

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN
MODELLENMESİ ve KONTROLÜ**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisi Ali Önder BİLİROĞLU

**FBE Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı Elektronik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Banu ATAŞLAR AYYILDIZ

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARA GENEL BAKIŞ	3
2.1 Hibrit Elektrikli Araçların Tarihçesi	3
2.2 Hibrit Elektrikli Araçların Sınıflandırılması	5
2.2.1 Hibrit Araçların Hibritleşme Derecesine Göre Sınıflandırılması	5
2.2.1.1 Mikro Hibrit Araçlar	5
2.2.1.2 Hafif Hibrit Araçlar	6
2.2.1.3 Tam Hibrit Araçlar	6
2.2.2 Hibrit Araçların Güç Organlarının İlişkisine Göre Sınıflandırılması	6
2.2.2.1 Seri Hibrit Elektrikli Araçlar (S-HEA)	6
2.2.2.2 Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar (P-HEA)	7
2.2.2.3 Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar (SP-HEA)	8
2.3 Hibrit Elektrikli Araçlarda Uygulanan Yöntemler	8
2.3.1 Motor Küçültme	9
2.3.2 Motor Durdurma	9
2.3.3 Regeneratif Frenleme	9
2.3.4 Güç Yönetimi	10
2.4 Hibrit Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları	12
3. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN KOMPONENTLER VE KOMPONENTLERİN BOYUTLANDIRILMASI	13
3.1 Batarya	13
3.2 Elektrik Motoru ve Sürücüsü	16
3.2.1 Doğru Akım Motorları	18
3.2.2 Asenkron Motorlar	18
3.2.3 Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar	19
3.2.4 Anahtarlamalı Reluktans Motoru	20
3.3 Hibrit Kontrol Ünitesi	23
3.4 CAN Protokolü	26

4.	HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MODELLENMESİ.....	31
4.1	Sürüş Çevrimleri.....	33
4.2	İçten Yanmalı Motor Modeli	33
4.3	Elektrik Motoru Modeli.....	35
4.4	Batarya Modeli	36
4.5	Güç Aktarım Organlarının Modellenmesi	38
4.5.1	Vites Kutusu	39
4.5.2	Diferansiyel.....	41
4.6	Tekerlek Modeli.....	41
4.7	Boylamsal Araç Dinamiğinin Modellenmesi	41
4.7.1	Rüzgar Direnci.....	42
4.7.2	Boylamsal Lastik Kuvvetleri	43
4.7.2.1	Kayma Oranı.....	43
4.7.2.2	Normal Lastik Yükleri.....	44
4.7.3	Yokuş Direnci.....	46
4.7.4	Yuvarlanma Direnci.....	46
4.8	Dönen Kütle Faktörü	47
5.	SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ KONTROL SİSTEMİ	49
5.1	Harici Şarj Prosedürü.....	50
5.2	Batarya Devreye Alma Prosedürü	51
5.3	Hava Sistemi Prosedürü.....	52
5.4	Seri Hibrit Elektrikli Araç Kontrolü	53
5.4.1	GENSET Kontrolü.....	53
5.4.2	Hibrit Kontrol Algoritması	58
5.5	Kapanış Prosedürü	67
5.6	Hata İzleme Prosedürü.....	68
6.	SİMÜLASYONLAR	70
6.1	Seri Hibrit Elektrikli Araç İçin CBD Çevrimi Verileri	70
6.2	Seri Hibrit Elektrikli Araç İçin ECE Çevrimi Verileri	75
6.3	Konvansiyonel Araç ve Seri Hibrit Elektrikli Araç Karşılaştırma Verileri.....	80
7.	SONUÇLAR.....	81
	KAYNAKLAR.....	83
	EKLER	84
Ek 1	Modellemede kullanılan parametreler	85
Ek 2	Simulasyon ön yükleme kodları	86
Ek 3	İYM verim haritasının [g/s] çıkarım kodları	87
Ek 4	GENSET güç noktaları belirleme kodları.....	88
Ek 5	Araç uygulama fotoğrafları.....	89
	ÖZGEÇMİŞ.....	92

SİMGE LİSTESİ

A_f	Aracın aerodinamik kuvvetlere maruz kalan ön cephe alanı
C_d	Aerodinamik direnç katsayısı
d_r	Diferansiyel çevrim oranı
$EY_{yakıt}$	Yakıt enerji yoğunluğu
F_{aero}	Aerodinamik sürüklenme kuvveti
F_i	Yokuş direnci
f_r	Yuvarlanma direnci katsayısı
F_{xf}	Ön lastiklerdeki boylamsal itici lastik kuvveti
F_{xr}	Arka lastiklerdeki boylamsal itici lastik kuvveti
g	Yerçekimi ivmesi
g_r	Vites kutusu çevrim oranı
h	Aracın ağırlık merkezinin yerden yüksekliği
h_{aero}	Aerodinamik kuvvetin araca etki ettiği noktanın yerden yüksekliği
I_{BAT}	Batarya akımı
J_d	Diferansiyel şaftı atalet momenti
J_{em}	Elektrik motoru atalet momenti
J_t	Toplam tekerlek atalet momenti
l_f	Aracın ağırlık merkezinin ön aksa olan yatay uzaklığı
l_r	Aracın ağırlık merkezinin arka aksa olan yatay uzaklığı
m	Aracın kütlesi
P_{brake}	Sürücü tarafından elektrik motorundan istenen frenleme gücü
P_{EM}	Elektrik motoruna aktarılan elektriksel güç
P_{gen}	Anlık GENSET elektriksel gücü
P_{genmax}	Maksimum GENSET elektriksel gücü
P_{genopt}	Optimum GENSET elektriksel gücü
P_{bat}	Bataryadan istenen anlık elektriksel güç
P_{req}	Sürücü tarafından elektrik motorundan istenen hızlanma gücü
r_{eff}	Efektif lastik yarıçapı
R_L	Yük direnci
R_{xf}	Ön lastiklerdeki yuvarlanma direnci
R_{xr}	Arka lastiklerdeki yuvarlanma direnci
$R_{şarj}(SOC, T)$	Batarya şarj direnci
$R_{deşarj}(SOC, T)$	Bataryadeşarj direnci
$R_{iç}$	Batarya iç direnci
SOC	Bataryanın anlık SOC değeri
SOC_{low}	Kontrol algoritmasında belirlenen bandın normal alt SOC değeri
SOC_{high}	Kontrol algoritmasında belirlenen bandın normal üst SOC değeri
SOC_{min}	Maksimum güç isteğinde izin verilen zorlamalı alt SOC değeri
SOC_{high}	Rejenereatif frenleme için izin verilen üst SOC değeri
$V_{rüzgar}$	Aracın hareket yönünün ters yönünde etkiyen rüzgar hızı
V_x	Araç hızı
V_{BAT}	Batarya gerilimi
$V_{OC}(SOC, T)$	Batarya açık devre gerilimi
η_{IYM}	İçten yanmalı motor verimi
η_{dif}	Diferansiyel verimi
η_{vk}	Vites kutusu verimi
τ_{EM}	Elektrik motoru torku
τ_{IYM}	İçten yanmalı motor torku

$\tau_{dif_çkş}$	Diferansiyel çıkış torku
$\tau_{dif_grş}$	Diferansiyel giriş torku
τ_{genopt}	Optimum şarj durumunda jeneratöre uygulanan tork referansı
τ_{genmax}	Maksimum şarj durumunda jeneratöre uygulanan tork referansı
τ_{ref}	Sürücünün gaz pedalından tork isteği
$\tau_{vk_çkş}$	Vites kutusu çıkış torku
$\tau_{vk_grş}$	Vites kutusu giriş torku
ω_{EM}	Elektrik motoru açısal hızı
$\omega_{dif_çkş}$	Diferansiyel çıkış hızı
$\omega_{dif_grş}$	Diferansiyel giriş hızı
ω_{genopt}	Optimum şarj durumunda İYM'ye uygulanan hız referansı
ω_{genmax}	Maksimum şarj durumunda İYM'ye uygulanan hız referansı
$\omega_{İYM}$	İçten yanmalı motor açısal hızı
$\omega_{vk_çkş}$	Vites kutusu çıkış hızı
$\omega_{vk_grş}$	Vites kutusu giriş hızı
$YT_{İYM}$	Anlık toplam yakıt tüketimi
θ	Aracın seyahat ettiği yolun eğimi
λ	Dönen kütle faktörü
ρ	Hava yoğunluğu
σ_x	Kayma oranı
ω_w	Lastik açısal hızı

KISALTMA LİSTESİ

Ah	AmperSaat
BMS	Batarya Yönetim Sistemi
CAN	Kontrolör Alan Ağı
CBD	Merkezi İş Bölgesi Çevrimi
DOD	Deşarj Derinliği
ECE	Avrupa Şehiriçi Çevrimi
EKÜ	Elektronik Kontrol Ünitesi
EM	Elektrik Motoru
EMI	Elektromanyetik Girişim
GENSET	Jeneratör Seti
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
HKÜ	Hibrit Kontrol Ünitesi
IGBT	İzole Kapılı Bipolar Transistor
IPM	Akıllı Güç Modülü
ISO	Uluslararası Standardizasyon Birliği
İYM	İçten Yanmalı Motor
kWh	KiloWattSaat
Li-Ion	Lityum İyon
NiMH	Nikel Metal Hidrid
P-HEA	Paralel Hibrit Elektrikli Araç
SAE	Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
S-HEA	Seri Hibrit Elektrikli Araç
SOC	Şarj Durumu
SOH	Sağlık Durumu
SP-HEA	Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Son 5 yılda A.B.D.'de hibrit elektrikli araç satış miktarları.....	4
Şekil 2.2	Seri hibrit elektrikli araç konfigürasyonu	6
Şekil 2.3	Paralel hibrit elektrikli araç konfigürasyonu.....	7
Şekil 2.4	Seri-paralel hibrit elektrikli araç konfigürasyonu	8
Şekil 2.5	ECE çevrimi güç gereksinimleri	10
Şekil 2.6	Örnek bir İYM haritası için İYM devrine göre en verimli çalışma çizgisi.....	11
Şekil 3.1	Seri hibrit elektrikli araçta komponentlerin yerleşimi	13
Şekil 3.2	Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorları	17
Şekil 3.3	Asenkron motor tork - hız karakteristiği.....	19
Şekil 3.4	Fırçasız DC motor tork - hız karakteristiği	20
Şekil 3.5	Anahtarlama relüktans motoru tork - hız karakteristiği.....	21
Şekil 3.6	Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarının seçim kriterleri	21
Şekil 3.7	Üç fazlı IGBT'li evirici	22
Şekil 3.8	Evirici kapalı çevrim tork kontrolü prensip şeması	22
Şekil 3.9	Hibrit kontrol ünitesi sistem haberleşme ve yönetim diyagramı	24
Şekil 3.10	dSPACE ControlDesk programı ekran görünümü.....	26
Şekil 3.11	Otomotiv uygulamalarında CAN kullanımı.....	26
Şekil 3.12	CAN protokolü genel mesaj paket yapısı	27
Şekil 3.13	CAN mesaj paketi kimlik tanımlama alanı	28
Şekil 3.14	CAN mesaj paketi kontrol alanı ve DLC tablosu	29
Şekil 3.15	CAN mesaj paketi veri alanı	29
Şekil 3.16	CAN mesaj paketi CRC alanı	29
Şekil 3.17	CAN mesaj paketi onaylama alanı.....	30
Şekil 3.18	CAN mesaj paketi çerçeve sonu alanı	30
Şekil 4.1	Seri hibrit elektrikli araç MATLAB/Simulink modeli.....	32
Şekil 4.2	ECE15 ve CBD çevrimleri.....	33
Şekil 4.3	İçten yanmalı motor modeli	34
Şekil 4.4	İYM yakıt tüketim haritası.....	34
Şekil 4.5	Elektrik motoru modeli	35
Şekil 4.6	Elektrik motoru tork-hız haritası.....	36
Şekil 4.7	Elektrik motoru verim haritası	36
Şekil 4.8	Batarya eşdeğer devresi	37
Şekil 4.9	Batarya modeli	37
Şekil 4.10	Lityum Polimer batarya MATLAB/Simulink bloğu.....	38
Şekil 4.11	Güç aktarım organları	39
Şekil 4.12	Güç aktarım organları tork ve hız çevrim blokları.....	39
Şekil 4.13	Vites çevrim oranı haritası ve vites kutusu modeli.....	40
Şekil 4.14	Hibrit araç için maksimum güç noktasında vites geçiş benzetimi	40
Şekil 4.15	Diferansiyel modeli.....	41
Şekil 4.16	Tekerlek modeli	41
Şekil 4.17	Araca boylamsal yönde etkiyen kuvvetler	42
Şekil 4.18	Kayma oranı hesabı.....	44
Şekil 4.19	Normal lastik yükleri bileşenleri.....	45
Şekil 4.20	Normal lastik yükleri hesap bloğu	46
Şekil 4.21	Normal lastik yüklerinin hareket sırasındaki dağılımı	47
Şekil 4.22	Yuvarlanma direncinin gösterimi	47
Şekil 4.23	Dönen kütle faktörü	48

Şekil 5.1	Seri hibrit elektrikli araç genel kontrol şeması	49
Şekil 5.2	Harici şarj prosedürü	51
Şekil 5.3	Batarya devreye alma prosedürü	52
Şekil 5.4	Hava sistemi prosedürü	53
Şekil 5.5	İYM kontrol sisteminin simulink modeli	55
Şekil 5.6	İYM Simulink modeli	56
Şekil 5.7	Kayma kipli kontrolör Simulink modeli	56
Şekil 5.8	Referans hız girişi altında İYM modelinin cevabı	57
Şekil 5.9	GENSET kontrol performansı	57
Şekil 5.10	Kontrol algoritması genel blokları	62
Şekil 5.11	Kontrol algoritması başlangıç modu bloğu	63
Şekil 5.12	Kontrol algoritması şarj modu bloğu	64
Şekil 5.13	Kontrol algoritması deşarj modu bloğu	66
Şekil 5.14	Sistem kapanış prosedürü	67
Şekil 5.15	Hata izleme prosedürü	68
Şekil 6.1	S-HEA için CBD çevrimi takip performansı	70
Şekil 6.2	S-HEA için CBD çevrimi sürücü istekleri ve EM anlık güç değerleri	71
Şekil 6.3	S-HEA için CBD çevriminde anlık elektriksel güçler	72
Şekil 6.4	S-HEA için CBD çevriminde bataryanın anlık verileri	72
Şekil 6.5	S-HEA için CBD çevrimi İYM durumu ve algoritma durum geçişleri	73
Şekil 6.6	S-HEA için CBD çevrimi İYM anlık verileri	73
Şekil 6.7	CBD çevriminde konvansiyonel ve S-HEA için İYM çalışma noktaları	74
Şekil 6.8	S-HEA için ECE çevrimi takip performansı	75
Şekil 6.9	S-HEA için ECE çevrimi sürücü istekleri ve EM anlık güç değerleri	76
Şekil 6.10	S-HEA için ECE çevriminde anlık elektriksel güçler	76
Şekil 6.11	S-HEA için ECE çevriminde bataryanın anlık verileri	77
Şekil 6.12	S-HEA için ECE çevrimi İYM durumu ve algoritma durum geçişleri	78
Şekil 6.13	S-HEA için ECE çevrimi İYM anlık verileri	78
Şekil 6.14	ECE çevriminde konvansiyonel ve S-HEA için İYM çalışma noktaları	79

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Hibritleşme dereceleri	5
Çizelge 3.1	Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya türleri ve karşılaştırma.....	15
Çizelge 3.2	Kullanılan Lityum Polimer bataryaya ait bilgiler	16
Çizelge 3.3	Kullanılan elektrik motoru ve sürücüsünün özellikleri.....	23
Çizelge 3.4	dSPACE MicroAutoBox1401 donanım özellikleri	25
Çizelge 3.5	CAN fiziksel pin tanımlamaları	27
Çizelge 5.1	Algoritma parametreleri.....	59
Çizelge 5.2	Maksimum şarj akımı için SOC'a bağlı GENSET güçleri.....	60
Çizelge 5.3	Optimum ve maksimum şarj noktaları.....	61
Çizelge 6.1	Tam yüklü araç için yakıt tüketim karşılaştırması.....	80
Çizelge 6.2	Boş araç için yakıt tüketim karşılaştırması	80

ÖNSÖZ

Artan dünya nüfusu ile birlikte tükenmekte olan kaynaklar sonucunda, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, artan enerji taleplerini karşılamak üzere alternatif enerji kaynaklarının arayışına girmişlerdir. Özellikle ulaştırma sektöründe, petrol ve türevi kaynakların tükenmeye yüz tutması ve bunların doğa üzerindeki olumsuz etkileri göz önüne alındığında, yenilenebilir ve çevreci enerji çözümlerine ilgi son yıllarda hızla artış göstermiştir. Bunun sonucu olarak, tümü elektrikli araçlar öncesi geçiş teknolojisi sayılabilecek hibrit elektrikli araçlar üzerine çeşitli çalışmalar ve büyük ARGE yatırımları yapılmıştır.

Dünyada önde gelen otomotiv üreticileri hibrit elektrikli araç teknolojileri geliştirmekte ve seri üretimlerini yapmaktadırlar. Türkiye'nin önde gelen ARGE kurumlarından olan TÜBİTAK MAM da bu konuda çalışmalara 2000'li yılların hemen başlarında başlamıştır. Sanayi ve üniversite işbirlikleri ile çeşitli prototip araç çalışmaları tamamlanmış ve devam etmektedir.

Tüm bu bilgiler ışığında bu tez çalışması ve yüksek lisans öğrenimim sırasında vermiş olduğu destek ve yardımlarından dolayı değerli hocamız Sayın Yrd. Doç. Dr. Banu ATAŞLAR AYYILDIZ'a, Mehmet Ali ÇİMEN, Volkan SEZER, Öncü ARARAT ve Murat DEMİRCİ başta olmak üzere desteklerini esirgemeyen tüm iş arkadaşlarıma, laboratuvar imkanlarını sonuna kadar kullanma imkanı bulduğum TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü'ne ve lisans/yüksek lisans çalışmalarım süresince sabırları ve sürekli desteklerinden dolayı aileme çok teşekkür ederim.

Ali Önder BİLİROĞLU
28/08/2009

ÖZET

Geçtiğimiz son on yılda, otomotiv teknolojilerinde enerjinin verimli kullanılabilirliği ve temiz enerji kaynaklarının kullanımı doğrultusundaki arayışların paralelinde, hibrit elektrikli araçlara olan ilgi hızlı bir şekilde artmıştır. Uygun konfigürasyon seçildiğinde ve bölgenin coğrafi koşulları incelenerek sistem yapılandırılmaları yapıldığında, hibrit elektrikli araçların konvansiyonel araçlara göre, yakıt tüketimi ve emisyon değerleri bakımından başarılı oldukları görülmektedir. Bu tezde, şehir içi toplu taşımada kullanılabilecek bir seri hibrit elektrikli otobüsün MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi yapılmıştır. Modellenmesi tamamlanan aracın üzerinde koşturulmak üzere bir kontrol algoritması üzerinde çalışılmış ve konvansiyonel araçla yakıt tüketimi açısından karşılaştırılması simülasyon sonuçlarıyla incelenmiştir.

Giriş bölümünde, hibrit elektrikli araçlar için bir giriş olması adına, hibrit elektrikli aracın tanımı ve genel performans kriterleri ile tez kapsamında amaçlanan çalışmalar için giriş cümlelerine yer verilmiştir.

İkinci bölümde hibrit elektrikli araçlar hakkında genel bilgilere yer verilmiştir. Bu kapsamda, hibrit elektrikli araçlar için genel bir bakışın ardından, tarihsel gelişim süreci incelenmiştir. Ardından, çeşitli hibrit elektrikli araç konfigürasyonlarından bahsedilerek, hibrit elektrikli araç mimarileri hakkında kısa bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya, elektrik motoru ve sürücüsü ile hibrit kontrol ünitesi gibi alt komponentlerden genel olarak bahsedilmiştir. Ardından uygulama yapılan seri hibrit araçta seçilen komponentlerin özellikleri, tablolar halinde verilmiştir.

Dördüncü bölümde, hibrit elektrikli aracı oluşturan komponentlerin ve alt sistemlerin nasıl modellendiğinden ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Bölüm sonunda, konvansiyonel ve hibrit elektrikli aracın simülasyon sonuçları grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur.

Beşinci bölümde, araç üzerindeki tüm alt sistemlere ait kontrol metodolojisinden prosedürler dahilinde abahsedilmiştir. Simülasyon çalışmalarında uygulanan hibrit kontrol algoritması bu bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

Altıncı bölümde, araç modelleri kullanılarak otomotiv endüstrisindeki standart yol çevrimleri için simülasyon verileri ve sonuçlarına yer verilmiştir.

Yedinci ve son bölümde yapılan bu çalışma ile elde edilen sonuçlar yorumlanmış, ve gelecekte yapılması öngörülen çalışmalar hakkında bilgilere ve tavsiyelere verilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Hibrit elektrikli araç, Modelleme, Simülasyon, Kontrol

ABSTRACT

Automotive Industry has been searching for the way of using existing energy resources more efficiently and utilizing clean energy resources in their new products. Hybrid electric vehicles attract people's attention more and more in last ten years parallel to this tendency. Recent works show that hybrid electric vehicles consume less fuel and expose less emission with respect to the conventional vehicles in case of choosing adequate configuration and system parameters according to the geographical conditions. In this thesis, hybrid series electric bus which can be used in public transportation has been modeled in MATLAB/Simulink environment. Control algorithm which is designed to be used in the modeled vehicle is tested under simulation environment to obtain comparison between hybrid electric bus and conventional bus regarding of fuel consumption.

In the introduction section contains general hybrid electric vehicle definitions. Then, general study of this thesis is explained in this section.

Second section gives the general overview of hybrid electric vehicles. This general overview is followed by the historical progress periods of these vehicles in time. Then, architectures of the hybrid electric vehicles are investigated considering different hybrid electric vehicle configurations.

Third section is devoted to the general overview of hybrid electric vehicle components such as battery, electric motor, electric motor driver and hybrid control unit. This section also includes the tables that give the properties of the components that are chosen to be used in the application vehicle.

In fourth section, detailed modeling approach for components and subcomponents of hybrid electric vehicle is introduced. At the end of this section, simulation results of conventional and hybrid electric vehicles are presented in graph and table formats.

Fifth section comprises control methodologies for each component on the vehicle. Overall control algorithm used in the simulations is introduced in detail.

Sixth section shows the simulation results, depend on the automotive industry standart road cycle profiles using vehicle models. At the end, comparative tables are given for fuel consumption values.

The last section is the conclusion which gives the interpretations on the obtained results and possible research areas for the future.

Keywords : Hybrid electric vehicle, Modelling, Simulation, Control

1. GİRİŞ

Hibrit araçlar, hareket için en az iki enerji kaynağının kullanıldığı araçlar olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, hareket için gerekli olan tahriki sağlamak için kullanılan birimler, konvensiyonel araçlarda bulunan içten yanmalı motor ve elektrik motorlarıdır. Günümüzde içten yanmalı motorlarda enerji kaynağı olarak petrol kökenli ürünler olan benzin, mazot ve biodizel ürünleri kullanılmaktadır. Elektrik motorlarının tahrikini sağlamak üzere kullanılacak elektriğin üretimi için çeşitli elektrik üretim/depolama kaynakları olarak yüksek kapasiteli bataryalar, yakıt pilleri, ultra kapasitörler, güneş pilleri kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, dizel yakıt kullanan içten yanmalı motor ile hareketi sağlayacak olan elektrik motoru ve elektrik ihtiyacını karşılayacak yüksek kapasiteli bir batarya yer almaktadır.

Hibrit elektrikli araçlar üzerinde yapılan çalışmaların temelinde yer alan ve ulaşılması gereken hedefler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Performans – menzil, hızlanma kapasitesi, tırmanma kapasitesi ve maksimum hız
- Emisyon değerleri – önceden tanımlanması yapılmış emisyon standartlarına dayalı olarak emisyon sınırlarına uyumluluğu
- Güvenlik – çarpışma dayanıklılığı, yol tutuşu ve frenleme yeteneği, tehlikeli madde koruması, güvenlik standartlarına uyumluluk
- Uygun satış fiyatı ve bakım maliyetleri
- Yakıt ikmal kolaylığı
- Dayanıklılık ve düşük onarım maliyetleri
- Konfor ve kullanım kolaylığı

Hibrit elektrikli araçlar üzerinde çalışmalar yapılırken, öncelikle tasarımı yapılacak aracın çalışacağı yol ve yük koşulları belirlenmeli ve sistemin isterleri ortaya çıkarılmalıdır. Aracın kullanım amacına yönelik olarak, maliyet etkin bir analiz ile uygun topoloji seçilmeli ve bilgisayar ortamında sistemin modellenmesi yapılarak, seçilen topoloji için isterleri karşılayacak komponentlerin seçimi için simülasyon çalışmaları yapılmalıdır.

Modelleme çalışmaları tamamlanan tasarımın gerçekleşmesi için uygulama sırasında birçok güçlüklerle karşılaşılabilir. Özellikle yüksek gerilim ve akım değerlerinin var olduğu elektrikli tahrik sistemlerinden kaynaklanan elektromanyetik girişim problemleri, özel olarak üzerinde durulması gereken konulardan biridir. Araç içerisindeki alt komponentler ile haberleşme ve sinyalleşme için kullanılan veri iletim kabloları, elektromanyetik gürültülerden en az etkilenecek şekilde mümkünse ekranlı seçilmeli, komponentler arasında taşınacak

yüksek gerilim hatlarının mesafeleri mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır.

Hibrit elektrikli araçların tarihi aslında 1900'lü yıllara kadar dayanmaktadır. Ancak enerji depolama sistemlerinde belirli kriterlerin o zamanlarda sağlanamamış olması, çalışmaların içten yanmalı motor teknolojileri yönüne kaymasına neden olmuştur. Günümüzde petrol türevi yakıtların rezervlerinin tükenme riski, tüm dünyadaki otomotiv üreticilerini, temiz enerji kaynaklarının kullanıldığı araçlar üzerinde çalışma yapmaya itmiştir. Tüm elektrikli araçlara geçişte bir alternatif olarak hibrit elektrikli araçlar üzerinde çalışmalar hızla devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında şehir içi toplu yolcu taşımacılığında kullanılmak üzere tasarlanan seri hibrit bir elektrikli aracın modellenmesi, kontrolü ve simülasyonlar ile konvansiyonel araca göre yakıt tüketim performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Hibrit elektrikli araçlara genel bakış başlığı altında, hibrit elektrikli araçların tarihçesi ve yakın zamanda dünyada satış miktarları ile ilgili bilgilerin yanı sıra hibrit elektrikli araç topolojileri ile avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmektedir

Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan temel komponentler ve bunlara ait temel karakteristik bilgileri ve karşılaştırmalı tabloları üçüncü bölümde yer almaktadır.

Tezin dördüncü bölümünde, seri hibrit bir elektrikli aracın MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi temel denklemler ile verilmiştir.

Daha sonra, seri hibrit elektrikli araç için gerekli olan kontrol prosedürlerine yer verilmektedir. Burada, araç alt komponentlerine ilişkin kontrol metodları, akış diyagramları şeklinde anlatılmaktadır. Seri hibrit elektrikli araçta kullanılan GENSET için uygulanan kayma kipli kontrolör tasarımı ve kontrolörün performans grafikleri yer almaktadır.

Kontrol algoritmasının hibrit elektrikli araç modeline entegre edilmesi ile elde edilen sistem modelinin, otomotiv uygulamalarında standart olan ECE ve CBD gibi araç çevrimleri için performans sonuçları altıncı bölümde grafikleri ile yer almaktadır. Simülasyonda kullanılan bu araç çevrimleri için konvansiyonel araç ve seri hibrit elektrikli araç için karşılaştırmalı yakıt tüketim değerleri de yine bu bölümde tablolar halinde sunulmaktadır.

Sonuç bölümünde ise, yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar ve daha sonraki çalışmalar için hedefler ve tavsiyelere yer verilmiştir.

2. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARA GENEL BAKIŞ

2.1 Hibrit Elektrikli Araçların Tarihçesi

Tarihte bilinen ilk hibrit elektrikli araç, Ferdinand Porsche tarafından 1901 yılında seri hibrid elektrikli araç olarak tasarlanmıştır. Enerji kaynağı olarak elektrik motorlarının elektriğini karşılayacak bir jeneratör ile küçük batarya kullanılırken, hareket için her bir teker içerisine yerleştirilmiş, sürekli istekte maksimum 1.9 kW-2.6 kW ivmelenme sırasında 5.2 kW anlık güç sağlayabilen elektrik motorları kullanılmıştır. Araç, 50 km/sa maksimum hız ve 50 km menzil özelliklerine sahiptir.

1915 yılında, elektrikli araç üreticisi olan Woods Motor Vehicle isimli şirket tarafından bir başka hibrit elektrikli araç üretilmiştir. Bu araç dört silindirli içten yanmalı motor ve bir elektrik motoruna sahiptir. 25 km/sa hızın altında sadece elektrik motoru ile hareket sağlanırken, 25 km/sa ile maksimum hız olan 55 km/sa hızları arasında içten yanmalı motor tarafından aracın hareket etmesi sağlanmaktadır.

Daha yakın bir geçmişte sahip bir HEA prototipi Victor Wouk tarafından yapılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından oluşturulan Ulusal Temiz Otomobil Teşvik Programı kapsamında prototipini geliştiren Wouk, General Motors firmasına ait 1972 model bir Buick Skylark otomobile 16 kW'lık bir elektrik motoru entegre etmiştir.

1978 yılında David Arthurs tarafından birçok HEA'nın temel tasarım kriteri olan geri kazanımlı frenleme sistemi geliştirilmiştir. Opel GT'ye ait hazır ürünleri, kendi tasarladığı gerilim kontrolörü ile entegre ederek, bataryalar, elektrik motoru ve DC jeneratör ile birlikte birleştirmiştir.

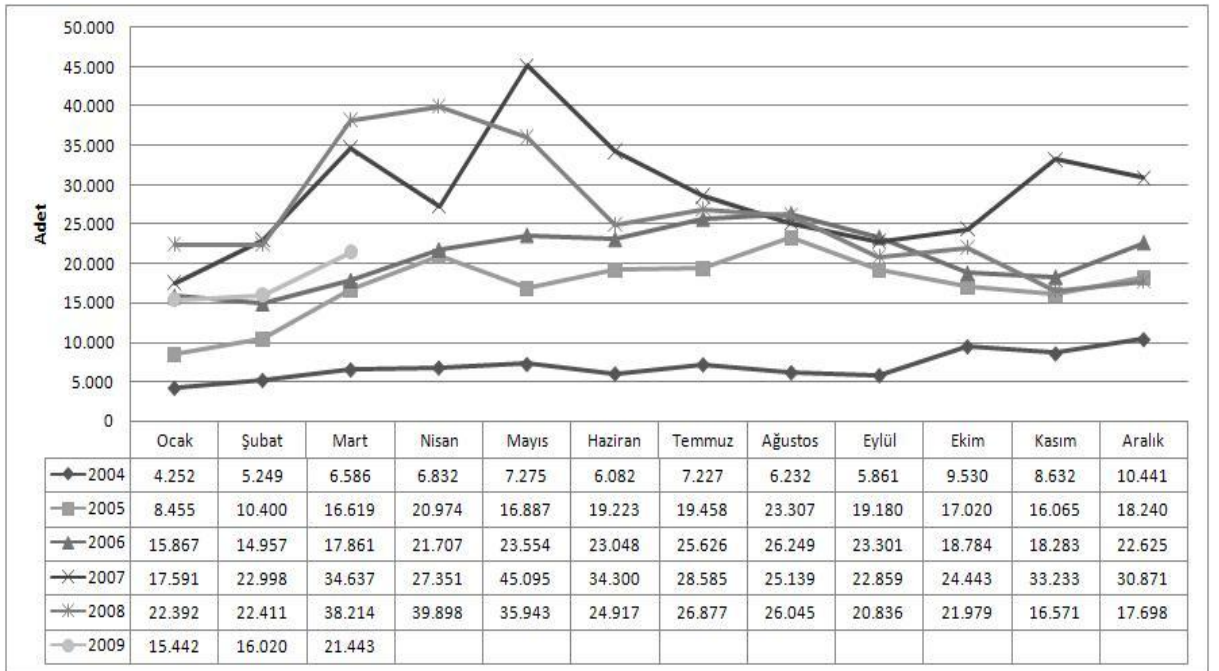
1989 yılında, Audi firması Audi 100 Avant Quattro model aracı üzerinde prototip olarak ürettiği şarj edilip kullanılabilme özelliğine sahip(plug-in) paralel hibrit elektrikli aracı ortaya çıkarmıştır. 12.6 beygir gücündeki Siemens marka elektrik motorları arka tekerleri sürmektedir. Elektrik motoru için gerekli olan elektrik enerjisi, araca yerleştirilmiş olan bir Nikel-Kadmiyum batarya paketi tarafından sağlanmaktadır. Aracın ön tekerlekleri 2.3 lt, 5 silindirli ve 136 beygir gücündeki içten yanmalı motor tarafından tahrik edilmektedir. Bu projedeki hedef, şehirler arası trafikte sadece içten yanmalı motorun kullanıldığı, şehir içi trafiğinde ise yalnızca elektrik motoru ile sürüşün sağlanabildiği bir araç ortaya koymaktır. Ancak, elektrik sürüşü için kullanılan elektrikselsel komponentlerin ağırlıkları, sistemin istenilen verime ulaşmasını engellemiştir. Bundan iki yıl sonra, Audi firması yine aynı araç üzerinde ikinci prototip hibrit elektrikli aracını geliştirdi. Bu araçta, 28.6 beygir gücündeki üç-fazlı elektrik motoru arka tekerlerin tahriğini sağlıyordu. Fakat bu prototipte ilkinden farklı olarak,

arka aksa yerleştirilen torsen diferansiyel ile 2.0 lt, 4 silindirli içten yanmalı motorun tahrik enerjisi de arka tekerleklerle ilave güç olarak aktarılmıştır.

Otomobil sektöründe HEA'lar için başarı, 1990'lı yıllarda Toyota Prius ve Honda Insight ticari araçları ile yakalanmıştır. Bu araçlarda, içten yanmalı motorun direk olarak tekerlekleri tahrik edebildiği paralel hibrit konfigürasyonları kullanılmıştır. Toyota Prius ilk üretiminden itibaren yüksek talep görmüştür. Yeni dizaynları daha konvensiyonel görünümde, daha ucuz olmakla beraber %40'a kadar yakıt ekonomisi değerlerine ulaşmıştır. Honda Civic Hybrid modeli 4.7 lt/100km yakıt tüketimi performansına sahiptir. Honda Insight modeli 2006 yılında üretimden kalktıktan sonra, ilerleyen yıllarda yeni bir model olarak Honda Accord'un hibrit modeli üretilmiştir.

Honda ve Toyota firmaları en çok hibrit elektrikli araç satışı yapan iki firmadır. 1997 ve Kasım 2004 yılları arasında Toyota 306,862 adet hibrit elektrikli araç satışı yaparken, 1999 ve Kasım 2004 yılları arasında Honda 81,867 adet hibrit elektrikli araç satışı yapmıştır (Sezer, 2008).

2005 yılında, ilk hibrit elektrikli dört-çeker araç Ford tarafından Escape Hibrit modeli olarak üretilmiştir. 2007 model Camry Hibrit, 2006 yazından sonra piyasada yerini almıştır. 2007 yılında, Lexus firması GS model spor sedan otomobilinin hibrit versiyonunu piyasaya sürmüştür. Yine aynı yıl içinde Nissan firması da Altima hibrid modeli ile piyasadaki yerini almıştır.



Şekil 2.1 Son 5 yılda A.B.D.'de hibrit elektrikli araç satış miktarları

Şekil 2.1’de, A.B.D.’de yıllar ve aylara göre son 5 yıl için hibrit elektrikli araç satış adetleri görülmektedir.

2.2 Hibrit Elektrikli Araçların Sınıflandırılması

Son yıllarda, otomotiv teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte artan güvenlik, konfor ve lüks ihtiyaçları nedeniyle mekanik ve hidrolik sistemlerin yerini elektrik destekli sistemlere bırakması, araçtaki elektrik gücü tüketimini her yıl yaklaşık olarak %4-5 oranında arttırmaktadır (Koot, 2006). Araç üreticileri, bu artış dolayısı ile günümüzde kullanılan standart 14V (12V Batarya) elektrik ağından, 42V (36V Batarya) elektrik ağına geçmeyi planlamaktadırlar. Araç yardımcı donanımlarının motordan ayrılarak elektrik enerjisi ile işletilmesi küçük çapta da olsa hibritleşmeyi beraberinde getirmektedir.

Hibrit elektrikli araçlar, hibritleşme seviyesine göre mikro, hafif ve tam hibrit olmak üzere üç, güç organlarının birbirleri ile ilişkisine göre ise seri, paralel ve seri-paralel olmak üzere üç alt grupta sınıflandırılmaktadır (Bahar, 2008).

2.2.1 Hibrit Araçların Hibritleşme Derecesine Göre Sınıflandırılması

Hibritleşme oranı, araçta kullanılan elektrik motoru gücünün, toplam araç gücüne oranı olarak tanımlanabilir. Hibrit araçların hibritleşme derecesine göre sınıflandırılması Çizelge 2.1’de görülmektedir.

Çizelge 2.1 Hibritleşme dereceleri

	Mikro Hibrid	Hafif Hibrid	Tam Hibrid
Motor Durdurma, Aksesuar Yükl Paylaşımı	✓	✓	✓
Yalnız EM ile Araç Sürme	--	--	✓
Fren Enerjisinin Geri Kazanımı	✓	✓	✓
Seyir Gücü Paylaşımı	--	✓	✓

2.2.1.1 Mikro Hibrit Araçlar

Mikro hibrit araçlarda elektrik motoru, bir kayış kasnak mekanizması ile içten yanmalı motora bağlanmaktadır. Mikro hibritler araç üzerinde bulunan tüm aksesuar yüklerini karşılayacak şekilde boyutlandırılmakta ve tasarlanmaktadır. Araca konulan elektrik motoru, İYM rölanti devrinde iken motorun açılıp kapatılması için kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlar ilk çalıştırılma anında yüksek yakıt tükettiğinden, mikro hibrit araçlarda ilk çalışma ve stabilizasyon süresi 800 ms’lerden 200 ms’lere kadar düşürülmekte ve ilk çalışma anında harcanan fazla yakıt tasarruf edilmektedir (Koot, 2006).

2.2.1.2 Hafif Hibrit Araçlar

Hafif hibrit araçlarda elektrik motoru içten yanmalı motora destek verebilmektedir. Fakat bu araçlarda elektrik motoru aracı yalnız başına götürecek kadar güçlü değildir. Hafif hibrit araçlarda rejeneratif frenleme enerjisinin kazanılması ve seyir gücü paylaşımı esastır.

