

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ ELEKTRİK MOTORU VE HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNE
SAHİP ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA GÜÇ PAYLAŞIM KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Hüseyin Ayhan YAVAŞOĞLU

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ ELEKTRİK MOTORU VE HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNE
SAHİP ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA GÜÇ PAYLAŞIM KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

**Hüseyin Ayhan YAVAŞOĞLU
(504052103)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN
Eş Danışman: Prof. Dr. Seta BOĞOSYAN**

AĞUSTOS 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504052103 numaralı Doktora Öğrencisi Hüseyin Ayhan YAVAŞOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İKİ ELEKTRİK MOTORU VE HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNE SAHİP ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA GÜÇ PAYLAŞIMI KONTROLÜ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof.Dr. O. Seta BOĞOSYAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Galip CANSEVER**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ata MUĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç Dr. Bülent VURAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İlker ÜSTOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Volkan SEZER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 20 Temmuz 2016
Savunma Tarihi : 12 Ağustos 2016



Eşime ve kızıma



ÖNSÖZ

Tez çalışmamın süresince benden yardımını esirgemeyen, yol gösteren, tez danışmanım Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN'a ve eş danışmanım Prof. Dr. Seta BOGOSYAN'a en içten saygı ve sevgilerimi ve kendisinin nezdinde tüm bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Yaptığım çalışmalara değerli katkılarda bulunan ve Amerika'da huzurlu bir ortamda çalışmamı sağlayan Assoc. Prof. Dr. Alireza KHALIGH'e minnettarım. Tez çalışmam sırasında her konudaki desteği için değerli hocalarım Prof. Dr. Ata MUĞAN ve Prof. Dr. Galip CANSEVER'e ve Doç. Dr. Bülent VURAL'a şükranlarımı sunarım. Çalışmalarım süresince bana desteğini esirgemeyen Chuan Shi ve Dr. Junyi Shen'e teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın her aşamasında yanımda olan aile büyüğüme şükranlarımı ve akademik hayatım boyunca bana inanan ve desteğini esirgemeyen eşime ve aileme sevgilerimi sunarım.

Bu tez çalışması kısmi olarak Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Bilim Vakfı (NSF) tarafından 1307228 numaralı ödenek, Genovation Cars Inc. Firması ve TUBITAK 2214/A doktora sırası yurtdışı araştırma bursu tarafından desteklenmiştir.

Temmuz 2016

Hüseyin A. YAVAŞOĞLU
(Elektrik Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Tanımı	3
1.2 Tezin Literatüre Katkıları Ve Kapsamı	5
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	7
2.1 Elektrikli Araçların Sınıflandırılması.....	8
2.1.1 Hibrit elektrikli araçlar (HEA)	10
2.1.2 Prizden (şebekeden) şarj edilebilen hibrit araçlar (PHEA)	10
2.1.3 Tümüyle elektrikli araçlar (BEA)	10
2.1.4 Yakıt pilli elektrikli araçlar (YPEA)	11
2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Enerji Depolama Sistemine Ait Birimler.....	14
2.2.1 Batarya	15
2.2.2 Ultrakapasitör.....	19
2.2.3 Yakıt pili	20
3. ELEKTRİKLİ ARACIN MODELLENMESİ.....	25
3.1 Araç Modeli.....	25
3.2 Sürüş Çevrimi.....	26
3.3 Araca Etkiyen Kuvvetler	28
3.3.1 Rüzgâr direnci	29
3.3.2 Yuvarlanma direnci.....	30
3.3.3. Yokuş direnci	31
3.3.4. Çekiş kuvveti.....	31
3.3.5 Dönen kütle faktörü	32
3.4 Enerji Depolama Sisteminin Modellenmesi.....	33
3.4.1 Bataryanın modellenmesi.....	33
3.4.2 Bataryanın çevrim ömrü modeli	37
3.4.3 Ultrakapsitörün modellenmesi	41
3.4.4 Yakıt pilinin modellenmesi	42
3.3.5 Elektrik motorunun modellenmesi.....	46
4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA İKİ HAREKET MOTORUNUN BERABER KULLANIMI.....	51
4.1 İki Motor Topolojisi	52
4.2 Eşdeğer İki Motor Kullanımı	55
4.3 Birbirini Tamamlayıcı Tork ve Hız Karakteristiğine Sahip İki Motor Kullanımı.....	59

4.4 İki Motor Kullanımında Motorlar Arası Güç Paylaşımı Optimizasyonu	61
5. İKİ HAREKET MOTORUNA SAHİP ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN TASARLANMASI VE GÜÇ PAYLAŞIM OPTİMİZASYONU	65
5.1 Enerji Depolama Sisteminde Sadece Batarya Kullanımı	65
5.1.1 Batarya enerji depolama birimine sahip elektrikli araçlar için bataryanın boyutlandırılması.....	67
5.2 Batarya/UK HEDS Topolojisi.....	71
5.3 Batarya/UK/YP HEDS Topolojisi.....	73
5.4 İki Hareket Motoruna ve HEDS' ne Sahip Elektrikli Araçlarda Enerji Optimizasyonu.....	75
5.4.1 Konveks (dışbükey) optimizasyon	77
5.4.1.1 Afin ve konveks kümeler	78
5.4.1.2 Afin ve konveks fonksiyonlar	79
5.4.1.3 Optimizasyon probleminin konveks olarak tanımlanması	80
5.4.2 Batarya/UK HEDS optimizasyonu.....	80
5.4.3 Batarya/UK/YP HEDS optimizasyonu	83
6. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI	87
6.1 Elektrikli Araçlarda Eşdeğer İki Motor Kullanımının İncelenmesi	87
6.2 Batarya/UK HEDS Topolojisi İçin Birbirini Tamamlayıcı Özellikte Tork ve Hız Karakteristiğine Sahip İki Hareket Motoru Kullanımının İncelenmesi.....	93
6.3 Batarya/UK/YP HEDS Topolojisi İçin Birbirini Tamamlayıcı Özellikte Tork ve Hız Karakteristiğine Sahip İki Hareket Motoru Kullanımının İncelenmesi....	102
7. SONUÇLAR	107
KAYNAKLAR.....	113
EKLER.....	121
ÖZGEÇMİŞ	143

KISALTMALAR

AER	: All-Electric-Range
ANL	: Argonne Ulusal Laboratory
BEA	: Bataryadan beslenen Elektrikli Araç
DoD	: Depth of Discharge
DOE	: Department of Energy
EA	: Elektrikli Araç
EDS	: Enerji Depolama Sistemi
EM	: Elektrik Motoru
EUDC	: Extra Urban Driving Cycle
GEA	: Güç Elektroniği Arayüzü
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç
HEDS	: Hibrit Enerji Depolama Sistemi
IDC	: İstanbul Sürüş Çevirimi
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
İYM	: İçen Yanmalı Motor
MPC	: Model Predictive Control
NEDC	: New European Driving Cycle
NSF	: National Sanitation Foundation
PEM	: Proton Exchange Membrane
PHEA	: Prizden Şarj Edilebilen Elektrikli Araç
SMSM	: Sabit Mıknatıslı Sekron Motor
SoC	: State of Charge
TKD	: Tork Kavrama Dişlisi
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UDDS	: Urban Dynamometer Driving Schedule
UK	: Ultra Kapasitör
USABC	: United States Advances Battery Consortium
USPTO	: United States Patent and Trademark Office
YE	: Yüksek Enerji
YG	: Yüksek Güç
YP	: Yakıt Pili
YPEA	: Yakıt Pilli Elektrikli Araç

SEMBOLLER

a_{cc}	: İvme
A_f	: Aracın Ön Cephe Alanı
C_D	: Aerodinamik Direnç Katsayısı
F_{AD}	: Rüzgâr Direnci
F_{RR}	: Yuvarlanma Direnci
F_{Gr}	: Yokuş Direnci
F_{OPP}	: Araca ter yönde etikyen kuvvetler toplamı
F_{TR}	: Çekiş kuvveti
$P_{YÜK}$	: Talep gücü
ρ	: Havanın yoğunluğu
G_r	: Dişli Oranı
h	: Saat
h_y	: Yol yüksekliği
M	: Kütle
P	: Güç
Q	: Kapasite
R	: Gaz Sabiti
T	: Sıcaklık
v	: Hız
V_{FC}	: Yakıt Pili Hücresinin Gerilim Değeri
W	: Watt
α	: Yolun Eğimi
τ	: Tork
λ	: Termal İletkenlik

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Otomotiv pazarındaki elektrikli araç modelleri.....	11
Çizelge 2.2 : Hali hazırda pazarda en çok öne çıkan tümüyle elektrikli ve yakıt pilli araç modellerinin karşılaştırılması.	14
Çizelge 2.3 : Batarya tiplerinin karşılaştırılması.	18
Çizelge 2.4 : Maxwell firmasına ait ultrakapasitör modelleri.	20
Çizelge 2.5 : Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri.	21
Çizelge 2.6 : Mirai aracında kullanılan Toyota YP yığın özellikleri.....	22
Çizelge 3.1 : Seçilen motor sürücülerini.....	49
Çizelge 5.1 : YG ve YE lityum-iyon batarya karşılaştırması.	66
Çizelge 5.2 : YG ve YE batarya karakteristikleri.	67
Çizelge 5.3 : Elektrik araç karakteristiği.	68
Çizelge 6.1 : Hareket motorlarının özellikleri.	87
Çizelge 6.2 : Araç parametreleri.	88
Çizelge 6.3 : UDDS ve NEDC sürüş çevrimleri için tek ve eşdeğer çift hareket motoru topolojilerinin verim açısından karşılaştırılması.	89
Çizelge 6.4 : IDC, NYCC ve US06 sürüş çevrimleri için tek ve eşdeğer çift hareket motoru topolojilerinin, verim açısından karşılaştırılması	92
Çizelge 6.5 : Batarya ve UK özellikleri.....	93
Çizelge 6.6 : Hareket motorlarının özellikleri.	94
Çizelge 6.7 : Enerji depolama sistemi ve hareket motorları için ağırlık dağılımı.	95
Çizelge 6.8 : UDDS sürüş çevrimi için, güç iletim sistemi toplam verim değerleri.	98
Çizelge 6.9 : Ağırlık, AER ve EOL açısından incelenen durumların karşılaştırılması.	102
Çizelge 6.10 : İki hareket motoruna sahip elektrikli araçlar için incelenen EDS topolojileri.....	102
Çizelge 6.11 : Batarya/UK/YP HEDS için Batarya ve UK özellikleri.....	103
Çizelge 6.12 : İki motorlu güç aktarım sistemi için, batarya, batarya/UK, batarya/UK/YP topolojilerinin karşılaştırılması.	105

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Amerika marka ve patent ofisi (USPTO)'nin verilerine göre tümüyle elektrikli ve hibrid elektrikli araçlar için yıllara göre, ülke ve dünya bazında alınan patentlerin sayısı.	7
Şekil 2.2 : Tamamen elektrikli (BEA) ve şebekeden şarj edilebilen hibrit elektrikli (PHEA) araçların dünya genelinde satış miktarı.	8
Şekil 2.3 : Elektrikli araç tipleri; a) Hibrit elektrikli araç, b) Prizden şarj edilebilen hibrit elektrikli araç, c) Tümüyle elektrikli araç.	9
Şekil 2.4 : Elektrikli araçlarda güç aktarım yapılandırması.	14
Şekil 2.5 : Batarya teknolojisindeki gelişim.	16
Şekil 2.6 : Ultrakapasitör hücresi.	19
Şekil 2.7 : PEM tipi yakıt pilinin çalışması.	21
Şekil 2.8 : Yakıt pili sistemi maliyeti ve gelecek hedefleri.	24
Şekil 3.1 : Tamamen elektrikli bir araç için, ileri akışlı güç aktarım yapısı.	25
Şekil 3.2 : Geri akışlı araç modeli.	26
Şekil 3.3 : İstanbul Sürüş çevrimi.	27
Şekil 3.4 : Avrupa NEDC sürüş çevrimi hız.	27
Şekil 3.5 : UDDS şehiriçi sürüş çevrimi.	28
Şekil 3.6 : Aracın tırmanma modeli ve araca seyir halinde etkiyen kuvvetler.	29
Şekil 3.7 : Çeşitli araç tipleri için aerodinamik direnç katsayıları.	30
Şekil 3.8 : Örnek bir araç için hız - çekiş kuvveti grafiği.	32
Şekil 3.9 : Batarya için hücrelerin seri olarak bağlanması.	33
Şekil 3.10 : Batarya hücrelerinin paralel olarak bağlanması.	34
Şekil 3.11 : K2 Enerji firmasına ait LFP26650P lityum iyon batarya hücresinin, deşarj derinliğine karşı açık devre geriliminin değişimi.	35
Şekil 3.12 : Batarya iç direncinin, bataryanın deşarj yüzdesine göre değişimi.	36
Şekil 3.13 : Dirençli batarya modeli.	36
Şekil 3.14 : Lityum-iyon bataryalarda, çevrim sayısına karşılık gelen kapasite kaybının genelleştirilmiş profili.	37
Şekil 3.15 : Çeşitli akım oranı değerlerine karşılık gelen lnB eğri uydurma parametreleri.	40
Şekil 3.16 : Yakıt hücresi akım/gerilim karakteristiği.	42
Şekil 3.17 : Yakıt pili, normalize edilmiş güç değerine karşılık gelen, genelleştirilmiş verim profili.	44
Şekil 3.18 : Elektrik motorunun (EM) yarı-durağan model gösterimi.	46
Şekil 3.19 : UQM150 Motorunun pozitif torklar için verim haritası; a) Autonomie kütüphanesinin verileri ile motor verimib) İnterpolasyon yapılmış motor verimi.	48
Şekil 4.1 : İki elektrik motorlu elektrikli araç topolojisi.	53
Şekil 4.2 : Tork kavrayıcı.	53
Şekil 4.3 : İki elektrik motorunun aynı şafta bağlanan, tork kavrama dişli yapısı. ...	54

Şekil 4.4 : Remy HVH 250 elektrik motoru için, seçilmiş sabit hız değerlerine karşılık gelen tork/verim eğrileri.....	56
Şekil 4.5 : Remy HVH 250 elektrik motoruna ait, düşük hızlarda yüksek tork talepleri için, tek ve çift motor topolojilerinin verim değeri.....	57
Şekil 4.6 : Remy HVH 250 elektrik motoruna ait, yüksek hızda, tek ve çift motor topolojilerinin verim değeri.....	58
Şekil 4.7 : Batarya/UK hibrit enerji depolama sistemine sahip çift motorlu güç aktarım topolojisi.....	58
Şekil 4.8 : Birbirini tamamlayıcı özellikte seçilen M1 ve M2 motorlarına ait verim haritaları(a) (M1) Camry motorun verim haritası. (b): (M2) UQM Powerphase 125 motorun verim haritası.....	60
Şekil 4.9 : Camry (M1) ve UQM125 (M2) için Tork-Hız eğrisi sırası ile mavi ve kırmızı ile verilmiştir.....	60
Şekil 4.10 : Camry ve UQM motorun yüksek verimli olan bölgeleri.....	61
Şekil 4.11 : Motorlar arasında güç paylaşımı için akış diyagramı.....	64
Şekil 5.1 : Tesla Model S tümüyle elektrikli araçta ağırlık dağılımı.....	65
Şekil 5.2 : Enerji depolama sisteminde batarya kullanılan elektrikli araçta bataryanın optimum boyutlandırılması; (a) YE, Saft VL45 E; (b) YG, K2 Energy 26650P.....	69
Şekil 5.3 : Batarya / UK hibrit enerji depolama sistemi topolojileri.....	71
Şekil 5.4 : Önerilen batarya/UK HEDS sistemine sahip, iki hareket motorlu elektrikli araç topolojisi.....	73
Şekil 5.5 : Önerilen batarya/UK/YP HEDS sistemine sahip, iki hareket motorlu elektrikli araç topolojisi.....	75
Şekil 5.6 : x1 ve x2 üzerinden geçen doğru ve koyu ile x1 ve x2 arasındaki doğru parçası.....	78
Şekil 5.7 : Konveks ve konveks olmayan kümeler. (a) Konveks küme. (b) ve (c) konveks olmayan küme.....	79
Şekil 5.8 : Konveks fonksiyon.....	80
Şekil 5.9 : Batarya/UK Hibrit enerji depolama sisteminden, elektrik motorlarına doğru güç akışı.....	81
Şekil 5.10 : Batarya/UK/YP hibrit enerji depolama sisteminden, elektrik motorlarına doğru güç akışı.....	83
Şekil 6.1 : UDDS sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Honda hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) UDDS sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.....	88
Şekil 6.2 : NEDC sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Honda hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) NEDC sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.....	89
Şekil 6.3 : IDC sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Lexus hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) IDC sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.....	90
Şekil 6.4 : NYCC sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Lexus hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) NYCC sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.....	91

Şekil 6.5 : US06 sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Lexus hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) US06 sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.	92
Şekil 6.6 : Durum 3 simülasyon sonuçları; (a) UDDS hız profili; (b) Talep gücü; (c) M1 (Camry) gücü; (d) M2 (UQM125) gücü.	96
Şekil 6.7 : UDDS sürüş çevrimi altında güç iletim sistemi verim karşılaştırması; (a) Sadece M3 motoru (mavi); iki motor kullanımı (M1 ve M2) (kırmızı); (b) Sadece M4 (mavi); iki motor kullanımı (M1 ve M2) (kırmızı)	97
Şekil 6.8 : Tek motorlu ve çift motorlu topolojilerde, motorlardaki kayıp güçlerin karşılaştırılması.	98
Şekil 6.9 : HEDS için güç paylaşımı (a) Batarya Gücü; (b) UK Gücü; (c) SOC _{UK} ; (d) DC/DC konvertör gücü.....	100
Şekil 6.10 : Durum 3 ve durum 6 arasında batarya gücünün karşılaştırılması.	101
Şekil 6.11 : UDDS sürüş çevrimi altında Batarya/UK/YP HEDS topolojisi için optimum motor güçleri; (a) UDDS hız profili; (b) Talep gücü; (c) M1 (Camry) gücü; (d) M2 (UQM 125) gücü.	104
Şekil 6.12 : Güç aktarım sisteminde M1 (Camry) ve M2(UQM125) elektrik motorları kullanılan elektrikli araç için; batarya, batarya/UK ve batarya/UK/YP EDS topolojilerinin karşılaştırılması	105

İKİ ELEKTRİK MOTORU VE HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNE SAHİP ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA GÜÇ PAYLAŞIM KONTROLÜ

ÖZET

Elektrikli araçların büyük çoğunluğu hareketini, güç aktarım sistemlerinde bulunan, tek bir elektrik motoru ile sağlamaktadır. Aracın performansını aynı zamanda güç aktarım sisteminin verimini arttırmak amacı ile tek bir hareket motoru yerine, etkili bir güç paylaşım stratejisi uygulayarak, aynı şafta bağlı, birbirini tamamlayıcı tork ve hız karakteristiğine sahip, iki elektrik motoru kullanılabilir. İki motor kullanımının bir diğer avantajı ise, yüksek güce sahip büyük hacimli tek bir motor kullanımı yerine, düşük güç ve küçük hacimde iki motor kullanımı sayesinde kaput altındaki alanın çok daha efektif kullanılabilmesidir. Bu güç aktarım topolojisi, özellikle sürtünme direncini azaltan aerodinamik yapıları sebebiyle, kaput altındaki alanı sınırlı olan spor araçlar için ilgi çekici bir çözüm olacaktır.

Günümüzde, elektrikli araçlarda ana enerji depolama birimi olarak batarya kullanılmaktadır. Seyir halinde sıkça karşılaştığımız hızlanma ve yavaşlamaların neden olduğu, yüksek güç taleplerini karşılamak ve batarya gücünde oluşacak dalgalanmalardan dolayı batarya ömrünün zarar görmemesi için, bataryalar çoğunlukla, olması gerekenden fazla boyutlandırılarak araçlara yüklenmektedir. Prensip olarak bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ultra-kapasitörler (UK) ise yüksek güç yoğunluğuna ve anlık yüksek şarj/deşarj kabiliyetine sahiptir. Batarya ve UK'ün birbirini tamamlayıcı bu özelliklerinden yararlanmak için, batarya/UK hibrit enerji depolama sistemi (HEDS) düşünülmüştür. Bu sistemde UK, bir güç tamponu gibi davranarak anlık şarj/deşarj'a ait yüksek güçleri karşılar. Bu şekilde batarya üzerindeki baskı azalır ve batarya ömrü uzar.

Bu tez çalışmasında, güç aktarım sisteminde iki elektrik motoruna ve batarya/UK HEDS sahip bir elektrikli araç için güç kontrol stratejisi sunulmuştur. Önerilen güç kontrol stratejisi iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, talep gücü, rejeneratif frenleme ve ilerleme periyotlarında, elektrik motorlarının en yüksek verime sahip

olmasını sağlayacak şekilde, iki motor arasında paylaştırılır. Bu önerilen, gerçek zamanlı uygulanabilir güç paylaşım stratejisi, iki elektrik motorunun birbirini tamamlayıcı özelliklerinden en iyi şekilde faydalanmaktadır.

İkinci kısımda, hesaplanmış olan optimum motor güçleri, HEDS içinde batarya ve UK arasında paylaştırılır. HEDS güç paylaşımını optimize edebilmek için, batarya gücünün genliğini ve batarya akımındaki dalgalanmaları minimize ederek, batarya ömrünü uzatacak bir konveks optimizasyon problemi formüle edilmiştir.

Tek motor, eşdeğer iki motor ve birbirini tamamlayıcı iki motor kullanan güç aktarım topolojileri, tez içerisinde çeşitli simülasyon çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon çalışmalarına göre, önerilen topoloji ve güç paylaşım stratejisi, güç aktarım sisteminin verimini %10 arttıracak ve bataryanın ömrünü %82 uzatacak potansiyele sahiptir. Güç aktarım sistemindeki verim artışı, elektrikli aracın tek bir şarj ile gidebileceği azami mesafenin de %27' ye kadar uzamasını sağlamaktadır.

Diğer yandan, batarya/UK/Yakıt Pili (YP) HEDS topolojisi önerilmiş ve bu topoloji toplam ağırlık hepsinde aynı kalmak kaydıyla sadece batarya ve batarya/UK topolojileri ile batarya ömrü ve tamamen elektrik enerjisi ile gidebileceği menzil (AER) açısından karşılaştırılmıştır. YP ve UK'ün getirdiği ilave ağırlıktan dolayı, toplam ağırlığın aynı kalması amacıyla en küçük boyutta batarya batarya/UK/YP topolojisinde kullanılırken, en büyük boyuttaki batarya, bünyesinde sadece batarya olan topolojide kullanılmıştır. En uzun batarya ömrü, batarya/UK/YP topolojisinden az bir farkla daha iyi olan batarya/UK topolojisi ile elde edilmiştir. En iyi AER ise batarya/UK topolojisinden 2.4 kez daha iyi olan batarya/UK/YP topolojisi ile ulaşılmıştır.

Ayrıca bu tez kapsamında, yüksek güç (YG) ve yüksek enerji (YE) özelliklerine sahip bataryalar kullanılarak, enerji depolama sistemi (EDS) 'nin optimum boyutlandırılması yapılmıştır ve farklı güç aktarım sistemi ve EDS topolojileri için altı ayrı çalışma durumu incelenmiştir.

Bu tezin literatüre yaptığı önemli katkılar şu şekilde sıralanabilir; ilk olarak, gerçek zamanlı uygulanabilen, güç aktarım sisteminin verimini arttıracak, iki motor arasında optimum güç paylaşımını sağlayacak bir güç paylaşımı kontrol stratejisi sunulmuştur. İkinci olarak, ağırlık, verim ve menzil açısından, güç aktarım sisteminde, tek motor kullanımı, eşdeğer iki motor kullanımı ve birbirini tamamlayıcı iki motor kullanımına

ait topolojiler karşılaştırılmıştır. Üçüncü olarak, YG ve YE batarya tipleri için optimum EDS boyutlandırılması araştırılmıştır. Dördüncü olarak, batarya ömrünü uzatacak bir konevks optimizasyon problemi HEDS için formüle edilmiştir. Beşinci olarak, güç aktarım sistemi ve EDS topolojileri için altı ayrı çalışma durumu incelenmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Son olarak ise batarya/UK/YP HEDS topolojisi tartışılmıştır.



POWER SPLIT CONTROL FOR A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM WITH TWO PROPULSION MACHINES IN ELECTRIC VEHICLES

SUMMARY

The Majority of electric vehicles (EVs) on the market have only one propulsion machine in their powertrains. To enhance power performance and propulsion efficiency, two propulsion machines, with complimentary torque-speed characteristics, are coupled to the same shaft via a torque coupler could be deployed in the EV powertrain. A potential merit of using two propulsion machines is the improved powertrain efficiency and effective load power split. Another advantage of using two complimentary propulsion machines, instead of a single large machine, is that the space under the hood can be effectively utilized. This is particularly an attractive solution for race cars, with limited space due to their aerodynamic body frame, which in turn will reduce the drag coefficient.

Nowadays, batteries are used as the primary energy storage devices in EVs; however, they are usually oversized in order to deliver high power and avoid the unwanted degradation due to frequent acceleration and deceleration. In principle, batteries have relatively high energy density. Ultra-capacitors (UCs), on the other hand, have high power density and excellent instantaneous charging and discharging capabilities. In order to take advantage of these complementary features of the battery and UC, a battery/UC hybrid energy storage system (HESS) is considered. In the HESS, UC pack acts as a power buffer for instantaneous charging/discharging of high peak power. In this way, the stress on the battery is substantially relieved, resulting in battery lifetime extension

In this dissertation, a power split control strategy is proposed for an electric vehicle (EV) powertrain with two propulsion machines and a battery/ultra-capacitor (UC) hybrid energy storage system (HESS). The proposed power split control strategy consists of two stages. In the first stage, the load power is split between the two propulsion machines to obtain the highest powertrain efficiency in both propulsion and regenerative braking modes. A real-time implementable power split control strategy is

proposed to benefit from complementary operation features of these two propulsion machines.

In the second stage, the load power is split between the battery pack and UC in the HESS. To optimize the power split in HESS, a convex optimization problem is formulated to minimize the battery power magnitude and battery current variations to extend the battery lifetime.

The powertrain topologies for single propulsion machine, two identical propulsion machines and two complementary propulsion machines are compared in the simulation cases. The implementation of proposed power split control strategy in the powertrain of an EV with two propulsion machines will potentially result in up to 10% improvement in the powertrain efficiency and up to 82% extension of the battery lifetime. The improvement of propulsion efficiency will in turn lead to up to 27% extension of all-electric driving range (AER).

On the other hand, a battery/UC/Fuel Cell (FC) HESS topology is introduced. Remaining ESS total weight same, only battery, battery/UC and battery/UC/FC topologies are compared based on AER and battery health. Due to additional weight of FC and UC, smallest battery size is utilized in the battery/UC/FC topology to keep ESS weight same as other compared topologies and the biggest battery size is utilized in the only battery ESS topology. According to simulation results, the longest battery life time is achieved with battery/UC topology which is slightly better than battery/UC/FC topology. The longest AER is achieved with battery/UC/FC topology which is 2.4 times better than battery/UC topology.

Moreover, optimal ESS sizing is studied for only battery ESS for high power (HP) and high energy (HE) batteries. Six case studies are presented for different powertrain and ESS topologies.

The main contributions of this paper are as follows, First, a real-time implementable power split control strategy is presented, which optimally splits power between two propulsion machines to improve the powertrain efficiency. Second, the powertrain topology with two identical propulsion machines and the powertrain topology with two complementary propulsion machines are compared with utilizing single propulsion machine in the powertrain according to weight, efficiency and all-electric-range (AER). Third, Optimal battery sizing is studied for a battery ESS with utilizing

HP and HE batteries, Fourth, a convex HESS optimization problem is formulated with the objective function to extend battery life. Fifth, six case studies are investigated based on different powertrain and ESS topologies. Finally, battery/UC/FC HESS topology is discussed and only battery, battery/UC and battery/UC/FC topologies are compared based on AER and battery health.



1. GİRİŞ

Otomotiv ülkemizde ve dünyada en önemli sektörlerden biridir. Dolayısıyla otomotiv sektöründeki teknolojik gelişmeler ülkemiz ve dünya açısından büyük önem arz etmektedir. Günümüzde temiz enerji kaynaklarına yönelimin etkili olduğu önemli araştırma alanlarından birisi otomotiv sektöründe yeni nesil araçlar olarak da adlandırabileceğimiz enerji depolama sisteminde (EDS) yakıt pili (YP), batarya, ultrakapasitör (UK) gibi birimlerin bulunduğu, güç aktarım sisteminde elektrik motoruna sahip elektrikli araç (EA) teknolojileridir. Araştırmaların yeni nesil araçlar üzerine odaklanmasının başlıca sebepleri, konvansiyonel araçlarda içten yanmalı motor (İYM) kullanımının getirdiği mutlak çözüm bekleyen dezavantajlarıdır.

Çevresel duyarlılık, araçların konvansiyonel araçlar yerine alternatif olmasının nedenlerinden biridir. Ülkemizde trafiğe kayıtlı toplam taşıt sayısı son on yılda neredeyse ikiye katlanmış ve Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 2015 Ocak ayı itibari ile yaklaşık olarak 19 milyona ulaşmıştır (TÜİK, 2015). Bu araçların büyük çoğunluğu fosil kaynaklı yakıtlar ile çalışmakta, çevre gürültüsüne ve emisyon olarak açığa çıkan NO_x, SO₂, CO₂, CO, kurşun, hidrokarbonlar nedeniyle doğaya ve insan sağlığına zarar vermekte, küresel çevre tehdidi oluşturmaktadır (Parks ve diğ., 2007). Ulaştırma bakanlığının verilerine göre ulaşırmadan kaynaklanan CO₂ emisyonunun %88,7'lik bölümü karayolu taşımacılığında kaynaklanmaktadır (TCUDHB, 2012). Avrupa komisyonu 2050'ye kadar ulaştırma sektöründe, sera gazı emisyonlarının, 1990 yılına kıyasla %60 oranında azaltılmasını hedeflemektedir. Bu hedefe ulaşmak için şehiriçinde kullanılan araçların sıfır emisyona sahip olması düşünülmektedir (Dickinson ve Nasri, 2014).

Konvansiyonel araçlar için diğer bir dezavantajlı durum, petrol bağımlılığıdır. Ulaştırma sektörünün büyük kısmı karayolu ile sağlanmaktadır. Ulaştırma bakanlığının verilerine göre 2010 yılında yurtiçi yük taşıma oranının %88,3'ü ve yurtiçi yolcu taşıma oranının %91,8'i karayolu ile yapılmaktadır (TCUDHB, 2012). Petrol türevi yakıtların en çok kullanıldığı sektörlerden birisi ulaşım ve ulaştırma sektörüdür. Bazı araştırmacılara göre, eğer bugünkü eğilimler doğrultusunda petrol üretimi ve

tüketimi devam ederse, dünya petrol rezervlerinin yakın bir gelecekte tükenmesi söz konusudur (Ehsani ve diğ, 2010; Abolhassani ve diğ, 2003).

Elektrikli araç teknolojisinin konvansiyonel araçlara alternatif olarak görülmesinin diğer önemli bir sebebi, konvansiyonel araçların sahip olduğu içten yanmalı motorların veriminin düşük olmasıdır. İçten yanmalı motorlarda, sadece termal kayıplar %60 (Baglione ve diğ, 2007) civarındadır. Dolayısı ile konvansiyonel bir aracın toplam verimi %10 ile %35 arasındadır ve ortalama olarak %20 kabul edilebilir (Khaligh, 2010). Oysa ki, elektrik motorunda verim, dişli ve invertör kayıpları dahil olmak üzere %76.4 - %80.2 arasındadır (Thomas, 2014).

Yukarıda bahsedilen bu sorunların çözümü için önce İYM ve elektrik motorunun beraber kullanıldığı hibrit elektrikli araçlar (HEA) sonrasında prizden (şebekeden) de şarj edilebilen elektrikli araçlar (PHEA) ve nihai olarak bünyesinde İYM bulunmayan tümüyle elektrikli araçlar (EA), literatürdeki diğer bir tanımı olan, bataryadan beslenen elektrikli araçlar (BEA) gündeme gelmiştir.

Elektrikli araçlarda ana enerji kaynağı olarak batarya kullanılmaktadır. Günümüzde batarya teknolojilerinde yaşanan gelişmelere rağmen, bataryanın enerji yoğunluğu petrol türevi yakıtlara nazaran düşüktür. Bu nedenle, enerji depolama sisteminde sadece batarya olan elektrikli araçlar menzil konusunda sıkıntı yaşamaktadır. Bu durumda kullanılan bataryanın boyutunun arttırılması önerilebilir, fakat literatürdeki birçok araştırmaya göre, boyut artışının neden olacağı ilave ağırlık, hacim ve özellikle maliyet sebebiyle, uygun bir çözüm olmayacaktır (Khaligh ve Li, 2010). Bataryalar elektrikli araçlarda ana depolama cihazlarıdır ve aracın menzili %15 arttırmak için yapılan değişiklikler, enerji depolama sistemi maliyetini neredeyse iki katına çıkartabilir (Khaligh ve Li, 2010). Bu durumda enerji verimliliğinin arttırılması daha uygun bir çözüm olacaktır. Diğer yandan (Miller, 2007) yaptığı çalışmada Lityum-iyon Bataryanın deşarj derinliği (DoD) %30'dan %80'e çıkarıldığında, çevrim ömrünün 2600 çevrimden 1000 çevrime düştüğü belirtilmektedir. Bu nedenle, bataryanın kullanım ömrünü uzatmak için şarj seviyesi (SoC)'nin değerini belirli bir aralıkta tutacak bir yönetime ihtiyaç vardır. Daha verimli ve daha uzun ömürlü bir EDS için, elektrikli araçlarda bataryanın yanında, ultrakapasitör (UK) ve/veya yakıt pili gibi diğer enerji depolama kaynaklarının da bulunduğu hibrit enerji depolama sistemleri önerilmektedir (Lukic ve diğ, 2006; Choi ve Seo, 2012; Vural ve diğ, 2014).

Elektrikli araçlarda Lityum-iyon tipi batarya kullanımı sürüş mesafesinin artmasında önemli rol oynamıştır, buna karşın elektrikli araçlarda elektrik enerjisinin depolanması başta gelen problemlerden biridir. Elektrikli aracın mesafesinin arttırılması için alternatif bir yol, araçlarda yakıt pili kullanımıdır. YP kullanılmasının iki önemli avantajı vardır. Bunlardan birincisi araç beş dakikadan daha kısa bir süre içerisinde tekrar yakıtını doldurabilir ve ikinci olarak, tek bir dolum ile aracın alabileceği mesafe, sadece batarya beslemeli araçlara göre çok daha yüksek değerlere çıkarılabilir (Venturi ve diğ, 2013).

Elektrikli araçlar, konvansiyonel araçların sahip olduğu problemlere bir çözüm olarak görülse de, konvansiyonel araçlar ile rekabet edebilmesi için hala geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadırlar. Yukarıda bahsi geçen enerji depolama sistemindeki ünitelerin sayısının artması, enerji depolama sisteminin daha karmaşık bir yapıya dönüşmesine neden olmaktadır. Hibrit enerji depolama sistemi (HEDS) için güç paylaşım stratejilerinin geliştirilmesi, elektrikli araçlar için performans ve enerji verimliliği yönünden büyük önem arz etmektedir.

Diğer yandan çalışmalarda göz ardı edilen bir husus ise tek bir elektrik motoru ile hareket eden elektrikli araçların sabit bir dişli oranı ile tekere güç aktarımı yapmasından dolayı güç aktarım sisteminin verimliliğin kısıtlı kalmasıdır

1.1 Tezin Tanımı

Elektrikli araçların büyük çoğunluğu hareketini, güç aktarım sistemlerinde bulunan, tek bir elektrik motoru ile sağlamaktadır. Aracın performansını aynı zamanda güç aktarım sisteminin verimini arttırmak amacı ile tek bir hareket motoru yerine, etkili bir güç paylaşım stratejisi uygulanarak aynı şafta bağlı, birbirini tamamlayıcı tork ve hız karakteristiğine sahip, iki elektrik motoru kullanılabilir. İki motor kullanımının bir diğer avantajı ise, yüksek güce sahip büyük hacimli tek bir motor kullanımı yerine, düşük güç ve küçük hacimde iki motor kullanımı sayesinde kaput altındaki alanın çok daha efektif kullanılabilmesidir. Bu güç aktarım topolojisi, özellikle sürtünme direncini azaltan aerodinamik yapıları sebebiyle, kaput altındaki alanı sınırlı olan spor araçlar için ilgi çekici bir çözüm olacaktır (Yavaşoğlu ve diğ., 2015b).

Bu tez çalışmasında elektrikli araçlarda tek ve iki motor kullanımı geniş bir şekilde incelenmiştir. Diğer yandan ana enerji kaynağı olarak kullanılan bataryalar yüksek güç

taleplerini karşılamak ve özellikle şehir içi kullanım esnasında çok sık gerçekleşen durma ve hızlanmadan dolayı istenmeyen ömür kayıplarından kaçınmak amacıyla, olması gerekenden daha büyük boyutlarda seçilebilmektedir. Bataryalar prensip olarak yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ultrakapasitörler ise mükemmel denilecek seviyede anlık şarj ve deşarj kabiliyetine sahiptir (Khaligh ve Li, 2010; Ortúzar ve diğ, 2007). Batarya ve ultrakapsitörün bu birbirini tamamlayıcı özelliklerini beraber kullanmak için batarya/UK hibrit enerji depolama sistemi düşünülmüştür. HEDS' de UK tampon görevi görerek anlık şarj ve deşarjdan kaynaklanan güç dalgalanmalarını karşılamaktadır (Lukic ve diğ, 2006; Choi ve Seo, 2012). Böylece batarya üzerindeki baskı azalarak, daha uzun ömürlü olması sağlanır (Carter ve diğ, 2012; Malaize ve Tona, 2011; Castro ve diğ, 2012). Literatürde birçok güç paylaşım yaklaşımı tartışılmıştır. Bu paylaşım metotları (Gürkaymak ve diğ, 2009) çalışmasında dinamik yapılarına, karmaşıklık seviyelerine, uygulanabilirlikleri ve performanslarına göre karşılaştırılmıştır. Yan ve diğ, (2012) yaptığı çalışmada model öngörülü kontrol (Model Predictive Control- MPC) , kullanılmıştır. Bu kontrol yöntemi karmaşık yapısından dolayı yüksek hesaplama gerektirebilir. Diğer yandan bu kontrol yöntemi sistemin uygun bir modeline ihtiyaç duymaktadır. Elde edilen kontrol sonuçları ise gerçek sistem ile modeli arasındaki farklılıklardan oldukça etkilenmektedir. Garcia ve diğ., (2010) ve Liu ve diğ. (2008) 'yayınlarında güç paylaşımı için kural tabanlı ve bulanık mantık kontrol stratejilerini incelemişlerdir. Bu metotlar kolay yapıdadır, fakat sezgisel ve tecrübeye dayalı olduğundan dolayı bu çalışmaların optimum güç paylaşımını sağlaması zordur. Düşmez ve Khaligh (2014) 'yayınında güç paylaşımı bulanık mantık ve dalgacık algoritması ile sağlanmıştır. Bu yöntem de yüksek hesaplama gerektirdiği için gerçek zamanlı uygulanması güçtür. Bu tez çalışmasında ise, iki hareket motoruna ve HEDS' e sahip bir elektrikli araç için gerçek zamanlı uygulanabilir, optimizasyon tabanlı güç paylaşım kontrol stratejisi önerilmiştir. Güç paylaşım kontrol stratejisi, en yüksek verime ulaşmak için optimum tork değerlerini iki motor için belirlemektedir. Diğer yandan konveks (dışbükey) optimizasyon problemi ile hibrit enerji depolama birimleri arasındaki güç paylaşımı tanımlanmış ve optimum şekilde çözülmüştür.

Yakıt hücreleri üzerinde teorik ve pratik bilgi edinebilmek için, Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatı - Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Araştırma Merkezi (UNIDO-ICHET) laboratuvarlarından yararlanılmış ve 1,4 kW gücünde hava

soğutmalı yakıt pilinin entegrasi ve yazılımı geliştirilmiştir. Yakıt pili ve batarya enerjisinin beraber kullanıldığı pratik mobil uygulamalar üzerinde çalışmamalarda bulunulmuştur (Yazıcı ve diğ, 2013).

Hibrit enerji depolama sistemleri konusundaki çalışmalar ise İstanbul Teknik Üniversitesi, Mekatronik Eğitim ve Araştırma Merkezinde ve 2012,2013 ve 2015 yıllarında üç kez IEEE Araç elektroniği konusunda en iyi makale ödülünü almış Maryland Üniversitesi' ne bağlı Maryland Güç elektroniği Laboratuvarı 'nda gerçekleştirilmiştir.

1.2 Tezin Literatüre Katkıları ve Kapsamı

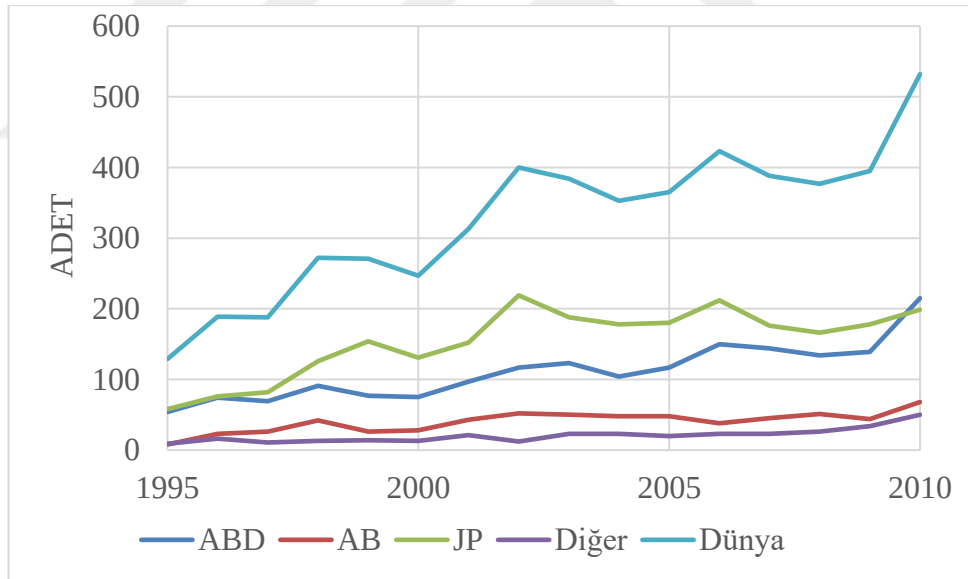
Argonne Ulusal Laboratuvarı'nın geliştirmiş olduğu Autonomie yazılımı motor kütüphanesinin verilerine dayanarak, Matlab sayısal hesaplama programı üzerinden yapılan simülasyonlar aracılığı ile elektrikli araçların güç aktarım sisteminde eşdeğer veya tork ve hız özellikleri bakımından birbirini tamamlayıcı karakteristikte, iki motor kullanımı için, motorlar arasında güç paylaşımını sağlayacak, gerçek zamanlı olarak uygulanabilen bir güç paylaşım stratejisi sunulmuştur. Güç aktarım sisteminde tork ve hız bakımından birbirini tamamlayıcı karakteristiğe sahip iki motor kullanımı, aynı güç seviyesinde fakat farklı tork/hız karakterine sahip tek motor kullanımları ile karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonuçları detaylı bir şekilde sunulmuştur. İki ve tek motor içeren güç aktarım topolojilerinin, elektrikli araçların tamamen elektrik enerjisi ile alabildikleri menzili nasıl etkilediği tez kapsamında incelenmiştir.

İkinci olarak, güç aktarım sisteminde iki motor bulunduran araç topolojisi için bataryanın ömrünü uzatmayı hedefleyen HEDS konveks optimizasyon problemi formüle edilmiş ve güç paylaşım stratejisi verilmiştir. İki ve tek elektrik motoruna sahip güç aktarım topolojileri hibrit ve hibrit olmayan enerji depolama sistemleri için batarya ömrü, araç menzili gibi çeşitli açılardan incelenerek sonuçlar irdelenmiştir.



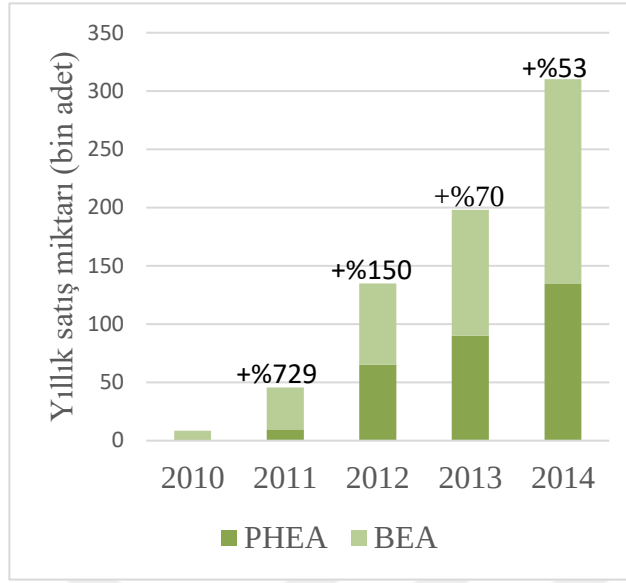
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Sessiz çalışmaları, çevreyi kirlilememeleri, konvansiyonel araçlara nazaran daha az hareketli parçaya sahip olmaları, egzoz ve yağlama sistemlerinin olmayışı, periyodik bakımlarının daha ucuz oluşu, hareketi sağlayan elektrik motorlarının sahip olduğu yüksek tork sayesinde performanslarının da yüksek olması gibi sayılabilecek avantajlar, elektrikli araçlara olan ilgiyi arttırmaktadır. Buna bağlı olarak, elektrikli araçlar ile ilgili yapılan araştırma çalışmaları artarak devam etmektedir. Elektrikli araçlar ile ilgili alınan patent sayısındaki eğilim Şekil 2.1’ de Amerikan ulusal bilim kurulunun (NSF) sunduğu, Amerika marka ve patent ofisi (USPTO)’nin verdiği patent verileri ile görülmektedir.



Şekil 2.1 : Amerika marka ve patent ofisi (USPTO)’nin verilerine göre tümüyle elektrikli ve hibrid elektrikli araçlar için yıllara göre, ülke ve dünya bazında alınan patentlerin sayısı (NSF, 2012).

Enerji depolama sistemlerinde, elektrik motorunda ve güç elektroniğinde yaşanan teknolojik gelişmeler sayesinde elektrikli araçlar, otomotiv pazarındaki payını artırma eğilimindedir.



Şekil 2.2 : Tamamen elektrikli (BEA) ve şebekeden şarj edilebilen hibrit elektrikli (PHEA) araçların dünya genelinde satış miktarı (EAİ Raporu, 2015).

Elektrikli araçlar otomotiv pazarında konvansiyonel içten yanmalı motorlara sahip araçlar ile maliyet, menzil gibi konularda tam anlamıyla rekabet edemese de, devlet teşvikleri ve müşteri talepleri sayesinde son 15 senedir popülerliğini arttırmıştır. Tahmin edilenin aksine elektrikli araçların tarihi yeni değildir. Elektrikli araçların tarihi 1830'lu yıllara dayanmaktadır (Larminie ve Lowry, 2013). Lohner-Porsche bataryaları şarj edilebilmek için elektrikli araca bir içten yanmalı motor koyarak, 1901 yılında ilk hibrit aracı üretmiştir. İlerleyen yıllarda, petrolün ucuz ve enerji yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle içten yanmalı motorlar pazarın hâkimi durumuna gelmiştir. 1997 yılında araç verimliliğinin artırılması için Toyota modern anlamda ilk hibrit aracı olan Prius modelini tanıtmıştır. Toyotanın Prius modelini, Honda 1999 yılında çıkardığı Insight modeli ile takip etmiştir. Akabinde diğer araç üreticisi firmalar da birçok hibrit elektrikli araç modelini piyasaya sunmuşlardır. 2003 yılında kurulan Tesla Motor firması tümüyle elektrikli araçlar üretmeye başlamış, model s adını verdikleri araç ile Amerika pazarında tümüyle elektrikli araç satışında lider konuma çıkmıştır.

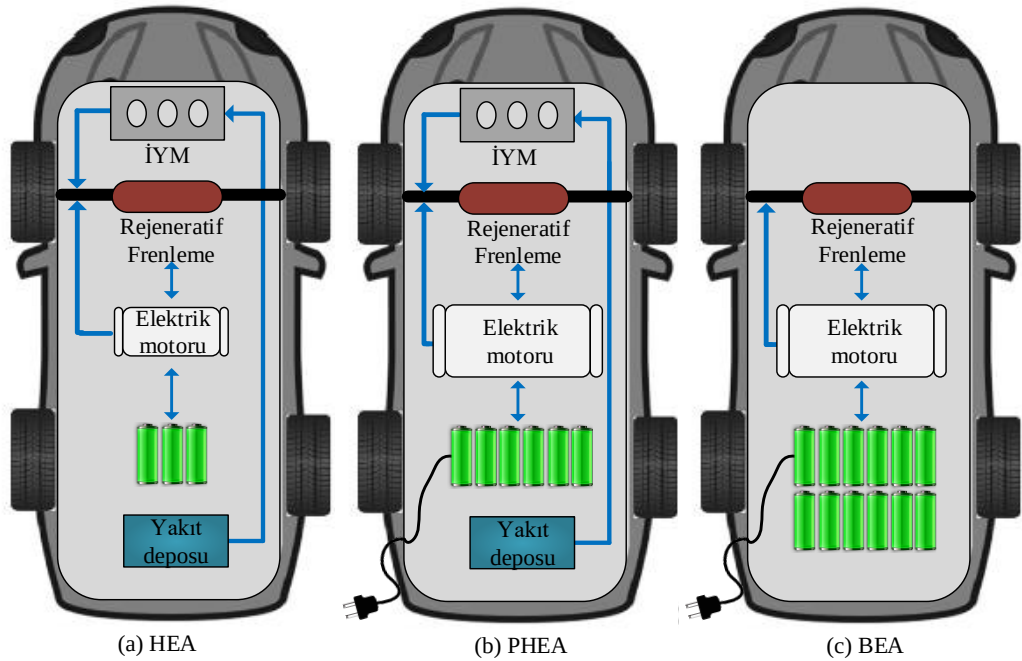
2.1 Elektrikli Araçların Sınıflandırılması

Hibrit Elektrikli araçlar (HEA) ve harici olarak prizden (şebekeden) şarj edilebilen hibrit elektrikli (PHEA) araçlar güç aktarım yapısı bakımından literatürde seri HEA,

paralel HEA, seri/paralel HEA, seri PHEA, paralel PHEA, seri/paralel PHEA olarak çeşitli gruplara sınıflandırılmıştır (Yong ve diğ, 2015).

Seri hibrit araçlarda elektrik motoru aracın hareketi için gerekli tahriki sağlarken içten yanmalı motor (İYM) ise elektrik motoru için gerekli enerjiyi üretmektedir. Bu tip araçlarda yüke göre elektrik motorunun gücü değişirken, içten yanmalı motorun yükten bağımsız bataryanın şarjlılık durumunu temel alarak sistemin en verimli olduğu bölgelerde çalışması hedef alınmıştır. Paralel hibrit araçlarda ise hem elektrik motoru hem de İYM beraber tahrik gücünü sağlamaktadır. Paralel hibrit araçların temel prensibi; durma ve kalkma periyotlarının çok sık yaşandığı düşük hızlarda elektrik motoru hareketi sağlarken, yüksek hızlarda İYM’ unda devreye girmesidir. Seri/paralel sistemler ise, seri ve paralel yapıların kombine edildiği sistemlerdir. Bu topolojilerde İYM hem hareketi sağlama, hem de bataryayı şarj etme görevini üstlenir.

Elektrikli araçlar İYM’a olan bağımlılıklarına göre, hibrit elektrikli araçlar (HEA), prizden şarj edilebilen hibrit araçlar (PHEA) ve bünyesinde hiç İYM bulundurmayan tümüyle elektrikli araçlar (EA) veya bataryalı elektrikli araçlar (BEA) olarak şekil 2.3’de görüldüğü gibi üç kısma ayrılabilir.



Şekil 2.3 : Elektrikli araç tipleri; a) Hibrit elektrikli araç, b) Prizden şarj edilebilen hibrit elektrikli araç, c) Tümüyle elektrikli araç.

2.1.1 Hibrit elektrikli araçlar (HEA)

Konvansiyonel araç mimarisine en yakın ve günümüzde en yaygın olarak kullanılan elektrikli araç tipidir. Elektrik motorunun ve içten yanmalı motorun güç aktarım sisteminde beraber bulunduğu bu araç tipinde asıl güç, içten yanmalı motor tarafından karşılanır. Elektrik motorunun gereksinim duyduğu enerji, bataryaya İYM tarafından doldurulur. Bu araç modelinde elektrik motorunun gücü daha az ve bataryanın boyutu, diğer elektrikli araç mimarilerine göre daha küçük olarak tasarlanır. Örnek olarak, Honda Insight modelinde ise 0,6 kWh'lik ve Toyota Pirus modelinde 1,3kWh'lik batarya modülleri kullanılmıştır.

