

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR LİTYUM-İYON BATARYAYI HIZLI ŞARJ ETME
PARAMETRELERİNİN BAĞLAŞIK EŞDEĞER ELEKTRİK
DEVRE-ISI TRANSFERİ MODELİYLE GENETİK ALGORİTMA
TEMELLİ ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONU**

GÜLSÜM GÖZDE KADIZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR LİTYUM-İYON BATARYAYI HIZLI
ŞARJ ETME PARAMETRELERİNİN
BAĞLAŞIK EŞDEĞER ELEKTRİK DEVRE-
Sİ TRANSFERİ MODELİYLE GENETİK
ALGORİTMA TEMELLİ ÇOK AMAÇLI
OPTİMİZASYONU**

GÜLSÜM GÖZDE KADIZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ SALİH ÖZEN ÜNVERDİ

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED
SCIENCES

**GENETIC ALGORITHM-BASED MULTI-
OBJECTIVE OPTIMIZATION OF FAST-
CHARGING PARAMETERS OF A
LITHIUM-ION BATTERY WITH A
COUPLED EQUIVALENT ELECTRICAL
CIRCUIT-HEAT TRANSFER MODEL**

GÜLSÜM GÖZDE KADIZ
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASST. PROF. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ

GEBZE

2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/07/2023 tarih ve 2023/40 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/08/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Gülsüm Gözde Kadız'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Salih Özen ÜNVERDİ

ÜYE

: Doç. Dr. Gamze Gediz İliş

ÜYE

: Doç.Dr. Hadi GENCELİ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada, geliştirilmiş bir elektrik-termal bağlantı modeline dayalı olarak lityum-iyon piller için bir optimizasyon stratejisi ve soğuk ortamlarda şarj yöntemi önerilmiştir. HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization) deneyi aracılığıyla, ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin parametre tanımlaması yapılarak lityum iyon pilin elektrik-termal bağlantı modeli oluşturulmuştur. Şarj süresi ve şarj sıcaklık faktörü dikkate alınarak, lityum-iyon pilin çok aşamalı şarj stratejisi, Matlab GA Toolbox kullanılarak, meta sezgisel algoritmalarından birisi olan Genetik Algoritma ile optimize edilmiştir. Bu tez çalışmasının hedefi önerilen çok aşamalı sabit akım şarj yönteminin, geleneksel sabit akım-sabit voltaj (CC-CV) şarj yöntemiyle şarj edilen batarya örneklerinin sıcaklığına kıyasla şarj işlemi sırasındaki düşük sıcaklığın artışına katkı sağlayarak batarya bozulmasını önlemek kalmayıp aynı zamanda şarj süresini de azalttığını göstermektir. Bu nedenle, önerilen optimize şarj stratejisi, hızlı şarjın sağlanması temelinde şarj sıcaklığı artışını belirli bir ölçüde sınırlamakla ve batarya sisteminin termal yönetimi ve batarya şarj sisteminin tasarımı ve güvenli şarj yöntemi için belirli bir teorik temel sağlamıştır. Bu kapsamda eksi sıcaklıklarda literatürde sınırlı çalışma bulunduğundan çalışma yenilik içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Sıcaklık Artışı, Şarj Optimizasyonu, Lityum-iyon Piller, Elektrikli Araç.

SUMMARY

In this work, an optimization strategy for lithium-ion batteries based on an improved electrical-thermal coupling model and charging method in cold environments is proposed. Through HPPC (Hybrid Pulse Power Characterisation) experiment, the electrical-thermal junction model of the lithium-ion battery is established by parameter identification of the second-order RC equivalent circuit model. Considering the charging time and charging temperature factor, the multi-stage charging strategy of the lithium-ion battery is optimized using the genetic algorithm optimization method. The objective of this thesis is to demonstrate that the proposed multi-stage constant current charging method not only prevents battery degradation but also reduces the charging time by contributing to the increase of the low temperature during the charging process compared to the temperature of battery samples charged by the conventional constant current-constant voltage (CC-CV) charging method. Therefore, the proposed optimized charging strategy limits the charging temperature rise to a certain extent on the basis of ensuring fast charging and provides a certain theoretical basis for the thermal management of the battery system and the design of the battery charging system and safe charging method. In this context, since there are limited studies in the literature at minus temperatures, the study is novel.

Key Words: Temperature Rise, Low Temperature Charge Optimization, Lithium-ion batteries, Electric Vehicle.

TEŞEKKÜR

Başta, çalışmamda bana yol gösteren ve beni cesaretlendiren, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Salih Özen Ünverdi'ye,

Destekleyici ve işbirlikçi bir ortam yarattıkları, test konusunda yardımlarını esirgemedikleri için Birikim Pilleri Batarya Teknolojileri A.Ş. şirket yöneticilerine, Birikim Pilleri ARGE departmanı (BARGEM) müdürüme ve tüm çalışma arkadaşlarıma,

Beni bugünlere getiren, varlık sebeplerim ve en büyük destekçilerim canım annem ve babama ve her zaman yanımda olan kardeşime ve aynı dönemde kendisinde tez sürecinde olmasına rağmen çalışmalarım sırasında gece gündüz verdiği inanılmaz motivasyon ve destek için sevgili arkadaşım Yankı Gündüz Özvarış'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	5
2. PİL MODELLEME	7
2.1. Pil Modelleme Yöntemleri	7
2.1.1. Deneysel Model	8
2.1.2. Elektrokimyasal Model	8
2.1.3. Matematiksel Model	9
2.1.4. Elektriksel Devre Model	9
2.1.4.1. Eşdeğer Devre Model	9
2.2. Lityum-İyon Pil Eşdeğer Devre Modellerinin Parametre Tanımlaması	13
2.2.1. Açık Devre Voltajı	14
2.2.1.1. Lityum İyon Pil OCV-SoC Modeli	15
2.2.2. Pil Doluluk Oranı (SOC) Kestirim Metodları	17
2.2.3. Ohmik Direnç	20
2.2.4. Terminal Voltajı	22
2.2.5. Dinamik RC Parametreleri (Polarizasyon Direnci ve Kapasitansı)	22
2.3. Model Parametrelerinin Kestirilmesi	23
2.3.1. MATLAB'da Modelleme	24
2.3.2. Model Simülasyonu	25
3. TERMAL MODELLEME	31
4. LİTYUM İYON PİLLER İÇİN ŞARJ STRATEJİLERİ	41

4.1. Basit Şarj Yöntemleri	42
4.1.1. Sabit Akım Şarjı (CC)	42
4.1.2. Sabit Voltaj Şarjı (CV)	43
4.2. Optimize Edilmiş Şarj Yöntemleri	43
4.2.1. Sabit Akım-Sabit Voltaj (CC-CV) Şarj Yöntemi	43
4.2.2. Çok Kademeli Sabit Akım Şarjı (MSCC)	46
4.2.3. Pulse Şarjı	48
4.2.4. Boost Şarj	50
4.2.5. Model Bazlı Şarj Yöntemleri	52
4.2.6. Elektriksel-ısıl yaşlanma modeli	52
4.2.7. Diğer Optimizasyon Şarj Yöntemleri	52
4.3. Önerilen Hızlı Şarj Tekniği	53
4.3.1. Genetik Algoritma	54
4.3.2. Genetik Algoritmaların Temelleri	56
4.3.3. Önerilen Yeni Şarj, Çok Amaçlı Genetik Algoritma Optimizasyon	
Temelli Hızlı Şarj	59
4.3.3.1. Şarj Akımının Sınır Koşulunun Belirlenmesi	62
4.3.3.2. Amaç Fonksiyonunun Oluşturulması	63
4.3.3.3. Kısıtlama Fonksiyonunun Oluşturulması	64
5. DENEYLER, SİMÜLASYON SONUÇLARI VE GELECEK ÇALIŞMALAR	72
5.1. Deneysel Kurulum	72
5.1.1. Lityum İyon Hücresi	72
5.1.2. Hücre test sistemi	74
5.1.3. Deney Sonuçları	77
5.2. Simülasyon Kurulumu	80
5.2.1. CC-CV Simülasyonu	81
5.2.2. Önerilen Çok Amaçlı Genetik Algoritma Optimizasyon Temelli Hızlı	
Şarj Simülasyonu	83
5.2.3. Simülasyon Sonuçları	85
5.3. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar	88
5.3.1. Özet	88
5.3.2. Sonuç	89
5.3.3. Gelecek Çalışmalar	89

KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	96
EKLER	97



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
U_{ocv}	: Açık devre voltajı (V)
R_0	: Seri (ohmik) direnç (Ω)
R_1, R_2	: Blok direnç parametreleri (Ω)
C_1, C_2	: Blok kapasitör parametreleri (F)
U_t	: Terminal voltajı (V)
U_0	: İlk SoC' deki açık devre voltajı (V)
U_1, U_2	: RC blokları üzerindeki voltaj düşümleri (V)
SoC_t	: Mevcut pil doluluk oranı
SoC_0	: Başlangıç pil doluluk oranı
C_b	: Kullanılabilir maksimum kapasite (mAh)
η	: Coulomb verimliliği
$I_{L,t}$	: Yük akımını (A)
I_d	: Deşarj akımı (A)
I_c	: Şarj akımı (A)
t_d	: Deşarj süresi (sn)
t_c	: Şarj süresi (sn)
ΔI	: Akım artışı (A)
V_{batt}	: Batarya voltajı (V)
I_{batt}	: Batarya akımı (A)
V_{boost}	: Boost şarj voltajı (V)
I_{boost}	: Boost şarj akımı (A)
V_{ch}	: Şarj voltajı (V)
I_{ch}	: Şarj akımı (A)
I_{end}	: Son akımı (A)
I_{min}	: Üretici tarafından verilen min. Akımı (A)
I_{max}	: Üretici tarafından verilen max. Akımı (A)
N	: Şarj akımı sayısı
m	: Şarj akımı permütasyonları sayısı

ρ	:	Bataryanın ortalama yoğunluğu (kg/m ³)
c_p	:	Sabit basınçta ortalama özgül ısı (J/kg K)
v_e	:	Elektrolit hızı (m/s)
λ	:	Tüm yönlerdeki ortalama ısı iletkenlik (W/(m·K))
q	:	Isı üretim hızı (W)
h	:	Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
A_s	:	Batarya yüzey alanı (m ²)
T_∞	:	Çevre sıcaklığı (K)
m_{batt}	:	Bataryanın kütlesi (kg)
c_{batt}	:	Bataryanın özgül ısını (J/kg K)
T_{batt}	:	Bataryanın sıcaklığı (K)
Q_{gen}	:	Batarya tarafından üretilen ısı (W)
Q_{conv}	:	Batarya hücrelerinden çevresine ısı taşınımı (W)
$Q_{entropi}$	:	Reaksiyon ısı (W)
Q_{joule}	:	Joule ısı (W)
$Q_{polarizasyo}$	:	Polarizasyon ısı (W)
Q_s	:	Yan reaksiyon ısı (W)
F	:	Faraday sabiti
I	:	Şarj akımı (A)
n	:	Hücre reaksiyonunda transfer edilen elektronların mol sayısı
RC	:	Direnç-Kapasitör çifti
PNGV	:	Yeni Nesil Araçlar için Ortaklık
MSCC	:	Çok aşamalı sabit akım şarjı
CC	:	Sabit akım
CV	:	Sabit voltaj
CC-CV	:	Sabit akım sabit voltaj
PPCC	:	Pozitif darbeli şarj akımı
NPCC	:	Negatif darbeli şarj akımı
BPCC	:	Çift yönlü darbeli şarj akımı
ECM	:	Eşdeğer devre modeli
SoC	:	Şarj durumu
OCV	:	Açık devre voltajı