2.2.1.3 Tam Hibrit Araçlar

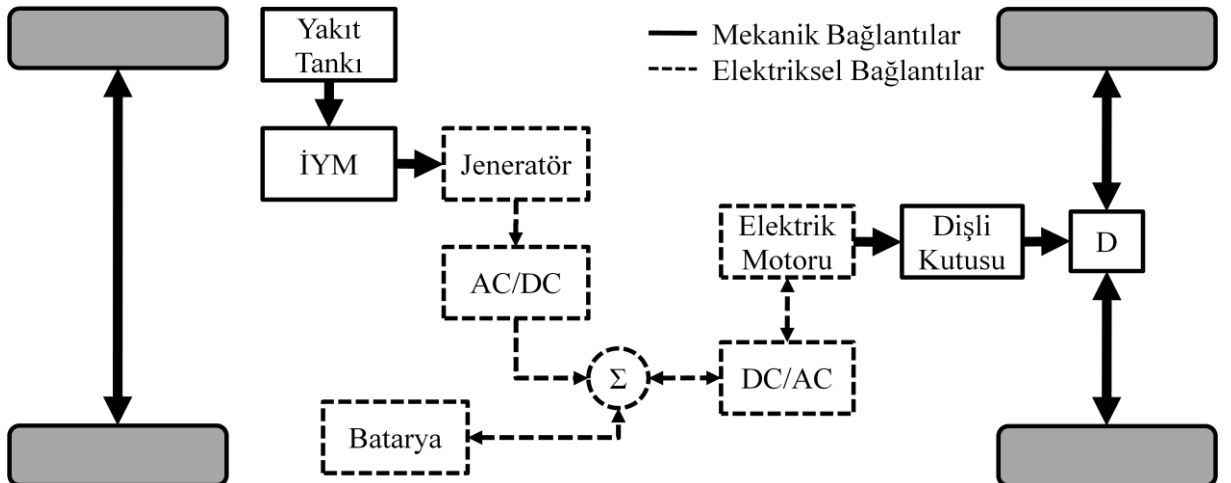
Diğer hibritlerden farklı olarak tam hibrit araçlarda, araç yalnızca elektrik motoru ile de sürülebilmektedir. Seyir hızına bağlı olarak tam hibrit araçlarda elektrik motoru araç yükünün bir kısmını ya da tamamını kendi başına karşılayabilir. Önceki sistemlere göre daha güçlü motor ve batarya gerektirdiğinden sistem kontrolü de daha karmaşıktır. Tam hibrit araçlarda yüksek oranlarda yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir.

2.2.2 Hibrit Araçların Güç Organlarının İlişkisine Göre Sınıflandırılması

Hibrit araçlar, güç organlarının birbirleri ile ilişkisine göre seri, paralel ve seri-paralel olmak üzere üç grupta incelenebilir (Sezer vd., 2007).

2.2.2.1 Seri Hibrit Elektrikli Araçlar (S-HEA)

Seri hibrit elektrikli araçlar, elektrikli sürüş için tasarlanmıştır. Bir başka deyişle, elektrikli araçlar ile çok fazla benzerlik göstermektedir. Elektrikli araçlardan ayıran tek farkı, aracın elektrik motorları tarafından çekişini sağlayacak elektrik enerjisini üretecek ve bataryaların şarj olmasını sağlayacak bir içten yanmalı motorun sistemde var olmasıdır. Seri hibrit konfigürasyonunda, İYM ile tekerlekler arasında hiçbir mekanik bağlantı bulunmamaktadır ve yol yüklerinin karşılanması için elektrik motoruna hiçbir şekilde direk katkı sağlamaktadır. Seri hibrit araçtaki içten yanmalı motorun yol yükünden bağımsız hale getirilmesi ile, içten yanmalı motorun istenen bir noktada sürekli çalışması sağlanabilmekte ya da maksimum verimli noktalar arasında gezinebilecek şekilde İYM kontrol edilebilmektedir.



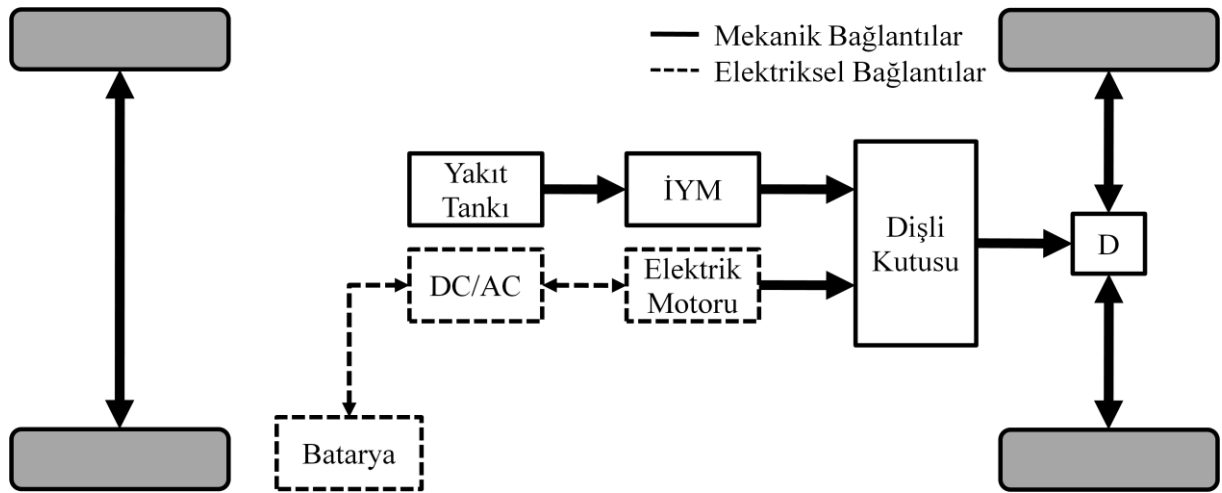
Şekil 2.2 Seri hibrit elektrikli araç konfigürasyonu

Çekişi sağlayacak elektrik motoru, aracın maksimum güç isteklerini karşılayacak şekilde seçilmeli ve boyutlandırılmalıdır. Bunun sonucunda yüksek maliyetli ve büyük boyutlu elektrik makinalarının kullanılması gerekliliği ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, tüm performans kriterlerini sağlayacak hibrit komponentleri, en yüksek güç isteyecek sürüş şartlarına göre boyutlandırılmalıdır. Bunun tabii bir sonucu olarak, ortalama sürüş karakteristiklerinde, maksimum ihtiyaca göre boyutlandırılması yapılmış komponentlerin daha az verimli noktalarda çalışması durumu ortaya çıkmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, seri hibrit konfigürasyonu genellikle, komponentlerin yerleşimi için daha geniş alanın bulunduğu ve sürekli olarak benzer görevleri yerine getiren ağır vasıta taşıtlarda uygulanmaktadır.

2.2.2.2 Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar (P-HEA)

Paralel hibrit elektrikli araçların tasarımları seri hibrit elektrikli araçlara göre farklılık göstermektedir. P-HEA'larda İYM ve EM, herbiri ayrı ayrı ya da birlikte olmak üzere aracın çekişinde katkıda bulunabilir. Paralel hibrit elektrikli araçlarda komponentlerin araç üzerindeki yerleşimlerinin değişiklik gösterdiği çeşitli konfigürasyonlar olsada, her konfigürasyonda İYM ile tekerlekler arasında mutlak suretle mekanik bir bağlantı bulunmaktadır (Musardo ve Staccia, 2003).

Genel olarak paralel hibrit elektrikli aracın konfigürasyonu Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 Paralel hibrit elektrikli araç konfigürasyonu

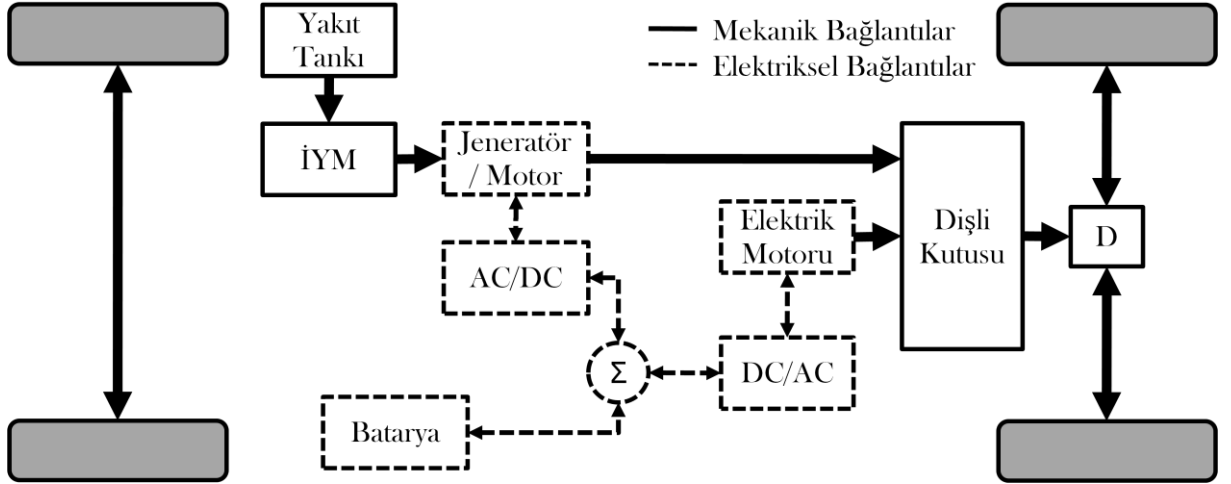
P-HEA konfigürasyonlarında düşük hızlarda genellikle tipik bir elektrikli araç sürüşü göze çarpmaktadır. Düşük hızlarda sadece EM ile hareket sağlanırken, daha yüksek hızlara çıkıldığında gerekli olan güç ihtiyacı İYM tarafından karşılanmaktadır. Hatta buna ek olarak anlık güç isteklerinin ortaya çıktığı durumlarda, EM ile İYM birlikte çekişe katkı sağlayıp seyir gücünü paylaşarak aracın çekişini sağlayabilirler. Bu strateji ile, düşük yol yüklerinde oluşmakta olan yüksek hidrokarbon (HC), karbonmonoksit (CO), azotoksit (NO_x) emisyonları

ile verimsiz yakıt tüketimi azaltılmaya ya da engellenmeye çalışılmaktadır.

2.2.2.3 Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar (SP-HEA)

Seri-paralel konfigürasyon, hem seri hem de paralel mimarilerin avantajlı yönlerinin verimli bir şekilde kullanıldığı konfigürasyondur ve bu sayede daha esnek güç yönetim seçenekleri ortaya çıkmaktadır. Sistem kontrol yapısı diğer iki konfigürasyona göre daha kompleks olan seri paralel hibrit elektrikli araç konfigürasyonu Şekil 2.4'te görülmektedir.

SP-HEA konfigürasyonunda karmaşık kontrol algoritmaları ve elektromekanik yönetim ile sadece İYM, sadece EM, EM destekli İYM sürüşü(paralel mod) ve jeneratör destekli EM sürüşü(seri mod) stratejileri işletilebilmekte ve hibrit araçlara ilişkin tüm avantajlar azami ölçüde uygulanabilmektedir.



Şekil 2.4 Seri-paralel hibrit elektrikli araç konfigürasyonu

Günümüzde, transmisyon sistemlerinin içerisinde kullanılan gezegen dişli sistemleri ile, İYM ve elektrik motorlarının güç dağılımları çeşitli konfigürasyonlar ile tekerlere aktarılmaktadır. Otomatik kavrama sistemleri ve transmisyon içerisine gömülmüş elektrik motoru teknolojileri ile, kavrama durumları ve hibrit kontrol sisteminin yönlendirmeleri doğrultusunda elektrik motorları değişik amaçlar için kullanılarak, tümleşik yapı içerisinde birden fazla hibrit çalışma moduna imkan sağlanmaktadır.

2.3 Hibrit Elektrikli Araçlarda Uygulanan Yöntemler

Karayolu araçlarında seyir için kullanılan enerji tüketiminin azaltılabilmesi için, araç kütlesinin düşürülmesi, yuvarlanma direnci ve aero-dinamik dirençlerinin azaltılması, güç aktarma organlarının ve çalışma bölgelerinin optimizasyonu, trafik akışındaki düzenlemeler gibi birçok yöntemler bulunmaktadır. Hibrit elektrikli araçlarda, motor küçültme, aracın

hareket etmediği durumlarda ya da yüksek şarj durumlarında İYM kapatma, güç organları yönetimi ve optimizasyonu, enerjinin geri kazanımı olanakları nedeniyle, yüksek oranlarda yakıt tasarrufu yapılabilmekte ve egsoz emisyon değerleri düşürülebilmektedir.

Hibrit elektrikli araç tasarımları yapılırken yakıt tüketimi ve egsoz gazı emisyonlarının düşürülmesi için uygulanan yöntemler şunlardır:

2.3.1 Motor Küçültme

İçten yanmalı motorlarda verimi etkileyen faktörlerin en başında, dışarıya atılan ısı, sürtünme ve pompalama kayıpları yer almaktadır. Küçük motorlarda, silindir hacminin daha küçük olması nedeniyle, pompalama ve ısı kayıpları daha az olmaktadır. Hareketli parçaların küçük olması nedeniyle, küçük motorlarda sürtünme için harcanan enerji miktarıda düşüktür. Verilen bir çevrim için büyük motorlar ile kıyaslandığında küçük motorlar en yüksek tork eğrisi referans alındığında daha fazla yükleneceğinden daha verimli bölgelerde çalışırlar.

2.3.2 Motor Durdurma

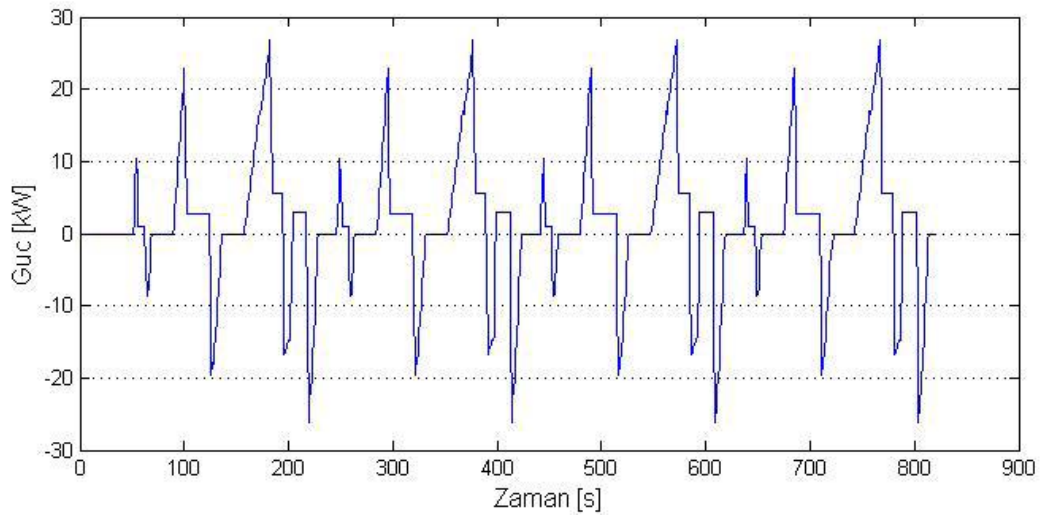
Şehir içi trafik şartlarında araç duruyorken içten yanmalı motorlar rölanti devirlerinde çalışmaya devam ederler. Avrupa şehir içi çevriminde motorun rölantide olduğu süre toplam çevrim zamanının %35,4'ü kadardır. Frenlemede geçen süre ise toplam sürenin %13,8'i kadardır. İçten yanmalı motor, rölanti ve frenleme sürelerinde kapatıldığı takdirde, büyük oranlarda yakıt tüketimi sağlanabilmektedir. İçten yanmalı motorlarda, ilk çalıştırma anında motorun kararlı çalışma konumuna geçebilmesi için silindirlerde daha yüksek miktarda yakıt püskürtülmektedir. İlk çalışma esnasında motor sıcak iken hızla 1500 rpm devirine ulaştıktan sonra yavaşça rölanti devrine geri döner. Bu ilk çevrimlerde her bir silindire 600 mg yakıt gönderilmektedir. Motor rölanti devrine oturduğunda bu miktar 18 mg seviyelerine kadar geriler (Kessels, 2007). Hafif hibrit araçlarda motor ilk çalıştırılmadan önce, kayış kasnak yardımı ile içten yanmalı motora bağlanan düşük güçlü bir elektrik motoru yardımı ile içten yanmalı motor denge durumuna gelene kadar elektrik motoru ile tahrik edilmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken diğer hususlar katalitik konvertör ve motor sıcaklığıdır. İçten yanmalı motorlar sürekli rejim sıcaklığında daha az emisyon üretirken, katalitik konvertörler yüksek sıcaklıklarda daha verimli çalışmakta, atmosfere salınan karbon monoksit ve hidro-karbon gazlarının yakılarak sağlığa zararsız gazlara dönüştürülmesinde büyük rol oynamaktadırlar. Bu sebeplerden ötürü, motor durdurulurken motor ve katalitik konvertör sıcaklıkları da göz önünde bulundurulmalıdır.

2.3.3 Rejeneratif Frenleme

Avrupa şehir içi çevriminde, aracı hızlandırmak ve sabit hızla götürmek için gereken toplam

pozitif enerji miktarı 3000 kg'lık bir araç için yaklaşık 2,82 MJ iken, bu çevrimde fren ile atılan enerji miktarı 1,76 MJ seviyelerindedir. Aynı zamanda toplam çevrim zamanının %13,8'i frenleme ile geçmektedir. Bu sürede atılan enerji miktarı, çevrimde ihtiyaç duyulan pozitif enerji miktarı ile kıyaslandığında oldukça büyük bit kayıp olduğu göze çarpmaktadır. Hibrit elektrikli araçlar ile elde edilen en büyük avantaj, konvansiyonel araçlarda atılan frenleme enerjisinin bir kısmının hibrit elektrikli araçlarda geri kazanılabilir olmasıdır. Genellikle fren ile atılan enerji miktarı, araç üzerinde bulunan elektrik motorunun alabileceği kapasitenin üzerinde gerçekleşmektedir. Avrupa şehir içi çevriminde 3000 kg'lık araç için ihtiyaç duyulan fren gücü yaklaşık 27kW civarındadır (Şekil 2.5) .



Şekil 2.5 ECE çevrimi güç gereksinimleri

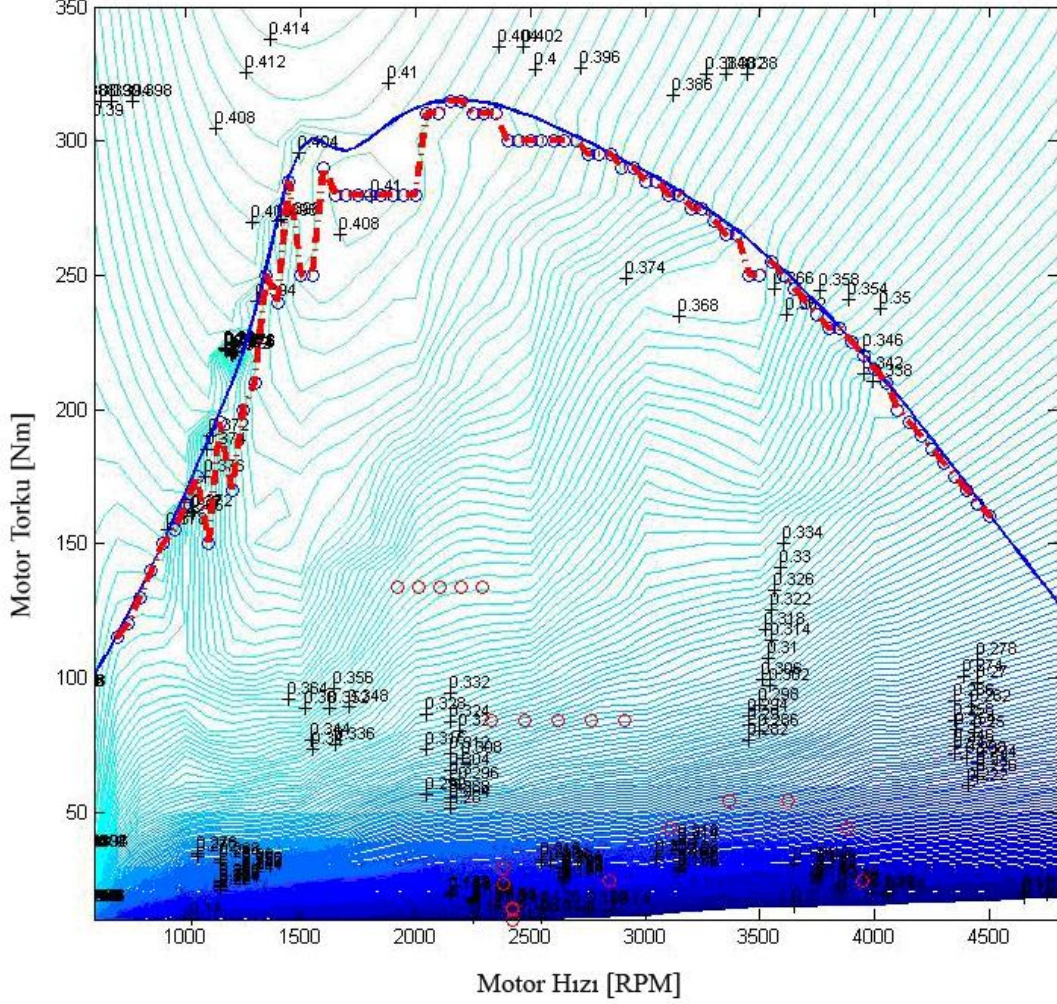
Rejeneratif frenleme de dikkat edilmesi gereken en önemli husus, regülasyonlar ile düzenlenen ön ve arka aks fren moment dağılımlarıdır.

2.3.4 Güç Yönetimi

Güç ve güç aktarma organlarının en yüksek verim ve ucuz enerji bölgelerinde çalıştırılması, hibrit elektrikli araçlarda önemli oranlarda yakıt tüketimi azaltma potansiyeli oluşturmaktadır. Konvansiyonel bir araca elektrik motoru eklendiğinde, içten yanmalı motorların pahalı enerji tükettiği bölgelerde bütün sistemin verimi göz önüne alınarak elektrik motoru ile desteklenebilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, içten yanmalı motorların ortalama olarak en yüksek verimleri %43'ler civarında iken , bu oran şehir içi seyirlerinde ortalama %30'lara, daha eski motorlarda ise %20'lere kadar düşebilmektedir (Guzella ve Sciarreta, 2005). İyi tasarlanan bir kontrol algoritması ile bu potansiyeli açığa çıkartmak mümkündür.

Artan motor devri için örnek bir içten yanmalı motorun en verimli çalıştığı noktalar kesikli çizgi ile Şekil 2.6'da verilmiştir. Birçok kontrol uygulamasında içten yanmalı motorun

çalışma noktasının mümkün olduğu kadar en verimli noktada olması hedeflenmektedir. Bu yaklaşım kısmi olarak doğru bir yaklaşım olsa da, doğru yaklaşım, hesaplarda zaman boyutunun da dikkate alınması ve denklemlerin buna göre kurularak optimizasyon yapılmasıdır.



Şekil 2.6 Örneğin bir İYM haritası için İYM devrine göre en verimli çalışma çizgisi

Bazı durumlarda, içten yanmalı motorun çevrim içerisinde en verimli çalışacağı noktaya çekilmesi, bataryanın şarj kısıtları da düşünüldüğünde en doğru yaklaşım olmayabilir. Bu durumda araç üzerinde kullanılan komponentler ve bunların verimleri göz önüne alınarak toplam verimlilik hesabı üzerinden bir kontrol yapılması en doğru yaklaşım olacaktır. Ancak, bu optimizasyon çalışmaları yapılırken, uygulanan kontrol algoritmasının araç üzerine uygulanabilirliği için sistemin dinamik yapısı da göz önüne alınmalıdır.

2.4 Hibrit Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları

Yakıt tüketimindeki iyileşme ve egsoz gazlarında azaltımların yanında hibrit elektrikli araçların, konvansiyonel araçlara göre avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Elektrik motoru ile daha yumuşak bir hızlanma desteği, paralel yapıda içten yanmalı motora destek ile daha yüksek ivmelenme performansı
- Tasarıma göre yokuş çıkma kabiliyetinde artış
- Sessiz sürüş imkanı
- Araç içerisinde gerekli konfor ve lüks ihtiyaçları için elektrik enerjisinin sağlanabilirliği
- A.B.D.'de olduğu gibi bazı ülkelerde vergi indirimi avantajı
- Dört çekiş konfigürasyonlarında sportif sürüş kabiliyeti
- Araç kararlılık ve kontrol uzayının genişlemesi.

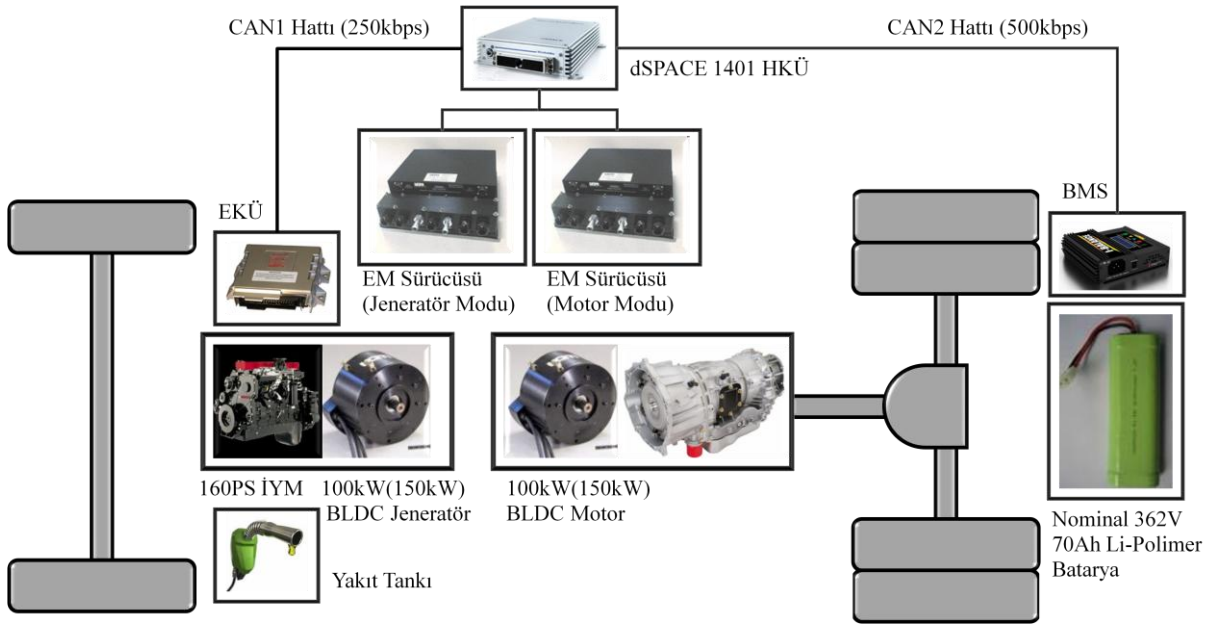
Hibrit elektrikli araçların dezavantajları ise:

- Batarya teknolojisinin henüz gelişmekte olması nedeniyle, düşük faydalı batarya çevrim ömrü
- Faydalı hacmin azalması ve araç kütlesindeki artış
- Araç karmaşıklığının artması
- Maliyet artışı
- Batarya çevrim ömrü sonunda geri dönüşüm problemi olarak sıralanabilir (Musardo ve Staccia, 2003; Plotkin vd., 2001).

3. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN KOMPONENTLER VE KOMPONENTLERİN BOYUTLANDIRILMASI

Hibrit elektrikli araçlarda, konvensiyonel araçlara ek olarak, konfigürasyona bağlı olarak aracın güç ihtiyaçlarını karşılayacak boyutlarda batarya, elektrik motoru/motorları ve hibrit kontrol ünitesi yer almaktadır. Tez kapsamında seri hibrit elektrikli aracın modellenmesi ve kontrolü ele alınacağından, araçta uygulanan seri konfigürasyon üzerinden gidilerek hibrit araçlarda kullanılan komponentler ve boyutlandırmalarından bahsedilecektir.

Şekil 3.1’de, seri hibrit otobüse ait komponentlerin genel yerleşimi ve haberleşme ağı görülmektedir. Batarya ve motor sürücüleri aynı CAN(Controller Area Network – Kontrolör Alan Ağı) hattı üzerinde hibrit kontrol ünitesinin(HKÜ) birinci CAN portu üzerinden haberleşmektedir. Hibrit kontrol ünitesinin ikinci CAN portu üzerinden de araç elektronik kontrol ünitesi(EKÜ) ile haberleşilmekte ve hibrit kontrol algoritmasında kullanılacak bilgiler HKÜ tarafından yakalanmaktadır. CAN protokolü hakkında detaylı bilgi Bölüm 3.4’te yer almaktadır.



Şekil 3.1 Seri hibrit elektrikli araçta komponentlerin yerleşimi

3.1 Batarya

Bataryalar, kullanılacağı alana göre tek bir hücre olarak ya da istenilen DC gerilim seviyesine göre birkaç hücrenin kaskat olarak seri bağlanması ile oluşturulmuş, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve elektrik enerjisi ihtiyacında da, ters enerji dönüşümü ile kimyasal enerjiden elektrik enerjisini sağlayan önemli komponentlerdir. Batarya teknolojisi henüz diğer enerji kaynakları gibi yüksek enerji yoğunluğuna erişememiştir ve bu konuda

alışmalar günümüzde de devam etmektedir. Zaten, batarya teknolojisinde devrim olarak nitelendirilecek çok yüksek enerji yoğunluklu ve kısa sürede şarj edilebilen bataryaların üretilmesi durumunda, tümü elektrikli araçların n daha da açılacaktır ve daha cazip hale gelecektir.

Hibrit elektrikli araçlarda batarya seçiminde, aracın hibritleşme derecesi ile birlikte kullanılan mimarının ne olduğu da önemlidir. Kullanılacak olan bataryanın tipi, boyutu ve enerji yoğunluğu, kullanılan bataryanın tek başına ana enerji kaynağı gibi çalışmasına ya da ana bir enerji kaynağına destek görevi göreceğine göre değişiklik göstermektedir.

Kullanılan bataryanın birincil enerji kaynağı ve enerji deposu olarak öne çıktığı tasarımlarda, üzerinde kullanılacağı aracın maksimum güç ve enerji ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde boyutlandırılması gerekmektedir.

Hibrit elektrikli araçlar için batarya seçiminde dikkate alınacak bazı batarya parametreleri aşağıdaki gibi açıklanabilir.

- **Batarya Kapasitesi :**

Batarya üzerinde depolanabilecek olan enerjinin bir ölçüsüdür. Ancak bataryaların kapasitesinden bahsederken tek bir rakamsal ifade söylenememektedir. Batarya kapasitesinden bahsedilirken, bataryanın yaşı, deşarj oranı, sıcaklık ve batarya tipi dikkate alınmalıdır.

Batarya kapasitesi ile ilgili olarak temel olarak Amper-Saat(Ah) terimi kullanılmaktadır. Ah olarak verilen batarya kapasitesi bilgisine göre, bataryanın belirlenen akım değeri için ne kadar süre ile o akımı sağlayabileceğini gösterir.

Batarya kapasitesinin enerji olarak bir başka ifadesi de kWh şeklindedir. Bataryanın nominal uç gerilimi ile Ah kapasitesinin çarpılması ile elde edilmektedir ve bataryanın tamamen şarj olması için gerekli olan enerjinin bir ifadesidir.

- **Batarya Uç Gerilimi :**

Bataryayı oluşturan kaskat bağlanmış hücrelerin toplamda oluşturduğu gerilim seviyesidir. Bataryanın nominal uç gerilimi, araçta kullanılacak elektrik motorlarını sürecek elektrik motoru sürücüleri ile uyumlu olması gerekliliğinden dolayı önemlidir. Genellikle 250V ile 400V gerilim seviyelerinde bataryalar kullanılmaktadır.

Uç gerilimi genellikle şarj halindeki batarya için verilmektedir. Bataryanın deşarj durumunda uç geriliminin, batarya şarj durumu ile birlikte düşeceği aşıkardır.

- **Batarya şarj-Deşarj evrim Sayısı :**

Bataryaların kimyasal yapısı sebebi ile tamamıyla deşarj edilmeleri, bataryaların ömrünü

kısaltmaktadır. Batarya üreticileri tarafından, bataryanın toplamda kaç şarj-deşarj çevrimine cevap verebileceği bilgisi verilmektedir. SOH(State-Of-Health) olarak ifade edilen batarya sağlığı, ilerleyen şarj-deşarj çevrimleri sonucunda düşmektedir. Örneğin %80 DOD(Depth-Of-Discharge) bataryadeşarj derinliği ile kullanılan bir batarya için 300 şarj-deşarj çevrimi ön görülürken, %50 DOD bataryadeşarj derinliği ile kullanılan bir bataryada 600 şarj-deşarj çevrimi öngörülebilmektedir.

• **Enerji Yoğunluğu ve Güç Yoğunluğu :**

Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu bilgileri, bataryanın birim ağırlığı için elektrik enerjisi olarak sağladığı güç ve enerjinin ölçüsüdür. Batarya türleri ve teknolojileri arasındaki en kritik fark enerji ve güç yoğunluklarıdır. Batarya boyutlandırması sırasında araç ağırlığına etkisi sebebi ile batarya türü seçiminde önemli bir kriterdir.

Çizelge 3.1 Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya türleri ve karşılaştırma

Batarya Tipi	Enerji Yoğunluğu [Wh/kg]	Güç Yoğunluğu [W/kg]	Çevrim Ömrü	Teknolojik Durum	Şimdiki Maliyeti [\$ /kWh]	Gelecek Maliyeti [\$ /kWh]	Üreticiler	Kullanıldığı Araçlar	Diğer Bilgiler
Kurşun Asit	25 - 30	75 - 130	200 - 400	Üretimde	100 - 125	75	Trojan, Hawker, Exide, Interstate	CARTabus, Solectria E10	
Gelişmiş Kurşun Asit	35 - 42	240 - 412	500 - 800	Üretimde			Delphi, Horizon, Electrosources	Audi Duo, GM EV1(VLRA), Solectria Force	Potansiyel Gelişme: 55Wh/kg, 450 W/kg, 2000 çevrim ömrü
Nikel Metal Hidrür	50 - 80	150 - 250	600 - 1500	Prototip	525 - 540	115 - 300	Panasonic, Ovonic, SAFT	Toyota RAV4-EV, Toyota prius, Chrysler Epic Minivan, Honda EV, Chevy S10	Potansiyel Gelişme: 120 Wh/kg, 2200 çevrim ömrü
Nikel Kadmiyum	35 - 57	50 - 200	1000 - 2000	Üretimde	300 - 600	110	SAFT	WWU Viking 23	Potansiyel 2200 çevrim ömrü
Lityum İyon	100 - 150	300	400 - 1200	Prototip			SONY, SAFT	Nissan Altera EV	Potansiyel 1000 Wh/kg
Lityum Polimer	100 - 155	100 - 315	400 - 600	Prototip		100			

Çizelge 3.1’de hibrit elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların performans kriterlerine göre karşılaştırılması görülmektedir. Günümüzde, hibrit elektrikli araçların tasarımı ve üretiminde ağırlıklı olarak NiMH ve Li-Ion bataryalar yüksek enerji yoğunluklarından dolayı tercih edilmektedirler. Maliyet olarak henüz istenilen sayıda üretimleri gerçekleştirilemediğinden dolayı dezavantajları olsa da, yakın zamanda bu batarya türlerine olan taleplerin artması ve tümü elektrikli araçların seri üretime geçmesi ile birlikte maliyetlerinin kabul edilebilir seviyelere düşeceği öngörülmektedir. Halen, Lityum batarya türleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Çalışmaların odak noktasında ise kısa sürede şarj edilebilme potansiyeli ve yüksek enerji yoğunluğu kriterleri yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında yüksek enerji yoğunluğu ve güç ihtiyacından ötürü Lityum Polimer batarya tercih edilmiştir. Kokam firmasına ait 70 Ah'lık Lityum Polimer hücrelerin kullanıldığı batarya paketinde toplam 98 adet hücre yer almaktadır. Nominal 3,7 V'luk hücreler ile toplamda 362,6 V'luk bir nominal DC bara gerilimine ulaşılmaktadır. Bu bataryadan deşarj sırasında sürekli olarak maksimum 5C'ye kadar akım çekilmesi mümkündür. Ancak şarj sırasında maksimum izin verilen şarj akımı 2C'dir (Kokam, 2008).

Çizelge 3.2 Kullanılan Lityum Polimer bataryaya ait bilgiler

Batarya Kapasitesi	70Ah
Nominal Gerilim	362.6V
Maksimum Uç Gerilimi (%100 SOC)	406.7V
Minimum Uç Gerilimi (%0 SOC)	333.2V
Azami Şarj Akımı	140A
Azami Sürekli Deşarj Akımı	350A
Azami Anlık Deşarj Akımı	700A
Çevrim Süresi (<%80DOD)	<800 Çevrim

3.2 Elektrik Motoru ve Sürücüsü

Elektrik motorları, bataryalardan sağladığı elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren elektrik makinalarıdır. İçten yanmalı motorlara göre en göze çarpan özelliği, düşük hızlarda yüksek tork üretebilmesidir. Elektrik motorlarının bu karakteristiği, aracın ivmelenme karakteristiğinde de önemli bir artı sağlamaktadır.

Hibrit elektrikli araçların tasarımında elektrik motoru seçimi daha özel bir dikkat gerektiren önemli bir husustur. Otomotiv endüstrisinde günümüzde halen elektrik motorlarının seçimi, avantajları ve dezavantajları konusunda çalışmalar ve iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Bu açıdan bakıldığında HEA uygulamalarında elektrik motoru seçiminde göz önüne alınacak anahtar noktalar verimlilik, güvenilirlik ve maliyettir. Bu noktada elektrik motorlarının seçimi önemli olmakla birlikte, tek başına elektrik motoru yerine tüm sistemin karakteristiği ve sınır değerleri göz önüne alınmalıdır. Hibrit elektrikli araçlarda, elektrik motoru seçiminde göz önüne alınan üç ana faktör sürücü hissiyatı, aracın ihtiyaç duyduğu çekiş gücü ve enerji kaynağıdır.