2.1.2 Prizden (şebekeden) şarj edilebilen hibrit araçlar (PHEA)

Bu araç modelinde hibrit elektrikli araç modelinde olduğu gibi içten yanmalı motor ve elektrik motoru beraber kullanılmaktadır. Hibrit araçlara göre farkı ise bataryanın harici olarak şebekeden şarj edilebilmesidir. Prensip olarak PHEA'da, düşük hız ve kısa mesafelerde elektrik motoru ile yol alınırken yüksek hız ve uzun mesafelerde içten yanmalı motor kullanılır. Genel olarak hibrit elektrikli araçlara göre elektrik motorları daha güçlüdür ve bataryaları daha büyük olarak tasarlanır. Örnek olarak Mercedes C350e modelinde 6,2 kWh, BMW 330e modelinde 7,6 kWh ve Chevrolet Volt 2016 modelinde 18,4kWh batarya modülü kullanılmıştır.

2.1.3 Tümüyle elektrikli araçlar (BEA)

Bu elektrikli araç mimarisinde içten yanmalı motor bulunmaz ve aracın hareketi tamamen elektrikli motor tarafından sağlanır. Bu sebeple daha önce verilen hibrit elektrikli araç tiplerine nazaran elektrik motorları daha güçlü ve batarya modülleri daha büyük olarak tasarlanır. Örnek olarak Tesla model s P85 modelinde 7104 hücreden oluşan 85kWh Panasonic firmasına ait lityum batarya modülü kullanılmıştır (Teslerati, 2013). Tümüyle elektrikli araçlar, bataryalarının şarj edilmesi için şebekeye bağımlı olduklarından tam bir şarj ile gidebilecekleri menzil ve çevrede bulunan şarj istasyonlarının sıklığı önemli faktörlerdir. Sadece batarya ile enerjisini sağlayan tümüyle elektrikli araçlarda uzun bir menzil için büyük miktarlarda kullanılan batarya modülleri, maliyet ve ağırlık olarak dezavantaj oluşturmaktadır. Elektrikli araçların yaygın olarak kullanıldığı ülkelerden biri olan Amerika'da ülke genelinde Enerji bakanlığı (DOE) verilerine göre, özel teşebbüslerin sayıları hariç 12695 şarj istasyonu ve 31752 şarj noktası bulunmaktadır (DOE, 2016). Elektrikli araçlar için şarj

istasyonların artması ve tek bir şarj ile ulaşabilecekleri menzilin uzatılması pazardaki sahip olduğu payın artmasını sağlayacaktır. Pazardaki elektrikli araç modelleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Otomotiv pazarındaki elektrikli araç modelleri.

Marka	Model	Batarya Enerjisi [Kwh]	Motor Gücü [KW]	Motor Torku [Nm]	Menzil [Km]	Araç Ağırlığı [Kg]	Fiyat*
Tesla	Model s 85	85	270	440	426	2108	\$81,070
Tesla	Model s 60	60	225	430	335	2005	\$71,070
Toyota	Rav4 EV	41.8	115	370	165	1829	\$49,800
BMW	i3	18.8	125	250	190	1195	\$46,250
Mercedes-Benz	B-Class ED	31.5	132	340	137	1769	\$42,375
Honda	Fit EV	20	92	256	132	1475	\$36,625
Volkswagen	e-golf	24.2	86	255	134	1538	\$35,445
Kia	Soul EV	24	81.4	285	150	1515	\$33,700
Fiat	500e	24	83	200	140	1339	\$32,300
Nissan	Leaf SV	24	80	254	78	1486	\$32,100
Ford	Focus Electric	23	99	245	122	1675	\$29,170
Nissan	Leaf S	24	80	254	78	1470	\$29,010
Chevrolet	spark EV 1LT	19	100	443	132	1356	\$26,820
Smart	Electric Drive	17.6	49	130	122	950	\$25,700
Mitsubishi	I-miev	16	49	196	100	1170	\$23,845

*2015 Amerika pazarı için tavsiye edilen perakende satış fiyatı.

2.1.4 Yakıt pilli elektrikli araçlar (YPEA)

Lityum-iyon batarya teknolojisindeki önemli gelişmelere rağmen, elektrikli araçlarda elektrik enerjisinin depolanması hala en büyük sorunlardan biridir. Hızlı ve yüksek enerji depolamaya imkân veren yakıt pili kullanan elektrikli araçlar, menzil ve uzun şarj sürelerine çözüm olarak gündeme gelmişlerdir. Yakıt pilli araçlarda hidrojenin depolandığı bir tank ve hidrojenin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan yakıt pili bulunmaktadır. Bu araçlarda elektrokimyasal tepkime sonucu atık olarak su ve su buharı çıkar. Emisyon ve gürültü bakımından tümüyle elektrikli araçlar gibi çevre

dostudurlar. Bu araçlar, tümüyle elektrikli bataryadan beslenen araçlarda olduğu gibi, içten yanmalı motorlar yerine elektrik motoru kullanılmaktadır (Brown ve Yavaşoğlu, 2014).

Yakıt pilli araçlar, enerji depolama sistemlerinde genel olarak batarya ve yakıt pilini beraber bulundurlar. Yakıt pilli elektrikli araçların kendi içinde sınıflandırılması, bünyesinde bulundurdıkları, yakıt pili ve batarya güçlerine bakılarak, mesafe arttırıcı yakıt pilli araç ya da sadece yakıt pilli araç olarak adlandırılmaktadır. Mesafe arttırıcı uygulamalarda batarya ana enerji kaynağıdır ve bataryanın gücü, yakıt piline nazaran daha büyüktür. Aracın seyir halinde talep ettiği ana güç değerleri batarya tarafından karşılanmaktadır. Bu uygulamalarda mesafe arttırıcı olarak adlandırılan ilave enerji kaynağı yakıt pilidir. P_{FC} , yakıt pilinin gücü, P_{Bat} , bataryanın gücü olmak üzere, enerji depolama sistemindeki güç oranı (2.1)'de verildiği gibidir (Walters ve diğ, 2015).

$$\frac{P_{FC}}{P_{Bat}} < 1, \text{ Yakıt pilli mesafe arttırıcı elektrikli araç.} \quad (2.1)$$

Yakıt pilli araçlarda ise ana enerji kaynağı yakıt pilidir. İlave enerji kaynağı bataryadır ve anlık güçler batarya tarafından karşılanır ve yakıt pili, batarya güç oranı katsayısı (2.2)'de verildiği gibi 1'den fazladır.

$$\frac{P_{FC}}{P_{Bat}} > 1, \text{ Yakıt pilli araç.} \quad (2.2)$$

Son 15 yılda otomobil firmalarının ürettikleri yakıt pili kullanan araç modelleri aşağıdaki gibi listelenmiştir;

Audi: Audi A2H2-hybrid vehicle, Audi Q5-FCEV, Audi A7 h-tron quattro.

BMW: BMW 1 Series Fuel-cell hybrid electric, BMW_i8 fuel-cell prototype, BMW 5-Series Grand Turismo fuel-cell.

Chrysler: Jeep Commander II-hybrid vehicle, Chrysler Natrium-hybrid vehicle, Jeep Treo-Fuel cell.

Daimler: Mercedes-Benz NECAR 5, Mercedes-Benz F-CELL A-Class, Mercedes-Benz F600 Hygenius, Mercedes-Benz F-CELL Roadster, Mercedes-Benz F-Cell B-Class.

Fiat: Fiat Seicento Elettra H2 Fuel Cell-hybrid vehicle, Fiat Seicento Hydrogen-hybrid vehicle, Fiat Panda Hydrogen-Fuel cell, Fiat Phyllis-Fuel cell, Fiat Panda-Fiat Panda HyTRAN.

Lotus Engineering: Black Cab-Fuel cell.

Ford: Ford Focus FCV, F-250 Super Chief .

General Motors: HydroGen3-Fuel cell, GM HyWire-Fuel cell, GM Sequel-hybrid vehicle, CHEArolet, Equinox Fuel Cell, HydroGen4.

Honda: Honda FCX Clarity, Honda FCV.

Kia: Kia Borrego FCEV-Fuel cell.

Mazda: Mazda Premacy FC-EV, Mazda 5 Hydrogen RE Hybrid.

Nissan: Nissan X-Trail FCHV-hybrid vehicle, Nissan TeRRA SUV-concept.

Mitsubishi: Mitsubishi FCV.

Peugeot: Peugeot Quark, Peugeot 207 Epure, H2Origin-Fuel cell.

Renault: Scenic ZEV H2 is a hydro-electric MPV co-developed by Nissan.

Hyundai: Hyundai Santa Fe FCEV, Hyundai Tucson FCEV, Hyundai Intrado, Hyundai ix35 FCEV.

Subaru: Subaru Viziv 2-concept.

Suzuki: Suzuki MR Wagon-FCV, Suzuki Wagon R-FCV, SX4-FCV-concept car

Toyota: Toyota FCHV-hybrid vehicle, Toyota Fine-S-concept car, Toyota Fine-N-concept car, Toyota Fine-T-concept car, Toyota Fine-X-concept car, Toyota FCHV-adv-preproduction vehicle, Toyota Mirai

Volkswagen: VW Bora Hy-motion-Fuel cell, VW Bora Hy-power-Fuel cell, VW Touran Hy-motion-Fuel cell, VW space up! Blue, VW Passat Lingyu Hymotion, VW Golf Hymotion

Bu araçların birçoğu prototip olarak üretilmiş ticari olarak satışa sunulmamıştır. Ford, Daimler, Renault ve Nissan yakıt pilli araç üretimi için işbirliği yapma kararı vermiş 2017’de ortak yakıt pilli araçlarını satışa çıkaracaklarını duyurmuşlardır.

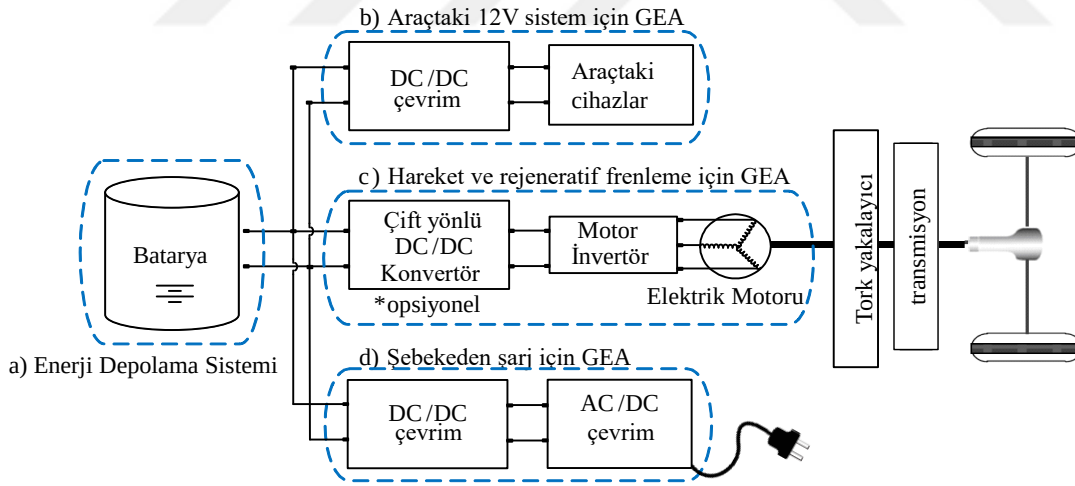
Piyasada tümüyle elektrikli ve yakıt pilli araç tipinde sınıfında lider olan modellerinin karşılaştırılması Çizelge 2.2 ile verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Hali hazırda pazarda en çok öne çıkan tümüyle elektrikli ve yakıt pilli araç modellerinin karşılaştırılması (Tesla,2015; Toyota, 2015)

Model	Tesla Model S P85	Toyota Mirai
		
Araç Tipi:	Tümüyle elektrikli	Yakıt pilli araç
Menzil:	426Km	502Km
Toplam ağırlık:	2108 Kg	1850 Kg
Fiyatı:	\$81,070	\$57,500
Şarj/dolum süresi:	5 ~ 10 saat	~5 dakika

2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Enerji Depolama Sistemine Ait Birimler

Elektrikli araçlarda bulunan güç elektroniği sistemi şekil 2.4’ de gösterildiği gibi dört ana bölümde incelenebilir.



Şekil 2.4 : Elektrikli araçlarda güç aktarım yapılandırması.

Bunların ilki aracın elektrik enerjisi ile hareketini sağlayacak olan ve aynı zamanda rejeneratif frenleme esnasında faydalı frenleme enerjisini depolamak için gereken, elektrik motoru ve sürücüsünün bulunduğu güç elektroniği ara yüzüdür (GEA). Yapılan uygulamalarda, enerji depolama sisteminin gerilim seviyesinin, elektrik motorunun bağlı olduğu bara gerilimine eşitlenmesi ve enerji depolama sistemi ile

motor arasında güç akışının kontrolü için motor sürücüsü ve enerji depolama sistemi arasında DC/DC konvertörlerinde kullanıldığı görülmektedir.

Elektrikli araçlarda bir diğer güç elektroniği ara yüzü ise aracın şebekeden şarj edilebilmesi için gerekli olan cihazların oluşturduğu gruptur. Bu grupta genel olarak alternatif akımın doğrultulması ve bataryanın hızlı ve ömrünün korunarak şarj edilmesi için ardarda AC/DC ve izole DC/DC konvertörler kullanılır (Gautam ve diğ, 2011).

Bir diğer bölüm, araçlarda bulunan aydınlatma, klima, müzik sistemi gibi çeşitli çevre birimlerinin beslenmesi için enerji depolama sisteminin gerilim seviyesinin DC/DC konvertör aracılığı ile çevre birimlerinin gerilim seviyesine düşürüldüğü yapıdır.

Elektrikli araçlarda enerji depolama sistemi olarak adlandırılan bir diğer bölüm ise aracın ihtiyaç duyduğu güçlerin karşılanması için enerjinin depolandığı kısımdır. Elektrikli araçlarda genel olarak ana enerji kaynağı olarak batarya kullanılır. Ultrakapasitör ve yakıt pili gibi diğer üniteler de enerji depolama sisteminde kullanılmaktadır.

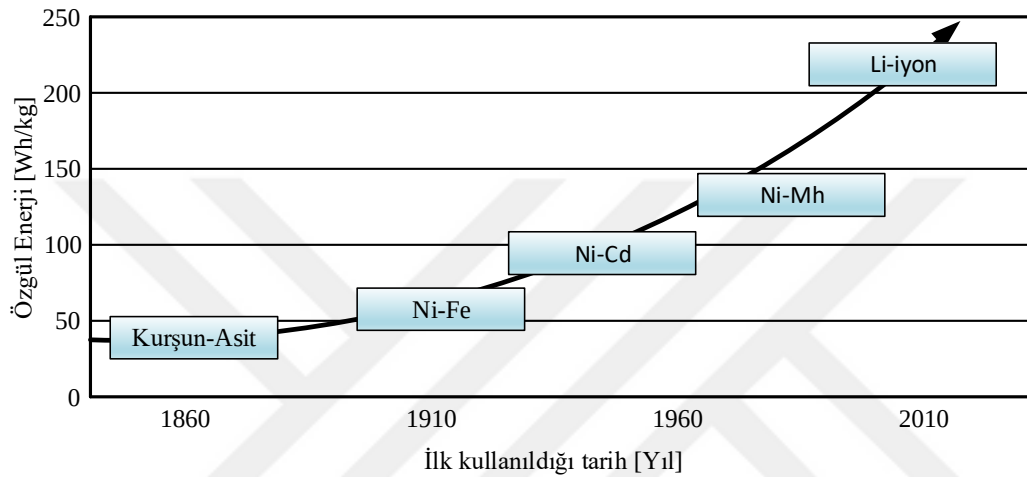
Enerji depolama cihazları, yüksek güç taleplerini ekonomik bir şekilde karşılayabilecek özellikte olması ve aynı zamanda uzun ömürlü ve yüksek verime sahip olması beklenmektedir. Uygulamaya göre değişen, gerekli enerji ve güç talepleri göz önüne alınarak, enerji depolama cihazları seçilmektedir. Ayrıca, ağırlık, hacim, maliyet hatta bakım giderleri gibi etkenler enerji depolama cihazının seçiminde dikkate alınmalıdır.

2.2.1 Batarya

Elektrikli araçlarda en çok kullanılan enerji depolama ünitesi olan bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bataryaların birçok çeşidi ve her batarya çeşidinin kendine has özellikleri bulunur. Kimi bataryalar ortam sıcaklığında çalışabilirken, kimi bataryalar, başlangıç veya çalışma esnasında sıcaklık bakımından şartlandırılmaya ihtiyaç duyabilir. Bataryaların doluluk (Şarj) oranı (SoC), yüzdesel olarak ifade edilir. %100 SoC bataryanın tamamen dolu olduğunu belirtirken, %0 SoC bataryanın tamamen boş olduğu anlamına gelmektedir. Genel olarak bataryalar kullanılmadıkları süre içerisinde doluluk oranının bir kısmı kendi kendine boşalabilmektedir. Bazı batarya çeşitlerinde, bataryaların boş bir şekilde uzun süre bırakılmasının ömürlerinin kısalması açısından etkili olabildiği için bu parametreler

bataryalar için önem kazanmaktadır. Bataryanın ömrü elektrikli aracın maliyetine yansıyan en önemli faktörlerden biridir (Shen,2014).

Araçlarda kullanılmak üzere birçok batarya teknolojisi geliştirilmiştir. 19. yüzyılın ortalarında ilk kurşun-asit batarya tanıtıldığından beri, batarya kullanımı ve batarya teknolojisindeki gelişim büyük hızla devam etmiştir. Son on yılda ise batarya teknolojisi gelişmeler hızlanarak şekil 2.5’de gösterildiği gibi günümüze kadar katlanarak artmıştır.



Şekil 2.5 : Batarya teknolojisindeki gelişim (Farhadi ve Mohammed, 2015).

Kurşun-asit bataryalar ağır ve enerji yoğunluğu düşük bataryalardır. Fakat ucuz oldukları, anlık yüksek güç verebildikleri, iç dirençlerinin çok düşük olduğu ve bakım gerektirmedikleri için otomotiv sektöründe konvansiyonel araçlara start verme, ateşleme ve aydınlatma görevleri için en çok kullanılan batarya tipidir.

Bir diğer batarya türü çalışma sıcaklığı çok yüksek olan sodyum bazlı bataryalardır. Sodyum sülfür (NaS) bataryaların geliştirilmesi 1970’lerde başlamıştır ve 300-350 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadırlar. Kurşun asit bataryalara göre 6 kat daha fazla özgül enerjiye sahiptirler. Fakat yüksek sıcaklıkta çalışabilmeleri için gerekli muhafaza birimlerinin ağırlığı dikkate alındığında özgül enerji olarak sahip oldukları avantaj yarı yarıya düşmektedir. Bu batarya çeşidi çok iyi bir soğutma ve ısıtma yönetimi gerektirmektedir. Diğer yandan bu batarya modelinde negatif ve pozitif sıvı reaktif materyalleri birbirinden kırılğan seramik malzeme ile ayrıldığı için güvenlik bakımından endişelere neden olmuş, bu yüzden ticari olarak da gelişmemiştir. Güvenlik kaygılarına çözüm olarak, literatürde Zebra olarak da adlandırılan sodyum metal klorid bataryalar öne sürülmüştür. Bu batarya tipi NaS tipi bataryalara özellik olarak çok benzemektedir. Fakat bu batarya tipinde başlıca dezavantajlar; yine NaS

bataryalar gibi yaklaşık 320°C' de çalışmaları ve daha önemlisi bu bataryalar kullanılmadıkları zaman bile sıcak tutulmaları gerekmektedir. Örnek olarak 18kWh'lık enerjiye sahip bir zebra batarya kullanılmadığında yaklaşık 100W'lık bir güç harcamaktadır. Bir gün boyunca kullanılmadığı düşünülürse $0.1 \times 24 = 2,4$ kWh'lık bir enerji kaybı söz konusudur (Larmine ve Lowry, 2003).

Nikel bazlı bataryalar 19. Yüzyıldan beri ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılan batarya türlerindendir. Bu batarya teknolojisi içinde nikel çinko, nikel kadmiyum ve nikel metal hidrit bataryalar sayılabilir. Nikel çinko bataryalar 300' den daha az çevrim ömrüne sahip oldukları için ticari olarak kullanım şansları düşüktür.

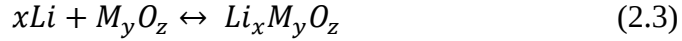
Nikel kadmiyum (NiCd) bataryalar, kurşun asit bataryalara göre daha fazla özgül (spesifik) enerjiye sahiptirler. Nikel-kadmiyum bataryalar hızlı şarj edilebilmeleri, son derece güvenli olmaları ve düşük sıcaklıklarda rahatlıkla kullanılabilmesi gibi birçok avantaja sahiptir. Fakat kadmiyum hem çevreye zararlı hem de kanserojen bir maddedir. NiCd bataryalar bünyesinde bulundurduğu yüksek orandaki toksit kadmiyum maddesinden dolayı birçok uygulamada yerini nikel metal hidrit (NiMH) bataryalara bırakmıştır.

NiMH bataryalar, NiCd bataryaların teknolojik olarak geliştirilmiş bir versiyonu olarak görülebilir. Bu batarya tipinde bünyesinde metalik kadmiyum yerine hidrojen bulundurarak birim ağırlığına göre kapasitesinde ve boyutlarında iyileşme elde edilmiştir. Kadmiyum olmadığı için daha sağlıklıdır ve NiCd bataryalarda olan hafıza etkisi NiMH bataryalarda bulunmamaktadır. Günümüz teknolojisinde elektrikli araçlarda enerji depolama ünitesi olarak büyük çoğunlukla NiMH bataryalara göre daha fazla enerji yoğunluğuna sahip olan lityum bataryalar gelmektedir.

Lityum bataryalar ilk defa 1980'lerin sonuna doğru satışa çıkmıştır. Lityum-iyon bataryalar diğer bataryalara nazaran daha maliyetli olmasına karşın enerji ve güç yoğunluğu daha yüksek, daha hafif ve çevrim ömürleri daha fazladır (Khaligh ve Li, 2010). Lityum tabanlı bataryalar, lityum polimer (Li-P) ve lityum iyon (Li-I) olarak iki ana grupta sınıflandırılabilir (Ehsani ve diğ, 2010).

Lityum polimer bataryalarda, negatif elektrot katı lityumdan ve pozitif elektrot metal oksitten oluşmaktadır. Kimyasal reaksiyon sonucu lityum, lityum metal oksit oluşturacak şekilde metal oksitle birleşmekte ve böylece enerji açığa çıkmaktadır

(Carter ve diğ, 2012). Şarj reaksiyonu ise deşarjın tersi şeklinde gelişir. Genel olarak elektrokimyasal reaksiyon aşağıda verildiği gibidir (Ehsani ve diğ, 2010);



Lityum polimer piller düşük sıcaklıkta, düşük performansa sahiptirler ve kullanımda yerini daha çok lityum iyon pillere bırakmıştır.

Lityum iyon bataryalar ilk kez 1991 yılında duyurulmuştur. Tümüyle elektrikli ve şebekeden şarj edilebilen elektrikli araçlarda yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Lityum iyon pillerde kullanılan anot ve katot aktif maddeler genelde metal oksit türü lityum içermeye bileşikleridir. Ticari lityum iyon bataryalarda katot aktif madde olarak LiCoO₂, LiNiO₂ ve LiMn₂O₄, anot aktif madde olarak da çoğunlukla karbon kullanılmaktadır. Genel olarak bataryanın reaksiyonu (2.4) ile verilen denklemde gösterildiği gibidir (Ehsani ve diğ, 2010).



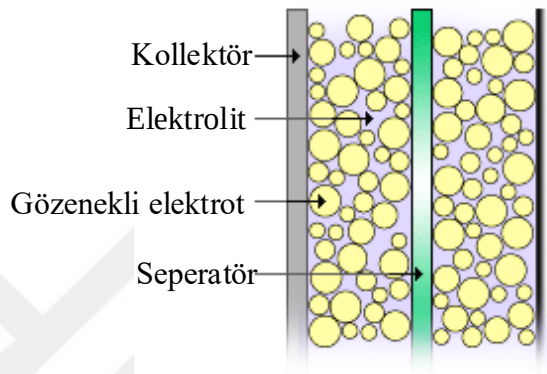
Çizelge 2.3’de verildiği gibi Li-I bataryalar özellik olarak diğer batarya türlerine göre daha avantajlı durumdadır. Lityum iyon bataryalar maliyet konusunda diğer batarya çeşitlerine göre daha dezavantajlıdır fakat bu konuda son yıllarda iyileşme gözlenmiştir. General Motors şirketinin yaptığı açıklamaya göre, araç üreticisi firmalar kWh başına lityum-iyon bataryaları 145\$’ın altında bir maliyet ile günümüzde temin edebilmekte ve 2021 yılında bu maliyetin 100\$’ a kadar düşmesi beklenmektedir (Barra, 2015).

Çizelge 2.3 : Batarya tiplerinin karşılaştırılması (Warner, 2015).

Batarya tipi	Hücre Gerilimi [V]	Özgül Enerji [Wh/kg]	Enerji yoğunluğu [Wh/l]	Çevrim ömrü [Çevrim]	Verim [%]
Kurşun-asit	2	30~40	60~70	300~800	75~90
Ni-Cd	1,2	40~60	50~150	1000~2000	75
Ni-MH	1,2	30~80	140~300	500~1500	81
Li-ion	3,2~3,8	70~220	130~600	1000~4500	85~90

2.2.2 Ultrakapasitör

Bazı kaynaklarda süperkapasitör olarak da adlandırılan ultrakapasitörler enerjiyi, fiziksel olarak ayrılmış pozitif ve negatif yüklerde saklarlar (Khaligh ve Li, 2010). Yükler yalıtkan ile ayrılmış iki paralel plakada tutulur. Elektrotlar üzerinde hiçbir kimyasal değişim olmadığı için UK'ler uzun çevrim ömrüne, yüksek güç yoğunluğuna fakat düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Şekil 2.6'da ultrakapasitör yapısı tek bir hücre için gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Ultrakapasitör hücresi (Khaligh ve Li, 2010).

Organik ve Sulu olmak üzere iki ayrı tip elektrolit kullanan ultrakapasitör teknolojisi mevcuttur. Sulu tipler 0,9V civarı bir gerilim seviyesine sahip iken sulu olmayan elektrolit kullanan ultrakapasitör tiplerinde, her bir hücre gerilimi 2,3 V~ 3.3V seviyesine sahip olabilir. Sonuç olarak organik tip elektrolite sahip olan UK'ler daha fazla enerji yoğunluğuna sahip fakat aynı zamanda daha maliyetli ve iç dirençleri daha yüksektir (Spyker ve Nelms, 2000).

Ultrakapasitörler elektrik enerjisini doğrudan depoladıkları için şarj ve deşarj işlemi çok hızlı ve çok verimlidir. Ultrakapasitörlerin verimi %95'den fazla ve çevrim ömrü yaklaşık 1000000 çevrimdir (Maxwell, 2016; Farhadi ve Mohammed,2015). Önde gelen ultrakapasitör üreticilerinden Maxwell firmasının pazara sunduğu bazı ultrakapasitör modellerinin karakteristikleri Çizelge 2.4' de sunulmuştur.

Çizelge 2.4 : Maxwell firmasına ait ultrakapasitör modelleri (Maxwell,2016).

UK Modeli	BCAP0650	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
Kapasite değeri [F]	650	1500	2000	3000
Gerilimi [V]	2,7	2,7	2,7	2,7
İç direnci [$m\Omega$]	0,8	0,47	0,35	0,29
Özgül güç [kW/kg]	6,8	6,6	6,9	5,9
Özgül enerji [Wh/kg]	4,1	5,4	5,6	6
Depolanan enerji [Wh]	0,66	1,52	2,03	3,04
Min. çalışma sıcaklığı [$^{\circ}C$]	-40	-40	-40	-40
Maks. çalışma sıcaklığı [$^{\circ}C$]	65	65	65	65
Maks. akım değeri [A]	680	1150	1500	1900
Çevrim ömrü [çevrim]	1000000	1000000	1000000	1000000
Ağırlık [g]	160	280	360	510

Trafikte sıklıkla gerçekleşen dur-kalk periyotları esnasında veya dik yokuşlarda seyrederken anlık yüksek şarj ve deşarj ihtiyaçlarını karşılamak için ultrakapasitörler yüksek çevrim ömürleri ve yüksek güç yoğunluğu sayesinde, yüksek enerji yoğunluğuna sahip enerji depolama birimleri ile beraber kullanmak için idealdir. Bataryalar ile beraber kullanımında, aracın gerektirdiği maksimum güç değerini karşılamakta büyük rol oynayarak, araca yüklenecek bataryanın boyutunda iyileşme sağlayabilir. Bataryaya nazaran iç dirençlerinin düşük olması nedeni ile sıkla gerçekleşen frenleme periyotlarında, faydalı frenleme enerjisini daha az kayıpla depolanmasını sağlayarak, hem enerji verimliliğin artmasını, hem de batarya üzerindeki şarj/deşarj trafiğinin azalması ile batarya ömrünün uzamasına yardımcı olur.

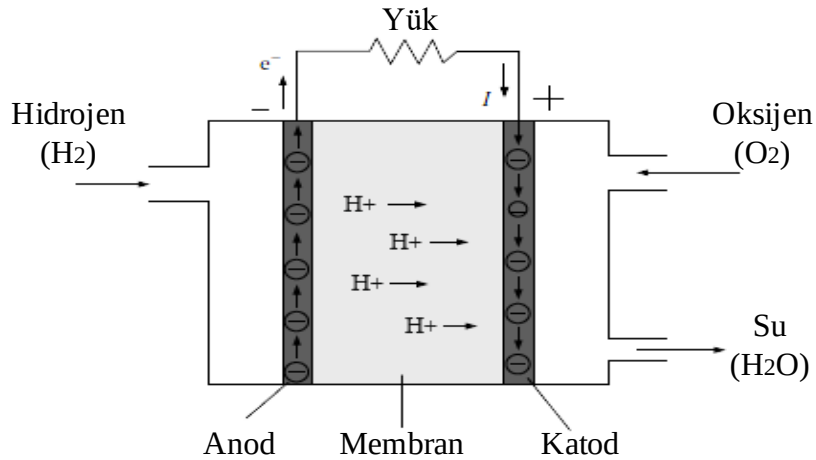
2.2.3 Yakıt pili

Yakıt pili, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren düşük gürültü seviyesine sahip, çevre dostu sistemlerdir. İlk kez 1839 yılında William Grove tarafından tanıtılan yakıt pili, günümüzde içten yanmalı motorlara kıyasla yaklaşık olarak 3 kat daha yüksek verimle çalışabilmektedirler (Barbir, 2013; Larminie ve Lowry, 2003). Yakıt pilleri, kullandıkları yakıta, çalışma sıcaklıklarına ve kullandıkları elektrolit tipine göre Çizelge 2.5 'deki gibi çeşitli sınıflara ayrılırlar (Larminie ve Dicks, 2003).

Çizelge 2.5 : Yakıt pili çeşitleri
ve özellikleri (Ehsani ve diğ, 2010; Larmin ve Lowry, 2003).

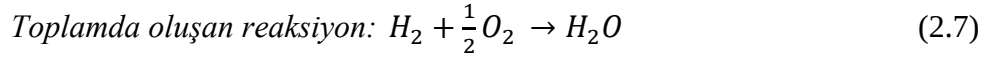
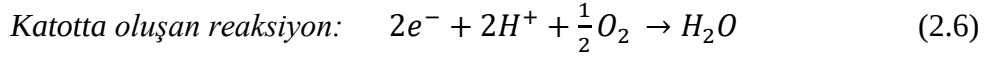
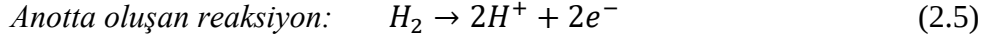
YP Tipi	Çalışma Sıcaklığı [°C]	Elektrolit Tipi	Yük Taşıyıcı	Uygulama alanı	Verim [%]
Erimiş Karbonat YP	650	Erimiş karbon çözeltisi	CO_3^{2-}	Orta ve MW mertebesine kadar büyük birleşik ısı-güç üretim sistemleri	40 ~55
Fosforik Asit YP	150 ~220	Dengelenmiş fosforik asit	H^+	200kW mertebesinde birleşik ısı-güç üretim sistemleri	35 ~50
Katı Oksit YP	800 ~1000	Seramik katı oksit	O^{2-}	kW ile MW'lar arası tüm birleşik ısı-güç üretim sistemleri	45 ~60
Alkali YP	70 ~100	Potasyum hidroksit	OH^+	Uzay araçlarında kullanıldı (Apollo)	50 ~70
PEM YP	60 ~80	Proton geçirgen polimer	H^+	Araçlarda, mobil uygulamalarda ve küçük güçlü birleşik ısı-güç üretim sistemleri	35 ~60

Elektrot olarak ince ve iyon iletebilen polimer bir zar kullanan yakıt hücrelerine Polimer Elektrolit veya Proton Geçirgen Membran (Polymer Electrolyte – Proton Exchange Membrane, PEM) denilmektedir. Yüksek verimliliğinin yanı sıra, düşük sıcaklıkta çalışması, hacim ve ağırlık açısından sahip olduğu avantajlar, sayesinde PEM YP sistemleri günümüzde araç uygulamaları için en uygun YP sistemidir (Larmin ve Dicks, 2003; Ehsani ve diğ, 2010; Larmin ve Lowry, 2003; Farhadi ve Mohammed, 2015). P



Şekil 2.7 : PEM tipi yakıt pilinin çalışması.

EM tipi yakıt pilinin çalışma prensibinin gösterildiği Şekil 2.7’ de görüldüğü gibi, hidrojen, yakıt pilinin anod kısmına, oksijen ise katot kısmına giriş yapmaktadır. Yakıt pilinde genel olarak gerçekleşen kimyasal reaksiyon, elektroliz olayının tersidir. Bir PEM yakıt pili için anod, katod ve toplamda oluşan reaksiyonlar (2.5) – (2.7) denklemleri gösterilebilir.



Genellikle platin kullanılan, katalizörün etkisiyle hidrojen atomları proton ve elektronlarına ayrılmaktadır. Ayrılan protonlar, proton seçici membrandan katoda doğru hareket ederken, elektronlar ise istenen yük üzerinden geçerek elektrik akımı oluşturmaktadır. Devreyi tamamlayan elektronlar, tekrar hidrojen protonuna bağlanır ve oksijenle birleşerek saf su buharı ve ısı meydana getirirler.

Yakıt hücreleri seri olarak birbirlerine bağlanarak yakıt pili yığını (stack) oluştururlar. Böylece çıkış gerilimleri de artmış olur. Örnek olarak Toyota firmasının Mirai yakıt pilli araçta kullandığı 370 hücreden oluşan yakıt pili yığınının özellikleri Çizelge 2.6 ile verilmiştir.

Çizelge 2.6 : Mirai araçta kullanılan Toyota YP yığın özellikleri (Toyota, 2016).

Özellik	Değer
Çıkış gücü [kW]	114
Özgül güç [kW/kg]	2
Güç yoğunluğu[kW/L]	3,1
Hücre sayısı	370
Hücre ağırlığı [g]	102

Yakıt pilinin bataryaya nazaran en büyük farkı şarj etme zorunluluğu olmaması, yakıt (hidrojen) olduğu sürece elektrik enerjisi üretebilmesidir. Hidrojenin araçlarda depolanması için birçok yöntem ve her yöntemin kendisine göre zorlukları bulunmaktadır. Başlıca bilinen depolama yöntemleri; yüksek basınçta sıkıştırma, sıvılaştırma, hidrokarbonlar, hidrürler olarak sayılabilir.

Hidrojeni sıvılaştırarak saklamak için kriyojenik sıcaklıklara (-259,2°C) düşürmek gerekmektedir. Bu işlem teknik olarak zorluklara sahiptir. Hidrojenin saklanacağı tankın son derece güvenli ve ortam sıcaklığından izole edilmesi gereklidir. Ayrıca

sıvılaştırma işlemi esnasındaki enerji kaybı da göz önüne alınmalıdır (Ehsani ve diğ, 2010).

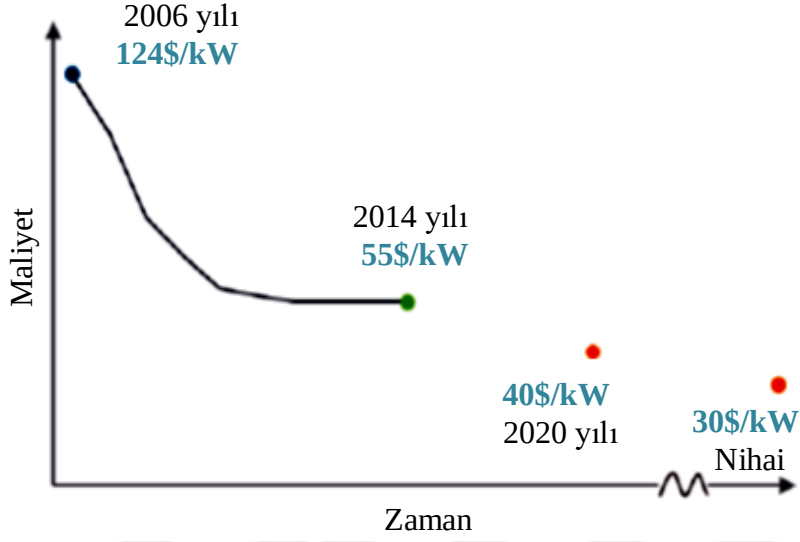
Hidrojen depolamadaki veya elde etmedeki bir diğer yöntem ise, metanol veya etanol gibi hidrokarbonlu yakıtlardır (Barbir, 2013). Bu hidrokarbonların içerdikleri hidrojen miktarı, hidrokarbonun toplam miktarının büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklıkta su buharı ile yapılan ayrıştırma neticesinde, hidrokarbonun %70-75'i oranında hidrojen elde edilebilmektedir. Ancak ayrıştırma sonucu ortaya çıkan karbondioksit ve karbonmonoksit gibi gazlar bu yöntem için bir dezavantajdır.

Hidrojenin metallerde, alaşımlarda ve ara metallerde hidrür olarak depolanabilmesi başka bir depolama seçeneğidir. Bu yöntemin dezavantajı tüp ağırlığı ve tekrarlanan doldurma-boşaltma sayısına bağlı olarak doldurulabilecek hidrojen kapasitesinin azalmasıdır. Bir diğer depolama yöntemi ise Sodyum bor hidrür ile hidrojenin depolanmasıdır. Bu yöntemin dezavantajı ise hidrojen ayrışımında ortaya çıkan metaboratı tekrar sodyum bor hidrüre dönüştürmek için yüksek enerji gereksinimi ve katalizör olarak platin gibi pahalı materyallerin kullanılmasıdır.

Hidrojen depolamada en çok bilinen yöntem, hidrojenin yüksek basınçta sıkıştırılarak, çelik, alüminyum bazlı veya karbon kompozit tüplerde depolanmasıdır (Barbir, 2013; Ehsani ve diğ, 2010). Yakıt pilli araçlarda 350 bar ve 600 bar olmak üzere iki ayrı basınç standardı kullanılmaktadır. Toyota firması 600 bar basınç altında toplamda 122.4L hacme sahip üç katmanlı kompozit malzemeden yapılmış, iki hidrojen tankında, tank ağırlığının %5,7'si olan yaklaşık 5kg hidrojen depoladığını belirtmiştir (Toyota, 2016).

Sıfır emisyonu ve sessiz çalışmalarına karşın, teknolojik olarak hala gelişmekte olan yakıt pilleri için önemli dezavantajlardan biri de maliyettir (Ellis ve diğ, 2001). Geçtiğimiz 10 yıl içerisinde elde edilen teknolojik gelişmeler sayesinde, hem performans hem de maliyet konusunda yakıt hücrelerinde ilerleme kaydedilmiştir. PEM yakıt pilinde, güç yoğunluğu bakımından daha önceki yakıt hücrelerine nazaran 2.4 kat iyileşme elde edilirken, özellikle, katalizör olarak kullanılan platin ve korezyona dayanıklılık için seperatör üzerinde kullanılan altından dolayı kaynaklanan maliyet artışı, yeni tasarımlar sayesinde %59 oranında azalmıştır (Konno ve diğ, 2015). Otomotiv sektöründe yakıt pilinin maliyeti Şekil 2.8'de gösterildiği gibi 2006 yılına göre %50, 2008 yılına göre ise %30 düşüş göstermiştir. 2002 yılından bu yana

elektrolizör cihazlarının %80 ucuzlaması nedeniyle, yenilenebilir enerji ile hidrojen üretimi maliyetleri de düşmüştür (DOE Raporu, 2015).



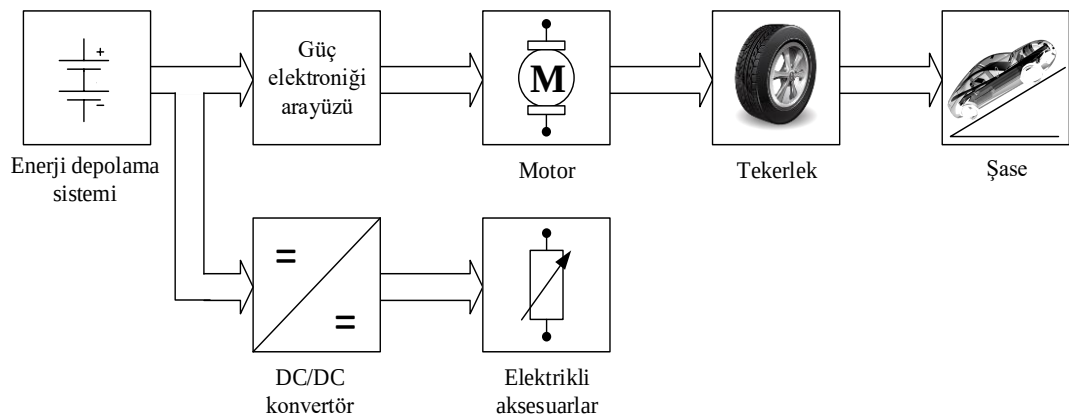
Şekil 2.8 : Yakıt pili sistemi maliyeti ve gelecek hedefleri (DOE Raporu, 2015).

3. ELEKTRİKLİ ARACIN MODELLENMESİ

Elektrikli araca ait güç aktarım organlarının ve enerji depolama birimlerinin verimliliğinin artırılması için öncelikle aracın seyir halinde iken ihtiyaç duyduğu gücün hesaplanması gerekmektedir (Shen ve diğ., 2014a). Araç parametrelerine göre değişen talep gücünü hesaplamak için araç modeli belirlenmelidir.

3.1 Araç Modeli

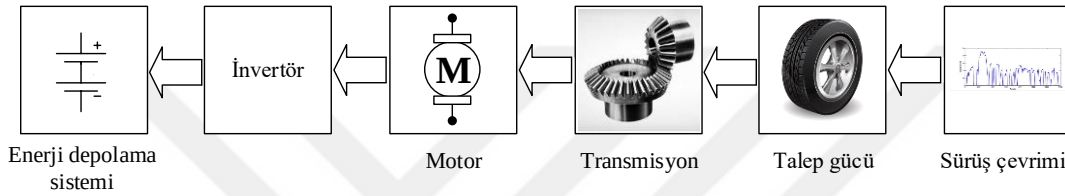
Genel olarak bir araçta, sürücünün gaz ve fren pedalı vasıtasıyla verdiği sinyaller doğrultusunda, talep gücü enerji depolama sisteminden, güç iletim organlarına ve nihai olarak tekerleğe iletilmekte, araç sürücünün isteğine bağlı olarak çeşitli hızlarda yol alabilmektedir. Bahsi geçen güç akışı, ileri akış olarak adlandırılmaktadır (Mansour ve Clodic, 2010) ve elektrikli bir araç için genel olarak ilerleme anında Şekil 3.1’de verildiği gibi gösterilebilir. İleri akış yöntemi ile sürüş çevrimini takip edecek bir modelleme yapılacaksa, sürücünün de modellenmesi gerekmektedir (Sun ve diğ., 2002). Sürücü genellikle bir PID denetleyici yardımı ile modellenir. Sürücü modeli kendisine verilen hız profilini takip etmek amacıyla, gaz ve fren pedallarını kontrol ederek, sürüş çevriminin hızı ile gerçekleşen hız arasındaki hatayı azaltmaya çalışır.



Şekil 3.1 : Tamamen elektrikli bir araç için, ileri akışlı güç aktarım yapısı (Shen ve diğ., 2014b).

İleri akışlı araç modelinin tersi, geri akışlı araç modelidir ve yabancı literatürde “backward modelling” veya “backward-facing modelling” olarak adlandırılmaktadır (Auger ve diğ., 2014). Şekil 3.2’ de gösterilen, geri akışlı araç modelinde, sürüş

çevrimlerinden alınan hız ve zaman verileri, kontrol sisteminin girişlerini oluştururken, araç parametreleri göz önünde bulundurularak yapılan hesaplama neticesinde elde edilen, enerji depolama birimlerinin sağlaması gereken güç değerleri ise, sistemin çıkışlarını oluşturur. Sürüş çevrimi kullanıldığında, hız profili belirli olduğu için, hız profiline karşılık gelen araç yükleri hesaplanılarak, tekerlekten başlayarak güç aktarma organları üzerinden enerji depolama birimlerinin sağlaması gereken güç miktarı, hareketi gerçekleştiren motorların sağlaması gereken tork ve devir hızları hesaplanabilir. Geri akışlı model göreceli olarak ileri akış yönlü modele göre hesaplama açısından daha avantajlı olduğundan, optimizasyon çalışmaları için daha uygundur. Bu tez çalışmasında geri akışlı güç iletim modeli kullanılmıştır.

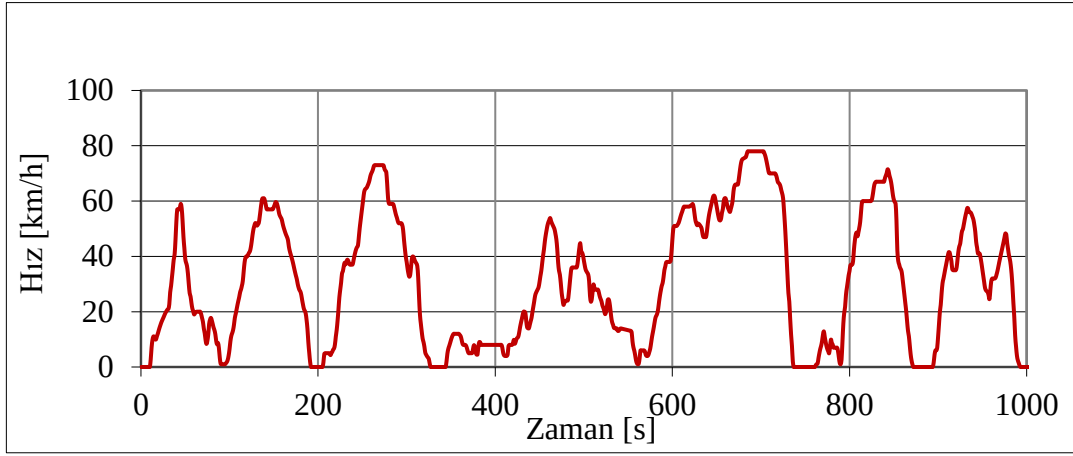


Şekil 3.2 : Geri akışlı araç modeli.

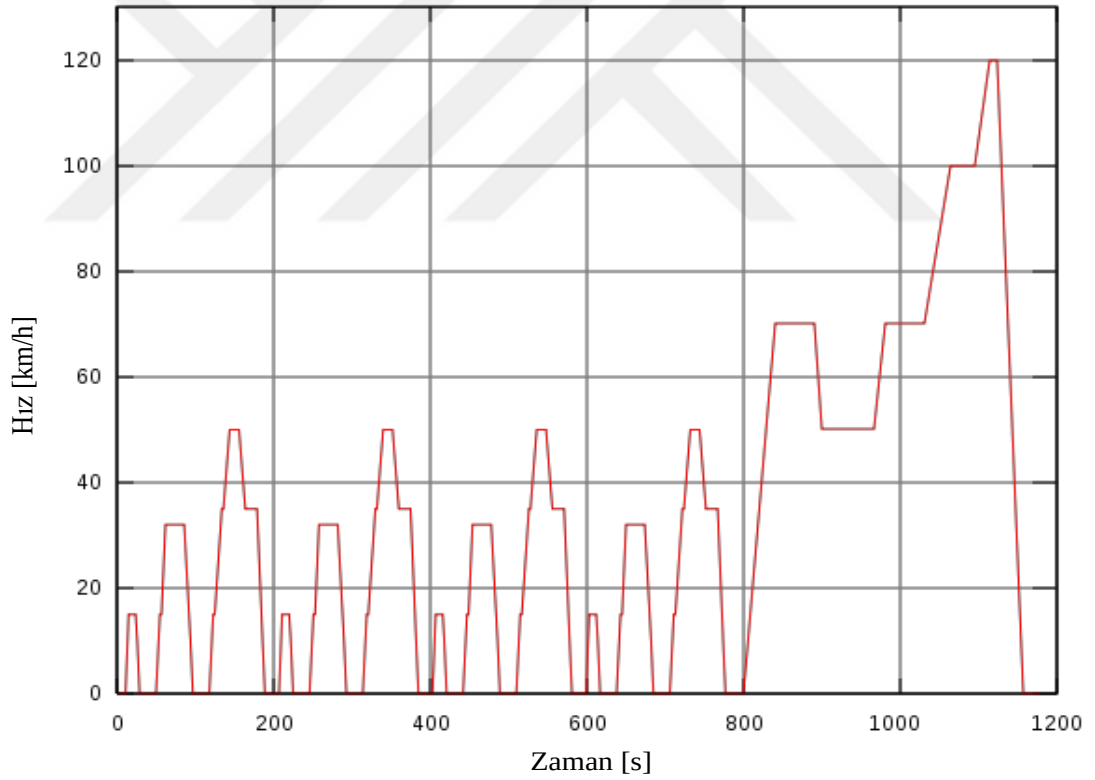
3.2 Sürüş Çevrimi

Sürüş çevrimi, zamana karşılık gelen hız değerlerinin bulunduğu veri dizileridir (Ehsani ve diğ, 2010). Sürüş çevrimleri araçların enerji tüketimi veya çevre kirliliğine etkileri gibi çeşitli durumları incelemek amacı ile teorik olarak laboratuvar ortamında veya gerçek yol koşullarında ölçümler yapılarak oluşturulmuştur. Genellikle yüksek örnekleme zamanına ($\tau = 1s$) sahiptirler ve eğim bilgisini içermezler. Literatürde çeşitli ülke ve kuruluşlara ait sürüş çevrimleri bulunmaktadır. Sürüş çevrimlerine örnek olarak; yoğun trafiğe sahip olan İstanbul'un gerçek sürüş koşullarını simüle eden, uzun boştaki bekleme sürelerini ve düşük hız profiline yansıtan, İstanbul sürüş çevrimi (IDC) gösterilebilir. İstanbul sürüş çevrimi 8.61 km uzunluğundaki bir yolu temsil etmektedir. Azami ve ortalama hız değerleri sırası ile 78 km/h ve 30.9 km/h' dir (Ergeneman ve Sorusbay, 2010). Bir diğer örnek sürüş çevrimi; Avrupa için toplamda 11 km uzunluğundaki bir yolu temsil eden NEDC (New European Driving Cycle) yeni avrupa sürüş çevrimidir. Bu sürüş çevrimi ECE-15 Avrupa şehiriçi sürüş çevriminin ard arda dört kez tekrarlanması ve daha agresif ve daha yüksek hız içeren EUDC (Extra Urban Driving Cycle) çevrimi ile birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Amerika için ise; 12 km uzunluğundaki şehir içi UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) sürüş çevrimi ve yüksek hızlı sürüş profiline sahip 13 km uzunluğundaki US06 sürüş

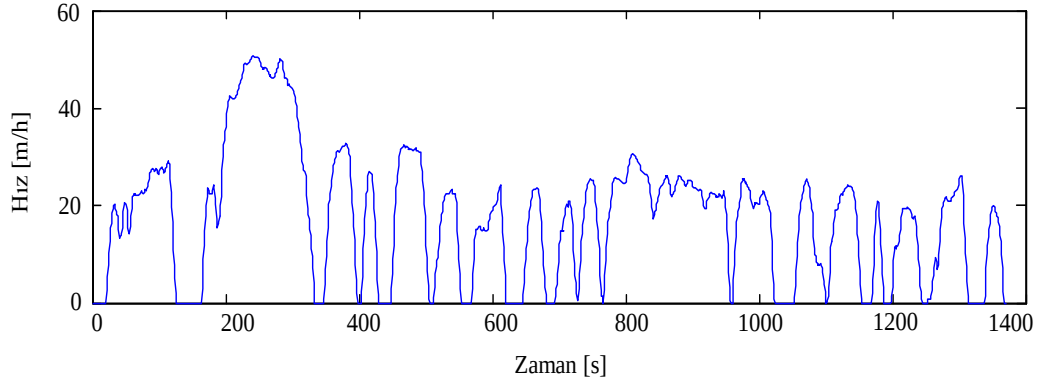
çevrimleri örnek olarak verilebilir. IDC, NEDC ve UDDS sürüş çevrimlerine ait hız profilleri Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : İstanbul Sürüş çevrimi (Ergeneman ve Sorusbay, 2010).



