



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ TAŞIT ARAÇLARINDA KULLANILAN LİTYUM-İYON
BATARYALARIN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ**

Ali Abdullah SAYIN

Prof.Dr. İbrahim YÜKSEL
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2011
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Ali Abdullah SAYIN tarafından hazırlanan “**Elektrikli Taşıt Araçlarında Kullanılan Lityum-İyon Bataryaların Modellenmesi ve Benzetimi**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof.Dr. İbrahim YÜKSEL

Başkan : Prof. Dr. İbrahim YÜKSEL
U.Ü. Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza:

Üye : Prof. Dr. Güneş YILMAZ
U.Ü. Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gürsel ŞEFKAT
U.Ü. Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza:

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Kadri ARSLAN

Enstitü Müdürü

../../....(Tarih)

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

01/09/2011

İmza

Ali Abdullah SAYIN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ TAŞIT ARAÇLARINDA KULLANILAN LİTYUM-İYON BATARYALARIN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Ali Abdullah SAYIN

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. İbrahim YÜKSEL

Bu tez çalışmasında li-iyon bataryanın modellenmesi ve modellenen sistem üzerinde benzetimlerin yapılarak, özellikle batarya yönetim sistemi ve özel olarak da dengeleme sistemi denetim stratejilerinin ortaya konması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda öncelikle var olan farklı elektrikli araç mimarileri ve alt sistemleri incelenmiştir. Bu alt sistemlerden en önemlisi ve karmaşığı olan bataryaların, karakteristikleri ile ilgili daha detaylı bilgilere yer verilmiştir. Tez çalışmasına konu olan endüstriyel bir projede, enerji kaynağı olarak li-iyon batarya kullanılmıştır. Li-iyon bataryayı denetleyecek sistemin denetim stratejilerinin belirlenmesi ve dinamik davranışının kestirilebilmesi için gerekli olan matematiksel model tasarlanmıştır. Bu model kullanılarak benzetimler yapılmış, elde edilen çıktılar ile batarya hücresi dengeleme stratejisi geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araç, batarya yönetim sistemi, batarya modelleme, hücre dengeleme.

2011, x + 113 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

MODELING AND SIMULATION OF ELECTRIC VEHICLES' LITHIUM-ION BATTERY

Ali Abdullah SAYIN

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof.Dr. İbrahim YÜKSEL

The objective of this thesis is to develop the battery management system control strategies, particularly cell balancing, by setting up a li-ion battery model and realizing several simulations on the model. In order to accomplish this objective different kind of electric vehicle architectures and their subsystems have been researched. The characteristics of the batteries are much more detailed because of their distinctive importance and complexity comparing to the other subsystems. The subject of this study is an industrial project whereas a li-ion battery has been chosen as the energy source. A mathematical model of the battery has been obtained to predict dynamic behavior of battery and to define the control strategies of battery management system. In conclusion, cell balancing strategies have been identified based on the simulation results gathered from this battery model.

Keywords: Electric vehicles, battery management systems, li-ion battery modeling, cell balancing.

2011, x + 113 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Otomotiv sektörünün yüzyıl önce rafa kaldırdığı elektrikli araç projeleri bugün tekrardan akademisyenlerin ve mühendislerin gündemlerinde yer almaktadır. Bu noktadan hareketle yüksek lisans tez çalışmamızda bu projelerin kanaatimizce en stratejik unsuru olan batarya ve batarya yönetimine yeni bir bakış açısı getirmeye çalıştık. Amacımız, ülkemizde yapılan hem akademik hem de endüstriyel çalışmalara ufak da olsa bir katkıda bulunmaktır. Umuyoruz ki, bu çevre dostu araç projeleriyle dünyamızı, çocuklarımıza daha yaşanabilir bir şekilde bırakabiliriz.

Tezin hazırlanmasında tüm deneyimini ve birikimini paylaşan danışmanım Prof. Dr. İbrahim YÜKSEL'e, özellikle tez konusunun seçiminde bana yol gösteren, tecrübelerini aktaran Dr. Wolfgang BÖGEL'e, hem profesyonel iş yaşantıma devam edip hem de akademik çalışma yapmamın yolunu açan yöneticilerim Murat TAŞDELEN, Ertunç ERKOÇ ve Nevin ÇAPAR'a, teknik konularda büyük bir işbirliği içinde olan Masato ORIGUCHI, Antoine SAINT-MARCOUX, Yves LE-VOURCH, Clement JUNCA ve Jérémie LELONG'a teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışmanın temelinde yer alan endüstriyel projeyi TEYDEB 3100471 kapsamında destekleyen TÜBİTAK' a da şükranlarımı sunarım

Bu uzun süren çetin yolda gerçek bir hayat arkadaşı olan, giden zamanın geri gelmeyeceğini bilmesine rağmen, bir eş olarak aile yaşantımızdan feragat ederek, her zaman ve her şartta özverili bir şekilde bana destek olan, değerli varlığım, sevgili eşim Gülcan SAYIN'a teşekkür ederim. Ayrıca, babasıyla geçirmesi gereken zamanları isteği dahilinde olmadan ve hatta hiç farkına bile varamadan kaybeden yaşama amacım kızım Defne Zeynep'ten özür diler; bir bakışıyla, dokunuşuyla, gülümseyişiyle hayat enerjimi yenilediği için de teşekkür ederim. Beni dünyaya getirdikten sonra, yıllarca onurlu, haysiyetli ve üretken bir birey olmam için her türlü emeği sarf eden annem Nezire SAYIN ve merhum babam Emin SAYIN'a, bütün hayatım boyunca yolumu aydınlatan ablam Elif SERT'e ve beni kardeşi yerine koyan eşi Altan SERT'e, varlığıyla maddi-manevi bana her türlü desteği veren, elimden tutan, bana ağabeylikten çok babalık yapan Emrah SAYIN'a, beni öz evlatlarından ayırmayan Fatma ve Akif ATÇI'ya teşekkür ederim. Benden daha çok emeğinizin geçtiğine inandığım bu çalışmayı sevgi ve saygılarımla sizlere ithaf ediyorum.

Ali Abdullah SAYIN
27 / 09 / 2011

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
3. MATERYAL VE YÖNTEM	9
3.1. Elektrikli Araçlar Hakkında Genel Bilgiler	9
3.1.1. Elektrikli araç teknolojilerinin gelişimi	9
3.1.2. Elektrikli araç teknolojilerinin sınıflandırılması	10
3.1.2.1. İçten yanmalı motorlu ve hibrit elektrikli taşıt araçlarının özellikleri	11
3.1.2.2. Elektrikli taşıt araçlarının özellikleri	13
3.1.2.3. Farklı elektrikli araç tipleri	17
3.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Enerji Kaynakları	21
3.2.1 Farklı batarya tipleri	22
3.2.1.1. Lityum-iyon bataryalar	25
3.2.1.1.1 Lityum-iyon batarya hücre kimyası	28
3.2.1.1.2. Polimer lityum-iyon bataryalar	30
3.3. Batarya Yönetim Sistemi	37
3.3.1. Performans denetimi fonksiyonu	41
3.3.2. Ölçme fonksiyonu	41
3.3.3. Hesaplama fonksiyonu	42
3.3.4. Haberleşme fonksiyonu	43
3.3.5. Denetleme fonksiyonu	43
3.3.6. Dengeleme fonksiyonu	44
3.3.6.1. Pasif dengeleme	45
3.3.6.2. Aktif dengeleme	47
3.4. Li-iyon Batarya Modeli	48
3.4.1. Li-iyon batarya modelleme teknikleri	48
3.4.1.1. Elektrokimyasal modeller	49
3.4.1.2. Stokastik modeller	50
3.4.1.3. Elektriksel eşdeğer devre modelleri	50
3.4.2. Li-iyon batarya modelinin tasarlanması	52
3.4.2.1. Batarya modeli	53
3.4.2.1.1. Hücre dinamiği alt sistemi	55
3.4.2.1.2. Isıl hesaplamalar alt sistemi	59
3.4.2.1.3. Çalışma fonksiyonları alt sistemi	62
3.4.2.1.4. Şarj seviyesi hesaplama alt sistemi	64
3.4.2.1.5. Akım dağılımı alt sistemi	65
3.4.2.1.6 Dengeleme alt sistemi	68
3.5. Testler ve benzetimler	70
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	84
5. SONUÇ	89

KAYNAKLAR	91
EKLER	94
EK 1: Empedansiyometri Verileri	95
EK 2: Benzetim Sonuçları	97
EK 3: Veri Tabloları ve Kullanım Şekilleri.....	105
ÖZGEÇMİŞ	113

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

A	Batarya dış yüzey alanı
a_i	Şarj yükü
C	Kapasite
C_p	Bataryanın özgül ısısı
DCR	İç direnç
hc	Isı transfer katsayısı
$i(t)$	Akım girişi
i_{dm}	Dal akımı
i_{th}	Thevenin eşdeğer akımı
m	Bataryanın kütlesi
N	Durum sayısı
n	Deneme sayısı
q	Olasılık
Q_{max}	Batarya maksimum kapasitesi
R	Direnç
R_d	Dengeleme direnci
R_{dc-th}	Thevenin eşdeğer direnci
$T(t)$	Batarya iç sıcaklığı
$Ta(t)$	Çevre sıcaklığı
Ti	Zaman sabiti
V_{OCV}	İdeal gerilim kaynağı
$v_{cl}(t)$	Direnç-kapitör çifti gerilimi
Z	Empedans
Z_L	Endüktif empedans
Z_C	Kapitif empedans

Kısaltmalar

Açıklama

ADG	Açık Devre Gerilimi
ASIC	Application Specific Integrated Circuit (Uygulamaya Özel Entegre Devre)
BBO	Batarya Boşluk Oranı
BDO	Batarya Doluluk Oranı
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
CCV	Closed Circuit Voltage (Kapalı Devre Gerilimi)
EA	Elektrikli Araç
EPŞHEA	Elektrik Prizinden Şarj edilebilir Hibrit Elektrikli Araç
EYS	Enerji Yönetim Sistemi
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
İYM	İçten Yanmalı Motor
Li	Lityum

LiCoO ₂	Lityum Kobalt Oksit
LiMn ₂ O ₄	Lityum Manganez Oksit
LIN	Local Interconnection Network (Yerel Bağlantı Ağı)
Na-NiCl ₂	Sodyum-Nikel Klorür
Na-S	Sodyum-Sülfür
Ni-Cd	Nikel-Kadmiyum
NiMH	Nikel-Metal Hidrat
Ni-Zn	Nikel-Çinko
NO _x	Azot Oksitler
OCV	Open Cicuit Voltage (Açık Devre Gerilimi)
PVDF	Poliviniliden Florid
PVDF-HFP	Kopolimer Poliviniliden Florid Heksafloropropilen
SPI	Serial Peripheral Interface (Seri Çevresel Arayüz)
SOC	State of Charge
SOH	State of Health (Batarya Genel Durumu)
SOP	State of Power (Batarya Güç Durumu)
USABC	Birleşik Devletler Gelişmiş Batarya Konsorsiyumu
VRLA	Valve Regulated Lead-Acid (Valf Ayarlı Kurşun-Asit)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Taşıt araçlarının sınıflandırılması	10
Şekil 3.2. Elektrikli araç alt sistemlerinin genel yapısı.....	18
Şekil 3.3. Elektrikli araç elektriksel tahrik yapılandırma çeşitleri.....	19
Şekil 3.4. Li-iyon batarya pazar talebi ve ortalama fiyat grafiği	27
Şekil 3.5. Li-iyon batarya hücresi kimyasal reaksiyonları.....	29
Şekil 3.6. Li-iyon batarya hücresi kimyasal prosesleri	29
Şekil 3.7. Polimer li-iyon hücre katmanları	30
Şekil 3.8. C/LiCoO ₂ polimer li-iyon hücre şarj karakteristiği	31
Şekil 3.9. C/LiCoO ₂ polimer li-iyon hücre deşarj karakteristiği	32
Şekil 3.10. C/LiCoO ₂ polimer li-iyon hücre deşarj karakteristiği (sabit güç)	32
Şekil 3.11. C/LiMn ₂ O ₄ polimer li-iyon hücre şarj/deşarj karakteristiği.....	32
Şekil 3.12. AESC batarya hücresi ve modülü.....	33
Şekil 3.13. Batarya elektriksel bağlantı şekilleri, (a) hücre, (b) modül, (c) batarya	34
Şekil 3.14. Li-iyon batarya montajı (dikey).....	35
Şekil 3.15. Li-iyon batarya montajı (yatay)	35
Şekil 3.16. Batarya yönetim sisteminin donanımsal yapısı	38
Şekil 3.17. Batarya yönetim sistemi yazılımının yapısı.....	39
Şekil 3.18. Pasif dengeleme devresi	46
Şekil 3.19. Basit Markov zinciri batarya modeli	50
Şekil 3.20. Farklı elektriksel eşdeğer devre hücre modelleri.....	51
Şekil 3.21. Bi-hücre yapısı.....	53
Şekil 3.22. Bi-hücre yapısı.....	54
Şekil 3.23. 2.mertebeden Randles elektriksel eşdeğer devresi	55
Şekil 3.24. OCV ve SOC arasındaki ilişki	56
Şekil 3.25. R ₁ C ₁ çifti Simulink modeli	58
Şekil 3.26. Hücre dinamiği Simulink modeli.....	59
Şekil 3.27. Isıl hesaplamalar alt sistemi Simulink model	61
Şekil 3.28. AESC li-iyon hücre empedansiyometri test sonucu	55
Şekil 3.28. Veri tablolarının karakteristikleri	63
Şekil 3.29. Çalışma fonksiyonları alt sistemi Simulink modeli.....	63
Şekil 3.30. Şarj seviyesi hesaplama alt sistemi Simulink modeli.....	65
Şekil 3.31. Hücre akım dağılımları	66
Şekil 3.32. Akım dağılımı alt sistemi Simulink modeli.....	67
Şekil 3.33. Dengeleme direncini içeren Thevenin eşdeğer devre.....	69
Şekil 3.34. Dengeleme alt sistemi Simulink modeli	69
Şekil 3.35. Batarya Simulink modeli	70
Şekil 3.36. DDT2000 veri kayıt menüsü	71
Şekil 3.37. Batarya-1'in SOC değerlerindeki değişim.....	74
Şekil 3.38. Batarya-1 kendi kendine deşarj akımı dağılımı.....	75
Şekil 3.39. 4 hücre için dengeleme komutunun değişimi (P1 sürüş profili - 3 ay).....	78
Şekil 3.40. Hücreler arası dengesizlik değişimi (P1 sürüş profili - 3 ay)	79
Şekil 3.41. 4 hücre için dengeleme komutunun değişimi (P4 sürüş profili - 6 ay)	80
Şekil 3.42 Hücreler arası dengesizlik değişimi (P4 sürüş profili - 6 ay)	81
Şekil 3.44. Hücreler arası dengesizlik değişimi (P5 sürüş profili -6 ay)	82
Şekil 3.45. 4 hücre için dengeleme komutunun değişimi (P5 - 6 ay)	82

Şekil 3.46. Hücreler arası dengesizlik değişimi (P5-6 ay).....	83
Şekil 4.1. Hücreler arası dengesizlik değişimi (P1 sürüş profili - 3 ay - Δ SOC=%0)	84
Şekil 4.2. P3 sürüş profili - 6 ay - (a) Δ SOC=%0, (b) Δ SOC=%1, (c) Δ SOC=%3	85
Şekil 4.3. P3 sürüş profili - 6 ay - (a) Δ SOC=%0, (b) Δ SOC=%1	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Farklı araç tipleri ve karakteristik özellikleri.....	13
Çizelge 3.2. USABC uzun dönem batarya hedefleri	23
Çizelge 3.3. Farklı batarya tipleri için önemli batarya parametreleri	23
Çizelge 3.4. Li-iyon bataryaların avantajları ve dezavantajları	27
Çizelge 3.5. Yol testlerinde kayıt edilen parametreler.....	69
Çizelge 3.6. En kötü şart senaryosu	71
Çizelge 3.7. Farklı sürüş profilleri	74

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlara sahip araçların otomotiv pazarının en büyük payına sahip oldukları bilinen bir gerçektir. Son yıllarda hız kazanan çalışmalar neticesinde, elektrikli araçların da bu pazarda kendilerine yer bulabilecekleri düşünülmektedir. Yaklaşık olarak yüz yıl öncesinde hayata geçirilmiş, fakat rekabetçi olmayı başaramamış elektrikli araçlar, getirdikleri çok önemli avantajlar sayesinde yeniden gündeme gelmişlerdir. Fosil yakıt tüketmedikleri ve dolayısıyla kirletici gaz emisyonuna sebep olmadıklarından dolayı çevreye duyarlı kesimler tarafından desteklenmektedirler. Son dönemde devreye alınmış veya seri üretim aşamasında olan elektrikli araç projeleri vardır. Bunlardan bazıları Türkiye’ de yürütülmekte ve hatta batarya imalatı da yapılmaktadır. Bu tez çalışması da bu projelerde ihtiyaç duyulan teknik altyapının oluşturulmasına yönelik yapılmıştır. Temel amaç ve hedef, elektrikli araçlarda kullanılan li-iyon bataryaların modellenmesi ve benzetimidir. Bu çalışmada yeni üretime girecek bir araçta kullanılacak batarya sistemi ele alınmıştır.

Elektrikli araçların en önemli alt sistemlerinden biri bataryadır. Bataryayı oluşturan temel eleman (batarya hücresi) ve bu elemanlardan oluşan bataryanın tasarım ve imalatına ait genel bilgiler sunulmuştur. Li-iyon hücrelerden oluşan bataryaların en önemli problemi hücreler arası doluluk durumunun dengelenmesi olup bu problemin çözülmesi amacıyla bataryanın matematiksel modeli ve benzetimi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bunun yanında bataryadaki birçok fonksiyonun denetim ve yönetimini sağlayan batarya yönetim sisteminin genel yapısı ve çalışması hakkında da bilgi verilmiştir. Modellemede ise çeşitli yöntemler arasında elektriksel eşdeğer devre yaklaşımı tercih edilmiştir. MATLAB / Simulink ortamında, elde edilen matematiksel bağıntılarla birlikte dengeleme stratejinin akışını yorumlayan bir program hazırlanmıştır. Ayrıca, programda deneylerden elde edilen sonuçlardan da faydalanılmıştır.

Yapılan modelleme ve benzetim çalışmaları sonucunda, batarya hücreleri arasındaki dengesizliğin giderilmesiyle, aracın genel performansını iyileştirecek bir denetim ve yönetim stratejisi ortaya konmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrikli araçlar ile ilgili son dönemde çok önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar temelde genel sistem gözüyle elektrikli araçlara odaklanan çalışmalar ile elektrikli araçların alt sistemlerine odaklanan çalışmalar olacak şekilde düşünülebilir. Tez konusunun kapsamı çerçevesinde, kaynak araştırmasında göreceli olarak teknolojinin son durumu üzerinde daha az durulmuş ve ağırlıklı olarak elektrikli araç batarya teknolojisi, yönetimi ve modellenmesi araştırılmıştır. Literatüre girmiş çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Takeda ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada, giderek güçlenen çevreci akımın ve enerji tasarrufu ile ilgili göz ardı edilemez taleplerin, elektrikli araçlar ve hibrit elektrikli araç teknolojilerinin geliştirilmesinde itici kuvvet olduğunun altını çizmişlerdir. Mitsubishi'nin desteklediği projede daha küçük boyutlarda, hafif, yüksek performanslı yüksek şarj/deşarj verimine sahip bataryanın geliştirilmesine odaklanmıştır. Üzerinde çalışılan manganez pozitif elektrotlu lityum-iyon bataryanın hem elektrikli araçlarda hem de hibrit elektrikli araçlarda yüksek performans sağladığını tespit etmişlerdir. İlgili çalışmada elektrikli araç ve hibrit araçlarda gerekli olan performans niteliklerine sahip lityum-iyon bataryalarda pozitif elektrotun manganezden imal edilmesi durumunda yeteri kadar ucuz bir çözüm olduğunun altını çizmişlerdir.

Axsen ve ark.(2008) çalışmalarında hibrit elektrikli araçlarda kullanılabilecek ileri batarya sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgili konuları irdelemişlerdir. Hibrit elektrikli araçların temel tasarımları, teknik beklentilerin karşılaştırılması, batarya tasarımındaki seçilen tasarım değişkenleri ve farklı batarya kimyalarını incelemişlerdir. İncelenen farklı batarya kimyaları sırasıyla kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel metal hidrat ve lityum-iyon'dur. Elektrikli araçlarda ve büyük ölçüde hibrit araç uygulamalarında özellikle lityum-iyon teknolojisinin güç, enerji, ömür, güvenlik ve maliyet kısıtları açısından değerlendirildiğinde diğer teknolojilere oranla daha büyük avantaj sağladığı sonucuna varmışlardır. Nikel metal hidratın söz konusu tarihte lityum-iyon'a oranla maliyeti çok daha düşük olsa da, lityum iyon'un çok yüksek enerjini kapasitesi yani aynı batarya hacminde çok daha fazla enerji depolayabiliyor olması nedeniyle önemli

bir avantaj sağladığı ortaya konmuştur. Aksen ve ark. çalışmalarının detaylarında ise lityum-iyon bataryalarda kullanılan kobalt, manganez, demir fosfat, titanyum ve bunların bileşiklerinden imal edilen farklı katot tiplerinin de batarya seçiminde dramatik etkisinin olabileceğinin altını çizmişlerdir.

Kultgen (2009) yapmış olduğu çalışmada güvenli bir şekilde bataryadan mümkün olan en yüksek enerjinin elektrikli ve hibrit araçlara aktarılması için karmaşık elektronik yapılara ihtiyaç olduğunun altını çizmiştir. Bu çerçeveden bakıldığında bu denetim ve yönetim işini yapmak için gelişmiş batarya yönetim sistemlerine ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle elektrikli araçların ana fonksiyonunu yerine getirebilmesi için şarj durumunun yüksek doğrulukla bilinmesi gerekmektedir ve bunu yapabilmek içinde muhakkak gelişmiş bir batarya yönetim sisteminin kullanılması gerektiğini vurgulamıştır.

Chaturvedi ve ark.(2010) da birçok çalışmada belirtildiği üzere elektrikli araçlar için en uygun batarya kimyasının lityum-iyon olduğunu belirtmişlerdir. Bu teknoloji seçiminin ardından en önemli konulardan birinin bataryanın yönetim sistemi olduğunu, batarya ve otomobil üreticilerinin özellikle üzerinde durduklarının altını çizmişlerdir. Bunun nedeni olarak da enerji depolama sistemlerinin ki burada batarya söz konusudur, araç performansına direkt etkisinin olduğunu göstermişlerdir. Güvenli, güvenilir çalışma şartlarını sağlayacak bir batarya yönetim sistemi tasarlayanın büyük zorlukları da beraberinde getirdiği çünkü yaşlanma gibi batarya performansını düşürecek etmenlerin tam olarak tespit edilemediğini öne sürmüşlerdir. Bu bilinmeyenleri ortaya koymak üzere elektrokimyasal bir model üzerinde çalışılmış, sistem denetimi açısından incelemelerde bulunulmuş ve sistemin limitleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yaptıkları benzetim çalışmalarının sonucunda tatmin edici şekilde bazı parametreleri tanımlayabilmişlerdir. Bunlar arasında en önemlilerin bataryanın anlık gücü ve enerjisidir. Bu parametrelerin takibi bataryanın yaşlanma etkisine rağmen batarya yönetim sisteminde yapılabilmüş ve istenen seviyede denetim sağlanmıştır. Modelleme açısından elektrik eşdeğer devre yaklaşımının da yeterli olabileceğini ve daha az karmaşık bir yapıyla da aynı fonksiyonun koterilabileceğini savunmuşlardır.

Miller (1999) batarya ve süperkapasitörlerin modellenmesinde elektriksel eşdeğer devre yaklaşımı ile modelleme çalışması yapmıştır. Modelleme çalışmasını empedansiyometri ve deşarj ölçümlerini kullanarak yapmıştır. Modeli kullanarak yaptığı benzetim çalışmaları ile optimum performans elde etmek için kullanılması gereken tasarım parametrelerini belirlemeye çalışmıştır. Bu tür bir yaklaşımla istenen batarya performansının elde edilebileceğini öne sürmüştür.

Tremblay ve ark. (2008) bataryanın modellenmesi üzerinde çalışmışlardır ve genel kapsamlı bir model ortaya koymuşlardır. Bu model çerçevesinde farklı batarya kimyalarına göre adaptif benzetim çalışmalarına imkân verilmiştir. Modelin ortaya konulabilmesi için batarya üreticilerinin verdiği parametreler baz alınmış ve özellikle batarya deşarj eğrisi kullanılmıştır. Modelde batarya bir kaynak ve direnç ile temsil edilirken benzetim esnasında daha önce yapılan hesaplamalara göre elde edilen transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Ne var ki, bataryayı birçok hücreden oluşmasına rağmen tek bir hücre olarak ele almışlardır. Bununla beraber şarj ve deşarj esnasında batarya iç direncinin sabit olduğunu, akımın genliğine bağlı kapasite değişimi (Peukert etkisi) olmadığını, sıcaklığın model üzerinde etkisi olmadığını kendi kendine deşarj olmadığını varsaydıkları için modelin temsil yeteneğini düşürdüğü belirtilebilir.

Dubarry ve ark. (2008) lityum-iyon batarya modellenmesinde, bataryanın birçok hücreden meydana getirilmiş büyük bir hücre olarak kabul edilmesinden, özellikle hücreler arasını dengesizliklerin ortaya konabilmesi açısından hücrelerin tek tek modellenmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir. Ancak modelin en küçük alt sistemi olan hücrenin yüksek doğruluk seviyesinde sonuç verecek şekilde seçilmesi gerektiğinin altını çizmişlerdir.

Bhide ve Shim (2009) gelişmiş bir batarya modeli üzerinde çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmalar esnasında modelleme yaklaşımlarının elektrokimyasal, elektriksel ve stokastik olabileceğini belirtmişlerdir. Şarj durumunun akım, kapasite, iç direnç ve termal parametreleri göz önünde bulundurularak tayin edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Elektrokimyasal yaklaşımın karmaşık olduğunu stokastik yaklaşımın ise yeteri kadar doğru sonuç vermediğini ileri sürüp elektriksel veya diğer bir söylemle

elektrik eşdeğer devre yaklaşımı ile birçok problemin üstesinden gelinebileceğini göstermişlerdir. Benzetim araçlarından olan Amesim yazılımı kullanarak yaptıkları benzetim çalışmalarının gerçek durumla yüksek oranla benzerlik gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Yan ve ark. (2009) batarya doluluk oranının tayin edilmesinin çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Batarya yönetim sistemi açısından bakıldığında da bir tasarım parametresi olarak dikkate alınması gerektiğinin altını çizmişlerdir. Akım integrali yönteminin ve Kalman filtrelerinin kullanıldığı uygulamalarda, yeteri kadar hassas sonuçlar elde edilemediğini vurgulamışlardır. Her ne kadar ilk doluluk oranının hesaplanmasında, açık devre gerilimine karşılık batarya doluluk oranı deneysel verilerden oluşturulmuş veri tablolarından yararlanılsa da çalışma esnasında doğru sonuç verecek farklı yaklaşımların ortaya konmasının gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Bu amaç doğrultusunda bozucu girişlerin de hesaba katıldığı matematiksel bir formül elde etmişlerdir. Bu formül vasıtasıyla akım integrali ve Kalman yöntemlerinin performansları artırılmıştır. Tipik bir batarya modeli kullanarak yaptıkları benzetim çalışmaları sonucu ortaya koydukları stratejiyi doğrulamışlardır.

Xu ve ark. (2009) batarya doluluk oranının tayin edilmesine yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır. Batarya doluluk oranının doğru bir şekilde tayin edilmesiyle özellikle aşırı şarjın beraberinde getirdiği olumsuzlukların önüne geçilebileceğini belirtmişlerdir. Kombinasyon algoritması adını verdikleri bir yöntem ile batarya doluluk oranının tespitinde farklı bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Kombinasyon algoritmasının geliştirilmesi amacıyla bir lityum-iyon batarya modeli kullanmışlardır. Üzerinde durdukları parametreler arasında hücre kapasitesi, hücre sıcaklığı, akım karakteristikleri sayılabilir. Batarya doluluk oranının tespit edildiği benzetimler yapmışlardır. Maksimum %5 hata ile elde ettikleri sonuçları kombinasyon algoritmasının oluşturulmasında kullanmışlardır.

Li ve ark. (2009) batarya modellenmesinde farklı bir yaklaşımı benimsemişleridir. Bu noktada yaptıkları çalışmada bataryanın karakterize edilmesinde şarj durumunun tayini için şarj durumunu etkileyen parametrelerin bulanık sinir ağları ile belirlenebileceğini

ortaya koymuşlardır. Modele temel giriş olarak batarya iç direncini, gerilim ve akımı seçmişlerdir.

Hu ve ark. (2010) otomotiv uygulamaları için lityum-iyon bataryanın elektro-termal bir modelini geliştirmişlerdir. Dinamik model yapısına elektriksel eşdeğer devre uyarlamışlardır. Bu eşdeğer devre parametreleri ise şarj durumu, sıcaklık ve akımın yönüne bağlıdır. Tanımlanan model çok geniş sıcaklık ve şarj durumu aralığında çalışabilmektedir ve böylece otomotiv uygulamalarında kullanılabilmiştir. Modele temel teşkil eden elektriksel devre literatürde Randles eşdeğer devresi olarak adlandırılmaktadır. Söz konusu devre bir kaynak ile kapasite ve dirençlerden meydana getirilmektedir. Yapılan geniş çalışmalar sonucu kullanılan model ile birlikte çok yüksek doğrulukla sonuçlar elde edilmiş ama yine de şarj durumunun tayininde oluşabilecek hataların kompanse edilmesi gerektiğinin altı çizilmiştir.

Ramamurthy ve ark. (2010) lityum-iyon bataryaların empedansiyometri test sonuçlarına dayanarak modellenmesi konusunda çalışmalar yapmışlardır. Empedansiyometri testi sonuçlarını standart elektrokimyasal batarya modeline entegre etmişlerdir. Bataryanın empedans modelini güç denetimi modeline eklemişlerdir. Bataryanın denetim modelinin performansını göz önünde bulundurarak dinamik kompanzasyon tekniği geliştirmişlerdir. Bu sayede özellikle şarj esnasındaki denetleme fonksiyonu optimize edilmiştir. Sistem modeli ve tasarım parametrelerini gerçek test verileri ile doğrulanmışlardır.

Cheng ve ark. (2011) batarya yönetim sistemi ve batarya doluluk oranının doğru bir şekilde tespit edilmesine yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır. Batarya yönetim sisteminin en önemli fonksiyonun, bataryanın güvenli bir şekilde kullanılabilmesi amacıyla belirli şartlar altında çalıştığının takip edilmesi ve ihtiyaç duyulduğunda da denetlenmesi olduğunu ifade etmişlerdir. Batarya yönetim sisteminin blok yapısı üzerinde durmuş ve alt sistemlerini incelemişlerdir. Batarya doluluk oranının hesaplanmasında Coulomb ve açık devre gerilimi yöntemlerini benimsemişlerdir. Batarya doluluk oranının bir durum değişkeni olduğu batarya modelini kullanmış ve Kalman yöntemini de kullanarak batarya doluluk oranını tayin etmişlerdir. Deneysel

olarak elde edilmiş batarya parametreleri modele entegre edilmiştir. Benzetim sonuçları yine deneysel verilerin kullanılmasıyla doğrulanmıştır.

Martinez ve ark. (2005) çok hücreli lityum-iyon bataryaların kapasitelerini maksimuma çıkartmak için hücrelerin dengelenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Yaptıkları çalışmada genelde otomotiv uygulamalarında kullanılan bataryaların birden fazla seri bağlı hücrenin en az iki paralel dizi halinde birleştirilmesiyle teşkil edildiğini belirtmişlerdir. Bu tür çoklu hücre mimarisine sahip bataryaların performanslarının en üst seviyede olabilmesi için hücrelerin dengelenmesi gerektiğinin altını çizmişlerdir. Bunun nedeni olarak da dengelenmeyen bir tek hücrenin bile bataryanın genel performansını düşürebileceği gerçeğidir. Çoklu hücreli batarya mimarisinde şarj durumu veya kapasite değerlerinin hücreler arasında farklılık göstermesi durumunda bataryanın genel yönetimi en zayıf hücreye göre yapılmak zorundadır. Bu durumda da kaçınılmaz olarak verimsizlik yaşanmaktadır.

Moore ve Schneider (2007) lityum-iyon batarya sistemlerinin dengelenmesi ve farklı dengeleme yöntemlerine yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır. Dengeleme yapma ihtiyacının aşırı şarj üst limiti ve aşırı deşarj alt limiti arasında çalışma zorunluluğundan kaynaklandığını ve dengesizlik durumundaki hücrenin şarj esnasında diğer hücrelerden daha hızlı şarj olarak bataryanın tam olarak şarj edilememesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde deşarj durumunda problemlili bir hücrenin bile bataryanın müsaade edilen minimum şarj durumuna erişmeden güç aktarımının kesileceğini belirtmişlerdir. Bu koruma algoritmaları aslında bataryayı korumak için var olsalar da performans düşümüne neden oldukları için sistemin bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bu optimizasyon ise batarya yönetim sistemi altında çalışacak bir dengeleme algoritması ile mümkün olabilmektedir. Dengeleme yöntemlerinin temel itibari ile 2 çeşit olduğu belirtilmiştir. Bu yöntemler pasif ve aktif dengeleme yöntemleridir. Pasif dengeleme yönteminde bir şönt dengeleme direnci ile problemlili hücrenin deşarj edilmesi suretiyle diğer normal hücrelerin seviyesine çekilmektedir. Aktif dengeleme yönteminde ise pasif dengelemede ısı enerjisine dönüştürülen atıl enerji, transformatör vb. yardımcı elemanlar vasıtasıyla ihtiyacı olan

diğer hücelere taşınmaktadır. Pasif yöntemle göre daha karmaşık olan aktif dengeleme daha verimli bir denetim imkânı sunmaktadır

Yapılan kaynak araştırması sonucunda bataryaların modellenmesinde çoğu zaman bataryanın bir tek enerji kaynağı olarak modellendiğı tespit edilmiştir. Bu durumda ise bataryayı oluşturan batarya hücreleri ile ilgili dinamikleri incelemek mümkün olamamaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında bataryanın hücre bazında modellenmesi ve özellikle hücreler arası gerilim dengesizlik kaynakları ve bu gerilim dengesizliklerinin nasıl giderilebileceğı üzerine araştırmalara yer verilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Elektrikli Araçlar Hakkında Genel Bilgiler

3.1.1. Elektrikli araç teknolojilerinin gelişimi

Elektrikli araçların tarihçesi sanılanın aksine çok eskilere dayanmaktadır. Tam tarihi belli olmasa da 1830'lu yıllarda Robert Anderson ilk binek elektrikli aracı tasarlamıştır. Hollandalı Profesör Stratingh'in tasarladığı daha ufak boyutlu elektrikli araç, asistanı Christopher Becker tarafından 1835 yılında üretilmiştir. Özellikle 1800'lü yılların sonunda Amerika' da elektrikli araçlara ilgi artmış ve 1897'de hayata geçen ilk ticari uygulama New York taksi filosu olmuştur. (Anonim 2009).

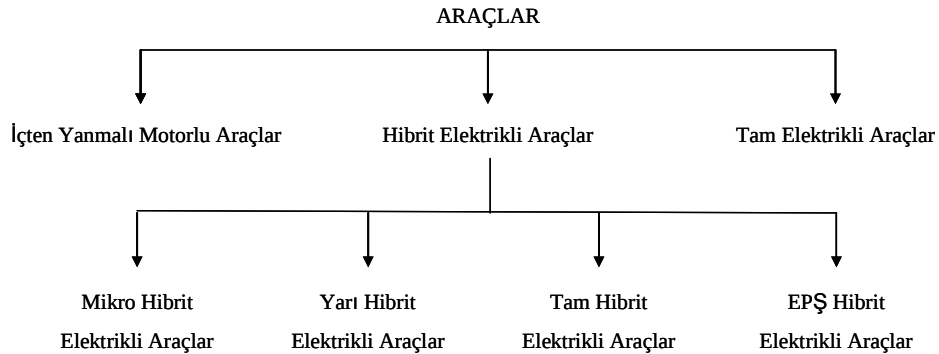
20. yy' ın başlarında buharlı ve benzinli araçlarda da gelişmeler kaydedildi. İlk dönemde elektrikli araçlar, rakip araçlara kıyasla avantajlara sahipti. Özellikle temiz, sessiz ve kullanım kolaylığı açısından tercih ediliyordu. Benzinli araçların en büyük dezavantajı vites geçişlerinin çok zor olması iken buharlı araçlarda, elektrikli araçlardaki gibi şanzıman olmadığından dolayı problem yaratmasa da, ilk çalıştırma soğuk havalarda 45 dakikayı bulabiliyordu. Dolayısıyla elektrikli araçlar tercih edilmekteydi. 1920'li yıllarda elektrikli araçlara olan ilgi azaldı çünkü önemli bazı gelişmeler yaşanmaktaydı. Bu gelişmeler;

- Amerika'da şehirlerarası yolların fiziki durumları iyileşti ve daha uzun menzilli araçlara ihtiyaç duyulmaya başlandı.
- Teksas' ta ham petrol bulundu ve benzin fiyatları düştü. Böylece ortalama bir tüketicinin bile ulaşabildiği rakamlar söz konusu oldu.
- 1912'de Charles Kettering marş motorunu icat etti ve elle krankı döndürerek motora ilk hareketi vermeye gerek kalmadı.
- Henry Ford içten yanmalı motorlara sahip araçları seri üretmeye başladı. Bu gelişme doğrudan araç edinme maliyetini düşürmüştür. 1912' de satış fiyatı 1,750\$ civarında olan elektrikli araçlar, 650\$' lık benzinli araç karşısında rekabetçi olamamıştır. (Anonim 2010).

1935’li yıllarda piyasada neredeyse hiç elektrikli araç bulunmamaktaydı. 1960’lı yıllara kadar da geliştirme çalışmaları yapılmadı. 1960 – 1970 arasında içten yanmalı motorların yarattığı egzoz emisyonu ve ithal ham petrole bağımlılık problemlerini azaltmak amacıyla alternatif yakıtlı araçlara ihtiyaç duyuldu. 1990’lı yıllara kadar ticari ve özel amaçlı elektrikli araçlar üretildi. 1990’dan sonra çevre bilincinin artması ve yasal düzenlemelere gidilmesi nedeniyle sektörde ivmelenme kaydedilmiştir. Bu ivmeyle Amerikan, Avrupalı ve Japon otomobil üreticileri hibrit ve elektrikli araç projelerine yatırım yapmışlardır. İlk projeler arasında Chrysler TEVan, Ford Ranger EV, GM EV1, Honda EV Plus, Nissan Altra EV, Mitsubishi i-Miev, Toyota RAV4 ve Prius sayılabilir. Hatta Amerikan Tesla ile Lotus işbirliğine giderek spor bir elektrikli araç satışa sunmuşlardır. Tesla Roadster, içten yanmalı motora sahip rakiplerine benzer şekilde 0’dan 100 km/s hıza 4 saniyenin altında ulaşmaktadır. Son dönemde ise Renault, farklı segmentlerde yer alan modelleri (Fluence ZE, Kangoo ZE, Zoe ve Twizy) piyasaya sürme aşamasındadır.

3.1.2. Elektrikli araç teknolojilerinin sınıflandırılması

İçten yanmalı motorlu araçlardan bu yana farklı teknolojilere sahip araçlar üretilmiştir. Teknolojik sıralamaya göre içten yanmalı motorlu araçlardan sonra mikro hibrit, yarı hibrit, tam hibrit son olarak da elektrik prizinden şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar ve %100 elektrikli araçlar gelmektedir. Elektrikli araç teknolojilerinin 1800’lü yıllardaki gelişimi göz ardı edilecek olursa, Şekil 3.1.’de içten yanmalı motorlu araçlardan bugünün %100 elektrikli araçlarına kadar gösterilen gelişim gözlenebilir.