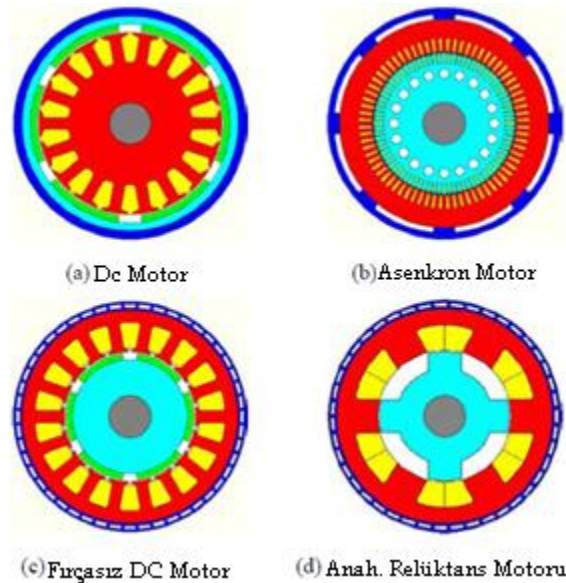
Hibrit elektrikli araçların elektrikli tahrikinde göz önüne alınacak en önemli gereklilikler şunlardır (Zeraoulia vd., 2006):

- Anlık yüksek güç ihtiyacını karşılayabilmesi ve yüksek güç yoğunluğu
- İlk kalkış ve tırmanma kabiliyeti için düşük hızlarda yüksek tork karakteristiği ve seyir halinde yüksek hızlarda yüksek güç karakteristiği

- Sabit tork ve sabit güç bölgelerini içeren geniş hız aralığı
- Tork isteğine karşı hızlı cevap verebilme
- Büyük hız ve tork isteklerinde verimin yüksek olması
- Hibrit elektrikli araçların en önemli artılarından olan geri kazanımlı frenleme için yüksek verim
- Aracın değişik çalışma koşulları için yüksek güvenilirlik ve dayanım özelliği
- Kabul edilebilir maliyettir.

Elektrik motoru seçimi, hibrit elektrikli araçların güç aktarım organlarının dizilişine yani mimarisine bağlıdır. S-HEA tasarımında, içten yanmalı motorun aracın çekişi için mekanik olarak tekerlerle bağlantısı olmadığı için, çekiş işlevini sadece elektrik motoru sağlamaktadır. Buna karşılık, paralel hibrit konfigürasyonda, hibrit yönetim algoritmasına bağlı olarak içten yanmalı motor ve elektrik motoru çekişi değişik oranlarda paylaşmaktadır. Ancak, her durumda elektrik motoru seçilirken, araç modeli ile yapılan benzetimler ve sürüş simülasyonları ile belirlenen en kötü duruma göre elektrik motoru seçimi ve boyutlandırması yapılır. Hibrit elektrikli araçlar ve tümü elektrikli araçlarda tercih edilen ve kullanılan başlıca elektrik motoru çeşitleri şunlardır:

- Doğru akım motorları (DC Motor)
- Asenkron motorlar
- Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (BLDC, PMSM)
- Anahtarlamalı relüktans motorlarıdır (SRM – Switched Reluctance Motor).



Şekil 3.2 Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorları

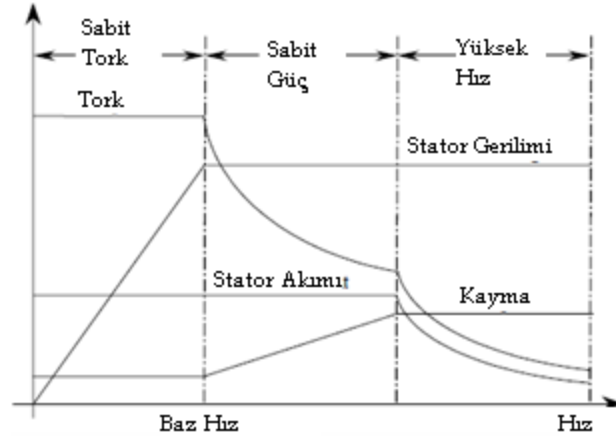
3.2.1 Doğru Akım Motorları

DC motorlar, tork-hız karakteristikleri sebebi ile elektrikli tahrik sistemlerinde en belirgin olarak göze çarpan motorlardır. Tork-hız karakteristikleri bir araçta istenen çekiş ihtiyaçlarını çok iyi bir şekilde karşılamaktadır ve hız kontrolleri oldukça basittir. Ancak, uyarma alanını oluşturmak için enerji tüketilmesinden dolayı verimleri kalıcı mıknatıslı motorlara nazaran daha düşüktür. Ayrıca, rotorda bulunan uyarma sargılarından akım akıtabilmek için kullanılan fırça-kollektör düzeneği DC motorlarda arızaları sıklaştırmakta ve bakım maliyetlerini artırmaktadır. Bahsi geçen bu iki dezavantajdan ötürü bu motorların fiziksel boyutları da rakiplerine göre daha büyüktür. Bu yüzden özellikle yüksek güç/ağırlık oranı tercih edilen elektrikli araç uygulamalarında kontrol kolaylığından dolayı 80'li yılların sonuna kadar kullanılsalarda, daha sonraları yüksek teknolojiye elektrikli araçlarda tercih edilmemeye başlanmıştır. Günümüzde düşük maliyetli golf arabaları, çim biçme arabalarında vs. kullanılmaktadır. Yarıiletken güç elemanları üzerindeki son zamanlarda yaşanan büyük ilerlemeler ile IGBT ve IPM yarıiletken anahtarlama elemanlarının yüksek güçlerde üretilibilmeleri ile birlikte DC motorlar, elektrikli tahrik sistemlerinde yerlerini asenkron motorlara ve fırçasız DC motorlara bırakmışlardır.

3.2.2 Asenkron Motorlar

Sincap kafesli asenkron motorlar, hibrit elektrikli araçların elektrikli tahriğinde, güvenilirlikleri, bakım gerektirmemesi, dayanıklılığı, düşük maliyetleri ve zorlayıcı ortam koşullarında çalışabilme kabiliyetleri ile çok yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Asenkron motorlar, özellikle zorlu ortam şartlarına sahip endüstri ve araç tahrik sistemleri için çok uygundur. Günümüzde asenkron motorlar, kontrolü ve sürüş teknikleri konusunda diğer komütatörsüz motor türleri arasında en olgunlaşmış ve ilerlemiş motor teknolojisidir.

Asenkron motorların araç tahrik sistemlerinde kullanılmaya başlanması gerilim ve frekansın kontrol edilebildiği akıllı EM sürücü sistemlerinin üretilmesiyle mümkün olmuştur. Frekans ve gerilim genliği değiştirilerek asenkron motorlardan DC motorlara benzer tork-hız karakteristikleri elde edilebilmiştir. Asenkron motorlarda, baz hız üzerindeki sabit güç bölgesinde çalışma, alan zayıflatma ile sağlanmaktadır. Böylece sabit güçte motor daha hızlı çalıştırılarak araç yükü karşılanmaktadır. Alan zayıflatma ile aynı güçteki bir motor ile araç daha hızlı sürülebilmektedir.



Şekil 3.3 Asenkron motor tork - hız karakteristiği

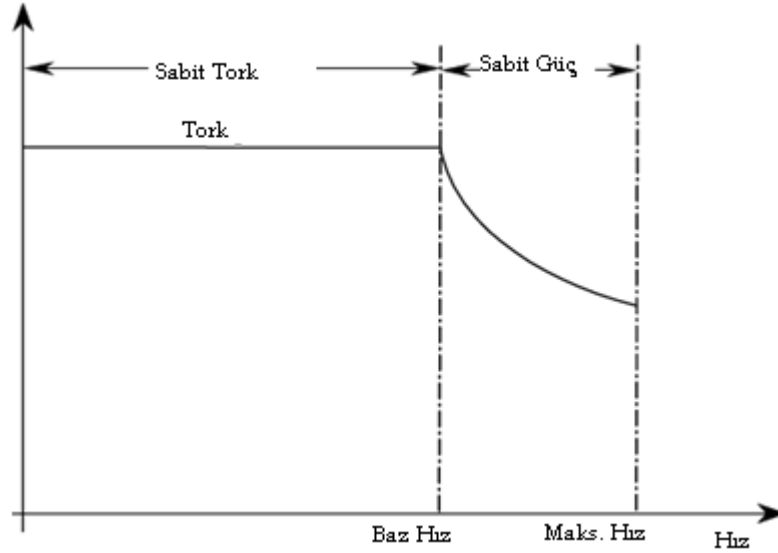
Asenkron motorlar her ne kadar güvenilir ve olgunlaşmış bir teknoloji olsa da rotor çubuklarında endüksiyon ile üretilen alan akımları ile dönebilmektedirler. Kalıcı mıknatıslı motorlarda ise bu uyarma akım akıtılmadan güçlü mıknatıslarla sağlanmaktadır. Dolayısıyla, asenkron motorların rotorlarında daha fazla kayıp olduğundan verimleri kalıcı mıknatıslı motorlara göre daha düşüktür.

3.2.3 Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar

Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları, hibrit elektrikli araç uygulamalarında asenkron motorlar ile birlikte teknolojik olarak yarışan ve HEA uygulamalarında sıkça tercih edilen motor türüdür ve birçok bilinen otomotiv üreticisi tarafından seri üretimde kullanılmak üzere tercih edilmiştir. Fırçasız DC motorları ön plana çıkaran en önemli avantajları;

- Aynı güç değeri için toplam boyutun ve ağırlığının diğer motorlara oranla küçük olması (yüksek güç yoğunluğu)
- Yüksek verimlilik (>%90)
- Çalışma sırasında oluşan ısının kolay bir şekilde yüzeye yayılabilmesi

Ancak, fırçasız DC motorlar sabit mıknatıslı olmasından dolayı sınırlı bir alan zayıflatma bölgesine sahiptir ve dolayısıyla sabit güç bölgesi asenkron motorlara göre daha dardır.

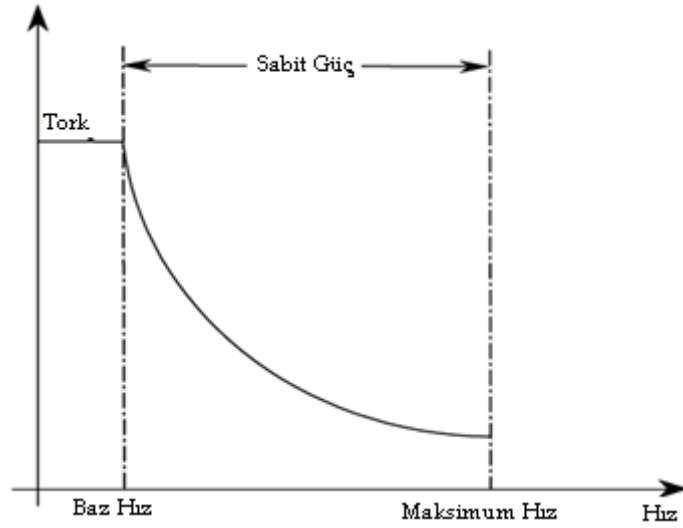


Şekil 3.4 Fırçasız DC motor tork - hız karakteristiği

Fırçasız DC motorlarda, hız aralığının genişletilmesi ve verimliliğin artırılması için, motorun sürüşünü sağlayan eviricideki kontrol algoritmasında, iletim açılarının kontrolü ile baz hızı üzerindeki hız bandı üç ile dört kata kadar artırılabilir. Fakat, çok yüksek hızlara çıktığında verimlilik azalabilmekte ve motorda demagnetizasyon problemleri ortaya çıkabilmektedir.

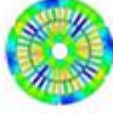
3.2.4 Anahtarlama Reluktans Motoru

Anahtarlama reluktans motorları, HEA uygulamalarında kullanılabilir potansiyeline sahiptir. Basit ve sağlam yapısı, hataya karşı toleranslı oluşu, kontrol kolaylığı ve elektrikli tahrik sistemleri için uygun tork – hız karakteristiği tercih sebebidir. Ancak, tüm bu avantajlarının yanında bazı durumlarda avantajlarının önüne geçebilecek bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Akustik gürültü problemi, tork dalgalanmaları, özel konverter mimarisi gerekliliği, kaynak tarafından çekilen akımdaki aşırı dalgalanma ve elektromanyetik girişim (EMI) problemleri bunlardan bazılarıdır. Yukarıda bahsedilen tüm bu avantaj ve dezavantajlar araç uygulamalarında oldukça kritik noktalardır. SRM tabanlı HEA uygulamaları için kabul edilebilir çözümler gerekmektedir. Tüm bunlara rağmen anahtarlama reluktans motorları, hafif ve ağır HEA uygulamalarında, özellikle askeri uygulamalarda kullanılabilir.



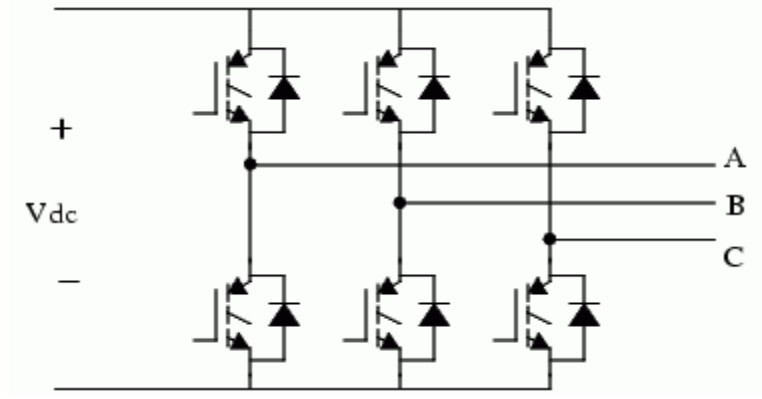
Şekil 3.5 Anahtarlamalı relüktans motoru tork - hız karakteristiği

Genel olarak yukarıda bahsedilen motor türleri arasında güç yoğunlukları, verim, kontrol kolaylığı, güvenilirlik, teknolojik olgunluk ve maliyet açısından Şekil 3.6'daki gibi bir karşılaştırma yapılabilir (Puanlama ilgili karakteristik için en yüksek puan 5 olacak şekilde yapılmıştır.) (Zeraoulia vd., 2006).

Tahrik Sistemi				
Karakteristik	DAM	ASM	KMSM	ARM
Güç Yoğunluğu	2.5	3.5	5	3.5
Verimlilik	2.5	3.5	5	3.5
Kontrol Kolaylığı	5	5	4	3
Güvenilirlik	3	5	4	5
Teknolojik Durum	5	5	4	4
Maliyet	4	5	3	4
Σ Toplam	 22	 27	 25	 23

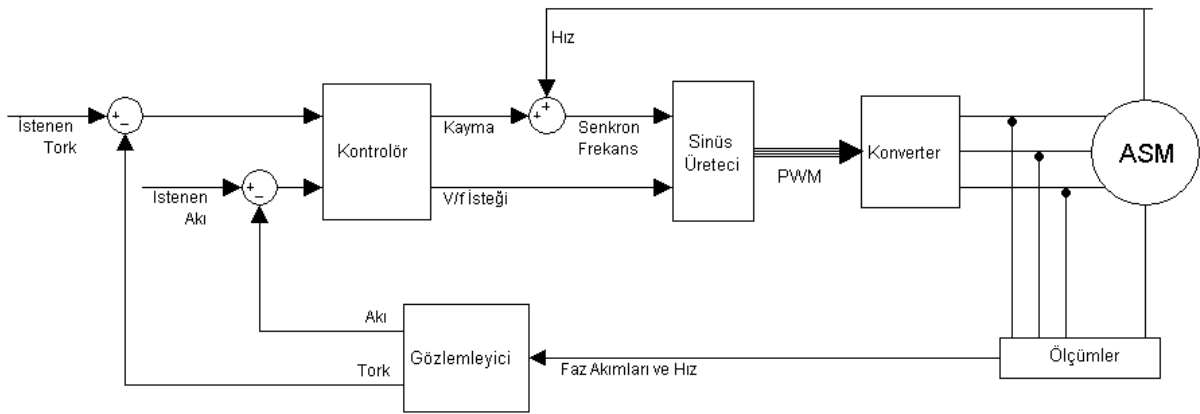
Şekil 3.6 Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarının seçim kriterleri

Yukarıda bahsi geçen tüm motor türleri için, bataryadan alınan DC gerilimin, kullanılan elektrik motoru için anlamlı anahtarlama paternlerine dönüştürülmesi için yüksek anahtarlama frekansına sahip eviriciler kullanılmaktadır. Günümüzde yaygın olarak IGBT'li ve IPM'li, üç-fazlı eviriciler kullanılmaktadır.



Şekil 3.7 Üç fazlı IGBT'li evirici

Elektrik motoru sürücülerinin, kabiliyetine göre hız, tork ve jeneratör olarak kullanım için motor kontrol modları bulunmaktadır. Otomobil uygulamalarında, kontrol açısından ana faktör tork olduğundan, motor kontrolünde her zaman tork kontrolü esastır.



Şekil 3.8 Evirici kapalı çevrim tork kontrolü prensip şeması

Bu tez çalışmasında, hibrit dönüşümü yapılan araçta UQM firmasına ait 150 kW anlık güç, 100 kW sürekli güç değerine sahip fırçasız DC elektrik motoru ve sürücüsü tercih edilmiştir. Su soğutmalı tasarımı ile küçük boyutlarda yüksek güç yoğunluğu sağlamaktadır. Jeneratör seti ve araç çekişinde kullanılmak üzere toplam 2 adet elektrik motoru sürücüsü-motor seti için 2 ayrı soğutma sistemi araç üzerine monte edilmiştir.

Çizelge 3.3'de, araçta kullanılan elektrik motoru ve sürücülerine ait bilgiler yer almaktadır (UQM, 2008):

Çizelge 3.3 Kullanılan elektrik motoru ve sürücüsünün özellikleri

Anlık Motor Gücü	150kW
Sürekli Motor Gücü	100kW
Anlık Motor Torku	650Nm
Sürekli Motor Torku	400Nm
Anlık Rejeneratif Güç	150kW
Sürekli Rejeneratif Güç	100kW
Anlık Rejeneratif Motor Torku	650Nm
Sürekli Rejeneratif Tork	400Nm
Maksimum Motor Hızı	5000RPM
Güç Yoğunluğu	1.65kW/kg
Nominal Giriş Voltajı Aralığı	320-376VDC
Çalışma Giriş Voltajı Aralığı	300-420VDC
Minimum Gerilim Limiti	240VDC
Maksimum Girişi Akımı	550A
EM Sürücü Tipi	PWM Kontrollü, 3-faz fırçasız DC Motor Sürücüsü
Güç Katı Metodolojisi	3*IGBT'li Yarım Köprü
Anahtarlama Frekansı	12.5kHz
EM Sürücü Kontrol İşlemcisi	Texas Instruments 2812 Sabit Noktalı İşlemci
İşlemci Nominal Giriş Gerilimi	12VDC (Dahili besleme seçeneği)
İşlemci Besleme Aralığı	8-15VDC
İşlemci Giriş Akım Aralığı	0.3-0.5A
İşlemci Uyku Modu Güç Tüketimi	17W
Kontrol Elektroniği Özellikleri	RS232 haberleşme, CAN uyumluluğu, hata tanılama yazılımı, dijital kontrol sinyalleri, yazılım kontrollü 4-bölgeli çalışma, sıcaklık algılama / alarm, hız algılama, IGBT anahtarlama, batarya yönetimi için işletim konfigürasyonu, tork-hız-voltaj kontrol seçenekleri, rejeneratif frenleme seçeneği

3.3 Hibrit Kontrol Ünitesi

Hibrit kontrol ünitesi (HKÜ), hibrit araçlarda elektriksel sistem alt komponentleri ile aracın elektronik kontrol ünitesini senkronize bir şekilde takip ederek, tüm sistemden topladığı ham veriyi işleyip kontrol algoritması doğrultusunda gerekli çıkış sinyallerini üreten, sistemin ana yöneticisi konumundaki birimdir.

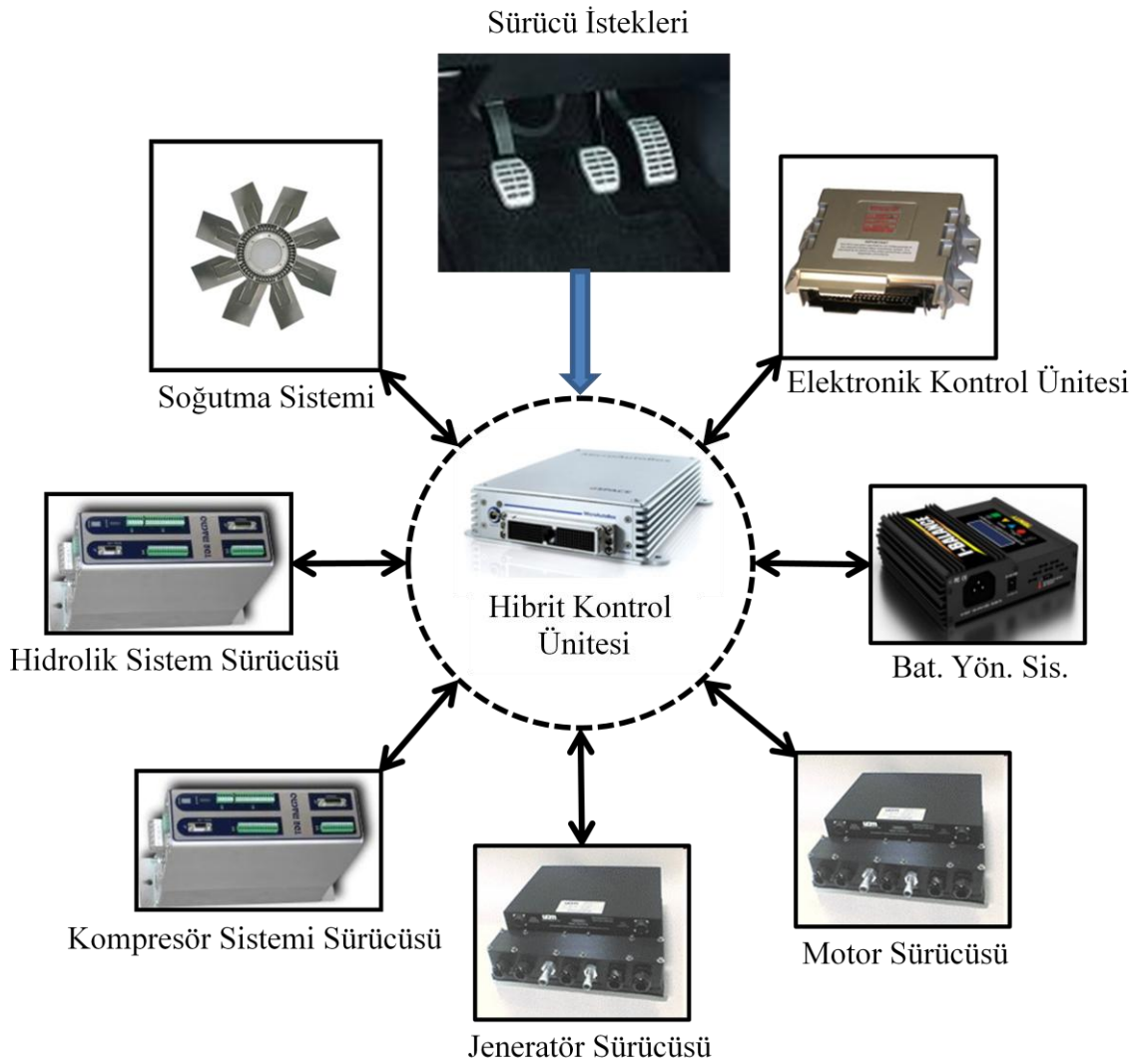
Hibrit kontrol ünitesinin hibrit elektirikli araç üzerinden topladığı, yorumladığı ve alt sistemlere gönderdiği temel sinyaller:

- Sürücünden gelen hızlanma, frenleme istekleri ile içten yanmalı motora gönderilen gaz

referansı

- Bataryaya ait akım, gerilim, SOC, SOH, hata / uyarı mesajları ile bataryaya gönderilen kontaktör aç/kapa ve uyandırma sinyalleri
- EM ve GENSET'e ait sürücülerin akım, gerilim, tork, hız geri beslemeleri, sıcaklık, hata/uyarı mesajları ile sürücülere gönderilen referans bilgileri
- Kompresör ve hidrolik alt sistemleri için aç/kapa sinyalleri ile hız referans bilgisi
- Araç elektronik kontrol ünitesinden alınan araç hızı, İYM hızı ile gaz pedalı geri besleme bilgileridir.

HKÜ, araç üzerindeki tüm bu alt sistemlerden bilgileri toplarken, donanımında mevcut bulunan dijital ve analog giriş çıkış birimleri ile haberleşme ağına bağlanabilmesi için CAN birimi kullanılır.



Şekil 3.9 Hibrit kontrol ünitesi sistem haberleşme ve yönetim diyagramı

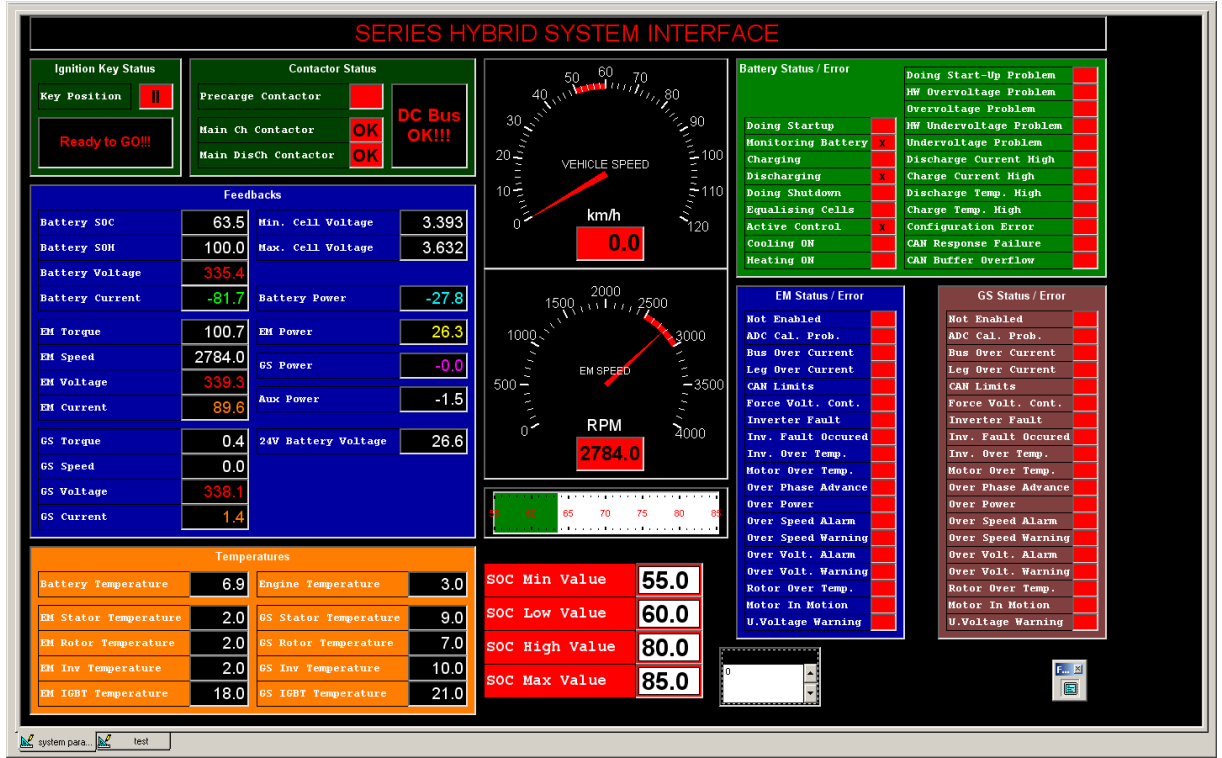
Bu tez çalışmasında, dSPACE firmasına ait dSPACE MicroAutoBox1401 ürünü, güvenilirliği ve otomotiv alanındaki araştırmalarda sıkça kullanılır olmasından dolayı aracın hibrit kontrol ünitesi olarak tercih edilmiştir.

Çizelge 3.4’de dSPACE MicroAutoBox1401’e ait donanım özellikleri yer almaktadır (dSPACE, 2008).

Çizelge 3.4 dSPACE MicroAutoBox1401 donanım özellikleri

Kontrol Ünitesi	dSPACE MicroAutoBox1401
İşlemci	IBM PPC 750FX, 800 MHz
Bellek	Bilgisayar haberleşmesi için ayrılmış 4MB bellek 16MB flash bellek
Arayüzler	2 x CAN portu 1 x RS232 portu 1 x LIN portu olarak kullanılabilecek seri arayüz EKÜ haberleşmesi için dual port 16Kx16bit DPRAM
Analog	16 x 12-bit çözünürlüklü ADC (0-5V) 8 x 12-bit çözünürlüklü DAC (0-4.5V, her kanal için azami 5mA)
Dijital	16 x bağımsız dijital giriş 10 x bağımsız dijital çıkış 16 x pin paylaşımlı, konfigüre edilebilir dijital giriş/çıkış 16 x TPU kanalı (EKÜ simülasyonları için)
Güç Tüketimi	Azami. 20 W
Besleme Gerilimi	6 ... 40 V geniş giriş gerilim aralığı (aşırı gerilim ve ters polarizasyon korumaları ile)

dSPACE firmasına ait birçok üründe olduğu gibi, MicroAutoBox1401 ürününde de, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan modele, dSPACE’in donanım özelliklerini kullanmak için dSPACE’e ait Simulink blokları eklenerek, MATLAB ortamında derlenerek ürettirilen kod dSPACE haberleşme arayüzü üzerinden yüklenerek, gerçek zamanlı olarak kod çalıştırılabilmektedir. Derlenip flash ya da RAM’a yazılan kodun işletilmesi sırasında, prototiplendirme ve ön tasarım test aşamalarında dSPACE firmasının geliştirdiği ControlDesk programı kullanılmaktadır. Oluşturulan giriş, çıkış, grafik arayüzleri ile gerçek zamanlı olarak sistemde giriş olarak tanımlanmış verilerin değerleri değiştirilebilmekte ve yine veri toplama amacı ile kullanılabilmektedir.

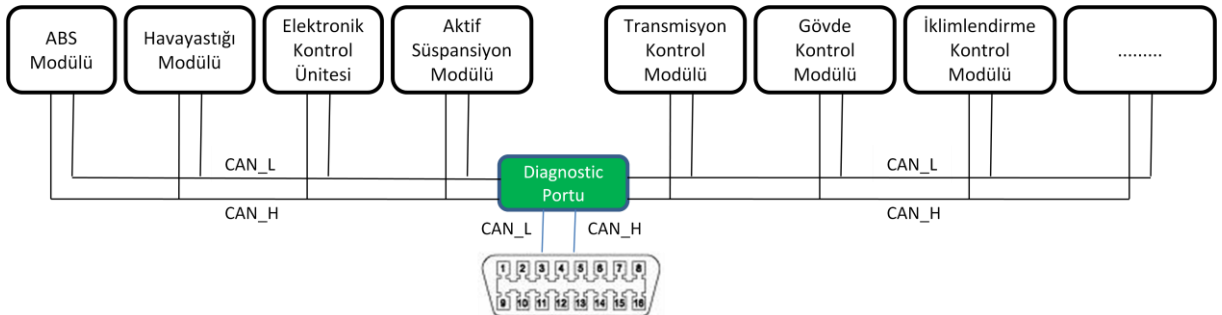


Şekil 3.10 dSPACE ControlDesk programı ekran görünümü

Şekil 3.10’da tez çalışmaları sırasında ControlDesk programı ile oluşturulan örnek ekran görüntüleri yer almaktadır.

3.4 CAN Protokolü

CAN, 1980’li yılların başlarında özellikle otomotiv uygulamaları için Robert Bosch GMBH tarafından geliştirilmiş bir seri haberleşme protokolüdür. 1993 yılında uluslararası olarak ISO 11898-1 ile standartlaştırılmıştır. Daha sonra A.B.D.’de, özellikle ağır vasıta araçlarında haberleşme ve hata analizlerine yönelik olarak SAE tarafından J1939 adı altında standart mesaj kimlikleri ve mesajları belirlenmiştir.



Şekil 3.11 Otomotiv uygulamalarında CAN kullanımı

Otomotiv üzerinde esas olarak en üstte yönetici konumunda yer alan EKÜ’nin yanında transmisyon, hava yastıkları, fren sistemleri ve sabit hız kontrolcüler gibi gelişmiş kontrol

üniteleri de yer almaktadır (Şekil 3.11). Tüm bu alt sistemler, araç üzerinde kullanılan sensörlerdeki bilgilere ihtiyaç duymaktadır. Bu amaca yönelik olarak, ortak bir ağ yapısı üzerinde tüm kontrol ünitelerinin birleştirilmesi ve ihtiyaç duyulan bilgilerin aynı ağ üzerinden alınabilmesi sağlanmıştır.

CAN protokolünün fiziksel katmanındaki bağlantı yapısı ve pin tanımlamaları Çizelge 3.5'deki gibidir.

Çizelge 3.5 CAN fiziksel pin tanımlamaları

DB-9 Pin#	Sinyal Adı	Sinyal Açıklaması
1	Rezerv	-
2	CAN_L	Dominant uç (Low)
3	CAN_GND	Hat Toprağı
4	Rezerv	-
5	CAN_Shield	Ekranlama(Opsiyonel)
6	GND	Toprak(Opsiyonel)
7	CAN_H	Resesif uç(High)
8	Rezerv	-
9	CAN_V+	CAN Besleme(Opsiyonel)

Genellikle CAN konnektörü olarak DB-9 konnektörü tercih edilmektedir. Diferansiyel işaretler ile taşınan mesajlar, ekranlı bir kablo ile desteklenerek, EMI gürültülerinden minimum seviyede etkilenmektedir.

Çerçeve Baş.	Kimlik Tanımlama Alanı	Kontrol Alanı	Veri Alanı	CRC Alanı	Onay Alanı	Çerçeve Sonu	Pakerler Arası Boşluk
1 Bit	12/32 Bit	6 Bit	0-8 Byte	16 Bit	2 Bit	7 Bit	3 Bit

Şekil 3.12 CAN protokolü genel mesaj paket yapısı

- **Çerçeve Başlangıcı (SOF - Start Of Frame):**

Mesajlaşma başlamadan önce ağa giriş yapan ilk sinyaldir. Bekleme durumunda olan ağa dominant olarak giriş yapar ve hatta mesajlaşmanın başlayacağına ilişkin tetik niteliğindedir. Bu şekilde ağa mesaj yollayacak düğümün, hat ile senkronizasyonunun yapıldığı alandır. Bu bölümde senkronizasyonu tamamlayan gönderici düğüm, bu alandan sonra mesaj gönderme işlemine başlar.

- **Kimlik Tanımlama (Arbitration) Alanı:**

CAN protokolü CAN2.0A ve CAN2.0B olmak üzere ikiye ayrılır. CAN2.0A(Standart) da

mesaj kimlikleri(ID) 11-bit uzunluktadır ve toplamda 2^{11} adet farklı mesaj kimliği tanımlanabilmektedir. CAN2.0B’de (Extended CAN – Genişletilmiş CAN) ise mesaj kimliği genişletilmiş ve toplam 29-bit uzunluktadır. Genişletilmiş CAN protokolünde ise toplam 2^{29} adet farklı mesaj kimliği tanımlanabilmektedir.

Standart formatta kimlik(ID) uzunluğu 11-bittir ve Genişletilmiş(Extended) formattaki temel kimlik(Base ID) alanına karşılık gelmektedir. Standart formatta kimlik alanını RTR biti takip eder. Veri formatında RTR biti dominanttır. Mesaj talep formatında(Remote Request) ise RTR biti resesiftir. Standart formatta ID’yi takip eden IDE biti dominanttır. Genişletilmiş formatta ise kimlik tanımlama alanında yer alan IDE biti resesiftir. IDE biti, hatta iletilen mesajın standart formattamı yoksa genişletilmiş formattamı olduğunu belirler. Bu şekilde alıcılar tarafından gönderilen mesaj, o formata göre alanlarına ayrılarak çözülür. Genişletilmiş formatta yer alan SRR(Substitute Remote Request) biti ise konum olarak standart formattaki RTR bitine vekillik eder ve resesif olarak gönderilir. Genişletilmiş formatta ikinci kısım 18-bitlik genişletilmiş ID alanıdır.

STANDART MESAJ FORMATI

	Kimlik Tanımlama Alanı			Kontrol Alanı		Veri Alanı
SOF	11 bit ID	RTR	IDE	r0	DLC	

GENİŞLETİLMİŞ MESAJ FORMATI

	Kimlik Tanımlama Alanı					Kontrol Alanı		
SOF	11 bit ID	SRR	IDE	18 bit ID	RTR	r1	r0	DLC

Şekil 3.13 CAN mesaj paketi kimlik tanımlama alanı

- **Kontrol Alanı:**

Kontrol alanı mesajın standart formattamı yoksa genişletilmiş formattamı olduğunu belirleyen IDE biti, rezerve olarak ayrılmış r0 biti ve mesaj veri uzunluğunu ifade eden DLC bloğundan oluşur. Genişletilmiş formatta ise IDE biti arbitration alanına kaymıştır ve bu formatta kontrol alanı r0 ve r1 olmak üzere rezerve bitler ve yine aynı şekilde DLC bloğundan oluşur. r0 biti standart formatta dominant olarak iletilirken, genişletilmiş formatta resesif ya da dominant olarak iletilir. DLC bloğu , bu bloğu takip eden veri alanındaki mesajın kaç Byte uzunlukta olacağını belirler.

RTR	IDE/r1	r0	DLC3	DLC2	DLC1	DLC0	Veri/CRC
		Bayt Sayısı	Veri Uzunluk Kodu(DLC)				
			DLC3	DLC2	DLC1	DLC0	d - dominant r - resesif
		0	d	d	d	D	
		1	d	d	d	R	
		2	d	d	r	D	
		3	d	d	r	R	
		4	d	r	d	D	
		5	d	r	d	R	
		6	d	r	r	D	
		7	d	r	r	R	
		8	r	d/r	d/r	d/r	

Şekil 3.14 CAN mesaj paketi kontrol alanı ve DLC tablosu

- Veri Alanı:**

İki işlemci arasında taşınmak istenen veriyi içeren bloktur. Toplam 8-Byte'a kadar veri içerebilmektedir. Bu 8 Byte çeşitli veriler için bölünerek, 1 paket içerisinde birden fazla mesaj taşınabilir. Mesajlara ait ID ve veri formatı bilindikten sonra, alıcı tarafından ters çözümleme ile mesaj içerisinden istenen veri çekilebilmektedir.

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Minimum veri alanı uzunluğu = 0 Byte

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Maksimum veri alanı uzunluğu = 8 Byte

Şekil 3.15 CAN mesaj paketi veri alanı

- CRC Alanı:**

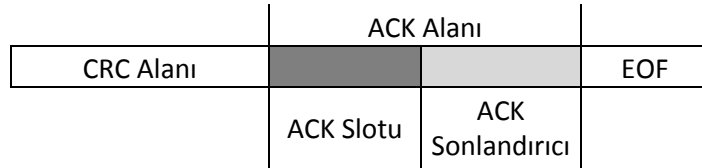
CRC alanında ağ içerisinde taşınan mesaj paketinde oluşan hatalar sayılır. Mesajların iletimi sonunda toplam hata sayısı 127'i aştığında en son CRC sonlandırıcısındaki alan bir olacağından, hattaki hata sınırına erişilmesi ile gerekli düzenlemeler yapılmaktadır.