Şekil 3.4 : Avrupa NEDC sürüş çevrimi hız (Milligan ve diğ, 2015).



Şekil 3.5 : UDDS şehiriçi sürüş çevrimi (Yavasoglu ve diğ., 2015a).

Sürüş çevrimlerinde, τ örnekleme zaman aralığına karşılık gelen $\bar{v}$, anlık hız ve bazı çevrimlerde bulunan $\bar{h}_y$, anlık yol yüksekliği verileri (3.1) eşitliği ile ifade edilebilir;

$$\bar{v}(k), \bar{h}_y(k), \quad k = 0, \dots, n - 1. \quad (3.1)$$

(3.1) ile verilmiş olan sürüş çevrimi verileri ile aracın hızı v , ivmesi a_{cc} ve kat ettiği mesafe x , (3.2), (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile sunulan denklemler ile hesaplanabilir (Guzzella ve Amstutz, 1999).

$$v(k) = \frac{1}{2} \cdot (\bar{v}(k + 1) + \bar{v}(k)) \quad (3.2)$$

$$k = 0, \dots, n - 2, \quad v(n - 1) = 0$$

$$a_{cc}(k) = \frac{1}{\tau} \cdot (\bar{v}(k + 1) - \bar{v}(k)) \quad (3.3)$$

$$k = 0, \dots, n - 2, \quad a(n - 1) = 0$$

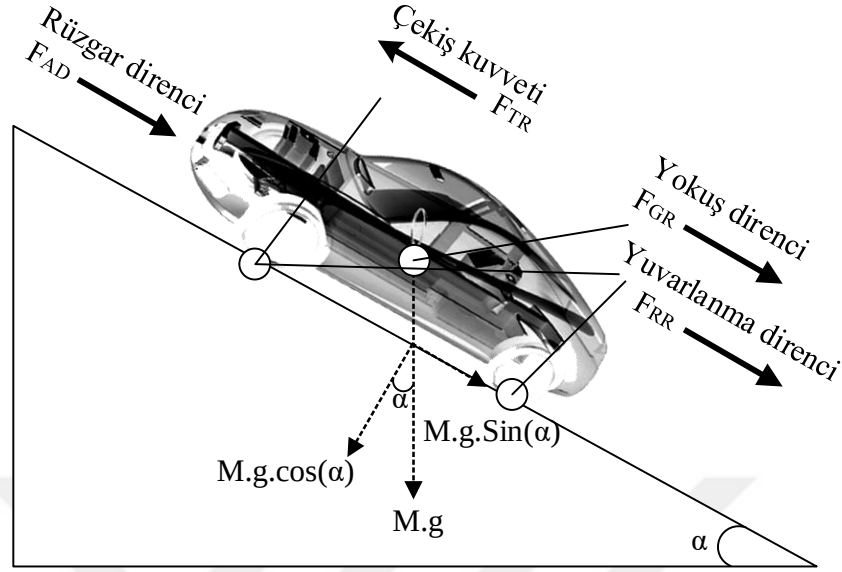
$$x(k) = \frac{\tau}{2} \sum_{k=0}^{n-1} \bar{v}(k + 1) + \bar{v}(k) \quad (3.4)$$

Aracın zamana bağlı hızı ve ivmesi bilindiği takdirde, araca etkiyen kuvvetler göz önünde bulundurularak, zamana bağlı gerekli tork ve güç hesaplamaları yapılabilecektir.

3.3 Araca Etkiyen Kuvvetler

Boyuna araç dinamiği modelinde, hareket halindeki bir araç üzerine etki eden kuvvetler toplamı; çekiş kuvveti (sürükleyici kuvvet) ve aracın hareketine negatif etkisi bulunan, yokuş direnci, tekerlek sürtünme direnci ve rüzgâr direncinden meydana gelmektedir. Literatürde bazı kaynaklar yokuş direnci ve tekerlek sürtünme direncini beraber hesaplayarak, bu iki kuvvetinin toplamına yol direnci adını

vermektedirler (Ehsani ve diğ, 2010). En basit hali ile aracın tırmanma modeli ve araca seyir halinde etki eden kuvvetler Şekil 3.6'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.6 : Aracın tırmanma modeli ve araca seyir halinde etkiyen kuvvetler.

3.3.1 Rüzgâr direnci

Rüzgâr direnci aracın aerodinamik yapısına, havanın yoğunluğuna ve aracın hızına bağlı olarak değer almaktır. Hava direncinin oluşturduğu kuvvet (3.5) eşitliği ile verilen formülde de görüldüğü üzere aracın hızının karesi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu nedenle, yüksek hızlarda etkisi daha fazla hissedilmektedir.

$$F_{AD} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot v(t)^2 \quad (3.5)$$

Burada,

F_{AD} : Rüzgar direnci [N]

A_f : Aracın ön cephe alanı [m^2]

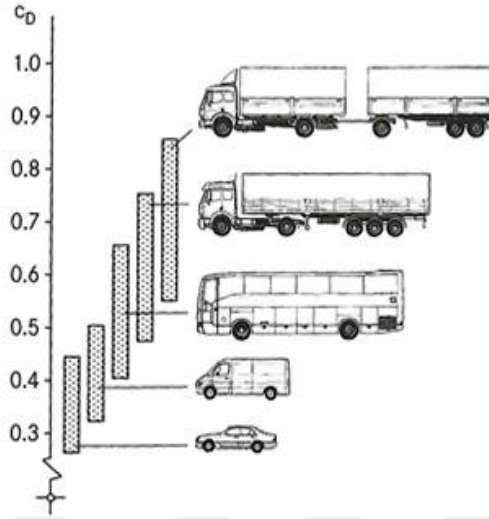
ρ : Havanın yoğunluğu [kg/m^3] (Yaklaşık olarak deniz seviyesinde normal sıcaklıkta $1.2 kg/m^3$ alınmaktadır.)

v : Aracın hızı [m/s]

C_D : Aerodinamik direnç katsayısıdır.

Aracın dış yüzey şekline bağlı olarak aerodinamik direnç katsayısı değişmektedir. Kamyon, otobüs gibi büyük boyutlu aerodinamik açıdan dezavantajlı araçlarda 0.8'e kadar yüksek değerler alabilirken, yarış için tasarlanmış veya prototip olarak optimum

dizayna sahip araçlarda aerodinamik direnç katsayısı 0.15'e kadar düşük değerler alabilir (Ehsani ve diğ, 2010).



Şekil 3.7 : Çeşitli araç tipleri için aerodinamik direnç katsayıları (Platform for Aerodynamics Road Transport, 2016).

3.3.2 Yuvarlanma direnci

Yuvarlanma direnç kuvveti, araçların seyir halinde iken tekerleklerin yuvarlanma esnasında yol ve lastiklerdeki şekil değiştirmelerden kaynaklanır ve (3.6) eşitliğinde gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$F_{RR} = M \cdot g \cdot C_r \cdot \cos(\alpha) \quad (3.6)$$

Burada,

F_{RR} : Yuvarlanma direnci [N]

M : Aracın kütlesi [kg]

g : Yerçekimi ivmesi [m/s^2]

C_r : Yuvarlanma direnç katsayısı

α : yokuşun eğimini temsil etmektedir.

C_r tekerleğin malzemesi, tekerleğin yapısı, tekerleğin sıcaklığı, tekerleğin basıncı, yolun malzemesi, yolun ıslak olup olmayışı gibi birçok nedene bağlı olarak değer alabilir. Deneysel çalışmalara dayanarak birçok ortam şartı için sabit katsayı değerleri literatürde belirlenmiştir. Bununla beraber yuvarlanma direnç katsayısı, aracın hızına bağlı olarak da değişmektedir. Araç hızının, katsayı değerine etkisini hesaplamak için

literatürde çeşitli eşitlikler sunulmuştur. Bu çalışmada, Sciarretta ve diğ, (2004) yayınında ifade ettiği (3.7) ile verilen yuvarlanma direnci formülü kullanılmıştır.

$$C_r = a_0 + a_1 v(t) + a_2 v(t)^2 + a_3 v(t)^3 + a_4 v(t)^4 + a_5 v(t)^5 \quad (3.7)$$

Burada $a_0 = 8.80 \times 10^{-3}$, $a_1 = -6.42 \times 10^{-5}$, $a_2 = 9.27 \times 10^{-6}$, $a_3 = -3.30 \times 10^{-7}$, $a_4 = 6.68 \times 10^{-9}$ ve $a_5 = -4.46 \times 10^{-11}$ yuvarlanma direnç katsayılarıdır (Sciarretta ve diğ, 2004).

3.3.3. Yokuş direnci

Yokuş direnç kuvveti, eğimli yolda hareket esnasında, aracın ağırlığının yola paralel bileşeninden kaynaklanmaktadır. Yokuş eğimi arttıkça aracın kütlesi, aracın hareketine zıt yönde direnç göstereceğinden, yokuş direnci de artar. Bir aracın, herhangi bir sabit hızda (ivmenin sıfıra eşit olduğu durumda) tırmanabileceği maksimum yokuş; o aracın “tırmanma yeteneği” olarak tanımlanmaktadır. Tırmanabileceği maksimum eğim ise, maksimum tırmanma yeteneğini belirlemektedir. Bu yetenek, özellikle ağır vasıtalar ve karayolu dışı araçlar için önem kazanmaktadır (Kumas ve diğ, 2012). Yol eğimi olan α 'nın neden olduğu yokuş direnci (3.8) eşitliği ile verilen denklem ile hesaplanabilir.

$$F_{Gr} = M \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3.8)$$

3.3.4. Çekiş kuvveti

Enerji depolama sistemi tarafından üretilip, aracın tekerleklerine ulaştırılan çekiş kuvveti (F_{TR}) aracın hareketini sağlar. δ dönen kütle faktörü olmak üzere, aracın ivmelenme kuvveti, $F_{ma} = \delta \cdot M \cdot a_{cc}(t)$, ters yönde etki eden kuvvetler ile çekiş kuvvetinin bileşkesi alınarak, Newton'un ikinci yasasına göre (3.9) ile verildiği gibi ifade edilebilir (Ehsani ve diğ, 2010).

$$\delta \cdot M \cdot a_{cc}(t) = F_{TR}(t) - F_{OPP}(t) \quad (3.9)$$

Burada, F_{OPP} , ters yönde etki eden kuvvetler toplamıdır ve denklem (3.10) ile ifade edilmiştir.

$$F_{OPP}(t) = F_{AD}(t) + F_{RR}(t) + F_{GR}(t) \quad (3.10)$$

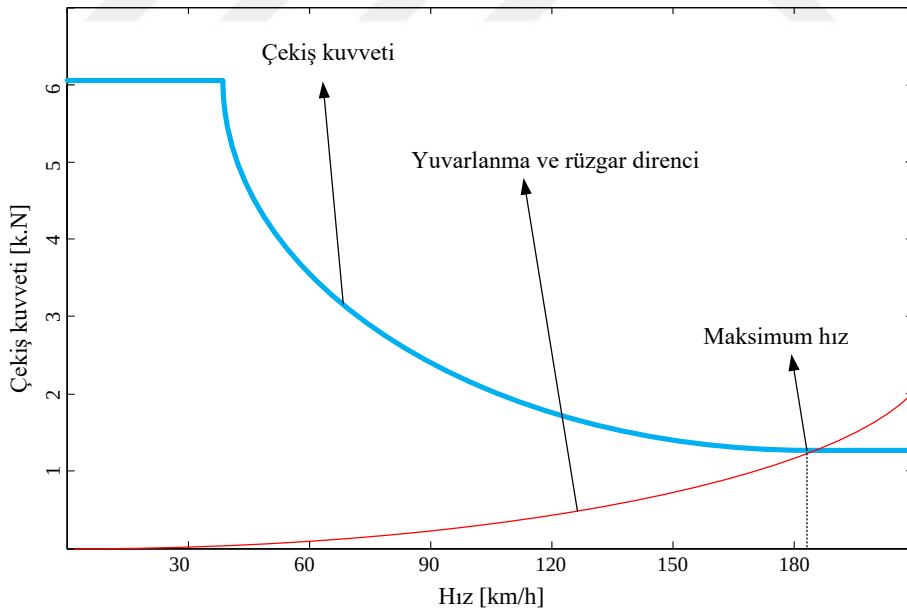
3.3.5 Dönen kütle faktörü

Araçta tekerlek ve dönen aktarma organlarının ataletinden kaynaklanan ivmelenme direncini temsil etmektedir. Dönen kütle faktörünün hesaplanması için, dönen tüm parçaların sahip olduğu ataletten kaynaklanan, dönen kütle momentlerinin bilinmesi gerekmektedir. Eğer bu değerler bilinmiyor ise, dönen kütle faktörü olan δ , bir yolcu aracı için aşağıda verilen deneysel olarak elde edilmiş ilişki ile ifade edilebilir (Ehsani ve diğ, 2010).

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 G_r^2 \quad (3.11)$$

Burada G_r aracın dişli oranını ifade etmektedir. δ_1 kütle faktörünün tekerlekten dolayı kaynaklanan kısmını temsil eder ve 0,04 anlamlı bir değer olarak kabul edilebilir. δ_2 ise güç iletim organlarından kaynaklanan dönen kütle faktörünü temsil etmektedir ve 0,0025 değeri, anlamlı bir değer olarak kabul edilebilir (Ehsani ve diğ, 2010).

Yukarıda bahsi geçen araca etkiyen direnç kuvvetleri arasında, (3.8) ile verilen yokuş direnç kuvveti denklemi araç hızından bağımsız iken, rüzgar (3.5) ve yuvarlanma (3.6) direnç kuvvetleri araç hızına bağlı olarak değer almaktadır. Bu nedenle aracın son hızının belirlenmesinde, yuvarlanma ve rüzgar direncinin etkisi görülmektedir.



Şekil 3.8 : Örnek bir araç için hız - çekiş kuvveti grafiği (Ehsani ve diğ, 2010).

Araca etki eden kuvvetler göz önüne alınarak, aracın çeşitli hız değerleri için gereksinim duyduğu yük gücü (talep gücü), $P_{yük}$, aracın ivmelenme kuvveti $F_{ma} = \delta \cdot M \cdot a_{cc}$ olmak üzere, (3.12) ve (3.13) eşitlikleri ile verildiği gibi hesaplanabilir;

$$P_{YÜK}(t) = \frac{v(t)}{n_{elek}} (F_{ma}(t) + F_{AD}(t) + F_{RR}(t) + F_{GR}(t)) \quad (3.12)$$

$$P_{YÜK}(t) = \frac{v(t)}{n_{elek}} (\delta \cdot M \cdot a_{cc}(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot v(t)^2 + M \cdot g \cdot C_r(t) \cdot \cos(\alpha) + M \cdot g \cdot \sin(\alpha)) \quad (3.13)$$

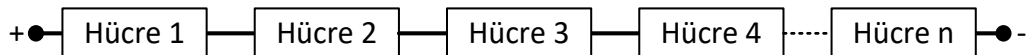
Burada, n_{elek} elektrikli aracın güç iletim sistemindeki toplam verimini ifade etmektedir.

3.4 Enerji Depolama Sisteminin Modellenmesi

Elektrikli araçlarda enerji depolama sistemi, sadece bataryadan oluşabileceği gibi, yakıt pili, ultrakapasitör gibi diğer birimler ile hibrit bir yapıda olabilir. Enerji depolama birimleri arasında veya enerji depolama birimleri ile motor sürücüler arasında sistem gereksinimlerine göre yükseltici (Boost), düşürücü (Buck) veya her iki operasyon kabiliyetine sahip buck/boost konvertörler kullanılabilir.

3.4.1 Bataryanın modellenmesi

Batarya modülü, enerji depolama sistemindeki gereksinimler dikkate alınarak, istenen gerilim ve akım değerlerine ulaşmak için, Şekil 3.9' da verildiği gibi seri ve şekil 3.10'da gösterildiği gibi paralel bağlanan batarya hücrelerinden oluşmaktadır. Seri ve paralel bağlantı yapılarak elde edilen batarya hücre gruplarına ait toplam gerilim, direnç ve akım değerleri (3.14) – (3.19) ile verilen eşitlikler ile ifade edilir.

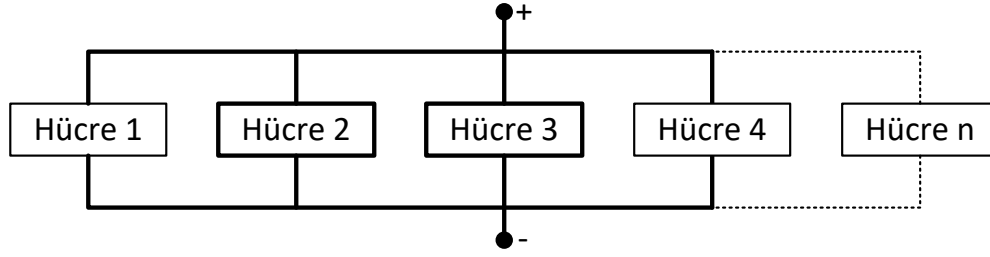


Şekil 3.9 : Batarya için hücrelerin seri olarak bağlanması.

$$V_{toplamlam} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots + V_n \quad (3.14)$$

$$R_{toplamlam} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n \quad (3.15)$$

$$I_{toplamlam} = I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_n \quad (3.16)$$



Şekil 3.10 : Batarya hücrelerinin paralel olarak bağlanması.

$$V_{toplamlam} = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_n \quad (3.17)$$

$$\frac{1}{R_{toplamlam}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (3.18)$$

$$I_{toplamlam} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_n \quad (3.19)$$

Burada $V_{toplamlam}$, $R_{toplamlam}$ ve $I_{toplamlam}$ sırasıyla seri ya da paralel koldaki toplam gerilim, toplam direnç ve toplam akım değerini ifade etmektedir. $j = 1, 2, \dots, n$, bir koldaki hücre sayısı olmak üzere, V_j , R_j ve I_j ise tek bir hücreye ait gerilim, direnç ve akım değerini ifade eder.

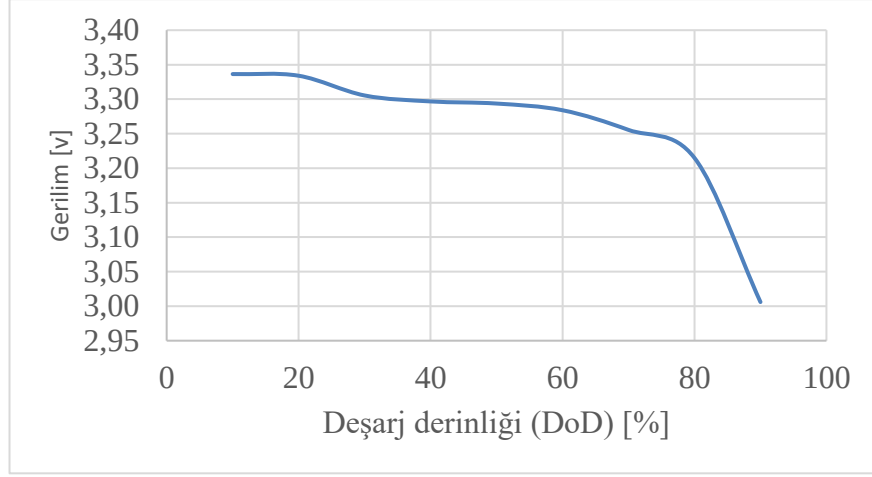
Bir batarya modelinin girişi bataryadan istenen güç, çıkışı ise; bataryanın akımı, gerilimi, verimi ve şarj seviyesi olarak düşünülebilir. Bataryanın şarj seviyesi olan SoC_{bat} , bataryanın belirli bir t anındaki kapasitesinin $Q_{bat}(t)$, nominal kapasite miktarı $Q_{bat,0}$ ’a oranıdır ve genel olarak yüzde ile ifade edilir.

$$SoC_{bat}(t) = 100 \frac{Q_{bat}(t)}{Q_{bat,0}} \quad (3.20)$$

Diğer bir ifade biçimi olan deşarj derinliği (DoD) ise deşarj edilen kapasite miktarının, nominal kapasiteye olan oranıdır ve (3.21)’de gösterildiği gibi SoC’un tersidir. Örnek olarak %100 SoC bataryanın tamamen dolu olduğunu belirtirken, %100 DoD bataryanın tamamen boş olduğunu gösterir. Genel olarak bataryanın kullanımı esnasında mevcut durumu SoC ile belirtilirken, bataryanın ömrü ile ilgili yapılan hesaplamalarda, kullanım sonrası durumu belirtmek amacı ile DoD kullanılır. Genellikle lityum-iyon bataryalar için, kapasite kayıplarını azaltmak maksadı ile tekrar şarj etmeden önce DoD’nin maksimum değerinin tamamına ulaşması istenmez (Guena ve Leblanc, 2006).

$$DoD(t) = 100 - SoC(t) \quad (3.21)$$

Bataryanın gerilim değeri SoC oranına bağlı olarak değişim gösterebilir. Genellikle %20 ve %80 arası SoC değerleri için batarya gerilimindeki değişim Şekil 3.11’de görüldüğü gibi çok azdır (Larmine ve Lowry, 2003).



Şekil 3.11 : K2 Enerji firmasına ait LFP26650P lityum iyon batarya hücresinin, deşarj derinliğine karşı açık devre geriliminin değişimi (K2 Energy Solutions, 2010a).

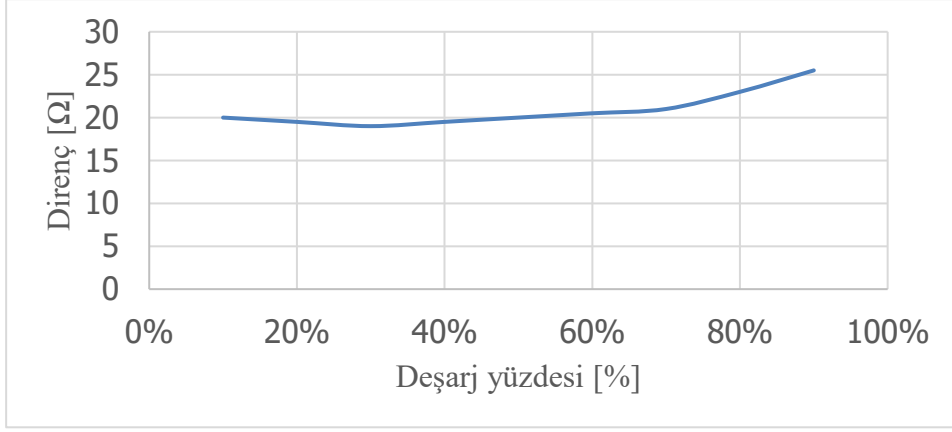
Bu tez çalışmasında bataryanın, derin deşarjın olumsuz etkilerinden etkilenmemesi amacıyla, DoD değerinin maksimum %80 olması öngörülmüştür. Bu durumda batarya geriliminin SoC değerine karşılık yaklaşık olarak lineer bir değişim gösterir ve (3.22) 'de verilen denklem ile ifade edilebilir (Guzzella ve Sciarretta, 2013).

$$V_{bat,oc}(t) = C_1 \frac{Q_{bat}(t)}{Q_{bat,0}} + C_2 \quad (3.22)$$

Burada C_1 ve C_2 katsayıları bataryanın karakteristiğine göre değişmekte her batarya modeli için ayrı hesaplanmaktadır.

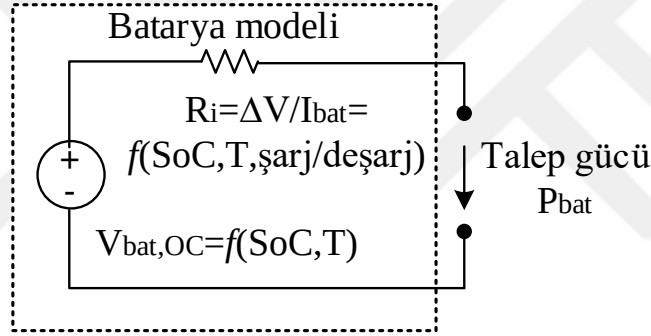
Bataryanın davranışı etkileyen önemli faktörlerden birisi de sıcaklıktır. Bataryanın aşırı ısınması ömrünün azalmasına, kapasite kaybına, ısı ve güç kayıplarına neden olmaktadır (Zhao ve diğ, 2015). Dahası, batarya hücreleri arasındaki ısı dağılımının dengesiz olması da bataryanın performansını ve ömrünü önemli derecede etkilemektedir. Bu yüzden, güvenlik ve performans açısından elektrikli araçlarda batarya termal yönetimi yapılmaktadır (Yang ve diğ, 2016).

Bataryanın iç direnci yukarıda bahsi geçen batarya sıcaklığının yanında, bataryanın SoC'na, şarj ve deşarj akım oranına, hatta bataryanın yaşına bağlı olarak değişir (Baghzouz ve Boehm, 2001). Bataryanın şarjlılık oranına göre iç direncinin değişim verileri için üretici firmanın sunmuş olduğu, Şekil 3.12' de grafiği verildiği gibi ürün bilgi dokümanlarından yararlanılmıştır (K2 Energy Solutions, Inc. 2010a).



Şekil 3.12 : Batarya hücresi iç direncinin, bataryanın deşarj yüzdesine göre değişimi (K2 Energy Solutions, Inc. 2010a).

Bu tez çalışmasında batarya modülünün etkili bir termal yönetime sahip olduğu varsayılarak, sabit bir gerilim kaynağına seri bağlı iç direnç ile Şekil 3.13' de gösterilen batarya modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.13 : Dirençli batarya modeli (Johnson ve diğ, 2001).

Burada R_i bataryanın iç direncini ifade ederken $V_{bat,OC}$ ise bataryanın mutlak sıcaklığı (T) ve bataryanın şarjlılık durumu (SoC_{bat})' na göre değer alan açık devre gerilimini simgelemektedir. V_{bat} ve P_{bat} ise bataryanın terminal gerilimini ve gücünü göstermektedir. Batarya terminal akım ve gerilimleri (3.23) ve (3.24)' de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$V_{bat}(t) = V_{bat,OC}(SoC(t), T(t)) - R_i(SoC(t), T(t), Sgn(P_{bat}(t)))I_{bat}(t) \quad (3.23)$$

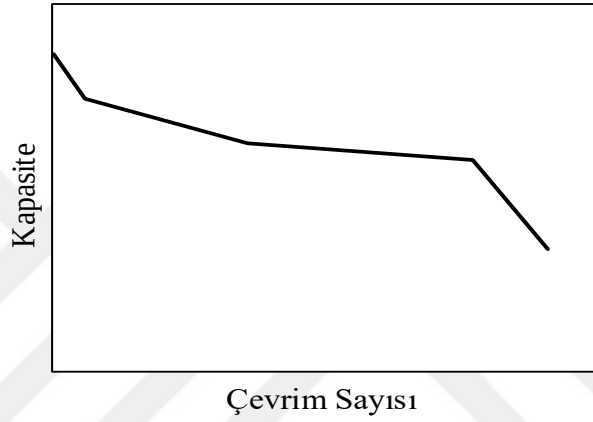
$$I_{bat}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{-V_{bat,OC}(t) + \sqrt{V_{bat,OC}(t)^2 + 4R_i(SoC(t), T(t), Sgn(P_{bat}(t)))P_{bat}(t)}}{2R_i(SoC(t), T(t))}, P_{bat}(t) < 0 \\ \frac{V_{bat,OC}(t) - \sqrt{V_{bat,OC}(t)^2 - 4R_i(SoC(t), T(t), Sgn(P_{bat}(t)))P_{bat}(t)}}{2R_i(SoC(t), T(t))}, P_{bat}(t) > 0 \end{array} \right\} \quad (3.24)$$

Bataryanın iç gücü ve terminallerindeki güçler ise iç dirençten dolayı farklılık gösterir ve bataryanın verimi (η_{bat}) sıklıkla çalıştığı deşarj modunda, bataryanın terminal gücünün, batarya iç gücüne ($P_{bat,in}$) oranlanması ile (3.25) hesaplanabilir.

$$\eta_{bat} = \frac{P_{bat}(t)}{P_{bat,in}(t)} = \frac{V_{bat,OC}(t)I_{bat}(t)}{V_{bat,OC}(t)I_{bat}(t) + I(t)^2 R_i(SoC(t), T(t), sgn(P_{bat}(t)))} \quad (3.25)$$

3.4.2 Bataryanın çevrim ömrü modeli

Çevrim ömrü sayısı ile ifade edilen bataryanın kullanım süresi, elektrikli araçların pazardaki yeri için önemli faktörlerden biridir. Amerikan Gelişmiş Batarya Konsorsiyumu (USABC) batarya ömrünü, batarya kapasitesinin, nominal değerinin %80'ine kadar düşürecek, şarj-deşarj çevrim sayısı olarak tanımlamıştır (Shen ve diğ, 2014c). Genel olarak çevrim sayısına göre kapasite kaybı profili lityum iyon bataryalar için Şekil 3.14'de verildiği gibidir.



Şekil 3.14 : Lityum-iyon bataryalarda, çevrim sayısına karşılık gelen kapasite kaybının genelleştirilmiş profili (Spotnitz, 2003).

Bataryanın çevrim ömrü, bataryanın mutlak sıcaklığı T , bataryanındeşarj derinliği DoD ve batarya akımının $C_{oranı}$ ile son derece ilintilidir. Kapasite kaybı $Q_{kayıp}$, şu şekilde ifade edilebilir (Wang ve diğ, 2011);

$$Q_{kayıp} = f(t, T, C_{oranı}, DoD) \quad (3.26)$$

Burada t , çevrim zamanı, $C_{oranı}$; batarya akımının, bataryanın nominal kapasitesi olan $Q_{bat,0}$ ' a bölümü ile elde edilir ve (3.27) ile gösterilebilir.

$$C_{oranı}(t) = \frac{|I_{bat}(t)|}{Q_{bat,0}} \quad (3.27)$$

Bu çalışmada şarj vedeşarj akımlarının bataryanın ömründe aynı şekilde yıpranma etkisi gösterdiği varsayılmıştır.

Batarya sıcaklığının doğru bir şekilde modelde hesaplanabilmesi, modelin doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. Elektrikli araçlarda gerekli olan yüksek güç profilinin karşılanması esnasında bataryanın üzerine düşen termal yük de artmaktadır. Bu

nedenle batarya tavsiye edilen çalışma sıcaklığı aralığının dışına çıkabilmekte, dolayısıyla batarya kapasitesinde kayıplar olabilmektedir. Batarya ısını hesaplamada Newton'nun soğuma kanunundan yararlanılabilir (Shen ve diğ, 2014b);

$$\frac{dQ_{thermal}}{dt} = h \cdot S_{hücre} [T_{çevre} - T(t)] \quad (3.28)$$

Burada $Q_{thermal}$ bataryanın termal enerjisini (Joul), h , yayılan ısının iletim katsayısını ($W/m^2/K$), $S_{hücre}$, çevreye ısı geçişi olan hücre yüzey alanını, $T_{çevre}$ çevre sıcaklığını ve T ise bataryanın mutlak sıcaklığını ifade etmektedir. Bu denklemden yola çıkarak, batarya sıcaklığı (3.29) ve (3.30) de ifade edildiği gibi yazılabilir (Shen ve diğ, 2014b)

$$T(t) = T_{çevre} [T(0) - T_{çevre}] e^{\frac{-t}{\tau_0}} \quad (3.29)$$

Burada τ_0 bataryanın karakteristiği ile alakalı olup (3.31) ile verildiği gibidir (Shen ve diğ, 2014b).

$$\tau_0 = \frac{m_{hücre} \cdot C_{thermal}}{h \cdot S_{hücre}} \quad (3.30)$$

$m_{hücre}$ batarya hücresinin ağırlığı (kg), $C_{thermal}$ batarya hücresinin termal kapasitesi ($J/kg/K$)'dir.

(3.29)'de verilen denklemde, bataryanın yüzeyi dikkate alınarak işlem yapıldığı için, bataryanın yüzeyindeki ısı miktarı hesaplanmaktadır. Oysaki normal çalışma şartlarında bile, bataryanın yüzey ısı ile merkezindeki ısı farklılık göstermektedir (Shen ve diğ, 2014b). Bu nedenle (3.31)'da hesaplanan ısıyı $T_{yüzey}$ olarak ifade ederek bataryanın iç ısı $T_{iç}$, şu şekilde hesaplanabilir (Shen ve diğ, 2014b);

$$T_{iç}(t) = T_{yüzey}(t) + \frac{h \cdot S_{hücre}}{\lambda_{bat} \cdot L} (T_{yüzey}(t) - T_{çevre}(t)) \quad (3.31)$$

Burada λ_{bat} , eşdeğer termal iletkenlik ($W/(K.m)$), L ise silindir şeklinde olan batarya hücresinin yüksekliğini (m) ifade etmektedir. Bu tez çalışmasında bataryanın etkili bir termal yönetime sahip olduğu düşünülerek, Ebbesen ve diğ, (2012) çalışmasına göre, bataryanın mutlak sıcaklığı $T = 313K$ ($40^\circ C$) olarak sabit kabul edilmiştir.

Lityum-iyon bataryalarda kapasite kaybını hesaplayabilmek için literatürde birçok batarya çevrim ömrü modeli çalışması yapılmıştır (Spotnitz, 2003; Dubarry ve diğ, 2007; Ramadass ve diğ, 2004). Fakat birçok çalışmada, modelin yapılandırılması veya doğrulanmasında büyük ölçekli deneysel veriler kullanılmamıştır. Bu tez çalışmasında (Bloom ve diğ, 2001) 'nin büyük ölçekte gerçekleştirdiği deneysel sonuçları ve (Shen ve diğ, 2014c) 'in önerdiği lityum demir fosfat ($LiFePO_4$) batarya modelini temel alan

(Shen ve diğ, 2014b ve Shen ve diğ, 2014c) çalışmalarında sunulan batarya çevrim ömrü modeli kullanılmıştır.

Shen ve diğ (2014c) çalışmasında önerdiği genelleştirilmiş batarya çevrim ömrü modeli (3.33) ile verildiği gibidir.

$$Q_{kayıp} = B e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right) Ah^\rho} \quad (3.32)$$

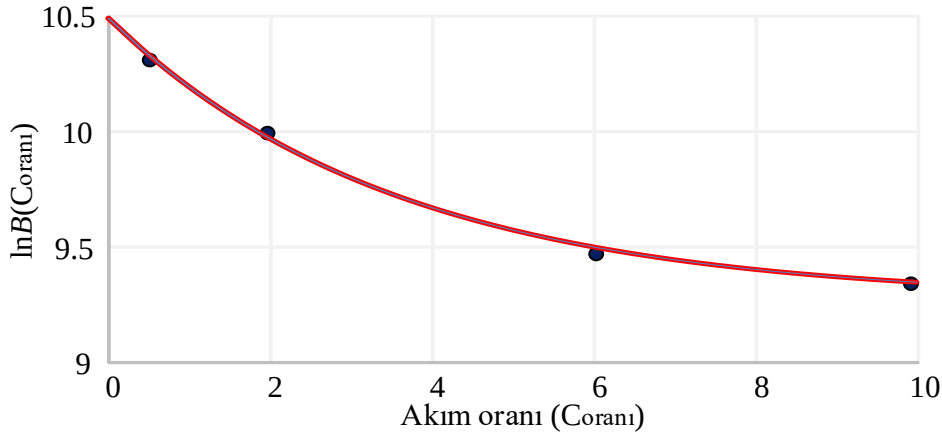
(3.32) verilen eşitlik her iki tarafın logaritması alınarak doğrusal bir hale getirilebilir.

$$\ln(Q_{kayıp}) = \ln(B) - \frac{E_a}{R.T} + \rho \ln(Ah) \quad (3.33)$$

Burada $Q_{kayıp}$ kapasite kaybı, B ve E_a Arrhenius yasasına göre üstel katsayı ve aktivasyon enerjisi, T bataryanın mutlak sıcaklığı ve R , ise değeri $8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ olan ideal gaz kanuna göre, gaz sabitidir. ρ lineer modelin eğimini ifade eder ve 0.55 değerindedir (Ebbesen ve diğ, 2012). Batarya kapasite kaybı modellemesinde kullanılan B , E_a ve ρ parametreleri çok sayıda deneysel veri kümesi sayesinde elde edilen ampirik katsayılardır. Batarya akımı arttıkça, aktivasyon enerjisi düşmektedir (Wang ve diğ, 2011). E_a akım oranına göre deneysel veriler doğrultusunda şu şekilde hesaplanabilir (Ebbesen ve diğ, 2012).

$$E_a = 31700 - 370,3.C_{oranı} \quad (3.34)$$

Diğer yandan B katsayısı da akım arttıkça düşmektedir. Wang ve diğ (2011) çalışmasında, nominal $C_{oranı}$ 1C olmak üzere, 1/2C, 2C, 6C, and 10C akım oranı değerleri için B katsayısını hesaplamıştır. Bu değerleri Şekil 3.14 ile gösterilen bir fonksiyon haline getiren Shen ve diğ (2014c)'nin oluşturduğu (3.35) ve (3.36) denklemleri tüm $C_{oranı}$ 'ları için, $\ln B$ değerlerini hesaplamayı mümkün kılmaktadır.



Şekil 3.15 : Çeşitli akım oranı değerlerine karşılık gelen $\ln B$ eğri parametreleri (Shen ve diğ, 2014c).

$$\ln B = a_1 \cdot e^{(-a_2 \cdot \text{Coranı})} + a_3 \quad (3.35)$$

$$a_1 = 1,226; \quad a_2 = 0,2797; \quad a_3 = 9,263 \quad (3.36)$$

(3.32)' de kullanılan $[Ah]$ ise, (3.37) ile ifade edilmiş olup, çevrim sayısı $N_{\text{çevrim}}$, deşarj derinliği DoD ve çevrim sırasında iletilen şarj miktarını gösteren batarya kapasitesi C ile orantılıdır (Shen ve diğ, 2014c).

$$[Ah] = N_{\text{çevrim}} \cdot DoD \cdot C \quad (3.37)$$

$Q_{\text{kayıp}}$ bataryanın ömrü olarak kabul edilen ve toplam $Q_{\text{kayıp}}$ miktarı; %20 olarak bilinen bir parametre değeri olduğundan $N_{\text{çevrim}}$, çevrim sayısı bu denklemler aracılığı ile elde edilebilir. Aracın günlük sürüş mesafesi ve kullanıldığı yol karakteristiği bilindiği takdirde, bataryanın bulunan çevrim ömrü vasıtası ile takvim ömrü de hesaplanabilmektedir.

Batarya ömrüne etki eden önemli üç faktör deşarj derinliği, sıcaklık ve akım oranı ele alındığında, elektrikli araçlarda DoD aracın ağırlığına, sürüş mesafesine ve sürüş çevriminin karakteristiğine göre değişmektedir. Bu sebeple hibrit enerji depolama sistemi kullanımının ve enerji yönetiminin DoD üzerindeki etkisi kısıtlı olacaktır. DoD 'nin etkisi %40 dan %60'a çıkarıldığında batarya çevrim ömrüne sadece (Shen ve diğ, 2014b) çalışmasına göre %0,9' luk bir etki yaparken %80 değerinden sonra (U.S. Department of Energy Report, 2004) bataryanın çevrim ömrüne etkisi üssel bir şekilde artış göstermektedir. Bu nedenle bataryanın maksimum DoD değeri, bu tez çalışmasında %80 olarak sınırlandırılmıştır. Diğer yandan etkili bir termal yönetim altında bataryanın sıcaklığı sabit tutulabilir. Bu açıdan bataryanın çevrim ömrünü

etkileyen en önemli etkenin batarya akımına bağlı değer alan C_{oran} 'olduğu söylenebilir.

3.4.3 Ultrakapasitörün modellenmesi

Ultrakapasitör modülü batarya da olduğu gibi hücrelerin seri ve/veya paralel bir şekilde bağlanmasıyla istenen güç ve gerilim değerlerini sağlayacak şekilde dizayn edilebilir. Bu tez çalışmasında UK hücreleri Şekil 3.9' da verildiği gibi seri olarak bağlanarak incelenen topolojilerin gereksinimini sağlayacak gerilim ve güç değerleri için tasarlanmıştır. N_{UC} , ultrakapasitörün hücre sayısı, $V_{UC,hücre}$, ultrakapasitörün hücre gerilim değeri olmak üzere, kapasitör modülünün gerilim değeri V_{UC} , (3.38) ile gösterildiği gibi hesaplanır.

$$V_{UC} = N_{UC} \cdot V_{UC,hücre} \quad (3.38)$$

$C_{UC,hücre}$, ultrakapasitörün sığa (farad) değeri olmak üzere, kapasitör modülünün toplam sığa değeri C_{UC} , (3.39) ile gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\frac{1}{C_{UC}} = N_{UC} \cdot \frac{1}{C_{UC,hücre}} \quad (3.39)$$

Bu çalışmada ultrakapasitörün şarjlılık değeri (SoC_{UC}), (3.40) ile ifade edildiği gibi ultrakapasitörün gerilim değerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. SoC_{UC} 'ün maksimum değere sahip olduğu an, ultrakapasitörün gerilim değerinin en yüksek seviyeye sahip olduğu zamandır. Bu çalışmada SoC_{UC} maksimum değeri %100 ve minimum değeri tez çalışmasında önerilen topolojideki, ultrakapasitörün çıkışına bağlı olan inverterin çalışma gerilimi göz önüne alınarak %50 ile sınırlandırılmıştır.

$$SoC_{UC}(t) = \frac{V_{UC}(t) - V_{UC,min}}{V_{UC,max} - V_{UC,min}} \quad (3.40)$$

Burada $V_{UC}(t)$, $V_{UC,min}$ ve $V_{UC,max}$ sırası ile ultrakapasitörün anlık, minimum ve maksimum gerilim değerlerini ifade etmektedir. Ultrakapasitörün enerjisi ($E_{UC}(t)$) ise (3.41) ile ifade edilmiştir.

$$E_{UC}(t) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{UC}(t)^2 - V_{UC,min}^2) \quad (3.41)$$

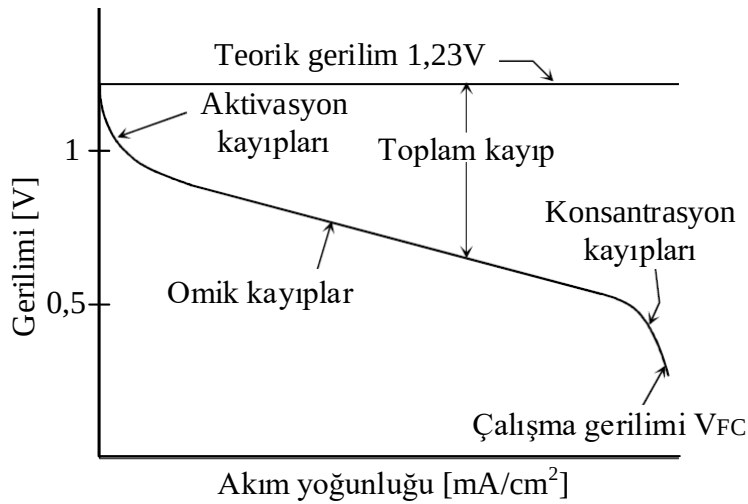
SoC değerinin maksimum ve minimum limit değerleri ultrakapasitörün depolayabileceği maksimum enerjiyi ($E_{UC,max}$) ve sahip olabileceği minimum enerjiyi ($E_{UC,min}$) de (3.42)' de verildiği gibi sınırlandırmaktadır.

$$E_{UC,min} \leq E_{UC}(t) \leq E_{UC,max} \quad (3.42)$$

3.4.4 Yakıt pilinin modellenmesi

Elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu bir yakıt pili hücresinin teorik olarak gerilimi yaklaşık olarak 1.23V' dur (Larmine ve Dicks, 2003). Çalışma esnasında bu gerilim değeri kayıplar nedeniyle 1V'un altına düşmektedir. Yakıt pilinin çıkışında 1kW'lık bir güce ihtiyaç duyulduğu takdirde, bu güç sadece tek bir yakıt hücresi ile karşılanacağı varsayılırsa, yaklaşık 1000A lik bir akım sağlanması söz konusudur ve hücrenin bunu karşılayabilmesi için alanının 1000 cm²'den daha büyük olması gereklidir (Barbir, 2013). Diğer yandan böyle bir durumda akım taşıyan kabloların kesitinin çok kalın olması gerekir. Bu nedenle yakıt pili bölüm 2' de bahsedildiği gibi, birbirine seri olarak bağlanan yakıt hücrelerinin oluşturduğu yığın (stack) yapısında tasarlanmaktadır. Yığındaki hücre sayısı arttıkça, yakıt pilinin çıkış gerilimi de doğru orantılı olarak artmaktadır. Genellikle yakıt pillerinin çıkış gerilimleri elektrikli araçlarda bağlandıkları DC baraya nazaran düşük olduğu için, boost konvertörler ile birlikte kullanılır.

Yakıt pilindeki kayıplar, aktivasyon, omik ve konsantrasyon kayıpları olarak ayrılabilir. Yakıt hücresinde, akım yoğunluğuna bağlı, değişen hücre gerilimi üzerinde bu kayıplar şekildeki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.16 : Yakıt hücresi akım/gerilim karakteristiği (DOE - Amerikan ulusal enerji teknolojileri laboratuvarı, 2004).

Aktivasyon ile alakalı kayıplar, elektrotlardaki, elektrokimyasal reaksiyonların aktivasyon enerjisinden dolayı kaynaklanır. Omik kayıplar, elektrot ve elektrolitlerdeki iyonik dirençlerden, akım kollektörlerinden, kontaktör ve bağlantılardan kaynaklanmaktadır. Omik kayıplar akım yoğunluğu ile doğru

orantılıdır ve malzeme seçimi yakıt pili yığınının geometrisine ve sıcaklığa göre değişebilmektedir (U.S. Department of Energy Report, 2004). Konsantrasyon kayıpları ise yüksek akım yoğunluğu esnasında meydana gelerek, hücre geriliminin düşmesine neden olmaktadır. Bu kayıplar göz önünde bulundurularak, yakıt pili hücre geriliminin (3.43) ile verildiği gibi gösterilebilir.

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{ohm} - V_{kons} - V_{aktiv} \quad (3.43)$$

Burarda V_{FC} , Yakıt pili hücresinin gerilim değerini, V_{ohm} , direnç nedeniyle potansiyel kaybını, V_{kons} , konsantrasyon potansiyel kaybını, V_{aktiv} , aktivasyon potansiyel kaybını belirtmektedir. E_{Nernst} [V], hücrenin termodinamik potansiyelini ifade etmektedir (Park and Choe, 2008).

$$E_{Nernst} = 1.23 - (8.5 \times 10^{-4})(T_i - 298.15) - 4.309 \times 10^{-5} T_i \ln(p_{i,H_2} + \frac{1}{2} p_{i,O_2}) \quad (3.44)$$

Burada T_i yakıt pili hücresinin mutlak sıcaklığını ifade ederken p_{i,H_2} ve p_{i,O_2} sırası ile hidrojen ve oksijen kısmi basınçlarını belirtmektedir. .

Yakıt pilinin yığın gerilimi (V_{stack}) ise, seri hücre sayısı (N_{FC})' na bağlı olarak (3.45) eşitliğinde verildiği gibi hesaplanabilir.

$$V_{stack} = N_{FC} \cdot V_{FC} \quad (3.45)$$

Böylece yakıt pilindeki kayıplar, teorik açık devre gerilimi 1.23 V olmak üzere, (3.46) 'de verilen eşitlik ile hesaplanabilir (Dickinson ve Nasri, 2014).

$$P_{FC,Kayıp} = (N_{FC} \cdot 1.23 - V_{stack}) \cdot I_{FC} \quad (3.46)$$

Yakıt pilinin verimini hesaplamak için, Gibbs serbest enerjisinden yararlanılarak hidrojenin elektrik enerjisine dönüşebilecek kısmı (3.48) ile ifade edilebilir (Barbir, 2013).

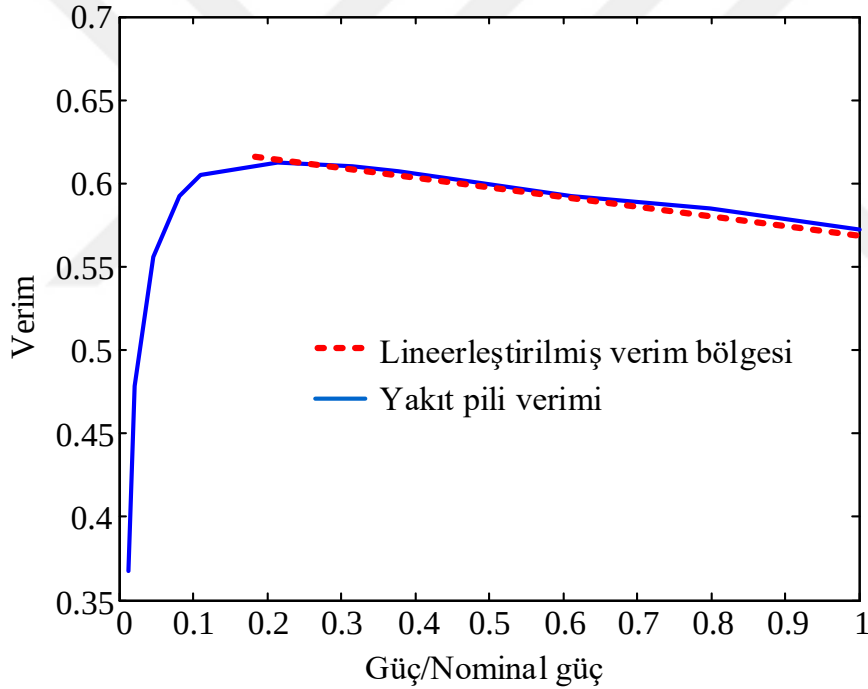
$$\Delta G = \Delta H - T_G \Delta S \quad (3.47)$$

Burada ΔG , Gibbs serbest enerjisini başka bir değişle, hidrojenin elektrik enerjisine dönüşebilecek kısmını, ΔH , Hidrojenim entalpisini başka bir değişle hidrojeninde depolanmış olan enerjiyi, ΔS , enerji çevrimi esnasında geri kazanımı mümkün olmayan kayıp enerjiyi ve T_G kelvin cinsinden ortam sıcaklığını belirtmektedir. 25 °C ve 1 atmosfer basınç altında teorik olarak yakıt pilinin maksimum ulaşabileceği verim miktarı (3.48) eşitliği ile verildiği gibidir (Barbir, 2013).

$$\eta_{FC,max} = \frac{\Delta H}{\Delta G} = \frac{237.34}{286.02} = \%83 \quad (3.48)$$

Fakat yakıt pilinin gerilimi daha önce bahsi geçen, aktivasyon kayıpları, omik kayıplar, konsantrasyon kayıpları ve iç akım kayıpları yani bazı elektronların dış devre yerine elektrolitten geçmesinden kayanaklanan kayıplar gibi bir çok nedenden dolayı maksimum değerinden çok daha aşağı seviyeye düşmektedir.

Bu çalışmada hidrojen depolama ünitesi, yakıt pili ve boost konvertör tek bir sistem olarak düşünülmüştür. Yakıt pili sisteminin toplam verimi; yakıt pili verimi ve boost konvertörün verimlerinin çarpımı ile elde edilmektedir. Yakıt pili veriminin hesaplamasında, yakıt pilinin güç / verim ilişkisini gösteren (Barbir, 2013; Ehsani ve diğ., 2010) yayınlarında vsunulmuş olan, genelleştirilmiş verim eğrisinden yararlanılmıştır.



Şekil 3.17 : Yakıt pili, normalize edilmiş güç değerine karşılık gelen, genelleştirilmiş verim profili.

Yakıt pili, nominal güç değerinin %20'sinden daha az olduğu değerlerde çalıştığı zamanlarda yakıt pilinin verimi düşmektedir (Barbir, 2013). Bu nedenle, çalışma esnasında yakıt pilinin minimum güç değeri, nominal gücünün %20'si ile sınırlandırılmıştır. Yakıt pilinin lineere yakın verim bölgesi ise, Şekil 3.17 de kırmızı kesikli çizgilerle gösterildiği gibi (3.49) denklemi ile verilmiştir.

$$\eta_{FC}(t) = \delta \cdot \frac{P_{FC}(t)}{P_{FC,nom}} + \xi \quad (3.49)$$

Burada P_{FC} , yakıt pilinin anlık gücünü, $P_{FC,nom}$, yakıt pilinin nominal gücünü göstermekte, δ ve ξ ise denklem katsayıları olup, sırası ile, -0.0523 ve 0.6256 değerindedir.