GA	:	Genetik Algoritma
LIB	:	Lityum iyon batarya
NCA	:	Lityum nikel kobalt alüminyum kimya katot malzemesi
LCO	:	Lityum kobalt Oksit
ILP	:	Tam sayı lineer programlama
PDE	:	Kısmi diferansiyel denklemler
ODE	:	Adi diferansiyel denklemler
MOGA	:	Çok amaçlı genetik algoritma
EA	:	Evrimsel algoritma
VEGA	:	Vektör değerlendirmeli genetik algoritma
HPPC	:	Hibrit darbe gücü karakterizasyonu
FEA	:	Sonlu elemanlar analizi
PSO	:	Parçacık sürüşü optimizasyonu
SA	:	Benzetimli tavlama optimizasyonu
ACO	:	Karınca kolonisi optimizasyonu
TS	:	Tabu arama optimizasyonu
BMS	:	Batarya yönetim sistemi
GUI	:	Grafiksel kullanıcı arayüzünü
SEI	:	Katı elektrolit arayüzü
EIS	:	Empedans spektroskopisi
AC	:	Alternatif akım
EMI	:	Elektromanyetik yayılma
EMC	:	Elektromanyetik uyumluluk
PI	:	Orantılı integral kontrolcüsü
ETNN	:	Elektrokimyasal termal nöral ağ
TR	:	Termal kaçak
GTÜ	:	Gebze Teknik Üniversitesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Rint Model (a), PNGV (b), Birinci dereceden direnç-kapasitör (RC) (c) ve İkinci dereceden RC (d) eşdeğer devre modelleri.	11
2.2: İkinci dereceden RC eşdeğer devre modeli.	13
2.3: 25°C, 0°C ve -10°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen HPPC testi akım ve voltaj grafiği.	15
2.4: Açık devre voltajının (OCV) şarj durumu (SoC) ile değişen eğrisi.	17
2.5: Amper-Saat Sayma (Coulomb Sayma) SoC Matlab/Simulink deşarj modeli.	19
2.6: -10 °C Sıcaklıkta deşarjın zamanla değişen SoC grafiği.	19
2.7: Tek bir darbede (0.5C) çekilen akıma karşı voltaj değişim grafiği (Bataryanın kimyasal karakteristiği).	20
2.8: -10 °C, 0 °C, 25 °C Sıcaklıktaki Hibrit darbe gücü karakterizasyonu (HPPC) test akım, voltaj profili.	21
2.9: -10 °C, 0 °C, 25 °C Sıcaklıktaki Hibrit darbe gücü karakterizasyonu (HPPC) test voltaj profili yakından görüntüsü.	21
2.10: Parametre tahmini akış şeması.	25
2.11: Simulink'te ikinci dereceden RC eşdeğer devre simülasyon modeli.	26
2.12: Simulink'te ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin terminal voltajı hesaplama alt modülü	26
2.13: Simulink'te ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin “Parametre Estimation Toolbox” arayüzünde hazırlanan parametre tahmin başlangıç durumu.	27
2.14: Simulink'te ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin “Parametre Estimation Toolbox” arayüzünde parametre tahmini.	27
2.15: Parametre tahmini sonrası 25 °C sıcaklıkta Simülasyon ve deney sonuçlarının voltaj grafiği.	28
2.16: Parametre tahmini sonrası 0 °C sıcaklıkta Simülasyon ve deney sonuçlarının voltaj grafiği.	28
2.17: Parametre tahmini sonrası -10 °C sıcaklıkta Simülasyon ve deney sonuçlarının voltaj grafiği.	29

2.18:	25 °C Sıcaklıktaki simülasyon sonucunda SoC değerlerine karşılık gelen U_{OCV} , R_0 , R_1 , R_2 , C_1 , C_2 parametre grafikleri.	29
2.19:	0 °C Sıcaklıktaki simülasyon sonucunda SoC değerlerine karşılık gelen U_{OCV} , R_0 , R_1 , R_2 , C_1 , C_2 parametre grafikleri.	30
2.20:	-10 °C Sıcaklıktaki simülasyon sonucunda SoC değerlerine karşılık gelen U_{OCV} , R_0 , R_1 , R_2 , C_1 , C_2 parametre grafikleri.	30
3.1:	LIB'da ısı üretimi ve transferi.	33
3.2:	Çok bağlantılı birleşik elektro-termal modelin şematik gösterimi.	34
3.3:	Ekonomik bilinçli ücretlendirme için genel çok amaçlı optimizasyon çerçevesi.	35
3.4:	Simulink'te ikinci dereceden RC modelinin ısı modellemesi.	39
3.5:	Simulink'te ikinci dereceden RC modelinin Simulink fiziksel modelleme kullanarak ısı modellemesi.	39
4.1:	CC-CV şarj tekniği akım ve gerilim grafiği.	44
4.2:	CC-CV şarj tekniği akış şeması.	45
4.3:	MSCC şarj tekniği akım ve gerilim grafiği.	47
4.4:	MSCC şarj tekniği akış şeması.	47
4.5:	a) Üst kesme gerilimine dayalı kaydırma koşulu ile b) SoC' ye dayalı kaydırma koşulu MSCC şarj teknikleri.	48
4.6:	a) Pozitif darbeli şarj akımı (PPCC), b) Çift Yönlü Darbeli Şarj Akımı (BPCC) grafiği.	49
4.7:	Boost şarj grafiği.	51
4.8:	Genetik algoritma akış şeması.	56
4.9:	Genetik algoritmanın temelleri.	57
4.10:	“main.m” dosyasının matlab kodu.	66
4.11:	“fitness_function.m” dosyasının matlab kodu.	68
4.12:	“voltage_constrain.m” dosyasının matlab kodu.	69
4.13:	Değişkenin alt ve üst sınırı ve değişken sayısı matlab kodu.	69
4.14:	Matlab GA Solver'ın grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI).	70
4.15:	Pareto sınırı grafiği.	71
5.1:	INR21700-50E batarya görseli.	73
5.2:	Farklı sıcaklık testleri için programlanabilir sıcaklık-nem odası.	75
5.3:	Test aşamasında chamber ve kontrol panelinin görüntüsü.	75

5.4:	Testler için hücreye yerleştirilen termokupl düzeneği.	76
5.5:	Test verileri işletim arayüzü.	76
5.6:	25 °C / 0 °C ve -10 °C CC-CV şarj testi grafikleri.	77
5.7:	25 °C / 0 °C ve -10 °C CC-CV şarj kapasite-zaman grafikleri.	79
5.8:	25 °C / 0 °C ve -10 °C şarj test sıcaklık grafikleri.	80
5.9:	CC-CV şarj algoritmasının genel Simulink modeli.	81
5.10:	CC-CV şarj Simulink bloğu.	82
5.11:	CC-CV blok genel yapısı.	82
5.12:	CC-CV şarj blok parametreleri.	82
5.13:	MOGA optimizasyon şarj algoritmasının Simulink modeli.	84
5.14:	MOGA optimizasyon şarj algoritmasının Simulink bloğu.	84
5.15:	25 °C sıcaklıktaki CC-CV şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve Simulink model sonuç grafikleri.	85
5.16:	25 °C sıcaklıktaki MOGA şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve Simulink model sonuç grafikleri.	86
5.17:	0 °C sıcaklıktaki CC-CV şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve Simulink model sonuç grafikleri.	86
5.18:	0 °C sıcaklıktaki MOGA şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve Simulink model sonuç grafikleri.	87
5.19:	-10 °C sıcaklıktaki CC-CV şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve Simulink model sonuç grafikleri.	87
5.20:	-10 °C sıcaklıktaki MOGA şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve Simulink model sonuç grafikleri.	88

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Farklı eşdeğer devre modellerinin karşılaştırılması.	12
3.1: Farklı termal modellerin karşılaştırılması.	32
5.1: Samsung 21700-50E model bataryanın özellikleri.	73
5.2: 25 °C / 0 °C ve -10 °C sıcaklıkta CC-CV şarj yönteminin deneysel olarak CC ve CV aşaması zaman ve kapasite değerleri tablosu.	78
5.3: 25 °C / 0 °C ve -10 °C Şarj-Deşarj test sıcaklık değerleri.	80

1. GİRİŞ

Günümüz batarya teknolojilerinden biri olan lityum iyon bataryalar taşınabilir elektronik cihazlar, otomotiv elektrik ve elektronik sistemleri ve yenilenebilir enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılan olgunlaşmış bir teknoloji ürünü olup, gün geçtikçe daha ekonomik olarak üretilebilmektedirler. Birçok ülke kendi lityum-iyon batarya projelerini başlatmıştır. Lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunlukları, yüksek açık devre voltajları, düşük kendi kendine deşarj hızları, hafıza etkisi olmaması, düşük bakım-onarım gereksinimleri ve uzun çevrim ömürleri gibi avantajlara sahiptir. Bu avantajlar, lityum-iyon bataryaların elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Ancak, lityum-iyon bataryaların düşük şarj hızları ve şarj yönteminin pil ömrü üzerindeki belirsiz etkileri gibi darboğazları vardır. Lityum-iyon bataryaların performansları ve ömürleri çalışma koşullarının yanı sıra şarj yöntemlerine bağlı olarak değişir.

Son yıllarda, lityum-iyon batarya şarj işleminin optimizasyonu önemli bir bilimsel araştırma konusudur. Genetik algoritmalar (GA'lar) karmaşık çok amaçlı problemleri çözmek için güçlü bir optimizasyon tekniği olarak büyük ilgi görmüştür. GA'lar doğal evrim ilkelerinden ilham alır ve en iyi çözüm kümesini bulmak için doğal seçim sürecini taklit eder. Batarya tasarımı ve optimizasyonu da dahil olmak üzere çeşitli mühendislik alanlarında başarıyla uygulanmışlardır.

Gelecekte küresel lityum rezervlerin giderek azalacağı göz önüne alındığında, lityum-iyon bataryaların yüksek verimle çalışmalarını sağlamak ve ömürlerini uzatmak için bu bataryaların şarj edildikleri koşullardaki elektro-kimyasal karakteristiklerine ve uygulama alan parametrelerine uygun şarj stratejileri ve ısı yönetim teknolojileri geliştirilmesi gereklidir.

Batarya şarj stratejisinde üç amaç vardır; şarj süresinin kısaltılması, şarj esnasında sıcaklık artışının düşürülmesi, şarj kapasitesinin arttırılması. Optimize edilmesi gereken hedefler ise şarj süresi ve şarj sıcaklık değeridir. Sıcaklık, bataryanın performansı ve emniyeti üzerinde önemli etkisi olan bir parametredir. Batarya sıcaklığı belirli bir sınırı aşarsa, katot kafes yapısı etkilenecek ve güvenlik riskleri ortaya çıkacaktır. Gerek bataryanın şarjı gerekse kullanımı sırasında sıcaklık artışını sınırlamak gerekir.

Termal kaçak düşük sıcaklıklarda meydana gelemez ancak bataryanın bozulmasına yol açar. Ayrıca, düşük çevre sıcaklıkları aşırı şarj olasılığını artırır, çünkü düşük sıcaklıklarda daha ciddi polarizasyon, sistemin şarj kesme voltajına daha kolay ulaşmasına ve aşmasına neden olur. Ayrıca, bozulma mekanizmaları değişebilir ve düşük sıcaklıklarda aşırı şarjın neden olduğu bozulma özellikleri oda sıcaklığındakilerden farklı olabilir. Düşük sıcaklıklarda, sistem katı elektrolit ara yüzey ayrışması, negatif ve pozitif elektrot ayrışması gibi bazı yan reaksiyonlar için gereken başlangıç sıcaklıklarına ulaşamayabilir. Ayrıca, düşük sıcaklıklar batarya polarizasyon direncini de artırarak negatif elektrot potansiyelinin Li/Li^+ 'ya göre 0 V'un altına düşmesine neden olabilir ve bu da lityum birikimini artıracaktır. Bununla birlikte, bataryalar tarafından üretilen ısı, düşük sıcaklıklarda batarya bozulmasını hafifletmek için sıcaklığı yeterince artırabilir. Verimli düşük sıcaklık pil uygulamaları için düşük sıcaklıklarda aşırı şarj sırasında bozulma özelliklerini tam olarak anlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Aşırı şarj sırasında bozunma özellikleri ve mekanizmaları üzerine yapılan araştırmaların çoğu oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup düşük sıcaklık etkileri üzerine çok az çalışma yapılmıştır. Liu ve arkadaşları [1] NCM 523 (%50 Nikel, %20 Kobalt ve %30 Mangan kimya katot malzemesi) pillerini 4,5 V'ta aşırı şarj döngüleriyle aşırı şarj etmiştir. Ana bozulma mekanizmasının pozitif NCM aktif malzemesinin kaybı ve ardından lityum envanterinin kaybı olduğunu, artan omik direncin ise en küçük etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Togasaki ve arkadaşları [2] 4,4 V'ta aşırı şarj edilen NCA pillerinin bozunma özelliklerini inceleyerek kapasitenin başlangıçta kademeli olarak azaldığını ve daha sonra daha hızlı bir şekilde azaldığını göstermiştir. Juarez-Robles ve arkadaşları [3] LCO bataryalarını 4,3-4,8 V'ta aşırı şarj etmiş ve sonuçlar 4,5 V'u aşan LCO bataryalarının belirgin hacim genişlemesine ve yüksek kapasite azalma oranlarına sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalar, çevresel sıcaklığın etkisini dikkate almadan şarj akımı ve şarj voltajının bozulma özellikleri üzerindeki etkisine odaklanmıştır.