Şekil 3.1. Taşıt araçlarının sınıflandırılması

3.1.2.1. İçten yanmalı motorlu ve hibrit elektrikli taşıt araçlarının özellikleri

İçten yanmalı motorlu araçlar günümüzde hala yüksek oranda tercih edilen, ulaşılabilir taşıt araçlarıdır. Elektrikli ve hibrit araçlara temel teşkil etse de çalışma prensipleri ve teknik mimarisi ile bu yeni araçlardan keskin bir şekilde ayrışır. Genel olarak benzin veya dizel yakıtlarla çalışan motorlara sahiptirler ve bu motorlardan çıkan zararlı gazlar çevreyi kirletmektedir. Özellikle büyük şehirlerde içten yanmalı motor emisyonlarından azot oksitler(NO_x), karbon monoksit (CO), küçük partiküller insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu çevresel sorunun çözümü ile ilgili olarak devletler bazı yasal düzenlemelere gitmişler ve limitler belirlemişlerdir. İçten yanmalı motorların teknolojik seviyesi, bu limitlerin tutturulmasında çok yeterli olamadığından ilk çözüm olarak “mikro hibrit” araçlar gündeme gelmiştir.

Hibritleşmenin giriş seviyesi mikro hibrit araçlardır. Bu tip araçlarda elektrik motoru yoktur sadece içten yanmalı motoru destekleyen “durdur&başlat” adı verilen bir sisteme sahiptirler. Bu elektromekanik sistem içten yanmalı motorun otomatik olarak durdurulması ve tekrardan başlamasını sağlama amacıyla kullanılır ve aynı zamanda rejeneratif frenleme özelliği de mevcuttur. Güçlendirilmiş entegre marş motoru-alternatör, kayışlı entegre marş-motoru-alternatör veya krank miline monte edilmiş yapılar gibi farklı tahrik sistemleri kullanılabilir. Rejeneratif frenlemeden elde edilecek yarar da doğal olarak seçilen elektromekanik sistem elemanlarının güçleri ile doğru orantılıdır. Mikro hibrit araçlar için tipik alternatör çıkış gücü 2-4 kW iken klasik ama güçlendirilmiş 12V akü bulunur. Ayrıca maksimum torkun sınırlandırılmış olması sebebiyle fren sisteminde de değişiklikler söz konusu olur. Mikro hibrit araçlarda; araca, motor ve şanzıman tipine ve sürüş şartlarına bağlı olmak üzere yakıt tüketimi ve karbon dioksit (CO_2) emisyonları %1,5 ila 4 arasında düşmektedir. (Karden ve ark. 2004)

40V ila 140V arasındaki gerilimlerde çalışan bir elektrik motoruna sahip araçlar “yarı hibrit” sınıfına girer. Yarı hibrit araçlarda kısmi olarak elektrik tahrik desteği söz konusudur. Mikro hibrit araçlarda kullanılan entegre marş motoru-alternatör tiplerinin daha gelişmişleri kullanılır. Genelde düşük ve bazı modellerde yüksek motor

devirlerinde devreye giren elektrik motoru, içten yanmalı motora oranla daha küçük seçilir. Bu tip hibrit araçlarda elektromekanik sistem daha yüksek güç seviyesine sahip olduğundan, rejeneratif frenleme sayesinde yakıt tüketiminde ve salınan zararlı gaz emisyonlarında önemli derecede iyileşme sağlanır. Bunun bir sonucu olarak, kullanılan enerji seviyelerinin önemli oranda artmasıyla, yarı hibrit araçlarda ihtiyaç duyulan enerji depolama sistemi klasik kurşun-asit akü teknolojisinden daha üstün bir batarya teknolojisi olmalıdır. Ayrıca yarı hibrit araçlarda motor torkunun yumuşatılması, vites geçiş desteği gibi ek özelliklerde bulunabilir. Yarı hibrit araçlardaki alternatörler mikro hibrit araçlardaki alternatörlerden daha yüksek kapasiteli olduğundan, jeneratör olarak adlandırabilirler, 110V veya 220V seviyesindeki AC güçlerde çalışabilirler.

Elektrik motorunun, bataryanın yarı hibrit araçlara kıyasla daha yüksek kapasiteli olduğu araçlar “tam hibrit” araçlardır. Elektrik motorunun daha yüksek çıkış gücüne sahip olması nedeniyle aracın kalkış anında ve hatta içten yanmalı motorun yüksek devirlerinde dahi devreye girerek elektrik enerjisi kullanımı maksimize edilir. Bütün bunlara rağmen batarya menzili ile ilgili bir rakam telaffuz edilmez. Tam hibrit araçlarda yarı hibrit araçlarda kullanılan içten yanmalı motora oranla daha küçük bir içten yanmalı motor ve daha büyük bir elektrik motoru kullanılır. Elektrikli araçlara oranla, bataryanın enerji kapasitesi daha düşük seçilir çünkü tam hibrit araçlarda batarya ve elektrik motorunun kapasitesi tüm sistem göz önünde bulundurularak optimize edilir. Diğer bir ifade ile tam hibrit araçlarda elektriksel sistemin görevi hala klasik içten yanmalı motoru desteklemektir. Elektriksel sistemin gerilim seviyesi 200V civarında olabilir.

Hibrit elektrikli araç teknolojisinin en tepesinde “elektrik prizinden şarj edilebilir hibrit” araçlar vardır. Aslında temel yapısı itibarıyla tam hibrit araçlarla benzerlik göstermektedir fakat ev tipi elektrik prizlerinden sağlanan elektrik ile şarj edilebildikleri için önemli bir fark ortaya çıkar. Diğer bir farklılığı ise kullanılan bataryanın tam hibrit bataryasından daha yüksek kapasiteye sahip olmasıdır. Daha gelişmiş bir batarya ile donatıldığından, termal yönetimi, sistem yüklerini ve diğer parametrelerini denetleyecek daha karmaşık bir denetleme sistemi de kullanılmaktadır. Bu tip araçlarda seçilen içten yanmalı motorun görevi temel olarak sürüş esnasında bataryayı şarj etmektir,

dolayısıyla elektrik motorunun birincil tahrik elemanı olduğu belirtilmelidir. Elektrik prizinden şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlarda sadece bataryadan çekilen güç ile onlarca kilometre yol yapılabilir. Yarı hibrit araçlara oranla daha yüksek kapasiteli bir elektriksel tahrik sistemine sahip olan bu araçların tamamen elektrikli araçlara oranla en büyük avantajı ise sürücünün, batarya tamamen deşarj olmuş olsa bile hareket edebiliyor olmasıdır. Öte yandan sadece içten yanmalı motorlara sahip konvansiyonel araçlara oranla %40 ila %50 arasında yakıt ekonomisi de sağlamaktadır. (Silva ve ark. 2009).

Çizelge 3.1. Farklı araç tipleri ve karakteristik özellikleri

	Fonksiyon						
	İYM	Stop&Start	Elektriksel tahrik	Rejeneratif frenleme	Elektrik motoru	Salt elektrisel sürüş	Harici batarya şarjı
Sistem							
İYM araç	Var	Mümkün	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
Mikro HEA	Var	Var	Yok	Sınırlı	Yok	Yok	Yok
Yarı HEA	Var	Var	Sınırlı	Var	Var	Sınırlı	Yok
Tam HEA	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Yok
EPŞ HEA	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
EA	Yok	Var	Var	Var	Var	Var	Var

3.1.2.2. Elektrikli taşıt araçlarının özellikleri

Elektrikli araç tasarımları 20.yy'dan bu yana var olsalar da modern elektrikli araçlar klasik elektrikli araçlardan oldukça farklıdır. Sadece yeni bir taşıt aracı değil yepyeni bir elektriksel yapı olarak bakılabilir. Yeni elektrikli araç tasarımları ile temel unsurları ifade etmek gerekirse;

- Elektrikli araçlar her biri kendine ait karakteristik özelliklere sahip elektrik motoru, güç dönüştürücü ve enerji kaynağına sahip modern elektriksel tahrik sistemine sahiptirler.

- Elektrikli araçlara sadece bir taşıt aracı olarak bakılmamalı, topluma temiz ve verimli taşımacılık imkânı veren sistemler olarak düşünölmelidir.
- Elektrikli araç kullanıcılarının beklentileri analiz edilmeli ve yapılacak akademik çalışmalara bu doğrultuda yön vermelidir.

Elektrikli araç sistem mimarisine ait karakteristik özellikler, özellikle içten yanmalı motorlu araçlardan net bir şekilde ayrışır. Diğer bir değişle görsel özellikleri birbirlerine benzemektedir fakat teknik alt yapıları oldukça farklıdır.

Elektrikli araç tasarımlarında makine mühendisliği ile elektrik-elektronik mühendisliği tam bir uyum göstermek durumundadır. Elektrikli araçlarda iyi bir araç performansı ve ulaşılabilir fiyatlar gibi hedefleri yakalayabilmek için sistem entegrasyonu ve optimizasyonu öncelikli olarak ele alınması gereken konulardır. Elektrikli araç tahrik sistem karakteristiği ile içten yanmalı motorlu araç karakteristikleri çok farklı olduğu için yeni bir elektrikli araç tasarım yaklaşımında bulunmak gerekir. Elektrikli araçların içten yanmalı motorlu araçlar ile rekabetinde öne geçmesi için gelişmiş enerji kaynaklarına (batarya, süperkapasitörler vs.) ve akıllı enerji yönetim sistemlerine ihtiyaç vardır. Modern elektrikli araç tasarım yaklaşımı açısından otomobil, elektrik, kimya gibi mühendislik dallarının sentezlenmesi ve bu dalların en yüksek teknolojilerini kullanmak gerekir. Böylelikle elektrikli araçlara özgü sistemleri imalat teknikleri geliştirilebilir. Elektrikli araç tasarım yaklaşımlarının odak noktasında enerji verimli kullanmak vardır. Aşağıdaki noktalar elektrikli araç tasarımında tipik olarak göz önünde bulundurulur;

- Elektrikli araç satışa çıkacağı pazarın özelliklerinin tanımlanması.
- Sürüş çevrimi açısından teknik şartnamelerin belirlenmesi.
- Altyapısal gereksinimlerin (şarj istasyonları, batarya geri dönüşümü vb.) belirlenmesi.
- Şasi ve gövde seçimin yapılması.
- Enerji kaynağının tipine (ev tipi elektrik, güneş enerjisi vb.) karar verilmesi.
- Tahrik sisteminin (elektrik motoru, konvertör, aktarma organları vb.) seçilmesi.
- Farklı sürüş tipleri açısından elektrikselsel tahrik sistemi gereksinimlerinin (güç, tork, hız) ve enerji kaynağı gereksinimlerinin (kapasite, gerilim, akım) seçilmesi.

- Akıllı enerji yönetim sisteminin araca entegre edilmesi.
- Motor sürücüsünün seçilen sürüş tipine uygun olacak şekilde seçilmesi.

Elektrikli araçlarda otomotiv, elektrik, elektronik, kimya ve bilgi teknolojileri önem arz eder. Enerji kaynağı en kritik konu olmakla beraber gövde tasarımı, elektriksel tahrik, enerji yönetimi ve sistem optimizasyonu da eşit öneme sahiptirler ve elbette bütün bunların en iyi düzeyde entegrasyonu başarılı bir tasarım için şarttır.

Gövde tasarımı ile ilgili birkaç temel yaklaşım vardır. Bunlardan biri elektrikli aracın içten yanmalı motorlu araçtan dönüştürülmesi ve diğeri de özel bir tasarımın yapılmasıdır. Dönüştürme yapılan bir araçta içten yanmalı motorlu araca bağlı motor ve ekipmanlarının yerine elektrik motoru, güç konvertörü ve batarya gelir. Bu durumda tasarım maliyetleri düşük olur çünkü içten yanmalı motorlu aracın şasisi ve kasası küçük değişikliklerle kullanılabilir. Öte yandan dönüştürülen çoğu araçta artan araç ağırlığı, yükselen ağırlık merkezi ve dengesiz dağılan yük problem yaratabilir. Bu tür problemler yaşamamak için genellikle sıfırdan bir tasarımın yapılması tercih edilir. Sıfırdan tasarlanan elektrikli araçlar, tasarımcı mühendisler farklı elektrikli araç alt sistemlerinin koordinasyonu ve entegrasyonu açısından esneklik sağlar. (Fenton 1996). Sıfırdan elektrikli araç olarak tasarlanan bazı araçlarda bile hızlanma, maksimum hız gibi performans değerlerini artıracak yönde değişiklikler sonradan yapılabilir. Bu yaklaşımlar arasından en önemlisi araç ağırlığının düşürülmesidir çünkü böylelikle aracın menzili direkt artırılabilir. Aracın boş ağırlığını azaltmak için alüminyum veya kompozit malzemeler kullanılması akla ilk gelen çözümlerdir. Bununla beraber aerodinamik direnci azaltacak tasarımların yapılması doğrudan menzili artırır.

Elektrikli araçlar içten yanmalı motorlu araçlarla kıyaslandıklarında daha kısa bir menzile sahiptirler. Bu nedenle de araçta depolanan enerjinin verimli bir şekilde kullanılması gerekir. Kullanımı maksimize etmek için bir enerji yönetim sistemine ihtiyaç duyulur. Elektrikli aracın çeşitli alt sistemlerinden algılayıcılar vasıtasıyla gelen iç ve dış hava sıcaklığı, akım, gerilim, şarj ve deşarj esnasında batarya gerilimi, elektrik motorunun akımı ve gerilimi, araç hızı vb. bilgiler enerji yönetim sisteminin aşağıdaki fonksiyonları yerine getirmesinde kullanılır;

- Sistemin enerji akışının optimize edilmesi.
- Kalan enerji miktarının tahmin edilmesi ile yapılabilecek menzilin yaklaşık olarak hesap edilmesi.
- Sürücüye daha verimli sürüş tarzının önerilebilmesi.
- Rejeneratif frenleme ile kazanılan enerjinin bataryaya aktarılması.
- Dış ortam sıcaklığına bağlı olarak sıcaklığın denetlenmesi.
- Araç içi ve dışı aydınlatmaların ortam şartlarına bağlı olarak ayarlanması.
- Uygun bir batarya şarj etme yönteminin önerilmesi.
- Enerji kaynaklarının (özellikle batarya) çalışma geçmişlerinin analiz edilmesi.
- Doğru çalışmayan ve bozucu araç elemanlarının veya fonksiyonlarının teşhis edilmesi.

Enerji yönetim sistemine bir navigasyon sistemi entegre edildiğinde enerji açısından verimli olacak güzergahlar belirlenebilir, şarj istasyonlarının konumlarına göre menzil hesabı yapılabilir ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak menzil güncellenebilir. Özet olarak, enerji yönetim sistemi araçta depolanan enerjinin en iyi şekilde kullanılmasına yönelik kararları alır ve bu kararları alırken de birçok entegre fonksiyondan faydalanır.

Daha önce de belirtildiği üzere elektrikli araçlar disiplinler arası teknolojileri içeren karmaşık bir mimariye sahiptir. Elektrikli araç performansı birçok disiplinler arası ilişkiye sahip faktörlerden etkilendiği için bilgisayar benzetimleri, performansın iyileştirilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi, optimizasyonunu yapabilmek açısından en önemli teknolojidir. Ayrıca bilgisayar benzetimleri, araç üreticilerinin prototip maliyetlerini ve ilk tasarım onay çalışmalarının süresini kısaltması açısından da çok önemlidir. Elektrikli araç sistemi, mekanik, elektrik, denetleme ve termal alt sistemlerinden meydana geldiği için yapılacak benzetimler de karma sinyallerin benzetimi esasına dayanmalıdır. Böylece sistem optimizasyonu, alt sistem parametrelerinin tümü göz önünde bulundurulmuş bir şekilde bütün sistemi optimize edecek şekilde yapılabilir. Genellikle ilgili sistem parametreleri için birçok iteratif hesaplama ve benzetim yapılır. (Bergveld 2001). Kısaca, elektrikli araç sistem

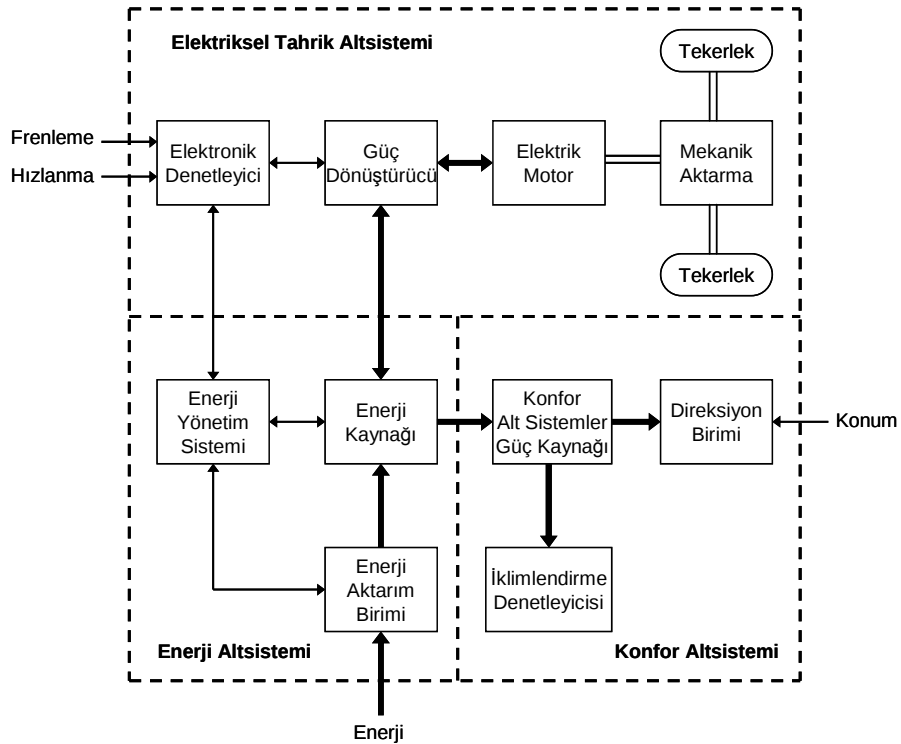
seviyesinde benzetim ve optimizasyonu yapılırken aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır;

- Alt sistemler arası etkileşimler elektrikli araçların performansını doğrudan etkilediği için bu etkileşimler çok iyi analiz edilmeli ve hesaba katılmalıdır.
- Modelin doğru sonuçlar verebilme kabiliyeti ile modelin karmaşıklığı doğru orantılıdır. Doğru sonuç verme, karmaşıklık ve kullanım kolaylığı özellikleri arasında en optimum modeli ortaya koymak için bazı parametreler göz ardı edilmeli ve kabullerde bulunulmalıdır.
- Elektrikli araçların yüksek gerilim altında çalıştığını göz önünde bulundurarak, başta batarya ve bataryanın araca getireceği ağırlık olmak üzere sürücü gerilimi, akım değerleri, hızlanma performansı, sürüş menzili ve güvenlik parametreleri en iyi şekilde kararlaştırılmalıdır.
- Sürüş menzilini artırmak adına bataryanın kapasitesi artırılabilir fakat bunun sistem maliyetine büyük bir yük getireceği göz ardı edilmemelidir.
- Genelde elektrikli araçlarda sabit oranlı bir şanzıman (çoğu zaman redüktör) araç performansını ve sürüş kalitesini etkiler. İteratif yöntemler ve farklı sürüş profilleri ile çok sayıda benzetimler yapılarak en optimum oran seçilmelidir.

3.1.2.3. Farklı elektrikli araç tipleri

İçten yanmalı motorlu araçlar ile karşılaştırıldığında elektrikli araç yapılandırmalarının daha esnek olduğu belirtilebilir. Bu esneklikler elektrikli araçlara özgü birçok faktörden kaynaklanmaktadır. (Wouk 1995). Elektrikli araçlarda enerji akışı mekanik bağlantı elemanları yerine kablolar vasıtasıyla sağlandığından esneklik söz konusu olur. Farklı elektriksel tahrik alternatifleri, elektrikli araç sistem yapılandırmaları açısından önemli bir çeşitlilik getirir. Diğer bir faktör ise enerji kaynakları ile ilişkilidir çünkü batarya veya yakıt hücreleri gibi elektrikli araç enerji kaynakları farklı karakteristik özelliklere sahiptirler. Şekil 3.2.'de bir elektrikli aracın genel yapısı; ana alt sistemler olan elektriksel tahrik, enerji ve konfor olmak üzere gösterilebilir. Elektriksel tahrik alt sistemi elektronik denetleyici, güç dönüştürücü, elektrik motoru, mekanik aktarma ve tekerlekler olarak özetlenebilir. Enerji alt sisteminde ise enerji yönetim sistemi, enerji

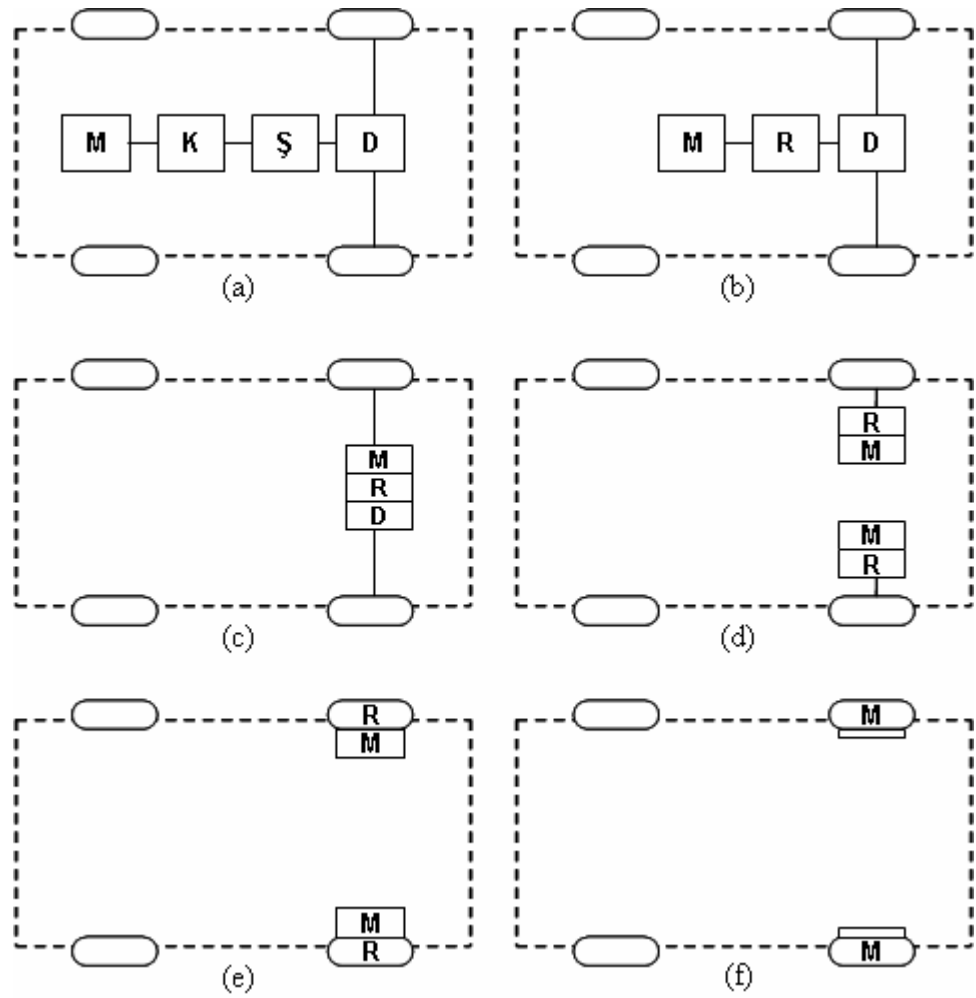
kaynağı, enerji aktarım birimi ve son olarak da konfor alt sistemi de konfor alt sistemler güç kaynağı, direksiyon birimi ve iklimlendirme birimi olacak şekilde verilmiştir. Mekanik bağlantı çift çizgi, elektriksel bağlantı kalın çizgi ve denetleme bağlantıları ince tek çizgi ile gösterilmiştir. Frenleme ve hızlanma bilgisi pedallardan alınıp, elektronik denetleyicide denetim sinyallerine dönüştürülür. Bu üretilen sinyaller ile güç dönüştürücü, enerji kaynağı ile elektrik motoru arasındaki akışı denetler. Buradaki akışın iki yönlü olduğunu belirtmek gerekir çünkü normal sürüş modunda elektrik motoru enerji kaynağında aktarılan enerji ile tahrik sağlarken, rejeneratif frenleme modunda ise elektrik motoru jeneratör gibi çalışarak enerji akışının motordan enerji kaynağına doğru olmasını sağlar. Ayrıca enerji kaynağının batarya (bazı metal-hava bataryalar hariç) veya yakıt hücresi olduğu düşünülecek olursa rejeneratif frenleme sayesinde elde edilen enerji, enerji kaynağının şarj edilmesinde kolaylıkla kullanılabilir. Enerji yönetim sistemi denetleyicisi, elektrikli araç elektronik denetleyicisiyle beraber çalışarak rejeneratif frenlemeyi denetler. Öte yandan da enerji aktarım birimi ile beraber çalışarak da şarj süreci, enerji kaynağının doluluk oranı gibi kritik verileri de takip ederek enerji kaynağının kullanılabilirlik durumunu dinamik olarak belirler.



Şekil 3.2. Elektrikli araç alt sistemlerinin genel yapısı

Konfor alt sistemleri güç kaynağı da araçta yer alan müzik, varsa navigasyon, aydınlatma, iklimlendirme, elektrik destekli direksiyon gibi genel olarak araç içi yaşam alanı ile ilgili birimlerin ihtiyaç duydukları farklı seviyelerdeki gerilimi sağlar.

Güncel teknolojik seviye itibariyle, elektriksel tahrik ve enerji kaynaklarındaki varyasyonlara bağlı olarak elektrikli araçlarda birçok farklı yapılandırmaya gidilebilir. Şekil 3.3.'de görüleceği üzere bu varyasyonlar altı farklı şekilde özetlenebilir.



Şekil 3.3. Elektrikli araç elektriksel tahrik yapılandırma çeşitleri (M: elektrik motoru, K: kavrama, Ş: şanzıman, D: diferansiyel, R: redüktör)

Şekil 3.3.(a)'da gösterilen yapılandırma standart önden çekişli bir içten yanmalı motorlu araca elektrik motorunun adapte edilmiş halidir. Elektrik motoru, kavrama, şanzıman ve

diferansiyelden teşkil edilir. Kavrama ve şanzıman olduğu için sürücü dişli oranlarını vites değiştirerek kendi seçer ve böylece üretilen tork tekerleklerle kadar gider. Tekerleklerde; düşük hız ve viteslerde yüksek tork, yüksek hız ve viteslerde ise düşük tork oluşur. Bu tarz bir yapılandırma genellikle içten yanmalı motorlu araçtan elektrikli araca dönüşüm yapıldıysa söz konusu olur çünkü mümkün mertebede hâlihazırda var olan parçaları yeni parçalarla değiştirmek maliyeti artırmaktadır.

Şanzıman yerine sabit dişli oranına sahip redüktör kullanılması ile kavrama kullanılmasına ihtiyaç kalmaz ve dolayısıyla mekanik aktarma hem hacimsel hem de kütsel olarak önemli ölçüde küçültülür. Bu yapı Şekil 3.3.(b)'de gösterilmiştir. Bu yapılandırmada elektrik motoru, redüktör ve diferansiyel bulunur. Burada altı çizilmesi gereken nokta bu tür bir yapılandırmanın içten yanmalı motorlu araçlar için kesinlikle uygun olmadığıdır çünkü kavrama ve şanzıman olmadan istenen tork-hız karakteristikleri elde edilemez.

İçten yanmalı motorlu araçlardakine benzer şekilde elektrikli araçlarda da elektrik motoru, redüktör ve diferansiyel tek gövdede birleştirilebilir. Bu birleşik yapıdan alınan hareket akslar vasıtasıyla doğrudan tekerleklerle iletilir. Şekil 3.3.(c)'de gösterilen yapı çoğu modern elektrikli araçlarda sıkça tercih edilen bir yapıdır.

Bir elektrikli araçtaki diferansiyelin görevi, farklı hızlarda çalışabilen iki elektrik motorunun kullanılmasıyla da yerine getirilebilir. Şekil 3.3.(d)'de iki ayrı elektrik motoru ve redüktör ile tekerleklerle ayrı hareket verilebilecek bir yapı gösterilmiştir.

Elektrik motorundan alınan hareketin tekerleklerle kadar iletilmesinde kullanılan aktarma organlarının azaltılması açısından bakıldığında elektrik motoru tekerleklerin içine yerleştirilebilir. Bu tür bir yapılandırmaya tekerlek-içi (in-wheel) yapılandırması adı verilir. Şekil 3.3.(e)'de verilen yapılandırmada elektrik motorunun hızını tekerleklerde istenen hıza düşürmek için planet dişli grubu kullanılır. Bu yapılandırmada planet dişli grubunun kullanılmasının nedeni ise planet dişli grubunun yüksek hızlı redüksiyon yapılmasında avantajlı olmasıdır.

Her türlü mekanik dişli sistem yapıdan çıkarılarak, düşük hızlı rotora sahip elektrik motorları tekerlek-içi yapılandırma şeklinde kullanılabilir. Şekil 3.3.(f)'de rotorun doğrudan tekerlek jantına monte edilerek kullanıldığı yapı gösterilmiştir. Böylece sadece elektrik motorunun denetlenmesiyle tekerlek hızının ve dolayısıyla da araç hızının denetlenmesi mümkün olabilmektedir.

Yukarıda verilen yapılandırmalar arasından temel olarak boyutlara ve elektrikli aracın ne tür bir uygulamada kullanılacağına bağlı olmak üzere seçim yapılabilir. Bu seçimdeki ana kriterler hacim, ağırlık, performans ve maliyet olarak sıralanabilir.

3.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Enerji Kaynakları

Elektrikli araçlarda kullanılan enerji kaynakları elektrikli araçların endüstriyellesmesinde en önemli engellerden birisidir. Dolayısıyla tasarlanmış veya hala tasarlanmakta olan elektrikli araçların en kritik tasarım parametresi enerji kaynaklarıdır. Bu tasarım parametresinin kıstasları özetle aşağıdaki gibidir;

- Yüksek özgül enerji (kWh/kg) ve enerji yoğunluğu (kWh/L).
- Yüksek özgül güç (kW/kg) ve güç yoğunluğu (kW/L).
- Hızlı şarj ve aşırı-deşarj özellikleri.
- Uzun çevrim ve servis ömürleri.
- Kendi kendinedeşarj oranı ve yüksek şarj olma verimi.
- Güvenlik.
- Maliyet.
- Bakım gerektirmemesi.
- Çevreci ve geri dönüştürülebilir.

Elektrikli araçlarda farklı tiplerde enerji kaynakları kullanılabilir. Bu enerji kaynakları arasında hidrojen yakıt hücreleri kullanılabileceği gibi farklı kimyasal özelliklere sahip bataryalar da kullanılabilir. Öte yandan araçta sadece bir enerji kaynağı kullanmaktansa hibrit bir enerji kaynağına sistemde yer vermek bazı negatif kıstasları ortadan kaldırır. Hibrit elektrikli araçların en büyük dezavantajı ise hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru kullanılması nedeniyle maliyetinin çok yüksek olmasıdır. Toyota,

Honda, Chevrolet ve Chrysler gibi otomobil üreticileri ürün gamlarında hibrit elektrikli araçlara yer verirken (Geller 2010), Renault gibi üreticiler de tüm ürün gamını sadece bataryaya sahip elektrikli araçlardan oluşturmuşlardır. (Sayın ve Yüksel 2011).

3.2.1 Farklı batarya tipleri

Bugün ve gelecekte bataryaların elektrikli araçlar için en avantajlı çözüm olduğu fikri hâkimdir. Amerikan enerji bakanlığının Birleşik Devletler Gelişmiş Batarya Konsorsiyumu (USABC) adı altında kurduğu organizasyonda Ford, GM, Chrysler ve batarya imalatçıları yer almaktadır. Bu konsorsiyum orta ve uzun vadeli elektrikli araç bataryaları için performans hedeflerini koymuş durumdadırlar. Çizelge 3.2’de bu hedefler verilmiştir. (Uscar 2006) Bu hedefler arasında güç yoğunluğu, özgül güç (batarya doluluk oranına (SOC, State of Charge) bağlı olarak), enerji yoğunluğu, özgül enerji, ömür, çevrim sayısı ve çalışma sıcaklığı vb. vardır.

Elektrikli araç bataryaları için konulan bu hedefler gerçekleştirilmesi çok zor olan hedeflerdir. Mevcut bataryalar arasında elektrokimyasal olarak bu hedefleri yakalayacak teknoloji seviyesine ulaşamamıştır. Fakat öte yandan USABC bu hedefleri koyarken temel amacı içten yanmalı motorlu araçlara yakın bir elektrikli araç performansı yakalayabilmektir.

Mevcut elektrikli araçlarda kullanılabilecek batarya teknolojileri arasında; valf ayarlı kurşun-asit (VAKA veya literatürde bilindiği şekli ile VRLA-Valve regulated lead-acid), nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-çinko (Ni-Zn), nikel-metal hidrat (NiMH) , çinko-hava (Zn-hava), alüminyum-hava (Al-hava), sodyum-sülfür (Na-S), sodyum-nikel klorür (Na-NiCl₂), lityum-polimer (Li-polimer) ve lityum-iyon (Li-iyon) vardır. Bu batarya tiplerinden bazılarının detaylarına ilerleyen bölümlerde yer verilecektir. Bu farklı batarya tiplerinin, özgül enerji, enerji yoğunluğu, özgül enerji, çevrim ömrü, tahmini maliyet gibi bazı önemli parametreleri Çizelge 3.3’de sıralanmıştır.

Çizelge 3.2. USABC uzun dönem batarya hedefleri

Parametreler	Minimum Hedef Değer	Uzun Dönem Hedefi
Güç yoğunluğu (W/L)	460	600
Özgül güç - %80BBO/30 saniye(W/kg)	300	400
Enerji yoğunluğu - C/3 Deşarj hızında (Wh/L)	230	300
Özgül enerji - C/3 Deşarj hızında (Wh/kg)	150	200
Özgül güç / Özgül enerji oranı	2:1	2:1
Batarya grubu boyutu (kWh)	40	40
Ömür (yıl)	10	10
Çevrim ömrü - Çevrim başı %80 BBO	1000	1000
Şatış fiyatı - 25,000 adet @ 40 kWh (\$/kWh)	<150	100
Çalışma sıcaklığı - ortam (oC)	-40 ~ +50	-40 ~ +85
Normal şarj süresi (h)	6	3 ~ 6
Hızlı şarj süresi (h)	%20-70 BDO <30dk @150W/kg	%40-80 BDO 30dk
1 saat zarfında sürekli deşarj (nominal enerji kapasitesi üzerinden %)	75	75

Çizelge 3.3. Farklı batarya tipleri için önemli batarya parametreleri

Tip	Özgül enerji (Wh/kg)	Enerji yoğunluğu (Wh/L)	Özgül güç (W/kg)	Çevrim ömrü (çevrim sayısı)	Maliyet (\$/kWh)
VRLA	30-45	60-90	200-300	400-600	150
Ni-Cd	40-60	80-110	150-350	600-1200	300
Ni-Zn	60-65	120-130	150-300	300	100-300
NiMH	60-70	130-170	150-300	600-1200	200-350
Zn-hava	230	269	105	-	90-120
Al-hava	190-250	190-200	7-16	-	-
Na-S	100	150	200	800	250-450
Na-NiCl ₂	86	149	150	1000	230-350
Li-polimer	155	220	315	600	-
Li-iyon	90-130	140-200	250-450	800-1200	>200

Buradaki veriler genel bilgi amaçlı verilmiştir çünkü farklı batarya tipleri için ilgili değerler üreticiden üreticiye farklılık gösterebilir. Hatta bir batarya üreticisinin ürettiği

aynı tipte fakat farklı model bataryalar arasında bile önemli farklılıklar gözlenebilir. Bunun nedeni ise ilgili bataryanın tasarımı esnasında özgül enerji, özgül güç, çevrim ömrü gibi parametreler arasında farklı seçimler yapılmış olmasıdır. Ayrıca bu tip veriler kısa periyotlar içinde bile kaydedilebilen önemli gelişmeler nedeniyle de değişebilir. Çizelge 3.3'deki verilere dikkat edilecek olursa bugün itibari ile USABC'nin hedeflerine ulaşan batarya tipi şu an için mevcut değildir.

1990' larda GM, EV1 isimli, tamamen elektrikle tahrik edilen modelini piyasaya sürmüştür. Ekonomik açıdan ve altyapı yetersizliği nedenleri ile önemli bir başarı yakalayamadığı söylenmektedir. EV1'de 18kWh kapasiteli kurşun asit batarya kullanılmış ve ağırlık açısından da araca önemli bir yük getirmiştir. GM' nin 1999'da piyasaya sürmüş olduğu EV1'in yeni sürümünde 26kWh'lik Panasonic NiMH batarya sistemi kullanmıştır. GM'in beklentilerin altında kalması diğer otomobil üreticilerinin çekincelerini artırmış olmakla beraber Honda içten yanmalı motor ile birlikte elektrik motoru ile çalışan bir hibrit aracını piyasaya sürmüştür. Bugün ürün gamlarında farklı hibrit araçlar olan üretici firmalar mevcuttur. En popüler ve bilinen hibrit Toyota Prius 200V'luk NiMH batarya sistem içermektedir. Birçok otomobil üreticisinin yaptığı gibi Toyota da batarya konusunda bir üretici ile ortaklığa gitmiştir ve araçlarında Panasonic bataryaları kullanmaktadır. Batarya sisteminde 28 modülden oluşan 2 dizi mevcuttur. Her bir modül de 6,5Ah'lık 6 hücreden oluşmaktadır.

Hibrit elektrikli araç ve elektrik prizinden şarj edilebilir hibrit elektrikli araç uygulamalarında bataryalar özellikle ihtiyaç duyulan enerji miktarına göre boyutlandırılmıştır. Tipik bir hibrit elektrikli araç batarya sisteminde yüksek yükler altında çalışma durumu söz konusu olup batarya sistemi araç ivmelendiğinde devreye girerek ilave bir güç sağlar. Böyle bir durumda daha iyi yakıt ekonomisi sağlayan daha düşük güçte içten yanmalı motor kullanılabilir. Elektrikli motor yanında içten yanmalı motor kullanan hibrit elektrikli araçlarda elektrikli araçlarda olduğu kadar yüksek kapasiteli batarya kullanılması gerekmez. Bunun sonucu olarak batarya daha dar bir batarya doluluk oranı aralığında çalışabilir . Gerek hibrit elektrikli araçlarda ve gerekse elektrikli araçlarda frenleme sırasında elektrik motoru jeneratör biçiminde çalışarak bataryayı şarj ettiğini de belirtmek gerekir. Çoğu hibrit elektrikli araçlarda batarya

sisteminde NiMH bataryalar kullanılmıştır. Bunun başlıca nedeni, NiMH bataryaların kurşun-asit batarya sisteminden daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması yanında düşük çalışma sıcaklıklarında çok az kapasite düşüşü göstermesidir. Ayrıca NiMH batarya teknolojisi Li-iyon batarya teknolojisinden önce geliştirilmiş olduğunda erken dönem hibrit elektrikli araçlarında NiMH batarya sistemi tercih edilmiştir.