Yakıt pilinin güç mertebesi belirlenirken, yoğunlukla çalışacağı güç bölgesi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada, ana enerji depolama birimi olarak batarya kullanılmış, yakıt pili mesafe artırıcı görev üstlenmektedir. Bu nedenle yakıt pilinin nominal güç değeri talep gücüne göre düşük seviyede olması, seyir halindeki ortalama gücü karşılamada görev üstlenmesi istenmiştir. Yapılan ön çalışmalara göre, 1700kg toplam ağırlığa sahip bir araç için UDDS, US06 ve İstanbul sürüş çevrimleri kullanılarak yapılan simülasyonlarda, rejeneratif frenleme enerjisi hesaba katıldığı takdirde, çevrim boyunca ortalama 5kW'ın altında bir güç gereksinimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler gözönünde bulundurularak, 8kW maksimum çıkış gücüne sahip, su soğutmalı yakıt pili seçimi yapılmıştır. Yakıt pilinin hücre sayısı (Barbir, 2013; Dickinson ve Nasri, 2014) yayınlarında sunulan verilere göre 150 olarak belirlenmiştir.

Yakıt pilinin tepkime süresi için, Hydrogenics firmasının 8kW gücündeki HyPM HD8 su soğutmalı PEM yakıt pili modülüne ait veri dokümanındaki bilgilerden faydalanılarak, boşa çalışma anından, maksimum güce ulaşma süresi $T_{FC} = 4s$ kullanılmıştır.

Hidrojen depolama ünitesi olarak, Yakıt piline entegre, basınçlı gaz fazında hidrojen barındıran tank kullanımı seçilmiştir. Hidrojen tankı olarak, (Toyota, 2016) yayınında kullanılan 60 litre hacminde 700 bar basınç altında hidrojen bulunduran kompozit yakıt tankı kullanılmıştır. Depolanan potansiyel enerji miktarı, hidrojen ağırlığı baz alınarak (3.50) eşitliğinde verildiği gibi hesaplanabilir.

$$E_{tank} = E_{H_2} \cdot M_{H_2} \quad (3.50)$$

Burada E_{tank} , hidrojen tankında depolanan potansiyel enerjiyi, E_{H_2} , 1kg hidrojenin sahip olduğu potansiyel 119.9 MJkg⁻¹ başka bir deyişle 33.3 kWhkg⁻¹ enerji miktarını, M_{H_2} , ise hidrojen tankında ihtiva edilen hidrojenin ağırlığını belirtmektedir (Amerika Enerji Bakanlığı, 2015). Bu çalışmada kullanılan tankın ağırlığının %5.7' sini hidrojen oluşturmakta ve yaklaşık olarak 2.5kg hidrojen belirtilen basınçta depolanabilmektedir

(Toyota, 2016). Sonuç olarak tasarlanan sistemde 83.04 kWh potansiyel enerji depolanabilmektedir.

3.3.5 Elektrik motorunun modellenmesi

Elektrikli araçlarda elektrik motorlarının seçimi maksimum güç, maksimum tork ihtiyacı, motorun boyutları, ağırlığı, gerilimi ve verimi gibi bir çok kriter göz önüne alınarak yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında, elektrikli aracın hareketini sağlamsı için kullanılan motorlar sürekli mıknatıslı senkron motor tipindedir. Elektrik motorlarının seçimi Autonomie yazılımı kütüphanesi ve Remy Motor şirketinin ürün katalogları kullanılarak yapılmış ve kullanılan motorların detaylı bilgileri tezin 5. ve 6. bölümlerinde sunulmuştur.

Elektrik motorunun, yarı-durağan modelleme için gösterimi Şekil 3.18’da verildiği gibidir.



Şekil 3.18 : Elektrik motorunun (EM) yarı-durağan model gösterimi (Guzzella ve Sciarretta, 2013).

Burada giriş değişkenleri motorun bağlı olduğu şafta göre belirlenen tork $\tau_M(t)$ ve hız $\omega_M(t)$, çıkış değişkeni ise motorun bağlı olduğu DC baradaki elektriksel güçtür $P_M(t)$. Motorun elektriksel gücü (3.51) ile verildiği gibi gösterilebilir.

$$P_M(t) = I_M(t) \cdot V_M(t) \quad (3.51)$$

Burada $I_M(t)$ ve $V_M(t)$ sırasıyla motor akımını ve motor gerilimini ifade etmektedir. Motorun elektriksel gücü olan $P_M(t)$ ile mekaniksel gücü olan $\tau_M(t) \cdot \omega_M(t)$ arasındaki ilişki detaylı bir modele ihtiyaç duymadan motorun tork ve hız değerlerinin fonksiyonu olan sabit bir motor verimi $\eta_M(t)$ haritası ile ifade edilebilir. Böyle bir durumda motorun elektriksel gücü motor/generatör çalışma bölgeleri için (3.52) ile ifade edildiği gibidir (Guzzella ve Sciarretta, 2013).

$$P_M(t) = \begin{cases} \frac{T_M(t) \cdot \omega_M(t)}{\eta_M(\omega_M(t), T_M(t))} & , T_m(t) \geq 0 \\ T_M(t) \cdot \omega_M(t) \cdot \eta_M(\omega_M(t), T_M(t)) & , T_m(t) < 0 \end{cases} \quad (3.52)$$

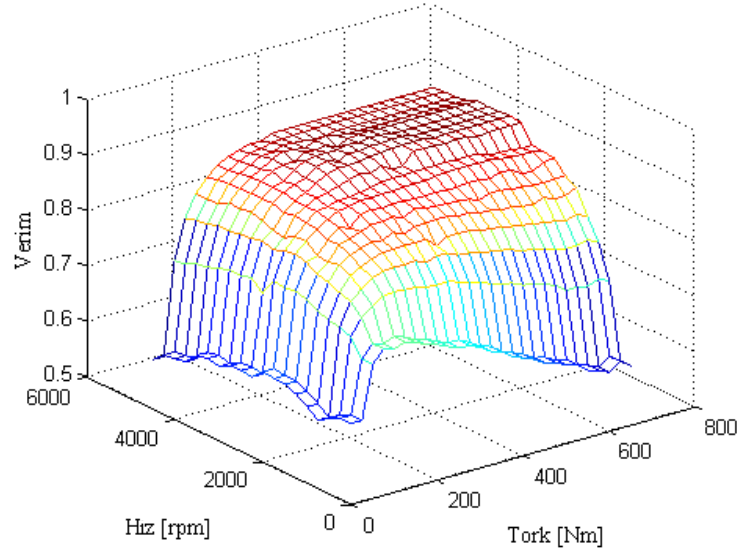
Motor torku, ve motorun açısal hızı (rad.s^{-1}), aracın tekerlek yarıçapına r , motor ve tekerlek arasındaki dişli oranı G_r ’ ye ve (3.10) ile hesaplanmış olan çekiş kuvvetine

(F_{tr}) , göre (3.53) ve (3.54) verildiği gibi ifade edilebilir (Larminie ve Lowry, 2003).

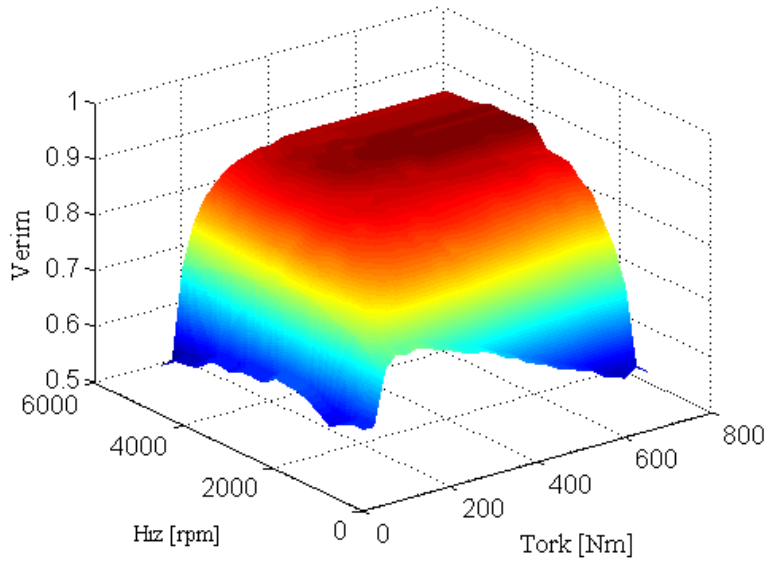
$$T_M = \frac{F_{tr} \cdot r}{G_r} \quad (3.53)$$

$$\omega_M = G_r \cdot \frac{v}{r} \quad (3.54)$$

Motor verimini hesaplamada, Argon Ulusal Laboratuvarı'nın deneysel çalışmaları sonucu oluşturulan verilere sahip Autonomie yazılım kütüphanesinin sahip olduğu, motor hızı ve motor torku'nun fonksiyonu olan motor verim haritaları kullanılmıştır. Motorlar için sunulan verim haritaları Şekil 3.19a' da gösterildiği gibi belirli aralıklarla örneklenmiş olup, simülasyonda kullanılabilir hale getirilebilmesi için Şekil 3.19b'de ki gibi interpolasyon yöntemi ile veri sıklığı arttırılmıştır. İnterpolasyon yönteminde, eldeki tork ve hız vektörleri, sırasıyla 1 Nm tork ve 1 rpm hız aralıklarına göre tekrar düzenlenmiş, verim verileri ise, yenilenen tork ve hız vektörlerine göre Matlab “interp2” fonksiyonu kullanılarak istenilen çözünürlükte olması sağlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.19 : UQM150 Motorunun pozitif torklar için verim haritası; a) Autonomie kütüphanesinin verileri ile motor verimi b) İnterpolasyon yapılmış motor verimi.

Tez çalışmasında kullanılan inverterlerin, Reinhart firmasının PM150 serisi karakteristiğinde olduğu kabul edilmiştir. Sürücülere ait model ve özellik bilgileri Çizelge 3.1’ de verilmiştir (Reinhart Motion Systems, 2012).

Çizelge 3.1 : Seçilen motor sürücüleri.

Model	Rinehart PM150DX	Rinehart PM150DZ
Maksimum çalışma gerilimi	360V	720V
Motor akımı (sürekli)	450 Arms	225 Arms
Motor akımı (Anlık)	450 Arms	300 Arms

Simülasyon çalışmalarında motor sürücülerindeki güç kayıpları üretici firmanın sunmuş olduğu (3.55) ile verilen denklem ile hesaplanmıştır.

$$P_{inv_{Loss}} = a_i.V_{dc}^{b_i}.I_{out}^{c_i} + offset \quad (3.55)$$

Burada denklem katsayıları,

$$a_i = 0.0018166$$

$$b_i = 1.04066$$

$$c_i = 1.41566$$

$$offset = 335.945$$

değerindedir.



4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA İKİ HAREKET MOTORUNUN BERABER KULLANIMI

Elektrikli araçlarda tahrik sistemi, verim ve performans açısından kritik bir yere sahiptir. Yüksek enerji tasarrufu ve iyi bir dinamik performans için, aracın hareketini sağlayacak olan elektrik motoru ve sürücüsü detaylı bir ön çalışma sonucu seçilerek, en uygun tasarım ile araca yerleştirilmelidir. Elektrikli araçlarda çoğunlukla aracın hareketini sağlaması için, yüksek tork ve yüksek güç özelliğine sahip sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) tipi elektrik motorları kullanılmaktadır (Rahman, 2005)

Elektrik motorunun elektrikli araçlarda kullanımı, literatürde tekerlek içi motor, merkezi tek motor ve merkezi iki motor kullanımı gibi çeşitli topolojiler için sunulmuştur (Shuai ve diğ, 2014; Shen ve diğ, 2014a; Yavasoglu ve diğ, 2015b).

Güç aktarım sisteminde, tekerlek içi motor kullanımı (Shuai ve diğ, 2014) aracın transmisyon sistemini basitleştirerek, özellikle ağırlık ve hacim açısından avantaj sağlayabilir. Fakat tekerlek içi motor kullanımı mekanik açıdan iki konuda daha zorlu bir topolojidir. Birincisi araçtaki, yaylanan ve yaylanmayan ağırlık dengesi değişecektir ki, bu denge iyi ayarlanmaz ise son derece konforsuz ve ticari olarak satışı mümkün olmayan bir araç üretilmiş olur. Diğer yandan, tekerlek içi motorların mekanik fren ile beraber kullanımı, mekanik frenden dolayı oluşan ısı nedeniyle, üzerinde çalışma gerektiren bir husustur (Watts ve diğ, 2010). Bir diğer husus ise, yol tutuşu açısından, aracın bir tekerleğinden aktarılacak azami güç kısıtlanabilmektedir ve yol tutuşu için tekerlek hızlarının elektronik diferansiyel ile belirlenmesi çok daha karmaşık bir kontrol yapısı gerektirmektedir.

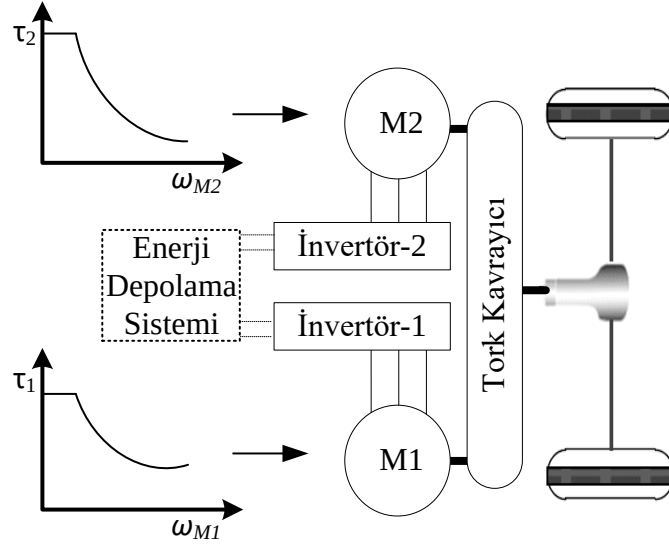
Hali hazırda kullanılan ve üretilmekte olan elektrikli araçların çoğunluğu, hareketini sadece tek bir merkezi elektrik motoru ile sağlamaktadır (Yavasoglu ve diğ, 2015b). Aracın hareket sisteminde tek bir motor kullanımı sistemi basitleştirerek kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Elektrik motorlarının geniş hız aralığında çalışabilme yetenekleri, tek bir dişli oranına sahip, tek bir elektrik motorunun, elektrikli araçlarda kullanmasını mümkün kılmaktadır. Fakat bu şekilde kullanılan elektrik motorları çoğunlukla yüksek

motor hızlarında verim kaybı yaşayabilmektedir (Miller ve diğ, 2011). Bu nedenle çekiş gücünü ve verimi arttırabilecek, iki vitesli elektrikli araçlar gündeme gelmiştir. Fakat bu sistem, değişken çevrim oranına sahip dişli sisteminin getirdiği ek maliyet ve vites geçişlerinin iyi bir kontrole ihtiyaç duyması nedeniyle, nadir olarak pratik uygulamalarda kullanılmaktadır.

Diğer yandan elektrikli araçlarda birden fazla elektrik motorunun beraber kullanılması ise birçok yönden, tek motor kullanılan yapıya nazaran üstünlük sağlayacaktır. İki motor kullanımının getirebileceği en büyük fayda, talep gücünün iyi bir optimizasyon yöntemi ile iki motor arasında paylaştırılması sayesinde güç iletim sisteminin verimliliğinin artırılmasıdır. Bu sayede aracın toplam verimi artarken gidebileceği azami mesafe miktarı da artabilir. Diğer yandan iki farklı karakteristikte motor kullanımı ile daha geniş hız aralığında yüksek tork elde edilerek, aracın performansı arttırılabilir. İki motor kullanımının getirebileceği bir diğer avantaj ise, büyük güce sahip, büyük hacimli tek bir motor kullanımı yerine, küçük güç ve hacimde iki motor kullanımı sayesinde kaput altında kalan alan çok daha verimli değerlendirilebilmesidir. Bu topoloji, rüzgar direncini azaltmak için tasarlanmış aerodinamik yapılarından dolayı kaput altında kısıtlı hacmi bulunan spor arabalar için ilgi çekicidir (Yavasoglu ve diğ, 2015b). Aracın hareketinin iki motor ile sağlanması, birinin sinyal arızası nedeni ile çalışmadığı durumlarda, tek motor ile hareketini devam etmesine imkan tanıyarak, aracın dayanıklılığını da arttıracaktır.

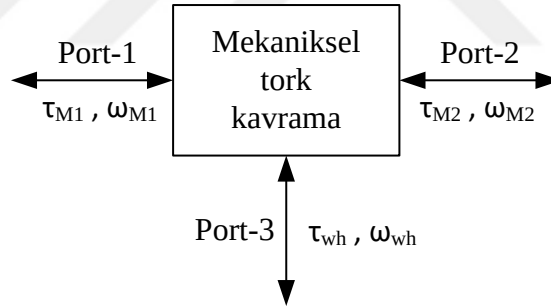
4.1 İki Motor Topolojisi

Elektrikli bir araçta hareketin sağlanması ve rejeneratif enerjinin geri kazanımı için, iki elektrik motoru, bir tork kavrayıcı vasıtası ile birbirine bağlanabilir. Bu sayede, elektrik motorları birbirinden bağımsız invertörler ile sürülerek, talep gücünün karşılanmasında farklı oranlarda katkıları bulunabilir ve motorların ürettikleri toplam güç mekaniksel bağlantılar ile tekerleklerle iletilebilir. Motorlar farklı invertörler ile sürüldükleri için, hibrit enerji depolama sistemine sahip bir yapıda, farklı gerilimler altında, farklı kaynaklardan beslenme esnekliğine de sahip olacaklardır. İki elektrik motorunun kullanıldığı topoloji Şekil 4.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : İki elektrik motorlu elektrikli araç topolojisi.

Burada M1 ve M2 sırası ile birinci ve ikinci elektrik motorunu simgelemektedir. Bu iki elektrik motorunun mekaniksel bağlantısı, tork kavrayıcı veya diğer bir değiş ile tork kavrama dişlisi (TKD) ile yapılabilir. Şekil 4.2 de, üç yollu, iki serbestlik derecesine sahip TDK biriminin, kavramsal gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.2 : Tork kavrayıcı (Ehsani ve diğ, 2010).

TKD'nin üç bağlantı noktası olup, bu bağlantılar hem giriş hem de çıkış olarak çift yönlüdür. Burada girişten maksat TKD'ya enerji akışı ve çıkıştan maksat TKD'dan enerji çıkışıdır. Bağlantı noktaları port olarak adlandırılırsa, port-1 ve port-2, sırası ile birinci ve ikinci elektrik motorlarının bağlandığı noktaları belirtmektedir. Port-3 ise, mekaniksel bir bağlantı aracılığı ile tekerleklere güç aktarımını sağlamaktadır. Bütün bağlantı noktaları çift yönlü olduğu halde, port-3 ile port-1 veya port-2'ye aynı anda giriş ya da çıkış olmaz. Eğer kayıplar ihmal edilirse, TKD'ye giren güç her zaman TKD'den çıkan güce eşit olacaktır. Bu durumda aracın elektrik motorları ile tahrik edildiği an için, tekerleklere doğru güç aktarımı (4.1) ile gösterildiği gibidir (Ehsani ve diğ, 2010).

$$\tau_{wh} \cdot \omega_{wh} = \tau_{M1} \cdot \omega_{M1} + \tau_{M2} \cdot \omega_{M2} \quad (4.1)$$

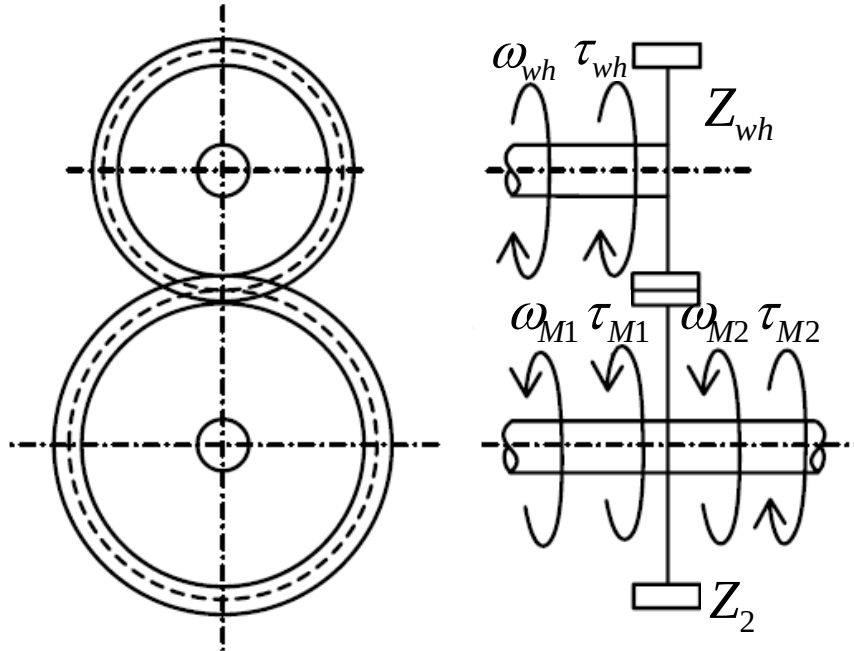
TKD diğerk bir Şekilde 4.2 ile verildiğı gibi ifade edilebilir.

$$\tau_{wh} = k_1 \cdot \tau_{M1} + k_2 \cdot \tau_{M2} \quad (4.2)$$

Burada k_1 ve k_2 genel olarak cihazın yapımı sırasında kararlaştırılmış sabit değerler olup, dişli çevrim oranı olarak tanımlanan, TKD'ye ait yapısal parametrelerdir. τ_{wh} , aracın anlık olarak seyir halindeyken ihtiyaç duyduğu talep torku, τ_{M1} ve τ_{M2} ise ayrı ayrı kontrol edilebilen, motorlara ait itici torklardır. Her ne kadar açısal hızlar ω_{M1} , ω_{M2} , ω_{M2} ve ω_{wh} (4.1) eşitliği ile ayrı ayrı ifade edilmiş olsalar da, birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilememektedir. (4.1) eşitliği göz önünde bulundurularak, açısal hızlar (4.3) eşitliğinde verildiğı gibi ifade edilebilir:

$$\omega_{wh} = \frac{\omega_{M1}}{k_1} = \frac{\omega_{M2}}{k_2} \quad (4.3)$$

Bu tez çalışmasında iki elektrik motorunun aynı şafta bağlanarak, tekerleğe iletilen gúce farklı oranlarda katkıları bulunmasına rağmen, sürekli aynı hızda döndüğü ($\omega_{M1} = \omega_{M2}$) bir yapı tasarlanmıştır ve Şekil 4.3 ile gösterilmiştir.

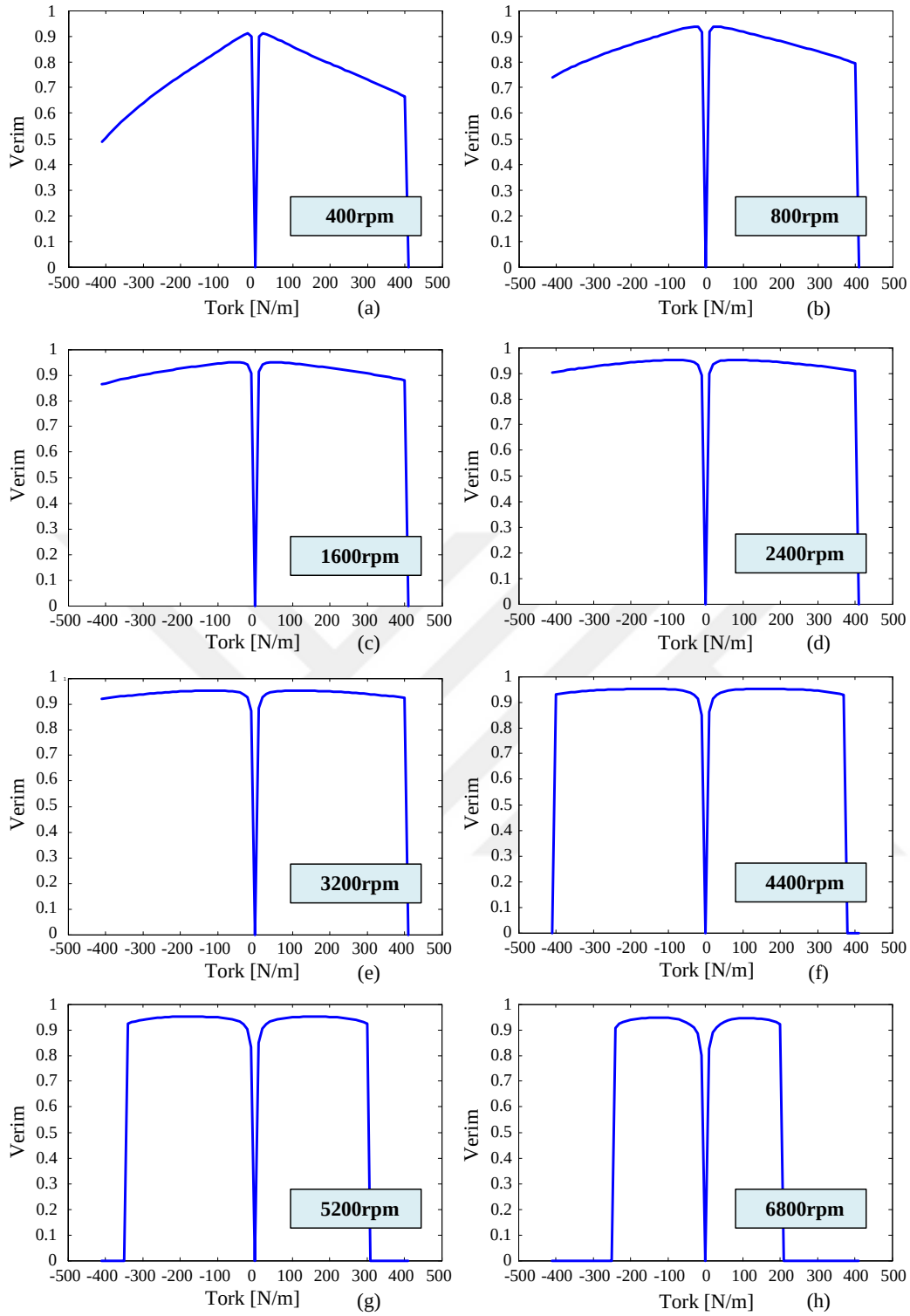


Şekil 4.3 : İki elektrik motorunun aynı şafta bağlanan, tork kavrama dişli yapısı (Ehsani ve diğ., 2010).

Burada, Z_3 ve Z_2 dişlilerdeki diş sayısı olmak üzere, $k_1 = k_2 = \frac{Z_3}{Z_2}$ 'dir.

4.2 Eşdeğer İki Motor Kullanımı

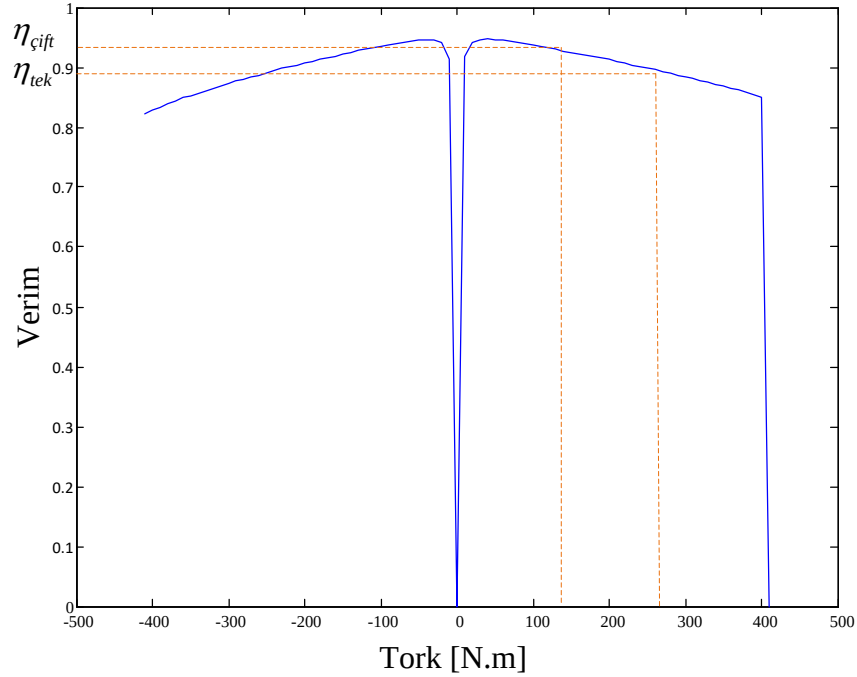
Araçta eşdeğer iki elektrik motor kullanımı yapıldığı zaman, tork ve hızın bir fonksiyonu olan, her iki motora ait verim haritası da eşdeğer olacaktır. Motor sisteminin verim haritasında bir değişiklik olmamasına rağmen, iki motor kullanımı ile yine de verim artışı elde etmek söz konusudur. Motorlar Şekil 4.3 'te verildiği gibi bir tork kavrayıcı ile bağlandıkları takdirde, eşder hızda dönerken, talep torku iki motor arasında efektif bir şekilde paylaştırılarak, motorların yüksek verimli olduğu bölgelerde çalışması sağlanabilir. Aracın seyir sırasında talep ettiği güç tek bir motorun karşılayacağı azami değerden daha küçükse, iki motorun talep torkunu paylaşmasının yanısıra, motorların birinin toplam gücü karşılaması da değerlendirilmelidir. Bazı durumlarda talep torkunun iki motor arasında paylaştırılması, motorların daha verimsiz bölgelerde çalışmasına neden olabilir. Bu nedenle hareket sisteminin sürekli olarak en yüksek verimde çalışması amacı ile kontrol sisteminin tek motor ya da iki motor çalışmaya karar vermesi gerekmektedir. Bu durumu daha detaylı incelemek amacı ile örnek olarak eşdeğer motor kullanımı için Remy firmasına ait HVH 250 modeli incelenmiştir. Üretici firmanın sağladığı ürün bilgilerinden (Jung, 1996) yararlanarak sabit hız değerlerine karşılık gelen iki boyutlu tork/verim haritaları Şekil 4.4' te gösterildiği gibidir.



Şekil 4.4 : Seçilen sabit hız değerleri için

Remy HVH 250 elektrik motoruna ait tork/verim eğrileri; (a) sabit 400 rpm; (b) sabit 800 rpm; (c) sabit 1600 rpm; (d) sabit 2400 rpm; (e) sabit 3200 rpm; (f) sabit 4400 rpm; (g) sabit 5200 rpm; (h) sabit 6800 rpm.

Burada rpm motor milinin dakikadaki dönüş hızını ifade etmektedir. Şekil 4.4'ü incelediğimiz zaman iki durum ortaya çıkmaktadır. Birincisi düşük hızlarda motorlar arasında talep gücünün paylaşılması, toplam verim değerini arttırabilir. Bu durum Şekil 4.5 ile gösterilmiştir.

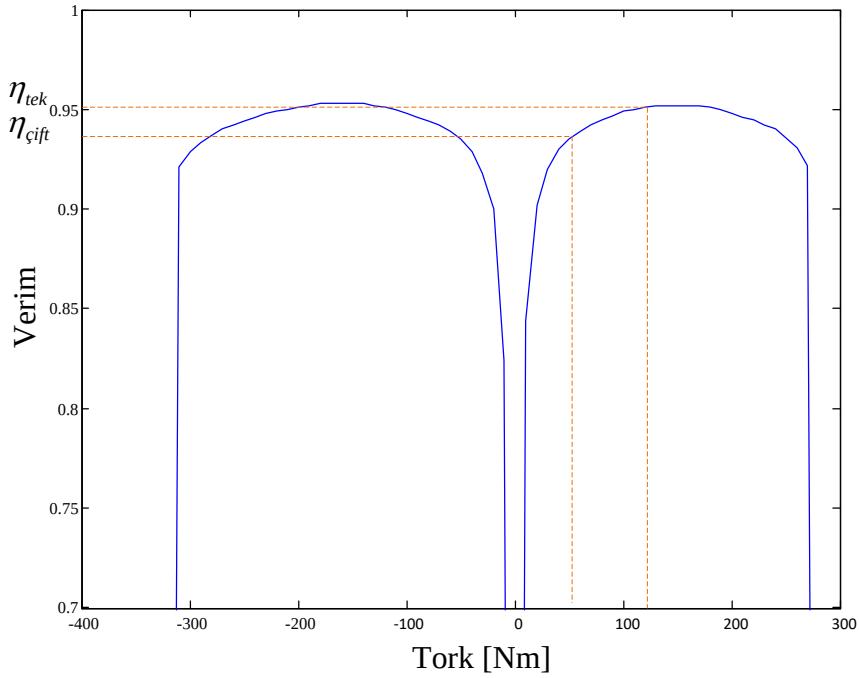


Şekil 4.5 : Remy HVH 250 elektrik motoruna ait, düşük hızlarda yüksek tork talepleri için, tek ve çift motor topolojilerinin verim değeri.

Şekil 4.5 de 1600 rpm den daha düşük hızlarda karşılaşılan, Remy elektrik motoruna ait tork/verim karakteristiği gösterilmiştir. Tek bir elektrik motoru kullanılması durumunda, motor verimi örnek olarak seçilen 270 N.m tork değeri için, η_{tek} , ile grafikte gösterilmektedir. İki motor kullanımında ise toplam tork değeri iki motor arasında paylaşılacağı için, iki motordan her birinin sahip olacağı tork değeri 270 N.m 'dan daha düşük olacaktır. İki motor kullanımında, her bir motor eşit miktarda tork değerine sahip olduğu durumda her bir motorun karşılaması gereken tork değeri 135N.m' dir. Bu durumda iki motor kullanımında her bir motorun verimi $\eta_{çift}$ ile grafikte gösterilmiştir. Özet olarak Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, düşük hızlarda yüksek tork talepleri, motorlar arasında paylaştırılarak, motorlar kısmi olarak daha düşük tork değerlerinde çalışırlar ve daha yüksek verimler elde edilmektedir.

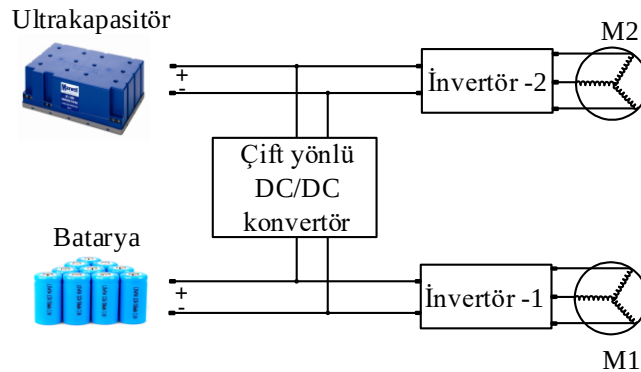
İkinci olarak yüksek hız ve düşük tork çalışma bölgelerinde, tek motor kullanımı, gücün iki motora paylaştırılmasına nazaran daha avantajlı hale gelmektedir. Bu durum

Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Yüksek hızlarda, talep torkunun 150 Nm’den daha az olduğu durumlarda, iki motor kullanımı verimin düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.6 : Remy HVH 250 elektrik motoruna ait, yüksek hızda, tek ve çift motor topolojilerinin verim değeri.

İki motorlu bir topolojide anlık tork ve hız değerlerine bağlı olarak tek motor çalışma modu daha avantajlı ise, hangi motorun seçileceği hibrit enerji depolama sisteminden beslenen ve motorların ayrı kaynaklara doğrudan bağlı olduğu bazı topolojilerde önem kazanmaktadır. Batarya/Ultrakapasitör HEDS sahip bir araca ait topoloji Şekil 4.7’de gösterildiği gibidir.



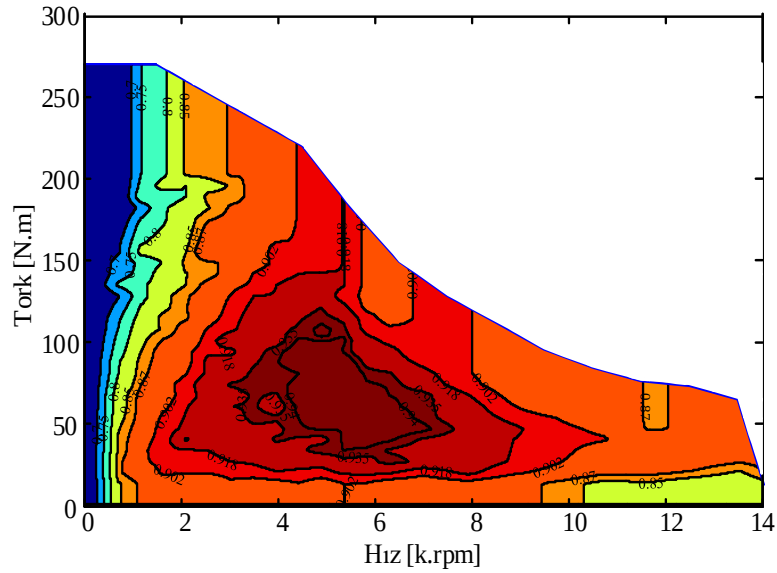
Şekil 4.7 : Batarya/UK hibrit enerji depolama sistemine sahip çift motorlu güç aktarım topolojisi(Yavasoglu ve diğ, 2015a).

Motor-1’in doğrudan bataryadan, motor-2’nin doğrudan ultrakapasitörden beslendiği bir yapı için, rejeneratif çalışma esnasında M2’nin ve aracın ilerlemesi esnasında

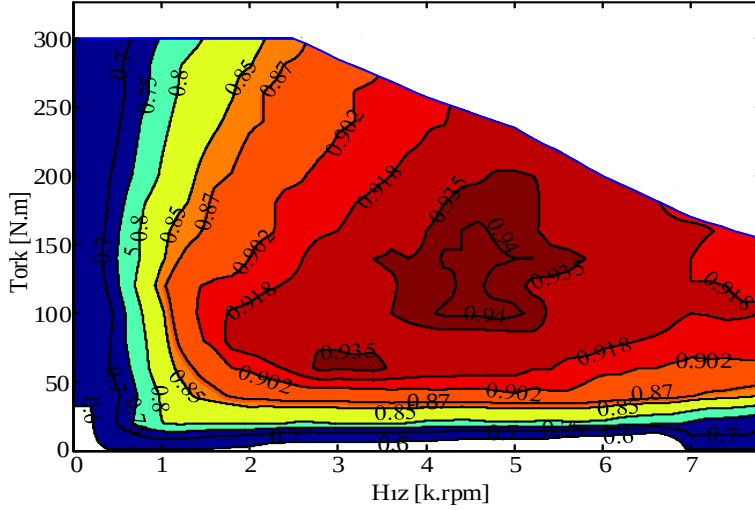
M1'in seçilmesi, DC/DC konvertörün daha az kullanılmasına sebebiyle toplam sistem verimini arttıracaktır.

4.3 Birbirini Tamamlayıcı Tork ve Hız Karakteristiğine Sahip İki Motor Kullanımı

Elektrikli araçlarda, hareketin sağlanmasında görevli eşdeğer iki motor kullanımı, tek motor kullanımına nazaran sınırlı bir verim artışına imkân sunmaktadır. Kullanılan motorlar eşdeğer olduğu için motor verim haritasında değişim olmamaktadır. Oysaki içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun beraber kullanıldığı paralel hibrit araçlarda olduğu gibi, farklı karakteristik özelliklere sahip, birbirini tamamlayıcı iki elektrik motoru kullanımı ile daha yüksek verim potansiyeline sahip bir güç aktarım sistemi oluşturulabilir. Böylece daha geniş bir çalışma bölgesinde daha yüksek verim elde edilme şansı olacaktır. Örnek olarak, Autonomie yazılım kütüphanesinden Camry (M1) ve UQM powerphase 125 (M2) motorları seçilmiştir. Birbirini tamamlayıcı özellikte seçilen M1 ve M2 ye ait verim haritaları Şekil 4.8a ve Şekil 4.8b ile gösterilmiştir.

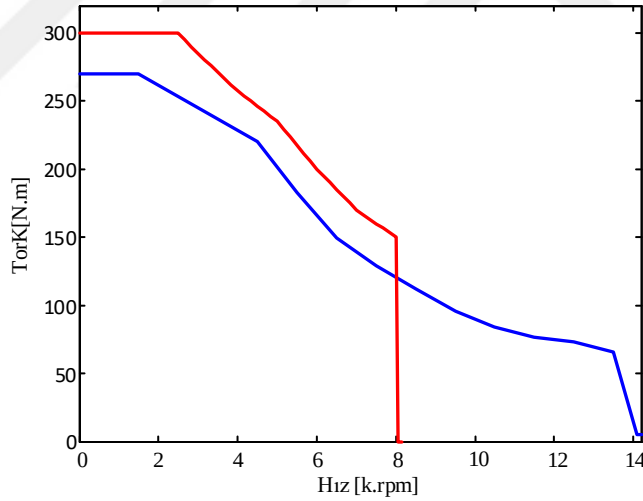


Şekil 4.8 : Birbirini tamamlayıcı özellikte seçilen M1 ve M2 motorlarına ait verim haritaları; (a) (M1) Camry motorunun verim haritası (Yavasoglu ve diğ, 2015a).



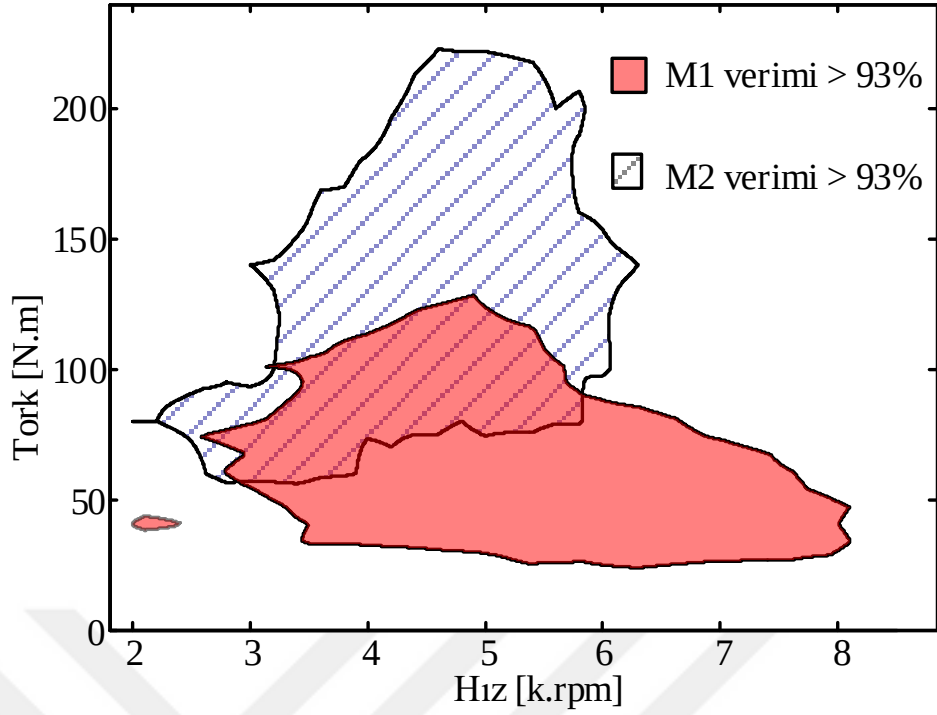
Şekil 4.8 : (devam) (b) (M2) UQM Powerphase 125 motorun verim haritası (Yavasoglu ve diğ, 2015a).

Camry, UQM powerphase 125 motoruna göre daha hızlı fakat tork bakımından daha düşük bir profile sahiptir. UQM ise daha yüksek tork aralığında çalışabilmekte fakat daha düşük hız karakteristiğine sahiptir. M1 ve M2 için maksimum tork/hız eğrisi şekil 4.9’da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.9 : Camry (M1) ve UQM125 (M2) için Tork-Hız eğrisi sırası ile mavi ve kırmızı ile verilmiştir.

Diğer yandan bu iki motor tork-hız eğrilerinin tamamlayıcı olmasından ziyade verim haritalarının da değişik hız ve tork değerlerine karşın birbirini tamamlayıcı özelliktedir. M1 yüksek tork değerlerinde yüksek verimle çalışabilirken, M2 düşük tork değerleri için daha yüksek verimli çalışma bölgelerine sahiptir. Bu nedenle bu iki motorun beraber kullanımı ile motorlara ait yüksek verimli çalışma bölgeleri Şekil 4.10 da gösterildiği gibi genişletilmiş olacaktır.



Şekil 4.10 : Camry ve UQM motorun yüksek verimli olan bölgeleri (Yavasoglu ve diğ, 2015b).

4.4 İki Motor Kullanımında Motorlar Arası Güç Paylaşımı Optimizasyonu

İki motor ile tahrik edilen elektrikli araçta motorlardan maksimum verimi alabilmek için talep edilen gücü en iyi şekilde motorlar arasında paylaşmak gerekmektedir. Bu paylaşımın nasıl olacağı, motorlardaki kayıp gücü minimuma indirecek hesaplama ile bulunabilir. Motorlarda harcanan kayıp gücü minimuma indirecek bir güç dağılımı, motorlardaki verimi de maksimuma çekecektir.

Aracın hızına, ivmelenmesine ve araca etkiyen direnç kuvvetlerine göre değer alan, motorların karşılaması gereken toplam motor gücü P_M ; 4.4 ile ifade edilebilir.

$$P_M = \tau_M \cdot \omega_M \quad (4.4)$$

Burada τ_M motorlara düşen toplam tork değeri olup, motorlara ait açısal hız, ω_m ve τ_M , tork değerleri (4.5) ve (4.6) ile verildiği gibi hesaplanabilir (Yavasoglu ve diğ, 2015a).

$$\omega_M = \frac{v \cdot G_r}{r_{wh}} \quad (4.5)$$

$$\tau_M = \frac{r_{wh} \cdot F_{TR}}{G_r} \quad (4.6)$$

Burada G_r , r_{wh} sırasıyla; motor ile tekerlekler arasındaki sabit dişli oranı ve tekerlek yarıçapıdır. F_{TR} ise (3.10) ile verilmiş olan aracın seyir halindeki çekiş kuvvetidir. (4.4) ile verilmiş toplam motor gücü, motorlar arasında (4.7) ile gösterildiği gibi sürüş çevriminin her bir adımında birinci ve ikinci motor arasında dağıtılabilir.

$$P_M(k) = \eta_{M1}(k).P_{M1}(k) + \eta_{M2}(k).P_{M2}(k) \quad (4.7)$$

Burada $k = 1, 2, \dots N$. N sürüş çevriminin uzunluğudur. P_{M1} ve P_{M2} birinci ve ikinci motora ait güç değerlerini ifade etmektedir. Elektrik motorlarının verimi η_{M1} ve η_{M2} olmak üzere, (4.8) ve (4.9)'da verildiği gibi hız ve torkun birer fonksiyonudur.

$$\eta_{M1}(t) = f(\omega_M(k), \tau_{M1}(k)) \quad (4.8)$$

$$\eta_{M2}(t) = f(\omega_M(k), \tau_{M2}(k)) \quad (4.9)$$

Burada, $\omega_M(k)$, $\tau_{M1}(k)$ ve $\tau_{M2}(k)$, sırası ile motorların dönüş hızı, M1'in tork değeri ve M2'nin tork değeridir. Maksimum verimi sağlayacak, M1 ve M2'de harcanan minimum kayıp gücü hesaplamak bize motorlar arasında nasıl bir güç paylaşımı yapmamız gerektiğini gösterecektir. M1 ve M2'ye ait ilerleme anında pozitif ve rejeneratif frenleme periyodunda, negatif tork değerleri (4.10) de verildiği gibi hesaplanabilir (Yavasoglu ve diğ, 2015a).

$$P_{kayıp,i}(k) = \begin{cases} \omega_M(k). \tau_{Mi}(k). (1 - \eta_{Mi}(k)) & \text{eğer } \tau_{Mi}(k) \geq 0 \\ \omega_M(k). \tau_{Mi}(k). \frac{(1 - \eta_{Mi}(k))}{\eta_{Mi}(k)} & \text{eğer } \tau_{Mi}(k) < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

$i = \{1,2\}$ birinci ve ikinci elektrik motorunu, $P_{kayıp,i}(k)$ ise her bir motordaki kayıp gücü belirtmektedir. Bu güç paylaşım probleminde, her bir adımda, M1 ve M2 kendi çalışma bölgeleri içinde değer almalı ve her iki motorun toplam tork değeri, talep edilen torku karşılaması gerekmez. Bu gereksinimlerin neden olduğu kısıtlamalar (4.11) - (4.13) eşitlikleri ile ifade edilmiştir.

$$\tau_{M1}(k) + \tau_{M2}(k) = \tau_M(k) \quad (4.11)$$

$$\tau_{M1,min}(\omega_M(k)) \leq \tau_{M1}(k) \leq \tau_{M1,maks}(\omega_M(k)) \quad (4.12)$$

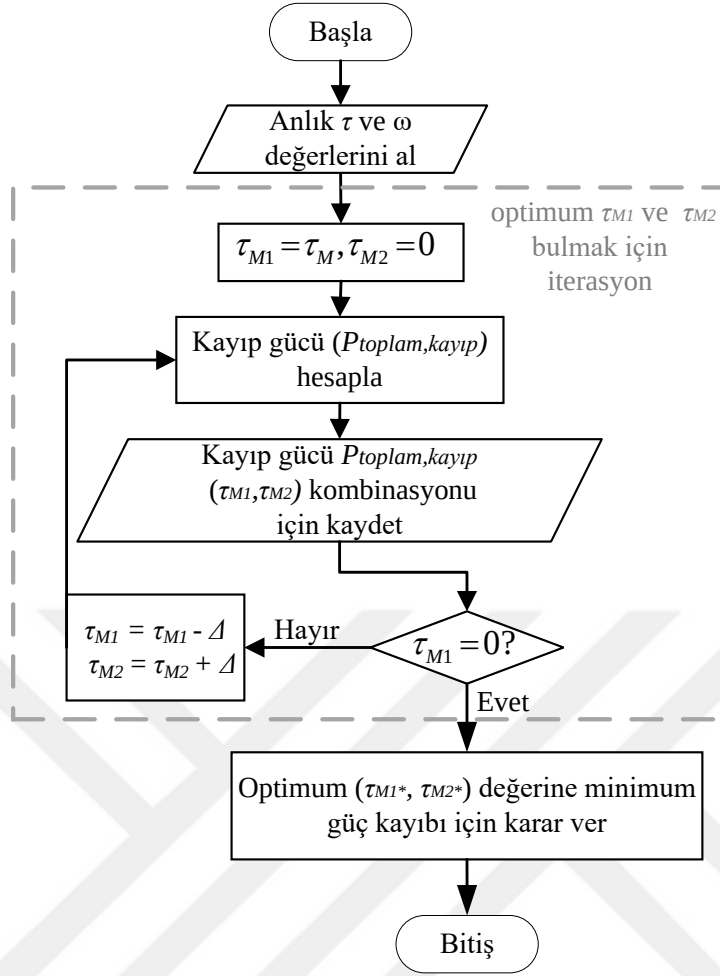
$$\tau_{M2,min}(\omega_M(k)) \leq \tau_{M2}(k) \leq \tau_{M2,maks}(\omega_M(k)) \quad (4.13)$$

Burada $\tau_{M1,maks}$ ve $\tau_{M1,min}$ M1 için maksimum ve minimum tork değerini ifade eder. $\tau_{M2,maks}$ ve $\tau_{M2,min}$ ise; M2 için maksimum ve minimum torku ifade etmektedir. Bu

Güç paylaşım optimizasyonunda amaç problem (4.14)'de verildiği gibi motorlardaki kayıp güçleri minimize etmek olarak belirlenmiştir.

$$P_{topl,kayıp}(k) = \min[P_{M1,kayıp}(\omega_M(k), \tau_{M1}(k), \eta_{M1}(k)) + P_{M2,kayıp}(\omega_M(k), \tau_{M2}(k), \eta_{M2}(k))] \quad (4.14)$$

Optimizasyon probleminin çözümü şu şekilde açıklanabilir, Her bir zaman adımına karşılık gelen talep torku $\tau_M(k)$ ve motor hızı $\omega_M(k)$ bölüm-3' de verilen denklemler yardımı ile kullanılan sürüş çevriminin her bir adımı için hesaplanabilmekte, dolayısı ile bilinmektedir. Herhangi bir hız değeri için M1 ve M2' nin alabileceği maksimum ve minimum tork değer aralığı tork-hız eğrilerinden elde edilebilmektedir. Motor hızı bilindiği için, herhangi $\tau_{M1}(k)$ ve $\tau_{M2}(k)$ tork değeri için motorların alacakları verim değerleri de yine verim haritaları vasıtası ile bilinmektedir. Böylece güç paylaşımı yapılarak, motorlar için seçilen herhangi tork değeri $(\tau_{M1}(k), \tau_{M2}(k))$ için kayıp güç hesaplanabilir. Dolayısıyla, motorlar arasındaki tüm paylaşım ihtimalleri değerlendirilerek, motorlardaki kayıp gücü minimize edecek, M1 ve M2 için optimum tork değeri $(\tau_{M1}^*(k), \tau_{M2}^*(k))$ belirlenebilir. Optimum güç paylaşım optimizasyonuna ait akış diyagramı genel olarak Şekil 4.11 ile sunulmuştur. Verilen algortimada; talep torku önce tamamen birinci motor tarafından karşılanması ihtimali daha sonra, sırası ile Δ kadar τ_{M1} azaltılıp, Δ kadar τ_{M2} artırılarak tüm ihtimaller için motorlardaki toplam kayıp güç değeri hesaplanmaktadır. Minimum kayıp gücü veren optimum tork değerleri $(\tau_{M1}^*(k), \tau_{M2}^*(k))$ seçilmektedir. Bu çalışmada $\Delta=1\text{Nm}$ olarak seçilmiştir.