Literatürde oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda aşırı şarjla ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır. Qian ve arkadaşları [4] NCM 111 (%10 Nikel, %10 Kobalt ve %80 Mangan kimya katot malzemesi) pillerini 45 °C'de 0,1C akımla birçok döngü boyunca %110 SoC'ye kadar aşırı şarj etmiş ve aşırı şarjlı pillerin hizmet ömrünün normal şarjlı pillerin üçte birine düştüğünü tespit etmiştir. Liu ve arkadaşları [5] NCM

622 (%60 Nikel, %20 Kobalt ve %20 Mangan kimya katot malzemesi) bataryaları -20 °C'de 24 saat depoladıktan sonra 20 °C'de aşırı şarj etmiş ve sonuç olarak maksimum termal kaçak sıcaklığının düştüğünü göstermiştir. Ouyang ve arkadaşları [6] çeşitli çevre sıcaklıklarında (0 °C, 20 °C, 50 °C ve 70 °C) aşırı şarj sırasında pil bozulmasını incelemiş ve 5 V'ta aşırı şarj edilen pillerin 4,5 V'ta aşırı şarj edilenlere göre çevre sıcaklıklarına daha duyarlı olduğunu bulmuştur. Dolayısıyla, sıcaklık, farklı sıcaklıklarda farklı bozulma özelliklerine sahip aşırı şarjın neden olduğu pil bozulmasını büyük ölçüde etkilemektedir. Oda sıcaklıklarında aşırı şarjın neden olduğu bozulma mekanizmaları kapsamlı bir şekilde incelenmiş olsada, düşük sıcaklıkların etkisi hala net değildir. Özellikle düşük sıcaklıkların etkisi ile oda sıcaklıkları arasındaki fark açıklığa kavuşturulmamıştır. Bataryaların düşük sıcaklıklarda aşırı şarj olma olasılığı daha yüksektir ve düşük sıcaklıklarda aşırı şarjın neden olduğu bozulma özellikleri oda sıcaklığındakilerden farklıdır.

Günümüzde, geleneksel CC-CV şarj yöntemine alternatif şarj stratejileri geliştirmek amacıyla, araştırmacılar Taguchi yöntemini, genetik algoritma (GA), karınca koloni sistemi, parçacık üşüşme, tam sayı lineer programlama (ILP) ve deneyim temelli çok amaçlı optimizasyon algoritmalarını kullanarak, batarya çalışma performansı, ömrü ile şarj kapasitesini, enerji kayıplarını ve şarj süresini etkileyen çeşitli faktörlerin etkileşimini göz önüne alarak, çok kademeli (adımlı) şarj yöntemlerinde her kademe için çok amaçlı optimal akım değerlerini belirleyebilmektedirler.

Güç lityum-iyon bataryalarının şarjı için, CC-CV yöntemi yerine, kutuplaşma voltajı ve yük kesme voltajı kısıtları altında, elektrik yükü durumuna bağlı olarak kabul edilebilir şarj akım değerini belirlemek suretiyle, kutuplaşma zaman sahibine göre belirlenen kabul edilebilir şarj akımı eğrisini esas alan, pratikte kullanılabilir bir şarj stratejisi geliştirilebileceği belirtilmiştir [7].

Değişken frekanslı darbeli şarj sistemiyle optimal şarj frekansını dinamik olarak uygulayarak batarya empedansını minimum seviyede, dolayısıyla ortalama şarj akımını maksimum seviyede tutmak suretiyle lityum-iyon batarya şarj hızını standart CC-CV sistemlerine göre %24, geleneksel sabit frekanslı darbeli şarj sistemlerine göre %10 arttırmak mümkündür [8]. Değişken voltaj darbeli şarj yöntemiyle lityum-iyon batarya şarj hızının CC-CV yöntemine göre %14 arttırılabileceği savunulmuştur [9].

Tamamen boşalmaya yüz tutmuş bir lityum-iyon bataryanın kısa bir sürede çok yüksek akımla anma kapasitesinin üçte birine kadar şarjını müteakiben standart yöntemlerden biriyle tam kapasitesine kadar şarj edilmesinin bataryaya zarar vermediği tespit edilmiştir [10].

Öte yandan, lityum-iyon bataryaların emniyetle çalışmalarını sağlamak amacıyla, batarya yaşlanma süreci parametrik test datasına dayalı batarya modelleri temelli batarya sağlığı öngörü ve izleme sistemleri geliştirilmiştir. Bunun ötesinde, bir lityum-iyon bataryanın fonksiyonelliği elektrik yükü ve sağlık durumları ile çalışma sıcaklığı ve şarj-deşarj geçmişine bağlıdır.

Günümüz elektrikli ulaşım araçlarının gereksinimi olan uzun menzil, hızlı şarj ve düşük sıcaklıklarda şarj edilebilirlik mevcut batarya teknolojileriyle sağlanamamaktadır. Düşük sıcaklıklarda bir lityum-iyon bataryanın kimyasal etkinliği azalır, iç direnci artar ve kapasitesi düşer. Lityum iyon bataryaların şarj sürelerinin uzunluğu, elektrikli araçların yaygın kullanımını kısıtlayan temel bir sorundur. Bu sorunu çözmek için çeşitli stratejiler önerilmiştir. Literatürde lityum iyon bataryaların çok kademeli (adımlı) CC-CV, voltaj temelli çok kademeli sabit akım, elektriksel yük temelli çok kademeli sabit akım gibi farklı hızlı şarj yöntemlerinin çok amaçlı optimizasyonları çeşitli algoritmalar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

Çok aşamalı sabit akımla şarj stratejilerinde, önceden belirlenen anahtarlama koşuluna (şarj kesme voltajı) göre her adımdaki şarj akımı optimize edilir. Amaç en kısa sürede, en az enerji kaybıyla, en yüksek şarj kapasitesine ulaşmaktır. Şarj süresi üst sınırı, batarya ömrüne ve ulaşım aracı sürüş menziline bağlı olarak belirlenen şarj edilmeyen kapasitenin alt ve üst sınırları, uygulanabilecek en küçük ve en büyük şarj akımları ve şarj akımının giderek azalması kısıtları altında çok amaçlı optimizasyon (pareto cephesini oluşturan hallere ağırlık çarpanları yöntemi uygulanarak, en kısa şarj süresinde, batarya azami sıcaklık sınırını aşmadan mümkün olan en az enerji kaybıyla, bataryayı mümkün olan en yüksek şarj haline ulaştıran, seçilen şarj kesme voltajına ve şarj kademeleri sayısına bağlı olarak, her kademe için şarj akımı değerlerinin belirlenmesi) gerçekleştirilir. Seçilen sabit akımla şarj kademeleri sayısı, şarj kesme voltajı ve amaçlanan hedeflerin ağırlık çarpanlarına bağlı olarak optimal sonuçlar değişir [11].

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Elektrikli otomobiller geniş uygulama olanaklarına sahiptir ve araç güç bataryalarının şarj teknolojisi, yeni enerji otomobillerinin geliştirilmesinde anahtar teknolojilerden biridir. Geleneksel lityum pil şarjı çoğunlukla sabit akım-sabit voltaj yöntemini benimser, ancak sürekli ve sık şarj uygulama, düşük sıcaklık koşullarında hızlandırılmış kapasite düşüşüne neden olur ve bu da verimsizlik, güvenlik sorunlarına yol açar. Lityum-iyon pillerin şarj süreciyle ilgili yukarıda belirtilen sorunları hedefleyen bu çalışma, geliştirilmiş bir elektrik-termal bağlantı modeline dayalı olarak lityum-iyon piller için bir optimizasyon stratejisi ve soğuk ortamlarda şarj yöntemi önermektedir. HPPC deneyi aracılığıyla, ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin parametre tanımlaması yapılacak ve lityum pilin elektrik-termal bağlantı modeli oluşturulacaktır. Şarj süresi ve şarj sıcaklık faktörü dikkate alınarak, lityum-iyon pilin çok aşamalı şarj stratejisi genetik optimizasyon algoritması ile optimize edilecektir.

Lityum-iyon bataryaların çalışma performanslarını yükseltmek, ömürlerini uzatmak ve mümkün olan en kısa sürede, en az enerji kaybıyla, emniyetli olarak hedeflenen kapasiteye kadar şarj edilebilmelerini sağlamak amacıyla optimal hızlı şarj stratejileri geliştirmek gerekir. Bu amaçla, bataryanın şarj durumunu tahmin etmek için bataryanın elektrik eşdeğer devre modelini ve ısı modelini içeren birleşik bir model kurulmalıdır. Bu model, bataryanın şarjı ve kullanılması esnasında sıcaklık artışını hesaplayarak izin verilen sınır değerlerin üzerine çıkmasını önlemek amacıyla kullanılır.

Bu çalışmanın hedefi önerilen çok aşamalı sabit akım şarj yönteminin, geleneksel CC-CV şarj yöntemiyle şarj edilen batarya örneklerinin sıcaklığına kıyasla şarj işlemi sırasındaki düşük sıcaklığın artışına katkı sağlayarak batarya bozulmasını önlemek kalmayıp aynı zamanda şarj süresini de azalttığını göstermektir. Bu nedenle, önerilen optimize şarj stratejisi, hızlı şarjın sağlanması temelinde şarj sıcaklığı artışını belirli bir ölçüde sınırlamakla ve batarya sisteminin termal yönetimi ve batarya şarj sisteminin tasarımı ve güvenli şarj yöntemi için belirli bir teorik temel sağlayacaktır.

Geleneksel lityum pil şarjı çoğunlukla sabit akım-sabit voltaj yöntemini benimser, ancak sürekli ve sık şarj uygulama koşulları, güvenlik sorunlarına kolayca yol açan sıcaklık artışına ve hızlandırılmış kapasite düşüşüne neden olur. Lityum iyon pillerin şarj işlemiyle ilgili yukarıda belirtilen sorunları hedefleyen bu çalışma,

geliştirilmiş bir elektrik-termal bağlantı modeline dayalı olarak lityum iyon piller için bir optimizasyon stratejisi ve şarj yöntemi önermektedir. Samsung INR21700-50E pillerinin HPPC deneyi sayesinde, ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin parametre tanımlaması tamamlanacak ve lityum pilin elektriksel-termal modeli kurulacak. Şarj süresi ve şarj sıcaklığı artışı gibi iki faktör dikkate alındığında, lityum-iyon pilin çok aşamalı şarj stratejisi, genetik optimizasyon algoritması tarafından optimize edilecektir.