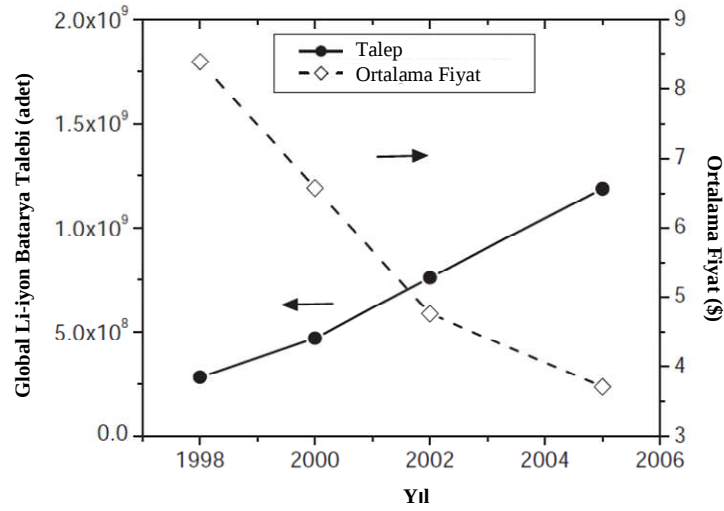
Son yıllarda yüksek enerji yoğunluğuna sahip Li-iyon batarya teknolojisinin gelişmesine paralel olarak gerek hibrit ve gerekse elektrikli araç uygulamalarında Li-iyon bataryalar tercih edilmeye başlamıştır. Geçmişte, güvenlik zaafalarının yanı sıra düşük ve yüksek sıcaklıklardaki önemli kapasite düşümü nedenleri ile Lityum-iyon bataryalar daha çok küçük elektronik cihaz uygulamalarında kullanılmıştır. Maliyet ve teknolojik zorluklar nedeniyle daha ileri otomotiv uygulamalarında fazla kullanılamamışlardır. Batarya gücü ve ömrü toplam sistemin maliyetini belirlediğinden elektrikli araç uygulamalarında batarya sistemi en önemli birimdir. Elektrikli araçlar geliştirilirken istenen performansı ve menzili elde edebilmek için elektriksel kapasiteyi artıracak büyük batarya sistemine ihtiyaç duyulur. Geliştirilen batarya yönetim sistemi ile birlikte yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum-iyon bataryalar şu an için ticari ve endüstriyel açıdan en uygun seçenek görünmektedir. Li-iyon bataryalar NiMH'e göre yüksek hücre gerilimi, enerji yoğunluğu ve düşük kendi kendine deşarj oranıyla önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlardan yola çıkarak elektrikli araçlarda kullanılabilecek batarya sisteminde yüksek gerilim elde edebilmek için hücreler seri şekilde bağlanır. Diğer taraftan gerilim artışı yanında kapasite artışı sağlamak içinse seri hücrelerin diğer bir seri hücre dizisiyle paralel bağlanması gerekir. Bu durumda batarya sistemin tasarım ve operasyon karmaşıklığı artar. Karmaşıklığı artan batarya sisteminde, iyi bir batarya güvenliği, batarya enerji yönetimi ve batarya ısıl yönetimi için iyi bir batarya yönetim sistemi gerekir.

3.2.1.1. Lityum-iyon bataryalar

Bu tez çalışma konusu li-iyon bataryalar olup bu konuda ayrıntılı bilgi verilecektir. Li-iyon bataryalar pozitif ve negatif katmanlara sahiptirler. Her bataryada olduğu gibi yük çevrimi söz konusudur ve li-iyon bataryalarda da Li^+ iyonlarının pozitif ve negatif

elektrotlar arası transferi söz konusu olur. Pozitif elektrot, tipik olarak katmanlı yapıda lityum kobalt oksit (LiCoO_2) gibi bir metal oksittir veya lityum mangan oksit (LiMn_2O_4) gibi tünel yapıda olan bir maddedir. Negatif elektrot ise yine katmanlı yapıda olan ve bakır bir kolektöre sahip grafitik karbondur. Şarj ve deşarj süreçlerinde lityum iyonları aktif maddenin atomik katmanlarına gömülür veya koparılır. Piyasada bulunan çoğu li-iyon bataryada pozitif elektrot olarak LiCoO_2 kullanılır. LiCoO_2 iyi bir elektriksel performansa sahiptir, kolay imal edilir, güvenlik açısından sorunsuzdur ve genel olarak süreçlere hassas değildir. Son dönemde LiMn_2O_4 ve lityum nikel kobalt oksit ($\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$) daha ucuz ve bazı uygulamalarda daha yüksek performans gösterdiğinden tercih edilmektedir. İlk üretilen li-iyon bataryalarda negatif elektrot malzemesi olarak kok kullanılsa da geliştirilmiş grafitler piyasaya sürüldükçe kullanım oranları düşmüştür. Grafitlerin getirdiği avantajlar arasında daha yüksek özgül enerji kapasitesi, artırılmış çevrim ömrü sayılabilir. 1999 yılında 400 milyon adet li-iyon batarya satışı yapıldığında yatırımcı şirketler araştırma ve geliştirme faaliyetlerini daha da hızlandırmışlardır. (Linden ve Reddy 2002) Bu ivmelenmeden dolayı otomobil üreticileri de li-iyon bataryaların elektrikli araçlarda kullanılmasının önündeki en büyük engel olan maliyet kıstasının yavaş yavaş ortadan kalkacağını öngörmüşlerdir. 2005 yılı ile birlikte pazarın 1,1 milyar adet olduğu ve maliyetlerin 1999 yılından 2005 yılına kadar %46 oranında düştüğü görülmüştür. Bu durum Şekil 3.4'te verilmiştir. Birçok ürün grubunda li-iyon teknoloji standart hale gelmiş ve performansta sürekli iyileşmeler sağlanmıştır. Pazarın ihtiyaçlarını karşılamak adına silindirik, prizmatik ve polimer formlarda, 0,1Ah ila 160Ah kapasiteleri aralığında ürün çeşitliliği sağlanmıştır. Kullanım alanları olarak, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar gibi tüketici elektroniği ürünleri; radyolar, detektörler, termal görüş sistemleri gibi askeri elektronik cihazlar, uzay ve otomotiv sanayinin temel ürünleri sayılabilir.

Ağırlığın veya hacmin önemli bir tasarım veya ürün kıstası olduğu uygulamalarda li-iyon bataryalar yüksek özgül enerjisi ($\sim 150\text{Wh/kg}$) ve enerji yoğunluğu ($\sim 400\text{Wh/L}$) ile öne çıkmaktadır. Ayrıca li-iyon bataryalar düşük değerlerde kendi kendine deşarj oranına (aylık %2 ila %8 arası), yüksek çevrim sayısına (yaklaşık 1000 çevrim) sahip olması ve geniş bir sıcaklık aralığında (şarj esnasında -20 ile $+60^\circ\text{C}$, deşarj esnasında -40 ile $+65^\circ\text{C}$) çalışabilmesi sayesinde birçok alanda kullanılabilmektedirler.



Şekil 3.4. Li-iyon batarya pazar talebi ve ortalama fiyat grafiği

Farklı batarya üreticileri farklı sayılarda batarya hücresi kullanarak çok farklı amaçlara hizmet edebilecek bataryalar üretmektedirler. Bir tek hücrenin tipik çalışma gerilim aralığı 2,5 ila 4V arasındır. Bu değerlerde NiCd veya NiMH batarya hücrelerinin yaklaşık olarak 3 katıdır. Dolayısıyla uygulama tipine bağlı olmak kaydıyla NiCd veya NiMH hücrelerden 1/3 oranında daha az li-iyon batarya hücresi aynı performansı gösterebilir. 5C¹ sürekli deşarj veya aralıklı 25C hızında deşarj karakteristiğine sahiptirler. Bütün bu avantajlarının yanına bir de maliyet avantajı eklendiğinde birçok uygulamada doğrudan tercih edilirler. Li-iyon bataryaların avantajları Çizelge 3.4.'de verilmiştir. Li-iyon bataryaların dezavantajlarında biri, 2V'un altında kadar deşarj edildiğinde (aşırı deşarj) kapasite kaybına uğramasıdır ve benzer şekilde de 4V'un üstünde şarj edildiğinde (aşırı şarj) de fiziki tahribin söz konusu olmasıdır. Aşırı şarj ve aşırı deşarj durumlarını engellemek, aralık dışı sıcaklıklarda çalışmadığını garanti altına almak için elektronik denetleyici devreleri kullanmak bir zorunluluktur. Böyle bir devrenin kullanılması sistemin karmaşıklığını ve maliyetini artırır dolayısıyla da önemli bir dezavantajdır. Ayrıca Li-iyon bataryalar NiCd ve NiMH batarya hücrelerine oranla yüksek sıcaklıklarda kapasite kaybına uğrarlar.

1 Bataryaların şarj ve deşarj akımları "C" oranı ile ifade edilir. Kurşun asit bataryalar haricindeki bataryalar 1C nominal değere sahiptirler. 1C' lik bir deşarj esnasında akan toplam akım, bataryanın nominal kapasitesine eşittir. Örneğin, 1000mAh kapasiteli bir batarya 1C oranında deşarj edilirse, bir saat boyunca 1000mA akım sağlayabilir. Aynı batarya 0,5C oranında deşarj edildiğinde 500mA'lık akımı iki saat boyunca üretebilir. 2C oranında aynı batarya 2000mA'ı 30 dakika boyunca sağlar. 1C oranı genellikle bir saatlik, 0,5C iki saat, 0,1C oranı ise on saatlik deşarj rejimi anlamına gelir.

Çizelge 3.4. Li-iyon bataryaların avantajları ve dezavantajları

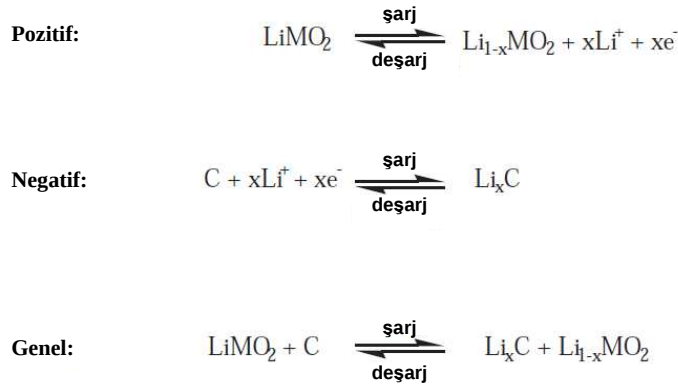
Avantajları	Dezavantajları
Bakım gerektirmeyen hücre yapısına sahip olması	Yüksek maliyetli olması
Uzun çevrim ömrüne sahip olması	Yüksek sıcaklıklarda kapasitesinin düşmesi
Geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmesi	Aşırı şarj durumunda kapasite kaybının olması
Raf ömrünün uzun olması	Koruyucu devre gereksinimi
Kendi kendine deşarj oranının düşük olması	Silindirik tiplerlerin düşük kapasiteye sahip olması
Hızlı şarj edilebilmesi	
Yüksek güçte deşarj edilebilmesi	
Yüksek enerji verimliliğine sahip olması	
Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması	
Hafıza etkisinin olmaması	

3.2.1.1.1 Lityum-iyon batarya hücre kimyası

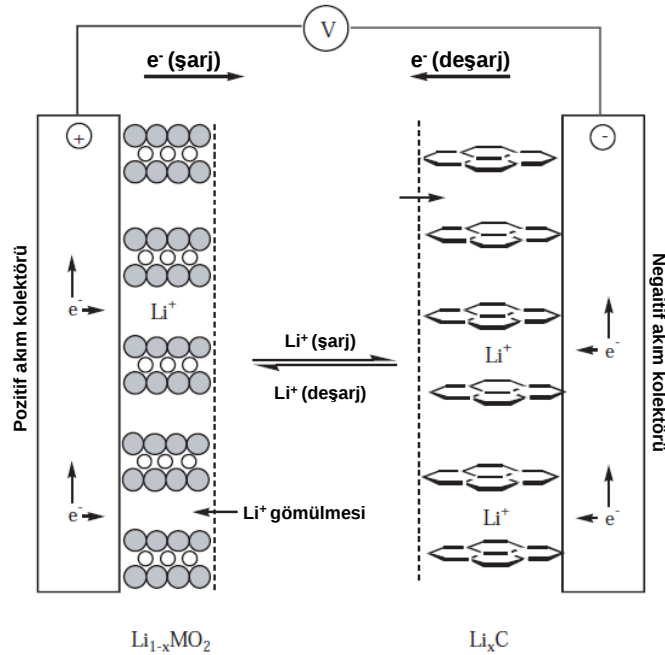
Bir önceki bölümde de yer verildiği üzere elektrotlarda kullanılan aktif elektrokimyasal maddeler, pozitif elektrot için lityum metal oksit ve negatif elektrot için grafit karbondur. Bu malzemeler metal folyo şeklindeki akım kolektörüne yapıştırılır. Tipik olarak kolektörde poliviniliden florid (PVDF) ya da kopolimer poliviniliden florid heksafloropropilen (PVDF-HFP) kullanılır. Pozitif ve negatif elektrotlar polietilen veya polipropilen separatör ile elektriksel olarak izole edilmiştir. Elektrolit olarak sıvı, jel, katı tipler mevcuttur. 1990 yılında Sony'nin li-iyon bataryaları ticarileştirmesinden sonra çok farklı kombinasyonlar yapılmıştır. Örnek olarak, bazı jel-polimer elektrolitli li-iyon bataryada sıvı elektrolitli bataryada kullanılan aktif maddeler kullanılması gösterilebilir. Kullanılan batarya elemanları her ne kadar farklılık gösterse de hücre kimyası aynıdır.

Li-iyon batarya hücrelerinde tersinir bir şekilde Li iyonlarının katmanlar arasına gömülmesi söz konusudur. Bu reaksiyonda Li iyonlarının gömüldüğü veya koparıldığı durumların her ikisi içinde katmanlarda kalıcı bir fiziksel değişiklik söz konusu değildir. Pozitif ve negatif elektrot malzemelerinin katmanlı seçilmesinin nedeni de zaten bu reaksiyona müsaade ediyor olmalarıdır. Gömülme işlemine uygun olan malzemeler arasında grafit, katmalı silikatlar ve kalay sayılabilir. Bir li-iyon batarya hücresi şarj

edildiğinde pozitif elektrot oksitlenir ve negatif elektrot azalır. Bu süreçte, lityum iyonları pozitif elektrottan koparılır ve negatif elektrota gömülür. Şekil 3.5'te bu durum gösterilmiştir. Şekil 3.5.'te LiMO_2 metal oksit olan pozitif elektrot ve C ile temsil edilen grafitik karbon negatif elektrot mevcuttur. Deşarjda ise bu sürecin tam tersi meydana gelmektedir. Li-iyon batarya hücresinde metalik lityum bulunmadığından, bu hücreler kimyasal açıdan daha da reaktif ve dolayısıyla da daha güvenlidir. Ayrıca negatif elektrotu metalik lityum olan şarj edilebilir bataryalardan daha uzun ömürlüdür. Şarj ve deşarj prosesleri görsel olarak Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu şekilde katmanlı aktif maddeler metalik akım kolektörlerinin üzerinde gösterilmiştir.



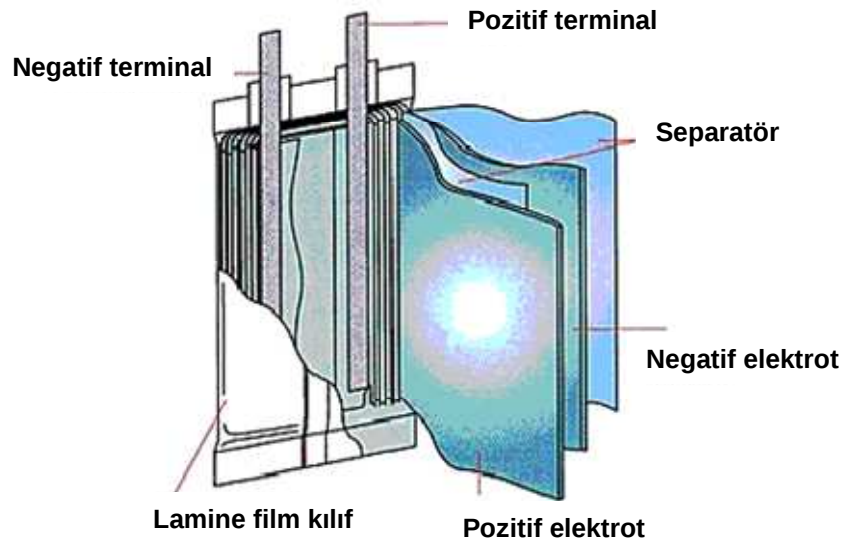
Şekil 3.5. Li-iyon batarya hücresi kimyasal reaksiyonları



Şekil 3.6. Li-iyon batarya hücresi kimyasal prosesleri

3.2.1.1.2. Polimer lityum-iyon bataryalar

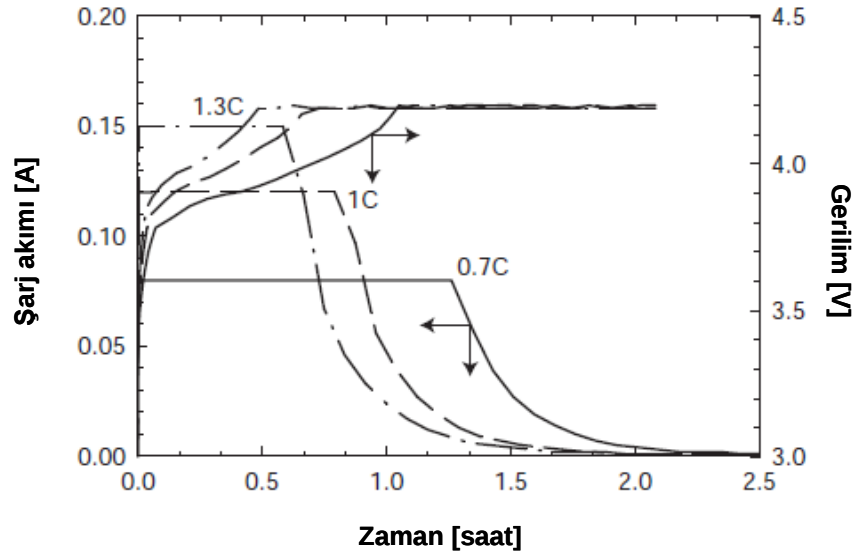
Polimer li-iyon bataryalar bu tez çalışmasına konu olan elektrikli taşıt aracında kullanılan batarya tipidir. Söz konusu araçta kullanmasının temel amacı fiziken ince ama bununla beraber yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluk avantajlarını korumasıdır. Polimer li-iyon hücrelerde de silindirik ve prizmatik hücrelerle aynı aktif maddeler kullanılır. Polimer li-iyon hücrelerde düz ve yapışık elektrotlar kullanılarak ince bir hücre olarak üretilebilmesi sağlanmıştır. Bu katmanlı yapı Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Polimer li-iyon hücre katmanları

Polimer li-iyon hücrelerde genelde jel tipi elektrolit kullanılır. Bu tür elektrolitlerin kullanılmasının amacı alternatif olarak kullanılabilecek katı elektrolitlerden daha iletken olmasıdır. Bugün üretilen jel elektrolitli hücreler sıvı elektrolitli li-iyon bataryalardan özgül enerji ve enerji kapasitesi açısından daha iyi performans ortaya koyarlar. Bununla beraber daha ince yapıda olmaları sebebiyle elektrikli araç uygulamalarında tercih edilirler. Genelde kalınlıkları 1,2mm ile 8,4mm arasında değişir. Kapasiteleri de 0,5Ah ile 40Ah arasındadır. Özgül enerji ve enerji kapasitesi açısından da silindirik ve prizmatik li-iyon hücrelere benzer şekilde; C/LiCoO₂ hücreler için sırasıyla 145 ila 190 Wh/kg, ve 270 ila 400 Wh/L, C/LiMn₂O₄ hücreler için 130 ila 144 Wh/kg ve 235 ila 300 Wh/L değerleri söz konusudur.

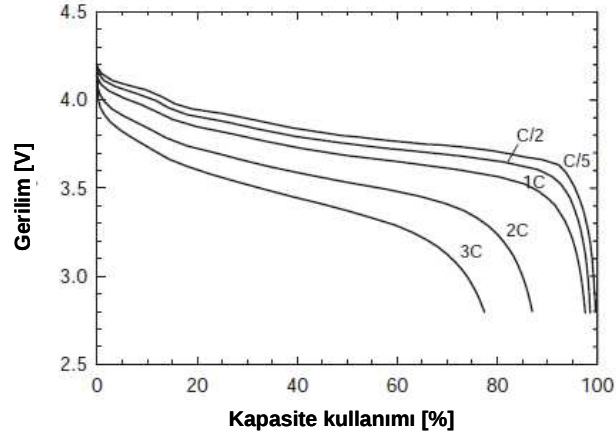
Polimer li-iyon bataryalar sabit akım (SA) ve sabit akım-sabit gerilim (SASG) rejimi ile şarj edilebilir. 0,120 Ah'lık bir C/LiCoO₂ polimer li-iyon bataryanın 1,3C, 1C, 0,7C oranlarında şarj edilmesi durumunda ortaya çıkan şarj akımı ve hücre gerilimi Şekil 3.8.'de verilmiştir. Bütün durumlarda üst gerilim limiti olan 4,2V'a kadar sabit akımla hücre şarj edilmiştir.



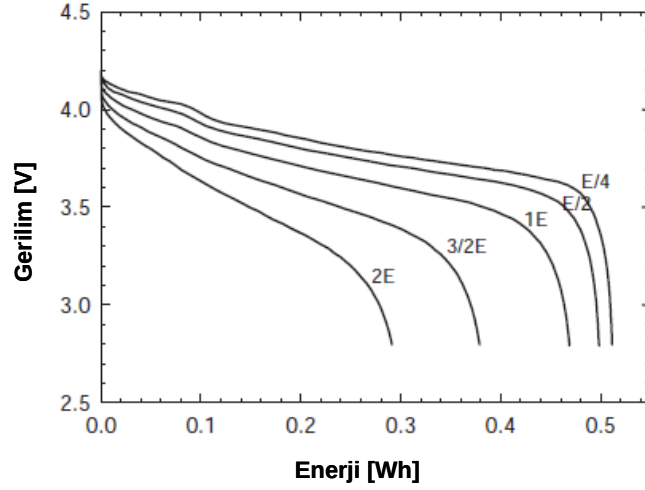
Şekil 3.8. C/LiCoO₂ polimer li-iyon hücre şarj karakteristiği

C/LiCoO₂ hücrelerin 3C ve 0,2C'deki deşarj kapasitesi Şekil 3.9.'da verilmiştir. Görüldüğü üzere hücre kapasitesinin %95'i 1C oranında, %87'si 2C oranında ve %77'si 3C oranında kullanılabilmiştir. Hücreden düşük deşarj oranlarında ortalama olarak 3,8V gerilim elde edilmişken bu gerilim değeri 2C oranında 3,55V ve 3C oranında da ortalama olarak 3,45V olmuştur. Hücre mevcut enerjisinin %80'nini 2C oranında kullandırmıştır. Şekil 3.10.'da görülebileceği üzere sabit güç ile deşarj edildiğinde de benzer özellikler söz konudur.

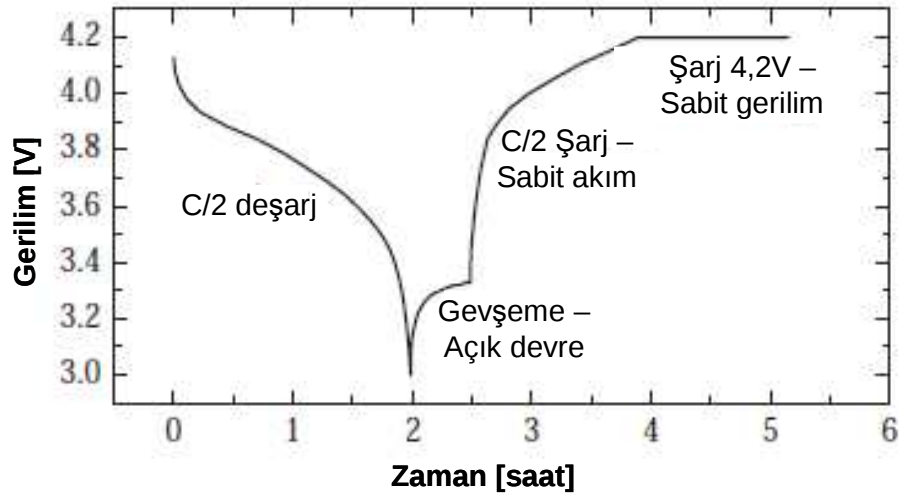
C/LiMn₂O₄ hücrelerin performansları da diğer li-iyon hücrelere benzerlik gösterir. Şekil 3.11'de C/LiMn₂O₄ hücrelerin SASG rejimi ile 0,5C oranında deşarj ve 4,2V'a kadar şarj edilmesi durumu gösterilmiştir. Çok az da olsa C/LiCoO₂ bataryalardan daha yüksek ortalama gerilim değeri söz konusu olmuştur. Bu tip hücrelerin kendi kendine deşarj oranları düşüktür (yaklaşık olarak 23°'de %2,5 ve 40°'de %6).



Şekil 3.9. C/LiCoO₂ polimer li-iyon hücre deşarj karakteristiği



Şekil 3.10. C/LiCoO₂ polimer li-iyon hücre deşarj karakteristiği (sabit güç)



Şekil 3.11. C/LiMn₂O₄ polimer li-iyon hücre şarj/deşarj karakteristiği

Li-iyon batarya hücreleri farklı yapılandırma şekillerinde birbirlerine elektriksel olarak bağlanırlar. Birden fazla hücre kullanılmasının iki temel amacı vardır;

- Hücreleri seri bağlayarak elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu gerilim seviyesine ulaşmak.
- Seri bağlanmış hücreleri birbirlerine paralel bağlayarak hedeflenen kapasiteyi elde etmek.

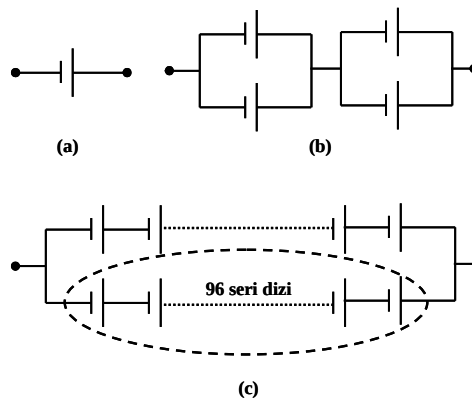
Batarya sisteminde kullanılacak hücre ve/veya modül sayısı araçta kullanılacak elektrik motorunun gücüne ve ulaşılacak istenen menzile göre belirlenmektedir. 4 kapılı standart sedan bir araç, 250 kg'lık bir Li-iyon batarya ile 150km menzile ulaşılabilir (Sayın ve Yüksel 2011). Aynı araçta 250kg yerine 500kg'lık bir batarya kullanılırsa menzile de doğru orantılı olarak 2 katına çıkar. Fakat burada göz önünde bulundurulması gereken noktalar arasında araç ağırlığının artması ve bataryanın araca montaj için gerekli olacak alandır. Özetle; elektrikli araçlarda kullanılacak bataryaların seçiminde güç ve kapasite (menzili belirleyen parametre) gereksinimlerinin yanı sıra fiziken araca nasıl monte edileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Aşağıdaki şekilde hücre ve modül yapılarına örnek verilmiştir.



Şekil 3.12. Örnek bir batarya hücresi ve modülü

Batarya modülleri hücrelerden teşkil edilmektedir. Hücrelerden oluşan bu modüller, doğrudan hücreleri üreten firmalardan temin edilir. Batarya modüllerinin uygun şekillerde birleştirilmesi ile elektrikli araçlarda kullanılabilecek batarya ve batarya

sistemi oluşturulmaktadır. Batarya sistemini üreten firmalar, batarya hücrelerini modül olarak hücreleri üreten firmalardan satın almaktadırlar. Batarya sisteminin üretiminde sadece batarya modülleri değil aynı zamanda yardımcı elemanlarda kullanılmaktadır. Bu yardımcı elemanları mekanik ve elektriksel olmak üzere iki farklı gruba ayırmak mümkündür. Mekanik bağlantı elemanları, modüllerin mekanik olarak bir araya getirilmesini sağlayan ve bataryanın iskeletini oluşturan montaj bağlantı elemanlarıdır. Ayrıca bataryanın en dışında yer alan, mekanik olarak bataryayı dış etkilere koruyan ve genellikle sac malzemeden imal edilen koruma kapağı, bataryanın üzerine oturtulduğu ve elektrikli araca montajı için kullanılan metal taşıyıcı karter de mekanik yardımcı elemanlar arasında yer alır. Hava ve su sızdırmazlığının sağlanması için farklı tipte fitiller de kullanılmaktadır. Modüllerin elektriksel bağlantılarının yapılmasında kullanılan kablo, soket vb. bağlantı elemanları da elektriksel yardımcı elemanlar arasındadır. Daha önce de değinildiği üzere hücrelerin elektriksel bağlantıları seri ve paralel şekilde gerçekleştirilir. Bu bağlantı şekli uygulama bazında değişiklik gösterebilir. Özellikle batarya modüllerindeki hücre sayısı ve bağlantı tipleri (seri-paralel) üreticiden üreticiye değişiklik gösterebilir. Tez çalışmasında ele alınan batarya sisteminin modülleri ise dört hücreye sahiptir. Bu dört hücreden ikisi paralel ve bu iki paralel hücreler de birbirlerine seri bağlanmıştır. Bu tip bağlantı şekli 2S2P olarak adlandırılır. Tez çalışmasında ele alınan batarya sisteminde toplam 48 adet modül kullanılmıştır. Bu modüller de birbirlerine seri bağlanmış ve sonuç olarak 96 hücrelik seri dizilerin birbirlerine paralel bağlandığı batarya sistemi teşkil edilmiştir. Bu elektriksel bağlantı şekilleri Şekil 3.13.'de verilmiştir. Bu topolojide seri bağlanmış hücrelere dizi adı verilmektedir.



Şekil 3.13. Batarya elektriksel bağlantı şekilleri, (a) hücre, (b) modül, (c) batarya

Şekil 3.14’de ise bataryanın modül montajlarının tamamlanmış hali gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Li-iyon batarya montajı (dikey)

Şekil 3.14.’de de görülebileceği üzere batarya sisteminde 16 modül içeren 3 sıra vardır. Bataryayı oluşturan modül ve hücrelerin montaj yapısı elektriksel yapısından farklı olabilmektedir. Bunun en önemli örneklerinden bir diğeri Şekil 3.15.’te verilen ve yatay biçimde montajı yapılan batarya tipidir.



Şekil 3.15. Li-iyon batarya montajı (yatay)

Li-iyon batarya hücrelerinin modüler bir şekilde üretilmesinin iki önemli amacı vardır. Bunlardan ilki, farklı elektrikli araç uygulamalarında ihtiyaç duyulan farklı elektriksel kapasiteyi sağlamak, yani daha büyük bir enerjiye ihtiyaç duyulduğunda daha fazla sayıda modül kullanılarak bu ihtiyacın karşılanabilir olması, ikincisi ise, bu farklı elektrikli araçların gövde mimarileri itibariyle farklı fiziki yapıda olabilecekleridir. Dolayısıyla “A aracı” projesinde Şekil 3.14.’de verilen kule tipi dikey batarya kullanılması daha uygunken “B aracı” için kasa altına montajı yapılabilen ve Şekil 3.15.’te gösterilmiş yatay tip batarya sistemi kullanılabilir.

Tez çalışmasında ele alınan batarya hücresinin nominal gerilimi 3,7V ve enerji kapasitesi de 34Ah’dır. 96 hücrenin seri bağlanmasıyla elde edilen nominal çıkış gerilimi 355,2V olmaktadır fakat maksimum hücre geriliminin 4,2V seviyelerinde olduğu düşünüldüğünde yüksek batarya doluluk oranlarında çıkış gerilimi 400V’a kadar yükselmektedir. 96 hücrelik seri dizinin enerji kapasitesi 34Ah iken iki seri dizinin paralel bağlanması suretiyle kapasite ikiye katlanır ve 68Ah’lık bir enerji kapasitesi elde edilir. Böyle bir batarya ile kaç kilometrelik bir menzil elde edilebileceği aşağıda matematiksel olarak ifade edilmiştir. Gizlilik nedeniyle tüm test sonuçları açık olarak ifade edilemese de standart bir sedan elektrikli aracın enerji tüketiminin (β) 170 Wh/km olduğu söylenebilir. Çizelge 3.3.’te de görülebileceği üzere bir li-iyon hücrenin ortalama özgül enerjisi (ρ) 100 Wh/kg’ dir. Tez çalışmasında kullanılan bataryanın ağırlığı (M) da 250 kg ise bataryada depolanan enerji (E);

$$E = M \cdot \rho \quad (3.1)$$

$$E = 250 \cdot 100 \left(\text{kg} \cdot \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} \right) \quad (3.2)$$

$$E = 25000 \text{Wh} \quad (3.3)$$

Dolayısıyla depolanan enerji (E) 25 kWh olmaktadır. Menzil (L) ise aşağıdaki eşitlikte ifade edildiği üzere;

$$L = \frac{E}{\beta} \quad (3.4)$$

olduğundan, sayısal değerlere Denklem (3.4)'de yerlerine koyularak,

$$L = \frac{25000}{170} \left(\frac{Wh}{Wh / km} \right) \cong 147,06km \quad (3.5)$$

elde edilir. Burada yapılan kısa hesaplama ile birlikte çalışmada ele alınan bataryayı kullanan bir aracın yaklaşık olarak 150km'lik bir menzile sahip olabileceği belirtilebilir.

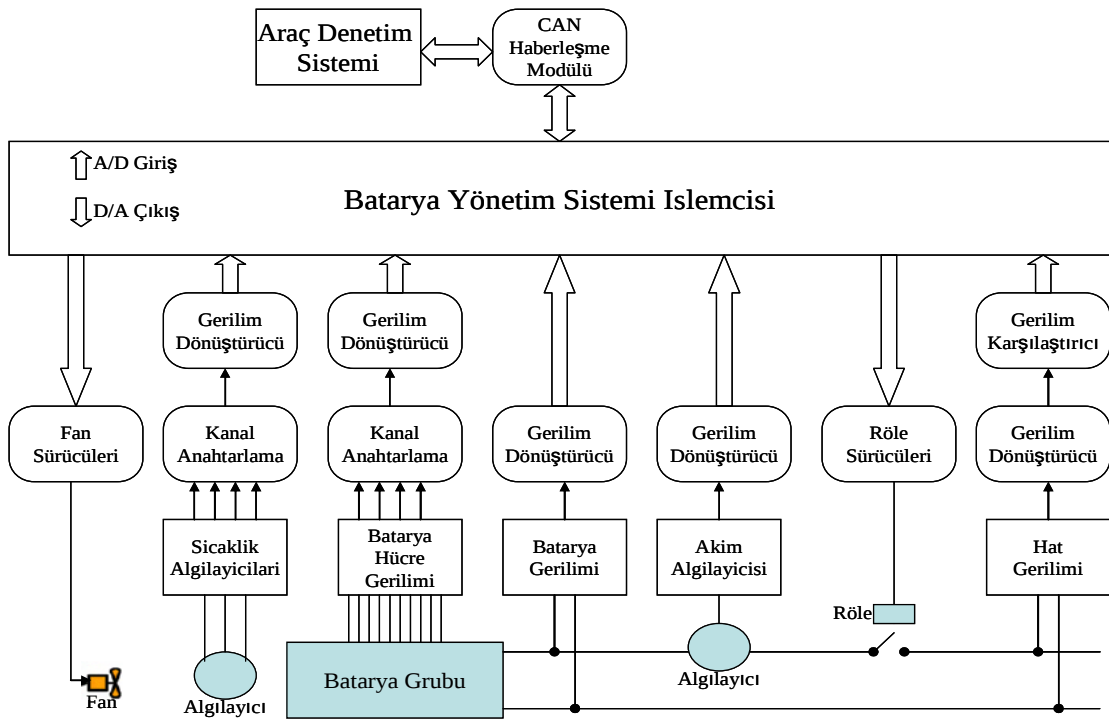
3.3. Batarya Yönetim Sistemi

Elektrikli araçlarda batarya yönetim sisteminin kullanılmasının en önemli sebepleri arasında güvenlik açısından bataryanın belirli limitler dâhilinde kullanılması gerekliliği ve bataryanın kullanımı süresince en yüksek performans ile çalışmasını sağlayabilmektir. Batarya yönetim sisteminin karmaşıklığı sistemden sisteme değişkenlik gösterebilir ama temel olarak batarya hücresinin kimyasına, elektrikli aracın gereksinimlerine ve elektrikli aracın kullanıldığı ortam şartlarına cevap vermelidir. Bazı bataryaların kimyasal özellikleri nedeniyle, güvenli bir şekilde kullanılmasını garanti altına almak amacıyla, bataryanın belirli sıcaklık, gerilim ve akım değerleri dâhilinde çalıştırılması şarttır. Ayrıca, bataryanın anlık durumu ve performansı ile ilgili bilgilerin değerlendirilmesiyle, bataryadaki mevcut enerjinin neredeyse tamamen kullanılması söz konusu olmaktadır. Tüm batarya yönetim sistemlerinde birçok fonksiyon bulunur. Bunlar fonksiyonlar arasında performans denetimi, ölçme, hesaplama, haberleşme, denetleme ve dengeleme sayılabilir. Bu fonksiyonların kullanılmasının amacı öncelikle bataryayı korumak ve sonrasında da geniş bir çalışma aralığında optimum performans elde etmektir. Bazı durumlarda batarya kimyasının ve elektrikli aracın şartları göz önünde bulundurulduğunda bütün bu fonksiyonların kullanılmasına gerek yoktur. Fakat yine batarya kimyasına bağlı olarak bazı fonksiyonların kullanılması şarttır. Bazı batarya yönetim sistemleri sadece sıcaklığın takip edildiği basit yapılar olsa da bazı batarya yönetim sistemleri yukarıda belirtilen tüm fonksiyonları içeren özellikle donanım ve yazılım açısından karmaşık yapılardır. Batarya yönetim sistemi batarya ile

ilgili kararları verirken daha üst seviyeli olan bir denetleyici tarafından denetlenebilir. Bu üst seviyeli denetleyici çoğu zaman aracın ana denetleyicisidir çünkü özellikle aracın genel performansı açısından batarya parametreleri haricinde değerlendirilmesi gereken birçok araç parametresi vardır. Özet olarak batarya yönetim sisteminin 3 temel görevi vardır. Bunlar;

1. Bataryayı ve dolayısıyla batarya hücrelerini korumak
2. Bataryanın ömrünü uzatmak
3. Bataryayı her an kullanıma hazır tutmak

Batarya yönetim sistemleri arasında farklılıklar olsa da temel anlamda aşağıdaki şekilde gösterilen donanımsal yapıya sahiptirler.



Şekil 3.16. Batarya yönetim sisteminin donanımsal yapısı

Batarya yönetim sistemi; algılayıcılar, analog – dijital çeviriciler ve anahtarlama elemanlarını içermektedir. Bataryadan; sıcaklık, hücre gerilimleri, batarya gerilimi ve akım gibi analog büyüklüklerin alınmasında algılayıcılar kullanılmaktadır. Ayrıca batarya yönetim sisteminde bataryanın soğutulmasıyla ilgili varsa fan gibi alt sistem

Batarya yönetim sistemi denetleyicisinde koşturulan yazılım her yazılımda olduğu gibi bir başlangıç ve sonlandırma komutu kullanılmaktadır. Elektrikli aracın başlatılmasıyla beraber yazılım öncelikle hata denetimi yapmaktadır. Karşılaşılabilecek hataların başında istenen gerilim, akım değerlerine sahip olmamak, kaçak akımın olması veya sistemi durdurma ile ilgili bir komutun alınması sayılabilir. Yapılan denetim sonucu bir hata ile karşılaşılması durumunda batarya ile gerilim hattı arasındaki bağlantı bir röle vasıtasıyla kesilir. Yapılan bu ilk hata denetiminden başarı ile geçilebiliyor ise bir sonraki adımda haberleşme testi yapılır. Böylelikle diğer sistem elemanları ve araç denetleyicisiyle haberleşmede problem olup olmadığı test edilmiş olur. Bu testten sonra güç testi yapılır ve bataryadan elektrik motorunu tahrik edebilecek bir gücün çekilebileceği ile ilgili geri bildirim alınmış olur. Güç testinden sonra hücrelerin gerilim seviyeleri karşılaştırılır. Hücreler arasındaki gerilim farklılıkları müsaade edilen maksimum değerden küçükse döngü devam ettirilir. Son olarak batarya için en önemli hata kaynaklarından biri olan sıcaklık ile ilgili denetimler yapılır. Batarya sıcaklığının yüksek olması durumunda fan veya diğer soğutma sistemleri devreye girer ve uygun sıcaklığa düşürülene kadar batarya soğutulur. Son olarak ise SOC seviyesi tespit edilir ve araç denetleyicisine ilgili bilgi aktarılır. Bu bilginin takip edilmesi elektrikli araçlar için çok önemlidir. Bunun sebebi ise içten yanmalı motora sahip araçlardaki yakıt seviyesi bilgisine eşdeğer olan SOC bilgisinin, araç kullanıcısına en doğru şekilde iletilmesi ve araç denetleyicisinin menzil hesaplamasını en az hata ile yapabilmesi gerekmektedir. Bu testler sonucunda bir hatanın varlığı tespit edilmesi durumunda daha önce de belirtildiği üzere batarya ile gerilim hattı arasındaki bağlantı kesilir ve hata raporu oluşturulur.