Şekil 4.11 : Motorlar arasında güç paylaşımı için akış diyagramı (Yavasoglu ve diğ, 2015a).

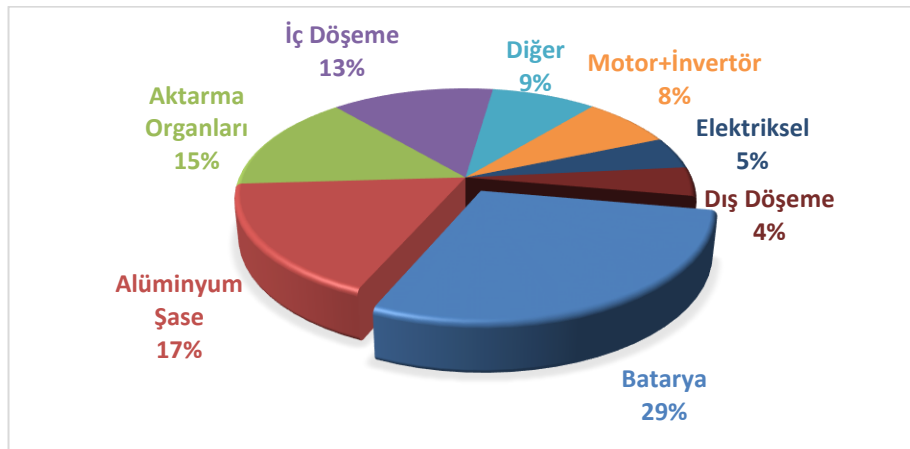
5. İKİ HAREKET MOTORUNA SAHİP ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN TASARLANMASI VE GÜÇ PAYLAŞIM OPTİMİZASYONU

Bölüm 4.1 ile sunulmuş olan, iki hareket motoruna sahip elektrikli araç topolojisine yönelik enerji depolama sistemi tasarımında, hali hazırdaki ve üretilmekte olan elektrikli araçların büyük çoğunluğunda olduğu gibi, sadece batarya modülü veya bataryanın, UK ve/veya YP ile oluşturduğu hibrit yapılar kullanılabilir.

5.1 Enerji Depolama Sisteminde Sadece Batarya Kullanımı

Elektrikli araç uygulamalarında genel olarak NiMH ve lityum iyon ailesine ait batarya modelleri kullanılmıştır. Şekil 2.5 ve Çizelge 2.3’ de belirtildiği gibi lityum iyon bataryalar, NiMH bataryalara nazaran özgül enerji, özgül güç ve enerji yoğunluğu bakımından daha üstündür. Bu nedenle günümüzde pazardaki elektrikli araçların çoğunluğunda lityum batarya kullanılmaktadır.

Enerji depolama sisteminde, lityum-iyon batarya hücreleri kullanılan, Tesla Motor şirketine ait Model S tümüyle elektrikli aracının ağırlık dağılımını, örnek teşkil etmesi amacıyla incelersek, Şekil 5.1’ de gösterildiği gibi ağırlık bazında en çok yer tutan bileşenin batarya olduğunu görebiliriz.



Şekil 5.1 : Tesla Model S tümüyle elektrikli araçta ağırlık dağılımı (Teslarati 2013).

Şekil 5.1’ de gösterildiği gibi tümüyle elektrikli araçlarda, özellikli menzil ihtiyacını karşılaması amacıyla, çok yüksek boyutlarda araca yüklenmesinden dolayı, aracın maliyet ve ağırlığını değiştirmesi bakımından, batarya araç bileşenleri arasında kritik bir konuma sahiptir. Bu nedenle, elektrikli araçlarda bataryanın, menzil, performans ve maliyet kalemleri göz önünde bulundurularak en iyi şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Lityum-iyon bataryalar Çizelge 5.1’de verildiği gibi yüksek enerji (YE) ve yüksek güç (YG) özellikli olmak üzere iki ayrı tipte üretilmektedir. Yapısal olarak, YG bataryalar ani güç ihtiyaçlarına karşı, hızlı tepki verebilmek için ince elektrotlara ve büyük yüzey alanlarına sahiptir. YE bataryalar ise, daha kalın elektrotlara sahiptir ve daha fazla iyon saklayabilir (Fleurbaey ve diğ., 2014).

Çizelge 5.1 : YG ve YE lityum-iyon batarya karşılaştırması (Sarlioğlu ve diğ, 2015).

Özellik	Birim	YG Batarya	YE Batarya
Nominal hücre gerilimi	V	3.3 - 3.8	3.3 - 3.8
Enerji yoğunluğu	Wh/l	150	200 – 400
Özgül enerji	Wh/kg	90	120 – 200
Güç yoğunluğu	W/l	3500 – 9000	800 – 2200
Özgül güç	W/kg	2000 – 4000	500 - 1200

Elektrikli araçlardaki menzil ihtiyacını karşılayabilmek için YE tipi bataryalar kullanılabilir. Fakat YE bataryaların çıkış güçleri sınırlıdır (Cohen ve diğ, 2015). Bataryaların yüksek güç değerlerinde çalışması, çevrim ömürlerini kısaltmakta, bataryanın daha sık değişmesine neden olarak, sistem maliyetini arttırmaktadır (Miller ve diğ., 2011). Bu sebeple, tırmanma veya hızlanma esnasında ihtiyaç duyulan ani güç değerlerini karşılamak amacıyla ve bataryaların hızlı ömür kaybına uğramaması için, olması gerekenden daha fazla boyutlarda YG tipi bataryalar, elektrikli araçlara yüklenmektedir. Bu sebeple doğru batarya tipi seçimi ve seçilen bataryanın boyutlandırılması önem kazanmaktadır.

5.1.1 Batarya enerji depolama birimine sahip elektrikli araçlar için bataryanın boyutlandırılması

Bataryanın boyutlandırılmasında;

- Aracın günlük kullanımına bağlı olarak gereksinim duyduğu tek bir şarj ile gidebileceği mesafe
- Aracın toplam ağırlığına, aracın aerodinamik yapısına, yolun karakteristiğine ve araçtan istenen performans kıstaslarına bağlı olarak gereksinim duyacağı maksimum güç ihtiyacı
- Bataryanın sağlaması gereken gerilim seviyesine ulaşması için gerekli olan hücre sayısı

dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada Çizelge 5.2’ de verilen Saft firmasına ait YE tipi ve K2 Energy firmasına ait YG tipi Lityum-iyon bataryalar için (Shen ve diğ., 2014a) çalışmasında verilen yöntem ile boyutlandırma yapılmıştır.

Çizelge 5.2 : YG ve YE batarya karakteristikleri (Shen ve diğ., 2014a).

Özellik	YE Saft VL 45 E	YG K2 26650P
Nominal çalışma gerilimi [V]	3.3	3.2
Nominal hücre kapasitesi [Ah]	44	2.6
Hücre enerjisi [Wh]	140	8.32
Hücre ağırlığı [kg]	0.9	0.0825
Maks. sürekli deşarj akımı [A]	50	42
Maks. darbe deşarj akımı [A]	100	150
Maks. deşarj gücü [W]	165	480

Bataryanın bağlı olduğu DC-bara geriliminin nominal değerinin 300V olduğu varsayılmıştır. Bataryanın bu gerilim değerini sağlaması için sahip olması gereken minimum seri hücre sayısı, YG ve YE tipi bataryalar için hesaplanmıştır.

Aracın elektrikli menzilinin hesaplanmasında, aracın şehir içi karakteristiğini yansıtan bir yolda seyir ettiği varsayılarak, Şekil 3.5 ile gösterilen UDDS sürüş çevrimi, ardarda

eklenerek kullanılmıştır. Hesaplamada kullanılan araç karakteristiği ise Çizelge 5.3 ile verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Elektrik araç karakteristiği (Yavasoglu ve diğ., 2015a).

Özellikler	Değer
Araç şase ağırlığı [kg]	1200
Sürekli motor gücü [kW]	110
Maksimum motor gücü [kW]	165
Aracın ön yüzey alanı [m ²]	2.13
Aerodinamik sürtünme katsayısı	0.24
Tekerlek yarı çapı [m]	0.34
Dişli oranı	5.5

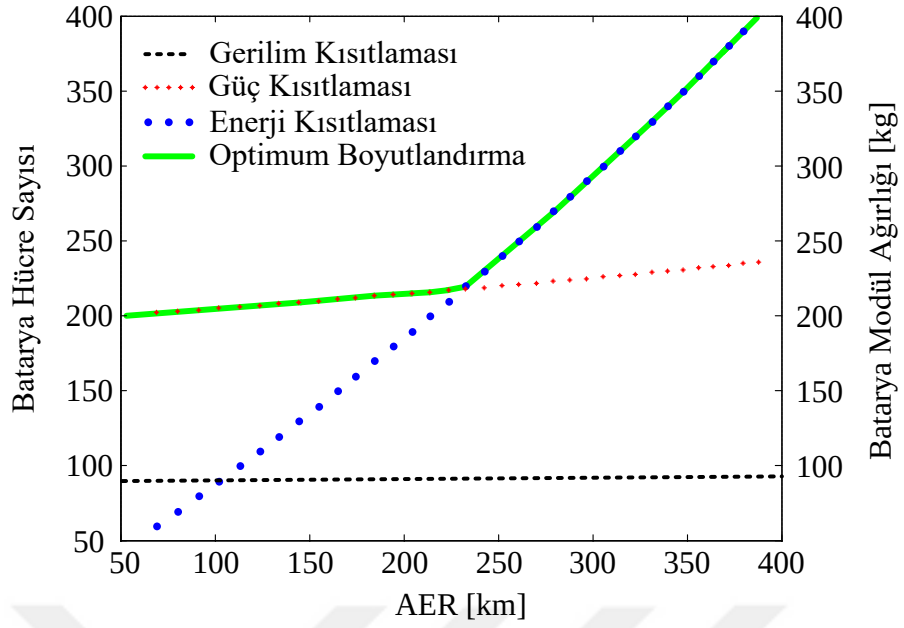
Burada aracın toplam ağırlığı M , hücre sayısına göre değişmektedir. Aracın toplam ağırlığı, aracın şase ağırlığı, $M_{şase}$ ve enerji depolama sisteminin ağırlığı M_{EDS} ile (5.1)'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$M = M_{şase} + M_{EDS} \quad (5.1)$$

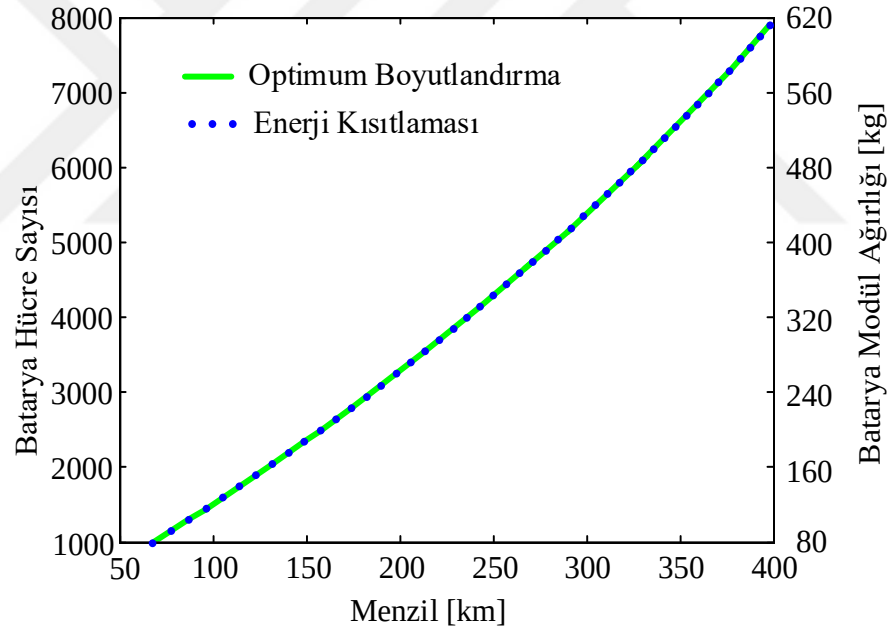
Burada EDS ağırlığı hesaplanırken hücre sayısı $N_{hücre}$, hücre ağırlığı $m_{hücre}$ ve P_f paketleme faktörü dikkate alınarak (5.2) eşitliğinde verildiği gibi hesaplanmıştır. Batarya modülü yüzlerce hücreden oluşabilmekte, içerisinde gerilim, akım ve sıcaklık sensörleri bulunabilmektedir. Batarya modülü hücreler arası elektriksel iletiminin sağlanması, aktif veya pasif soğutmanın yapılabilmesi, fiziksel olarak dış ortama karşı dayanıklı olması için çeşitli şekillerde tasarlanmaktadır. Bu tasarım nedeniyle batarya modülünün ağırlığı artmaktadır. Bu çalışmada batarya için paketleme faktörü (Shen ve Khaligh, 2015a)'da yapılan çalışma baz alınarak 1.4 olarak kabul edilmiştir.

$$M_{EDS} = N_{hücre} \cdot m_{hücre} \cdot P_f \quad (5.2)$$

Çizelge 5.2' de verilen YG ve YE tipi lityum-iyon bataryalar için, Çizelge 5.3'de verilen araç karakteristiğine göre, şehir içi yol şartlarında, optimum boyutlandırma menzil, azami güç ihtiyacı ve minimum çıkış gerilimi için Şekil 5.2' de verildiği gibi hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.2 : Enerji depolama sisteminde batarya kullanılan elektrikli araçta bataryanın optimum boyutlandırılması; (a) YE, Saft VL45 E; (b) YG, K2 Energy 26650P.

Şekil 5.2a ve Şekil 5.2b’de mavi noktalı eğri ile yatay eksenle verilen elektrikli menzil uzunluğu arttıkça gerekli olan enerji miktarının karşılanması için ihtiyaç duyulan batarya hücre sayısı ve bu hücre sayısının teşkil ettiği ağırlığı belirten ilişki gösterilmiştir. İstenen menzil miktarı arttıkça ihtiyaç duyulan hücre sayısı da doğrusala yakın bir eğim ile artmaktadır.

Diğer yandan kırmızı noktalı eğri ile menzil ihtiyacı arttıkça, ihtiyaç duyulan azami güç miktarının karşılanması için gerekli olan hücre sayısı ve artan hücre sayısına bağlı olarak bataryanın teşkil edeceği ağırlık miktarı gösterilmiştir. Gereken azami güç değeri, daha çok sürüş çevrimine göre değişmekte, ani hızlanmalar sırasında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Yol karakteristiği, hesaplama boyunca aynı kaldığı için, gerekli olan azami güç miktarı menzil arttıkça fazla bir değişim göstermemektedir. Menzil değeri ile batarya ağırlığı doğru orantılı olduğu için, araç ağırlığındaki artışın getirdiği ilave güç değeri azami gücün belirlenmesinde etkili rol oynamaktadır.

Bataryanın sağlaması gereken nominal gerilim değeri ise menzile göre değişiklik göstermemektedir ve siyah noktalı doğru ile Şekil 5.2a' da gösterilmiştir. YG tipi bataryanın optimum boyutlandırılmasının yapıldığı Şekil 5.2b' de ise batarya hücre sayısının çok fazla olması nedeniyle gerilim kısıtlaması, batarya boyutlandırma tasarımını etkilememektedir.

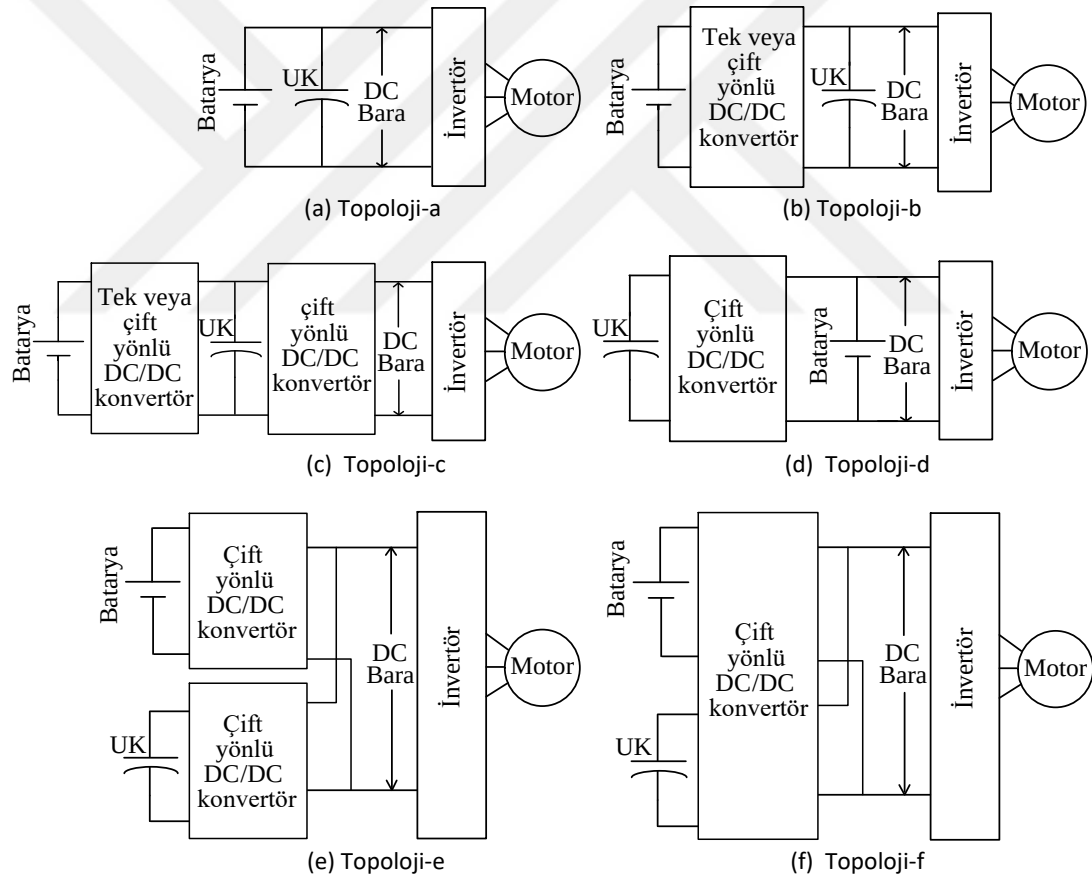
Olması gereken optimum boyutlandırma yeşil ile gösterilen eğri ile YG ve YE batarya tipleri için Şekil 5.2a ve Şekil 5.2b' de gösterilmiştir.

Batarya için optimizasyon çalışması bize göstermektedir ki, enerji depolama sisteminde YE tipi batarya kullanılan elektrikli araçlar, ağırlık bazında YG tipi batarya kullanılan araçlara nazaran daha uzun menzile sahip olabilmektedir. Diğer taraftan 230 km altında bir menzile sahip olması istenen elektrikli araçlar için YE tipi batarya seçimi yapıldığında, gerekli gücü karşılayabilmek için olması gereken miktardan daha fazla YE tipi bataryanın araca yüklenmesi gerekmektedir.

Hem yüksek güç değerlerini karşılamak, hem de batarya çevrim ömrünü koruyabilmek için, YE ve YG tipi bataryaların beraber kullanımı, optimum boyutlandırma açısından bir çözüm olabilir. Fakat YE tipi batarya ile birlikte YG tipi bataryaların kullanılması yerine, YE tipi bataryalar ile daha düşük iç dirence sahip olan UK'ün seçilmesi, kayıp güçleri azaltarak, enerji depolama sisteminin verimini arttırabilir. UK kullanımı ile EDS'nin anlık güç karşılama potansiyeli artacak, dolayısı ile aracın performans kriterleri de yükselecektir. Diğer yandan darbe güçlerinin UK ile karşılanması sayesinde, batarya akımı üzerindeki dalgalanmalar azalarak, batarya çevrim ömrü uzatılabilir.

5.2 Batarya/UK HEDS Topolojisi

Şehir trafiğinde sıklıkla yaşanan hızlanma ve yavaşlamalar nedeniyle bataryalar yüksek güç darbelerine maruz kalarak çevrim ömürleri kısalmaktadır. Ultrakapasitörler yüksek güç yoğunluğuna ve üstün anlık şarj, deşarj kabiliyetine sahiptir. UK ve Bataryadan oluşan HEDS’de UK, anlık yüksek şarj ve deşarj güçlerini karşılayarak bir tampon eleman olarak görev alır. Bu şekilde batarya üzerindeki stres azalarak, bataryanın çevrim ömrü uzatılabilir (Yavasoglu ve diğ., 2015b), (Cohen ve diğ., 2015). Diğer yandan rejeneratif frenleme enerjisi daha verimli bir şekilde depolanabilir. Batarya ve UK’ün beraber kullanıldığı literatürdeki HEDS topolojileri (Khaligh ve Li, 2010) çalışmasında incelenmiştir. Literatürdeki başlıca batarya/UK HEDS topolojileri Şekil 5.3’ de gösterildiği gibi çeşitli şekillerde sunulmuştur.

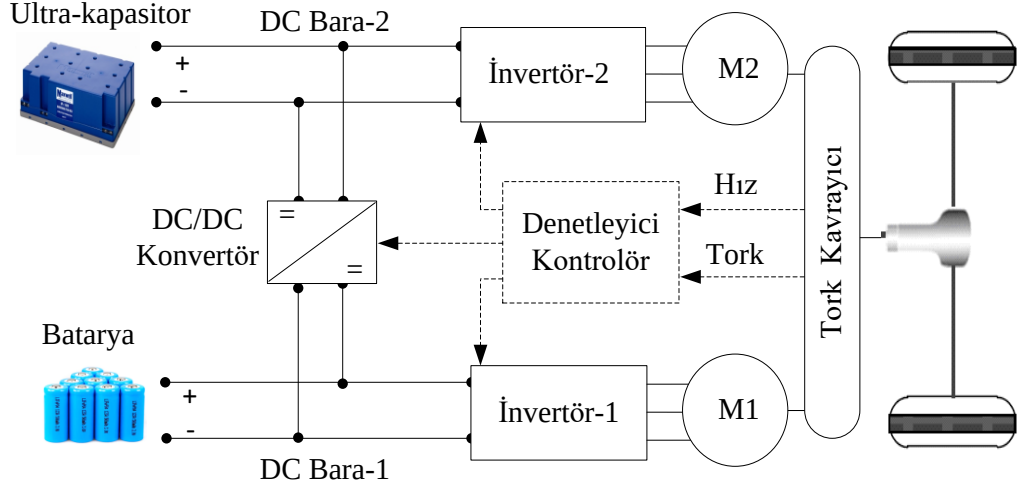


Şekil 5.3 : Batarya / UK hibrit enerji depolama sistemi topolojileri.

Şekil 5.3a’da UK, batarya pasif paralel topolojisi topoloji-a ile gösterilmiştir. Bu topoloji, uygulanması kolay ve düşük maliyetlidir. Bu topolojide batarya ya da UK ayrı ayrı kontrol edilememektedir ve UK’ün efektif kullanımı düşüktür. Şekil 5.3b’de

verilen topoloji-b' de UK topoloji-a' da olduğu gibi pasif bir şekilde devreye bağlanmış fakat batarya aktif olarak kontrol edilebilmektedir. Bataryanın gerilimi bara gerilimine yükseltilebilirken, doğrudan bağlanan UK'ün yüksek gerilim değerini karşılaması gerekmektedir. Motor sürücüsünün girişi, UK'e bağlı olduğu için, UK'ün gerilim değeri motor sürücüsünün çalışma aralığı ile kısıtlanacaktır. Şekil 5.3c' verilen topoloji-c' de UK'ün gerilim salınımı topoloji-b' ye göre daha iyidir fakat daha maliyetlidir. Ağırlık ve boyutları daha büyüktür. Topoloji-d' de UK gerilimi daha düşük seçilebilir. Böylece UK boyutu ve maliyeti azalabilir. Fakat UK'ün kullanım frekansı yüksek olduğu için bağlı olduğu konvertör üzerindeki kayıp güç de artabilir. Ayrıca topoloji-d' de DC bara gerilimi, batarya gerilimi tarafından sınırlandırılmıştır. Topoloji-e' de Batarya ve UK, DC baraya, iki ayrı, çift yönlü DC/DC konvertör ile bağlanmıştır. Bu topoloji batarya ve UK kullanımı açısından tam kontrol kabiliyetine sahiptir. Daha önce sunulan topolojilere nazaran, daha ağır, daha büyük, daha kompleks ve daha maliyetlidir. Topoloji-f ise, daha karmaşık bir yapı bize sunar. Topoloji-e de olduğu gibi, batarya ve UK için tam kontrol kabiliyetine sahiptir. Fakat kontrolü daha karmaşıktır. Topoloji-e' ye göre üstün olduğu noktalar ise; boyut/ağırlık ve maliyet olarak daha hesaplı olabilmesidir.

Bu tez çalışmasında batarya/UK HEDS için topoloji-f temel alınarak, Şekil 5.4 ile gösterilmiş olan iki motorlu hareket sistemine sahip topoloji önerilmiştir.



Şekil 5.4 : Önerilen batarya/UK HEDS sistemine sahip, iki hareket motorlu elektrikli araç topolojisi (Yavasoglu ve diğ., 2015a).

Şekil 5.4 ile gösterilen, önerilen batarya/UK HEDS topolojisinde, M1 ve M2 elektrik motorları, invertör-1 ve invertör-2 sayesinde, aracın hareketini sağlamak üzere ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. M1 ve M2 Şekil 4.3’ de detaylı gösterilen bir tork kavrayıcı dişli ile birbirine bağlıdır. Bu topolojide, motorlar aynı hızda dönerken, gücün karşılanmasında veya rejeneratif enerjinin depolanmasında farklı oranlarda katkıları olmaktadır. M1 doğrudan bataryaya bağlı iken, M2 ise doğrudan UK’e bağlıdır. Topolojide UK ve batarya arasında çift yönlü buck/boost konvertör kullanılmıştır. Güç iletimi esnasında çift yönlü konvertör güç akış yönüne bağlı olarak gerilim seviyesini arttırmak için boost veya düşürmek için buck modunda çalışmaktadır. Çift yönlü konvertör sayesinde, hem batarya ve UK arasında güç iletimi sağlanmaktadır, hem de enerji depolama birimleri ile doğrudan bağlı olmadıkları elektrik motorlar arasında güç iletimi sağlanmış olmaktadır. Batarya ve UK’ün bağlı oldukları DC baralar, batarya ve UK’ün gerilim değerleri ile anılmaktadır. UK’ün açık devre gerilim değeri 600V’ tur. UK’ün anlık gerilimi, o anki şarj seviyesine göre 300V ile 600V arasında değişebilmektedir. Bataryanın gerilim değeri ise UK’e göre daha azdır ve nominal gerilim değeri 300V dur.

5.3 Batarya/UK/YP HEDS Topolojisi

Lityum-iyon batarya teknolojisi sayesinde, elektrikli araçların menzili önemli derecede artmıştır. Buna rağmen, elektrikli araçlarda, enerji depolama konusu, hala geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadır (Walters ve diğ., 2015). Uzun şarj süresi ve yüksek

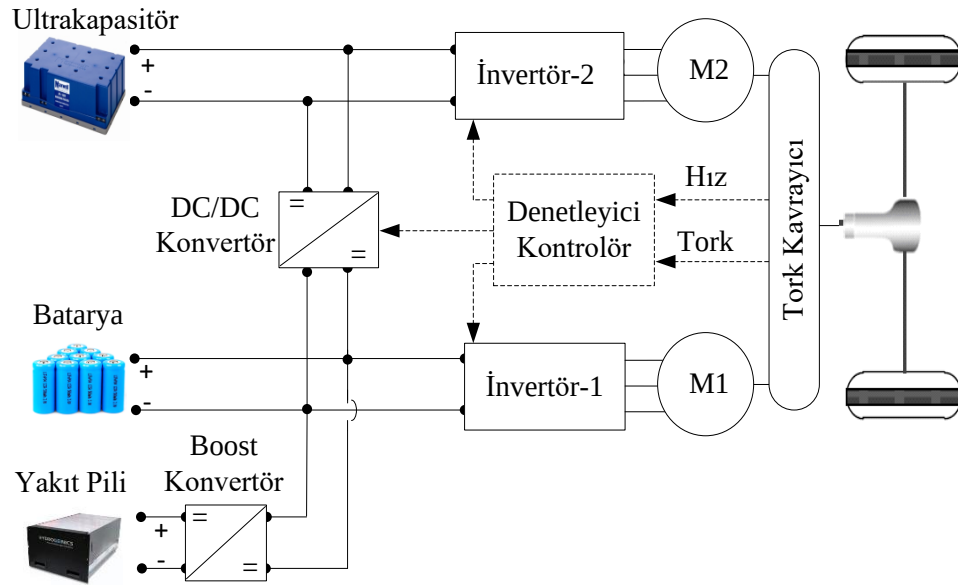
menzil için araca yüklenen büyük boyutlardaki bataryanın, aracın ağırlığını ve maliyetini arttırması, batarya enerji depolama sistemine sahip elektrikli araçlarda başlıca dezavantajlarıdır.

Yakıt pili bu dezavantajlı durumları kompanse etmek amacıyla enerji depolama sisteminde kullanılabilir. Hareketli parçası olmadığı için bakım masrafı olmaması ve emisyon olarak saf su çıkışı yakıt pilinin avantajlı olan özellikleridir. Yakıt pili sisteminde, basınçlı gaz fazında hidrojen dolumu, konvensiyonel araçlarda olduğu gibi kısa sürede yapılabilmektedir. 500 km menzile ulaşabilen yakıt pili sistemine sahip bir araç, 5 dakikadan daha kısa bir sürede hidrojen dolumunu gerçekleştirebilmektedir (Toyota, 2016),(Walters ve diğ., 2015). Enerji depolama sisteminde yakıt pili kullanarak, sadece batarya veya UK / batarya hibrit depolama topolojilerine nazaran daha yüksek menzil elde edilebilir. Bu sayede, özellikle uzun menzil için tasarlanan araçlarda ağırlık ve maliyet azaltılabilir.

Yakıt pili, tepkime süresi açısından UK veya batarya kadar hızlı değildir. Bu nedenle ani güç taleplerinin karşılanabilmesi amacıyla, literatürde YP/UK , YP/batarya ve batarya/UK/YP gibi bir çok hibrit enerji depolama sistemi topolojiler sunulmuştur (Vural ve diğ., 2014).

Bu tez çalışmasında daha yüksek menzil ve daha iyi bir batarya ömrü hedeflenerek, Şekil 5.4' de verilen batarya/UK topolojisine, yakıt pilinin menzil arttırıcı rolde bataryaya paralel bağlanması ile elde edilen, Şekil 5.5' de sunulmuş olan batarya/UK/YP topolojisi önerilmiştir.

Önerilen batarya/UK/YP HEDS topolojisinde, Şekil 5.4' de sunulan batarya/UK topolojisinden farklı olarak yakıt pili, bataryanın bağlı olduğu DC baraya tek yönlü bir boost konvertör aracılığı ile bağlanmıştır. Yakıt pili, topolojide mesafe arttırıcı role sahip olduğu için, diğer enerji depolama birimlerine nazaran daha düşük çıkış gücüne sahiptir. Yakıt pilinin maksimum çıkış gücü 8kW olarak belirlenmiştir. Yakıt pilinin enerji depolama sistemi içerisindeki güç akış kontrolü, verimli olduğu çalışma bölgesi ve bataryanın doluluk oranı göz önüne alınarak sağlanmaktadır.



Şekil 5.5 : Önerilen batarya/UK/YP HEDS sistemine sahip, iki hareket motorlu elektrikli araç topolojisi.

5.4 İki Hareket Motoruna ve HEDS' ne Sahip Elektrikli Araçlarda Enerji Optimizasyonu

Matematiksel olarak optimizasyon amaç fonksiyonunun, minimize veya maksimize edilmesi olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada optimize edilmek istenen problem ise, bölüm 4.3' de optimum güç değerleri hesaplanmış, iki hareket motoruna ait güç değerlerinin, hibrit enerji depolama sistemi birimleri arasında paylaşımı olarak tanımlanabilir. HEDS' de optimum güç akışının hesaplanmasında aşağıda sıralanan amaçlar göz önüne alınmaktadır;

- Batarya gücü için genlik ve değişimlerin azaltılması ve dolayısıyla batarya çevrim ömrünün arttırılması.
- Güç kayıplarının azaltılarak araç menzilin arttırılması.
- SoC_{UK} 'un, ani güç taleplerinin karşılanabilmesi ve faydalı rejeneratif frenleme enerjisinin depolanabilmesi için optimum kontrolü.

Literatürde güç paylaşımı için birçok değişik yaklaşım mevcuttur. Güç paylaşım kontrolü stratejileri genel olarak (Gürkaynak ve diğ., 2009)'daki çalışmada karşılaştırılmış ve dinamik yapılarına, ne kadar kompleks ya da basit olduklarına ve performanslarına göre sınıflandırılmıştır.

(Napoli ve diğ., 2002) yaptıkları çalışmada çok girişli DC/DC konvertör ile birbirlerine bağlı olan Bat/UC/FC HEDS için güç paylaşım çalışması yapmıştır. Bu çalışmada batarya, ultrakapasitör ve yakıt pili için referans güç değerleri, lineer denklemler ile belirlenmektedir. Fakat amaç fonksiyonun minimize edilmesi bu çalışmada yer almamıştır.

(Liu ve diğ., 2008) bulanık mantık tabanlı güç kontrol algoritması önermiş ve barayanın şarjlılık durumu, ultrakapasitörün şarjlılık durumu ve yük gücü, bu yaklaşımda giriş değişkenleri olarak kullanılmıştır. Batarya ve ultrakapasitör arasındaki güç paylaşım oranı ise üyelik fonksiyonları ve kural tabanıyla, giriş değişkenlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Ne varki, bu kontrol stratejisi sezgisel ve tecrübeye dayalı bir altyapı ile oluşturulmakta ve optimum güç paylaşımını sağlamamaktadır.

Moreno (Moreno ve diğ., 2006) HEDS güç paylaşımını optimize edecek bir çalışmada bulunmuş (Wang ve diğ., 2011) ise hem HEDS nin optimum boyutlandırılmasını hem de optimum kontrolünü incelemiştir. Bu çalışmalarda ise bataryanın çevrim ömrünün uzatılması için, batarya gücündeki değişimlerin ve batarya gücünün genliğinin minimize edilmesi incelenmemiştir.

(Lukic ve diğ., 2006) ve (Choi ve diğ., 2012) 'deki HEDS güç paylaşım stratejileri, optimum paylaşımı hesaplayabilmektedir, fakat gelecek güç talep bilgisine son derece bağlı oldukları için gerçek zamanlı uygulanmaları zordur.

(Donmez ve Khaligh, 2014) 'de güç paylaşımı bulanık mantık ve dalgacık algoritması ile sağlanmıştır. Model öngörümlü kontrol (Model Predictive Control- MPC) , (Yan ve diğ., 2012)'da kullanılmıştır. Bu yöntemlerin yüksek hesaplama gerektirmesi nedeniyle gerçek zamanlı uygulanması güçtür.

Bu çalışmada ise, iki hareket motoruna ve HEDS' e sahip bir elektrikli araç için gerçek zamanlı uygulanabilir, optimizasyon tabanlı güç paylaşım kontrol stratejisi önerilmiştir. İlk aşamada motorların yüksek verimli olduğu bölgelerde çalışmasını mümkün kılacak, güç paylaşım kontrol stratejisi ile motorlara ait güç paylaşımı hesaplanmakta, ikinci aşamada ise gerçek zamanlı çözümü mümkün olan, konveks optimizasyon problemi ile hibrit enerji depolama sistemi birimleri arasındaki güç paylaşımı tanımlanmaktadır.

5.4.1 Konveks (dışbükey) optimizasyon

Matematiksel olarak bir optimizasyon problemi (5.3) ile ifade edilebilir;

$$\begin{array}{ll} \min & f_0(x) \\ \text{ks.} & f_i(x) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \end{array} \quad (5.3)$$

Burada $x = (x_1, \dots, x_n)$ vektörü optimizasyon değişkenlerini ifade eder. $f_0 : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ ise amaç fonksiyonunu ve $f_i : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}, i = 1, \dots, m$ eşitsizlikleri, kısıtlayıcı fonksiyonlardır ve $b_1, \dots, b_m$ kısıtlayıcı fonksiyonların sınırlarıdır. Eğer x^* vektörü, bütün kısıtlamaları sağlayan vektörler arasında kalan en küçük amaç değeri ise, *problemin çözümü* veya *optimum* olarak adlandırılır. Başka bir deyişle herhangi bir z için, $f_1(z) \leq b_1, \dots, f_m(z) \leq b_m$ ile $f_0(z) \geq f_0(x^*)$ elde edilir.

Amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcı fonksiyonlar $f_0, \dots, f_m$ lineer ise optimizasyon problemi de lineer program olarak adlandırılır. Bu durumda (5.4) ile verilen eşitliği sağlarlar.

$$f_i(\alpha x + \beta y) = \alpha f_i(x) + \beta f_i(y) \quad (5.4)$$

Burada, bütün x değerleri için, $y \in \mathbf{R}^n$ ve bütün α değerleri için $\beta \in \mathbf{R}$ dir. Eğer optimizasyon problemi lineer değilse, nonlineer olarak adlandırılır.

Konveks optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcı fonksiyonlar konvekstir ve (5.5) ile verilen eşitsizliği sağlarlar.

$$f_i(\alpha x + \beta y) \leq \alpha f_i(x) + \beta f_i(y) \quad (5.5)$$

Burada, bütün x değerleri için, $y \in \mathbf{R}^n$ ve bütün α değerleri için, $\beta \in \mathbf{R}$ ve $\alpha + \beta = 1$,

$\alpha \geq 0, \beta \geq 0$ 'dir (Boyd ve Vandenberghe, 2009).

Konveks optimizasyon için, fonksiyonların konveks olarak tanımlanması çoğunlukla zor olabilir ve konveks olmayan fonksiyonların konveks hale getirilmesinde güçlüklerle karşılaşılabilir. Fakat şaşırtıcı bir şekilde bir çok optimizasyon problemi konveks optimizasyon yöntemi ile çözülebilmektedir.

Konveks optimizasyon kullanmanın avantajları ise, öncelikle karşılaşılan optimizasyon problemlerinin çoğunluğunun konveks olmasıdır. Eğer konveks değil iseler, konveks hale getirilebilme ihtimalleri vardır. En önemli avantajı ise konveksliğin verdiği doğal yapıları sebebiyle, herhangi bir yerel optimum değer aynı

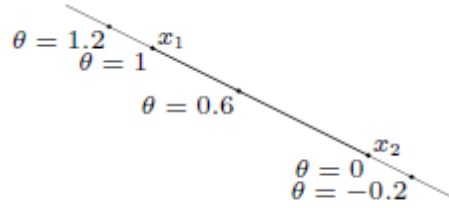
zamanda global optimum değerdir. Bu sebeple konveks optimizasyon problemleri daha hızlı, daha verimli ve daha güvenilirlerdir.

5.4.1.1 Afın ve konveks kümeler

$x_1 \neq x_2 \in \mathbf{R}^n$ içinde iki nokta olduğunu varsayarsak, $\theta \in \mathbf{R}$ olmak üzere x_1 ve x_2 arasındaki,

$$y = \theta x_1 + (1 - \theta)x_2 \quad (5.6)$$

noktaları bir doğruyu ifade eder. $\theta=1$ için $y = x_1$ ve $\theta=0$ için $y = x_2$ değerini alır. Şekil 5.6' da verilen doğru üzerinde koyu olan kısım ile gösterilmiştir. Dolayısıyla, θ değişkeninin 0 ile 1 arasındaki değerleri için, 5.6' da verilen eşitlik kapalı bir doğru parçasına karşılık gelir.

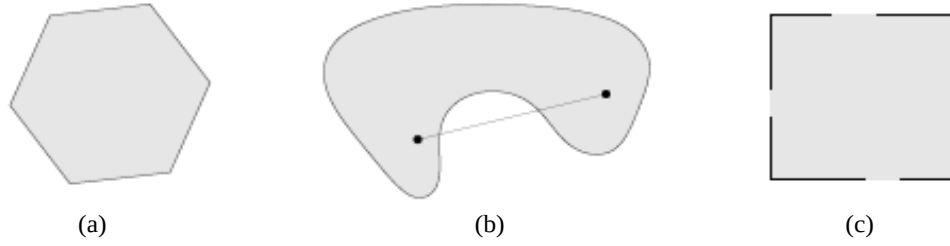


Şekil 5.6 : x_1 ve x_2 üzerinden geçen doğru ve koyu ile x_1 ve x_2 arasındaki doğru parçası (Boyd ve Vandenberghe, 2009).

İki ayrı nokta arasındaki doğru parçasının içerdiği noktaların oluşturduğu kümeye, ($\theta \in \mathbf{R}$) olmak üzere, afın küme denir ve (5.7) ile gösterilebilir.

$$x = \theta x_1 + (1 - \theta)x_2 \quad (5.7)$$

x_1 ve $x_2 \in S$ ise ve 5.7' da verilen doğru $0 \leq \theta \leq 1$ olmak üzere, belirtilen doğru parçasının tüm noktaları S içerisinde kalıyorsa, S konveks küme olarak adlandırılır. Konveks ve konveks olmayan kümeler Şekil 5.7' de verilen örnekler ile gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Konveks ve konveks olmayan kümeler. (a) Konveks küme. (b) ve (c) konveks olmayan küme (Boyd ve Vandenberghe, 2009).

Şekil 5.7a’ da konveks küme örneği olarak kapalı sınırları olan altıgen bir şekil gösterilmiştir. Şekil 5.7b’de ise, böbreği andıran şekil’de doğru parçasının bazı noktaları şekil dışında kaldığı için, bu şekil konveks değildir. Şekil 5.7c’ de ise, bir kare şekli verilmiştir. Normal şartlarda kare bir konveks yapıdır fakat Şekil 5.7c’ de verilen kare şeklin bazı sınır noktaları mevcut iken, bazı sınır noktaları ise açıktır. Bu nedenle Şekil 5.7c de konveks olmayan küme örneği olarak karşımıza çıkmaktadır.

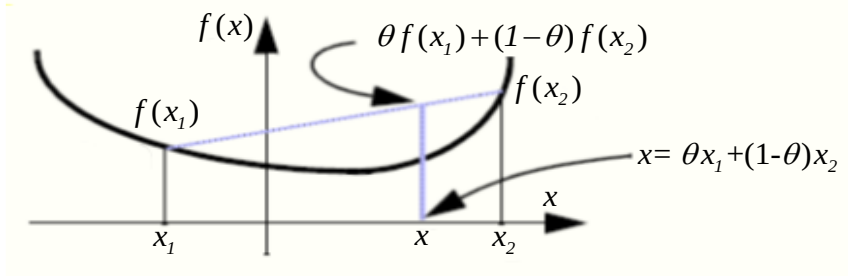
5.4.1.2 Afin ve konveks fonksiyonlar

Konveks optimizasyon uygulamasında, amaç ve kısıt fonksiyonların doğru tanımlanabilmesi için, için afin ve konveks fonksiyonların tanımı önem teşkil etmektedir.

Afin fonksiyonlar, genel olarak lineer bir fonksiyon ile sabit değerın birleşimi ile oluşur. Tek boyutlu bir afin fonksiyonun grafiği doğrusal bir çizgidir. Genel şekli 5.8 ile gösterilebilir (Boyd ve Vandenberghe, 2009).

$$f(x) = A \cdot x + b \quad (5.8)$$

Konveks fonksiyonun tanımı için, tek değişkene sahip bir $f(x)$ fonksiyonunu dikkate alalım. Şekil 5.8’de verilen herhangi iki nokta; x_1 ve x_2 , arasında bir doğru çizelim. Bu doğru, x_1x_2 arasında seçilen herhangi iki noktadan geçen doğrunun üstünde kalıyorsa, $f(x)$ fonksiyonu konvekstir.



Şekil 5.8 : Konveks fonksiyon (Kaymaz, 2011).

Tek değişkenli bir fonksiyonda bu durumu belirlemek kolay olmasına rağmen n değişkenli bir fonksiyonun konveksliği, o fonksiyonun Hessian matrisinin, S setinin bütün noktalarında pozitif yarı tanımlı veya pozitif tanımlı olmasına bağlıdır (Kaymaz, 2011).

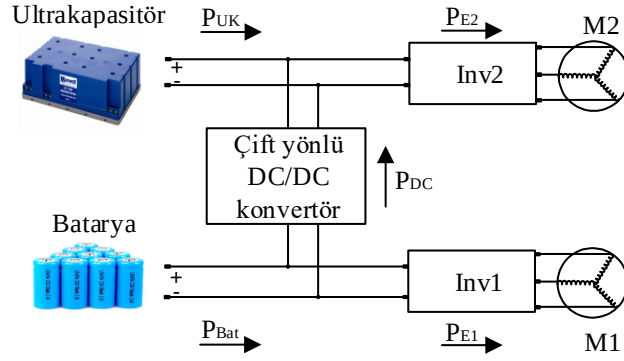
5.4.1.3 Optimizasyon probleminin konveks olarak tanımlanması

Optimizasyon probleminin konveks olarak tanımlanabilmesi için öncelikle amaç ve kısıt fonksiyonları; f_0 ve f_i , $i = 1, \dots, m$ konveks olmalıdır. Fonksiyonların konveksliğinin tanımlanmasında şu hususlara dikkat edilebilir (Kaymaz, 2011):

- Bir fonksiyonun Hessian matrisi pozitif veya yarı pozitif tanımlı ise o fonksiyon konvekstir.
- Lineer eşitlik veya eşitsizlik kısıtlayıcı fonksiyonları, optimizasyon problem için daima konveks alan tanımlar.
- Nonlineer eşitlik kısıtlayıcı fonksiyonlar daima konveks olmaya alan tanımlar.
- Bir konveks programlama problemi için, lokal minimum aynı zamanda global minimumdur.

5.4.2 Batarya/UK HEDS optimizasyonu

İki hareket motoruna sahip batarya/UK hibrit enerji depolama sistemine sahip topoloji Şekil 5.4 ile verilmiştir. Topolojide verilen birimlerin güç akış yönleri zaman bağlı olarak değişim göstermektedir. İlerleme modundaki operasyonların büyük bir çoğunluğunda, güç akış yönleri Şekil 5.9'da gösterildiği şekildedir.



Şekil 5.9 : Batarya/UK Hibrit enerji depolama sisteminden, elektrik motorlarına doğru güç akışı (Yavasoglu ve diğ., 2015a).

Burada, P_{DC} DC/DC konvertörün gücü, P_{UK} UK'ün gücü ve P_{Bat} bataryanın gücüdür. İnvertör-1 ve invertör-2 için giriş güçleri P_{E1} ve P_{E2} ile verilmiştir.

Bu topolojide batarya ana enerji depolama birimidir. UK'ün enerji depolama sistemindeki görevi ise anlık güç taleplerini karşılayarak, batarya gücündeki dalgalanmayı ve batarya gücünün genliğini azaltmaktadır. Bu topolojide güç paylaşım optimizasyonu bataryanın ömrünü uzatmaya yönelik tasarlanmıştır. Bataryanın çevrim ömrünü uzatmak için, batarya gücünün genliğini ve salınımını azaltacak amaç fonksiyonu (5.9) ile belirlenmiştir (Yavasoglu ve diğ., 2015b),

$$\min \int a \sum |P_{Bat}(k)| + b \sum (P_{Bat}(k) - P_{Bat}(k-1))^2 \quad (5.9)$$

Bu optimizasyon probleminde kısıtlayıcı fonksiyonlar ise (5.10) - (5.15) ile verilmiştir (Yavasoglu ve diğ., 2015b);

$$P_{Bat}(k) - P_{DC}(k) = P_{E1}(k) \quad (5.10)$$

$$P_{UC}(k) + P_{DC}(k) = P_{E2}(k) \quad (5.11)$$

$$E_{UC}^{min} \leq E_{UC}(k-1) - P_{UC}(k)\Delta T \leq E_{UC}^{max} \quad (5.12)$$

$$P_{Bat}^{min} \leq P_{Bat}(k) \leq P_{Bat}^{max} \quad (5.13)$$

$$P_{UC}^{min} \leq P_{UC}(k) \leq P_{UC}^{max} \quad (5.14)$$

$$P_{DC}^{min} \leq P_{DC}(k) \leq P_{DC}^{max} \quad (5.15)$$

Burada, P_{Bat}^{max} , P_{Bat}^{min} , P_{UK}^{max} ve P_{UK}^{min} , ise sırası ile batarya ve UK'ün maksimum deşarj ve şarj güçleridir. P_{DC}^{max} DC Bara-1' den DC Bara-2 ye doğru konvertörden geçen maksimum gücü ve P_{DC}^{min} ise, konvertören geçece aksi yöndeki maksimum gücü ifade

eder. Burada ifade edilmelidir ki, çift yönlü güç akışından dolayı, P_{DC} , P_{UK} ve P_{Bat} güç değerleri negatif veya pozitif değerler olabilir.

(5.9)' da verilen amaç fonksiyonu iki fonksiyondan oluşmaktadır. Bu fonksiyonlardan biri batarya gücünün genliğini, diğeri ise batarya gücündeki dalgalanmayı azaltmayı hedeflemektedir. $0 \leq i_1 \leq 1$ ve $0 \leq i_2 \leq 1$ olmak üzere, a ve b bu iki fonksiyonun ağırlıkları olup (5.16) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$a = \frac{i_1}{P_{Bat}^{max}}, \quad b = \frac{i_2}{P_{Bat,diff}^{max}} \quad (5.16)$$

Burada, $P_{Bat,diff}^{max}$ maksimum müsaade edilen batarya gücündeki değişimdir. Bu şekilde iki amaç fonksiyonu normalleştirilmiştir.

Bu optimizasyon problemini konveks optimizasyon yöntemi ile çözebilmek için amaç ve kısıt fonksiyonlarının da konveks olması gerekmektedir.

Öncelikle amaç fonksiyonunun yapısını incelersek, bataryanın çevrim ömrünü uzatmak için; batarya gücünün genliğini ve batarya gücünün dalgalanmasını minimize etmek amacıyla (5.17)' da verildiği gibi iki ayrı fonksiyonun birleşiminden oluştuğunu görebiliriz.

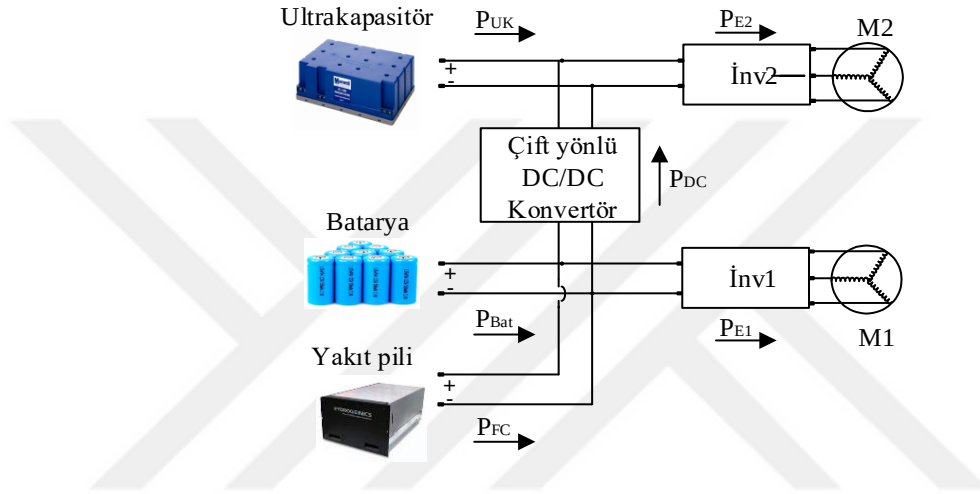
$$\min \underbrace{a \sum |P_{Bat}(k)|}_{f_1} + \underbrace{b \sum (P_{Bat}(k) - P_{Bat}(k-1))^2}_{f_2} \quad (5.17)$$

Burada f_1 fonksiyonu mutlak değer fonksiyonudur. Temel eşitsizlik kuramlarından biri olan üçgen eşitsizliğine göre, mutlak değer fonksiyonları her zaman konveks bir fonksiyonu ifade eder (Mitrinovic ve diğ., 1993). f_2 ise $f(x)=x^2$ yapısında ikinci dereceden bir fonksiyondur. Böyle bir fonksiyonun ikinci dereceden türevi; (f_2'') sıfırdan büyüktür ve sabit pozitif bir değer alır. Bu nedenle, f_2 kesinlikle konveks bir fonksiyondur (Mitrinovic, 1970). İki konveks fonksiyonun toplamı yine bir konveks fonksiyonu verdiği için (Cui, 2001), formüle edilen amaç fonksiyonu konvekstir.