15-Bit CRC Sıralaması	1 Bit
CRC Alanı	CRC Sonlandırıcı

Şekil 3.16 CAN mesaj paketi CRC alanı

- **Onaylama Alanı:**

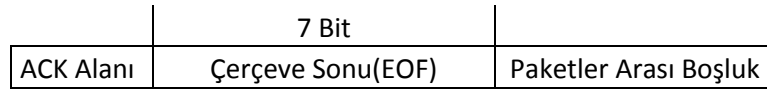
Onaylama alanı, onay slotu ve onay sonlandırıcısı olmak üzere iki bitten oluşmaktadır. Mesajı gönderen düğüm, mesajla beraber onaylama alanındaki bu iki biti de resesif olarak gönderir. Mesajı düzgün bir şekilde alıp okuyan alıcı taraf, onay slotunun iletimi esnasında gönderen tarafa dominant bir bit gönderir. Gönderen taraf bu şekilde dominant biti onay slotu gönderimi sırasında gördüğünde, ağ içerisindeki en az bir düğümün bu mesajı doğru olarak aldığını anlar.



Şekil 3.17 CAN mesaj paketi onaylama alanı

- **Çerçeve Sonu (EOF - End Of Frame):**

Herbir veri ve uzaktan istek (Remote Request) mesaj paketi, 7 resesif bitten oluşan bayrak sırası ile sonlandırılır. Ve bu şekilde bir CAN mesaj paketi sonlandırılmış olur.



Şekil 3.18 CAN mesaj paketi çerçeve sonu alanı

4. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MODELLENMESİ

Hibrit elektrikli araçlar modellenirken, ya mevcut aracın modeli kurularak yardımcı enerji kaynağı ve donanımları ile hibrite dönüştürülür, ya da araç önceden belirlenen konfigürasyona göre hibrit olarak baştan modellenir. Bir hibrit elektrikli araç tasarlanırken gözönüne alınması gereken kriterler aşağıdaki gibidir.

- Yakıt ekonomisi
- Düşük emisyon
- Düşük maliyet
- Bakım masraflarının asgari olması
- Sürüş konforu ve yüksek sürüş performansı
- Güvenilirlik

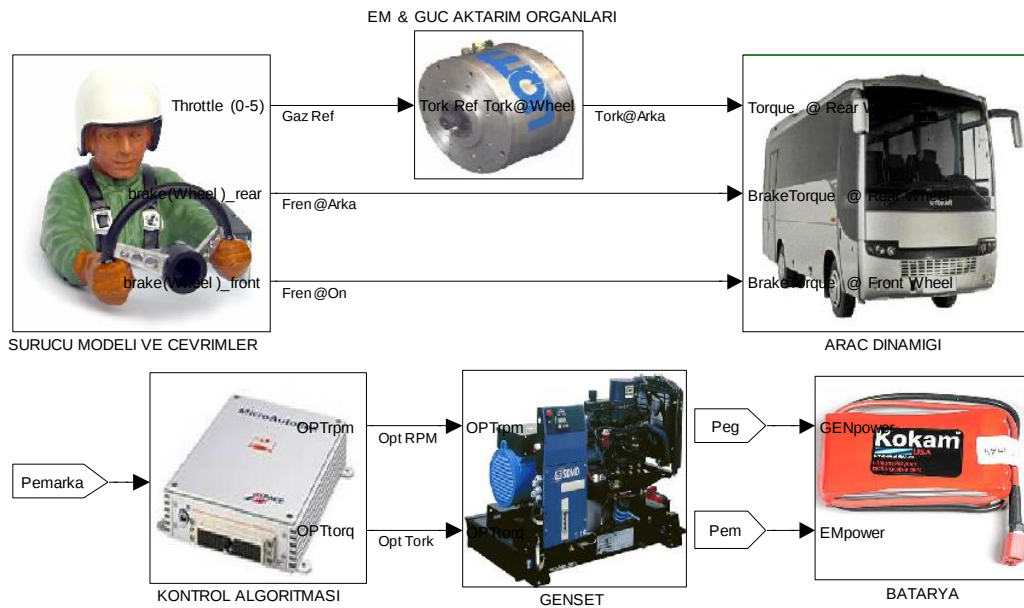
Aracın tasarımı en başından yapılıyor ise, güç organlarının dizilişleri ve birbirlerine mekanik bağlantı şekilleri, batarya, elektrik motoru ve içten yanmalı motorun boyutlandırılması çalışmalarında çeşitli optimizasyon çalışmaları yürütülmelidir. Tasarımı yapılacak hibrit araçta bileşenlerin seçimi ve güç yönetim stratejileri çalışılırken gözönünde bulundurulması gereken bazı hususlar aşağıda sıralanmıştır.

- Öncelikle, tasarımı yapılacak olan hibrit araç, en azından konvensiyonel araçta sağlanan minimum performans değerlerini sağlamalıdır.
- İçten yanmalı motor, dinamik yüklere karşılık çalıştığı geçiş bölgelerinde çok daha fazla yakıt tüketimi ve emisyonu sebep olmaktadır. Dolayısıyla içten yanmalı motor bu noktalarda mümkün olduğu kadar az çalıştırılmalıdır.
- Batarya teknolojisinin içinde bulunduğu mevcut durum gözönüne alındığında, batarya ömrü bataryanın kullanım şekline göre değişmektedir. Batarya ömrünü kısaltacak anlık kullanımlardan kaçınılmalı ve batarya yönetim stratejisi ile ömrü maksimize edecek bir kontrol metodolojisi uygulanmalıdır. Bu kontrol metodolojisi uygulanırken, batarya üreticisi tarafından verilen parametrelere uygun olarak batarya sıcaklığı, ortam sıcaklığı, güvenli çalışma için izin verilen maksimum şarj ve deşarj akımları ile batarya şarj derinliği mutlak suretle dikkate alınmalıdır.
- İçten yanmalı motor verimi açısından bakıldığında, konfigürasyona bağlı olarak eğer içten yanmalı motorun durdurulması düşünülüyorsa, katalitik konvertör ve motor sıcaklıkları dikkate alınmalıdır. Bilindiği üzere, içten yanmalı motorlar soğuk çalışma sırasında normalden çok daha fazla yakıt tüketimine neden olmaktadır.

Hibrit elektrikli araçlarda esas, güç aktarım organlarının maksimum verimli olduğu noktalarda çalıştırılması olduğundan, öncelikle standartlarca kabul görmüş ve o araç klasmanına ait çevrim için aracın güç ihtiyaçları belirlenmelidir. Bu amaca yönelik olarak, simülasyon ortamında aracın boyuna araç modeli kurularak, güç ve güç aktarma organlarının davranışları incelenerek komponentlerin boyutlandırılması işlemi yapılır.

Boyuna araç modeli oluşturulurken, komponent boyutlandırması için geri akışlı, tasarımı yapılan aracın performans sonuçlarının gözlenmesi içinde ileri akışlı araç modeli kullanılmaktadır. Geri akışlı araç modeli ile, belirlenen çevrim için hız profili belirli olduğundan, bu hız profiline karşılık gelen araç yüklerinin hesaplanması ile, tekerlekten başlayarak güç aktarma organlarının çevrimlerinden geçerek güç organlarının sağlaması gereken tork ve hız değerleri belirlenebilmektedir. Tork ve hız değerleri belirlendikten sonra, temel güç denklemleri kullanılarak aracın elektriksel güç ihtiyacı, enerji ihtiyacı ve kullanılacak batarya için akım değerleri hesaplanabilmektedir.

Komponentlerin geri akışlı araç modeli ile boyutlandırılmasının ardından, ya kullanılacak komponentlerin modellenmesi ile ya da bu komponentlere ilişkin tork-hız, gerilim-şarj v.b. tablolarından faydalanılarak ileri akışlı araç modeli üzerinde yerleşimleri yapılabilmektedir. Bu modelde mutlaka güç sistemlerini kumanda edecek bir sürücü modeli yer almaktadır. Sürücü genellikle oransal-integral (PI) kontrolör kullanılarak modellenmektedir. Sürücü modeli, girilen çevrime karşılık hız profilini takip edebilmek amacıyla, model içerisinde gaz, fren ve kavrama pedallarını kontrol ederek, gerçekleşen hız ile profildeki hız arasındaki hatayı minimum seviyede tutmaya çalışmaktadır.



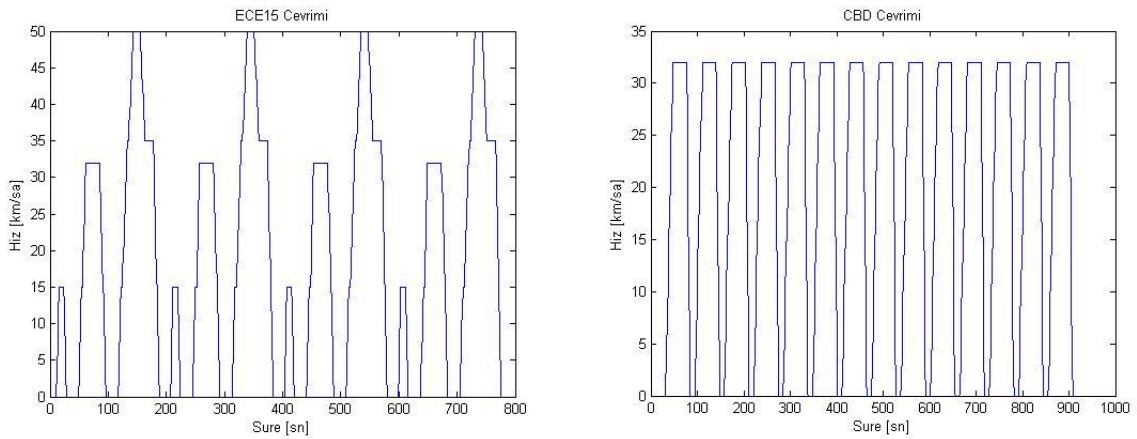
Şekil 4.1 Seri hibrit elektrikli araç MATLAB/Simulink modeli

Tez kapsamında, aracın geri akış hesapları ile komponent boyutlandırmaları yapılmış ve MATLAB/Simulink’de ileri akış modeli kurularak araç performansı, verimler, yakıt tüketimi bilgisi ve verilen çevrim için komponentlerin güç, akım, gerilim, tork ve hız verileri elde edilmiştir.

Araç modelinde kullanılan denklem ve yöntemler aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır. Model içerisinde içten yanmalı motor, elektrik motoru ve batarya için üreticilerin sağladığı tablolardan elde edilen haritalar kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan sürüş çevrimi için hız profiline karşılık gelen yol yükleri, bu yükleri oluşturan yuvarlanma direnci, aero-dinamik direnç, yokuş direnci ve ivmelenme direnci denklemleri ile elde edilmiştir.

4.1 Sürüş Çevrimleri

Aracın aynı yol şartlarında yakıt tüketim ve salınan zararlı gaz miktarlarını karşılaştırmak amacı ile standartlarda yer alan sürüş çevrimleri kullanılmaktadır. Tüm motor üreticileri ve araç üreticileri, araçlar ile ilgili hızlanma ve yakıt tüketimi gibi verileri bu sürüş çevrimlerine göre vermektedirler ve karşılaştırmalar aynı sürüş çevrimi için yapılmaktadır. Aracın modellenmesinde, Avrupa’da geçerli olan ECE ve otobüsler için kullanılan CBD çevrimleri kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları bu çevrimlere göre verilmiştir.



Şekil 4.2 ECE15 ve CBD çevrimleri

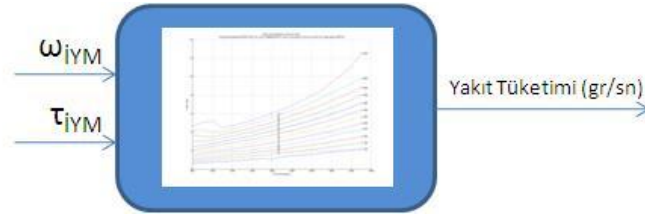
4.2 İçten Yanmalı Motor Modeli

İçten yanmalı motorlar, petrol türevi yakıtların yakıcı ile yanma odasında yakılması sonucunda elde edilen enerji ile hareket sağlayan yapılardır. İçten yanmalı motorlar basitçe tork, yakıt tüketimi ve emisyon değerleri için haritalar ile modellenmiştir. Gerçek bir araçta, içten yanmalı motorun torku, gaz pedalı açıklığı, motor hızı ve vitese göre hesaplanmaktadır. Ancak oluşturulan modelde içten yanmalı motorun karşısına elektrik motoru monte edilerek bir jeneratör seri oluşturulmuştur. Dolayısıyla model içerisinde İYM için tork çıkarım haritası

kullanmak gerekmemektedir. Sadece karşısına monte edilmiş elektrik motoru üzerinden tork isteği girilerek, İYM üzerinde hız kontrolü yapılmaktadır.

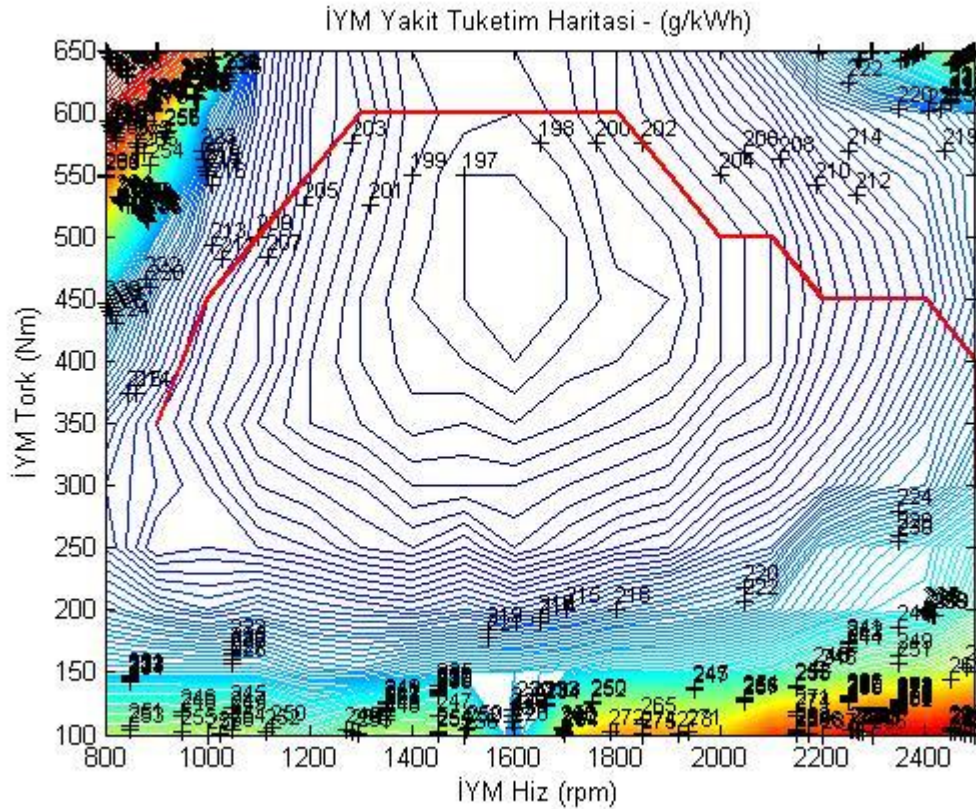
Model üzerinde yakıt tüketim karşılaştırması yapmak için yakıt tüketim haritası kullanılmaktadır. Bloğa giriş olarak o andaki tork ve hız bilgisi girmekte, ve hesaplamalar sonucunda bloktan simülasyon zamanı boyunca yakıt tüketimi, 100 km'deki yakıt tüketimi değerleri elde edilmektedir.

İçten yanmalı motora ilişkin model Şekil 4.3'te blok olarak görülmektedir.



Şekil 4.3 İçten yanmalı motor modeli

Simülasyon süresince içten yanmalı motorun çalıştığı verim değeri direk olarak yakıt tüketim haritası kullanılarak hesaplanabilir. Bunun için, içten yanmalı motora için çıkışında elde edilen gücün girişte yakıttan elde edilen güce oranını bulmak, bize içten yanmalı motorun verimini verir. Modelleme ve simülasyonda anlık geçici durum değerleri ihmal edilmektedir.



Şekil 4.4 İYM yakıt tüketim haritası

Şekil 4.4'te içten yanmalı motora ilişkin yakıt tüketim haritası yer almaktadır. Her bir tork ve hız noktası için içten yanmalı motorun verimi şu şekilde hesaplanabilir:

$$\eta_{iYM} = \frac{\tau_{iYM} \omega_{iYM}}{YT_{iYM} EY_{yakıt}} \quad (4.1)$$

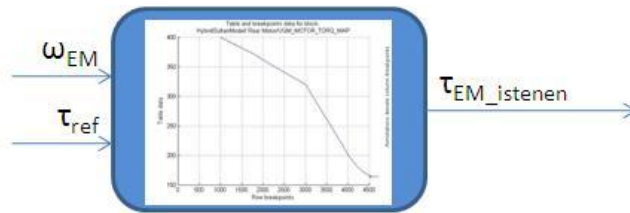
Burada $EY_{yakıt}$ [Watt.sn/gr] yakıtın enerji yoğunluğu, YT_{iYM} [gr/sn] anlık toplam yakıt tüketimini, τ_{iYM} [N.m] içten yanmalı motorun çıkış torkunu, ω_{iYM} [rad/sn] içten yanmalı motorun açısal hızını ve η_{iYM} içten yanmalı motorun verimini ifade eder.

4.3 Elektrik Motoru Modeli

Elektrik motoru, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren elektrik makinasıdır. Aynı şekilde jeneratör modunda kullanılarak, mekanik enerjiden elektrik enerjisi elde etmekte mümkündür.

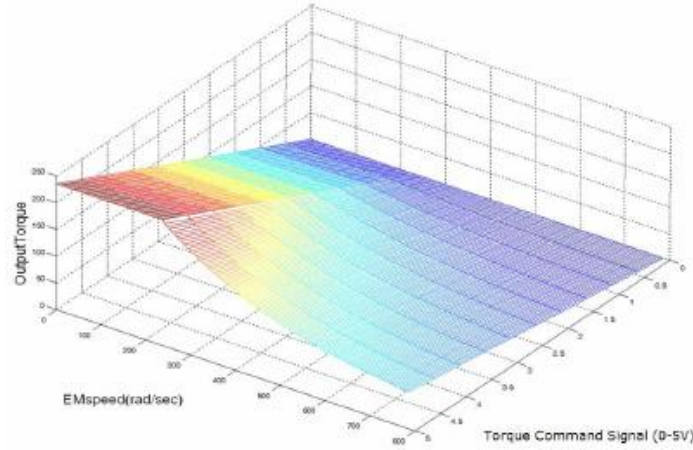
Seri hibrit elektrikli araç modellemesi yapılırken sistemde mevcut bulunan 2 adet elektrik motorundan biri İYM ile birlikte jeneratör seti (GENSET) görevi görmektedir. İYM üzerinde hız kontrolü ile elektrik motoruna tork kontrolü yapılarak, jeneratör setinin istenen güçlerde ve verimlerde çalışması sağlanmaktadır. Diğer taraftan, aracın çekişi için kullanılan ikinci elektrik motoru üzerinde sadece tork kontrolü ile aracın çekişi sağlanmaktadır.

Elektrik motorlarının modellenmesinde iki harita kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi elektrik motoruna ait tork haritasıdır. Bu blok, giriş olarak elektrik motoru hızı ve tork referansı bilgilerini kullanırken, çıkış olarak o hız için elektrik motorunun sağlayabileceği tork değerini verir (Şekil 4.5). Tork referans bilgisi, elektrik motoru sürücüsünün özelliklerine bağlı olarak analog referans ya da varsa CAN mesajı olarak gönderilebilir.



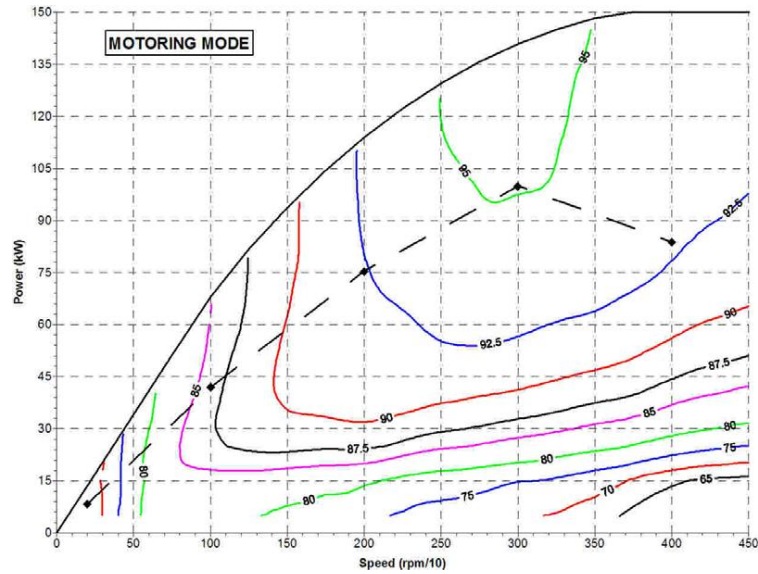
Şekil 4.5 Elektrik motoru modeli

Elektrik motoru üzerinde kullanılan tork-hız haritası Şekil 4.6'da görülmektedir. Direk analog olarak ya da CAN üzerinden gönderilen sinyal, elektrik motoru tarafından analog olarak işlenerek, maksimum tork haritası üzerinden ölçeklenmekte ve çıkış torku için referans üretilmektedir. Faz akımları üzerinden tork bilgisi hesaplanarak, kapalı çevrim tork geri beslemesi ile sürücü içerisinde yer alan gömülü işlemci tarafından tork kontrolü yapılmaktadır.



Şekil 4.6 Elektrik motoru tork-hız haritası

Elektrik motoru modelinde kullanılan diğer harita ise verim haritasıdır (Şekil 4.7). Giriş olarak elektrik motoru hızı ve elektrik motoru torkunu kullanmakta, çıkış olarak elektrik motoru verimini üretmektedir. Jeneratör ve elektrik motoru olarak kullanılan her iki motorda aynı olmakla birlikte, birisi jeneratör modunda, diğeri elektrik motoru modunda kullanılmaktadır. Bu nedenle, modelleme yapılırken üretici tarafından sağlanan motor ve jeneratör mod haritaları verim açısından ayrı ayrı ele alınmaktadır (UQM, 2008).

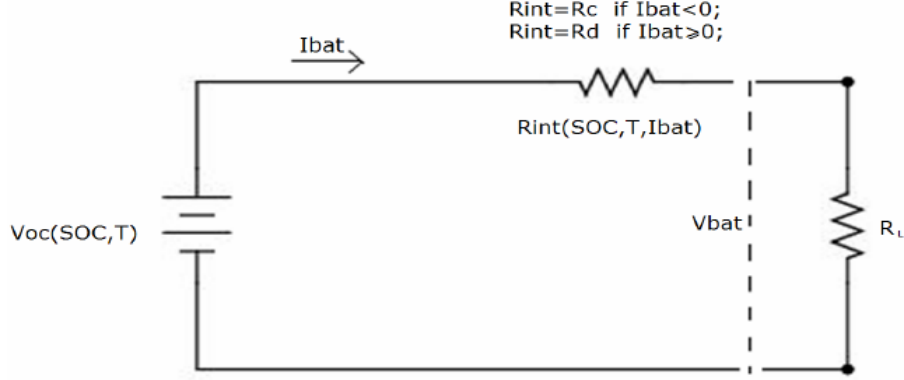


Şekil 4.7 Elektrik motoru verim haritası

4.4 Batarya Modeli

Batarya modülü, hibrit elektrikli araçta kullanılan ana komponentlerden biridir. Batarya, çekiş yapan elektrik motorları için tek enerji kaynağıdır. Jeneratör seti üzerinde mekanik enerjiden elektrik enerjisine dönüştürülen enerji ve frenleme sırasındaki rejeneratif frenleme enerjisi bataryada depolanır.

Bataryanın modellenmesi yapılırken, basit olarak elektriksel eşdeğer devresi kullanılır. Eşdeğer devrenin çizimi Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8 Batarya eşdeğer devresi

Hibrit elektrikli araç için batarya modellenmesi yapılırken, model girişi olarak bataryadan istenen güç P_{ist} bloğa giriş olarak girerken, bataryanın şarj durum bilgisi (SOC) çıkmaktadır. Batarya modelini detaylandırmak ve elektriksel olarak sistemi irdeleyebilmek için blok içerisinde hesaplanan akım bilgisi yine blok dışına I_{bat} olarak çıkarılmaktadır. Sistem alt komponentlerinin hepsinde olduğu gibi batarya modelinde de batarya verim değeri η_{BAT} çıkışı olarak alınmaktadır.



Şekil 4.9 Batarya modeli

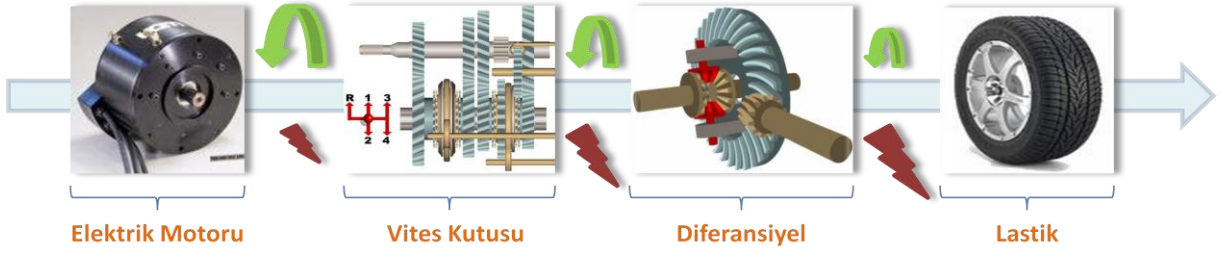
Batarya modelinde kullanılan eşdeğer devre çözümünde ve SOC hesabında kullanılan eşitlikler şu şekildedir (Sezer, 2008):

$$R_{iç} = \begin{cases} R_{şarj}(SOC, T) & I_{BAT} < 0 \\ R_{deşarj}(SOC, T) & I_{BAT} > 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$V_{BAT} = V_{OC}(SOC, T) + I_{BAT}R_{iç} \quad (4.3)$$

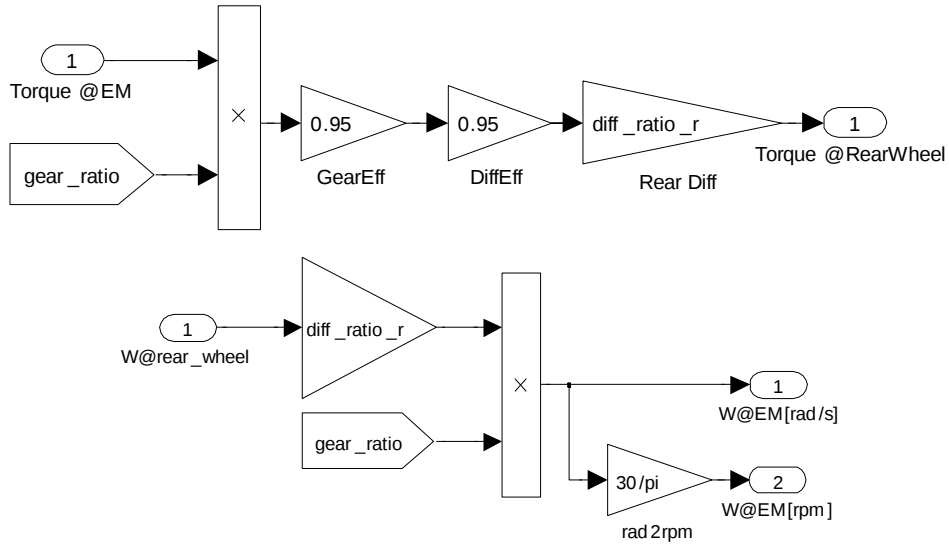
$$I_{BAT} = \frac{P_{BAT}}{V_{BAT}} \quad (4.4)$$

Yukarıdaki (4.2) eşitliği, batarya üreticisi tarafından her bir Li-Ion hücresi için oda sıcaklığında iç direncin, batarya şarj seviyesine göre değişimini gösteren veriler ve grafiklerden elde edilmektedir ve tablo olarak modelde kullanılmaktadır. (4.3) eşitliğinde ise,



Şekil 4.11 Güç aktarım organları

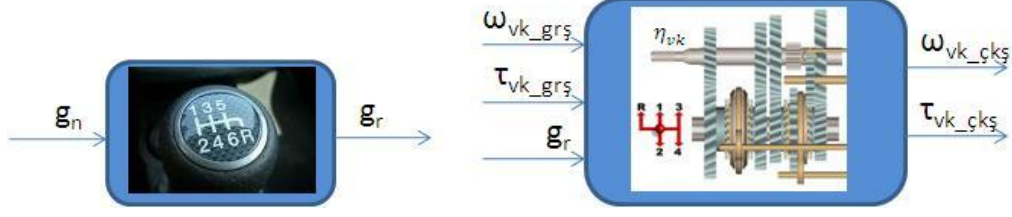
Elektrik motorundan elde edilen tork, tekerlere aktarılan kadar vites kutusunda değişken olmak üzere, diferansiyel ile sonlandırılıp nihai olarak tekerlere aktarılır. Bu sırada elektrik motorunun açısal hızı, vites ve diferansiyel çevrim oranı kadar düşürülüp lastiklere açısal hız olarak aktarılırken, aynı şekilde elektrik motoru milindeki tork da, çekiş lastiklerine aynı çevrim oranları kadar çarpılarak aktarılmaktadır. Modellemede, tüm aktarım organlarına ait kayıplar dikkate alınmıştır.



Şekil 4.12 Güç aktarım organları tork ve hız çevrim blokları

4.5.1 Vites Kutusu

Vites kutusu modelinde, vites kutusunun verimi η_{vk} , farklı vites seçimleri için vites çevrim oranı g_r sembolleri ile ifade edilmektedir. Hesaplamalarda kullanılmak üzere o anki vites ile o vitesine ait çevrim oranını elde etmek için Şekil 4.14'teki akış modeli kullanılmaktadır. Modellemesi yapılan araçta 6 ileri 1 geri vites bulunduğundan, vites numarası g_n , 1-6 arasında o anda vitesin konumunu ifade etmektedir.



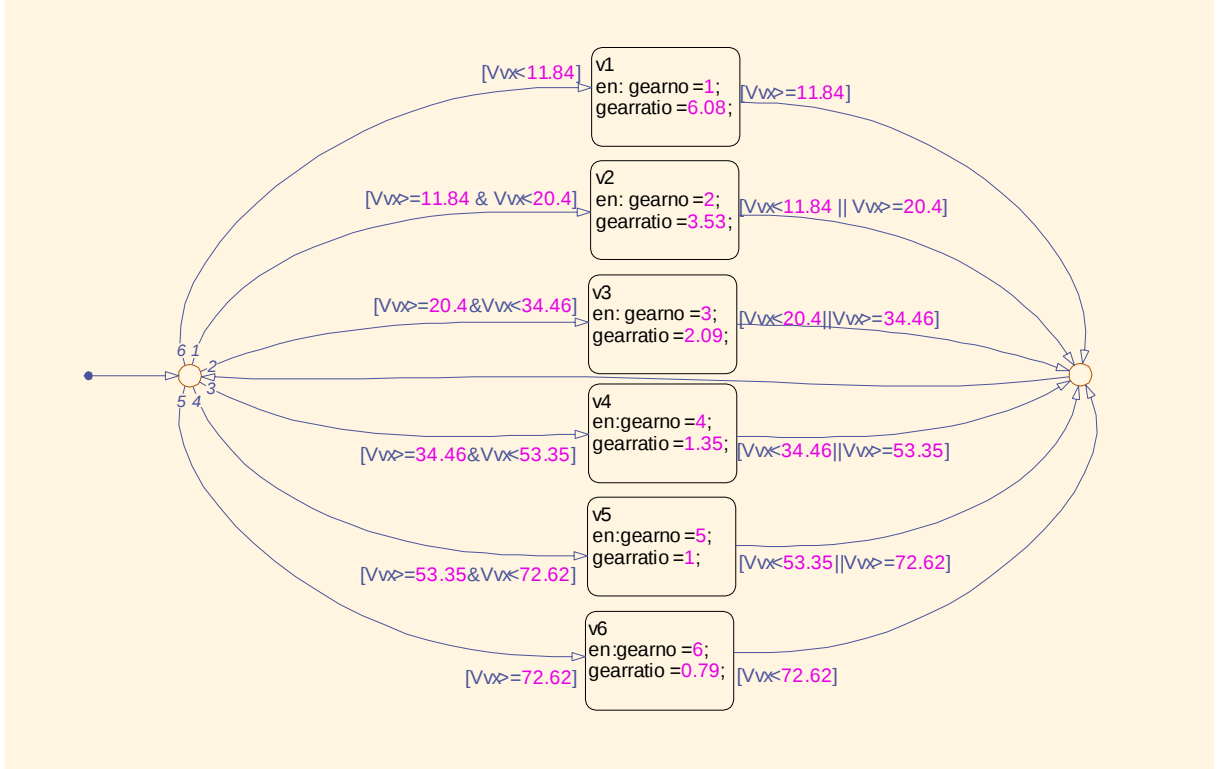
Şekil 4.13 Vites çevrim oranı haritası ve vites kutusu modeli

Vites kutusundaki çevrim oranını hesaplamak için aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır:

$$\omega_{vk_çkş} = \frac{\omega_{vk_grş}}{g_r} \quad (4.7)$$

$$\tau_{vk_çkş} = \tau_{vk_grş} \eta_{vk} g_r \quad (4.8)$$

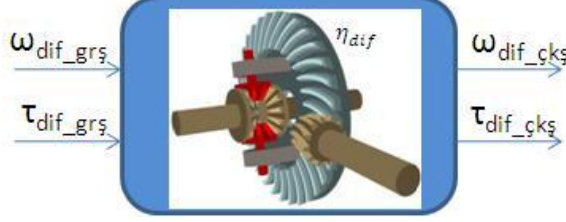
Simülasyon sırasında, aracta vites değişimini benzetmek için, konvansiyonel araçta içten yanmalı motorun maksimum güç noktası olan 2500 rpm değeri ile seri hibrit elektrikli araçta elektrik motorunun maksimum güç noktası olan 3000 rpm değerleri kullanılarak, aktarım organlarının çevrim oranlarından geçerek araç hızına indirgenmiştir. Maksimum güç noktaları ile belirlenen araç hızlarında vites geçişleri benzetimi yapılmıştır. Şekil 4.14'te, hibrit araç için elektirik motoru maksimum güç noktasından hareketle vites geçiş benzetimi örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.14 Hibrit araç için maksimum güç noktasında vites geçiş benzetimi

4.5.2 Diferansiyel

Diferansiyel, motorda üretilen dönme hareketini, çekiş lastiklerine ileten ve son çevrimin yapıldığı, dişli yapısındaki güç aktarım organıdır. Modellemesi yapılırken, η_{dif} ile ifade edilen diferansiyel verimi ve d_r ile ifade edilen diferansiyel çevrim oranı kullanılır.



Şekil 4.15 Diferansiyel modeli

Son çevrim olan diferansiyeldeki hesaplamalar için aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır:

$$\omega_{dif_çkş} = \frac{\omega_{dif_grş}}{d_r} \quad (4.9)$$

$$\tau_{dif_çkş} = \tau_{dif_grş} \eta_{dif} d_r \quad (4.10)$$

4.6 Tekerlek Modeli

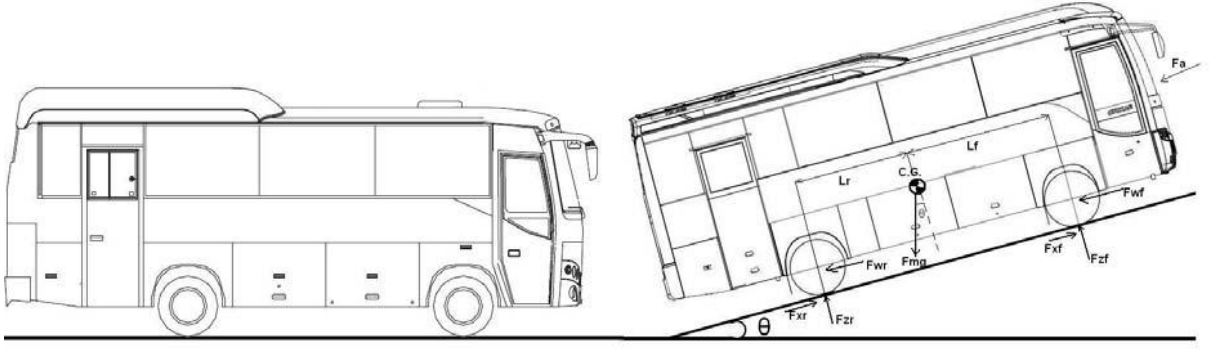
Tekerlek modeli olarak, Pacejka lastik modelini baz alan hazır bir Simulink lastik bloğu kullanılmaktadır. Lastik modeline giriş olarak boylamsal kayma oranı ve normal lastik yükleri girerken, çıkış olarak boylamsal lastik çekiş kuvvetleri (F_{xf} ve F_{xr}) elde edilmektedir.



Şekil 4.16 Tekerlek modeli

4.7 Boylamsal Araç Dinamiğinin Modellenmesi

Boylamsal araç dinamiğinde, tekerlek kuvvetleri ile araca etkiyen yokuş direnci, rüzgar direnci, yuvarlanma direnci ve lastik kuvvetleri hesaplanarak, araca etkiyen net kuvvet hesaplanmaktadır (Rajamani, 2006).



Şekil 4.17 Araca boylamsal yönde etkiyen kuvvetler

$$F_{net} = m\ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg\sin(\theta) \quad (4.11)$$

Burada;

- F_{xf} : Ön lastiklerdeki boylamsal itici lastik kuvveti [N]
 F_{xr} : Arka lastiklerdeki boylamsal itici lastik kuvveti [N]
 F_{aero} : Aerodinamik sürüklenme kuvveti [N]
 R_{xf} : Ön lastiklerdeki yuvarlanma direnci [N]
 R_{xr} : Arka lastiklerdeki yuvarlanma direnci [N]
 m : Aracın kütlesi [kg]
 g : Yerçekimi ivmesi [m/s^2]
 θ : Aracın seyahat ettiği yolun eğimi

büyükliklerini ifade etmektedir.

4.7.1 Rüzgar Direnci

Aracın hareketi sırasında, ön yüzeye etkiyecek rüzgar direnci aşağıdaki formülasyon ile hesaplanmaktadır. Boylamsal araç dinamiği ile modelleme ve simulasyon yapılırken aracın yanal yüzeylerine etkiyen rüzgar dirençleri ihmal edilerek, rüzgar kuvvetinin sadece seyahat yönünün tersine doğru etki ettiği varsayılmaktadır. Buna göre rüzgar direnci:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} A_f \rho C_d (V_x + V_{rüzgar})^2 \quad (4.12)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada;

- F_{aero} : Aerodinamik kuvvet [N]

A_f	: Aracın aerodinamik kuvvetlere maruz kalan ön cephe alanı [m^2]
ρ	: Hava yoğunluğu [kg/m^3]
C_d	: Aerodinamik direnç katsayısı
V_x	: Aracın hızı [m/s]
$V_{rüzgar}$	: Aracın hareket yönünün ters yönünde etkiyen rüzgar hızı [m/s]

büyükliklerini ifade eder.