Çok aşamalı şarj stratejisinde kademe sayısı az olduğunda, şarj kapasitesini garanti altına almak için şarj akımı düşürülerek batarya ısınma hızının azaltılması şarj süresini uzatır. Farklı ısınma hızına sahip kademelerin sayısı arttırılarak şarj süresi önemli ölçüde kısaltılabilir. Bununla birlikte, aşama sayısı belirli bir değere ulaştıktan sonra, artan aşama sayısı ile şarj süresinin kısılması ihmal edilebilir ölçüde azalır. Deneysel sonuçlar, önerilen şarj yönteminin bataryanın şarj edilebilen kapasitesini yükseltirken, şarj süresini ve şarj esnasında sıcaklık artışını optimize edilebildiğini göstermektedir. Dolayısıyla, şarj süresince emniyet açısından kabul edilebilir maksimum batarya sıcaklık kısıtlaması altında, şarj süresi, sabit şarj akımı uygulanacak kademe sayısı ve her kademe için uygulanacak şarj akımı, bataryanın şarj edilebilen kapasitesi, çalışma performansı ve ömrü azaltılmadan optimize edilmelidir.

Genetik algoritma (GA), biyolojik evrimden doğal seleksiyon ve en uygun olanın hayatta kalması ilkelerinden esinlenen seçim, çaprazlama ve mutasyonu içeren uyarlanabilir bir optimizasyon tekniğidir. GA, hem kısıtlı hem de kısıtlamasız optimizasyon problemlerini çözmek için etkili bir yöntemdir. GA, popülasyon olarak adlandırılan çözümün genetik bir temsilini ve çözümü değerlendirmek için kullanılan bir uygunluk fonksiyonunu gerektirir. GA'yı optimum çözümü bulmak için kullanmak için, önce bir çözüm popülasyonunu rastgele başlatın ve ardından popülasyonun optimum bir çözüme doğru gelişmesini sağlayan bir sonraki nesli üretmek için seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin tekrar tekrar uygulanması yoluyla. Bu sezgisel yöntem (bazen meta sezgisel olarak da adlandırılır) mühendislikteki optimizasyon problemlerine faydalı çözümler üretmek için rutin olarak kullanılır.

2. PİL MODELLEME

Pil modellemesi pillerin belirli yükleme koşulları altında nasıl tepki verdiğini belirlemek için yapılmaktadır. Pil modellerini kullanan çoğu uygulama için, pilin üzerindeki voltaj ve içinden akan akım da dahil olmak üzere pilin elektriksel özelliklerini doğru bir şekilde tahmin etmek önemlidir. Bugüne kadar literatürde farklı modelleme yöntemleri bulunmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında, farklı metodlar kısaca açıklanacak ve eşdeğer devre modelleri üzerinden pil modellemesinin derinlemesine analizi yapılacaktır. Pil durumları sensörler tarafından doğrudan ölçülemez ve bu değerler genellikle model tabanlı tahmin algoritmaları kullanılarak çıkarılır. Bu nedenle, doğru pil modelleme teknikleri son derece önemlidir. Bu tür teknikler, gerçek hayattaki uygulamalarda Li-Ion pil paketlerinin güvenilirliğini ve faydasını artırabilir. Bununla birlikte, bu modellerin karmaşıklığı, özellikle gereken büyük hesaplama çabası nedeniyle hala kritik bir sorun olmaya devam etmektedir. Bu nedenle, gerçek zamanlı olarak doğru sonuçlar için bu modelleri mikroişlemcilerde kullanmak için doğruluk ve karmaşıklık arasında bir denge sağlanması gerekir. Yüksek doğruluklu bir bilgisayar simülasyonunun geliştirilmesi gerekmektedir. Laboratuvar test sonuçları pil performansını gerçek hayatta tahmin edebilmeli ve bu nedenle modelleme ve simülasyon birbirini tamamlayıcı hareket etmelidir.

2.1. Pil Modelleme Yöntemleri

Pil performansını değişen derecelerde doğrulukla tahmin edebilen çeşitli pil modelleri mevcuttur. Modeller, karmaşıklıkların doğasına ve modelin uygulanması için gerekli testlere göre farklılık gösterir. Pil modelleri özelliklerine ve teorik temellerine göre dört kategoride sınıflandırılmıştır; elektrokimyasal, deneysel, istatistiksel ve elektriksel devre modelleri. Batarya içindeki elektrokimyasal reaksiyonlar temelinde, elektrokimyasal modeller diğer modellerin temelini oluşturur. Deneysel modeller, elektrokimyasal modeli basitleştirmek için matematiksel ifadeler kullanılarak geliştirilir. Elektriksel devre modelindeki devre bileşenleri elektrokimyasal modeldeki reaksiyonlara bir alternatif olarak görülebilir. Ayrıca, veri odaklı modeller, eğitim örneklerinin veri analizi yoluyla elektrokimyasal modelin performansını tanımlamak olarak görülebilir.

2.1.1. Deneyisel Model

Deneyisel modellerde, batarya terminal voltajı, SoC ve akımın matematiksel bir fonksiyonu olarak temsil edilir. Basitleştirilmiş bir elektrokimyasal model olarak kabul edilen deneyisel model, bir bataryanın temel doğrusal olmayan özelliklerini düşük dereceli polinom veya matematiksel ifadelerle temsil eder. Ampirik modelin doğruluğu daha fazla parametre eklenerek geliştirilebilir ve doğruluğu artar ancak batarya içinde daha fazla etki olduğunda, hesaplama yükü de artmaktadır.

2.1.2. Elektrokimyasal Model

Elektrokimyasal modeller, batarya mekanizması hakkında derinlemesine bilgi verir. Elektrokimyasal kinetiğe ve yük transfer sürecine göre, elektrokimyasal modeller batarya içindeki iç reaksiyonları tanımlamak amacıyla oluşturulmuştur. Elektrokimyasal modeller, Faraday'ın birinci yasası, Ohm yasası, difüzyonun Fick yasası ve Butler-Volmer denklemi gibi bir dizi fiziksel yasanın temelini oluşturur. Elektrokimyasal model, doğrusal olmayan bir Kısmi Diferansiyel Denklemler (PDE's) formunda ifade edilir. Bu nedenle, doğrudan analitik bir çözüme sahip olmak için, elektrokimyasal modeli kullanmanın ön koşulu PDE'leri Adi Diferansiyel Denklemlere (ODE'ler) dönüştürmektir. Elektrotlarda ve elektrolitte dağıtılmış elektrokimyasal reaksiyonları anlamak için uygundur. Bu tür modeller, mikroskobik parametrelerin (ör. aktif hücre malzemesi, konsantrasyon dağılımı) pilin makroskopik özelliklerine (ör. voltaj ve akım) bağımlılığını ilişkilendirir. Bu tür modeller, bir pilin iç mekanizmasının her ayrıntısını içerir ve bu da onları oldukça hassas hale getirir. Parametreler, birleştirilmiş zamanla değişen kısmi diferansiyel denklemler [12] ile ilişkilidir ve çözüm günlerce simülasyon süresi gerektirebilir. Ayrıca, önemli sayıda bilinmeyen parametre, zayıf model sağlamlığına (ekstrapolasyon altında) yol açan aşırı uydurma sorunları verir. Elektrokimyasal modeller, genellikle patent korumalı olan dahili pil bileşimi hakkında ayrıntılı bilgi gerektirir. Bununla birlikte, karmaşık sayısal algoritmalar, bu modellerin doğruluk değerlerini ortadan kaldıran ve onları pil yönetim sistemlerinde işe yaramaz hale getiren büyük bir hesaplama çabası gerektirir.

2.1.3. Matematiksel Model

Matematiksel modeller, bir pilin çalışma süresi özelliklerini tahmin etmek için deneysel ilişkilere dayanır. Matematiksel bir modelin örneklerinden biri, pillerin pulse deşarjı sırasında şarj geri kazanım mekanizmalarında yer alan belirsizliklerle ilgilenen stokastik yöntemlerin kullanımını içerir. Ancak bu yöntemler, devre optimizasyonu için gerekli olan herhangi bir akım-gerilim ilişkisi bilgisi sunmaz. Bazı analitik modeller, pil kapasitesi ve deşarj hızı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi tahmin edebilen Peukert yasası gibi basit denklemleri kullanır, ancak geri kazanım etkisini dikkate almaz. Matematiksel modellerin hesaplanması, elektrokimyasal ve eşdeğer devre modellerine kıyasla nispeten kolaydır. Ancak, bu modeller yalnızca belirli uygulama türleri için çalışır ve tipik olarak %5-20 aralığında çok düşük doğruluk sunar [12].

2.1.4. Elektriksel Devre Model

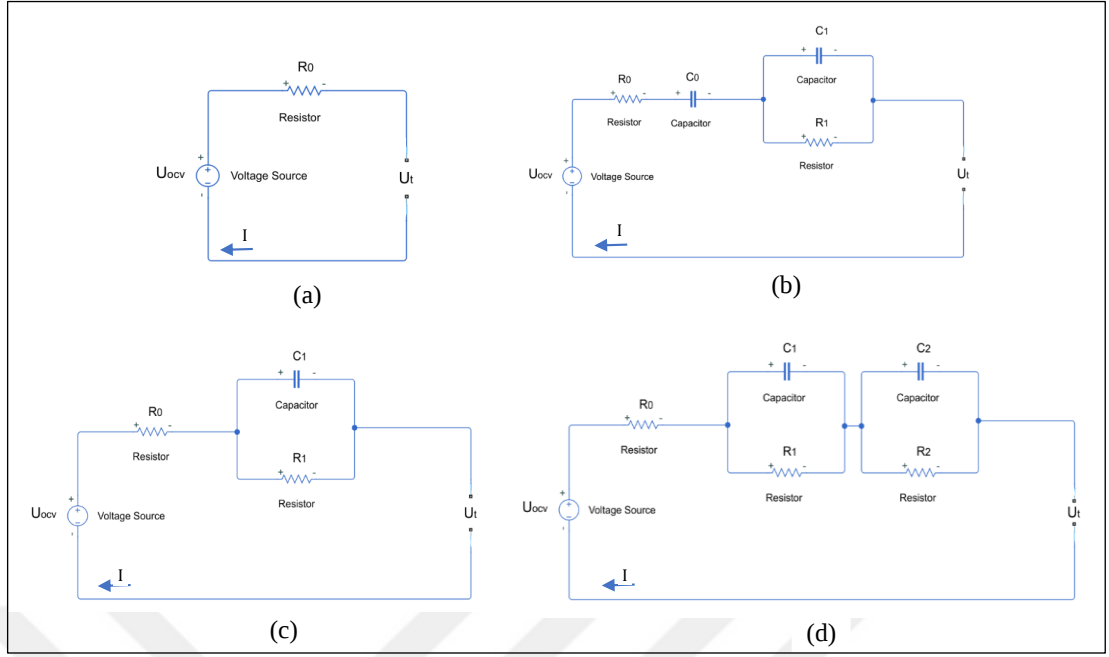
Elektriksel devre modelinde sistem modeli eşdeğer devreler üzerinden oluşturulmaktadır. Eşdeğer devreler ile oluşturulan pil modeli matematiksel işlemlere olanak sağlayarak pil modelindeki doğruluk performansını arttırmaktadır. Literatürde kullanılan çeşitli eşdeğer devre modeller bulunmaktadır.

2.1.4.1. Eşdeğer Devre Model

Eşdeğer devre modelleri (ECM), SoC ile ilgili bir voltaj kaynağı, dahili bir direnç ve girişler (akım, SoC ve sıcaklık) ile terminal voltajı arasındaki elektriksel ilişkiyi tanımlayabilen, pil performansını ölçmek için aktif (örn. kapasitörler) ve pasif (örn. dirençler) elektrikli bileşenler kullanır. Bu modeller, doğruluk ve hesaplama çabası arasında bir dengedir; bu, bu modellerin matematiksel modellerden daha yüksek doğruluğa ve elektrokimyasal modellerden daha düşük hesaplama çabasına sahip olduğu anlamına gelir. Yani ampirik modellerle karşılaştırıldığında, ECM'ler bataryanın elektriksel karakteristiğinin anlaşılması için çok daha kolaydır. Ayrıca, çok sayıda devre bileşeni ve bunların kombinasyonları nedeniyle ECM, araştırmacılara uygulamaları için uygun bir yapı tasarlama konusunda yeterli özgürlük sağlar. Genel olarak ECM'de direnç kendi kendine deşarjı, yüksek değerli kondansatör veya voltaj

kaynağı ise bataryanın OCV'sini gösterir. Farklı zaman sabitlerine sahip RC çiftleri, elektrolit ve gözenekli elektrotlardaki difüzyon sürecini ve elektrottaki yük transferi ve çift katman etkisini temsil eder. Bir laboratuvar da şarj ve deşarj deneyleri yapılarak bir ECM oluşturulabilir. ECM'ler, yüksek doğrulukla yüksek dinamik simülasyon sunan elektrikli araçların BMS'sinde geniş çapta kabul görmüştür. Bu modelleme yaklaşımında, pil performansı, hücre çalışma koşullarının ölçülmesi ve izlenmesinden doğrudan tahmin edilebilir. İlişkili eşdeğer devre, pil davranışını tahmin etmek için bir araç olarak kullanılır.