Kısıtlayıcı fonksiyonların yapılarını incelediğimizde (5.10) ve (5.11)'in doğrusal (afin) eşitlikler olduğunu görüyoruz. (5.12) – (5.14)' verilen eşitsizlikler ise lineer yapıdadır. Dolayısıyla (5.10) - (5.14) ile verilen kısıtlayıcı fonksiyonlar konveks yapıdadır ve bu optimizasyon problemi konveks optimizasyon yöntemi ile çözülebilir.

5.4.3 Batarya/UK/YP HEDS optimizasyonu

İki hareket motoruna sahip batarya/UK/YP hibrit enerji depolama sistemine sahip topoloji Şekil 5.5 ile verilmiştir. Topolojide yakıt piline ait güç akışı tek yönlü olup, yakıt pilinden DC-baraya doğrudur. Verilen diğer birimlerin güç değerleri ise, zaman bağlı olarak negatif veya pozitif polaritede olabilmekte, dolayısıyla güç akış yönleri zamana bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. İlerleme modundaki operasyonların büyük bir çoğunluğunda, batarya/UK/YP topolojisine ait güç akış yönü Yakıt pilinin güç indisi P_{FC} olmak üzere Şekil 5.10'da gösterildiği şekildedir.



Şekil 5.10 : Batarya/UK/YP hibrit enerji depolama sisteminden, elektrik motorlarına doğru güç akışı.

Bu yapıda batarya, batarya/UK HEDS topolojisinde olduğu gibi yine ana enerji depolama birimi görevini üstlenmektedir. UK ise anlık güçleri karşılayacak bir tampon birim, yakıt pili ise mesafe arttırıcı olarak ihtiyaç oldukça en verimli olduğu bölgede sisteme sürekli enerji sağlamaktadır.

Bu topolojide güç paylaşım optimizasyonunda amaç, aracın menziline ve enerji depolama sisteminin verimini arttırmak, bataryanın çevrim ömrünü uzatmak olarak belirlenmiştir. Optimizasyon problemi, batarya, UK ve YP açısından üç ayrı kısımdan oluşmuştur.

Bataryanın çevrim ömrünü arttırmak için, bataryanın gücünün genliğini ve değişimini azaltmaya yönelik (5.18) ile verildiği gibi bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur.

$$\min \int a |P_{bat}(t)| + b(P_{bat}(t) - P_{bat}(t - 1))^2 \quad (5.18)$$

a ve b amaç fonksiyonun ağırlıkları olup (5.16) eşitliği ile ifade edildiği gibidir.

Diğer yandan yakıt pilinin, hibrit enerji depolama sistemi içerisinde güç seviyesi, bataryanın şarj seviyesi ve yakıt pilinin verim-güç haritası temel alınarak optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bataryanın şarj seviyesi düşük olmadığı sürece yakıt pili verimli olduğu bölgelerde çalışmayı seçecek, batarya şarjı düştükçe yakıt pili verimli bölgelerde çalışmaktan ziyade, bataryaya yardımcı olmaya çalışacaktır. Bataryanın şarj seviyesine göre yakıt pilinin referans güç değeri (5.19) ile verildiği gibi hesaplanabilir.

$$P_{FC}^{ref}(t) = \frac{(P_{FC}^{min} - P_{FC}^{max})}{(SoC_{Bat}^{max} \cdot (0.8))} (SoC_{Bat}(t) - (SoC_{Bat}^{max} \cdot (0.2))) + P_{FC}^{max} \quad (5.19)$$

Burada , $P_{FC}^{ref}(t)$, P_{FC}^{min} , P_{FC}^{max} , sırasıyla yakıt pili için referans güç değerini, yakıt pilinin minimum ve maksimum güç değerlerini belirtmektedir. $SoC_{Bat}(t)$ ve SoC_{Bat}^{max} sırasıyla bataryanın anlık şarj seviyesini ve maksimum şarj seviyesini belirtmektedir. Bataryanın şarj değeri minimum

Yakıt pilinde kayıp güç değeri, $P_{FC,kayıp}(t)$, (3.49) ile verilen verim fonksiyonuna baz alınarak (5.22) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$P_{FC,kayıp}(t) = P_{FC}(t) \cdot (1 - \delta \cdot \frac{P_{FC}(t)}{P_{FC,nom}} + \xi) \quad (5.20)$$

Yakıt pili için minimize edilmesi istenen amaç fonksiyonu (5.19) ve (5.20) eşitlikleri kullanılarak (5.21) ile ifade edilebilir.

$$\min \int c \cdot |P_{FC}^{ref}(t) - P_{FC}(t)| + d \cdot P_{FC,kayıp}(t) \quad (5.21)$$

Burada, $0 \leq i_4 \leq 1$, $0 \leq i_5 \leq 1$ ve $P_{FC,kayıp}^{max}$, yakıt pilindeki maksimum kayıp güç olmak üzere, $d = \frac{i_4}{P_{FC,nom}}$ ve $e = \frac{i_5}{P_{FC,kayıp}^{max}}$ (5.21) ile verilen amaç fonksiyonuna ait ağırlık katsayılarıdır. Nihai olarak, batarya, UK ve YP hibrit enerji depolama sistemi için amaç fonksiyonu (5.18) ve (5.21) ifadeleri kullanarak (5.22) ile ifade edilmiştir.

$$\min \int a|P_{Bat}(t)| + b(P_{Bat}(t) - P_{Bat}(t-1))^2 + c|P_{FC}^{ref}(t) - P_{FC}(t)| + dP_{FC,kayıp}(t) \quad (5.22)$$

HEDS için (5.22) ile verilen optimizasyon problemi her biri konveks olan ikinci dereceden, afin, mutlak değer ve lineer fonksiyonların birleşiminden oluşmuştur. Konveks fonksiyonların birleşimi yine bir konveks fonksiyonu vermesinden dolayı (5.22) ile verilen optimizasyon problemi de konveks optimizasyon problemidir.

Bu optimizasyon problemi için kısıtlayıcı eşitlik ve eşitsizlikler ile sunulmuştur:

$$P_{Bat}(t) + P_{FC}(t) - P_{DC}(t) = P_{E1}(t) \quad (5.23)$$

$$P_{UC}(t) + P_{DC}(t) = P_{E2}(t) \quad (5.24)$$

$$E_{UC}^{\min} \leq E_{UC}(t-1) - P_{UC}(t)\Delta T \leq E_{UC}^{\max} \quad (5.25)$$

$$P_{Bat}^{\min} \leq P_{Bat}(t) \leq P_{Bat}^{\max} \quad (5.26)$$

$$P_{UC}^{\min} \leq P_{UC}(t) \leq P_{UC}^{\max} \quad (5.27)$$

$$P_{DC}^{\min} \leq P_{DC}(t) \leq P_{DC}^{\max} \quad (5.28)$$

$$SoC_{Bat}^{\min} \leq SoC_{Bat}(t) \leq SoC_{Bat}^{\max} \quad (5.29)$$

$$0 \leq P_{FC}(t) \leq P_{FC}^{\max} \quad (5.30)$$

(5.23) – (5.30) ile verilen kısıtlayıcı eşitlik ve eşitsizlikler doğrusal formda oldukları için konvektir. (5.30) ile verilen yakıt pilinin gücüne ait kısıtlayıcı fonksiyon doğrusal bir eşitsizliktir fakat, YP'nin verimsiz olduğu, $\%0.P_{FC,nom} < P_{FC} \leq \%20.P_{FC,nom}$ aralığındaki güç değerlerinde çalışması istenmemektedir. Dolayısıyla YP, $\%0.P_{FC,nom} \leq P_{FC} \leq \%100.P_{FC,nom}$ aralığında, sürekli bir fonksiyon olmaktan çıkmaktadır. Bu durumda (5.30) eşitsizliği konveks olmayacaktır. Bu nedenle batarya şarjının çok yüksek olduğu periyotta yakıt pilinin devreden çıkması ve batarya şarjının düşük olduğu periyotta, YP'nin sadece verimli olduğu aralıkta çalışması için, her bir optimizasyon adımı başında (5.31) ile verilen eşitlik yardımı ile yakıt pilinin çalışma modu belirlenmiştir.

$$P_{FC}(t) = \begin{cases} 0, & SoC_{Bat}(t) \geq \%99 \\ P_{FC,nom} \leq P_{FC}(t) \leq P_{FC,nom} \cdot 0.2 & SoC_{Bat}(t) < \%99 \end{cases} \quad (5.31)$$



6. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

6.1 Elektrikli Araçlarda Eşdeğer İki Motor Kullanımının İncelenmesi

Elektrikli araçlarda eşdeğer iki elektrik motorunun ve sadece tek bir elektrik motorunun kullanılmasının araştırılması için, Aragonne ulusal laboratuvarı (ANL)'nın geliştirmiş olduğu, Autonomie yazılımı kütüphanesi verilerinden yararlanılarak, özellikleri Çizelge 6.1'de sunulmuş olan elektrik motorları kullanılmıştır. Eşdeğer iki hareket motoru kullanımının getireceği verim kazanıcı, UDDS, IDC, NEDC ve US06 sürüş çevrimleri kullanılarak araştırılmıştır.

Çizelge 6.1 : Hareket motorlarının özellikleri.

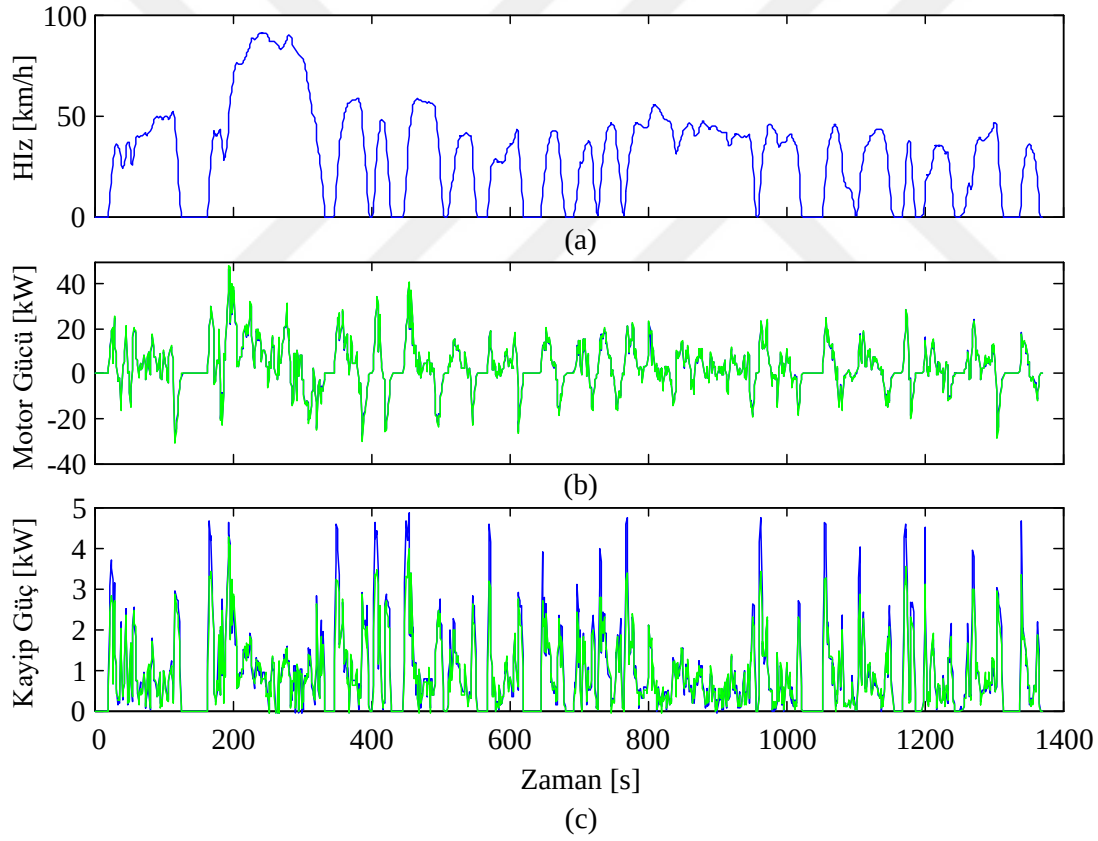
Motor Modeli	Honda	Lexus
Sürekli gücü [kW]	49	110
Maksimum Tork [N.m]	279	300
Atalet [kg.m ²]	0.05	0.02
Hız [rpm]	8500	10000
Maksimum verim	%96.4	%96
Ağırlık [kg]	45	41
Kontrolör ağırlığı [kg]	15	17.9
Toplam ağırlık [kg]	60	58.9

Bu simülasyon çalışmalarında motor sürücülerinin sabit %97'lik verim ile çalıştıkları kabul edilmiştir (Yavasoglu ve diğ., 2015b). Honda motor kullanılarak yapılan simülasyonlarda dişli oranı, $Gr = 5.5$ ve Lexus motor kullanılarak yapılan simülasyonlarda dişli oranı, $Gr = 8.2$ 'dir. Simülasyon için kullanılan diğer araç parametreleri çizelge 6.2 ile verildiği gibidir.

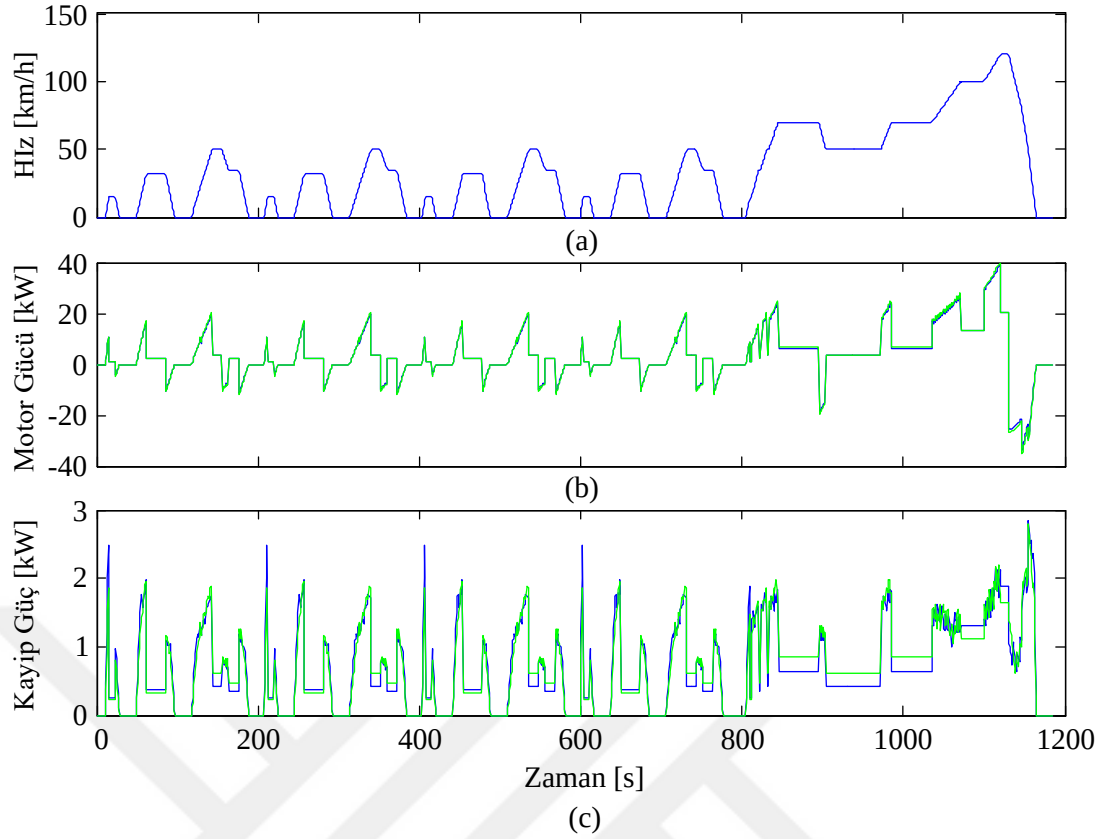
Çizelge 6.2 : Araç parametreleri.

Özellikler	Değer
Araç şase ağırlığı [kg]	1200
Aracın EDS ağırlığı [kg]	366.9
Aracın ön yüzey alanı [m ²]	2.13
Aerodinamik sürtünme katsayısı	0.24
Tekerlek yarı çapı [m]	0.34

Honda sabit mıknatıslı elektrik motoru ile yapılan tek ve eşdeğer çift motor topolojisi için elde edilen toplam motor gücü ve kayıp güçler Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : UDDS sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Honda hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) UDDS sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.



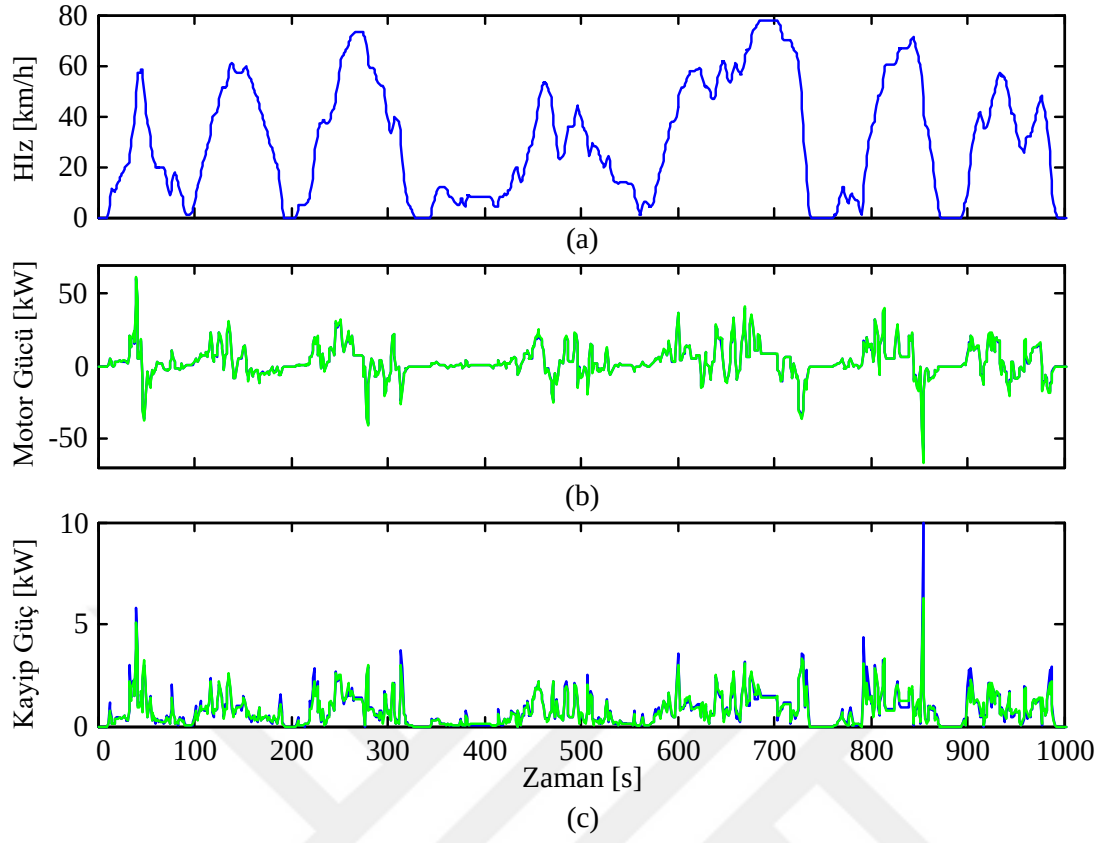
Şekil 6.2 : NEDC sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Honda hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) NEDC sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.

Honda elektrik motoru kullanılarak yapılan tek ve eşdeğer çift elektrik motoruna sahip topolojilerin verim açısından karşılaştırılması Çizelge 6.3 ile sunulmuştur.

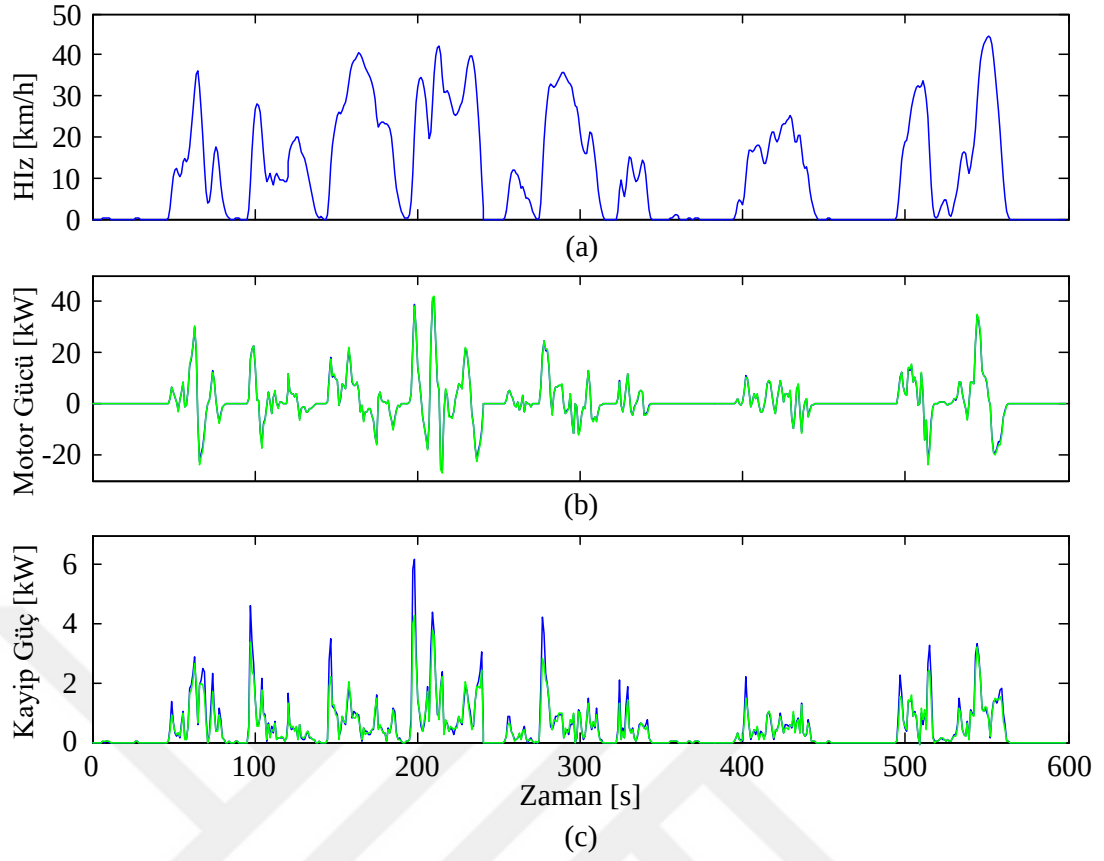
Çizelge 6.3 : UDDS ve NEDC sürüş çevrimleri için tek ve eşdeğer çift hareket motoru topolojilerinin verim açısından karşılaştırılması.

Çevrim Adı	Tek Motor			Çift Motor		
	İlerleme Verimi	Rejeneratif Verim	Toplam Verim	İlerleme Verimi	Rejeneratif Verim	Toplam Verim
UDDS	87.0%	88.3%	87.4%	88.3%	89.7%	88.8%
NEDC	89.4%	91.0%	89.9%	89.3%	91.8%	90.0%

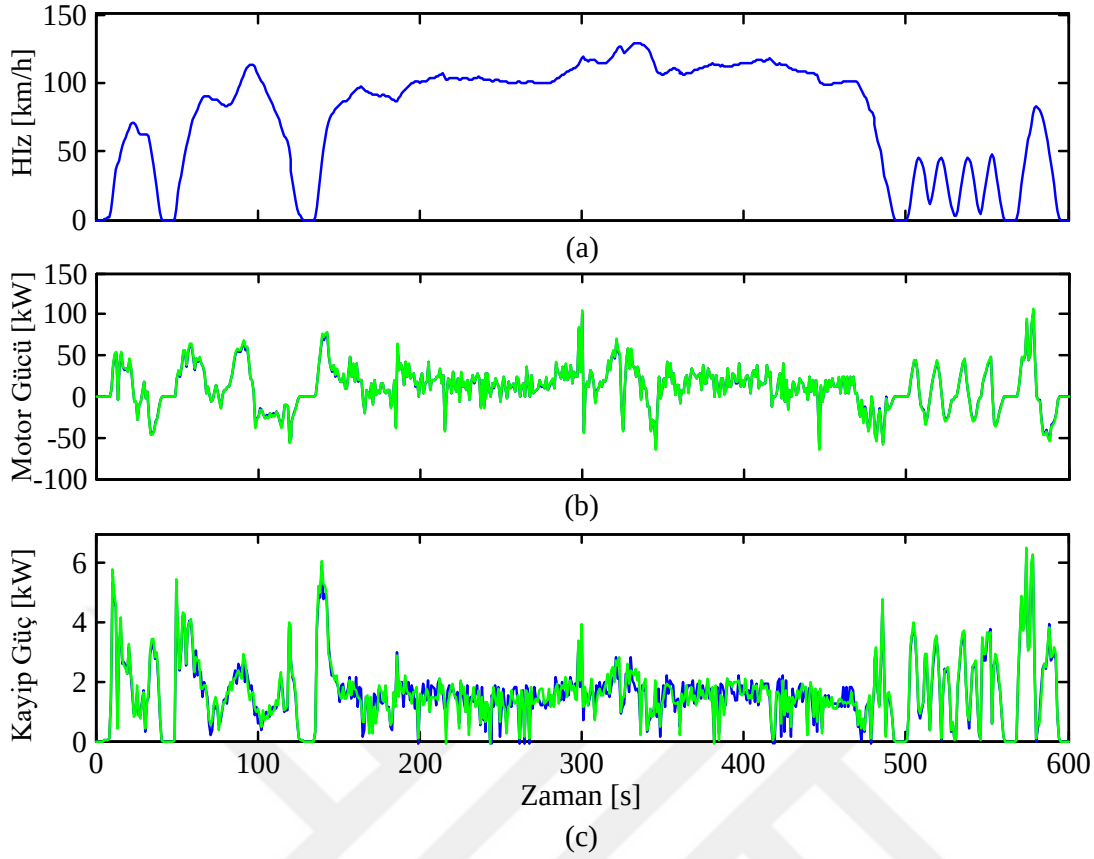
İstanbul sürüş çevrimi, NYCC ve US06 çevrimleri için Lexus elektrik motoru kullanılarak yapılan tek ve eşdeğer çift motor kullanımına ait motor güçleri ve kayıp motor gücü grafikleri Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : IDC sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Lexus hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) IDC sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.



Şekil 6.4 : NYCC sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Lexus hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) NYCC sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.



Şekil 6.5 : US06 sürüş çevrimi için, tek ve eşdeğer iki Lexus hareket motoru kullanımının karşılaştırılması; (a) US06 sürüş çevrimi hız profili. (b) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor güçleri. (c) Tek (mavi) ve çift (yeşil) motor topolojisi için kayıp motor güçleri.

Lexus elektrik motoru kullanılarak yapılan tek ve eşdeğer çift elektrik motoruna sahip topolojilerin verim açısından karşılaştırılması Çizelge 6.4 ile sunulmuştur.

Çizelge 6.4 : IDC, NYCC ve US06 sürüş çevrimleri için tek ve eşdeğer çift hareket motoru topolojilerinin, verim açısından karşılaştırılması.

Çevrim Adı	Tek Motor			Çift Motor		
	İlerleme Verimi	Rejeneratif Verim	Toplam Verim	İlerleme Verimi	Rejeneratif Verim	Toplam Verim
IDC	88.6%	90.8%	89.4%	89.1%	91.6%	90.0%
NYCC	87.0%	90.0%	88.2%	88.5%	91.1%	89.6%
US06	92.1%	93.9%	92.6%	92.3%	93.8%	92.7%

Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4, eşdeğer iki elektrik motoruna sahip topolojinin, tek motor kullanılan topolojiye nazaran, daha iyi bir verim sağlayacağını göstermektedir. Fakat bu verim artışı sınırlıdır ve seçilen örnekler için en fazla %1.4 verim artışı elde

edilmiştir. İki hareket motoruna sahip topolojide kullanılan elektrik motorları tork ve hız karakteristiği açısından, birbirini tamamlayıcı özelliğe sahip seçilerek, daha yüksek verim artışları elde edilebilir.

6.2 Batarya/UK HEDS Topolojisi İçin Birbirini Tamamlayıcı Özellikte Tork ve Hız Karakteristiğine Sahip İki Hareket Motoru Kullanımının İncelenmesi

Simülasyon çalışmasında Şekil 5.4 ile verilen topoloji baz alınmıştır. Enerji depolama sisteminde, ana enerji depolama birimi olarak, 28,2 kWh enerji kapasitene sahip, K2 enerji firmasının 22650 modeli LiFPO4 batarya verileri kullanılmıştır. Maxwell Firmasının BCAP1500 modeline ait veriler kullanılarak, UK modellenmiştir. Topolojide kullanılan EDS sistemine ait batarya ve UK özellikleri Çizelge 6.5 ile sunulmuştur.

Çizelge 6.5 : Batarya ve UK özellikleri (Yavaşoğlu ve diğ., 2015a).

Özellikler	Batarya	UK
Seri hücre sayısı	94	222
Paralel kol sayısı	36	0
Nominal hücre gerilimi [V]	3.2	2.7
Maksimum hücre deşarj akımı [A]	42	140
Maksimum darbe deşarj akımı [A]	150	1200
Nominal kapasite [Ah]	2.6	-
Anılan kapasite [F]	-	1500
Hücre ağırlığı [kg]	0.0825	0.28

UK'ün Çizelge 6.5 ile verilen nominal gerilim değeri, şarj değeri ile orantılı olarak zamana bağlı değişim göstermektedir. Bataryanın nominal gerilim değeri UK'e göre daha düşük seviyededir. Bataryanın şarj seviyesinin %100 ila %20 arasında değiştiği kabul edilerek, bataryanın gerilim değeri (3.23) ile verilen SoC_{Bat} 'a bağlı gerilim modeli ile belirlenmiştir. Batarya ve Ultrakapasitörün ağırlık hesaplamalarında paketleme faktörü 1.2 olarak alınmıştır (Sadoun ve diğ. 2012). Topolojide UK ve batarya arasında kullanılan çift yönlü buck/boost konvertörün verimi her iki yön için %98 olarak kabul edilmiş, (Pavlovsky ve diğ., 2014). Ağırlığı ise 30kg (Hajian ve diğ., 2014) olarak hesaplamalarda kullanılmıştır.

Bu bölümde, elektrikli araçlarda, hareketi sağlamak üzere, hız ve tork bakımından birbirini tamamlayıcı karakteristiğine sahip, iki motor kullanımı detaylı bir şekilde incelenmiştir. İki motor kullanımının, tek motor kullanımı ile karşılaştırılması amacıyla, üç ayrı motor konfigürasyonu seçilmiş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tek ve iki motora sahip topolojilerin karşılaştırılmasında, Aragonne ulusal laboratuvarı (ANL)'nın geliştirmiş olduğu, Autonomi yazılımı kütüphanesi kullanılarak, özellikleri Çizelge 6.6'de verilmiş olan elektrik motorları seçilmiştir.

Çizelge 6.6 : Hareket motorlarının özellikleri (Yavaşoğlu ve diğ., 2015a).

Motor Modeli	Camry MG1 (M1)	UQM 125 (M2)	UQM 150 (M3)	Lexus (M4)
Sürekli gücü [kW]	55	45	100	110
Maksimum Tork [N.m]	270	300	650	300
Atalet [kg.m ²]	0.0226	0.02	0.02	0.02
Hız [rpm]	14200	8150	4500	10000
Maksimum verim	%96	%94.3	%95.5	%96
Ağırlık [kg]	20	41	91	41
Kontrolör ağırlığı [kg]	5	15.9	15.9	17.9
Toplam ağırlık [kg]	25	56.9	106.9	58.9

Hareket sisteminde iki motor bulunan topolojilerde, verim haritaları sırasıyla, Şekil 4.8a ve Şekil 4.8b'de gösterilmiş olan M1 ve M2 motorları aynı anda beraber kullanılmıştır. Hareket sisteminde tek bir motor bulunan topoloji için, M3 veya M4 motorlarından biri kullanılmıştır. Adil bir karşılaştırma yapmak amacıyla, M1 ve M2 elektrik motorlarının toplam güç seviyesi ile tek motor olarak kullanılan M3 veya M4 elektrik motorlarının güç seviyeleri aynıdır. Tek motor topolojisi için iki ayrı motorun incelenmesinin sebebi, aynı güç seviyesinde, fakat farklı karakteristiklerdeki motorları değerlendirmektir. Özellikleri Çizelge 6.6 ile verilmiş olan M3; yüksek tork altında çalışmak için uygun bir yapıya sahip iken, M4 ise yüksek hız değerleri altında çalışmak için uygun bir motor tipidir.

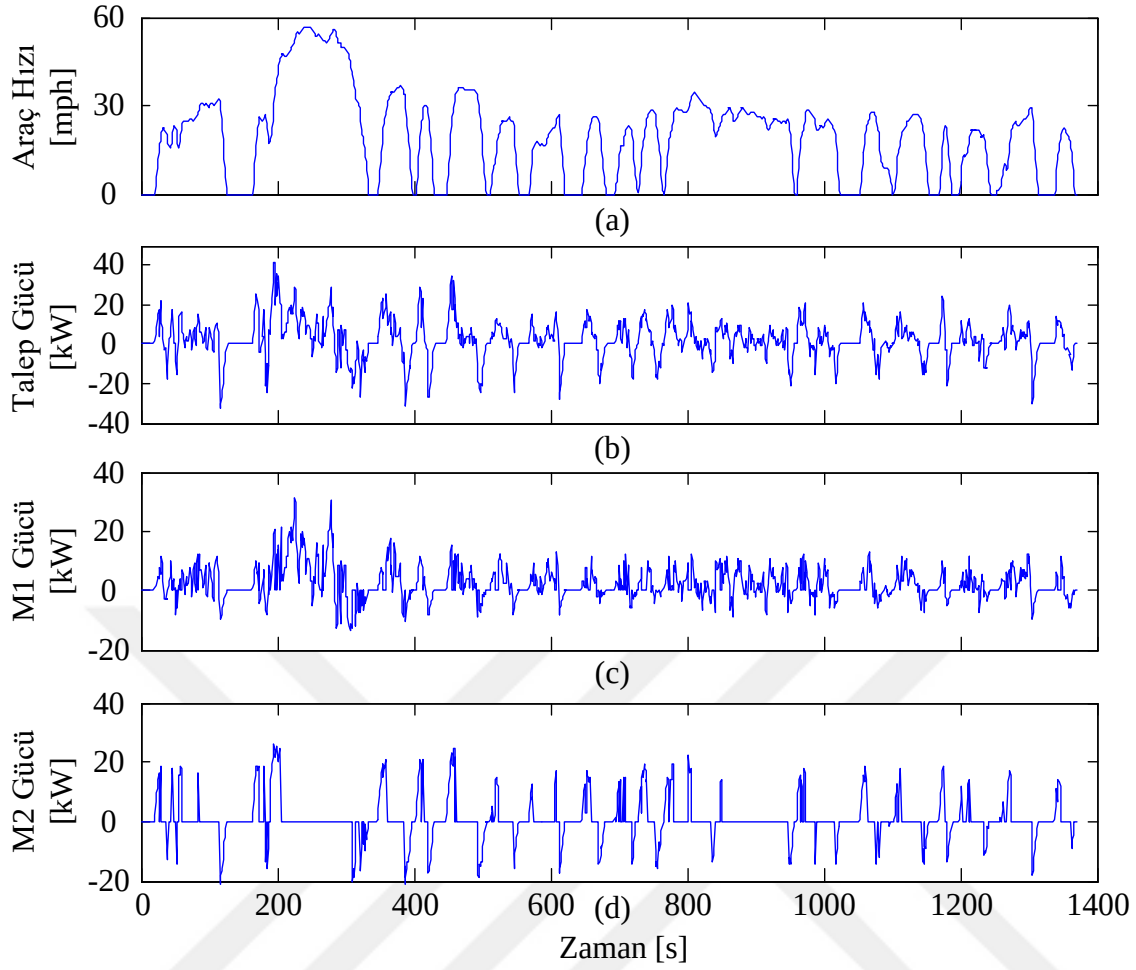
Farklı EDS topolojilerinin kullanımından kaynaklanan etkilerin incelenmesi amacıyla, sadece bataryadan oluşan enerji depolama sistemi ve batarya/UK den oluşan hibrit enerji depolama sistemi de karşılaştırılmak istenmiştir. Böylece enerji depolama

sistemi ve motor topolojisi açısından altı ayrı çalışma konusu incelenmiştir. Bu çalışılan durumları ve güç iletim sisteminin toplam ağırlıkları Çizelge 6.7’ de listelenmiştir.

Çizelge 6.7 : Enerji depolama sistemi ve hareket motorları için ağırlık dağılımı (Yavaşoğlu ve diğ., 2015a).

Durum	Enerji Depolama Sistemi	Motor Konfigurasyonu	Motor & invertör ağırlığı [kg]	EDS Ağırlığı [kg]	Toplam Araç Ağırlığı [kg]
1	Batarya	M3	106.9	324.9	1631.8
2	Batarya	M4	58.9	324.9	1583.8
3	Batarya	M1 & M2	81.9	324.9	1606.8
4	Batarya /UK	M3	106.9	399.5	1736.4
5	Batarya /UK	M4	58.9	399.5	1688.4
6	Batarya /UK	M1 & M2	81.9	399.5	1711.4

Durum 3 ve durum 6 da, güç iletimi sisteminde iki hareket motoruna sahip topoloji yer almaktadır. Durum 3 için simülasyon sonuçları Şekil 6.3’ ile sunulmuştur.

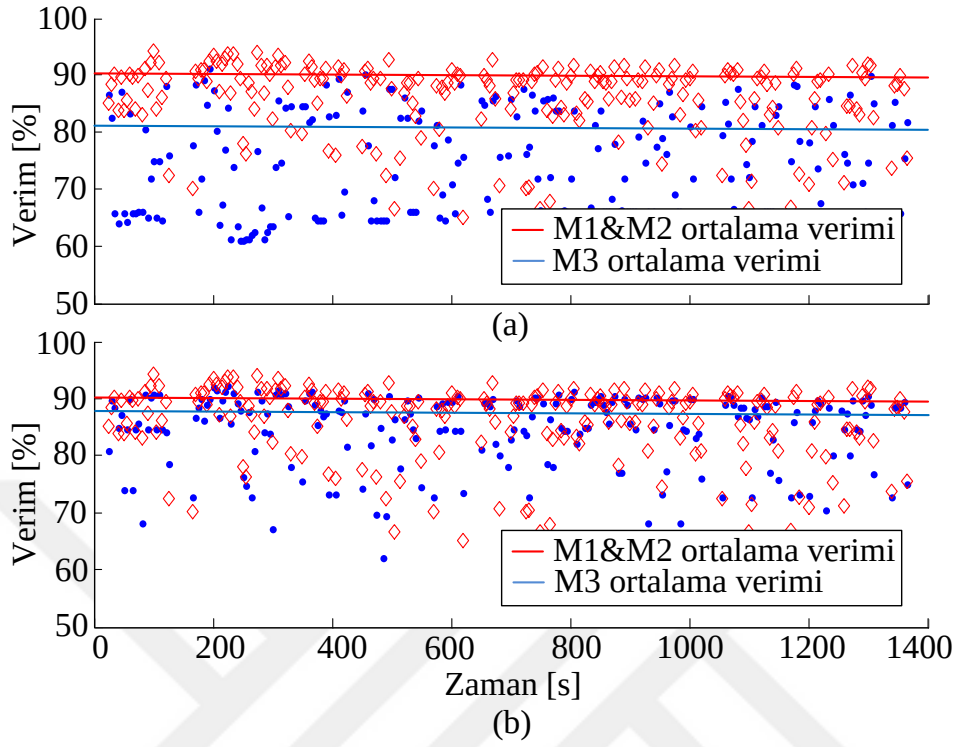


Şekil 6.6 : Durum 3 simülasyon sonuçları; (a) UDDS hız profili; (b) Talep gücü; (c) M1 (Camry) gücü; (d) M2 (UQM125) gücü.

Şekil 6.6’da gösterildiği gibi, toplam verimi arttırmak için, M1 tek başına düşük ve orta güç taleplerini karşılarken, M1 ve M2 beraber yüksek güç taleplerini karşılamaktadır. Tek motor ve çift motor topolojilerinin verimini karşılaştırmak için, durum1 den durum3’ e kadar verim sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Çizelge 6.8 de özetlenerek sunulmuştur.

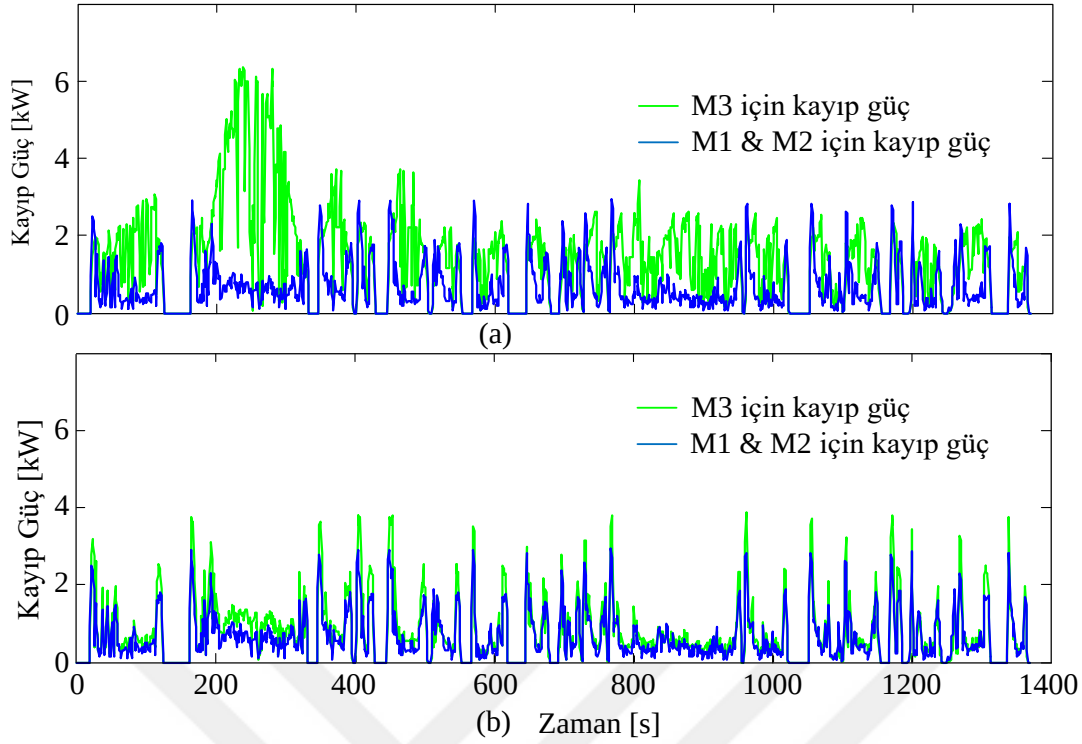
Tek motorlu yapı için seçilen M3 ve M4 ‘ün ulaşabildikleri maksimum verim değerleri UDDS sürüş çevrimi için %96’ dır. Oysaki çift motorlu yapı için seçilen M1 yine çalışma sırasında %96 verime kadar ulaşabilirken, M2’ nin ulaşabildiği maksimum verim değeri ise %94 ile sınırlıdır. Bu tek ve çift motorlu topolojilerin karşılaştırılması esnasında, çift motorlu yapı için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Buna rağmen, UDDS sürüş çevrimi altında ve sadece batarya enerji depolama birimine sahip araç için yapılan simülasyon çalışmaları bize göstermektedir ki, ilerleme modunda %2 ile %11 arası, rejeneratif modda ise %2 ile %5 arası çift motorlu topoloji daha yüksek verim

sağlamaktadır. UDDS sürüş çevrimi altında modellenen elektrikli araca ait tahrik sisteminin verim sonuçları Şekil 6.7 ile incelenebilir.



Şekil 6.7 : UDDS sürüş çevrimi altında güç iletim sistemi verim karşılaştırması; (a) Sadece M3 motoru (mavi); iki motor kullanımı (M1 ve M2) (kırmızı); (b) Sadece M4 (mavi); iki motor kullanımı (M1 ve M2) (kırmızı) (Yavaşoğlu ve diğ., 2015a).

Önerilen güç paylaşım kontrol stratejisi ile motorlardaki güç kaybı, tek motor topolojisinde M3 (UQM150) kullanıldığında %55.61, M4 (Lexus) kullanıldığında ise %18.35 azaltılmıştır. Motorlardaki tek ve iki motor kullanılan topolojiler için, güç aktarım organlarındaki güç kayıpları Şekil 6.8 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.8 : Tek motorlu ve çift motorlu topolojilerde, motorlardaki kayıp güçlerin karşılaştırılması.

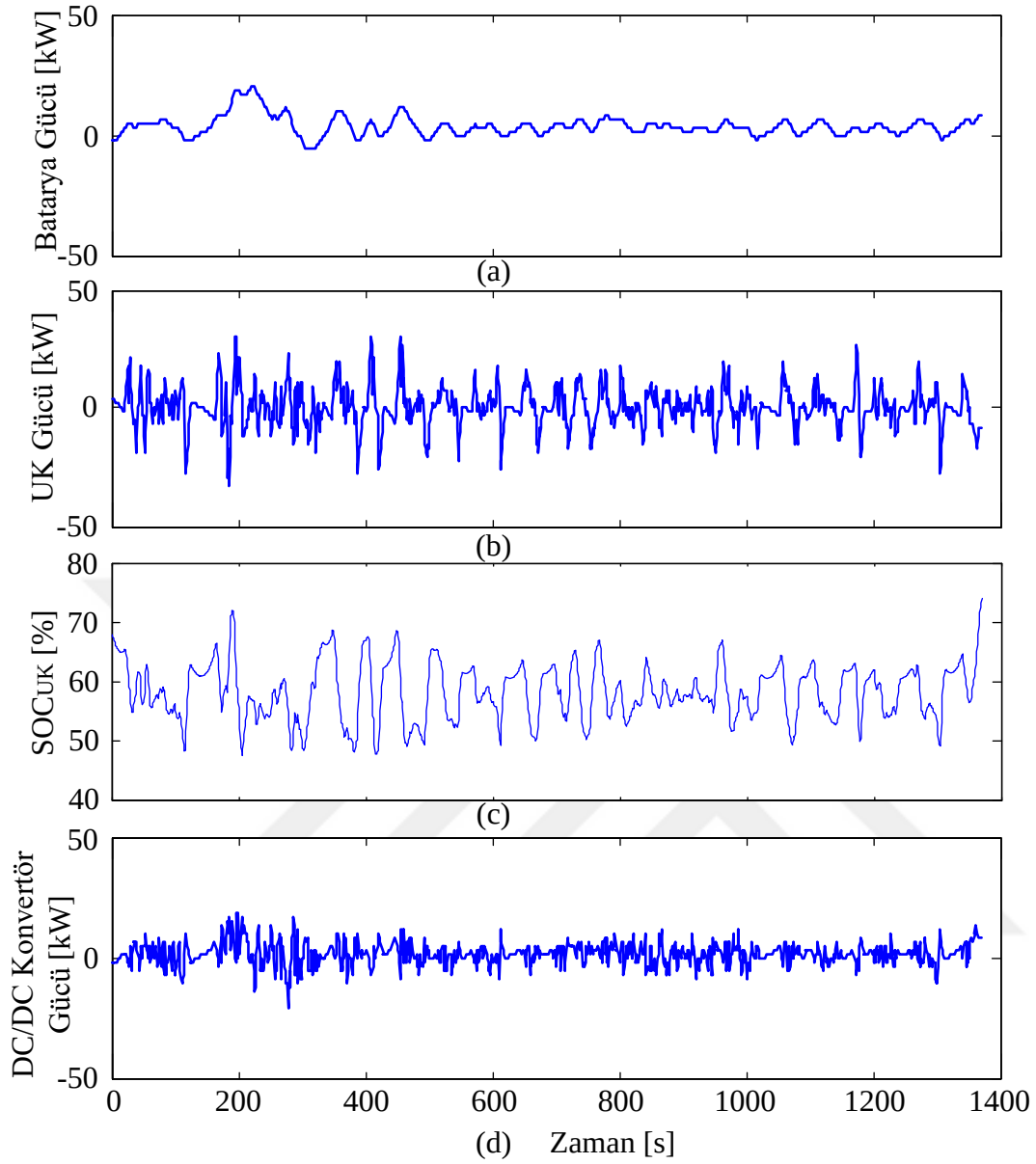
Farklı hareket motorlarının kullanımı, toplam güç iletim sisteminin ağırlığını Çizelge 6.7 ile verildiği gibi değiştirmektedir. Aracın toplam ağırlığı ile aracın tekrar şarj edilmeden gidebileceği toplam mesafe, birbirine ters orantılıdır. Çift motorlu topolojinin kullanıldığı durum3, Tek motorlu topolojiye sahip durum1' e göre 23 kg daha hafif ve gene tek motorlu topolojiye sahip durum2 ye göre 25kg daha ağırdır. Önerilen güç paylaşım kontrol stratejisi ile iki hareket motoruna sahip güç iletim topolojisi, Çizelge 6.8 ile gösterildiği gibi tek hareket motoruna sahip topolojilere nazaran daha yüksek verim sonuçları elde etmiştir.

Çizelge 6.8 : UDDS sürüş çevrimi için, güç iletim sistemi toplam verim değerleri.

Durum	EDS	Motor Konfigürasyonu	Motor Verimi	
			İlerleme Modu	Rejen. Modu
1	Batarya	M3	80.11%	85.86%
2	Batarya	M4	89.14%	88.66%
3	Batarya	M1 & M2	91.12%	90.77%

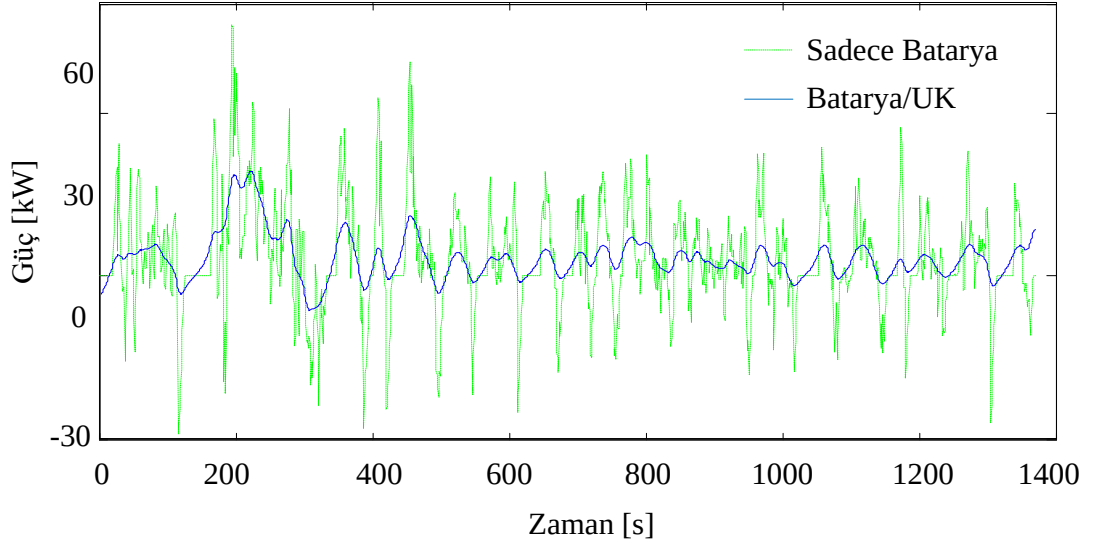
İki hareket motoruna ship topoloji kullanıldığında %4 ila %27 arasında bir verim artışı elde edilebileceği Çizelge 6.8 ile görülmektedir. Elektrikli aracın güç aktarım sisteminde elde edilen verim artışı tek bir şarj ile gidebileceği maksimum menzili de arttırabilir. Analiz edilen durumlara karşılık gelen toplam araç ağırlıkları ve menzil değerleri Çizelge 6.9 ile özetlenmiştir.