Atmosfer koşullarına bağlı olarak ρ hava yoğunluğu katsayısı değişebilmekte ve aerodinamik sürüklenmeye önemli ölçüde etki edebilmektedir. Aerodinamik test verilerinin toplandığı standart koşullar olan $15^\circ C$ hava sıcaklığı ve 101,32 kPa hava basıncında ρ katsayısı genellikle $1,225 kg/m^3$ olarak alınmaktadır.

Aerodinamik sürüklenme katsayısı C_d , araç üreticileri tarafından yavaşlayarak durma (Coast-Down) testleri ile elde edilmektedir. Bu testlerde, araç belirlenen bir hıza çıktıktan sonra, gaz pedalı tamamen bırakılarak, hiçbir fren kuvveti uygulanmaksızın aracın aerodinamik kuvvetler ve tekerleklerde oluşan yuvarlanma direnci ile yavaşlaması ve durması sağlanır. Hiçbir gaz pedalı ve fren pedalı girişinin uygulanmadığı bu koşullarda boylamsal lastik kuvvetleri çok küçüktür ve sıfır kabul edilebilir. Bununla birlikte yol eğimi $\theta=0$ ve rüzgar hızı $V_{rüzgar} = 0 m/s$ kabulleri yapılmaktadır. Bu koşullara altında tasarımı yapılan araç için aerodinamik direnç katsayısı üretici firma tarafından hesaplanmaktadır.

4.7.2 Boylamsal Lastik Kuvvetleri

Boylamsal lastik kuvvetleri (F_{xf} ve F_{xr}), yol tarafından lastiklere ekliyen sürtünme kuvvetlerinin eşdeğeridir. Deneysel çalışmalara bakıldığında, her bir lastikte oluşan boylamsal lastik kuvvetlerinin büyüklüklerinin bağlı olduğu etmenler şunlardır (Rajamani, 2006):

- Kayma oranı (σ_x)
- Lastik üzerindeki normal kuvvetler (F_{zf} ve F_{zr})
- Lastik ile yol arasındaki temas yüzeyindeki sürtünme katsayısı

Lastiğe etkiyen dikey kuvvetler normal lastik kuvveti olarak adlandırılmaktadır. Lastik üzerindeki normal kuvvetler, aracın ağırlığı, ağırlık merkezinin yeri, aracın ivmesi, aerodinamik sürüklenme kuvvetleri ve yol eğimine bağlı olarak değişmektedir.

4.7.2.1 Kayma Oranı

Gerçek araç hızı ile eşdeğer dönel teker hızı arasındaki fark boylamsal kayma olarak adlandırılır. Bir başka deyişle, boylamsal kayma ($r_{eff}\omega_w - V_x$) şeklinde gösterilebilir.

Buna göre frenleme sırasındaki kayma oranı:

$$\sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{V_x} \quad (4.13)$$

ve hızlanma sırasındaki kayma oranı:

$$\sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{r_{eff}\omega_w} \quad (4.14)$$

denklemleri ile ifade edilebilir.

Burada;

σ_x : Kayma oranı

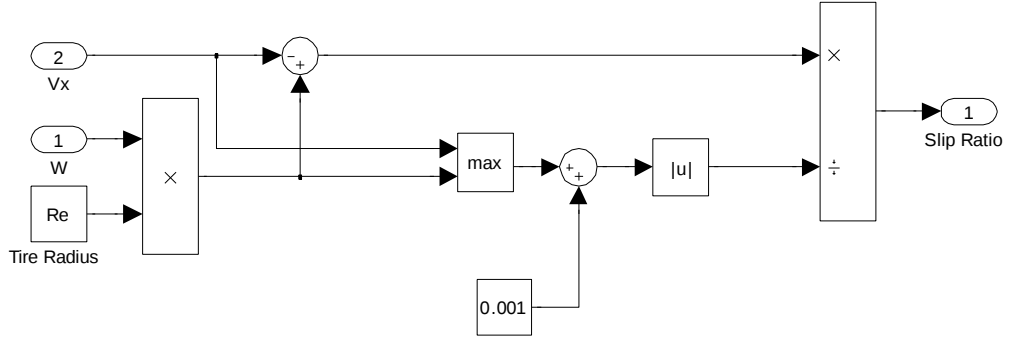
r_{eff} : Efektif lastik yarıçapı [m]

ω_w : Dönen lastiğin açısal hızı [rad/s]

V_x : Araç hızı [m/s]

büyükliklerini ifade etmektedir.

Şekil 4.18'de MATLAB/Simulink modelinde kayma oranının hesaplandığı blok yer almaktadır.

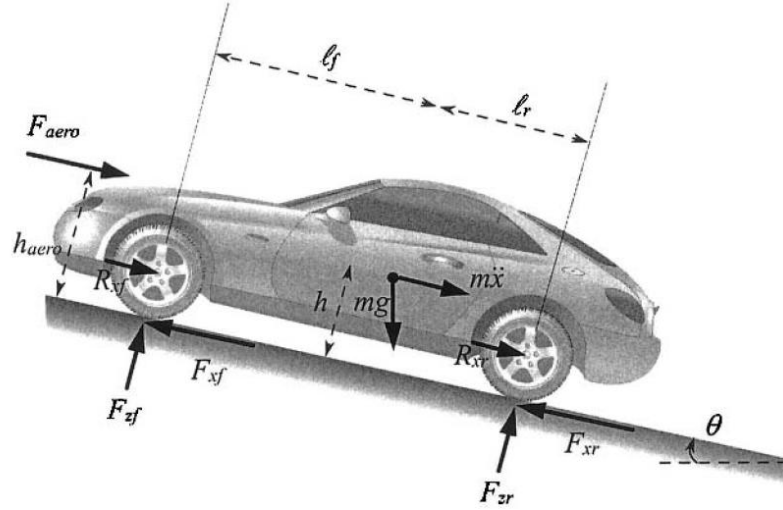


Şekil 4.18 Kayma oranı hesabı

4.7.2.2 Normal Lastik Yükleri

Normal lastik yüklerinin hesabında aracın kütlesi ile birlikte, aracın ağırlık merkezinin yeri, aracın ivmesi, araca etkiyen aerodinamik sürüklenme kuvveti ve aracın hareket ettiği yolun eğimi etki etmektedir.

Normal lastik yüklerinin lastikler üzerindeki dağılımı hesaplanırken, araç üzerinde ön ve arka lastiklerin temas noktalarına göre etkiyen kuvvetlerin net torklarının sıfır olduğu kabul edilir. Hesapta kullanılan kuvvet büyüklüklerinin etkidiği noktalar ve moment noktalarına olan uzaklıkları Şekil 4.19'da gösterilmektedir (Rajamani, 2006).



Şekil 4.19 Normal lastik yükleri bileşenleri

Buna göre;

h : Aracın ağırlık merkezinin yerden yüksekliği [m]

h_{aero} : Aerodinamik kuvvetin araca etki ettiği noktanın yerden yüksekliği [m]

l_f : Aracın ağırlık merkezinin ön aksa olan yatay uzaklığı [m]

l_r : Aracın ağırlık merkezinin arka aksa olan yatay uzaklığı [m]

büyükliklerini ifade etmektedir.

Şekil 4.19 göz önüne alınarak arka lastiğin yere temas noktasına göre kuvvetlerin momentleri yazarsak:

$$F_{zf}(l_f + l_r) + F_{aero}h_{aero} + m\ddot{x}h + mgh\sin(\theta) - mgl_r\cos(\theta) = 0 \quad (4.15)$$

eşitliği elde edilir. Buradan ön lastiğe etkiyen normal lastik kuvveti (F_{zf}):

$$F_{zf} = \frac{-F_{aero}h_{aero} - m\ddot{x}h - mgh\sin(\theta) + mgl_r\cos(\theta)}{(l_f + l_r)} \quad (4.16)$$

şeklinde yazılır ve bu denklem ile hesaplanır.

Aynı şekilde, ön lastiğin yere temas noktasına göre kuvvetlerin momentlerini yazacak olursak:

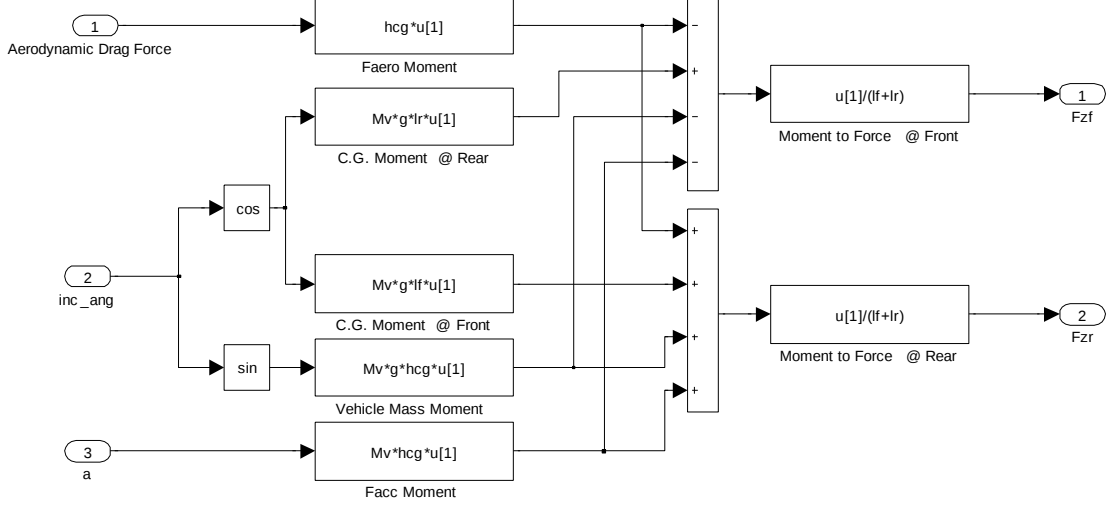
$$F_{zr}(l_f + l_r) - F_{aero}h_{aero} - m\ddot{x}h - mgh\sin(\theta) - mgl_f\cos(\theta) = 0 \quad (4.17)$$

eşitliği elde edilir. Buradan arka lastiğe etkiyen normal lastik kuvveti (F_{zr}):

$$F_{zr} = \frac{F_{aero}h_{aero} + m\ddot{x}h + mgh\sin(\theta) + mgl_f\cos(\theta)}{(l_f + l_r)} \quad (4.18)$$

şeklinde yazılır ve bu denklem ile hesaplanır.

Şekil 4.20’de, MATLAB/Simulink modelinde normal lastik yüklerinin hesaplanmasına ilişkin blok görülmektedir.



Şekil 4.20 Normal lastik yükleri hesap bloğu

4.7.3 Yokuş Direnci

Yokuş direnci, $\theta > 0^\circ$ olan yol eğimlerinde aracın hareketine ters yönde, $\theta < 0^\circ$ eğimlerinde ise araç hareket yönü ile aynı yönde araca etkiyen ve aracın ağırlığı ile doğru orantılı olarak artan kuvvettir. Basit bir trigonometrik ifade ile gösterilir. Buna göre yokuş direnci:

$$F_i = M_v g \sin(\theta) \quad (4.19)$$

formülü ile ifade edilmektedir. Burada;

F_i : Yokuş direnci [N]

M_v : Araç ağırlığı [kg]

g : Yerçekimi ivmesi [m/s^2]

θ : Yokuş eğimi

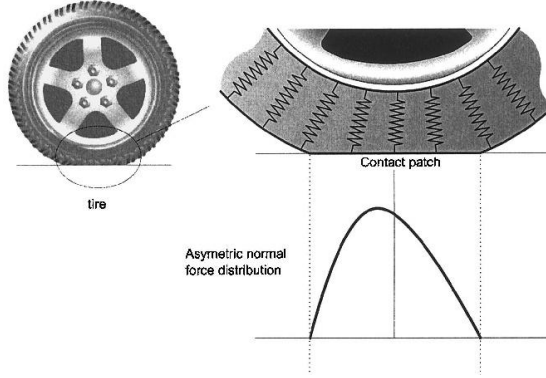
büyükliklerini ifade eder.

4.7.4 Yuvarlanma Direnci

Araç hareket halinde iken, lastik ile yol arasındaki temas noktasında, lastiğin elastik yapısından kaynaklı bir şekil değişimi olur. Hareket sırasında, lastik dönerken, lastiğin herbir noktası bu temas noktasına yaklaştıkça ezilmekte ve temas noktasını geçtikten sonra tekrar eski halini almaktadır. Lastiğin elastiki yapısından kaynaklanan bu sıkışma ve gevşeme hareketi sırasında kaybolan enerji, lastiğe dikey olarak etkiyen normal lastik yüklerinin bir

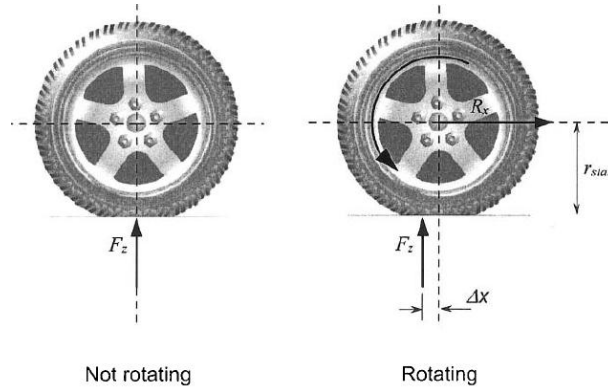
sonucudur.

Lastiğin yapısında hareket sırasında oluşan bu format değişimi, temas noktası etrafında normal yüklerin asimetrik dağılımına sebep olur. Araç hareketsiz duruyor iken, normal lastik yükleri, direk yere temas noktasında simetrik olarak dağılmıştır.



Şekil 4.21 Normal lastik yüklerinin hareket sırasındaki dağılımı

Lastik üzerindeki her bir noktayı, seri olarak bağlanmış dirençler olarak düşünürsek, kontak noktasına yaklaşan her bir noktanın direnci maksimuma yaklaşırken, temas noktasından uzaklaştıkça değeri sifıra yaklaşmaktadır. Sonuçta, lastik dönme hareketi yaparken, normal lastik yükleri, merkezden Δx kadar uzaklaşmaktadır (Rajamani, 2006).



Şekil 4.22 Yuvarlanma direncinin gösterimi

Lastiğin, duran haldeki referans noktasından hareketle, yuvarlanma direncinin modellenmesi sırasında toplam momentin eşitliği yaklaşımından hareketle aşağıdaki eşitlik kullanılabilir:

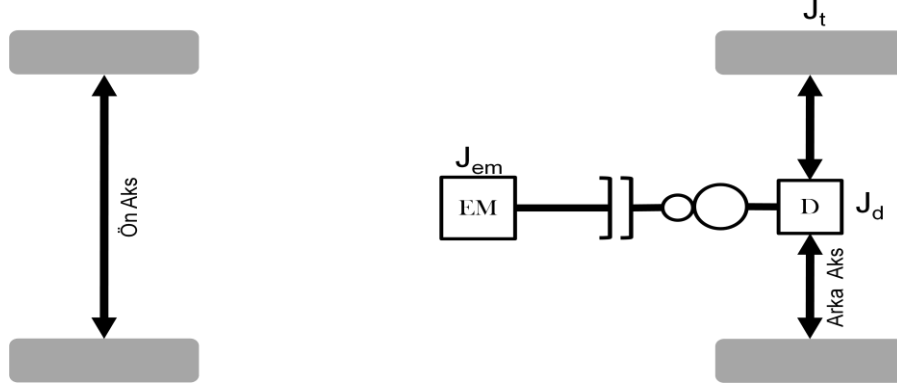
$$R_{xf} + R_{xr} = f_r(F_{zf} + F_{zr}) \quad (4.20)$$

f_r yuvarlanma direnci katsayısı, 0.01 ve 0.04 arasında değişmekle beraber, radyal tip lastiklere sahip binek araçlar için 0.015 olarak alınmaktadır.

4.8 Dönen Kütle Faktörü

Araca kütesinden dolayı etkiyen ivmelenme direncinin yanı sıra, dönen güç aktarım

organlarından kaynaklanan ivmelenme direnci de etki etmektedir. Bu dönen kütlelerin ataleti, her bir vites çevrim oranı için farklı büyüklükte toplam atalet direnci oluşturmaktadır. Döner kütle faktörünün hesabı için, döner organların ataleti, kinetik enerji denklemleri ile aşağıdaki şekilde tekerlere indirgenmektedir.



Şekil 4.23 Döner kütle faktörü

$$\frac{J_{em}w_{em}^2}{2} + \frac{J_d w_d^2}{2} + \frac{J_t w_t^2}{2} + \frac{mV^2}{2} = \frac{m_{denk}V^2}{2} \quad (4.21)$$

$$w_{em} = w_t i_d i_g \quad (4.22)$$

$$w_d = w_t i_d \quad (4.23)$$

$$V = w_t R_t \quad (4.24)$$

$$m_{denk} = m + \frac{\left(\frac{J_{em}}{(i_g i_d)^2} + \frac{J_d}{i_d^2} + J_t \right)}{R_t^2} = \lambda m \quad (4.25)$$

Burada;

J_{em} : Elektrik motoru atalet momenti [kg.m²]

w_{em} : Elektrik motoru açısal hızı [rad/s]

J_d : Diferansiyel şaftı atalet momenti [kg.m²]

w_d : Diferansiyel şaftı açısal hızı [rad/s]

J_t : Toplam tekerlek atalet momenti [kg.m²]

w_t : Tekerlek açısal hızı [rad/s]

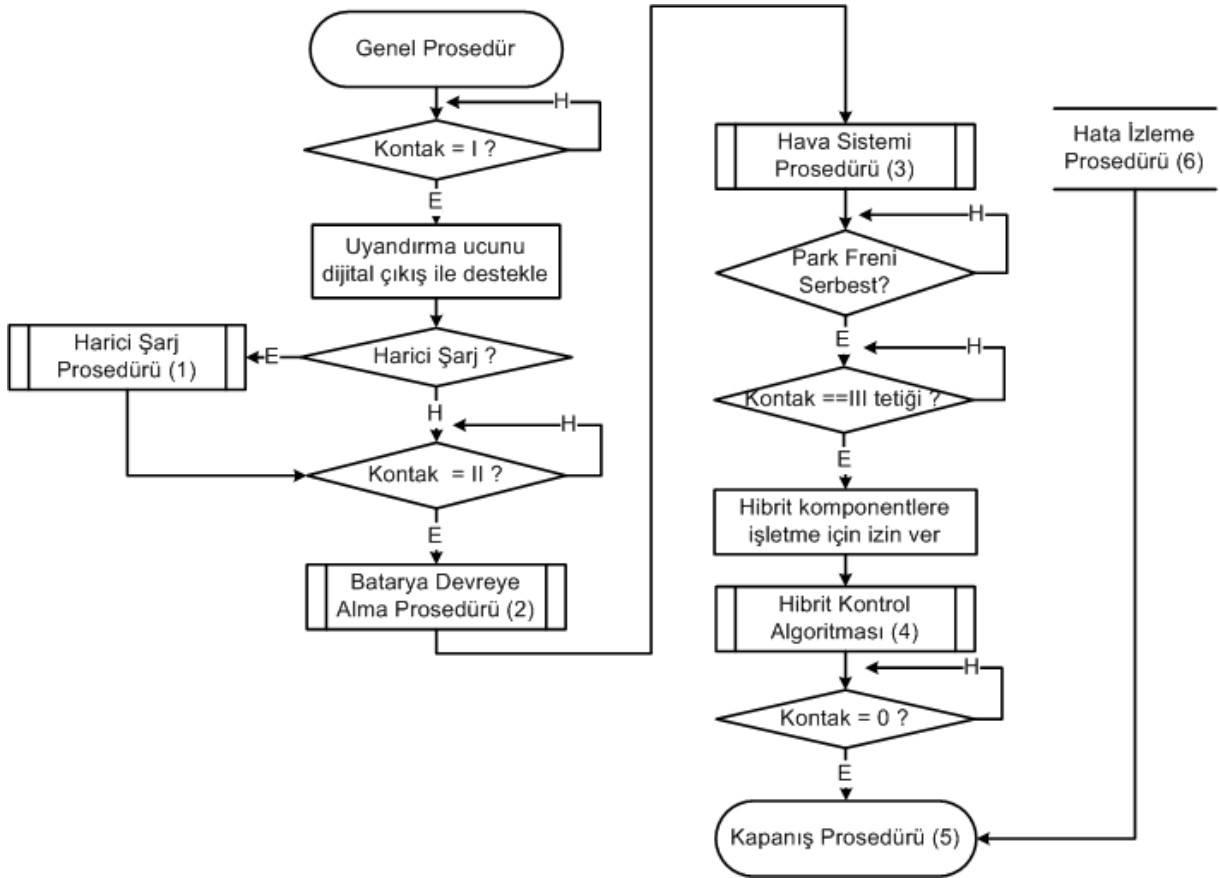
i_g : Vites çevrim oranı

i_d : Diferansiyel çevrim oranı

λ : Döner kütle faktörüdür.

5. SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ KONTROL SİSTEMİ

Seri hibrit dönüşümü yapılan hibrit elektrikli otobüste, HKÜ tarafından tüm alt sistemler aşağıda açıklanan kurallar ve prosedürler dâhilinde kontrol edilmektedir. Araç üzerinde yerleşimi yapılan batarya sistemi, çekiş için kullanılan elektrik motorunun sürücüsü, jeneratör setine ait elektrik motoru sürücüsü, aracın hava ihtiyacını karşılayan kompresör sistemi sürücüsü, direksiyon sistemine ait hidrolik sistem sürücüsü, sürücüden gelen girişleri değerlendirmek üzere gaz pedalı açıklığı, fren pedalı ve retarder kolu bilgileri, merkezi olarak HKÜ’de toplanan analog ve dijital kablolama ile CAN hatları üzerinden izlenmekte ve kontrol edilmektedir. Şekil 5.1’de sistemin genel kontrol akış şeması görülmektedir. Ardından seri hibrit elektrikli araç kontrolü alt başlığında aracın yakıt tüketiminde azaltıma yönelik kontrol stratejisinden bahsedilmektedir.



Şekil 5.1 Seri hibrit elektrikli araç genel kontrol şeması

Tez çalışmasında üzerinde çalışılan hibrit otobüsün merkezi hibrit kontrol ünitesi dSPACE 1401’dir. HKÜ güç beslemesini direk olarak araç aküsünden almaktadır. Sürücü koltuğa oturup, kontağı “I” konumuna aldığında, okunan kontak bilgisi üzerinden HKÜ’nin uyanma ucu aktif edilerek, HKÜ’nin prosedürleri işletmek üzere uyanması sağlanmaktadır. Ardından, hibrit yönetim prosedürü işleme başlar. Eğer kontak “II” konumuna alınmadan, harici şarj

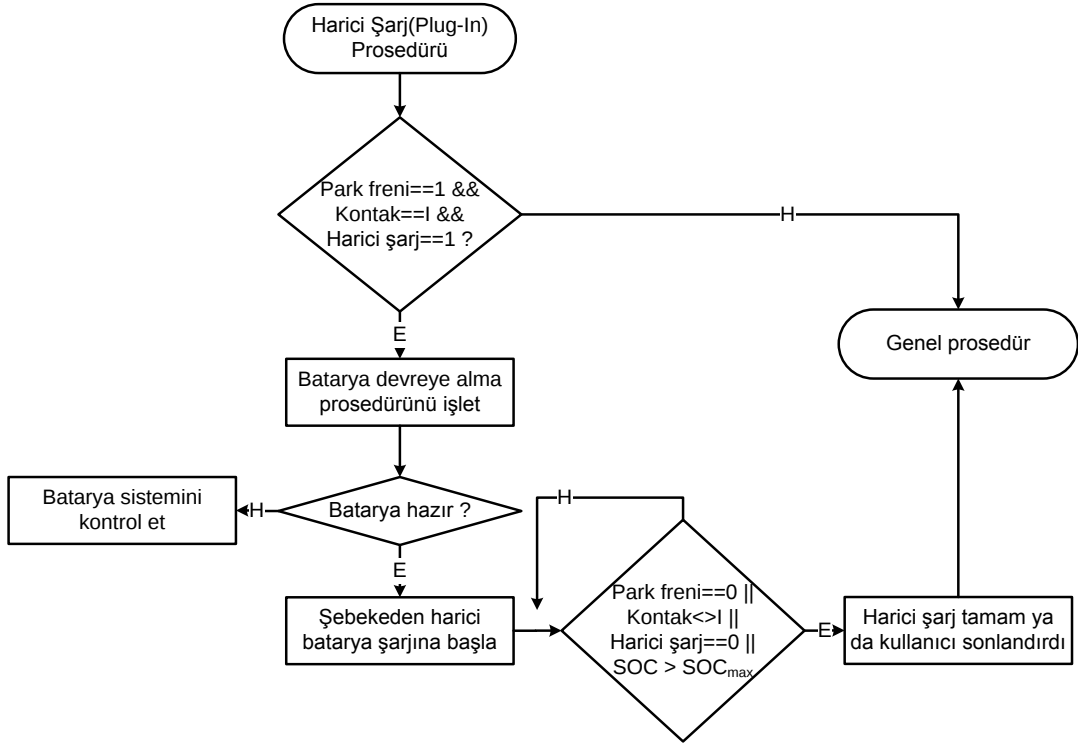
butonuna basılırsa, HKÜ tarafından harici şarj isteği olarak algılanır ve bataryaların şehir şebekesinden şarj edilmesi için harici şarj prosedürü işleme alınır. Kontak “II” konumuna alındığında batarya ve alt sistem prosedürleri işletilir. Aracın harekete hazır hale gelebilmesi için, konvansiyonel araçta olduğu gibi sürücünün kontağı “III” konumuna alıp sisteme tetik vermesi gerekmektedir.

Bu işletim sırasında, ilk yapılması gereken işlem, alt sistemlerin durumlarının incelenmesidir. Bu kapsamda fren sistemi, kapılar, park freni ve transmisyonunda ihtiyaç duyulan havanın tüplerdeki basınçlar, tüplere monte edilen basınç sensörleri kullanılarak HKÜ’deki ADC’ler ile okunmaktadır. Genel prosedür kapsamında, tüm alt prosedürlere paralel işletilen hata izleme prosedürü işletilerek öncelikle bataryada herhangi bir hata bayrağı aktif değilse, batarya devreye alınır ve elektrik destekli hava sistemi çalıştırılır. Konvansiyonel araçta varsayılan uygun işletme hava basıncı değeri 6-8 bar aralığıdır. Tüm tüplerde 8 bar üzerindeki basınç değeri okunduğunda, hava sistemi durdurulmakta ve “Hava basınç değerleri uygun” bayrağı aktif edilmektedir.

Sistemde herhangi bir hata durumu yoksa ve hava basınçları istenen seviyeye eriştiğinde, sürücünün park frenini serbest konuma alıp almadığı kontrol edilmektedir. Eğer park freni hala aktif ise, elektrik motoruna ya da jeneratör setine hiçbir şekilde tork, hız, başlatma referansları gönderilmemektedir. Sürücü park frenini serbest konuma aldıktan sonra kontağın “III” konumuna getirilmesi ile artık hibrit alt sistemlerin işletmeye alınması ve aracın hareketi için tüm gerekli ve yeter koşullar sağlanmış demektir. Bu aşamada araç üzerinde hibrit kontrol algoritması koşabilmesi için alt sistemlerin izinleri verilmekte ve hibrit kontrol algoritması (Bölüm 5.4.2) devreye alınmaktadır.

5.1 Harici Şarj Prosedürü

Seri hibrit elektrikli otobüste, harici olarak 220V AC gerilimden bataryanın şarj edilmesini sağlayan, bir adet AC/DC dönüştürücü yer almaktadır. Kullanıcı eğer aracı şehir şebekesinden şarj etmek isterse, araçta yer alan şarj fişini şehir şebekesine bağlamaktadır. Bu sırada, hibrit kontrolörünün batarya durumunu izleyebilmesi ve kontakları açıp kapatabilmesi için, park freninin devrede olması ve kontağın “I” konumuna alınması gerekir. Ardından, arka bagajda yer alan şarj butonunun açık konuma getirilmesi ile HKÜ, harici şarj prosedürünü işletmeye başlamaktadır. Bataryalar boş ise, yaklaşık 8 saat sürede %100 şarj seviyesine ulaşmaktadır. Ancak işletim için izin verilen azami SOC seviyesini aşmasına izin verilmemekte ve eşik seviyesine eriştiğinde kontrolör tarafından batarya kontakları kapatılmaktadır. Hiçbir şekilde araç harici şarja bağlı iken, aracın hareketine izin verilmemektedir.

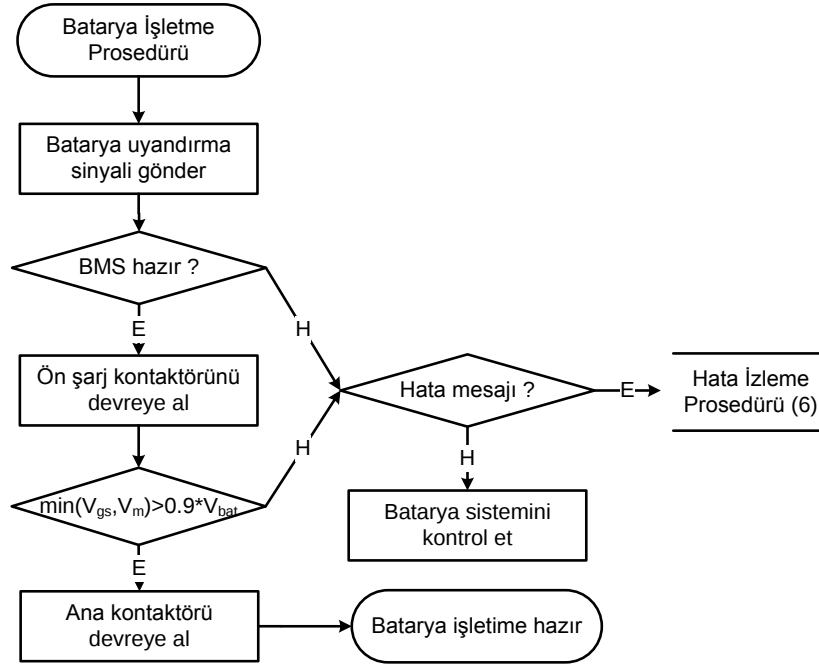


Şekil 5.2 Harici şarj prosedürü

5.2 Batarya Devreye Alma Prosedürü

Sürücü tarafından kontak anahtarı “II” konumuna alındığında, aracın işleme hazır hale gelmesi için ilk olarak bataryaya gönderilen uyandırma sinyaliyle, batarya yönetim sistemi (BMS) uyandırılmakta, ardından BMS’lerden herhangi bir hata bilgisi okunmuyor ise batarya önşarj işleminin ardından, ana kontak üzerinden DC baraya bağlanmaktadır.

Batarya, DC barayı beslemek için devreye alınırken, ilk olarak önşarj kontaktörüne sinyal gönderilerek DC baraya 25Ω 200W’lık seri bir direnç ile bağlanmaktadır. Bu sayede, EM sürücülerinin giriş katındaki yüksek değerli kapasiteler sebebi ile bataryadan anlık olarak yüksek akımların çekilmesi engellenmektedir. Bu hem bataryanın hem de sürücülerin işletme sağlıkları açısından önemlidir. EM sürücülerinin işlemcileri, DC bara gerilimi 180V’un üzerine çıktığında dahili beslemeleri ile çalışmaya başlar. Daha sonra birkaç milisaniye içerisinde CAN mesajlarını göndermeye başlar. Sürücülerden okunan DC gerilim bilgisi kullanılarak, sürücü giriş kapasitelerinin %90 dolduğu görüldüğünde ana kontaktör devreye alınarak önşarj kontağı kapatılır. Bu şekilde güvenli şekilde DC baranın batarya gerilimi ile eşitlenmesi sağlanır. Ana kontaktörün yardımcı kontağından alınan “kontaktör kapandı” bilgisi ile kompresör ve hidrolik sistem sürücülerine sistem açılışında bir kereye mahsus reset sinyali gönderilir ve bu alt sistemlerin işletmeye hazır hale gelmesi sağlanır.



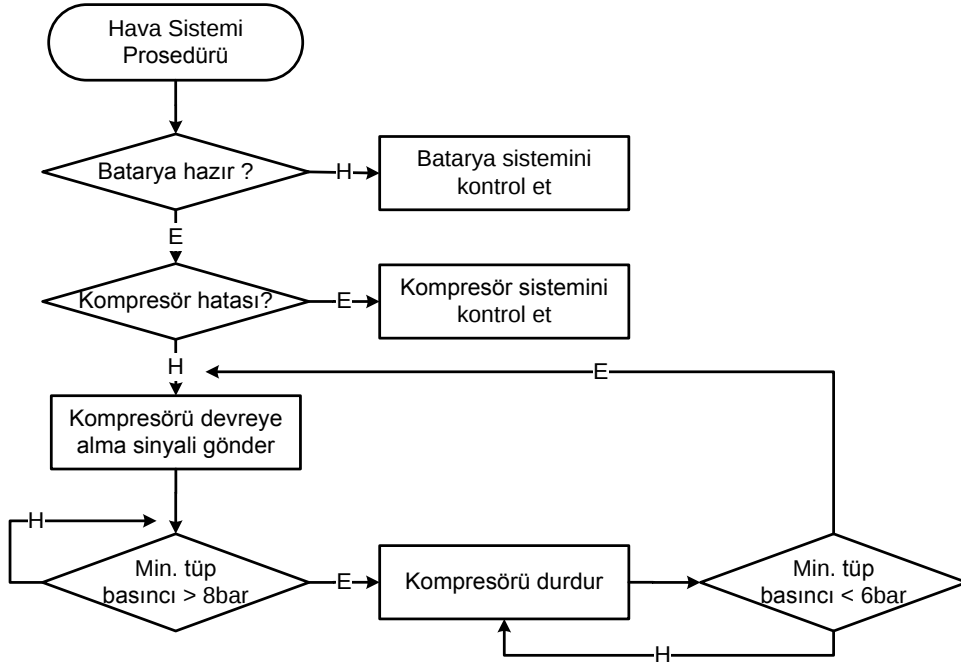
Şekil 5.3 Batarya devreye alma prosedürü

5.3 Hava Sistemi Prosedürü

Bataryanın DC baraya bağlanmasının ardından, aracın harekete hazır hale gelmesi için hava tüplerinin 8 bar üzerinde hava ile dolması gerekmektedir. Bunun için, hava tüplerindeki basınç sensörlerinden okunan değerlerin hepsi, 8 bar değerinin üzerine çıkana kadar elektrik destekli kompresör sistemi devreye alınır ve hava tüplerindeki basınçlar izlenir. Hava tüplerindeki basınç değerleri sağlandığında, kompresör devre dışı bırakılır. Aracın çalışması sırasında kapılar, fren sistemi ve debriyaj kullanımı ile hava tüpleri boşalmaktadır. Okunan basınç değerlerinden herhangi biri 6 barın altına indiğinde kompresör tekrar 8bar seviyesine kadar devreye alınır. Bu şekilde işletim sırasında 6-8 bar aralığında histerisis bir çalışma sağlanmaktadır.

Hava sistemindeki prosedürü, sistem ilk devreye alındığında bir kereye mahsus olmak üzere tüp basınçları üst basınç seviyesine erişene kadar işletilir. Araç işletimi sırasında, yukarıda bahsedildiği gibi, histerisis olarak sürekli kontrol edilmekte ve devreye girip çıkmaktadır. Bu şekilde hem enerji verimliliği sağlanmakta, hem de hava basıncının sürekli limit değerler arasında tutulması sağlanmaktadır.

Şekil 5.4'te, hava sistemi prosedürüne ilişkin çalışma prensibi, akış şeması ile anlatılmaktadır.



Şekil 5.4 Hava sistemi prosedürü

5.4 Seri Hibrit Elektrikli Araç Kontrolü

Tez kapsamında seri hibrit elektrikli hale dönüştürülen otobüs üzerinde uygulanan kontrol yöntemini aşağıdaki gibi temel iki başlığa ayırmak mümkündür:

- GENSET(Jeneratör Seti) Kontrolü
- Hibrit Kontrol Algoritması

5.4.1 GENSET Kontrolü

Seri hibrit elektrikli araç mimarisinde fosil yakıttan elektrik enerjisi üretimini sağlayan birim GENSET olarak adlandırılır. Bu birimde İYM bir elektrik motoruna akuple edilir ve elektrik motoru bir generatör olarak çalıştırılır. Bu alt birimden hibrit elektrikli araç kontrol algoritmasının istediği elektriksel gücü üretmesi istenir. GENSET çıkışında üretilecek elektriksel gücün mekanik büyüklüklere bağlı ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_{ele} = \eta_{mek-ele} T_{\text{saft}} \omega_{\text{saft}} \quad (5.1)$$

Bu denklikte $\eta_{mek-ele}$ mekanik enerjinin elektrik enerjisinin dönüşüm verimini, T_{saft} şafttaki torku ve ω_{saft} şaftın açısal hızını göstermektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere elektriksel gücü kontrol edebilmek için iki mekanik büyüklük bulunmaktadır. GENSET'in belirli bir güç noktasında çalıştırılabilmesi için şaft torku ve şaft hızının kontrol edilmesi gereklidir. GENSET uygulamalarında bu büyüklüklerin kontrolü İYM ve EM tarafından yapılmaktadır. Bu tezde yapılan uygulamada araçtaki İYM'den tork geribeslemesi alacak bir donanım

bulunmadığından, İYM için hız kontrolü ve EM için tork kontrolü yaparak sabit bir elektriksel güç üretilmesi sağlanmıştır. EM sürücüsünün gömülü yazılımında tork kontrolü bulunduğu için EM'ye sadece referans tork bilgisi göndermek yeterliyken, İYM için alt seviye bir hız kontrolörü geliştirilmiştir.

Geliştirilen sistemin verimli bir şekilde çalışabilmesi için içten yanmalı motorun hızının hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte İYM lineer olmayan oldukça karmaşık bir modele sahiptir. Bu tip bir sistemin her türlü belirsizliğe karşı gürbüz kontrolü için literatürde kayma kipli kontrolörlere sık sık rastlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında da geliştirilecek kontrolör için öncelikle sistemin modelinin basitleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla İYM dinamiği birinci dereceden bir sistem olarak kabul edilebilir (Gökasan vd., 2006; Bogosyan vd., 2006):

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{J_{TOP}} T_{IYM} - \frac{1}{nJ_{TOP}} T_{GEN} \quad (5.2)$$

Burada J_{TOP} sistemin toplam atalet momentini, T_{GEN} İYM'ye bağlı jeneratörün torkunu, w İYM'nin hızını, n ise çevrim oranını göstermektedir. İçten yanmalı motorun gaz pedalı girişi ile çıkış torku arasındaki bağıntı ise, içten yanmalı motora ait maksimum tork-hız zaman grafiği eğrisinden lineer bağıntı yoluyla aşağıdaki gibi elde edilebilir :

$$T_{IYM} = u(\alpha_0 + \alpha_1 w + \alpha_2 w^2 + \alpha_3 w^3 + \alpha_4 w^4) \quad (5.3)$$

Burada u gaz pedalı girişini, w İYM hızını ve α_i ($i=0,1,2,3,4$)'ler eğri uydurma yoluyla elde edilen parametreleri göstermektedir.