Rint modeli, Thevenin modeli, Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV) modeli bazı eşdeğer devre modelleridir. Literatürdeki en yaygın devreler birinci ve ikinci dereceden Thévenin eşdeğer devresi ve PNGV'dir (Yeni Nesil Araçlar için Ortaklık). Bu modeller iki önemli avantaj sunmaktadır: LIB'lerin statik ve dinamik özelliklerini yeterince temsil ederken aşırı karmaşık değildirler. Bu nedenle sorunsuz bir şekilde uygulanabilir ve parametreleri kolayca bulunabilir. Dört devrenin şeması Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Yapılan çalışmalarda değişen doğruluk derecelerine sahip ECM'ler geliştirmiştir. Bazıları yalnızca bir RC dalı olan ECM'leri uygularken, iki veya daha fazla RC dalı [13] olan ECM'ler gelişmiş doğruluk sunduğu sonucu çıkarılmıştır. Bununla birlikte, iki RC dalının ötesine daha fazla karmaşıklık eklemenin, ek hesaplama çabasıyla artan doğruluğu haklı çıkarmadığını kanıtlanmıştır [14]. Hatta bazı modeller, Li-iyon pillerdeki histerezisin etkisini modellemek için özel bileşenler içerir. Birinci dereceden RC modelinin şematik diyagramı Şekil 2.1a'da gösterilmektedir; burada kontrol edilebilir voltaj U_{OCV} , genellikle SoC ile doğrusal olmayan bir şekilde değişen lityum-iyon pilin açık devre voltajını, R_0 ise elektrolit direncini ve pilin bağlantı direncini tanımlayan lityum-iyon pilin omik direncini göstermektedir, R_1 polarizasyon direncini, C_1 polarizasyon kapasitansını, I akım sensöründen doğrudan ölçülebilen yükten geçen akımı ve U_t bir voltaj sensöründen doğrudan ölçülebilen bataryanın terminal voltajını gösterir. Paralel RC ağı lityum-iyon pilin doğrusal olmayan polarizasyon tepkisini tanımlar ve I deşarj için pozitif ve şarj için negatiftir.



Şekil 2.1: Rint Model (a), PNGV (b), Birinci dereceden direnç-kapasitör (RC) (c) ve İkinci dereceden RC (d) eşdeğer devre modelleri.

İkinci dereceden RC modelinin şematik diyagramı Şekil 2.1.c'de gösterilmektedir; burada U_{OCV} , R_0 , I ve U_t lityum-iyon pilin doğrusal olmayan polarizasyon tepkisini tanımlamak için iki paralel RC ağı olması dışında, birinci dereceden RC modelindeki ile aynı anlamlara sahiptir.

Hepsinde, U_{OCV} gerilimi SoC ile doğrusal olmayan bir şekilde değişen açık devre gerilimi (OCV), R_0 elektrolitin omik direnci ve batarya bağlantı direnci, R_1, R_2 polarizasyon direnci, C_1, C_2 polarizasyon kapasitansı ve U_t yük gerilimidir. RC dalı, LIB'lerin doğrusal olmayan polarizasyonunu tanımlamaktadır. İkinci dereceden Thévenin devresinde iki RC dalı bulunurken, PNGV devresinde OCV, $1/U_{ocv}$ ile ilgili ek bir kapasitans terimi vardır.

Tablo 2.1: Farklı eşdeğer devre modellerinin karşılaştırılması.

Model	Avantaj	Dezavantaj
Rint Model	Basit, temel, lineer model, simülasyon çalışma zamanı düşük ve karmaşık değil.	Pilin dinamik davranışı mümkün değil, Düşük doğruluk.
PNGV	Thevenin 1 RC modelinin geliştirilmiş bir versiyonudur. Daha iyi hücre davranışını temsil etmek için 2 kapasitör kullanır.	Simülasyon sırasında doğruluğu azaltan kapasitör nedeniyle bazı hatalar meydana gelebilir.
1 RC Thevenin	Birinci dereceden model ohmik direnç ve kimyasal direnci hesaba katabilir. Çalışma zamanı ve karmaşıklığı düşüktür.	Tam olarak doğru değil, sadece birkaç dinamik senaryoda kullanılabilir.
2 RC Thevenin	1 RC'nin genişletilmiş modeli. Üç ana hücre direnci türü hesaba katılır. 1 RC ve PNGV'den daha doğru. Simülasyonun karmaşıklığı biraz daha yüksektir, ancak çok iyi bir doğruluğa sahiptir.	Model karmaşıklığı yüksektir ve bazı karmaşık modelleme denklemlerini içerir.

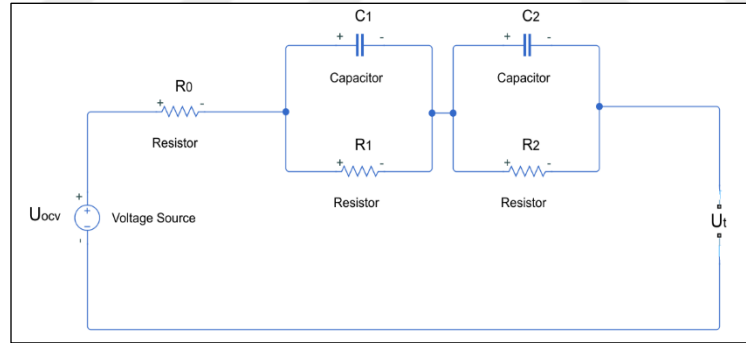
Referans [15]'da birinci dereceden RC modeli ve ikinci dereceden RC modeli karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve ECM'lerin, elektrokimyasal modellerin aksine hesaplama süresinde çok büyük bir avantaja sahip elektrokimyasal modele dayalı simülasyon süresi 9600 s [16] kadar uzunken, bu makaledeki eşdeğer devre modeline dayalı simülasyon süresi ihmal edilebilir düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca iki RC modelinin iki temsili çalışma koşulu altındaki maksimum bağıl hatalarının tümü %2'den azdır ve bu da genellikle gelişmiş BMS'ler için ECM'ye dayalı algoritmalar gibi pratik mühendislik hesaplamaları için hassasiyet gereksinimlerini karşılayabilir. İkinci dereceden RC modeli, hem basit hem de karmaşık deşarj koşullarında birinci dereceden RC modelinin aksine çıkış hatasını iyileştirmiştir, ancak çok fazla iyileştirme sağlamamıştır. Bu nedenle, taşınabilir tüketici elektroniği gibi sıradan uygulamalar için birinci dereceden RC modeli tercih edilebildiği ancak, otomotiv ve havacılık gibi katı uygulamalar için ikinci dereceden RC modeli tercih edilebileceği ve lityum-iyon pillerin eşdeğer devre modellemesi için pratik kontrol sistemlerindeki uygulamalar açısından büyük bir öğretici öneme sahiptir sonucu çıkarılmıştır.

Simülasyon programlarında kullanabilmek üzere seçilmesi düşünülen ilk model bataryanın elektrokimyasal iç yapısını tek bir iç direnç ile gösteren basit doğrusal devre

modelidir. Fakat yapılan literatür çalışmalarında doğrusal modelin geçici rejim durumlarında iyi sonuç vermediği görüldüğü için, daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek amacıyla iç dirence seri bağlı R, C yapısı eklenerek oluşturulan 2. Dereceden Thevenin modeli ile tez çalışmasına devam edilmiştir.

2.2. Lityum-İyon Pil Eşdeğer Devre Modellinin Parametre Tanımlaması

Eşdeğer devre modelleri, bataryaların dinamik özelliklerini simüle etmek için gerilim kaynakları, dirençler ve kapasitörlerden oluşan bir devre kullanır. Böylece batarya çalışmasında gösterilen gerilim ve akım arasındaki ilişkiyi tanımlanır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, bir ECM farklı elektrik bileşenlerinden oluşur. Açık devre voltajını temsil eden bir voltaj kaynağı, voltaj yanıtındaki gecikmeyi temsil eden paralel RC ağları ve hücrenin iç direncini temsil eden bir direnç ECM'nin ana bileşenleridir. Şekil 2.2, bu tez çalışmasında uygulanan bir eşdeğer devre modelini göstermektedir.



Şekil 2.2: İkinci dereceden RC eşdeğer devre modeli.

Bu eşdeğer devre modelinde yer alan parametreler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2.1. Açık Devre Voltajı

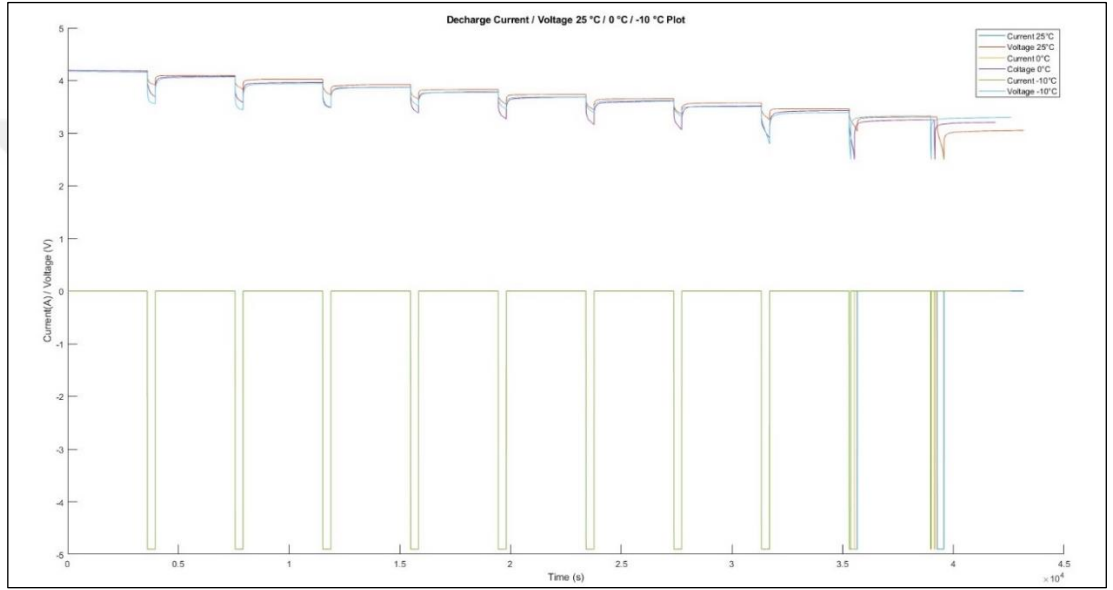
Bataryanın açık devre voltajı (OCV), batarya açık devre durumunda bırakıldığında bataryanın kararlı voltaj değeridir. Batarya şarj edildikten sonra, batarya terminal voltajı açık devre durumunda bırakıldığında kademeli olarak sabit bir değere düşecektir; deşarjdan sonra batarya ile ilgili olarak, yük kaldırıldıktan sonra batarya terminal voltajı kademeli olarak sabit bir değere yükselecektir. Bataryanın elektromotor kuvveti temel olarak bataryanın açık devre voltajına eşittir, batarya elektromotor kuvveti ise bataryada depolanan enerji miktarını ölçmek için kullanılan ölçütlerden biridir. Bu nedenle, pil OCV'si ile pil SoC'si arasında belirli bir ilişki vardır. Sabit yöntemin doğrudan bir yöntem olduğu ve nispeten daha doğru olduğu OCV'yi elde etmenin birkaç yolu vardır. Durağan yöntemde pil OCV ve SoC arasındaki ilişkiyi elde etmek için pil kapasitesi, standart şarj yöntemiyle tamamen şarj edilir; sonrasında 25°C, 0°C ve -10°C ortam sıcaklıkları için sırasıyla darbeli deşarj testleri gerçekleştirilmiştir.