Bu tez çalışmasında batarya yönetim sisteminin donanımsal ve yazılımsal özellikleri göz önünde bulundurularak, batarya modeli tasarlanmış ve gerekli benzetimler yapılmıştır. Bütün bu yapısal özelliklerinin yanı sıra aşağıda açıklanan denetleme fonksiyonları da titizlikle ele alınmıştır.

3.3.1. Performans denetimi fonksiyonu

Performans denetimi fonksiyonu, bataryanın, batarya hücrelerinin, batarya yönetiminin ve denetlemenin belirli seviyelerindeki parametreleri takip eder. Performans denetiminin ölçme fonksiyonundan farkı belirlenmiş limitler aşıldığında ortaya çıkar çünkü limitlerin ne kadar aşıldığı da önem arz eder. Ayrıca performans denetimi fonksiyonu çalışırken bazı zaman gecikmeleriyle çalışır, bunun nedeni, yanlış alarm veya hata kodu türetilmemesi gerekir. Bu fonksiyon dâhilinde genellikle sıcaklık, gerilim, basınç, akım, soğutucu akışkanın sıcaklığı ve sızıntı akımı görüntülenebilir. Performans denetimi genellikle sürekli çalışan bir fonksiyondur fakat bazı durumlarda karmaşıklığı azaltmak, güç tüketimini düşürmek veya yüksek sistem maliyet nedeniyle belirli periyotlarla çalışacak şekilde de seçilebilir. Ayrıca, performans denetimi fonksiyonu ile bataryanın ve batarya hücrelerinin güvenli çalışma limitlerinde çalışmasının denetimini de yapabilir. Bataryanın tümünü etkileyen sıcaklık parametresi örnek olarak verilebilir. Bir batarya sistemi için kritik sıcaklığın 55°C olduğunu varsayalım. Bu durumda önleyici bir eyleme geçmek için sıcaklığın tam olarak kaç derece olduğu değil (örneğin $\pm 3^{\circ}\text{C}$ tolerans ile) limitin aşılp aşılmadığıdır.

3.3.2. Ölçme fonksiyonu

Ölçme fonksiyonu, gözlemlenebilir batarya, batarya hücresi veya yönetim sistemi parametrelerinin niceliksel olarak belirlenmesi için kullanılır. Ölçülen verilerin yapısına bağlı olarak ölçme fonksiyonu ile ilgili olarak bazı veri çözünürlüğü ve doğruluğu için uygun seçimler yapılır. Bu seçimlerde batarya yönetim sisteminin fazla karmaşık olmaması ve maliyetinin düşük tutulmasına dikkat edilir. Batarya yönetim sisteminde ölçümü yapılan en önemli parametreler arasında gerilim, sıcaklık ve akım gösterilebilse de bazı farklı uygulamalarda batarya hücresinin basıncı dahil olmak üzere birçok farklı parametrenin de ölçümü yapılabilir. Gerilim ve sıcaklık ölçümleri hücre seviyesinde veya batarya grubu seviyesinde yapılabilirdiği gibi her iki seviyede de yapıldığı çözümler mevcuttur. Akım ise genelde batarya seviyesinde ölçülür. Bazı ölçümler anlık yapılır ve bir hesaplama fonksiyonu yardımıyla hücre empedansı gibi bilgiler de elde edilebilir. Ölçüm çözünürlüğü ve doğruluğu batarya kimyasının ve uygulamanın gereksinimlerine

göre değişkenlik gösterebilir. Örneğin, bir Hibrit elektrikli araç uygulamasında batarya hiçbir zaman tamamen şarj veya deşarj edilmiş olamaz. Genellikle %30 ila %80 SOC seviyelerinde çalışma söz konusudur. Böyle bir çalışma aralığında çoğu batarya kimyası iyi bir doğrusal karakteristik ortaya koyar. Dolayısıyla tam olarak SOC'nin belirlenmesi için milivoltlar mertebesinde ölçüm yapmak gerekir. Öte yandan sadece batarya ile çalışan elektrikli araçlarda ise batarya deşarj alt limitlerinde ve şarj üst limitlerinde çalışabilir. Bu durumda SOC ve gerilim karakteristiği daha belirgindir. Bu neden genel sistem karmaşıklığını ve maliyetini düşürmek adına daha az hassas olan bir lme fonksiyonu kullanılır.

3.3.3. Hesaplama fonksiyonu

Hesaplama fonksiyonu lme ile elde edilen verilerin işlenerek batarya hcreti, batarya ve yönetim sistemi ile ilgili gerekli bilgilerin elde edilmesi amacıyla kullanılır. Hesaplamalarda bir veya birden fazla ölçülebilen niceliksel değerler kullanılmakla beraber zaman ve hücre performans parametreleri gibi doğrudan ölçülmeyen değerler de kullanılabilir. Hesaplamalar gerçek zamanlı yapılabilir veya daha sonra kullanılmak üzere saklanan verilerden de yararlanarak yapılabilir. Hesaplama fonksiyonunu yerine getirecek elemanlar entegre bir şekilde lme donanımlarıyla beraber kullanılabilse de bazı uygulamalarda ayrı bir birim olarak tasarlanabilir. Batarya yönetim sistemi gereksinimlerine bağlı olarak hesaplama fonksiyonunun çözünürlülüğü farklılık gösterebilir. Empedansın hesaplanması için gerekli olan senkronize gerilim ve akım değerlerini elde etmek için karmaşık lme donanımlarına ihtiyaç olabilir. Dolayısıyla batarya yönetim sistemi için gerekli olacak parametreler belirlendikten sonra bu parametrelerin ölçümünü yapacak ve sonrasında hesaplayacak donanımsal yapılar da bir bütünlük dâhilinde seçilir. SOC, batarya g durumu (SOP) ve batarya genel durumu (SOH) gibi parametreler gelişmiş hesaplama yöntemlerine ihtiyaç duyar. Bunun nedeni ise bu tür parametrelerin hesaplanmasında anlık değerlere ihtiyaç duyulduğu kadar daha önceden kaydedilmiş geçmiş verilere de ihtiyaç duyulmasıdır.

3.3.4. Haberleşme fonksiyonu

Haberleşme fonksiyonu performans denetimi, ölçme ve hesaplama gibi fonksiyonlardan alınan bilgilerin diğer alt sistemlere veya aygıtlara anlamlı bir şekilde iletilmesi amacıyla kullanılır. Bu fonksiyon genelde karmaşık haberleşme protokollerini, veri hatlarını ve veri setlerini kullanır. Bu farklı yapılara örnek olarak seri çevresel arayüz (SPI) veri hattı, entegre devreler (I^2C) gösterilebilir. Otomobil sektöründe ise daha standart haline gelmiş protokoller kullanılmaktadır. Bunlar arasında öne çıkanlar ise denetleyici alan ağı (CAN – SAEJ1939, ISO 11898) ve daha yavaş bir protokol olan yerel bağlantı ağı (LIN) olarak belirtilebilir. İletilen bilgi, limit aşımı gibi bir performans denetimi çıktısı, batarya gerilimi gibi bir ölçme fonksiyonu çıktısı veya SOC gibi bir hesaplama fonksiyonu çıktısı ve hatta bu bilgilerin bir kombinasyonu da olabilir. Genellikle bu bilgiler batarya yönetim sisteminde mevcut olan birçok veri hattından geçerek iletilmesi gereken noktaya ulaştırılır.

3.3.5. Denetleme fonksiyonu

Denetleme fonksiyonu temel olarak batarya yönetim sisteminin kritik batarya parametrelerinin doğrudan denetlenmesi için kullanılır. Bu parametrelere örnek olarak şarj veya deşarj esnasında akımın kesilmesi veya termal yönetim sistemini tetiklemesi gösterilebilir. Bu fonksiyon genellikle batarya sisteminden ayrı tutulur çünkü batarya grubu ile doğrudan ilgili olmayan faktörlerin de verilecek kararlarda etkili olması istenir. Çoğu araç uygulamasında batarya yönetim sistemi doğrudan denetleme yapmaz ve bunu diğer bir alt sistemin denetimine bırakır. Örneğin, bir kısa devre durumu söz konusu olduğunda aracın durdurulması gibi. Gelişmiş elektrikli araçlarda denetim kararları genelde batarya yönetim sistemi tarafından bilinmeyen ve takip edilmeyen harici parametreler göz önünde bulundurularak alınır. Bu duruma örnek olarak rejeneratif frenleme gösterilebilir. Bazı araçlarda frenleme esnasında elektrik motorunun jeneratör gibi çalışıp batarya hücrelerini şarj etmesi mümkündür. Aynı zamanda bu özelliğin aracın frenlemesinde klasik fren mekanizmasına yardım etmesi durumu da söz konusu olabilir çünkü motor istenen yönde elektromotor kuvvet uygulayabilir. Normal şartlar altında batarya tamamen şarj edilmiş ise rejeneratif frenlemenin sağlayacağı şarj

akımı kesilir. Fakat acil bir durumda aracın en üst seviyeli denetleyicisi elektrik motorunun uygulayacağı zıt yönlü kuvvete yolcu güvenliği açısından ihtiyacı olabilir. Bu durumda da bataryaya zarar verme pahasına rejeneratif frenlemeye devam edilebilir. Sonuç olarak böylesi bir ihtimalde batarya yönetim sisteminin takip ettiği parametreler haricindeki parametreler denetleme kararlarının alınmasında etkili olur. Bazı küçük elektrikli araçlarda ise elle tutulur tek denetleyici alt sistem batarya yönetim sistemi olabilir. Bu durumda da batarya yönetim sistemi aracın en üst seviyeli denetleyicisi olarak denetleme kararlarını alır. Denetleme de kendi arasında fonksiyonlara ayrışabilir. Örneğin performans takip fonksiyonu ölçme ve hesaplama fonksiyonlarından bağımsız bir denetleme algoritmasına sahip olabilir. Bir batarya hücresi performans takip fonksiyonu sadece hücrenin güvenli limitler dahilinde çalışmasını denetlerken öte yandan hesaplama fonksiyonuna sahip bir ölçme fonksiyonu yine aynı parametreleri kullanarak bazı nümerik ölçümler yapıyor olabilir. Ayrıca bu iki alt sistemin denetleyici stratejilerinde de farklı yaklaşımlar söz konusu olabilir. Bir fonksiyon bazı parametre değerlerinin belirgin bir şekilde artmasında veya azalmasında devreye girerken diğer bir fonksiyon sadece aç-kapa denetleme işlevi görebilir.

3.3.6. Dengeleme fonksiyonu

Elektrikli araç bataryalarında gerekli enerjiyi elde edebilmek amacıyla çok sayıda hücre kullanılır. Hücrelerin seri bağlanması ile bataryanın gerilim seviyesi artırılırken, bu seri dizilerin paralel bağlanması yoluyla da bataryanın toplam kapasite artırılmış olunur. Üretim teknolojilerindeki kısıtlar nedeniyle hücreler arasında farklar oluşur. Bu fark temelde iç direnç ve toplam kapasitedeki farklar şeklindedir. Bataryanın kullanımı ile beraber hücreler arası farklar da giderek artar. Bunun sonucu olarak farklı iç direnç ve kapasiteye sahip zayıf hücreler her şarj ve deşarj çevrimi sonucunda aşırı şarj edilmesi veya aşırı deşarj edilmesi nedeniyle fiziken erken yaşlanır. Bu aşırı yaşlanmanın sonucu hücrenin kalıcı olarak hasar görmesi dahi söz konusu olabilir. Lityum-iyon bataryalardaki hücreler arası farkların kaynağı, hücrelerin iç dirençlerindeki ya da doluluk oranlarındaki sapmalardır. Hücreler arasındaki dengesizliği gidermek ve hücre ömrünü ve dolayısıyla da batarya ömrünü artırmak için hücre dengeleme sistemi kullanılır. Genelde batarya yönetim sistemine bağlı olarak çalışan hücre dengeleme

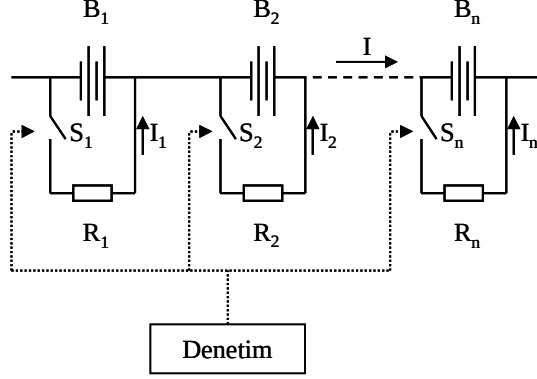
sistemi aynı zamanda hücre koruma görevini de görür. En basit şekliyle, hücre dengeleme sistemi yoluyla yüksek doluluk durumuna erken ulaşan zayıf hücrelerin daha fazla şarj olması engellenir ve diğer hücreler dolana kadar bekletilir. Ters durumda, düşük doluluk durumu değerine sahip bir hücre diğer hücrelerden, deşarj alt eşik değerine daha önce gelerek yüksek seviyede doluluk değerine sahip hücrelerin boşaltılmasına engel olacaktır. Özellikle li-iyon bataryalarda hücre dengeleme yoluyla hücreler arası doluluk durumu farklarının belirli bir seviyenin üzerinde veya altında tutulması gerekir. Bunun sağlanması amacıyla gerilim dengelemesine bağlı bir strateji uygulanabilir. Çeşitli stratejiler arasında doluluk durumunu temel alan stratejiler yaygın olarak kullanılmaktadır. Batarya denetim birimi hücre kapasitesine bağlı olarak tüm hücreler için doluluk durumu takibi ile dengeleme yapabildiği gibi sadece seçilen hücrelerin doluluk durumu değerlerine bağlı bir strateji de kullanılabilir. Örneğin, bataryadaki tüm hücre doluluk değerleri arasından maksimum, minimum ve ortalama doluluk durumu değerleri ele alınarak, istatistikî bir denetleme algoritması da geliştirebilir. Uygulamalarda pasif dengeleme ve aktif dengeleme olmak üzere iki tür dengeleme yöntemi kullanılır.

Bu tez çalışmasında modellenen sistemde pasif dengeleme stratejisi seçilmiştir. Bunun temel nedeni pasif dengeleme sisteminin aktif dengeleme sistemine oranla daha basit ve düşük maliyetli olmasıdır. Sonraki bölümlerde aktif ve pasif dengeleme yöntemleri ile ilgili detaylar verilmiştir.

3.3.6.1. Pasif dengeleme

Genelde bu yöntem, batarya içinde yer alan hücrelerde şarj sırasında oluşan fazla enerjinin seri bağlı dengeleme dirençleri üzerinden boşaltılması şeklinde uygulanır. Pasif dengeleme stratejisinin incelendiği bu tez çalışmasında dengeleme dirençleri batarya yönetim sisteminin ASIC modüllerine entegredir. Şekil 3.18.'de bu yöntemin basit bir şeması verilmiştir. Bu yöntem basitliği ve ucuzluğu nedeni ile tercih edilmektedir. Bu yöntemde yüksek gerilime sahip hücrelere ait dengeleme dirençleri kısa devre yaptırılarak fazla olan enerji dirençler üzerinde ısı enerjisine dönüştürülerek boşaltılır. Bu yöntemde, dengeleme dirençleri tranzistörlerle anahtarlanarak devreye

girerler. Bu yöntemin verimliliği doğrudan dengeleme direnci ve denetim algoritmasına bağlıdır.



Şekil 3.18. Pasif dengeleme devresi

Fazla enerjinin ısı enerjisine dönüşmesinden dolayı bu yöntemde yüksek enerji kaybı gibi önemli bir dezavantaj söz konusudur. Bununla beraber dengeleme devresinin basitliği ve düşük maliyetli olması nedeniyle elektrikli araç uygulamalarında tercih edilen bir yöntemdir.

Bu tez çalışmasında modellenen sistemde kullanılan ASIC modülündeki dengeleme direncinin değeri 330Ω 'dur. Hücre geriliminin minimum 2,7V olduğu bilindiğine göre, dengeleme akımı I ;

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.6)$$

$$I = \frac{2,7}{330} \cong 8mA \quad (3.7)$$

olarak elde edilmektedir. Dolayısıyla hücrelerin dengelenmesi amacıyla fazla gerilimin dengeleme direnci ile ısı enerjisine dönüştürülmesiyle söz konusu olan kayıp aşağıdaki gibi Joule ve Ohm yasalarından yararlanarak hesaplanmaktadır. Joule yasasından,

$$P = I.V \quad (3.8)$$

olduğuna göre, gerilim değeri (V) de Ohm yasasından,

$$V = I.R \quad (3.9)$$

olmak üzere,

$$P = I^2 .R \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (3.10)'da dengeleme akımı ve dengeleme direnci değerleri yerlerine koyulursa,

$$P = (8.10^{-3})^2 .330 \cong 21mW \quad (3.11)$$

elde edilir. Dolayısıyla dengeleme direncinin devreye girmesiyle beraber tek bir hücrede 21mW'lık güç kaybı söz konusu olmaktadır.

3.3.6.2. Aktif dengeleme

Çeşitli aktif dengeleme yöntemleri mevcut olmakla beraber bu yöntemin temeli fazla enerjiye sahip bir hücreden enerji eksiği olan bir hücreye enerjinin transfer edilmesi esasına dayanır. Genelde “gerilim taşıma” ve “enerji dönüşümü” olmak üzere iki farklı aktif dengeleme yöntemi kullanılır. Gerilim taşıma yönteminde, seçilen hücreden enerji alınır, depolanır ve başka bir hücreye iletilir. En çok tercih edilen gerilim taşıma yöntemi “hareketli kapasitör” yöntemidir. Bu yöntemde kapasitör yüksek gerilim seviyesindeki hücre ile doldurulur ve en düşük gerilim seviyesindeki hücreye boşaltılır. Bu yöntemde zaman kaybı büyüktür çünkü yüksek gerilimdeki hücre bataryanın bir ucunda, düşük gerilim seviyesindeki hücre bir uçta olabilir. Diğer aktif dengeleme yöntemi enerji dönüşümü yöntemi idi. Bu yöntemde bir grup hücreden alınan enerji diğer bir grup hücreye indüktör veya transformatörler sayesinde iletilir. Hareketli kapasitör yöntemine benzeyen bu yöntemde dengeleme işlemi hızlı bir şekilde yapılabilir. Bu yöntemin yapısının karmaşıklığı ve maliyetinin yüksekliğinden kaynaklanan dezavantajları mevcuttur. Li-iyon bataryaya sahip elektrikli araçlarda

batarya enerji verimliliği ve batarya ömrü uzatılması için pasif veya aktif dengeleme yöntemlerinden herhangi birisinin mutlaka kullanılması gerekir.

3.4. Li-iyon Batarya Modeli

Bu tez çalışmasında li-iyon bataryanın modellenmesi ve modellenen sistem üzerinde benzetimlerin yapılarak özellikle batarya yönetim sistemi ve özel olarak da dengeleme sistemi denetim stratejilerinin ortaya konması hedeflenmiştir. Tez çalışmasının birçok aşamasında, çalışmanın yönünü değiştirebilecek birçok tercih yapılmıştır. Bu tercihlerin en önemlisi modelleme ve benzetim çalışmalarının yapılacağı yazılım ortamının seçilmesidir. MATLAB / Simulink yazılımları kullanılmış ve dinamik modelleme çalışmalarında hem zaman açısından hem de modüler yapısı ile tercih edilmiştir. Tasarlanan modelin daha sonra başka uygulamalarla uyumlu olabilmesi ve elde olan donanım altyapısını en verimli şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Öte yandan elektriksel eşdeğer devre modelleme yaklaşımının benimsenmesi halinde veri tablolarının yüksek performansla kullanılabileceği de göz önünde bulundurulmuştur. Bütün bunların yanında birçok bilim adamı, mühendis ve uygulama geliştiren teknik çalışanların bu yazılımı kullanması ve karşılaşılabilecek problemlerde hızlı bir çözüm bulma imkânı da MATLAB / Simulink yazılımının tercih edilmesinde etkili olmuştur.

3.4.1. Li-iyon batarya modelleme teknikleri

Literatürde birçok farklı modelleme tekniği mevcuttur. Bu modelleme teknikleri arasında en yaygın kullanılanları ise batarya hücresinin modellenmesi ve daha sonrasında da gerekli parametre ayarlarının yapılarak bütün batarya grubunu temsil edecek şekilde genişletilmesidir. Bu teknikte bütün hücrelerin aynı dinamik davranış göstereceği varsayılır. Hâlbuki hücrelerin üretimi esnasında oluşabilecek küçük farklılıklar, hücre iç dirençlerinin ve kimyasının değişmesine neden olur. Bunun sonucunda farklı termal karakteristikler, farklı yaşlanma hızları ve farklı enerji kapasitesi düşüm oranları ortaya çıkar. Özellikle bu çalışmada incelenmiş hücre dengeleme stratejileri gibi denetleyici tabanlı çalışmalar ve benzetimler yapılacaksa hücrelerin tek tek dinamik parametrelerini değiştirilebilmesi istenen bir özelliktir. Diğer

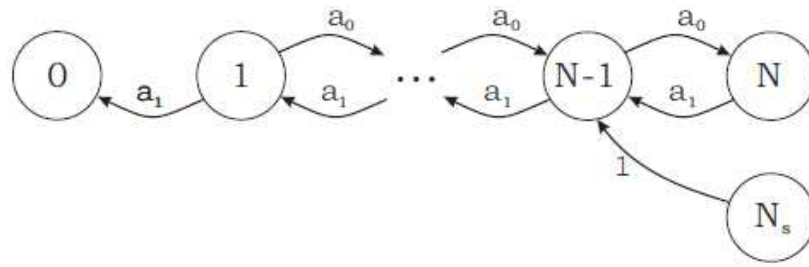
bir teknik ise hızlı sonuçların alınmasının istenildiği durumlarda tercih edilen kara-kutu modellemesidir. Bu yaklaşımda modellenecek batarya sistemine ait girişler ve yapılan deneyler sonucu elde edilen çıkışlar yüksek seviyeli yazılımla bir transfer fonksiyonuna dönüştürülür. Elde edilen bu transfer fonksiyonu ile de istenen benzetimler sistem bazında yapılabilir. Tekli veya çoklu hücre yapısında bataryaların modellenmesinde genel olarak elektrokimyasal, elektriksel eşdeğer devre ve ileri seviyeli stokastik yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin detayları ilgili bölümlerde verilmekle beraber elektriksel eşdeğer devre modeli bu çalışmada tercih edilmiştir.

3.4.1.1. Elektrokimyasal modeller

Elektrokimyasal modeller hücre içindeki kimyasal reaksiyonları temel alan modellerdir. Batarya prosesini çok detaylı olarak ele alır. Dolayısıyla da en doğru sonuç veren model tipi elektrokimyasal modellerdir. Fakat çok fazla detay olması modeli karmaşıktır ve daha sonradan ayarlama yapılmasını zorlaştırır. Doyle, Fuller ve Newman li-iyon hücreler için elektrokimyasal bir model geliştirmişlerdir (Jongerden ve Haverkort 2009). Bu modelde altı çift lineer olmayan diferansiyel denklem mevcuttur. Bu denklemlerin çözülmesiyle zamana bağlı olarak gerilim ve akım değerleri, elektrolit potansiyeli, elektrot fazları, tuz yoğunlukları, reaksiyon oranları ve elektrolitteki akım yoğunluğu zamanın ve hücredeki yerinin fonksiyonu olarak alınmaktadır. Yüksek seviyeli yazılım programları ile söz konusu model kullanılarak benzetimler yapabilmektedir. Kullanıcının belirlediği yük profiline göre bütün batarya parametrelerinin nasıl değiştiği gözlemlenebilmektedir. Elde edilen veri ile bataryanın ömrünü hesaplamak mümkündür. Kullanıcının yük profilini belirlemesi tek başına yeterli olmayıp, profille beraber yaklaşık 50 parametreyi daha seçmesi gerekmektedir. Elektrot kalınlığı, elektrolitteki tuz yoğunluğunun başlangıç değeri ve ısı kapasitesi gibi parametreler belirlenmek durumundadır. Bütün bu parametrelerin belirlenebilmesi için batarya elektrokimyası ile ilgili çok detaylı bilgiye ihtiyaç duyulur. Bu kadar detaylı parametre girişi yapıldığı için doğal olarak çok net sonuçlar elde edilebilir. Fakat ilgili parametrelerin elde edilmesinin zorluğu ve modelleme açısından karmaşıklık getirdiğinden bu yöntem, batarya üreticileri tarafından tercih edilirken, araç üreticileri tarafından tercih edilmez.

3.4.1.2. Stokastik modeller

Öncü stokastik modeller Chiasserini ve Rao tarafından geliştirilmiştir. Modelleri ayrık-zamanlı Markov zincirlerine dayanmaktadır (Chiasserini ve Rao 2001). En basit ayrık-zamanlı modellerinde batarya 0'dan N 'e kadar numaralandırılmış ve $N + 1$ duruma sahip Markov zinciri vardır. Şekil 3.18.'te bu zincir verilmiştir. Durumların sayısı bataryadaki şarj birimlerinin sayısına denk gelmektedir. Bir şarj birimi ise tek bir paketi iletmek için gerekli olan enerji miktarına bağlıdır. N sayısı da sürekli kullanımda erişilebilen şarj birimi sayıdır. Bu modelde her bir zaman basamağı için şarj biriminin $a_1 = q$ olasılığı ile tüketildiği ve $a_0 = 1 - q$ olasılığı ile geri kazanıldığı kabul edilmiştir. Durum 0'a veya T kadar şarj birimine ulaşıldığında bataryanın boş olduğu varsayılmıştır. T sayısı bataryanın teorik kapasitedir ($T > N$).

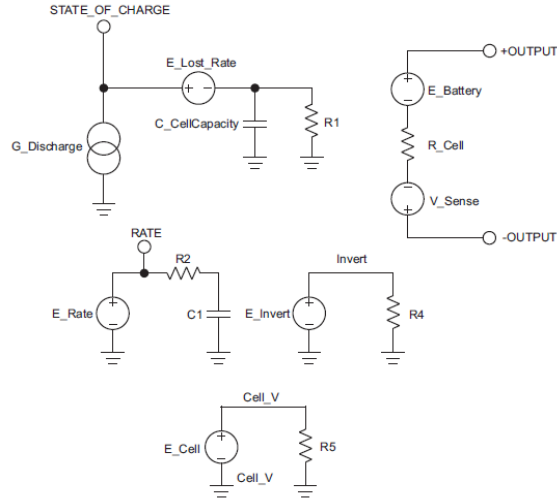


Şekil 3.19. Basit Markov zinciri batarya modeli

Li-iyon bataryayı modelleyebilmek için N yaklaşık olarak 2×10^6 olarak seçilmiş ve 3 faz kullanılmıştır. Bu tip bir Markov zinciri 6×10^6 adet durum ortaya koyar. Sonuç olarak bu ve buna benzer stokastik yaklaşımlar modelledikleri sistem hakkında fikir verebilir fakat çok yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilemez.

3.4.1.3. Elektriksel eşdeğer devre modelleri

Elektriksel eşdeğer devre modelleri kullanılarak nikel-kadmiyum, kurşun-asit ve alkalin bataryalar modellenmiştir. Şekil 3.20.'de farklı tipteki elektrik eşdeğer devreler verilmiştir.



Şekil 3.20. Farklı elektriksel eşdeğer devre hücre modelleri

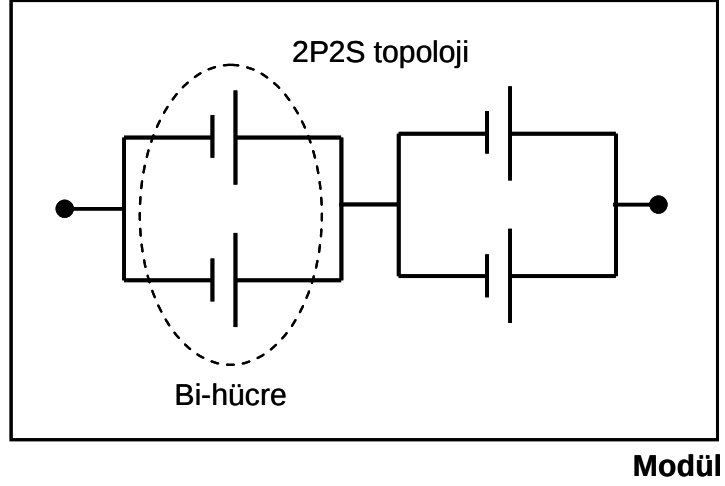
Bütün bu farklı tip bataryalar için kullanılan modellerde ortak noktalar mevcuttur. Bunlar;

- Batarya kapasitesi devredeki bir kapasitör ile temsil edilir.
- Batarya kapasitesini deşarj edecek bir yük direnci kullanılır.
- Gerilim ve SOC ile oluşturulmuş veri tabloları kullanılır.
- Bataryanın direncini temsil eden bir direnç kullanılır.

Çalışılacak hücre tipinin karakteristik özelliklerini modele yansıtmak için birkaç parametre değişikliğinin yapılması yeterli olmaktadır. Elektrokimyasal modellerden daha basit olsalar da yine de gerekli ayarların yapılması zaman alabilir. Bunun nedeni de bataryanın elektriksel ve kimyasal özelliklerini ortaya koyacak veri tablolarını oluşturmak için gerekli olan deneysel verilerin elde edilmesidir. Bu zorluğa rağmen batarya yönetim sisteminin geliştirilmesinde, denetleyici ve denetim stratejileri tasarımında elektriksel eşdeğer devre yöntemi, modelleme açısından yeterli doğruluk seviyesindedir ve elektrokimyasal modelleme tekniğine oranla çok daha kısa sürede tasarlanır ve model gerçekleştirilir. Dolayısıyla bataryanın elektrikli araca uyarlandığı çoğu çalışmada olduğu gibi getirdiği birçok avantaj nedeniyle tercih edilmektedir.

3.4.2. Li-iyon batarya modelinin tasarlanması

Bu bölümde, tez konusu li-iyon batarya modüllerinden teşkil edilen bir batarya grubunun modellenmesi ele alınmıştır. Batarya modelinin tasarlanmasında elektriksel eşdeğer devre yöntemi tercih edilmiştir. Elektriksel eşdeğer devre yaklaşımının tercih edilmesindeki en önemli neden, bu yöntemin elektrokimyasal ve stokastik yöntemlere göre batarya yönetim sistemi denetleme stratejilerinin geliştirilmesi için daha uygun olmasıdır. Modelin basit, kolay parametrize edilebilir olması sayesinde birçok benzetim hızlı ve kolay bir şekilde yapılabilir. Modelin tasarlanma amacı genel olarak batarya yönetim stratejilerinin özel olarak da dengeleme stratejilerinin geliştirilmesi ve bu stratejilerin bilgisayar ortamında farklı sürüş profili senaryolarında benzetimlerinin yapılmasıdır. Bu benzetim sonuçları çerçevesinde bir elektrikli taşıt aracının li-iyon bataryası ile ilgili çok önemli denetleyici stratejilerine ve algoritmalarına karar verilebilecektir. Modelleme tekniği açısından temel olarak elektriksel eşdeğer yaklaşımı benimsenmiştir. Bu tercihin yapılmasının sebepleri arasında elektriksel eşdeğer yaklaşımının, elektrokimyasal modelleme yaklaşımına oranla yüksek dereceli diferansiyel denklemler içermemesi ve çok daha az sayıda parametre girişine ihtiyaç duyulmasıdır. Kısacası elektriksel eşdeğer devre yaklaşımının daha az karmaşık olmasıdır. Bu nedenlerden ötürü de otomotivdeki denetim uygulamalarında tercih edilmektedir. Ele alınan modelde batarya hücre temelli tasarlanmıştır. Böylece ilgili batarya yönetim sistemi stratejilerini geliştirirken bir veya daha çok sayıdaki hücrenin parametreleri değiştirilerek hücreler arası farklılıkların gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere batarya modülünde dört hücre vardır. Bu dört hücre; ikisi paralel, paralel çiftler de seri olacak şekilde bağlanır. Modelin esnekliğini artırmak amacıyla bi-hücre olarak adlandırılan modül içindeki paralel hücreler dikkate alınarak model tasarlanmıştır. Bu paralel hücreler birbirlerine seri olarak bağlandığında batarya grubu teşkil edilmektedir. Söz konusu bi-hücre yapısı Şekil 3.21.'de gösterilmiştir. Bilgisayar altyapısı müsaade ettiği ölçüde hücre sayısı artırılabilir. Fakat bu artışla birlikte işlem ve hesaplama süreleri uzayacağından bi-hücre sayısı çok artırılamaz. Tez çalışmasında geliştirilen batarya modeli, batarya yönetim sistemi denetleme stratejilerini geliştirmeye yönelik olduğundan dört bi-hücre ile benzetimler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.21. Bi-hücre yapısı

Kullanılacak parametre sayısı mümkün olabildiğince az tutulmaya çalışılmıştır. Böylece modelin kalibrasyonu için çok sayıda deneme yapılmasına ihtiyaç bırakılmamıştır.

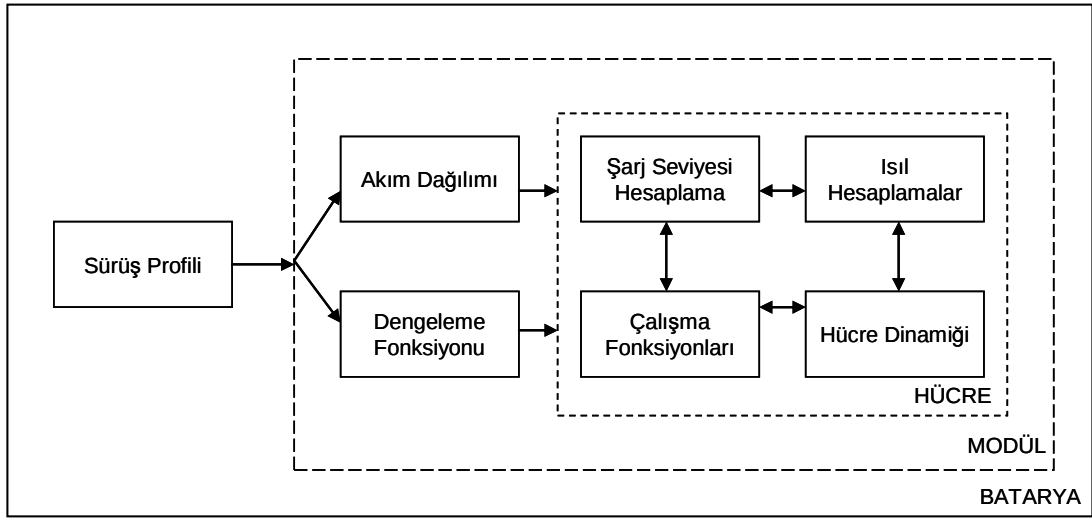
3.4.2.1. Batarya modeli

Batarya modelinin oluşturulmasında daha öncede belirtildiği üzere MATLAB / Simulink yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım sayesinde farklı model alt sistemleri başarılı bir şekilde birbirlerine entegre edilebilmiştir. Karmaşıklığı azaltmak ve modelin daha kolay yönetilmesini sağlamak amacıyla birçok alt sistem modeli kullanılmıştır. İlgili bölümlerde daha detaylı açıklanan bu alt sistemler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Sürüş profili alt sistemi
- Akım dağılımı alt sistemi
- Dengeleme fonksiyonu alt sistemi
- Şarj seviyesi hesaplama alt sistemi
- Çalışma fonksiyonları alt sistemi
- Isıl hesaplamalar alt sistemi
- Hücre dinamiği alt sistemi

Sürüş profili alt sisteminde bataryanın hangi rejimde şarj ve deşarj edildiği tanımlanmıştır. Kullanılan değerler farklı sürüş senaryoları için değiştirilebilmekte ve böylece farklı benzetimlerin yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Akım dağılımı alt

sisteminde her hücre için hücre dirençlerine bağlı olarak akımın kollara ayrılması durumu modellenmiştir. Dengeleme fonksiyonu alt sisteminde ise dengeleme ile ilgili fonksiyonların tanımlandığı model bloğudur. Bu fonksiyonlar batarya modülünü temsil ederken, hücre ve hücre içinde gerçekleşen fiziksel olayların modellemek amacıyla şarj seviyesi, çalışma fonksiyonları, ısı hesaplamalar ve hücre dinamiği alt sistemleri tasarlanmıştır. Aşağıdaki şekilde batarya modelinin genel yapısı verilmiştir.



Şekil 3.22. Batarya modeli genel yapısı

Batarya modelindeki alt sistemlerde hesaplanan ve/veya kullanılan dinamik parametreler haricinde MATLAB ortamında girişi yapılan değişken parametreler de tanımlanmıştır. Burada her hücre modelindeki bazı parametrelerin birbirlerinden bağımsızca değiştirilebilir olması hedeflenmiştir. Böylelikle hücreler arasında farklılıklar oluşturulabilecek ve gerçek bir batarya grubunu temsil edebilme durumu söz konusu olabilecektir. Örneğin hücrelerin tümünün aynı olması durumunda dengeleme stratejisi test edilemez. Kullanıcı tarafından değiştirilebilecek parametreler aşağıda verilmiştir;

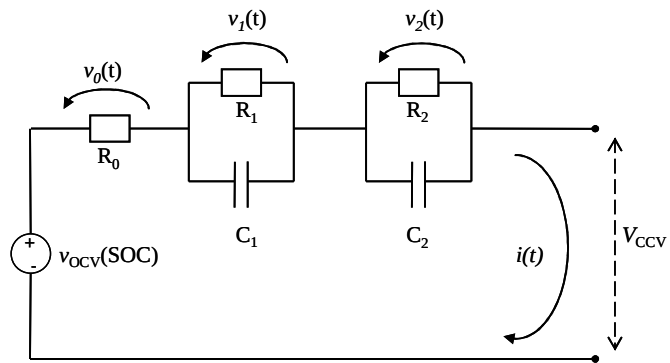
- Başlangıç SOC (0 ila 1 arasında - %0 ila %100 arasını temsilen)
- Maksimum kapasite (Ah)
- Başlangıç hücre ve ortam sıcaklığı (°C)
- Termik direnç (K/W)
- OCV tablosu (V)

3.4.2.1.1. Hücre dinamiği alt sistemi

Hücre modelinin tasarımında temel olarak hücrenin iki fiziksel özelliği göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar elektriksel yapı ve termal yapıdır. Modelin bu alt sistemleri ile birlikte diğer yardımcı model bloklarıyla batarya modeli teşkil edilmiştir. Diğer yardımcı blok yapıları bataryanın durumu ile ilgili hesaplamaları içerir. (SOC, açık devre gerilimi ve empedanslar). Tez çalışmasında tasarlanan batarya modelinin en büyük ayırt edici özelliği daha önce çalışılmış karmaşık modellerden farklı olarak batarya yönetim sistemi stratejisinin geliştirilmesine yönelik olmasıdır.

Hücre modelinin tasarlanmasında elektriksel eşdeğer devre yönteminin seçilmiştir. Bu yöntemin, göreceli olarak kimyasal modellerden basit olması, yüksek mertebeden diferansiyel denklemler içermemesi, benzetim sürelerinin kısa olması gibi önemli avantajlar sağladığı daha önceki bölümlerde de belirtilmiştir.

Modellemede elektriksel devre olarak 2. mertebeden Randles elektriksel eşdeğer devresi olarak bilinen devre yapısı tercih edilmiştir. Pek çok uygulamada ve literatürde yer alan elektriksel eşdeğer devre çalışmalarında 2. mertebeden Randles eşdeğer devresinin iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Hu ve ark. 2011). Şekil 2.23’de bataryanın bir hücresine ait elektriksel eşdeğer devre şeması verilmiştir.