Temel olarak kayma kipli kontrolör tasarımı iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama kayma yüzeyinin seçilmesi yani sistemin sürekli rejimde nasıl davranacağını belirlenmesi, ikinci aşama ise sistemin bu kayma yüzeyine kararlı bir şekilde erişip erişmeyeceğinin belirlenmesidir. Bu sistem için kayma yüzeyi olarak İYM hız hatasına lineer bağlı bir yüzey seçilebilir.

$$\sigma = \Gamma(w_{ref} - w) \quad (5.4)$$

İkinci aşamada sistemin bu kayma yüzeyine kararlı bir şekilde eriştiğinin gösterilmesi gerekmektedir. Bu amaçla aşağıdaki Lyapunov fonksiyonu önerilmiştir:

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (5.5)$$

Bu sistemin kararlı olabilmesi için bu fonksiyonun türevinin negatif tanımlı olması gerekmektedir. Yani türevin, D herhangi bir pozitif reel sayı olmak kaydıyla:

$$\dot{V} = -D\sigma^2 \quad (5.6)$$

eşitliğini sağlaması gerekmektedir. Başka bir deyişle kayma yüzeyinin dinamik denklemi aşağıdaki gibi olmalıdır:

$$\dot{\sigma} + D\sigma = 0 \quad (5.7)$$

Eğer yukarıdaki denklemde sigmanın türevi alınıp yerine konursa aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\dot{\sigma} = \Gamma w_{ref} + \Gamma \frac{1}{nJ_{TOP}} T_{GEN} - \Gamma \frac{1}{J_{TOP}} u(\alpha_0 + \alpha_1 w + \alpha_2 w^2 + \alpha_3 w^3 + \alpha_4 w^4) \quad (5.8)$$

Burada sigmanın türevinin sıfır olduğu durum sistemin kayma yüzeyindeki hareketini göstermektedir. Yani sistemin bu yüzeyde kalmasını sağlayacak kontrolör girişini bu türevi sıfıra eşitleyerek bulabiliriz:

$$u_{denk} = \frac{J_{TOP}}{(\alpha_0 + \alpha_1 w + \alpha_2 w^2 + \alpha_3 w^3 + \alpha_4 w^4)} (w_{ref} + \frac{1}{nJ_{TOP}} T_{GEN}) \quad (5.9)$$

Fakat kontrolör çıkışı buna ek olarak sistemin belirsizliklere karşı gürbüz olmasını sağlayan ve sistemi bu kayma yüzeyine getiren ek bir terim daha içermektedir. Bu durumda sigmanın türevi yukarıdaki denk kontrolör tanımı altında ayrık zamanda tanımlanırsa:

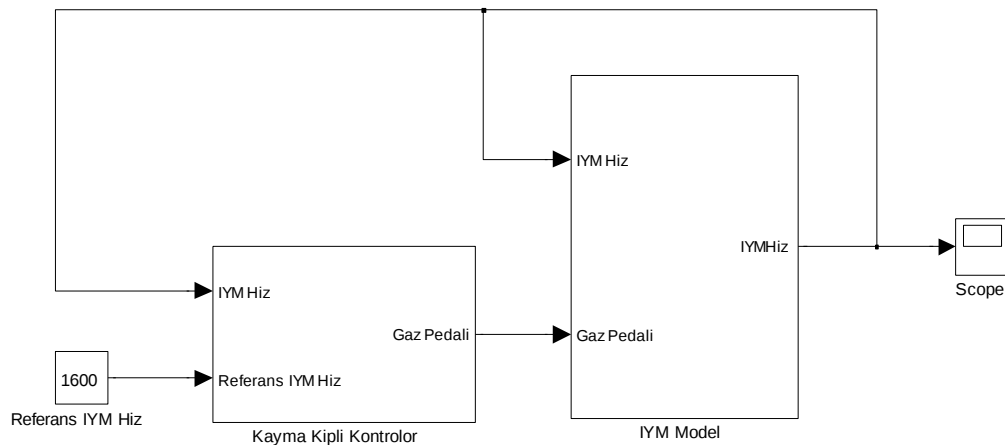
$$\frac{\sigma(k) - \sigma(k-1)}{T} = \Gamma \frac{1}{J_{TOP}} \sum_{i=0}^4 \alpha_i w^i(k-1) (u_{denk}(k-1) - u(k-1)) \quad (5.10)$$

elde edilir. Burada T örnekleme zamanını göstermektedir.

Denk kontrolörün iki hesap adımı arasında yaklaşık olarak değişmediği kabul edilirse:

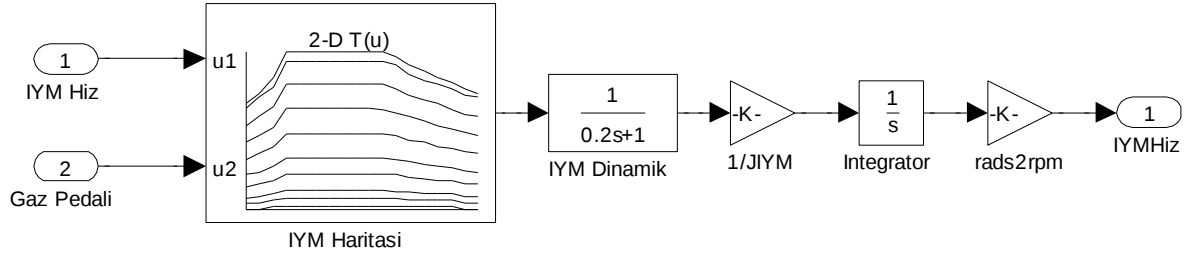
$$u(k) = u(k-1) + \frac{J_{TOP}}{\Gamma T \sum_{i=0}^4 \alpha_i w^i(k-1)} ((1 + DT)\sigma(k) - \sigma(k-1)) \quad (5.11)$$

elde edilir. Elde edilen bu kontrolör ilk olarak MATLAB/Simulink ortamında test edilmiştir. Şekil 5.5, sistemin simulink modelini göstermektedir.



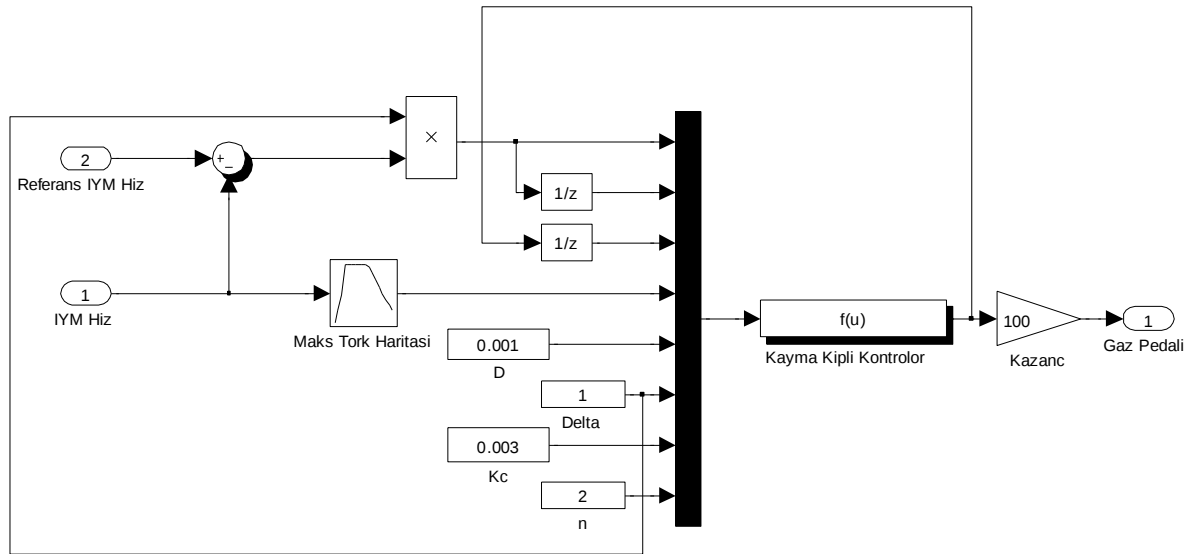
Şekil 5.5 İYM kontrol sisteminin simulink modeli

Burada İYM modeli olarak lineer olmayan bir harita kullanılmıştır. Bu harita, kontrolör tasarımındaki lineer değişim kabulünün aksine, gaz pedalı girişinin farklı aralıklardaki değişimi için farklı tork değişimleri vermektedir. Bununla birlikte içten yanmalı motorun bu torku belirli bir gecikmeyle verebildiği göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla tork çıkışının önüne zaman sabiti 0,2 saniye olan dinamik bir model konulmuştur. İçten yanmalı motorun atalet momenti 0,135 olarak kabul edilmiştir. Bu kabuller altında içten yanmalı motorun Simulink modeli Şekil 5.6'daki gibi oluşturulmuştur.



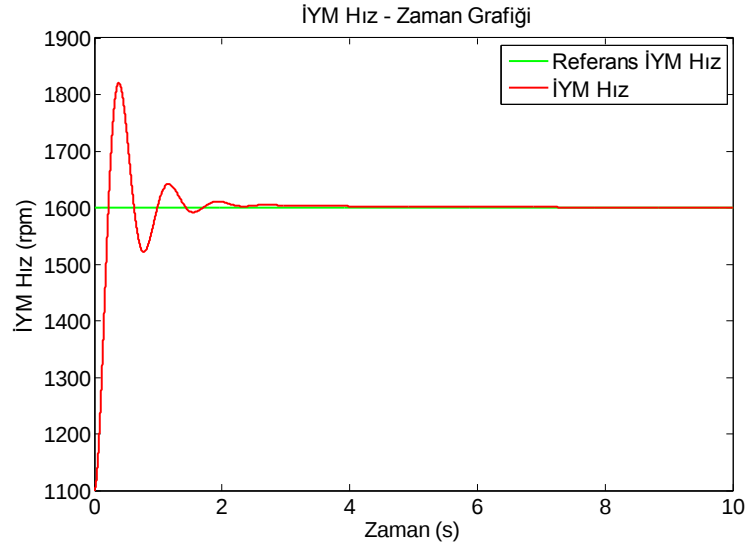
Şekil 5.6 İYM Simulink modeli

Kayma Kipli Kontrolör de, (5.11)'de verilen ifade yardımıyla Simulink ortamında Şekil 5.7'deki gibi oluşturulmuştur.



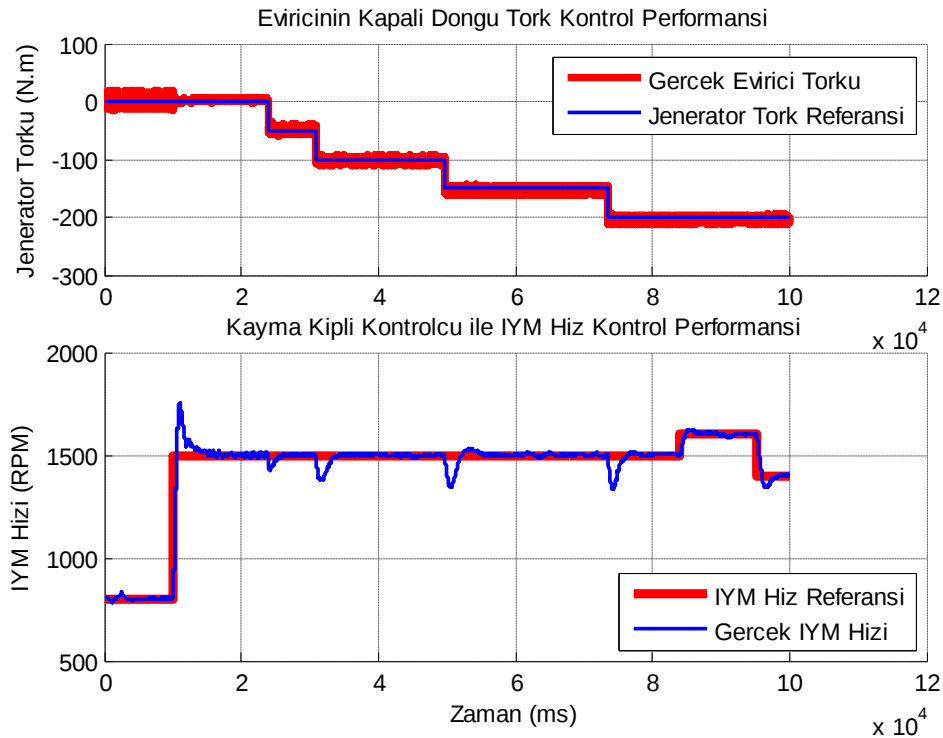
Şekil 5.7 Kayma kipli kontrolör Simulink modeli

Bu kontrolör çeşitli referans hız değerleri için test edilmiş ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.8, içten yanmalı motorun 1100 rpm hızdan verilen bir referans 1600 rpm girişi altındaki cevabını göstermektedir.



Şekil 5.8 Referans hız girişi altında İYM modelinin cevabı

GENSET kontrolünde, içten yanmalı motorun karşısına akuple edilen 100kW sürekli 150kW anlık güç değerine sahip fırçasız DC motorun sürücüsünün sürülmesinde tork kontrol modu aktiftir. İçten yanmalı motorun tork-hız haritası ile elektrik motorunun tork-hız haritasına göre belirlenen toplam en verimli noktada kontrol yapılırken, elektrik motoru sürücüsüne CAN hattı üzerinden tork referansı gönderilmektedir. Motor ve sürücüsüne ait herhangi bir kritik hata olmadığı sürece, EM sürücüsü oldukça düzgün bir şekilde tork kontrolünü kapalı çevrim olarak kendi içerisinde yapmaktadır.



Şekil 5.9 GENSET kontrol performansı

Şekil 5.9, GENSET için araç üzerinde uygulanan kayma kipli İYM hız kontrolü ile elektrik motoru tork kontrol performansını, araç üzerinden toplanan gerçek zamanlı örnek veri ile gayet açık bir şekilde göstermektedir.

Yukarıda görüldüğü üzere, sabit İYM hızı altında, EM tarafında değişen tork ile İYM tarafında anlık olarak hız değerlerinde hata oluşmaktadır. Bu noktada kayma kipli İYM hız kontrolörü hızlı bir şekilde cevap vererek, içten yanmalı motorun referans değerine kısa bir sürede oturmasını sağlamaktadır. Yük değişimlerinde İYM tarafında oluşan hız hatası, İYM dinamiğinin oldukça yavaş olmasından ötürü, elektrik motoruna göre daha uzun sürmektedir. İYM hız kontrolünde çalışma sırasında sadece İYM elektronik kontrol ünitesine gönderilen gaz referansı kontrol edilebilmektedir. İçten yanmalı motorun kendi iç dinamiklerine müdahale edilebilmesi durumunda daha iyi bir çalışma performansı yakalanabilir. Ancak üretici firmalar dışında bu müdahalenin yapılması mümkün olmadığından, İYM hız kontrolünde kayma kipli kontrolör kullanılarak, yük değişimlerinde oluşacak hata işareti minimize edilmeye çalışılmıştır.

5.4.2 Hibrit Kontrol Algoritması

Seri hibrit elektrikli araç kontrol algoritmasında içten yanmalı motorun dinamiğinden kaynaklı kontrol zorluğundan kaynaklanacak problemler sebebiyle, hem kontrol kolaylığı hem de simülasyon kolaylığı açısından literatürde “Termostat Kontrol” olarak geçen kontrol metodolijisi kullanılmıştır. İçten yanmalı motorun farklı verim noktaları için hız referansındaki sürekli değişimler, simülasyon aşamasında sorun çıkarmasa da, içten yanmalı motorun dinamiği gereği yakıt tüketim ve emisyon değerlerinde olumsuz etkilere sebep olabilmektedir.

Araçta kullanılan batarya paketinin maksimum şarj akımı daha öncede belirtildiği gibi 140A'dır. Yaklaşık 50kW'lık bir şarj gücü, batarya için sınır değerlerinin içerisinde kalmaktadır. Batarya özelliklerinde belirtildiği üzere, iç direncinin en düşük olduğu ve dolayısıyla en verimli olduğu %70 SOC değeri etrafında salınacak güvenli bir SOC bandı seçilmiştir. Algoritmada bataryanın verim haritası dikkate alınarak alt SOC limiti (SOC_{low}) %60, üst SOC limiti (SOC_{high}) %80 olarak belirlenmiştir. Aracın ilk hareketi sırasında, bataryadan okunan SOC değeri bu bant içerisinde ise, öncelikli olarak sadece elektrik modu ile alt SOC limitine kadar İYM devreye alınmadan aracın çekişi bataryadan sağlanan enerji ile gerçekleşmektedir. SOC değeri SOC_{min} değerine eriştiğinde İYM devreye alınmakta ve bataryanın şarj edilmesi için GENSET kontrolü aktif olmaktadır. Şarj modunda sürücünün hızlanma isteği ve güç değerlerine göre P_{genopt} ve P_{genmax} olmak üzere 2 farklı güç değeri ile

şarj yapılmaktadır. Her iki güç değeri için İYM, jeneratör ve batarya için toplam maksimum verimli nokta için içten yanmalı motora hız referansı(ω_{genopt} , ω_{genmax}) ve jeneratöre tork referansı(T_{genopt} , T_{genmax}) gönderilerek, batarya şarj gücü elde edilmektedir.

Çizelge 5.1 Algoritma parametreleri

Algoritma Parametre	Açıklama	Parametre Tipi
SOC	Bataryanın anlık SOC değeri	Değişken
SOC _{low}	Belirlenen bandın normal alt SOC değeri	Sabit
SOC _{high}	Belirlenen bandın normal üst SOC değeri	Sabit
SOC _{min}	Maksimum güç isteğinde izin verilen zorlamalı alt SOC değeri	Sabit
SOC _{max}	Rejenereatif frenleme için izin verilen üst SOC değeri	Sabit
T _{genmax}	Maksimum şarj durumunda jeneratöre uygulanan tork referansı	Sabit
W _{genmax}	Maksimum şarj durumunda İYM'ye uygulanan hız referansı	Sabit
T _{genopt}	Optimum şarj durumunda jeneratöre uygulanan tork referansı	Sabit
W _{genopt}	Optimum şarj durumunda İYM'ye uygulanan hız referansı	Sabit
P _{genmax}	Maksimum şarj durumunda istenen GENSET gücü	Sabit
P _{genopt}	Optimum şarj durumunda istenen GENSET gücü	Sabit
P _{gen}	GENSET'ten elde edilen anlık güç değeri	Değişken
P _{req}	Sürücünün anlık güç isteği	Değişken
P _{EM}	Çekiş için elektrik motorundan istenen anlık güç isteği	Değişken
P _{brake}	Sürücünün anlık rejeneratif frenleme gücü isteği	Değişken

Sürücünün sürekli maksimum güç isteği durumunda, GENSET tarafından üretilen P_{genopt} şarj gücü yetersiz kalacak, çekiş motoru GENSET ve bataryadan enerji ihtiyacını karşılayacaktır. Bu durumda SOC_{min} sınırına kadar bataryanın SOC değerinin düşmesine izin verilmektedir. P_{genopt} üzerindeki güç isteğinin halen devam etmesi durumunda, GENSET P_{genmax} noktasında çalıştırılarak SOC değerinin daha aşağıya inerek çalışma bandının dışına çıkması engellenmektedir.

Generatör seti için en verimli noktayı bulabilmek için İYM ve generatör olarak kullanılan

elektrik motoru ve sürücüsünün üreticileri tarafından sağlanan haritalardan faydalanılmıştır. Generatör setinin toplam verimi kimyasal enerji girişinden, elektriksel enerji çıkışına kadar olan sistem verimidir. GENSET bataryayı şarj etmek için kullanılacağı için bataryanın da verimi göz önüne alınmalıdır. Bahsedilen unsurları göz önüne alarak en verimli nokta eldeki verilere göre aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

Çizelge 5.2 Maksimum şarj akımı için SOC'a bağlı GENSET güçleri

SOC [%]	Voc [V]	Rint [mΩ]	Ibat [A]	Pgen_ele [kW]
10	361,914	98,98	140	52,61
20	365,54	91,14	140	52,96
30	369,068	95,06	140	53,53
40	372,89	99,96	140	54,16
50	377,79	98,98	140	54,83
60	384,552	86,24	140	55,53
70	393,176	88,2	140	56,77
80	403,76	99,96	140	58,49
90	411,796	74,48	140	59,11
100	411,796	11,76	140	57,88

Öncelikle, bataryanın şarj edilmesi esas olduğundan bataryanın şarj edilebileceği maksimum güç değeri bulunmalıdır. Batarya teknik özelliklerinde batarya şarj akımının batarya kapasitesinin iki katını, 140A'i, geçmemesi önerilmektedir. Buna göre, güç tabanlı bir algoritma kullanıldığı için batarya için şarj gücü hesaplanmalıdır. Batarya gücü batarya akımı ve batarya uç geriliminin bir fonksiyonudur. Aynı zamanda batarya uç gerilimi de, iç direnç ve SOC'un bir fonksiyonudur. Tüm bunlar göz önüne alındığında Çizelge 5.2'de 140A için en kötü çalışma durumu için %40 üzeri SOC değerlerinde bir batarya şarj gücü hesaplanmıştır. Akımın 140A'i aşmaması için bu güçlerden minimumu sabit şarj gücü olarak belirlenmiştir.

GENSET için ise Çizelge 5.2'de yaklaşık 54kW olan şarj gücünü üretecek birleştirilmiş maksimum verim noktası bulunmalıdır. Birleştirilmiş verim İYM verimi ve generatör veriminden oluşmaktadır. Ancak İYM verim haritası da generatör verim haritası da mekanik çalışma noktalarına karşın verimi vermektedirler. Haritaların sadece mekanik büyüklükler tarafında girişleri vardır. Bu durumda elimizde sadece elektriksel güç olduğundan mekanik hıza bir dönüşüm yapılamamaktadır. Bu problemi çözmek için 100kW'a kadar olan tüm mekanik güç aralığı 100W'lık adımlarla, hız aralığı ise 10rpm'lik adımlarla taranmış ve bu noktalar için İYM ve generatör verimleri hesaplanmıştır. Her bir adımda İYM verimi ve generatör verimi çarpılarak toplam verime geçilmiştir. Her bir mekanik güç değeri için en iyi

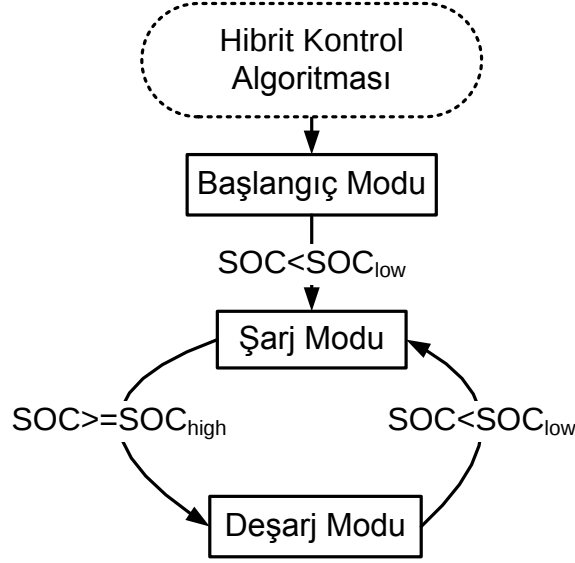
birleştirilmiş verimi veren mekanik güç, hız ikilisi bulunmuştur. Buradan da birleştirilmiş verim bilindiğinden o mekanik güç için üretilebilecek en iyi elektriksel güce geçilmiştir. Bu işlem 100kW'a kadar yapıp, elde edilen en verimli elektriksel güçler arasından 53,5kW ve 54,5kW arasında olanlar bulunmuştur. Daha sonra her mekanik güç için bulunan en iyi elektriksel güçler veri kümesi içerisinde en iyi verimli olanı seçilmiş ve bu güce ait hız ve tork bilgileri elde edilmiştir. Böylece algoritmada kullanılan P_{genopt} , T_{genopt} ve ω_{genopt} değerleri bulunmuştur. Aynı şekilde bir hesaplama P_{genmax} için de yapılmaktadır. P_{genmax} zorlanmış şarj durumunda kullanılacağı için 99kW'dan büyük bir güç aralığı taranmıştır. Zorlanmış şarj durumunun çok uzun süre devam etmeyeceği varsayıldığından elektrik motorunun geçici güç bölgesi bu işlem için kullanılmıştır.

Yukarıda anlatılan işlemleri yapan algoritma Ek-4'te verilmiştir ve ekte verilen Matlab kodu sonucuna göre Çizelge 5.3'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.3 Optimum ve maksimum şarj noktaları

	Optimum Şarj Noktası (P_{genopt})	Maksimum Şarj Noktası (P_{genmax})
Elektriksel Güç [kW]	54,4627	99,0682
Birleştirilmiş Verim [%]	39,0819	37,5812
Tork [Nm]	352,3757	498,3823
Hız [rpm]	1610	2100

Kontrol algoritması üç ana moddan oluşmaktadır (Şekil 5.10). SOC değerini belirli bir bant aralığında sabit tutabilmek için oluşturulan bu algoritmada öncelikle başlangıç durumuna girilmektedir. Bu durum içerisinde başlangıçta bataryada depolanan enerji bandın alt sınırına gelinceye kadar harcanmaktadır. Daha sonra algoritma enerji depolama eğilimine sahip olan şarj moduna girmektedir. Batarya SOC bandının üst sınırına kadar şarj edildiğinde bu durumdan çıkılarak bataryadan enerji kullanımı eğilimine sahip olan deşarj moduna girmektedir. Batarya SOC bandının alt sınırına kadar deşarj edildiğinde yeniden şarj eğilimi durumuna dönlür. Algoritma bu son iki durum arasında döngü halinde çalışmaktadır. Algoritmayı oluşturan bu üç ana durum Şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.10 Kontrol algoritması genel blokları

Başlangıç modunda (Şekil 5.11) daha önce bahsedildiği üzere, GENSET devreye alınmadan sadece EM ile sürüş sağlanmaktadır. Bu şartlar altında İYM çalışmamakla beraber yakıt tüketim değeri sıfırdır.

Sürücü tarafından frene basılmamış ve batarya SOC değeri SOC_{max} değerinin altında ise algoritma başlangıç deşarj durumu (Durum 11) ile çalışmasına devam eder. Bu durumda:

Durum11:

$$P_{gen} = 0$$

$$P_{EM} = P_{req}$$

eşitlikleri geçerlidir. Bu şartlar altında sürücü tarafından tüm hızlanma istekleri birebir olarak EM sürücüsüne referans olarak gönderilmektedir.

Başlangıç modu içerisinde sürücü tarafından frene basılmış ve SOC değeri SOC_{max} değerinin altında ise algoritma başlangıç modu bloğundaki rejeneratif frenleme durumuna (Durum 12) dallanır. Bu durumda:

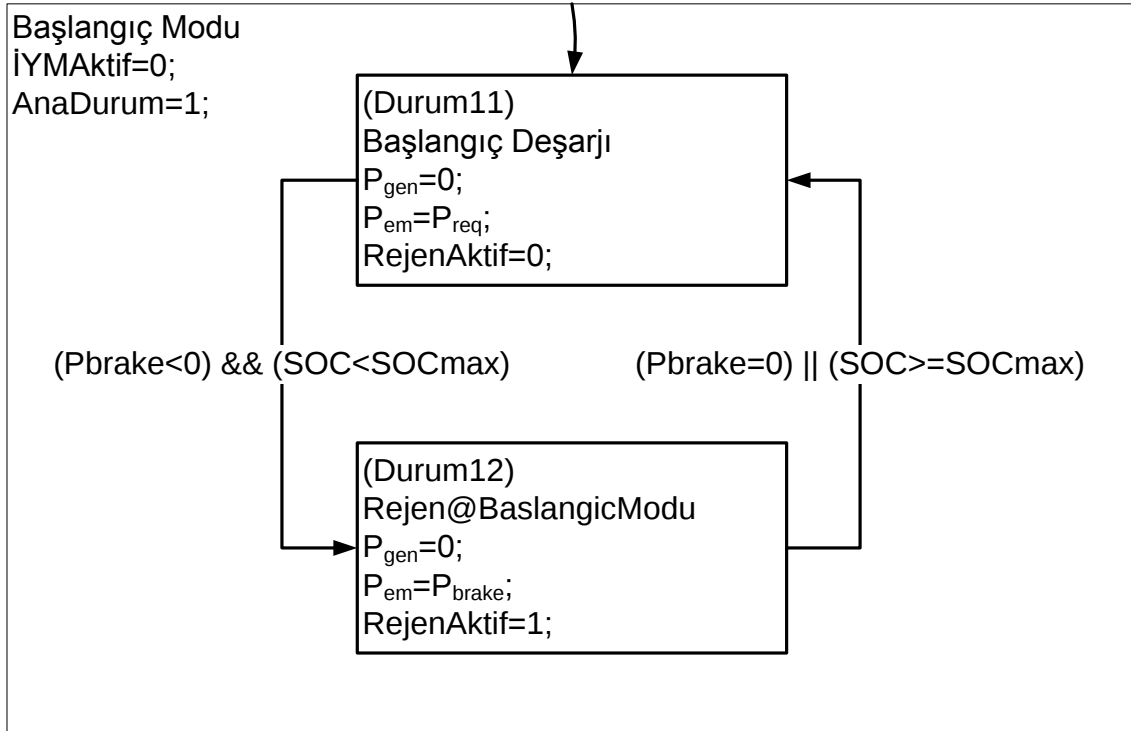
Durum12:

$$P_{gen} = 0$$

$$P_{EM} = P_{brake}$$

eşitlikleri geçerlidir. Sürücü tarafındaki frenleme isteği, EM sürücüsüne frenleme referansı olarak uygulanmakta ve aracın kinetik enerjisi, rejeneratif frenleme ile bataryalarda elektrik enerjisi olarak depolanmaktadır. Maksimum rejeneratif frenleme gücü batarya şarj limitleri ile

sınırlanmakla beraber, daha üst frenleme istekleri aracın klasik hidrolik sistemi ile karşılanmaktadır.



Şekil 5.11 Kontrol algoritması başlangıç modu bloğu

Şekil 5.10’da görüldüğü gibi başlangıç modundan çıkmak için gerekli ve yeter tek koşul batarya şarj seviyesi koşuludur. SOC değeri SOC_{low} değerinin altında ise, kontrol algoritması başlangıç modundan şarj moduna dallanır. Algoritmanın şarj durumuna dallanması ile “İYMAktif=1” eşitliği ile İYM hemen devreye alınır (Şekil 5.12) ve GENSET kontrolü için bölüm 5.4.1’de açıklanan GENSET kontrolörü devreye girer.

Şarj bloğuna giren akışta varsayılan olarak dallanılan alt durum optimum noktada şarj durumudur (Durum 22). Bu durumda:

Durum22:

$$P_{gen} = P_{genopt}$$

$$P_{EM} = P_{req}$$

eşitlikleri geçerlidir. Optimum noktada şarj devam ederken sürücü tarafından frenleme isteği ile optimum şarj durumundan çıkış olduysa ($P_{brake}<0$), algoritma şarj durumu içerisindeki rejeneratif frenleme durumuna (Durum 21) dallanır.

Bu durumda:

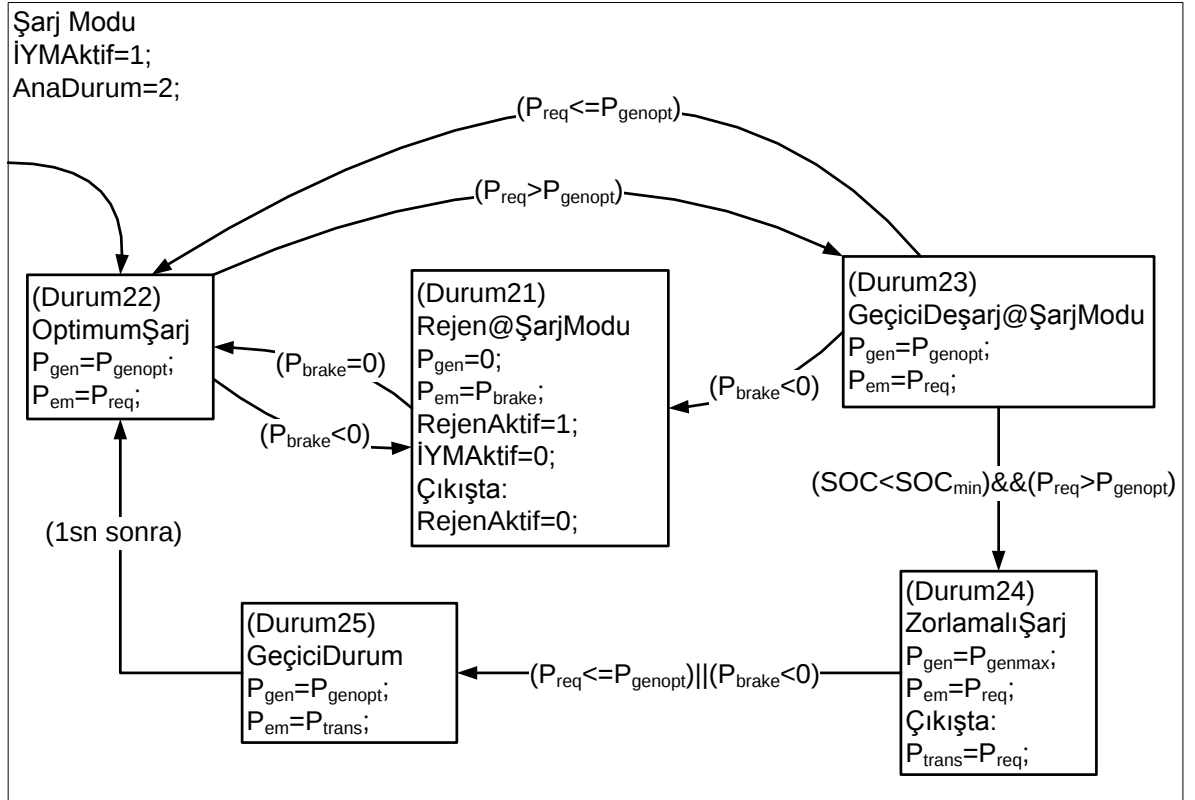
Durum21:

$$P_{gen}=0$$

$$P_{EM}=P_{brake}$$

$$\dot{Y}MAktif=0$$

eşitlikleri geçerlidir. Rejeneratif frenleme sırasında araç için güç ihtiyacı bulunmadığından, İYM durdurulmakta ve aracın kinetik enerjisi rejeneratif frenleme ile bataryalarda depolanmaktadır. Sürücü tarafından frenleme isteği ortadan kalktığına ya da uzun süreli frenleme sonucu SOC değeri SOC_{high} değerine eriştiğinde, şarj modunun tüm SOC artımı eğilimli durumlarında olduğu gibi şarj modu bloğundan çıkarakdeşarj modu bloğuna dallanır. Frenleme isteği burada da devam ediyorsa, rejeneratif frenlemeden gelen enerjiyi kazanmak adına,deşarj modunda (AnaDurum3) “ $SOC \geq SOC_{max}$ ” koşulu sağlanana kadar rejeneratif frenleme devam eder. Eğer SOC değeri üst limit değerine erişmeden frenleme kesildiyse, algoritma tekrardan optimum şarj durumuna (Durum22) dönüş yapar .



Şekil 5.12 Kontrol algoritması şarj modu bloğu

Sürücü tarafından güç isteği (P_{req}), optimum şarj gücünden (P_{genopt}) daha yüksek olursa, algoritma bu sefer geçicideşarj durumuna (Durum 23) dallanır.

Bu durumda:

Durum23:

$$P_{gen} = P_{genopt}$$

$$P_{EM} = P_{req}$$

eşitlikleri geçerlidir. Burada ($P_{req} > P_{genopt}$) olduğu için bataryaya aktarılan enerji, bataryadan çekilen enerjiden daha küçük olacaktır. Dolayısıyla batarya şarj seviyesi azalma eğilimine girecektir. Uzun süreli yüksek güç isteğinin devam arz etmesi durumunda, bataryanın deşarj eğilimi devam edecektir. Batarya SOC değeri, alt SOC limiti olan SOC_{min} değerine inmeden, sürücü güç isteği optimum şarj gücünün altına düşerse, algoritma tekrardan optimum şarj durumuna (Durum22) geri dönüş yapar. Ancak sürücünün uzun süreli yüksek güç isteği sonucunda ($SOC < SOC_{min}$) koşulu sağlanacak duruma gelirse algoritma bu sefer zorlamalı şarj durumuna (Durum 24) dallanacaktır. Bu durumda:

Durum24:

$$P_{gen} = P_{genmax}$$

$$P_{EM} = P_{req}$$

$$P_{trans} = P_{req}$$

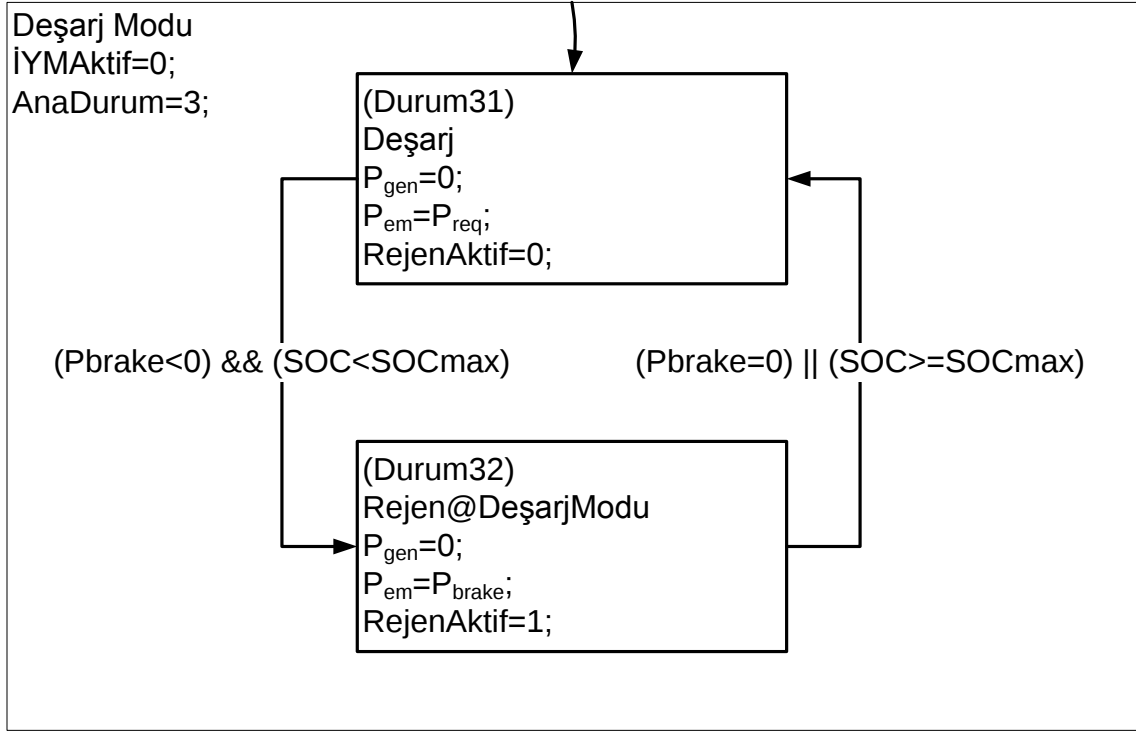
eşitlikleri geçerli olacaktır. Bu durumda, sürücü isteğinden arta kalan güç bataryalarda şarj için kullanılmaktadır ve SOC değeri tekrar zorlamalı olarak yükselme eğilimine geçer. Ancak pratik uygulamada sürücünün ani olarak güç isteğini kesmesi durumunda, geçici durum rejiminden kaynaklı olarak bataryanın, optimum şarj gücünden yüksek bir şarj gücüne maruz kalması söz konusudur. Batarya için yüksek şarj akım değerleri ile batarya güvenliği açısından sakıncalı olan bu durumun önüne geçmek için, optimum şarj durumuna (Durum 22) geçiş sırasında geçiş durumu (Durum 25) tanımlanmıştır. Bu durumda:

Durum25:

$$P_{gen} = P_{genopt}$$

$$P_{EM} = P_{trans}$$

eşitlikleri geçerlidir. Burada, elektrik motoruna gönderilen bir önceki referans değer I_{sn} gibi kısa bir süre için devam etmekte, GENSET'in optimum şarj noktasına geri dönüşü sağlandıktan sonra, elektrik motorunun sürücü güç isteğini aynen almasına izin verilmektedir. Bu sayede, geçici rejim durumu ile bataryanın yüksek şarj gücüne maruz kalması engellenmektedir.