Hibrit darbe gücü karakterizasyonu (HPPC) testi, darbe testleri yapmak için tipik bir test yöntemidir. Darbe testi, HPPC testine referansla gerçekleştirilir. Darbe deşarj testi, çeşitli SoC'lerde ve sıcaklıklarda batarya hücresi voltaj tepkisini karakterize eder.

Normal CC-CV şarj prosedürünü kullanan test aşağıdaki gibidir: İlk olarak, pil hücreleri CC-CV şarj protokolü kullanılır ve bir hücrenin 100'e kadar tamamen şarj edildiği kabul edilir. CC-CV şarj rejimi tamamlandıktan sonra % SoC ve kararlı durum için deşarj ve şarj testleri gerçekleştirilmiştir. Batarya test çalışması sırasında, akım ve voltajın örnekleme süresi 1 s idi. Batarya ortam sıcaklıkları 25°C, 0°C ve -10°C olarak ayarlanmıştır. Batarya darbe test profili Şekil 2.3'de gösterilmektedir. C oranı, pilin belirtilen süre içindeki çıkış değerini ifade eder ve çıkış değeri, nominal kapasitenin katına eşittir. Samsung INR21700-50E pillerin 25°C, 0°C ve -10°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen testlerinin prosedürü aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

- 1-) Pil full şarj edilir. (Şarj: 0.5C(2450mA), 4.2V, 0.02C(98mA) cutoff)
- 2-) 1 saat dinlendirilir.
- 3-) Pil 1C (4900 mA) akım oranında 6 dakika deşarj edilir.
- 4-) Pil 1 saat dinlendirilir.
- 5-) 3. Ve 4. Adımlar 10 kez tekrar edilip deşarj işlemi sonlanır.

Ortam sıcaklığı 10°C'nin altında olan testler için, teste herhangi bir rejenerasyon dahil edilmez. Her testten sonra pil 0.5 C oranında 4.2V, 98mA kesilmiş, pil sıcaklığı deşarj sıcaklığı ile aynı olacak şekilde CC-CV prosedüründe şarj edilmiştir. Şekil 2.3'de 100, 90, 80, 70..., 20, 10, %0 SOC' de gerçekleştirilen darbeli deşarj HPPC testi için akım ve voltaj grafiği verilmiştir. Kaydedilen veri dosyası darbeleri ve darbeler arasındaki müteakip deşarjları içerir, ilerleyen aşamalarda her darbe seti için SoC' yi belirlemek üzere amper-saat verilerine bakılmıştır.



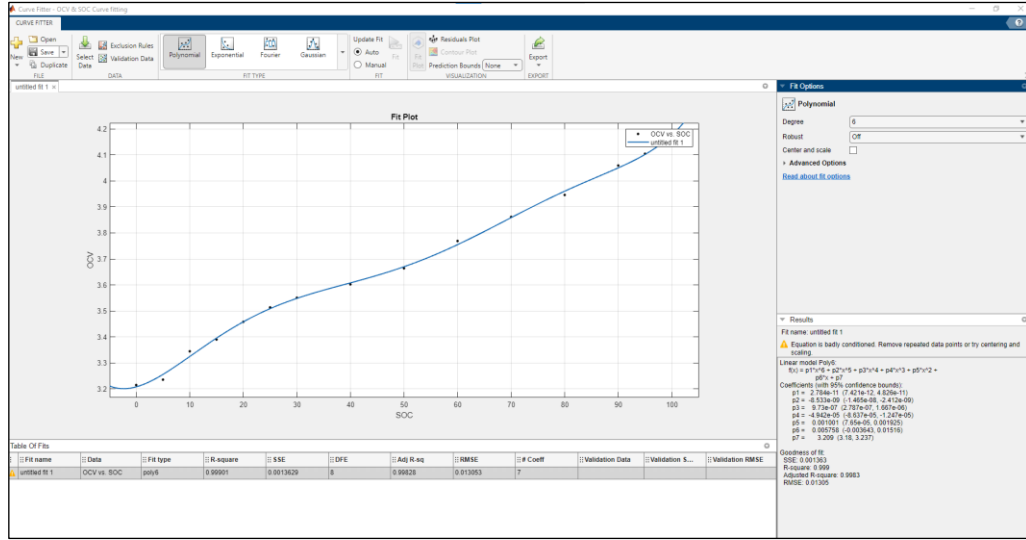
Şekil 2.3: 25°C, 0°C ve -10°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen HPPC testi akım ve voltaj grafiği.

2.2.1.1. Lityum İyon Pil OCV-SoC Modeli

Batarya açık devre voltajı, SoC ile doğrusal olmayan güçlü bir ilişkiye sahiptir. Lityum-iyon pillerin OCV'si ile SoC'si arasındaki ilişki temelde işlevsel bir ilişkidir. OCV ve SoC arasındaki monoton artan ilişkiye göre, OCV'nin birkaç test noktasının SoC aralığına ve karşılık gelen modellere uydurulmasıyla OCV-SoC eğrileri elde edilir. Bu nedenle, OCV modellemesi, OCV eğrisini elde etmek için anahtar adımdır ve OCV modelinin kalitesi, OCV'nin uygulanabilirliğini ve doğruluğunu doğrudan etkiler.

Açık devre voltajı (OCV), elektrot malzemelerindeki elektronik enerji değişimlerini analiz etmek ve pil şarj durumunu (SoC) tahmin etmek ve pil takımını yönetmek için kullanılan lityum iyon pillerin önemli bir karakteristik parametresidir. Bu nedenle, doğru OCV modellemesi, lityum iyon pil yönetimi için büyük önem taşır. [17]' de yüksek kapasiteli lityum-iyon pillerin farklı sıcaklıklardaki karakteristikleri ele alınmış ve farklı sıcaklıklardaki OCV-SoC karakteristik eğrileri modelleme, üstel, polinom, günah fonksiyonlarının toplamı ve Gauss model uydurma yöntemi ile incelenmiştir. Darbe testi verileri. 45 °C sıcaklıkta üstel model ($n = 2$), polinom modeli ($n = 3 \sim 7$), günah fonksiyonlarının toplamı modeli ($n = 3$) ve Gauss modeli ($n = 4$) ile OCV-SOC eğrilerini uydurma parametreleri 45°C, 25 °C, 0 °C ve -20°C elde edilmiş ve hatalar analiz edilmiştir. Çalışmada ki deneysel sonuçlar, pilin çalışma sıcaklığının OCV-SOC karakteristiğini önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Bu nedenle, modelin doğruluğunu artırmak ve pil durumu tahmininin doğruluğunu iyileştirmek için bu faktörlerin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Modelin polinom uydurması, mühendislikte yaygın olarak uygulanabilmesi için açık ve basittir. Ayrıca, pili modellerken sıcaklık faktörünü dikkate almak anlamlıdır, çünkü pilin sıcaklığı lityum-iyon pilin performansı ve ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve pil durumunun yanlış tahmin edilmesine yol açacaktır. Bu nedenle pil yönetim sistemi pili doğru bir şekilde kontrol edemez ve bu süreç aynı zamanda pil ömrünün bozulmasını hızlandıracak ve olası güvenlik risklerini beraberinde getirecektir.

Yapılan literatür taramasında SoC-OCV ilişkisini tanımlamak için yaygın olarak kullanılan, açık ve basit yöntem olan eğri uydurma modeline karar verilmiştir. Böylece bataryanın açık devre voltajı, SoC'nin bir fonksiyonu yani $OCV=f(SoC)$ bir polinom olarak temsil edilebilir. HPPC testlerinde, her bir bekleme aşamasının sonunda ölçülen gerilimler nihai açık devre gerilimi olarak kabul edilir. Yukarıda HPPC darbeleri deşarj yöntemiyle deneysel olarak elde edilen OCV'nin SOC ile değişimi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Açık devre voltajının (OCV) şarj durumu (SoC) ile değişen eğrisi.

Ölçülen bu batarya hücresi gerilimlerine bağlı olarak, elde edilmiş olan $f(\text{SoC})$ fonksiyonu kullanılarak OCV hesabı yapılmaktadır.

$$f(\text{SOC}) = p1 \cdot \text{SOC}^6 + p2 \cdot \text{SOC}^5 + p3 \cdot \text{SOC}^4 + p4 \cdot \text{SOC}^3 + p5 \cdot \text{SOC}^2 + p6 \cdot \text{SOC} + p7 \quad (2.1)$$

2.2.2. Pil Doluluk Oranı (SOC) Kestirim Metodları

Amper-Saat Sayma (Coulomb Sayma) Metodu; en yaygın ve doğrudan kullanılan yöntemdir. Başlangıç pil doluluk oranının bilinmesi gerekir. Hata birikimi oldukça fazladır.

Açık Devre Voltajı Metodu; Pil doluluk oranı ile açık devre voltajının doğrusal olmayan ilişkisine dayalı bir yöntemdir. Açık devre voltajının ölçümü için gereken dinlenme süreleri nedeni ile zaman problemine sahip. Farklı metodlarla birlikte kullanılmaktadır.

Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları Metodu; Doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde yaygın kullanılan yöntemdir. Her iki yöntemin güçlü ve zayıf yanları vardır. Bulanık mantık 0 ve 1 ifade türünde modelleme yaparken insan bilgisini içerebilen bir yöntemdir.

Kalman tabanlı filtreler, kontrol sistemlerinde, sinyal işlemede, robotikte ve navigasyonda yaygın olarak kullanılan matematiksel algoritmalar. Gürültü veya

belirsizliklerden etkilenen dinamik bir sistemin gerçek durumunu tahmin ederler. Filtreler, ortalama kare hatasını en aza indirerek optimal bir durum tahmini sağlamak için sensör ölçümlerini matematiksel bir modelden tahminlerle birleştirir. Bahsedilen üç tür Kalman tabanlı filtrenin kısa açıklamaları aşağıda verilmiştir:

- Kalman Filtresi: Doğrusal dinamik sistemlerde, modelin giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumlarını tahmin edebilen bir filtredir.
- Genişletilmiş Kalman Filtresi: Doğrusal olmayan matematiksel modeli tam olarak elde edilmiş pilin şarj durumunun kestirilmesi amacıyla kullanılacaktır. Sistemin doğrusallaştırılmasına ihtiyaç duyar.
- Kokusuz Kalman Filtresi: Doğrusallaştırmaya gerek duymaz. Gerçek doğrusal olmayan modeller ve rastgele durum değişkeninin yaklaşık bir Gauss dağılımını kullanan kokusuz kalman filtresi kullanılacaktır.

Bu çalışma da SoC tahmini için uygulaması basit ve bellek açısından verimli olması nedeniyle endüstride yaygın olarak da kullanılan amper-saat sayma metodu kullanılmıştır. Bu yöntem, akünün şarj veya deşarj akımı sırasında ölçüm yapan akım sensörünün çıkışına odaklanır ve şarj durumunu elde etmek için entegre eder.

