

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BULANIK MANTIK TABANLI ENERJİ YÖNETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Direncan BOYRAZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. İmdat TAYMAZ

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BULANIK
MANTIK TABANLI ENERJİ YÖNETİMİ**

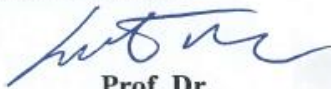
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Direncan BOYRAZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 13.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
İmdat TAYMAZ
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Recep KOZAN
Üye


Prof. Dr.
Cenk ÇELİK
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Direncan BOYRAZ

13.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. İmdat TAYMAZ'a ve tez çalışmam sırasında değerli birikimlerini benimle paylaşan Dr. Niyazi TANLAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her türlü desteği sunan canım aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Tez Kapsamı ve Amacı	2
1.3. Literatür Çalışması	3
BÖLÜM 2.	
HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	10
2.1. Hibrid Elektrikli Araçların Tanımı	10
2.2. Hibrid Elektrikli Araçların Tarihsel Gelişimi	10
2.2.1. Türkiye’de hibrid elektrikli araç çalışmaları	15
2.3. Hibrid Elektrikli Araç Türleri	16
2.3.1. Güç organlarının ilişkisine göre hibrid elektrikli araçlar	17
2.3.1.1. Seri hibrid elektrikli araç	17
2.3.1.2. Paralel hibrid elektrikli araç	19
2.3.1.3. Seri-Paralel hibrid elektrikli araç	20
2.3.1.4. Kompleks hibrid elektrikli araç	21

2.3.2. Hibridlik derecelerine göre hibrid elektrikli araçlar	21
2.3.2.1. Hibridlik derecesi	21
2.3.2.2. Mikro hibrid elektrikli araç	23
2.3.2.3. Hafif hibrid elektrikli araç	23
2.3.2.4. Tam hibrid elektrikli araç	24
2.3.2.5. Şarj edilebilir hibrid elektrikli araç	24
2.4. Hibrid Elektrikli Araçlarda Verimlilik Arttırmak Amacıyla	
Kullanılan Yöntemler	25
2.4.1. Motor durdurma	25
2.4.2. Regeneratif frenleme	26
2.4.3. Yalnızca elektrik motoru ile seyir	26
2.4.4. İçten yanmalı motor güçlendirme	27
2.4.5. Şebeke elektriği ile batarya şarjı	27
2.5. Hibrid Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları	28
 BÖLÜM 3.	
HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ENERJİ YÖNETİMİ	30
3.1. Hibrid Elektrikli Araçlarda Enerji Akışının Kontrolü	30
3.2. Paralel Hibrid Elektrikli Araç Kontrolü	33
3.2.1. Yalnızca içten yanmalı motor çalışma modu	35
3.2.2. Yalnızca elektrik motoru çalışma modu	35
3.2.3. Güç destek çalışma modu	36
3.2.4. Batarya şarjı çalışma modu	36
3.2.5. Regeneratif fren çalışma modu	37
3.3. Enerji Yönetim Stratejileri	38
3.3.1. Kural tabanlı enerji yönetim stratejileri	38
3.3.1.1. Bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim	
stratejileri	40
3.3.1.2. Deterministik kural tabanlı enerji yönetim	
stratejileri	41
3.3.2. Optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri	43

3.3.2.1. Global optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri	43
3.3.2.2. Gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri	45
 BÖLÜM 4.	
BULANIK MANTIK KURAL TABANLI ENERJİ YÖNETİM STRATEJİSİ ...	47
4.1. Bulanık Mantık Temelleri	47
4.1.1. Bulanık mantık kavramı	47
4.1.2. Bulanık küme teorisi ve üyelik fonksiyonları	49
4.2. Bulanık mantık kontrolör	53
4.2.1. Bulanıklaştırma	53
4.2.2. Bilgi tabanı	54
4.2.2.1. Veri tabanı	54
4.2.2.2. Kural tabanı	54
4.2.3. Karar verme	55
4.2.4. Durulaştırma	56
4.3. Bulanık Mantık Kural Tabanlı Enerji Yönetim Stratejilerinin Tasarımı	57
4.3.1. Bulanık mantık kontrolör yapısının açıklanması	58
4.3.2. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi	59
4.3.3. Önerilen enerji yönetim stratejilerine ait kural tabanının oluşturulması	62
 BÖLÜM 5.	
SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	68
5.1. Simülasyon Ortamı: ADVISOR	68
5.2. Sürüş Çevrimleri	71
5.3. Simülasyon Çalışmaları	73
5.3.1. Araç özelliklerinin belirlenmesi	73
5.3.2. Tahrik grubunun belirlenmesi	73
5.3.3. Simülasyon sonuçları	76

5.3.3.1. Referans strateji için simülasyon sonuçları	76
5.3.3.2. Strateji-A için simülasyon sonuçları	80
5.3.3.4. Strateji-B için simülasyon sonuçları	83
5.4. Sonuçların Değerlendirilmesi	87
5.4.1. Strateji-A için sonuçların değerlendirilmesi	87
5.4.2. Strateji-B için sonuçların değerlendirilmesi	90
BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	94
KAYNAKLAR	98
ÖZGEÇMİŞ	104

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

EM	: Elektrik Motoru
CO	: Karbonmonoksit
GUI	: Graphical User Interface
HC	: Hidrokarbon
HD	: Hibridlik Derecesi
HWFET	: Highway Fuel Economy Test
İYM	: İçten Yanmalı Motor
MLTB	: Millbrook London Transport Bus
NREL	: National Renewable Energy Laboratory
P_E	: Elektrik Motor Gücü (kW)
P_T	: Toplam Kurulu Güç (kW)
T_{EM}	: Elektrik Motoru Torku (Nm)
$T_{İYM}$	: İçten Yanmalı Motro Torku (Nm)
$T_{SÜRÜCÜ}$	: Sürücü Talep Torku (Nm)
UDDS	: Urban Dynamometer Driving Schedule

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. 1999-2015 yılları arasında ABD’de hibrid elektrikli araç satış rakamları	15
Şekil 2.2. Hibrid elektrikli araçların sınıflandırılması	17
Şekil 2.3. Seri hibrid elektrikli araç yapısı	18
Şekil 2.4. Paralel hibrid elektrikli araç yapısı	20
Şekil 2.5. Seri-Paralel hibrid elektrikli araç yapısı	20
Şekil 2.6. Kompleks hibrid elektrikli araç yapısı	21
Şekil 2.7. Hibridlik derecelerine göre İYM-EM boyutlarının değişimi	22
Şekil 3.1. İçten yanmalı motor devir sayısı-tork grafiği üzerinde optimum çalışma parametrelerinin gösterimi	32
Şekil 3.2. Çok seviyeli hiyerarşik kontrol sistemi yapısı	34
Şekil 3.3. Yalnızca içten yanmalı motor çalışma modu	35
Şekil 3.4. Yalnızca elektrik motoru çalışma modu	36
Şekil 3.5. Güç Destek çalışma modu	36
Şekil 3.6. Batarya şarj modu	37
Şekil 3.7. Rejeneratif fren çalışma modu	37
Şekil 3.8. Enerji yönetim stratejilerinin sınıflandırılması	38
Şekil 4.1. Klasik küme teorisi	50
Şekil 4.2. Bulanık küme teorisi	50
Şekil 4.3. Üçgen üyelik fonksiyonu	52
Şekil 4.4. Yamuk üyelik fonksiyonu	52
Şekil 4.5. Bulanık mantık kontrolör yapısı	53
Şekil 4.6. Bulanık mantık üst seviye kontrolör yapısı	59
Şekil 4.7. SoC üyelik fonksiyonları	61
Şekil 4.8. TSÜRÜCÜ üyelik fonksiyonlar	61
Şekil 4.9. TIYM üyelik fonksiyonları	61

Şekil 4.10. Ölçeklendirme, bulanıklaştırma, durulaştırma ve kural tabanı için ADVISOR blokları	62
Şekil 4.11. Strateji-A için bulanık mantık yüzey gösterimi	65
Şekil 4.12. Strateji-B için bulanık mantık yüzey gösterimi	66
Şekil 5.1. ADVISOR kullanıcı arayüzü	69
Şekil 5.2. ADVISOR paralel hibrid elektrikli araç blok diyagramı	70
Şekil 5.3. UDDS sürüş çevrimi hız-zaman grafiği	72
Şekil 5.4. HWFET sürüş çevrimi hız-zaman grafiği	72
Şekil 5.5. 1991 Geo Metro 1,0L içten yanmalı motor için verim haritası.....	74
Şekil 5.6. Seçilen elektrik motoruna ait verim haritası	75
Şekil 5.7. Referans strateji için UDDS sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi	77
Şekil 5.8. Referans strateji için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları	77
Şekil 5.9. Referans strateji için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi	78
Şekil 5.10. Referans strateji için HWFET sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi	78
Şekil 5.11. Referans strateji için HWFET sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları	79
Şekil 5.12. Referans strateji için HWFET sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi	79
Şekil 5.13. Strateji-A için UDDS sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi	80
Şekil 5.14. Strateji-A için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları	81
Şekil 5.15. Strateji-A için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi	81
Şekil 5.16. Strateji-A için HWFET sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi	82

Şekil 5.17. Strateji-A için HWFET sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları	82
Şekil 5.18. Strateji-A için HWFET sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi	83
Şekil 5.19. Strateji-B için UDDS sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi	84
Şekil 5.20. Strateji-B için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları	84
Şekil 5.21. Strateji-B için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi.....	85
Şekil 5.22. Strateji-B için HWEFT sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi	85
Şekil 5.23. Strateji-B için HWEFT sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları	86
Şekil 5.24. Strateji-B için HWEFT sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi	86

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Hibridleşme seviyeleri ile kullanılan teknolojiler arasındaki ilişki	23
Tablo 3.1. Enerji yönetim stratejilerinin karşılaştırılması	46
Tablo 4.1. Strateji-A için kural tablosu	64
Tablo 4.2. Strateji-B için kural tablosu	66
Tablo 4.3. Referans strateji kural tablosu	67
Tablo 5.1. Kullanılan sürüş çevrimlerinin teknik özellikleri	72
Tablo 5.2. Hibrid elektrikli aracın fiziksel özellikleri	73
Tablo 5.3. İçten yanmalı motora ait parametreler	74
Tablo 5.4. Elektrik motoruna ait parametreler	75
Tablo 5.5. Bataryaya ait parametreler	76
Tablo 5.6. Referans Strateji için simülasyon sonuçları	79
Tablo 5.7. Strateji-A için simülasyon sonuçları	83
Tablo 5.8. Strateji-B için simülasyon sonuçları	87

ÖZET

Anahtar kelimeler: Bulanık mantık, enerji yönetim stratejisi, bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetimi, enerji verimliliği

Dünya üzerinde petrol rezervlerinin gün geçtikçe tükenmesi ve hava kirliliği gibi nedenler konvansiyonel tahrik sistemlerine alternatif olarak hibrid tahrik sistemlerinin gelişmesine sebep olmuştur. Hibrid elektrikli araçlarda, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarında iyileştirme yapabilmenin en önemli yollarından biri tahrik elemanları arasındaki yük paylaşımını denetleyen kontrol sisteminden, dolayısıyla enerji yönetim stratejilerinden geçer. Bu nedenle hibrid elektrikli araçlarda enerji yönetim stratejileri, araç verimliliği üzerinde önemli rol oynamaktadır. Enerji yönetim stratejilerinin doğru belirlenmesi ile yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarında ciddi iyileştirmeler yapmak mümkündür.

Bu tez çalışmasında iki ayrı bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejisi tasarlanarak bir paralel hibrid elektrikli aracın enerji yönetim simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon çıktıları, simülasyon platformu olarak kullanılan ADVISOR tarafından önerilen bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejisi sonuçları ile karşılaştırılarak tasarlanan stratejilerin etkinlikleri gözlemlenmiştir.

İlk strateji, Strateji-A olarak isimlendirilmiştir. Strateji-A, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının düşürülmesinin yanı sıra batarya şarjlılık oranının korunmasını hedef olarak tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında yakıt tüketiminde referans şehir içi sürüş çevriminde hem yakıt tüketimi hem batarya şarjlılığı açısından hedefe ulaşıldığı görülürken şehirler arası çevrimde yakıt tüketimi azaltılmış fakat batarya şarjlılık oranı korunamamıştır. Bu durum, stratejilere ait kural tabanının sürüş çevrimine göre ayrıca optimize edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

İkinci strateji, Strateji-B olarak isimlendirilmiştir. Strateji-B, tüm çevrimlerde yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının azaltılması hedeflenerek tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçların bakıldığında hedeflere ulaşıldığı görülmüştür.

Simülasyon çıktıları, enerji yönetim stratejilerinin doğru belirlenmesinin enerji verimliliği dolayısıyla hibrid elektrikli aracın genel verimliliği açısından ne denli önemli olduğunu ortaya koymuştur.

THE FUZZY LOGIC RULE BASED ENERGY MANAGEMENT OF THE HYBRID ELECTRIC VEHICLES

SUMMARY

Keywords: Fuzzy logic, energy management strategy, the rule based energy management strategy, energy efficiency

The world's oil reserves are depleted day by day and causes such as air pollution have led to the development of hybrid drive systems as an alternative to conventional drive systems. One of the most important way to reduce fuel consumption and exhaust emissions in hybrid electric vehicles is through the control system, which controls load – leveling between drivetrain components and energy management strategies. Therefore, energy management strategies in hybrid electric vehicles play an important role in the efficiency of vehicle. With the correct determination of energy management strategies, it is possible to make significant improvements in fuel consumption and exhaust emissions.

In this thesis, two fuzzy logic rules based energy management strategies were designed then energy management simulations of a parallel hybrid electric vehicle were performed. The results of the simulations were compared with the results of the fuzzy logic based energy management strategy proposed by ADVISOR which is used as the simulation platform.

The first strategy is called Strategy-A. The Strategy-A is designed to reduce fuel consumption and exhaust emissions, as well as protect the battery charge rate. When the simulation results are compared, the fuel consumption in the reference city driving cycle has been achieved in terms of both fuel consumption and battery charge, and the fuel consumption in the highway driving cycle has been reduced but the battery charge rate has been reduced. This has revealed the need to optimize the rule base for the strategies according to the driving cycle.

The second strategy is called Strategy-B. Strategy-B is designed to reduce fuel consumption and exhaust emissions in all driving cycles. Looking at the simulation results when the targets have been met.

The simulation results show us how important the correct determination of energy management strategies is in terms of energy efficiency and the overall efficiency of the hybrid electric vehicle.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Geride bıraktığımız son yüz yıla bakıldığında, fosil yakıtlara dayanan tahrik sistemlerinin yoğun olarak kullanıldığını görmekteyiz. Fakat son yıllarda, petrol rezervlerinin gün geçtikçe tükenmesi ve hava kirliliği gibi nedenler konvansiyonel tahrik sistemlerine alternatif olarak hibrid tahrik sistemlerinin gelişmesine sebep olmuştur. Özellikle son yirmi yılda, içten yanmalı motor emisyonlarının çeşitli yasal düzenlemelerle sınırlandırılması ve bu düzenlemelerin gittikçe katılaştırılması (Euro normları) taşıtlar için hibrid tahrik sistemlerinin gelişim sürecini hızlandırmıştır.

Ekonomik ve çevresel açıdan bakıldığında tamamı elektrikli araçlar hem fosil yakıt kaynaklarına bağımlılık duymamaları ve emisyon yaymaları nedeniyle en verimli çözüm olarak öne çıkmaktadır. Fakat, altyapı eksikliği gibi farklı birçok sebepten dolayı tamamı elektrikli araçlar son kullanıcı için günümüzde halen daha ekonomik değildir. Bu nedenle konvansiyonel araç ile tamamı elektrikli araç arasında bir geçiş fazı olarak nitelendirilen hibrid elektrikli araçlar ön plandadır.

Öte yandan yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının düşürülmesi adına mevcut dizel ve benzinli motorlar üzerinde performans iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Genel verimliliği arttıracak start-stop gibi teknolojiler üzerine çalışmalar devam sürmektedir.

Hibrid elektrikli araçlar, tahrik amacı ile birden çok enerji kaynağı kullanan, birden fazla tahrik elemanı tarafından tahrik edilen araçları ifade etmektedir. Hibrid elektrikli araçların tahrik sistemi, içten yanmalı motor veya yakıt pilinin yanı sıra, yol yüklerini paylaşmak amacıyla tahrik elemanı olarak veya bataryayı doldurmak için elektrik

enerjisi üretmek amacıyla kullanılan elektrik motoru/generatöründen meydana gelmektedir. Tahrikin açıklandığı üzere en az iki ayrı tahrik elemanı arasında paylaştırılmasının konvansiyonel araca göre belli başlı getirileri bulunmaktadır. Yol yüklerinin paylaşılmasıyla içten yanmalı motor kısmen, bazen de tamamen yol yüklerinden bağımsız hale gelir; bu durum içten yanmalı motorun konvansiyonel araçtakine göre daha verimli noktalarda çalışmasını sağlar. Ayrıca rejeneratif frenleme ile kayıp enerjinin bataryalarda depolanması yakıt ve egzoz emisyonlarına olumlu yansımaktadır.

Hibrid elektrikli araçlarda, bahsedilen özellikler sayesinde sahip olunan potansiyel avantajların yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarına yansıtılabilmesinin başlıca yolu tahrik elemanları arasındaki yük paylaşımını denetleyen kontrol sisteminden, dolayısıyla enerji yönetim stratejilerinden geçmektedir.

1.2. Tez Kapsamı ve Amacı

Hibrid elektrikli araçlarda, enerjinin tahrik elemanları arasındaki akışını düzenleyen, yol yüklerinin tahrik elemanları arasındaki paylaşımını sağlayan üst seviye enerji yönetim stratejileri, yakıt tüketimi, egzoz emisyonları ve sistem verimliliği açılarından bakıldığında, hayati önem arz etmektedir.

Enerji yönetim stratejisinin aracın çalışma koşullarına ve tahrik sisteminin sahip olduğu özelliklere göre doğru belirlenmesi ile yakıt tüketimi ciddi oranda azaltılabilirken atmosfere salınan zararlı emisyonların da azaltılması mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasında iki ayrı bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejisi tasarlanarak bir paralel hibrid elektrikli aracın enerji yönetim simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon çıktıları, simülasyon platformu olarak kullanılan ADVISOR tarafından önerilen bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejisi sonuçları ile karşılaştırılarak tasarlanan stratejilerin etkinlikleri

gözlemlenmiştir. Enerji yönetim stratejilerinin hibrid elektrikli araç verimi üzerinde kritik ölçüde etkili olduğu ortaya konmuştur.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde hibrid elektrikli araçlardan bahsedilmiştir. Hibrid elektrikli araçların tarihsel gelişimi, Türkiye’de son yıllarda hibrid elektrikli araçlar ile ilgili yapılan çalışmalar, hibrid elektrikli araç türleri ve bunların sınıflandırılma yöntemleri ve hibrid elektrikli araçlarda kullanılan verimlilik artırıcı yöntemler anlatılmıştır.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde hibrid elektrikli araçlarda kullanılan enerji yönetim stratejileri açıklanmıştır. Tez çalışması kapsamında simülasyonu yapılan paralel hibrid elektrikli aracın kontrolü bu bölümde anlatılmıştır. Enerji akış kontrolü ele alınarak, enerji yönetim stratejileri sınıflandırılmış, bunların avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejilerinin tasarımı yapılmıştır. Bulanık mantık teorisine dair bilgi verilerek bulanık mantık kontrolörün yapısı incelenmiştir. Tasarlanan bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejileri açıklanmıştır.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde yapılan simülasyon çalışmaları açıklanmıştır. Simülasyon ortamı olan ADVISOR açıklanmış, simülasyonların koşturulacağı sürüş çevrimleri ile ilgili bilgi verilmiştir. Simülasyon sonuçları verilmiş daha sonra bu sonuçlar kendi içlerinde sürüş çevrimlerine göre detaylıca irdelenmiştir.

Tez çalışmasının altıncı bölümünde simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen veriler referans strateji ile karşılaştırılmış, tasarlanan stratejilerin etkinlikleri değerlendirilmiştir.

1.3. Literatür Taraması

Schouten ve ark. çalışmalarında paralel hibrid elektrikli araç için bulanık mantık

tabanlı bir enerji yönetim stratejisi önermişlerdir. Temel amaçları tüm araç bileşenlerinin işletme verimliliğini optimize ederek yakıt tüketimini azaltmaktır. Bulanık mantık kontrolör araç hızını kullanarak içten yanmalı motor ve elektrik motorunun güç çıkışını optimize etmektedir. Simülasyon sonuçları önerilen bulanık mantık enerji yönetim stratejisi ile yakıt ekonomisinde kayda değer bir iyileştirme olduğunu göstermektedir [1].

Rajagopalan ve ark., NREL ve Ohio State Üniversitesi tarafından geliştirilen paralel hibrid elektrikli araç için efektif kontrol stratejileri geliştirmişlerdir. Geliştirilen kontrol stratejileri egzoz emisyonlarının minimizasyonunu hedeflemektedir. Simülasyonlar ADVISOR üzerinde koşturulmuştur. Simülasyon sonuçları, geliştirilen kontrol stratejisi ile egzoz emisyonlarının efektif bir şekilde kontrol edilebileceğini göstermiştir [2].

Syed ve ark. çalışmalarında sürücüye geri bildirimde bulunan kural tabanlı bir bulanık mantık kontrolör önerisinde bulunmuşlardır. Bulanık mantık kontrolör, sürücünün araç kullanım tarzına ve performansına göre optimum sürüş stratejisini seçebilmesi için sürücüye geri bildirimde bulunacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmanın sonucunda içten yanmalı motorun verimliliğindeki artış, yakıt ekonomisi ve egzoz emisyonlarındaki iyileştirmeler gözlenmiştir [3].

Mohebbi ve Farrokhi paralel hibrid elektrikli araçlar için yapay sinir ağları tabanlı bir adaptif kontrol metodu kullanmışlardır. Kontrolörün giriş değişkenlerini batarya SoC değeri ve sürücü talep gücü; çıkış değişkenini ise gaz kelebek açısı olarak belirlemişlerdir. Kontrolöre ait simülasyonları ADVISOR üzerinde koşturarak programın dahili kontrolörüne göre çok daha iyi performans sonuçları elde etmişlerdir [4].

Naderi ve ark. paralel bir hibrid elektrikli araç için bulanık mantık enerji yönetim algoritması kullanmış aracın performansını incelemişlerdir. Aracın dinamik davranışını simule etmek için yedi serbestlik dereceli dinamik modelini geliştirmişlerdir. Geliştirilen dinamik model ile ADVISOR üzerinde koştan tek

serbestlik dereceli modelin sonuçları karşılaştırmışlardır [5].

Kessels ve ark. yaptıkları çalışmada hibrid elektrikli araçlar için online enerji yönetim stratejisi kullanmışlardır. Çalışmada önerilen online enerji yönetim stratejisinden elde edilen çıktılara göre yakıt ekonomisinin, dinamik programlama kullanılarak elde edilen verilerle neredeyse aynı olduğu gösterilmiştir [6].

Bin ve ark. çalışmalarında belirli bir sürüş çevriminde optimum sonucu elde etmek adına dinamik programlama kullanmışlardır. Trafik verileri ve rota bilgileri sürücü tork talebinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Çalışmada önerilen kontrolör optimuma yakın bir çözüm sunmaktadır [7].

Bahar ve ark. bir paralel hibrid elektrikli araç için bulanık mantık tabanlı bir enerji yönetim stratejisi geliştirmişlerdir. Araç hızı ile motor devir sayısı arasındaki fark ve batarya SoC değerleri bulanık mantık kontrolöre girdi olarak uygulanmıştır. Çalışmada özgün araç modeli kullanılmıştır. Fakat uygulanan bulanık mantık kontrol stratejisinden kaynaklı yakıt misinden söz edilmemiştir [8].

Majdi ve ark. çalışmalarında bulanık mantık tabanlı bir kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Batarya SoC değeri, araç hızı ve araç ivmesi kontrolörün giriş değişkenleri olarak tanımlanırken içten yanmalı motor gücü ve elektrik motoru gücü kontrolörün çıkış değişkenleri olarak tanımlanmıştır. Simülasyonlar için analitik bir model kullanmışlardır. Analitik model tabanlı enerji yönetim kontrolörü, simülasyon sırasında daha iyi sonuçlar verse de gerçek duruma göre farklılık göstermektedirler [9].

Xia ve Langlois yaptıkları çalışmada optimize edilmiş bir bulanık mantık enerji yönetim stratejisi kullanarak yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını minimuma indirmeyi hedeflemişlerdir. Batarya SoC değerini ve sürücü talep gücünü kontrolör girişi olarak kullanmışlardır. Çalışmada simülasyonlar ADVISOR üzerinde koşturulmuştur [10].

Boyalı ve Güvenç, çalışmalarında bir paralel hibrid elektrikli araç için dinamik programlama tabanlı bir gerçek zamanlı kontrolör tasarlamışlardır. Dinamik programlama gerçek zamanlı uygulamalar için uygun değildir; muhtemel bilgilere ve yüksek hesap süresine ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle çalışmada dinamik programlamadan elde edilen datalar kullanılarak yapay bir sinir ağı geliştirilerek eğitilmiştir. Çalışmada geliştirilen kontrolör ile yakıt ekonomisinde önemli gelişme sağlanmıştır [11].

Uyulan, yaptığı tez çalışmasında bir seri hibrid elektrikli araç için bulanık mantık kural tabanlı bir enerji yönetim stratejisi geliştirmiştir. Simülasyonlar, geliştirilen Simulink modeli üzerinde koşturulmuştur [12].

Xu ve ark. çalışmalarında bir paralel hibrid elektrikli araç için bulanık mantık tabanlı bir kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Sürücü güç talebi ve batarya SoC değeri bulanık mantık kontrolörün giriş değişkenleri olarak tanımlanırken içten yanmalı motor ve elektrik motoru güç değerleri de çıkış değişkenleri olarak kabul edilmiştir. Simülasyonlar için ADVISOR kullanılmıştır [13].

Wu ve ark. yaptıkları çalışmada bir paralel hibrid elektrikli araçta yakıt ekonomisini iyileştirilmesi için sürüş çevriminin tanınmasına dayalı bir bulanık mantık enerji yönetim stratejisi önerilmiştir. Strateji, öğrenme vektörü nicelemesine (LVQ) dayalı olarak sürüş çevrimini tanıyabilir ve bulanık mantık tork dağıtım kontrolörü, paralel hibrid elektrikli aracı kontrol etmek için tanıma sonuçlarına göre uygun üyelik fonksiyonlarını ve kuralları seçmektedir. Simülasyon sonuçları, önerilen enerji yönetim stratejisinin geleneksel bulanık mantık enerji yönetim stratejileri ile karşılaştırıldığında yakıt tüketimini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir [14].

Zhu ve Yang, paralel bir hibrid elektrikli araç için minimum yakıt tüketimi ve minimum egzoz emisyonu hedefleyerek bulanık mantık tabanlı bir kontrol stratejisi geliştirmişlerdir [15].

Correa ve ark. yaptıkları çalışmada yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarını minimize

etmek için enerji yönetim stratejileri geliştirilmiş ve analizleri yapılmıştır. Enerji yönetim stratejileri bulanık mantık kullanılarak geliştirilmiş, performans analizleri farklı araç kütleleri için yapılmıştır. Çalışma sonuçları, farklı araç kütleleri için her bir enerji yönetim stratejisinin yakıt tüketimi analizinin yapılmasına olanak sağlamıştır [16].

Lee ve ark. yaptıkları çalışmada sürücü özelliklerini modelleyerek bu özelliklerin yakıt ekonomisine etkisini incelemişlerdir [17].

Yaich ve ark. çalışmalarında elektrikli ve hibrid elektrikli araç konfigürasyonlarını modelleyerek simülasyon sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Elektrikli, seri hibrid ve paralel hibrid elektrikli golf araçları modellenmiş, simülasyonları ADVISOR üzerinde koşturulmuştur. Çalışma sonuçları yakıt ekonomisi açısından bakıldığında, paralel hibrid elektrikli araç konfigürasyonunun diğerlerine göre daha üstün olduğunu göstermiştir [18].

Lihao ve ark. yaptıkları çalışmada bir paralel hibrid elektrikli traktör için bir bulanık mantık enerji yönetim stratejisi tasarımı yapılmıştır. Simülasyonlar ADVISOR üzerinde koşturulmuş, bu sonuçlara göre enerji yönetim stratejisi optimize edilmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrası sonuçları çalışma içerisinde tartışılmıştır [19].

Pei ve ark. yaptıkları çalışmada paralel hibrid elektrikli araçların yakıt tüketimini iyileştirmek için “Quantum Chaotic Pigeon-Inspired Optimization algoritmasına dayalı bir bulanık mantık enerji yönetim stratejisi önermişlerdir. Çalışma sonuçları önerilen stratejinin diğer bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejilerine kıyasla yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir [20].

Gujarathi ve ark. çalışmalarında içten yanmalı motor ve elektrik motorunun çalışma noktalarına karar vermek için bulanık mantık enerji yönetim stratejisi kullanmışlardır. Hibrid dönüşümü yapılan Tata Indica aracı için MATLAB’de oluşturulan konvansiyonel ve şarj edilebilir hibrid elektrikli araç modelleri üzerinde tasarlanan enerji yönetim stratejisi koşturulmuştur. Konvansiyonel ve hibrid durum için yapılan

simülasyonlar karşılaştırılmıştır [21].

Zhang ve ark. yaptıkları çalışmada paralel bir hibrid elektrikli araç için “Adaptive Neuro Fuzzy Inference System optimizasyon algoritması tabanlı bir bulanık mantık ağ kontrol stratejisi önerilmiştir. Simülasyonlar ADVISOR üzerinde, UDDS sürüş çevrimi için koşturulmuştur. Sonuçlar, bulanık mantık ağ kontrolörünün giriş parametreleri olarak alınan kavrama torku ve batarya SoC değerine göre belirlenen üyelik fonksiyonlarının tatmin edici seviyede etkin olduklarını göstermektedir [22].

Chen ve ark. bir proton membranlı yakıt hücresi, iki destek konvertörü ve bir lityum iyon batarya paketinden oluşan karma tahrik sistemli bir hibrid elektrikli araç için bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisi önermişlerdir. Temel amacı yakıt hücresinin optimum akımını garanti ederken hidrojen tüketimini azaltmak ve güç, batarya SoC değerleri üzerindeki kısıtlamaları en aza indirmektir. Minimum hidrojen tüketimi için gerekli koşullar Pontryagin’in minimum prensibine göre elde edilmiştir. Çalışmada önerilen yöntem ile batarya SoC değeri ve sürücü yük talebini ayarlayarak anlık akü akımının referans değere ayak uydurabileceği garanti edilmiştir [23].

Elkhatib ve Adouane, çalışmalarında hibrid elektrikli araçlarda toplam enerji tüketimini minimuma çekmek için akıllı bir enerji yönetim stratejisi geliştirmişlerdir. Amaç, toplam araç verimliliğini arttırmak dolayısıyla toplam enerji tüketimini minimuma indirecek bir akıllı enerji yönetim stratejisi ve kontrolörü geliştirmektir. Önerilen kontrolör üç seviyeli ve bulanık mantık tabanlıdır. Simülasyon sonuçları geleneksel enerji yönetim stratejileri ile karşılaştırıldığında önerilen stratejinin toplam enerji tüketimini azalttığı göstermiştir [24].

Smith ve ark. çalışmalarında hızlanma ve normal seyir sırasında tork talebini belirlemek üzere yeni bir kural tabanlı bulanık mantık enerji yönetimi stratejisi önermişlerdir. Simülasyonlar belirlenen bir araç için, MLTB sürüş çevrimine göre yapılmıştır. Sonuçlara göre araç üzerindeki mevcut enerji yönetim stratejisine göre %2,2’lik yakıt tüketimi iyileştirmesi olduğu görülmüştür [25].

Tian ve ark. yaptıkları çalışmada şarj edilebilir şehir içi elektrikli otobüs için adaptif bulanık mantık tabanlı bir enerji yönetim stratejisi önermişlerdir. Çalışmada, Pontryagin'ın minimum prensibi kullanılarak farklı sürüş çevrimlerine ait optimum sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra bir yapay sinir ağı modülü, bataryanın optimal SoC eğrilerinin öğrenilmesi için tasarlanmış ve eğitilmiştir. SoC referans eğrisinin takibi için de adaptif bulanık mantık tabanlı bir kontrolör geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, yapay sinir ağları tarafından eğitilmiş ve eğitilmemiş sürüşler arasında %4,61 ila %13,49 aralığında bir yakıt tasarrufunun sağlandığını göstermiştir [26].



BÖLÜM 2. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

2.1. Hibrid Elektrikli Araçların Tanımı

Hibrid araç terimi en az iki güç kaynağına sahip bir olan bir tahrik grubundan gelmektedir. Hibrid elektrikli araç, tahrik kaynaklarından biri elektrik motoru olan, diğer tahrik kaynağı ise mevcut farklı alternatiflerden biri, genellikle de benzinli veya dizel bir içten yanmalı motor olan araçtır. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu Teknik Komitesi'ne göre hibrid elektrikli araç, tahrik gücünü iki veya daha fazla kaynaktan alan ve bunlardan en az birinin elektrik enerjisi sağladığı araçtır [27].

2.2. Hibrid Elektrikli Araçların Tarihsel Gelişimi

Hibrid elektrikli araçların ortaya çıkışı 19. yy sonlarına dayanmaktadır. Özellikle son yıllarda hızla gelişim gösteren hibrid elektrikli araçların gelişimi bu bölümde özetlenmiştir.