Şekil 5.13 Kontrol algoritması deşarj modu bloğu

Tüm alt durumları Şekil 5.12’de açıklanan şarj durumu bu şekilde devam ettikten sonra, batarya SOC seviyesinin, SOC bandının üst noktasındaki SOC_{high} değerine erişmesi sağlanır. Bu durumda $(SOC \geq SOC_{high})$ eşitliğinin sağlanması ile algoritma bataryanın deşarj olarak sadece EM ile sürüşün sağlanacağı deşarj modu bloğuna dallanacaktır (Şekil 5.13).

Bu durum bloğu içerisinde, başlangıç durumundaki koşulların aynısı geçerlidir. Blok girişinde “İYMAktif=0” eşitliği ile içten yanmalı motora durdurma sinyali gönderilmekte ve İYM durdurulmaktadır. Sadece EM ile sürüşün sağlandığı bu blok içerisinde, SOC bandının alt eşiğine kadar İYM çalışmamakta ve yakıt tüketimi sıfır olmaktadır. Frenleme isteğinin olmadığı koşulda geçerli olan deşarj durumunda (Durum 31):

Durum31:

$$P_{EM} = P_{req}$$

$$P_{gen} = 0$$

eşitlikleri geçerlidir. Bu eşitlikler ile GENSET’e herhangi bir referans gönderilmemekte ve sürücünün güç isteği olduğu gibi EM sürücüsüne referans olarak iletilmektedir. Sadece EM sürüşü devam ederken sürücü tarafından frenleme isteği algılanırsa ($P_{brake} < 0$) ve batarya SOC değeri SOC_{max} değerinin altında ise algoritma deşarj bloğundaki rejeneratif frenleme alt durumuna (Durum 32) dallanır. Bu durumda:

Durum32:

$$P_{EM} = P_{brake}$$

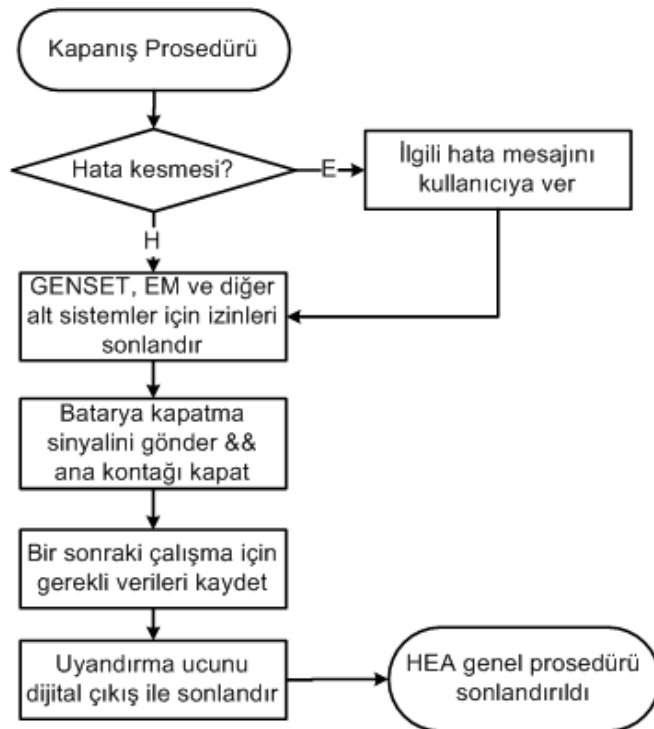
$$P_{gen} = 0$$

eşitlikleri geçerlidir. Frenleme isteği, EM sürücüsüne rejeneratif frenleme isteği olarak iletilmektedir ve yine aracın kinetik enerjisi bataryada depolanmaktadır.

Tüm ana blokları ve alt durumları açıklanan kontrol algoritması, sürüş esnasında döngü içerisinde devam etmektedir. Sürücü istekleri ve SOC değerleri irdelenerek, durumlar arası geçiş sağlanmakta ve hibrit elektrikli araçların avantajları arasında sayılan motor durdurma, rejeneratif frenleme ve optimum noktada İYM kontrolü esasları uygulanmaktadır.

5.5 Kapanış Prosedürü

Sürücü, araçtan ayrılacağı zaman kontağı “0” konumuna aldıktan sonra, anahtar ile birlikte aracı terketmektedir. Fakat, halen devrede olan hibrit kontrol algoritmasının gerekli verileri kaydedip, alt sistemlere kapanış sinyallerini düzgün bir şekilde göndermesi gerekmektedir. Bu nedenle, HKÜ üzerindeki bir adet dijital çıkış ile Kontak “I” konumu bir röle ile birleştirilmiştir. Kontak açıldığında, dijital çıkış “lojik 1” seviyesine getirilmekte ve rölenin uyandırma ucunu besleyecek şekilde yol vermesi sağlanmaktadır. Kontak tekrar “0” konumuna alınsa dahi, uyandırma ucu aktif olduğundan, dSpace çalışmaya ve prosedürleri işletmeye devam etmektedir.

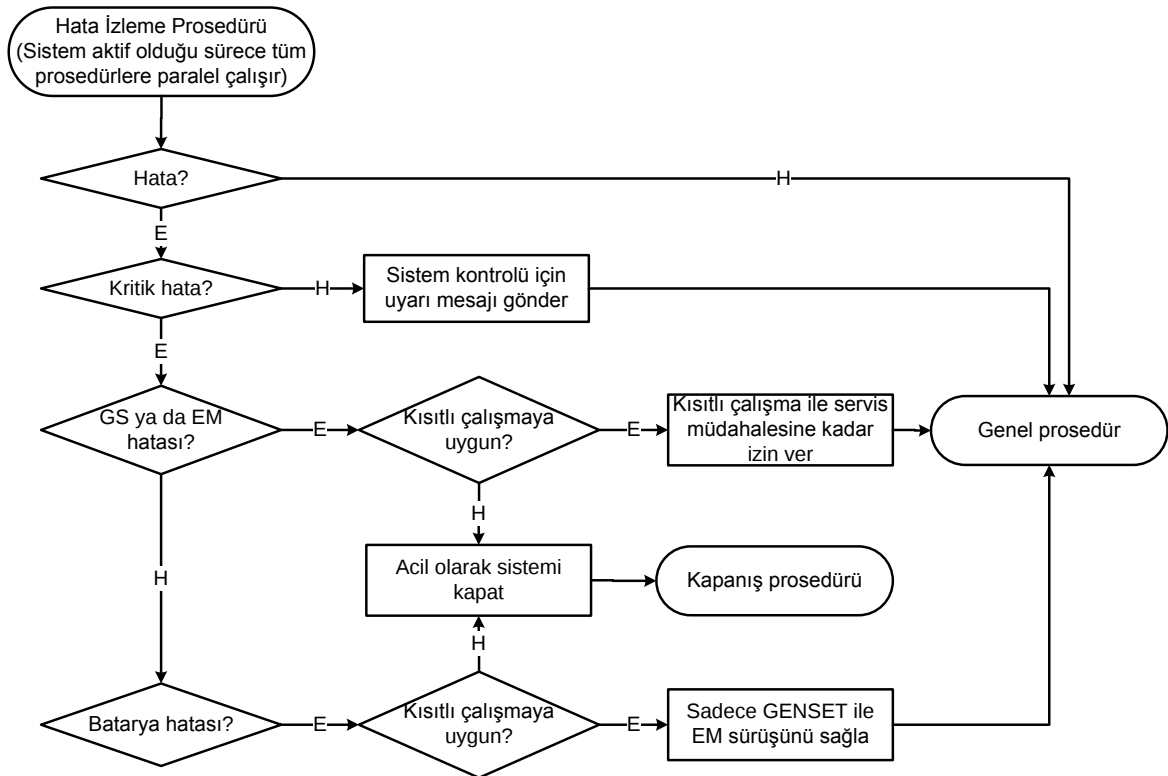


Şekil 5.14 Sistem kapanış prosedürü

Kontak “0” konumunun algılanması ile kapanış prosedürü işleme alınmakta ve tüm işlemler tamamlandıktan sonra, ilgili dijital çıkış “lojik 0” seviyesine çekilerek hibrit kontrol ünitesinin kapanmasına izin verilmektedir. Eğer kapanış prosedürüne, herhangi bir kritik hata sebebi ile dallanma olduysa, sürücüye hata uyarısı yapıldıktan sonra standart kapanış prosedürü işletilmektedir.

5.6 Hata İzleme Prosedürü

Hata izleme prosedürü, HKÜ ve tüm alt sistemlerin uyanması ile başlamaktadır. Batarya, elektrik destekli kompresör, elektrik destekli hidrolik sistem, elektrik motoru sürücüler ve içten yanmalı motora ait durum bilgileri, uyarılar ve hatalar HKÜ tarafından CAN hatları vasıtasıyla okunmaktadır. Bu hatalar önem seviyelerine göre gruplandırılmaktadır. Hata izleme prosedürü, HKÜ kapanış prosedürünü tamamlayıp kendini uyku moduna sokana kadar devrede kalmaktadır. Başlangıç prosedüründe, işletim sırasında ya da harici şarj modunda herhangi bir kritik hata görüldüğünde sistem güvenli moda alınarak gerekli alt işlemler yapılmaktadır. Eğer görülen hata kritik önem seviyesinde değil ise, hata derecesine göre motor ve jeneratör çalışmalarında kısıtlamalar getirilmektedir. Burada amaç, aracın müdahale edilebilecek bir ortama kadar güvenli olarak seyir edebilmesidir.



Şekil 5.15 Hata izleme prosedürü

Yazılımsal hata izleme prosedürünün yanı sıra, sadece batarya sistemine özgü olarak donanımsal bir koruma bulunmaktadır. Bataryanın aktif hale gelebilmesi için, HKÜ tarafından uyanma sinyalinin verilmiş olması, batarya üzerinde herhangi bir hata bayrağının olmaması ve sürücü tarafından herhangi bir şekilde emniyet butonuna basılmamış olması gerekmektedir. Bu şartlardan herhangi biri sağlanmadığında, batarya devrede ise kontaklar kapanmakta, eğer henüz devreye alınmamış ise kontaklar açılmamaktadır. Bu şekilde, HEA için kritik önem seviyesindeki bataryanın yazılıma paralel olarak donanımsal olarak da korunması sağlanmaktadır.

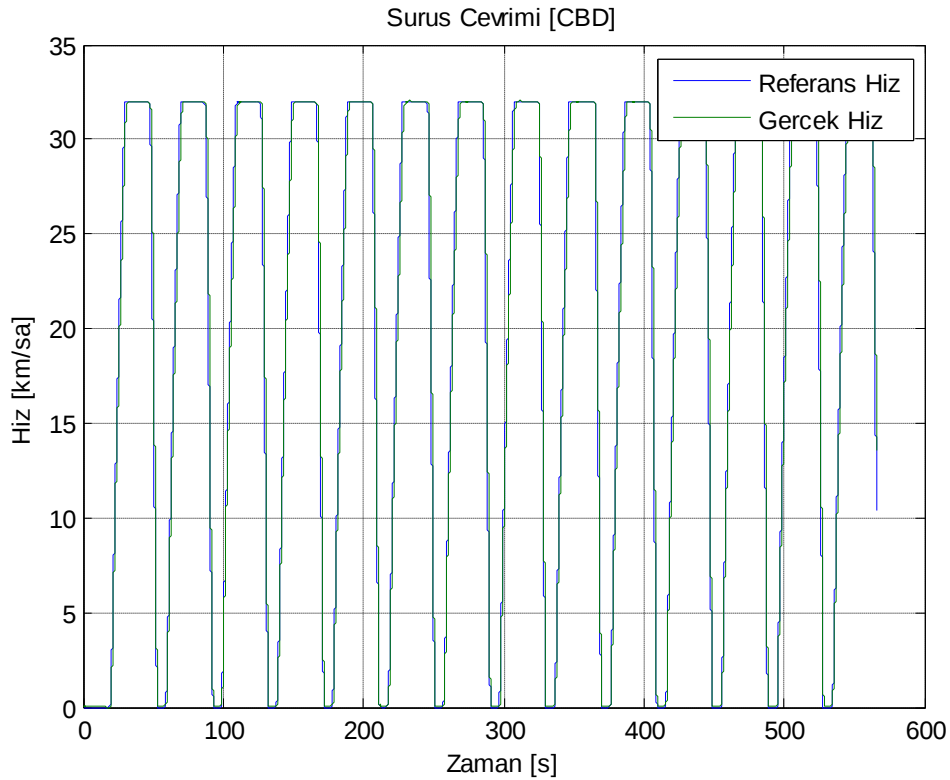
Sürücü tarafından herhangi bir acil durum gerekliliği görüldüğünde, prototip çalışmalarda güvenlik amacı ile acil durum butonu sürücü koltuğu yakınına konumlandırılmıştır. Sürücü gerekli gördüğü acil durumlarda bu acil durum butonuna basmak sureti ile batarya kontaklarını kapatarak sistemi tamamen kapalı hale sokabilir.

6. SİMÜLASYONLAR

Tez kapsamında konvansiyonel ve seri hibrit elektrikli olarak modelleri kurulmuş olan aracın, ECE15 ve CBD çevrimleri için karşılaştırmalı simülasyon sonuçları bu bölümde yer almaktadır. Algoritma durum geçişlerinin simülasyon zamanı içerisinde görülebilmesi için SOC bandı %69-%71 olarak alınmıştır.

6.1 Seri Hibrit Elektrikli Araç İçin CBD Çevrimi Verileri

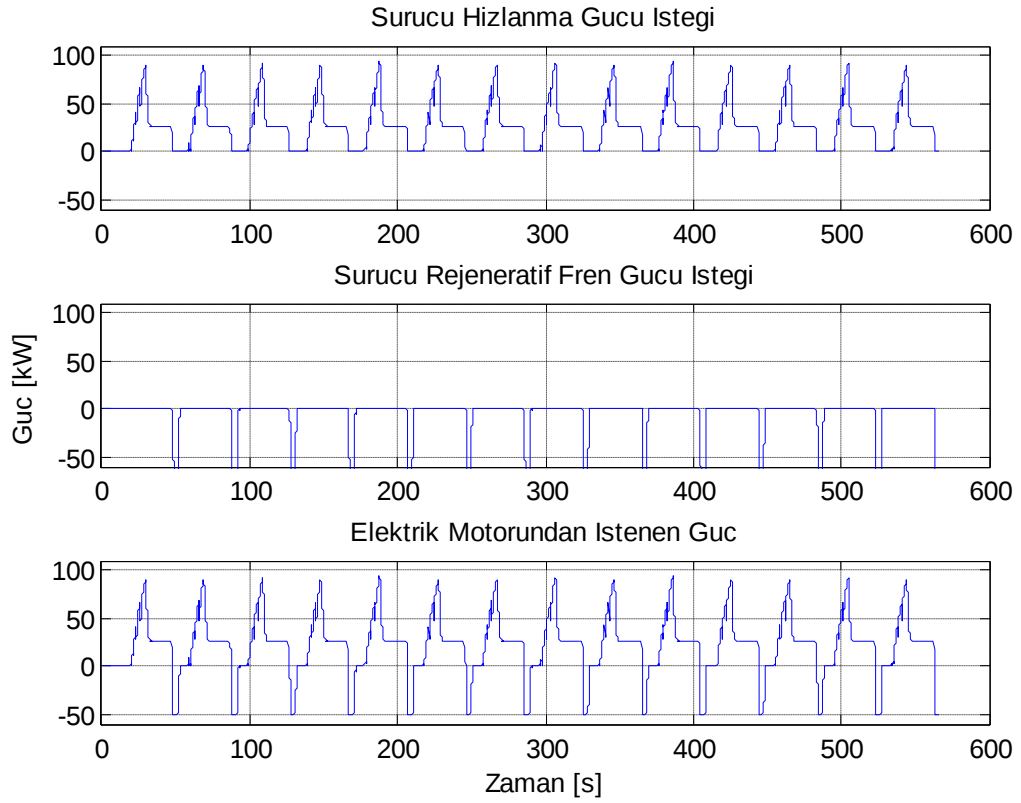
Modellemesi tamamlanan seri hibrit elektrikli aracın, metodolojisi anlatılan hibrit kontrol algoritması ile CBD çevrimi için simülasyonlarından elde edilen bazı veriler bu bölümde yer almaktadır.



Şekil 6.1 S-HEA için CBD çevrimi takip performansı

Şekil 6.1’ de seri hibrit elektrikli araç için kontrol algoritması, sürücü modeli benzetimi, araç modeli ve EM-İYM haritaları kullanılarak elde edilen çevrim takip performansı yer almaktadır.

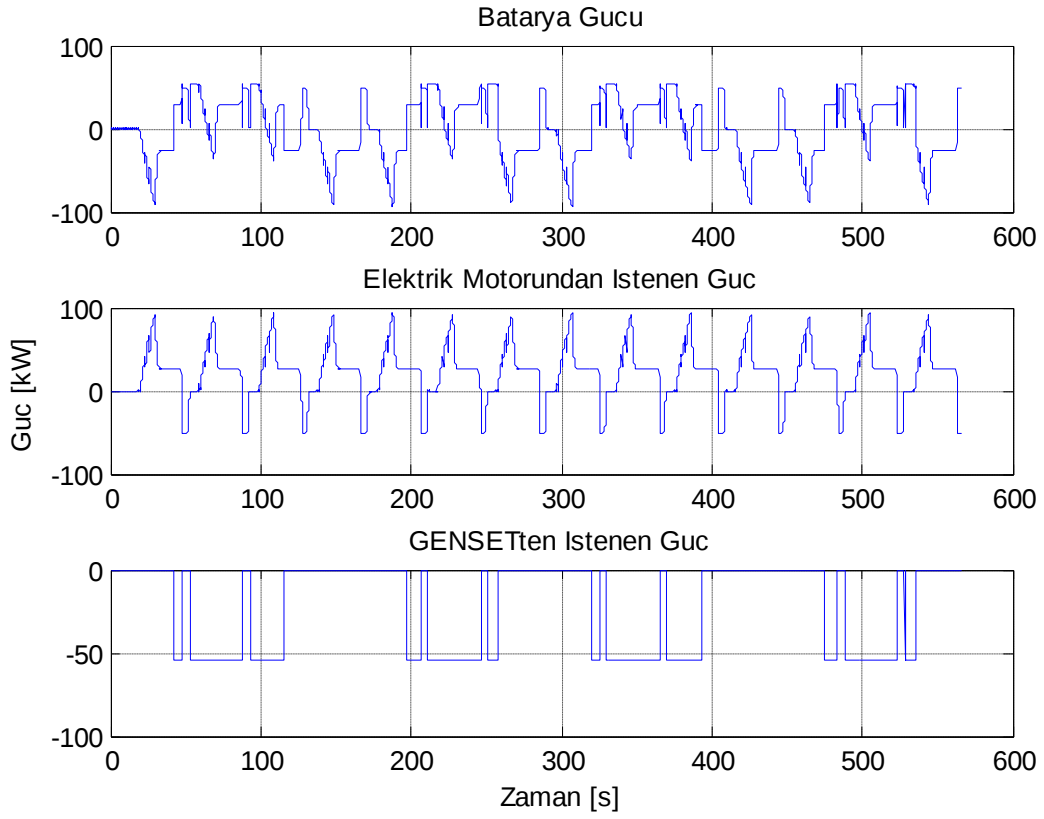
Maksimum 32km/sa hıza simülasyon zamanı boyunca defalarca çıkıp tekrar duraklama eğilimi gösteren bu çevrim için, PI tabanlı sürücü benzetimi ve komple modelin takip performansı oldukça iyi olduğu görülmektedir.



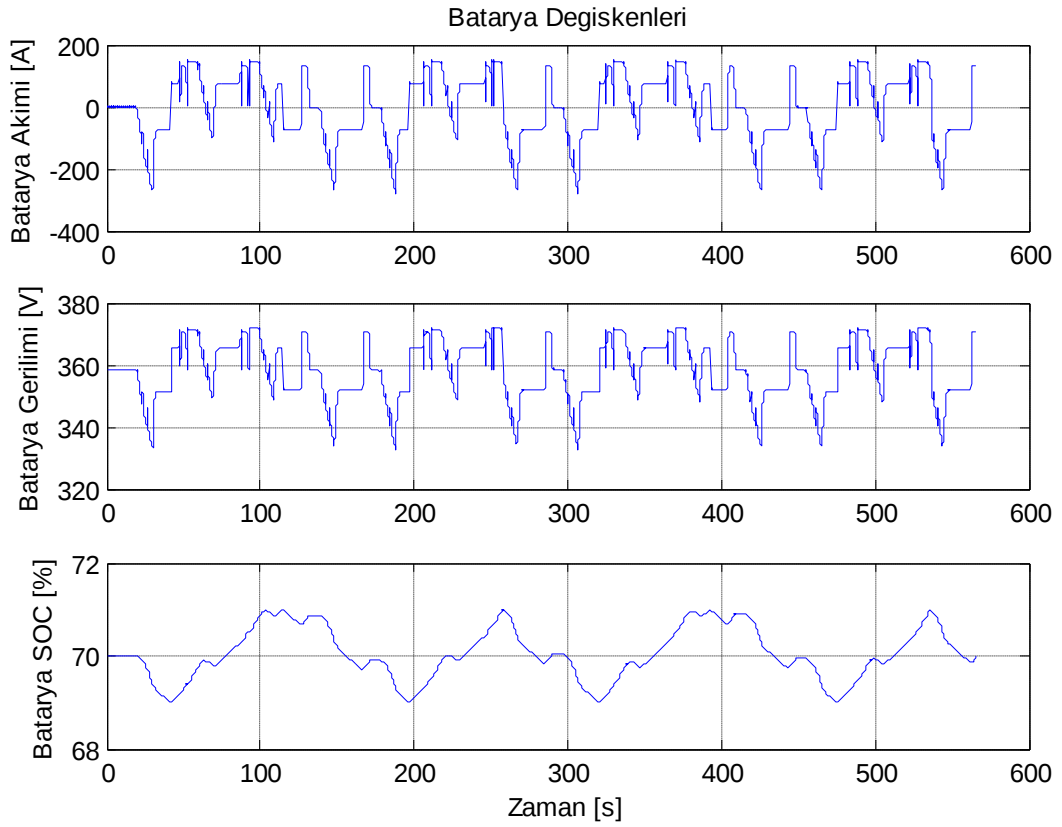
Şekil 6.2 S-HEA için CBD çevrimi sürücü istekleri ve EM anlık güç değerleri

CBD çevrimi boyunca, sürücün çevrim profiline bağlı olarak talep ettiği hızlanma ve frenleme istekleri ile elektrik motoruna yansıyan güç isteği Şekil 6.2’de görülmektedir. Dikkatle incelendiğinde, sürücü tarafından tüm frenleme isteklerini rejeneratif frenleme ile karşıladığımız modelde, hızlanma isteği ve rejeneratif fren gücü isteklerinin toplamı, elektrik motorundan istenen toplam güce eşit olmaktadır.

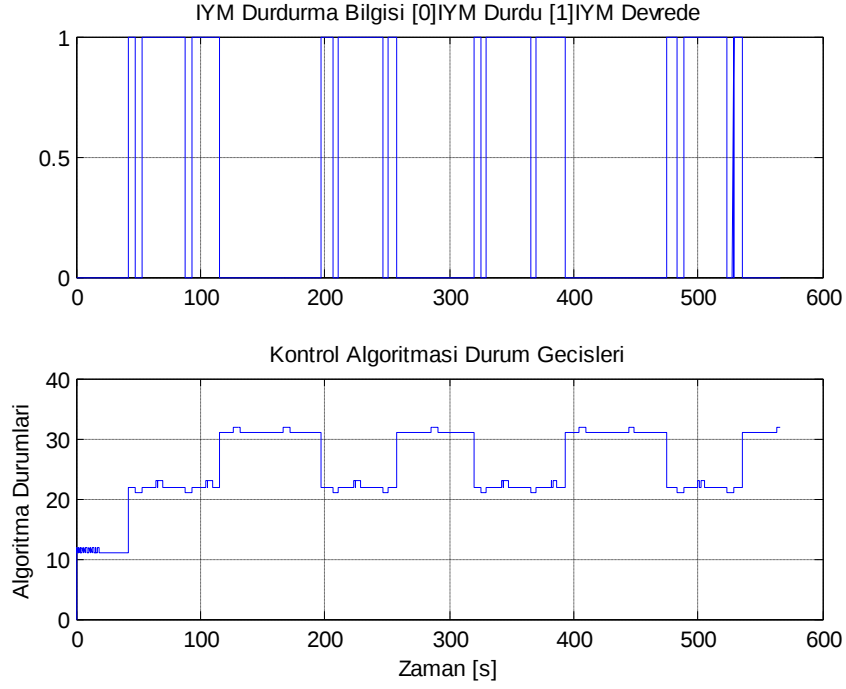
Yine simülasyon süresince, batarya, elektrik motoru ve jeneratör seti güçleri arasındaki ilişki Şekil 6.3’de görülmektedir. Algoritma durumlarına göre batarya gücü değişiklik gösterirken, yine algorithmada İYM’nin aktif ya da pasif olmasına göre GENSET’in optimum noktalı şarj desteği açık bir şekilde görülmektedir. Simülasyon sırasında, Şekil 6.3’deki batarya gücünün değişimlerine paralel olarak, bataryanın akım, gerilim ve SOC değerlerine ilişkin değişimler Şekil 6.4’te yer almaktadır. SOC değeri, başta belirtildiği gibi %69-71 bandında, termostat algoritmanın durumlarına göre salındığı net bir şekilde görülebilmektedir.



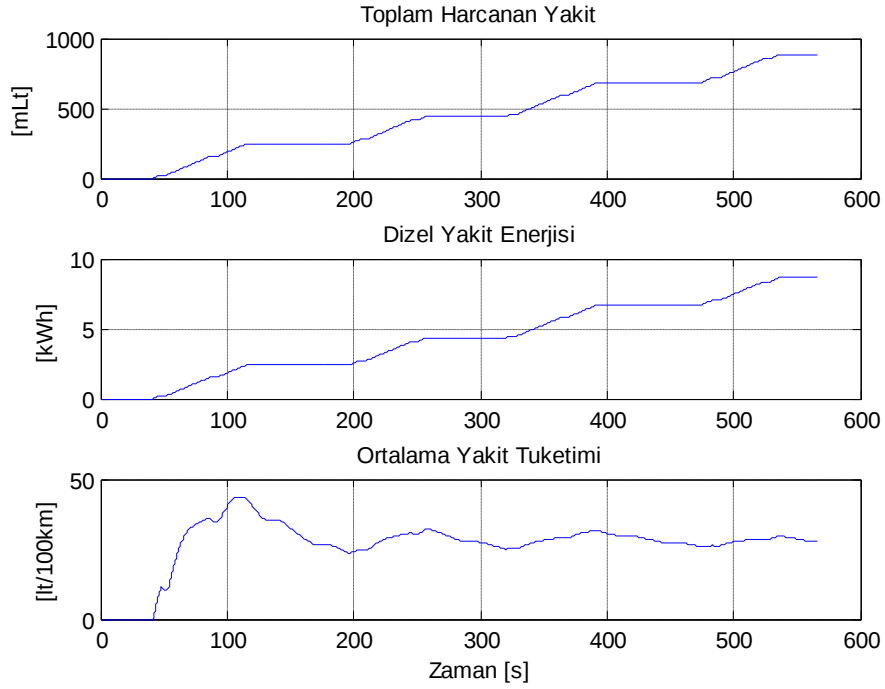
Şekil 6.3 S-HEA için CBD çevriminde anlık elektriksel güçler



Şekil 6.4 S-HEA için CBD çevriminde bataryanın anlık verileri



Şekil 6.5 S-HEA için CBD çevrimi İYM durumu ve algoritma durum geçişleri

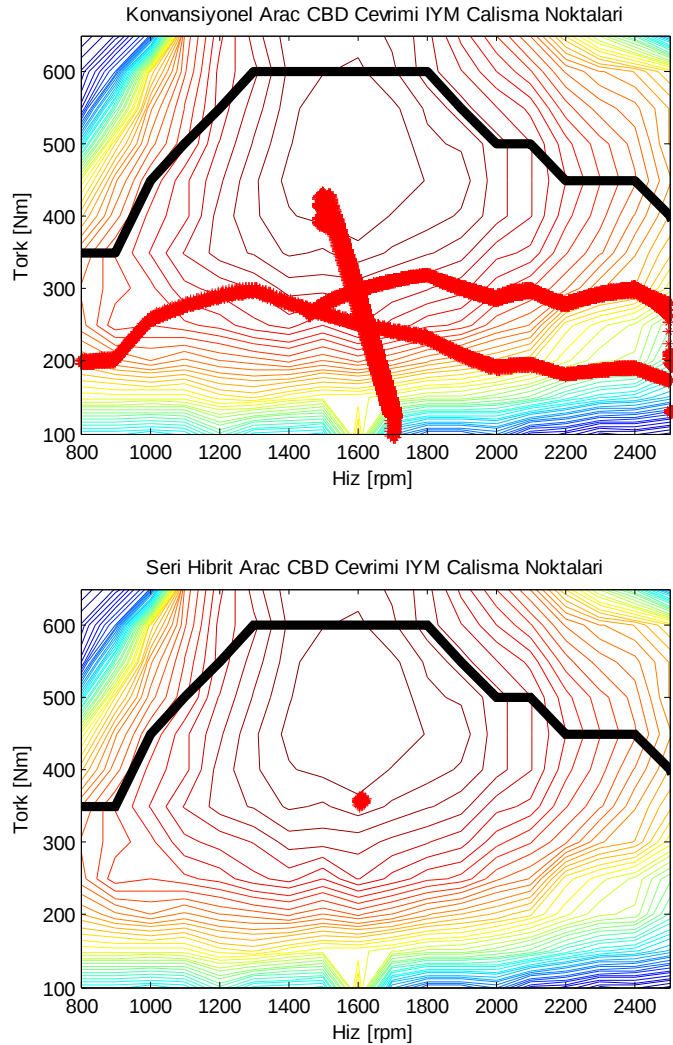


Şekil 6.6 S-HEA için CBD çevrimi İYM anlık verileri

Algoritmanın simulasyon süresinde çalışmasında, giriş çıkış yaptığı durumlar ve durumlara göre İYM'un devrede olup olmadığı bilgisi Şekil 6.5'de görülmektedir.

Şekil 6.6'da ise, İYM için anlık ve ortalama yakıt tüketim değerleri ile toplam dizel yakıt enerjisi verileri görülmektedir. Görüldüğü gibi, içten yanmalı motorun devrede olmadığı uzun

sürelerde harcanan yakıt değeri sabit değerde seyretmekte ve ortalama yakıt tüketiminde azalma eğilimi görülmektedir.



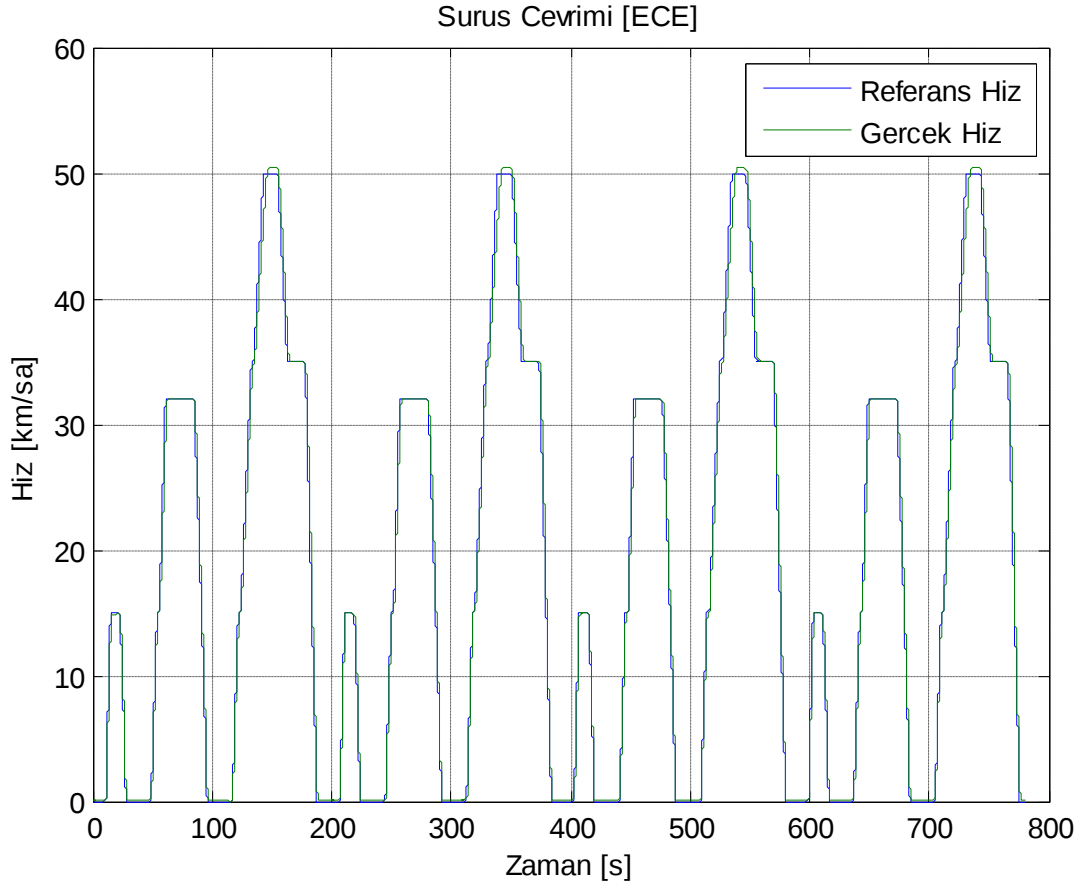
Şekil 6.7 CBD çevriminde konvansiyonel ve S-HEA için İYM çalışma noktaları

Şekil 6.7 ise, S-HEA ile konvansiyonel araç modellerinde CBD çevrimi için İYM'un çalışma noktalarını İYM verim haritası üzerinde göstermektedir. Konvansiyonel araçta CBD çevrimi için belirli bir rota üzerinde çok değişik verimlerde içten yanmalı motorun çalıştığı görülürken, S-HEA için tek noktali çalışmada İYM'nin maksimum verimli noktaya en yakın bölgede çalıştığı açıkça görülmektedir.

Konvansiyonel araçta şehiriçi yolculuklarında içten yanmalı motor Şekil 6.7'deki gibi değişik noktalarda hareket ederken, otoban sürüşlerinde yüksek hızlarda, ortalama olarak en verimli bölgenin içerisine oturmaktadır. Dolayısıyla, seri hibrit araçların özellikle şehiriçi çevrimlerinde performans artışı sağladığı açıkça anlaşılmaktadır.

6.2 Seri Hibrit Elektrikli Araç İçin ECE Çevrimi Verileri

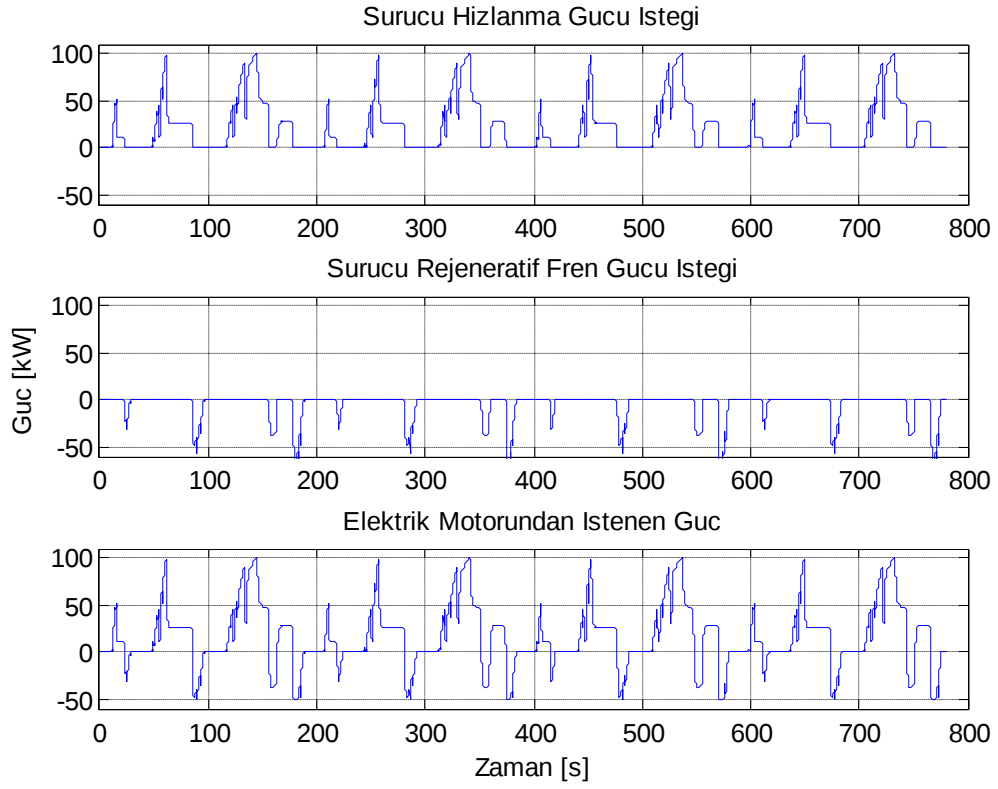
Oluşturulan modelin ve kontrol algoritmasının bir diğer standart çevrim olan ECE çevrimi için performansları aşağıda görülmektedir. Model dinamiklerinin ve PI tabanlı sürücü modelinin ECE çevrimi içinde oldukça düzgün bir takip performansı gösterdiği Şekil 6.8’de görülmektedir.