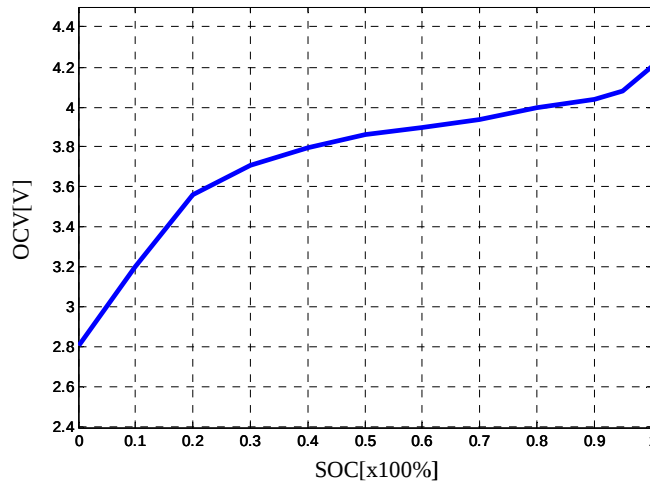
Şekil 3.23. 2.mertebeden Randles elektriksel eşdeğer devresi

MATLAB / Simulink modelinin kurulması elektriksel eşdeğer devrenin matematiksel denklemlerine dayanır. Bu denklemler ise aşağıda olduğu gibi çıkarılmıştır. Şekil 3.23’

da görüldüğü gibi devrede yer alan elemanlar arasında; ideal gerilim kaynağı olarak kabul edilen v_{OCV} , hücrenin iç direncini temsil eden R_0 ve üzerine düşen gerilim $v_0(t)$, şarj transferini temsil eden $R_i C_i$ ($i=1,2$) çiftleri ve bu çiftler üzerine düşen gerilim olan $v_i(t)$ değerleri bulunmaktadır. Devreden akan akım da $i(t)$ olarak gösterilebilir. Şekil 3.23.'e göre hücrenin uçları arasındaki gerilim farkı v_{CCV} aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$v_{CCV}(t) = v_{OCV}(t) - v_0(t) - v_1(t) - v_2(t) \quad (3.12)$$

Bu ifadede yer alan $v_{OCV}(t)$ batarya hücresinin açık devre gerilimi olup değeri bataryanın şarj durumuna (SOC) göre değişmektedir. Bu değişim doğrusal olmayıp, değişim karakteristiğinin daha çok deneysel olarak belirlenmesi gerekir. Deneysel verilere dayanan değişim karakteristiği Şekil 3.24' te verildiği gibidir.



Şekil 3.24. OCV ve SOC arasındaki ilişki

Şekil 3.24'te de görülebileceği gibi hücre şarj durumu %0 iken hücrenin açık devre gerilimi 2,8 V'tur. Buna karşılık %100 şarj durumunda 4,2 V'luk bir gerilim değerine ulaşılır. Nominal hücre gerilimi, hücrenin %50 dolu olduğunda elde edilen gerilimdir ve li-iyon bataryalarda genellikle 3,6V ila 3,8V arasındadır (Vladikova, 2005).

Denklem (3.12.)'de kullanılan $v_0(t)$, $v_1(t)$ ve $v_2(t)$ hücre içi gerilim düşüm değerleri hücre akımı cinsinden Ohm ve Kirchhoff yasalarına göre aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$v_0(t)$ gerilim düşümü, Ohm yasasından,

$$v_0(t) = R_0 \cdot i(t) \quad (3.13)$$

R_1 ve C_1 elemanlarının bağlı bulunduğu paralel kollardaki akım değeri,

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) \quad (3.14)$$

R_1 direnci üzerinden geçen akım değeri,

$$i_1(t) = \frac{v_1(t)}{R_1} \quad (3.15)$$

C_1 kapasitesi üzerinden geçen akım değeri,

$$i_2(t) = C_1 \cdot \frac{dv_1(t)}{dt} \quad (3.16)$$

olur. $i_1(t)$ ve $i_2(t)$ için elde edilen ifadeler Denklem (3.14)' de yerlerine konursa,

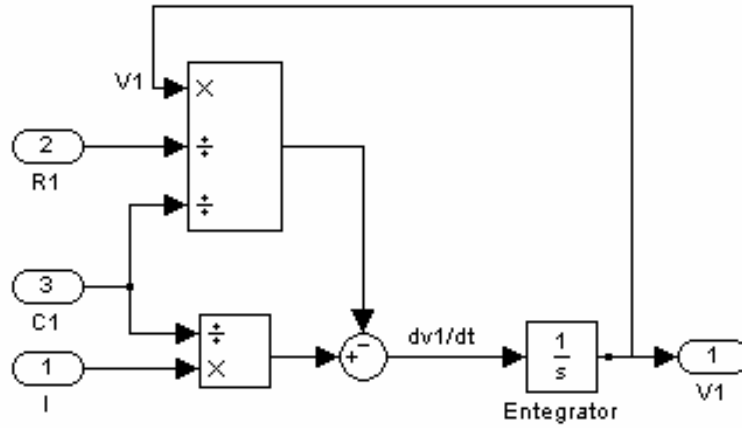
$$i(t) = \frac{v_1(t)}{R_1} + C_1 \cdot \frac{dv_1(t)}{dt} \quad (3.17)$$

(3.17) no'lu diferansiyel denklemi ise çözüme esas olmak üzere aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$\frac{dv_1(t)}{dt} = \frac{1}{C_1} \cdot i(t) - \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \cdot v_1(t) \quad (3.18)$$

Bu denklemin çözümüne esas olan Simulink modeli Şekil 3.25.' te olduğu gibi kurulmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi (3.13)' de yer alan iç direnç R_0 ile (3.15) ve (3.16)'da yer alan R_1 direnci ve C_1 kapasitans değerleri sabit olmayıp sıcaklık ve akımla

değişmektedir. Direnç ve kapasite elemanlarının sıcaklık ve akım parametrelerine bağlı değişimleri doğrusal olmayıp literatürde bu değişimleri tanımlayan çeşitli formüller verilmektedir. Bununla beraber bu formüllerin tam olarak uygun sonuçlar verdiği söylenemez. Çözümüne esas olmak üzere pratik açıdan direnç ve kapasitans değerlerinin değişik parametrelere bağlı değişimi deneysel testler ile elde edilmesi tercih edilir. Bu testlerden elde edilen sonuçlar ise tablolar halinde düzenlenerek modelin çözümünde kullanılır. Bu çalışmada da deneysel testler tercih edilmiş ve deneyden elde edilen sonuçlar tablolar halinde düzenlenmiştir. Buna göre Denklem (3.18)' in Simulink modelinde yer alan direnç ve kapasite değerleri MATLAB ortamında veri tabloları şeklinde sunulmuştur. Şekil 3.25.'de olduğu gibi kurulabilir. Bu modelde R ve C değerleri parametrelere bağlı olarak veri tabloları şeklinde sunulabilir.



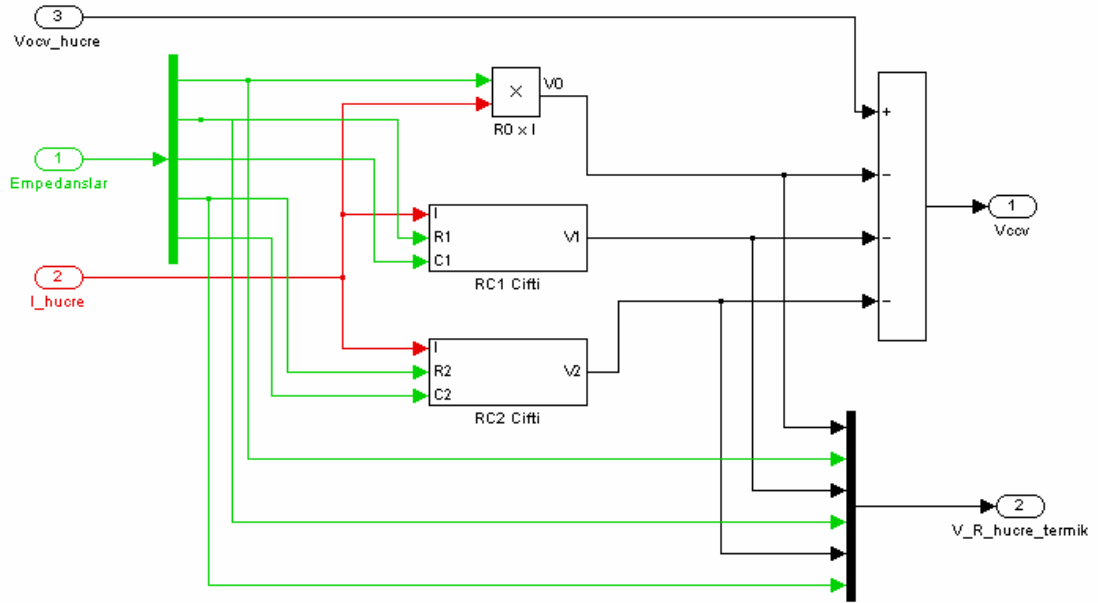
Şekil 3.25. R_1C_1 çifti Simulink modeli

R_1 ve C_1 paralel kolu için elde edilen (3.18) no'lu denklemin benzeri R_2 ve C_2 paralel kolu için de aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\frac{dv_2(t)}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot i(t) - \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \cdot v_2(t) \quad (3.19)$$

(3.19) no'lu denkleme göre kurulacak Simulink modeli ise Şekil 3.25.' deki modelin tamamen benzeri olacaktır.

Sonuç olarak bir hücrenin gerilim değişimi karakteristiğini çözen Simulink modeli Denklem (3.12)'yi sağlayacak biçimde Şekil 3.26.'da olduğu gibi kurulabilir.



Şekil 3.26. Hücre dinamiği Simulink modeli

Bu modelin girişleri arasında V_{ocv_hucre} yani hücre açık devre gerilimi, veri tablolarından elde edilen ve “Empedanslar” olarak adlandırılan R_0 , R_1 , R_2 , C_1 , C_2 değerleri ve giriş akımı olan “I” yer almaktadır. Çıkış olarak da hücrenin kapalı devre gerilimi olan V_{CCV} ve ısı hesaplamalar alt sisteminde kullanılmak üzere $V_R_hucre_termik$ değişkenleri tayin edilmiştir.

3.4.2.1.2. Isıl hesaplamalar alt sistemi

Bataryanın ısı hesaplamalarına temel teşkil eden sıcaklık değişimi ısı enerji dengesi esasına göre formüle edilebilir. Enerjinin sakınımı temel yasasına göre ısı enerji dengesi aşağıdaki şekilde formüle edilebilir.

$$\text{Sisteme verilen ısı enerjisi} - \text{Sistemden atılan ısı enerjisi} = \text{Sistemde depolanan ısı enerjisi}$$

Bu ifade aşağıdaki şekilde formüle edilebilir.

$$Q_1 - Q_2 = Q_3 \quad (3.20)$$

Burada sisteme verilen ısı Q_1 , Joule etkisi olarak bilinen yasaya göre batarya iç dirençleri üzerinden geçen batarya içi akımının yarattığı ısıdır. Bu aynı zamanda batarya dirençlerinde oluşan enerji kaybı olarak da bilinir. Kısaca

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n I^2 R_i t \quad (3.21)$$

olarak ifade edilebilen bu enerjinin Şekil 3.23.'deki devredeki her bir direnç üzerindeki güç kaybı karşılığı

$$\frac{Q_1}{t} = \frac{v_0^2(t)}{R_0} + \frac{v_1^2(t)}{R_1} + \frac{v_2^2(t)}{R_2} \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sistemden alınan veya atılan ısı enerjisi ise sistemle çevresi arasındaki ısı değişimi veya transferinin bir sonucu şeklinde ifade edilir. Sistem ile çevresi arasındaki ısı transferi ise iletim, taşınım ve ışıınım olmak üzere üç yoldan gerçekleşir. Modelin basitleştirilmesi açısından bataryanın hava ile doğal yolla soğutulması da göz önünde bulundurulduğunda iletim ve ışıınım yoluyla ısı transferi, taşınım yoluyla oluşan ısı transferi yanında ihmal edilebilir mertebede kabul edilmiştir. Buna göre bataryadan çevreye atılan veya transfer edilen ısı gücü ($T(t) > T_a(t)$) varsayımı ile,

$$Q_2 = h_c . A . (T(t) - T_a(t)) \quad (3.23)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

h_c : Isı transfer katsayısı ($W/m^2 \text{ } ^0K$)

A : Batarya dış yüzey alanı (m^2)

$T(t)$: Batarya iç sıcaklığı (0K)

$T_a(t)$: Çevre sıcaklığı (0K)

Sisteme verilen ısı enerjisi ile sistemden alınan ısı enerjisi arasındaki fark (varsa) kadar ısı ise sistemde depolanmış olur. Sistemde depolanan ısı enerjisinin güç cinsinden karşılığı,

$$Q_3 = m.C_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

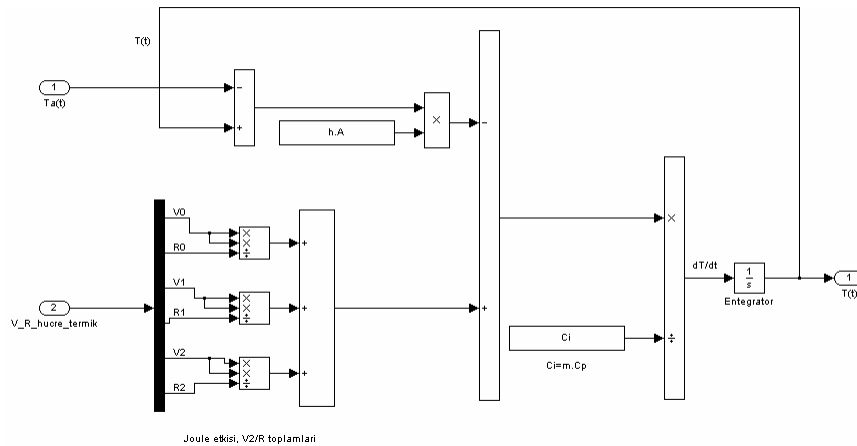
m: Bataryanın kütlesi (kg)

C_p: Bataryanın özgül ısısı (J / kg ⁰K)

olmak üzere, kütle ve ısıl kapasitenin çarpımı (C_i) da toplam ısıl kapasite katsayısı olarak adlandırılıp, (3.22), (3.23) ve (3.24) denklemleri (3.20) no'lu ısı enerjisi denkliği formülünde yerine konursa;

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{C_i} \left\{ \left[\frac{v_0^2(t)}{R_0} + \frac{v_1^2(t)}{R_1} + \frac{v_2^2(t)}{R_2} \right] - [h_c \cdot A \cdot (T(t) - T_a(t))] \right\} \quad (3.25)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Bu denklemde yer alan R₀, R₁ ve R₂ dirençleri de sıcaklık, akım ve şarj seviyesiyle değişmektedir. Bu durumu da göz önünde bulundurarak, sistemin ısı dinamiği çözümünü veren (3.25) no' lu denkleme ait Simulink modeli Şekil 3.27.' deki gibi kurulabilir.



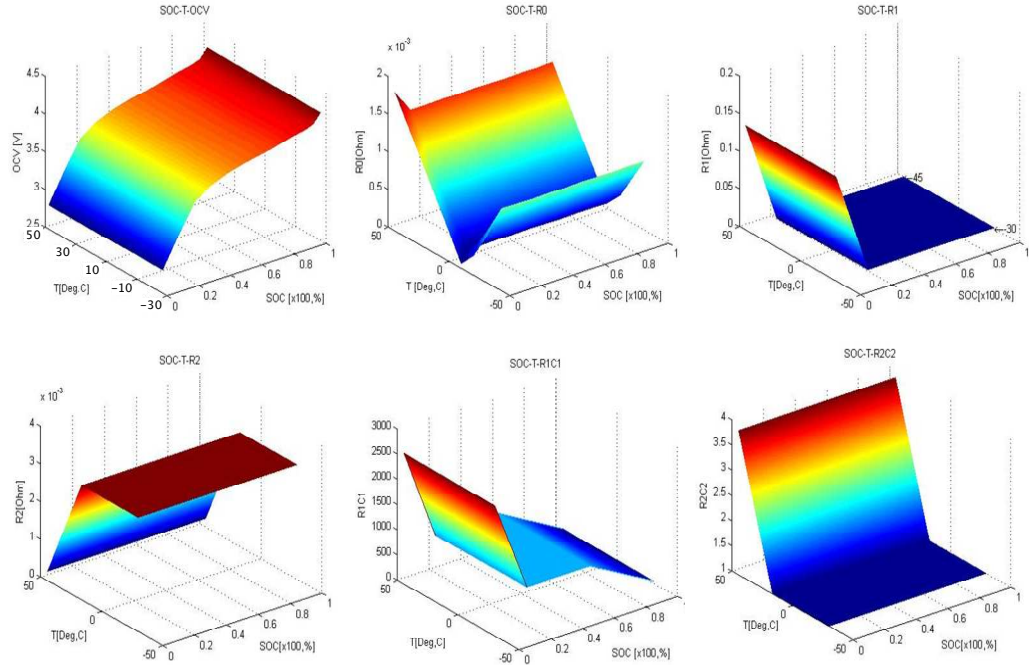
Şekil 3.27. Isıl hesaplamalar alt sistemi Simulink model

Isıl hesaplamalar alt sisteminin iki girişi bir de çıkışı bulunmaktadır. Girişlerin $T_a(t)$ başlangıç parametresi olarak kullanıcı tarafından girilmekte iken ikinci giriş olan $V_{R_hücre_termik}$ hücre dinamiği alt sisteminden alınmaktadır. Bu model sonucu hesaplanan hücre sıcaklığı, $T(t)$, çalışma fonksiyonları alt sisteme modelinde giriş değişkeni olarak kullanılmaktadır.

3.4.2.1.3. Çalışma fonksiyonları alt sistemi

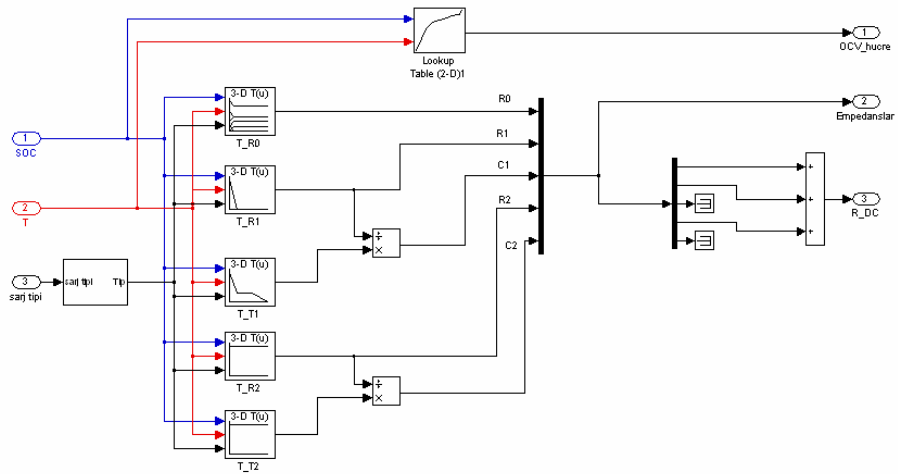
Bu çalışmada kullanılan elektriksel eşdeğer devre yönteminin başarı ile uygulanabilmesi için elektriksel eşdeğer devrede kullanılan direnç ve kapasite elemanlarının değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu değerler özellikle sıcaklığa ve şarj seviyesine göre değişiklik gösterir. Böyle bir durumda sıcaklık, akım ve gerilim gibi büyüklüklerin matematiksel olarak ifade edilmesi, sistemin doğrusal olmaması nedeniyle zordur. Bu tez çalışmasında bir mühendislik problemine mümkün olan en hızlı ve basit yöntemle çözüm bulunmaya çalışıldığından elektriksel eşdeğer devre elemanlarının karakterize edilmesinde veri tablolarının kullanılmasına karar verilmiştir. Veri tabloları ile örneklenmiş deneysel verilerden farklı enterpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemlerinin kullanılması suretiyle sürekli bir fonksiyon türetilir. Çalışmada yararlanılan veri tabloları oluşturulurken bataryayı imal eden firmanın test sonuçlarından yararlanılmıştır. Bu testler, özel test düzenekleri kullanılarak yapılabilmektedir. Özel test düzenekleri sayesinde farklı sıcaklıklarda, farklı şarj ve deşarj rejimleri ile bataryalar test edilebilir, bataryanın şarj seviyesi, gerilimi, iç direnci, kapasite değişimi gibi veriler test çıktısı olarak alınabilir. Çalışma fonksiyonları alt sisteminde 6 adet veri tablosu kullanılmıştır ve daha hızlı sonuç verdiği için doğrusal enterpolasyon yöntemi tercih edilmiştir. Veri tabloları MATLAB ortamında look-up table (veri tablosu) olarak bataryanın Simulink modeline giriş yapılmıştır. Veri tablolarında kullanılan değişkenler MATLAB içerisinde değişken olarak tanımlanarak, veri tablosu tarafından çağırılmaları sağlanmıştır. İlk veri tablosunda sıcaklık (T) ve şarj seviyesine (SOC) bağlı olarak hücre açık devre gerilimi ($OCV_{hücre}$) çıkış olarak elde edilmektedir. Bu değişken daha sonra dengeleme alt sisteminde kullanılmıştır. Diğer veri tablolarında ise yine farklı sıcaklık ve şarj seviyelerine bağlı olarak R_0 , R_1 , C_1 , R_2 ve C_2 değerleri çıktı olarak alınmaktadır. Üç

boyutlu düzenlenen veri tablolarının değişim karakteristikleri Şekil 3.28.' de grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Veri tablolarının karakteristikleri

Veri tablolarını değerlendirerek Simulink modeli çözümüne esas olan direnç ve kapasite değerlerinin kestirimini sağlayan Simulink modeli Şekil 3.29.'da olduğu gibidir.



Şekil 3.29. Çalışma fonksiyonları alt sistemi Simulink modeli

Bu modelde şarj seviyesi ve sıcaklık giriş olarak alınmıştır. Ayrıca daha sonra kullanılmak üzere işlevsel olmayan akım tipi seçimi ile ilgili bir model bloğu bulunmaktadır. Bu model bloğu farklı şarj tipleri ile ilgili yeteri kadar test verisi olmadığından işlevsel değildir. Fakat yeterli verinin olması durumunda kullanıma hazır olması açısından modele dahil edilmiştir. Bu girişlere karşılık hücre açık devre gerilimi ile birlikte R_0 , R_1 , C_1 , R_2 ve C_2 değişkenlerinin ilgili değerleri veri tablolarından elde edilir. Hücre açık devre gerilimi ve empedanslar hücre dinamiği modelinde giriş olarak kullanılmakta iken empedans değişkenlerinin reel kısımları (R_{DC}) akım dağılımı alt sistemine aktarılmaktadır.

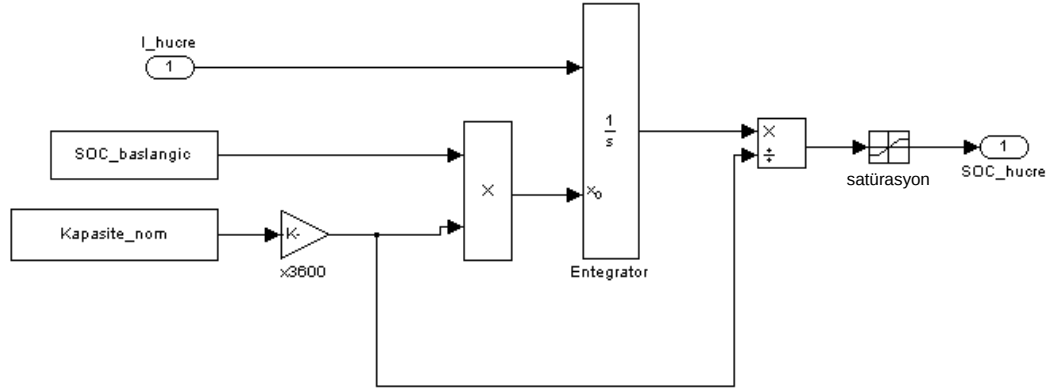
3.4.2.1.4. Şarj seviyesi hesaplama alt sistemi

Batarya modelinin istenen doğruluk seviyesinde sonuç verebilmesi için şarj seviyesinin (SOC) iyi bir şekilde hesaplanması gerekir. Şarj seviyesinin hesaplanması için birçok yöntem kullanılabilir. Bu yöntemlerden biri deşarj testi yöntemidir ve bütün yöntemler arasında en hassas sonucu verdiği iddia edilmektedir (Cheng ve ark.). Deşarj testi için sabit deşarj akımı ile bataryanın deşarj edilmesi gerekir. Böyle bir test uzun zaman almaktadır. Diğer bir yöntem açık devre gerilimlerine bağlı olarak hesaplamaların yapılmasıdır. Batarya gerilimi şarj veya deşarj sonrası hemen stabilize olmaz, dolayısıyla stabilize olmayan gerilim ile hesaplama yapılırsa şarj seviyesinin hesaplanan değeri ile gerçek değeri arasında farklılıklar oluşabilir. Hesaplamalar için Kalman filtreleri ve sinir ağlarının kullanıldığı karmaşık yöntemler mevcuttur. Bu tez çalışmasında karmaşık olmayan ve hızlı hesaplama yapılmasına olanak tanıyan Coulomb sayımı yöntemi kullanılmıştır. Coulomb sayımı yönteminin temel olarak bataryadan akan akımın ölçülmesine dayanır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir (Cheng ve ark.);

$$SOC(t) = SOC_{\text{başlangic}} + \frac{\int_0^t i(t).dt}{Q_{\text{nom}}} \quad (3.26)$$

Bu denklemde yer alan Q_{nom} bataryanın nominal kapasitesidir ve birimi amper.saat (Ah)' dir. Denklemden de görülebileceği üzere SOC değeri boyutsuzdur ve % olarak

ifade edilir. Şarj seviyesi hesaplamasına esas olan (3.26) denkleminin MATLAB / Simulink ortamında kurulan modeli Şekil 3.30.' da görüldüğü gibidir.



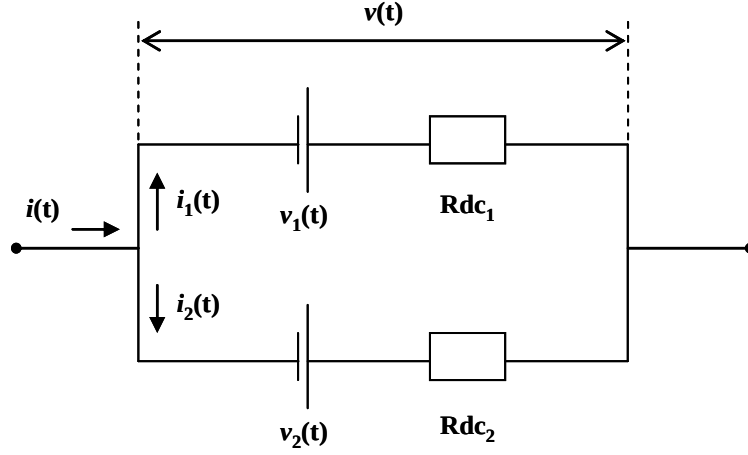
Şekil 3.30. Şarj seviyesi hesaplama alt sistemi Simulink modeli

Modelin girişinde yer alan $SOC_{baslangic}$ ve Q_{nom} MATLAB ortamında tanımlanabilen parametre değerleridir ve farklı parametre değerlerine göre benzetimlerin yapılması gerektiği durumlarda bu parametre değerleri MATLAB ortamında değiştirilebilir. Modelde Q_{nom} değişkeninin birimi modelin genelinde kullanılan birim olan saniyeye dönüştürülmesi için 3600 katsayısı ile çarpılmıştır. Diğer bir giriş ise hücre akımı olan $I_{hücre}$ ' dir. Değiştirilebilen giriş değeri akım dağılımı alt sistem modelinden okunur ve tek bir hücreden akan akım farklı değeridir. Tek bir hücreden akan akımın kullanılmasıyla hücre bazında şarj seviyesi hesaplanabilmektedir. Modelin çıkış değişkeni şarj seviyesi ($SOC_{hücre}$)' dir. Bu değişken çalışma fonksiyonu alt sisteminde yer alan veri tablolarında giriş değişkeni olarak kullanılmaktadır. Modelin çıkışında şarj seviyesini ($SOC_{hücre}$) 0 ila 1 değerleri arasında sınırlandırabilmek için ayrıca bir doyma (saturation) elemanı kullanılmıştır. Böyle bir sınırlama ile şarj seviyesinin 0'dan düşük (hücresinin tamamen deşarj edilmesi) ve 1'den büyük (hücresinin tamamen şarj edilmesi) olmaması sağlanır.

3.4.2.1.5. Akım dağılımı alt sistemi

Bu çalışmada batarya modeli hücre seviyesinde tasarlandığından her hücreye giren akım değerlerinin hesaplaması gerekir. Bu hesaplamayı yapabilmek için batarya akımının

hücrelere dağılımının tayin edilmesi önemlidir. Hücre akımlarının belirlenebilmesi için aşağıdaki şekilde verilen hücre yapısının matematiksel olarak ifade edilmesi gerekir.



Şekil 3.31. Hücre akım dağılımları

Bu devrede akım dağılımı paralel kollarda yer alan dirençlerin değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Giriş akımı, $i(t)$, paralel kollara ayrıldığından aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) \quad (3.27)$$

Burada $i_1(t)$ ve $i_2(t)$ paralel kollardan akan akımlardır. Devrenin uç gerilimi $v(t)$ paralel kollar için aynı değerde olduğundan ohm yasasına dayanarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$v_1(t) + i_1(t) \cdot R_{dc1} = v_2(t) + i_2(t) \cdot R_{dc2} \quad (3.28)$$

$i_1(t)$ ' yi elde edebilmek için (3.27) eşitliğinden,

$$i_2(t) = i(t) - i_1(t) \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilip (3.28) denkleminde $i_2(t)$ yerine konursa, (3.30) eşitliği elde edilir.

$$v_1(t) + i_1(t).R_{dc1} = v_2(t) + (i(t) - i_1(t)).R_{dc2} \quad (3.30)$$

Denklem (3.30) tekrar düzenlenirse, $i_1(t)$ için aşağıdaki (3.33) eşitliği elde edilir.

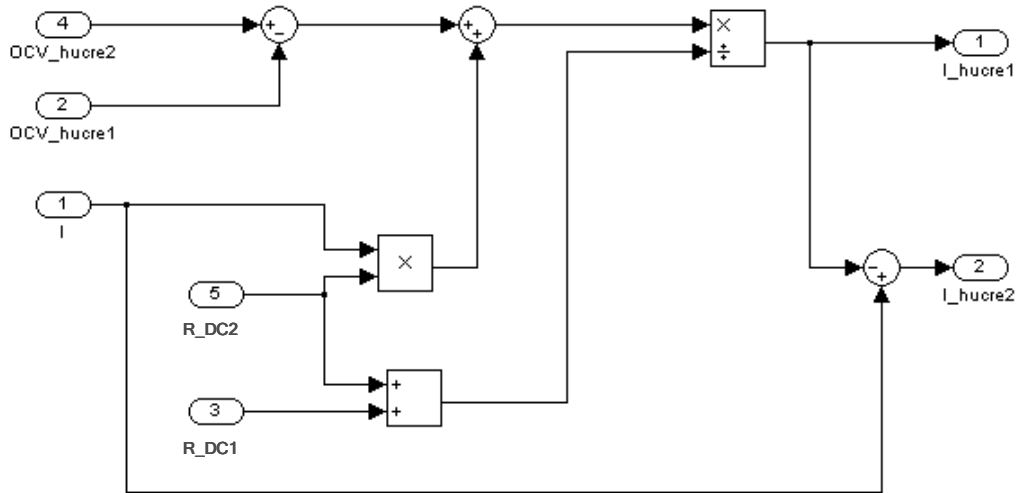
$$v_1(t) + i_1(t).R_{dc1} = v_2(t) + i(t).R_{dc2} - i_1(t).R_{dc2} \quad (3.31)$$

$$i_1(t).R_{dc1} + i_1(t).R_{dc2} = v_2(t) - v_1(t) + i(t).R_{dc2} \quad (3.32)$$

$$i_1(t).(R_{dc1} + R_{dc2}) = v_2(t) - v_1(t) + i(t).R_{dc2} \quad (3.33)$$

$$i_1(t) = \frac{v_2(t) - v_1(t) + i(t).R_{dc2}}{(R_{dc1} + R_{dc2})} \quad (3.34)$$

Burada, $v_1(t)$ ve $v_2(t)$ değeri ilgili hücrelerin açık devre gerilimleri; R_{dc1} ve R_{dc2} ilgili hücrelerin dirençleridir. Paralel kol akım değerlerini veren (3.29) ve (3.34) no'lu denklemlerin Simulink modeli Şekil 3.32.' de verildiği gibi kurulur.



Şekil 3.32. Akım dağılımı alt sistemi Simulink modeli

Akım dağılımı alt sistem modelinin girişleri arasından akım, $i(t)$ doğrudan model girişidir. OCV_hucre1, OCV_hucre2, R_DC1 ve R_DC2 girişleri çalışma fonksiyonları alt sisteminin çıkışlarıdır ve dinamik olarak hesaplamalar esnasında değerleri değişmektedir.

3.4.2.1.6 Dengeleme alt sistemi

Dengeleme alt sisteminde batarya hücresinin elektriksel devresinde bir dengeleme direncinin olması durumunda çözümün elde edilmesi amaçlanmıştır. Böyle bir seçimin yapılmasının temel nedeni, pasif dengeleme yönteminin tercih edilmesidir. Dengeleme direncinin devreye girmesiyle gerilim seviyesi yüksek olan hücrenin deşarj edilmesi söz konusu olmaktadır. Bu alt sistemdeki çözüm akım dağılımı alt sistemindeki çözüm ile benzerlik göstermektedir. Tek farklılık dengeleme direncinin devreye girmesiyle giriş akımının bir kez daha bölünüyor olmasıdır. Hesaplamaların basitleştirilmesi amacıyla iki hücreli devrenin Şekil 3.33.' deki Thevenin eşdeğeri kullanılmıştır. Bu durumda giriş akımını aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$i(t) = \frac{v_1(t) - v_2(t)}{R_{dc1} + R_{dc2}} \quad (3.35)$$

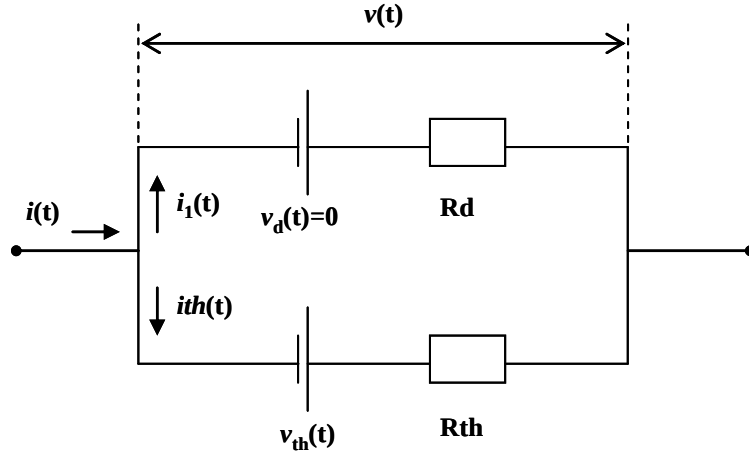
Thevenin gerilimi ise aşağıdaki gibi formüle edilir.

$$v_{th}(t) = v_1(t) - i(t).R_{dc1} \quad (3.36)$$

Bu durumda Thevenin eşdeğer direnci de aşağıdaki gibi verilebilir.

$$R_{dc-th} = \frac{1}{\frac{1}{R_{dc1}} + \frac{1}{R_{dc2}}} \quad (3.37)$$

Bu durumu özetleyen gösterim verilecek olursa,

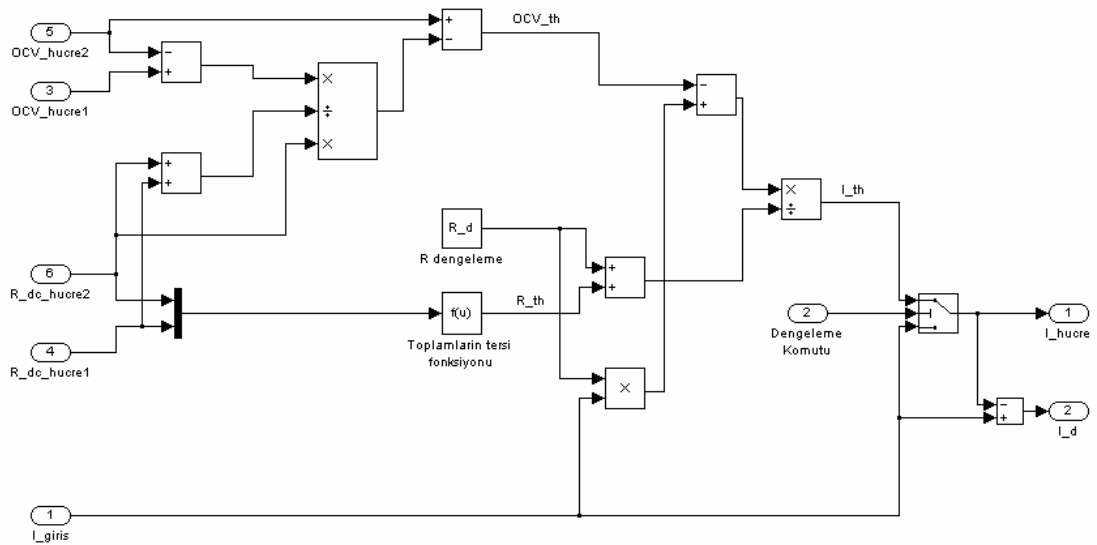


Şekil 3.33. Dengeleme direncini içeren Thevenin eşdeğer devre

Denklem (3.34) yeniden düzenlenecek olursa,

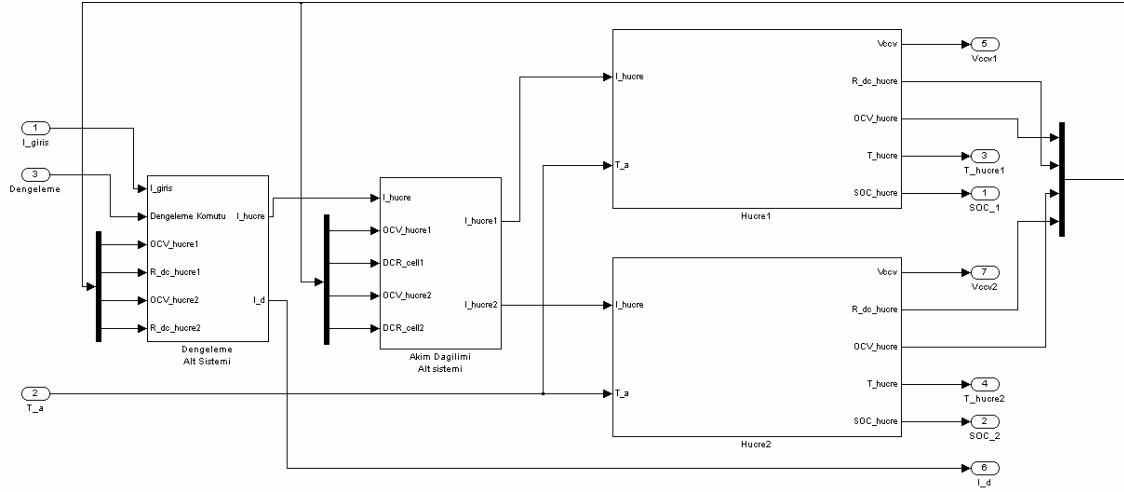
$$i_{th}(t) = \frac{-v_{th}(t) + i(t).R_d}{(R_d + R_{th})} \quad (3.38)$$

(3.36), (3.37) ve (3.38) no'lu denklemleri çözümüne esas teşkil eden Simulink modeli aşağıdaki gibi kurulabilir



Şekil 3.34. Dengeleme alt sistemi Simulink modeli

Bu modelin girişlerinden akım ile dengeleme direncinin değerleri MATLAB ortamından alınırken, gerilim ve direnç değerleri hücre modelinin ilgili alt sistemlerinden dinamik olarak tayin edilmektedir. Bütün alt sistemlerin birleştirilmesiyle sistemin Simulink modeli Şekil 3.35.' de olduğu gibi elde edilir.