1900'lü yılların başlarında içten yanmalı motor teknolojisindeki hızlı ilerleme ile birlikte hibrid elektrikli araçlar popülerliğini yitirir ve seri üretim noktasında oldukça geri kalır. Bu durum üzerinde petrolün yaygınlaşması ve Henry Ford'un benzin motorlarındaki ses, titreşim ve koku gibi başlıca sorunları çözmesi ve benzin motorlarını seri üretime uygun hale getirmesinin etkisi oldukça büyüktür. 1973 ve 1977 yıllarında Dünya üzerinde yaşanan enerji krizleri ile birlikte mevcut petrolün bir gün tükeneceği gerçeği ile yüzleşilmiş ve alternatif enerji kaynakları ile çalışacak taşıtlar için arayış başlamıştır. Bu durum hibrid elektrikli taşıtları tekrar gündeme getirmiştir. Modern hibrid elektrikli taşıtlarda kayda değer ilerlemeler ise bu süreçten sonra başlamıştır.

1899 yılında, Ferdinand Porsche tarafından Lohner – Porsche Elektromobil isimli araç tasarlanır. Başlangıçta tamamı elektrikli olan Elektromobil, yaklaşık bir yıl sonra tasarımcısı F. Porsche'un araca bataryaları şarj etmek amacıyla bir içten yanmalı motor eklemesiyle hibrid hale gelir. Elektromobil, tekerlek içlerine yerleştirilen elektrik motorları ile hareket eden, güç kaynağı olarak içten yanmalı motora bağlı bir jeneratör ve batarya kullanılan ilk seri hibrid elektrikli taşıttı.

1917 yılında Woods Motor Vehicle isimli firma bir hibrid elektrikli araç üretmiştir. Yapı olarak ilk paralel hibrid olarak kabul edilebilecek bu araç bir elektrik motoru ve dört silindirli bir içten yanmalı motora sahiptir. Tahrik, Elektromobil'den farklı olarak 25 km/h altındaki hızlarda sadece elektrik motoru kullanılarak sağlanırken 25 km/h ile maksimum hız olan 55 km/h arasında sadece içten yanmalı motor kullanarak sağlanmıştır.

1975 yılında elektrik mühendisi Dr. Viktor Wouk, General Motors firmasına ait Buick Skylark modeli bir konvansiyonel otomobili paralel hibrid elektrikli araca dönüştürmüştür. Mazda marka içten yanmalı motora yardımcı olarak 15 beygir gücünde bir doğru akım elektrik motoru ve sekiz adet 12 V batarya kullanılan aracın maksimum hızı 129 km/h'tir. Dr. Wouk hibrid elektrikli araç teknolojisinin modern araştırmacısı olarak tanınır [28].

1978 yılında David Arthurs tarafından modern hibrid elektrikli araçlar için önemli bir kilometre taşı olan rejeneratif fren sistemi tasarlanmıştır. Sistem, Arthurs tarafından ilk olarak Opel GT üzerinde denenmiştir.

1989 yılında Audi firması Duo isimli konsept hibrid elektrikli aracını tanıtmıştır. 100 Avant Quattro model araç platformu üzerinde yapılan değişikliklerle üretilen araçta 139 beygir gücündeki içten yanmalı motorla birlikte 12 beygir gücünde elektrik motoru ve Nikel-Kadmiyum batarya paketi kullanılmıştır. Araçtan sadece dokuz adet üretilmiştir.

1993 yılında alternatif yakıt ve araç teknolojilerinin seri üretiminin önemini gören

ABD başkanı Bill Clinton, hibrid elektrikli taşıtların geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve alternatif enerji kaynakları kullanan otomobiller hakkında araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin yapılması amacıyla Ford, Chrysler, General Motors, USCAR gibi birçok kamu kuruluşunu ve özel kuruluşu bir araya getiren “PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles; Yeni Nesil Taşıtlar İçin Ortaklık)”’yi kurmuştur. Oluşumun çalışmaları sonucunda Ford Prodigy ve General Motors Precept isimli paralel hibrid elektrikli, konsept otomobiller üretilmiştir.

Hibrid elektrikli araçlar açısından en büyük atak 1990’ların ortasından sonra yaşanır.

1997 yılında Toyota Prius modelini Japonya’da piyasaya sürmüştür. Prius, modern anlamda hibrid elektrikli araçların ilk ve en başarılı örneği olarak görülmektedir. 2000 yılında ABD’de satışına başlanan Prius, 2015 yılı itibariyle 1.637.959 adetlik satış rakamına ulaşmıştır [29]. Aracın çalışma mantığı, içten yanmalı motorun olabildiğince stabil ve optimum düzeyde çalışabilmesini sağlayabilmek amacıyla mekanik enerji dalgalanmalarının elektrik motoru tarafından karşılanması üzerine kurgulanmıştır.

1999 yılında Honda Insight’in üretimi başlamıştır.

Toyota Prius ve Honda Insight yakıt tüketimi sorunsalına çözüm getirerek ticarileştirilmiş ilk hibrid elektrikli araçlardır.

2002 yılında Honda, Civic modelinin hibrid versiyonunu piyasaya sürmüştür.

2005 yılında Ford, ilk hibrid elektrikli SUV aracı Escape’i piyasaya sürmüştür.

2006 yılında Toyota, hibrid alanındaki ataklarına devam etmiş ve hibrid Camry modelinin üretimine başlamıştır. 2015 yılı itibariyle Toyota Camry, 339.064 adet ile ABD piyasasında Prius’tan sonra en yüksek satış rakamına ulaşan ikinci hibrid elektrikli araçtır [29].

2007 yılında Nissan, Altima’yı piyasaya sürdü. Altima’da Toyota tarafından

geliştirilmiş “Hybrid Synergy Drive” güç aktarım sistemi kullanılmıştır. Araç 2011 yılına kadar üretilmiştir. Aynı yıl Lexus, mevcut GS 450h modeli spor otomobile hibrid dönüşümü uyguladı ve satışa sundu.

2009 yılında Ford, Fusion modelinin hibrid versiyonunu tanıtmıştır. 2012 yılında ikinci jenerasyonu piyasaya sürülen Fusion, halen satılmaktadır. Ford, University of Michigan’dan aldığı destekle geliştirdiği Lidar sensörleri ve kameralarla donatılmış otonom ve hibrid Fusion modelini 2017 yılı ocak ayında CES Fuarı’nda tanıtmıştır.

2009 yılında Hyundai, Seul Auto Show’da Elantra LPI adıyla yeni hibrid elektrikli modelini tanıtmıştır.

Elantra LPI, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ile çalışan ve lityum-polimer batarya kullanılan ilk hibrid elektrikli araç olma özelliği taşır. 94 g/km karbondioksit emisyonu ile Elantra LPI, SULEV (Süper Ultra Düşük Emisyonlu Araç) olarak kabul edilir.

2009 yılında Mercedes-Benz, S400 BlueHybrid modelini Chicago Otomobil Fuarı’nda tanıtmıştır. S400 BlueHybrid, Lityum-İyon bataryaların kullanıldığı ilk hibrid elektrikli araçtır.

2010 yılında Toyota, İngiltere-Burnaston fabrikasında 2011 model hibrid Auris modelinin üretimine başlar. Hibrid Auris, Avrupa’da seri üretimi yapılan ilk hibrid elektrikli araç olma özelliğindedir.

2012 yılında Peugeot, 3008 HYbrid4 modelini piyasaya sürmüştür. 3008 HYbrid4 modeli seri üretimi yapılan ilk dizel hibrid elektrikli araçtır.

2013 yılında Toyota, Prius modeli ile Dünya üzerinde 3 milyon adetlik hibrid elektrikli araç satış rakamına ulaştığını açıklamıştır [30].

2013 yılında Porsche, 2010 yılında Cenevre Otomobil Fuarı’nda konsept şeklinde tanıttığı 918 Spyder modeli şarj edilebilir spor hibrid elektrikli otomobilini piyasaya

sürmüştür.

2013 yılında McLaren P1 modeli, F1 motor teknolojisi ile hibrid teknolojisinin birlikte kullanıldığı hibrid elektrikli aracını piyasaya sürmüştür.

2014 yılında BMW, daha önce konsept olarak tanıtımını yaptığı i8 modeli şarj edilebilir hibrid elektrikli aracın satışına başlamıştır.

2015 yılında BMW, 330e iPerformance modelini Frankfurt IAA fuarında tanıtmıştır. Şarj edilebilir hibrid olan araç 2016 yılında Avrupa ve Amerika'da piyasaya sürülmüştür.

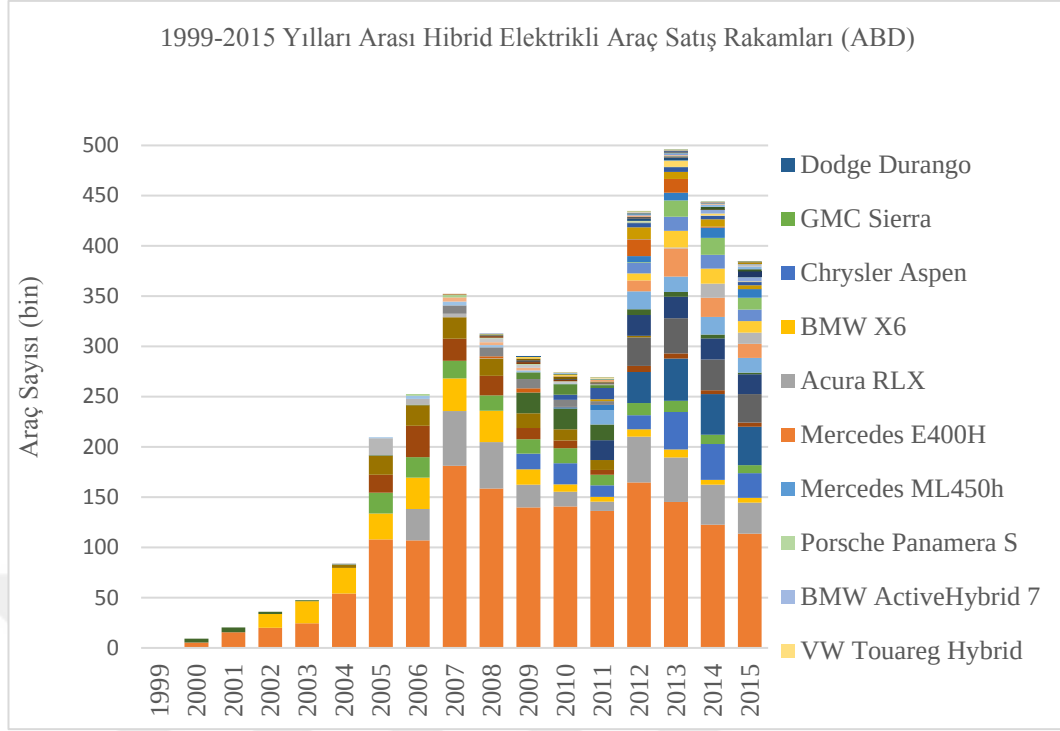
2016 yılında Hyundai tarafından Güney Kore'de üretilen hibrid, şarj edilebilir hibrid ve tam elektrikli olarak üç ayrı tipte üretilen Ioniq modeli piyasaya sürülmüştür.

2016 başlarında Toyota, C-HR modeli SUV sınıfı hibrid elektrikli aracını piyasaya sürmüştür. 2016 Kasım ayında seri üretimine başlanan araç, ülkemizde, Toyota-Sakarya fabrikasında üretilmekte olup Dünya üzerinde 47 ülkeye ihraç edilmektedir. Türkiye'de üretilen ilk hibrid elektrikli araç olma özelliği taşıyan C-HR, iç piyasada 2017 yılının ilk çeyreğinde 491 adet satılmıştır [31].

Hibrid elektrikli araçların otomobil pazar payı her geçen gün hızla artmaktadır. Toyota, 2017 yılı itibarıyla Dünya üzerinde 10 milyon adetlik hibrid elektrikli araç satış rakamına ulaştığını açıklamıştır [30].

Dünya üzerinde hibrid ve elektrikli araçların sayısı günden güne artmaktadır. 2015 yılında 1,2 milyon adet olan hibrid ve elektrikli araç sayısının 2035 yılında yüz milyon adete ulaşması beklenmektedir [32].

ABD'de 1999 ila 2015 yılları arasında gerçekleşen hibrid elektrikli araç satış rakamları Şekil 2.1.'de görülmektedir. Hibrid elektrikli araç satış rakamı 2013 yılında yaklaşık 500 milyon adete ulaşmıştır [29].



Şekil 2.1. 1999-2015 yılları arasında ABD’de hibrid elektrikli araç satış rakamları [29].

2.2.1. Türkiye’de hibrid elektrikli araç çalışmaları

Türkiye’de hibrid elektrikli araçlarla ilgili gerek Tübitak gerek üniversiteler gerekse ticari kuruluşlar ve çeşitli ortaklıklar tarafından farklı çalışmalar yapılmıştır.

Doblo Elit-1 modeli, Tübitak MAM ve TOFAŞ iş birliğinde geliştirilmiş, Türkiye’nin ilk hibrid elektrikli araç prototipidir. Doblo Elit-1, seri hibrid tahrik konfigürasyonda, rejeneratif fren sistemine sahiptir. Proje 2002 yılında tamamlanmıştır [33].

FOHEV-1 Ford ve Tübitak MAM işbirliğinde geliştirilmiş Türkiye’nin ilk hibrid elektrikli ticari aracı olma özelliğine sahiptir. Proje kapsamında Ford Transit minibüs, mevcut güç aktarma organları üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan, arka aksa bir elektrik motoru bağlanarak bir yol üzerinden hibrid elektrikli araca dönüştürülmüştür. Çalışma kapsamında sadece prototip araç üretilmiştir.

FOHEV-2 ise Ford, Tübitak MAM ve İTÜ işbirliğinde geliştirilmiş bir seri-paralel (karma) hibrid elektrikli araçtır. FOHEV-1’de sadece arka aksta elektrikli tahrik

varken FOHEV-2’de hem ön hem arka aksa elektrik motoru yerleştirilmiştir.

2007 yılında tamamlanan OTOKAR Doruk 160 LE Hibra modeli, Türkiye’nin ilk hibrid elektrikli otobüsüdür. Proje prototip aşamasında kalmıştır.

2009 yılında yerli otobüs üreticisi TEMSA, Avenue modeline hibrid dönüşümü uygulamıştır. Otobüste Cummins dizel motor ve Siemens ELFA hibrid sistemi kullanılmıştır.

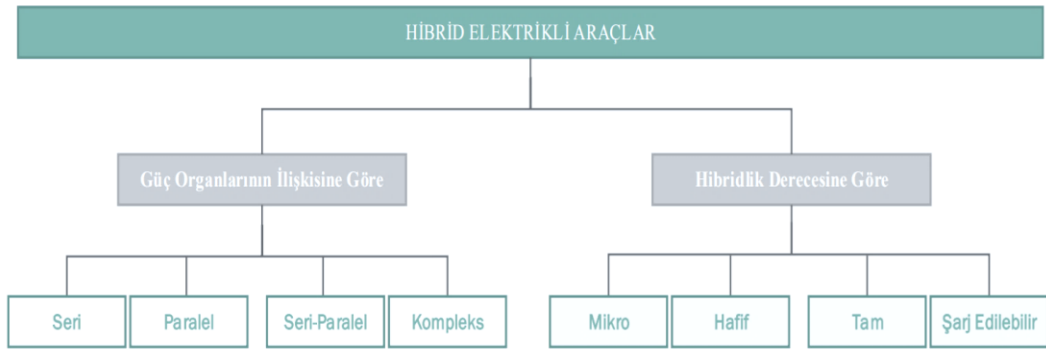
2016 yılı Kasım ayı itibariyle Toyota-Sakarya fabrikasında üreilmeye başlayan C-HR, Dünya üzerinde 47 ülkeye ihraç edilmektedir.

2017 yılında ASELSAN ve Katmerciler ortaklığında geliştirilen ülkemizin ilk konsept hibrid elektrikli zırhlı aracı HIZIR, IDEF 2017 fuarında sergilenmiştir. Proje kapsamında ASELSAN tarafından geliştirilen elektrik motoru mevcut HIZIR modeline entegre edilmiştir.

2.3. Hibrid Elektrikli Araç Türleri

Literatürde hibrid elektrikli araçların sınıflandırılmasına yönelik farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Genel olarak, güç organlarının birbirleri ile olan ilişkisine göre ve hibridlik derecesine göre sınıflandırmanın yapıldığı iki ayrı yöntem mevcuttur.

Hibrid elektrikli araçları güç organlarının birbirleri ile olan ilişkiye göre seri hibrid, paralel hibrid, seri-paralel hibrid ve kompleks hibrid olmak üzere dört grupta sınıflandırmak mümkündür [34]. Hibridlik derecesine göre ise mikro hibrid, hafif hibrid, tam hibrid ve şarj edilebilir hibrid olmak üzere dört grupta sınıflandırılmaktadır [35]. Hibrid elektrikli araç türleri, Şekil 2.2.’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Hibrid elektrikli araçların sınıflandırılması

2.3.1. Güç organlarının ilişkisine göre hibrid elektrikli araçlar

2.3.1.1. Seri hibrid elektrikli araçlar

En basit hibrid elektrikli araç türüdür. Yapı olarak tamamı elektrikli araçlara benzemektedir; bu yapıya içten yanmalı motor destekli elektrikli araç da denilebilir [36].

Seri hibrid elektrikli araçlarda içten yanmalı motorun direkt olarak tahrike etkisi yoktur. Tekerlekler sadece elektrik motoru tarafından tahrik edilir. Elektrik motoru için gerekli elektrik enerjisi generatörden veya bataryadan sağlanmaktadır. İçten yanmalı motor tarafından üretilen mekanik enerji ile generatör tahrik edilerek elektrik enerjisi üretilir. Üretilen elektrik enerjisi, sürücünün anlık güç talebi ve batarya şarj durumuna göre direkt olarak tekerlek tahrikini sağlayan elektrik motoruna iletilebilir veya bataryada depolanabilir. Bunun yanı sıra rejeneratif frenleme ile bataryalar şarj edilmektedir.

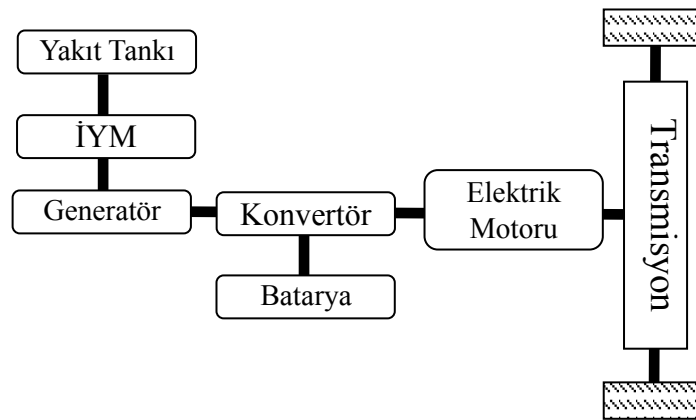
Seri hibrid elektrikli araçlarda içten yanmalı motor ile tekerlekler arasında herhangi bir mekanik bağlantı yoktur [37]. İçten yanmalı motor yol şartlarına bağlı olarak ortaya çıkan değişken yüklerin karşılanmasında görev almaz; yol yüklerinden bağımsızdır. Bu durum, İçten yanmalı motorun yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını azaltacak şekilde, verim eğrisine göre optimum aralıkta ya da istenilen belirli bir noktada çalıştırılabilmesini sağlar. İçten yanmalı motorun verimli olduğu bölgelerde

çalıştırılması, yakıt tasarrufu ve emisyonların optimizasyonu açısından seri hibrid konfigürasyonu avantajlı kılar.

Bazı seri hibrid modellerde ön ve arka aks için tek bir elektrik motoru kullanılırken bazı modellerde her bir tekerlek için ayrı elektrik motoru kullanılmaktadır. Her bir tekerleğin ayrı birer elektrik motoru ile tahrik edilmesi ile diferansiyel kullanma zorunluluğu ortadan kalkar. Ayrıca geliştirilen kontrol algoritmaları ile her bir tekerleğe aktarılan güç daha rahat kontrol edilebilmektedir. Tüm bunların yanı sıra elektrik motoru, aracın maksimum güç talebine göre boyutlandırılmalıdır. Bu durum, büyük boyutlu ve yüksek maliyetli ekipmanların kullanımını gerekli kılabilir ve seri hibrid elektrikli araçlar için büyük bir dezavantajdır.

İçten yanmalı motor tarafından üretilen mekanik enerjinin tekerleklere aktarılabilmesi için generatör ve elektrik motorunda gerçekleşen iki kademeli dönüşüm de seri hibrid konfigürasyonun bir başka dezavantajıdır.

Seri hibrid elektrikli araç konfigürasyonunda tahrik elemanları maksimum güç ihtiyacına göre boyutlandırılmaktadır. Dolayısıyla tahrik elemanları büyük boyutlarda olmakta ve araç içinde büyük hacimler kaplamaktadırlar. Bu durum seri hibrid konfigürasyonun en büyük dezavantajlarından biridir. Büyük yer ihtiyacından dolayı genellikle ticari araçlar, askeri araçlar ve otobüslerde tercih edilmektedir. Temsa Avenue, Mercedes-Benz Citaro ve MAN Lion's City, piyasada bulunan bazı seri hibrid elektrikli otobüs örnekleridir [38].



Şekil 2.3. Seri hibrid elektrikli araç yapısı

2.3.1.2. Paralel hibrid elektrikli araçlar

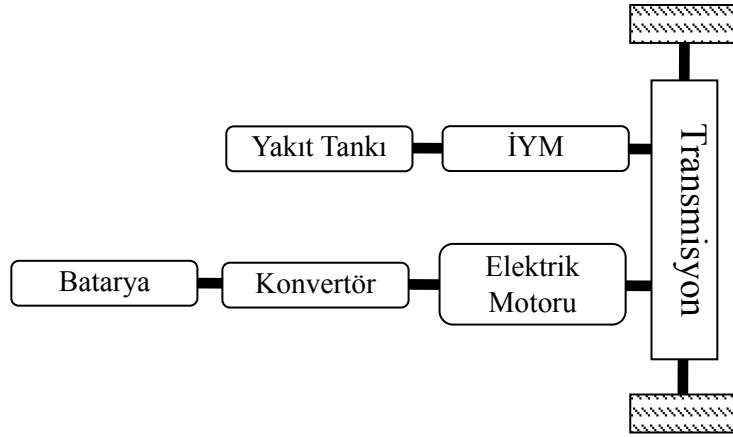
Temel olarak elektrik destekli konvansiyonel araç olarak tanımlanabilir.

Seri hibrid elektrikli araç konfigürasyonuna göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Seri konfigürasyondan farklı olarak içten yanmalı motor ile tekerlekler arasında bir mekanik bağlantı vardır. İçten yanmalı motor ve elektrik motoru bir mekanik bağlantı mekanizması ile birbirlerine bağlanabilir ve tahrik tekerleklerle tek bir mil üzerinden iletilir. Bağlantı mekanizmasının türüne göre elektrik motoru ve içten yanmalı motorun hızları, torkları veya her ikisi birbirine bağlanabilir. Sadece içten yanmalı motor, sadece elektrik motoru veya her ikisi birlikte çalışarak tekerleklerle tahrik sağlayabilirler [39].

Hem içten yanmalı motor hem elektrik motoru direkt olarak tahrike katkı sağladığı için seri hibrid konfigürasyondaki gibi iki kademeli enerji dönüşümü gerçekleşmemekte dolayısıyla dönüşümden kaynaklı enerji kayıpları görülmemektedir.

Enerji kontrol stratejileri ve mekanik bağlantılar yönünden seri hibrid konfigürasyona göre daha karmaşıktır. Sürüş esnasında elektrik motoru generatör olarak kullanılarak batarya şarj edilebilir. Seri hibrid konfigürasyon gibi ilave bir generatöre ihtiyaç duyulmaz. Özellikle rejeneratif frenleme ile boyutları seri hibride göre daha küçük olan bataryalar rahatça doldurulabilmektedir.

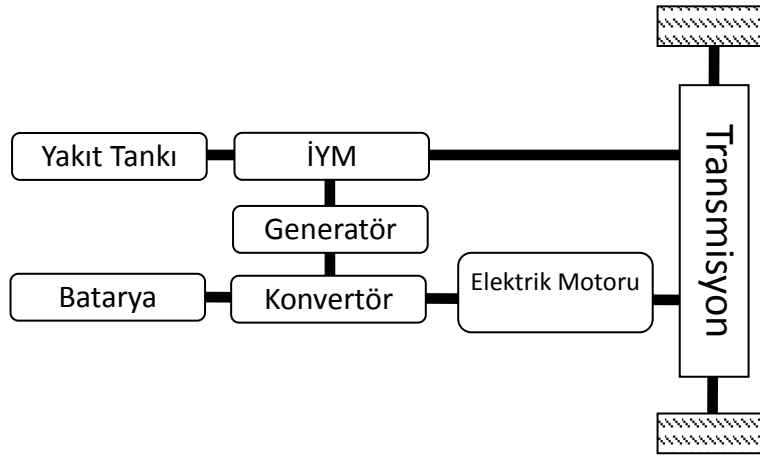
Paralel hibrid elektrikli araç konfigürasyonunda düşük hızlarda genel olarak sadece elektrik motorundan tahrik sağlanır. Böylece sistem, içten yanmalı motorun düşük devirlerdeki verimsizliğinden etkilenmez; yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından avantaj sağlanır. Daha yüksek hızlarda ise içten yanmalı motor da devreye girerek tahrike katkı sağlar. Paralel hibrid yapı Şekil 2.4.'te görülmektedir.



Şekil 2.4. Paralel hibrid elektrikli araç yapısı

2.3.1.3. Seri - Paralel hibrid elektrikli araçlar

Seri-Paralel hibrid elektrikli araç konfigürasyonu, hem seri hem paralel konfigürasyonun özelliklerini taşır; ikisinin de üstün olduğu noktaları birleştirmektedir. Seri-Paralel konfigürasyonda paralel konfigürasyondan farklı olarak fazladan bir generatör bulunur. Seri konfigürasyondan farklı olarak ta içten yanmalı motorun elektrik motoruyla doğrudan mekanik bağlantısı bulunmaktadır. Konstrüksiyon açısından karmaşık ve maliyet açısından dezavantajlı olan bu konfigürasyon ileri kontrol yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Genellikle otomobillerde kullanılan seri-paralel konfigürasyonun örneği olarak Toyota Prius verilebilir [38], [40]. Seri-paralel hibrid yapı Şekil 2.5.'te görülmektedir.



Şekil 2.5. Seri-Paralel hibrid elektrikli araç yapısı

Hibridlik derecesi, aracın kontrol stratejisinin saptanması açısından önemli bir mekatronik tasarım parametresidir; enerji akışının öngörülebilmesini sağlar. Hibridlik derecesi, 0 ila 1 aralığında değişir ve iki ayrı enerji kaynağının en yüksek güç değerlerini dikkate alır [42]. Hibridlik derecesi Denklem 2.1.'e göre belirlenir;

$$HD = \frac{P_{EM}}{P_T} \quad (2.1)$$

Burada, P_{EM} , elektrik motorunun gücünü, P_T ise aracın toplam kurulumu gücünü ifade etmektedir. Toplam güç, içten yanmalı motor gücü ve elektrik motoru gücünün toplamı kadardır.

Şekil 2.7.'de hibridlik derecelerine göre içten yanmalı motor boyutu ve elektrik motoru-batarya boyutu arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Hibridlik derecelerine göre İYM-EM boyutlarının değişimi [43].

Hibridlik derecesini klasik konvansiyonel seviye araçtan elektrikli araç seviyesine taşıyan farklı teknolojilere göre (rejeneratif frenleme gibi) belirlemek de mümkündür. Yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının azaltılması için kullanılan bu teknolojiler ile

hibridleşme seviyeleri arasındaki ilişki Tablo 2.1.'de görülmektedir. Bu teknolojiler ile ilgili detaylı bilgi ayrıca Bölüm 2.4.'te verilmiştir.

Tablo 2.1. Hibridleşme seviyeleri ile kullanılan teknolojiler arasındaki ilişki

	Mikro Hibrid	Hafif Hibrid	Tam Hibrid	Şarj Edilebilir Hibrid
Motor Durdurma	+	+	+	+
Rejeneratif Frenleme		+	+	+
Seyir Gücünün Paylaşımı		+	+	+
Yalnızca Elektrik Motoru ile Seyir			+	+
Şebeke Elektrik ile Batarya Şarjı				+

2.3.2.2. Mikro hibrid elektrikli araçlar

Mikro hibrid, motor durdurma teknolojisine sahip içten yanmalı motora bir alternatör-starter grubunun entegre edilmesiyle elde edilir. Seyir sırasında tahrik sadece içten yanmalı motor tarafından sağlanmaktadır; elektrik motoru tahrike katkı sağlamaz. Elektrik motorunun içten yanmalı motor rölanti devrinde iken otomatik olarak hızlı bir şekilde durdurup yeniden çalıştırması ile yakıt tasarrufu hedeflenmektedir. Özellikle durma ve kalkmaların sık olduğu şehir içi sürüşte yaklaşık %10 oranında yakıt tasarrufu sağlanmaktadır.

Mikro hibridler basit yapıları ve düşük maliyetleri nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ford Focus, Citroen C3, BMW 1 ve 3 serileri, FIAT 500 bazı mikro hibrid elektrikli araç örnekleridir [44].

2.3.2.3. Hafif hibrid elektrikli araçlar

Hafif hibrid elektrikli araçlarda içten yanmalı motor ve elektrik motoru birbiriyle bağlantılıdır; tahrik sırasında elektrik motoru, içten yanmalı motora destek verebilir.

Fakat yalnızca elektrik motoru ile seyir mümkün olmamaktadır zira elektrik motorunun boyutu, tahrik kuvvetini tek başına karşılayacak durumda değildir.

Hafif hibridlerde mikro hibride ek olarak rejeneratif frenleme ve seyir gücü paylaşımı kabiliyetleri bulunmaktadır. Mikro hibrid elektrikli araçlar ile kıyaslandığında elektrik motoru ve batarya daha büyüktür. Bu nedenle maliyetleri mikro hibridlere göre daha yüksektir.

Yaklaşık %25 oranında yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Honda Civic ve Insight hibrid modelleri, Mercedes-Benz S400 BlueHybrid, BMW 7 Serisi ActiveHybrid, Buick LaCrosse/eAssist modelleri bazı hafif hibrid elektrikli araç örnekleridir [44].

2.3.2.4. Tam hibrid elektrikli araçlar

Tam hibrid elektrikli araçlarda genellikle içten yanmalı motor ve elektrik motoru tarafından ortak sağlanan tahrik, sadece elektrik motoru tarafından da sağlanabilmektedir. Hafif hibride göre daha güçlü tahrik elemanları kullanmak gerekmektedir.

Yaklaşık %40 oranında yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. Chevrolet Tahoe hibrid, Toyota Prius ve Camry hibrid, Ford C-Max hibrid, Honda CR-Z, Kia Optima hibrid modelleri bazı tam hibrid elektrikli araç örnekleridir [44].

2.3.2.5. Şarj edilebilir hibrid elektrikli araçlar

Şarj edilebilir hibridler tam hibrid ile büyük oranda benzer konfigürasyona sahiptirler. Tam hibrid ile aralarındaki en büyük fark, küçültülmüş bir içten yanmalı motor kullanırken daha büyük boyutlu elektriksel komponentler (batarya, elektrik motoru) kullanıyor olmalarıdır. Büyük batarya ihtiyacı, maliyet, ağırlık ve uygulanabilirlik açısından büyük bir dezavantajdır. Fakat son yıllarda yarıiletken teknolojisi ile birlikte bataryalarda meydana gelen gelişmeler maliyeti düşürerek tedarik edilebilirliği arttırmış ve dolayısıyla şarj edilebilir hibridleri cazip hale getirmiştir.

Bu araçlar, şebekeden çekilen elektrik ile şarj edilebilmektedir. Motor çalışırken verimlilikleri neredeyse tam hibridler ile aynıdır.

Şarj edilebilir hibridler, genellikle kısa mesafelerde kullanılırlar da uzun mesafeler için de uygun durumdadırlar. Toyota Prius Plug-In Hibrid, Porsche Panamera SE Hibrid, Ford Fusion Energi, Chevrolet Volt modelleri bazı şarj edilebilir hibrid elektrikli araç modelleridir [45], [44].

2.4. Hibrid Elektrikli Araçlarda Verimlilik Arttırmak Amacıyla Kullanılan Yöntemler

2.4.1. Motor durdurma

İçten yanmalı motorlar özellikle şehir içi kullanımda trafik şartlarından ötürü sıklıkla rölanti devrinde çalışmaktadır. Motorun rölanti devrinde çalışma süresi, Avrupa şehir içi sürüş çevrimine göre, toplam çevrim süresinin %35,4'üne tekabül etmektedir [46]. Motor, rölanti devrinde çalışma süresince durdurularak yakıt tasarrufu sağlanması hedeflenir.

Motor durdurma kabiliyeti mikro hibridleşmenin belirleyici kriterlerinden biridir [46]. İlk çalışma anında, içten yanmalı motorun kararlı çalışma düzenine geçebilmesi amacıyla silindirlere yüksek miktarda yakıt püskürtülür. İlk çalışma anında yaklaşık 1500 devirde dönen motor, sonrasında yavaşça rölanti devrine iner.