Amper-saat sayma (Coulomb Sayma) metodunda kullanılan pil doluluk oranı formülü:

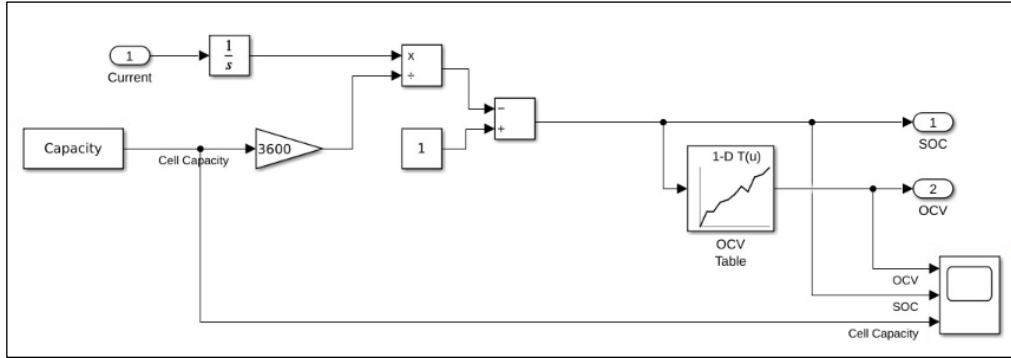
$$SoC_t = SoC_0 - \frac{1}{C_b} \int_0^t \eta I_{L,t} d\tau \quad (2.2)$$

Burada SoC_t : : mevcut pil doluluk oranı, SoC_0 : başlangıç pil doluluk oranı, C_b : kullanılabilir maksimum kapasite, η : coulomb verimliliği ve $I_{L,t}$: yük akımını ifade etmektedir. Coloumb verimliliği ya da şarj etme verimliliği olarak da adlandırılan η formülü:

$$\eta = \frac{\int_0^{t_d} I_d dt}{\int_0^{t_c} I_c dt} \quad (2.3)$$

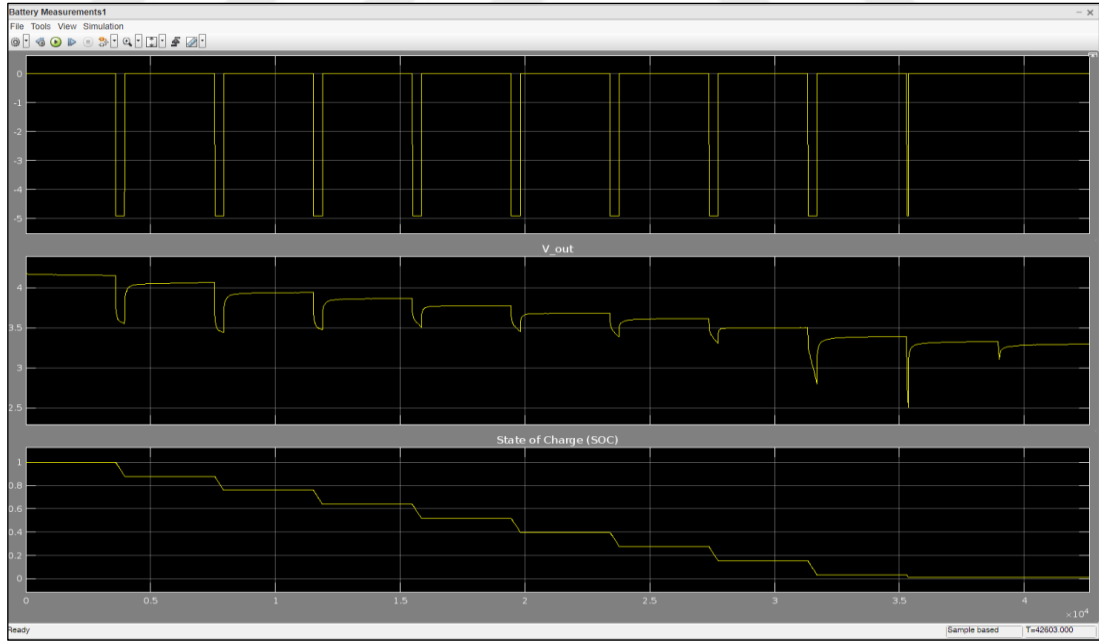
Burada I_d : Deşarj akımı, I_c : Şarj akımı, t_d : Deşarj süresi ve t_c : Şarj süresi olarak ifade edilmektedir.

Yukarıda belirtilen Coulomb sayma metodunda kullanılan formülün Matlab/Simulink programında modellenmesi Şekil 2.5’ te gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 2.5: Amper-Saat Sayma (Coulomb Sayma) SoC Matlab/Simulink deşarj modeli.

Pil doluluk oran formülü kullanılarak yapılan Şekil 2.5'teki modelleme sonucunda Şekil 2.6'daki şarj durumunun (SoC) zamana bağlı değişim grafiği elde edilmiştir.

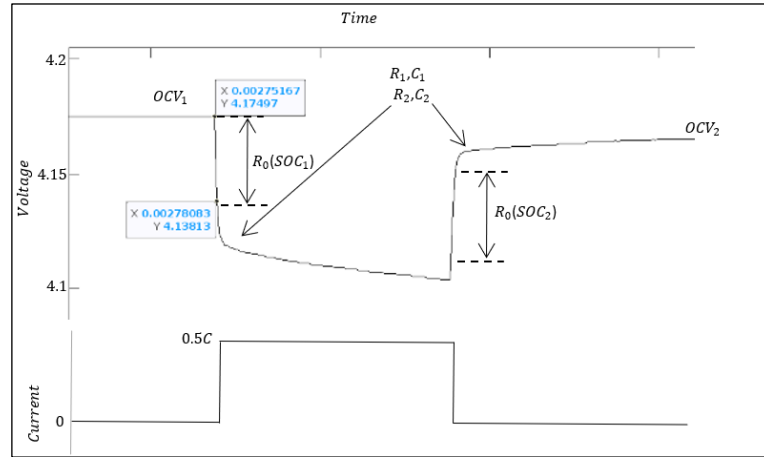


Şekil 2.6: -10 °C Sıcaklıkta deşarjın zamanla değişen SoC grafiği.

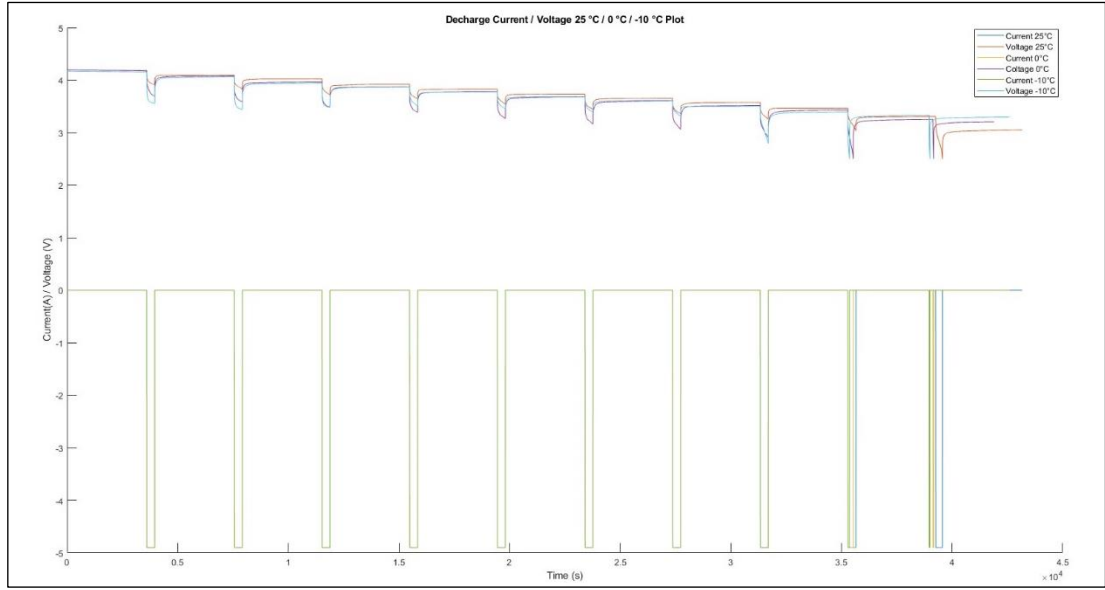
2.2.3. Ohmik Direnç

Genel olarak, batarya direncini ölçmek için kullanılan yöntemler güç kapatma yöntemi, adım yöntemi ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) yöntemidir. EIS yönteminde, batarya farklı frekanstaki bir dizi alternatif akım (AC) sinyaliyle uyarılır ve ardından giriş uyarma sinyali ile batarya voltajı çıkış yanıtı arasındaki ilişki analiz edilerek batarya empedans karakteristiği elde edilebilir. Kapatma yöntemi ve adım yönteminin prensibi benzerdir; burada ohm polarizasyon tepki süresi ile diğer polarizasyon tepki süresi arasındaki fark, farklı empedansı tanımlamak için kullanılır. Akım ani bir değişim gösterdiğinde, omik polarizasyonun neden olduğu gerilim düşümü kısmı anlık olarak değişir ve ardından diğer polarizasyonun neden olduğu gerilim düşümü kısmı, gerilim kararlı durum gerilim değerine dönene kadar geçici süreci üstel yaklaşımla tamamlar. Akım değişmeden önceki gerilimin U_0 ve akımın değiştiği andan sonraki gerilimin U_1 olduğunu varsayarsak, omik direnci hesaplamak için formül aşağıdaki gibidir:

$$R_0 (SoC) = \frac{U_1 - U_0}{\Delta I} \quad (2.4)$$



Şekil 2.7: Tek bir darbeye (0.5C) çekilen akıma karşı voltaj değişim grafiği (Bataryanın kimyasal karakteristiği).



Şekil 2.8: -10 °C, 0 °C, 25 °C Sıcaklıktaki Hibrit darbe gücü karakterizasyonu (HPPC) test akım, voltaj profili.

Hibrit darbe gücü karakterizasyon test profili Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Bataryadan hibrit darbe gücü karakterizasyon testinde akım çekilirken ölçülen voltaj değeri düşer ve akım darbesinden sonra düzelir. Buradaki voltaj düşüşünün şekli ve geri kazanımı batarya kimyasallarının karakteristiğidir. Bu darbeli test prosedürünün amacı eşdeğer devreyi kullanarak doğru parametrelerle yeniden üretebilme daha spesifik olarak seri direncin geri kazanımının anlık kısmının hesaba katmaktır. Birleşik RC çifti toparlanmanın üstel kısmını açıklamaktadır. Farklı SoC'lerde yanıtların farklı olduğunu gözlemleyebiliriz. Ayrıca sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinin de bu grafikteki herhangi bir darbedeki voltaj grafiğine yakınlığımızı Şekil 2.9 da gözlemleyebiliriz. Farklı SoC'lerden omik direnç, polarizasyon direnci ve polarizasyon kapasitansı elde etmek için adım yöntemini benimser.



Şekil 2.9: -10 °C, 0 °C, 25 °C Sıcaklıktaki Hibrit darbe gücü karakterizasyonu (HPPC) test voltaj profili yakından görüntüsü.

2.2.4. Terminal Voltajı

Akü tarafından harici bir yüke sağlanan voltaj, akü terminal voltajı olarak adlandırılır. Bu voltajın değeri, açık devre voltajından oldukça farklıdır ve iç direnç ve iki RC kolu boyunca voltaj düşüşü çıkarıldıktan sonra elde edilir.

$$U_t = U_{OCV} - U_1 - U_2 - U_0 \quad (2.5)$$

$$U_0 = IR_0 \quad (2.6)$$

$$\frac{dU_1}{dt} = -\frac{U_1}{C_1 R_1} + \frac{I_1}{C_1} \quad (2.7)$$

$$\frac{dU_2}{dt} = -\frac{U_2}{C_2 R_2} + \frac{I_2}{C_2} \quad (2.8)$$

Burada U_{OCV} ; açık devre voltajı, R_0 ; seri direnç, R_1, R_2 ; blok direnç parametreleri, C_1, C_2 ; blok kapasitör parametreleri, U_t ; terminal voltajı, U_1, U_2 ; RC blokları üzerindeki voltaj düşümlerini ifade etmektedir.

