MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERİ HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MİNİMUM ENERJİ TÜKETİM STRATEJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

MEHMET GÖL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Ahu Ece Hartavı KARCI

İSTANBUL, 2024

MARMARA UNIVERSITY

INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES

DEVELOPMENT OF AN ENERGY CONSUMPTION MINIMIZATION STRATEGY FOR SERIES HYBRID VEHICLE

MEHMET GÖL

MASTER THESIS

Department of Electric and Electronic Engineering

Thesis Supervisor

Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA

Thesis CO- Supervisor

Dr. Ahu Ece Hartavi KARCI

İSTANBUL, 2024

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZET ..... **iii**

ABSTRACT ..... **iv**

SEMBOLLER ..... **v**

KISALTMALAR ..... **viii**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**

TABLO LİSTESİ ..... **xii**

1. GİRİŞ 1
   1.1 Literatür Özeti 1
   1.2 Tezin Amacı 3
   1.3 Enerji Yönetim Stratejileri 4
2. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR 5
   2.1 Giriş 5
   2.2 Hibrid Elektrikli Araçların Sınıflandırılması 6
      2.2.1 Seri Hibrid Elektrikli Araçlar 7
      2.2.2 Paralel Hibrid Elektrikli Araçlar 8
      2.2.3 Seri-Paralel Hibrid Elektrikli Araçlar 9
      2.2.4 Kompleks Hibrid Elektrikli Araçlar 10
   2.3 Hibrid Elektrikli Araçların Modellenmesi 10
      2.3.1 Araç Dinamiği 11
      2.3.2 İçten Yanmalı Motor 15
      2.3.2 Batarya 18
      2.3.2 Elektrik Makinası 20
      2.3.2 Araç Tekerleği 23
      2.3.2 Sürücü Modeli 24
      2.3.2 Aksesuar Yükleri 24
   2.4 Sonuç 28
3. ECMS KONTROL 31
   3.1 Giriş 31
   3.2 Problem Formulasyonu 31
   3.3 Sonuç 34

4. ECMS TABANLI KONTROL STRATEJİSİ 35
4.1 Giriş 35
4.2 Penaltı Fonksiyonu 35
4.3 Sonuç 38
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 39
5.1 Giriş 39
5.2 Simulasyon Sonuçları 39
5.3 Sonuç 52
KAYNAKÇA 56

ÖZET

SERİ HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MİNİMUM ENERJİ TÜKETİM STRATEJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ulaşım türleri arasında en üst sırada ise karayolu ulaşımı gelmektedir. Karayolu taşımacılığı artan talepler ve gelişmekte olan ülkelerin büyümekte olan ekonomisinde her geçen gün daha da etkili bir aktör haline gelmiştir. Dünyadaki otomotiv üretimine bakıldığında hali hazırda piyasada 1 milyar otomobilin yer aldığı ve bu sayının 2050 yılında 2,5 milyara ulaşması öngörülmektedir. Ayrıca yakıt tüketimi ve emisyon oranı 1970 yılından bu yana %78 artmıştır. Bu durumun mevcut geleneksel araçların üretilmesine devam edilmesi durumunda yakıt tüketiminin, emisyonun, gürültü kirliliğinin ve yakıt fiyatlarının artması gibi bir takım olumsuz etkileri de beraberinde getireceği açıktır. Bu durum hükümetlerin ve birçok çevre dostu kuruluşların, yakıt tüketimi ve zararlı gaz emisyonu salınımı ile ilgili daha sıkı standartlar hazırlamalarına neden olmuştur. Gittikçe sıkılaşan yakıt ekonomisi ve gaz emisyonları kriterleri, otomotiv üreticilerini verimliliği arttıracak ve emisyon salınımını en aza indirgeyecek yeni teknolojiler geliştirmeye teşvik etmiştir. Gerçekleştirilen araştırma çalışmaları enerji krizini çözmede ve küresel ısınmaya yol açan sera gazı etkilerinin azaltılmasında Elektrikli Araçların (EA) ideal bir çözüm olduğunu net bir biçimde ortaya koymuştur. Araçların elektrifikasyonu her ne kadar önemli olsa da mevcut batarya teknolojisinin yetersizliğinden dolayı 10-15 yıl içerisinde hibrid araçların pazara daha hakim olması beklenmektedir. Hibrid araçlar arasında ise menzil sorunun en düşük olduğu araç konfigürasyonu seri hibrid araçlardır. Bu bağlamda teknojiyi takip edebilmek ve enerji sorununu azaltmak amacıyla bu çalışma kapsamında seri hibrid araçların enerji tüketimi minimizasyon algoritması geliştirilecektir

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF AN ENERGY CONSUMPTION MINIMISATION STRATEGY FOR SERIES-HYBRID VEHICLE

Road transportation is the highest among the transportation types. Road transportation is becoming an increasingly important factor due to rising demand and developing nations' expanding economies. Looking at the automotive production in the world, It is projected that by 2050, there will be 2.5 billion vehicle on the road, up from the current 1 billion. Since 1970, pollutants and fuel consumption have both climbed by 78%. If this situation continues to produce existing traditional vehicles, it is clear that fuel consumption, emissions, noise pollution and fuel prices will increase. This has led the governments and many other eco-friendly organizations to develop stricter standards of fuel consumption and emission of harmful gas emissions. Increasingly tightening fuel economy and gas emissions criteria have encouraged automotive manufacturers to develop new technologies that will improve efficiency and minimize emissions emissions. Electric vehicles (EVs) are the best way to alleviate the energy problem and lessen the impact of greenhouse gases on global warming, according to numerous research reports. While vehicle electrification is crucial, hybrids are predicted to take the lead in the market in the next ten to fifteen years because current battery technology is not up to par. Series hybrid vehicles are the hybrid vehicle arrangement with the least amount of range issues. To keep up with technology and lessen the energy issue, an algorithm for series hybrid vehicle energy consumption minimization will be created as part of this thesis.

SEMBOLLER/SYMBOLS

F_r	Yuvarlanma Direnci Kuvveti
F_{aero}	Aerodinamik Kuvvet
F_{hc}	Yokuş Tırmanma Kuvveti
F_{net}	Araca Etkiyen Net Kuvvet
F_{acc}	İvmelenme Kuvveti
μ_r	Yuvarlanma Direnci Katsayısı
ρ	Havanın Yoğunluğu
C_x	Aerodinamik Katsayı
i_{dr}	Diferansiyel Oranı
l_f	Ön Şaft Uzunluğu
l_r	Arka Şaft Uzunluğu
η_{diff}	Diferansiyel Verimi
A	Aracın Ön İzdüşüm Alanı
m	Aracın Kütlesi
g	Yerçekimi İvmesi
v	Aracın Hızı
α	Aracın Yer İle Yapmış Olduğu Açı
P_c	İym Gücü
μ_t	İym Verimi
R_{int}	Batarya İç Direnci
R_{ch}	Batarya Şarj İç Direnci
R_{dch}	Batarya Deşarj İç Direnci
T	Batarya Sıcaklığı
I	Batarya Akımı
V_{nom}	Nominal Voltaj
V_{batt}	Batarya Voltajı
E_0	Batarya A. D. Voltajı (Open Circuit)
E_{batt}	Batarya Voltajı (Open Circuit)
P_{req}	Batarya Güç İhtiyacı
Q	Elektriksel Yük

R_{polar}	Polarizasyon Direnvi
$\mathbf{i_{filter}}$	Filtrelenmiş Akım
K_A	Bataryanın Eksponansiyel Alandaki Voltaj Düşümü
K_B	Eksponansiyel Bölgenin Zaman Sabiti
$V_{a,b,c}$	FDAM'nin Fazlarındaki Gerilim
$R_{a,b,c}$	Sargı Direnci
$L_{a,b,c}$	Sargı Öz Endüktansı
$M_{a,b,c}$	Karşıt Öz Endüktans
K_v	Motor Sabiti
w_m	Motor Hızı
M_e	Toplam Moment
M_i	Yük Momenti
J	Eylemsizlik Momentin
B	Sürtünme Katsayısı
B_x	Pacejka Modelinin Katsayısı
C	Pacejka Modelinin Katsayısı
D	Pacejka Modelinin Katsayısı
E	Pacejka Modelinin Katsayısı
V_{sx}	Boyuna Kayma Hızı
R_e	Tekerin Efektif Yarıçapı
V_x	Aracın Boyuna Hızı
Ω	Tekerleğin Açısal Hızı
s	Boyuna Kayma
V_{sy}	Yanal Kayma
u_{th}	Gaz Pedalı Sinyali
u_{br}	Fren Pedalı Sinyali
K_p	PI Kontolcü Oransal Katsayısı
K_i	PI Kontolcü İntegral Katsayısı
e	Hata Sinyali
$P_{comp\ A/C}$	Kompresör Gücü
$\mathbf{b}_{comp\ A/C}$	Kompresör Aç Kapa Sinyali
$K_{comp\ A/C}$	Kompresör Güç Sabiti
u_{preq-L}	Yüksek Güç Gereksinim Sinyali

u_{preq-H}	Düşük Güç Gereksinim Sinyali
$P_{c\,dc/dc}$	DC/DC Harcadığı Güç
$P_{N\,dc/dc}$	DC/DC Nominal Gücü
P_r	Rejeneratif Frenlemeden Arta Kalan Güç
$\eta_{dc/dc}$	Dc/Dc Nin Verimi
Q_{24}	24 V Akünün Kapasitesi
$V_{N/24}$	24 V Akünün Nominal Voltajı
$\eta_{chr/24}$	24 V Akünün Şarj Verimi,
$\eta_{dchr/24}$	24 V Akünün Deşarj Verimi,
P_{ice_f}	İYM Fan Gücü
P_{ice}	İym Gücü
n_{ice}	İYM Hızı
δ_{cf}	Kayma Hızı
n_{max}	İYM Maksimum Hızı
η_{cf}	İYM Soğutma Fanının Verimidir
J_t	Harcanan Toplam Enerji
P_{EM}	Em Gücü
P_{ICE}^{opt}	Optimal İYM Gücü
P_{EM}^{opt}	Optimal Em Gücü
SOC	Sarj Seviyesi
SOC_{min}	Minimum Şarj Seviyesi
SOC_{max}	Maximum Şarj Seviyesi
η_{batt}	Batarya Verimi
η_{EM}	Em Verimi
η_{PE}	Güç Elektroniği Verimi
$\dot{m}_{ICE}$	Harcanılan Yakıt
s	Penaltı Faktörü (Ağırlık Fonksiyonu)
s_{opt}	Optimal Penaltı Faktörü
SOC_{ref}	Referans Şarj Değeri
s_k	Penaltı Faktörünün Sabiti
f_{SOC}	Penaltı Faktörünün Değişkeni
$H(t)$	Hamiltonian Fonksiyonu

KISALTMALAR/ABBREVIATIONS

EA	Elektrikli Araçlar
HEA	Hibrid Elektrikli Araç
S-HEA	Seri Hibrid Elektrikli Araç
P-HEA	Paralel Hibrid Elektrikli Araç
SP-HEA	Seri Paralel Hibrid Elektrikli Araç
K-HEA	Komplex Hibrid Elektrikli Araç
EM	Elektrik Motoru
İYM	İçten Yanmalı Motor
DKT	Deterministik Kural Tabanlı
BK	Bulanık Control
OTK	Optimizasyon Tabanlı Kontrol
ECMS	Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minizasyon Stratejisi
EYS	Enerji Yönetim Stratejisi
SHB	Seri Hibrid Buldozer
GKF	Geri Kazanımlı Fren
HIL	Harware In The Loop Testi
NiMH	Nikel Metal Hidrit
SOC	Sarj Seviyesi
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Makinası
DP	Dinamik Programlama
PMP	Pontryagin'in Minimumu

ŞEKİL

Şekil 1.1 Petrol rezervlerinin öngörülen talebi ve arzı 2

Şekil 1.2 Dünya petrol talebinde artış..... 3

Şekil 1.3 HEA'lara uygulanan kontrol stratejileri 4

Şekil 2.1 HEA Konfigürasyonları..... 6

Şekil 2.2 Seri-hibrit araç konfigürasyonu 6

Şekil 2.3 Paralel hibrid araç konfigürasyonu..... 8

Şekil 2.4 Seri Paralel hibrid araç konfigürasyonu 9

Şekil 2.5 Komplex hibrid araç konfigürasyonu 10

Şekil 2.6 Simulayon Şeması 11

Şekil 2.7 Araç üzerine etkiyen kuvvetler 11

Şekil 2.8 Yuvarlanma Direnci 12

Şekil 2.9 Aerodinamik Kuvvet 14

Şekil 2.10 Yokuş Tırmanma Direnci 14

Şekil 2.11 İvmelenme Kuvveti 15

Şekil 2.12 İYM tork haritası 16

Şekil 2.13 İYM verim haritası 16

Şekil 2.14 İYM CO2 emisyon haritası 17

Şekil 2.15 İYM CO emisyon haritası 17

Şekil 2.16 İYM NOx emisyon haritası 17

Şekil 2.17 Akü elektriksel eşdeğer devresi..... 18

Şekil 2.18 Exponansiyel Voltajın bulunması..... 19

Şekil 2.19 Batarya Çıkış Voltajı 20

Şekil 2.20 EM Tork Haritası..... 22

Şekil 2.21 EM Verim Haritası 22

Şekil 2.22 Elektrik Motoru Modeli..... 22

Şekil 2.23 Yanal ve doğrusal kayma 24

Şekil 2.24 Kayma-Boyuna Kuvvet Grafiği 24

Şekil 2.25 Tekerlek Bloğu 24

Şekil 2.26 PI Kontrollü Sürücü 25

Şekil 2.27 A/C Klima Modeli 26

Şekil 2.28 24 V Batarya 27

Şekil 2.29 İYM Soğutma Fanı Modeli 27

Şekil 2.30 Aksesuar Yükleri 28

Şekil 2.31 Seri-HEA Akış Şeması 30

Şekil 2.32 Seri-HEA Simulink Modeli 30

Şekil 3.1 IYM verim haritasına göre minimum belirlenmesi 31

Şekil 4.1 Penaltı fonksiyonun 0.2 olması durumundaki minimum 33

Şekil 4.2 Penaltı fonksiyonun 1.6 olması durumundaki minimum 33

Şekil 4.3 n değerleri için penaltı fonksiyonu 34

Şekil 4.4 $f_{SOC,I}$ fonksiyonu modeli 35

Şekil 4.5 Penaltı fonksiyonu modeli 35

Şekil 4.6 ECMS kontolcü modeli 36

Şekil 5.1 FİGE Sürüş Çevrimi 36

Şekil 5.2 Deterministik Tabanlı Kontrol Algorisması 37

Şekil 5.3 NREL SOC ve Yakıt Tüketimi 37

Şekil 5.4 NREL Sürüş Çevrimi ve Batarya Gücü 38

Şekil 5.5 NREL Batarya voltajı ve akımı 38

Şekil 5.6 NREL EM çalışma bölgesi 38

Şekil 5.7 NREL SOC ve İçten Yanmalı Motorun Torku 39

Şekil 5.8 SC03 SOC ve Yakıt Tüketimi 40

Şekil 5.9 SC03 Sürüş Çevrimi ve Batarya Gücü 40

Şekil 5.10 SC03 Batarya voltajı ve akımı 40

Şekil 5.11 SC03 EM çalışma bölgesi 41

Şekil 5.12 SC03 SOC ve İçten Yanmalı Motorun Torku 41

Şekil 5.13 FİGE SOC ve Yakıt Tüketimi 42

Şekil 5.14 FİGE Sürüş Çevrimi ve Batarya Gücü 42

Şekil 5.15 FİGE Batarya voltajı ve akımı 42

Şekil 5.16 FİGE EM çalışma bölgesi 43

Şekil 5.17 FİGE SOC ve İçten Yanmalı Motorun Torku 43

Şekil 5.18 Orange SOC ve Yakıt Tüketimi 44

Şekil 5.19 Orange Sürüş Çevrimi ve Batarya Gücü 44

Şekil 5.20 Orange Batarya voltajı ve akımı 44

Şekil 5.21 Orange EM çalışma bölgesi 45

Şekil 5.22 Orange SOC ve İçten Yanmalı Motorun Torku 45

TABLO LİSTESİ/LIST OF TABLES

Tablo 2.1 Araç Parametreleri 26

Tablo 5.1 ECMS Algoritmasının Benzetim Sonuçları 45

Tablo 5.2 Kural Tabanlı Algoritmanın Benzetim Sonuçları 47

Tablo 5.3 Enerji Yönetim Stratejilerinin Karşılaştırılması 49

1. GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Taşıtlar dünyada kapsamış oldukları pazar payı ile hem sanayinin hem de bilim ve teknoloji çevrelerinin üzerinde yoğun olarak çalıştığı konulardan biri olmuştur. Özellikle motorlu taşıtların kullanımından kaynaklanan bir takım çevresel olumsuzluklar ve gün geçtikçe azalan fosil yakıt rezervleri her iki kesiminde bu ihtiyaçlara cevap verebileceği düşünülen Hibrid Elektrikli Araçların (HEA) gelişimine katkıda bulunmasına neden olmuştur (Bureau of Transportation Statistics, 2008).

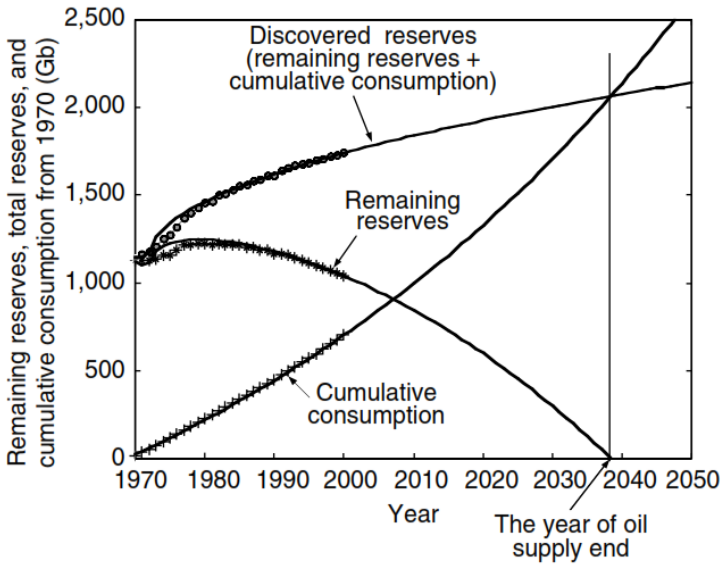
Taşıtlar, insan veya herhangi başka bir nesnenin bir yerden başka bir yere nakledilmesinde kullanılan araçlar olarak tanımlanabilir. Günümüz teknolojisinde yaygın olarak kullanılan taşıtların tahrik sistemlerini içten yanmalı motorlar oluşturmaktadır. Motorlar, yakıtın yanması ile elde etmiş oldukları ısı enerjisini hareket enerjisine dönüştürerek araçların hareket etmelerini sağlayan mekanik yapılardır. Ancak motorlu taşıtlarda fosil yakıtların kullanılması bir takım olumsuz etkileride beraberinde getirmektedir. Özellikle artan dünya nüfusuna paralel olarak motorlu taşıt sayısınında artış göstermesi olumsuz etkilerininde hergeçen gün giderek artmasına neden olmaktadır (Chan, C. C. 2007).

Fosil yakıtların gün geçtikçe azalması ve ileriki dönemlerde bu durumun maliyetin artmasına neden olması bunlardan ilkidir. İkincisi ise fosil yakıtların yanması sonucunda ortaya çıkan emisyon ve sera gazlarının çevreye ve insan sağlığına olan etkileridir (global ısınma, asit yağmurları vb.). Fosil yakıtlara dair bu olumsuzluklar ve gün geçtikçe artarak kendini hissettiren etkileri taşıtlar için alternatif enerji kaynak araştırmalarının hız kazanmasına neden olmuştur. Hibrid elektrikli araçlarda (HEA) bu bağlamda ortaya konulmuş çözümlerden biridir (Mohan N. 1994).

Kayıtlara geçmiş olan ilk HEA Fransız ve Belçika firmaları tarafından geliştirilmiş olup 1899 yılında Paris'te sergilenmiştir. HEA'lara dair çalışmalar incelendiğinde tasarlanma amaçlarının yakıt ekonomisinden çok içten yanmalı motorların (İYM) performanslarına katkıda bulunmak amacı ile geliştirildikleri görülmektedir. Ancak I.Dünya Savaşının ardından ortaya çıkan gelişmiş benzinli motorlar ile rekabeti mümkün olamamıştır. Özellikle elektrik makinelerinin kontrolünde karşılaşılan problemler HEA'ların

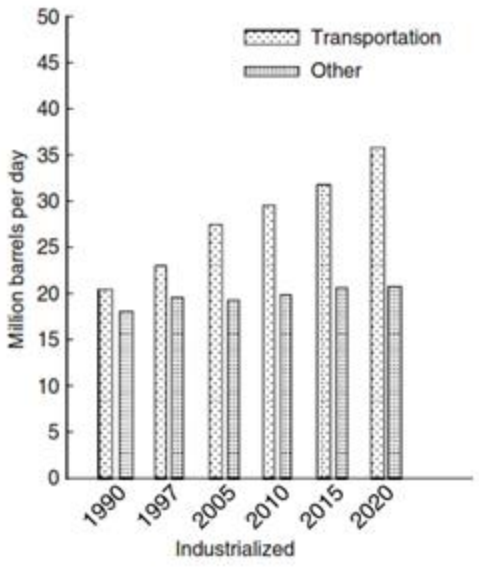
gelişimini büyük ölçüde sınırlamıştır. Bu durum 1960'lı yıllarda güç elektroniğinin gelişimine kadar oldukça yavaş bir biçimde ilerlemiştir. Bu duruma ek olarak akü sistemleri için o zaman ki teknolojinin yeterli olmayışı bu alandaki çalışmaları engelleyen diğer bir etkendir. Fosil yakıt reservlerinin gittikçe azalması ve çevreye olan duyarlılığın artması ile birlikte elektrik makinaları, güç elektroniği ve akü teknolojisinin gelişimi HEA çalışmalarını hızlandırmıştır (Frost & Sullivan 2014) (Mebarki B. 2018).

Dünyanın petrol kaynaklarının petrol arzını tamamen destekleyebileceği yılların sayısı, yeni petrol rezervlerinin keşfine ve kümülatif petrol üretimine (aynı zamanda kümülatif petrol tüketimine) bağlıdır. Tarihsel veriler, yeni petrol rezervlerinin keşfinin yavaş gerçekleştiğini göstermektedir. Öte yandan tüketim, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi yüksek bir büyüme oranı göstermektedir. Petrol keşfi ve tüketimi mevcut eğilimleri takip ederse, dünya petrol kaynağı yaklaşık 2038 yılına kadar kullanılacaktır (Samuel E. de Lucena, 2011).



Şekil 1.1. Petrol rezervlerinin öngörülen talebi ve arzı (Ehsani M. 2010)

Dünyanın altında yeni petrol rezervleri keşfetmek giderek daha zor hale gelmektedi. Ayrıca yeni petrol sahalarını keşfetmenin maliyeti giderek artmaktadır. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, petrolün birincil kullanıcısı ulaşım sektörüdür ve 1997 yılında dünyada kullanılan petrolün %49'unu tüketmektedir (Ehsani M. 2010).



Şekil 1.2. Dünya petrol talebinde artış (US, 2005)

Özetle, yeni nesil ulaşımın en iyi geliştirme stratejisi, hibrit elektrikli araçları bir an önce ticarileştirmek ve aynı zamanda petrol dışı yakıt hücreli araçları mümkün olan en kısa sürede ticarileştirmek için elinden gelenin en iyisini yapmak olacaktır (Technology & Maintenance Council,2006) (Wipke K. B., vd. 1999).

Literatürdeki çalışmalar ele alındığında EA'larda verimi artırmaya yönelik geliştirilen güç kontrol stratejileri ve enerji yönetim sistemleri maksimum enerji ekonomisi ve minimum maliyet ile birlikte iyi bir sürüş konforu sağlamak için tasarlanırlar. Tüm bunların sağlanabilmesi için bir EA oluşturan her bir bileşen arasındaki enerji akışı optimum şekilde ayarlanmalıdır.

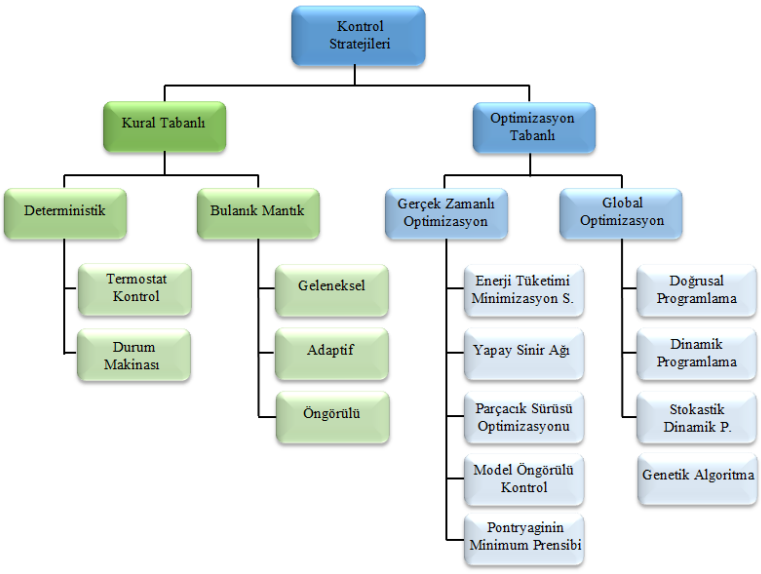
1.2 Tezin Amacı

Dünyadaki otomotiv üretimine bakıldığında hali hazırda piyasada 1 milyar otomobilin yer aldığı ve bu sayının 2050 yılında 2,5 milyara ulaşması öngörülmektedir. Bu durumun mevcut geleneksel araçların üretilmesine devam edilmesi durumunda yakıt tüketiminin, emisyonun, gürültü kirliliğinin ve yakıt fiyatlarının artması gibi bir takım olumsuz etkileri de beraberinde getireceği açıktır. Bu durum hükümetlerin ve birçok çevre dostu kuruluşların, yakıt tüketimi ve zararlı gaz emisyonu salınımı ile ilgili daha sıkı standartlar hazırlamalarına neden olmuştur. Gittikçe sıkılaşan yakıt ekonomisi ve gaz emisyonları kriterleri, otomotiv üreticilerini verimliliği arttıracak ve emisyon salınımını en aza indirgeyecek yeni teknolojiler geliştirmeye teşvik etmiştir (Wouk V. 1995).