Konvansiyonel araçlarda kullanılan marş motoru titreşim, gürültü ve gecikme olmaksızın bu fonksiyonu yerine getirme kabiliyetine sahip değildir. Bu nedenle hibrid elektrikli araçlarda, motor durdurma işlemini gerçekleştirebilmek için güçlü elektrik motorları kullanılır. Kullanılan güçlü elektrik motorlarıyla hafif hibrid elektrikli araçlarda motor devri hızlı bir şekilde arttırılabilir [47]. Böylece motor sürücünün hissetmeyeceği şekilde hızlıca çalıştırılabilmektedir.

2.4.2. Rejeneratif Frenleme

Hibrid elektrikli araçlarda frenleme enerjisinin bir kısmını generatör üzerinden geri kazanma olanağı bulunmaktadır. Hibrid elektrikli araçları konvansiyonel araçlardan ayıran en büyük özelliklerden biri de sunduğu bu olanaktır. Rejeneratif frenleme ile atık ısı enerjisinin faydalı elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve depolanması sağlanmaktadır. Konvansiyonel araçlarda frenleme esnasında sürtünme ile atılan ısı enerjisi, hibrid elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme ile bataryaların şarj edilmesinde kullanılmaktadır. Elektrik motoru generatör modunda çalışarak bataryaların enerji depolamasını sağlar. Bu, araca herhangi bir ek yakıt yükü getirmemektedir.

Avrupa şehir içi sürüş çevrimine göre 3000 kg bir aracın hızlanması ve sabit hızla ilerlemesi için gerekli için gerekli toplan enerji miktarı 2,82 MJ iken fren ile dışarı atılan ısı enerjisi 1,76 MJ değerindedir. Yine Avrupa şehir içi sürüş çevrimine toplam çevrim süresinin %13,8'inin frenleme için harcadığı göz önüne alındığında frenleme esnasında dışarı atılan kayıp enerji miktarının toplam enerji miktarına kıyasla oldukça büyük değerlerde olduğu görülmektedir [46].

2.4.3. Yalnızca elektrik motoru ile seyir

Elektrik motoru ve batarya, aracın aracın kalkışını sağlayacak şekilde boyutlandırılarak tam hibrid yapı elde edilebilmektedir. Böylece içten yanmalı motor, sadece araç duruyorken değil seyir halindeyken de durdurulabilecek ve verimsiz çalıştığı düşük devir bölgelerinde kapatılarak motor verimliliği artırılabilir.

Elektrik motoru ve batarya ikilisi, aracın kalkışı için gerekli gücü sağlayarak düşük devirlerde içten yanmalı motora olan bağımlılığı ortadan kaldırır. Araç, içten yanmalı motorun daha verimli çalıştığı hıza ulaşana kadar elektrik motoru tarafından tahrik edilmeye devam eder. Bu süreçte içten yanmalı motorun kapatılması toplam sürüş verimini arttırmaktadır. Yalnızca elektrik motoru ile seyir kabiliyeti ile yakıt tasarrufu sağlanırken egzoz emisyonları da azaltılmaktadır.

2.4.4. İçten yanmalı motor küçültme

En sade şekliyle düşünüldüğünde, hibrid konfigürasyona sahip bir araçta elektrik motoru boyutu büyütüldükçe içten yanmalı motor boyutunun küçültülmesine imkan sağlanır.

İçten yanmalı motorun verimliliğini direk olarak etkileyen sürtünme ve pompalama kayıpları ile dışarı atılan ısı gibi faktörler, küçük hacimli motorlarda daha düşük olmaktadır. Bu nedenle verimlilik açısından, içten yanmalı motorun olabildiğince düşük silindir hacmine sahip olması istenmektedir. Hibrid elektrikli araçlarda aracın mevcut güç ihtiyacını karşılayabilecek bir elektrik motorunun bulunması daha düşük hacimde içten yanmalı motor kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

İçten yanmalı motor silindir hacminin küçültülmesi ile birlikte sadece içten yanmalı motor ile sürüş sağlandığı durumlarda aracın performansı zayıflamaktadır. Fakat sürücü tork talebine göre, kurgulanacak olan efektif bir kontrol algoritması ile gereksinim duyulan tork, elektrik motoru ve içten yanmalı motorun ortak çalışması ile sağlanabilecektir [49].

Daha küçük boyutlarda bir içten yanmalı motorun kullanılması ile araç kütlesinin azaltılması sonucunda yakıt ekonomisine az da olsa katkı sağlanacaktır.

2.4.5. Şebeke elektriği ile batarya şarjı

Şarj edilebilir hibrid elektrikli araçlar, hibrid elektrikli araç dünyasının son gelişmelerinden biri olarak nitelendirilmektedir. Son yıllarda günlük hayatta kullanımları yaygınlaşmaya başlamıştır. Şarj edilebilir elektrikli araçlarda, araca eklenen ilave bir şarj sistemi ile batarya şebeke gerilimi ile şarj edilebilmektedir. Bu sayede, günlük kullanımda ve yeterli menzil şartlarında içten yanmalı motorun çalışmasına ihtiyaç duymadan sadece elektrik motoru ve batarya ile sürüş imkanı sağlanmaktadır.

Şarj edilebilir hibrid elektrikli araçlarda, batarya SoC değeri, kritik değere gelene kadar sadece elektrik motoru ile sürüş sağlanır. Batarya SoC değeri kritik değerin altına düştükten sonra içten yanmalı motor devreye alınmaktadır [50].

2.5. Hibrid Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları

Hibrid elektrikli araçların temel kazanımları olan yakıt tüketiminde iyileşme ve egzoz emisyonlarında azalmanın yanı sıra konvansiyonel araçlara kıyasla belirli üstünlükleri vardır.

Hibrid elektrikli araçların üstünlükleri, avantajları şu şekilde sıralanabilir:

1. İçten yanmalı motorun maksimum verim aralığında çalıştırılabilmesi olanağı,
2. Motor durdurma teknolojisi ile içten yanmalı motorun rölanti kayıplarının minimize edilebilmesi [47],
3. Motor küçültme imkanı ile düşük hacimlerdeki içten yanmalı motorların kullanılabilmesi,
4. Rejeneratif frenleme teknolojisi ile konvansiyonel araçlarda ısı olarak kaybolan frenleme enerjisinin geri kazanılabilmesi [51], [52],
5. Sürücü talep torkunun düşük olması durumunda tahrikin yalnızca elektrik motorları kullanılarak sağlanabilmesi imkanı [44],
6. Elektrik motorunun düşük hızlarda aktif olması ile daha sessiz sürüş imkanı,
7. Flywheel teknolojisi ile enerjinin mekanik olarak depolanabilmesi,
8. Transmisyona gerek kalmadan direkt olarak elektrik motoru üzerinden tahrik gücünün ayarlanabilmesi,

Dezavantajlar ise şu şekilde sıralanabilir:

1. Düşük batarya kullanım çevrimleri nedeniyle batarya kullanım ömrünün düşük olması,
2. Düşük batarya kapasitelerinin menzili sınırlandırması,
3. Karmaşıklığın yüksek olması,
4. Araç içerisindeki faydalı hacmin azalması,

5. Araç ağırlığının artması,
6. Yüksek maliyet,



BÖLÜM 3. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ENERJİ YÖNETİMİ

3.1. Hibrid Elektrikli Araçlarda Enerji Akışının Kontrolü

Hibrid elektrikli araçların tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli kriterlerden biri, güç aktarma organlarında enerji akışının etkili bir şekilde kontrol edilebilmesidir. Hibrid elektrikli araçlar, Bölüm 2.3.'de detaylı olarak açıklandığı üzere farklı konfigürasyonlara sahiptir. Hibrid elektrikli araç konfigürasyonlarındaki farklılıklardan dolayı, sistemi oluşturan farklı elemanlardan gelen güç akışını düzenlemek amacıyla farklı kontrol stratejileri gerekmektedir [35]. Kontrol stratejileri, hibrid elektrikli araçlarda dört ana hedefi gerçekleştirmeyi amaçlar. Bu hedefler şu şekilde sıralanabilir [53]:

- Maksimum yakıt ekonomisi
- Minimum egzoz emisyonları
- Minimum maliyet
- Yüksek sürüş performansı

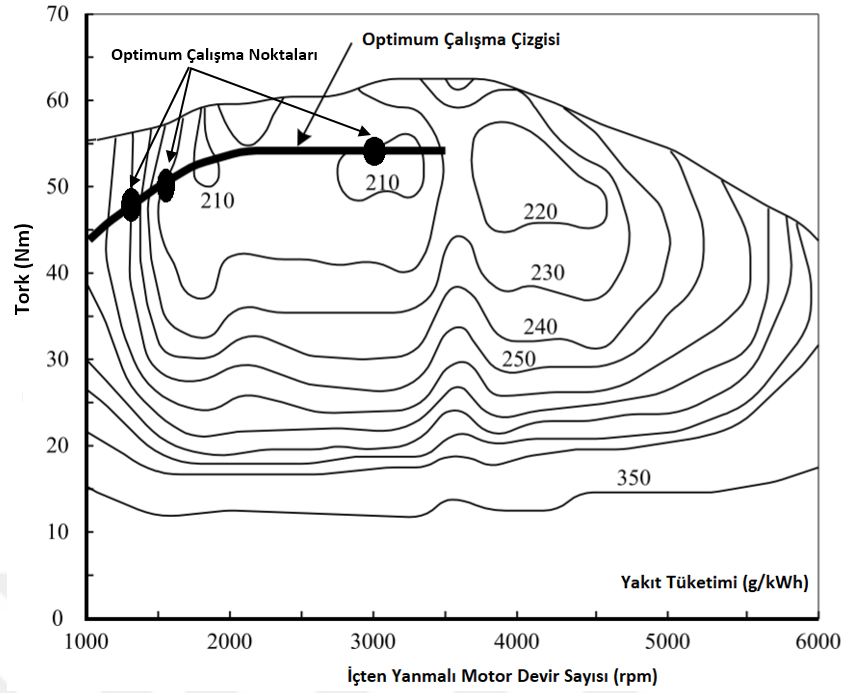
Bu hedeflerden maksimum yakıt ekonomisi sağlarken egzoz emisyonlarını minimize etmek birbirine paralel hedeflerdir. Fakat hibrid elektrikli araç kontrolünde, maksimum yakıt ekonomisi ve minimum egzoz emisyonları kriterlerini sağlarken aynı zamanda yüksek sürüş performansı elde etmek mümkün değildir; bunlar birbirleriyle çelişen hedeflerdir. Bu durum bir optimizasyon problemini de beraberinde getirmektedir. Problemin çözümü için optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır.

Hibrid elektrikli araçlar için güç kontrol stratejilerinin belirlenmesinde göz önünde bulundurulacak belirli anahtar faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler aşağıda açıklanmıştır:

- İçten yanmalı motorun optimum çalışma parametreleri; içten yanmalı motorun optimum çalışma parametreleri belirlenerek verimsiz rejim bölgelerinde çalışmasının önüne geçilir. Bunun için içten yanmalı motorun moment-hız düzlemi üzerinde, düşük yakıt tüketimi, düşük egzoz emisyonu veya her ikisinin de istenilen değerlerde olduğu bir ortak nokta baz alınarak içten yanmalı motora ait optimum çalışma noktası belirlenmektedir. Bu nokta, tek bir moment değerine karşılık gelen hız değerini vermektedir. Fakat içten yanmalı motor, ihtiyaç duyulan farklı güç değerlerini karşılamak durumundadır. Bu nedenle farklı güç değerlerine karşılık gelen optimum çalışma noktalarının, içten yanmalı motora ait moment-hız düzlemi üzerinde birleştirilmesi ile içten yanmalı motora ait optimum operasyon eğrisi çıkarılır.

Optimum operasyon eğrisi ile belirlenen bölge, motorun yakıt verimliliğinin en yüksek olduğu içten yanmalı motorun optimum çalışma bölgesi olarak adlandırılır.

İçten yanmalı motor için motor devrine göre değişen optimum çalışma noktaları ile optimum çalışma çizgisi devir sayısı-tork grafiği üzerinde Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İçten yanmalı motor devir sayısı-tork grafiği üzerinde optimum çalışma parametrelerinin gösterimi

- En düşük içten yanmalı motor hızı; içten yanmalı motor düşük operasyonel hızlarda çalışırken yakıt verimliliği oldukça düşüktür. Bu nedenle belirli bir eşik hız değerinin altında düşüldüğünde içten yanmalı motor kapatılır ve verimsiz bölgede çalışması engellenir.
- En düşük içten yanmalı motor çalıştırma süresi; içten yanmalı motorun sıkça kapatılıp açılması durumunda yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarında belirli bir artış görülmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için bir çalıştırma süresi belirlenir ve bu sürenin altında içten yanmalı motor kapatılmaz.
- Batarya şarj derinliği; batarya şarj derinliği, aracın ivmelenmesi için gerekli enerjiyi sağlayacak aynı zamanda rejeneratif frenleme veya yokuş aşağı seyir sırasında açığa çıkan rejeneratif enerjiyi absorbe edebilecek seviyede olmalıdır. Özellikle rejeneratif enerjinin yüksek oranda geri kazanımı, araç verimliliği adına önemli bir noktadır. Batarya şarj derinliğini istenen seviyede tutabilmek için; şarj derinliği çok yüksek ise içten yanmalı motor durdurulmalı, şarj derinliği çok düşük ise içten yanmalı motor güç çıkışı, batarya şarj seviyesini arttıracak şekilde ayarlanmalıdır.

- Emniyetli batarya gerilim düzeyi; batarya, aracın rejeneratif çalışması sırasında veya elektrik motorunun generatör çalışma modunda şarj olurken veya boşalırken batarya gerilimi belirli bir seviyenin üstüne çıkmamalıdır ve belirli bir seviyenin altına inmemelidir. Batarya ömrünü optimum değerde tutabilmek için bataryanın aşırı yüklenmemesi gerekirken belirli bir şarjlılık oranının da altına inmemesi gerekir. Bu nedenle batarya gerilimi, belirlenen emniyetli gerilim düzeyinde tutulmalıdır.
- Bağlı güç dağılımı; İçten yanmalı motor ve batarya arasındaki güç dağılımı, sürüş sırasında talep edilen performans değerlerini sağlayacak biçimde, orantılı olarak yapılmalıdır [53].

3.2. Paralel Hibrid Elektrikli Araç Kontrolü

Hibrid elektrikli araçlar, çok seviyeli-hiyerarşik bir sistem ile kontrol edilmektedirler. Çok seviyeli-hiyerarşik hibrid elektrikli araç kontrolü için üç ayrı aşama, her aşama için ayrı kontrolör/kontrolörler ve her kontrolör için ayrı enerji yönetim stratejisi tanımlanmaktadır. En üst seviyede, tez kapsamında incelenen ana enerji yönetim stratejisi bulunmaktadır. Üst seviye kontrolör, hibrid elektrikli aracın güç organları arasındaki enerji akışının denetimini sağlamaktan sorumludur; çalışma modları arasındaki geçiş ve alt seviye bileşenlerin kontrolü bu üst seviye kontrolör ile yapılmaktadır; üst seviye kontrolör için hibrid elektrikli aracın alt seviye güç bileşenlerin kontrolünden sorumludur denilebilir.

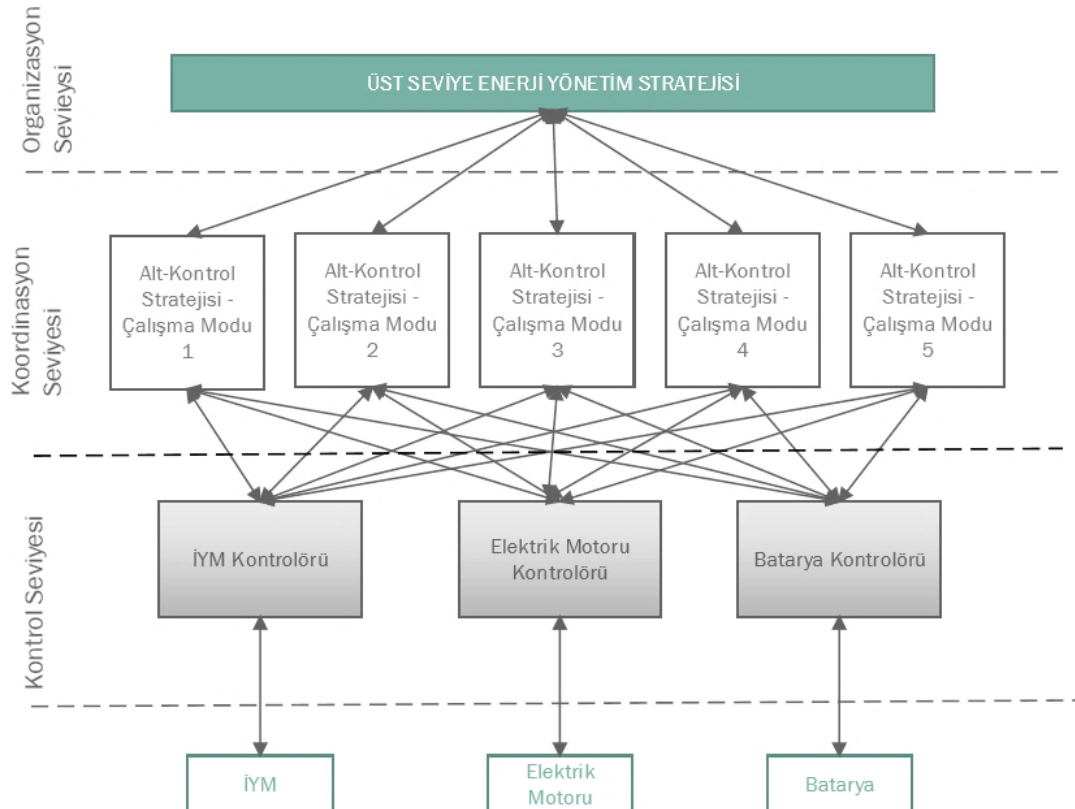
Hiyerarşik kontrol için üç ayrı seviye tanımlanmaktadır. Bu seviyeler kısaca şöyle açıklanabilir;

- Organizasyon Seviyesi: Tez kapsamında incelenen konu olan hibrid elektrikli araç için ana enerji yönetim stratejisi bu seviyede bulunmaktadır. Bu seviyede, araç çalışma şartları ile ilgili bilgiler yorumlanarak aracın anlık çalışma modu değerlendirilir ve ikinci seviyeye ait alt enerji yönetim stratejisi belirlenir.
- Koordinasyon Seviyesi: Farklı çalışma modlarına ait alt enerji yönetim

stratejileri bu seviyede bulunmaktadır. Bu seviye, içten yanmalı motor kontrolörü, elektrik motoru kontrolörü ve batarya kontrolörünü denetler, bunları koordine eder ve aralarındaki olası çatışmaları önler. Farklı çalışma modları için tanımlanmış alt enerji yönetim stratejileri, sürücü talep torku ve araç hızı etrafında içten yanmalı motor, elektrik motoru ve batarya parametrelerini doğru bir şekilde belirlemektedir.

- Kontrol Seviyesi: İçten yanmalı motor, elektrik motoru ve bataryaya ait kontrolörler hiyerarşinin en alt seviyesinde bulunmaktadır. Bu üç güç bileşeni ile ilgili kontrolörler, koordinasyon seviyesinden gelen bilgiler doğrultusunda doğrudan içten yanmalı motor, elektrik motoru ve bataryaya talimatlar verir ve çalışmalarını kontrol ederler [54].

Çok seviyeli-hiyerarşik kontrol sistemi yapısı Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

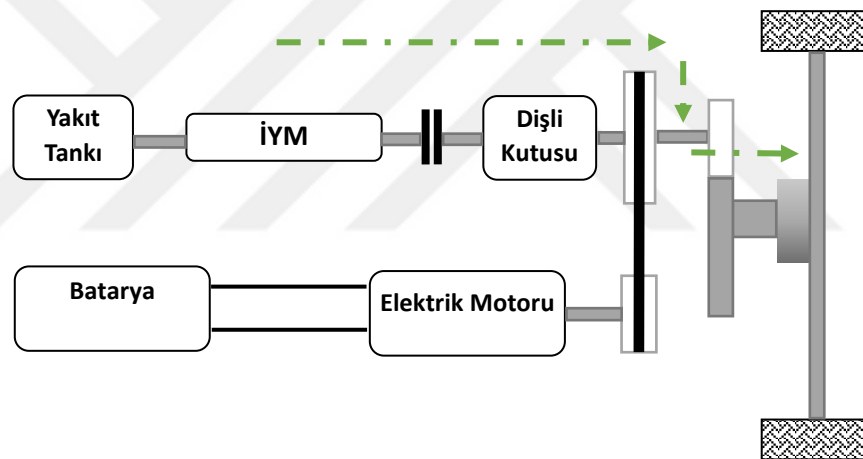


Şekil 3.2. Çok seviyeli hiyerarşik kontrol sistemi yapısı

Tez kapsamında çalışılan enerji yönetim stratejisinde, paralel hibrid elektrikli araç için, gücün akış doğrultusuna göre beş farklı temel çalışma modu belirlenmiştir. Çalışma modlarını çeşitlendirmek mümkündür. Belirlenen çalışma modları aşağıda açıklanmıştır.

3.2.1. Yalnızca içten yanmalı motor çalışma modu

Bu çalışma modunda paralel hibrid elektrikli aracın yük ve hız talebi yalnızca içten yanmalı motor tarafından karşılanmaktadır. Elektrik motorunun tahrik gücüne katkısı yoktur ve kapalı durumdadır. Genellikle aracın normal seyri sırasında bu çalışma modu aktiftir. Yalnızca içten yanmalı motor çalışma moduna ait güç akışı Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.

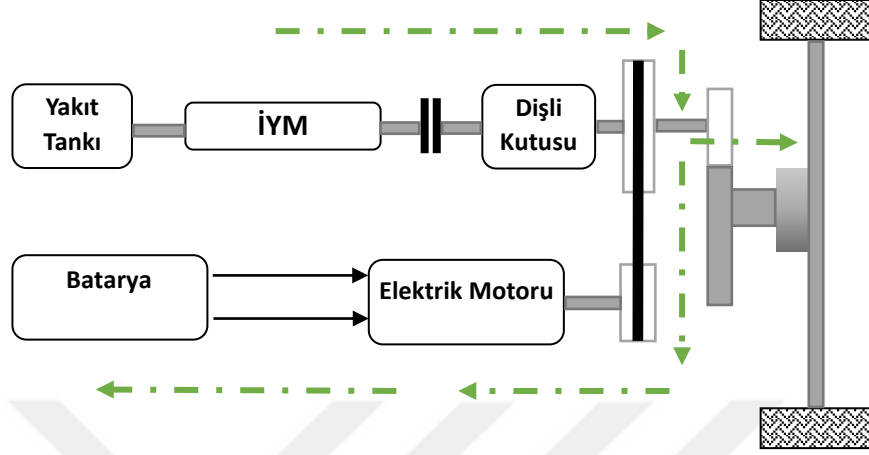


Şekil 3.3. Yalnızca içten yanmalı motor çalışma modu

3.2.2. Yalnızca elektrik motoru çalışma modu

Bu çalışma modunda paralel hibrid elektrikli araç esasen elektrikli araç olarak çalışmaktadır. İçten yanmalı motorun tahrik gücüne katkısı yoktur. İçten yanmalı motor, aktarma organlarından ayrılarak ve rölanti durumunda bırakılmaktadır. Aracın hareketini sağlayan tüm enerji bataryalardan sağlanmaktadır. Yalnızca elektrik motoru çalışma moduna ait güç akışı Şekil 3.4.'te gösterilmiştir.

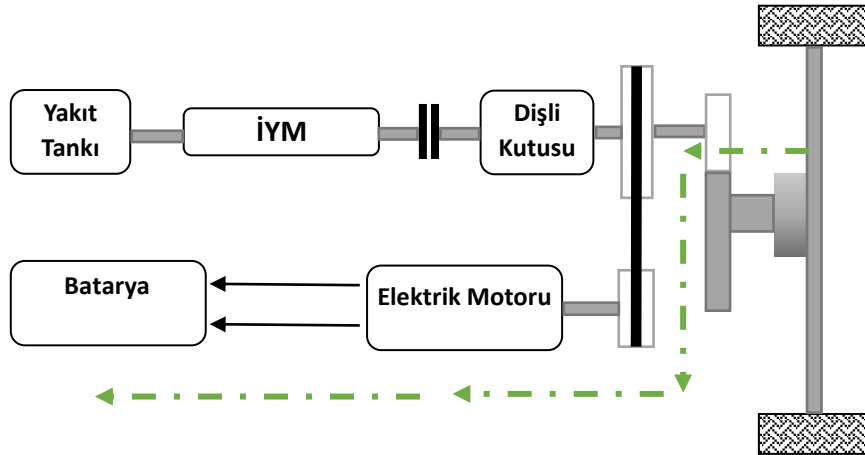
elektrik motoru üzerinden şarj edilebilmektedir. Bu modda elektrik motoru generatör olarak kullanılır. Batarya şarj çalışma moduna ait güç akışı Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Batarya şarj modu

3.2.5. Rejeneratif fren çalışma modu

Bu çalışma modunda elektrik motoru aracılığı ile mekanik frenleme esnasında atmosfere ısı olarak atılan frenleme kinetik enerjisi geri kazanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Geri kazanılan bu enerji bataryada depolanır ve araç, güç destek modu veya yalnızca elektrik motoru modunda çalışmaktayken kullanılır [37], [55], [56]. Rejeneratif fren çalışma moduna ait güç akışı Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.

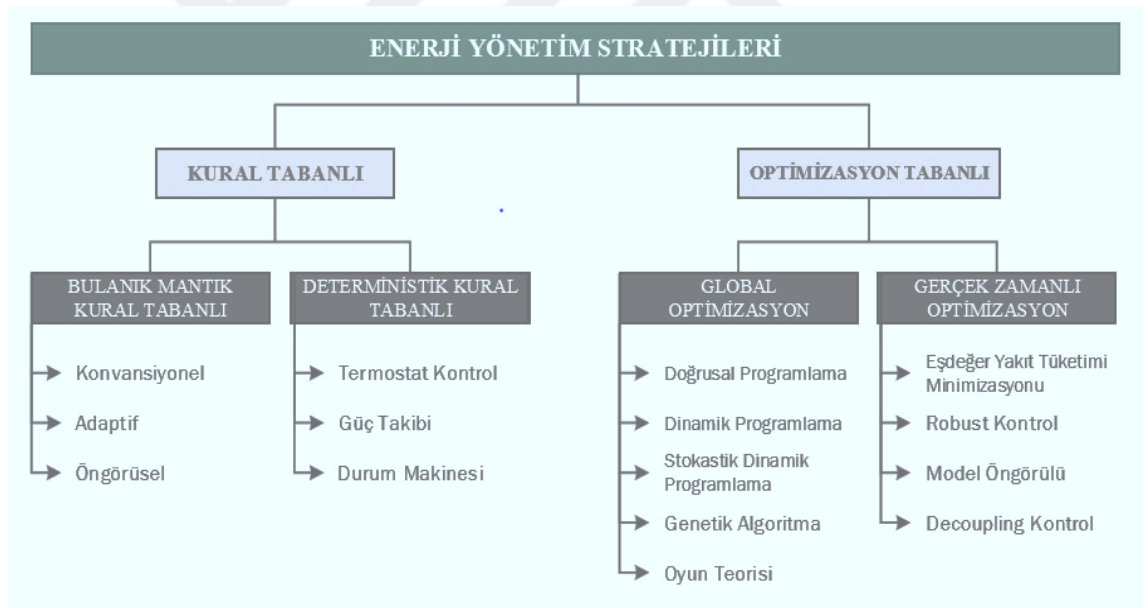


Şekil 3.7. Rejeneratif fren çalışma modu

3.3. Enerji Yönetim Stratejileri

Hibrid elektrikli araçlarda enerji yönetim sistemleri, belirlenen performans kriterini veya kriterlerini baz alarak güç organları arasındaki enerji paylaşımını ve paylaşım sürecinin efektif bir şekilde yönetilmesini sağlamaktan sorumludur. Efektif enerji kullanımının sağlanabilmesi için ilgili performans kriterleri göz önünde bulundurularak uygun enerji yönetim stratejilerinin uygulanması gerekmektedir.

Enerji yönetim stratejilerinin sınıflandırılmasına yönelik literatürde farklı yaklaşımlar mevcuttur. Genel anlamda enerji yönetim stratejilerini iki ana başlık altında toplamak mümkündür [57]. Bunlar, Bölüm 3.3.1. ve Bölüm 3.3.2.'de açıklandığı gibi kural tabanlı enerji yönetim stratejileri ve optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileridir. Enerji yönetim stratejilerinin sınıflandırılması Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Enerji yönetim stratejilerinin sınıflandırılması

3.3.1. Kural tabanlı enerji yönetim stratejileri

Kural tabanlı enerji yönetim stratejileri düşük işlem yükleri nedeniyle pratik ve insana dayalı stratejiler olarak nitelendirilebilirler [58].

Bu yaklaşımda enerji yönetiminin dayandığı kurallar sezgisel olarak tanımlanmaktadır; insan sezgileri, deneyimler, güvenlik koşulları ve matematiksel modeller baz alınarak belirlenmektedir [57]. Kurallar, sürüş ile ilgili ön bilgi olmaksızın belirlenir. Kural tabanlı yaklaşım, aracın güç dağılımının gerçek zamanlı yapılabilmesine olanak tanır. Gerçek zamanlı bir enerji yönetimi yapmanın en yaygın yolu olarak karşımıza kural tabanlı yaklaşım çıkmaktadır.

Kural tabanlı enerji yönetim stratejilerinin temeli yük tasnif esasına dayanır ve ana hedef; hibrid bir güç sisteminde meydana gelen güç akışının, gerçek zamanlı kontrolünün efektif bir şekilde yapılabilmesidir. Yük tasnif stratejisinin esası, belirli bir motor hızında, içten yanmalı motorun çalışma noktasını moment-hız diyagramı üzerinde, verimlilik, yakıt ekonomisi ve egzoz emisyonları parametrelerinden birine göre optimum olduğu noktaya kaydırmaktır. Burada, verimlilik, yakıt ekonomisi ve egzoz emisyonları parametrelerinden hangisi maksimize edilmek isteniyorsa o parametre temel alınarak içten yanmalı motor için çalışma noktası belirlenmektedir.

Hibridlik derecesine göre içten yanmalı motor ağırlıklı olduğu bilinen bir hibrid elektrikli araç için enerji yönetim stratejisi, sürücü talep gücü ile içten yanmalı motor tarafından o an için üretilen güç arasındaki reel farka göre kurgulanır; eğer sürücü güç talebi içten yanmalı motor gücünden yüksekse eksik güç miktarı elektrik motoru tarafından kompanse edilecek şekilde kurgulanırken sürücü güç talebi içten yanmalı motor gücünden düşükse içten yanmalı motor bataryayı şarj edecek şekilde kurgulanmaktadır. Burada hedef, içten yanmalı motorun en verimli olduğu rejimde çalıştırılmasıdır. Hibridlik derecesinin durumuna göre bu senaryoları çeşitlendirmek mümkün olmaktadır.

Kural tabanlı enerji yönetim stratejilerinin en büyük avantajı olarak matematiksel modellere ve karmaşık hesaplamalara ihtiyaç duymaması gösterilmektedir. Honda Insight ve Toyota Prius gibi birçok araçta kural tabanlı enerji yönetimi stratejileri kullanılmaktadır [59].

Kural tabanlı enerji yönetiminde kurallar genel olarak kontrolöre önceden tanımlanmaktadır. Fakat adaptif olarak, sürüş ve yol koşullarına göre kuralların uyarlanarak kontrolöre uygulandığı uygulamalar da bulunmaktadır.

Kural tabanlı enerji yönetim stratejileri bulanık mantık kural tabanlı ve deterministik kural tabanlı enerji yönetim stratejileri olmak üzere iki ana alt başlıkta incelenmektedir.

3.3.1.1. Bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejileri

Bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejileri son yıllarda hibrid elektrikli araçların güç yönetiminde popüler olarak kullanılmaktadır. Literatürde konuyla ilgili farklı hibrid elektrikli araç konfigürasyonları için yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır.

Hibrid güç aktarma sistemlerini multi-domain, doğrusal olmayan ve zamanla değişen bir yapı olarak ele aldığımızda enerji yönetim problemine en mantıklı çözüm olarak bulanık mantık görülmektedir [60]. Hibrid elektrikli araçlarda enerji yönetimi problemine olduğu gibi matematiksel olarak tanımlanması zor, karmaşık ve zamanla değişen sistemler, durumlar için uygundur. Bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetimine konvansiyonel kural tabanlı enerji yönetiminin gelişmiş hali diyebiliriz. [37], [57].

Bulanık mantık teorisi, sayısal ve dilsel verileri aynı anda işleme yeteneği sayesinde hibrid elektrikli araç enerji yönetimi konusunda bir çok noktada avantaj sağlamaktadır. Farklı çalışma koşullarına karşı kolay adapte edilebilmesi, bulanık kuralların kolay bir şekilde ayarlanabilmesi ve ihtiyaç duyulduğunda değiştirilebilmesi, modelleme ve ölçüm hatalarının sistem kontrolünü etkilememesi gibi avantajlar bulanık mantık enerji yönetimini üstün kılmaktadır. Fakat kuralların, üyelik fonksiyonlarının genellikle önceden tanımlanıyor olması sebebiyle sistem ile ilgili tecrübe ve uzmanlık gerektiriyor olması ayrıca üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde deneme-yanılma

yöntemi kullanılıyorsa zaman alıcı olması gibi nedenler bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetimi stratejileri için dezavantajdır.

Bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejileri üç alt başlığa ayrılmaktadır; konvansiyonel bulanık mantık kural tabanlı, adaptif bulanık mantık kural tabanlı ve öngörüsels bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejileri.

Konvansiyonel bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejilerinde enerji yönetimini üst seviyeden gerçekleştiren kontrolör bulanık mantığın temel adımlarını sırasıyla uygulamaktadır. İlk adımda kontrolörün belirlenen giriş parametreleri bulanıklaştırılarak üyelik fonksiyonlarına dönüştürülür. Daha sonra çıkış parametrelerinin belirlenebilmesi için kurallar tanımlanır. Son adımda ise kontrol sinyalleri ile orantılı olacak şekilde çıkış parametreleri durulaştırılarak ilgili birime gönderilir. Bu yaklaşım ile ilgili temel sorun önerilen enerji yönetim stratejisinin batarya şarj beslemesini garanti etmemesidir [57]. Çok katlı kontrolörler kullanılarak bu sorun bertaraf edilmeye çalışılmaktadır.

Adaptif bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejilerinin temeli, konvansiyonel bulanık mantık enerji yönetim stratejilerinde kullanılan parametrelerin mevcut çalışma koşullarına uyarlanarak geliştirilmesi esasına dayanmaktadır.

Öngörüsels bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejileri ise mevcut sürüş koşulları senaryolarına ek olarak, bulanık mantık enerji kontrolörüne yaklaşan, olabilecek, öngörülen sürüş koşul senaryolarının entegre edilmesi esasına dayanmaktadır. “Global Positioning System (GPS)” kullanılarak trafik durumu ile ilgili bilgiler işlenmektedir.

3.3.1.2. Deterministik kural tabanlı enerji yönetim stratejileri

Deterministik kural tabanlı enerji yönetim stratejilerinde, hibrid güç aktarma organlarındaki güç akışına, içten yanmalı motorun verim, yakıt veya emisyon haritalarına ve mühendislik deneyimlerine dayanarak tasarlanan deterministik

kurallar, genellikle look-up tablolarının kontrolöre implemente edilmesi ile gerekli güç akışını aktarma organları arasında sağlamaktadırlar.

Bu stratejiler, sabit kurallar etrafında şekillendirilmişlerdir. Motor durdurma, batarya şarjı gibi hibrid elektrikli aracın farklı çalışma modları arasındaki geçiş, bu modların operasyonel sınırlarının önceden kesin olarak belirlendiği algoritmalar üzerinden düzenlenmektedir.

Deterministik kural tabanlı enerji yönetim stratejileri temel olarak üç alt başlık altında incelenmektedir.

Termostat (Aç-Kapa) kontrol yöntemi, aç-kapa yöntemi olarak da bilinir, güç aktarma organları için izin verilen çalışma sınırlarını tanımlama esasına dayanan klasik bir yöntemdir. Burada temel amaç, içten yanmalı motor, batarya ve elektrik motorunun belirlenen çalışma aralıklarında çalışmasını sağlayabilmektir. Bu yöntemde, batarya SoC değeri önceden belirlenen bir aralıkta kalmak kaydıyla içten yanmalı motor durdurulup çalıştırılır yani aç-kapa yapılmaktadır.

Plansız güç talebi girdileri göz önüne alındığında termostat kontrol yönteminde genel sistem verimliliğini belirlemek mümkün değildir. Bunun yanı sıra işlem gereksiniminin düşük olması nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır [27]. Bu yöntemle, rota bilgisi daha önceden belirlenmiş, plansız güç talebinin minimumda olacağı şehir içi sürüş çevrimlerinde başarılı sonuçlar elde edildiği söylenebilir.

Güç takibi (Power Follower) yönteminde içten yanmalı motor ana tahrik kaynağıdır ve elektrik motoru gerekli durumlarda güç talebini karşılamak için tahrike katkı sağlar. Kurallar yine sezgi ve deneyimlere dayanarak belirlenmektedir. Modifiye edilmiş güç takibi yönteminde ise tüm olası çalışma noktalarında yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarını temsil edecek bir maliyet fonksiyonunun önerilmesi ile hem enerji tüketimini hem de egzoz emisyonlarını optimize etmektir. Kontrol stratejisi, anlık enerji tüketimi ve egzoz emisyon salınımı hedeflerini bulabilmek için zamana göre ortalaması alınmış bir hız değeri kullanmaktadır.

Durum Makinesi (State Machine) yönteminde enerji yönetim algoritması aracın çalışma modunu belirlemektedir. Bir paralel hibrid elektrikli araç çalışma modları, dinamik olarak belirlenir. Çalışma modları arasındaki geçişler, sürücü güç talebindeki değişikliklere, çalışma koşullarındaki değişikliklere veya herhangi bir alt sistemdeki olası bir soruna bağlı olarak yapılmaktadır. Bu yöntemde yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları gibi performans parametrelerinde iyileşme garanti edilememektedir [57].

3.3.2. Optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri

Optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejilerinde amaç, güç aktarma organlarının verimliliğini maksimize ederken güç aktarma organlarında meydana gelen kayıpları minimize etmektir. Sistem için optimum referans hız veya tork değeri, yakıt tüketimi, egzoz emisyonları gibi performans kriterlerinden birini temsil eden bir maliyet fonksiyonunun minimize edilmesiyle elde edilmektedir. Fakat bu işlem ancak sabit bir sürüş çevrimi üzerinde gerçekleştirilirse global bir optimum çözüm bulunabilir; enerji yönetim kontrolörü belirlenen sürüş çevrimi süresince geçmiş ve gelecek güç taleplerini önceden bilmektedir. Kural tabanlı enerji yönetim stratejilerine göre matematiksel işlem yükleri daha fazladır.

Optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri kendi içinde iki ana alt başlıkta incelenmektedir. Bunlar aşağıda açıklandığı gibi global optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri ve gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileridir.

3.3.2.1. Global optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri

Gerçek zamanlı çalışan bir sistemde, sürüş çevrimi belirli olmadığından ve yol şartları ile ilgili kestirim yapmak güç olduğundan dolayı tanımlanan maliyet fonksiyonunun minimizasyonu ile ilgili global bir çözüm üretmek mümkün olmayabilmektedir. Bu nedenle global optimizasyon teknikleri, doğrudan gerçek zamanlı bir enerji yönetim sistemi için kullanılmamaktadır; ancak diğer enerji yönetim stratejilerinin kalitesini değerlendirmek, karşılaştırmak amacıyla kullanılabilir.

Global optimizasyon tabanlı enerji yönetimi, sürüş çevrimi ile ilgili ön bilgilere dayanmaktadır. Bu sebeple nedensel olmayan bir yaklaşım olarak da ele alınmaktadır. Bunun yanı sıra global optimizasyon yönetiminin hesaplama yükü kural tabanlı enerji yönetimine göre daha fazladır [59].

Global optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri; doğrusal programlama, dinamik programlama, stokastik dinamik programlama, genetik algoritma ve oyun teorisi olmak üzere beş alt başlıkta incelenmektedir. Hibrid elektrikli araçların, çok sayıda bileşenden meydana gelmeleri, bu bileşenlerin ayrık durumda çalışmaları, modellenmesi zor olan sürücü ve yol koşulları gibi parametrelere sahip olmaları gibi nedenlerden dolayı bu sistemlerle ilgili analitik çözümler elde etmek oldukça zor olmaktadır. Bu tarz sorunların çözümü için uygun olan dinamik programlama yöntemi sürüş çevriminin birden fazla alt bölüme ayrılması esasına dayanır. Sürüş çevriminin her bir bölümü arasındaki geçiş sırasında, belirlenen performans kriteri baz alınarak, bir maliyet çıkartılmaktadır. Genellikle son bölümden başlanarak maliyet fonksiyonunun optimum çözümü elde edilene kadar optimizasyon süreci kıştırılmaktadır. Böylece hibrid elektrikli aracın çalışma modları arasında optimum şartlarda geçiş yapılması sağlanmaktadır. Dinamik programlama yaklaşımı her ne kadar optimum veya optimuma yakın bir çözüm sunuyor olsa da gerçek zamanlı sürüşe uygulanamaması büyük bir dezavantıdır.

Doğrusal programlama optimizasyon tabanlı enerji yönetiminde ise maliyet fonksiyonlarının doğrusallaştırılması söz konusudur. Doğrusal olmayan maliyet fonksiyonları doğrusal fonksiyonlar türünden ifade edilmektedir. Böylece işlen yükünün doğrusal olmayan fonksiyonlara göre azaltılması hedeflenmektedir. Ancak lineerleştirme işlemi özellikle karmaşık sistemler için çoğu zaman uygulanabilir değildir. Dinamik programlama yöntemi gibi doğrusal programlama da gerçek zamanlı sürüşe uygulanmaya uygun değildir.

3.3.2.2. Gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri

Gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri, doğabilecek güç talebi öngörülerine dayanarak maliyet fonksiyonunu optimize edebilmek için gerçek zamanlı, anlık güç işleme esasına dayanmaktadır. Bu yöntem, matematiksel hesap gereksinimleri ve bellek gereksinimleri açısından bakıldığında gerçek zamanlı uygulamalar için uygun olmaktadır.

Bu yöntemde sürüş çevriminin önceden bilinmesi gerekmemektedir. Bu durum enerji yönetiminin gerçek zamanlı olarak uygulanabilmesini mümkün kılmaktadır.

Gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı yöntemlerden olan model öngörülü kontrol yönteminde, yol koşullarının önceden öngörülmesi ile bataryalarda depolanan elektrik enerjisinin efektif bir şekilde kullanılması sağlanır. Bir diğer gerçek zamanlı optimizasyon yöntemi olan eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu stratejisinde maliyet fonksiyonu anlık, gerçek zamanlı olarak optimize edilmektedir. Bu yöntemde maliyet fonksiyon iki kademelidir; fonksiyonun ilk kademesi sürücü güç talebinin karşılanması için içten yanmalı motor tarafından harcanan yakıt miktarını, ikinci kademesi ise batarya SoC değerinin korunması için içten yanmalı motor kullanıldığı durumda içten yanmalı motor tarafından harcanan yakıt miktarıdır. Her bir kademede anlık olarak yapılan optimizasyon sonucu elde edilen yakıt tüketimlerinden toplam yakıt tüketimine geçilir.

Yukarıda açıklanan; deterministik kural tabanlı, bulanık mantık kural tabanlı, gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı ve global optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri, avantajları, dezavantajları ve uygulama alanları açısından Tablo 3.1.'de birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 3.1. Enerji yönetim stratejilerinin karşılaştırılması

Enerji Yönetim Stratejisi	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulamalar
Deterministik Kural Tabanlı	Kolay uygulanabilir, Hesap yükü yönünden avantajlıdır.	Parametrelerin detaylı olarak ayarlanması ve kalibre edilmesi gerekir, Optimum çözüm garanti etmez.	Yaygın olarak hibrid elektirkli araç prototiplerinde ve ticari uygulamalarda kullanılır.
Bulanık Mantık Kural Tabanlı	Bileşen değişkenliği açısından güçlüdür, Hesap yükü düşüktür,	Optimalite garanti etmez, Bulanık mantık üyelik fonksiyonlarının ve kurallarının kalibre edilmesi gerekir.	Hibrid elektirkli araç prototiplerinde ve ticari uygulamalarda kullanılır.
Gerçek Zamanlı Optimizasyon Tabanlı	Kolay uygulanabilir, Giriş parametrelerinde gürültü görülmez. Hibrid elektrikli araçlarda uygulanma potansiyeline sahiptir, Optimuma yakın sonuç elde edilebilmektedir.	Global optimum sonuç elde edilemez, Mevcut kontrolörlere uygulanma noktasında zorluklar yaşanır.	Hibrid elektrikli araç prototiplerinde uygulanır.
Global Optimizasyon Tabanlı	Optimum sonuç elde edilebilmektedir, Kalibrasyona ihtiyaç duymaz.	Karmaşık hesaplamalar gerektirir, Direkt olarak uygulanamaz, Sürüş çevrimi ile ilgili ön bilgilendirmeye ihtiyaç duyar.	Bazı hibrid elektrikli araçların performanslarının belirlenmesinde kullanılır, Diğer enerji yönetim stratejilerinin verimliliklerinin değerlendirilmesinde kullanılır, Kural tabanlı stratejiler için uygulanabilir kuralların türetilmesinde kullanılır,

BÖLÜM 4. BULANIK MANTIK KURAL TABANLI ENERJİ YÖNETİM STRATEJİSİ

4.1. Bulanık Mantık Temelleri

4.1.1. Bulanık mantık kavramı

Kontrol sistemleri ile ilgili en büyük sıkıntılardan biri kontrol edilecek karmaşık, doğrusal olmayan sistemlere ait matematiksel modellerin, sistem davranışlarını tam olarak yansıtacak şekilde çıkarılamamasıdır. Sistem kontrolü açısından bakıldığında, sistem ile ilgili matematiksel modelin türetilmediği durumlarda klasik kontrol teorisi verimli olmamaktadır. Bu noktada, matematiksel modellerinin türetilmediği sistemlerin kontrolü için, ortaya atılan farklı bir yaklaşımdan yararlanılmaktadır.

Bulanık mantık olarak nitelenen bu yaklaşım ilk olarak 1965 yılında Azeri bilim adamı Lotfi Zadeh tarafından ortaya atılmıştır [61], [62]. Zadeh, bazı felsefi problemleri ele alarak makineler düşünebilir mi? sorusuna ve dolayısıyla yapay zeka sorunlarına tatmin edici cevaplar vererek iki değerli klasik mantığa, teknoloji üreten ve teknoloji ile desteklenen güçlü bir alternatif önermiştir [63].

Bulanık mantık, nesneleri ve değerleri gerçeğe daha yakın ve daha uygun olarak betimlemeyi amaçlamaktadır; betimleme matematiğin elverdiği oranda başarılı olmaktadır. Zadeh'e göre; bulanık mantık her şeyin bir derece meselesi olduğu insani akıl yürütme için bir modeldir; temelinde kelimeler aracılığı ile matematiksel hesaplamalar yapabilme imkanı sunmaktadır [64].

İkili Aristo mantığı olarak da bilinen klasik mantıkta kesin değerler bulunmaktadır; 0 veya 1, var veya yok gibi. Burada bir eleman bir kümenin elemanıdır veya değildir ve bu eleman ancak ve ancak kesin değerler alabilmektedir. Bu tür kümelere kesin

kümeler denir. Bulanık mantık ise kesin değerlerin yanında ara değerlerin de varlığı ile ilgilenmektedir. Buna göre 0 ile 1 arasında 0.1, 0.2, 0.3, ... 0.9 gibi ara değerler de bulunmaktadır ve bu değerler birden fazla kümeye ait olabilirler. Bu kümelere bulanık küme denir. Bir elemanın bulanık bir kümeye ait olma durumu üyelik fonksiyonları ile ifade edilmektedir. Üyelik fonksiyonları, söz konusu elemanın o kümeye ne oranda dahil olduğunun göstergesidir.

Örneğin, klasik mantıkta bir varlık güzel ya da çirkin olarak, net ifadelerle nitelenir. Bulanık mantık ise bu nitelemenin kısmen güzel ya da kısmen çirkin şeklinde yapılabilmesine de olanak tanımaktadır; bulanık mantık insan zihnine benzer şekilde sistemlerin, olayların veya durumların analiz edilmesini mümkün kılmaktadır.

Bulanık mantığın sağladığı başlıca avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Bulanık mantık, insan düşünce sistemine ve insan zihninin çalışma tarzına yakındır, bu nedenle anlaşılması kolay bir yapıya sahiptir,
- Gerçeklenmesi basittir,
- Gerçek yaşamda olduğu gibi belirsiz, zamanla değişen, karmaşık sistemlerin denetimi için basit çözümler önerir,
- Üyelik fonksiyonlarının kullanılması sayesinde diğer kontrol yöntemleri ile kıyaslandığında daha esnek yapıya sahiptir,
- Kesinlik ifade etmeyen bilgilerin kullanılması mümkün olmaktadır,
- Doğrudan insan deneyimlerinden faydalanılabilmesine olanak sağlar,
- Klasik kontrol yöntemleriyle uyumludur, farklı yapılarda kontrolör tasarımına imkan sağlar,
- Sinyallerin ön işleme tabi tutulmaları ve geniş bir alana yayılan değerlerin nispeten az sayıda üyelik fonksiyonlarına indirgenmeleri nedeni ile bulanık mantık kontrol için genellikle küçük boyutlarda yazılımlar yeterli olur.

Bunun yanında, uygulamada kullanılan kuralların uzmanlık ve deneyim gerektiriyor olması ve üyelik fonksiyonlarının deneme yanılma yoluyla belirlenmesi ve bu nedenle vakit alması, bulanık mantık için söylenebilecek başlıca dezavantajlardır. Ayrıca

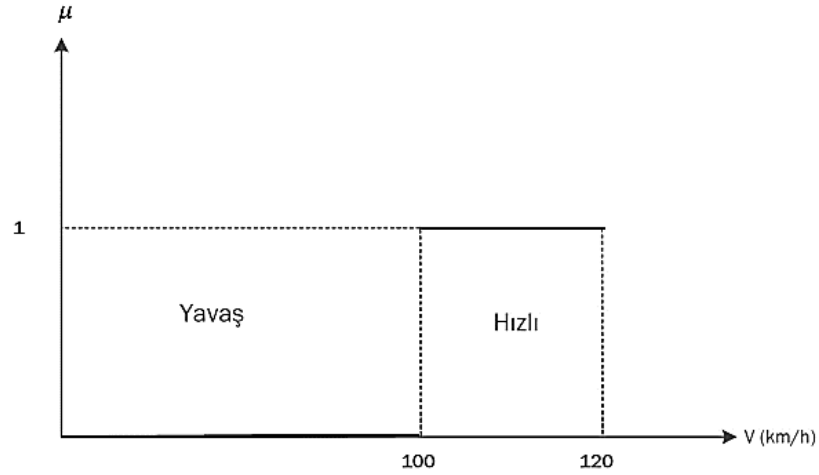
bulanık mantık ile denetimi yapılacak olan sistemin kararlılık analizinin yapılamaması ve sistem cevabının önceden kestirilememesi bulanık mantık için büyük sorundur.

Hibrid elektrikli araçların bulanık mantık ile kontrolü ve enerji yönetimi ile ilgili son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır [1], [3], [5], [8], [9], [10], [12], [13], [15], [19], [25], [26]. Bu çalışmalar ile ilgili detaylı bilgi, Bölüm 1.3.'te, literatür çalışması başlığı altında verilmiştir. Buna göre bulanık mantık; karmaşık, bilinmeyen parametrelere sahip, zamanla değişen ve doğrusal olmayan hibrid elektrikli araç sistemlerinin kontrolü için güçlü bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.1.2. Bulanık küme teorisi ve üyelik fonksiyonları

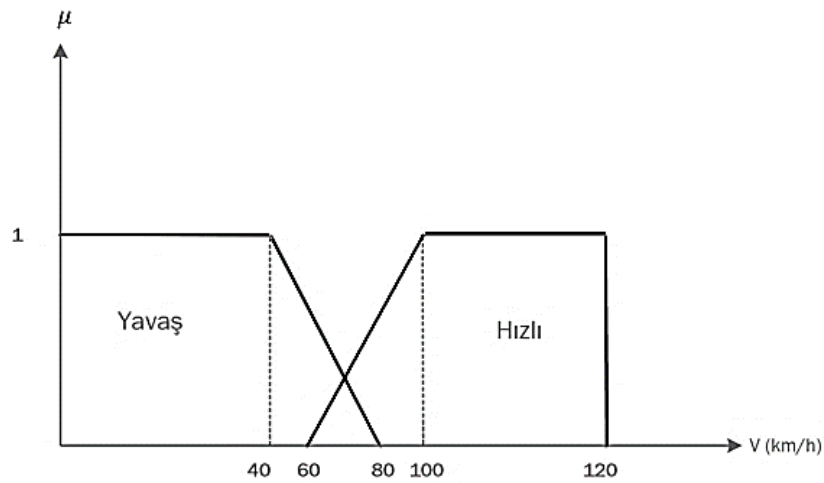
Bulanık mantık teorisinin temeli bulanık kümelerle dayanmaktadır. Klasik mantıkta, yukarıda açıklandığı gibi, bir eleman bir kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Örneğin otoyolda seyretmekte olan bir otomobil ele alalım. Bu otomobilin seyir hızının hangi değer altında olması halinde yavaş olarak niteleneceği ile ilgili kesin bir sınır yoktur. Ancak bu hız değerlerinin yavaş olarak kabul edilebileceği bulanık düzeyler bulunmaktadır. Kümenin sınırlandırılmasında karşılaşılan bu belirsizlik, bulanık küme teorisinde 0 ve 1 arasında değerler alabilen üyelik fonksiyonları ile ifade edilmektedir. Bulanık küme teorisinde bir kümenin elemanları, o kümeye 0 ile 1 arasında değişen üyelik dereceleri ile ait olmaktadır. Bulanık küme yaklaşımı; belirsizliğin formülize edilmesi, parametrik hale getirilmesidir.

Klasik mantıkta otomobil, 100 km/h hız ile otoyolda seyrederken hızlı olarak nitelenirken 99,5 km/h hız ile seyretmesi yavaş olarak nitelenmektedir. Fakat gerçekte sınırlar böylesine net çizilememektedir. Şekil 4.1.'de klasik mantık küme teorisine göre aracın hızı betimlenmiştir. Görüldüğü üzere küme elemanları ya 0 değerini alarak yavaş olarak nitelenmekte ya da 1 değerini alarak hızlı olarak nitelenmektedir.



Şekil 4.1. Klasik küme teorisi

Bulanık küme teorisinde ise 0-40 km/h hız aralığı yavaş olarak nitelenirken bu bölgede bulanık küme üyelik derecesi 1'dir. Yani 0-40 km/h aralığı bulanık küme tam üyeliğine sahiptir. Aynı şekilde 100-120 km/h hız aralığı bulanık küme tam üyeliğine sahiptir ve üyelik derecesinin değeri 1'dir. Bunun yanı sıra 60-80 km/h hız aralığı bulanık kümelerin birbirleri ile kesiştiği aralıktır. Bu bölgedeki değerler hem yavaş hem hızlı olarak değerlendirilebilir ki bu, daha başarılı bir değerlendirme ortaya koymamızı sağlamaktadır. Bu noktada, bu değerlerin hangi oranda hangi bulanık kümeye ait olarak nitelendirileceğinin kararı üyelik derecesi ile belirlenmektedir. Şekil 4.2.'de bulanık küme teorisine göre aracın hızı betimlenmiştir. Yavaş ve hızlı kümelerine ait kesin değerler bulanıklaştırılarak sezgisel bir gösterim elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Bulanık küme teorisi

Bulanık küme teorisinde bir elemanın herhangi bir bulanık kümeye olan üyelik derecesini belirleyebilmek için üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. “X” evrensel kümesi içerisinde tanımlanan “A” bulanık kümesi için “ α ”, A kümesinin bir elemanı ve “ $\mu_A(\alpha)$ ” üyelik fonksiyonu Denklem 4.1.’deki gibi tanımlanır [61].

$$A = \{ (\alpha \ \mu_A(\alpha)) \mid \alpha \in X \} \quad (4.1)$$

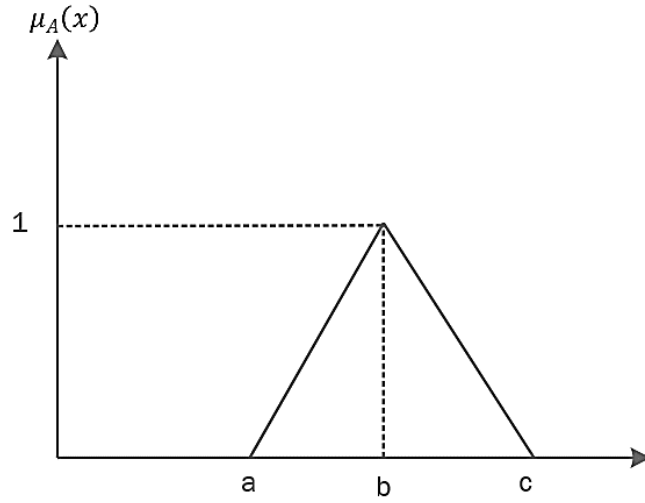
Buna göre üyelik fonksiyonu, [0, 1] aralığında değerler alabilen ve bir kümenin elemanlarının o kümeye hangi üyelik derecesi ile ait olduğunu gösteren fonksiyondur.

Bir sistem açısından ele aldığımızda üyelik fonksiyonları, sisteme atanan bulanık değişkenlerin olası değerleri için her bir üyeliğin derecesini göstermektedir. Üyelik dereceleri genellikle dilsel veriler ile belirlenmektedir.

Üyelik fonksiyonları grafiksel olarak ifade edilirler. Bu grafikler genellikle üçgen, yamuk ve çan şeklinde olmaktadır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonları aşağıda açıklanmıştır.

- *Üçgen Üyelik Fonksiyonu:* yukarıda tanımlanmış olan A bulanık kümesine ait üçgen üyelik fonksiyonuna ait matematiksel gösterim Denklem 4.2.’deki gibidir ve grafiksel olarak Şekil 4.3.’te gösterilmiştir;

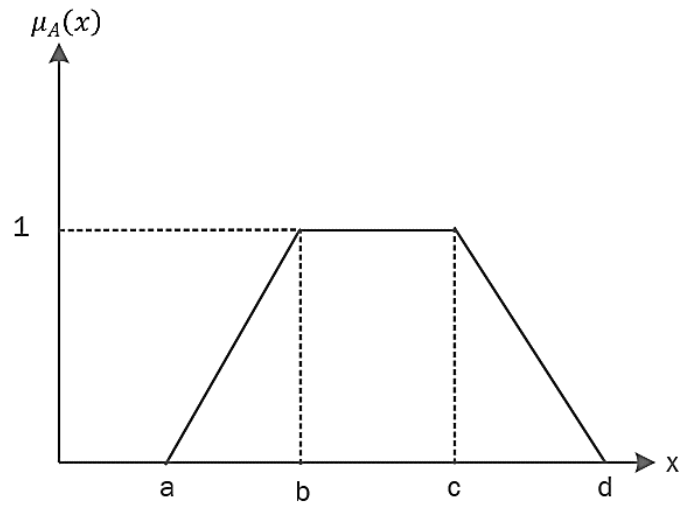
$$\mu_A(x) = \mu_A(x; a, b, c) \begin{bmatrix} \frac{(x-a)}{(b-a)} & a \leq x < b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)} & b \leq x < c \\ 0 & x > c \text{ veya } x < a \end{bmatrix} \quad (4.2)$$



Şekil 4.3. Üçgen üyelik fonksiyonu

- *Yamuk Üyelik Fonksiyonu:* yukarıda tanımlanmış olan A bulanık kümesine ait yamuk üyelik fonksiyonuna ait matematiksel gösterim Denklem 4.3.'teki gibidir ve grafiksel olarak Şekil 4.4.'te gösterilmiştir;

$$\mu_A(x) = \mu_A(x; a, b, c, d) \left[\begin{array}{ll} \frac{(x-a)}{(b-a)} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} & c \leq x < d \\ 0 & x > d \text{ veya } x < a \end{array} \right] \quad (4.3)$$



Şekil 4.4. Yamuk üyelik fonksiyonu

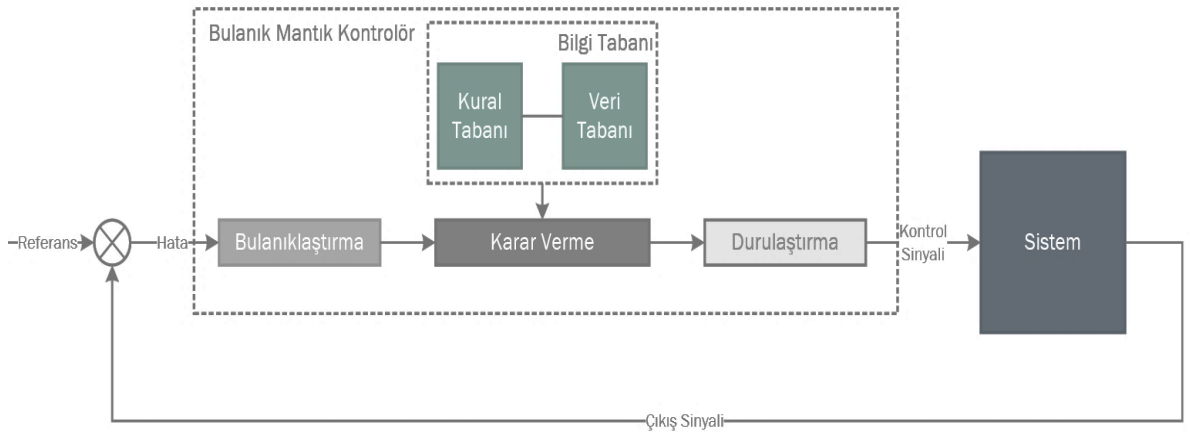
Bu türlerden hangisini kullanılacağı ve kullanılacak olan üyelik fonksiyonu sayısı tamamıyla tasarımcı insiyatifindedir. Çözümün hassasiyeti açısından bakıldığında üyelik fonksiyonunun türünün doğru belirlenmesi ve üyelik fonksiyonu sayısının fazla olması çözüm hassasiyetini arttırmaktadır. Sistem kontrolörünün temeli üyelik fonksiyonlarıdır; bu nedenle üyelik fonksiyonları üzerinde oldukça hassas bir şekilde çalışılmalıdır.

Üyelik fonksiyonlarını önemli kılan bir diğer etken de bulanık küme ile ilgili tüm bilgilerin üyelik fonksiyonları aracılığı ile tanımlanıyor olmasıdır.

4.2. Bulanık Mantık Kontrolör

Bulanık mantık kontrolör tasarımında denetimi yapılacak olan sistemin matematiksel modeline ihtiyaç yoktur. Bu, dinamik, zamanla değişen ve çok bilinmeyenli sistemlerin kontrolü için çok büyük bir avantajdır. Hibrid elektrikli araç kontrolünde ve enerji yönetiminde bulanık mantık kontrolörlerin kullanılmasının başlıca sebeplerinden biri de budur. Bulanık mantık kontrolörde sistemin matematiksel modeli yerine sistemin davranışı konusunda detaylı bilgi sahibi, tecrübeli kişilerin sahip oldukları bilgilerden faydalanılmaktadır.

Bulanık mantık kontrolör dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler şu şekilde sıralanabilir; bulanıklaştırma birimi, bilgi tabanı, karar verme birimi ve durulaştırma birimi. Şekil 4.5.'te bulanık mantık kontrolör yapısı görülmektedir.



Şekil 4.5. Bulanık mantık kontrolör yapısı

4.2.1. Bulanıklaştırma

Bulanık mantık kontrol sürecinin ilk aşaması olan bulanıklaştırmada ölçüm yoluyla dış dünyadan alınarak kontrolöre beslenen, sayısal değere sahip giriş verileri, kontrolörün bilgi tabanındaki üyelik fonksiyonları tarafından dilsel ifadelere dönüştürülmektedir.

Bulanıklaştırma birimi, giriş verilerinin sayısal değerlerini karar verme biriminde kullanılacak bilgilere dönüştürmektedir. Bulanıklaştırma modülü temel olarak giriş verilerini uygun bulanık mantık kümelerine üyelik fonksiyonu ile birlikte eşleştirir; gerçek sayısal bir değeri dilsel ifadeye dönüştürmektedir.

4.2.2. Bilgi tabanı

Bulanık mantık kontrolörün bilgi tabanı, veri tabanı ve kural tabanından oluşmaktadır. Genel anlamda bilgi tabanı dilsel kontrol kurallarını kapsarken kural tabanı kontrol amaçlarını ve kontrol stratejisini belirlemektedir.

4.2.2.1. Veri tabanı

Veri tabanının görevi; bulanıklaştırma birimi, kural tabanı ve durulaştırma biriminin uygun işlevi yerine getirebilmesi için gerekli bilgiyi sağlayabilmektir. Bu üç birimin uygun işlevi yerine getirmesi için gerekli olan bilgi; kontrolör giriş ve çıkış değişkenlerinin dilsel değerlerini tanımlayan üyelik fonksiyonlarını ve bunların ölçeklendirme faktörlerini kapsamaktadır.

Bulanık mantık kontrolörünün her bir değişkeni için evrensel kümenin tanım aralığının belirlenmesi, bulanık küme sayısının belirlenmesi ve üyelik fonksiyonlarının seçilmesi ile birlikte veri tabanı oluşturma işlemi tamamlanmış olur. Her bir değişken için tanımlanacak bulanık küme ve üyelik fonksiyonu sayısı bulanık mantık kontrolörünün hassasiyetini belirleyen temel faktördür.

4.2.2.2. Kural tabanı

Kural tabanı, bulanık mantık kontrolörün giriş ve çıkış parametreleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan kurallardan oluşmaktadır. Kontrolün stratejisi kural tabanı ile belirlenmektedir; kontrol stratejisinin ifade edilmesi için uygun bir yoldur. Kural tabanının yapısı direkt olarak tasarımcının deneyimine bağlıdır. Kural tabanında temel olarak giriş verileri ile çıkış verileri arasındaki ilişki belirlenmektedir.

Bulanık mantık kontrolörün denetim kuralları şu şekilde olmaktadır;

“Eğer , O halde” veya “If , Then.....”