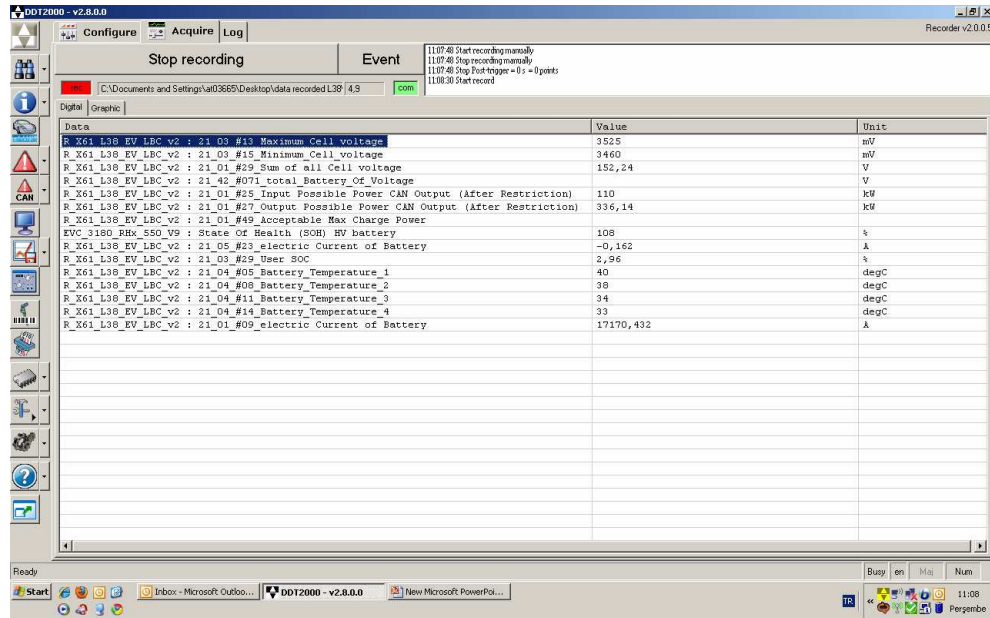
Şekil 3.35. Batarya Simulink modeli

Şekil 3.35.' deki batarya sistemi Simulink modelinde görüldüğü gibi üç ana giriş vardır. Bunlar giriş akımı (I_{giris}), dengeleme komutu ve ortam sıcaklığıdır (T_a). Giriş akımı öncelikle dengeleme alt sisteminde hesaplandıktan sonra akım dağılımı bloğunda iki ayrı hücreye dağıtılır. Hücre modelinde ise MATLAB ortamından alınan ortam sıcaklığı bilgi ile veri tablolarından ilgili değerler hesaplanır. Hücre modellerinde bağımsız olarak kapalı devre gerilimi, şarj seviyesi ve hücre sıcaklıkları tayin edilmektedir.

3.5. Testler ve benzetimler

Önceki bölümlerde bir li-iyon bataryanın hücre elemanı seviyesinde nasıl ve hangi matematiksel temellere dayanarak modellendiği açıklanmıştır. Bu çalışmada tasarlanan modelin kullanım amacı ise denetim sisteminin karşı karşıya kalabileceği durumları temsil edebilecek benzetimleri yürütmektir. Özellikle batarya yönetim sisteminin önemli görevlerinden biri olan hücre dengeleme fonksiyonunun hangi şartlar altında ve ne şekilde yapılması gerektiği konusuna odaklanılmıştır. Bu çerçevede bazı özel

laboratuvar test sonuçları ve ilgili batarya grubu ile donatılmış yol test araçlarından veriler toplanmıştır. Modelleme aşamasında veri tablolarının oluşturulması amacıyla ağırlıklı olarak laboratuvar test sonuçları kullanılsa da yönetim stratejilerini geliştirmek amacıyla yol testlerinden de yararlanılmıştır. Bu testlerde CAN veri hattındaki verilere erişmek ve kayıt altına almak için bu iş için özel olarak hazırlanmış DDT2000 yazılımı kullanılmıştır. DDT2000 yazılımı, araç denetleyicilerine erişmek, denetleyiciye kod yüklemek, denetleyicide kaydedilmiş hata mesajlarını okumak, gerçek zamanlı veri toplamak gibi amaçlarla kullanılan özel bir yazılımdır. DDT2000 yazılımının veri toplama amacıyla kullanılan menüsü Şekil 3.36.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.36. DDT2000 veri kayıt menüsü

Bataryanın, kullanım şartlarında ne tür bir karakteristik ortaya koyduğu, denetleme stratejilerinin belirlenmesi için önemlidir. Bu fiziksel karakteristiğin tespit edilebilmesi için batarya denetleyicisinde işlenen verileri değerlendirmek gerekir. Bataryanın fiziksel karakteristiğini ortaya koyacak veriler arasında bataryanın kapasitesi, iç direnci, hücre gerilimleri, şarj seviyesi ve kullanım geçmişi yer alır. Bu önemli verileri elde etmek için batarya denetleyicisinde işlenen veri paketlerinden yararlanılır. Çizelge 3.5.' de DDT2000 yazılımı ile erişilen veri paketleri açıklamalarıyla verilmiştir.

Çizelge 3.5. Yol testlerinde kayıt edilen veriler

Veri paketi	Paket	Açıklama
vRESIST	LID 01	İç direnç
vCAPAF	LID 01	Anlık tam kapasite
vCURBA	LID 01	Batarya akımı
vOCVOL	LID 03	Batarya açık devre gerilimi
vMSN_HIS	LID 30	Sürüş geçmişi
Cell Voltage[0..61]	LID 41	Hücre gerilimi
Cell Voltage[62..95]	LID 41	Hücre gerilimi
vBSOHE	LID 61	Batarya fonksiyonellik durumu
vCell_SUM	LID 01	Tüm hücre gerilimleri toplamı
vBPCMAX	LID 01	Kabul edilebilir maksimum şarj gücü
vOCVSOC	LID 03	OCV'den hesaplanan SOC
vCELL_MAX	LID 03	Maksimum hücre gerilimi
vCELL_MIN	LID 03	Minimum hücre gerilimi
vCANSOC	LID 01	SOC (batarya)
vDRV_HIS[0..4][0..4]	LID 67	Kullanım süresi geçmişi
vPRK_HIS[0..4][0..4]	LID 67	Duruş süresi geçmişi
vBAT_MILE	LID 61	Toplam yapılan yol (km)

Tez çalışmasında üzerinde çalışılan örnek batarya yönetim sisteminin dengeleme akımı batarya yönetim sistemi üreticisi tarafından 8mA olarak belirlenmiştir. Batarya hücrelerinin fiziki ve kimyasal yapısı nedeniyle oluşan dengesizliğin kompanze edilmesi için bir dengeleme sistemi kullanılması gerekmektedir.

Bu noktada dengesizliğe neden olan parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Belli başlı parametreler ise;

- İmalat esnasında oluşabilen çok küçük yapısal farklar
- Farklı seviyelerdeki kendi kendine deşarj akım seviyeleri

dir. Toplam hücre kapasitesindeki farklılıklar zamanla değişim göstermektedir. Bununla beraber kaybedilen enerji, hücreler arası gerilim farklarının daha da artmasına neden olur. Aktif dengeleme yapılması durumunda fazladan enerji kaybı söz konusu olmasa da çalışmaya konu olan araçta kabul edilen dengeleme yöntemi pasif dengeleme yöntemidir ve bu açıdan dezavantajlıdır. Öte yandan kendi kendine deşarj nedeniyle yaşanan kayıp hücre gerilim seviyelerinde önemli farklılıkların oluşmasına neden

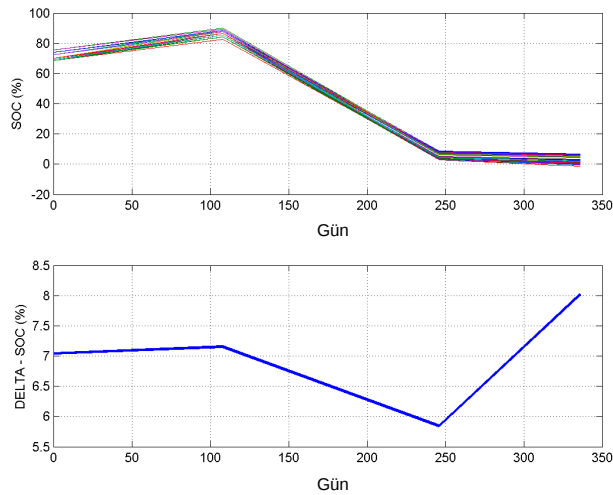
olmaktadır. Dolayısıyla çok uzun süre dengelenmeyen batarya hücrelerinde, kalıcı kapasite kaybı söz konusu olur. Batarya yönetim sisteminde uygulanması donanımsal olarak önceden karar verilen pasif dengeleme yönteminin yeterli olup olmadığı irdelenmelidir. Bu yeterliliğin görülebilmesi için batarya yönetim sistemi tarafından öncelikle kendi kendine deşarj etkisinin kompanse edilmesi gerekir. Bu amaçla uzun süreli park denemesi yapılmıştır. Bu testte batarya grubu 3 aylık teste tabi tutulup ortalama kendi kendine deşarj akımı belirlenmiştir. Bu test sonucunda bu ortalama kendi kendine deşarj akımını kompanse edecek stratejiler geliştirilmiştir. Bu noktada bazı sürüş profillerinin tanımlanması gerekir. Bu profilleri tanımlarken göz önünde bulundurulması gereken husus dengeleme yapılması için gereken sürenin yeterli olup olmayacağıdır. Her gün elektrikli aracın şarj edildiği bir profil en avantajlı olanıdır çünkü batarya yönetim sistemi dengeleme yapmak için yeterli zamanı bulabilir. Fakat bu tür bir stratejinin geliştirilmesinde göz önünde bulundurulmasında gözetilen durumlar en kötü durumu yansıtmalıdır. Dengeleme açısından en kötü durum ise bataryanın çok sık şarj edilememesi ve dolayısıyla da batarya yönetim sisteminin dengeleme yapmak için yeterli zamanı bulamamasıdır. En kötü şartların tanımlandığı sürüş profili Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. En kötü şart senaryosu

Durum	Değer	Birim
Aracın günlük kullanım süresi	20	dakika
BYS'nin günlük bekleme modunda olduğu süre	12	dakika
Aylık şarj süresi	8	saat
BYS'nin aylık aktif olduğu toplam süre	24	saat

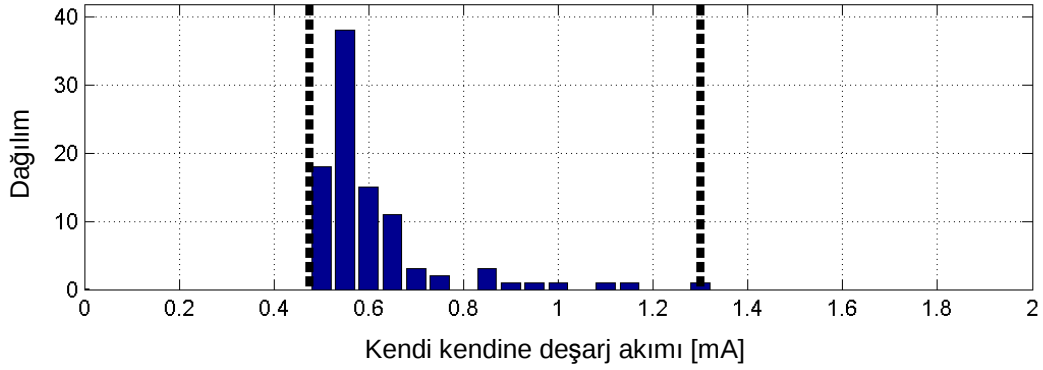
Dengeleme sisteminin toplamda kısa süreli devrede olması durumunda, örneğin yıllık 200 saat, gerilim seviyelerinde farklılık olan hücreleri dengelemek mümkün olamamaktadır. Fakat orta sıklıkta bir kullanım söz konusu olursa ki bu da yaklaşık olarak batarya yönetim sistemi işlemcisinin örnek olarak yıllık 1500 saat (aylık 125 saat) çalışabilir durumda olması durumunda dengeleme işlevi yerine getirilebilmektedir. Bu tür bir zaman dilimi yol testi yapılan araçlardan alınan veriler göz önünde

bulundurulduğunda yaklaşık olarak yıllık 15.000 km yol yapılmasına karşılık gelir. En kötü şartlar araç üreticilerinin tecrübelerinden yararlanılarak ortaya konmaktadır. Bu açıdan bakıldığında en kötü şartlarda batarya yönetim sistemi aylık olarak dengeleme yapabileceği Çizelge 3.6.'da belirtildiği üzere 24 saat olduğu kabul edilmiştir. Bu da yıllık olarak 228 ($24[\text{saat}] \cdot 12[\text{ay}] = 228[\text{saat/yıl}]$) saate denk gelmektedir ve bütün dengeleme stratejisi bu şartlar baz alınarak geliştirilmiştir. Ayrıca ortalama bir sürüş profili de tanımlanmıştır. Bu profilde yıllık 15.000 km sürüş yapılacağı yani ortalama 30 km/s ile 500 saat sürüş zamanı olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca bekleme modu ve şarj süreleri ile birlikte ek olarak 1000 saat dengeleme süresine sahip olunacağı kabulünde bulunulmuştur. Diğer bir ifadeyle toplamda dengeleme yapmak için yıllık 1500 ($500+1000=1500 [\text{saat}]$) saatlik dengeleme imkanına sahip olunabilir. Yapılan laboratuvar testlerinden birinde 2 adet batarya grubu 3 ay boyunca şarj ve deşarj edilmeden laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Bu süreçte batarya grubunda hakim olan dinamik kendi kendine deşarj olayıdır. Batarya-1 ile Batarya-2'nin karakteristikleri benzerdir ve hücre doluluk seviyelerindeki değişim Şekil 3.37.'de verilmiştir. Bu 3 aylık süreçte hücrelerin gerilim seviyeleri farklı hızlarda düşmüştür. Bazı hücrelerin gerilim düşüm hızı diğerlerinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni dengeleme yapılmadığı için daha hızlı kendi kendine deşarj olmalarıdır. Dolayısıyla buradan çıkarılabilecek sonuç, eğer dengeleme yapılmazsa bataryanın kullanımı esnasında bazı hücreler belirgin bir şekilde enerji kaybedecektir. Bu da dengesizliğin hızlı bir şekilde artmasına ve son olarak da bataryanın tam kapasite kullanılamamasına yol açacaktır.



Şekil 3.37. Batarya-1'in SOC değerlerindeki değişim

Test sonucu gözlenen kendi kendine deşarj akım seviyesi 0,48 mA ile 1,3 mA arasında değişmektedir. Ortalama kendi kendine deşarj akımı ise 0,82 mA'dır. Bu akım dağılımı Şekil 3.38.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.38. Batarya-1 kendi kendine deşarj akımı dağılımı

Şekilde de görüleceği üzere hücrelerin çoğu 0,55mA seviyesindedir. 0,8mA'den daha büyük kendi kendine deşarj akımına sahip hücre sayısı yaklaşık olarak 10' dur. Elektrikli aracın sık kullanılmamasına ilişkin en kötü durum senaryosu dahilinde ayda 24 saat dengeleme yapılabilir. $(0,82[\text{mA}] \cdot 720 / 24[\text{saat/saat}] = 24,6 [\text{mA}])$ Yukarıdaki sonuçlar da göz önünde bulundurulduğunda 24,6 mA dengeleme akımına ihtiyaç vardır. Bu seviyedeki dengeleme akımı donanımsal olarak elde edilememektedir.

Yine daha önce verilen ortalama sürüş profili şartlarında aylık 125 saat dengeleme imkanı söz konusu olmaktadır. Bu şartlar altında $(0,82 [\text{mA}] \cdot 720 / 125 [\text{saat/saat}] = 4,72 [\text{mA}])$ 4,72 mA'lık dengeleme akımına ihtiyaç vardır. Bu şartlar altında dengeleme akımı istenen sonucu almak için yeterlidir çünkü batarya yönetim sisteminden sağlanabilen dengeleme akımı 8 mA' dir.

Öte yandan batarya yönetim sisteminin 8 mA'lık bir dengeleme akımı sağlayabildiğini düşünülürse aylık dengeleme için 73,8 $(720 [\text{saat}] \cdot 0,82 / 8 [\text{mA/mA}] = 73,8 [\text{saat}])$ saate ihtiyaç vardır. Ortalama 30 km/s hız yapıldığı varsayılır ve günde 1 saatlik yol alınmasına karşılık 2 saat bataryanın şarj edildiği düşünülürse batarya yönetim sisteminin sağlayacağı dengeleme akımının yeterli olacağı söylenebilir.

Batarya modelinin kullanılmasıyla bazı benzetimler bu çalışma çerçevesinde yapılmıştır. Geliştirilen strateji çerçevesinde başlangıçta dengeleme için gerekli olan süre hesaplanmıştır. Bilgisayar ortamında alınan benzetim sonuçlarında etkili bir şekilde batarya hücreleri arasındaki dengesizliğin giderildiği gözlemlenmiştir. Benzetimler belirli sürüş profilleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Benzetim periyodu 3 aylık olmakla beraber şarj ve deşarj süreleri haricindeki bekleme süreleri benzetim senaryosundan çıkarılmıştır. Böylelikle toplam benzetim süresi kısaltılmıştır. Bu profiller Çizelge 3.7.' de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Farklı sürüş profilleri

Durumlar	Sürüş profilleri				
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>
Sürüş (dakika/gün)	30	10	10	10	10
Kullanım periyodu (gün/hafta)	6	5	5	5	5
Şarj sayısı (adet/ay)	24	20	6	3	1
Şarj süresi (saat/şarj)	10	1	5	5	5
Toplam şarj süresi (saat/ay)	240	20	30	15	5

Bu sürüş profilleri dengeleme komutunun sadece şarj durumunda ve hem şarj hem de deşarj durumunda verildiği alternatif benzetimlerde kullanılmışlardır. Ayrıca EK 2’de 6 aylık benzetim sonuçları da verilmiştir.

Benzetim çalışmaları çerçevesinde farklı dengeleme stratejileri test edilmiştir. Bu çalışma esnasında kapasite kaybı, başlangıç gerilim seviyesi düşümü, kendi kendine deşarj kayıpları göz önünde bulundurulmuştur. Burada amaç farklı sürüş profillerinin belirlenen dengeleme stratejisine karşılık verdiği cevabı tespit edebilmek ve birkaç ay sonra hücreler arası dengesizliğin hangi seviyede olabileceğini kestirmektir. Şekil 3.39.

ve Şekil 3.40.'da verilen örnek sonuçta, strateji dahilinde hücreler arası dengesizliğin önemli ölçüde giderilebildiği gözlemlenmiştir.

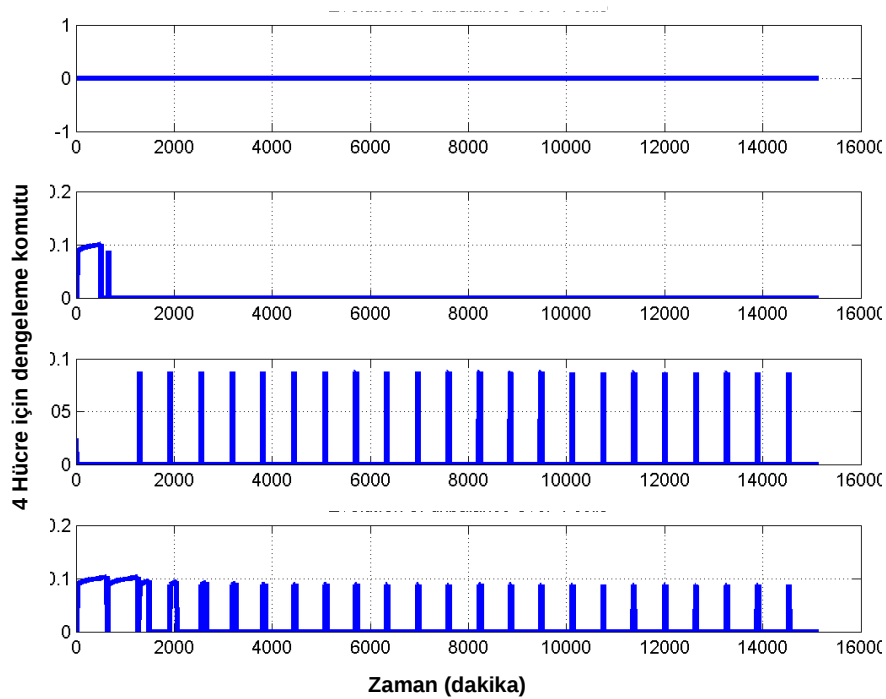
Dengeleme stratejisinin temelinde, dengeleme için gerekli olacak sürenin hücre gerilim seviyelerine bakarak aracın çalıştırılmasından önce hesaplanması yatmaktadır. Başlangıçta aşağıdaki algoritma yürütülür;

- Hücre gerilimi ölçülür ve karşılık gelen hücre doluluk değeri tahmin edilir.
- Hücre doluluk değeri ve mevcut kapasite bilgisi kullanılarak kalan kapasite hesaplanır.
- En zayıf hücrenin kapasitesi tespit edildikten sonra diğer hücrelerin tespit edilen kapasite değerine düşmeleri için kaç Ah'lık dengeleme yapılması gerektiği hesaplanır.
- Dengeleme süresi hesaplanır.

Genel strateji bu şekilde olmakla beraber aşağıda verilen birkaç değişikliği de yapmak mümkündür;

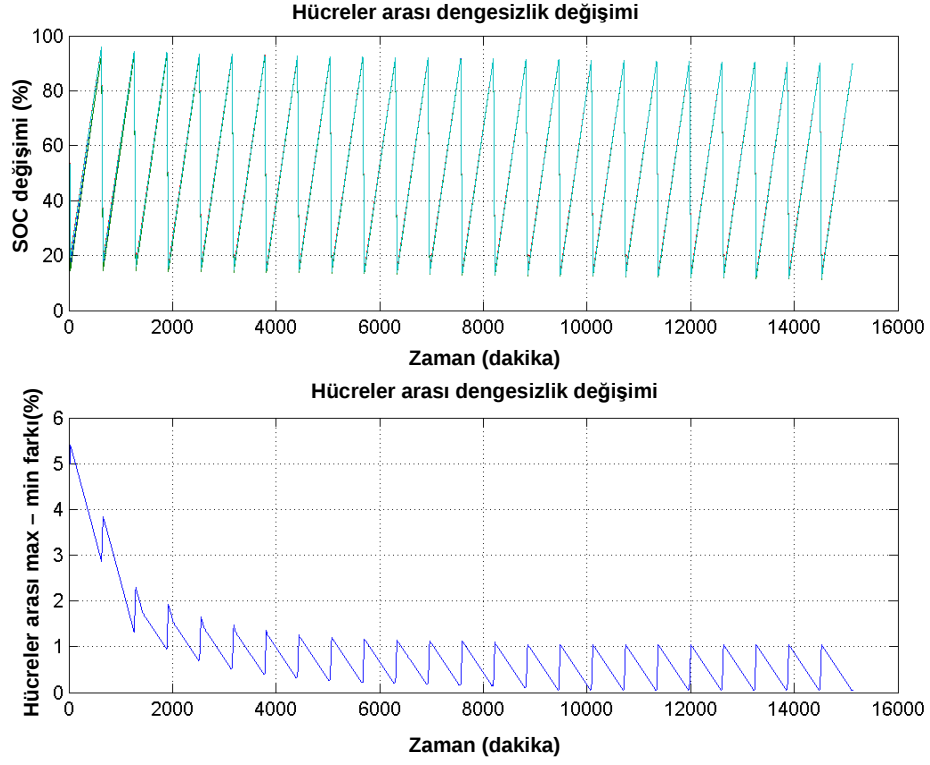
- Hücreleri korumak amacıyla hücre doluluk seviyesi ile ilgili bir eşik değeri belirlenmiştir. Bu eşik değeri ile hali hazırda düşük hücre doluluk seviyesine sahip hücrelerin dengelemeyle beraber daha da fazla deşarj edilmelerinin (aşırı deşarjdan kaçınmak amacıyla) önüne geçilmek istenmiştir. Bu eşik değeri ilk olarak $SOC < \%8$ olarak belirlenmiştir.
- Her hücre için en düşük doluluk seviyesine düşmesi için gereken zamanın hesaplanmasının minimize edilmesine çalışılmıştır. Böyle bir ihtiyacı doğuran 2 neden vardır. Bunlardan ilki, hücre kapasitelerinin doluluk seviyesi cinsinden hesaplanmasıdır. Eğer kapasite [Ah] cinsinden hesaplanabilseydi zamanla hücrelerde oluşan kapasite düşümü tespit edilebilirdi. Hâlbuki hücre doluluk seviyesi, var olan hücre kapasitesinin yüzde cinsinden ifadesidir. Dolayısıyla yanıltıcı bir hücre doluluk

seviyesi değeri nedeniyle aslında düşük kapasiteli olan fakat hücre doluluk seviyesi yüksek olarak tespit edilen zayıf bir hücre, dengeleme direncinin devreye alınmasıyla daha da deşarj edilebilir. İkinci neden ise, gerilim ölçümündeki hatadır. Algılayıcı donanımın hatasıyla ($\pm 50\text{mV}$) aslında zayıf olan bir hücrenin dengeleme ile deşarjı söz konusu olabilir. Bu problemi aşmak amacıyla bir eşik değeri belirlenmiştir. Eğer iki hücre doluluk seviyesi arasındaki fark (ΔSOC - delta SOC) %3'ten küçükse dengeleme komutu verilmez. Doğal olarak, burada karşılaştırmaya tabi tutulacak hücrelerden biri başlangıçta en zayıf olarak tespit edilen hücredir.



Şekil 3.39. 4 hücre için dengeleme komutunun değişimi (P1 sürüş profili - 3 ay)

Şekil 3.39. ve Şekil 3.40’da P1 sürüş profili ile yapılan benzetim sonucu verilmiştir. Bu profilde aracını sıkça kullanan bir sürücünün kullanım alışkanlıkları göz önünde bulundurulmuştur. Bu sürücü haftanın 6 günü A noktası ile B noktası arasında aracını 15 dakika süresince kullandığı varsayılmıştır. Aracın kullanıldığı her gün 1 kere batarya şarj edilmektedir. Dolayısıyla batarya ayda 24 defa şarj edilmektedir. Şarj tipinin “yavaş şarj” seçilmesi sonucu toplamda bataryanın tam doldurulması için gerekli olan süre 10 saattir. Bu durumda da aylık 240 saatlik bir şarj süresine ulaşılır. Bu kabullerle birlikte benzetimin hangi strateji çerçevesinde yapılacağı da önemlidir.

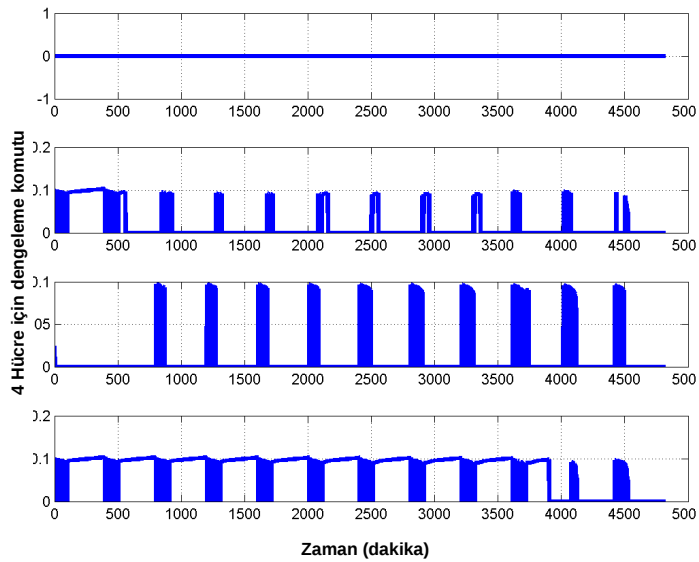


Şekil 3.40. Hücreler arası dengesizlik değişimi (P1 sürüş profili - 3 ay)

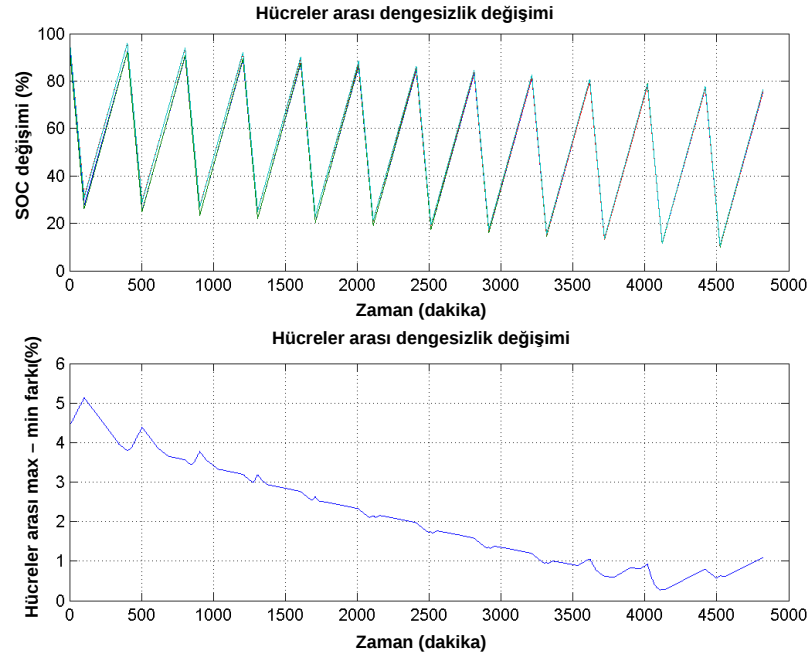
Dengeleme stratejisi ile ilgili kıstaslar arasında; dengeleme komutu verilmesinin mümkün olduğu minimum şarj seviyesi, dengelemenin sadece şarj esnasında veya hem şarj hem de deşarj esnasında yapılması, minimum hücre seviyesi ile maksimum şarj seviyesi arasındaki fark olan ΔSOC değeri bulunmaktadır. Şekil 3.39. ve Şekil 3.40.' da sonuçları verilen benzetimde dengeleme komutu için gerekli olan minimum şarj seviyesi eşik değeri %8' dir ve şarj seviyesi %8' den düşük olan hücreler dengelenmemiştir. Dengeleme sadece şarj esnasında yapılmış ve ΔSOC için %3' lük değer seçilmiştir. Şekil 3.39' da hücreler için dengeleme komutunun değişimi görülmektedir. Birinci hücre için dengeleme komutu hiçbir zaman verilmemiştir. Bunun anlamı, ilgili hücrenin elektriksel karakteristiğinin nominal değerlere yakın olması, şarj esnasında hiçbir zaman diğer hücrelerden daha hızlı şarj seviyesinin artmaması, deşarj esnasında ise şarj seviyesinin diğer hücrelerden daha hızlı düşmemesidir. İkinci hücre için de benzer karakteristik söz konusu olduğundan, sadece benzetim başlangıcında dengeleme yapılmış ve sonrasında bir daha gereklilik durumu ortaya çıkmamıştır. Üçüncü ve dördüncü hücrelerin durumu ise ilk iki hücreden farklı olup, benzetim

süresince dengeleme yapıldığı görülmektedir. Bunun temel sebebi bu iki hücrenin diğer hücrelerden daha yüksek iç dirence sahip olması dolayısıyla şarj seviyelerindeki değişimin ilk iki hücreyle benzer karakteristik göstermemesidir. Programın algoritması gereği, bu iki problemlili hücre sürekli dengelenmiştir. Hücrelerin dengelenmesi sonucunda, Şekil 3.40.'da görüldüğü gibi hücreler arası dengesizlik zaman içinde azalmaktadır. Böyle bir sonuç alınabilmesinin temel nedeni %8' lik eşik değerinin tanımlanması ile zayıf olan hücrelerin dengelemeyle beraber daha da zayıflatılmamasıdır. Öte yandan Δ SOC değeri %3 olarak tayin edilmiş, minimum hücre şarj seviyesi ile maksimum hücre seviyesi arasındaki farkın %3' ten düşük olduğu durumda dengeleme yapılmamıştır. Bu şartlar altında minimum hücre şarj seviyesi ile maksimum hücre şarj seviyesi başlangıçta %5,5 seviyesindeyken, tasarlanan dengeleme stratejisi sayesinde şarj seviyesi arasındaki fark Şekil 3.40.'ta gösterildiği gibi %1'e kadar düşürülmüştür.

Şekil 3.41. ve Şekil 3.42.' de 6 ay zarfında Çizelge 3.7.' de tanımlanan P4 sürüş profilinin kullanıldığı benzetim sonuçları verilmiştir. Şarj akımı 8A olarak seçilmiştir.

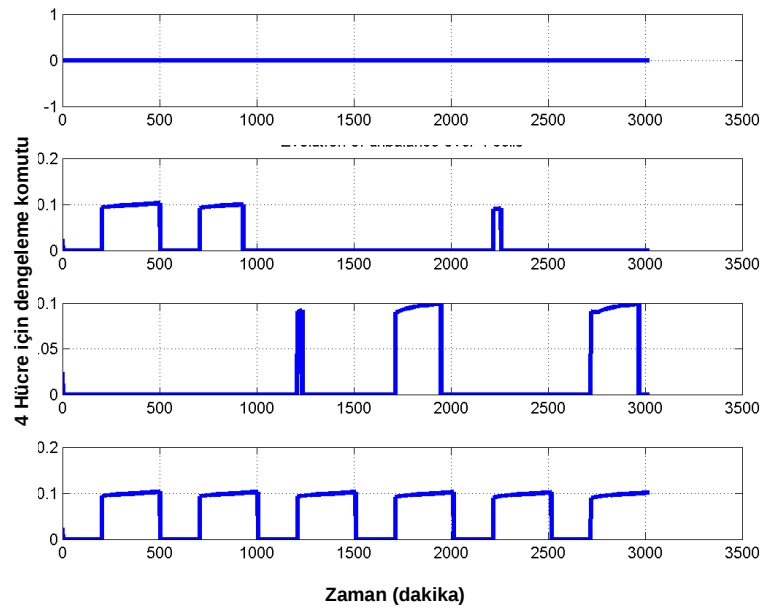


Şekil 3.41. 4 hücre için dengeleme komutunun değişimi (P4 sürüş profili – 6 ay)

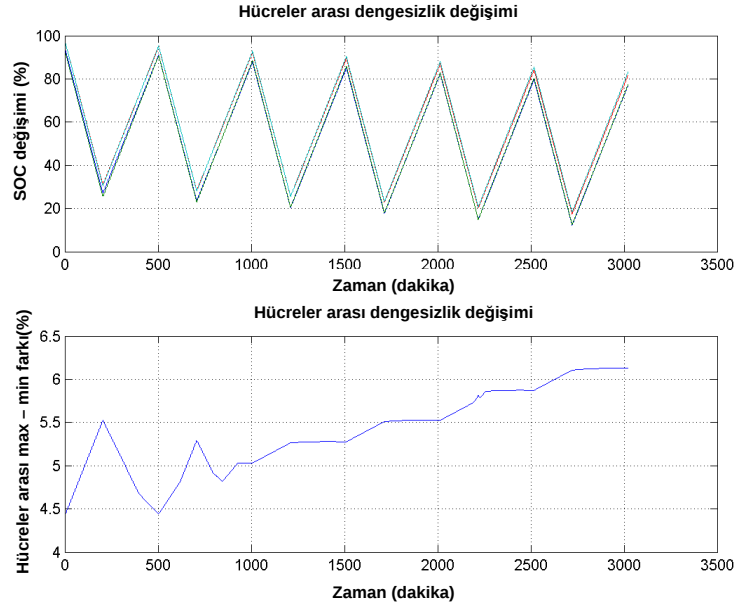


Şekil 3.42 Hücreler arası dengesizlik değişimi (P4 sürüş profili - 6 ay)

Şekil 3.42.'de görülebileceği üzere hücreler arası minimum ve maksimum değerleri arasındaki fark %4 seviyesinde düşürülebilmektedir. Fakat Şekil 3.43. ve Şekil 3.44.'de verilen 6 aylık P5 sürüş profilinde durum çok farklı olup hücreler arası dengesizlik artmaktadır.

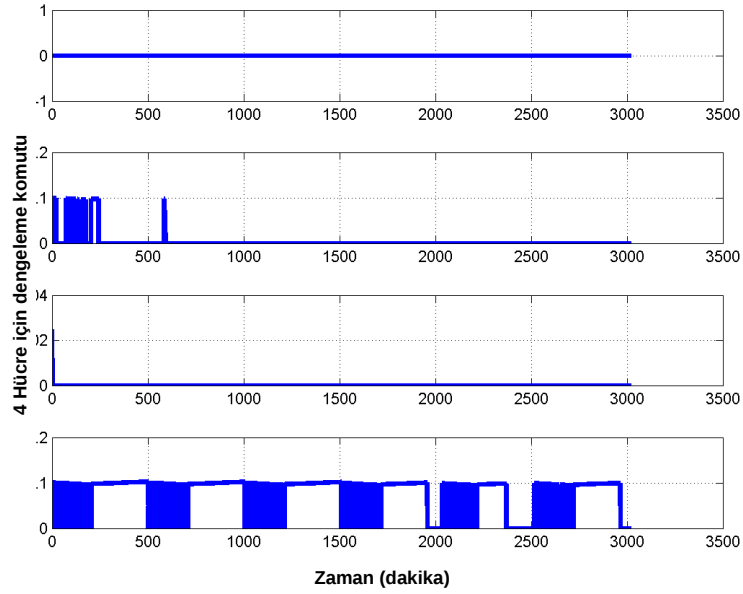


Şekil 3.43. 4 hücre için dengeleme komutunun değişimi (P5 sürüş profili - 6 ay)

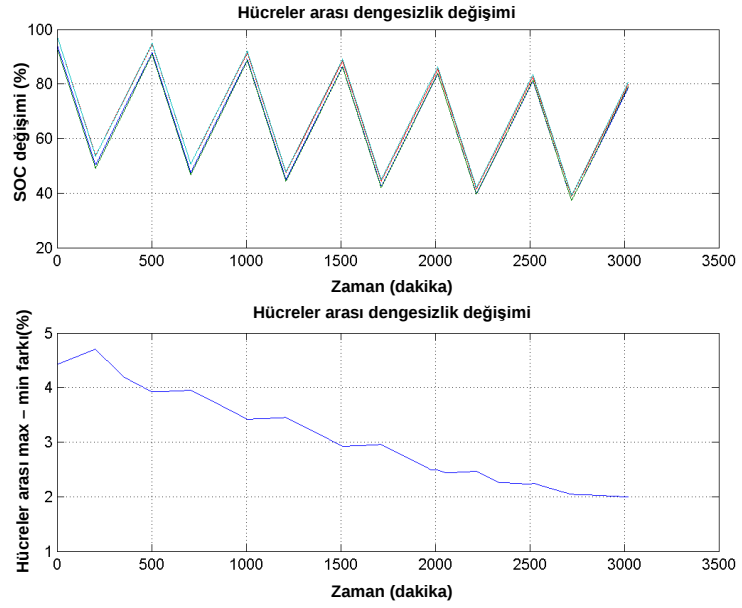


Şekil 3.44. Hücreler arası dengesizlik değişimi (P5 sürüş profili -6 ay)

P5 profili 6 aylık benzetim sonuçlarında Δ SOC eşik değeri %3 yerine %0 alındığı için dengesizliğin artmasının temel sebebi olarak düşünülebilir. Bunun nedeni fiziken zayıf hücrelerin dengeleme ile deşarj edilerek daha da zayıflatılmasıdır. Şekil 3.45. ve Şekil 3.46.’de yine P5 profili kullanılmış ve 6 aylık bir benzetim yapılmıştır.