Gerçekleştirilen araştırma çalışmaları enerji krizini çözmede ve küresel ısınmaya yol açan sera gazı etkilerinin azaltılmasında Hibrid Elektrikli Araçların ideal bir çözüm olduğunu net bir biçimde ortaya koymuştur. Ancak mevcut akü teknolojisinin enerji yoğunluğunun petrol ile karşılaştırıldığında yeterli olmaması, menzil sorununun ortaya çıkmasına neden olmuştur. EA'ın tek şarjda gidilebileceği menzilin artırılabilmesi ise akü teknolojisine yönelik yapılan çalışmalardan farklı olarak araç verimliliğini arttırarak da geliştirilebilir. Bu ise uygulanan enerji yönetim stratejisinin doğru belirlenmesi ile doğrudan ilintilidir. HEA'ların klasik araçlardan farklı olarak frenleme esnasında kaybedilen enerjinin geri kazanımına ve gelişmiş enerji stratejilerinin uygulanmasına imkân sunan bir platform sunması da bu araçların olumlu yönlerinden bir diğeridir. Bu çerçevede EA'ların menzil sorunu, araç verimliliğini arttırmak sureti ile çözüm getirecek enerji yönetim algoritması geliştirilmiştir. Bu amaçla geliştirilen eşdeğer tüketim minimizasyon algoritması seri hibrid elektrikli araca uygulanmıştır. Gerçeklenen algoritmanın karşılaştırılabilmesi için deterministik tabanlı bir kontrol algoritması da oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1.3 Enerji Yönetim Stratejileri

Enerji yönetim sistemleri için geliştirilen kontrol algoritmalarının en önemli hedefi mevcut enerjiyi optimum bir şekilde kullanarak sürüş menzilini artırmaktır. Hibrid elektrikli araçlardaki enerji yönetim sistemleri için geliştirilen üst seviye kontrolcülerine uygulanan kontrol yöntemleri Şekil 1.3'deki gibi sınıflandırılabilir. Buna göre uygulanan üst seviye kontrolcüler temel olarak iki sınıfa ayrılmaktadır.



Şekil 1.3. HEA'lara uygulanan kontrol stratejileri

2. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

2.1 Giriş

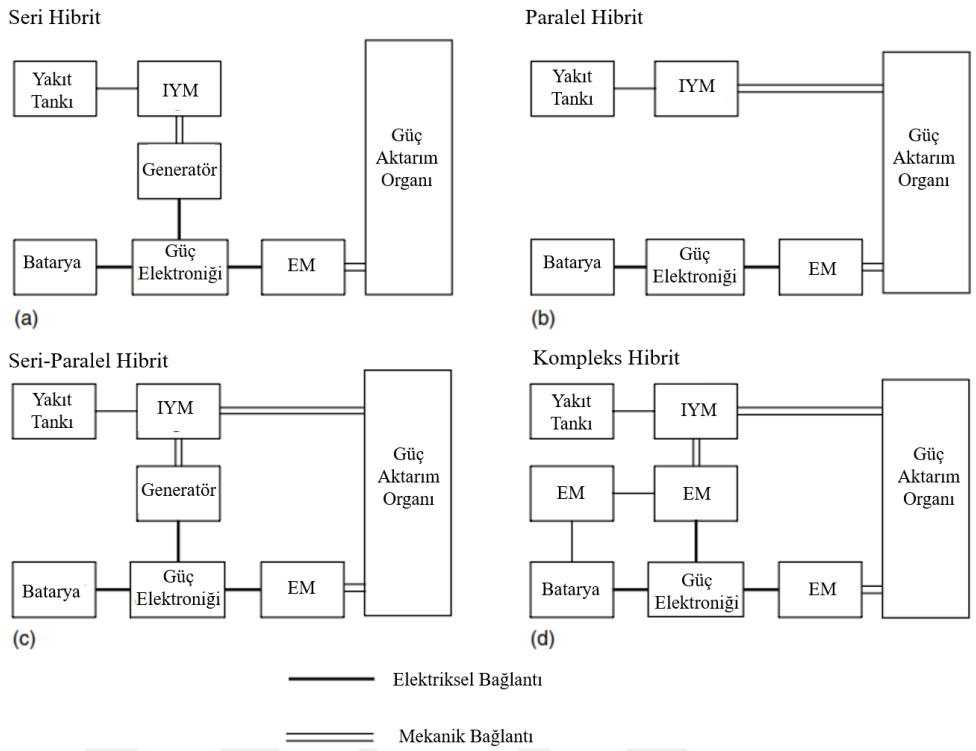
İlk örneklerini 1800'lü yılların sonlarında görmüş olduğumuz Hibrid Elektrikli Araçlar (HEA) elektrik makinaları, güç elektroniği ve akü alanındaki teknolojinin yeterli olmaması nedeni ile ancak 1900'lü yılların sonlarına doğru ticari bir ürün haline dönüşebilmiştir. HEA bugün yapısında birden fazla güç sistemi bulunduran taşıt olarak tanımlanmaktadır. İlk olarak ortaya çıkış nedeninden farklı olarak HEA'lar günümüzde yakıt ekonomisine destek sağlamak ve yanma sonucunda oluşan zararlı emisyon gazlarının seviyesini Euro standartları ile belirlenmiş olan limit değerlerin altına düşürmek maksadı ile üretilmektedir (L. Jichao vd. 2023).

Yapılan açıklamadan anlaşıldığı üzere taşıt yapısında her halükarda bir İçten Yanmalı Motor (İYM) yer almaktadır. Amaç iyi bir performansa ve uzun menzil mesafelerine sahip olan İYM'yi çevreye hiç bir yan etkisi olmayan ve yüksek verimliliğe sahip elektrik makinası ile birlikte kullanarak her iki sistemin avantajlarını birleştirmektir. Bunu, tasarlanılan kontrol sistemleri yardımı ile her iki makinayı optimal bölgelerinde çalıştırarak gerçekleştirirler.

HEA'lar yapılarında birden fazla güç sistemi, buna bağlı olarak enerji dönüştürme sistemi ve tahrik sistemi bulunduran araçlar olarak da açıklanabilirler. Bu yeni nesil araçların güç sistemi olarak karşımıza aküler, volanlar ve süperkapasiteler çıkmaktadır. Enerji dönüştürücü olarak ise İYM ve EM'ler yer almaktadır. Araç tahrik sistemi veya diğer bir deyişle güç aktarma organları olarak ise enerji dönüştürücüler tarafından üretilen kuvvet ve hareketi tekerleğe aktaran sistemler bulunmaktadır (D.A.Crolla ve D.Cao,2012). HEA'lar üretilen gücün tahrik sistemine aktarılış biçimine göre bir takım sınıflara ayrılmaktadır. Her yapının kendine göre bir takım avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu bölümde hibrid elektril araçlar hakkında bilgi verilecektir.

2.2 Hibrid Elektrikli Araçların Sınıflandırılması

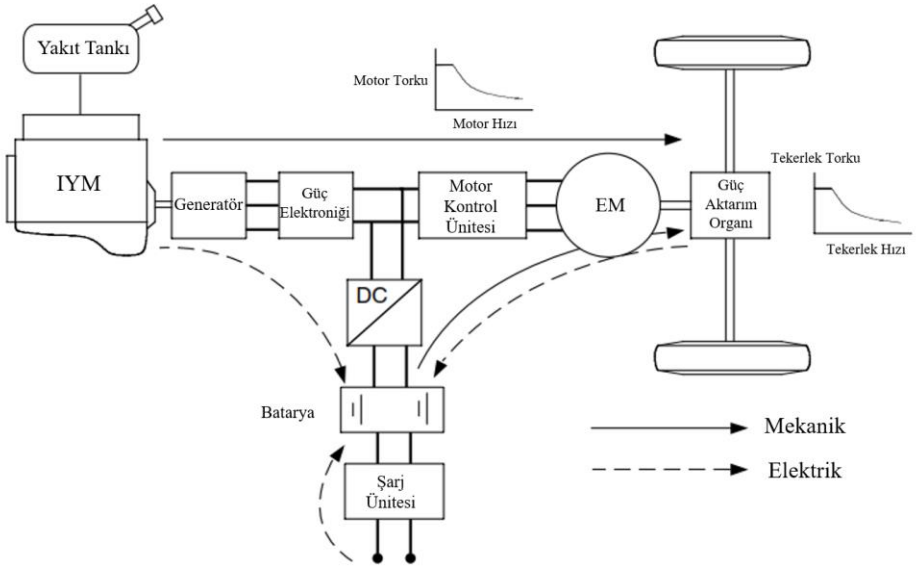
HEA'ların üretilen gücün tahrik sistemine aktarılış biçimine göre bir takım sınıflara ayrıldığını bir önceki ayrıtta belirtmiştik. HEA'lar temel olarak 4 sınıfta toplanmaktadırlar. Bunlar seri, paralel, seri-paralel ve kompleks hibrid araçlardır.



Şekil 2.1. HEA Konfigürasyonları

2.2.1 Seri Hibrid Elektrikli Araç

Seri Hibrid Elektrikli Araçlar (S-HEA) isimlerinden de anlaşıldığı üzere içten yanmalı motorların (İYM) elektrik makinaları (EM) ile birlikte seri olarak bağlandığı, ancak tahrik gücünün elektrik makineleri ile araç tekerleklerine iletildiği konfigürasyonlardır (Emadi vd. 2007).



Şekil 2.2 Seri hibrid araç konfigürasyonu

Araç yapısında yer alan İYM bir mil üzerinden generatöre bağlı olup elektrik enerjisinin üretilmesinde kullanılır. Kısacası araçta yer alan İYM'nin klasik araçlar yapılarından farklı olarak tekerlerle herhangi bir mekanik bağlantısı bulunmamaktadır. İYM tarafından üretilen elektrik enerjisi ise akülerde depolanır. Depolanan enerji tekerlekler ile bağlantısı bulunan EM ya da EM grubunun beslenmesinde kullanılarak taşıtın hareket etmesini sağlar (J.S. Hu vd. 2012).

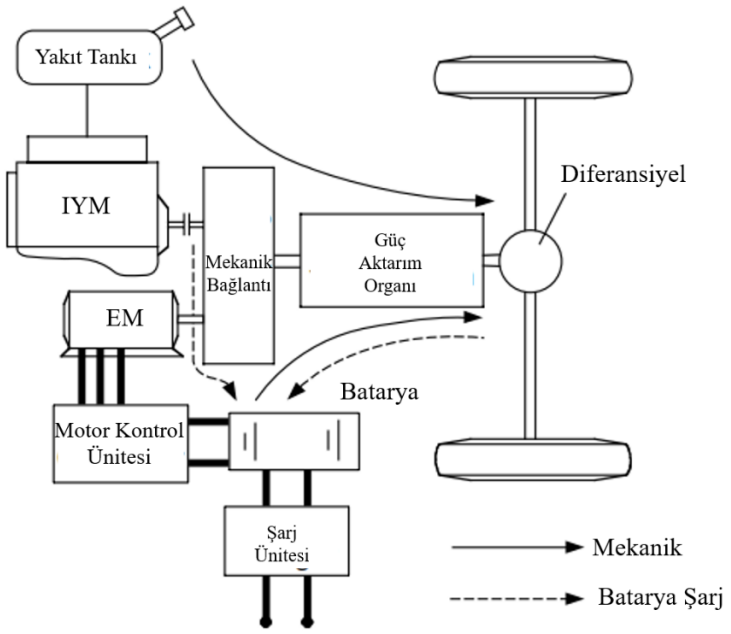
S-HEA'da aracın hareket etmesini sağlayan mekanik enerji temel olarak 3 aşamada gerçekleşmektedir. Çevrim fosil yakıt bünyesinde yer alan kimyasal enerjinin yanma sureti ile mekanik enerjiye dönüştürülmesi ile başlar. İkinci aşamada elde edilen mekanik enerji generatör yardımı ile elektrik enerjisine çevrilir. Bu aşamada üretilen elektrik enerjisi kimyasal enerji olarak akülerde depolanabileceği gibi doğrudan aracın hareketini sağlayan EM'yi beslemede de kullanılabilmektedir. Çevrim elektrik enerjisinin EM yardımı ile hareket enerjisine dönüştürülmesi ile son bulur. Ancak enerjinin farklı formlara dönüştürülmesi esnasında oluşan kayıplar bu tür HEA'larda sistem ait bileşke verimin düşük olmasına neden olur (Lin C. vd. 2001).

S-HEA'larda İYM'nin taşıtın hızından ve moment gereksiniminden bağımsız olması, motorun verimin yüksek ve emisyon miktarlarının az olduğu hız ve moment değerinde çalıştırılabilmesine imkan sağlamaktadır. Araçta akü sisteminin yer alması geleneksel veya yapısında akü bulunmayan S-HEA'lara nazaran frenleme enerjisinin depolanmasına imkân sağlar. Bu durum her ne kadar sistem yapısını daha karmaşık hale getirsede aracı hareket ettirmek için harcanılan enerji miktarının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Diğer bir deyişle yakıt tasarrufuna imkân sağlar. Bu tür frenleme literatürde Geri kazanımlı frenleme (GKF) olarak adlandırılmaktadır. Bugün GKF güvenlik nedeniyle taşıtın geleneksel frenleme sisteminin yanında ancak ek bir frenleme sistemi olarak kullanılabilmektedir (J.Guo, vd. 2009). Taşıtta kullanılan EM'nin frenleme esnasında güç ve moment sınırlarına ulaşılması halinde sürücü tarafından belirlenmiş olan frenleme momenti isteği, GKF'nin klasik frenleme ile birlikte kullanılmalasına neden olmaktadır. Böylece, aracın doğrudan tahriğinde kullanılan EM'nin generatör modunda çalıştırılması ile geleneksel frenlemede ısıya dönüştürülen mekanik enerji daha sonra kullanılmaya imkân sağlayan bir biçimde aküde kimyasal enerji olarak depolanabilmektedir (H. Zhang, vd. 2012) (S. Sakai ve 2002).

Seri hibrid araçlar mevcut olan diğer HEA'lar ile kıyaslandıklarında yapılarının basitliği açısından olukça büyük avantaj sağlamaktadırlar. Ancak bu avantajlarının yanısıra en az 3 tahrik makinasına ihtiyaç duymaları, tekerleklerin tahriğinde kullanılan EM'nin aracın hareket etmesinde gerekli olan mekanik enerjiyi sağlayan tek tahrik elamanı olması, buna bağılı olarak büyük güçlerde olması, daha büyük yer kaplaması, diğer sistemlere nazaran daha ağır olması ve yüksek maliyet gibi bir takım dez avantajlarıda beraberinde getirmektedir (Waltermann P. 1996).

2.2.2 Paralel Hibrid Elektrikli Araç

Paralel Hibrid Elektrikli Araçlar (P-HEA) İYM tahrik gücüne ek olarak elektrik makinasının motor modunda çalıştırılarak tahrik gücü sağladığı ve/veya her iki sistemin tahrik gücünün toplanarak araç tekerleklerine iletildiği konfigürasyonlardır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Paralel hibrid araç konfigürasyonu

Seri HEA'lardan farklı olarak geleneksel motorlu taşıtlarda olduğu gibi İYM tarafından üretilen mekanik güç tekerleklere aktarılmaktadır. Bu nedenle hem İYM'nin klasik araçlar yapılarında olduğu gibi hemde EM'nin tekerlerle mekanik bağlantısı bulunmaktadır. Mekanik bağlantıları moment ve hız olmak üzere temel olarak iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca P-HEA'lar da vites kutusu konumunun yerleştirilmesine bağlı olarak farklı çekiş karakteristiği sağlanabilmektedir.

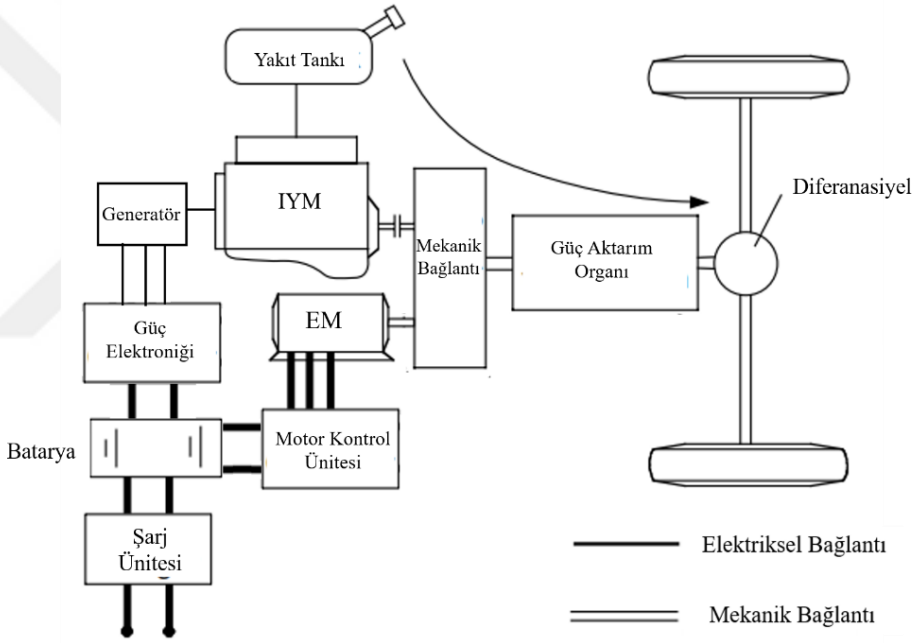
S-HEA'lardan farklı olarak P-HEA yapılarında akü sistemi mutlaka yer almaktadır. Bu nedenle Geri Kazanımlı Fren (GKF) yöntemi ile frenleme enerjisinin depolanmasından

konfigürasyonlarından faydalanılmaktadır. Bu durum her ne kadar sistem yapısını karmaşık hale getirsede harcanılan yakıt miktarının azaltılmasına büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır (Z. Zhang, vd. 2010).

P-HEA'lar mevcut olan diğer HEA'lar ile kıyaslandıklarında daha küçük boyutlu EM ve akü sistemi kullanılmasına imkan sağlamaları gibi ek avantajlarının yanısıra gerek yapısının gerekse tahrik gücünün tekerleğe aktarımının daha karmaşık bir yapı ile aktarılması gibi bir takım dezavantajlarıda ebraberinde getirmektedir.

2.2.3 Seri/Paralel Hibrid Elektrikli Araç

Seri-Paralel Hibrid Elektrikli Araçlar (SP-HEA), kısaca hem seri hemde paralel hibrid araçların özelliklerini bünyesinde barındıran konfigürasyonlar olarak tarif edilebilirler.

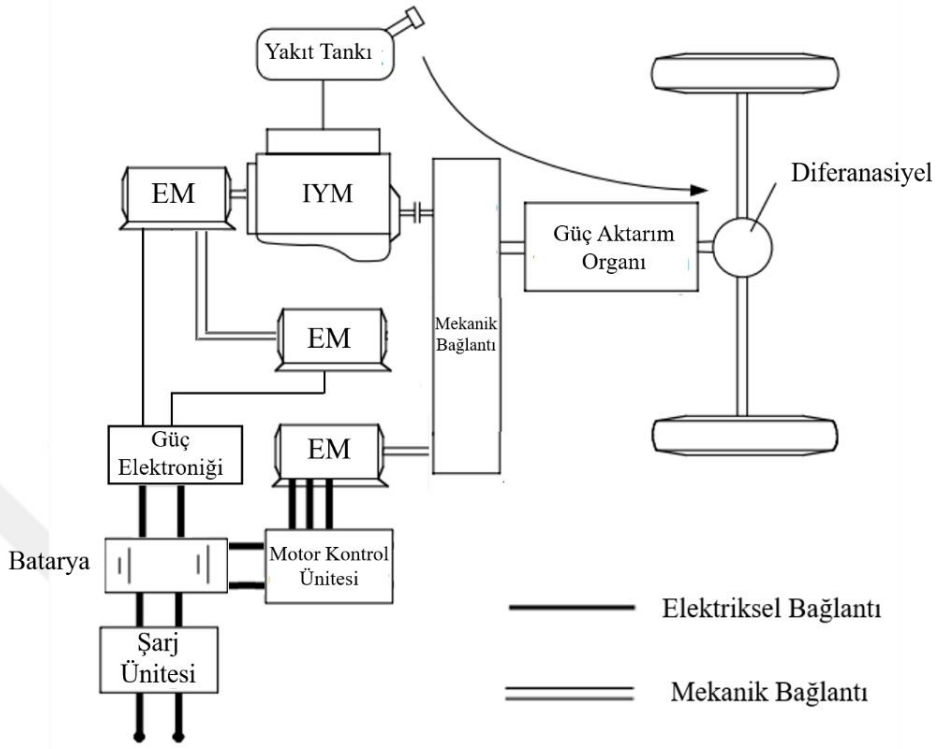


Şekil 2.4. Seri-parelel hibrid elektrikli araç konfigürasyonu

SP-HEA'larda, tekerleklere aktarılan gücü elektrik motorundan veya içten yanmalı motordan veya her ikisinden sağlayabilmek için güç ayıraçlarını bulunmaktadır. Ana çalışma prensip, İYM veya EM'nin sağlamış olduğu güçlerinin sürücünün güç isteğinden bağımsız olmasıdır. Aynı amaca hizmet edebilcek şekilde SP-HEA mimarisi içerisinde farklı konfigürasyonlar da yer alabilir. Yapısında iki EM'nin yer aldığı P-HEA'nın aralarına kavrama eklenmesi ile paralel moddan seri moda geçebilen bir SP-HEA elde etmek mümkündür. Bu tür HEA'ların karmaşık yapılarının yanısıra en büyük avantajı her an için en uygun konfigürasyonun seçimine olanak sağlamalarıdır (Lowe M., vd. 2009).

2.2.4 Komplex Hibrid Elektrikli Araç

Kompleks Hibrid Elektrikli Araçlar (K-HEA), daha önceki ayrıtlarda belirtmiş olduğumuz her üç konfigürasyondan da daha farklı bir yapıya sahiptir.



Şekil 2.5. Kompleks hibrit-elektrikli araç konfigürasyonu

Ancak yapı olarak en çok SP-HEA'ya benzerlik göstermektedir. Her iki yapı arasındaki temel fark SP-HEA'da yer alan EM'nin tek bir mod yerine hem motor hemde generatör olarak çalışmasıdır. K-HEA tasarımı iki yönlü enerji akışına imkan sağlarken, karmaşık yapısı enerji kontrol algoritmasının daha karmaşık bir hale gelmesine ve maliyetin artmasına neden olmaktadır (Lowe M., vd. 2009).

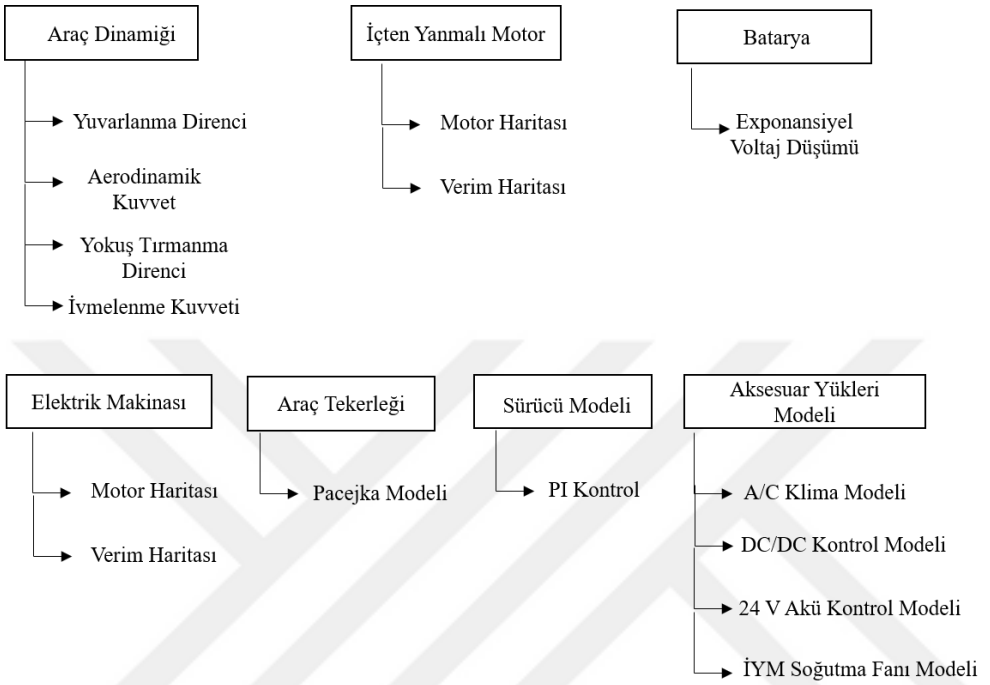
2.3 Hibrid Elektrikli Araçların Modellenmesi

HEA'lar için geliştirilmiş olan matematiksel modeller incelendiğinde literatürde iki farklı yöntem kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemler:

- İleri Akış Yöntemi: Sürücü isteğine bağlı olarak yapılan hesaplamalar doğrultusunda belirlenen moment bilgisi sürücüden tekerleklere doğru aktarılmaktadır.
- Geri Akış Yöntemi: Belirli bir çevrim için gerekli olan güç bilgisi hesaplanarak, sistemde yer alan güç kaynaklarına paylaştırılır. Kısacası akış tekerden kaynağa doğrudur (Wipke K. B. vd. 1999).

MATLAB®/Simulink programı her iki yönteminde kullanılmasına imkan tanıyan bir

ortam olup tercih kullanıcıya aittir. İşlem gücüne ihtiyaç duyulan sistemlerde daha basit olan Geri Akış yöntemi tercih edilirken, daha detaylı analizlerin yapılmak istenilmesi durumunda İleri Akış yöntemi kullanılmaktadır. Tez kapsamında İleri Akış Modelleme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 2.6. Simulasyon Şeması

Şekil 2.6 da gerçeklenen simulasyon modelleri verilmiştir.