Kuralın eğer kısmı şart kısmıdır ve kontrolörün giriş verisi bu kısımda bulunur; o halde kısmı ise sonuç kısmıdır ve kontrolörün çıkış verisi bu kısımdadır.

Bu kurallar, uzman deneyimlerinden ve tecrübelerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda oluşturulmaktadır. Bulanık mantık kontrolörün etkinliği, hassasiyeti bu kuralların efektif bir şekilde belirlenebilmesine bağlıdır.

4.2.3. Karar verme

Karar verme işlemi ile insanın karar verme yeteneğine benzeyen bir şekilde bulanık kavramları işleyerek çıkarımlar yapılır ve gerekli sistem kontrolü belirlenir.

Karar verme aşamasında, kesin değerlere sahip olan giriş verilerinin bulanıklaştırılması ile elde edilen dilsel verilerin ve bulanık kuralların belirlenmesinin ardından belirlenen kurallar çerçevesinde sonuçlar elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar bulanık formdadır yani dilsel veriler şeklindedir. Bu sonuçların hangi oranda geçerli olduğu da yine girişteki üyelik dereceleri tarafından belirlenmektedir. Bulanık karar verme mekanizması ile üyelik derecelerini ve kural tabanını kullanarak bir bulanık küme oluşturulur ve bulanık mantık kontrolörünün çıkış değerlerinin hesaplanması için durulaştırma aşamasında kullanılır.

4.2.4. Durulaştırma

Durulaştırma ile bulanık bir ifadeden bulanık olmayan bir ifade elde edilir. Bulanık karar verme işlemi sonucunda elde edilen dilsel veriler, fiziksel bir sistemde kullanılabilmesi için durulaştırma işlemi ile kesin değerlere dönüştürülmektedir. Durulaştırma, bulanık prosesin ilk aşaması olan bulanıklaştırma işleminin tam tersi olarak ifade edilebilir.

Farklı durulaştırma yöntemleri bulunmaktadır. Bulanık mantık kontrolörün performansı için durulaştırma yönteminin doğru belirlenmesi önemlidir. Literatürde yaygın kullanılan durulaştırma metotları şöyledir; ağırlık merkezi metodu, merkezlerin ağırlıklı ortalaması metodu, domen üzerinde en büyük bölgenin merkezinin hesaplanması metodu, maksimumların ortalaması metodu.

En yaygın kullanılan durulaştırma metodu ağırlık merkezidir. Çalışma kapsamında ağırlık merkezi metodu kullanılmıştır. Ağırlık merkezi metodu, birleştirilmiş üyelik fonksiyonlarının altında kalan alanın merkezini belirleme üzerine kuruludur. Hesaplama yükü fazladır ve hesaplamalar karmaşıktır. Bu nedenle çıkarım yavaş gerçekleşmektedir. Ağırlık merkezi metodu ile kesin değer çıkarımı ayrık zaman için Denklem 4.4.'te, sürekli zaman için Denklem 4.5.'te yapılmaktadır:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^1 u_i \mu_{\text{çıkarım}u}(u_i)}{\sum_{i=1}^1 \mu_{\text{çıkarım}u}(u_i)} \quad \text{Ayrık zaman gösterimi,} \quad (4.4)$$

$$u = \frac{\int u \mu_{\text{çıkarım}u}(u) du}{\int \mu_{\text{çıkarım}u}(u) du} \quad \text{Sürekli zaman gösterimi} \quad (4.5)$$

Burada u_i ; i. Üyelik fonksiyonunu, $\mu_{\text{çıkarım}u}(u_i)$ ise i. Üyelik derecesini ifade etmektedir.

Durulaştırma işleminin yapılması, kontrolör çıkışları dijital bir sistem tarafından kullanılıyorsa elzemdir.

4.3. Bulanık Mantık Kural Tabanlı Enerji Yönetim Stratejilerinin Tasarımı

Hibrid elektrikli araçlarda enerji verimliliğini arttırabilecek ve güç organlarının en verimli oldukları çalışma aralıklarında çalışmasını sağlayacak enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesi hibrid elektrikli araçlar açısından büyük önem arz etmektedir. Değişken yol koşulları ve doğrusal olmayan sürüş koşulları nedeniyle hibrid elektrikli araç, Bölüm 3.2.'de açıklandığı üzere değişik modlarda çalışmaktadır. Değişken çalışma modları boyunca bataryanın şarj ve deşarj dengesini korumak aynı zamanda içten yanmalı motor ve elektrik motoru arasındaki tork dağılımını kontrol etmek oldukça karmaşıktır. Tez kapsamında yapılan çalışmada, önerilen bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejileri ile bu kompleks optimizasyon problemine dair verimli bir çözüm önerisinde bulunulmuştur.

Bölüm 3.2.'de bahsedildiği üzere hibrid elektrikli araçlarda hiyerarşik kontrol düzeni söz konusudur. Bu nedenle farklı seviyelerde kontrolörler ve kontrol stratejilerinden bahsetmek mümkündür. Tez kapsamında tasarımı yapılan enerji yönetim stratejileri üst seviye olup hibrid elektrikli aracın güç aktarma organları arasındaki enerji akışının denetimini sağlamaktan sorumludur; çalışma modları arasındaki geçiş ve alt seviye bileşenlerin kontrolü üst seviye enerji yönetim stratejisi tarafından yapılmaktadır.

Tez kapsamında, üst seviye enerji akış yönetimi için iki ayrı bulanık mantık kural tabanlı stratejisi önerilmiştir. Bu bölümde, önerilen bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejileri açıklanacaktır. Enerji yönetim stratejilerinin tasarımında temel alınan parametreler egzoz emisyonlarının azaltılması ve yakıt tüketiminin düşürülmesi olmuştur. İki ayrı strateji önerilmiş ve bu stratejiler NREL tarafından tasarlanarak ADVISOR içerisine gömülen referans strateji ile karşılaştırılmıştır. Strateji-A ve Strateji-B olarak isimlendirilen iki ayrı enerji yönetim stratejisi için kontrolör yapıları aynı olup bulanık mantık kuralları ve üyelik fonksiyonları farklı olarak belirlenmiştir.

Stratejilerin amaçları özetlenecek olursa; Strateji-A, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının düşürülmesinin yanında batarya SoC değerinin korunmasına hatta mümkünse arttırılmasına odaklanılarak oluşturulmuş bir kural tabanı ile tasarlanmıştır.

Strateji-B ise tamamiyle yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını düşürmek üzerine odaklanılarak oluşturulan kural tabanı ile tasarlanmıştır.

Bu bölümde, giriş ve çıkış parametrelerinin belirlenmesi, Strateji A, Strateji B ve Referans Strateji için bulanık mantık kuralları, üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi ile yapılan tasarım ve değişikliklerin ADVISOR üzerine nasıl implemente edileceği açıklanacaktır.

4.3.1. Bulanık mantık kontrolör yapısının açıklanması

Bu bölümde bulanık mantık kontrolörün yapısına dair bilgi verilecektir. Bulanık mantık kontrolör yapısı ADVISOR'dakine benzer şekilde ele alınmıştır. Belirli yerlerde ADVISOR Matlab fonksiyonları değiştirilmiştir.

Bulanık enerji kontrolörüne ait iki giriş bir çıkış parametresi belirlenmiştir.

Giriş parametreleri:

- SoC : Batarya şarjlılık oranı,
- $T_{SÜRÜCÜ}$: Sürücü tarafından talep edilen, aracın toplam tahrik torkudur; hızlanma, araca etkiyen aerodinamik sürüklenme, yol şartları gibi parametreler sonucu anlık olarak belirlenir. Simülasyon çalışması için bu değer sürüş çevrimi tarafından belirlenmektedir.

Çıkış parametresi:

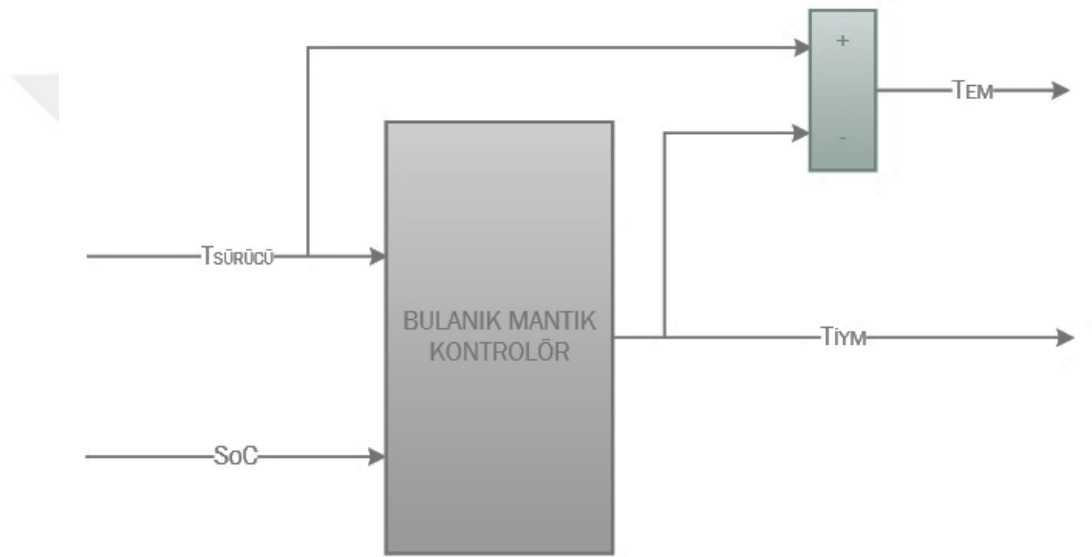
- $T_{İYM}$: İçten yanmalı motor torku.

Sürücü tarafından talep edilen araç tahrik torku, aracın çalışma moduna göre içten yanmalı motor torku ile elektrik motoru torkunun toplamından meydana gelmektedir. Buna göre sürüş çevrimi boyunca elektrik motoruna ait tork değeri Denklem 4.6. ile hesaplanır;

$$T_{EM} = T_{SURUCU} - T_{IYM} \quad (4.6)$$

Buna göre bulanık mantık üst seviye enerji kontrolörü, batarya şarjlılık oranı ve sürücü tarafından talep edilen tork değerlerine göre içten yanmalı motorun üretmesi gereken tork değerini belirler.

Bulanık mantık üst seviye enerji kontrolörünün yapısı, giriş, çıkış parametreleri ve bunlar arasındaki ilişki Şekil 4.6.'da görülmektedir.



Şekil 4.6. Bulanık mantık üst seviye kontrolör yapısı

4.3.2. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi

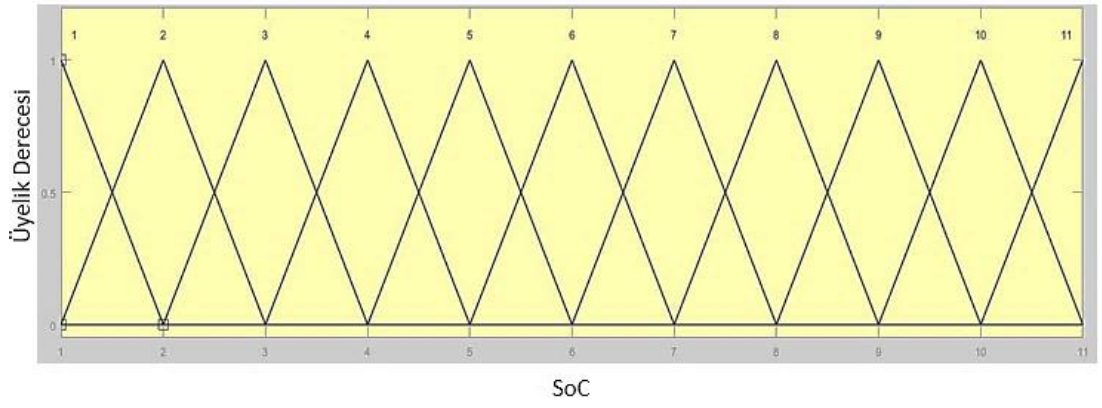
Her bir giriş ve çıkış parametresine karşılık birer üyelik fonksiyonu belirlenmektedir. Tüm üyelik fonksiyonları üçgen tipindedir.

Üyelik fonksiyonlarında, giriş ve çıkış parametrelerinin durumlarına tasarımcının uzmanlığının veya deneyiminin daha net bir şekilde yansıtılabilmesi adına 1'den 11'e kadar ölçeklendirme yolu tercih edilmiştir. Bu tercih şu şekilde açıklanabilir; giriş ve çıkış parametrelerine ait üyelik fonksiyonları, dilsel verilerle, “Düşük”, “Orta”, “Yüksek” şeklinde ifade edilmeye çalışılırsaydı, üyelik fonksiyonlarının taradığı alan

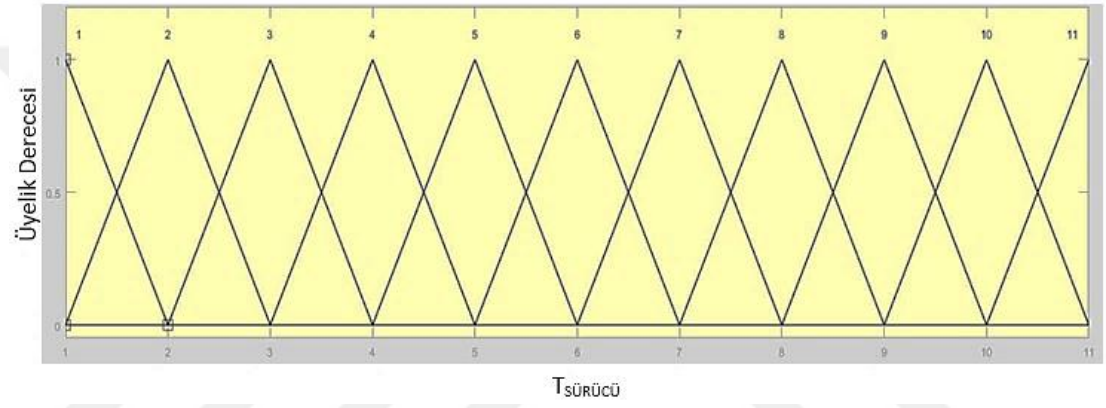
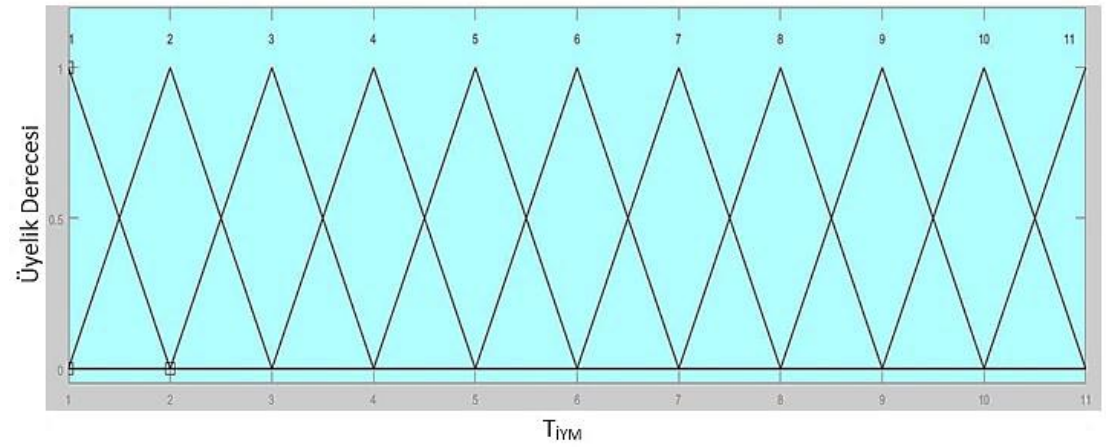
yeterince geniş olamayacaktı; dilsel ifadelerin fazlaca çoğaltılması ile birlikte hem üyelik fonksiyonlarının işlem yükü artacak dolayısıyla dosya boyutu büyüyecek ve işlem hızı azalacaktır hem de bulanık mantık kuralları oluşturulurken karmaşaya sebep olacaktır. Üyelik fonksiyonlarının taradığı alanın arttırılabilmesi, kurgulanacak olan stratejinin daha hassas olması adına üyelik fonksiyonları “1”, “2”, “3”, ... “11” şeklinde dilsel ifadelerle ifade edilmiştir. Yani “Çok Düşük” ifadesine karşılık burada “1” ifadesi kullanılmıştır.

Bunun yanında ADVISOR Matlab kodları, belirlenen değer aralıklarında, giriş ve çıkış parametrelerini 1, 11 aralığında lineer interpolasyonla ölçekler. Yapılan tasarımda SoC giriş değişkeni için değer aralığı [0.6, 0.7] olarak belirlenmiştir. Bu değer aralığı ifadesi, batarya şarjlılık oranının %60 ila %70 arasında değiştiği anlamına gelmektedir. Buna göre bataryanın SoC=0,6 değeri dilsel değişken olarak “1” şeklinde, SoC=0,7 değeri ise dilsel değişken olarak “11” şeklinde ifade edilmiştir. Ara değerler ise lineer interpolasyonla ölçeklendirilerek belirlenmektedir. Sürücü talep tork değeri için bir aralık belirlenmemiş olup sürüş çevrimine göre değişmektedir. Batarya SoC değerinde olduğu gibi 1, 11 aralığında ölçeklendirme yapılmaktadır. Çıkış parametresi olan içten yanmalı motor gücü için de aynı şekilde bir değer aralığı belirlenmemiştir. Ölçeklendirme işlemi, ADVISOR Matlab kodu içerisinde koşan fonksiyonlar ile yapılmaktadır.

Toparlanacak olursa; SoC giriş parametresi için {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11} bulanık kümesinde 11 adet üyelik fonksiyonu ve [0.6, 0.7] çalışma aralığı, TSÜRÜCÜ giriş parametresi için {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11} bulanık kümesinde 11 adet üyelik fonksiyonu ve T_{IYM} çıkış parametresi için {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11} bulanık kümesinde 11 adet üyelik fonksiyonu belirlenmiştir. SoC, T_{IYM}, TSÜRÜCÜ parametrelerine ait üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 4.7., Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.’da gösterilmiştir.

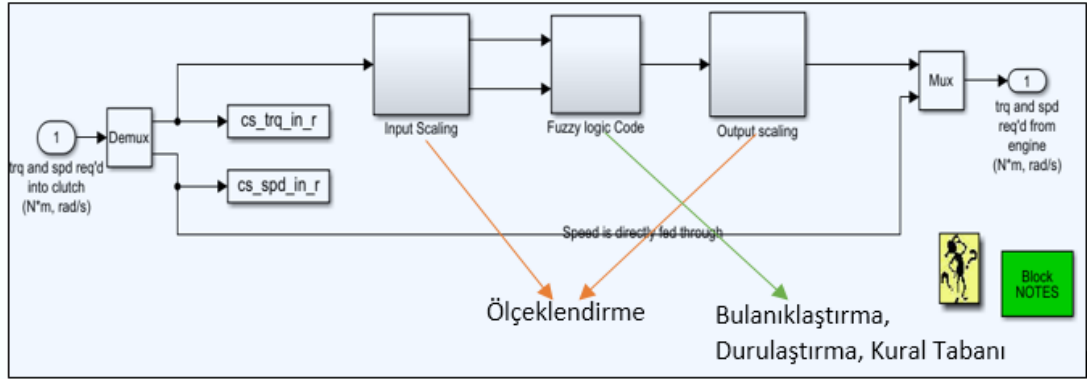


Şekil 4.7. SoC üyelik fonksiyonları

Şekil 4.8. T_{SÜRÜCÜ} üyelik fonksiyonlarıŞekil 4.9. T_{İYM} üyelik fonksiyonları

Ölçeklendirme, bulanıklaştırma ve durulaştırma işlemleri ADVISOR Matlab kodlarıyla yapılmıştır. Üyelik fonksiyonları ve değer aralıkları bu dosya üzerinde

tanımlanmıştır. Bu durum, Şekil 4.10'da, ADVISOR blok diyagramı üzerinde açıklanmıştır.



Şekil 4.10. Ölçeklendirme, bulanıklaştırma, durulaştırma ve kural tabanı için ADVISOR blokları

4.3.3. Enerji yönetim stratejilerine ait kural tabanının oluşturulması

Kontrolörün alt metninde yatan temel felsefe enerji yönetim stratejisindedir. Çalışma kapsamında iki farklı bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejisi tasarlanarak ADVISOR Matlab koduna implemente edilmiştir. Her bir strateji için ayrı kural tabanı oluşturulmuştur; stratejilerin karakteristiklerini belirleyen ana unsur kural tabanları olmuştur. Üyelik fonksiyonları, giriş parametreleri gibi önceki bölümlerde açıklanan kavramlar her bir strateji için aynıdır. Stratejilere ait kural tabanının nasıl oluşturulduğu ile ilgili bilgi bu bölümde verilecektir.

Enerji yönetim stratejilerine ait kural tabanlarının oluşturulma felsefesi şöyle açıklanabilir;

Strateji-A; hedef bölgesi olarak belirlenen şehir içinde yakıt ekonomisi ve egzoz emisyonlarını düşürmeye çalışırken batarya SoC değerinin de belirli bir oranda korunması üzerine kurgulanmıştır. Batarya deşarjının belirli bir oranın altına düşmesini önlemek amaçlanır. Bunun için içten yanmalı motor Strateji-B'ye göre daha yüksek tork değerlerinde çalıştırılmıştır. Böylece sürüş çevrimi boyunca, sürücü talep torku karşılanırken aynı zamanda bataryanın şarj olabilme aralığı arttırılmaya çalışılmıştır. İçten yanmalı motor ile elektrik motoru arasındaki yük paylaşımının

verimli bir şekilde yapılması sağlanarak elektrik motorunun olabildiğince aktif olması dolayısıyla bataryaya binen yükün azalarak şarjlılık oranının korunması hedeflenmiştir. Genel anlamda batarya, içten yanmalı motor verimli çalışma aralığında çalışırken doldurulup verimsiz çalışma aralığında çalışırken elektrik motorunu tahrike katkı sağlayacak şekilde kurallar oluşturulmuştur. Bataryanın yüksek şarjlılık oranlarında bile içten yanmalı motor torku yüksek tutulmuştur. Simülasyon için seçilen içten yanmalı motorun verim haritasına bakıldığında nispeten daha yüksek tork elde edilen bölgelerin daha verimli olduğu görülmektedir. Öte yandan yüksek tork bölgelerinin egzoz emisyonlarında artışa neden olduğu da bilinmektedir. Bu durum, kendi içinde ayrı bir optimizasyon problemi doğurmaktadır. Kurallar belirlenirken bu durum göz önünde bulundurularak içten yanmalı motor tork değerlerini çok yüksek değerlere çıkmamasına dikkat edilmiştir. Kurallar oluşturulurken içten yanmalı motorun olabildiğince verimli bölgede kalması hedeflenmiştir; yakıt tüketimi, egzoz emisyonları ve batarya şarjlılık değeri arasında olabildiğince bir denge kurulmaya çalışılmıştır.

Kurallar, ADVISOR tarafından önerilen, bundan sonra “Referans Strateji” olarak adlandırılacak olan “Verimlilik” stratejisi ile karşılaştırıldığında, içten yanmalı motor çıkış torkunun tasarımı yapılan Strateji-A’da, referans stratejiye göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 4.1.'de Strateji-A için bulanık mantık kural tablosu görülmektedir.

Tablo 4.1. Strateji-A için kural tablosu

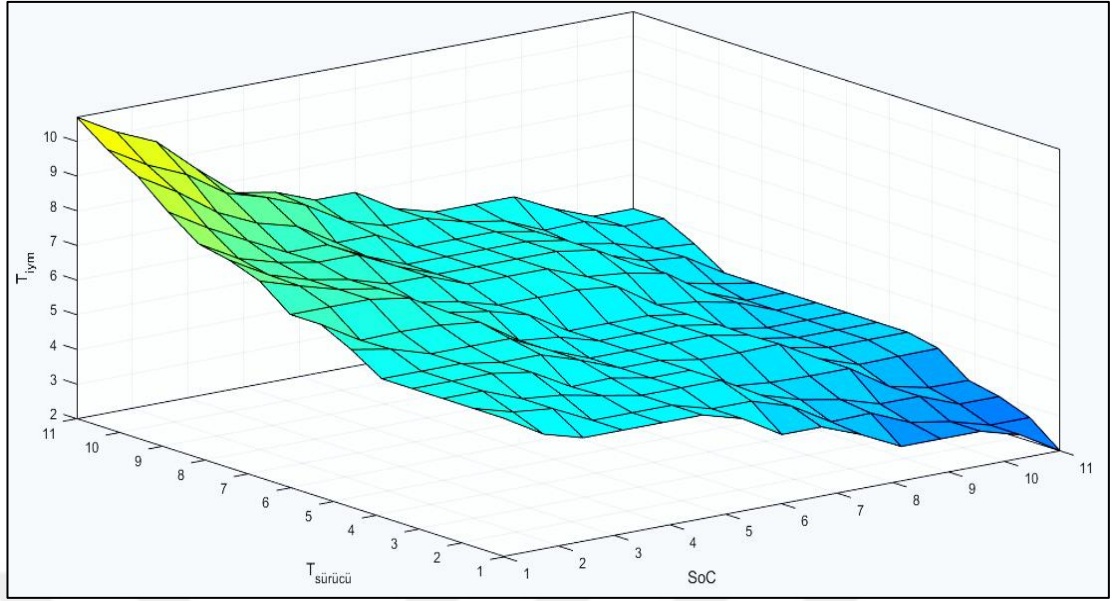
SoC T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	6	5	5	5	5	4	4	3	3	3	2
2	6	6	5	5	5	5	4	4	3	3	3
3	6	6	5	5	5	5	4	4	4	3	3
4	6	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4
5	7	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4
6	7	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4
7	8	7	7	6	6	6	6	5	5	4	4
8	8	7	7	7	6	6	6	6	5	4	4
9	9	8	7	7	6	6	6	6	5	5	4
10	10	9	8	7	7	6	6	6	5	5	5
11	11	10	9	8	7	6	6	6	6	5	5

Tabloyu açıklamak adına örnek olarak bir kural incelenecek olursa;

$$IF SoC = 1 \text{ and } T_{SURUCU} = 11 \text{ THEN } T_{IYM} = 11$$

SoC değeri çok düşük ve buna karşılık sürücü tarafından talep edilen tahrik gücü çok yüksekse içten yanmalı motor çıkış gücü çok yüksek olmalıdır.

Strateji-A için belirlenen kural tablosuna göre oluşturulan, bulanık mantık kontrolöre ait kuralların taradığı yüzey gösterimi Şekil 4.11.'de verilmiştir.



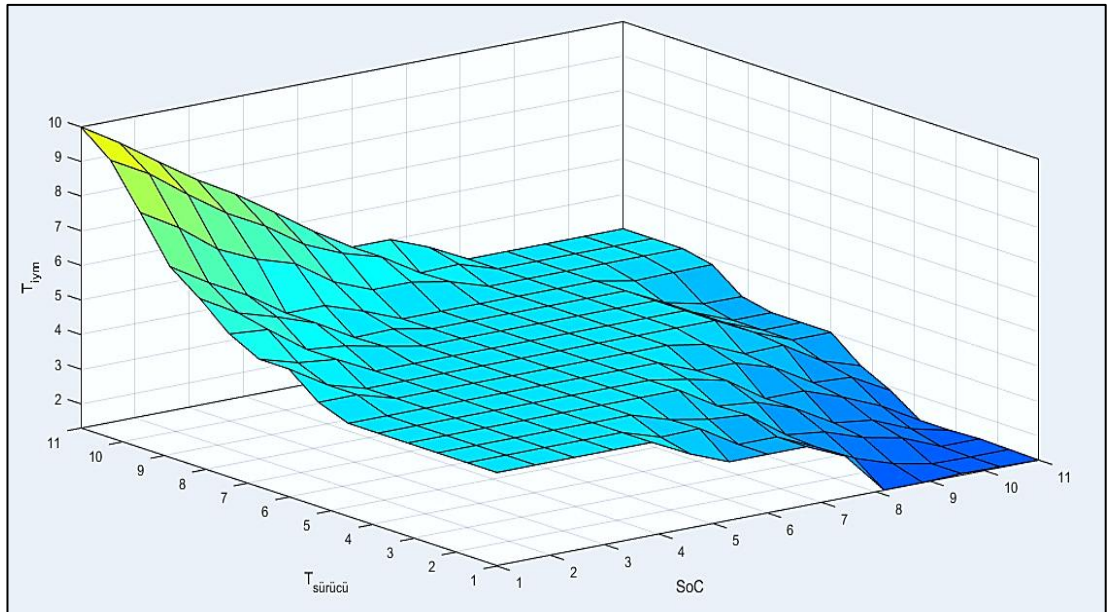
Şekil 4.11. Strateji-A için bulanık mantık yüzey gösterimi

Strateji-B ise şehiriçinde daha çok yakıt ekonomisi yapmak ve egzoz emisyonlarını düşürmek üzerine odaklanılarak oluşturulmuştur. Tasarımda öncelik yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının düşürülmesine tanınmış, batarya şarjlılık oranının korunması ikinci planda kalmıştır. Yakıt tüketimini düşürebilmek adına içten yanmalı motor çıkış torku düşük tutulmuştur. Bu esnada içten yanmalı motorun düşük verim bölgelerinde kalması da önlenmeye çalışılmıştır. İçten yanmalı motor daha çok kararlı çalışma bölgesinde tutulmaya çalışılmıştır. Kural tablosuna bakıldığında bataryanın yüksek şarjlılık değerleri için içten yanmalı motor çıkış torkunun minimumda tutulmaya çalışıldığı görülmektedir. Bu durum doğal olarak batarya SoC değeri üzerine olumsuz yansıyacaktır.

Tablo 4.2. Strateji-B için kural tablosu

SoC T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	3	3	2	1	1	1
3	4	4	4	4	4	4	3	3	2	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	1
5	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2
6	5	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
7	5	5	4	4	4	4	4	4	4	3	3
8	6	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3
9	7	6	5	5	4	4	4	4	4	4	4
10	9	8	7	6	5	5	4	4	4	4	4
11	10	9	8	7	6	5	5	4	4	4	4

Strateji-B için belirlenen kural tablosuna göre oluşturulan, bulanık mantık kontrolöre ait kuralların taradığı yüzey gösterimi Şekil 4.12.'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Strateji-B için bulanık mantık yüzey gösterim

ADVISOR tarafından geliştirilmiş olan, verimlilik odaklı bulanık mantık enerji yönetim stratejisine ait kural tablosu da Tablo 4.3.'te görülmektedir. Bu stratejide amaç, içten yanmalı motoru maksimum verimlilikte çalıştırmaktır. İçten yanmalı motorun çalışma noktaları, verimliliğin yüksek olduğu tork bölgelerinde olacak şekilde ayarlanmıştır.

Tablo 4.3. Referans strateji kural tablosu

$\frac{SoC}{T}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	7	6	6	5	5	4	4	4	4	3	3
2	7	6	6	6	5	5	4	4	4	4	3
3	7	6	6	6	6	5	5	4	4	4	4
4	7	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4
5	7	7	6	6	6	6	5	5	4	4	4
6	8	7	7	6	6	6	6	5	4	4	4
7	8	7	7	6	6	6	6	5	5	4	4
8	8	7	7	7	6	6	6	6	5	4	4
9	9	8	7	7	6	6	6	6	5	5	4
10	10	9	8	7	7	6	6	6	5	5	5
11	11	10	9	8	7	7	6	6	6	5	5

Simülasyon çalışmalarında bu üç strateji, belirlenen iki ayrı sürüş çevrimi için Matlab kodu üzerine implemente edilerek simülasyonlar ayrı ayrı koşturulmuş ve ölçümler alınmıştır.

BÖLÜM 5. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

5.1. Simülasyon Ortamı: ADVISOR

Tez kapsamında tasarımı yapılan bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejileri, ADVISOR programı üzerine implemente edilmiş ve ADVISOR tarafından sunulan sistem modeli kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, simülasyon çalışmalarında kullanılan ADVISOR programı açıklanacaktır.