Şekil 3.45. 4 hücre için dengeleme komutunun değişimi (P5 sürüş profili – 6 ay)



Şekil 3.46. Hücreler arası dengesizlik değişimi (P5 sürüş profili - 6 ay)

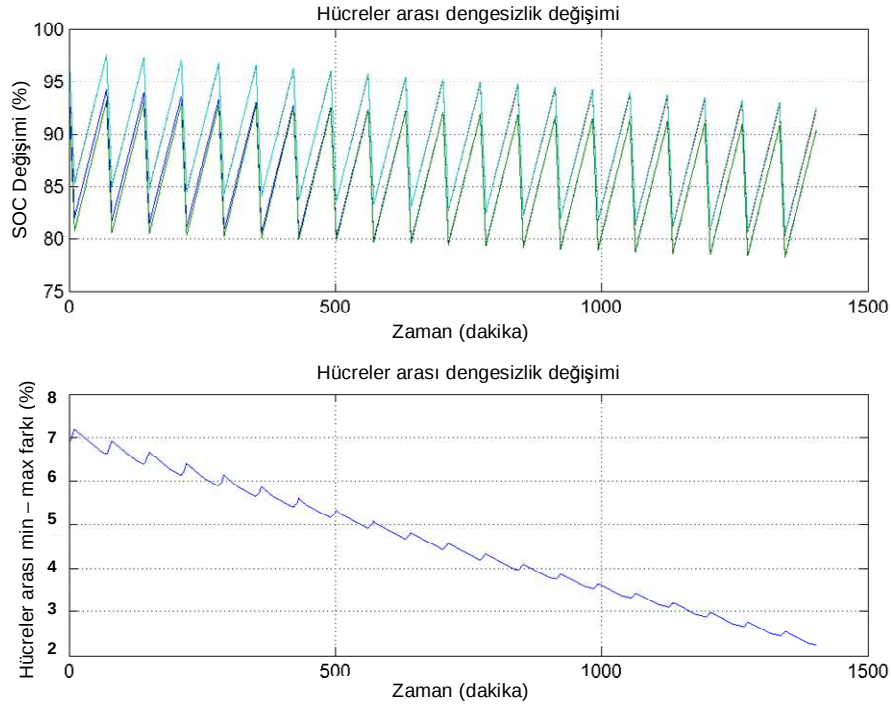
Şekil 3.45. ve Şekil 3.46.'de sonuçları verilen P5 – 6 ay benzetiminde, Şekil 3.43. ve Şekil 3.44.'de sonuçları verilen benzetimlerde kullanılan dengeleme stratejisinde değişiklik yapılmıştır. Bu değişiklik çerçevesinde ΔSOC eşik değeri %0 yerine %1 alınmış ve deşarj esnasında da dengeleme yapılmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlara göre hücreler arası minimum ve maksimum değerleri arasındaki fark %2,5 seviyelerine kadar düşürülebilmektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Tez çalışmasında Randles 2. mertebe elektriksel eşdeğer devresinin temel alındığı li-iyon batarya modeli tasarlanmış ve tasarlanan modelin kullanıldığı benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimlerin yapılması ile batarya hücreleri arasındaki dengesizliğin giderilmesine yönelik geliştirme faaliyetleri yürütülmüştür.

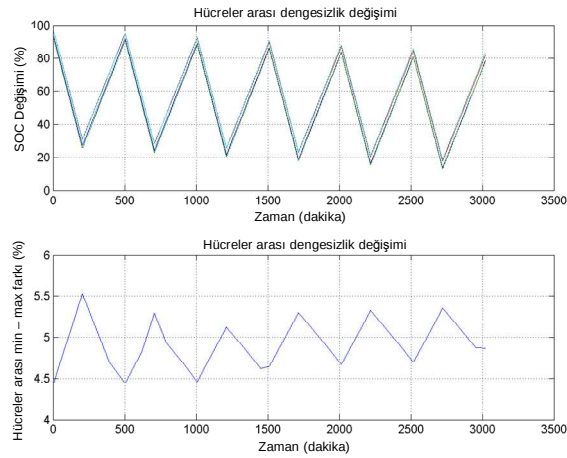
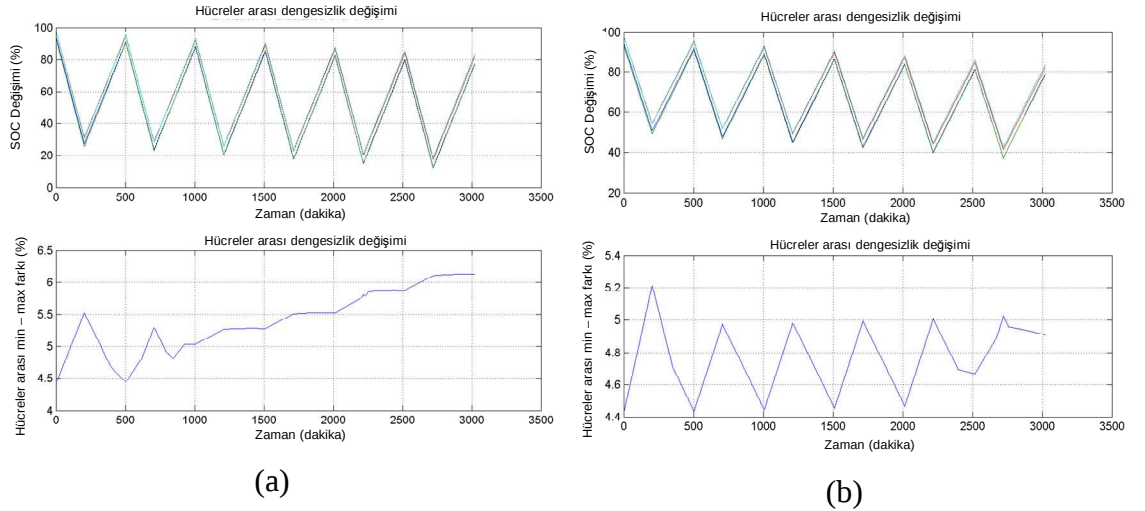
Benzetimlerin yapılabilmesi için farklı 5 adet sürüş profili tanımlanmıştır. Bu profiller farklı sürüş ve şarj rejimlerini içermektedir. Bu profillerin giriş değeri olarak kullanılmasının yanında, dengeleme için önemli olan üç kıstas daha vardır. Bu kıstaslar; bir hücrenin dengeleme yapılabilmesi için sahip olması gereken minimum şarj seviyesi, minimum şarj seviyesi ile maksimum şarj seviyesi arasındaki farkı ifade eden ΔSOC ve son olarak da dengelemenin şarj, deşarj veya her iki durumda da yapılmasıdır.

Yapılan ilk benzetimlerde P1 sürüş profili kullanılmıştır. Bu benzetimlerin bir kısmında ΔSOC , %0 ila %3 arasında değişen değerlerde seçilmiştir. Şekil 4.1.'de dengelemenin sadece şarj esnasında yapıldığı ve ΔSOC değerinin %0 olarak tayin edildiği benzetim sonucu verilmiştir.



Şekil 4.1. Hücreler arası dengesizlik değişimi (P1 sürüş profili - 3 ay - $\Delta SOC = \%0$)

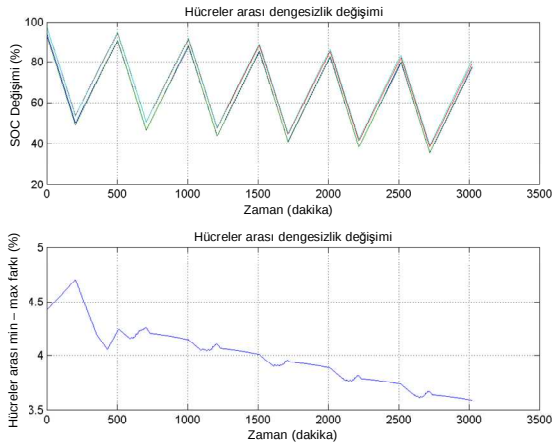
Dengeleme için batarya yönetim sisteminin yeteri kadar süre bulduğu bu benzetimde hücreler arası şarj seviyesi farkı %7'den %2 seviyelerine indirilmiştir. Bu sürüş profili ile yapılan diğer benzetimlerde de benzer sonuçlar alınmıştır. Dolayısıyla bataryanın aylık ortalama 20 defa şarj edilmesi durumunda Δ SOC değeri belirlenmemiş olsa da hücreler arası şarj seviyesi dengesizliğinin giderilebildiği söylenebilir. Dengeleme stratejisinin geliştirilebilmesi için şarj sayısının yüksek olduğu profiller yerine daha riskli olan, düşük sayıda şarj içeren profiller belirleyici olmaktadır. Bu amaç doğrultusunda yapılan benzetimler arasından P3 profilinin kullanıldığı benzetimler örnek verilebilir. P3 profili kullanılarak, dengelemenin sadece şarj esnasında yapıldığı Şekil 4.2.' de sırasıyla Δ SOC değerinin %0, %1 ve %3 olarak belirlendiği benzetim sonuçları verilmiştir.



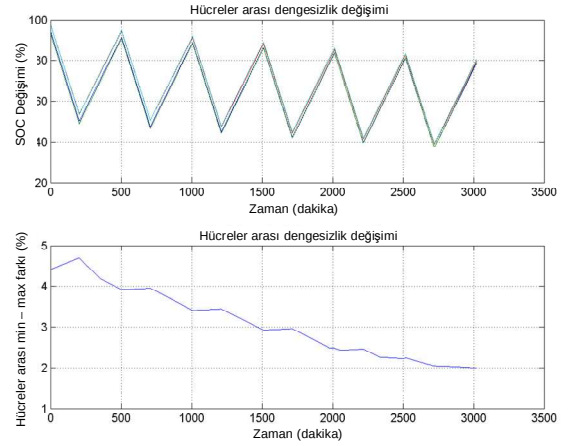
Şekil 4.2. P3 sürüş profili - 6 ay - (a) Δ SOC=%0, (b) Δ SOC=%1, (c) Δ SOC=%3

Benzetim sonuçlarına göre $\Delta SOC = \%0$ olması durumunda hücreler arası gerilim farkı giderek artmaktadır. Dolayısıyla dengeleme yapılabilen süre, düşük şarj sayısına bağlı olarak yeterli olmamakta ve hücreler arası dengesizlik giderilememektedir. Bu nedenle dengelemenin daha verimli yapılması gerekir. Dengelemenin daha verimli hale getirilebilmesi için ise Şekil 4.2. (b) ve Şekil 4.2 (c)' de verilen benzetim sonuçlarında olduğu gibi ΔSOC değeri atanmalıdır. Bu değer $\Delta SOC = \%1$ olarak atandığı durumda hücreler arası dengesizlik $\%5$ seviyesindeyken, $\Delta SOC = \%3$ olarak belirlendiğinde $\%4,5$ seviyesinde bir hücreler arası dengesizlik söz konusu olmaktadır. Bu sonuçlara dayanarak bataryanın sık şarj edilemediği bir kullanım şeklinde dengelemenin verimini artırmak için ΔSOC gibi bir eşik değerinin kullanılmasının gerektiği belirtilebilir.

Yukarıda elde edilen bulgulara dayanarak, dengeleme stratejisinin geliştirmesi için farklı benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimlerde yukarıda da belirtilen sebeplerden dolayı yine dengeleme için çok fazla sürenin olmadığı P3 sürüş profili tercih edilmiştir. Fakat Şekil 4.3.'te sonuçları verilen benzetimlerde dengeleme yapmak için hem şarj hem de deşarj durumları kullanılmıştır. Bu sayede dengeleme yapmak için daha uzun süreye sahip olunmaktadır.



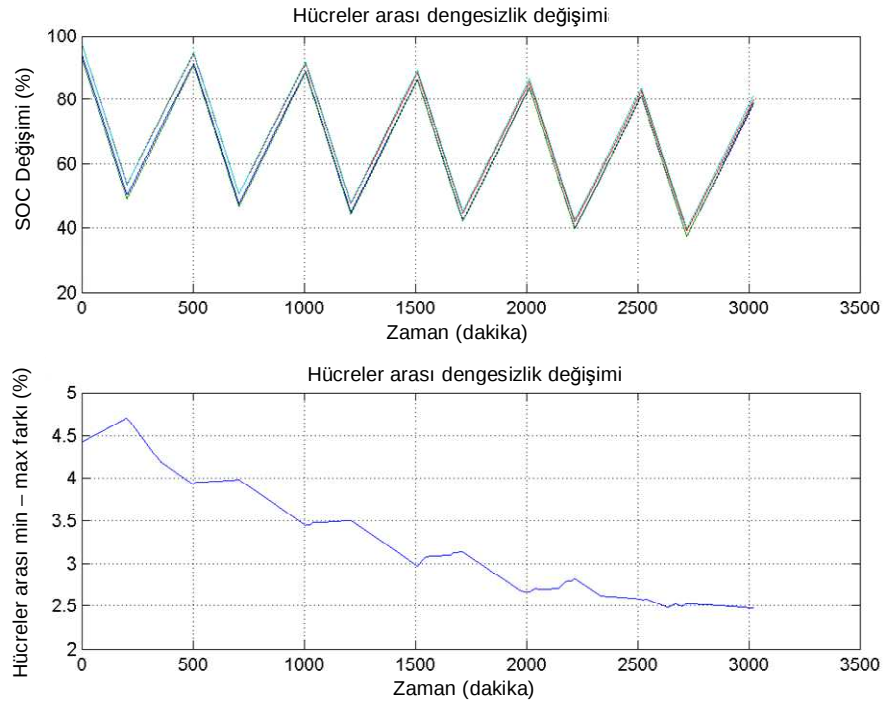
(a)



(b)

Şekil 4.3. P3 sürüş profili - 6 ay - (a) $\Delta SOC = \%0$, (b) $\Delta SOC = \%1$

Şekil 4.3.(a)'da gösterildiği gibi $\Delta SOC = \%0$ olarak tayin edilirse, hücreler arası şarj seviyesi farkı $\%3,5$ olurken, Şekil 4.3.(b)'de gösterildiği gibi $\Delta SOC = \%1$ olması durumunda bu fark $\%2$ ' ye kadar gerilemektedir. Bu sonuçlar sadece şarj esnasında dengeleme yapılan ve Şekil 4.2.'de verilen sonuçlara oranla daha iyi olsa da dengeleme neticesinde bataryadan depolanan enerji kullanılmaktadır. Bu nedenle dengeleme performansını $\%3$ seviyesinde iyileşme sağlansa da enerji kaybı söz konusu olduğundan geliştirilen stratejide deşarj esnasında dengeleme yapılması şarta bağlanmıştır. Bu şart ise deşarj esnasında dengeleme yapılabilmesi için hücreler arası şarj seviyesi farkının $\Delta SOC > \%3$ olmasıdır. Dolayısıyla hücreler arası dengesizlik $\%3$ ' ten büyük ise deşarj esnasında da dengeleme yapılabilir. Bu şart altında P3 sürüş profili kullanılarak yapılan benzetim sonucu Şekil 4.4.' te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. P3 sürüş profili-6 ay- $\Delta SOC = \%1$ - $\Delta SOC > \%3$ deşarj durumu dengeleme şartı

Şekil 4.4.'te elde edilen sonuçta hücreler arası minimum ve maksimum şarj seviyeleri farkının $\%2,5$ olduğu görülmektedir. Şekil 4.3.'te gösterilen, deşarj esnasında her hangi bir şart aranmaksızın dengeleme yapılan duruma oranla $\%0,5$ daha kötü bir sonuç elde

edilse de bataryada depolanan enerji daha az tüketildiği için söz konusu şartın stratejiye dahil edilmesi uygun görölmüştür.

5. SONUÇ

Gerçekleştirilmiş olan çalışmada elektrikli araçlarla ilgili en güncel durum özetlenmiş, elektrikli araçlarda kullanılan batarya teknolojileri incelenmiş ve bu teknolojilerin avantaj ve dezavantajlarının üzerinde durulmuştur. Batarya yönetim sisteminin fonksiyonları açıklanmış ve elektrikli araçlarda denetleme açısından ne kadar önemli olduğu vurgulanmıştır. Bir elektrikli aracın li-iyon batarya modeli, batarya hücresinin temel alındığı elektriksels eşdeğer devre yaklaşımının benimsenmesiyle tasarlanmıştır. Eşdeğer devre yaklaşımının seçilmesiyle, hem model yapısının karmaşıklaşmasının önüne geçilmiş hem de yapılan mühendislik çalışmasının göreceli olarak daha kısa sürede tamamlanması söz konusu olmuştur. Ayrıca, modelin hücre bazında tasarlanmasıyla, hücreler arası dinamikleri göz ardı etmeden benzetimler yapılabilmiştir. İlgili batarya modeli, MATLAB/Simulink ortamında kurulmuştur. Modelde yer alan, ölçülmesi zor, dinamik değişkenler veri tablolarının kullanılmasıyla kestirilmiştir. Bu veri tablolarının oluşturulması ve modelin doğruluğunun artırılması amacıyla laboratuvar ortamında elde edilen test sonuçlarından yararlanılmıştır. Modelleme çalışmasında özellikle pasif dengeleme yönteminin üzerinde durulmuştur. Modelin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzetimler, batarya yönetim sistemine ait hücre dengeleme fonksiyonuna ilişkin denetleme stratejisinin geliştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Benzetimler bir elektrikli aracın kullanım karakteristiklerine dayanarak oluşturulan farklı sürüş profilleri baz alınarak tasarlanmıştır. İlgili sürüş profilleri ve farklı dengeleme şartları altında yapılan benzetimler sonucunda aşağıdaki dengeleme stratejisi ortaya konmuştur;

1. Dengeleme yapılabilmesi için minimum hücre şarj seviyesi %8 olmalıdır.
2. Şarj esnasında dengeleme yapılabilmesi için minimum ve maksimum hücre şarj seviyesi farkı, $\Delta SOC \geq \%1$ olmalıdır.
3. Genel batarya performansını artırmak için deşarj esnasında da dengeleme yapılabilir. Aranılan şart $\Delta SOC \geq \%3$ tür.

Geliştirilen strateji sayesinde hücreler arası şarj seviyesi farklılıkları ortalama %2,5 oranında iyileştirilebilmektedir.

Tasarlanan modelde hücre şarj seviyesinin belirlenmesinde risk mevcuttur. Hücre gerilimlerinin ölçümünde yapılacak 50 mV'luk bir hata hesaplanan hücre doluluk seviyesinde %10' luk sapmaya neden olabilir. Toplam hücre kapasitelerinin düşüş hızları da değişkendir ve zamanla kapasite düşüm hızı artmaktadır. Bu hücre dinamiği modellenmemiştir. Bu tez çalışması, bir endüstriyel proje dahilinde gerçekleştirildiğinden bilimsel ve akademik olarak ileriye dönük geliştirmeye açıktır. Geliştirilebilecek noktalar aşağıda verilmiştir;

1. Hücre dengelemeye karşılık elektrikli araç menzilinin düşürülmesi problemine daha mukavim bir stratejinin tasarlanması.
2. Gerilim ölçümündeki ölçme hatasının modele eklenmesi.
3. Aktif dengeleme yönteminin batarya yönetim sistemine adapte edilmesi.

İlgili geliştirme çalışmalarının yapılması durumunda, çok karmaşık elektrikli araç tasarımlarının hayata geçirilmesine önemli katkılarda bulunulabilir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2006,** USABC Goals for Advanced Batteries for EVs. http://www.uscar.org/commands/files_download.php?files_id=27-(Erişim tarihi: 27.09.2011)
- Anonim, 2010.** Timeline: history of the electric car. <http://www.pbs.org/shows/223/electric-car-timeline.html>-(Erişim tarihi: 27.09.2011).
- Anonim, 2010.** History of electric vehicles. <http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/Electric-Vehicles.htm>-(Erişim tarihi: 27.09.2011)
- Aksen, J., Burke, A., Kurani, K. 2008.** Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008. Institute of Transportation Studies University of California – Davis UCD-ITS-RR-08-14 no’lu teknik rapor, Milpitas.
- Bergveld, H.J. 2001.** Battery management systems design by modeling. *Ph.D. Thesis*, Proefschrift Universiteit Twente, Twente.
- Bhide, S., Shim, T. 2009.** Development of improved li-ion battery model incorporating thermal and rate factor effects. Vehicle Power and Propulsion Conference, 7-11 September, 2009, Dearborn, Michigan.
- Chaturvedi, N. A., Klein, R., Christensen, J., Ahmed, J., Kojic, A. 2010.** Modeling, estimation, and control challenges for lithium-ion batteries. 2010 American Control Conference, June 30-July 02, 2010, Marriott Waterfront, Baltimore.
- Cheng, K. W. E., Divakar, B. P., Wu, H., Ding, K., Ho, H. 2011.** Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 60 (1):76-88.
- Chiasserini, C.F., Rao, R.R. 2001.** Energy Efficient Battery Management. *IEEE journal on selected areas in communications*, 19 (7): 1235-1245.
- Dubarry, M., Vuillaume, N., Liaw, B.Y. 2008.** From Li-ion single cell model to battery pack simulation. 17th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 3-5 September, 2008, San Antonio, Texas.
- Fenton, J. 1996.** Handbook of Vehicle Design Analysis. Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA, 1996. 755pp.
- Gabrielli, C. 1998.** Identification of electrochemical processes by frequency response analysis. Solartron Analytical Corp. Technical report number 004/83, Paris.
- Geller, B., Quinn, C., Bradley, T.H. 2010.** Analysis of design tradeoffs for plug-in hybrid vehicles. *Electric and hybrid vehicles power sources, models, sustainability, infrastructure and the market*, 2010: 159-191.

- Gold, S. 1997.** A PSPICE Macromodel for Lithium-Ion Batteries. The Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances, 14-17 January, 1997, Long Beach.
- Hu, Y., Yurkovich, S., Guezennec, Y., Yurkovich, B.J. 2011.** Electro-thermal battery model identification for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 196 (2011): 449-457.
- Karden, E., Ploumen, S., Spijker, E., Kok, D., Kees, D., Philips, P. 2004.** Rekuperatives Bremsen in Fahrzeugen mit 14V-Bordnetz, Energiemanagement und Bordnetze, Haus der Technik, 12/13 October, 2004, Essen.
- Karden, E., Ploumen S., Fricke, B., Miller, T., Snyder, K. 2007.** Energy storage devices for future hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 168 (2007): 2-11.
- Kultgen, M. 2009.** Managing high-voltage lithium-ion batteries in HEVs. Linear Technology Corp. teknik raporu, San Jose.
- Lasia, A. 2002.** Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. Modern aspects of electrochemistry, Ed.: Conway, B. E., Bockris, J., White, R.E. New York, 2002, Vol. 32, pp: 143-248.
- Li, G., Wang, H., Yu, Z. 2009.** New Method for Estimation Modeling of SOC of Battery. 2009 WRI World Congress on Software Engineering, 19-21 May, 2009, Xiamen.
- Linden, D., Reddy, T. 2002.** Handbook of batteries. McGraw-Hill, New York, USA, 2002. 1454pp.
- Martinez, C., Sorlien, D., Goodrich, R., Chandler, L., Magnuson, D. 2005.** Using cell balancing to maximize the capacity of multi-cell li-ion battery packs. Intersil Corp., Uygulama notu AN167.0, Milpitas.
- Miller, J. R. 1999.** Development of equivalent circuit models for batteries and electrochemical capacitors. The Fourteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances, 12-15 January, 1999, Long Beach.
- Moore, S.W., Schneider, P.J. 2001.** A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems. SAE rapor 2001-01-0959, Michigan.
- Ramamurthy, A., Notani, S., Bhattacharya, S. 2010.** Advanced lithium ion battery modeling and power stage integration technique. Energy Conversion Congress and Exposition 2010 IEEE, 12-16 September, 2010, Atlanta.
- Ran, L., Jungfen, W., Haiying, W., Gehen, L. 2010.** Prediction of state of charge of lithium-ion rechargeable battery with electrochemical impedance spectroscopy theory. The 5th IEEE Conference On Industrial Electronics And Applications. 15 -17 June, 2010, Taichung.

Randles, J. E. B. 1948. A cathode ray polarograph. *Trans. Faraday Soc.*, 44 (1948): 322-327.

Sayın, A.A., Yüksel, İ. 2011. Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. *Mühendis ve Makina*, 52 (615): 75-82.

Silva, C., Ross, M., Farias, T. 2009. Evaluation of energy consumption, emissions and cost of plug-in hybrid vehicles. *Energy Conversion and Management*, 50 (2009): 1635–1643.

akeda, N., Imai, S., Horii, Y., Yoshida H. 2003. Development of high-performance lithium-ion Batteries for hybrid electric vehicles. Mitsubishi Motors teknik raporu, Tokyo.

Tremblay, O., Dessaint, L.A., Dekkiche, A. 2007. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 9-12 September, 2007, Arlington, Texas.

Vladikova, D. 2004. The technique of the differential impedance analysis. International Workshop: Advanced Techniques for Energy Sources Investigation and Testing. 4 – 9 September, 2004, Sofia.

Wouk, V. 1995. Hybrids: Then and now. *IEEE Spectrum*, 32 (1995):16–21.

Xu, J., Gao, M., He, Z., Yao, J., Xu, H. 2009. Design and study on the state of charge estimation for lithium-ion battery pack in electric vehicle. International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 13-16 July, 2009, Las Vegas.

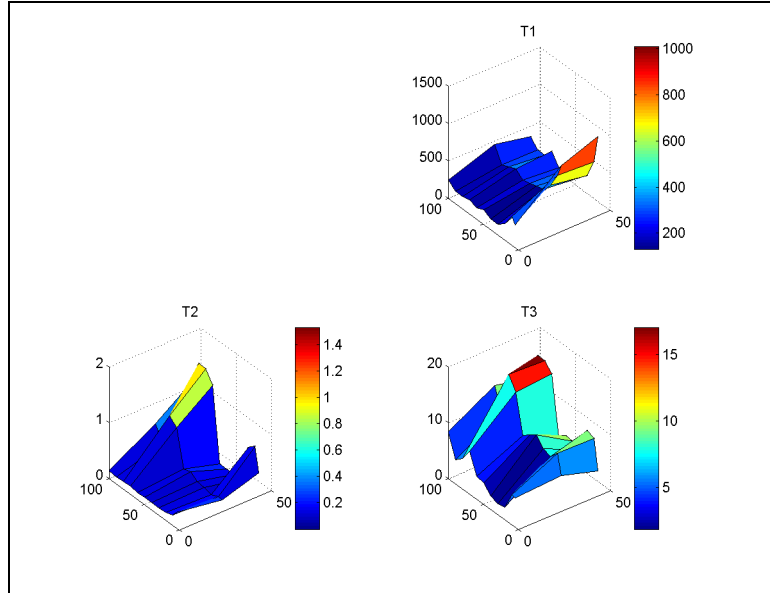
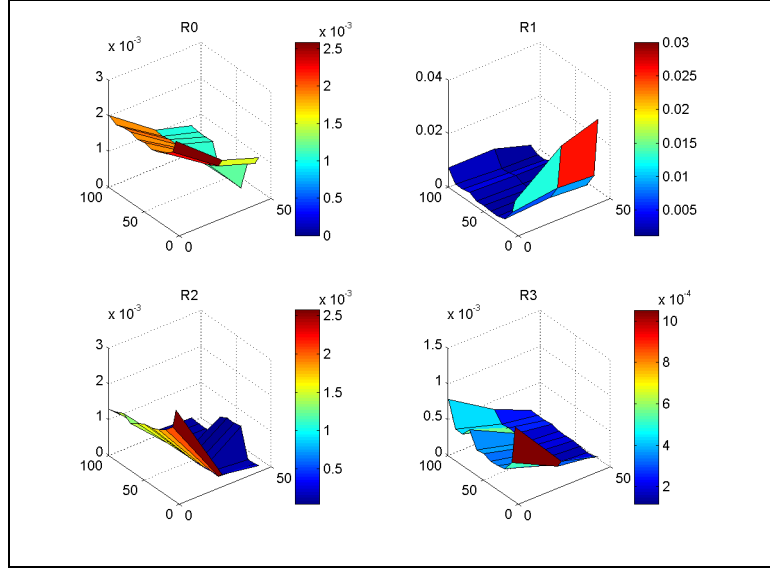
Yan, J., Li, C., Xu, G., Xu, Y. 2009. A novel on-line self-learning state-of-charge estimation of battery management system for hybrid electric vehicle. The Intelligent Vehicles Symposium, 3-5 June, 2009, Shaanxi.

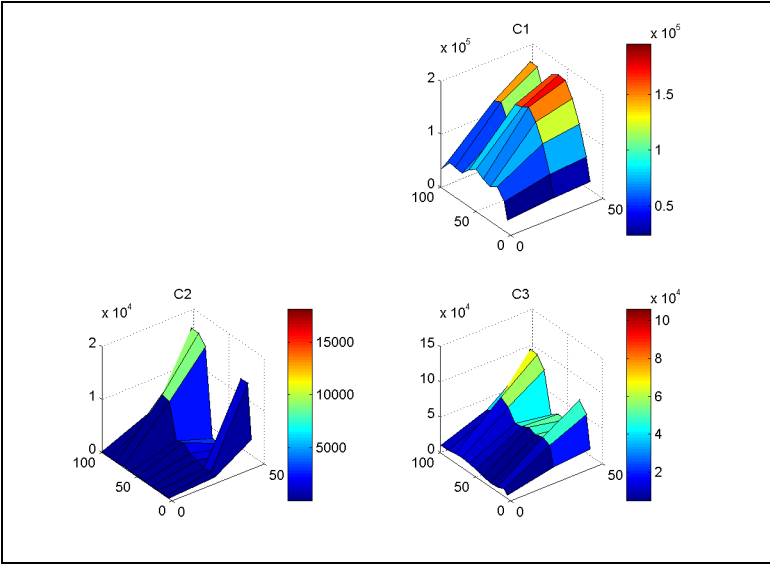
EKLER

EK 1	Empedansiyometri Verileri
EK 2	Benzetim Sonuçları
EK 3	Veri Tabloları ve Kullanım Şekilleri

EK 1: Empedansiyometri Verileri

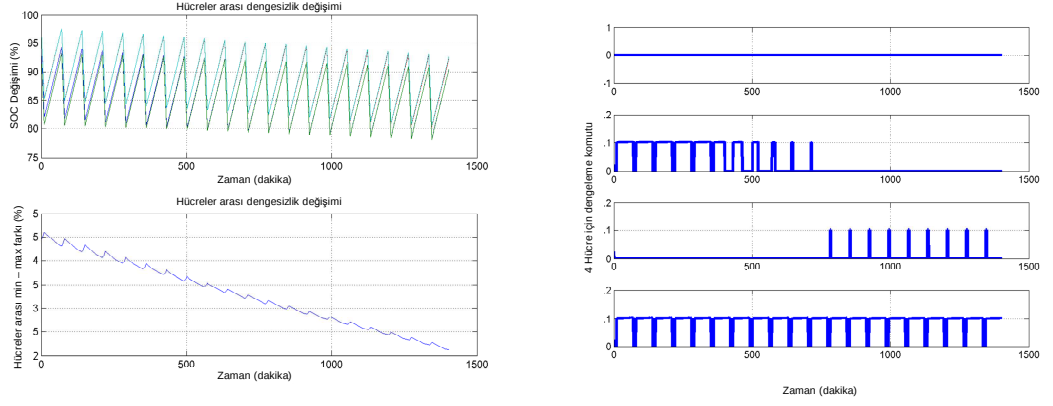
Aşağıda verilen şekillerde modelin kurulmasında kullanılan empedansiyometri sonuçları verilmiştir. Buradaki sonuçların düşük akım seviyelerinde elde edildiği göz ardı edilmemelidir. Dolayısıyla gerçek çalışma şartlarında bazı değişikliklerin olabileceği unutulmamalıdır.



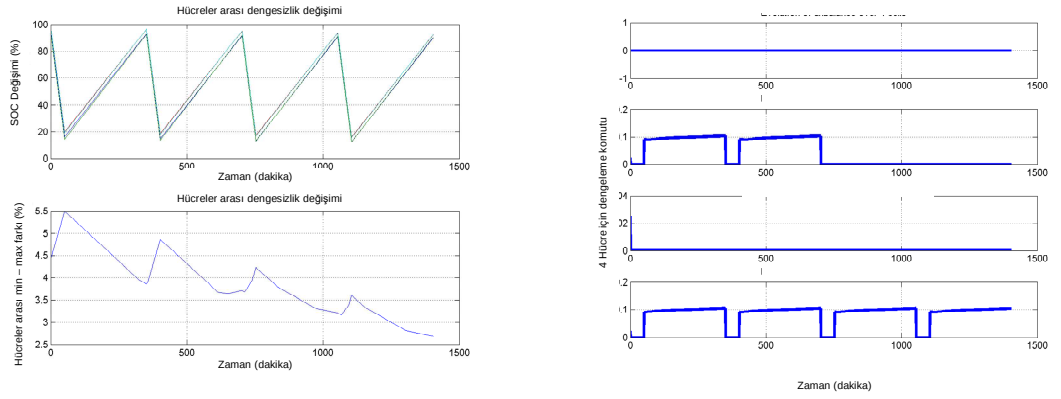


EK 2: Benzetim Sonuçları

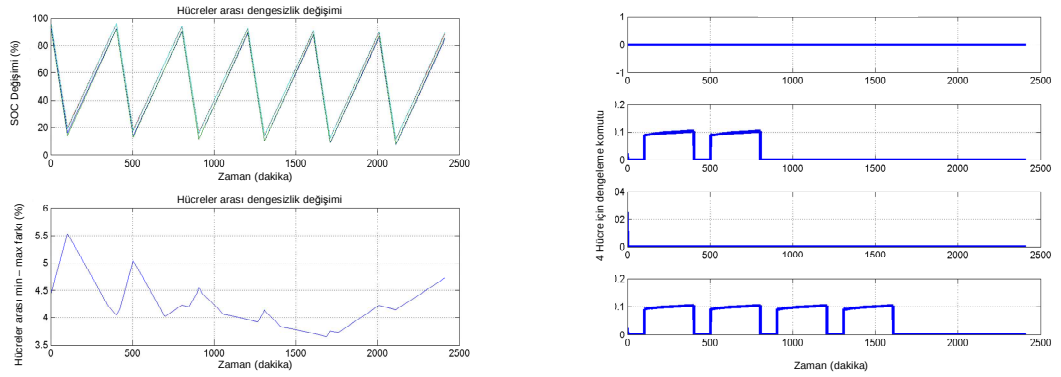
Bu bölümde farklı sürüş profilleri ve dengeleme stratejilerinin benzetim sonuçları yer almaktadır.



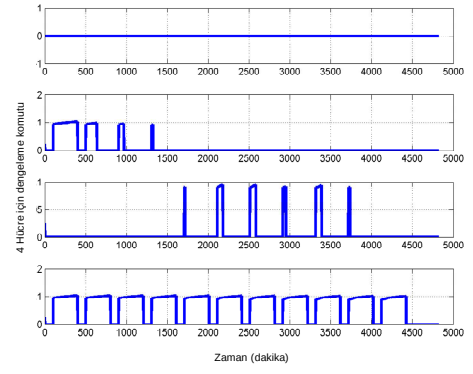
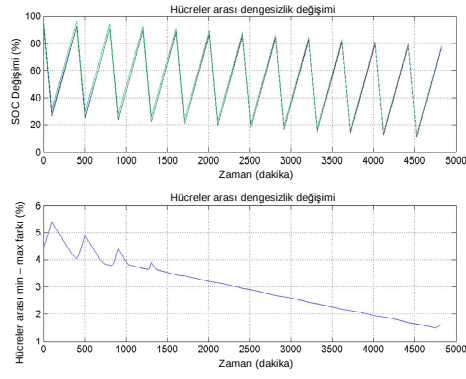
P1 sürüş profili, 3 ay, $\Delta SOC=0\%$, Dengeleme: şarj&deşarj



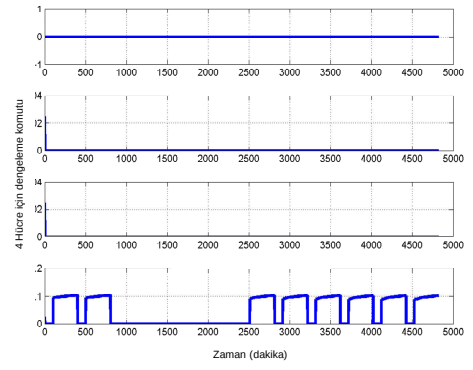
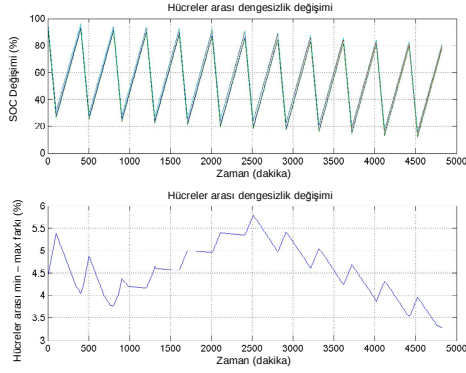
P2 sürüş profili, 3 ay, $\Delta SOC=0\%$, Dengeleme: şarj



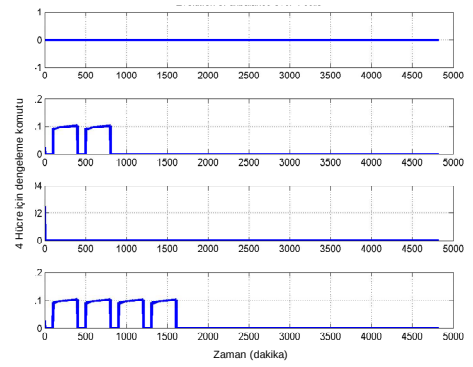
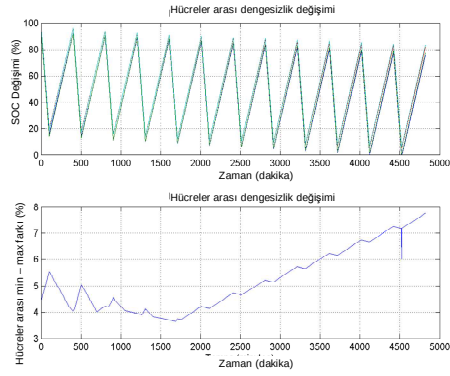
P3 sürüş profili, 3 ay, $\Delta SOC=0\%$, Dengeleme: şarj



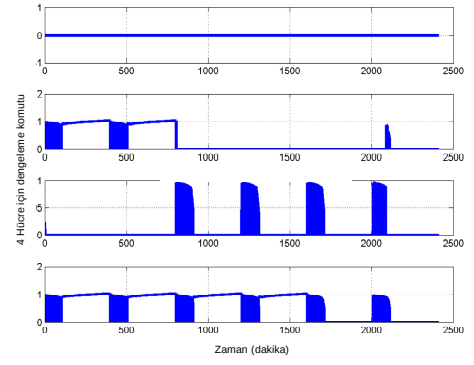
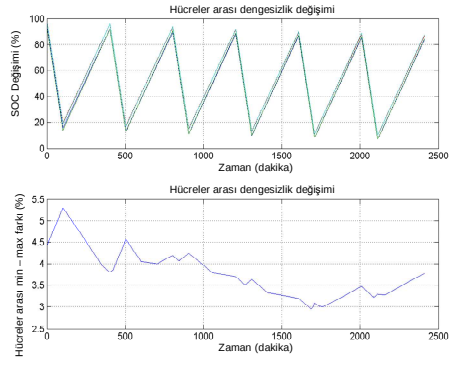
P3 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = 0\%$, Dengeleme: şarj



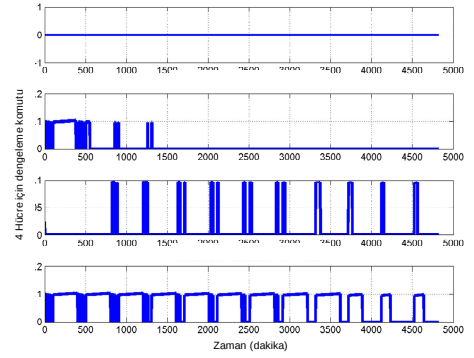
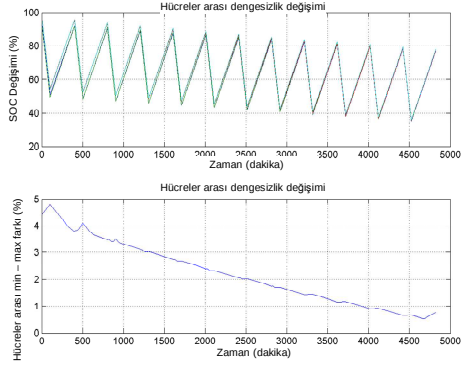
P3 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = 3\%$, Dengeleme: şarj&deşarj