Durum 4 den durum 6 ya kadar, batarya/UK' ün oluşturduğu hibrit enerji depolama sistemi kullanılmıştır. UK'ün şarjlılık değeri başlangıç anı için %90 bataryanın ise tam dolu olduğu varsayılmıştır. Bataryanın minimum şarj değeri ise %20 ile sınırlandırılmıştır. UDDS sürüş çevrimi altında, HEDS için batarya, UK ve DC/DC konvertöre ait güç değerleri, bataryanın çevrim ömrünü uzatmayı hedefleyen (5.9) ile verilmiş olan konveks optimizasyon probleminin, matlab CVX toolbox'ı kullanarak çözümü ile elde edilmiştir. Durum 6 için simülasyon sonuçları Şekil 6.9 ile gösterilmiştir. Şekil 6.9' da görüldüğü gibi, sürüş çevrimi esnasında DC/DC konvertörün maksimum gücü 35kW' ın altındadır. Batarya ana yükleri karşılarken, UK bir tampon görevi görerek, talep gücündeki ani değişimleri karşılamaktadır.



Şekil 6.9 : HEDS için güç paylaşımı (a) Batarya Gücü; (b) UK Gücü; (c) SOC_{UK}; (d) DC/DC konvertör gücü.

Önerilen güç paylaşım stratejisi ile bataryanın gücünün genliği ve dalgalanmasının azaldığı, Şekil 6.10’ da verilen sadece batarya ve batarya/UK kullanılan topolojiler için batarya gücünün karşılaştırıldığı grafikte daha iyi görülmektedir.



Şekil 6.10 : Durum 3 ve durum 6 arasında batarya gücünün karşılaştırılması.

Batarya/UK HEDS topolojisinde, sadece batarya kullanılan enerji depolama sistemine nazaran, batarya gücünün genliği %58.4 azaltılmıştır

Bataryanın ömrünün karşılaştırılan topolojilerde nasıl değiştiğini hesaplamak için, (Yavaşoğlu ve değ., 2015a)' da verilen model kullanılmıştır. Bu modelde sıcaklık, derin deşarj (DOD) ve akım oranı (C_{rate}) dikkate alınmıştır. Aracın günlük kullanımı, ardarda 5 adet UDDS sürüş çevrimine eşdeğer olduğu varsayılarak, 60km (37.25 mil) olarak hesaplanmıştır. Bu veriler altında enerji depolama sisteminde sadece batarya olan topolojide bataryanın yıl bazında ömrü (EOL) 10.39 yıl, Batarya/UK kullanımında ise, 18.75 yıl olarak hesaplanmıştır. Böylece batarya ömründe %82,1' lik bir artış söz konusudur. Bataryanın tahmin edilen ömrü ve elektrikli aracın tek bir şarj ile gidebileceği menzil miktarı, incelenen altı durum için Çizelge 6.9' da listelenmiştir.

Çizelge 6.9 : Ağırlık, AER ve EOL açısından incelenen durumların karşılaştırılması.

Durum	EDS	Motor Konfigürasyonu	Araç ağırlığı [kg]	Menzil [km]	Batarya Ömrü [Yıl]
1	Batarya	M3	1631.8	181.6	9.44
2	Batarya	M4	1583.8	222.5	10.42
3	Batarya	M1 & M2	1606.8	231.3	10.39
4	Batarya /UK	M3	1736.4	180.3	15.31
5	Batarya /UK	M4	1688.4	212.4	17.78
6	Batarya /UK	M1 & M2	1711.4	220.6	18.75

6.3 Batarya/UK/YP HEDS Topolojisi İçin Birbirini Tamamlayıcı Özellikte Tork ve Hız Karakteristiğine Sahip İki Hareket Motoru Kullanımının İncelenmesi

Bu bölümde iki hareket motoruna sahip elektrikli bir araç için enerji depolama sisteminde yakıt pilinin kullanılması incelenmiştir. Aracın hareket sisteminde, özellikleri Çizelge 6.6 ile verilmiş olan M1 (Camry) ve M2 (UQM Powerphase 125) motor çifti kullanılmıştır. İki hareket motoruna sahip topoloji için, incelenen değişik EDS durumları Çizelge 6.10 ile gösterilmiştir.

Çizelge 6.10 : İki hareket motoruna sahip elektrikli araçlar için incelenen EDS topolojileri.

Durum	EDS yapılandırması	Toplam araç ağırlığı [kg]	Enerji açısından EDS boyutu			
			Batarya [kWh]	UK [kWh]	H2 tankı [kWh]	Toplam [kWh]
1	Batarya	1735.1	40.43	-	-	40.43
2	Batarya/UK	1741	32.73	0.5625	-	33.29
3	Batarya/UK/YP	1732.6	24.06	0.5625	83.04	107.66

Çizelge 6.10 ile sunulmuş olan EDS topolojileri, EDS ağırlıkların eşit tutulması temel alınarak oluşturulmuştur. Bu nedenle, aracın toplam ağırlığı eşit kalacak şekilde, durum1, durum2 ve durum3 ‘deki batarya boyutları birbirinden farklı seçilmiştir. Enerji depolama sisteminde; K2 enerji firmasına ait LFP26650EV tipi batarya, Maxwell firmasına ait BCAP1500 model ultrakapasitör ve Hydrogenics firmasına ait HyPM HD8 modeli baz alınarak (Barbir, 2013) çalışmada verilen genelleştirilmiş

yakıt pili modeli kullanılmıştır. Kullanılan batarya ve Ultrakapasitörün özellikleri Çizelge 6.11 ile verildiği gibidir.

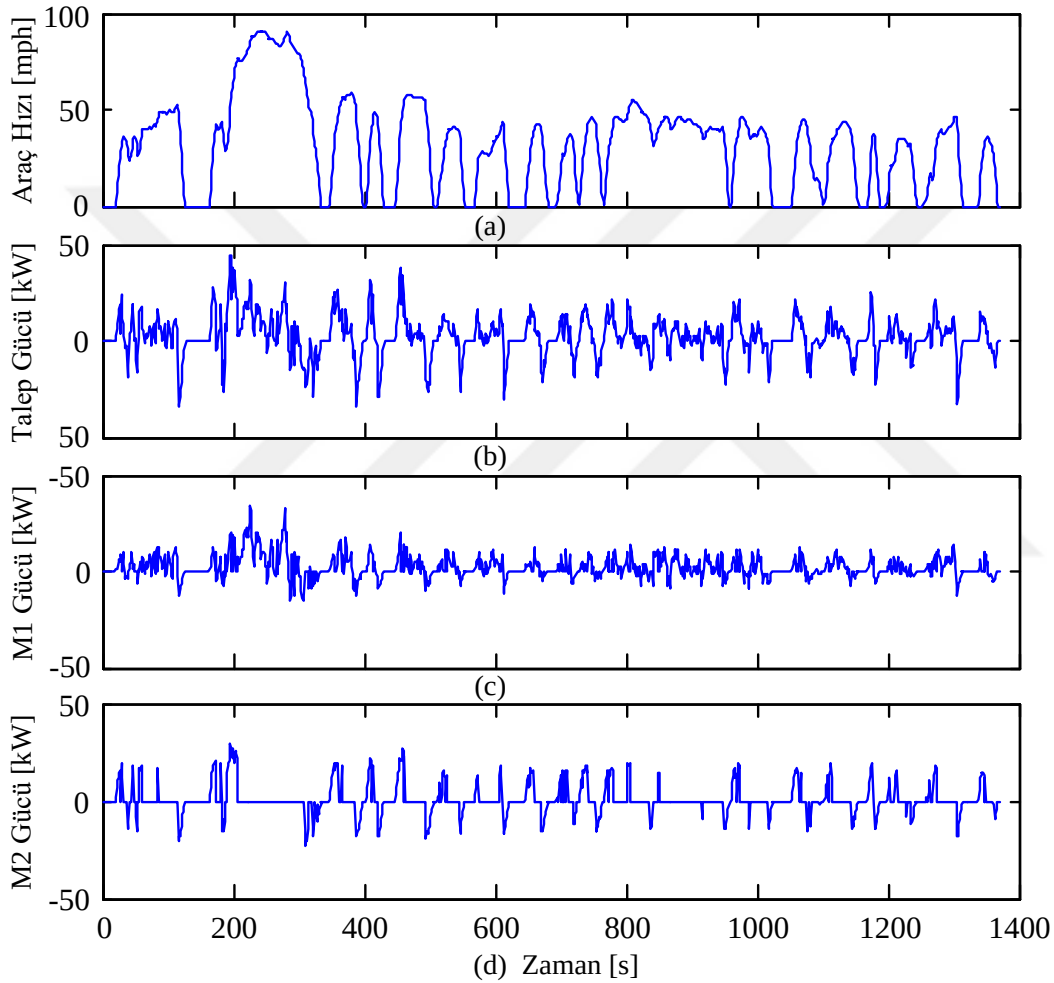
Çizelge 6.11 : Batarya/UK/YP HEDS için Batarya ve UK özellikleri
(Yavaşoğlu ve diğ., 2015a; K2 Energy. 2010b).

Özellikler	Batarya	UK
Nominal hücre gerilimi [V]	3.2	2.7
Maksimum hücre deşarj akımı [A]	12	140
Maksimum darbe deşarj akımı [A]	28	1200
Nominal kapasite [Ah]	3.2	-
Anılan kapasite [F]	-	1500
Hücre ağırlığı [kg]	0.082	0.28

Durum 1’ de batarya hücre sayısı 3948 adet olup 94 seri 43 paralel koldan oluşmaktadır. Durum 2’de 3196 batarya hücresi kullanılmış olup 94 seri ve 34 paralel koldan oluşmaktadır. Durum 3’de ise 94 seri ve 25 paralel koldan oluşan 2350 hücreli batarya modülü kullanılmıştır. Bataryanın geriliminin ve iç direncinin hesaplanmasında bölüm 3.4.1’de verilen batarya modeli kullanılmıştır. Durum 2 ve durum 3’ de kullanılan UK modülleri aynı olup 222 seri hücreden oluşmuştur. UK’e ait gerilim ve iç direnç değerleri bölüm 3.4.3 ile verilen UK modeli ile hesaplanmıştır. Batarya ve UK arasındaki DC/DC konvertörün azami gücü 40kW ve verimi %98 olarak kabul edilmiştir. Durum 3 de kullanılan yakıt pili sisteminde yakıt pili modülünün maksimum çıkış gücü 8kW ve bağlı olduğu Boost konvertörün verimi ise sabit %98 olarak kabul edilmiştir (Anzicek ve Thompson, 2005). Yakıt pilinin verimi güce bağlı bir fonksiyon olan 3.51 ile verilen eşitlik ile hesaplanmıştır. Yakıt pili sisteminde, hidrojen tankı ise 60 litre hacimde olup 700 bar basınç altında 2.494kg hidrojen depolayabilmektedir (Toyota, 2016). Dolayısıyla hidrojen tankının sağlayabileceği maksimum potansiyel enerji miktarı 83.04kWh’dır.

Bataryanın başlangıç anındaki şarj seviyesi %99 olarak kabul edilmiş ve derin deşarjın bataryanın çevrim ömrüne olan negatif etkisini azaltmak için minimum şarj seviyesi %20 ile sınırlandırılmıştır. Hidrojen tankının simülasyon başlangıcında %99 dolu olduğu ve Ultrakapasitörün başlangıç şarj değerinin %90 olduğu varsayılmıştır.

Simülasyonda kullanılan araç parametreleri; şase ağırlığı, aracın ön yüzey alanı, aracın aerodinamik sürtünme katsayısı ve tekerlek yarı çapı Çizelge 6.2 ile verilen değerlerdir. Aracın dişli çevrim oran $G_r = 5.5$ kullanılmıştır. İncelenen durumlarda araç ağırlıkları eşit olduğu için her bir durum için hesaplanan, motorlarda harcanan kayıp gücü minimuma indirecek şekilde talep gücünün paylaştırıldığı, uygun değer motor güçleri de neredeyse aynıdır. UDDS şehir içi sürüş çevrimi için M1 ve M2 motorlarına ait optimum motor güçleri Şekil 6.11’ de verildiği gibi hesaplanmıştır.

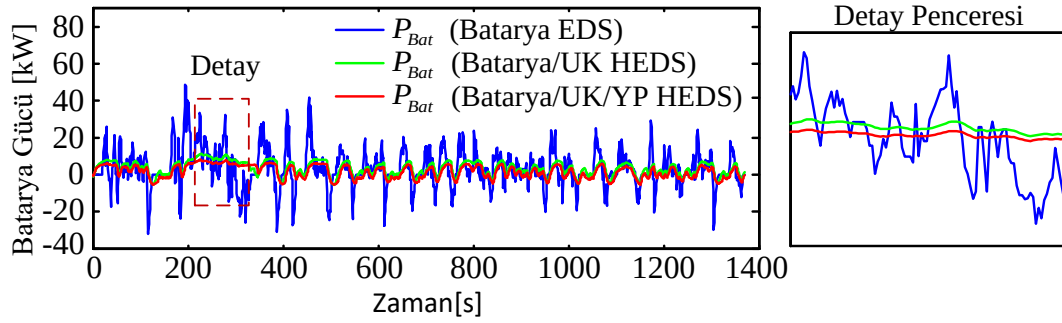


Şekil 6.11 : UDDS sürüş çevrimi altında Batarya/UK/YP HEDS topolojisi için optimum motor güçleri; (a) UDDS hız profili; (b) Talep gücü; (c) M1 (Camry) gücü; (d) M2 (UQM 125) gücü.

Şekil 6.11 ile talep gücünün karşılanmasında, düşük güçlerinin, düşük ve orta güçlerde daha verimli olan M1 ile yüksek güçlerin ise, yüksek güçlerde daha verimli olan M2 tarafından karşılandığı görülmektedir.

Batarya gücü, sadece batarya kullanılan EDS topolojisi, batarya/UK HEDS topolojisi ve batarya/UK/YP topolojisi için karşılaştırıldığında, en yüksek genliğin batarya EDS

topolojisinde, en düşük genliğin ise batarya/UK/YP topolojisinde elde edildiği şekil 6.12’ de görülmektedir.



Şekil 6.12 : Güç aktarım sisteminde M1 (Camry) ve M2(UQM125) elektrik motorları kullanılan elektrikli araç için; batarya, batarya/UK ve batarya/UK/YP EDS topolojilerinin karşılaştırılması.

Batarya gücünün genliğinin düşük olması, bataryanın çevrim ömrünü olumlu yönde etkilemektedir. Diğer yandan batarya boyutunun büyümesi ise $C_{oranı}$ ‘nın azalmasına dolayısıyla, bataryanın çevrim ömrünün artmasına olumlu yönde etkisi olmaktadır. Batarya gücü genliğinin en az olduğu batarya/UK/YP topolojisi, bu yönden diğer topolojilere nazaran daha avantajlı iken, en küçük batarya boyutuna bu topoloji sahip olması nedeniyle de dezavantajlıdır. Bataryanın çevrim ömrü, topolojilerin tek bir şarj ile gidebilecekleri azami menzil miktarı, günlük aracın kullanım mesafesinin 60km, başka bir deyişle, ard arda tekrarlanan, beş adet UDDS sürüş çevrimi olduğu varsayılarak, Çizelge 6.12 ile gösterilmiştir. Diğer yandan sürüş çevrimi esnasında bataryadan çekilen azami akım miktarları da Çizelge 6.12 ile sunulmuştur.

Çizelge 6.12 : İki motorlu güç aktarım sistemi için, batarya, batarya/UK, batarya/UK/YP topolojilerinin karşılaştırılması.

Duru m	EDS yapılandırması	Azami batarya akımı [A]	Batarya çevrim ömrü [Yıl]	Menzil [km]
1	Battery EV	161.5	14.3	320.9
2	Battery EV + UC	37.5	20.9	318.1
3	Battery + UC + FC	26.3	19.6	778.1

Bataryanın çevrim ömrü açısından batarya/UK ve batarya/UK/YP topolojileri birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir. Bu iki topoloji, sadece batarya kullanılan EDS topolojisine nazaran, yaklaşık 1.4 kat daha iyi sonuç vermektedir. Menzil yönünden

karşılaştırıldığında ise, batarya/UK/YP topolojisi, diğer toplojilere nazaran yaklaşık 2.5 kat daha fazla menzile ulaşabilmektedir.



7. SONUÇLAR

Ulaşım sektöründe fosil kaynaklı konvansiyonel araçların sahip oldukları düşük verim, petrole olan bağımlılıkları ve neden oldukları çevresel kaygılar, alternatif olarak elektrikli araçların gündeme gelmesine ve elektrikli araçlar üzerinde yapılan çalışmaların artmasında neden olmuştur.

Elektrikli araçlar her ne kadar konvansiyonel içten yanmalı araçlar için bir alternatif olarak görülse de, konvansiyonel araçlar ile rekabet edebilmek için maliyet ve tek bir şarj ile gidebilecekleri elektrikli menzil (AER) gibi birçok konuda hala geliştirilmeye gereksinim duymaktadırlar.

Günümüzdeki elektrikli araçların çoğunluğu, güç aktarım sisteminde sadece tek bir elektrik motoru kullanmaktadır. Tekerleklerle güç, genel olarak tek bir dişli oranı vasıtasıyla, elektrik motorlarının geniş bir hız aralığında çalışmasıyla sağlanmaktadır. Bu çalışma aralığında, motorlar her zaman ve her şartta verim haritalarının yüksek verim elde edilen bölgesinde kalamamaktadır.

Elektrikli araçlarda geliştirilmek istenen diğer bir husus, boyutlandırılması, performans ve dayanıklılığı açısından enerji depolama sistemi (EDS)'dir. Elektrikli araçlarda batarya ana enerji depolama birimi olarak kullanılmaktadır. Özellikle performans açısından tasarlanan elektrikli araçlarda, EDS, enerji kriterinden çok, güç kriteri göz önüne alınarak boyutlandırılmaktadır. Bu nedenle, anlık yüksek güç taleplerinin karşılanması amacıyla, gereğinden fazla miktarlarda yüksek enerji (YE) özelliğine sahip batarya veya daha ağır olan, düşük enerji fakat yüksek güç (YG) özelliğindeki batarya EDS de yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında, enerji depolama sistemi sadece bataryadan oluşan elektrikli araçlarda, aracın günlük kullanımı, aracın toplam ağırlığı, aracın aerodinamik yapısı, yolun karakteristiği ve araçtan istenen performans kriterlerine bağlı olarak gereksinim duyacağı maksimum güç ihtiyacı, bataryanın sağlaması gereken gerilim seviyesine ulaşması için gerekli olan toplam hücre sayısı dikkate alınarak, YE tipi ve YG tipi lityum bataryaların kullanımı ile EDS'in optimum boyutlandırılması araştırılmıştır.

Batarya için optimizasyon çalışması bize göstermektedir ki, enerji depolama sisteminde YE tipi batarya kullanılan elektrikli araçlar, ağırlık bazında YG tipi batarya kullanılan araçlara nazaran daha uzun menzile sahip olabilmektedir. Diğer taraftan, araç parametrelerine bağlı olarak değişmekle birlikte, genellikle 250 km'nin altında bir menzile sahip olması istenerek tasarlanan elektrikli araçlar için, YE tipi batarya seçimi yapıldığında, aracın seyir halinde ihtiyaç duyduğu gerekli gücün karşılanabilmesi için, olması gerekenden daha büyük boyutlarda YE tipi bataryanın araca yüklenmesi gerektiği görülmektedir.

Hem anlık yüksek güç taleplerinin etkili bir şekilde karşılanması ve batarya boyutunun azaltılması, hem de batarya akımındaki dalgalanmaları azaltarak, batarya çevrim ömrünün uzatılabilmesi amacıyla, YE tipi lityum bataryalar ile birlikte, bataryaya göre, daha düşük bir iç dirence sahip olan Ultrakapasitörün (UK) oluşturduğu, batarya/UK hibrit enerji depolama sistemi (HEDS) aynı zamanda güç aktarım sisteminde, verim ve performans artışı için iki elektrik motoruna sahip bir elektrikli araç topolojisi önerilmiştir.

Güç aktarım sisteminde iki elektrik motoru kullanımını incelemek amacıyla, Argonne ulusal laboratuvarı (ANL) 'nın geliştirmiş olduğu Autonomie yazılımı motor kütüphanesinin verilerinden yararlanılmıştır. Matlab sayısal hesaplama programı üzerinden yapılan simülasyonlarda, şehir içi ve çevre yolu karakteristiklerine sahip olan UDDS, IDC, NEDC, NYCC ve US06 sürüş çevrimleri kullanılmıştır. Elektrikli araçların güç aktarım sisteminde hareketin sağlanması amacıyla iki elektrik motoru kullanan topolojiler için, motorlardaki kayıp gücü minimize etmeyi hedefleyen, motorlar arasında güç paylaşımını sağlamak üzere, optimizasyon tabanlı, gerçek zamanlı olarak uygulanabilecek bir güç paylaşım stratejisi sunulmuştur.

Güç aktarım sisteminde, merkezi tek bir motor kullanımı, eşdeğer iki motor kullanımı, tork ve hız bakımından birbirini tamamlayıcı karakteristiğe sahip iki motor kullanımı, detaylı bir şekilde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Adil bir karşılaştırma yapmak amacıyla, iki motor kullanılan topolojilerdeki toplam nominal motor gücü ile tek motor kullanılan topolojideki nominal motor gücü aynı seviyede seçilmiştir. Ayrıca, iki ve tek motor içeren güç aktarım topolojilerinin, elektrikli araçların tamamen elektrik enerjisi ile alabildikleri menzili nasıl etkilediği tez kapsamında tartışılmıştır.

Güç aktarım sisteminde eşdeğer iki elektrik motoru kullanılan topoloji, şehir içi ve çevre yolu özelliklerini yansıtan sürüş çevrimleri altında, tek bir elektrik motoru kullanılan topolojiler ile karşılaştırıldığında, verim artışı sağlanabileceği fakat bu artışın sınırlı bir miktarda olduğu, yapılan çalışmalarda en fazla %1.5 verim artışı elde edilebildiği görülmüştür.

Güç aktarım sisteminde, birbirini tamamlayıcı tork ve hız karakteristiğinde seçilmiş iki elektrik motoruna sahip bir topolojinin, daha geniş bir çalışma aralığında yüksek verime sahip olduğu görülmüştür. Böylece, birbirini tamamlayıcı özellikte seçilen iki motorlu güç aktarım sistemi topolojisinin, tek motorlu güç aktarım sistemi topolojisine nazaran, şehir içi yol karakteristiğine sahip UDDS sürüş çevrimi altında, ilerleme modunda %11, rejeneratif modda ise %5 daha verimli olduğu görülmektedir. Böylece %4 ila %27 arasında bir AER artışının elde edilebileceği simülasyon sonuçları ile elde edilmiştir.

Genel olarak elektrikli araçlarda tek bir elektrik motoru kullanımına nazaran, bu tez çalışmasında önerildiği gibi iki elektrik motoru kullanılması halinde, aracın toplam maliyeti, artabileceği düşünülebilir. Fakat tek bir, büyük hacim ve güce sahip elektrik motoru kullanmak yerine, iki adet, küçük hacim ve düşük güce sahip elektrik motoru kullanımı; araçta kaput altındaki yerleşimin daha kolay olmasını sağlayabileceği gibi, diğer yandan, güç aktarım sisteminin de daha dayanıklı ve daha yüksek verimli olmasını sağlayabilir. Böylece, araç menziline artış sağlanabilir ve dolayısıyla, elektrikli aracın maliyetinde iyileşme elde edilebilir. Örnek olarak, yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre; birbirini tork ve hız bakımından tamamlayıcı özelliklere haiz iki elektrik motoru kullanılan topolojinin, sadece tek bir merkezi elektrik motoru kullanılan topolojiye nazaran, sağlayabileceği 27%'lik menzil artışı, araçta maliyet ve ağırlık açısından en önemli kalemlerden biri olan bataryanın, menzil gereksinimi açısından fazladan boyutlandırılmasının önüne geçebilmektedir. Böylece önerilen iki elektrik motoruna sahip güç aktarım topolojisiyle, elektrikli araçta, tasarım aşamasında daha küçük boyutlu bir batarya seçimi mümkün kılınmaktadır. Önerilen topolojinin sağladığı %11'e kadar verim artışı, bataryadan daha az güç çekilebilmesine ve dolayısıyla, bataryanın çevrim ömrünün uzamasına, bunun sonucu olarak bataryanın bakım masraflarının azalmasına, böylece aracın toplam maliyetinin düşmesine olanak sağlamaktadır.

İkinci olarak, güç aktarım sisteminde iki motor bulunduran elektrikli araçlarda, batarya/UK hibrit enerji depolama sistemi için bataryanın ömrünü uzatmayı hedefleyen, batarya gücünün genliğini ve batarya akımındaki dalgalanmaları minimize etmek üzere, ikinci dereceden bir konveks optimizasyon problemi formüle edilmiştir. Konveks bir problemde herhangi yerel optimum değerin aynı zamanda global optimum da olması nedeniyle optimizasyon problemlerinin çözümü daha sağlam ve daha hızlı olmakta, gerçek zamanlı uygulanması kolaylaşmaktadır. Konveks optimizasyon problemi, Matlab yazılımı üzerinde CVX toolbox kullanılarak çözülmüştür.

İki ve tek elektrik motoruna sahip güç aktarım topolojileri hibrit ve hibrit olmayan enerji depolama sistemleri için, elektrikli aracın toplam verimini, kullanılan bataryanın ömrü ve araç menzilini nasıl değiştirdiği gibi birçok açıdan altı ayrı topoloji için incelenmiştir.

Bataryanın HEDS içerisinde, 6.76F/0.42kWh bir UK ile beraber kullanımı halinde, sadece batarya kullanılan topolojiye nazaran ömrünün 10.39 yıldan 18.75 yıla artabileceği görülmüştür. Hibrit enerji depolama sistemi ile araca binen ek 104kg lık yükün %5 oranında AER' de yapacağı azalma ise iki motorlu güç aktarım topolojisinin verim artışı ile tolere edilebilmektedir.

Daha yüksek menzile ulaşabilme potansiyeli olan ve konvensiyonel araçlara eşdeğer bir sürede dolum yapabilme kabiliyetine sahip yakıt pili sistemine sahip araç topolojisinin, iki elektrik motoruna sahip güç aktarım sistemine entegre edilerek incelenmiştir. HEDS' de YP' ne sahip araçların avantajı ve dezavantajlarını karşılaştırmak için. Araç ağırlığı aynı kalacak şekilde EDS'i boyutlandırılmış, batarya, batarya/UK ve batarya/UK/YP topolojileri incelenmiştir. Günlük aracın katettiği yol miktarı 60km olduğu varsayılarak UDDS sürüş çevrimi altında yapılan simülasyon sonuçları bize batarya/UK ve batarya/UK/YP topolojilerinde kullanılan batarya modüllerinin çevrim ömrünün birbirine yakın olduğu ve EDS'i sadece bataryadan oluşan topolojiye nazaran yaklaşık 1.4 kat batarya ömrünün arttırılabileceği görülmüştür. Batarya ve batarya/UK topolojilerinin tek bir şarj ile ulaşabildikleri menzil miktarı şehir içi yol karakteristiği altında 320km iken, batarya/UK/YP topolojisi kullanarak menzil miktarı yaklaşık 780 km mesafeye ulaşabilmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında önerilen topoloji ve güç paylaşım stratejileri sayesinde, efektif bir güç paylaşımı yaparak birbirini tamamlayıcı tork ve hız karakteristiğinde iki elektrik motoru kullanımı, elektrikli araçlarda en önemli zorluklardan biri olan tek bir şarj ile gidilen azami menzil miktarını %27'e kadar arttırmaktadır. Bu nedenle önerilen topolojinin ticari olarak büyük öneme sahiptir. Diğer yandan maliyet açısından en kritik kalemlerden biri olan bataryanın ömrü önerilen HEDS topolojisi ise nerdeyse iki katına kadar çıkarılabildiği ve yakıt pili sistemi kullanarak elektrikli araçlardaki menzilin, iki kattan daha fazla artabileceği görülmüştür.





KAYNAKLAR

- Abolhassani, M., Acharya, P., Asadi, P., Ashmun, T. Campell, S., Dorsey, D., ... Ehsani, M.** (2003). Impact of Hybrid Electric Vehicles on the World's Petroleum Consumption and Supply, *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2003-01-2310.
- Alternatif Yakıtlar veri merkezi.** Erişim: 01 Mart 2016, http://www.afdc.energy.gov/fuels/electricity_locations.html
- Amerika Enerji Bakanlığı** - Target Explanation Document: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles. (Mayıs 2015) (Online) Bağlantı yolu: <http://energy.gov/eere/fuelcells/downloads/target-explanation-document-onboard-hydrogen-storage-light-duty-fuel-cell>.
- Anzicek, J. &Thompson A.,**(2005) DC-DC boost converter design for Kettering Universitys GEM fuel cell vehicle, *Proc. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, Indianapolis, ABD, september 26.
- Auger, D. J., Groff, M. F., Mohan, G., Longo, S., Assadian, F.** (2014). Impact of Battery Ageing on an Electric Vehicle Powertrain Optimisation, *J. sustain. dev. energy water environ. syst.*, 2(4), 350-361, DOI: <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.2014.02.0028>.
- Baghzouz, Y. & Boehm, R.** (2001). A method to determine battery charge/discharge resistance in stand-alone PV power systems, *5th WSES/IEEE World Multiconference on Circuits, Systems, Communications & Computers (CSCC 2001) in Rethymnon*, Crete, Greece, July 8-15.
- Barbir, F.** (2013). PEM Fuel Cells, Theory And Practice, (1th ed.,pp.65-89), Waltham, MA, USA, Elsevier.
- Barra, M.** (2015). General Motors Company 2015 Global Business Conference, Michigan, USA, September 1.
- Bloom, I., Cole, B., Sohn, J., Jones, S., Polzin, E., Battaglia, V., Case, H.** (2001). An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells, *Journal of Power Sources*, 101, 2, 238–247.
- Boyd, S. & Vandenberghe, L.** (2009). *Convex Optimization*, (7th ed., pp.21-25), Cambridge, Cambridge University Press.
- Brown, J., Gill, J. & Yavaşoğlu, H.** (2014). Are Hydrogen Vehicles Still A Rational Investment?, Emerging researchers national (ERN) Conference in STEM Washington D.C., ABD, February 20-22.
- Carter, R., Cruden, A. & Hall, P. J.** (2012). Optimizing for efficiency or battery life in a battery/supercapacitor electric vehicle, *IEEE transactions on vehicular technology*, 61, 1526-1533.

- Castro, R., Pinto, C., Araujot, R. E., Melo, P. & Freitas, D.** (2012). Optimal Sizing and Energy Management of Hybrid Storage Systems, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seoul, Korea, September 9-12.
- Choi, M. & Seo, S.** (2012). Robust energy management of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in an electric vehicle, *Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Greenville, SC, USA, March 4-8.
- Choi, M., Kim, S., & Seo, S.** (2012). Energy Management Optimization in a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 463 – 472.
- Cohen, I., Wetz, D., Heinzl, J., & Dong, Q.** (2015). Design and Characterization of an actively Controlled Hybrid Energy Storage Module for High-Rate Directed Energy Applications, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (5), 1427 – 1433.
- Cui, S.** (2001, Aralık). Convex Optimization for Electrical Engineering lecture notes, *Texas A&M University*. Erişim adresi: <http://ece.tamu.edu/~cui/Lecture2>
- Dickinson, D. & Nasri, M.** (2014). Range Extender Vehicle Concept Based on High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, *Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, March 25 - 27.
- Düşmez, S. & Khaligh, A.** (2014). A supervisory power splitting approach for a new ultracapacitor-battery vehicle deploying two propulsion machines, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10 (3), 1960-1971.
- Dubarry, M., Svoboda, V., Hwu, R. & Liaw, B. Y.** (2007). Capacity Loss in Rechargeable Lithium Cells During Cycle Life Testing: The Importance of Determining State Of Charge, *Journal of Power Sources*, 174 (2), 1121-1125.
- Ebbesen, A., Elbert, P. & Guzzella, L.** (2012). Battery State-of-Health Perceptive Energy Management for Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61 (7), 2893-2900.
- Ehsani, M., Gao, Y. & Emadi, A.** (2010). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, (2nd ed., pp.9-23) New York, NY: Taylor & Francis Group.
- Elektrikli Araçlar İnsiyatifi (EAİ)** – Global EV Outlook Erişim: 01 Aralık 2015, http://www.iea.org/evi/Global-EV-Outlook-2015-Update_1page.pdf.
- Ellis, M.W., von Spakovsky, M.R. & Nelson, D.J.** (2001). Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century, *IEEE Proceedings*, 89 (12), 1808-1818.
- Ergeneman, M. & Sorousbay, C.** (2010). Estimation of Greenhouse Gas Emissions Related to Urban Driving Patterns, *ICAT 2010 - International Conference on Energy and Automotive Technologies in Istanbul*, Istanbul, November 5.
- Farhadi M. & Mohammed, O.** (2015). Hybrid Energy Storage Systems for Transportation Electrification, *ACEMP Aegean Conference Electrical Machines and Power Electronics*, Side, Turkey, September 2-4.

- Fleurbaey, K., Omar, N., Baghdadi, M., Timmermans, J., Mierlo, J.** (2014). Analysis of Hybrid Rechargeable Energy Storage Systems in Series Plug-In Hybrid Electric Vehicles Based on Simulations, *Energy and Power Engineering* 6, 195-211.
- Garcia, P., Fernandez, L. M., Garcia, C. A. & Juado, F.** (2010). Energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway, *IEEE transactions on industrial electronics*, 57, 4013-4023.
- Gautam, D., Musavi, F., Edington, M., Eberle, W. & Dunford, W. G.** (2011). An automotive on-board 3.3 kW battery charger for PHEV application, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Chicago, IL, September 6-9.
- Guenä, T. & Leblanc, P.** (2006). How depth of discharge affects the cycle life of lithium-metal-polymer batteries, *INTELEC - Twenty-Eighth International Telecommunications Energy Conference*, Providence, Rhode Island, USA, September 10-14.
- Gurkaynak, Y., Khaligh, A. & Emadi, A.** (2009). State of the art power management algorithms for hybrid electric vehicles, *IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference*, Dearborn, MI September 7-10.
- Guzzella, L. & Amstutz, A.** (1999). CAE Tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrains, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 48 (6), 1762-1769.
- Guzzella, L. & Sciarretta, A.** (2013). *Vehicle Propulsion Systems*, (3. Sürüm), Springer Heidelberg New York, Springer, DOI 10.1007/978-3-642-35913-2.
- Hajian, M., Robinson, J., Jovcic, D. & Bin, W.** (2014). 30 kW, 200 V/900 V, Thyristor LCL DC/DC Converter Laboratory Prototype Design and Testing, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 29 (3), 1094-1102.
- Iqbal, H.** (2011). *Electric And Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, (2nd. Edt., Vol. 1 pp.13). Boca Raton, FL : CRC Press.
- Johnson, V. H., Pesaran, A. A. & Sack, T.** (2001). Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries, *17th Annual Electric Vehicle Symposium*, Montreal, Canada October 15-18.
- K2 Energy Solutions, Inc.** (2010a). OCV and Internal Resistance as a Function of State of Charge for K2 Energy LFP26650P cells Datasheet.
- K2 Energy Solutions, Inc.** (2010b). High Capacity LFP26650EV Energy Cell Datasheet.
- Kaymaz, İ.** (2011). Atatürk Üniversitesi, Optimizasyon Ders Notları.
- Khaligh, A.** (2010). Plug-In Hybrid Electric Vehicles: Sustainable Driving to 21st Energy Future. *Presentation, IEEE Industrial Electronics Conference*, Glendale, AZ, November 7-10.
- Khaligh, A. & Li, Z.** (2010). Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art, *IEEE transactions on vehicular technology*, 59 (6), 2806-2814.

- Konno, N., Mizuno, S., Nakaji, H., & Ishikawa, Y.** (2015). Development of Compact and High-Performance Fuel Cell Stack, *SAE Int. J. Alt. Power*, 4 (1)123-129.
- Kumas, H., Gencer, C. & Maras, H.** (2012). Ağır araçlar için yol eğimi ve viraj yarıçapı dikkate alınarak en hızlı güzergâhın belirlenmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 385-395.
- Larmine, J. & Dicks, A.** (2003). Fuel Cell Systems Explained, (2nd ed., pp.41-44) Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, John Wiley & Sons Ltd.
- Larmine, J. & Lowry, J.** (2003). Electric Vehicle Technology Explained, (1th ed., pp. 41-44) Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, John Wiley & Sons Ltd.
- Liu X., Wu, Y. & Duan, J.** (2008). Power split control strategy for a series hybrid electric vehicle using fuzzy logic, *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Qingdao, China, september 1-3.
- Lukic, S. M., Wirasingha, S. G., Rodriguez, F., Cao, J. & Emadi, A.** (2006). Power management of an ultracapacitor/battery hybrid energy storage system in an HEV, *Vehicle Power and Propulsion Conference*, Windsor, United Kingdom, September 6-8.
- Malaize, J. & Tona, P.** (2011). Optimization-based control design for hybrid energy storage systems in electric vehicles, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Chicago, IL, USA, September 6-9.
- Mansour, C. & Clodic, D.** (2010). Modeling of the THS-II series/parallel power train and its energy management system. *FISITA 2010 World Automotive Congress*, Budapest, Hungary, May 30- June 4.
- Maxwell Technologies** (2010, Mayıs). – Datasheet K2 Ultracapacitors-2.7v Series, , Erişim adresi: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/k2-series/documents>
- Miller, J. M.** (2007). Energy storage technology markets and application's: ultracapacitors in combination with lithium-ion, *7th International Conference on Power Electronics*, EXCO, Daegu, Korea, October 22-26.
- Miller, M., Holmes, A., Conlon, B., & Savagian, P.** (2011). The GM “Voltec” 4ET50 Multi-Mode Electric Transaxle, *SAE Int. J. Engines* 4 (1):1102-1114, 2011.
- Milligan, R., Muneer, T. & Smith, I.** (2015). A comparative range approach using the real world drive cycles and the battery electric vehicle, *Transportation Electrification Conference (ITEC)*, 2015 *IEEE International*, Chennai, India, August 22-29.
- Mitrinovic, D.,** (1970). Analytic Inequalities. (1th ed., pp.306) Springer-Verlag, Berlin
- Mitrinovic, D., Pecaric, J. & Fink, A.** (1993). *Classical and New Inequalities in Analysis*. Kluwer Academic Publishers, (1th ed., pp.740), London.

- Moreno, J., Ortúzar, M. & Dixon, J.** (2006). Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 53 (2), 614 – 623.
- Napoli A., Crescimbeni, F., Capponi, G. & Solero, L.** (2002). Control Strategy for Multiple Input DC-DC Power Converters Devoted to Hybrid Vehicle Propulsion Systems, *Proc. IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics*, L'Aquila, Italy, June 8-11.
- National Science Foundation** Science And Engineering Indicators 2012. Erişim: 10 Mart 2016, www.nsf.gov/statistics/seind12/pdf/seind12.pdf.
- Ortúzar, M., Moreno, J. & Dixon, J.** (2007). Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle: implementation and evaluation, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 54 (4), 2147-2156.
- Park, S. & Choe, S.** (2008). Dynamic modeling and analysis of a 20-cell PEM fuel cell stack considering temperature and two-phase effects, *Journal of Power Sources*, 179, 660-672.
- Parks, K., Denholm, P. & Markel, T.** (2007). Costs and emissions associated with plug-in hybrid electric vehicle charging in the xcel energy colorado service territory, *National Renewable Energy Laboratory Technical Report*, NREL/TP-640-41410, Golden, Colorado, USA.
- Platform for Aerodynamics Road Transport** (Mart 2016) Erişim adresi: <http://www.part20.eu/en/background/aerodynamics/>
- Ramadass, P., Haran, B., Gomadam, P.M., White, R. & Popov, B.N.** (2004). Development of first principles capacity fade model for Li-ion cells, *J. Electrochem. Soc.*, 151(2), 196-203.
- Reinhart Motion Systems LLC.** (2012). Technical datasheet of AC motor controller for electric and hybrid vehicles May 2012.
- Sadoun, R., Rizoug, N., Bartholomeus, P., & Barbette, B.** (2012). Sizing of hybrid supply (battery-supercapacitor) for electric vehicle taking into account the weight of the additional buck-bust chopper, in *Proc. IEEE Trans. on Renewable Energies and Vehicular Technology Conference*, Hammamet, Tunus, March 26-28.
- Sarlioglu, B., Morris, C., Han, D., Li, S.** (2015). Benchmarking of Electric and Hybrid Vehicle Electric Machines, Power Electronics, and Batteries, *International Conference on ACEMP, OPTIM & ELECTROMOTION*, Antalya, Turkey, October 2-4.
- Sciarretta, A., Back, M. & Guzzella, L.** (2004) Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, 12 (3), 352-363.
- Shen, J., Düşmez, S. & Khaligh, A.** (2014b). An Advanced Electro-Thermal Cycle-Lifetime Estimation Model for LiFePO₄ Batteries, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, June 14-17.

- Shen, J., Dusmez, S., & Khaligh A.** (2014c). Optimization of Sizing and Battery Cycle Life in Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10 (4), 2112-2121.
- Shen, J., Hasanzadeh, A. & Khaligh, A.** (2014a). Optimal Power Split and Sizing of Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, June 14-17.
- Shen, J., & Khaligh, A.** (2015a). A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System, *IEEE Transactions On Transportation Electrification*, 1(3) 223-231.
- Spotnitz, R.** (2003). Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 113, 72-80.
- Spyker, R. L. & Nelms, R. M.** (2000). Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 36 (3), 829-836.
- Sun, L. Bai, W. & Sun, F.** (2002) State-of-the-Art Electric Vehicle Simulation Technology. *EVS19 Conference Proceedings*, Busan, South Korea. August 28-30.
- TCUDHB - T.C. Ulaştırma Denizcilik & Haberleşme Bakanlığı, Strateji Geliştirme Başkanlığı** (2012). İstatistiklerle Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme (2003-2011), **162224-204-1-64**, Ankara.
- Tesla Motor Company**, (2015) Model S product information, Erişim adresi: <https://www.teslamotors.com/models>
- Teslarati**, (2013) Model S Ağırlık dağılımı, Erişim adresi: <http://www.teslarati.com/tesla-model-s-weight/>
- The U.S. Department of Energy (DOE)** Progress and Accomplishments in Hydrogen and Fuel Cells (2015) (Online) Bağlantı yolu: <http://energy.gov/eere/fuelcells/downloads/progress-and-accomplishments-hydrogen-and-fuel-cells>.
- Toyota** (2015) Mirai fuel cell vehicle official website (Online) Bağlantı yolu: <https://ssl.toyota.com/mirai/>
- Toyota Mirai Product Information** (2016) (Online) Bağlantı yolu: <http://toyotanews.pressroom.toyota.com/releases/2016+toyota+mirai+fuel+cell+product.htm>.
- TUİK - Türkiye İstatistik Kurumu** (2015), *Haber Bülteni*, Sayı: 18763.
- U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, Report**, (2004). Fuel Cell Handbook (7th. Ed.) by EG&G Technical Services, Inc. Under Contract No. DE-AM26-99FT40575.
- Venturi, M., Mohrdieck, C. & Friedrich, J.** (2013). Mercedes-Benz B-Class Fuel Cell: the world largest hydrogen vehicle fuel cell fleet experience, *Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, Barcelona, Spain, November 17-20.

- Vural, B., Dusmez, S., Uzunoglu, M., Ugur, E. & Akin, B.** (2014). Fuel consumption comparison of different battery/ultracapacitor hybridization topologies for fuel-cell vehicles on a test bench, *IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics*, 2(3), 552-561.
- Walters, A., Ogrzewalla, J., & Khulmann, A.** (2015). Fuel Cell Range Extender for Battery Electric Vehicles, *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, Aachen, March 3-5.
- Walters, M., Kuhlmann, A. & Ogrzewalla, J.** (2015). Fuel cell range extender for battery electric vehicles, *Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS) International Conference*, Aachen, March 3-5.
- Wang, J., Liu, P., Hicks-Garner, J., Sherman, E., Soukiazian, S., Verbrugge, M., Tataria, H., Musser, J. & Finamore, P.** (2011). Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells, *Journal of Power Sources*, 196 (8), 3942-3948.
- Wang, L., Collins, E., & Li, H.** (2011). Optimal Design and Real-Time Control for Energy Management in Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (4) . 1419 – 1429.
- Warner, J.** (2015). The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design, (1th ed., pp.65-89) 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA, Elsevier.
- X. Liu, Y. Wu, & J. Duan.** (2008). Power split control strategy for a series hybrid electric vehicle using fuzzy logic, in *Proc. IEEE Automation and Logistics Conference*, September 1-3.
- Yan, F., Wang, J. & Huang, K.** (2012). Hybrid electric vehicle model predictive control torque-split strategy incorporating engine transient characteristics, *IEEE transactions on vehicular technology*, 61 (6), 2458-2467.
- Yang, X., Tan, S. & Liu, J.** (2016). Thermal management of Li-ion battery with liquid metal, *Energy Conversion and Management*, 117, 577-585.
- Yavasoglu, H. A., Shen, J., Shi, C., & Khaligh, A.** (2015a). A Supervisory Controller for a Hybrid Energy Storage System with Two Propulsion Machines in Electric Vehicles, *International Conference on Acemp, Optim & Electromotion*, Antalya, Turkey, October 2-4.
- Yavasoglu, H. A., Shen, J., Shi, C., Gokasan, M. & Khaligh, A.** (2015a). Power Split Control Strategy for an EV Powertrain With Two Propulsion Machines, *IEEE Transactions On Transportation Electrification*, 1 (4), 382-390.
- Yazıcı, M., Yavasoglu, H. & Eroglu, M.** (2013). A mobile off-grid platform powered with photovoltaic/wind/battery/fuel cell hybrid power systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(26) 11639–11645.
- Yong, J, Ramachandaramurthy, V., Tan, K., & Mithulananthan, N.** (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49,365–385.

- Zhao, R., Zhang, S., Liu, J. & Gu, J.** (2015). A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system, *Journal of Power Sources*, 299, 557-577.
- Pavlovsky, M., Guidi, G. & Kawamura, A.**, (2014). Assessment of coupled and independent phase designs of interleaved multiphase buck/boost dc–dc converter for EV power train, *IEEE Trans. Power Electron.*, 29 (6) 2693–2704.