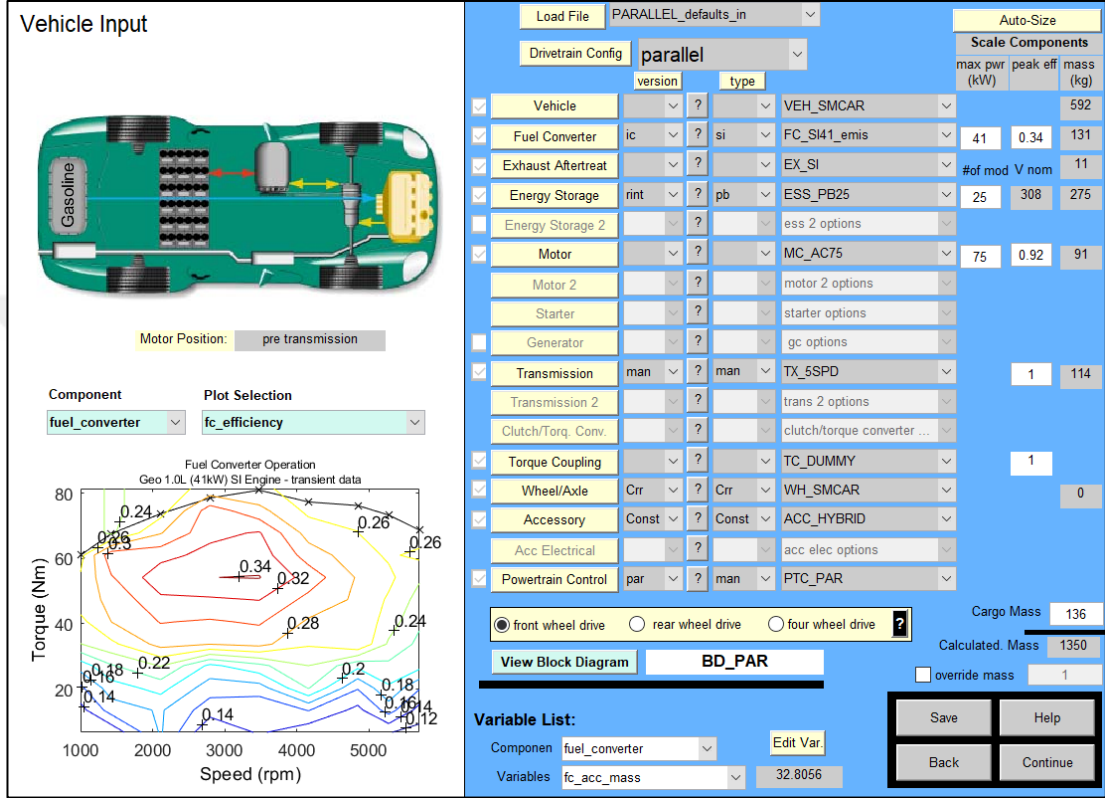
ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator), NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilmiş açık kaynak kodlu bir simülasyon programıdır. Ford, Daimler Chrysler, General Motors ile Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı arasında imzalanan hibrid elektrikli araç teknolojileri geliştirme antlaşması kapsamında geliştirilmiştir.

ADVISOR, Matlab-Simulink tabanlı bir programdır. Programın yapısı model, veri ve script setlerinden oluşmaktadır. Program aracılığı ile konvansiyonel, hibrid elektrikli ve tam elektrikli araçların dinamik analizleri yapılmaktadır. Özellikle hibrid elektrikli araçlarda güç aktarma organları arasındaki güç akışının analizinde program başarılı çıktılar üretmektedir.

Toparlanacak olursa ADVISOR ile konvansiyonel, hibrid ve tam elektrikli araçlar ile ilgili, yakıt tüketimi, egzoz emisyonları, hızlanma ve tırmanma gibi kabiliyetler, batarya şarjlılık durumunun değişimi gibi parametreler yine program üzerine tanımlı sürüş çevrimleri boyunca veriler elde edilebilmektedir.

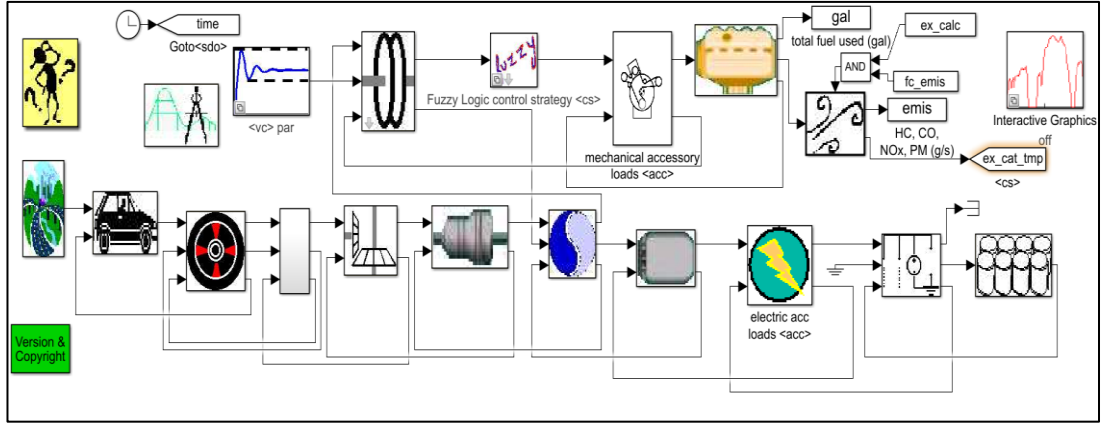
ADVISOR açık kaynak kodlu bir programdır; .m dosyaları üzerinde değişiklik yapılarak tasarımcı tarafından istenilen değişimler kolayca simülasyona yansıtılabilmektedir. Program ayrıca bir GUI yardımıyla güç aktarma organları

konfigürasyonlarının belirlenebilmesine, içten yanmalı motor, batarya, elektrik motoru, egzoz sistemi, kontrol sistemi ile ilgili parametrelerin değiştirilebilmesine ve ilgili konfigürasyonlara ait Simulink blok diyagramlarının gösterilebilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 5.1.'de ADVISOR kullanıcı arayüzü görülmektedir.



Şekil 5.1. ADVISOR kullanıcı arayüzü

ADVISOR dosya yapısı girdi scriptleri, çıktı scriptleri, kontrol scriptleri ve blok diyagramlarından oluşmaktadır. Girdi scriptleri değişkenlerin tanımlanması için kullanılır. Girdi scriptlerinden gelen girişlere göre diğer scriptler çalıştırılır. Blok diyagramları Simulink dosyalarıdır ve girdi dosyalarında belirlenen motor verim haritaları gibi girdilerden egzoz emisyonları gibi çıktılar üretmekten sorumludurlar. Arayüzün arka planında yapılan tüm hesaplamalar Simulink blok diyagramları üzerinde yapılmaktadır. Çıktı scriptleri, modellerden gelen çıktıları değerlendirerek işlemekten sorumludur. Simülasyon grafikleri çıktı scriptleri tarafından üretilirler. Şekil 5.2.'de çalışma kapsamında incelenen paralel hibrid elektrikli araç için Simulink'te oluşturulmuş ADVISOR blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.2. ADVISOR paralel hibrid elektrikli araç blok diyagramı

Şekil 5.2.'de görülen blok diyagramı teker teker modellenen araç komponentlerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu modeller, test verileri veya ampirik hesaplamalar sonucu elde edilen verilerden oluşmaktadır. Modellenen her komponent ayrı bir Matlab dosyasına sahiptir. Ayrıca simüle edilen aracın fiziksel özelliklerinin tanımlandığı ayrı bir dosya mevcuttur. Bu dosyalar ihtiyaç halinde güncellenebilmekte, kolayca değiştirilebilmektedir. Bu açıdan ADVISOR, araştırmacılara ciddi şekilde kolaylık sunmaktadır.

ADVISOR, temel olarak iki ayrı hesaplama yöntemi üzerine kurulmuştur. Bunlar yoldan sürücüye metodu ve sürücüden yola metodudur. İlk methodda sürüş çevrimi ve hız profili programa girdi olarak verilmektedir. Pedal pozisyonları dikkate alınmaz. ADVISOR bu girdilere karşın gerekli çekiş kuvvetini hesaplayarak tork değerine ulaşmaktadır. Sürücüden yola metodunda ise sürücü modeli sistem girdisi olarak kullanılmaktadır. ADVISOR bu girdiye karşılık pedal konumlarını oluşturur ve içten yanmalı motorun tork değerini hesaplayarak çekiş kuvvetine geçiş yapar [65].

ADVISOR, geliştirildiği günden bu yana hibrid elektrikli araçlar ile ilgili gerçekleştirilen araştırmalarda, geliştirme ve simülasyon çalışmalarında etkin kullanılan bir araç olmuştur. [2], [4], [5], [10], [13], [18], [19], [22] çalışmalarında görüldüğü üzere hibrid elektrikli araçlar için geliştirilen enerji yönetim stratejilerinin ne derecede etkin olduklarının simülasyon ortamında testi için halen yoğun olarak kullanılmaktadır.

5.2. Sürüş Çevrimleri

Araçların yakıt tüketimi, egzoz emisyonları gibi performans değerlerini belirleyebilmek için farklı türlerde sürüş çevrimleri oluşturulmuştur. Bunlara, aracın performans datalarını görebilmek amacıyla belirlenmiş, güncel sürüş karakteristiklerinin yansıtıldığı hız-zaman grafikleri de diyebiliriz.

Sürüş çevrimleri belirlenen bir zaman dilimi içerisinde söz konusu araç ve sürüşün gerçekleşeceği bölge ile ilgili gerçek sürüş koşullarını olabilecek en yüksek derecede yansıtmalıdır.

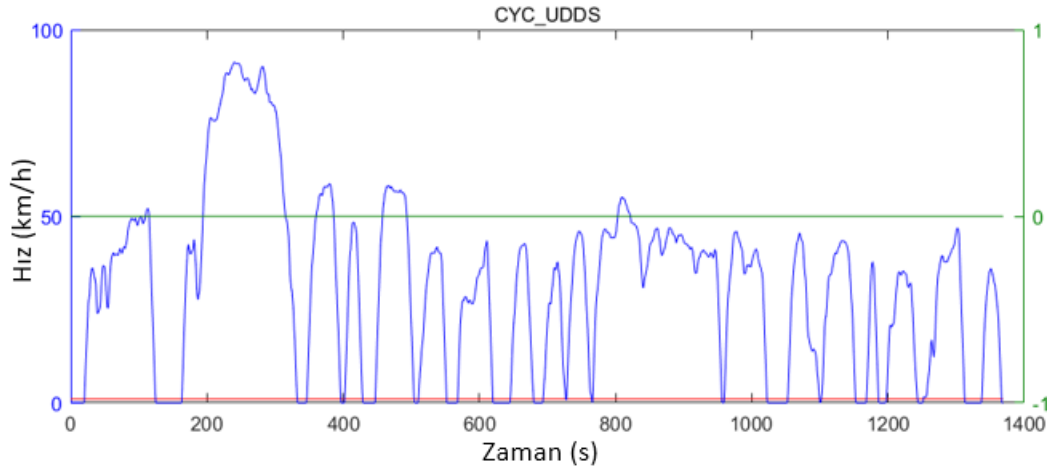
Literatürde çok sayıda sürüş çevrimi bulunmaktadır. Bunlar genellikle şehiriçi ve şehirlerarası karma sürüş şartlarını yansıtacak şekilde tasarlanmıştır. Aracın tasarım hedef bölgesine göre uygun sürüş çevrimi belirlenir.

Tez kapsamında yapılan çalışmada ele alınan araç, günlük kullanıma uygun bir binek araçtır. Bu nedenle şehir içi ve şehirlerarası durumları göz önüne alarak sürüş çevrimi seçimi yapılmıştır. Buna göre, şehir içi sürüş çevrimi olarak UDDS (Urban Dynamometer Driving Cycle) ve şehirlerarası sürüş çevrimi olarak da HWFET (Highway Fuel Economy Test) seçilmiştir.

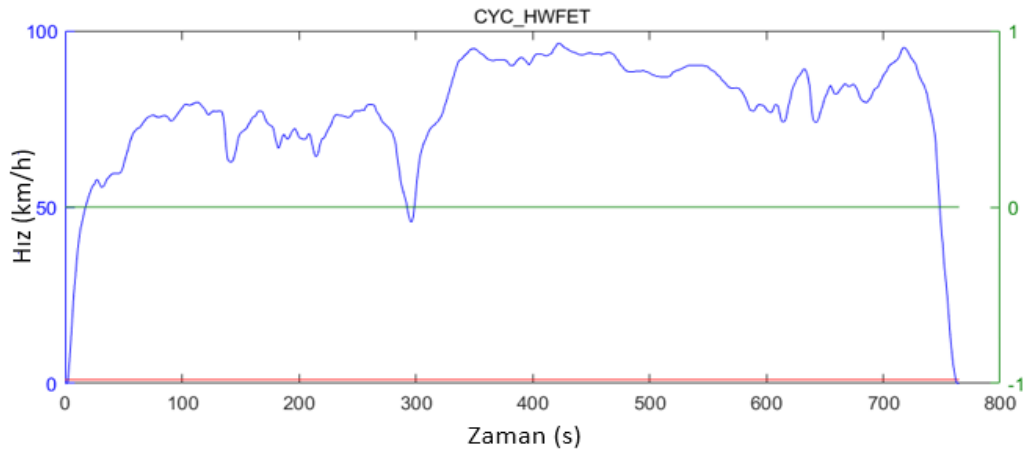
UDDS ve HWFET sürüş çevrimlerine ait teknik özellikler Tablo 5.1.'de verilmiştir. Sürüş çevrimlerine ait bu özellikler tasarımı yapılan enerji yönetim stratejilerinin simülasyon sonuçlarına nasıl yansıdığının yorumlanması açısından önem arz etmektedir. UDDS ve HWFET sürüş çevrimlerine ait hız-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'te görülmektedir.

Tablo 5.1. Kullanılan sürüş çevrimlerinin teknik özellikleri

Sürüş Çevrimi	UDDS	HWFET
Çevrim Türü	Şehir içi	Şehirlerarası
Süre (sn)	1369	765
Uzunluk (m)	1199	1651
Maksimum Hız (km/h)	91,25	96,4
Ortalama Hız (km/h)	31,51	77,58
Boşta Çalışma Süresi (s)	259	6
Durma Sayısı	17	1



Şekil 5.3. UDDS sürüş çevrimi hız-zaman grafiği



Şekil 5.4. HWFET sürüş çevrimi hız-zaman grafiği

5.3. Simülasyon Çalışmaları

5.3.1. Araç özelliklerinin belirlenmesi

Tez kapsamında önerilen bulanık mantık enerji yönetim stratejilerinin etkinliklerinin görülebilmesi için yapılan simülasyonlar için ADVISOR veri tabanında bulunan verilerden yararlanılarak araç özellikleri belirlenmiştir.

Aracın fiziksel özellikleri, Ford Focus-II Hatchback model alınarak belirlenmiştir. Aracın karoseri ağırlığı, aerodinamik etkilere maruz kalan ön yüzey alanı, aerodinamik sürüklenme katsayısı, akslar arası mesafe gibi parametreler Ford Focus-II'den alınmıştır. İlgili parametreler ADVISOR'da "VEH_SMCAR.m" isimli dosyanın içerisine işlenmiştir. Hibrid elektrikli aracın fiziksel özellikleri Tablo 5.2.'de verilmiştir.

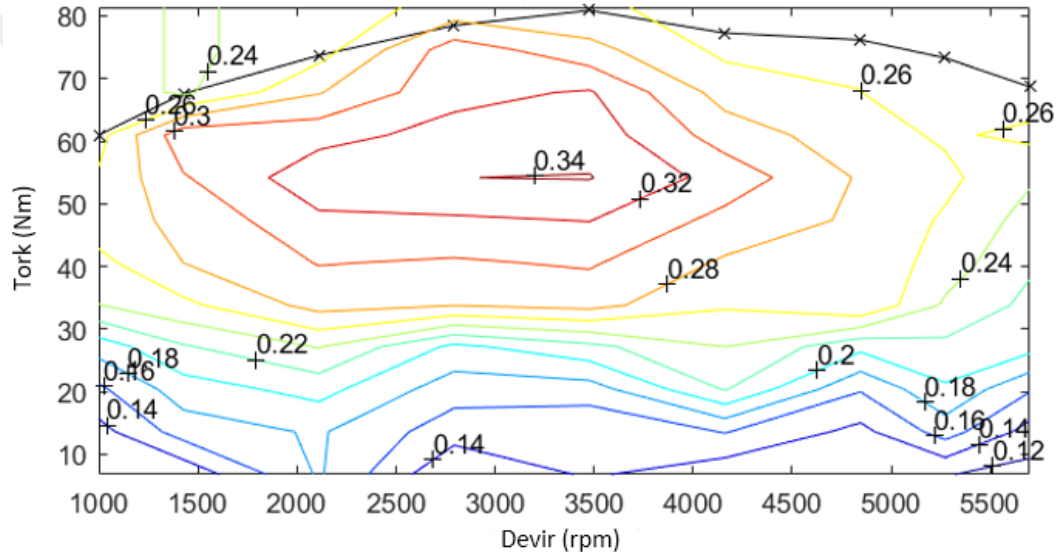
Tablo 5.2. Hibrid elektrikli aracın fiziksel özellikleri

Parametre	Değer
Araç Toplam Ağırlığı (kg)	1349
Ön Yüzey Alanı (m ²)	2,26
Aerodinamik Sürüklenme Katsayısı	0,324
Araç Ağırlık Merkezinin Yüksekliği (m)	0,5
Ön-Arka Aks Arası mesafe (m)	2,64

5.3.2. Tahrik grubunun belirlenmesi

Hibrid elektrikli araç fiziksel özelliklerinin belirlenmesinin ardından tahrik sistemi boyutlandırılarak eleman seçimi yapılmıştır.

İçten yanmalı motor olarak ADVISOR veri tabanında bulunan 41 kW gücünde ve 1,0 l hacmindeki “1991 Geo Metro” isimli motor seçilmiştir. Motor seçimi yapılırken, sürtünme-ventilasyon ve ısı kayıplarını düşürebilmek adına motorun küçük hacimli olmasına dikkat edilmiştir. Seçilen içten yanmalı motordan, 5700 rpm’de 41 kW maksimum güç ve 3477 rpm’de 81 Nm maksimum tork elde edilebilmektedir. İçten yanmalı motorun maksimum verimi %34’tür. İçten yanmalı motorun verim haritası Şekil 5.5.’te görülmektedir. Ayrıca motora ait teknik detaylar Tablo 5.3.’te verilmiştir. Seçilen içten yanmalı motora ait parametreler ADVISOR veri tabanında “FC_SI41_emis.m” isimli dosyada bulunmaktadır.

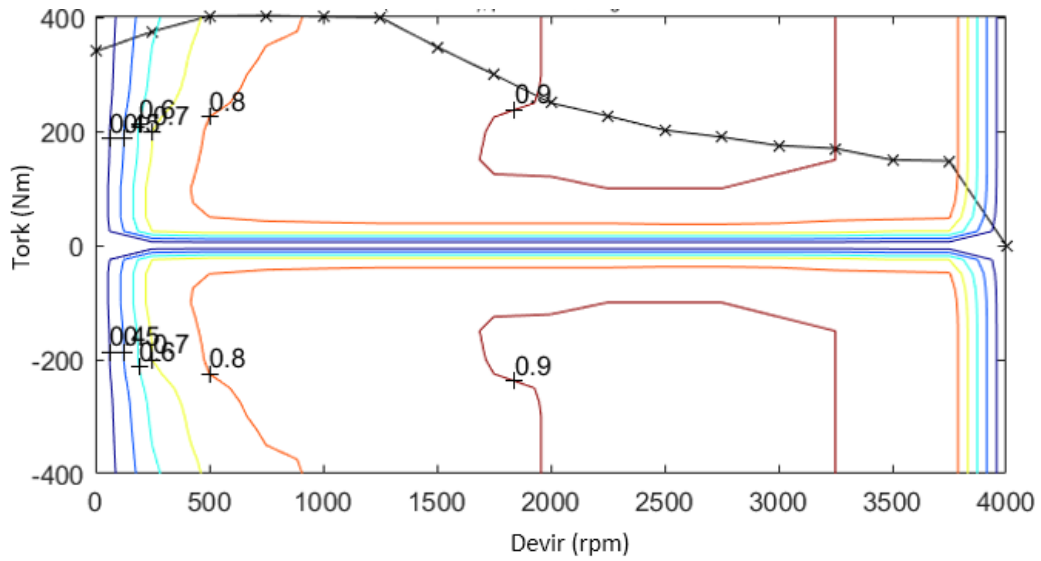


Şekil 5.5. 1991 Geo Metro 1.0L içten yanmalı motor için verim haritası

Tablo 5.3. İçten yanmalı motora ait parametreler

Parametre	Değer
Tür	Benzinli
Hacim (l)	1,0
Maksimum Güç (kW)	41 kW @ 5700 rpm
Maksimum Tork (Nm)	81 Nm @ 3477 rpm
Ağırlık (kg)	131
Maksimum Verim	0,34

Elektrik motoru olarak ADVISOR veri tabanında bulunan, 58 kW'lık Johnson Controls'e ait sabit mıknatıslı doğru akım motoru seçilmiştir. Seçilen elektrik motorunun maksimum tork değeri 400 Nm ve maksimum verimi %92'dir. Seçilen elektrik motoruna ait verim haritası Şekil 5.6.'da görülmektedir. Elektrik motoru ile ilgili teknik detaylar Tablo 5.4.'te verilmiştir. Seçilen elektrik motoruna ait parametreler ADVISOR veri tabanında "MC_PM58.m" isimli dosyada bulunmaktadır.



Şekil 5.6. Seçilen elektrik motoruna ait verim haritası

Tablo 5.4. Elektrik motoruna ait parametreler

Parametre	Değer
Tür	Sabit Mıknatıslı Doğru Akım Motoru
Maksimum Güç (kW)	58
Maksimum Tork (Nm)	400
Ağırlık (kg)	70
Maksimum Verim	0,92

Hibrid elektrikli araç için kurşun-asit batarya seçimi yapılmıştır. 25 hücreden oluşan batarya, 5,5 V ile 16,5 V çalışma gerilimi aralığına ve 28 Ah kapasite sahiptir. Seçilen kurşun-asit bataryanın nominal gerilim değeri ise 265 V'tur. Batarya ile ilgili teknik

detaylar Tablo 5.5.'te verilmiştir. Seçilen bataryaya ait parametreler ADVISOR veri tabanında “ESS_PB28.m” isimli dosyada bulunmaktadır.

Tablo 5.5. Bataryaya ait parametreler

Parametre	Değer
Tür	Kurşun-Asit
Min./Maks. Gerilim (V)	5,5 V – 16,5 V
Nominal Gerilim (V)	265
Hücre Sayısı	25
Kapasite (Ah)	28
Ağırlık (kg)	295

5.3.3. Simülasyon sonuçları

ADVISOR tarafından yakıt ve egzoz emisyonlarının verimlilikleri esas alınarak tasarlanan bulanık mantık enerji yönetim stratejisi Bölüm 4.3.'te açıklanmıştır. Bölüm 5.3.1.'de tanımlanan araç özellikleri ve Bölüm 5.3.2.'de tanımlanan tahrik grubu için paralel hibrid elektrikli araç simülasyonları ilk olarak referans strateji ile oluşturulmuştur. Buradan elde edilen veriler, oluşturulan Strateji-A ve Strateji-B'nin etkinliğinin sorgulanması için kullanılacaktır.

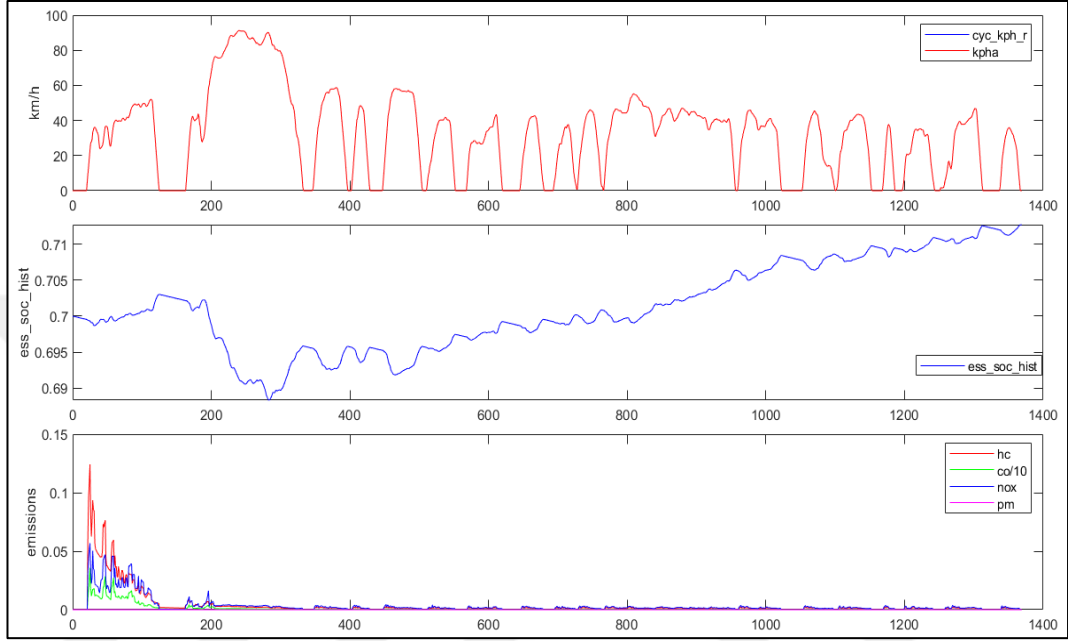
Simülasyon çalışmalarında daha önce bahsedildiği üzere şehir içi, şehirlerarası sürüş koşullarını temsilen UDDS ve HWFET sürüş çevrimleri kullanılmıştır.

5.3.3.1. Referans strateji için simülasyon sonuçları

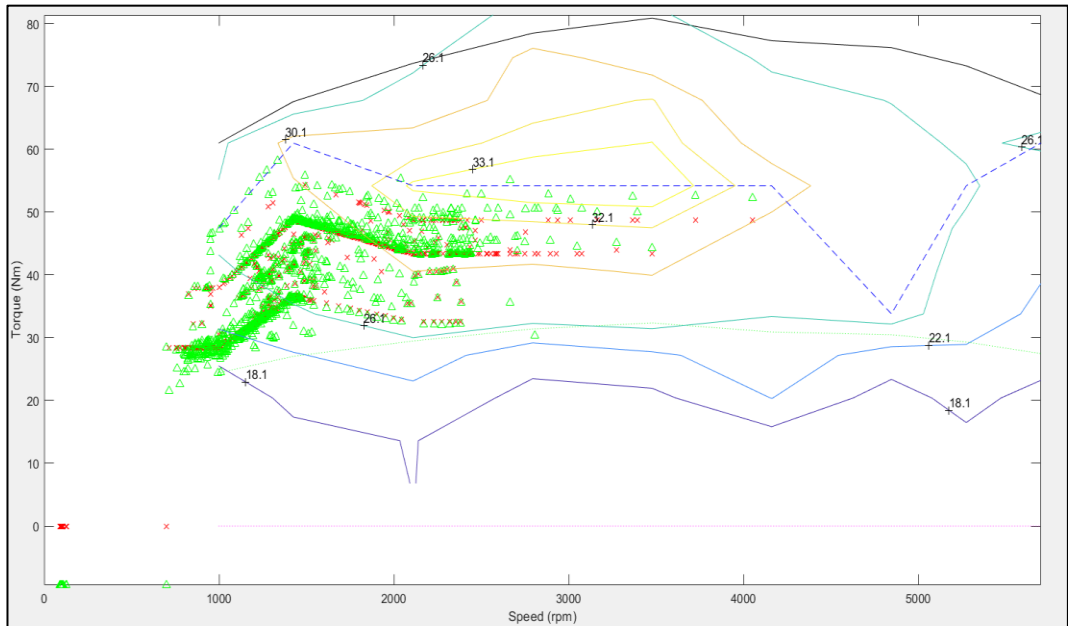
ADVISOR tarafından geliştirilen referans stratejinin yine ADVISOR üzerinde oluşturulması sonucunda elde edilen veriler bu kısımda verilmiştir.

Şekil 5.7.'de UDDS sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği ile birlikte referans stratejinin UDDS sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen SoC değerinin zamana bağlı değişimi ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir.

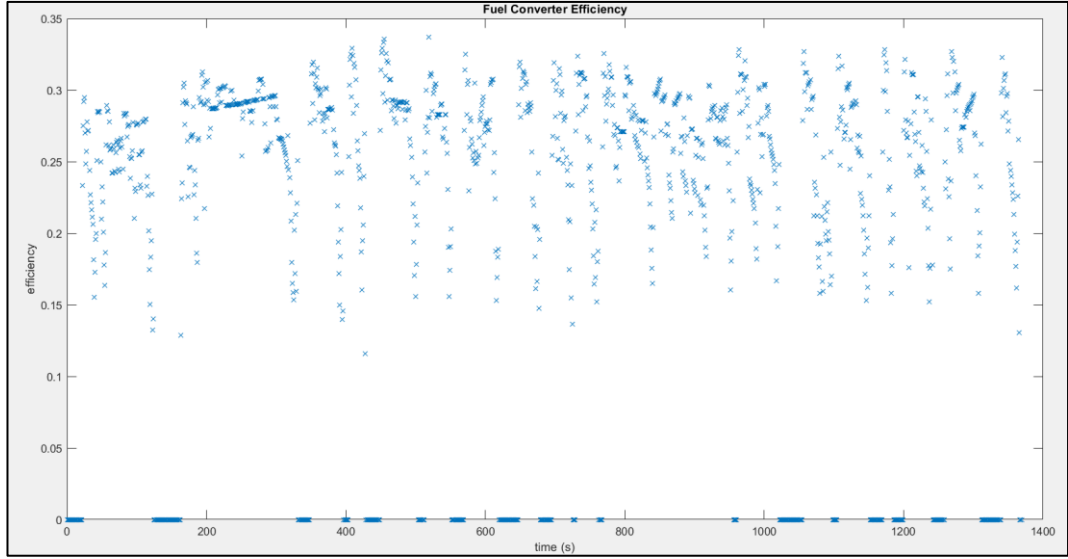
Şekil 5.8.'de referans stratejinin UDDS sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen içten yanmalı motora ait, tork-devir grafiği üzerinde, çalışma noktaları görülmektedir. Şekil 5.9.'da ise referans strateji için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motora ait zamana bağlı verim grafiği görülmektedir.



Şekil 5.7. Referans strateji için UDDS sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi

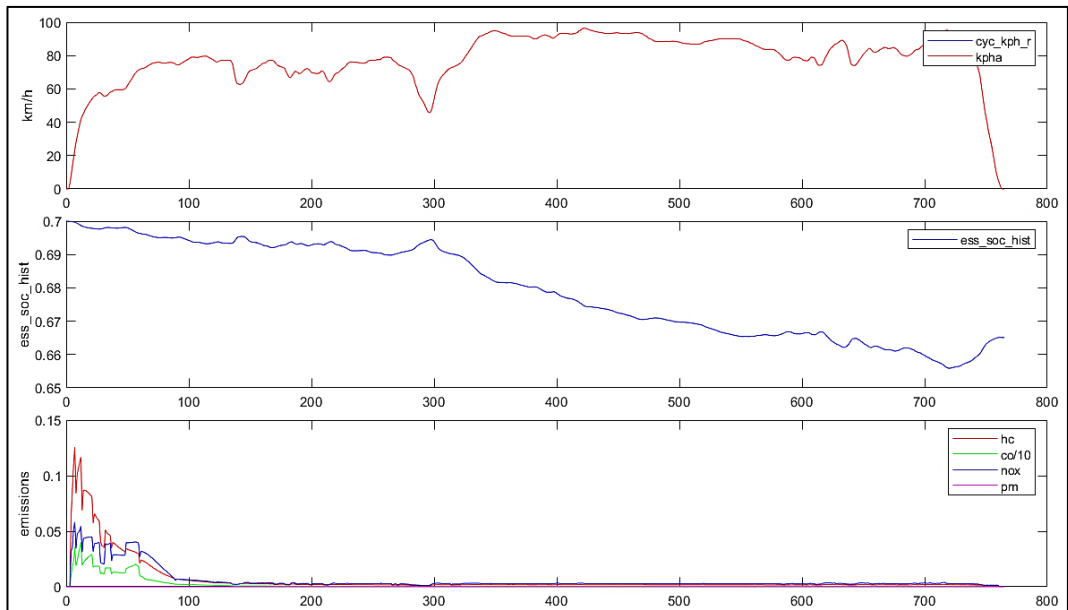


Şekil 5.8. Referans strateji için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları

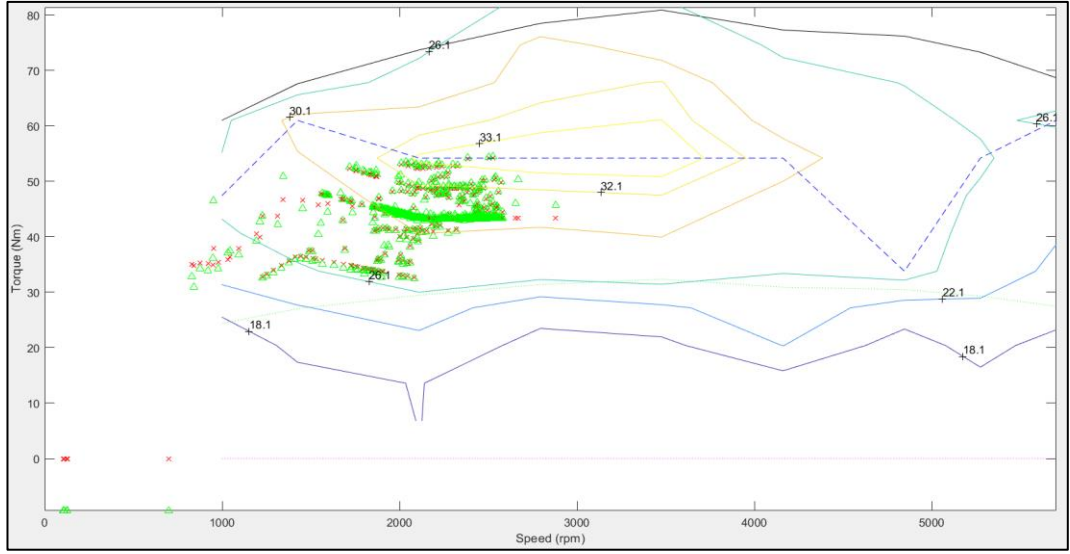


Şekil 5.9. Referans strateji için UDDS sürüş çevriminde için içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi

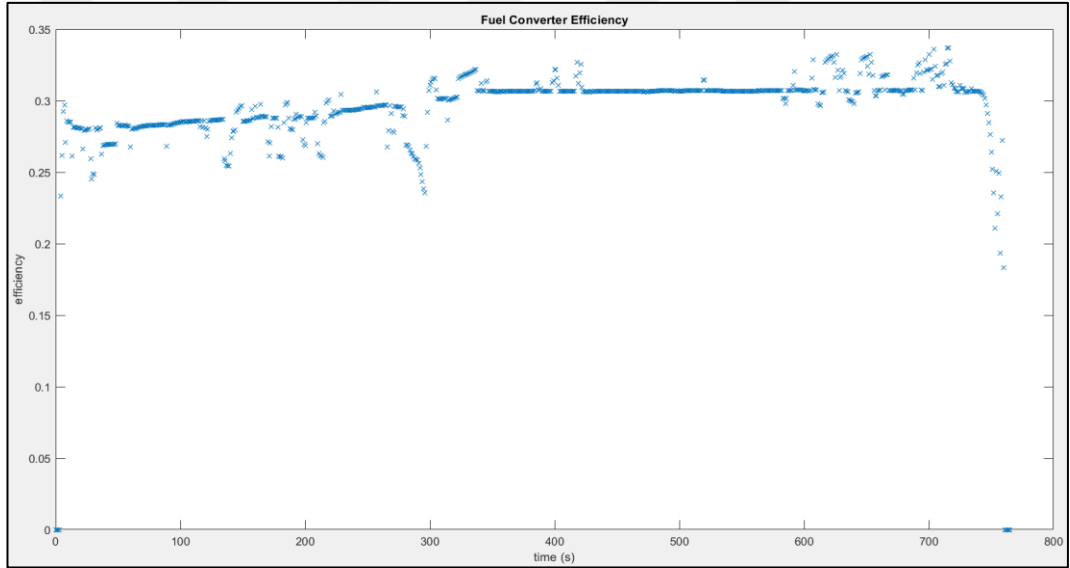
Şekil 5.10.'da HWFET sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği ile birlikte referans stratejinin HWFET sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen SoC değerinin zamana bağlı değişimi ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 5.11.'de referans stratejinin HWFET sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen içten yanmalı motora ait, tork-devir grafiği üzerinde, çalışma noktaları görülmektedir. Şekil 5.12.'de ise referans strateji için HWFET sürüş çevriminde içten yanmalı motora ait zamana bağlı verim grafiği görülmektedir.