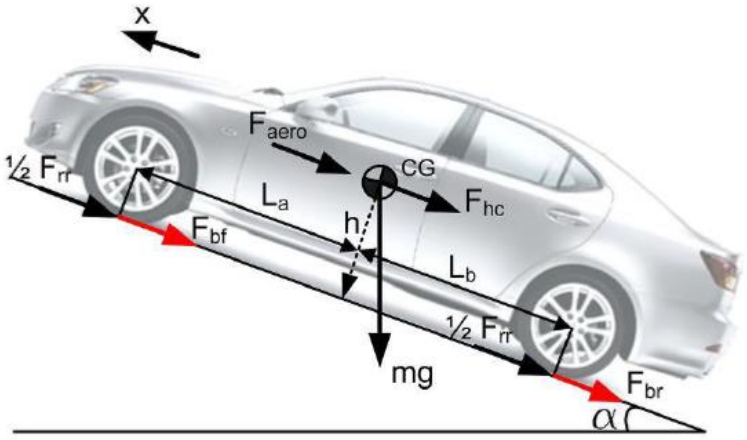
2.3.1 Araç Dinamiği

Bir taşıta ilk hareketin verilebilmesi için öncelikle araca etkiyen kuvvetlerin yenilmesi gerekmektedir. Aracın hareket etmesine engel olan bu kuvvetlere Direnç Kuvvetleri denilmektedir. Aracın karşılaşmış olduğu bu direnç kuvvetleri makinaların sağlamış olduğu hareket enerjisi ile yenilerek hareket sağlanır. Motorlu taşıtlarda hareketi sağlayan kuvvet İYM'ler tarafından sağlanırken yeni nesil araçlar olarak isimlendirilen HEA'larda konfigürasyona bağlı olarak İYM ve/veya EM ile sağlanmaktadır. Makianalar tarafından üretilen kuvvetler güç aktarma organları üzerinden tekerleklere aktarılır. Aracın hareketi esnasında maruz kalmış olduğu direnç kuvvetleri:

- Yuvarlanma Direnci
- Aerodinamik Kuvvet

- Yokuş Tırmanma
- İvmelenme Kuvveti

olarak dört grupta toplanmaktadır.



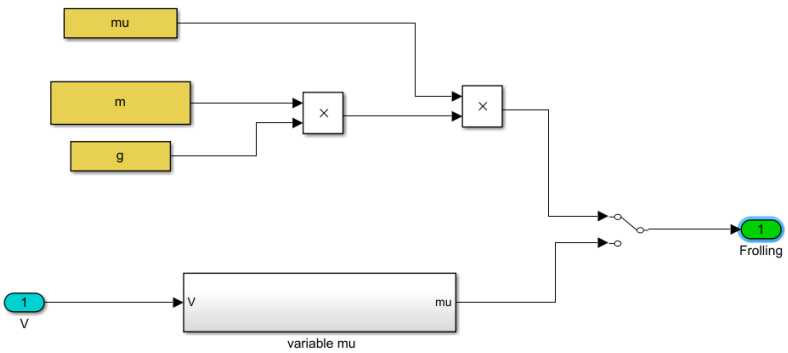
Şekil 2.7. Araç üzerineki resistif kuvvetler

2.3.1.1 Yuvarlanma Direnci

Yuvarlanma direnci kısaca araç lastiğini ile hareketin sağlanılmasının istendiği yüzey arasındaki direnç kuvveti olarak tanımlanabilir. Bu direnç kuvvetinin oluşma nedeni ise tekerleğin üzerine binen ağırlık sonucunda yer ile teması eden yüzey arasında meydana gelen eğilmedir. Hareket etmekte olan bir araca etkiyen yuvarlanma direnci kuvveti

$$F_r = \mu_r mg \tag{2.1}$$

olarak ifade edilir. Burada m aracın kütlesini, g yerçekimi ivmesini ve μ_r de yuvarlanma direnci katsayısını göstermektedir. Lastiklerin yuvarlanma direnci katsayıları bir çok faktörün etkisi ile değişim göstermektedir.Bunların başında, lastik yüzeyimin şekli, lastiğin şişirme basıncı ve yol yüzeyinin durumu (asfalt, beton, kum vb.) gelmektedir.



Şekil 2.8. Yuvarlanma Direnci

$$F_r = [(v.(0.000041).2.24) + 0.0041]C_d \quad (2.2)$$

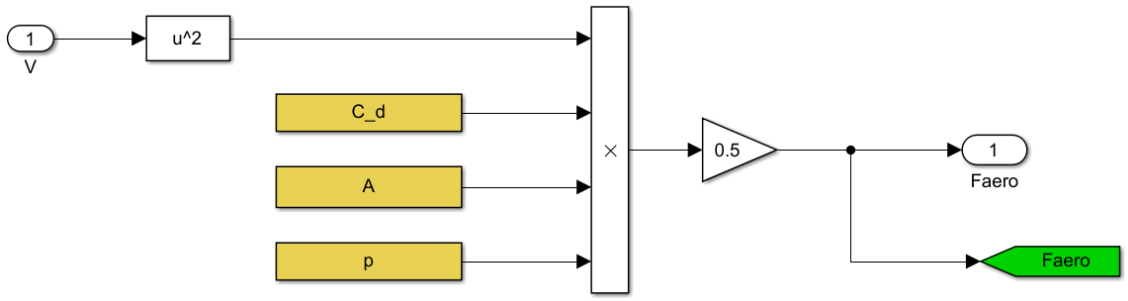
(Gillespie, 1992) yuvarlanma direnci katsayısının hıza ve zemine bağlı olduğunu gösteren formülü eşitlik 2.2 şekilnde vermiştir. Burada C_d zeminin sürtünme katsayısıdır.

2.3.1.2 Aerodinamik Kuvvet

Sabit bir hızla hareket etmekte olan bir araca havanın göstermiş olduğu direnç kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Temel olarak 2 nedenden dolayı meydana gelir. Bunlardan ilki Şekil Sürtünme Direnci olup, aracın yüzey geometrisine bağlıdır. Hareket halinde olan araç önündeki havayı itmeye çalışır ancak havanın bu şekildeki hareketi ani olarak gerçekleştirilemez. Bu durum aracın ön alanında yüksek basınç oluşmasına neden olur. Benzer şekilde aracın arkasındaki hava aracın hareketi ile oluşan boşluğu ani olarak dolduramaz bu durumda arkada alçak basınç oluşmasına neden olur. Böylece aracın hareketine karşı koyan iki basınç bölgesi meydana gelmiş olur. Aracın hareketine engel aerodinamik kuvvetin olan ikinci bileşeni ise Yüzey Sürtünme Direnci olarak adlandırılabilir. Araç yüzeyine yakın olan hava araç hızına yakın bir hızda iken aracdan uzakta olan hava akımının hızı sabit kalır. Bu durum hava moleküllerinin farklı hızlarda akmasına neden olur. İki hava molekülü arasındaki hız farkı da Aerodinamik Kuvvetin ikinci bileşenini oluşturur. Hareket halinde olan araca etkiyen kuvvet

$$F_{aero} = \frac{1}{2}\rho C_x A v^2 \quad (2.3)$$

formülü ile ifade edilebilir. Burada ρ havanın yoğunluğunu, C_x aerodinamik katsayıyı, A aracın ön izdüşüm alanını, v ise taşıt hızını göstermektedir.



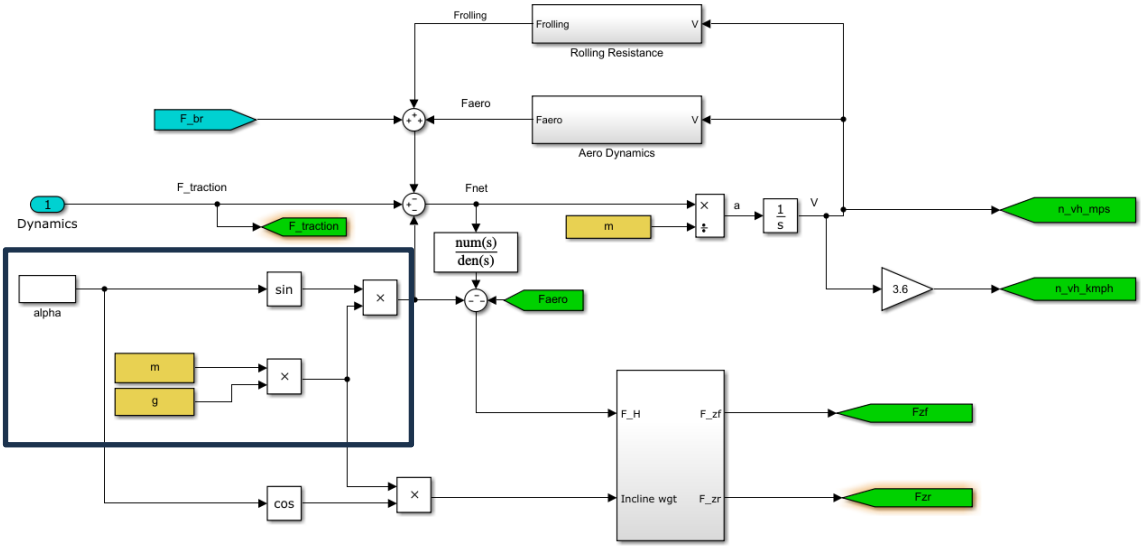
Şekil 2.9. Aerodinamik Kuvvet

2.3.1.3 Yokuş Tırmanma Direnci

Belirli bir eğime sahip yolda araca kendi ağırlığı nedeni ile eğimle orantılı olarak etkiyen direnç kuvvetidir. Yokuş tırmanma direnci taşıt ağırlığının yola paralel olan bileşeni olarak da tanımlanabilir. Aracın sabit bir hızda seyir ederken tırman bileceği maksimum yokuş ise o aracın tırmanma yeteneği olarak adlandırılır. Araca etkiyen yokuş tırmanma direnci

$$F_{hc} = mgsin\alpha \tag{2.4}$$

formülü yardımı ile hesaplanabilir. Burada yer alan α aracın yer ile yapmış olduğu açıyı göstermektedir.



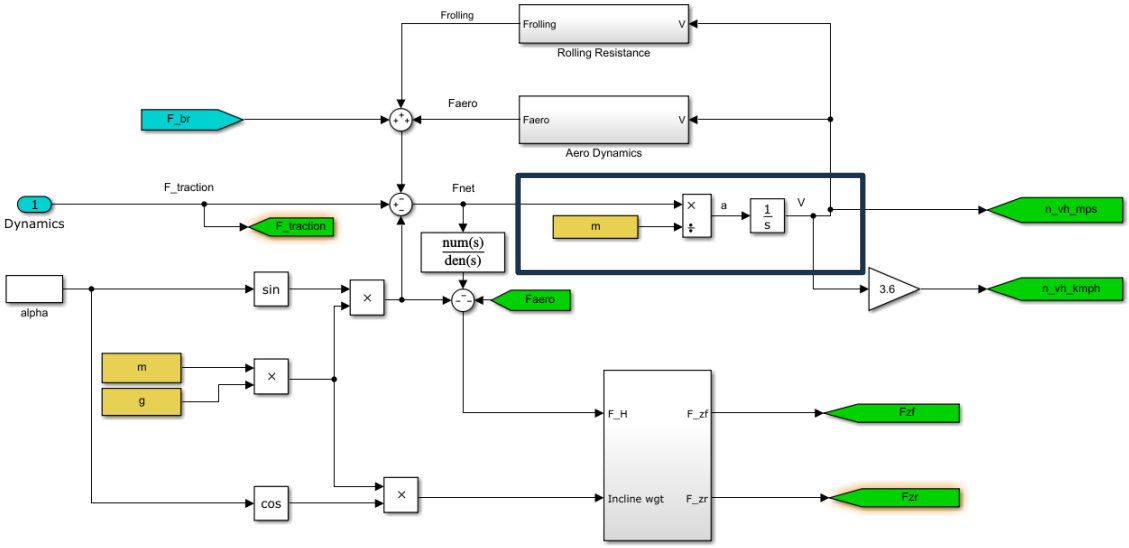
Şekil 2.10. Yokuş Tırmanma Direnci

2.3.1.4 İvmelenme Kuvveti

İvmelenme kuvveti aracın gerektiğinde belirli yokuşları tırmana bilmesi ve/veya hızını arttırabilmesi için karşılaması gereken kuvvet olarak ifade edilebilir. Newton'un hareket yasasından hareket ile bir taşıtın hızlanması veya yavaşlaması sırasında araca etkiyen kuvvet

$$F_{acc} = m\alpha \tag{2.5}$$

formülü yardımı ile hesaplanabilir. Bu ifadede yer alan a aracın hızlanma/yavaşlama durumundaki ivmesini göstermektedir.



Şekil 2.11. İvmelenme Kuvveti

2.3.1.5 Doğrusal Araç Dinamiği

Aracın hareket edebilmesi için üzerine etkiyen direnç kuvvetlerini yenmesi gerekmektedir. Araca etkiyen net kuvvet ifadesi direnç kuvvetlerinden faydalanılarak yazılabilir (X. Liu, vd. 2005).

$$F_{net} = ma = F_r + F_{aero} + F_{hc} \tag{2.6}$$

$$m\frac{dv}{dt} = F_r + F_{aero} + F_{hc} \tag{2.7}$$

2.3.2 İçten Yanmalı Motor

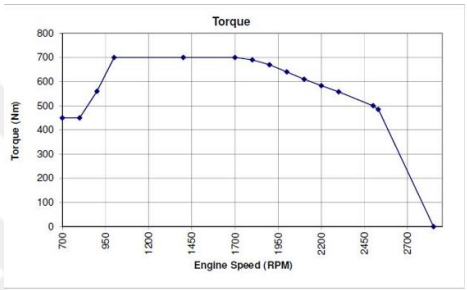
İYM'ler, fosil yakıtların yanma odalarında yakılması sureti ile yakıt bünyesinde bulunan kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren makinalardır. Buhar makinası gibi yakıtın motor dışında yakılmasının ardından yanma odalarının motorun içine taşınması ile oldukça kompakt bir yapıya sahip olan İYM'lerin üretimine başlanmıştır. Bu büyük gelişme otomobil üretimine farklı bir boyut kazandırmıştır (Li, S.G., vd. 2011).

Geleneksel motorlu taşıtlarda kullanılan İYM'ler, istenilen performans ve maksimum hız durumunda arcın maruz kaldığı direnç kuvvetlerini yenebilecek şekilde boyutlandırılırlar. Buradan hareket ile araçtan talep edilen maksimum güç isteği;

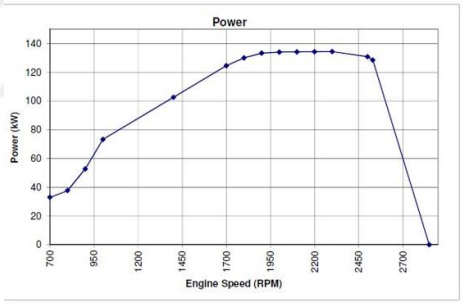
$$P_c = \frac{v}{1000\mu_t}\left(\mu_r mg + \frac{1}{2}\rho C_x A v^2 + mgsina\right) \tag{2.8}$$

formülü ile ifade edilebilir (M. A. Hannan, vd. 2011). Denklem (2.8) nolu denklemde v araç hızını, m toplam araç kütlesini, g yerçekimi ivmesini, C_x aerodinamik sürtünme katsayısını, lastik yuvarlanma direnci katsayısını, ρ hava yoğunluğunu, aracın, A aracın ön izdüşüm alanını ve α aracın yer ile yapmış olduğu açıyı göstermektedir.

Ancak taşıtlar çoğu zaman şehir içinde düşük yüklere maruz kalırlar. Çalışma prensipleri gereği İYM'ler düşük yüklerde verimsiz olarak çalışırlar. Bu nedenle motorlu taşıtların kısmi yüklerdeki yakıt tüketimleri ve çevreye yaymış oldukları emisyon gazı seviyeleri yüksektir.Şekil 2.12 IYM'un hıza göre tork ve güç değerleridir. Şekil 2.13 IYM'un hız ve moment değerlerine bağımlı 3 boyutlu verim haritasıdır. Şekil 2.14-2.16 ise yine hız ve moment değerlerine bağlı olmak üzere g/s cinsinden 3 boyutlu emisyon haritalarıdır.

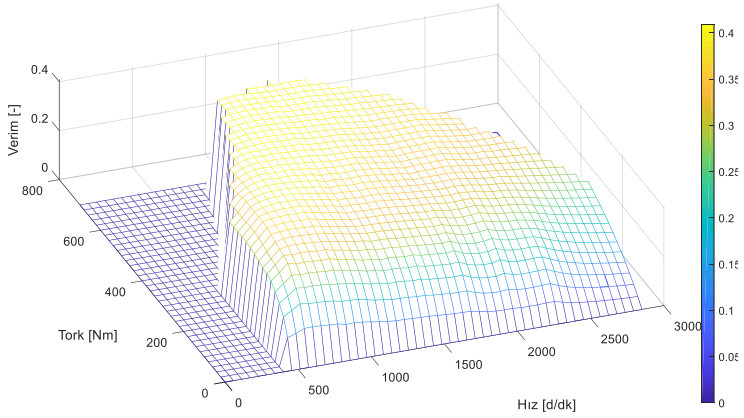


Torque Output	
RPM	Nm
700	450
800	450
900	560
1000	700
1400	700
1700	700
1800	690
1900	670
2000	640
2100	610
2200	583
2300	558
2500	500
2530	485
2850	0

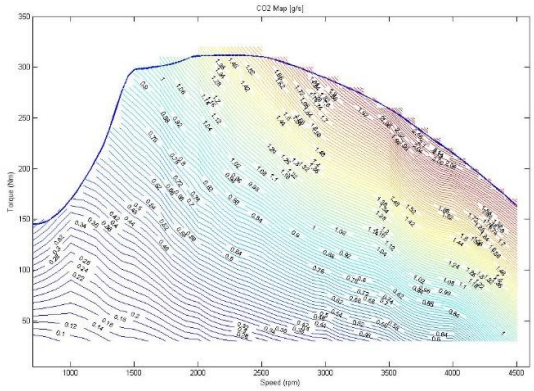


Power Output	
RPM	kW
700	33
800	38
900	53
1000	73
1400	103
1700	125
1800	130
1900	133
2000	134
2100	134
2200	134
2300	134
2500	131
2530	128
2850	0

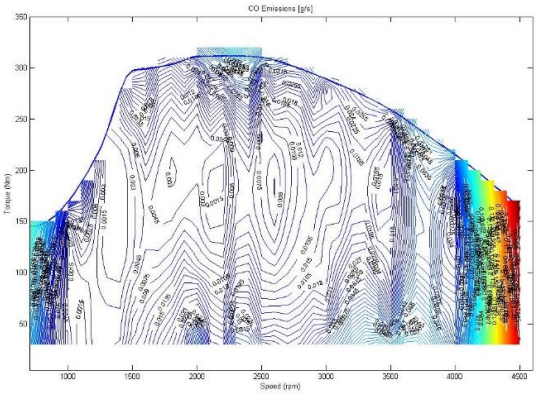
Şekil 2.12 IYM Moment-Hız grafiği



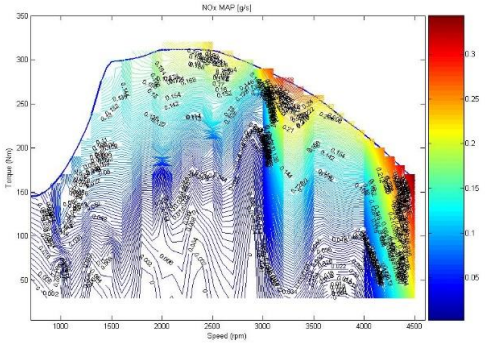
Şekil 2.13 IYM'un moment ve hıza göre verimlilik haritası



Şekil **2.14** İYM CO2 emisyon seviyesi



Şekil 2.15 İYM CO emisyon seviyesi



Şekil 2.16 İYM NOx emisyon seviyesi

HEA simülasyonlarında İYM'lerin fiziksel modeli yerine, bu modeli ifade eden haritalardan faydalanılmaktadır. Bu haritalar ise, hız ve gaz pedalı açıklığına göre moment haritası, hız ve momente göre yakıt tüketimi haritası ve son olarak yine hız ve momente göre emisyon haritasıdır.Simülasyonlarda İYM'ye ait dinamik modeller yerine statik tabloların kullanılmasının başlıca nedeni bu tür modellerin getirmiş oldukları

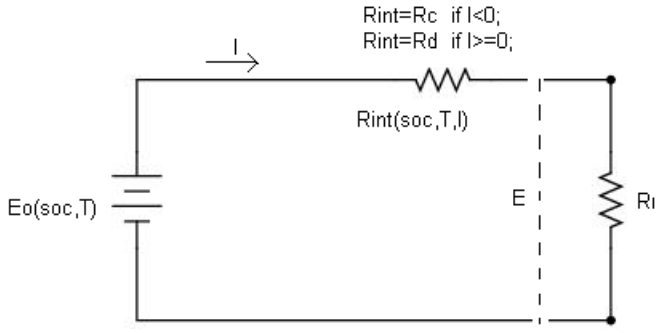
hesaplama yüklerini azaltamaktır.

2.3.3 Batarya

Akü sisitemleri bugün HEA teknolojisinin vazgeçilmez enerji kaynaklarından biridir. HEA'larda klasik araçlardan farklı olarak akülerde depolanmış olan enerji tahrik sistemine mevcut konfigürasyon dahilinde katkıda bulunacak olan EM'unu beslemede kullanılmaktadır. Ancak mevcut teknoloji göz önüne alındığında 1 depo yakıtın sağlamış olduğu enerji miktarı ile akü sisteminin sağlayabileceği enerji miktarı arasında oldukça büyük fark bulunmaktadır. HEA'larda kullanılan akü türleri arasında: Nikel-kadmiyum (NiCD), Nikel-metal hidrür (NiMH) ve Lityum-ion yer almaktadır (Tremblay O., Dessaint L.A 2009).

Farklı akü çeşitleri bir takım avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Örneğin NiMH, Lityum-Iyon akülere nazaran daha düşük enerji depolama kapasitesine sahiptir. Ancak Lityum-Iyon akülerde maliyet ve yüksek çalışma sıcaklığı gibi bir takım olumsuz özelliklere sahiptir. HEA teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak akü ve farklı enerji depolama sistemleri üzerindeki çalışmalar gittikçe artmaktadır.

Akü geliştirilmesinin amaçlanmış olduğu projelerde akünün elektrokimyasal yapısı ön plana çıkarken, araç performansının önemli olduğu HEA'larda akü sisteminin elektriksel eşdeğer devresinden faydalanılmaktadır. Bu çalışmada benzer olarak, akünün şarj/deşarj durumunu ve şarj seviyesini göz önüne alan elektriksel eşdeğer devre modeli kullanılmıştır (Tremblay O., Dessaint L.A 2009).



Şekil 2.17 Akü elektriksel eşdeğer devresi

Devreyi çözmek için gereken denklemler aşağıda verilmişlerdir. Kirchoff'un akım ve gerilim yasalarından yararlanılır. Temel ifadeler aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$R_{int} = \begin{cases} R_{ch}(SOC,T) & I < 0 \\ R_{dch}(SOC,T) & I \geq 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$V_{batt} = E_{0(SOC,T)} + I.R_{int} \quad (2.10)$$

$$I = \frac{P_{req}}{E} \quad (2.11)$$

denklemleri yazılabilir.

Gerek HEA'larda gerekse elektrikli araçlarda akü şarj seviyesi araç performansı üzerinde oldukça büyük bir öneme sahiptir. Akü şarj seviyesini, akünün mevcut şarj miktarının anma şarjına oranı olarak tanımlamak mümkündür. Literatürde akü şarj seviyesini hesaplamaya dair bir çok yöntem bulunmaktadır.

Tez kapsamında Lityum-Iyon kullanılmış ve matematiksel olarak Denklem (2.12-2.15) yardımı ile modellenmiştir.

Akü uç gerilimi:

$$V_{batt} = E_{batt} - i.R_{ch/dch}(SOC) \quad (2.12)$$

Deşarj Modu:

$$E_{Batt}(Q_{used}, i_{filter}, i) = E_0 - R_{polar}.\frac{Q}{Q - Q_{used}}.i_{filter} - R_{polar}.\frac{Q}{Q - Q_{used}}.Q_{used} + K_A.e^{(-K_B.Q_{used})} \quad (2.13)$$

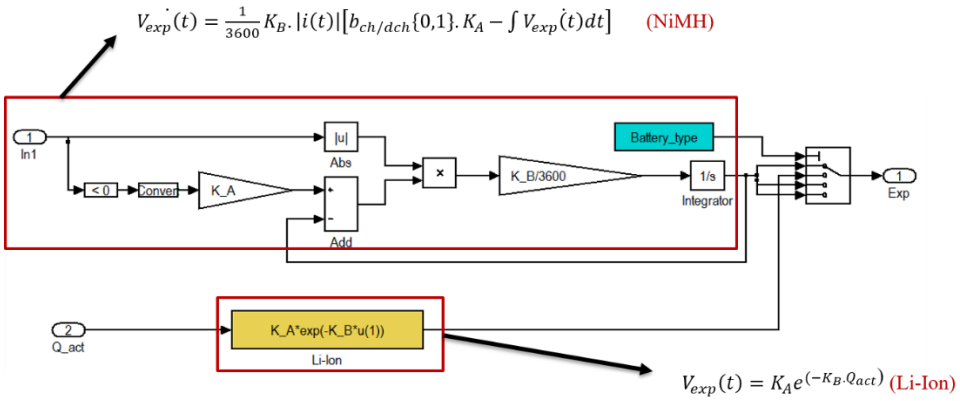
Şarj Modu.

$$E_{Batt}(Q_{used}, i_{filter}, i) = E_0 - R_{polar}.\frac{Q}{Q_{used}+0.1.Q}.i_{filter} - R_{polar}.\frac{Q}{Q-Q_{used}}.Q_{used} + K_A.e^{(-K_B.Q_{used})} \quad (2.14)$$

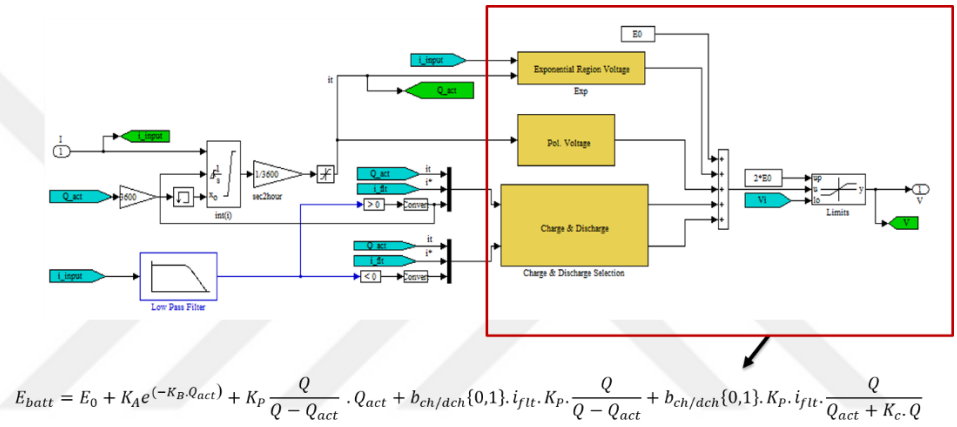
Akü şarj seviyesi:

$$SOC = 100(1 - \frac{1}{Q}\int_0^t i(t)dt) \quad (2.15)$$

Burada V_{batt} batarya voltajı, E_{batt} nonlineer voltaj, E_0 bataryadaki açık devre gerilimi, R_{polar} is polarizasyon direnci, i_{filter} filtrelenmiş akım, i batarya akımı, Q_{used} kullanılan kapasite miktarı, Q bataryadaki maksimum kapasite, $R_{ch/dch}$ şarj/deşarj durumundaki iç direnç, K_A eksponansiyel alandaki voltaj düşümü ve K_B eksponansiyel bölgenin zaman sabiti olarak tanımlanır. Denklemlerin modellenmesi Şekil 2.18-2.19 da gösterilmiştir. Formüllere incelendiğinde, endüklenen geriliminin ve açık devre geriliminin SOC ve T'nin birer fonksiyonu olduğu görülmektedir. Pratikte akü sistemlerinin soğutma sistemleri ile birlikte kullanılması nedeniyle sıcaklık sabit kabul edilerek denklemlerin basitleştirilmesi de mümkündür.