EKLER

EK A: Simülasyon Kodu



EK A: Simülasyon Kodu

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%           Power Demand calculation           %
%           Electrical Vehicle                 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%-----
% Software Begins
%-----

clc
clear
%   CHOOSE a Drive Cycle
%   UDDS=>1 US06=>2 NYCC => 3 HWFET =>4 FTP75 =>5   IST =>6   NEDC =>
7
DriveCycle=1;

% UDDS
if DriveCycle==1
cycle_v=textread('D:\udds_velocity.txt');
v=cycle_v/2.2369; %mph to m/s
time=1370;
end;

%US06
if DriveCycle==2
us06_data=textread('D:\us06col.txt');
us06_v=us06_data(:, [2]); us06_t=us06_data(:, [1]);
cycle_v=us06_v; v=cycle_v/2.2369; time=600;
end;

%NYCC
if DriveCycle==3
nycc_data=textread('D:\nycccol.txt');
nycc_v=nycc_data(:, [2]); nycc_t=nycc_data(:, [1]); cycle_v=nycc_v;
v=nycc_v/2.2369; time=598;
end;

% HWFET
if DriveCycle==4
load HWFET_data_forsplit
time=765;
end;

%FTP75
if DriveCycle==5
ftp75_data=textread('D:\ftp75.txt');
ftp75_v=ftp75_data(:, [2]); ftp75_t=ftp75_data(:, [1]);
cycle_v=ftp75_v;
v=ftp75_v/2.2369; time=598;
```

```

end;

%Istanbul
if DriveCycle==6
IST_data=textread('D:\ist_drv_kmh.txt');
IST_v=IST_data(:, [2]); IST_t=IST_data(:, [1]); cycle_v=IST_v;
v=IST_v*(1000/3600);    time=1003;
end;

%NEDC
if DriveCycle==7
NEDC_data=textread('D:\NEDC_kmh.txt');
NEDC_v=NEDC_data(:, [2]); NEDC_t=NEDC_data(:, [1]); cycle_v=NEDC_v;
v=NEDC_v*(1000/3600);    time=1184;
end;

%-----
% calculate the acceleration
%-----
% normalize the velocity
for kk=1:time-2
    accel(kk)=(v(kk+1)-v(kk));
    velocity(kk)=0.5*(v(kk+1)+v(kk));
end;
velocity(time-1)=0;
velocity(time)=0;
v=velocity';

% calculate acceleration
accel(time-1)=0;
accel(time)=0;
accel=accel';

%-----
%Vehicle Parameters
%-----
pa=1.205;           % Density of air
cd=0.24;            % Aerodynamic Drag Coefficient
af=2.12344;         % Frontal area of vehicle
vehicle_mass=M_chassis+M_ESS; % Chassis weight+ ESS weight
cargo_weight=90;    % Cargo weight
mt=vehicle_mass+cargo_weight; %Vehicle total mess
Gr=8.5;             %Gear Ratio
rwh=0.33602;        %Wheel Radius R16
g=9.8;              %G force
%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%OPPOSING FORCES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----

%-----
% Rolling Resistance
%-----

```

```

a0=8.8e-3;
a1=-6.42e-5;
a2=9.27e-6;
a3=-3.3e-7;
a4=6.68e-9;
a5=-4.46e-11;
Cr=(a0+a1.*v+a2.*v.^2+a3.*v.^3+a4.*v.^4+a5.*v.^5);
Fr=g*mt*Cr;
%-----

% Air Drag
Fad=0.5*pa*cd*af*(v.^2);

% acceleration
sigma =1.14;% mass factor
Fma=(sigma*mt).*accel;

% Total opposing forces
Ftotal=Fr+Fad+Fma;

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----
%Calculation of Demand Torque and Power
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----

%-----
%Wheel & motor Speed
%-----
w_wh=v/rwh; %wheel Speed rad/second
w_m=w_wh*Gr; %motor Speed rad/second
w_wh_rpm=60*v/(2*pi*rwh); %revolution/min for wheel
w_mot_rpm=w_wh_rpm*Gr; %revolution/min for motor

%-----
% Torques on wheel & motors
%-----

P_demand_chas=v.*Ftotal;

% Torque Demand
for kt=1:time

if w_m(kt)>0
    T_motor(kt)=P_demand_chas(kt)./w_m(kt);
else
    T_motor(kt)=0;
end;
end;
%-----

eff_wheel=0.99; % eff of wheels
eff_drive=0.97; % eff of torque coupling and final drive

for zx=1:time;
    if P_demand_chas(zx)>0
        P_mot_out(zx)=P_demand_chas(zx)/(eff_wheel*eff_drive);
    end
end

```

```

else
    P_mot_out(zx)=P_demand_chas(zx)*eff_wheel*eff_drive;
end;
end;

save('power_demand_results.mat','mt','P_mot_out','T_motor','v','w_m'
,...
'w_mot_rpm','Gr','time','P_demand_chas');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%                2 motors EV                %%%%%%%%%
%%%%%%%%                POWER SPLIT                %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%-----
% Software Begins
%-----
clc
clear
%-----
%                               choose motors
%-----
% Honda  => 1      Camry  => 2      Lexus   => 3      Nissan  => 4
% UQM125 => 5      Remy   => 6      UQM150 => 7      No_motor=> 0
%-----
motor1=2;
motor2=5;
motortype=[motor1, motor2];
%-----
%Load Power Demand Results
load power_demand_results
%P_mot_out,T_motor,v(vehicle speed[m/s])
%w_m(motor angular speed),w_mot_rpm(motor speed rpm),
%time(driving cycle time),Gr(Fixed Gear Ratio)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%                EFFICIENCY MAPS OF MOTORS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%-----
% Motor Eff maps are interpolated for better use in sperate m-files.
%-----

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%                Lexus
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----
%-----
%110kW continues 165Kw peak
%-----
%-----
Speed_Lexus      = [0 500 10 20 30 40 50 60 70 8000 9000 10000];
Torque_Lexus     = [0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140
150 160 170 180 190 200 250 300];

```

```

Lexus_eff_motor_map      = 0.01*[...
59.30 87.90 88.40 87.90 86.90 85.90 84.90 83.70
82.40...
81.00 79.40 77.80 76.60 76.20 74.60 73.30 73.20
73.00...
72.80 72.70 72.60 64.10 58.80
59.30 87.90 88.40 87.90 86.90 85.90 84.90 83.70
82.40...
81.00 79.40 77.80 76.60 76.20 74.60 73.30 73.20
73.00...
72.80 72.70 72.60 64.10 58.80
48.00 84.50 88.60 89.10 89.10 89.00 88.60 88.00
88.40...
87.90 87.30 86.60 85.70 84.90 84.00 83.10 82.70
82.40...
82.10 82.00 81.70 77.00 73.00
54.60 82.60 88.30 89.80 90.70 90.80 90.90 91.00
90.70...
90.60 90.40 90.30 90.00 89.80 89.20 90.70 90.10
89.80...
89.50 89.10 88.80 86.20 82.90
59.90 81.40 87.40 89.80 90.90 91.40 91.50 91.80
91.90...
91.80 92.10 91.80 91.60 91.90 91.70 91.40 91.50
91.00...
90.60 90.70 90.80 89.00 86.40
62.90 79.50 87.00 89.40 90.60 91.30 91.80 92.30
92.40...
92.50 93.00 92.90 93.10 93.00 92.70 92.70 92.60
92.60...
92.50 92.50 92.40 91.30 89.10
60.00 78.90 86.50 89.50 91.10 91.80 92.40 93.00
93.10...
93.40 93.40 93.60 93.60 93.60 93.80 93.70 93.60
93.50...
93.40 93.30 93.20 93.70 90.50
49.20 87.30 91.90 93.70 93.80 95.20 95.30 95.40
95.70...
95.70 96.00 95.40 95.00 95.40 94.90 94.90 94.90
94.90...
94.50 94.10 93.90 93.70 90.50
54.90 87.70 91.80 94.40 95.00 95.10 95.40 95.70
95.70...
96.00 95.70 95.50 95.40 95.60 95.40 95.30 95.10
94.80...
94.50 94.10 93.90 93.70 90.50
60.70 87.70 92.30 93.90 94.80 95.80 95.90 95.40
95.70...
95.80 95.80 95.70 95.60 95.40 95.30 95.30 95.10
94.80...
94.50 94.10 93.90 93.70 90.50
60.00 87.50 91.50 93.50 94.20 94.50 94.80 95.10
95.10...
95.20 95.20 95.10 95.10 95.40 95.30 95.30 95.10
94.80...
94.50 94.10 93.90 93.70 90.50
60.00 87.20 90.80 92.50 93.20 93.50 93.60 93.80
93.90...
94.00 93.80 95.10 95.10 95.40 95.30 95.30 95.10
94.80...
94.50 94.10 93.90 93.70 90.50 ];

```

```

xi_Lexus=linspace(1,300,300);
yi_Lexus=linspace(1,100,100);
[xii_Lexus,yii_Lexus]=meshgrid(xi_Lexus,yi_Lexus);
zii_Lexus=interp2(Torque_Lexus,Speed_Lexus,Lexus_eff_motor_map,...
xii_Lexus,yii_Lexus,'linear');    %interpolated matrix
eff_Lexus=zii_Lexus;
%-----

%-----

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                                HONDA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----
%49KW peak & 49KW continues
%-----
Honda_Torque=[0    19.6    39.2    78.4    98.0    117.6    137.2    156.8
...          176.4    235.2    274.4];

Honda_Speed= [0:500:8500];

Honda_eff_map= 0.01*[...
63.0    87.7    84.7    79.4    78.09    76.5    75.0    73.89
...
71.3    63.8    59.7
63.07    87.76    84.71    79.49    78.10    76.56    75.09    73.90
...
71.33    63.88    59.75
80.23    85.98    86.96    87.34    86.64    85.45    84.73    84.03
...
83.26    80.81    77.35
80.24    87.45    88.53    89.23    89.37    88.36    88.08    87.98
...
87.33    85.65    82.47
81.05    90.54    90.31    90.33    90.42    90.38    90.13    89.86
...
89.38    87.95    87.25
83.52    88.41    91.83    91.51    91.56    91.43    91.28    91.02
...
91.23    90.67    90.67
84.90    90.61    91.38    92.36    92.29    92.35    92.16    92.12
...
93.52    93.61    93.61
84.92    90.37    92.79    93.59    94.31    94.42    94.68    95.24
...
95.42    95.42    95.42
86.24    93.14    94.56    95.69    95.67    96.02    96.07    95.88
...
95.88    95.88    95.88
85.70    90.78    93.73    96.00    96.13    96.39    96.23    96.23
...
96.23    96.23    96.23
82.22    89.23    93.00    95.29    96.05    96.05    96.05    96.05
...
96.05    96.05    96.05
81.37    87.75    92.89    95.47    95.83    95.83    95.83    95.83
...
95.83    95.83    95.83

```

```

80.69 86.69 92.47 95.18 95.40 95.40 95.40 95.40
...
95.40 95.40 95.40
79.83 86.00 92.05 95.06 95.48 95.48 95.48 95.48
...
95.48 95.48 95.48
78.99 85.00 91.13 94.50 94.70 94.70 94.70 94.70
...
94.70 94.70 94.70
77.41 84.26 90.75 94.21 94.21 94.21 94.21 94.21
...
94.21 94.21 94.21
76.08 82.89 90.31 93.49 93.49 93.49 93.49 93.49
...
93.49 93.49 93.49
75.97 82.22 89.96 93.17 93.17 93.17 93.17 93.17
...
93.17 93.17 93.17];

```

```

xi_Honda=linspace(1,274,274);
yi_Honda=linspace(1,8500,107.5);
[xii_Honda,yii_Honda]=meshgrid(xi_Honda,yi_Honda);
zii_Honda=interp2(Honda_Torque,Honda_Speed,Honda_eff_map,xii_Honda,.
...
yii_Honda,'linear'); %interpolated matrix

eff_Honda=zii_Honda;
%-----

```

```

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               Nissan Leaf
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----
%40kW continues 80Kw peak
%-----

```

```

Speed_Nissan=[0 500 1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000
10000];
Torque_Nissan=0:10:280;

```

```

Nissan_eff_motor_map = 0.01*[...
36 55.45 66.37 75.72 75.35 81.56 76.21 59.89 40.49
...
41.72 43.20 42.58
36 75.20 82.89 86.18 85.22 86.40 85.84 82.41 78.89
...
76.83 79.20 80.01
36 78.68 85.55 89.43 89.76 90.70 91.07 89.19 87.99
...
86.84 88.02 88.14

```

36	80.00	86.36	90.56	91.71	92.33	92.65	91.55	91.17
...								
90.93	91.68	90.99						
36	79.27	86.70	91.04	92.24	93.28	93.20	93.35	92.72
...								
92.88	93.47	92.50						
36	78.88	86.74	91.19	92.82	93.76	93.94	93.46	93.85
...								
94.13	94.57	93.30						
36	78.61	86.56	91.30	92.94	93.91	94.84	93.61	94.41
...								
94.93	95.19	93.87						
36	78.25	86.45	91.27	93.10	93.93	95.01	94.60	95.28
...								
95.54	95.51	94.11						
36	77.71	86.21	91.32	93.00	94.27	94.87	94.72	95.68
...								
96.14	95.74	94.33						
36	77.22	86.02	91.28	93.06	94.33	94.86	94.66	96.02
...								
96.39	95.93	80.00						
36	76.74	85.61	91.16	93.04	94.29	95.08	95.24	96.24
...								
96.59	80.00	80.00						
36	76.16	85.31	91.00	92.97	94.51	94.83	95.68	96.48
...								
80.00	80.00	80.00						
36	75.61	84.93	90.82	92.94	94.29	94.91	95.46	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	75.09	85.01	90.56	92.82	94.20	94.91	95.52	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	74.42	84.46	90.47	92.86	94.13	94.83	80.00	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	73.79	83.99	90.20	92.69	94.01	94.78	80.00	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	73.02	83.47	89.98	92.49	94.15	94.66	80.00	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	72.01	83.12	89.70	92.28	94.01	80.00	80.00	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	71.40	82.57	89.44	92.42	93.86	80.00	80.00	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	70.47	81.94	89.10	92.30	93.67	80.00	80.00	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	69.63	81.25	88.73	91.99	80.00	80.00	80.00	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	69.28	80.98	88.82	91.62	80.00	80.00	80.00	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						
36	68.09	80.33	88.11	91.19	80.00	80.00	80.00	80.00
...								
80.00	80.00	80.00						


```

36 66.97 79.53 87.77 90.90 80.00 80.00 80.00 80.00
...
80.00 80.00 80.00
36 67.25 78.60 87.32 90.61 80.00 80.00 80.00 80.00
...
80.00 80.00 80.00
36 66.16 77.95 87.34 90.38 80.00 80.00 80.00 80.00
...
80.00 80.00 80.00
36 64.45 77.91 86.60 90.00 80.00 80.00 80.00 80.00
...
80.00 80.00 80.00
36 64.34 77.09 85.90 80.00 80.00 80.00 80.00 80.00
...
80.00 80.00 80.00
36 62.67 76.06 85.90 80.00 80.00 80.00 80.00 80.00
...
80.00 80.00 80.00];

xi_Nissan=linspace(1,280,280);
yi_Nissan=linspace(1,10000,10000);
[xii_Nissan,yii_Nissan]=meshgrid(xi_Nissan,yi_Nissan);
zii_Nissan=interp2(Speed_Nissan,Torque_Nissan,Nissan_eff_motor_map, .
...
yii_Nissan,xii_Nissan,'linear'); %interpolated matrix
eff_Nissan=zii_Nissan;
% -----

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               UQM P150                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----
%100kW cont 150Kw peak
%-----

Speed_UQM150      = 0:250:4500;
Torque_UQM150      = 0:25:650;
UQM150_eff_motor_map= 0.01*[
    64.60 64.60 74.10 76.40 75.80 76.50 75.90 74.90
74.40...
    73.50 72.70 72.60 71.70 70.40 69.80 68.40 67.60
66.80...
    65.60 65.10 64.10 63.60 62.10 61.50 60.60 62.00
60.70
    64.60 64.60 74.10 76.40 75.80 76.50 75.90 74.90
74.40...
    73.50 72.70 72.60 71.70 70.40 69.80 68.40 67.60
66.80...
    65.60 65.10 64.10 63.60 62.10 61.50 60.60 62.00
60.70
    63.60 63.60 77.20 80.10 81.70 82.80 83.10 82.90
82.80...
    82.30 82.10 82.20 81.60 80.80 80.50 79.60 79.10
78.60...
    77.70 77.50 76.80 76.00 74.50 74.60 74.20 75.00
74.10
    62.30 62.30 78.00 82.10 83.60 85.20 85.80 86.00
85.90...

```

86.10	85.20	85.90	85.70	84.90	84.70	84.20	83.90
83.60...							
83.10	82.40	82.20	81.70	81.00	80.50	80.60	81.00
80.20							
63.80	63.80	78.20	82.70	85.20	86.20	87.10	87.70
87.70...							
87.90	87.80	87.90	86.20	87.30	87.30	87.20	86.80
86.40...							
86.30	85.80	85.50	85.20	84.80	84.60	84.10	84.60
83.90							
65.10	65.10	79.00	83.60	86.20	87.30	88.10	88.60
88.40...							
89.30	88.40	89.20	89.30	89.40	89.40	88.90	88.90
88.30...							
88.30	87.80	87.90	87.40	87.20	87.90	87.00	87.10
88.00							
65.90	65.90	80.10	84.10	85.70	88.30	88.80	89.60
90.20...							
90.30	90.60	89.90	90.90	90.50	90.30	90.20	90.10
89.90...							
89.20	89.80	89.90	89.40	89.40	89.10	89.00	89.10
89.20							
66.0	66.00	80.60	85.30	85.90	88.20	89.90	89.20
91.10...							
91.50	91.10	91.40	91.40	91.20	91.20	91.30	91.10
91.10...							
91.40	91.30	91.00	91.60	91.40	90.30	90.10	91.20
91.40							
66.30	66.30	80.30	85.80	87.60	89.20	90.40	91.40
91.60...							
92.20	92.10	92.20	92.20	92.40	92.40	92.40	92.70
92.80...							
92.90	92.90	92.80	92.90	92.50	92.30	92.20	92.10
91.60							
64.40	64.40	80.60	85.40	87.40	89.40	90.90	91.20
91.70...							
91.80	92.10	92.40	92.90	93.00	93.00	93.10	93.10
93.10...							
93.20	93.00	93.10	93.00	92.20	92.10	92.10	91.80
91.80							
64.60	64.60	77.40	84.70	86.30	89.70	90.80	91.80
92.20...							
92.80	93.40	93.90	93.50	94.30	93.10	93.20	95.30
95.20...							
95.20	95.00	95.20	95.10	94.60	94.90	94.90	94.90
94.90							
64.50	64.50	79.20	85.30	86.70	89.30	90.90	91.80
93.00...							
94.0	94.60	94.50	94.70	95.00	95.10	95.40	95.40
95.50...							
95.40	95.00	95.20	95.20	95.20	95.20	95.20	95.20
95.20							
63.40	63.40	78.70	84.80	87.50	90.00	91.40	92.30
92.90...							
94.40	94.90	94.20	95.20	95.00	95.40	95.30	95.50
95.50...							
95.0	95.0	95.0	95.00	95.00	95.00	95.00	95.00
95.00							
63.90	63.90	78.70	84.60	88.00	89.90	91.40	91.90
93.40...							

```

94.50 94.80 94.90 94.80 95.30 95.00 95.50 95.30
95.10...
94.90 94.90 94.90 94.90 94.90 94.90 94.90 94.90
94.90
63.50 63.50 78.10 84.20 87.70 89.90 91.50 92.80
93.40...
93.40 94.60 94.40 94.70 93.90 94.80 95.00 95.10
95.00...
95.00 95.00 95.00 95.00 95.00 95.00 95.00 95.00
95.00
61.40 61.40 77.30 84.30 87.80 89.80 91.30 92.20
93.50...
94.30 94.10 93.80 94.60 95.00 94.40 94.20 94.20
94.20...
94.20 94.20 94.20 94.20 94.20 94.20 94.20 94.20
94.20
61.0 61.0 77.0 83.50 86.70 89.70 91.00 92.00
93.10...
93.20 93.90 93.80 93.60 93.30 93.50 93.80 93.80
93.80...
93.80 93.80 93.80 93.80 93.80 93.80 93.80 93.80
93.80
60.70 60.70 76.00 83.30 86.50 89.50 90.60 91.70
92.60...
92.90 93.40 93.50 93.70 93.70 93.80 93.80 93.80
93.80...
93.80 93.80 93.80 93.80 93.80 93.80 93.80 93.80
93.80
58.90 58.90 75.60 82.70 86.60 88.90 90.60 91.60
92.20...
92.80 92.70 93.50 93.60 93.60 93.60 93.60 93.60
93.60...
93.60 93.60 93.60 93.60 93.60 93.60 93.60 93.60
93.60];

```

```

xi_UQM150=linspace(1,650,650);
yi_UQM150=linspace(1,4500,4500);
[xii_UQM150,yii_UQM150]=meshgrid(xi_UQM150,yi_UQM150);
zii_UQM150=interp2(Torque_UQM150,Speed_UQM150,UQM150_eff_motor_map, .
...
    xii_UQM150,yii_UQM150,'linear');    %interpolated matrix

eff_UQM150=zii_UQM150;

%-----

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               UQM 125                                %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----
%45kW continues, 125Kw peak
%-----

Speed_UQM125    = 0:200:7800;
Torque_UQM125   = [0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 240 260
280 300 ];
UQM125_eff_motor_map = 0.01*[...
58.0    58.9    60.7    65.6    63.5    62.9    63.3    64.6    64.3
63.4    63.0    61.2    61.5    61.9    62.2
58.0    58.9    60.7    65.6    63.5    62.9    63.3    64.6    64.3
63.4    63.0    61.2    61.5    61.9    62.2

```

59.5	67.5	66.8	69.8	69.3	68.3	71.2	73.0	71.6
70.3	69.5	66.4	66.3	67.0	65.8			
61.0	73.3	71.8	73.9	75.1	75.3	77.6	77.2	77.1
75.5	73.8	71.6	70.2	70.8	69.1			
61.6	77.8	76.7	78.7	79.4	80.4	82.4	80.8	80.8
79.8	77.4	75.7	73.8	73.6	72.6			
63.0	79.9	80.4	83.0	83.7	84.3	86.4	84.5	84.1
82.4	80.5	78.7	77.9	77.5	75.3			
62.3	80.7	83.7	85.6	87.3	88.8	89.0	86.9	86.0
84.4	83.4	81.2	80.2	79.8	77.7			
60.6	80.4	85.4	87.3	89.8	90.2	90.1	88.2	86.6
85.7	85.1	83.6	82.2	81.5	79.2			
58.2	80.4	86.2	88.7	90.8	91.3	90.5	89.2	87.9
87.5	86.6	84.5	83.8	82.9	81.5			
57.4	80.1	87.3	90.2	92.5	92.0	90.7	89.3	88.2
88.1	87.1	85.6	84.8	84.6	83.1			
56.2	80.7	88.0	90.5	93.0	92.2	91.2	90.2	89.8
88.4	88.4	86.6	86.2	84.9	84.0			
52.9	80.1	88.1	91.4	93.0	92.7	91.6	90.9	90.0
89.8	89.2	87.1	87.2	86.1	85.1			
51.5	80.0	88.6	91.9	93.3	92.6	91.9	91.2	90.5
90.7	89.7	87.9	87.6	87.1	85.8			
50.8	79.3	88.9	92.9	93.5	92.7	92.1	91.8	91.1
90.7	90.1	88.4	88.8	87.4	86.7			
50.2	79.8	88.8	93.9	93.3	92.9	92.5	92.7	91.5
91.0	90.7	89.2	89.0	88.5	87.7			
50.3	80.1	88.8	93.7	93.4	92.8	92.7	93.0	91.8
91.6	90.9	90.0	89.5	88.9	88.6			
49.9	80.1	88.9	93.8	93.2	93.0	92.9	93.1	92.0
91.8	91.0	90.2	90.3	89.5	89.6			
50.0	80.3	88.9	94.0	93.1	93.4	93.3	93.5	92.6
92.2	91.4	90.4	90.5	89.8	89.8			
50.0	80.2	89.3	93.3	93.0	93.5	93.4	93.6	93.3
92.6	91.8	91.2	90.8	90.4	89.8			
49.6	79.9	89.2	93.2	93.1	93.7	93.7	93.5	93.2
92.8	92.1	91.4	91.2	90.8	89.8			
49.3	79.1	89.4	92.8	93.1	93.9	93.7	93.6	93.5
93.1	92.1	91.7	91.4	91.2	89.8			
48.3	79.1	89.4	92.9	93.1	94.1	93.8	94.1	93.8
93.5	92.9	91.7	91.5	91.6	89.8			
46.8	78.5	89.3	92.7	93.1	94.1	94.1	94.0	94.0
93.8	93.3	92.4	92.0	92.0	89.8			
46.0	79.1	89.3	92.7	93.1	94.1	94.1	94.2	94.1
93.8	93.4	92.7	92.2	92.0	89.8			
45.5	79.4	89.7	92.5	93.0	94.3	93.7	94.1	93.9
93.7	93.6	92.5	92.2	92.0	89.8			
45.3	79.2	89.9	92.5	93.2	94.1	93.8	94.0	93.6
93.8	93.6	92.5	92.2	92.0	89.8			
45.2	79.2	89.6	91.9	93.3	93.9	93.3	94.0	93.6
93.7	93.5	92.5	92.2	92.0	89.8			
44.6	79.0	89.8	91.9	93.3	93.4	93.4	93.7	93.3
93.2	93.4	92.5	92.2	92.0	89.8			
39.9	79.2	90.0	91.1	93.1	93.4	93.3	93.7	93.1
93.2	93.0	92.5	92.2	92.0	89.8			
38.6	79.2	89.7	90.8	93.1	93.0	93.1	93.5	93.0
92.9	93.1	92.5	92.2	92.0	89.8			
38.1	79.1	89.0	90.6	92.3	93.1	93.1	93.2	92.9
92.7	92.7	92.5	92.2	92.0	89.8			
36.0	77.7	88.7	90.6	92.0	92.8	92.7	93.1	92.6
92.3	92.5	92.5	92.2	92.0	89.8			

33.7	76.9	88.4	90.2	91.8	92.8	92.6	92.9	92.4
92.0	92.5	92.5	92.2	92.0	89.8			
27.6	76.4	88.0	90.2	91.6	92.6	92.5	92.5	92.1
91.9	92.2	92.5	92.2	92.0	89.8			
45.0	75.9	88.0	89.9	91.4	92.1	92.2	92.0	92.1
91.5	92.0	92.5	92.2	92.0	89.8			
65.0	74.2	87.1	89.8	90.8	91.8	91.8	91.8	92.2
90.9	92.0	92.5	92.2	92.0	89.8			
66.0	72.4	86.5	89.9	90.8	91.9	91.9	91.3	91.9
91.0	92.0	92.5	92.2	92.0	89.8			
67.0	72.3	86.3	89.8	90.9	92.1	91.8	91.1	91.5
90.8	92.0	92.5	92.2	92.0	89.8			
68.0	71.6	85.7	89.9	90.9	92.0	91.5	90.8	91.4
90.8	92.0	92.5	92.2	92.0	89.8			
69.0	70.0	85.0	90.0	90.7	91.8	91.8	90.4	91.2
90.8	92.0	92.5	92.2	92.0	89.8]			

```

xi_UQM125=linspace(1,300,300);
yi_UQM125=linspace(1,7800,7800);
[xii_UQM125,yii_UQM125]=meshgrid(xi_UQM125,yi_UQM125);
zii_UQM125=interp2(Torque_UQM125,Speed_UQM125,UQM125_eff_motor_map, .
...
xii_UQM125,yii_UQM125,'linear');    %interpolated matrix
eff_UQM125=zii_UQM125;
%-----

%-----

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                                REMY                                %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----

%max Speed 10997 rpm
%continues Torque 275Nm          peak Torque300 Nm
%-----

calc_Remy_eff %eff_remy (m-file)
%-----

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                                Camry                                %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----

% 55Kw Continues, 105kw peak power
%-----

Speed_Camry= [0 700 1167 1633 2100 2567 3033 3497 3967 4433 4900
5367 5833 6300 7000 7933 8867 9800 10733 11667 12600 13533 14000];
Torque_Camry = [0 6.75 13.5 20.25 27 33.75 40.5
47.25... 54 60.75 67.5 74.25 81 87.75 94.5 101.25
108 114.75 121.5... 128.25 135 141.75 148.5 155.25 162
168.75 175.5 182.25189 195.75... 202.5 209.25 216 222.75
229.5 236.25 243 249.75 256.5 263.25 270];

Camry_eff_motor_map = [...
0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6
0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6
0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6

```

0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.6							
0.836	0.836	0.836	0.855	0.853	0.844	0.843	0.837
0.828	0.821	0.821	0.803	0.788	0.785	0.768	0.756
0.740	0.731	0.708	0.684	0.748	0.718	0.714	0.680
0.677	0.657	0.642	0.619	0.619	0.619	0.619	0.61880833
0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833
0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833	0.61880833
0.864	0.864	0.864	0.882	0.889	0.886	0.883	0.877
0.870	0.871	0.868	0.859	0.853	0.850	0.839	0.832
0.824	0.809	0.794	0.771	0.779	0.753	0.748	0.807
0.781	0.766	0.741	0.706	0.776	0.753	0.739	0.739
0.739	0.739	0.739	0.739	0.739	0.739	0.739	0.739
0.738987794	0.738987794	0.738987794	0.738987794	0.738987794	0.738987794	0.738987794	0.738987794
0.883	0.883	0.883	0.894	0.896	0.905	0.900	0.899
0.896	0.887	0.880	0.883	0.875	0.872	0.875	0.862
0.843	0.849	0.831	0.831	0.818	0.820	0.792	0.818
0.809	0.794	0.783	0.784	0.759	0.812	0.781	0.781
0.781	0.781	0.781	0.781	0.781	0.781	0.781	0.781
0.78125986	0.78125986	0.78125986	0.78125986	0.78125986	0.78125986	0.78125986	0.78125986
0.875	0.875	0.875	0.894	0.901	0.906	0.927	0.912
0.909	0.907	0.902	0.901	0.891	0.885	0.887	0.872
0.873	0.857	0.859	0.856	0.840	0.839	0.847	0.839
0.832	0.826	0.826	0.815	0.790	0.789	0.844	0.844
0.844	0.844	0.844	0.844	0.844	0.844	0.844	0.844
0.844	0.844093662	0.844093662	0.844093662	0.844093662	0.844093662	0.844093662	0.844093662
0.877	0.877	0.877	0.893	0.903	0.908	0.917	0.912
0.914	0.916	0.914	0.920	0.912	0.914	0.905	0.902
0.894	0.884	0.878	0.879	0.871	0.849	0.855	0.891
0.880	0.872	0.857	0.838	0.850	0.823	0.850	0.850
0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
0.850162155	0.850162155	0.850162155	0.850162155	0.850162155	0.850162155	0.850162155	0.850162155
0.889	0.889	0.889	0.897	0.908	0.914	0.916	0.916
0.920	0.925	0.921	0.926	0.918	0.914	0.904	0.920
0.905	0.901	0.898	0.893	0.887	0.876	0.866	0.880
0.873	0.886	0.868	0.864	0.851	0.843	0.862	0.862
0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862
0.861929133	0.861929133	0.861929133	0.861929133	0.861929133	0.861929133	0.861929133	0.861929133
0.880	0.880	0.880	0.902	0.910	0.921	0.920	0.923
0.928	0.926	0.926	0.928	0.927	0.924	0.922	0.922
0.918	0.917	0.912	0.908	0.895	0.893	0.882	0.878
0.883	0.891	0.881	0.865	0.867	0.873	0.861	0.860917389
0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389
0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389	0.860917389
0.884	0.884	0.884	0.907	0.915	0.921	0.926	0.923
0.926	0.920	0.924	0.928	0.925	0.929	0.928	0.921
0.923	0.919	0.914	0.909	0.908	0.902	0.896	0.900
0.891	0.888	0.884	0.881	0.881	0.881	0.881	0.880528866
0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866
0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866	0.880528866
0.891	0.891	0.891	0.905	0.914	0.923	0.924	0.929
0.930	0.932	0.936	0.932	0.930	0.939	0.934	0.931
0.926	0.924	0.921	0.916	0.914	0.908	0.903	0.904
0.893	0.893	0.893	0.893	0.893	0.893	0.893	0.893371453
0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453
0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453	0.893371453
0.879	0.879	0.879	0.903	0.913	0.929	0.922	0.931
0.937	0.934	0.934	0.939	0.933	0.940	0.942	0.929
0.932	0.928	0.925	0.920	0.915	0.910	0.897	0.897
0.897	0.897	0.897	0.897	0.897	0.897	0.897	0.897301079

0.897301079	0.897301079	0.897301079	0.897301079	0.897301079		
0.897301079	0.897301079	0.897301079	0.897301079	0.897301079		
0.892	0.892	0.892	0.910	0.923	0.930	0.931 0.930
0.942	0.942	0.941	0.950	0.940	0.938	0.929 0.931
0.927	0.923	0.912	0.900	0.909	0.909	0.909 0.909
0.909	0.909	0.909	0.909	0.909	0.909	0.909 0.909419622
0.909419622	0.909419622	0.909419622	0.909419622	0.909419622	0.909419622	
0.909419622	0.909419622	0.909419622	0.909419622	0.909419622		
0.890	0.890	0.890	0.912	0.921	0.929	0.933 0.935
0.937	0.936	0.938	0.931	0.928	0.922	0.916 0.914
0.902	0.899	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887 0.887
0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887 0.88706528
0.88706528	0.88706528	0.88706528	0.88706528	0.88706528	0.88706528	
0.88706528	0.88706528	0.88706528	0.88706528	0.88706528		
0.880	0.880	0.880	0.910	0.929	0.924	0.931 0.935
0.935	0.931	0.930	0.929	0.926	0.917	0.914 0.903
0.895	0.885	0.885	0.885	0.885	0.885	0.885 0.885
0.885	0.885	0.885	0.885	0.885	0.885	0.885 0.884862983
0.884862983	0.884862983	0.884862983	0.884862983	0.884862983	0.884862983	
0.884862983	0.884862983	0.884862983	0.884862983	0.884862983		
0.878	0.878	0.878	0.897	0.922	0.921	0.924 0.932
0.928	0.928	0.929	0.918	0.913	0.904	0.895 0.895
0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895 0.895
0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895 0.894599477
0.894599477	0.894599477	0.894599477	0.894599477	0.894599477	0.894599477	
0.894599477	0.894599477	0.894599477	0.894599477	0.894599477		
0.885	0.885	0.885	0.912	0.919	0.923	0.921 0.922
0.918	0.916	0.909	0.897	0.893	0.893	0.893 0.893
0.893	0.893	0.893	0.893	0.893	0.893	0.893 0.893
0.893	0.893	0.893	0.893	0.893	0.893	0.893 0.892716254
0.892716254	0.892716254	0.892716254	0.892716254	0.892716254	0.892716254	
0.892716254	0.892716254	0.892716254	0.892716254	0.892716254		
0.873	0.873	0.873	0.895	0.906	0.907	0.908 0.911
0.903	0.893	0.885	0.880	0.880	0.880	0.880 0.880
0.880	0.880	0.880	0.880	0.880	0.880	0.880 0.880
0.880	0.880	0.880	0.880	0.880	0.880	0.880 0.879734763
0.879734763	0.879734763	0.879734763	0.879734763	0.879734763	0.879734763	
0.879734763	0.879734763	0.879734763	0.879734763	0.879734763		
0.852	0.852	0.852	0.885	0.893	0.899	0.901 0.897
0.891	0.874	0.874	0.874	0.874	0.874	0.874 0.874
0.874	0.874	0.874	0.874	0.874	0.874	0.874 0.874
0.874	0.874	0.874	0.874	0.874	0.874	0.874 0.87399584
0.87399584	0.87399584	0.87399584	0.87399584	0.87399584	0.87399584	
0.87399584	0.87399584	0.87399584	0.87399584	0.87399584		
0.830	0.830	0.830	0.865	0.878	0.879	0.894 0.887
0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878 0.878
0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878 0.878
0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878 0.877650018
0.877650018	0.877650018	0.877650018	0.877650018	0.877650018	0.877650018	
0.877650018	0.877650018	0.877650018	0.877650018	0.877650018		
0.836	0.836	0.836	0.866	0.880	0.878	0.879 0.857
0.857	0.857	0.857	0.857	0.857	0.857	0.857 0.857
0.857	0.857	0.857	0.857	0.857	0.857	0.857 0.857
0.857	0.857	0.857	0.857	0.857	0.857	0.857 0.857249065
0.857249065	0.857249065	0.857249065	0.857249065	0.857249065	0.857249065	
0.857249065	0.857249065	0.857249065	0.857249065	0.857249065		
0.818	0.818	0.818	0.856	0.875	0.875	0.864 0.864
0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864 0.864
0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864 0.864
0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864 0.864438425

```

0.864438425 0.864438425 0.864438425 0.864438425 0.864438425
0.864438425 0.864438425 0.864438425 0.864438425
0.811 0.811 0.811 0.835 0.862 0.866 0.875 0.875
0.875 0.875 0.875 0.875 0.875 0.875 0.875 0.875
0.875 0.875 0.875 0.875 0.875 0.875 0.875 0.875
0.875 0.875 0.875 0.875 0.875 0.875 0.875 0.875325033
0.875325033 0.875325033 0.875325033 0.875325033 0.875325033
0.875325033 0.875325033 0.875325033 0.875325033
0.828 0.828 0.828 0.859 0.867 0.862 0.862 0.862
0.862 0.862 0.862 0.862 0.862 0.862 0.862 0.862
0.862 0.862 0.862 0.862 0.862 0.862 0.862 0.862
0.862 0.862 0.862 0.862 0.862 0.862 0.862 0.862203742
0.862203742 0.862203742 0.862203742 0.862203742 0.862203742
0.862203742 0.862203742 0.862203742 0.862203742]+0.01;

```

```

xi_Camry=linspace(1,270,270);
yi_Camry=linspace(1,14000,14000);
[xii_Camry,yii_Camry]=meshgrid(xi_Camry,yi_Camry);
zii_Camry=interp2(Torque_Camry,Speed_Camry,Camry_eff_motor_map,xii_C
amry,...
yii_Camry,'linear'); %interpolated matrix

eff_Camry=zii_Camry;
%-----

```

```

if motor1==0
    load no_motor1;end;
if motor1==1
    Pmaxmotor1=49000;eff_map1=eff_Honda;Tlmax=274;'motor1
Honda';end;
if motor1==2
    Pmaxmotor1=105000;eff_map1=eff_Camry;Tlmax=270;'motor1
Camry';end;
if motor1==3
    Pmaxmotor1=165000;eff_map1=eff_Lexus;Tlmax=300;'motor1
Lexus';end;
if motor1==4
    Pmaxmotor1=80000;eff_map1=eff_Nissan;Tlmax=280;'motor1
Nissan';end;
if motor1==5
    Pmaxmotor1=125000;eff_map1=eff_UQM125;Tlmax=300;'motor1
UQM125';end;
if motor1==6
    Pmaxmotor1=76000;eff_map1=eff_remy;Tlmax=300 ;'motor1
Remy';end;
if motor1==7
    Pmaxmotor1=4500;eff_map1=eff_UQM150;Tlmax=650 ;'motor1
UQM150';end;
if motor1==0
    load nomotor2;end;
if motor2==1
    Pmaxmotor2=49000;eff_map2=eff_Honda;T2max=274;'motor2
Honda';end;
if motor2==2
    Pmaxmotor2=105000;eff_map2=eff_Camry;T2max=270;'motor2
Camry';end;
if motor2==3
    Pmaxmotor2=165000;eff_map2=eff_Lexus;T2max=300;'motor2
Lexus';end;
if motor2==4

```



```

        Pmaxmotor2=80000;eff_map2=eff_Nissan;T2max=280;'motor2
Nissan';end;
if motor2==5
    Pmaxmotor2=125000;eff_map2=eff_UQM125;T2max=300;'motor2
UQM125';end;
if motor2==6
    Pmaxmotor2=76000;eff_map2=eff_remy;T2max=300    ;'motor2
Remy';end;
if motor2==7
    Pmaxmotor2=4500;eff_map2=eff_UQM150;T2max=650    ;'motor1
UQM150';end;
%-----

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                                     TORQUE SPLIT                                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----

%-----
% in every sample time the most efficient T1 and T2 values are
calculated.
% in every sample time the minumum P1 and P2 values are calculated.
%-----

%init for for jj-----
    P11_best=zeros(time,1);
    P22_best=zeros(time,1);
    Ptot_best=zeros(time,1);

    T1=zeros(time,1);
    T2=zeros(time,1);
    Ttotal=zeros(time,1);
    n1=zeros(time,1);
    n2=zeros(time,1);

    mot_spd=zeros(time,1);
    mot_spd_rpm=zeros(time,1);
    Tmaxx=zeros(time,1);
%-----

    for jj=1:time
%----- JJ init-----
        T11=zeros(time,1);
        T22=zeros(time,1);
        P11=zeros(time,1);
        P22=zeros(time,1);
        Ptot=zeros(time,1);
        P11_amp=zeros(time,1);
        P22_amp=zeros(time,1);
        sayi=1;

        % Ceiling-----
        mot_spd(jj)=ceil(w_m(jj));
        mot_spd_rpm(jj)=ceil(w_mot_rpm(jj));

        if T_motor(jj)>0
            Tmaxx(jj)=ceil(T_motor(jj));

```

```

else
    if T_motor(jj)<0
        Tmaxx(jj)=-1.*ceil(abs(T_motor(jj)));
    end;
end;
%-----

%----- JJ init over -----
jj;
if mot_spd(jj)>0
    Flag1=Flag1+1;
    for jk=1:1:(abs(Tmaxx(jj))+1)
        jk;
        if jk==1
            Flag2=Flag2+1;
            T11(jk)=0;
            T22(jk)=Tmaxx(jj);

            Ptemp=zeros(1000,1);
            Ptemp2=zeros(1000,1);
            n11=zeros(1000,1);
            n22=zeros(1000,1);
            exeed=zeros(1000,1);
        else
            if Tmaxx(jj)>0
                T22(jk)=T22(jk-1)-1;
                T11(jk)=Tmaxx(jj)-T22(jk);
            end;
            if Tmaxx(jj)<0
                T22(jk)=T22(jk-1)+1;
                T11(jk)=Tmaxx(jj)-T22(jk);
            end;
        end;
    end;

%-----EFFICIENCY OF MOTOR1-----
%-----
    if round(abs(T11(jk)))<T1max
        Ptemp(jk)=(mot_spd(jj)*T11(jk));
        if abs(Ptemp(jk))<abs(Pmaxmotor1)

n11(jk)=eff_map1((1+round(mot_spd_rpm(jj))), (1+round(abs(T11(jk)))))
;
            else
                exeed(jk)=1;
            end;
        else
            exeed(jk)=1;
        end;

%-----EFFICIENCY OF MOTOR2-----
%-----
    if round(abs(T22(jk)))<T2max
        Ptemp2(jk)=(mot_spd(jj)*T22(jk));
        if abs(Ptemp2(jk))<abs(Pmaxmotor2)
n22(jk)=eff_map2((1+round(mot_spd_rpm(jj))), (1+round(abs(T22(jk)))))
;
            else
                exeed(jk)=1;
            end;
        else
            exeed(jk)=1;
        end;
end;

```

```

%-----

trade_off=0.999;
% -----
if Tmaxx(jj)>=0
    if exeed(jk)==0

        P11(jk)=(T11(jk)*(w_m(jj)))/n11(jk);
        P11_amp(jk)=P11(jk);
        P22(jk)=(T22(jk)*(w_m(jj)))/n22(jk);
        P22_amp(jk)=P22(jk)/trade_off;
        Ptot(jk)=P11_amp(jk)+P22_amp(jk);
        if jk==1
            Ptot_best(jj)=Ptot(jk);
            sayi=jk;
            n1(jj)=n11(jk);n2(jj)=n22(jk);
            T1(jj)=T11(jk);T2(jj)=T22(jk);
            P1(jj)=P11(jk);P2(jj)=P22(jk);
        else
            if Ptot(jk)< Ptot_best(jj)
                Ptot_best(jj)=Ptot(jk);
                sayi=jk;
                n1(jj)=n11(jk);n2(jj)=n22(jk);
                T1(jj)=T11(jk);T2(jj)=T22(jk);
                P1(jj)=P11(jk);P2(jj)=P22(jk);
            end;
        end;
    end;
end;

if Tmaxx(jj)<0
    if exeed(jk)==0
        P11(jk)=(T11(jk)*(w_m(jj)))*n11(jk);
        P11_amp(jk)=P11(jk)*trade_off;
        P22(jk)=(T22(jk)*(w_m(jj)))*n22(jk);
        P22_amp(jk)=P22(jk);
        Ptot(jk)=P11_amp(jk)+P22_amp(jk);

%-----
        if jk==1
            Ptot_best(jj)=Ptot(jk);
            sayi=jk;
            n1(jj)=n11(jk);n2(jj)=n22(jk);
            T1(jj)=T11(jk);T2(jj)=T22(jk);
            P1(jj)=P11(jk);P2(jj)=P22(jk);
        else
            if abs(Ptot(jk))> abs(Ptot_best(jj))
                Ptot_best(jj)=Ptot(jk);
                sayi=jk;
                n1(jj)=n11(jk);n2(jj)=n22(jk);
                T1(jj)=T11(jk);T2(jj)=T22(jk);
                P1(jj)=P11(jk);P2(jj)=P22(jk);
            end;
        end;
    end;
end;
end;

    if abs(T1(jj))>0
T1(jj)=(T11(sayi)./(T22(sayi)+T11(sayi))).*T_motor(jj);
        T2(jj)=T_motor(jj)-T1(jj);
    end;
end;

```

```

        else
            if abs(T2(jj))>0
T2(jj)=(T22(sayi)/(T11(sayi)+T22(sayi))).*T_motor(jj);
                T1(jj)=T_motor(jj)-T2(jj);
            end;
        end;
        P11_best(jj)=T1(jj).*w_m(jj);
        P22_best(jj)=T2(jj).*w_m(jj);
        Ptot_best(jj)=P11_best(jj)+P22_best(jj);
        Ttotal(jj)=T1(jj)+T2(jj);
        n1(jj)=n11(sayi);
        n2(jj)=n22(sayi);
    end;
end;

Pm1_in=P11_best;
Pm2_in=P22_best;
P_mot_in=Pm1_in+Pm2_in;
Pinv1_out=Pm1_in;
Pinv2_out=Pm2_in;
Pinv1_in=zeros(time,1);
Pinv2_in=zeros(time,1);

%inverter eff
inv_eff=0.97;

for jinv=1:time
if Pm1_in(jinv)>0
    Pinv1_in(jinv)=Pm1_in(jinv)/inv_eff;
else
    Pinv1_in(jinv)=Pm1_in(jinv)*inv_eff;
end;
if Pm2_in(jinv)>0
    Pinv2_in(jinv)=Pm2_in(jinv)/inv_eff;
else
    Pinv2_in(jinv)=Pm2_in(jinv)*inv_eff;
end;
end;

% efficiency of the motors and inverters
P_inv_in=Pinv1_in+Pinv2_in;
eta_Propulsion_mot = sum(P_mot_out.*(P_mot_out>=0))...
    / sum(P_inv_in.*(P_inv_in>=0))
eta_Regen_mot = sum(P_inv_in.*(P_inv_in<0)) /
    sum(P_mot_out.*(P_mot_out<0))
tot_prop_pow=sum(P_mot_out.*(P_mot_out>=0));
tot_ren_pow=sum(P_mot_out.*(P_mot_out<0));
eta_total_mot=((tot_prop_pow*eta_Propulsion_mot)+(abs(tot_ren_pow)...
.
*eta_Regen_mot))/(tot_prop_pow+abs(tot_ren_pow))

save('Inv_Power.mat','mt','Pm1_in','Pm2_in','P_mot_in','Pinv2_in'...
    ,'Pinv1_in','P_mot_out','T1','T2','n1','n2','v','w_m'...
    ,'w_mot_rpm','Gr','time','eta_Propulsion_mot'...
    ,'eta_Regen_mot','eta_total_mot')

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               Online Convex                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load Inv_Power.mat %load optimally splitted inv powers.
speed=v; %velocity of the vehicle [m/s]
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Energy Storage System                       %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               BATTERY                                     %
%                               Make:K2 Energy      Model:LFP26650EV        %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Cell Specs
%-----
% Capacity [Ah] 3.2
% Charge current [A]      3.2
% Nom. Voltage [V] 3.2
% Recomendated Cont. Discharge current [A]      3.2
% Max Discharge 12 A, puls 28A
% Energy [Wh] 10.24
% Rb [ohm] 0.019
% Weight 0.08

% Modul Specs
%-----
NbatPar = 25;% number of paralel brunches
NbatSer =94; %number of serial brunches
Nbat = NbatSer *NbatPar; % Cell number
Vbat_nom = 3.2 * Nbat / NbatPar;
Vbo = Vbat_nom; %battery open circuit voltage
Rb_nom = 19 * 10^(-3) * (NbatSer/NbatPar);
Ibat_max = 12 * NbatPar; %max discharge current
Ibat_min = -3.2 * NbatPar; %max charge current
Qbnom = 3.2 * NbatPar ; % (Ah) Battery nominal Capacity
Bat_Amp_Sec0=Qbnom*3600;
load Sa_linear
Pbat_max = Ibat_max*(Vbat_nom - Rb_nom*Ibat_max); % max discharge
power
Pbat_min = Ibat_min*(Vbat_nom - Rb_nom*Ibat_min); % max charge
power
Bat_energy=3.2*Qbnom*NbatSer/1000; %24kWh
Ebmax=Bat_energy*3600*1000; % 86.4e6 joule
%-----

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               UC
%                               Make:Maxwell      Model:BCAP1500/BCAP2000
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%SELECT CASE1 or CASE2
% CASE1 => BCAP2000

% Cell 222                                Ruc [ohm] 0.0777
% Capacitance [F] 9.009009009            Vuc nom 599.4
% Soc min 0.5                             Soc max 1
% Vuc min 299.7                           Vuc max 599.4
% Energy max [Wh] 449.5500004             Energy min [Wh] 112.3875001
% Etotal [Wh] 337.1625003                 Weight [Kg] 79.92

% CASE2 => BCAP1500

% Cell 222                                Ruc [ohm] 0.10434
% Capacitance [F] 6.756756757            Vuc nom 599.4
% Soc min 0.5                             Soc max 1
% Vuc min 299.7                           Vuc max 599.4
% Energy max [Wh] 337.1625003             Energy min [Wh] 112.3875001
% Etotal [Wh] 84.29062507                 Weight [Kg] 62.16

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UC=2;
% 1 for BCAP2000
% 2 for BCAP1500
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if UC==1
Ruc_iner=0.35*10^(-3); Farad=2000;
else
Ruc_iner=0.47*10^(-3); Farad=1500;
end;
Nuc = 222;
Ruc = Ruc_iner*Nuc;
Capacitance = Farad./Nuc;
Vuc_nom = 2.7 * Nuc;
SOCuc_min = 0.5; SOCuc_max = 1;
Vuc_min = Vuc_nom*SOCuc_min; Vuc_max = Vuc_nom*SOCuc_max;
iuc_max=1150;
Puc_max=iuc_max*Vuc_max;
Eucmax = 0.5*Capacitance*Vuc_nom^2 * (SOCuc_max^2);
Eucmin = 0.5*Capacitance*Vuc_nom^2 * (SOCuc_min^2);
Vucmax=Vuc_nom;
%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               FC
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FC system total weight 63.75;
% max power 8 kW
% 60l tank 2,494kg H2 (1kg H2 33.3kWh);
nfcboost=0.98;
Efcmax=2.49375*33.3*1000*3600; %(298,95e6 joule) (83kWh. usable ~43
kWh)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%initialiaztion of convex optimization for the Pb and Puc Pfc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Maximum power of battery
Pbmax=Pbat_max; Pbthre=Pbat_max/4;

% Maximum variation power of battery is 25kw
Pbvarmax=25e3; Pbvarthre=10e3;

% Maximum power of DC/DC converter is 40kw
Pconvmax=40e3; Pconvthre=20e3;

% Maximum power of fuel cell is 8kw
Pfc_max=8e3; Pfc_thre=50;

t=1:1:time; z=zeros(time,1);

% INIT

% initial UC SOCuc is 0.90
SOCuc=z; SOCuc(1)=0.9;

Euc=z; Euc(1)=Eucmax*(SOCuc(1)^2);
Vuc=z; Vuc(1)=Vucmax*SOCuc(1);
Iuc=z;
Euc_ref=Eucmax*(0.75^2);
Puc=z; Puc_in=z;
SOC_UC_ref=z; Euc_ref=z;

% initial bat SOCb is 0.99
SOCb=z; SOCb(1)=0.99;

Eb=z; Eb(1)=Ebmax*SOCb(1);
Vb=z; Vb(1)=Vbat_nom; Ib=z;
Pb=z; Pb(1)=0; Pb_in=z; Pbvar=z;
Rb_cell=z; Rb=z; Rb_cell(1)=19*10^(-3); Rb(1)=Rb_nom;

% initial FC SOC is 1
Efc=z; Efc(1)=Efcmax*1; SOCfc=z; SOCfc(1)=1;

nfc=z; nfc(1)=0.60;
Pfc=z; Pfc_ref=z; Pfc_in=z;

%DCDC
efft_conv=z; Pconv=z;

efft_mot_inv1=z; efft_mot_inv2=z;
Pe=P_inv_in;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for j=2:1:time
j
Pe(j)=Pinv1_in(j)+Pinv2_in(j);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%convex optimization for the Pb, Puc and Pfc

b=[Pb(j-1);
    Pinv1_in(j)-Pfc_ref(j)];
A=[Pbthre -Pbvarthre 0 0;
    Pbthre 0 -Pconvthre Pfc_thre];

c=[Pconvmax;
    Pbvarmax;
    Pbmax;
    Pfc_max];
D=[0 0 Pconvthre 0;
    0 Pbvarthre 0 0;
    Pbthre 0 0 0;
    0 0 0 Pfc_thre];

E=[Pbthre 0 0 0;
    0 Pbvarthre 0 0;
    0 0 Pconvthre 0;
    0 0 0 Pfc_thre];
d=[-0.3*Pbmax;
    -1*Pbvarmax;
    -1*Pconvmax;
    -1*Pfc_max];
n=4;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cvx_begin
variables y(n);
minimize(0.8*huber(y(1))+0.8*huber(y(2))+0.1*huber(y(3))+0.03*huber(
y(4))+0.01*norm((1+0.0523*(y(4)*Pfc_thre+Pfc_ref(j)))/8000+0.6256));
subject to
A*y==b;
D*y<=c;
E*y>=d;
cvx_end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Pb(j)=y(1)*Pbthre; Pconv(j)=y(3)*Pconvthre;
Pfc(j)=y(4)*Pfc_thre+Pfc_ref(j);

%-----
if Pconv(j)>=0 % power flow from bat to UC
    Puc(j)=Pinv2_in(j)-(Pconv(j)*eff_Pconv);
else % power flow from UC to bat
    Puc(j)=Pinv2_in(j)-(Pconv(j)/eff_Pconv);
end;
%-----

Euc(j)=Euc(j-1)-Puc(j);
Pbvar(j)=Pb(j)-Pb(j-1);
Pconv(j)=Pinv2_in(j)-Puc(j);

Vuc(j)=SOCuc(j)*Vucmax;

```



```

Iuc(j) = (Vuc(j)-sqrt(Vuc(j).^2-4.*Puc(j)*Ruc))./(2*Ruc);
Puc_in(j)=Vuc(j).*Iuc(j);
Euc(j)=Euc(j-1)-Puc_in(j);
SOCuc(j)=(Euc(j)/Eucmax)^0.5;
Vuc(j)=SOCuc(j)*Vucmax;

SOC_UC_ref(j+1)=(0.5-0.99)*(speed(j)/150)+0.99;
Eucref(j+1)=SOC_UC_ref(j+1)^2*Eucmax;

Eb(j)=Eb(j-1)-Pb(j);
SOCb(j)=(Eb(j)/Ebmax);
Vb(j)=(3.325* Nbat / NbatPar)*troff(j);

% Battery inner resistance current and total power.
Rb_cell(j) = (67.484-(14.782.*(Vb(j)./NbatSer)))* 10^(-3);
Rb(j) = Rb_cell(j)*(NbatSer/NbatPar);

Ib(j)= (Vb(j)-sqrt(Vb(j)^2-4*Pb(j).*Rb(j)))./(2.*Rb(j));
Pb_in(j)=Vb(j)*Ib(j);

Eb(j)=Eb(j-1)-Pb_in(j);
SOCb(j)=(Eb(j)/Ebmax);
Pbvar(j)=Pb(j)-Pb(j-1);

%%%%%%%%%% Fuel Cell
Pfc(j)=(Pfc(j)*nfcboost);
nfc(j)=0.6256-(0.0523.*(Pfc(j)/Pfc_max));
Pfc_in(j)=(2-nfc(j)).*Pfc(j)+((1-nfcboost)*Pfc(j));
Efc(j)=Efc(j-1)-Pfc_in(j);
SOCfc(j)=Efc(j)/Efcmax;
Pfc_ref(j+1)=(SOCb(j)-0.2)/0.8*(1600-8000)+8000;

end

% -----
Ibr = abs(Ib./Qbnom);
dSOH = Sa_linear.*Ibr;
dSOHsum = sum(dSOH);
B_EOL_est_years=0.2/(dSOHsum*365.25);
AER=((Efcmax)*12.07*5)/((Euc(1)-Euc(time))+(Eb(1)-Eb(time))+(Efc(1)-Efc(time)))+(Ebmax)*yol/(11.27*3600*1000);
% -----

```



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Hüseyin Ayhan YAVAŞOĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri : 29.02.1980, Bornova

E-posta : huseyinyavasoglu@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2003, YTU, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2005, YTU, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yavasoglu, H. A.**, Shen, J., Shi, C., Khaligh, A., 2015. A Supervisory Controller for a Hybrid Energy Storage System with Two Propulsion Machines in Electric Vehicles, *International Conference on Acemp, Optum & Electromotion*, October 2-4, 2015, Antalya, Turkey.
- Brown, J., Gill, J., **Yavaşoğlu, H.**, 2014. Are Hydrogen Vehicles Still A Rational Investment?, *Emerging researchers national (ERN) conference in STEM*, February 20-22, 2014 Washington D.C. USA.
- **Yavasoglu, H. A.**, Shen, J., Shi, C., Gokasan, M., Khaligh, A., 2015. Power Split Control Strategy for an EV Powertrain With Two Propulsion Machines, *IEEE Transactions On Transportation Electrification*, 1(4), 382-390.
- Yazici, M., **Yavasoglu, H.***, Eroglu, M., 2013. A mobile off-grid platform powered with photovoltaic/wind/battery/fuel cell hybrid power systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(26), 11639–11645.