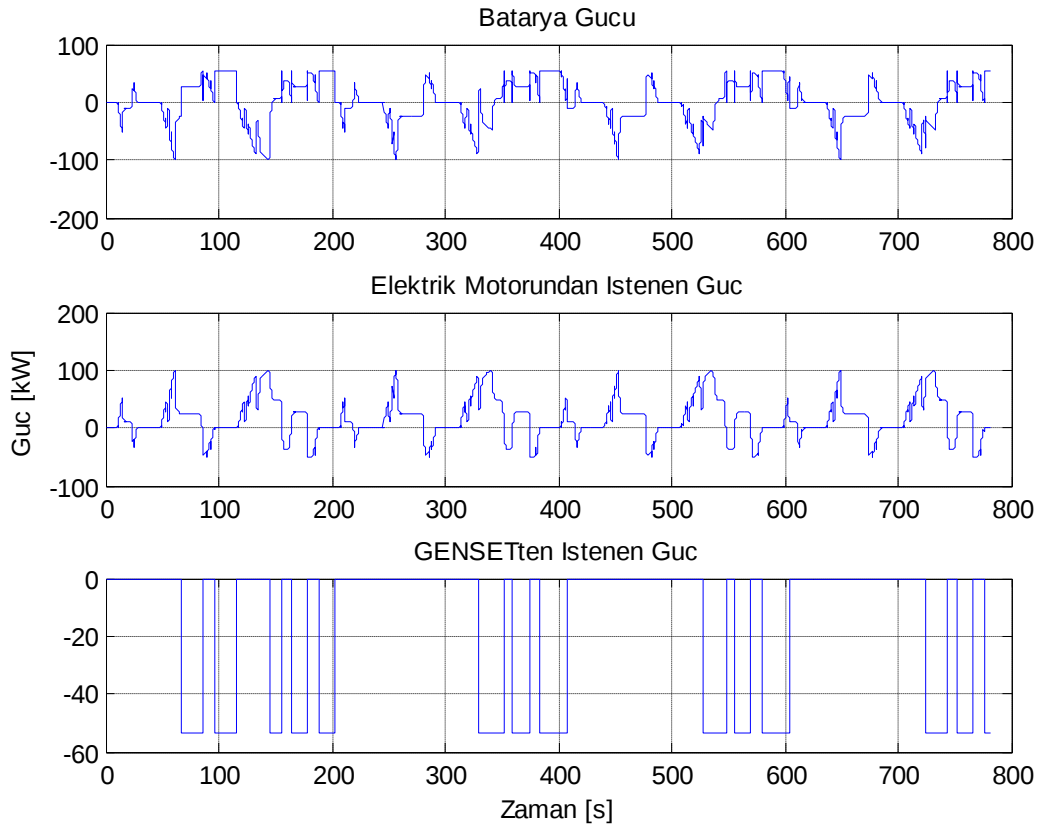
Şekil 6.8 S-HEA için ECE çevrimi takip performansı

Şekil 6.9’da ECE çevrim profili için sürücünün hızlanma ve frenleme güç seviyeleri ile elektrik motorunun çalıştığı güç aralıkları görülmektedir.

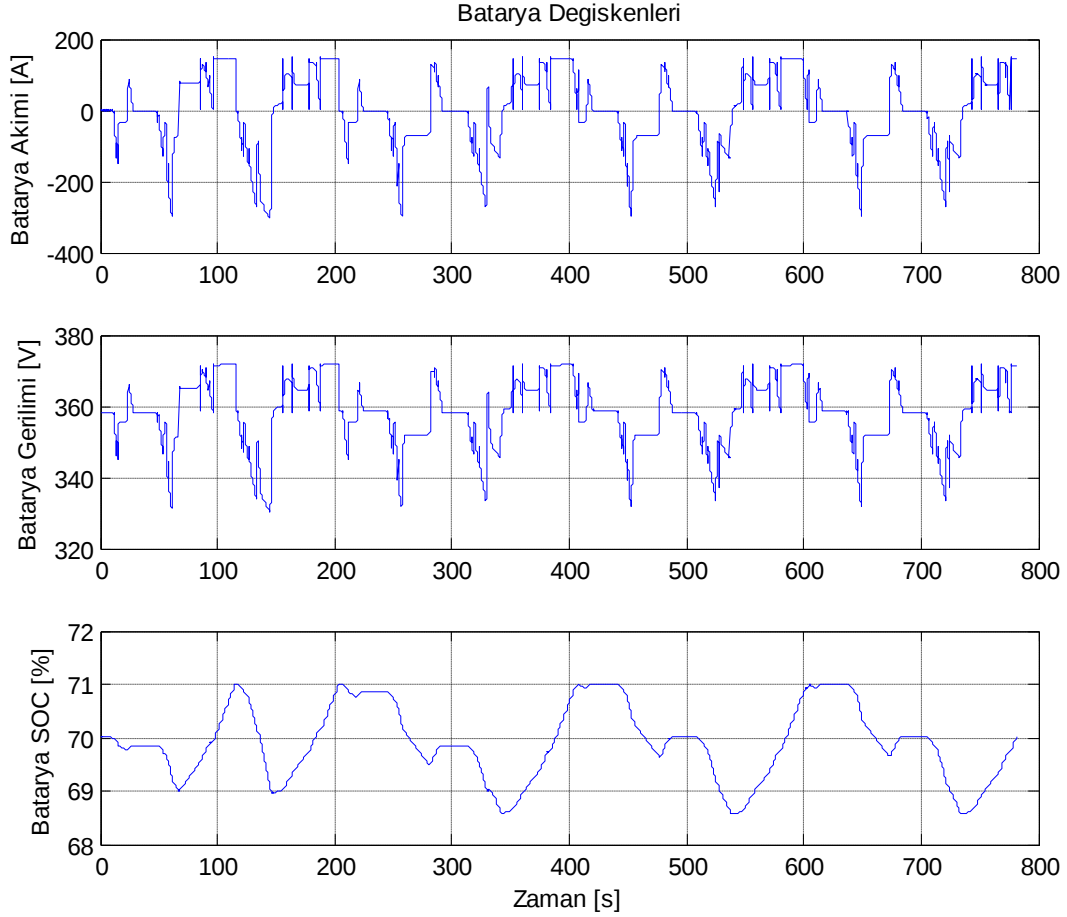
Şekil 6.10’da, ECE çevrimi boyunca batarya, GENSET ve elektrikli motoru güç paylaşımları yer almaktadır. Yine ECE çevriminde de, CBD de olduğu gibi aracı zorlamalı şarj bölgesine sokacak sürekli bir maksimum güç isteğinin oluşmadığı ve dolayısıyla GENSET’in optimum şarj noktasında çalışma seyri gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.9 S-HEA için ECE çevrimi sürücü istekleri ve EM anlık güç değerleri



Şekil 6.10 S-HEA için ECE çevriminde anlık elektriksel güçler

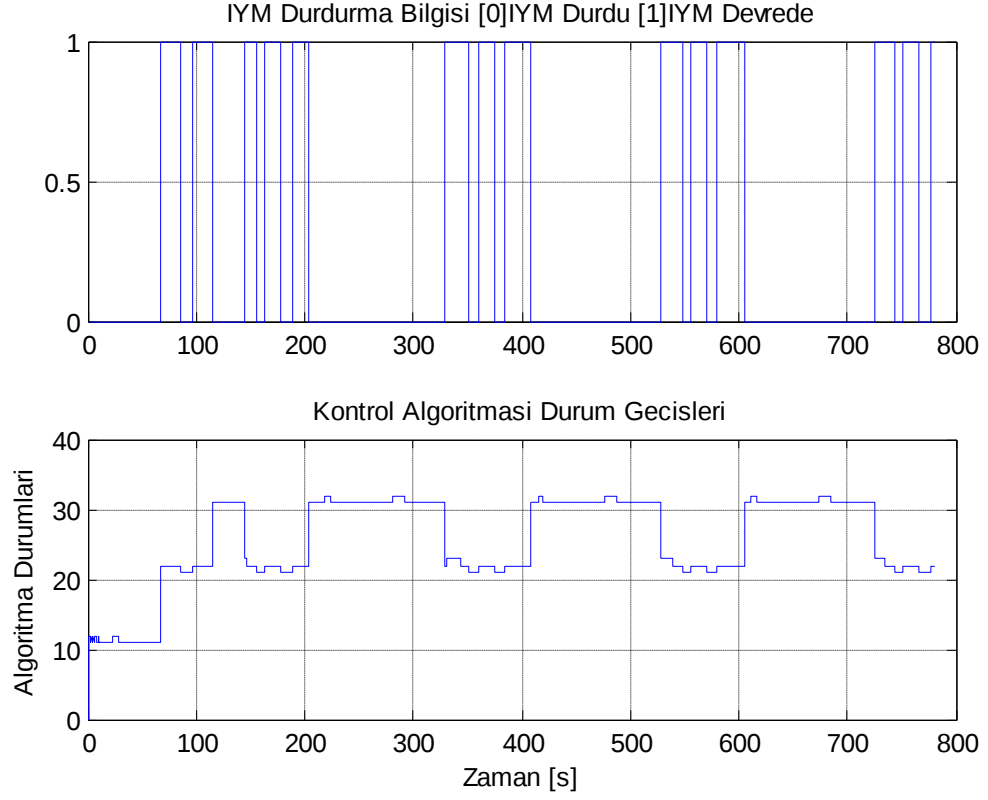


Şekil 6.11 S-HEA için ECE çevriminde bataryanın anlık verileri

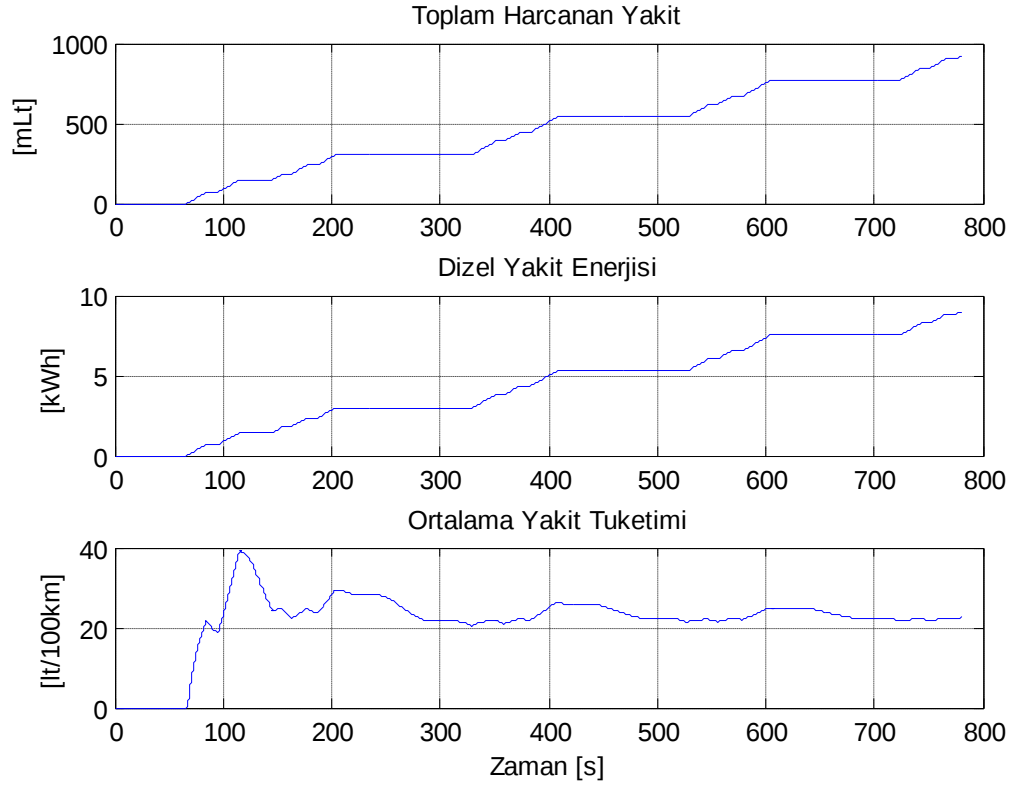
Şekil 6.11’de, ECE çevrimi koşturulan simulasyon zamanında, bataryadaki güç isteklerine karşılık akım, gerilim ve SOC değerlerinin değişimleri görülmektedir. Batarya SOC değerinin, çoğunlukla %69-71 bandından çıkmadığı, bazı bölgelerde SOC_{low} seviyesinin altına geçici deşarj modu koşulları ile geçtiği görülmektedir.

Şekil 6.12’de, ECE çevrimi için İYM durma zamanları ve güç isteklerine göre algoritma durum geçişleri yer almaktadır.

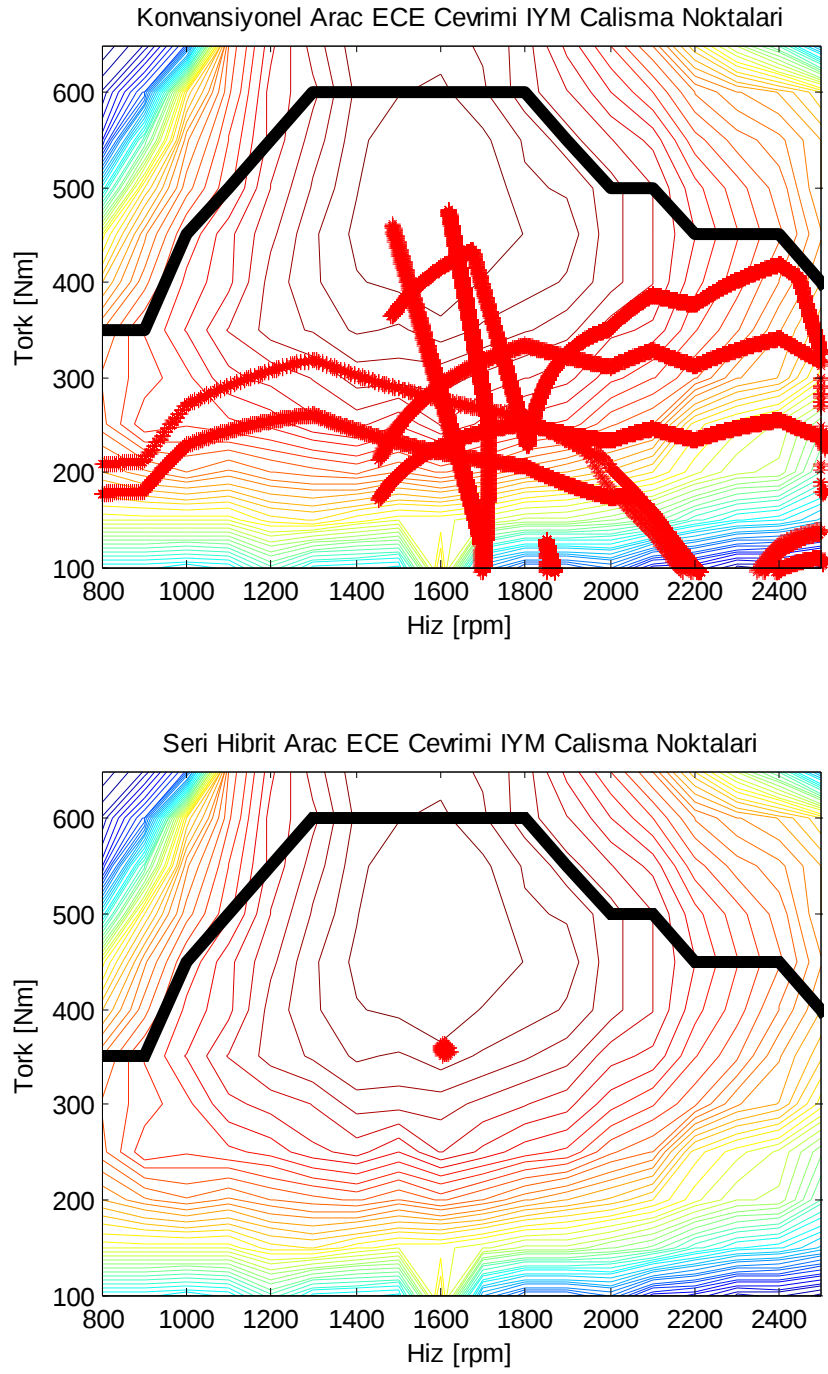
Şekil 6.13’de ise, ECE çevrimi için yakıt tüketim değerleri anlık ve ortalama olarak yer almaktadır. Karşılaştırmalı analiz tablosunda (Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2), CBD ve ECE çevrimleri için sayısal olarak yakıt tüketim değerleri görülmektedir.



Şekil 6.12 S-HEA için ECE çevrimi İYM durumu ve algoritma durum geçişleri



Şekil 6.13 S-HEA için ECE çevrimi İYM anlık verileri



Şekil 6.14 ECE çevriminde konvansiyonel ve S-HEA için İYM çalışma noktaları

ECE çevriminde, CBD çevrimine göre daha yüksek hızlara çıkan bir çevrim karakteristiği olduğu düşünüldüğünde, aracın aynı şartlar için daha yüksek vites değerleri ile o hız profiline erişeceği aşıkardır. Şekil 6.14'te ECE çevriminde konvansiyonel ve S-HEA için İYM çalışma noktalarını göstermektedir. Konvansiyonel araçta, yüksek vites noktalarına geçiş olduğu için, CBD'den farklı olarak daha çok noktada değişik tork-hız değerlerinde gezdiği görülmektedir.

S-HEA için ise İYM çalışma noktası değişiklik göstermemiştir ve sürekli olarak optimum şarj noktasında çalışmasını sürdürmüştür.

6.3 Konvansiyonel Araç ve Seri Hibrit Elektrikli Araç Karşılaştırma Verileri

Tez kapsamında yapılan modelleme ve algoritma çalışmaları sonucunda elde edilen yakıt tüketim verileri aşağıda görülmektedir.

Adil karşılaştırma için, batarya SOC değerinin çevrim içerisinde başlangıç değerine döndüğü noktalar itibari ile sonuçlar alınmıştır. Aracın hareketi sırasında SOC bandı içerisinde değişen batarya SOC değerinin ilk değere dönmesi ile, katedilen mesafe boyunca bataryadan kullanılan toplam enerji miktarı sıfırdır.

Çizelge 6.1’de, dolu araç için CBD ve ECE çevrimleri sonucunda, konvansiyonel ve seri hibrit elektrikli araç için yakıt tüketim sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 6.1 Tam yüklü araç için yakıt tüketim karşılaştırması

Çevrim	Dolu Araç [9600kg]	İlk SOC [%]	Son SOC [%]	Katedilen Mesafe [km]	Yakıt Tüketimi [Lt]	Ort. Yakıt Tük. [lt/100km]	İyileşme
CBD	Konvansiyonel	---	---	3,21	1,013	31,59	---
	Hibrit	70	70		0,882	27,51	12,92%
ECE	Konvansiyonel	---	---	4,07	1,185	29,09	---
	Hibrit	70	70		0,919	22,57	22,41%

Çizelge 6.2’de ise, boş araç için CBD ve ECE çevrimleri sonucunda, konvansiyonel ve seri hibrit elektrikli araç için yakıt tüketim sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 6.2 Boş araç için yakıt tüketim karşılaştırması

Çevrim	Boş Araç [6290kg]	İlk SOC [%]	Son SOC [%]	Katedilen Mesafe [km]	Yakıt Tüketimi [Lt]	Ort. Yakıt Tük. [lt/100km]	İyileşme
CBD	Konvansiyonel	---	---	2,75	0,648	23,55	---
	Hibrit	70	70		0,492	17,89	24,03%
ECE	Konvansiyonel	---	---	3,58	0,820	22,92	---
	Hibrit	70	70		0,611	17,07	25,52%

Yukarıdaki çizelgelere bakıldığında, yol profili ve araç ağırlığına bağlı olarak, aracın ortalama yakıt tüketiminin değişiklik gösterdiği açıkça görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, seri hibrit elektrikli bir otobüs için modelleme ve simülasyon çalışmaları ile birlikte, aracın kontrolüne yönelik algoritma çalışmaları tamamlanmıştır. Çalışmalar sırasında pratik uygulamadaki kontrol kolaylığı ve tek noktada kontrolün getirdiği avantajlar sebebi ile literatürde termostat kontrol olarak geçen kontrol metodolojisi uygulanmıştır. Hibrit elektrikli araçlar için vazgeçilmez bir unsur olan rejeneratif frenleme ile, aracın frenleme eğilimine girdiği anlarda hızından kaynaklı kinetik enerji, bataryalarda depolanmak üzere geri kazanımı simülasyonlar ile desteklenmiştir. Ayrıca, içten yanmalı motorun, yol ile mekanik bağlantısının kesilmesi ve bir elektrik motoru ile jeneratör seti olarak kullanılması durumunda, optimum tork-hız noktasında kontrolü sonucunda ortalama olarak daha verimli noktalarda çalıştığı sonucuna varılmıştır.

Tamamlanan bu tez çalışmasında, otomotiv uygulamalarında standart olan CBD ve ECE çevrimleri için yakıt tüketim verileri karşılaştırılmıştır. Buna göre, tam yüklü araç için CBD çevriminde konvansiyonel araca göre %12,92 lik bir yakıt ekonomisi sağlandığı görülmektedir. Yine tam yüklü araç için ECE çevriminde bu değer %22,41'dir. Aracın yolcuları olmadan boş ağırlığı için aynı iterasyonlar tekrarlandığında, CBD çevriminde %24,03 ve ECE çevriminde %25,52'lik bir yakıt ekonomisi değerine ulaşılmıştır. Aynı çalışmanın araç emisyon haritaları uygulanarak tekrarı ile, araç emisyon değerlerindeki değişimlerde net bir şekilde görülebilir.

Kontrol algoritması performansının detaylandırılması ve gerçek zamanlı veriler ile sonuçların elde edilmesi için araç üzerinde uygulama ve yakıt tüketim ölçüm çalışmaları, bir sonraki aşamada çalışmanın doğrulanması adına yapılması gereken en öncelikli işlerdir.

GENSET kontrolünde tasarlanan kayma kipli kontrolörün performansı oldukça iyi gözükmeyle beraber, daha farklı kontrol kontrolörler içinde içten yanmalı motor için hız kontrolü çalışmaları yapılabilir. Burada önemli olan, kontrol zorluğu oldukça yüksek olan ve dinamik cevabı oldukça yavaş olan içten yanmalı motorun, istenen hız referansına mümkün olan en kısa zamanda ve en az aşım ile oturmasını sağlayabilmektir.

Seri hibrit elektrikli araç kontrol algoritmasında uygulanan termostat algoritması yerine, tüm sistemin toplam verim haritası çıkarılarak, bu noktalarda sistemin çalışmasını sağlayacak kontrol algoritmaları da uygulanabileceği gibi, anlık ölçüm değerleri ile işlem gücü yüksek olan işlemciler kullanılarak, çalışma anında çalışma noktalarının belirlendiği adaptif kontrol sistemleri üzerinde de çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, sisteme aracın seyrettiği coğrafi koşulları öğrenebileceği GPS ve benzeri bir sistemin entegrasyonu ile, daha akıllı bir kontrol algoritması

uygulanarak, daha iyi sonuçlar da elde edilebilir.

Diğer hibrit elektrikli araç mimarileri için algoritmanın uygulama çalışmaları daha sonraki adımlarda yapılabilir. Ayrıca, ileri mühendislik teknikleri ile, genellikle seri-paralel konfigürasyonda görülen gezegen dişli sistemleri ile, çok modlu araç konfigürasyonları üzerinde çalışılarak, daha verimli sonuçlar elde edilebilir.

Bunun dışında, mekanik bağlantılardaki kayıpların önüne geçmek ve daha iyi sonuçlar almak adına, çekiş sisteminde tekerlek içi motorlar ile mekanik kayıplar en aza indirgenebilir. Sadece elektrikli araç teknolojilerine giden bu yolda, elektrikli destekli direksiyon sistemi geliştirme, elektrik destekli hidrolik sistem geliştirme, elektronik diferansiyel uygulamaları ileride çalışılabilecek diğer konulardır.

Çalışmalar sırasında yapılan araştırmalarda açıkça görülmüştür ki, elektrikli araç teknolojilerin gelişmesi yolundaki en büyük engel, mevcut batarya teknolojisidir. Hızlı şarj olabilen yüksek enerji ve güç yoğunluklu batarya teknolojileri ve bu bataryaların yönetim sistemleri üzerinde yapılacak çalışmalar ile, yeni nesil elektrikli araç teknolojilerinin hızlı bir şekilde ilerleyeceği açıktır. Bu sayede, sıfır emisyon değerleri ile çevreci araç çözümleri, seri üretim olarak piyasadaki yerini alacaktır.

Yine elektrikli araç tahrik sistemleri için, ürünlerin son kullanıcılar tarafından kullanılması ile, günümüz petrol istasyonları gibi, elektrikli araç şarj istasyonlarına ihtiyaç olacaktır. Farklı batarya tipleri için akıllı şarj istasyonları ve temiz enerji hedefine uygun olarak bu istasyonlardan sağlanacak enerjinin temin edileceği rüzgar ve güneş enerjisi teknolojileri üzerinde de çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Bahar, D.M., (2008), Hybrid Electric Vehicle Control Electronics and Its Fuzzy-Logic Simulation, Yüksek Lisans Tezi, Yeditepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bogosyan, S., Gokasan, M. ve Goering, D.J., (2007), “A Novel Model Validation and Estimation Approach for Hybrid Serial Electric Vehicles”, Vehicular Technology IEEE Transactions, 56(4):1485-1497.
- dSPACE, (2008), dSPACE Microautobox 1401 User Manual, dSPACE Inc.
- Gokasan, M., Bogosyan, S. ve Goering, D.J., (2006), “Sliding mode based powertrain control for efficiency improvement in series hybrid-electric vehicles”, Power Electronics IEEE Transactions, 21(3):779-790.
- Guzella L. ve Sciarreta A., (2005), Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization, Springer Verlag, Berlin.
- Jalil, N., Kheir, N.A. ve Salman, M., (1997), “A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle”, American Control Conference, 1:689-693.
- Kessels T.B.A., (2007), Energy Management for Automotive Power Nets, PhD Thesis, Eindhoven Technical University, Eindhoven.
- Kokam, (2008), SLPB 60460330H Cell Specifications Sheet, KOKAM Co, Inc.
- Koot M.W.T., (2006), Energy Management for Vehicular Electric Power Systems, PhD Thesis, Eindhoven Technical University, Eindhoven.
- Musardo, C. ve Staccia, B., (2003), Energy Management Strategies For Hybrid Electric Vehicle, M.S. Thesis, Politecnico Di Milano, Milano.
- Plotkin, S., Santini, D., Vyas, A., Anderson, J., Wang, M., He, J. ve Bharathan, D., (2001), Hybrid Electric Vehicle Technology Assessment: Methodology, Analytical Issues, and Interim Results, Argonne National Laboratory, USA.
- Rajamani, R., (2006), Vehicle Dynamics and Control: Mechanical Engineering Series, Springer.
- Sezer, V., (2008), Paralel Hibrit Elektrikli Aracın Modellenmesi ve Optimal Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sezer, V., Uygan, C.M.İ, Hartavi E.A., Acarman, T. ve Güvenç, L., (2007), “Propulsion System Design of a Hybrid Electric Vehicle”, Workshop on Hybrid Electric Vehicle Modeling and Control, 12 June 2007, İstanbul.
- UQM, (2008), UQM Power Phase 150 Traction System Manual, UQM Technologies Inc.
- Zeraoulia, M., Benbouzid, M.E.H. ve Diallo, D., (2006), “Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study”, Vehicular Technology IEEE Transactions, 55(6):1756-1764.

EKLER

- | | |
|------|---|
| Ek 1 | Modellemede kullanılan parametreler |
| Ek 2 | Simülasyon ön yükleme kodları |
| Ek 3 | İYM verim haritasının [g/s] çıkarım kodları |
| Ek 4 | GENSET güç noktası belirleme kodları |
| Ek 5 | Araç uygulama fotoğrafları |

Ek 1 Modellemede kullanılan parametreler

Parametreler	Değer	Birim
Boş araç ağırlığı	6290	kg
İzin verilen maksimum araç ağırlığı	9600	kg
Aerodinamik direnç katsayısı	0,7	--
Araç ön cephe alanı	7,116	m ²
Hava yoğunluğu	1,23	kg/m ³
Yer çekimi ivmesi	9,81	m/s ²
Yuvarlanma direnci katsayısı	0,016	--
Tekerlek yarıçapı	0,391	m
Aracın ağırlık merkezinin ön aksa uzaklığı	2,112	m
Aracın ağırlık merkezinin arka aksa uzaklığı	1,308	m
Araç ağırlık merkezinin yerden yüksekliği	1,096	m
Kullanılan dizel yakıt yoğunluğu	0,8287	g/cm ³
Dizel yakıt için net kalorifik değer	42518	J/g
Konvansiyonel araç diferansiyel oranı	3,73	--
Hibrit araçta kullanılan diferansiyel oranı	6,14	--
Vites çevrim oranları		--
1.vites	6,08	--
2.vites	3,53	--
3.vites	2,09	--
4.vites	1,35	--
5.vites	1	--
6.vites	0,79	--

Ek 2 Simulasyon ön yükleme kodları

```

%%Arac parametreleri ve haritalar için veri dosyasi
clc;clear;warning off;bdclose all;slCharacterEncoding('ISO-8859-1');
% Lastik ve İYM verileri
Pajeka2002_235_65_R16
CumminsEngine160PSMap
% SOC bandı tanımlama
SOChigh=0.71;
SOCnom=0.70;
SOClow=0.69;
% İYM, jeneratör ve EM için haritalar
load EM_GEN_Eff_Map
load emap2
load ICE_rpm_zarf
load ICE_tork_zarf
% Şehir içi çevrimleri
load eudc;
load CYC_CBDBUS;
% Araç parametreleri
Mv=9600; % Dolu araç ağırlığı(Boş araç için 6290)
Cd = 0.7; % Hava sürüklenme katsayısı
Af = 7.116; % Ön cephe alanı
rho= 1.23; % Hava yoğunluğu
g= 9.81 ; % Yer çekimi ivmesi
fr=0.016; % Yuvarlanma direnci katsayısı
Re=0.391; % Tekerlek yarıçapı
lr=1.308; % Ağırlık merkezinin ön aksa uzaklığı
lf=2.112; % Ağırlık merkezinin ön aksa uzaklığı
hcg=1.096; % Ağırlık merkezinin yüksekliği
Hlhv=42518; % Dizel kalorifik değeri
dFuel=0.8287; % Yakıt enerji yoğunluğu
diff_ratio_r=6.14; %S-HEA araç diferansiyel çevrim oranı
diff_ratio_r_original=3.73; %Konvansiyonel araç diferansiyel çevrim oranı
Je=0.028; %İYM atalet mometi
B=.05; %Sürtünme katsayısı
Jd=0.03; %Diferansiyel atalet momemti
Jw=1; %Teker atalet momenti
Jm=0.1; %Motor atalet momenti
gear_ratio=[6.08 3.53 2.09 1.35 1.0 0.79 ]; %Vites çevrim oranları
reverse_gear=6.08; %Geri vites çevrim oranı
% EM Verileri UQM 150kW (Tork-Hız zarfları)
Tem150_fp=[650 650 650 600 540 490 450 405 360 325 290];
Tem150_fpC=[400 400 400 380 355 345 260 200 145 75];
wi150=[0 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000];
% İYM verileri (Tork-Hız zarfları)
w_Ceng=[1000 1100 1200 1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 2100 2200 2300 2400
2500];
T_Ceng=[500 550 600 600 600 600 600 600 596 575 550 520 505 485 470 450];
rpm_zarf=[900:100:2700];
tork_zarf=[350 450 500 550 600 600 600 600 600 600 550 500 500 450 450 400 250
150];

```

Ek 3 İYM verim haritasının [g/s] çıkarım kodları

```
% İYM verim haritasının düzenlenmesi
clc;
fc_lhv=42518;
% İYM haritası
load Cummins160PSFuel.mat
% g/kWh olarak verim haritasını göster
v=[0:1:350];
c=contour(e_spd', e_trq' , fc_gpkwh',v) ;
clabel(c,'FontSize',6);
axis([800 2500 100 650]);
xlabel('Engine Speed (rpm)');
ylabel('Engine Torque (Nm)');
title('ISBe4+ 160B Fuel Map - BSFC (g/kWh)')
% g/kWh 'ten g/s'e geçiş
[spd,trq] = meshgrid(e_spd,e_trq);
Pwr_iym=spd.*trq.*pi/30;
fc=fc_gpkwh'.*(Pwr_iym./3600000); %g/s
% g/s olarak verim haritasını göster
figure
v=[0:0.5:500];
c=contour(e_spd', e_trq' , fc,v) ;
clabel(c,'FontSize',6);
axis([800 2500 100 650]);
xlabel('Engine Speed (rpm)');
ylabel('Engine Torque (Nm)');
title('ISBe4+ 160B Fuel Map (g/s)')

figure
surf(e_spd', e_trq' , fc)
xlabel('Engine Speed (rpm)');
ylabel('Engine Torque (Nm)');
title('ISBe4+ 160B Fuel Map (g/s)');

%verimlilik haritasını oluştur ve çizdir
eff_map=Pwr_iym./(fc*fc_lhv);

figure
v=[0.2:0.0025:.5];
c = contour (e_spd, e_trq , eff_map,v);
clabel(c,'FontSize',6);
```

Ek 4 GENSET güç noktaları belirleme kodları

%%GENSET optimum ve maksimum güç noktaları için ideal nokta hesapları

clear all

load('com.mat')

for i = 1:1:1001;

rpm = 800:10:2500;

pow = 0.1*(i-1); %100kW'a kadar tüm mekanik güçler için

for j = 1:171;

tork(j) = pow*1000/(rpm(j)*pi/30); %torkları tüm hız değerleri için hesapla

end

time = 1:171; %tüm tork-rpm ikilileri için verimleri bul

rpm = [time;rpm]';

tork = [time;tork]';

sim('combinedmapsim.mdl')

verim = verimel.*verimmek; %toplam verim

verimtoplamlam(:,i) = verim;

verimelektrik(:,i) = verimel;

verimmekanik(:,i) = verimmek;

index = find(verim==max(verim)); %toplam verimde maksimumu bul

besttork(i) = tork(index,2);

bestrpm(i) = rpm(index,2);

power(i,:) = [pow*verimel(index) verim(index) besttork(i) bestrpm(i)]; %o anki mekanik güç için en iyi verimle elde edilen elektriksel güç

clear tork rpm

end

t = find(53.5 < power(:,1) & power(:,1) < 54.5) %bulunan elektriksel güçlerden bul

for i=1:length(t)

BestElePow(i)=power(t(i),1);

BestEleEff(i)=power(t(i),2);

BestEleTrq(i)=power(t(i),3);

BestEleSpd(i)=power(t(i),4);

end

Comb=[BestElePow; BestEleEff; BestEleTrq; BestEleSpd]

besteff=find(Comb(2,:)==max(Comb(2,:)));

TheBestPoint=Comb(:,12);

TheBestElePow=TheBestPoint(1)

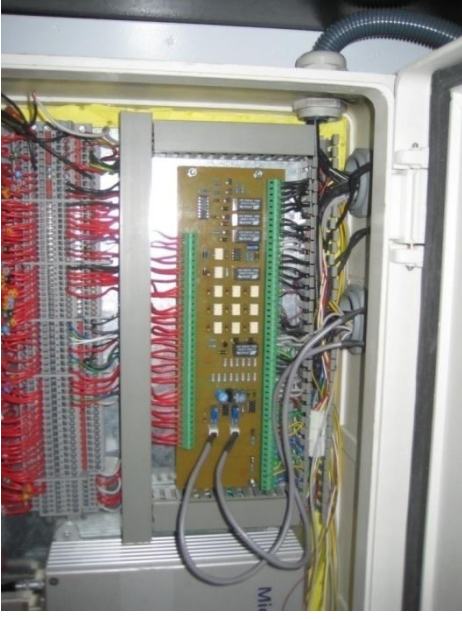
TheOverallBestEff=TheBestPoint(2)

TheBestTrq=TheBestPoint(3)

TheBestSpd=TheBestPoint(4)

Ek 5 Araç uygulama fotoğrafları

- Hibrit kontrol ünitesi ve arayüz devresi



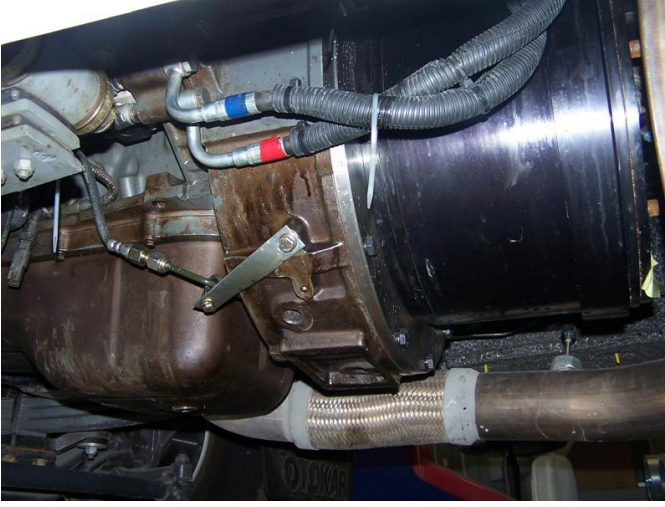
- Lityum-Polimer batarya paketi ve kontaktör kutusu



- Elektrik destekli kompresör sistemi ve sürücüsü



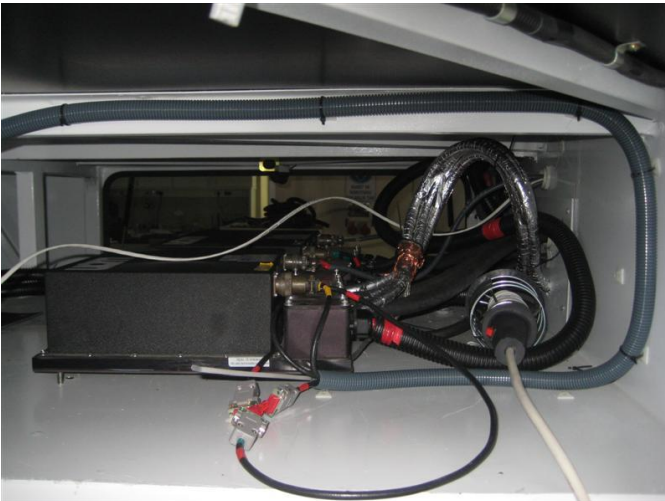
- GENSET (İYM + Jeneratör)



- EM + Vites Kutusu + Kardan



- EM ve Jeneratör Sürücüleri



- ControlDesk arayüzü ve sistem testleri



- Seri hibrit elektrikli otobüsün genel görünüşü



ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 12.12.1983

Doğum Yeri Eskişehir

Lise 1997-2000

Eskişehir Fatih Fen Lisesi

Lisans 2000-2005

YTÜ Elektrik-Elektronik Fak.
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006-2009

YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Müh. Anabilim Dalı,
Elektronik Programı

Çalıştığı kurumlar

2005-2007

Çizgi Elektronik San ve Tic. Ltd.Şti.

2007-Devam ediyor

TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü – Araştırmacı