Şekil 2.18 Exponansiyel Voltajın bulunması



Şekil 2.19 Batarya Çıkış Voltajı

2.3.4 Elektrik Makinası

Gerek doğrudan gerekse dolaylı olarak HEA'ların tahrik sistemine katkıda bulunan elektrik makinaları yüksek enerjili sürekli mıknatıs malzemelerin, yüksek doymalı manyetik malzemelerin geliştirilmesi ve kontrol sistemlerindeki ilerlemeler ile birlikte gelişim göstermektedir. Gelişen teknoloji ile bearaber yeni nesil EM'lerde daha küçük daha kompakt bir hale gelmektedir (Altun H., Aydoğmuş Ö., Sunter S. 2008).

HEA'larda elektrik makinalarının her türü kullanılmış olup, trend Fırçasız Doğru Akım, Asenkron ve Anahtarlamalı Relüktans makinasının kullanılması yönündedir. Bu çalışmada da son zamanlarda yapısal özellikleri nedeni ile oldukça rağabet gören Fırçasız Doğru Akım Makinasının (FDAM) modellenmesine değinilecektir.

FDAM'nin en belirgin avantajlarından biri fırça-kollektör düzeneğinin olmaması, bu görevin elektronik bir devre yardımı ile sağlanmasıdır. Diğer bir deyişle FDAM'de fırça-kollektör bakımı, elektromanyetik girişim (EMI), kıvılcım gibi bir takım olumsuzluklar

da ortadan kalkmıştır. Ayrıca fırça-kollektör düzeneğinin bulunmaması makina boyunun kısalmasına dolayısı ile sistemin sağlamlığının artamasına ve daha yüksek hızlara çıkılmasına imkan sağlamaktadır (Venkadesan A., vd. 2014).

FDAM statorda endüvi sargılarından, rotorda ise sürekli mıknatıslardan meydana gelmektedir. Ancak burada unutulmaması gereken en önemli nokta FDAM'nin çalışabilmesi için doğrudan şebekeden beslenmek yerine bir güç elektroniği devresi üzerinden beslenmesi gerektiğidir. Sürücü devre gerekli olan gerilim bilgisini sırası ile uygun olan endüvi sargısına uygulayarak motorun dönmesini sağlar.

FDAM'nin endüvi sargısına ait matematiksel modeli, Kirchoff'un gerilim yasasından hareket ile;

$$V_a = R_a.i_a + L_a\frac{di_a}{dt} + M_{ab}\frac{di_b}{dt} + M_{ac}\frac{di_c}{dt} + e_a \tag{2.16}$$

$$V_b = R_b.i_b + L_b\frac{di_b}{dt} + M_{ba}\frac{di_a}{dt} + M_{bc}\frac{di_c}{dt} + e_b \tag{2.17}$$

$$V_c = R_c.i_c + L_b\frac{di_c}{dt} + M_{ca}\frac{di_a}{dt} + M_{cb}\frac{di_b}{dt} + e_c \tag{2.18}$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada M karşıt öz endüktansı, L öz endüktansı, R sargı direncini, i akımı, v uç gerilimi ve e endüklenen gerilimi göstermektedir. Herbir faza ait sargılarda endüklenen gerilim ise

$$e_i = K_v w_m \tag{2.19}$$

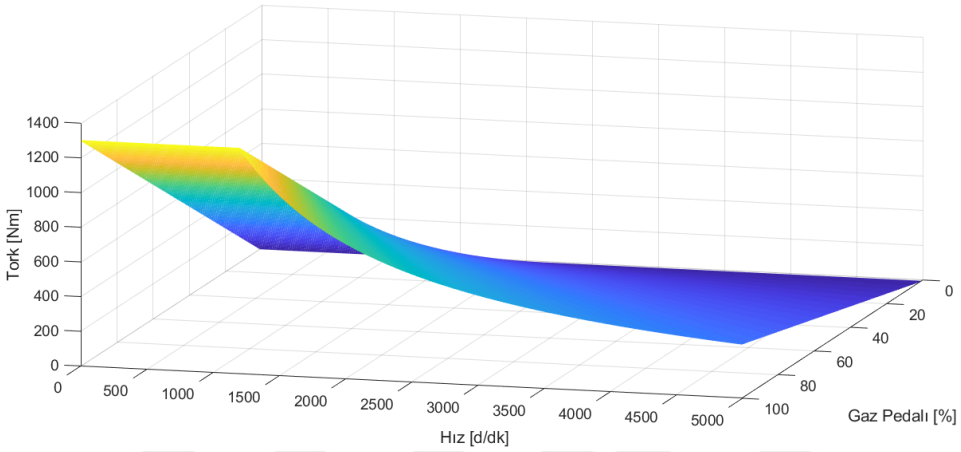
olarak ifade edilebilir. Burada K_v motor sabiti, w_m ise hız bilgisini göstermektedir. Makinanın elektriksel kısmına ait denklemlerin yazılmasından sonra modeli tamamlayabilmek için mekanik kısma ait denklemin yazılması gerekmektedir. Newtonun Hareket yasasından hareket ile FDAM'nin hareket denklemi;

$$M_e = M_i + J\frac{dw_m}{dt} + Bw_m \tag{2.120}$$

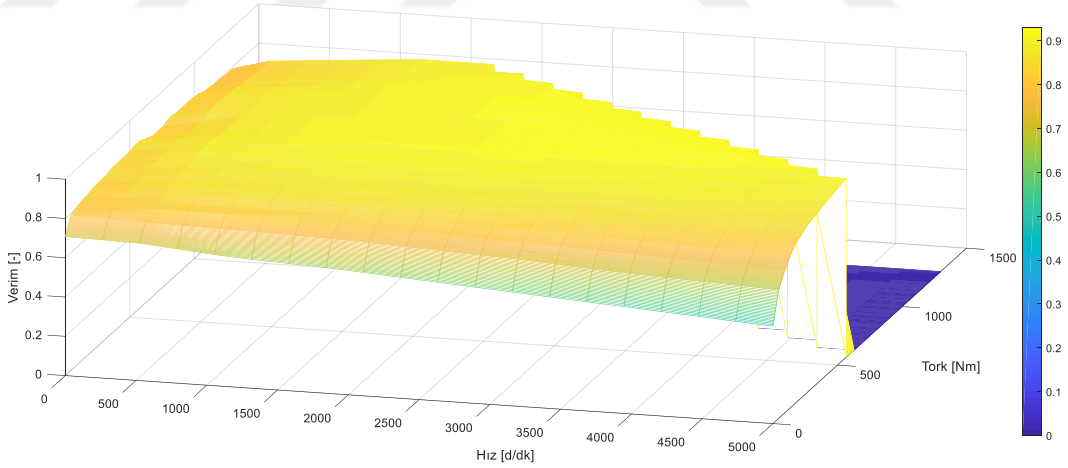
ile ifade edilir. Burada M_e toplam moment, M_i yük momentini, J eylemsizlik momentini, B ise sürtünme katsayısını göstermektedir (Dirkman R. J. 1987).

FDAM'nin matematiksel modelinin MATLAB®/Simulink ortamında blok diyagramlar yardımı ile gerçeklenebileceği gibi, makinaya ait moment-hız karakteristiği look-up tablosu kullanılarak da modellenebilir. Bu noktada hangi modelleme yönteminin kullanılması gerektiği ancak kullanıcı tarafından beklentiler çerçevesinde belirlenebilir. Şekil 2.20'de FDAM'nin moment hız karakterisitiği ile verim haritasının

MATLAB®/Simulink ortamında look-up tablosundan faydalanılmak sureti ile gerçeklenmiş modeli görülmektedir. Ancak tıpkı İYM modellemesinde olduğu gibi bu tür bir modellem tekniğinin kullanılması sistemin kabiliyeti hakkında bilgiler içermesine rağmen dinamik bir modelleme yöntemi olmamaktadır. Bu ise sistemin geçici davranışının incelenememesi anlamına gelmektedir. Şekil 2.20 elektrik makinasının tork hız grafiğidir. Gaz pedalı açıklığına göre %0-100 arasında ölçeklendirilmiştir. Şekil 2.21 makinanın hız ve moment değerlerine bağımlı 3 boyutlu verim haritasıdır.

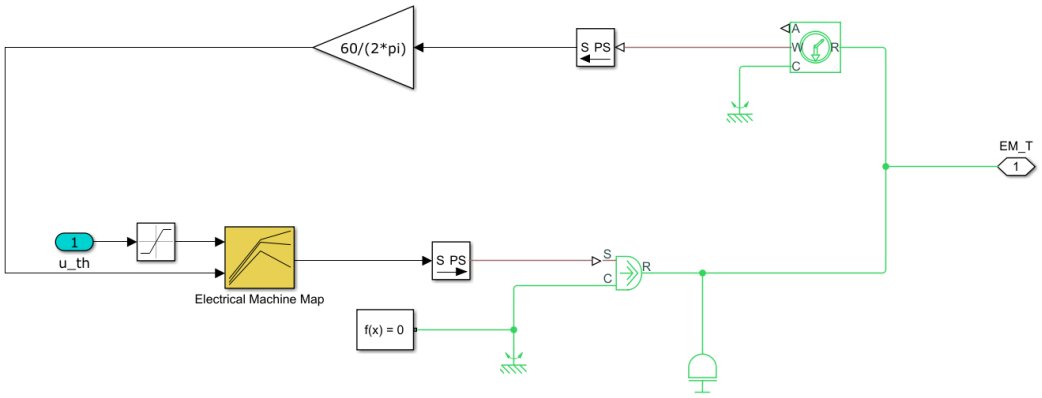


Şekil 2.20 EM Tork Haritası



Şekil 2.21 EM Verim Haritası

Şekil 2.22 de görüldüğü üzere elektrik makinası modellenmiştir. Modelde simulink/drivetrain kütüphanesi kullanılmıştır. Şekil 2.20 de gösterilen harita look-up table olarak modele eklenmiştir. İlk giriş gaz pedalı sinyali (throttle), ikinci giriş ise d/dk birimden makinenin hızıdır.



Şekil 2.22 Elektrik Motoru Modeli

2.3.5 Araç Tekerleği

Literatürde yer alan tekerlek modelleri arasında en çok kullanılan yöntem Pacejka tarafından 2002 yılında ortaya konulan ve Pacejka 2002 olarak adlandırılan modeldir. Pacejka tekerlek modeli,

- Durağan hal dönme
- Tek veye çift şerit değiştirme
- Dönme esnasında frenleme veya güç kesme
- J- dönme veya diğer dönüş manevraları
- ABS frenleme veya durma mesafelerinin incelenmesinde
- Düz olmayan yollarda araç manevralarında

gibi yerlerde kullanılmaktadır.

Pacejka modelinin temelini oluşturan, doğrusal ve yanal kuvvetlerin hesabında kullanılan ifade aşağıdaki gibidir;

$$Y(x) = D.sin[C.\text{atan}\,(Bx - E.(Bx - \text{atan}(Bx)))] \tag{2.21}$$

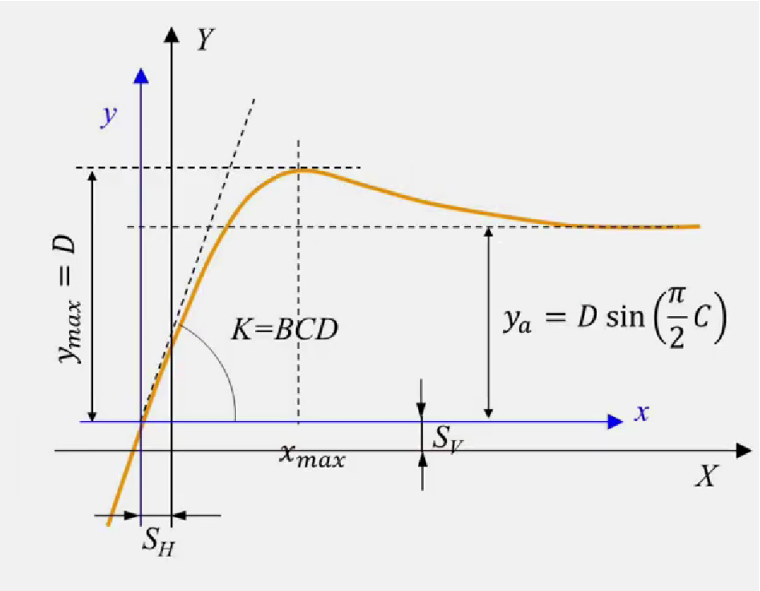
Burada D maksimum noktası, C şekil faktörü, B sertlik faktörü, E eğrilik faktörüdür.

$$D = \mu_s F_z \tag{2.22}$$

$$C = 1.65 \tag{2.23}$$

$$B.C.D = \frac{dY}{dx} \tag{2.24}$$

$$E = \frac{Bx_{max} - \tan\left(\frac{\pi}{2C}\right)}{Bx_{max} - tan^{-1}(Bx_{max})} \tag{2.25}$$



Şekil 2.23 Kayma-Boyuna Kuvvet Grafiği

Formül, x'in boyuna kayma değeri olarak ele alındığında Y(x) Boyuna kuvvetini hesaplar. x'in yanal kayma değeri olarak ele alındığında Y(x) yanal kuvvetini hesaplar. Tekerleğin modellenmesinde kullanılan ve önemli olan diğer bir değişken ise kayma değeridir. Kayma büyüklükleri iki çeşit olup Yanal Kayma ve Boyuna Kayma olarak adlandırılır. Her iki kayma miktarıda tekerleklere o yönde etkiyen kuvvetlere ve tekerlek yapısına göre hesap edilmektedir. Boyuna kayma, tekerlek hızı ile araç hızı arasındaki farkın araç hızına oranı olarak tanımlanmaktadır. Boyuna kayma hızı ise;

$$V_{sx} = V_x - \Omega . R_e \tag{2.26}$$

formülü ile ifade edilir. Burada yer alan Re , tekerlek efektif yuvarlanma yarıçapı, Vx aracın doğrusal hızı ve Ω tekerleğin açısal hızını gösterir. Tekerlek doğrusal hızı Yuvarlanma hızı olarak adlandırılabilir ve kısaca

$$V_r = \Omega . R_e \tag{2.27}$$

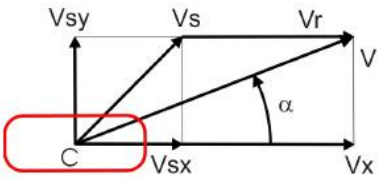
ile gösterilebilir. Bu durumda tekerleğin boyuna kayması

$$s = V_{sx}/V_x \tag{2.28}$$

formülü yardımı ile hesaplanabilir.Tekerleğin yanal kayma hızı ise,

$$V_{sy} = V_y \tag{2.29}$$

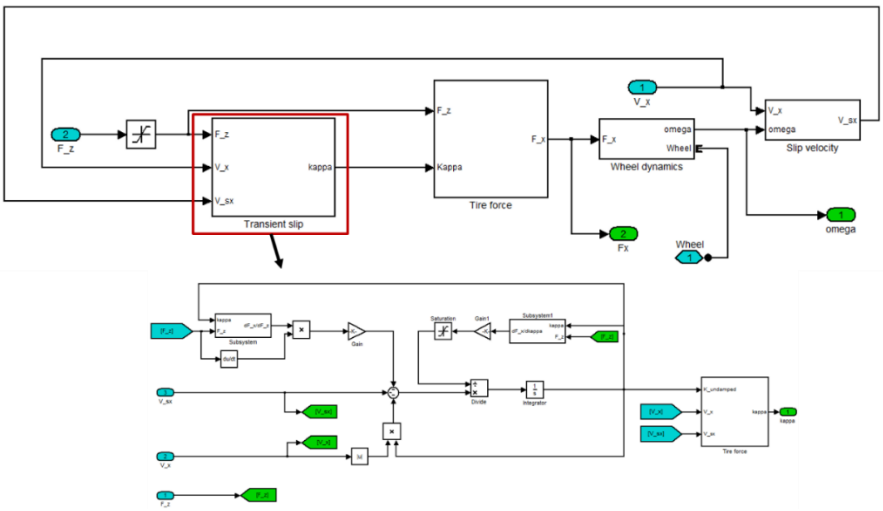
Şekil 2.24'de herhangi bir aracın tekerleğe etkiyen boyuna ve yanal kayma değerleri vektörel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.24 Yanal ve doğrusal kayma

Ancak kayma hesaplamalatında araç hızının sıfıra yakın olduğu durumlarda bu hız ifadesinin paydada olması nedeni ile birtakım kararsızlıklar oluşmaktadır. Bu nedenle Pacejka (Pacejka, 2002) kitabında araç hızına küçük bir sayı eklemeyi önermektedir. Ancak bu sorunu çözmenin diğer bir yolu ise hesaplamalara tekerlek elastikliğininde eklenilmesidir. Bu durumda kayma hesabı sıfır hızdan başlayarak yapılabilmesine rağmen simülasyon çalışmaları oldukça yavaş gerçekleşmektedir (Emadi A.D. 2007).

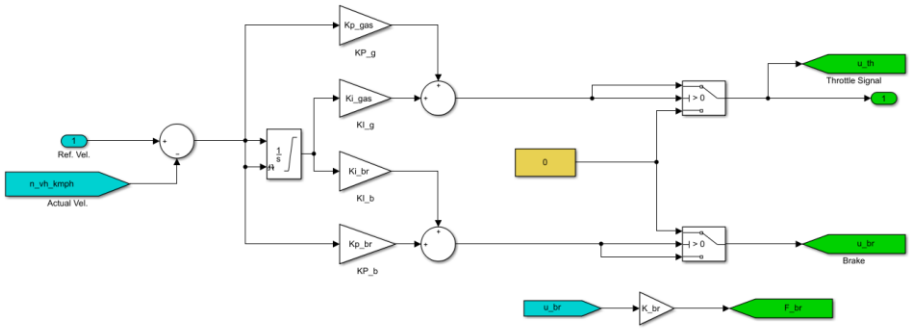
MATLAB®/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olan tekerlek modeli, sadece boyuna kaymanın modelini içermektedir. Tekerlek modelinin oluşturan blok diyagram Şekil 2.25'de gösterilmiştir.



Şekil 2.25. Tekerlek Bloğu

2.3.6 Sürücü Modeli

İleri yönlü araç modelinde sürücü PI kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.26 PI Kontrollü Sürücü

$$u_{th} = K_{p,gas}.e + K_{i,gas}.\int e\ dt \tag{2.30}$$

$$u_{br} = K_{p,br}.e + K_{,br}.\int e\ dt \tag{2.31}$$

Burada u_{th} gaz pedalı sinyali, u_{br} fren pedalı sinyali, K_p ve K_i PI kontrolcünün katsayıları, e ise referans hız ile araç hızının farkıdır.

2.3.7 Aksesuar Yükleri Modeli

Aksesuar yükleri: A/C Klima Kontrolü, Hidrolik Direksiyon, DC/DC Kontrolü, Su Soğutma Pompası, İYM Soğutması olarak sınıflandırılırlar (Muncrief, R.., vd. 2012).

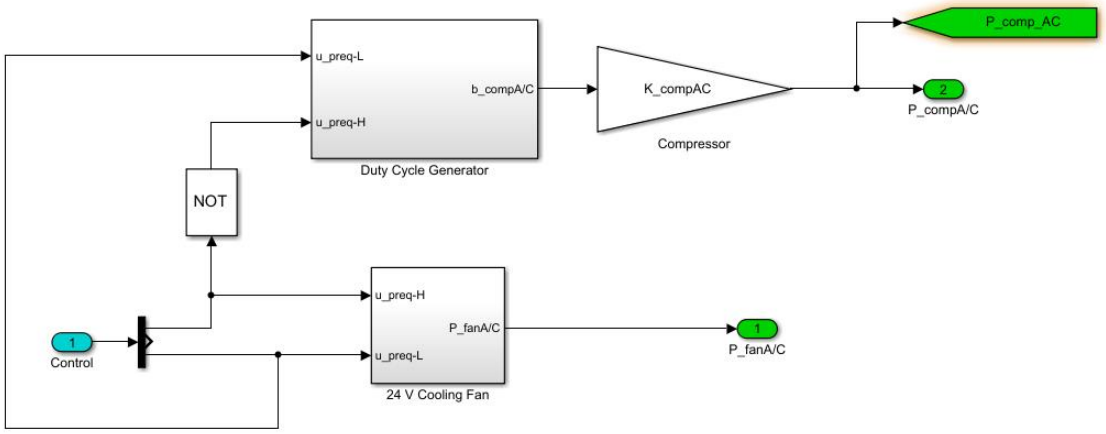
2.3.7.1 A/C Klima Modeli

Klima sisteminin kontrolü aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$P_{comp\ A/C}=\mathfrak{b}_{comp\ A/C}\{0,1\}K_{comp\ A/C} \tag{2.32}$$

$$\mathfrak{b}_{comp\ A/C}\{0,1\} = u_{preq-L}\{0,1\} \wedge \overline{u_{preq-H}\{0,1\}} \tag{2.33}$$

Burada $P_{comp\ A/C}$ kompresör gücü, $\mathfrak{b}_{comp\ A/C}\{0,1\}$ kompresör aç kapa sinyali, $K_{comp\ A/C}$ kompresör güç sabiti, $u_{preq-H}\{0,1\}$ yüksek güç gereksinim sinyali ve $u_{preq-L}\{0,1\}$ düşük güç gereksinim sinyalidir.



Şekil 2.27 A/C Klima Modeli

2.3.7.2 DC/DC Kontrol Modeli

DC/DC dönüştürücünün kontrolü;

$$\mathfrak{b}_{comp\ A/C}\{0,1\} = u_{preq-L}\{0,1\} \wedge \overline{u_{preq-H}\{0,1\}} \tag{2.34}$$

$$P_{c\ dc/dc} = \frac{\overline{u_{preq-H}\{0,1\}}[min(P_r, P_{N\ dc/dc})\mathfrak{b}_{dc/dc}\{0,1\}]}{\eta_{dc/dc}} \tag{2.35}$$

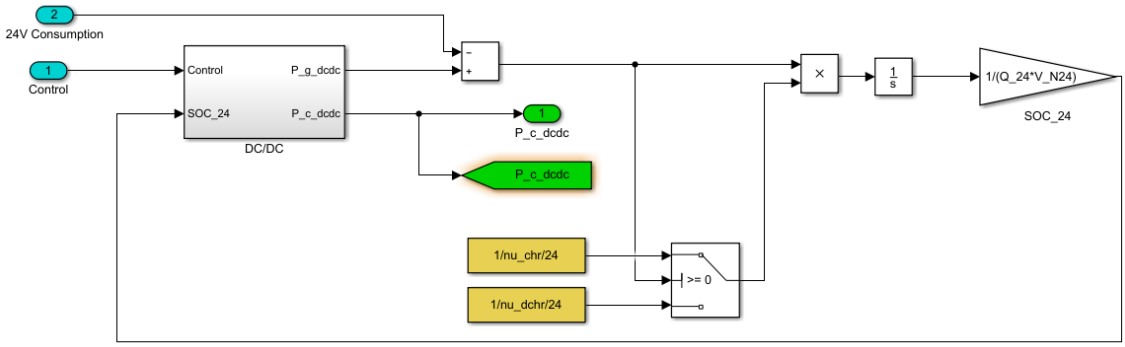
şeklindedir. Burada $P_{g\ dc/dc}$ DC/DC dönüştürücünün ürettiği güç, $P_{c\ dc/dc}$ DC/DC harcadığı güç, $P_{N\ dc/dc}$ DC/DC nominal gücü P_r rejeneratif frenlemeden arta kalan güç, $\eta_{dc/dc}$ DC/DC nin verimi, $\mathfrak{b}_{dc/dc}\{0,1\}$ DC/DC aç kapat sinyali, $u_{preq-H}\{0,1\}$ yüksek güç gereksinim sinyalidir. (C. Andersson, 2004)

2.3.7.3 24 V Akü Konrol Modeli

Aksesuar yüklerinin aküsünün kontrol stratejisi aşağıdaki gibidir;

$$SOC_{24} = \begin{cases} \dfrac{1}{Q_{24}V_{N/24}} \displaystyle\int \left[\frac{P_{g\ dc/dc} - P_{c\ dc/dc}}{\eta_{chr/24}}\right] dt\,, & P_{g\ dc/dc} - P_{c\ dc/dc} \geq 0 \\ \dfrac{1}{Q_{24}V_{N/24}} \displaystyle\int \left[\frac{P_{g\ dc/dc} - P_{c\ dc/dc}}{\eta_{dchr/24}}\right] dt\,, & P_{gdc/dc} - P_{c\ dc/dc} < 0 \end{cases} \tag{2.36}$$

Burada Q_{24} 24 V akünün kapasitesi, $V_{N/24}$ akününü nominal voltajı, $\eta_{chr/24}$ 24 V akünün şarj verimi, $\eta_{dchr/24}$ 24 V akünün deşarj verimi, $P_{g\ dc/dc}$ DC/DC nin ürettiği güç, $P_{c\ dc/dc}$ DC/DC nin harcaduğı güç olarak tanımlanır. (E.C. Owen, J. Steiber, 1997)



Şekil 2.28 24 V Batarya

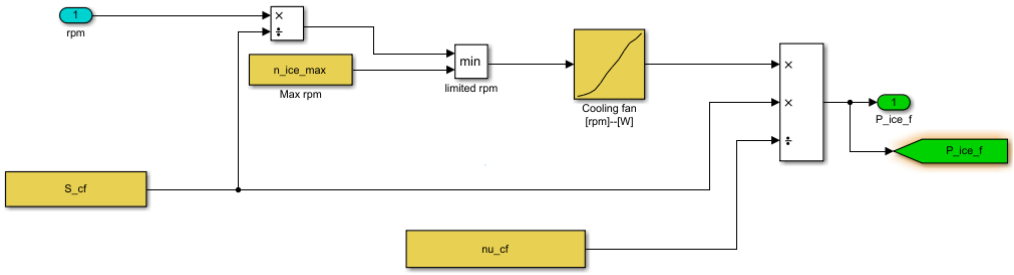
2.3.7.4 İYM Soğutma Fanı Modeli

İçten yanmalı motorun (İYM) soğutulması için gereken güç;

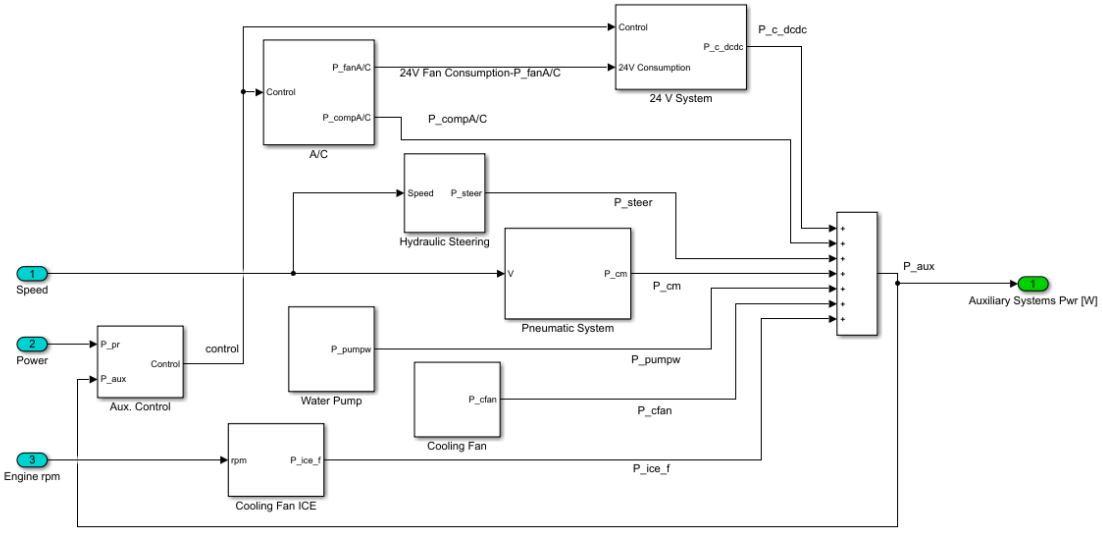
$$P_{ice_f} = \frac{\left[\frac{n_{ice}}{\delta_{cf}}\right]}{\min\left(n_{max}, \frac{n_{ice}}{\delta_{cf}}\right)} . [f(n_{ice}).1000]\delta_{cf}/\eta_{cf} \qquad (2.37)$$

olarak tanımlanır.