Şekil 5.10. Referans strateji için HWFET sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.11. Referans strateji için HWEFT sürüş çevriminde için içten yanmalı motor çalışma noktaları



Şekil 5.12. Referans strateji için HWEFT sürüş çevriminde için içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi

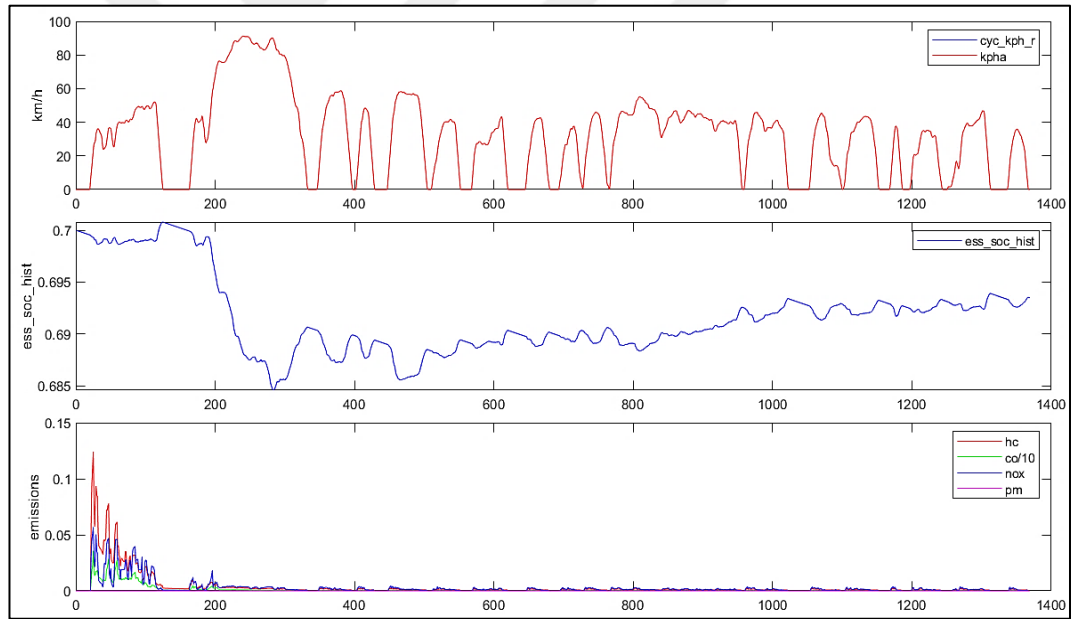
Tablo 5.6. Referans Strateji için simülasyon sonuçları

Sürüş Çevrimi	Yakıt Tüketimi (l/100 km)	Egzoz Emisyonları		
		HC (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)
UDDS	6,9	0,424	1,204	0,365
HWFET	4,8	0,302	0,952	0,283

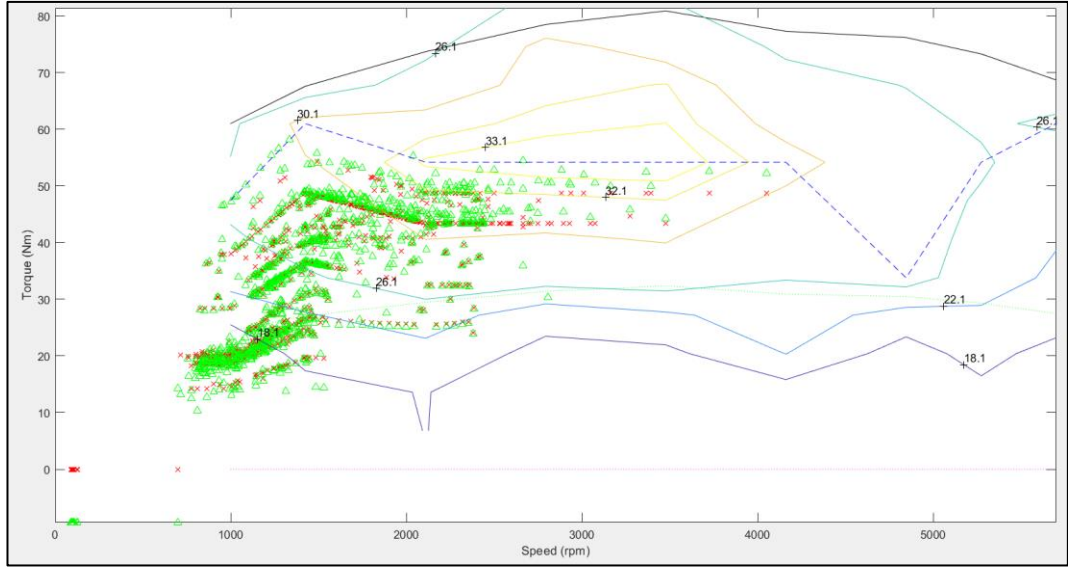
5.3.3.2. Strateji-A için simülasyon sonuçları

Tez kapsamında tasarımı yapılan Strateji-A'nın ADVISOR üzerinde koşturulması ile elde edilen veriler bu kısımda verilmiştir.

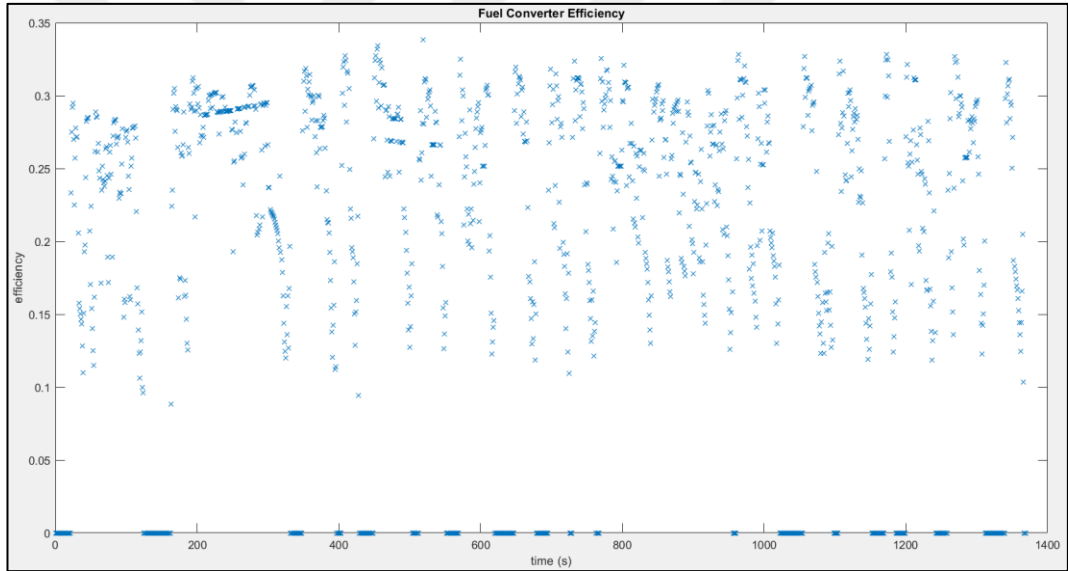
Şekil 5.13.'te UDDS sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği ile birlikte Strateji-A'nın UDDS sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen SoC değerinin zamana bağlı değişimi ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 5.14.'te Strateji-A'nın UDDS sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen içten yanmalı motora ait, tork-devir grafiği üzerinde, çalışma noktaları görülmektedir. Şekil 5.15.'te ise Strateji-A için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motora ait zamana bağlı verim grafiği görülmektedir.



Şekil 5.13. Strateji-A için UDDS sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi

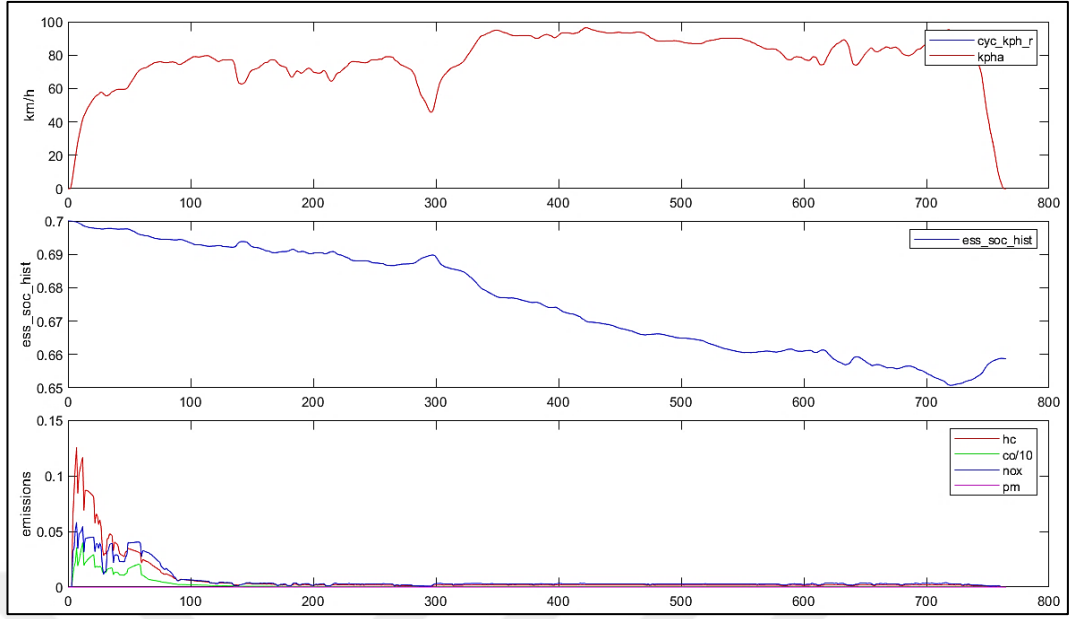


Şekil 5.14. Strateji-A için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları

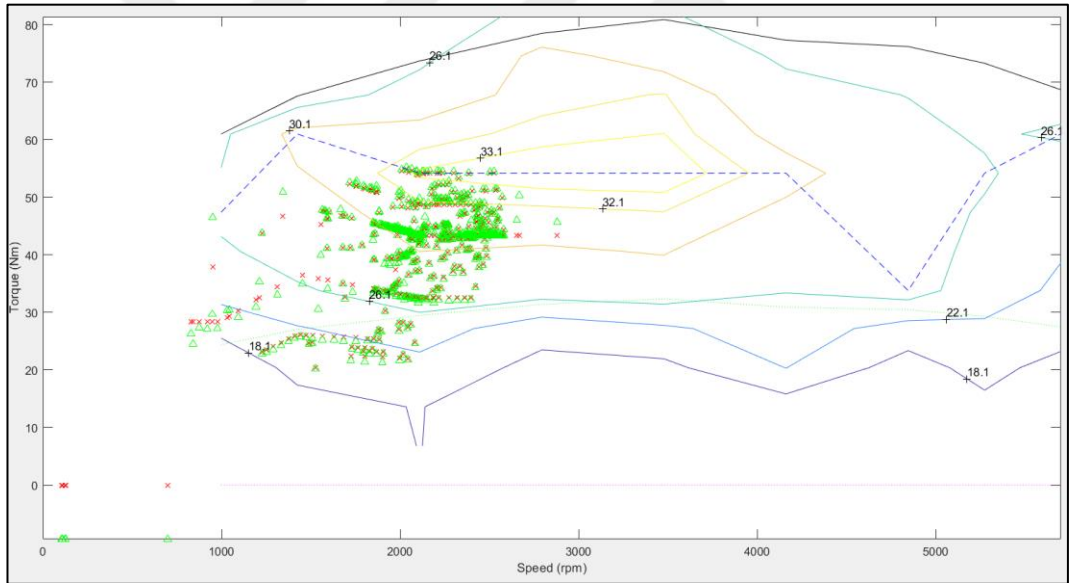


Şekil 5.15. Strateji-A için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi

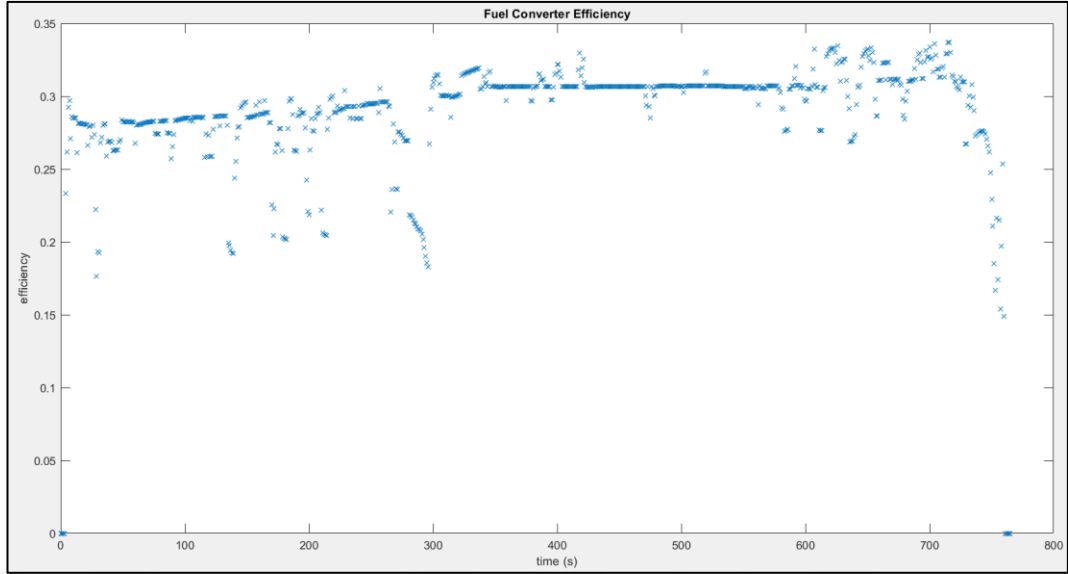
Şekil 5.16.'da HWFET şehirlerarası sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği ile birlikte Strateji-A'nın HWFET sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen SoC değerinin zamana bağlı değişimi ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 5.17.'de Strateji-A'nın HWFET sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen içten yanmalı motora ait, tork-devir grafiği üzerinde, çalışma noktaları görülmektedir. Şekil 5.18.'de ise Strateji-A için HWFET sürüş çevriminde içten yanmalı motora ait zamana bağlı verim grafiği görülmektedir.



Şekil 5.16. Strateji-A için HWFET sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.17. Strateji-A için HWFET sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları



Şekil 5.18. Strateji-A için HWFET sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi

Strateji-A için farklı sürüş çevrimlerinde yapılan simülasyonlardan elde edilen yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları sonuçları Tablo 5.7.'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Strateji-A için simülasyon sonuçları

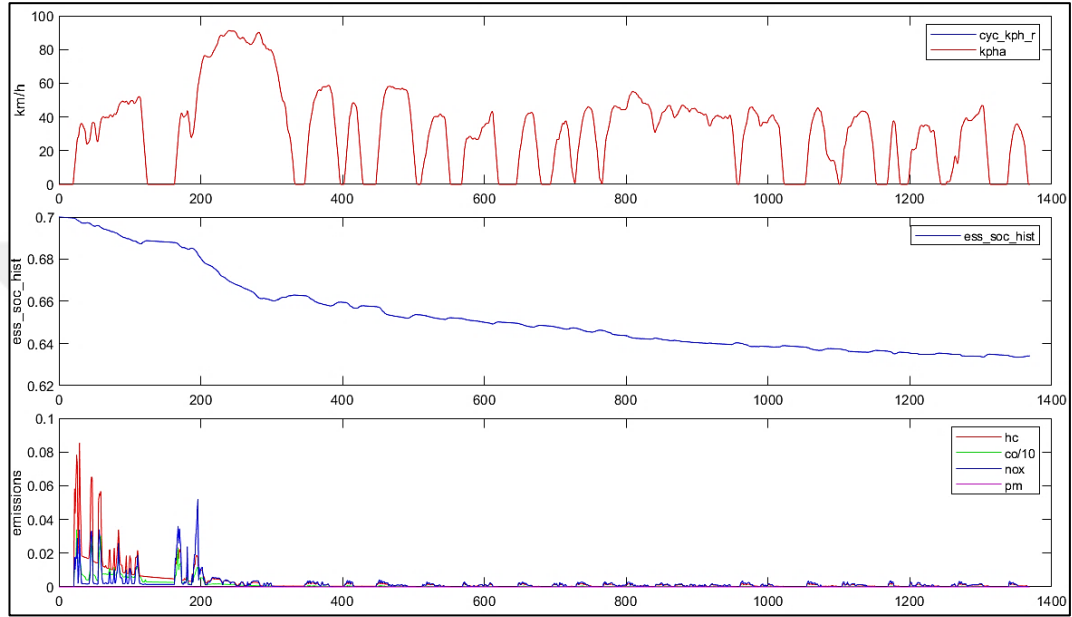
Sürüş Çevrimi	Yakıt Tüketimi (l/100 km)	Egzoz Emisyonları		
		HC (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)
UDDS	6,5	0,406	1,239	0,324
HWEFT	4,7	0,296	0,956	0,275

5.3.3.3. Strateji-B için simülasyon sonuçları

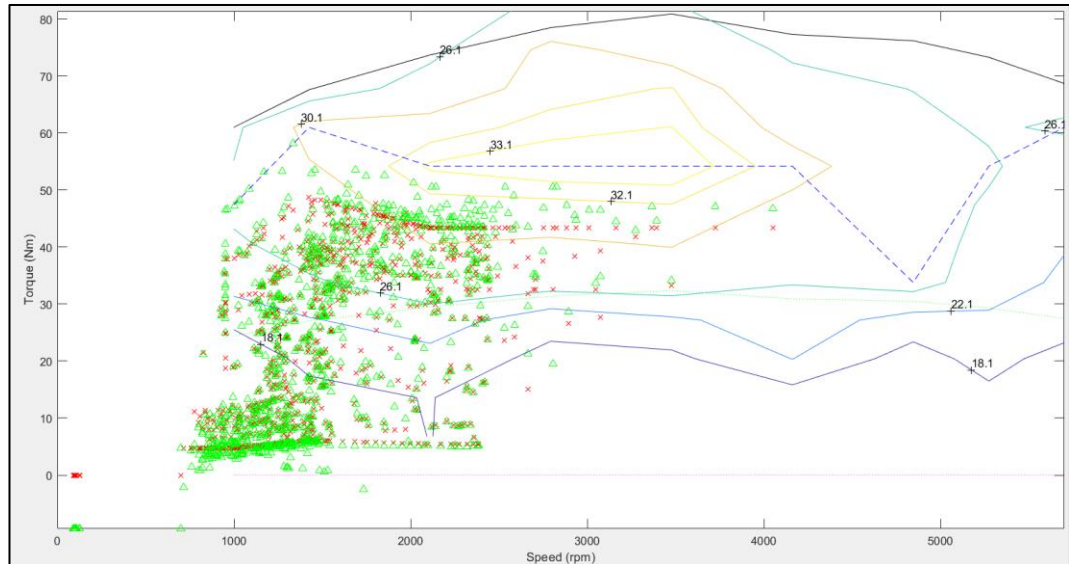
Tez kapsamında tasarımı yapılan ikinci enerji yönetim stratejisi olan Strateji-B'nin ADVISOR üzerinde UDDS şehiriçi ve HWFET şehirlerarası sürüş çevrimlerinde koşturulması ile elde edilen veriler bu kısımda verilmiştir.

Şekil 5.19.'da UDDS sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği ile birlikte Strateji-B'nin UDDS sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen SoC değerinin zamana bağlı

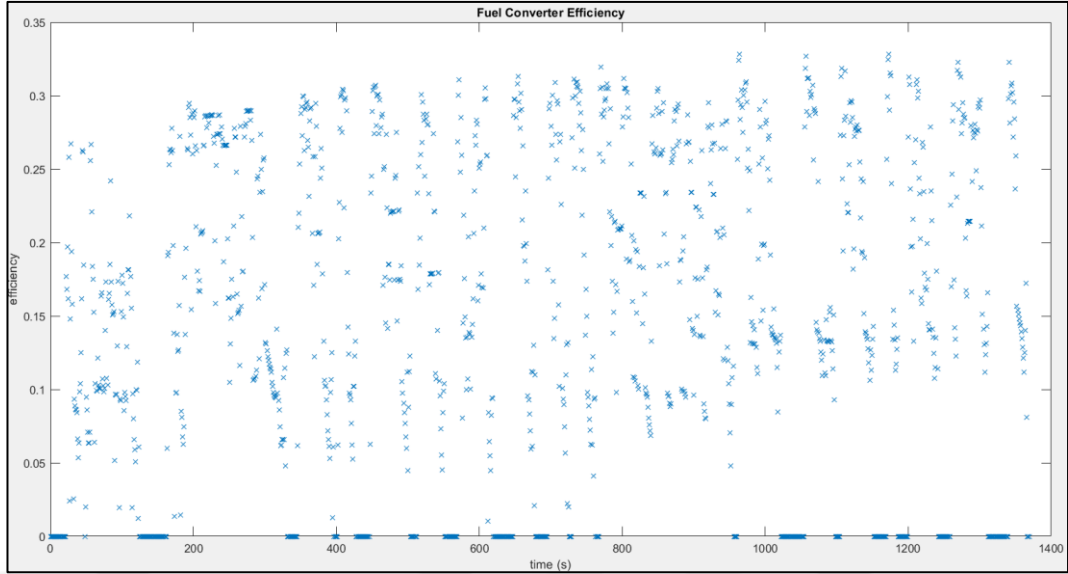
değişimi ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 5.20.'de Strateji-B'nin UDDS sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen içten yanmalı motora ait, tork-devir grafiği üzerinde, çalışma noktaları görülmektedir. Şekil 5.21.'de ise Strateji-B için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motora ait zamana bağlı verim grafiği görülmektedir.



Şekil 5.19. Strateji-B için UDDS sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi

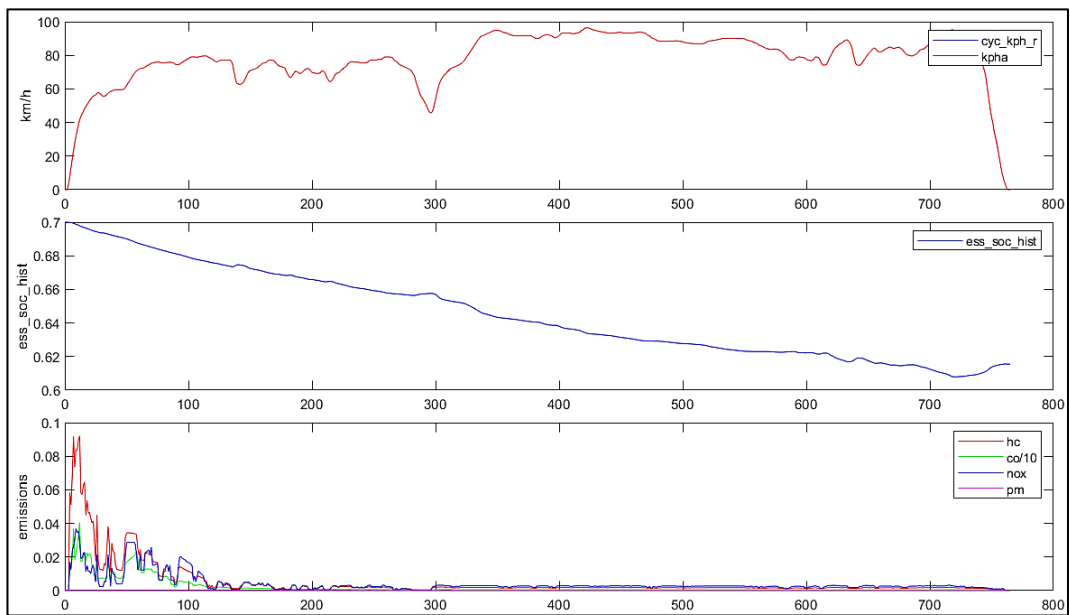


Şekil 5.20. Strateji-B için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları

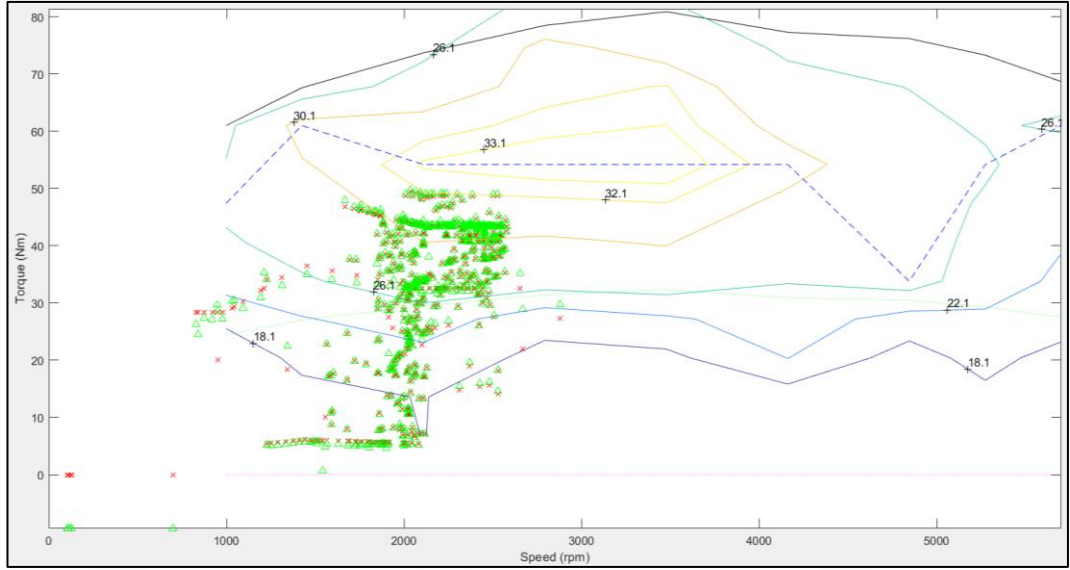


Şekil 5.21. Strateji-B için UDDS sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi

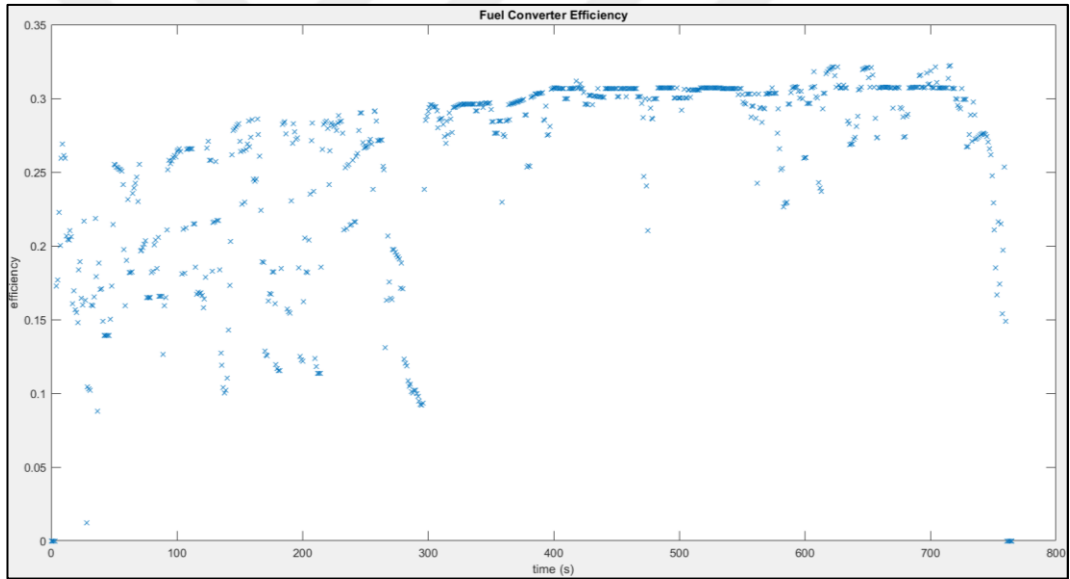
Şekil 5.22.'de HWFET şehirlerarası sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği ile birlikte Strateji-B'nin HWFET sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen SoC değerinin zamana bağlı değişimi ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 5.23.'te Strateji-B'nin HWFET sürüş çevriminde koşulması sonucu elde edilen içten yanmalı motora ait, tork-devir grafiği üzerinde, çalışma noktaları görülmektedir. Şekil 5.24.'te ise Strateji-B için HWFET sürüş çevriminde içten yanmalı motora ait zamana bağlı verim grafiği görülmektedir.



Şekil 5.22. Strateji-B için HWFET sürüş çevriminde SoC ve emisyon değerlerinin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.23. Strateji-B için HWEFT sürüş çevriminde içten yanmalı motor çalışma noktaları



Şekil 5.24. Strateji-B için HWEFT sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin zamanla değişimi

Strateji-B için farklı sürüş çevrimlerinde yapılan simülasyonlardan elde edilen yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları sonuçları Tablo 5.8.'de verilmiştir.

Tablo 5.8. Strateji-B için simülasyon sonuçları

Sürüş Çevrimi	Yakıt Tüketimi (l/100 km)	Egzoz Emisyonları		
		HC (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)
UDDS	5,1	0,317	1,329	0,207
HWFET	4,1	0,238	0,964	0,19

5.4. Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

5.4.1. Strateji-A için simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

Strateji-A'nın UDDS sürüş çevrimi için simülasyon sonuçlarına göre içten yanmalı motorun çalışma noktalarına bakılacak olursa 1500-2500 rpm devir aralığında, çalışma noktalarının daha çok optimum çalışma eğrisi etrafında toplandığı görülmektedir; çalışma noktaları verimli bölgededir. 750-1500 rpm aralığında ise çalışma noktaları verimsiz bölgededir. Devir sayısı arttıkça motor çalışma noktalarının verimli bölgeye doğru kaydığı görülür. Şekil 5.15.'te içten yanmalı motor verim-zaman grafiğine bakıldığında verimin çevrim boyunca %25-%30 aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. İçten yanmalı motorun çevrimdeki ortalama verimi ise %26 olarak elde edilmiştir. Verim – zaman grafiğinde, değerlerin sürüş hızına cevaben, devir sayısının sürekli dalgalanması nedeniyle grafik boyunca uniform dağılmadığı görülmektedir.

Strateji-A'nın tasarımında hedeflendiği gibi, şehiriçinde batarya SoC değerinin fazla kayıp yaşanmadan korunduğu görülmektedir. 0,7 ile başlayan SoC değeri, çevrim sonunda 0,694 mertebelerindedir. Yaklaşık 14 dakikalık sürüş çevriminde yaklaşık 12 km yol alınmış ve batarya şarj seviyesi SoC değerindeki düşüş yaklaşık %0,85 olmuştur. Buna göre ortaya başarılı bir bulanık mantık kural tablosu konulduğu söylenilebilir. Genel anlamda bakacak olursak; UDDS, şehir içi bir sürüş çevrimidir. Şehir içi sürüş çevriminde çevrim boyunca Şekil 5.13.'te görüleceği üzere çok sayıda frenleme ve duruş yaşanmaktadır. Bu frenleme ve duruşlar esnasında elektrik

motorunun generatör modunda çalışmasıyla batarya çokça şarj edilmektedir. Geri kazanılan bu enerji toplam sistem verimine de katkıda bulunmaktadır.