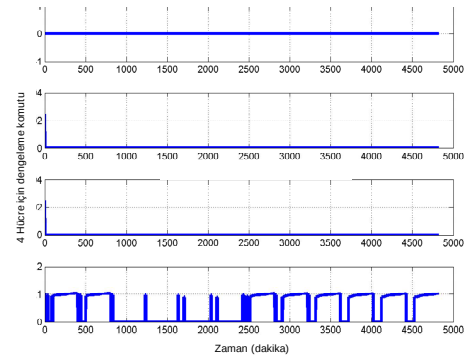
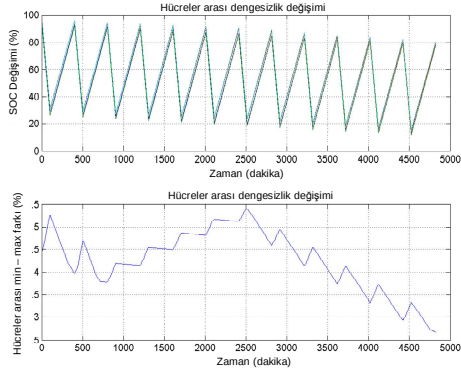
P3 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = 0\%$, Dengeleme: şarj&deşarj



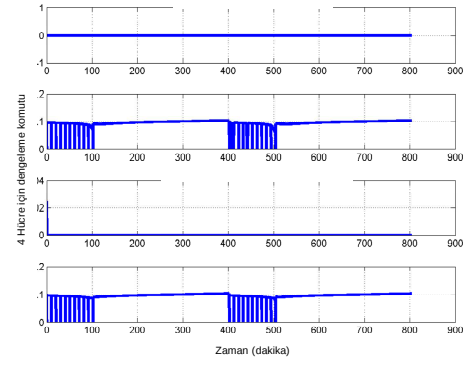
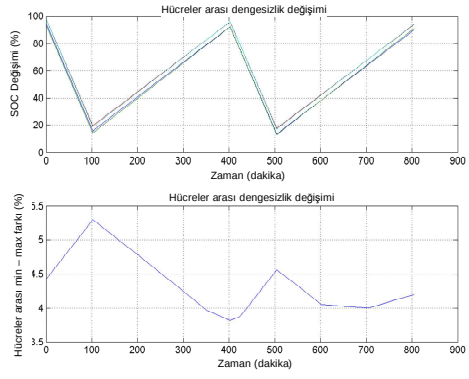
P3 sürüş profili, 3 ay, SOC=%0, Dengeleme: şarj&deşarj



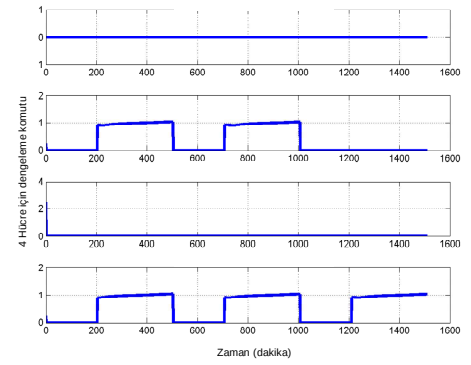
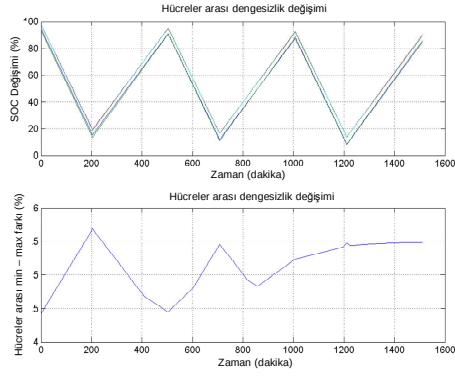
P3 sürüş profili, 6 ay, Δ SOC=%0, Dengeleme: şarj&deşarj



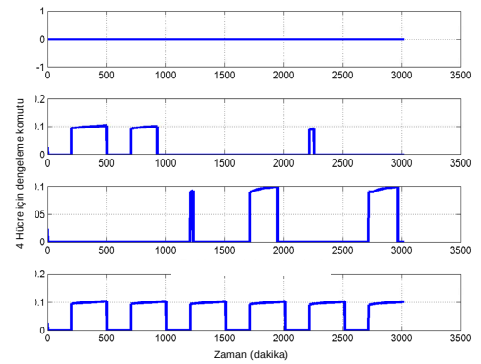
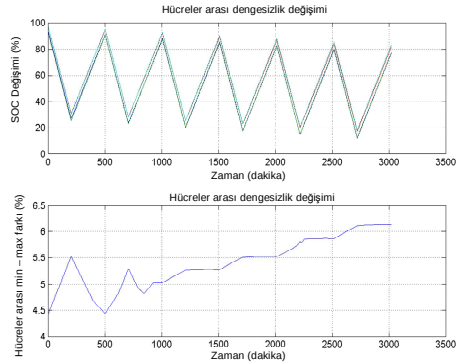
P3 sürüş profili, 6 ay, Δ SOC=%3, Dengeleme: şarj&deşarj



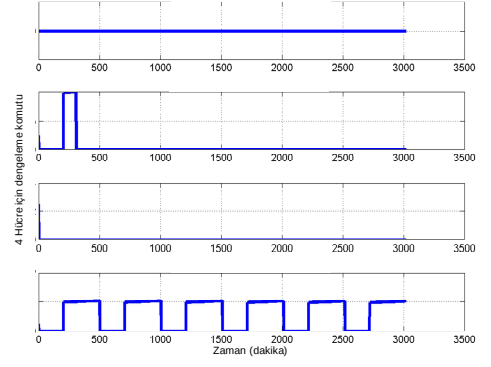
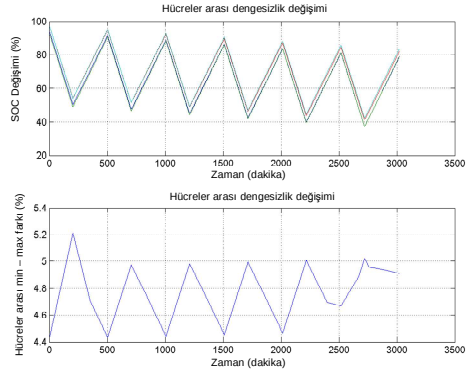
P3 sürüş profili, 3 ay, $\Delta SOC=0\%$, Dengeleme: şarj&deşarj



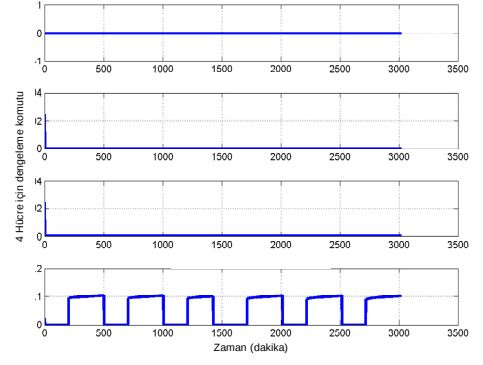
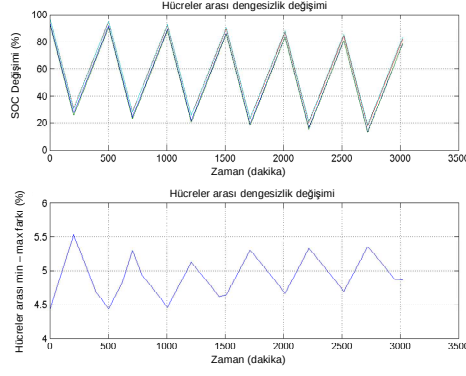
P4 sürüş profili, 3 ay, $\Delta SOC=0\%$, Dengeleme: şarj



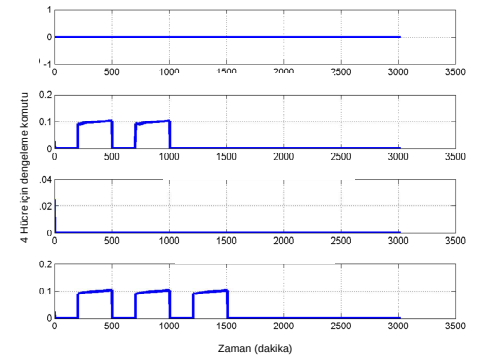
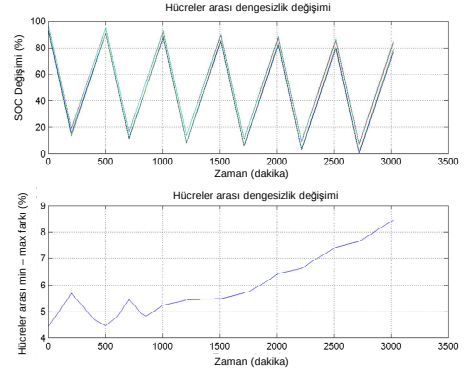
P3 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC=0\%$, Dengeleme: şarj



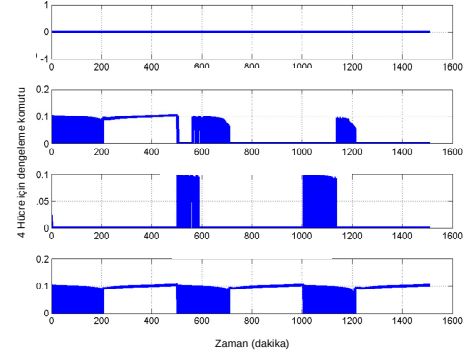
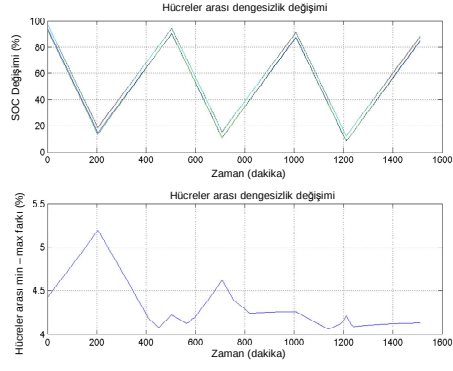
P4 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = \%1$, Dengeleme: şarj



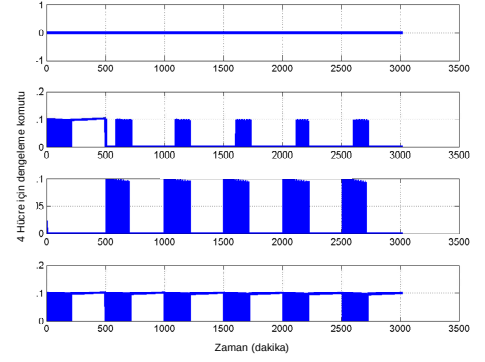
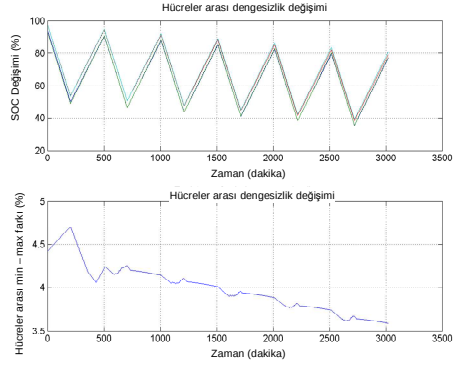
P4 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = \%3$, Dengeleme: şarj



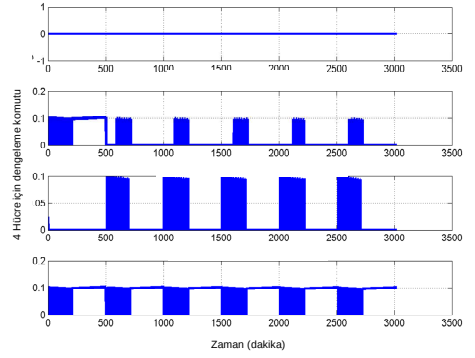
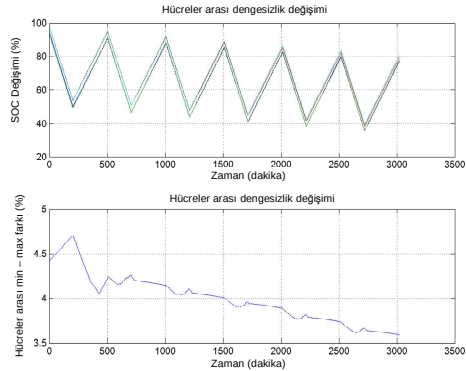
P4 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = \%0$, Dengeleme: şarj



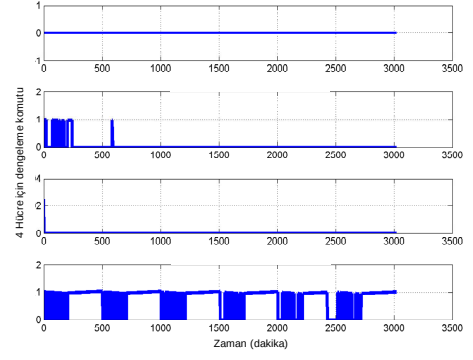
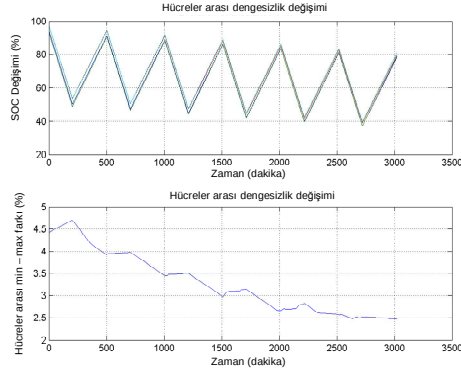
P4 sürüş profili, 3 ay, $\Delta SOC = 0\%$, Dengeleme: şarj&deşarj



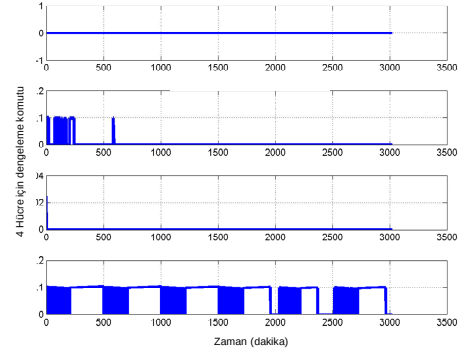
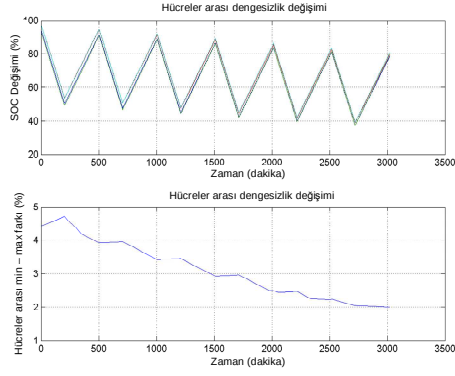
P4 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = 0\%$, Dengeleme: şarj&deşarj



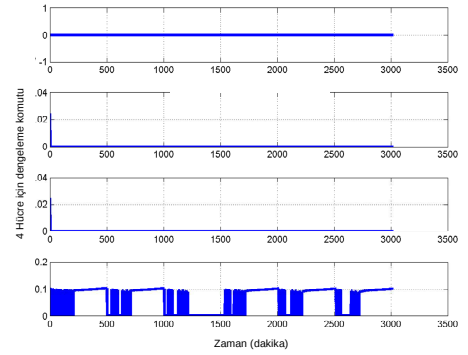
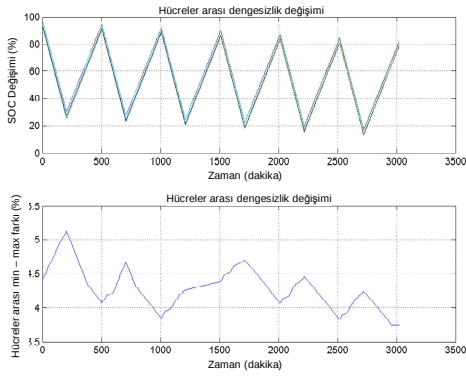
P4 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = 0\%$, Dengeleme: şarj&deşarj



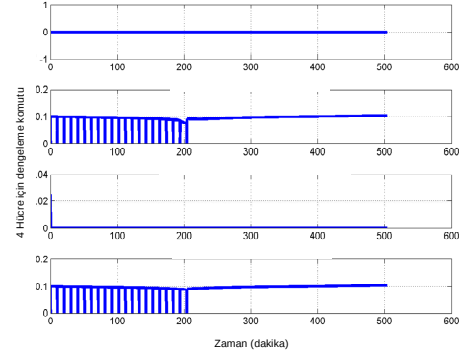
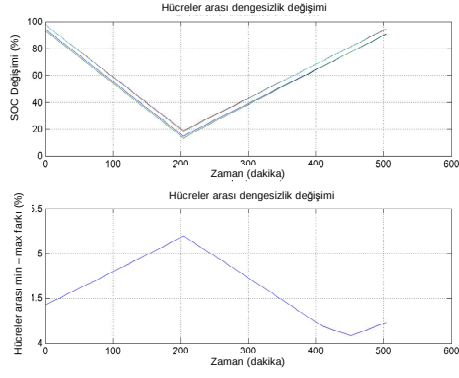
P4 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = \%1$, Dengeleme: şarj&deşarj



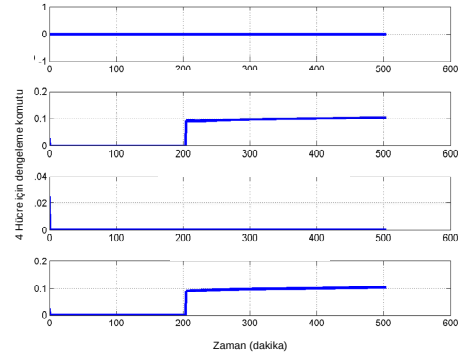
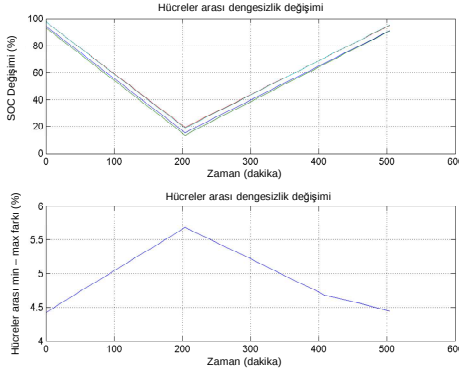
P4 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = \%1$, Dengeleme: şarj&deşarj



P4 sürüş profili, 6 ay, $\Delta SOC = \%3$, Dengeleme: şarj&deşarj



P5 sürüş profili, 3 ay, $\Delta SOC = \%1$, Dengeleme: şarj&deşarj

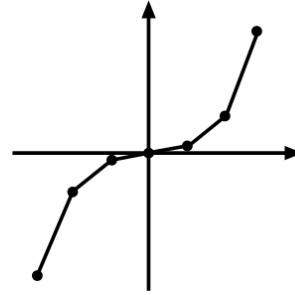


P5 sürüş profili, 3 ay, $\Delta SOC = \%0$, Dengeleme: şarj

EK 3: Veri Tabloları ve Kullanım Şekilleri

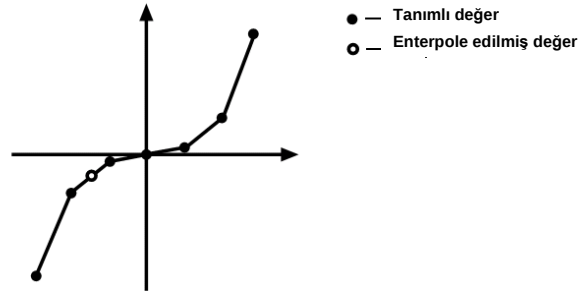
MATLAB / Simulink platformunda, veri tabloları $y = f(x)$ gibi bir fonksiyonun verilen x ve y vektörleri kullanılarak bir girişe karşılık çıkışın hesaplanmasında kullanılan yapılardır. Eğer verilen girişe karşılık tabloda denk gelen bir değer yok ise, çıkış değeri kestirim yolu ile belirlenir. Bu kestirim yapılırken enterpolasyon veya ekstrapolasyon yapılmaktadır. Aşağıdaki örnekte $y = x^3$ fonksiyonun veri tablosundan nasıl elde edildiği açıklanmıştır.

x	-3	-2	-1	0	1	2	3
y	-27	-8	-1	0	1	8	27



Çıkış değeri (y) $[-3,3]$ aralığında girişin (x) ayrık değerleri için belirlenir. (-2) girişine karşılık veri tablosunda çıkış değeri (-8) tespit edilir. Benzer şekilde (3) girişi için de (27) çıkışı tayin edilmektedir. Veri tablosuna daha önceden tanımlanmamış bir x değeri giriş olarak uygulanırsa çıkış interpolate veya ekstrapole edilir.

Enterpole edilmiş değer								
x	-3	-2	-1.5	-1	0	1	2	3
y	-27	-8	-4.5	-1	0	1	8	27



Giriş olarak (-1.5) değerinin verildiği durumda (x) için tanımlı bir değer olmadığından, (-1,-1) ile (-2,-8) değerleri arasında doğrusal enterpolasyon yapılır. Bu hesaplamanın sonucunda ise çıkış olarak (-4.5) döndürülür.

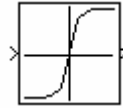
Benzer şekilde, $[-3,3]$ aralığının dışında (x) değeri veri tablosunda mevcut değilse ekstrapolasyon yöntemleri kullanılarak çıkış değeri döndürülür. Giriş olarak (4) değerinin girildiği bir durumda en yakın veri noktaları (2,8) ve (3,27) kullanılarak ekstrapolasyon yapılır ve sonuç olarak (46) değeri döndürülür. Veri tablolarının kullanılması matematiksel fonksiyonların hesaplanmasından daha basit ve hızlı bir çözüm yöntemi olduğundan modelleme çalışmalarında tercih edilir.

MATLAB / Simulink kütüphanesinde birden fazla veri tablosu çeşitli tanımlanmıştır. Bunlar;

1. Tek boyutlu veri tablosu
2. 2-boyutlu veri tablosu
3. n-boyutlu veri tablosu
4. Ön-şartlandırılmalı veri tablosu
5. Ön-şartlandırılmalı enterpolasyon veri tablosu
6. Dinamik veri tablosu

Farklı model tasarımlarında karşılaşılan farklı ihtiyaçlara göre veri tablosu seçimi yapılsa da en yaygın kullanılanları tek boyutlu, 2-boyutlu ve n-boyutlu veri tablolarıdır.

- **Tek boyutlu veri tablosu**



Bu model bloğu ile verilen x ve y vektörleri için $y = f(x)$ gibi bir fonksiyonun değeri hesaplanabilmektedir. x ve y vektörlerinin boyutları aynı olmak zorundadır. Ayrıca x vektörünün değerleri monotonik olarak artmalıdır (vektörde yer alan bir değer kendisinden önceki değere eşit veya daha büyük olması gerekmektedir).

Bloğun kullanılabilmesi için giriş vektörü 1-n boyutunda düzenlenmelidir. Blok aşağıdaki yöntemleri kullanarak çıkış değerini tayin eder.

Enterpolasyon – ekstrapolasyon (interpolation - extrapolation): Başlangıçta tanımlanmış yöntem doğrusal enterpolasyon – ekstrapolasyon yöntemidir. Eğer bir değer giriş vektöründeki bir değere denk geliyorsa çıkış vektöründeki ilgili eleman çıkış değeri olarak atanır. Eğer giriş vektöründe bir eşleşme durumu söz konusu olmaz ise blok uygun değer aralığında doğrusal enterpolasyon veya ekstrapolasyon yaparak çıkış değerini döndürür.

Enterpolasyon – son değer (interpolation – use end values): Bu yöntemde yukarıda tanımlanan doğrusal enterpolasyon teknikleri kullanılır fakat ekstrapolasyon yapılmaz. Bunun yerine çıkış vektöründeki son değerler kullanılır.

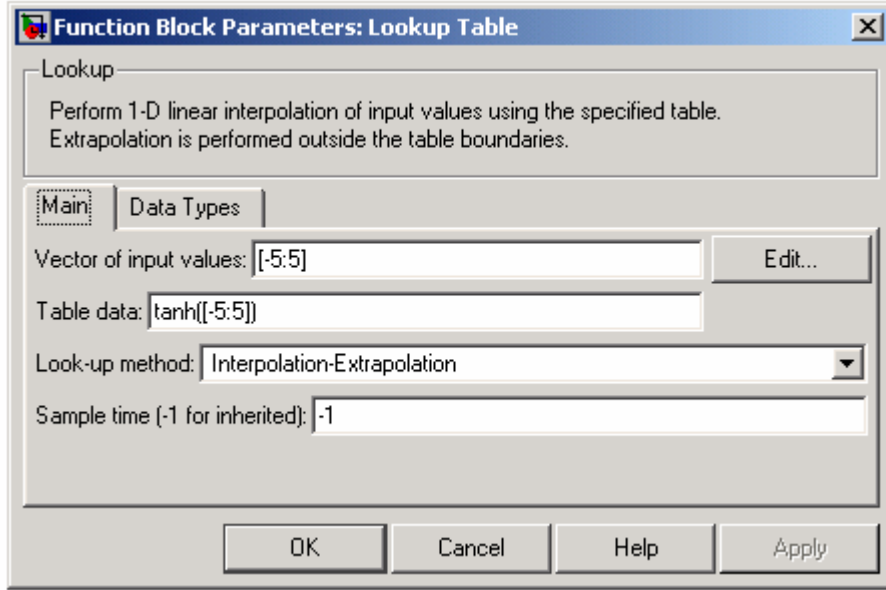
En yakın değer (use input nearest): Bu yöntemde enterpolasyon veya ekstrapolasyon yapılmaz. Bunun yerine vektörde yer almayan değer en yakın değere eşitlenir ve karşılık gelen çıkış değeri döndürülür.

Alt değer (use input below): Enterpolasyon veya ekstrapolasyon yapılmayan bir yöntemdir. Giriş değeri giriş vektöründe yok ise vektörde yer alan bir alt değer giriş olarak atanır ve karşılık çıkış elde edilir.

Üst değer (use input above): Enterpolasyon veya ekstrapolasyon yapılmayan bir yöntemdir. Giriş değeri giriş vektöründe yok ise vektörde yer alan bir üst değer giriş olarak atanır ve karşılık çıkış elde edilir.

Giriş veri tipleri Simulink' te tanımlanan her hangi bir veri tipi olabilir.

Aşağıda ilgili bloğun arayüz menüsü verilmiştir.



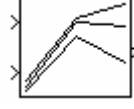
Giriş vektörü (vector of input values): Giriş vektörünün tanımlandığı alandır. Giriş vektörü çıkış vektörü ile aynı boyutta olmak zorundadır. Ayrıca giriş değerleri monotonik olarak artmalıdır.

Tablo verisi (table data): Çıkış vektörünün tanımlandığı alandır. Burada tanımlanan verinin boyutu giriş verisinin boyutu ile aynı olmak zorundadır.

Yöntem (Look-up method): Enterpolasyon – ekstrapolasyon, Enterpolasyon – son değer, En yakın değer, Alt değer ve Üst değer yöntemleri arasından birinin seçildiği alandır.

Örnekleme süresi (Sample time): Örnekler arası zaman aralığının tanımlandığı kısımdır. Modelin örnekleme zamanının kullanıldığı durumda ilgili değer (-1) olarak atanır.

- **2-boyutlu veri tablosu**



2-boyutlu veri tabloları ile daha önceden verilmiş x , y , z veri setleri için geçerli olan $z = f(x,y)$ fonksiyonu hesaplanabilir. Model bloğunun ilk giriş kapısı tablonun ilk boyutu, x , için kullanılır. Satır giriş değerleri (Row index input values) parametresi 1-m boyutlu x verileridir. Sütun giriş değerleri (Column index input values) parametresi ise 1-n boyutlu y verilerinden teşkil edilir. Tablo verisi (Table data) parametresi de m-n boyutlu bir matristir ve z veri setini oluşturur. Satır ve sütun verileri monotonik olarak artmalıdır (vektörde yer alan bir değer kendisinden önceki değere eşit veya daha büyük olması gerekmektedir).

Blok aşağıdaki yöntemleri kullanarak çıkış değerini tayin eder.

Enterpolasyon – ekstrapolasyon (interpolation - extrapolation): Başlangıçta tanımlanmış yöntem doğrusal enterpolasyon – ekstrapolasyon yöntemidir. Eğer bir değer giriş satır ve sütun vektörlerindeki bir değere denk geliyorsa çıkış matrisindeki ilgili eleman çıkış değeri olarak atanır. Eğer girişler satır ve sütun vektörleriyle eşleşmez ise blok matriste uygun değer aralıklarında doğrusal enterpolasyon veya ekstrapolasyon yaparak çıkış değerini döndürür.

Enterpolasyon – son değer (interpolation – use end values): Bu yöntemde yukarıda tanımlanan doğrusal enterpolasyon teknikleri kullanılır fakat ekstrapolasyon yapılmaz. Bunun yerine çıkış matrisindeki son değerler kullanılır.

En yakın değer (use input nearest): Bu yöntemde enterpolasyon veya ekstrapolasyon yapılmaz. Bunun yerine satır ve sütunda yer almayan değer en yakın değere eşitlenir ve karşılık gelen çıkış değeri döndürülür.

Alt değer (use input below): Enterpolasyon veya ekstrapolasyon yapılmayan bir yöntemdir. Giriş değerleri satır ve sütunda yok ise satırda ve sütunda yer alan bir alt değer giriş olarak atanır ve karşılık çıkış elde edilir.

Üst değer (use input above): Enterpolasyon veya ekstrapolasyon yapılmayan bir yöntemdir. Giriş değerleri satır ve sütunda yok ise satırda ve sütunda yer alan bir üst değer giriş olarak atanır ve karşılık çıkış elde edilir.

Giriş veri tipleri Simulink’ te tanımlanan her hangi bir veri tipi olabilir.

Aşağıda ilgili bloğun arayüz menüsü verilmiştir.

Function Block Parameters: Lookup Table (2-D)

Lookup2D
Performs 2-D linear interpolation of input values using the specified table. Extrapolation is performed outside the table boundaries. The first dimension corresponds to the top (or left) input port.

Main | Data Types

Row index input values: [1:3]

Column index input values: [1:3] Edit...

Table data: [4 5 6; 16 19 20; 10 18 23]

Look-up method: Interpolation-Extrapolation

Sample time (-1 for inherited): -1

OK Cancel Help Apply

Satır giriş değerleri (Row index input values): Veri tablosunun satır giriş elemanlarının vektör olarak tanımlandığı alandır. Vektör monotonik olarak artmalıdır.

Sütun giriş değerleri (Column index input values): Veri tablosunun sütun giriş elemanlarının vektör olarak tanımlandığı alandır. Vektör monotonik olarak artmalıdır.

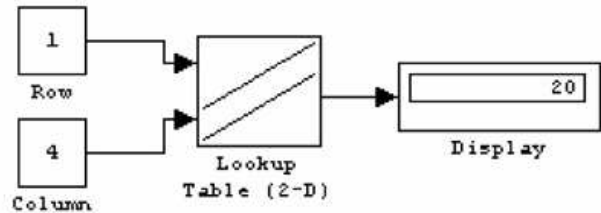
Tablo verisi (Table data): Çıkış değerlerini oluşturan matrisin tanımlandığı alandır. Matrisin boyutu tanımlı satır ve sütun vektörlerinin boyutlarıyla uyumlu olmak zorundadır.

Yöntem (Look-up method): Enterpolasyon – ekstrapolasyon, Enterpolasyon – son değer, En yakın değer, Alt değer ve Üst değer yöntemleri arasından birinin seçildiği alandır.

Örnekleme süresi (Sample time): Örnekler arası zaman aralığının tanımlandığı kısımdır. Modelin örnekleme zamanının kullanıldığı durumda ilgili değer (-1) olarak atanır.

2-boyutlu veri tablosunun kullanımına ilişkin aşağıdaki örnek verilebilir.

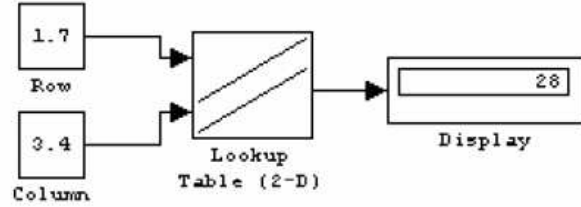
	3	4
1	10	20
2	30	40



Satır vektörü [1 2] ve sütun vektörünün [3 4] olarak verildiği bu örnekte tablo verisi de [10 20; 30 40] gibidir. Satır için (1), sütun için (4) seçimi yapıldığında, tablodan bu

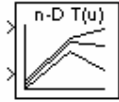
seçime karşılık (20) değeri döndürülmektedir. Bir sonraki örnekte ise aynı verilerin kullanıldığı fakat ara değer girişlerinin söz konusu olduğu bir örnek verilmiştir.

	3	3.4	4
1	10	14	20
1.7	24	28	34
2	30	34	40



Bu örnekte birinci giriş (1.7) iken ikinci giriş (3.4) olarak belirlenmiştir. Bu değerler giriş vektörlerinde enterpole edilerek çıkış (28) olarak hesaplanmaktadır.

- **n-boyutlu veri tablosu**



n-boyutlu veri tablosu N adet örneğe sahip bir fonksiyonun $y=F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, değişkenlerin enterpole edilerek çıkış değerinin hesaplanması amacıyla kullanılır. F fonksiyonunun sadece ampirik olarak bilindiği durumlarda da geçerlidir. Bu model bloğu ile etkin bir şekilde giriş değerleri seçilen parametrelere bağlı olarak enterpole edilir ve çıkış döndürülür. Desteklenen enterpolasyon yöntemleri arasında,

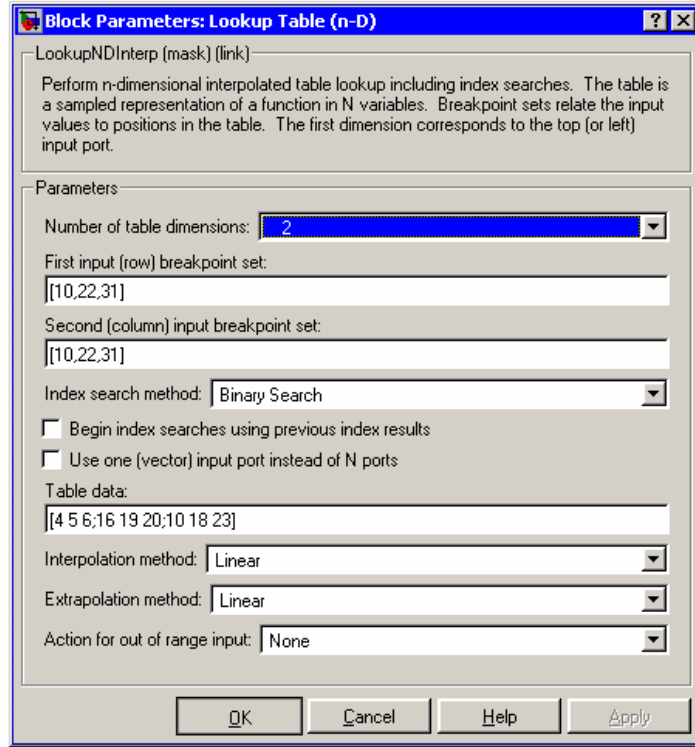
- Sabit yöntem
- Doğrusal yöntem
- Doğal (kübik) eğri yöntemi

mevcuttur. Bu bloğun kullanımı için bir dizi çıkış veri setleri tanımlanmaktadır. Bu değerler veri tablosunun satır ve sütunlarını oluşturmaktadır. Fakat burada farklı olan uygulama bu veri setlerinin sayfalar halinde düzenlenerek veri tablosunun n-boyutlu hale getirilmesidir.

Blok çıkışı, veri girişlerine bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

- Eğer istenen girişler daha önceden tanımlanmış giriş verileri ile eşleşiyorsa, ilgili satır, sütun ve sayfadaki karşılık gelen tablo verisi çıkış olarak döndürülür.
- Eğer istenen girişler satır ve sütun veri setlerinde mevcut değilse, uygun şekilde enterpolasyon yapılır. İstenen giriş tablonun hiçbir satır, sütun ve sayfasında yer almıyorsa istenen giriş varolan giriş verisi boyutunda sınırlandırılır veya tanımlanan şekilde ekstrapolasyon yapılır. Ekstrapolasyona izin verildiyse doğrusal veya kübik bir polinom kullanılarak ekstrapolasyon gerçekleştirilir.

Bu model bloğunun parametre seçim arayüzü aşağıda verilmiştir.



Tablo boyut sayısı (Number of table dimensions): Tablo verisinin kaç boyutlu olacağını tanımlandığı alandır. Bu sayı tablonun bağımsız değişken sayısını belirlemektedir ve böylece bloğun kaç adet girişinin olacağı da tanımlanmış olur.

Satır veri giriş seti (First input (row) breakpoint set): Tablonun satırlarının vektör olarak girildiği alandır. Vektör eleman değerleri monotonik olarak artmalıdır.

Sütun veri giriş seti (Second input (column) breakpoint set): Tablonun sütunlarının vektör olarak girildiği alandır. Vektör eleman değerleri monotonik olarak artmalıdır. Tablo boyut sayısının 2 veya daha büyük olduğu durumlarda aktiftir.

İndis arama yöntemi (Index search method): Bu alanda üç seçenek mevcuttur. Bu seçenekler eşit aralıklı noktalar (evenly spaced points), doğrusal arama (linear search) ve ikili arama (binary search)' dir. Bu seçeneklerin farklı durumlarda hesaplama süresi açısından getirdikleri farklı avantajlar vardır. Yanlış bir seçim yapılması durumunda modellenin çalışma süresi büyük ölçüde değişmektedir.

İndis aramasına bir önceki sonuçla başlanması (Begin index searches using previous index results): Buradaki seçeneğin aktif hale getirilmesi durumunda blok indisi bir önceki zaman adımında bulunan indis olarak tanımlanır. Giriş sinyallerinin çok fazla değişken olmadığı durumlarda çok önemli bir performans artışı gözlemlenebilir.

N adet giriş yerine bir adet adet kullanılması (Use one (vector) input port instead of N ports): Bağımsız her değişken için ayrı ayrı giriş yaratmak yerine N-boyutlu bir giriş kullanılabilir. Bu giriş için beklenen sinyal N-boyutlu bir tablo olmaktadır.

Tablo verisi (Table data): Çıkış değerleri tablosudur. Burada kullanılacak matris giriş veri vektörleri ile aynı boyuta sahip olmalıdır.

Enterpolasyon yöntemi (Interpolation method): Sabit, doğrusal ve kübik yöntemlerden birisinin seçildiği alandır.

Ekstrapolasyon yöntemi (Extrapolation method): Sabit, doğrusal ve kübik yöntemlerden birisinin seçildiği alandır.

Aralık dışı giriş durumu eylemi (Action for out of range input): Bu bölümde üç seçenek vardır. Bunlardan ilkinde her hangi bir eyleme geçilmez. İkincisinde uyarı ve sonuncusu da hata mesajıdır. Uyarı durumunda komut satırında bir uyarı mesajı gösterilirken, hata durumunda benzetimin çalıştırılmasına izin verilmez.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali Abdullah SAYIN

Doğum Yeri ve Tarihi : Dinar - 1982

Yabancı Dili : İngilizce - Fransızca

Eğitim Durumu

Lise : Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi (2000)

Lisans : Uludağ Üni. Müh.-Mim. Fak. Elektronik Müh. (2004)

Yüksek Lisans : Uludağ Üni. Fen Bil. Ens. Makina Müh. A.B.D. (2012)

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : Peugeot-Citroën SA / Santor (2006-2008)
Oyak-Renault (2008- ...)

İletişim : abdullah.sayin@renault.com / Oyak-Renault ARGE

Yayınları : 1- **Sayın, A.A., Yüksel, İ. 2011.** Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. TMMOB MMO 12. Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu, 13-14 Mayıs, 2011, Bursa.

2- **Sayın, A.A., Yüksel, İ. 2011.** Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. *Mühendis ve Makina*, 52 (615): 75-82.

3- **Sayın, A.A., Yüksel, İ. 2011.** Li-ion battery modeling and battery management: a case study on Renault Fluence ZE. IEEE International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics & Electromotion, 8-10 September, 2011, Istanbul.