Burada P_{ice_f} İYM fan gücü, n_{ice} İYM hızı, δ_{cf} kayma hızı, n_{max} İYM maksimum hızı ve η_{cf} İYM soğutma fanının verimidir.



Şekil 2.29 İYM Soğutma Fanı Modeli



Şekil 2.30 Aksesuar Yükleri

2.4 Sonuç

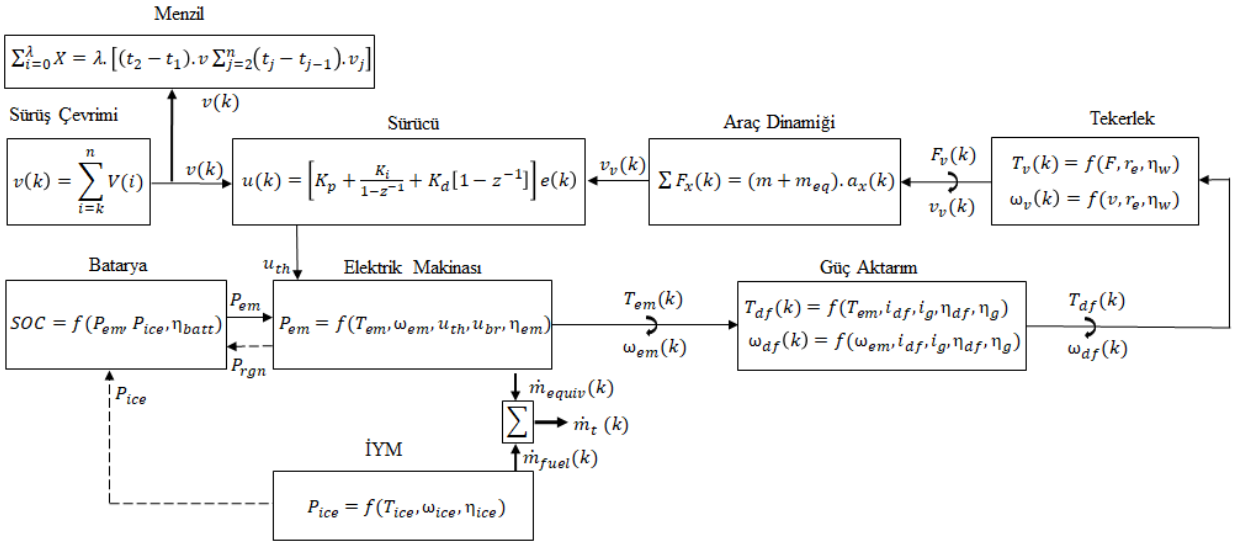
HEA'a ait simülasyon modeli güç aktarım organlarının MATLAB®/Simulink ortamında teker teker bir araya getirilmesi ile elde edilmiştir. Şekil 2.31 ve Şekil 2.32'de SHEA ait simülasyon modeli görülmektedir. Simülasyon modelinde konfigürasyona bağlı olarak kullanılan EM'ler, İYM, tekerlek modeli, doğrusal araç dinamiği ve bağlantı ekipmanlarından faydalanılmıştır. Modelleme tekniği olarak incelenmek istenilen dinamik davranış doğrultusunda ileri akış (forward based model) teknikleri kullanılmıştır.

Tablo 2.1 Araç Parametreleri

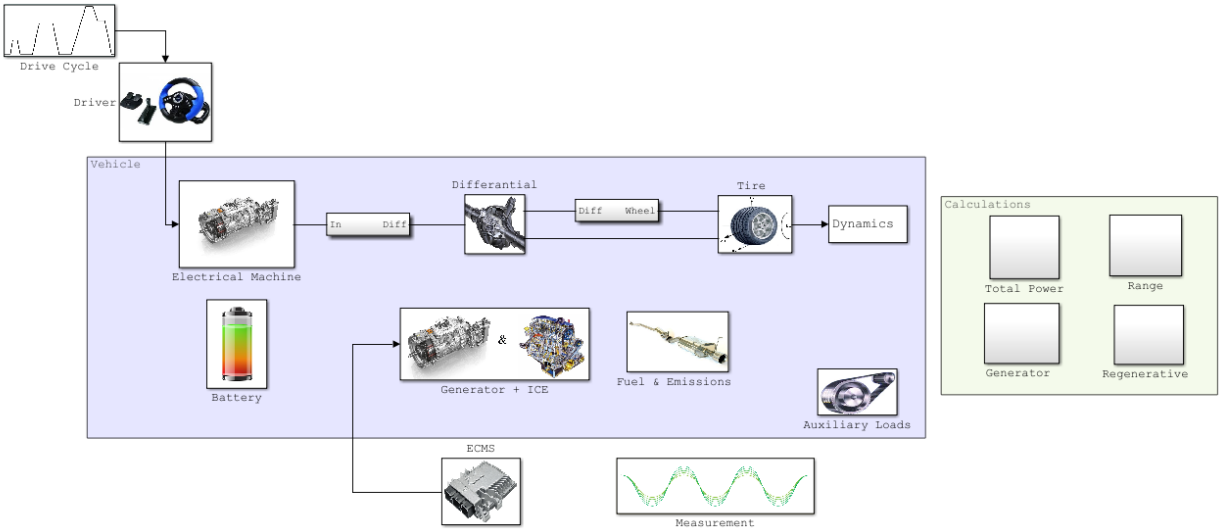
Parametre	**Birim**	**Sembol**	**Değer**
Dinamik			
Ağırlık	[kg]	m	6800
Ağırlık (Yüklü)	[kg]	m	13800
Alan	$[m^2]$	A	4.8
Aerodinamik Katsayı	[-]	C_x	0.68
Yoğunluk	$[kg/m^2]$	ρ	1.22
Yuvarlanma Direnci Katsayısı	[-]	μ_r	0.0063
Tekerlek Yarıçapı	[m]	r_e	0.38
Arka Diferansiyel Oranı	[-]	i_{dr}	4.77
Ön Diferansiyel Uzunluğu	[m]	l_f	1.6718
Arka Diferansiyel Uzunluğu	[m]	l_r	1.2616

Diferansiyel Verimi	[-]	η_{diff}	0.95
Yükseklik	[m]	h_{cg}	0.672
Eğim	[%]	α	0
Rejenerasyon Oranı	[-]	ρ_{rgn}	0.2
Sürücü			
Gaz Pedalı P değeri	[-]	$K_{p,gas}$	28
Gaz Pedalı I değeri	[-]	$K_{i,gas}$	18
Fren Pedalı P değeri	[-]	$K_{p,brake}$	150
Fren Pedalı I değeri	[-]	$K_{i,brake}$	100
Batarya			
Nominal Volt	[V]	V_{nom}	600
Nominal Kapasite	[Ah]	Q_{nom}	42
Batarya sabiti	[-]	K_c	1.038825
Polarizasyon Direnci	[Ω]	R_p	0.0282
Exponansiyel Volt Sabiti	[V]	V_{exp}	0.069166
Exponansiyel Ah sabiti	[Ah]	Ah_{exp}	75
Eylemsizlik			
EM Eylemsizliği	$[kg.m^2]$	J_{em}	0.179
Generatör Eylemsizliği	$[kg.m^2]$	J_{gen}	0.179
IYM Eylemsizliği	$[kg.m^2]$	J_{ice}	0.2099
Diferansiyel Eylemsizliği	$[kg.m^2]$	J_{diff}	0.662
Tekerlek Eylemsizliği	$[kg.m^2]$	J_{wh}	2.4129
Motor			
EM Max Torku	[Nm]	T_{em}	1300
EM Max Hızı	[d/dk]	n_{em}	5000
IYM Max Torku	[Nm]	T_{ice}	700
IYM Max Hızı	[d/dk]	n_{ice}	2850

Tablo 2.1'de SHEV aracın parametreleri verilmiştir.



Şekil 2.31 Seri-HEA Akış Şeması



Şekil 2.32 Seri-HEA Simulink Modeli

3. ECMS KONTROL

3.1 Giriş

Tüm hibrid araçların menzilini yükseltmek ve gensetin verimini maksimumda tutmak ile ilgili farklı enerji yönetim algoritmaları kullanılmaktadır. Optimum güç yöntemi, termostat yöntemi, sınırlamalı thermostat yöntemi, Eşdeğer Minimum Yakıt Tüketimi Stratejisi (ECMS) ve Dinamik Programlama (DP) tabanlı kontrolcüler, bu araçların kontrolcüleri arasındadır. Optimal çözüm veren algoritmalar belirli bir sürüş çevrimi için yapıldığından, trafik yoğunluğu ve yol durumu gibi değişkenlerden dolayı yapılan hesaplar ve sonuçlar kısmi optimaldir.

ECMS stratejisinde, anlık bir optimizasyon yöntemi sayesinde, hem gensetten hem de aküden gelen bu toplam güç talebi, hibrit aracın güç ihtiyacı karşılar ve minimum yakıt tüketimini elde etmek için orantılı olarak dağıtılır. Enerji yönetimi, temelde aküdeki enerjinin LHV (low heat value) ile yakıt enerjisine dönüştürülmesini içerir; bu, hibrit aracın her zaman dilimindeki minimum yakıt kullanımını belirlemeyi amaçlamaktadır (Barsalli, S. vd. 2004).

3.2 Problemin Formulasyonu

Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Stratejisi, eşitlik (1)'de verildiği üzere, anlık zaman dilimlerindeki yakıt tüketimini minimum yapacak çalışma noktalarını hesaplama üzerine kurulmuştur (C. Musardo, vd. 2005).

$$J_t = J_t(P_{ICE}(t), P_{EM}(t)) \tag{3.1}$$

$$\left\{P_{ICE}^{opt}(t), P_{EM}^{opt}(t)\right\} = arg \min_{\{P_{ICE}(t), P_{EM}(t)\}} J_t \tag{3.2}$$

$$\text{Sınırlamalar: } \begin{cases} P_{req}(t) = P_{ICE}(t) + P_{EM}(t) \\ SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max} \ \forall t \\ 0 \leq P_{ICE}(t) \leq P_{ICE\,max}(t) \\ P_{EM\,min}(t) \leq P_{EM}(t) \leq P_{EM\,max}(t) \end{cases} \tag{3.3}$$

Burada J_t harcanan toplam enerjidir. Paganelli nin methodunda eşdeğer yakıt tüketimi aşağıdaki formüllerle verilmiştir (Paganelli G., Sebastien D. 2002), (C. Musardo, vd. 2005).

Elektrik Enerjisi:

$$\Delta E_{elec} = \frac{P_{EM}(t)}{\eta_{batt}(P_{EM})\,\eta_{EM}(P_{EM})\eta_{PE}(P_{EM})}\Delta t \tag{3.4}$$

Burada η_{batt} batarya verimi, η_{EM} EM verimi ve η_{PE} güç elektroniği verimidir.

$$m_{ICE\ equivalent} = \frac{\Delta E_{elec}}{H_{LHV}} \tag{3.5}$$

H_{LHV} (low heating value değeri ile) eşdeğer yakıt tüketimine geçilir.

$$\dot{m}_{EM\ equivalent}(t) = \frac{m_{ICE\ equivalent}}{\Delta t} = \frac{P_{EM}(t)}{\eta_{PE}(P_{EM})\,\eta_{batt}(P_{EM})\,\eta_{EM}(P_{EM})H_{LHV}} \tag{3.6}$$

Şarj durumunda ise üretilen enerji aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\Delta E_{elec} = \eta_{PE}(P_{EM})\eta_{batt}(P_{EM})\,\eta_{EM}(P_{EM})P_{EM}(t)\Delta t \tag{3.7}$$

Şarj ve Deşarj durumları dikkate alınarak aşağıdaki formül elde edilir.

$$\dot{m}_{EM\ equivalent}(t) = \gamma\frac{P_{EM}(t)}{\eta_{batt}(P_{EM})\,\eta_{EM}(P_{EM})\eta_{PE}(P_{EM})} + (1-\gamma)\eta_{PE}(P_{EM})\eta_{batt}(P_{EM})\,\eta_{EM}(P_{EM})P_{EM}(t) \tag{3.8}$$

Burada:

$$\gamma = \frac{1 + sgn(P_{EM})}{2} \tag{3.9}$$

γ sabiti 0 veya 1 gelerek şarj veya deşarj durumunu gösterir.

IYM ve EM deki harcanan toplam enerji;

$$J_t = \dot{m}_{ICE}\big(P_{ICE}(t)\big) + s(SoC(t)).\dot{m}_{EM\ equivalent}(P_{EM}(t)) \tag{3.10}$$

Burada s(t) elektrik enerjisinin ağırlık faktörüdür. s(t) Şarj durumuna bağlı olarak elektriksel enerjiye ceza foksiyonu (penalty function) olarak gelir. Şarjın az olması durumunda s(t) yükselir. Bu da elektriksel tüketimi arttırır. Bu durum IYM çalıştırmaya zorlayarak şarj durumunu yükseltmeye ve s(t) yi azaltmaya zorlar.

Literatürde farklı s(t) fonksiyonları mevcuttur.

Friden ve Sahlin'in metodu denklem (3.11-3.12) deki gibidir (Friden H. Sahlin H., 2012).

$$s = s_{opt} + \tan(SOC_{ref} - SOC(t))K_s s_{opt} \tag{3.11}$$

$$s(t) = s_{opt} + K_P\left(SOC_{ref} - SOC(t)\right) + K_l\int(SOC_{ref} - SOC(t))dt \tag{3.12}$$

Bir diğer yöntem ise denklem (3.13) deki gibidir (J. Becker, vd. 2012).

$$s(t) = s_{opt} + s_{opt}\, K\ tan(\frac{SOC_{ref} - SOC(t)}{2\,\pi}) \tag{3.13}$$

Bu tez çalışmasında kullanılan yöntem;

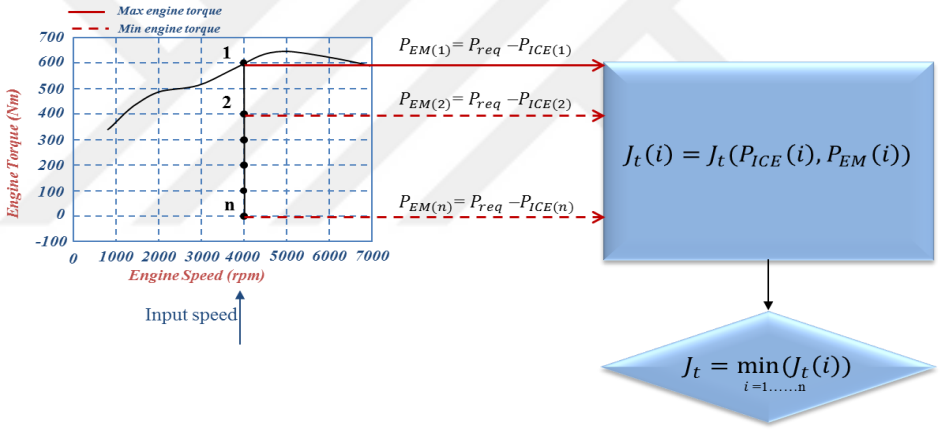
$$\mathrm{s(t)} = f_{SOC}\big(\mathrm{S(t)}\big).s_k \tag{3.14}$$

$$f_{SOC}\big(\mathrm{s(t)}\big) = \left(1 + \left(\frac{SOC_{ref} - SOC(t)}{SOC_{ref} - SOC_{min}}\right)^{2n+1}\right).\left(1 + tanh\left(\frac{f_{SOC,I}(SOC(t))}{SOC_{th}}\right)\right) \tag{3.15}$$

Olarak tanımlanmıştır. Burada;

$$f_{SOC,I}\big(SOC(t)\big) = 0.99.\, f_{SOC,I}(t - \Delta t) + 0.01.\,(SOC_{ref} - SOC(t)) \tag{3.16}$$

Şekil 3.1'de gösterildiği üzere aracın istediği güç miktarından $P_{req}(t)$, içten yanmalı motorun olası bütün güç değerleri çıkartılır toplam eşdeğer yakıt tüketimi hesaplanır. Bu değerlerden minimumu şeçilir.



Şekil 3.1 IYM verim haritasına göre minimum belirlenmesi

PMP Yaklaşımı

Alternatif olarak, ECMS optimizasyonu, her iterasyonda ceza fonksiyonu anlık olarak hesaplatılabilir. Bu aynı zamanda Pontryagin'in Minimum (PMP) formülüdür. İçten yanmalı motor çalışma noktasının tüm haritada taranarak her an için optimum çalışma noktası bulunur. PMP optimizasyonunda $u(t)$, optimum çözümdür. Bu da içten yanmalı motorun optimum gücünün bulunmasıdır. Hamiltonian fonksiyonunun minimumu ile gösterilir (D.S Naibu 2003).

$$u(t) = arg\ min\, H(SOC(t), u(t), t) \tag{3.17}$$

$$H(t) = \dot{m}_{fuel}(u(t), t) + \lambda(t)\frac{\partial SOC}{\partial t} \tag{3.18}$$

Burada $\lambda(t)$, SOC un durum değişkenidir.

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H(SOC(t), u(t), t)}{\partial SOC(t)} \tag{3.19}$$

ECMS'de, $H(t)$ 'nin SOC (t)' ye bağımlılığı ihmal edilebilir seviyededir, bu kabul sayesinde eşdeğer yakıt faktörü $s(t)$, λ ile orantılı olduğu düşünülebilir. (Ayrıca $\dot{\lambda}(t)$ çözümü sıfıra eşittir.) (T.C.J. Romijn 2019)

Denklem tekrar yazılırsa;

$$u(t) = arg\,min\, H(SOC(t), u(t), s(t), t) \tag{3.20}$$

$$H(t) = \dot{m}_{fuel}(u(t), t) + s(t)\,\frac{\partial SOC}{\partial t} \tag{3.21}$$

Böylece Hamiltonian fonksiyonunun SOC(t) ye bağımlılığı ihmal edilerek oluşturulan denklem, geleneksel ECMS'e indigenebilir (Dong-Il Cho. 1987; R. Vignesh, B. Ashok, 2023).

3.3 Sonuç

ECMS yaklaşımı, anlık optimizasyon stratejisini kullanarak, hibrit güç isterinin hem benzinli motorlara hem de akülere güç sağlamak için gereken tüm enerjiyi sağlamasını ve aynı zamanda optimum yakıt tüketimi kullanımını sağlamasını sağlar. Bu, iki enerji kaynağı arasında paylaşılan toplam gücün oranı hesaplanarak gerçekleştirilir. Başka bir deyişle akü enerjisi, toplam IYM yakıt tüketimine dönüştürülür ve hibrit aracın zaman içindeki minimum yakıt kullanımı belirlenerek hesaplanır.

4. ECMS TABANLI KONTROL STRTEJİSİ

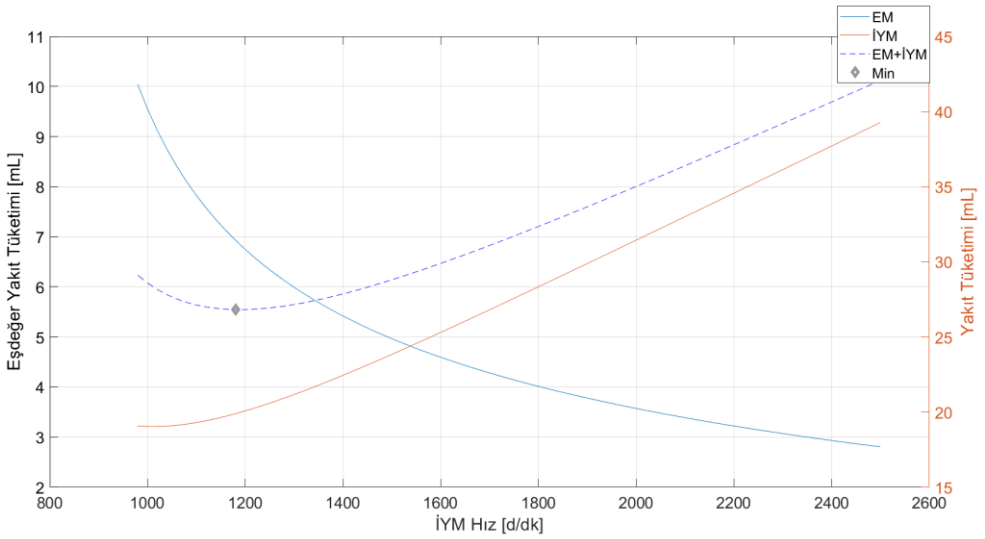
4.1 Giriş

Bölüm 2'de HEA'a ait güç aktarım organlarının simülasyon modeli gösterilmiştir. Tezin bu bölümünde matematiksel formülleri verilmiş olan ECMS kontrolcünün MATLAB®/Simulink ortamında benzetim modeli verilecektir.

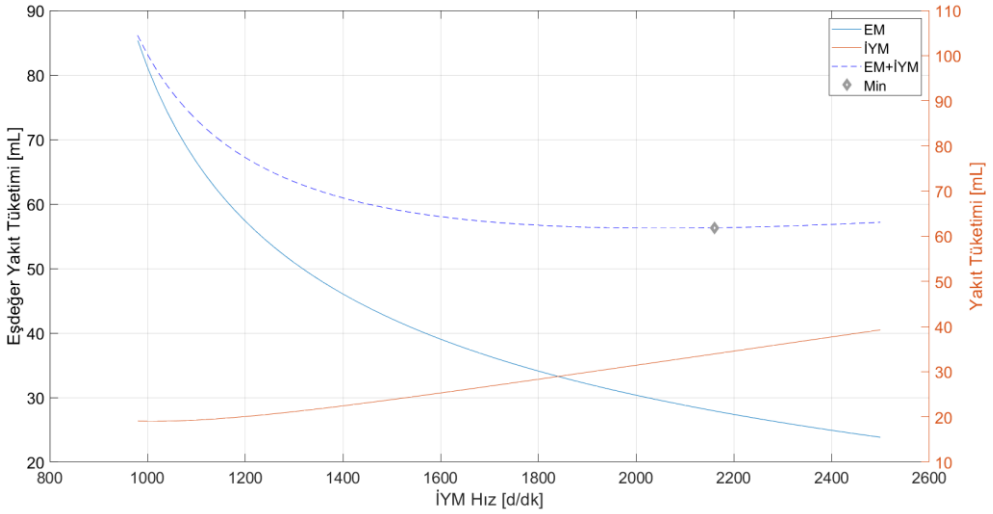
4.2 Penaltı Fonksiyonu

Penaltı faktörü olarak isimlendirilen s, $\boldsymbol{SOC(t)}$ değerinin belirlenen minimum değerine yaklaşması durumunda elektriksel enerji kaynağına ceza vererek yerel minimum noktasını İYM yi daha yüksek, çekiş motorunun daha düşük hız ve tork çalışma noktasına kaydırır. Bu durum bataryaya enerji vererek sarj durumunu yükseltir. Yüksek şarj seviyesi (3.14) eşitliğindeki $\boldsymbol{s(t)}$ yi düşürür ve elektriksel enerji kaynağına verilen cezayı azaltır. Böylece yerel minimum noktası tekrar elektriksel enerjinin daha yoğun yakıt enerjisinin daha az çalıştığı noktaya çekilmiş olur.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 de İYM'nin sabit tork değerinde iken 1000 ile 2600 d/dk çalışma hızı aralığı, elektrik motorunun eşdeğer yakıt tükerimi, ve İYM nin yerel minimum noktası verilmiştir. Sarj seviyesine bağlı olarak penaltı fonksiyonunun 0.2 değerinde İYM 1180 d/dk hızında çalışırken, farklı bir senaryoda ise Sarj seviyesinin düşmesinden dolayı penaltı fonksiyonunun yükselmesi durumunda hesap edilen minimum noktasının 2150 d/dk olduğu gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Penaltı fonksiyonun 0.2 olması durumundaki minimum



Şekil 4.2 Penaltı fonksiyonu 1.6 olması durumundaki minimum

Denklem (3.11) 'de s, teğet fonksiyonu ve optimal eşdeğer faktör s_{opt} kullanılarak hesaplanır. Optimal eşdeğer faktör, belirli bir sürüş çevrimi boyunca yakıt tüketimini en aza indirmek için çevrimdışı olarak hesaplanır. Öte yandan, denklem (3.12), orantılı ve integral kazanç ile PI yaklaşımını kullanır.