Şekil 5.13.'te görüldüğü üzere batarya SoC eğrisi, çevrimin yaklaşık 180. Saniyesinden sonra aracın yüksek hız talebi karşısında elektrik motorunun yol yükünü paylaşmasıyla hızlıca 0,685 mertebelerine düşmüş, sonrasında gelen yavaşlama ve durmalar neticesinde elektrik motorunun generatör olarak çalışması ile batarya şarj olmuş ve SoC eğrisinin trendi yukarı yönlü olmuştur.

Bir başka açıdan bakıldığında, UDDS sürüş çevrimin yaklaşık %18,9'u boşta çalışmadan meydana gelir. Boşta çalışma esnasında içten yanmalı motorun durdurulması hem yakıt tasarrufu hem de egzoz emisyonlarının azalması anlamına gelmektedir.

Yakıt tüketimi Strateji-A için UDDS sürüş çevriminde 6,5 l/100km olmuştur. Egzoz emisyonları açısından bakıldığında, çevrimin yaklaşık ilk 150 saniyesinde motorun soğuk olması ve bununla birlikte bu dilimin hızlanma aralığı olması sebebiyle motorun yüksek tork bölgesinde çalışması emisyon salınımını bu bölgede yükseltmiştir. Buna göre UDDS sürüş çevriminde HC salınımı 0,406 g/km, CO salınımı 1,239 g/km, NO_x salınım 0,324 g/km olmuştur.

Simülasyon sonucunda UDDS sürüş çevrimi için ADVISOR'dan alınan toplam sistem verimlilik değeri %10,3 olmuştur. Elektrik motorunun çevrim boyunca ortalama verimi %66, bataryanın ise %88 olarak elde edilmiştir.

Strateji-A, HWEFT şehirlerarası sürüş çevrimine göre değerlendirildiğinde ilk göze çarpan yakıt tüketimi olmaktadır. Simülasyon sonucuna göre yakıt tüketimi 4,7 l/100km olmuştur. HWEFT, şehirlerarası sürüş çevrimidir ve çevrim boyunca duruş yoktur. Frenleme ise oldukça az ve yumuşaktır. Bu durum içten yanmalı motorun kararlı rejim bölgesinde uzun süre çalışmasını sağlamaktadır. Çevrim boyunca çok fazla ivmelenme ihtiyacı olmaması ve genel anlamda yakıt tüketimini olumlu etkilemiştir. Şekil 5.17.'de içten yanmalı motorun çalışma noktalarına bakıldığında,

1500-2500 rpm aralığında çalışma noktalarının optimum tork eğrisine yakın bölgelerde gezindiği görülmektedir. Bu aralıkta motor, 30 – 60 Nm tork bölgesinde çalışmaktadır. İçten yanmalı motorun çevrim boyunca yoğun olarak 1750 – 2000 rpm aralığında çalıştığı, devir sayısının 1500 rpm altına genellikle düşmediği görülmektedir. UDDS şehiriçi çevrimi ile kıyaslandığında çalışma noktalarının optimum tork eğrisine daha yakın olduğu ve nispeten daha verimli bölgede konumlandığı görülmektedir. Şekil 5.18.'de, içten yanmalı motor veriminin zamana bağlı değişimini veren grafik incelendiğinde verimin sürüş çevrimi boyunca %25 ila %34 aralığında yoğunlaştığı görülmektedir.

Simülasyon sonucunda ADVISOR'dan alınan veriye göre çevrim boyunca içten yanmalı motorun ortalama verimi %30 olmuştur. Şehiriçi sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin %26 olduğu göz önüne alındığında içten yanmalı motor verimi için şehiriçi-şehirlerarası farkının %4 olduğu görülmektedir.

Batarya SoC değerine bakacak olursak, başlangıçta 0,7 olan SoC değeri çevrim sonunda yaklaşık 0,66 mertebelerindedir. Yaklaşık 8 dakikalık çevrim boyunca yaklaşık 17 km yol alınmış ve batarya SoC değerindeki düşüş çevrimin başlangıcından bitişine kadar yaklaşık %5,71 olmuştur. HWFET'nin şehirlerarası bir sürüş çevrimi olması nedeniyle çevrim boyunca frenleme çok azdır. Duruş sayısı ise çevrim boyunca bir olup çevrim sonundadır. Bu nedenle rejeneratif enerji kazanımı sınırlı olmaktadır. Şekil 5.16.'da SoC eğrisi incelendiğinde, eğri trendinin aşağı yönlü olduğu görülür. Pik yüklerde içten yanmalı motorun elektrik motoru ile yük paylaşımı yapması, sonrasında ise bataryanın yeterince şarj olamaması sonucu SoC değeri azalmıştır. UDDS sürüş çevriminde elde edilen %0,85'lik SoC düşüş değeriyle karşılaştırıldığı zaman HWFET sürüş çevriminde %5,71'lik batarya SoC düşüşü oldukça fazla olmuştur.

Strateji-A için HWFET şehirlerarası sürüş çevriminde elde edilen 4,7 l/100km yakıt tüketim değeri, şehiriçi sürüş çevrimi UDDS ile kıyaslandığında beklendiği üzere oldukça iyidir. Yakıt tüketimi, Strateji-A bulanık mantık enerji yönetimi stratejisi ile

şehir içinde 6,5 l/100km iken şehirlerarasında 4,7 l/100km mertebelerindedir. Yakıt tüketiminde, şehiriçi ile şehirlerarası arasında %27,7'lik bir fark olduğu görülmektedir.

Egzoz emisyonları açısından bakıldığında çevrimin yaklaşık ilk 75 saniyesinde motorun soğuk olması ve hızlanma ihtiyacına bağlı içten yanmalı motorun yüksek tork bölgelerinde çalıştırılması sonucu emisyon değerleri Şekil 5.16.'da görüldüğü üzere yüksektir. Fakat çevrimin şehirlerarası sürüş çevrimi olması dolayısıyla ani ve çok sayıda hızlanmanın olmaması ile içten yanmalı motorun kararlı çalışma bölgesinde daha uzun süreli kalması sonucu egzoz emisyon değerleri şehiriçi çevrime göre düşük kalmaktadır. Buna göre HWFET sürüş çevriminde HC salınımı 0,296 g/km, CO salınımı 0,956 g/km, NO_x salınım 0,275 g/km olmuştur. Şehir içi sürüş çevrimi ile kıyaslandığında HC salınımı % 27,1, CO salınımı %22,84, NO_x salınımı %15,12 azalmıştır.

Simülasyon sonucunda HWEFT sürüş çevrimi için ADVISOR'dan alınan toplam sistem verimlilik değeri %22 olmuştur. Elektrik motorunun çevrim boyunca ortalama verimi %64, bataryanın ise %88 olarak elde edilmiştir.

5.4.2. Strateji-B için simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

Strateji-B, yakıt tüketiminin düşürülmesine odaklanılarak oluşturulmuş bir enerji yönetim stratejisidir; SoC değerinin korunması ikinci planda kalmıştır. Strateji-B'ye göre içten yanmalı motor, çoğunlukla çıkış torku düşük kalacak şekilde çalışmalıdır. Buna göre Strateji-A'nın UDDS şehir içi sürüş çevrimi için simülasyon sonuçlarına göre, Şekil 5.19.'da görüldüğü üzere, içten yanmalı motorun çalışma noktalarının 750 - 1500 rpm arasında 0 -15 Nm aralığında, verimsiz bölgede yoğunlaştığı görülmektedir. 1500 – 2500 rpm aralığında çalışma noktaları nispeten daha yüksek tork bölgesine kaymış olsa da optimum tork eğrisine yaklaşmamıştır. İçten yanmalı motorun çevrim boyunca ortalama verimi %23 olarak ölçülmüştür. Verim – Zaman grafiğinde, değerlerin sürüş hızına cevaben, devir sayısının sürekli dalgalanması nedeniyle grafik boyunca uniform dağılmadığı görülmektedir.

Batarya SoC değerine bakacak olursak, Şekil 5.19.'da görüleceği üzere, başlangıçta 0,7 olan SoC değeri çevrim sonunda yaklaşık 0,63 mertebelerindedir. Yaklaşık 14 dakikalık UDDS sürüş çevrimi boyunca yaklaşık 12 km yol alınmış ve batarya SoC değerindeki düşüş, çevrimin başlangıcından bitişine kadar yaklaşık %10 olmuştur. Şehir içi sürüş çevriminde çevrim boyunca Şekil 5.19.'da görüleceği üzere çok sayıda frenleme ve duruş yaşanmaktadır. Bu frenleme ve duruşlar esnasında elektrik motorunun generatör modunda çalışmasıyla batarya çokça şarj edilmektedir. Geri kazanılan bu enerji toplam sistem verimine de katkıda bulunmaktadır. Buna rağmen Strateji-B kurgusu değeri, SoC değerinin düşük olduğu aralıklarda, içte yanmalı motor çıkış torku yakıt ekonomisinin sağlanabilmesi adına yükseltilmemiştir. Bu durum batarya SoC değerini doğrudan etkilemiş ve çevrim boyunca Strateji-A'nın aksine SoC değeri artış göstermemiştir. Şekil 5.19.'da görüleceği gibi, çevrim süresince SoC eğrisindeki trend aşağı yönlüdür.

Yakıt tüketimi Strateji-B için UDDS sürüş çevriminde 5,1 l/100km olmuştur. Egzoz emisyonları açısından bakıldığında, çevrimin yaklaşık ilk 100 saniyesinde motorun soğuk olması ve bununla birlikte bu dilimin hızlanma aralığı olması sebebiyle yüksek motorun yüksek tork bölgesinde çalışması nedeniyle emisyon salınımı yüksektir. Buna göre UDDS sürüş çevriminde HC salınımı 0,317 g/km, CO salınımı 1,329 g/km, NO_x salınım 0,207 g/km olmuştur. Emisyon değerlerinin Strateji-A'ya göre düşük olduğu görülmektedir. Bunun başlıca nedeni içten yanmalı motorun düşük tork bölgesinde çalıştırılmasıdır.

Simülasyon sonucunda UDDS sürüş çevrimi için ADVISOR'dan alınan toplan sistem verimlilik değeri %12 olmuştur. Elektrik motorunun çevrim boyunca ortalama verimi %66, bataryanın ise %88 olarak elde edilmiştir.

Strateji-B, HWEFT şehirlerarası sürüş çevrimine göre değerlendirildiğinde yakıt tüketimindeki düşüş göze çarpar. Simülasyon sonucuna göre yakıt tüketimi 4,1 l/100km olmuştur. HWEFT, şehirlerarası sürüş çevrimidir ve çevrim boyunca duruş yoktur. Frenleme ise oldukça az ve yumuşaktır. Bu durum içten yanmalı motorun kararlı rejim bölgesinde uzun süre çalışmasını sağlamaktadır. Çevrim boyunca çok

fazla ivmelenme ihtiyacı olmaması ve genel anlamda yakıt tüketimini olumlu etkilemiştir. Şekil 5.23.'te içten yanmalı motorun çalışma noktalarına bakıldığında, 1500-2500 rpm aralığında çalışma noktalarının optimum tork eğrisine yakın bölgelerde gezindiği fakat Strateji-A kadar yaklaşmadığı görülmektedir. İçten yanmalı motorun çevrim boyunca yoğun olarak 2000 rpm ve üzerinde çalıştığı, devir sayısının 1750 rpm altına genellikle düşmediği görülmektedir. UDDS şehiriçi çevrimi ile kıyaslandığında çalışma noktalarının optimum tork eğrisine daha yakın olduğu ve nispeten daha verimli bölgede konumlandığı görülmektedir. Şekil 5.23.'te, içten yanmalı motor veriminin zamana bağlı değişimini veren grafik incelendiğinde verimin sürüş çevrimi boyunca %25 ila %30 aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Simülasyon sonucunda ADVISOR'dan alınan veriye göre çevrim boyunca içten yanmalı motorun ortalama verimi %28 olmuştur. Şehir içi sürüş çevriminde içten yanmalı motor veriminin %23 olduğu göz önüne alındığında içten yanmalı motor verimi için şehir içi-şehirler arası farkının %5 olduğu görülmektedir.

Batarya SoC değerine bakacak olursak, başlangıçta 0,7 olan SoC değeri çevrim sonunda yaklaşık 0,617 mertebelerindedir. Yaklaşık 8 dakikalık çevrim boyunca yaklaşık 17 km yol alınmış ve batarya SoC değerindeki düşüş çevrimin başlangıcından bitişine kadar yaklaşık %11,85 olmuştur. HWEFT'nin şehirlerarası bir sürüş çevrimi olması nedeniyle çevrim boyunca frenleme çok azdır. Duruş sayısı ise çevrim boyunca bir olup çevrim sonundadır. Bu nedenle rejeneratif enerji kazanımı sınırlı olmaktadır. Şekil 5.22.'de SoC eğrisi incelendiğinde, eğri trendinin aşağı yönlü olduğu görülür.

Strateji-B için HWEFT şehirlerarası sürüş çevriminde elde edilen 4,1 l/100km yakıt tüketim değeri, şehiriçi sürüş çevrimi UDDS ile kıyaslandığında beklendiği üzere oldukça iyidir. Yakıt tüketimi, Strateji-B bulanık mantık enerji yönetimi stratejisi ile şehir içinde 5,1 l/100km iken şehirlerarasında 4,1 l/100km mertebelerindedir. Yakıt tüketiminde, şehiriçi ile şehirlerarası arasında %19,6'lık bir fark olduğu görülmektedir.

Egzoz emisyonları açısından bakıldığında çevrimin yaklaşık ilk 75 saniyesinde motorun soğuk olması ve hızlanma ihtiyacına bağlı içten yanmalı motorun yüksek tork bölgelerinde çalıştırılması sonucu emisyon değerleri Şekil 5.22.'de görüldüğü üzere

yüksektir. Fakat çevrimin şehirlerarası sürüş çevrimi olması dolayısıyla ani ve çok sayıda hızlanmanın olmaması ile içten yanmalı motorun kararlı çalışma bölgesinde daha uzun süreli kalması sonucu egzoz emisyon değerleri şehiriçi çevrime göre düşük kalmaktadır. Buna göre HWFET sürüş çevriminde HC salınımı 0,238 g/km, CO salınımı 0,964 g/km, NO_x salınım 0,19 g/km olmuştur. Şehir içi sürüş çevrimi ile kıyaslandığında HC salınımı %24,9 CO salınımı %27,4 NO_x salınımı %8,21 azalmıştır.

Simülasyon sonucunda HWEFT sürüş çevrimi için ADVISOR'dan alınan toplam sistem verimlilik değeri %23,6 olmuştur. Elektrik motorunun çevrim boyunca ortalama verimi %69 bataryanın ise %87 olarak elde edilmiştir.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hibrid elektrikli araçların performansları, kullanılan enerji yönetim stratejileri ile doğrudan ilgilidir. Enerji yönetiminde kullanılan stratejinin etkinliği arttıkça hibrid elektrikli aracın enerji verimliliği artmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, bulanık mantık kural tabanlı iki ayrı enerji yönetim stratejisi tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan stratejiler, simülasyon programı olarak kullanılan ADVISOR tarafından sunulan, referans olarak alınan, bulanık mantık kural tabanlı enerji yönetim stratejisi ile kıyaslanmıştır.

Enerji yönetim stratejileri, farklı parametrelerin en iyilenmesi amaçlanarak tasarlanmıştır.

İlk strateji, Strateji-A olarak adlandırılmıştır. Strateji-A'nın hedefi yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını azaltmak aynı zamanda sürüş çevrimi boyunca bataryanın şarjlılık oranının düşmesini önlemektir. Bu amaçların sağlanabilmesi için üst seviye bulanık mantık enerji yönetim kontrolörünün kural tabanı, içten yanmalı motorun çıkış torku, bataryanın nispeten yüksek şarjlılık oranlarında bile yüksek tork bölgesinde olacak şekilde oluşturulmuştur. Böylece rejeneratif enerji geri kazanımının yanında içten yanmalı motor daha fazla yol yükünü karşılayarak elektrik motorunun daha düşük güçlerde çalışması sağlanarak batarya şarjlılık oranının düşmesi önlenecektir.

İkinci strateji, Strateji-B olarak adlandırılmıştır. Strateji-B, yalnızca yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını azaltmak üzerine odaklanmıştır. Bu amacın sağlanabilmesi için üst seviye bulanık mantık enerji yönetim kontrolörünün kural tabanı, içten yanmalı motorun çıkış torku, bataryanın şarj edilmeye ihtiyaç duyduğu düşük şarjlılık oranlarında dahi düşük kalacak şekilde oluşturulmuştur.

ADVISOR üzerinde, bir paralel hibrid elektrikli araç konfigürasyonu için tahrik elemanları ve teknik parametreleri belirlenmiştir. Gerçekçi simülasyon sonuçları alabilmek adına şehir içi tipte bir otomobilin fiziksel özelliklerinin modellenebilmesi adına Ford Focus-II Hatchback aracı referans alınmıştır.

Tasarlanan stratejiler ve referans strateji ADVISOR üzerinde, belirlenen araç modeli için, farklı sürüş çevrimlerinde koşturulmuştur. Simülasyonlarda şehir içi yol şartlarını temsilen UDDS, şehirler arası yol şartlarını temsilen HWFET olmak üzere iki ayrı sürüş çevrimi kullanılmıştır.

Strateji-A için UDDS sürüş çevriminde yapılan simülasyonlarda, strateji tasarımından beklenildiği gibi hem yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları azaltılmış hem de batarya şarjlılık oranı korunmuştur. İçten yanmalı motor çalışma noktaları daha verimli bölgeye kaymıştır.

Strateji-A, yakıt tüketiminde, şehir içinde referans stratejiye göre %5,79 avantaj sağlamaktadır. Batarya şarjlılık oranının amaçlandığı gibi sadece %0,85'lik düşüşle korunduğu görülmüştür. Egzoz emisyonları referans strateji ile karşılaştırıldığında, CO emisyonlarında %4,24 azalma, NO_x emisyonlarında %12,05 azalma görülürken HC emisyonlarında %2'lik bir artış olmuştur.

Enerji verimliliği %10,3'tür. Referans stratejiye göre enerji verimliğinde %0,8'lik iyileşme görülmektedir.

Strateji-A için HWFET sürüş çevriminde yapılan simülasyonlarda, strateji tasarımından beklenildiği gibi yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları azalmıştır. Fakat batarya şarjlılık oranı beklenen aksine korunamamıştır.

Strateji-A, yakıt tüketiminde, şehirlerarasında referans stratejiye göre %20,9 avantaj sağlamaktadır. Batarya şarjlılık oranındaki düşüş ise %5,71'dir. Şehirler arası sürüş çevriminin karakteristiğinden dolayı, mevcut rejeneratif enerjinin bataryayı şarj etmekte yetersiz kaldığı görülmüştür.

Bu durum, kural tabanının her bir sürüş çevrimi için ayrı ayrı oluşturulması gerekliliğini ortaya koymuştur.

Egzoz emisyonları şehirler arası çevrimde referans strateji ile karşılaştırıldığında, CO emisyonlarında %1,98 azalma, NO_x emisyonlarında %2,82 azalma görülürken HC emisyonlarında %0,42'lik bir artış olmuştur.

Enerji verimliliği %22'dir. Referans stratejiye göre enerji verimliğinde %12,5'lik iyileşme görülmüştür.

Strateji-B için UDDS sürüş çevriminde yapılan simülasyonlarda, strateji tasarımından beklenildiği gibi yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarında düşüş gözlenmiştir. Özellikle yakıt tüketimi anlamında son derece başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Strateji-B'nin tasarımında, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının azaltılmasına odaklanılmıştır. Buna göre şehir içi simülasyon sonuçlarında referans stratejiye göre %26'lık yakıt tasarrufu yapıldığı görülmüştür. Batarya şarjlılık oranı burada ikinci plandadır. Yine strateji tasarımıyla orantılı olarak batarya şarjlılık oranındaki düşüş %10 olmuştur. Strateji-A ve referans strateji ile kıyaslandığında düşüş miktarı oldukça yüksektir.

Egzoz emisyonları referans strateji ile karşılaştırıldığında, CO emisyonlarında %25,23 azalma, NO_x emisyonlarında %43,28 azalma görülürken HC emisyonlarında % 7'lik bir artış olmuştur. Strateji-B'nin şehir içi uygulamasında hem egzoz emisyonları hem de yakıt tüketimi açısından başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Enerji verimliliği %12'dir. Referans stratejiye göre enerji verimliğinde %2,5'lik iyileşme görülmektedir.

Strateji-B için HWEFT sürüş çevriminde yapılan simülasyonlarda, strateji tasarımından beklenildiği gibi yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları azalmıştır.

Strateji-B, yakıt tüketiminde, şehirler arasında referans stratejiye göre %12,7 avantaj sağlamaktadır. Batarya şarjlılık oranındaki düşüş ise %11,85'tir. Strateji-A'da olduğu gibi şehirlerarası sürüş çevriminin karakteristiğinden dolayı, mevcut rejeneratif enerjinin bataryayı şarj etmekte yetersiz kalması ile batarya şarjlılık oranındaki düşüş aynı çevrim için Strateji-A'ya göre daha fazladır.

Egzoz emisyonları referans strateji ile karşılaştırıldığında, CO emisyonlarında %21,19 azalma, NO_x emisyonlarında %32,8 azalma görülürken HC emisyonlarında %1,2'lik bir artış olmuştur. Strateji-B'nin şehirler arası uygulamasında hem egzoz emisyonları hem de yakıt tüketimi açısından tasarımla paralel sonuçlar elde edilmiştir.

Enerji verimliliği %23,6'dır. Referans stratejiye göre enerji verimliğinde %14,1'lik iyileşme görülmektedir. Yapılan simülasyonlar içerisinde elde edilen en iyi enerji verim değeridir.

Buna göre simülasyon çıktıları, enerji yönetim stratejilerinin doğru belirlenmesinin enerji verimliliği dolayısıyla hibrid elektrikli aracın genel verimliliği açısından önemini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Schouten, N. J., Salman, M., Kheir, N.A., Energy Management Strategies for Parallel Hybrid Vehicles using Fuzzy Logic, Control Engineering Practise, pp. 171-177, 2003.
- [2] Rajagopalan, A., Washington, G., Rizzoni, G., Guezennec, Y., Development of Fuzzy Logic and Neural Network Control and Advanced Emmissions Modeling for Parallel Hybrid Vehicles, National Renewable Energy Laboratory, NREL, 2003.
- [3] Syed, F. U., Filev, D., Ying, H., Fuzzy-Rule Based Driver Advisory System for Fuel Economy Improvement in a Hybrid Electric Vehicle, Annu. Conf. NAFIPS, 2007.
- [4] Mohebbi, M. F. M., Adaptive Neuro Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles, International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2007.
- [5] Naderi, P., Farhadi, A., Bathaee, S., Forward Simulation of a Parallel Hybrid Vehicle and Fuzzy Controller Design for Driving/Regenerative Propose, Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology, pp. 595-602, 2008.
- [6] Kessels, J. T., Koot, M. W. T., Bosch, P. P., Kok, D. B., Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology , pp. 3428-3440, 2008.
- [7] Bin, Y., Li, Y., Gonnng, Q., Peng, Z. P., Multi-Information Integrated Trip Spesific Optimal Power Management for Plug-in Hybrid Electric Vehicles, American Control Conference, 2009.
- [8] Bahar, D., Çimen, M. A., Tuncay, R. N., Development of Control Strategy Based on Fuzzy Logic Control for a Parallel Hybrid Vehicle, Proc. of IEEE, Electrical and Electronics Engineering, pp. 342-346, 2009.
- [9] Majdi, L., Ghaffari, A., Fatehi, N., Control Strategy in Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic Controller, International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009.
- [10] Xia, M., Langlois, N., Optimum Fuzzy Logic Control Strategy of Hybrid Vehicles Using ADVISOR, International Confernece on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010.

- [11] Boyalı, A., Güvenç, L., Real-Time Controller Design for a Parallel Hybrid Electric Vehicle Using Neuro-Dynamic Programming Method, Proc. of IEEE, Systems and Cybernetics (SMC), pp. 4318-4324, 2010.
- [12] Uyulan, Ç., Seri Hibrit Elektrikli Aracın Modellenmesi ve Bulanık Mantık Kural Tabanlı Enerji Yönetim Stratejisinin Uygulanması, İstanbul Teknik Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2010.
- [13] Xu, B., Li, M., Yang, S., Guo, B., Design and Simulation of Fuzzy Control Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicle, International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2010.
- [14] Wu, J., Zhang, C. H., Cui, N. X., Fuzzy Energy Management Strategy for a Hybrid Electric Vehicle Based on Driving Cycle Recognition, International Journal of Automotive Technologies, pp. 1159-1167, 2012.
- [15] Zhu, C., Yang, B., Energy Management in Parallel Hybrid Vehicle Using Fuzzy Control, International Conference on Information Science and Technology, 2012.
- [16] Correa, F. C., Eckert, J. J., Silva, L. C., Santiciolli, F. M., Dedini, F. G., Application of Fuzzy Logic for Power Management in Hybrid Vehicles, Mecanica Computacional, pp. 2445-2455, 2014.
- [17] Lee, S., Choi, J., Jeong, K., Kim, H., A Study of Fuel Economy Improvement in a Plug-in Hybrid Electric Vehicle using Engine ON/OFF and Battery Charging Power Control Based on Driver Characteristics, Energies 2015, pp. 10106-10126, 2015.
- [18] Yaich, M., Ghariani, M., Hachicha, M. R., Modelling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles for Recreational Vehicle, 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, Monastir, Tunus, 2015.
- [19] Lihao, Y., Wang, Y., Zhu, C., Study on Fuzzy Energy Management Strategy of Parallel Hybrid Vehicle Based on Quantum PSO Algorithm, International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, pp. 147-158, 2016.
- [20] Pei, J. Z., Su, Y. X., Zhang, D. H., Fuzzy Energy Management Strategy for Parallel HEV Based on Pigeon-Inspired Optimization Algorithm, SCI-China Tech, pp. 425-433, 2016.
- [21] Gujarathi, P. K., Shah, V., Lokhande, M., Fuzzy Logic Based Energy Management Strategy for Converted Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle, IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium, 2017.

- [22] Zhang, X., Liu, Y., Zhang, J., Dai, W., Liu, Z., A Fuzzy Neural Network Energy Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicle, International Conference on Modelling, Identification and Control, Kunming, China, 2017.
- [23] Chen, H., Chen, J., Wu, C., Liu, H., Fuzzy Logic Based Energy Management for Fuel Cell/Battery Hybrid Systems, European Control Conference, Limassol, Cyprus, 2018.
- [24] Elkhatib, K., Adouane, L., Intelligent Energy Management Strategy Based on Artificial Neural Fuzzy for Hybrid Vehicle, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, pp. 112-125, 2018.
- [25] Smith, D., Douglas, R., Naeem, W., Fuzzy Rule-Based Energy Management Strategy for a Parallel Mild-Hybrid Electric Bus, IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference, 2018.
- [26] Tian, W., Wang, X., Lu, Z., Huang, Y., Tian, G., Adaptive Fuzzy Logic Energy Management Strategy Based on Reasonable SoC Reference Curve for Online Control of Plug-in Hybrid Electric City Bus, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 1607-1617, 2018.
- [27] Ehsani, M., Gao, Y., Emadi, A., Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2009.
- [28] Wakefield, E. H., History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Vehicles, SAE, 1998.
- [29] www.afdc.energy.gov/data/, Erişim Tarihi: 4.11.2017 .
- [30] <http://toyotanews.pressroom.toyota.com/releases>, Toyota News, Erişim Tarihi: 7.11.2017.
- [31] www.tehad.org, TEHAD Erişim Tarihi: 6.11.2017 .
- [32] www.bp.com/energyoutlook, BP Energy Outlook, Erişim Tarihi: 7.11.2017 .
- [33] Ünlü, N., Karahan, Ş., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün F., Tırıs, M., Elektrikli Araçlar, Tübitak MAM, Kocaeli, 2003.
- [34] Lo, E. W., Review on the Configurations of Hybrid Electric Vehicles, 2009.
- [35] Maggetto, G., Mierlo, J. V., Electric and Electric Hybrid Vehicle Technology: A Survey, IEE Seminar Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles, 2000.
- [36] Lucena, S. E., A Survey on Electric and Hybrid Electric Vehicle Technology, Electric Vehicles-The Benefits and Barriers, Rijeka, Croatia, 2011.

- [37] Bayındır, K. C., Gözüküçük, M. A., Teke, A., A Comprehensive Overview of Hybrid Electric Vehicle Powertrain Configurations, Powertrain Control Techniques and Electronic Control Units, Energy Conversion and Management, Elsevier, no. 52, 2011.
- [38] Ehsani, E., Yimin, G., Miller, J. M., Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives Proceedings of the IEEE, IEEE, cilt 95, pp. 719-728, 2007.
- [39] Miller, J. M., Propulsion System for Hybrid Vehicles, The Institution of Electrical Engineers, London, 2003.
- [40] Qi, L., Chen, W., Li, Y., Liu, S., Huang, J., Energy Management Strategy for Fuel Cell/Battery/Ultracapacitor Hybrid Vehicle based on Fuzzy Logic, International Journal of Electrical Power&Energy Systems, cilt 43, pp. 514-525, 2011.
- [41] Biliroğlu, A. Ö., Seri Hibrit Elektrikli Aracın Modellenmesi ve Kontrolü, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, 2009.
- [42] Baumann, B. M., Washington, G., Glenn, B.G., Rizonni, G., Mechatronic Design and Control of Hybrid Electric Vehicles, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2000.
- [43] Pesaran, A. A., Choices and Requirements of Batteries for EVs, HEVs, PHEVs, NREL, 2011.
- [44] Enang, W., Bannister, C., Modelling and Control of Hybrid Electric Vehicles (A Comprehensive Review), Renewable and Sustainable Energy Reviews, cilt 74, pp. 1210-1239, 2017.
- [45] Yang, Y., Emadi, A., Hybrid and Plug-in Hybrid Vehicles, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, John Wiley&Sons, 2013, pp. 1-22.
- [46] Boyalı, A., Hibrit Elektrikli Yol Taşıtlarının Modellenmesi ve Kontrolü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2008.
- [47] Bitsche, O., Gutmann, G., Systems for Hybrid Cars, Journal of Power Sources, pp. 8-15, 2004.
- [48] Kessels, T. B. A., Energy Management for Automotive Power Nets, Eindhoven Technical University, PhD Thesis, Eindhoven, 2007.
- [49] Erbeyler, S. A., Hibrit Elektrikli Hafif Ticari Araçta Dizel Motoru Azotoksit (NOX) Emisyonlarının Optimizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2007.
- [50] Alagarsamy, T., Moulik, B., A Review on Optimal Design of Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles, 3 rd International Conference for Convergence in Technology, Pune, India, 2018.

- [51] Yeo, H., Kim, H., Hardware-in-the-loop Simulation of Regenerative Braking for a Hybrid Electric Vehicle, *Journal of Automobile Engineering*, 2002.
- [52] Axsen, J., Kurani, K. S., Hybrid, Plug-in Hybrid or Electric - What Do Car Buyers Want ?, *Energy Policy*, 2013.
- [53] Chau, K. T., Wong, Y. S., Overview of Power Management in Hybrid Electric Vehicles, *Energy Conversion and Management*, vol. 43, pp. 1953-1968, 2002.
- [54] Huang, M., Optimal Multilevel Hierarchical Control Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicle, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Windsor, UK, 2006.
- [55] Chan, C. C., The State of the Art of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles, *Proceeding of the IEEE*, pp. 704-718, 2007.
- [56] Enang, W., Bannister, C., Brace, C., Vagg, C., Modelling and Heuristic Control of a Parallel Hybrid Electric Vehicle, *Proceedings of the Institution of a Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, pp. 1494-1513, 2015.
- [57] Salmasi, F. R., Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison and Future Trends., *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 2393-2404, 2007.
- [58] Tie, S. F., Tan, C. W., A Review of Energy Sources and Energy Management System in Electric Vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 82-102, 2013.
- [59] Zhang, P., Yan, F., Du, C., A Comprehensive Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles based on Bibliometrics, *Renewable Sustainable Energy Review*, pp. 88-104, 2015.
- [60] Xiong, W., Zhang, Y., Yin, C., Optimal Energy Management for a Series-Parallel Hybrid Electric Bus, *Energy Conversion Management*, pp. 1730-1738, 2009.
- [61] Zadeh, L. A., Fuzzy Sets & Systems, *Proc. Symp. System Theory*, 1965.
- [62] Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, *Inform. Control* 8, 1965.
- [63] Işıklı, Ş., Bulanık Mantık ve Bulanık Teknolojiler, *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Felsefe Bölümü Dergisi*, pp. 105-126, 2008.
- [64] Zadeh, L. A. Commercialism and Human Values, *Azerbaijan International*, 1998.
- [65] ADVISOR, Advanced Vehicle Simulator Açıklama Notları, NREL, 2002.

- [66] Chan, C., Bouscayrol, A., Chen, K., Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles: Architectures and Modelling, IEEE Transactions on Vehicular Technology, cilt 59, pp. 589-598, 2010.



ÖZGEÇMİŞ

Direncan Boyraz, 18.06.1992’de İstanbul’da doğdu. İlk ve orta eğitimini İstanbul’da tamamladı. 2010 yılında Nişantaşı Nuri Akın Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2011 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü 2015 yılında; 2013 yılında Çift Anadal Programı kapsamında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü’nü 2016 yılında bitirdi. Ardından yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Bilim Dalı’nda devam etti. 2016-2017 yılları arasında TOFAŞ-Türk Otomobil Fabrikası A.Ş’de yarı zamanlı proje mühendisi olarak çalıştı. Halen TAI-Tusaş Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, İstanbul Teknopark ofisinde tasarım mühendisi olarak görev yapmaktadır.