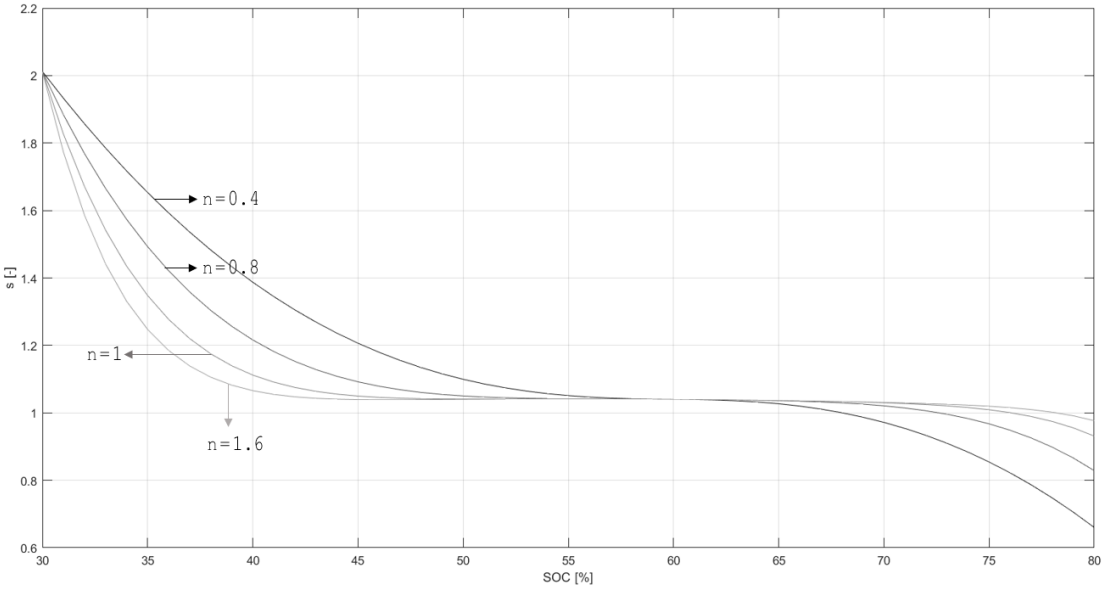
Denklem (3.11-3.12), belirtilen sınırlar dahilinde SOC (t) 'yi muhafaza edememe dezavantajına sahiptir. Başka bir sorun, sürüş çevrimine büyük ölçüde bağlı olmasıdır. Farklı sürüş çevrimleri için aynı başarıyı göstermez.
Denklem (3.13) de SOC değerinin osilasyona girmesi gibi bir dezavantajı vardır. Bu osilasyon durumu, İYM tork salınımına neden olur. İYM ve batarya açısından tehlikelidir.

Bu nedenlerden dolayı denklem (3.14-3.15) penaltı fonksiyonu için literatürdeki en iyi çözümlerden biridir.

$$f_{SOC}(\mathrm{s(t)}) = \left(1 + \left(\frac{SOC_{ref} - SOC(t)}{SOC_{ref} - SOC_{min}}\right)^{2n+1}\right).\left(1 + tanh\left(\frac{f_{SOC,I}(SOC(t))}{SOC_{th}}\right)\right) \quad (3.15)$$

$$f_{SOC,I}(SOC(t)) = 0.99.\, f_{SOC,I}(t - \Delta t) + 0.01.\,(SOC_{ref} - SOC(t)) \quad (3.16)$$

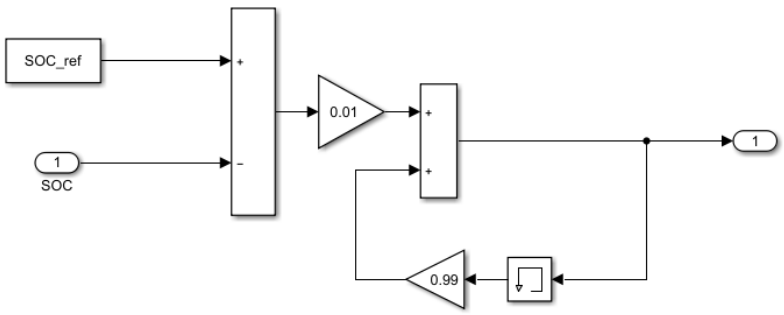
Burada $\boldsymbol{n}$ değeri kontrolcünün agresifliğini değiştirmede kullanılır. Şekil 4.3'de farklı n değerleri için penaltı fonksiyonu verilmiştir



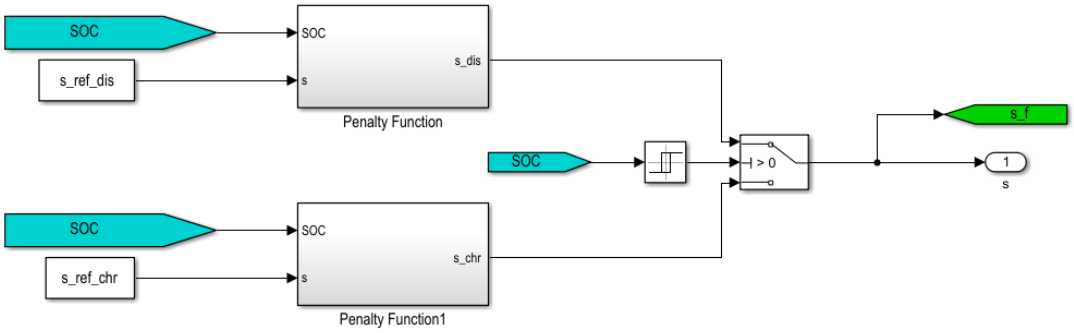
Şekil 4.3 n değerleri için penaltı fonksiyonu

Şekil 4.3 de görüldüğü üzere $\boldsymbol{n = 1.6}$ değerinde kontrolcü şarjın %40 ile %70 bandı arasında İYM de neredeyse hiçbir değişim gözlenmezken sarjın %40 dan daha aşağı düşmesi durumunda İYM'yi yüksek hız ve torklarda çalıştırması gibi ani değer değişimleri olur. Çalışma kapsamında İYM'nin ara değerlerinde çalışması bakımından $\boldsymbol{n = 1}$ gibi ortalama bir agresiflik seviyesi seçilmiştir.

Şekil 4.4 ve 4.5 de denklem (3.14-3.16) nın gerçeklenmesi gösterilmiştir.



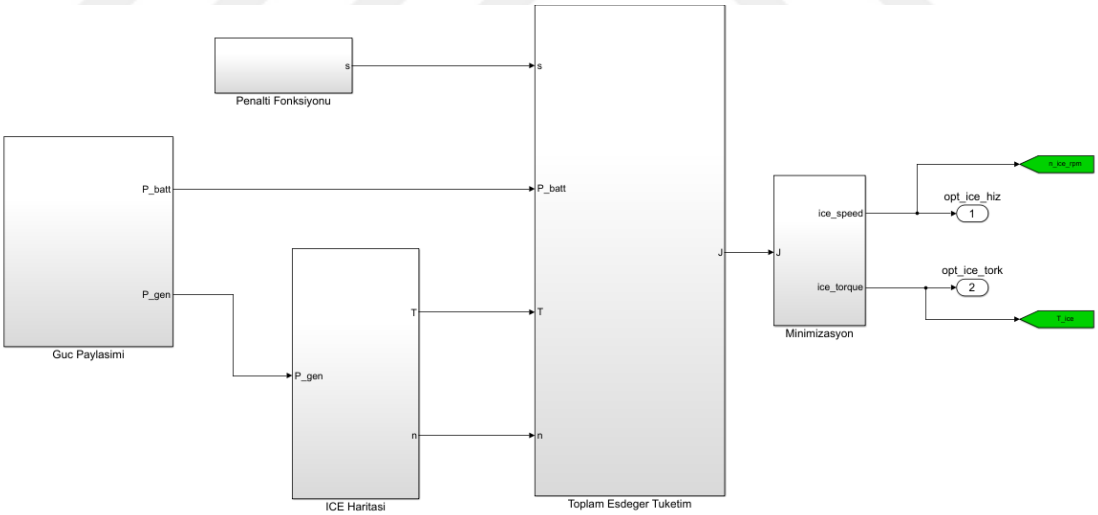
Şekil 4.4 $f_{SOC,I}$ Fonksiyonu Modeli



Şekil 4.5 Penaltı Fonksiyonu Modeli

4.3 Sonuç

ECMS modelinin gerçeklenmesindeki, kullanıcının istediği gücü ve İYM motorunun çalışma aralığını hesaplayan Güç Paylaşımı bloğu, sarj durumuna göre değişen penaltı fonksiyonu, toplam yakıt tüketiminin hesaplanması ve anlık minimum noktanın bulunmasını kapsayan model Şekil 4.6 de gösterilmiştir.



Şekil 4.6 ECMS Kontolcü modeli

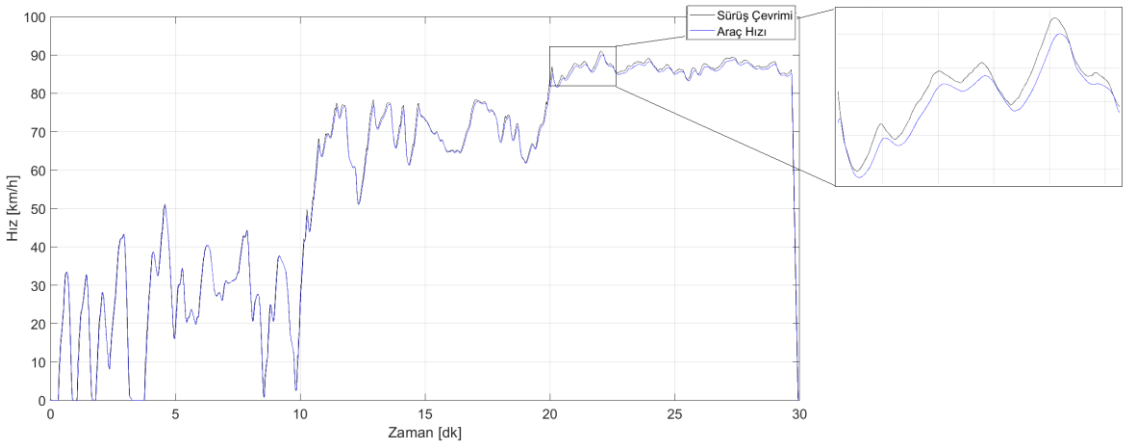
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Giriş

Bu bölümde araç simulasyonun sonuçları verilecektir. Öncelikle PI sürücünün testleri yapılmıştır. Sürücü modeli referans hızı karşılaştırılması yapılmıştır. Sürücünün doğrulanmasının ardından NREL FTP-SC03, FİGE ve Orange sürüş çevrimleri için ECMS kontrol ve deterministik tabanlı kontrol karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada menzil, tüketimi, emisyon salınımı değerleri incelenmiştir.

5.2 Simulasyon Sonuçları

Şekil 5.1'de FİGE sürüş çevrimi için Referans hız ve araç hızı karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.1 FIGE sürüş çevrimi

Şekilde görüldüğü üzere sürücü (PI kontrol) referans hızı takip edebilmektedir. Hız hatası en fazla 1.2 km/h olduğu görülmüştür. Buradaki hız farkı ihmal edilebilecek seviyededir ve sürücü seçilen standart sürüş çevrimlerini hatasız takip ettiği varsayılabilir. Araç dolu ve boş ağırlıklarında hız çevrimini takip edebildiğine göre enerji yönetim algoritmaları karşılaştırılabilir. Burada bahsedilen algoritmalar ECMS ve Determisinistik Tabanlı Kontrol (DTK) algoritmalarıdır. DTK algoritmasının stateflow modeli Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Determisinistik Tabanlı Kontrol Algoritması

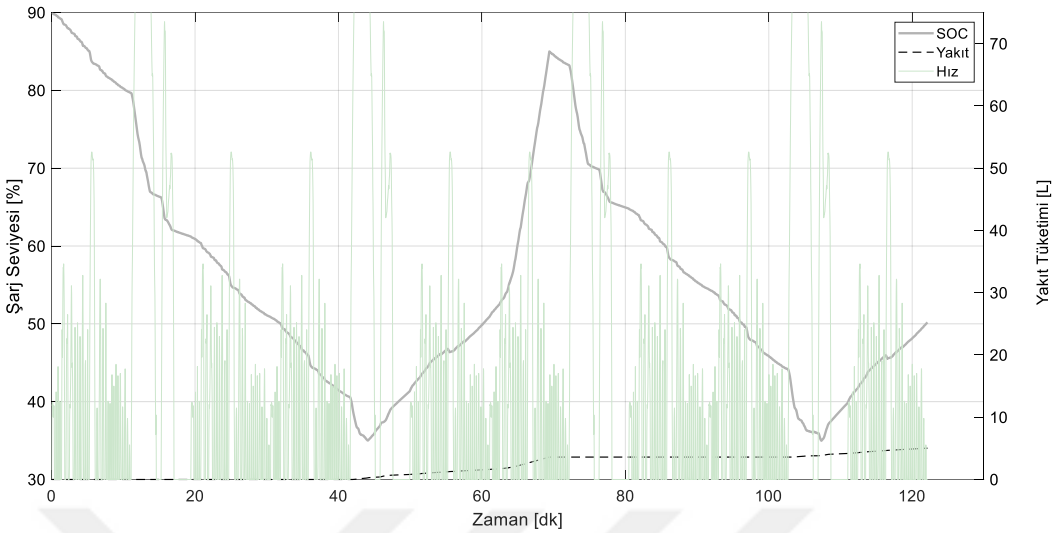
DTK algoritmayı tasarlayan kişiye oldukça bağımlıdır. Belirli bir şarj seviyesinin altında İYM ye hem bataryayı şarj edebilecek hem de en verimli noktasında çalışması için sinyal gönderilir. Belirli bir şarj seviyesinin üstünde ise İYM durdurulur. Kontrlcünün performansı belirlene eşik seviyelerine bağlıdır.

Şekil 5.3-5.22 arası ECMS algoritmasının;

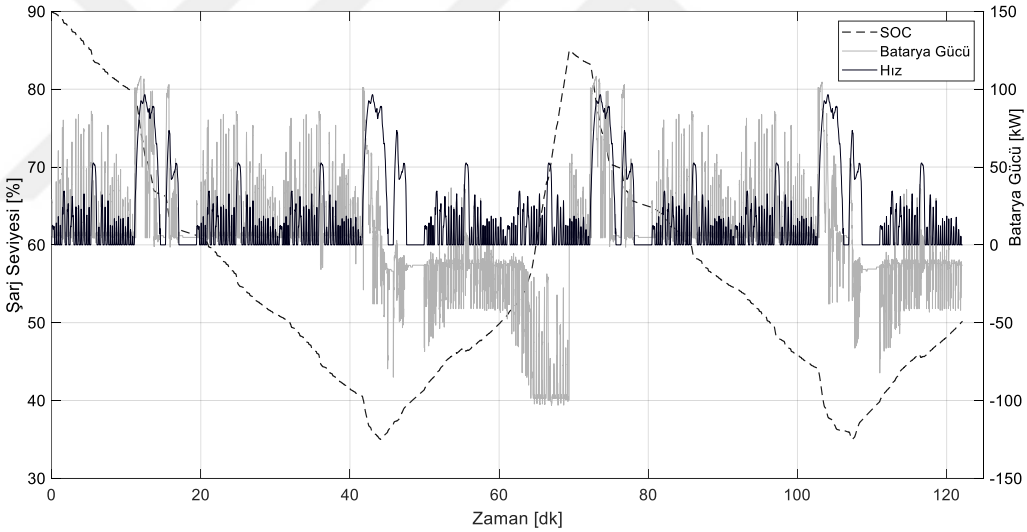
- NREL
- FTP-SC03
- FİGE
- Orange

Olmak üzere 4 adet sürüş çevrimindeki sonuçları göstermektedir .

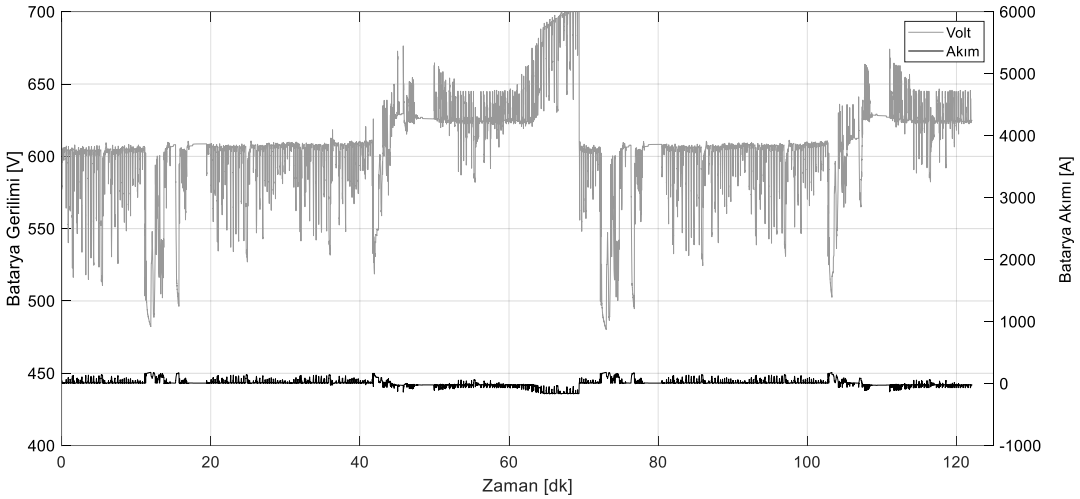
NREL Sürüş Çevrimi



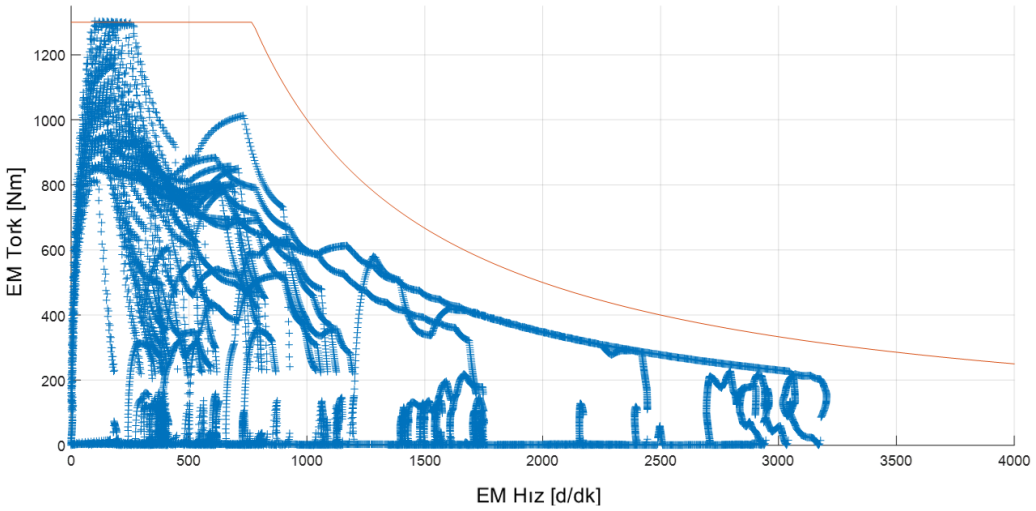
Şekil 5.3 NREL SOC ve Yakıt Tüketimi



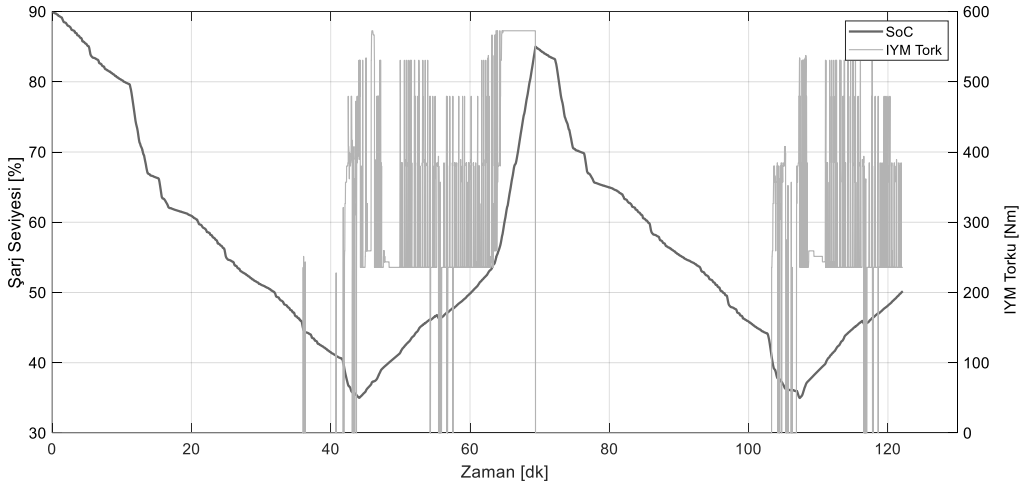
Şekil 5.4 NREL Sürüş Çevrimi ve Batarya Gücü



Şekil 5.5 NREL Batarya voltajı ve akımı



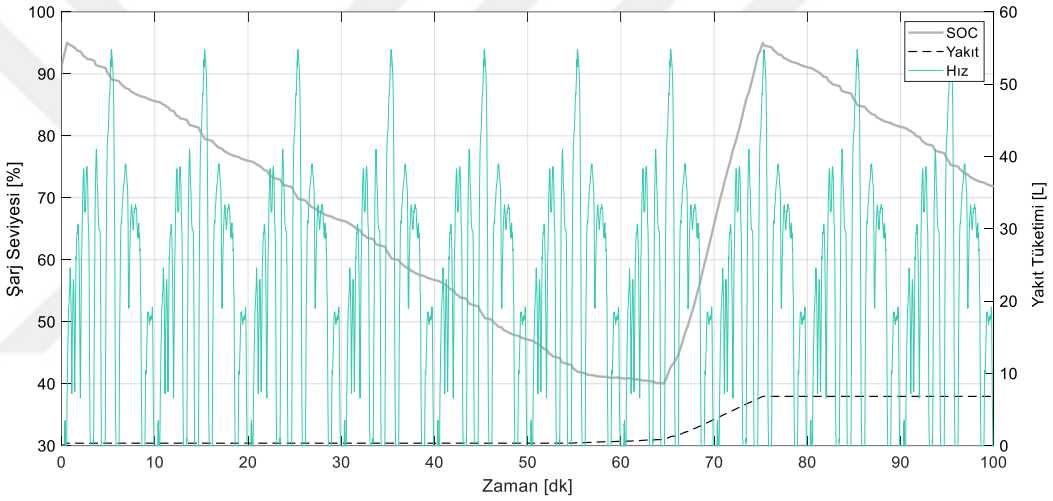
Şekil 5.6 NREL EM çalışma bölgesi



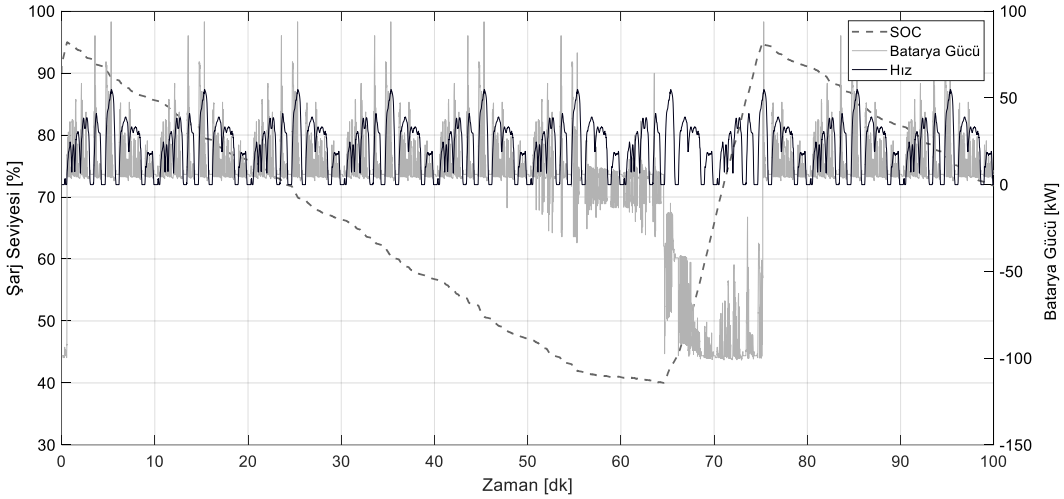
Şekil 5.7 NREL SOC ve İçten Yanmalı Motorun Torku

Şekil 5.3 de National Renewable Energy Laboratory (NREL) sürüş çevriminin hızı ve şarj seviyesi verilmiştir. Şekil 5.4 te ise bataryanın gücü görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere batarya gücü 40-70 dk arasında negatife düşmektedir. Bu aralıkta batarya şarj olmaktadır. Aynı şekilde SoC grafiğinin de yükseldiği görülebilir. Şekil 5.5te batarya voltajı görülmektedir. Voltaj değeri yaklaşık olarak sabit olmasına karşın, şarj sırasında yükseldiği görülmektedir. Şekil 5.6 da EM zarfı ve sürüş çevrimini sırasında motorun çalışma noktaları çizdirilmiştir. Şekilde 5.7 de ise İçten yanmalı motorun çalışma noktası ile sarj seviyesi verilmiştir.

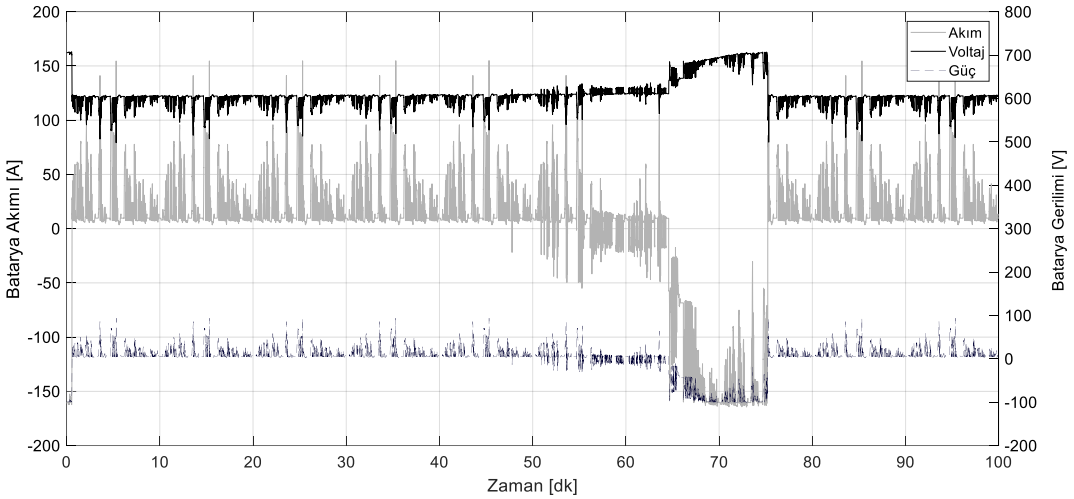
SC03 Sürüş Çevrimi



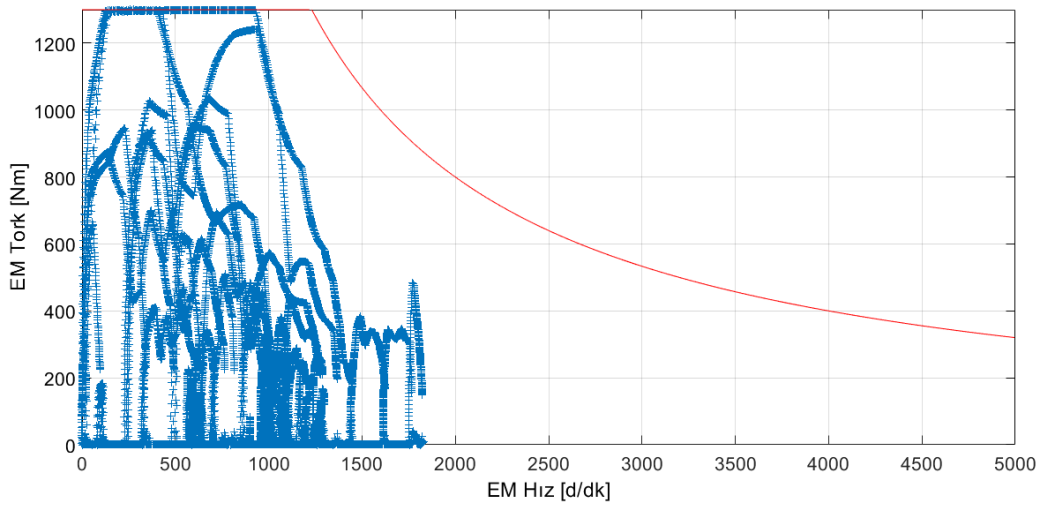
Şekil 5.8 SC03 SOC ve Yakıt Tüketimi



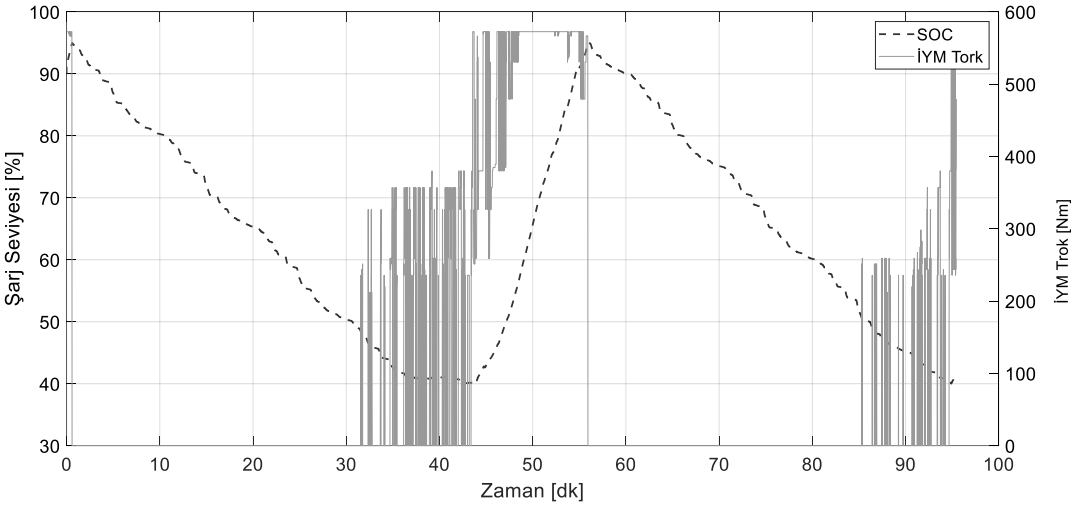
Şekil 5.9 SC03 Sürüş Çevrimi ve Batarya Gücü



Şekil 5.10 SC03 Batarya voltajı ve akımı



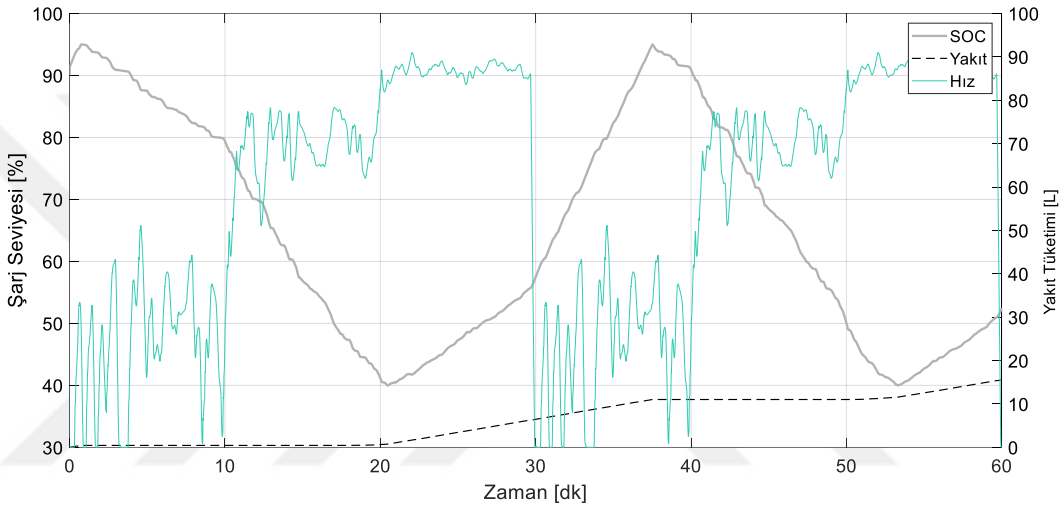
Şekil 5.11 SC03 EM çalışma bölgesi



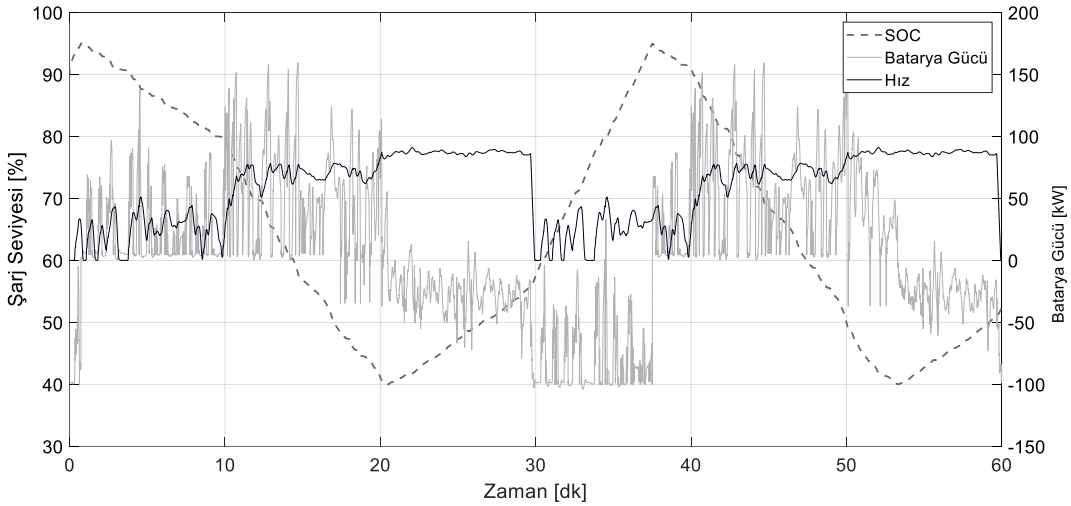
Şekil 5.12 SC03 SOC ve İçten Yanmalı Motorun Torku

Şekil 5.8 de US: Light-duty SFTP-SC03 sürüş çevriminin hızı ve şarj seviyesi verilmiştir. Şekil 5.9 te ise bataryanın gücü görülmektedir. Şekil 5.10 da batarya voltajı görülmektedir. Şekil 5.11 te EM zarfı ve sürüş çevrimini sırasında motorun çalışma noktaları çizdirilmiştir. NREL sürüş çevrimine göre daha yüksek hızlarda gezdiği Şekil 5.11'da da görülebilir. Şekilde 5.12 de ise İçten yanmalı motorun çalışma noktası ile sarj seviyesi verilmiştir.

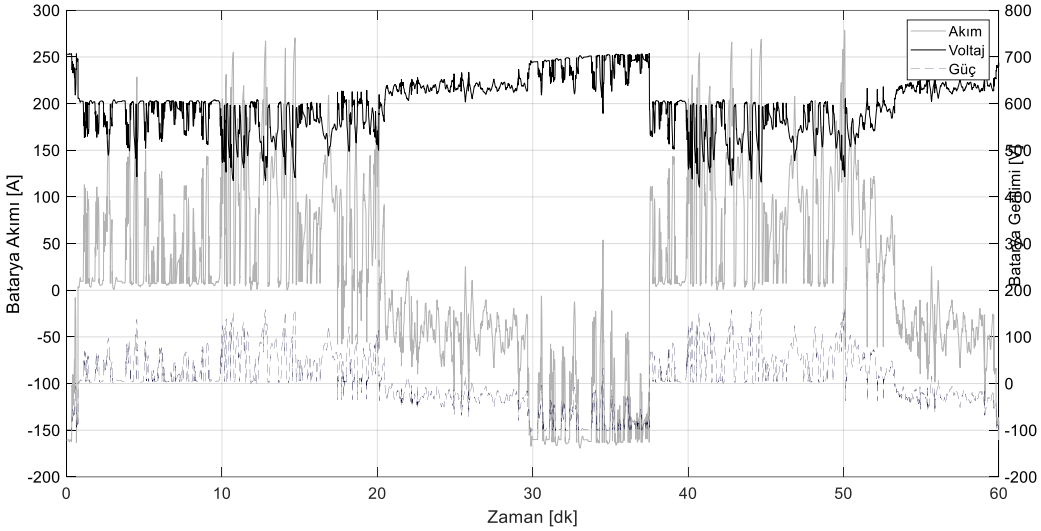
FIGE Sürüş Çevrimi



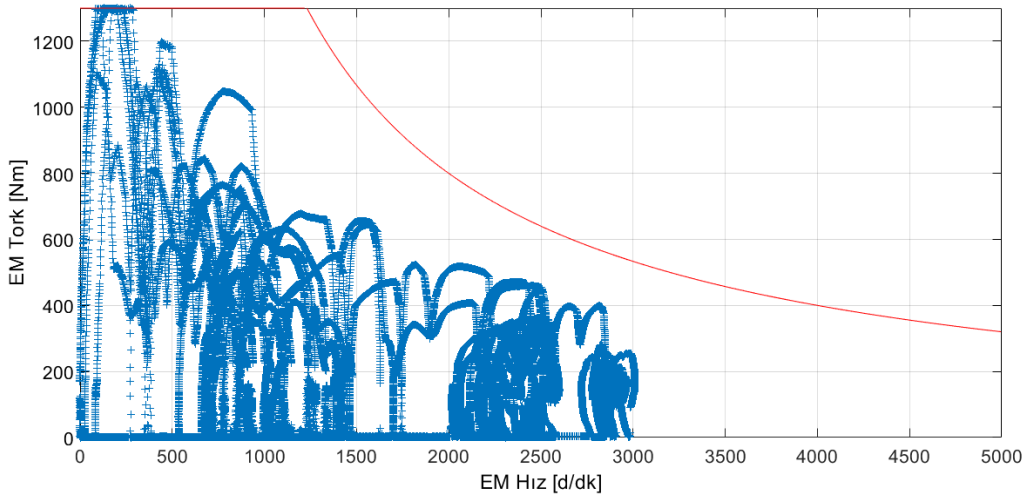
Şekil 5.13 FİGE SOC ve Yakıt Tüketimi



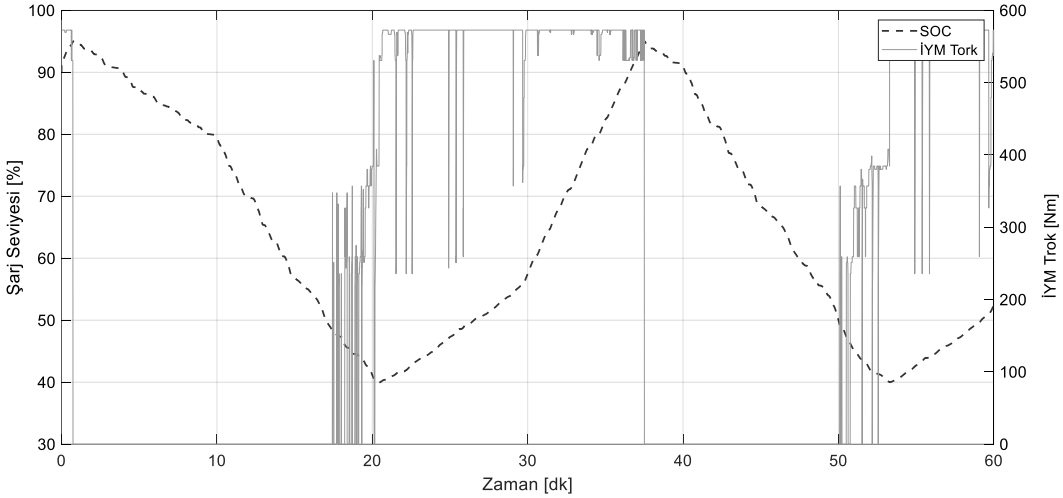
Şekil 5.14 FİGE Sürüş Çevrimi ve Batarya Gücü



Şekil 5.15 FİGE Batarya voltajı ve akımı



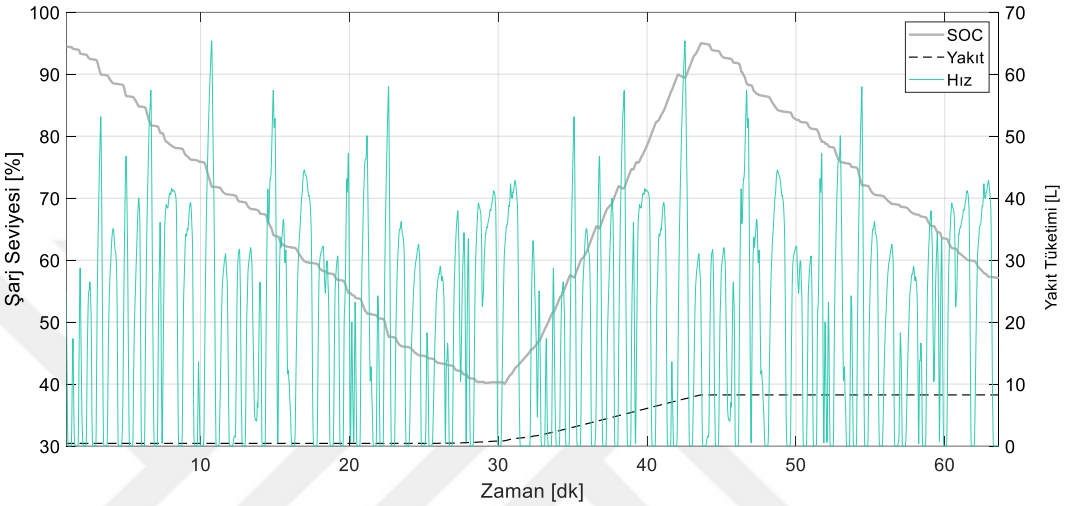
Şekil 5.16 FİGE EM çalışma bölgesi



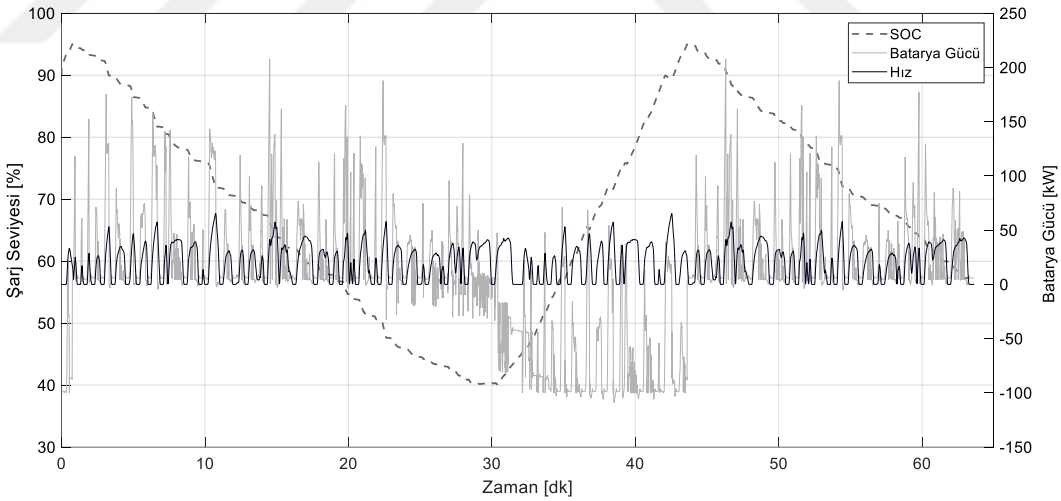
Şekil 5.17 FİGE SOC ve İçten Yanmalı Motorun Torku

Şekil 5.13 de ETC FIGE sürüş çevriminin hızı ve şarj seviyesi verilmiştir. Şekil 5.16 da EM zarfı ve sürüş çevrimini sırasında motorun çalışma noktaları çizdirilmiştir. Yüksek hızlarda fazla moment isteri görülmemiştir.

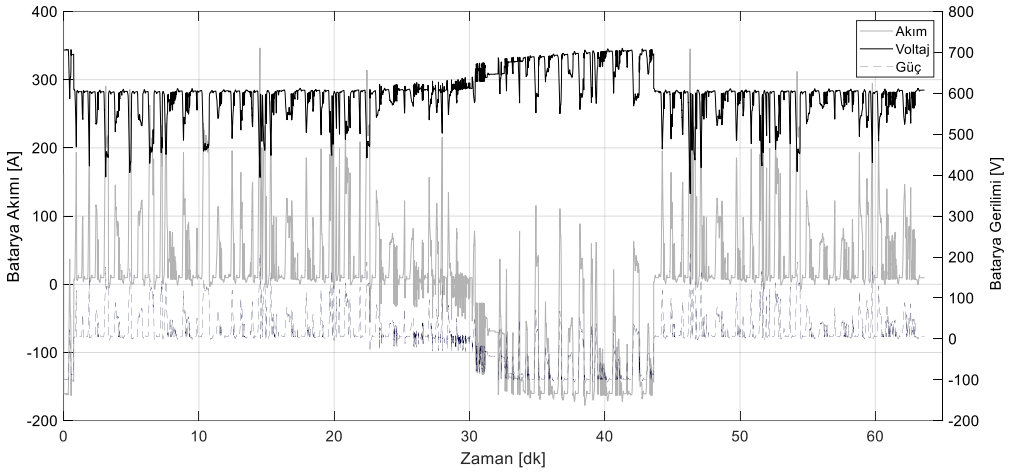
Orange Sürüş Çevrimi



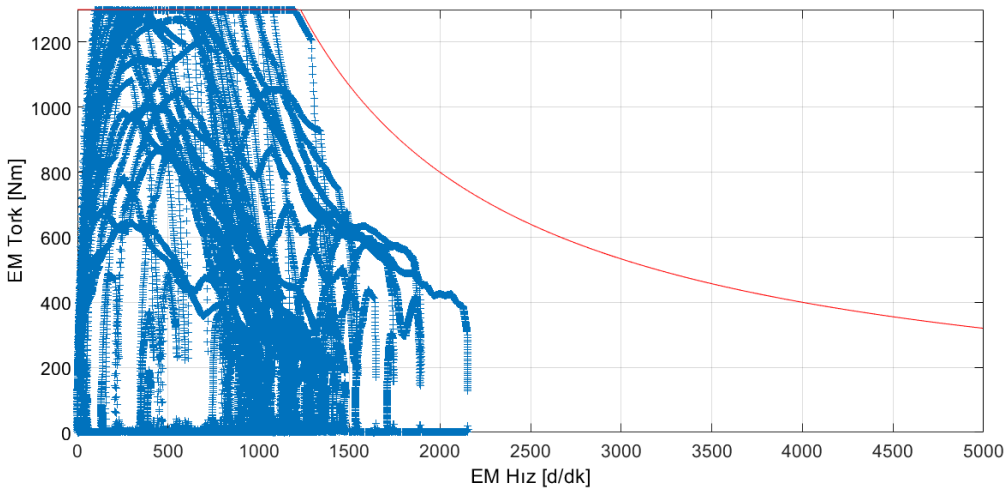
Şekil 5.18 SOC ve Yakıt Tüketimi



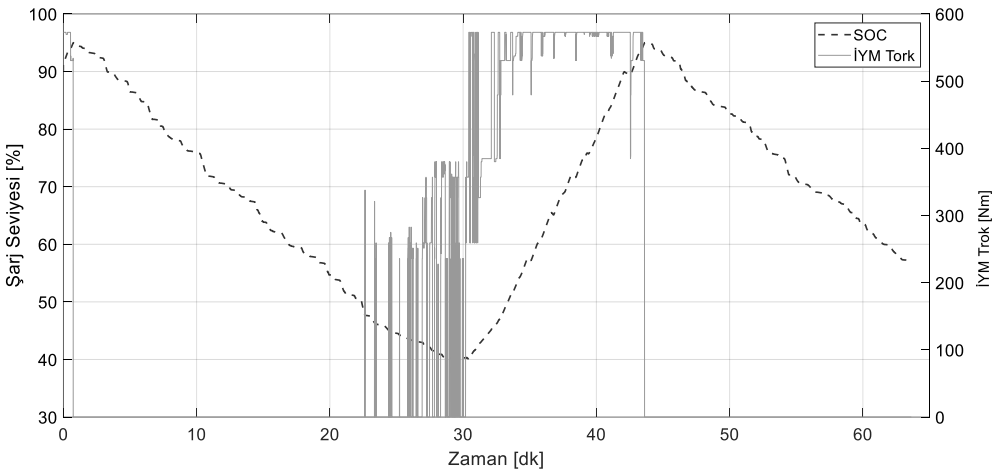
Şekil 5.19 Sürüş Çevrimi ve Batarya Gücü



Şekil 5.20 Orange Batarya voltajı ve akımı



Şekil 5.21 Orange EM çalışma bölgesi



Şekil 5.22 Orange SOC ve İçten Yanmalı Motorun Torku

Şekil 5.18 de Orange County Bus (OC BUS) sürüş çevriminin hızı ve şarj seviyesi verilmiştir. Hız değişiminin oldukça yüksek olduğuu bir sürüş çevrimidir. İvmelenme süresinin yüksek olmasından dolayı Şekil 5.21 deki grafikte görüldüğü gibi moment isteri yüksek çıkmıştır.

Tablo 5.1'de ECMS algoritmasının tam yüklü (13800 kg) ve yüksüz (6800 kg) olması durumundaki sonuçlar, Tablo 5.2'de ise kural tabanlı enerji yönetim algoritmasının tam yüklü ve yüksüz olması durumundaki sonuçlar verilmiştir

Tablo 5.1 ECMS Algoritmasının Benzetim Sonuçları

Yüklü								
Sürüş Çevrimleri	Menzil (km)	Enerji Tüketimi (kWh)	Spesifik Enerji Tüketimi (kWh/km)	Yakıt Tüketimi (L)	Spesifik Yakıt Tüketimi (L/km)	Emisyon		
						CO (g/km)	NOx (g/km)	CO_2 (g/km)
NREL	125.0	170.4	1.363	57.8	0.462	4.15	15.7	14.52
FTP SC03	194.0	110.2	0.568	37.2	0.191	2.68	10.04	9.36
FIGE	223.3	94.11	0.421	31.3	0.140	2.40	8.68	7.88
Orange	132.68	160.6	1.210	55.3	0.418	4.12	15.18	13.9
Yüksüz								
Sürüş Çevrimleri	Menzil (km)	Enerji Tüketimi (kWh)	Spesifik Enerji Tüketimi (kWh/km)	Yakıt Tüketimi (L)	Spesifik Yakıt Tüketimi (L/km)	Emisyon		
						CO (g/km)	NOx (g/km)	CO_2 (g/km)
NREL	190.3	111.8	0.587	36.6	0.192	2.63	9.82	9.06
FTP SC03	306.6	70.57	0.230	17.3	0.056	0.45	2.95	4.44
FIGE	305.1	69.31	0.227	23.2	0.076	1.56	6.07	5.82
Orange	218.6	97.76	0.447	29.52	0.135	2.03	7.75	7.43

Tablo 5.2 Kural Tabanlı Kontol Algoritmasının Benzetim Sonuçları

Yüklü								
Sürüş Çevrimleri	Menzil (km)	Enerji Tüketimi (kWh)	Spesifik Enerji Tüketimi (kWh/km)	Yakıt Tüketimi (L)	Spesifik Enerji Tüketimi (L/km)	Emisyon		
						CO (g/km)	NOx (g/km)	CO_2 (g/km)
NREL	112.7	170.4	1.511	61.9	0.552	2.54	16.16	13.38
FTP SC03	171.79	110.17	0.640	42.8	0.249	1.76	11.17	9.25
FIGE	201.53	94.14	0.466	37.9	0.188	1.55	9.88	8.18
Orange	118.23	160.44	1.357	59.8	0.507	2.45	15.61	12.93
Yüksüz								
Sürüş Çevrimleri	Menzil (km)	Enerji Tüketimi (kWh)	Spesifik Enerji Tüketimi (kWh/km)	Yakıt Tüketimi (L)	Spesifik Enerji Tüketimi (L/km)	Emisyon		
						CO (g/km)	NOx (g/km)	CO_2 (g/km)
NREL	167.37	111.8	0.668	39.04	0.233	1.60	10.17	8.43
FTP SC03	268.78	70.57	0.262	28.5	0.106	1.17	7.44	6.16
FIGE	269.44	69.27	0.256	26.7	0.100	1.09	6.98	5.78
Orange	193.70	97.80	0.504	38.9	0.200	1.59	10.15	8.41

5.3 Sonuç

Hibrid elektrikli araçlar (HEV'ler), otomotiv sektöründe sürdürülebilirliği ve enerji verimliliğini artırma yönünde atılan önemli adımlardan biridir. Bu araçlar, içten yanmalı motorların ve elektrikli motorların birleşimini kullanarak, yakıt tüketimini azaltırken performansı artırma potansiyeline sahiptir. Bu çift güç kaynağı yaklaşımı, araçların enerji kullanımını optimize ederken, emisyonları önemli ölçüde azaltmalarını sağlar. Bu nedenle, HEV'ler çevresel etkiyi minimize etme ve enerji verimliliğini maksimize etme hedefleri doğrultusunda otomotiv sektöründe giderek daha fazla önem kazanmaktadır.
Hibrid elektrikli araçların kalbinde, aracın farklı enerji kaynaklarından en etkili şekilde yararlanmasını sağlayan sofistike enerji yönetim algoritmaları yer alır. Bu algoritmalar, aracın anlık enerji ihtiyacını karşılamak için içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun ne zaman ve nasıl kullanılacağını dinamik olarak belirler. Enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesi, hibrid araç teknolojisindeki en kritik araştırma ve geliştirme alanlarından biridir. Bu sistemler, araçların enerji verimliliğini artırırken, sürüş performansından ödün vermeden emisyonları azaltmalarını sağlar.

Eşdeğer Enerji Minimizasyon Stratejisi (ECMS) gibi gelişmiş enerji yönetim algoritmaları, aracın enerji tüketimini minimize ederken optimum performansı sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu tür algoritmalar, araç içindeki enerji akışını sürekli olarak izler ve analiz eder, güç dağıtımını anlık olarak ayarlayarak aracın verimliliğini maksimize eder. ECMS, aracın enerji kaynaklarını en etkili şekilde kullanarak, yakıt tüketimini ve CO2 emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip bir yöntemdir.

Otomotiv sektöründeki enerji yönetimi algoritmalarının yeri, sadece araçların çevresel ve operasyonel verimliliğini artırmakla sınırlı değildir. Bu algoritmalar aynı zamanda, elektrikli ve hibrid araçların geniş çapta benimsenmesi için kritik öneme sahiptir. Tüketicilerin, işletme maliyetlerindeki düşüş, artırılmış menzil ve iyileştirilmiş sürüş deneyimi gibi faydaları görmeleri, bu teknolojilerin daha geniş bir kabulünü teşvik eder. Bu nedenle, enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesi, otomotiv endüstrisinin sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerlemesinde merkezi bir rol oynamaktadır.

Bu tezde, seri hibrid bir araçta, genset kontrolü için Eşdeğer Enerji Minimizasyon Yöntemi (ECMS) tasarlanmıştır. Sürüş çevrimleri incelendiğinde enerji tüketimi ve

menzil olarak başarı sağlanmıştır.

Seri hibrid elektrikli aracın formülleri Simulink ortamında gerçeklenmiştir. Elektrikli aracın boyuna kontrolü formülleri sisteme aktarılmıştır. Sistem gerçeklenmesinin ardından, aracın kontrolcüsü seçim yapmaktadır. Bu seçim temelde güç dağıtım stratejisidir. Enerjinin kaynaklara dağılımı, bataryadaki anlık sarj seviyesi, elektrik makinasının frenleme esnasında kazandığı rejeneratif güç hesaplanmıştır. Yakıt tüketimini azaltmak için Eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyon algoritması (ECMS) geliştirilmiştir.

Geliştirilen kontrol algoritması, yarı ticariler için standartlaştırılmış sürüş çevrimleri ile test edilmiştir. Geliştirilen algoritma, aracın anlık güç isterini verim haritaları ve optimum noktaların bilinmesi halinde optimum güç dağıtım belirlemektedir.

Tablo 5.3 Enerji Yönetim Stratejilerinin Karşılaştırılması

	ECMS	DTK		ECMS	DTK	
	Menzil (km)		%	CO_2 (g/km)		%
NREL	190.3	167.37	13.5	9.06	8.43	-7.47
FTP SC03	306.6	268.78	14	4.44	6.16	27.9
FIGE	305.1	269.44	13.23	5.82	5.78	-0.7
Orange	218.6	193.70	12.8	7.43	8.41	11.6

Tablo 5.3'de gösterildiği üzere optimizasyon tabanlı ECMS algoritması ve deterministik tabanlı kontrol algoritmasının benzetim sonuçları gösterilmiştir. Ticari araç ve kamyonlar için tasarlanmış 4 adet sürüş çevriminde ECMS algoritması menzil ve emisyonda başarı sağlamıştır. Benzetim sonuçları ECMS yönteminin yakıt tasarrufu sağlanmasında etkin olduğunu göstermektedir. Önerilen kontrol stratejisi ile yakıt tüketimi minimizasyonunda bir başarı elde edilmiştir.

NREL, FTP-SC03, FIGE ve OCB. Sonuçlar, önerilen ECMS'nin dört sürüş çevriminün tamamında Hibrit Elektrikli Araçların (HEV'ler) menzilini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. En önemli menzil artışı, menzildeki %14 artışla FTP-SC03 sürüş çevriminde gözlemlenmiştir. Orange Country Bus (OCB) sürüş çevriminde ise menzilde %12,8'lik bir artışla en düşük menzil artışını göstermiştir.

Ayrıca önerilen ECMS, FTP-SC03 sürüş çevriminde CO2 emisyonlarında önemli bir

azalma olduğunu görülmüştür. Genel olarak ECMS, HEV'lerde enerji yönetimine yeni bir yaklaşım olarak umut vaat etmektedir.

Geliştirilen algoritmanın performansını değerlendirmek için kural tabanlı kontrol stratejisi oluşturulmuştur. Sonuçlar, kural tabanlı kontrol stratejisiyle karşılaştırıldığında, ECMS stratejisi kullanılarak sürüş çevrimine ve elektrikli güç aktarma organı bileşenlerinin özelliklerine bağlı olarak %12,8 -%14 aralığında aracın menzilinin artırılabileceğini göstermiştir.

Bu tezde, seri hibrid bir araç için geliştirilen Eşdeğer Enerji Minimizasyon Stratejisi (ECMS) ile ilgili detaylı bir çalışma sunulmuştur. Bu çalışmanın sonuçları, ECMS algoritmasının, belirlenen dört sürüş çevrimi üzerinden seri hibrid araçların enerji verimliliğini ve çevresel performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. ECMS, yakıt tüketimini azaltırken menzilin artırılmasında etkili bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, CO_2 emisyonlarında belirgin bir düşüş sağlayarak çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunmuştur.

Bu çalışmanın sonuçları, otomotiv endüstrisindeki araç üreticileri ve tasarımcılar için önemli uygulamalar sunmaktadır. ECMS algoritmasının uygulanması, mevcut ve gelecekteki hibrid araç modellerinin enerji verimliliğini artırarak, hem tüketiciler için işletme maliyetlerini düşürebilir hem de çevresel etkileri azaltabilir. Bu, özellikle yakıt ekonomisine ve çevre dostu araçlara artan küresel talep göz önünde bulundurulduğunda önemlidir.

Bu tez, ECMS algoritmasının hibrid araçların enerji yönetimi üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelenmesiyle, enerji yönetimi stratejileri literatürüne önemli bir katkı sağlamaktadır. Algoritmanın detaylı analizi ve benzetim sonuçları, enerji yönetimi stratejilerinin tasarımı ve optimizasyonu konusunda yeni perspektifler sunmaktadır. Bu çalışma, gelecekteki araştırmalara teorik bir temel sağlayarak, hibrid araç teknolojisinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları, seçilen dört sürüş çevrimi ile sınırlıdır ve bu çevrimler tüm potansiyel kullanım senaryolarını temsil etmeyebilir. Ayrıca, ECMS algoritmasının performansı, aracın özgül parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle, algoritmanın farklı araç tipleri ve sürüş koşullarında test edilmesi gerekebilir.

Gelecekteki araştırmalar, ECMS algoritmasının farklı araç tipleri ve daha geniş bir sürüş çevrimi yelpazesi üzerinde uygulanabilirliğini değerlendirebilir. Ayrıca, algoritmanın adaptasyon kabiliyetini ve gerçek zamanlı uygulamalarını test etmek önemlidir. ECMS'in geliştirilmiş versiyonları, özellikle elektrikli araçlar ve plug-in hibrid araçlar gibi diğer araç teknolojilerine uyarlanabilir. Son olarak, enerji yönetimi stratejilerinin etkinliğini artırmak için yapay zeka ve makine öğrenimi tekniklerinin entegrasyonu araştırılabilir.

Bu tez, seri hibrid araçlar için enerji yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir adımdır ve sunduğu bulgular, araç tasarımı ve operasyonları üzerinde önemli etkiler yaratabilir. ECMS algoritmasının geliştirilmesi ve uygulanması, daha verimli ve çevre dostu araçların geliştirilmesine katkıda bulunarak, sürdürülebilir ulaşımın geleceğine doğru önemli bir adım oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR/REFERENCES

A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, G. Spiazzi ve L. de Araujo Silva, (2008), Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for ElectricVehicle Power Supplies System,IEEE Transactions on Power Electronics, no. 1, paper. 107-115, doi: 10.1109/TPEL.2007.911799.

Ali, A.M., Kamel, H.M., Sharaf, A.M., Hegazy S.A. (2014), A Comparative Investigation of A Rule Based Energy Management Algorithm for Hybrid-Electric Vehicles. 15th International Workshop on Research and Education in Mech., Egypt,

Altun H., Aydoğmuş Ö., Sunter S. (2008) Gerçek Dört-Bölgeli Bir DC Motor Sürücüsünün Modellenmesi ve Tasarımı, Science and Eng. J of Fırat Univ., Turkey.

Amrhein M. ve P.T. Krein (2005), Dynamic simulation for analysis of hybrid electric vehicle system and subsystem interactions, including power electronics, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54,825-836.

Aouzellag, H., Abdellaoui, H., Iffouzar, K., Ghedamsi, K. (2015), Model-Based Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicle. Electrical Engineering (ICEE), 2015 4th International Conference on. Boumerdes, Algeria.

Barsalli, S., Miulli, C., Possenti, A. (2004), A Control Strategy to Minimize Fuel Consumption of Series Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on energy conversion. vol. 19, no. 1.

Baruschka L., Mertens A. (2011), Comparison of Cascaded H-Bridge Converters andModular Multilevel Converters for The Use in Medium Voltage Grid Connected Battery Energy Storage Systems, 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt.

Berringer K., Marvin J., Perruchoud P. (1995), Semiconductor Power Losses in AC Inverters, Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95, Conference Record of the 1995 IEEE USA.

Bureau of Transportation Statistics. (2008). National Transportation Statistics. Retrieved Ocak 15, 2024, https://www.bts.gov/content/estimated-national-average-vehicle-emissions-rates-vehicle-vehicle-type-using-gasoline-and

Burwell, M., Goss, J., Popescu, M. (2013), Performance/cost comparison of induction-motor & permanent-magnet –motor in a hybrid electric car, Tokyo,

C. Andersson, (2004), On auxiliary systems in commercial vehicles", Lund University.

C. Musardo, G. Rizzoni, Y. Guezennec, ve B. Staccia, (2005), A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management," European Journal of Control, vol. 11, no. 4-5, pp. 509-524, 2005. DOI: 10.3166/ejc.11.509-524.

Casanellas F. (1994), Losses in PWM inverters using IGBTs, IEE Proceedings - Electric Power Applications, Vol. 141, Issue. 5, Spain,

Chan, C. C. (2007), The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, Proceedings of the IEEE, Hong Kong,.

D. A. Crolla ve D. Cao, (2012), The impact of hybrid ve electric powertrains on vehicle dynamics, control systems and energy regeneration, Vehicle System Dynamics, vol. 50, suppl. 1, pp. 95-109, 2012, doi: 10.1080/00423114.2012.676651.

D. S. Naibu, (2003) Optimal Control Systems. CRC Press LLC, 1st ed..

D. Yin, S. Oh ve Y. Hori, (2009), A Novel Traction Control for EV Based on Maximum Transmissible Torque Estimation," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 6, pp. 2086-2094, doi: 10.1109/TIE.2009.2016507.

Dirkman R. J. (1987), The Simulation of General Circuits Containing Ideal Switches, Power Electronics Specialists Conference, IEEE, USA,.

Dong-Il Cho. (1987), Nonlinear Control Methods for Automotive Powertrain Systems, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT),.

E. C. Owen ve J. Steiber, (1997), Development of Auxiliary Power Units for Electric Hybrid Vehicle, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas.

Elbert, P., Nüesch, T., Ritter, A., Murgovski, N., Guzzella, L. (2014), Engine ON/OFF Control for the Energy Management of a Serial Hybrid Electric Bus via Convex Optimization. IEEE Transactions on vehicular technology., vol. 63, no. 8.

Emadi A., D. W. Gao, C. Mi, (2007), Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles, Proceedings of the IEEE, vol. 95, pp. 729-745.

Finken, T. Felden, M., ve Hameyer, K. (2008), Comparison and Design of Different Electrical Machine Types Regarding Their Applicability in Hybrid Electrical Vehicles, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines.

Formentin, S., Guanetti, J.Ü Savaresi, S.M. (2016), Least costly energy management for series hybrid electric vehicles. Control Engineering Practice, 48, 37-51.

Friden H., Sahlin H., (2012) Energy Management Strategies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles, Department of Signals and Systems,Division of Automatic Control, Chalmers Unıversıty of Technology.

Frost & Sullivan, (2014), Strategic Analysis of the Global Hybrid and Electric Medium and Heavy-duty Truck Market.

Fujii Y., W.E. Tobler, E.M. Clausing, T. W. Megli, and M. Haghgooie. (2002), Application of dynamic band brake model for enhanced drivetrain simulation, Proceedings of the I MECH E Part D, Journal of Automobile Engineering, 216, 873-881.

Gokasan, M., Bogosyan, S., Goering, J.D. (2006), Sliding Mode Based Powertrain Control for Efficiency Improvement in Series Hybrid-Electric Vehicles. IEEE Transactions on power electronics., vol. 21, no. 3.

H. Wang, Y. Huang, A. Khajepour, Q. Song, (2016), Model predictive control-based energy management strategy for a series hybrid electric tracked vehicle," Applied Energy, vol. 182.

H. Zhang, G. Xu, W. Li ve M. Zhou, (2012), Fuzzy logic control in regenerative braking system for electric vehicle, IEEE International Conference on Information and Automation, Shenyang, China, pp. 588-591, doi: 10.1109/ICInfA.2012.6246881.

Hajimiri, M.H., Salmasi, F.R. (2006), A Fuzzy Energy Management Strategy for Series Hybrid Electric Vehicle with Predictive Control and Durability Extension of the Battery. Electric and Hybrid Vehicles, 2006. ICEHV '06. IEEE Conference. Pune, India.

Hartavi A. E., Uygan I., M,Guvenc L., Sezer, (2010), Propulsion system design of a hybrid electric vehicle, International Journal of Vehicle Design (IJVD). 52, 1-4.

Hauer K. ve R. Moore (2003), Fuel Cell Vehicle Simulation– Part 1: Benchmarking Available Fuel Cell Vehicle Simulation Tools, Fuel Cells, vol. 3, pp. 84-94,.

Hosseini Aghdam M.G., Fathi S. H. (2005), Modeling of Conduction and Switching Losses in Three-Phase Asymmetric Multi-Level Cascaded Inverter, Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on Power Systems and Electromagnetic Compatibility, Greece,.

Hyeoun-Dong Lee ve S.-K. Sul, (1998), Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 4, pp. 625-632, doi: 10.1109/41.704891.

J. Becker, C. Schaeper, D. U. Sauer, (2012), Energy management system for a multi-source storage system Electric Vehicle, pp. 407-412.

J. Guo, J. Wang ve B. Cao, (2009), Regenerative braking strategy for electric vehicles, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Xi'an, China, pp. 864-868, doi: 10.1109/IVS.2009.5164393.

J. Moreno, M. E. Ortuzar ve J. W. Dixon, (2006), Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 2, pp. 614-623, doi: 10.1109/TIE.2006.870880.

J.S. Hu, Y.R. Huang, ve F.R. Hu, (2012), Development of traction control for front–wheel drive in–wheel motor electric vehicles, International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, vol. 4, no. 4, pp. 344-358, 2012.

Jalil, N., Kheir, N.A., Salman, M. (1997), A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle. Proceedings of the American Control Conference Albuquerque. New Mexico.

K. Fujii ve H. Fujimoto, (2007), Traction Control based on Slip Ratio Estimation Without Detecting Vehicle Speed for Electric Vehicle,Power Conversion Conference - Nagoya, Nagoya,pp. 688-693, doi: 10.1109/PCCON.2007.373040.

Li, S.G., Sharkh, S.M., Walsh, F.C., Zhang, C.N. (2011), Energy and Battery Management of a Plug-In Series Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic. IEEE Transactions on vehicular technology. vol. 60, no. 8

Lin C.,C., Z. Filipi, Y. Wang, L. Louca, H. Peng, D. Assanis, ve J.,(2001), Stein, Integrated, feed-forward hybrid electric vehicle simulation in SIMULINK and its use for power management studies, In SAE Proceedings, number 2001-01- 1334,.

Lowe M., Ayee G., Gereffi G. (2009), Hybrid Drivetrains for Medium and Heavy-Duty Trucks, Manufacturing Climate Solutions Carbon-Reducing Technologies and U.S. Jobs chapter 9, USA,

L., Jichao, Y. Liang, Z. Chen, ve H. Yang. (2023). An ECMS Based on Model Prediction Control for Series Hybrid Electric Mine Trucks, Energies 16, no. 9: 3942. https://doi.org/10.3390/en16093942.

M. A. Hannan, F. A. Azidin ve A. Mohamed, (2011), Analysis of multi-power sources energy management system for electric hybrid vehicle, IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore, pp. 452-458, doi: 10.1109/PEDS.2011.6147288.

M. Koot, J. T. B. A. Kessels, B. de Jager, W. P. M. H. Heemels, P. P. J. van den Bosch and M. Steinbuch, (2005), Energy management strategies for vehicular electric power systems, in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 54, no. 3, pp. 771-782, doi: 10.1109/TVT.2005.847211

M. Michalczuk, B. Ufnalski ve L. Grzesiak, (2013), Fuzzy logic control of a hybrid battery-ultracapacitor energy storage for an urban electric vehicle, Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, 2013, pp. 1-7, doi: 10.1109/EVER.2013.6521580.

Maheswarı A., Gnanambal I. (2013), A Novel Cascaded H- Brıdge Multılevel Inverter Based on Optımal Pwm Technıque, IU-JEEE Vol. 13(1), India, 2013.
Maksimovıc´ D., Stankovic´ A. M., Thottuvelil V. J., Verghese G. C. (2001), Modeling ve Simulation of Power Electronic Converters, Proceedings of the IEEE , Vol. 89 , Issue. 6 , USA,.

Markel T., A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O'Keefe, S. Sprik, ve K. Wipke. (2002), ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. Journal of Power Sources, 110,255-66,.

Merdassi A., Gerbaud L., Bacha S. (2011), Automatic Modelling Approach for Power Electronics Converters: Code Generation (C S Function, Modelica, VHDL-AMS) and MATLAB/Simulink Simulation, MATLAB for Engineers - Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics, France,.

Mestha L.K., Evans P.D. (1989), Analysis of on-state losses in PWM inverters, IEE PROCEEDINGS, Vol. 136, Issue. 4,.

Mohammadian, M., Bathaee, T.M. (2004), Motion Control For Hybrid Electric Vehicle. Power Electronics and Motion Control Conference. Xi'an, China,

Mohan N., Robbins W. P., Undelve T.M., Nılssen R., Mo O. (1994), Simulation of Power Electronic and Motion Control Systems-An Overview, Proceedings of The IEEE, Vol. 82, USA.

Muehleck S. (2012), Design and Simulation of Interconnected H-Bridge Inverter, Computer Engineering Department California Polytechnic State University San Luis Obispo, California.

Muncrief, R., Cruz, M., Ng, H., ve Harold, M., (2012), Impact of Auxiliary Loads on Fuel Economy and Emissions in Transit Bus Applications," SAE Technical Paper 2012-01-1028, Musardo, C., Rizzoni, G., Guezennec, Y., Staccia, B. (2005), A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management. European Journal of Control. 11, 509–524.

Musardo, C., Staccia, B., Bittanti, S., Guezennec, Y., Guzzello, L., Rizzoni, G. (2004), An adaptive algorithm for hybrid electric vehicles energy management. Fisita world automotive congress.

N. K. Abdel Jalil, N. A. Kheir, ve M. A. Salman, (1997),A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle," in Proceedings of the 1997 American Control Conference, Albuquerque, NM, pp. 689-693.

N.J. Schouten, M. Salman, N. Kheir, (2002), Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 10, no. 3.

P. Khatun, C. M. Bingham, N. Schofield ve P. H. Mellor, (2003), Application of fuzzy control algorithms for electric vehicle antilock braking/traction control systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 52, no. 5, pp. 1356-1364, doi: 10.1109/TVT.2003.815922.

Paganelli G.,. Sebastien D. (2002), Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains, Vehicular Technology Conference. VTC Spring. IEEE 55thVolume: 4.

Pashikanti G., Dasari S. (2013), Performance Analysis of Three Phase Cascaded H-Bridge Multi Level Inverter for Voltage Sag and Voltage Swell Conditions, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER) Vol. 3, Issue. 5,.

Pisu, P., Rizzoni, G. (2005), A Supervisory Control Strategy for Series Hybrid Electric Vehicles with Two Energy Storage Systems. Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference. Chicago, IL, USA.

Powell B.K., K.E. Bailey, ve S.R. Cikanek. (1998), Dynamic modeling and control of hybrid electric vehicle powertrain systems, IEEE Control Systems Magazine, 18(5):17{33,.

Ripaccioli, G., Bernardini, D., Cairano D.S., Bemporad A., Kolmanovsky, I.V. (2010), A Stochastic Model Predictive Control Approach for Series Hybrid Electric Vehicle Power Management. 2010 American Control Conference. Baltimore, MD, USA.

R. Vignesh, B. Ashok, (2023), Intelligent energy management through neuro-fuzzy based adaptive ECMS approach for an optimal battery utilization in plugin parallel hybrid electric vehicle, Energy Conversion and Management, Volume 280, 116792, ISSN 0196-8904.

S. Formentin, J. Guanetti, ve S. M. Savaresi, (2016), Least costly energy management for series hybrid electric vehicles, Control Engineering Practice, vol. 48, pp. 37-51, ISSN 0967-0661.

Samuel E. de Lucena, (2011), A Survey on Electric ve Hybrid Electric Vehicle Technology, Electric Vehicles The Benefits and Barriers, Brazil.

Shabbir W., Evaangelou S.A. (2016), Exclusive Operation Strategy for the Supervisory Control of Series Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on control systems technology, vol. 24, no. 6.

Solouk, A., Shahbakhti, M. (2016), Energy Optimization and Fuel Economy Investigation of a Series Hybrid Electric Vehicle Integrated with Diesel/RCCI Engines. Energies, 9, 1020 Song Y., Wang B. (2013), Survey on Reliability of Power Electronic Systems, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, Issue. 1, USA.

Sorrentino, M., Rizzo, G., Arsie, I. (2011), Analysis of a rule based control strategy for onboard energy management of series hybrid vehicles. Control Engineering Practice, 19, 1433-1441.

Technology & Maintenance Council (TMC). (2006). Hybrid Work Trucks: Preparing for Market Introduction, S.15 Specialty Trucks Study Group Information Report: 2006-2.

Tremblay O., Dessaint L.A (2009), Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications, EVS24,Stavanger, Norway, May 13 - 16, 2009.

Tolbert L.M., Özpineci B., Islam S. K., Peng F. Z. (2011), Impact of SiC Power Electronic Devices for Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on, Vol. 47, USA.

T.C.J. Romijn, T.H. Pham, S. Wilkins, (2019), Modular ECMS Framework for Hybrid Vehicles, European Union's Horizon2020 Programme for research and innovation under grant agreement No.724087., IFAC-PapersOnLine, Volume 52, Issue 5, 2019, Pages 128-133.

U.S. DOE, EERE. (2008). Alternative & Advanced Vehicles: Hybrid Electric Vehicles. http://www.afdc.energy.gov/afdc/vehicles/hybrid_electric.html (10.01.2024)

U.S. Environmental Protection Agency. (2005). Emission Facts: Average Carbon Dioxide Emissions Resulting from Gasoline and Diesel Fuel. https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks (10.01.2024)

U.S. Environmental Protection Agency. (2009). 2009 U.S. Greenhouse Gas Inventory Report: Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2007.

Venkadesan A., Pvea P., Agrawal P., Puli V. (2014), Cascaded H-Bridge Multılevel Inverter For Induction Motor Drives, International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), Vol. 03, Issue. 05, India.

W. Shabbir ve S. Evangelou, (2016), Exclusive Operation Strategy for the Supervisory Control of Series Hybrid Electric Vehicles," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 24, pp. 1-9, doi: 10.1109/TCST.2016.2520904.

Waltermann P. (1996), Modelling and control of the longitudinal and lateral dynamics of a series hybrid vehicle, IEEE International Conference on Control Applications, pp 195-198,.

Wang, H., Huang, Y., Khajepour, A., He, H., Lv, C. (2017), MPC-based Power Management Strategy for a Series Hybrid Electric Tracked Bulldozer. Industrial Technology (ICIT), 2017 IEEE International Conference on. Toronto, Canada,

Wang, H., Huang, Y., Khajepour, A., Song, Q. (2016), Model predictive control-based energy management strategy for a series hybrid electric tracked vehicle. Applied Energ, 182, 105-114.

Williamson S. S., Emadi A., RajashekaraK., (2007), Comprehensive Efficiency Modeling of Electric Traction Motor Drives for Hybrid Electric Vehicle Propulsion Applications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, Issue. 4.

Wipke K. B., M. R. Cuddy ve S. D. Burch, (1999), ADVISOR 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 48, pp. 1751-1761.

Wouk V. (1995), Hybrids: then and now, Spectrum, IEEE,USA

X. Sun, M. Xue, Y. Cai, X. Tian, Z. Jin and L. Chen, (2023), Adaptive ECMS Based on EF Optimization by Model Predictive Control for Plug-In Hybrid Electric Buses, IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 9, no. 2, pp. 2153-2163, June 2023.

Yun, S., Lee, K., Yi, K. (2015), Development of a power management strategy to minimize the fuel consumption of a heavy-duty series hybrid electric vehicle. Journal of Mechanical Science and Technology, 29, 4399~4406.

Zhang Y.,W. Xiong ve C. Yin (2003), Optimal energy management for a series–parallel hybrid electric bus, Energy Conversion and Management, vol. 50, pp. 1730-1738,.

Zheng Q., (1999), Modeling and Control of Powertrains with Stepped Automatic Transmissions. PhD thesis, The Ohio State University. vol. 24, pp. 1-9, Feb. 11, 2016, doi: 10.1109/TCST.2016.2520904.

Waltermann P. (1996), Modelling and control of the longitudinal and lateral dynamics of a series hybrid vehicle. In Proceedings of the IEEE International Conference on Control.