2.2.5. Dinamik RC Parametreleri (Polarizasyon Direnci ve Kapasitansı)

ECM'deki paralel RC ağları, hücrenin dinamik yapısını birleştirmek için kullanılır. Bu parametreler geçici tepkiyi modellemek için kullanılır. R_1 ve R_2 , yük transfer direncini içeren dirençlere yapılan faradaik katkılardır. Yüzey kapasitörleri olarak adlandırılan C_1 ve C_2 , pilin yüzey etkilerini ve hücrenin iç kimyasal kinetiğini temsil eder. Şekil 2.7'de işaretlendiği gibi, gecikmeli voltaj yanıtının zaman sabiti, iki RC dalı kullanılarak modellenmiştir. Tüm parametreler SoC, sıcaklık ve deşarj akımının değişimi ile değişir. Bu tez çalışmasında, parametrelerin analizinde SoC ve deşarj akımı dikkate alınmıştır. Sıcaklık değişiminden kaynaklanan etkiler dahil edilmez ve hücrelerin ortam sıcaklıklarında çalıştığı varsayılır. Ancak hücre çalışması, harici bir soğutma sistemi varlığında analiz edilir. ECM'deki paralel RC ağları, hücrenin dinamik yapısını birleştirmek için kullanılır. Bu parametreler geçici tepkiyi

modellemek için kullanılır. R_1 ve R_2 , yük transfer direncini içeren dirençlere yapılan faradaik katkılardır. Yüzey kapasitörleri olarak adlandırılan C_1 ve C_2 , pilin yüzey etkilerini ve hücrenin iç kimyasal kinetiğini temsil eder.

Polarizasyon süreci için terminal gerilimi, akım ani bir değişim gösterdiğinde geçici süreci yaklaşık olarak üstel bir şekilde tamamlar. Kirchhoff yasalarına göre, ikinci dereceden RC modeli için terminal geriliminin değişim yasası aşağıdaki formülle yönetilebilir.

$$U_t = U_{ocv} - IR_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - IR_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} - IR_0 \quad (2.9)$$

Burada $\tau_1 = R_1 C_1$, $\tau_2 = R_2 C_2$ zaman sabitini temsil eder.

$$U_t = U_{ocv} - ae^{-bt} - ce^{-dt} - IR_0 \quad (2.10)$$

Yukarıdaki iki denklemin katsayıları karşılaştırıldığında, parametre değerleri aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$R_1 = a/I \quad (2.11)$$

$$R_2 = c/I \quad (2.12)$$

$$C_1 = 1/(R_1 b) \quad (2.13)$$

$$C_2 = 1/(R_2 d) \quad (2.14)$$

Yukarıda açıklanan yöntemle göre, ikinci dereceden RC modelinin polarizasyon direnci ve polarizasyon kapasitansı en küçük kareler yöntemiyle elde edilebilir.

2.3. Model Parametrelerinin Kestirilmesi

Modelde önerilen tüm parametreler SoC, akım ve sıcaklığın fonksiyonlarıdır. Ancak parametre kestirimi aşamasında her sıcaklık için ayrı ayrı parametreler kestirilmiş, SoC ve akımın bağımlılığı analiz edilmiştir. Önceki araştırmalar, parametre değerlerini çıkarmak için Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisini (EIS) kullanmıştır. Ancak bu teknik, operasyonun çok daha dinamik ve öngörülemez olduğu pratik uygulamalarda kullanılamaz. Parametre çıkarmanın arkasındaki çok daha basit bir teori, anlık voltaj ve akım arasındaki orantıyı ilişkilendiren ohm yasasını içerir. Bununla birlikte, teknik, yalnızca kullanılan zaman adımı, ilgili reaksiyonun

zaman sabitinden daha küçükse iyi çalışır, böylece durumdaki değişiklik minimum olarak kabul edilebilir. Çok daha gelişmiş bir teknik, R_0 , R_1 , R_2 , C_1 ve C_2 değerlerini belirlemek için MATLAB'da eğri uydurma araçlarının uygulanmasını içerir. R_0 değeri, bir deşarj darbesinin sonunda voltaj değerindeki anlık değişiklik kullanılarak belirlenir. Parametrelerin tahminleme aşamasında Simulink Tasarım Optimizasyonu'ndaki parametre estimation toolbox kullanılmıştır. Modelin değişen ortam koşullarındaki deşarj etkisi de hesaba katılmıştır.

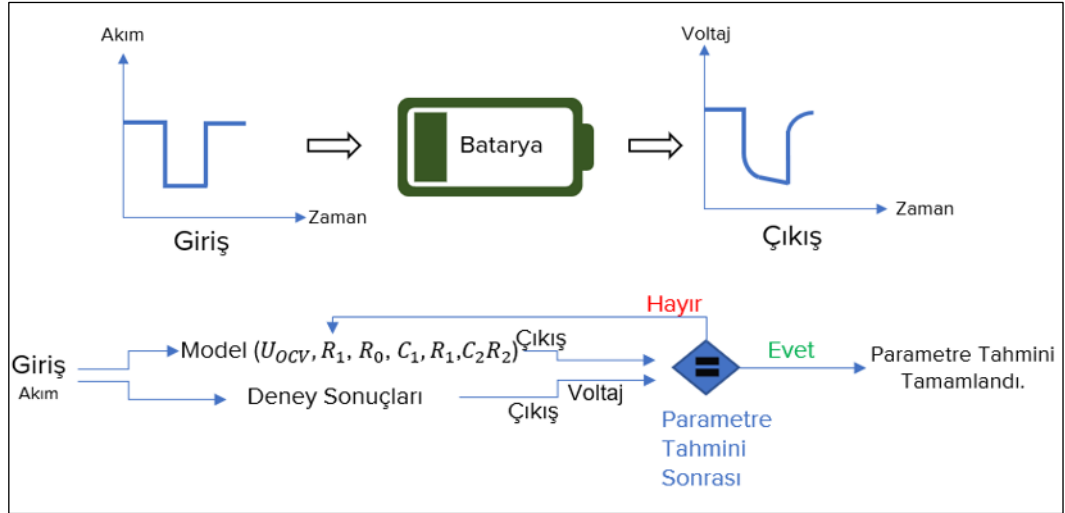
Model parametrelerinin çıkarılması için MATLAB'da bir ECM geliştirilmiştir. Model, 6 parametre, U_{OCV} , R_0 , R_1 , R_2 , C_1 ve C_2 için başlangıç tahminleri ve deneysel gerilim deşarj eğrileri ile beslenir. Simulink kontrol ve optimizasyon araçları kullanılarak bir parametre optimizasyon görevi belirlenir; model parametrelerini elde etmek için her adımda benzetilmiş ve ölçülen voltaj eğrileri karşılaştırılır.

Darbe deşarj eğrileri tahmin görevine dahil edildiğinden, parametreler her darbenin başında ve sonunda elde edilir. Deneyde kullanılan darbeler, pil takımını on adımda boşaltarak her adımda SoC seviyesini %10 oranında azaltır. SoC varyasyonu ile parametrelerin varyasyonu, dolayısıyla kolayca gözlemlenebilir.

Ayrıca darbe deşarj testleri, deşarj akımı ile parametre değişiminin gözlemlenebildiği 1C akım seviyesinde 3 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilir.

2.3.1. MATLAB'da Modelleme

Simulink Tasarım optimizasyonu, parametreleri tahmin etmek için yinelemeli teknikler kullanır. Modelden oluşturulan deşarj profili, deneysel deşarj profili ile karşılaştırılır ve parametreler her adımda güncellenir. Her adımda simüle edilen voltaj deneysel voltajla eşleştğinde yineleme sona erer. İşlem, farklı deşarj profilleri kullanılarak tekrarlanır. İşlem, parametrelerin SoC ve akıma göre değiştiği 2 boyutlu arama tabloları üretecektir. Bu işlemlerin akış şeması Şekil 2.10' da gösterilmiştir.

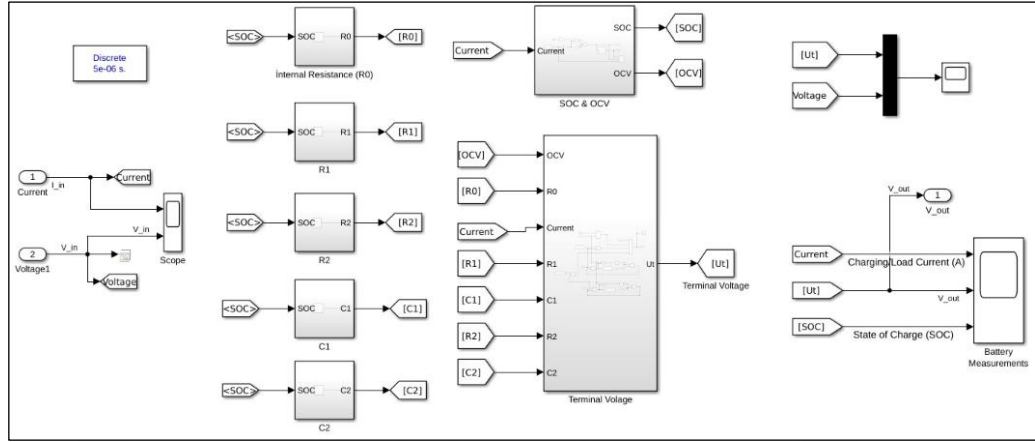


Şekil 2.10: Parametre tahmini akış şeması.

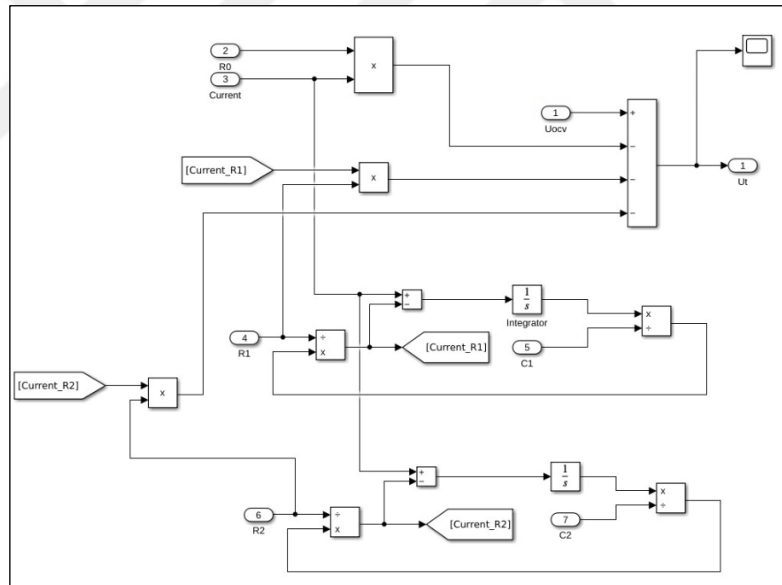
2.3.2. Model Simülasyonu

Gerekli model parametreleri belirlendikten sonra, lityum-iyon bataryanın simülasyon modeli Matlab/Simulink'te kurulabilir. Kurulan ikinci dereceden RC modelinin simülasyonları Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Simülasyon modelinin temel olarak SoC hesaplama modülü, devre parametresi look-up table modülü ve terminal çıkış voltajı hesaplama modülü olmak üzere üç alt modülden oluştuğu görülebilir. Spesifik alt modüller Şekil 2.5'de ve Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Şekil 2.5'de akım zaman integral yöntemine dayalı SoC hesaplama modülü gösterilmektedir, deşarj kapasitesi deşarj akımının zamanla entegrasyonu ile elde edilir ve daha sonra nominal kapasite eksi deşarj kapasitesi kullanılarak artık kapasite elde edilebilir. Son olarak, SoC değeri standartlaştırılmış hesaplama ile elde edilebilir. Şekil 2.12, Kirchhoff yasalarına dayalı terminal çıkış voltajı hesaplama modülünü göstermektedir ve çıkış voltajı, U_{OCV} (OCV) ile direnç kapasitörü arasındaki voltaj farkı ile elde edilebilir. Simülasyon modelinin yük akımı profili ve akünün ilk SoC değeri olarak iki girdisi vardır. Yük akımı profili program aracılığıyla girilir, böylece yük akımı herhangi bir forma ayarlanabilir. Akünün aşırı şarj ve aşırı deşarj olmasını önlemek için SoC'nin maksimum değeri 1 ve minimum değeri 0 olarak ayarlanmıştır. Nispeten kısa döngü süresi nedeniyle, sıcaklık değişiminin bir lityum iyon pilin çıkış voltajı üzerindeki

etkisi parametre tahmini aşamasında göz ardı edilir. Son olarak, modelin doğruluğunu teyit etmek için gerçek gerilim eğrisi modelin simülasyon eğrisi ile karşılaştırılır.

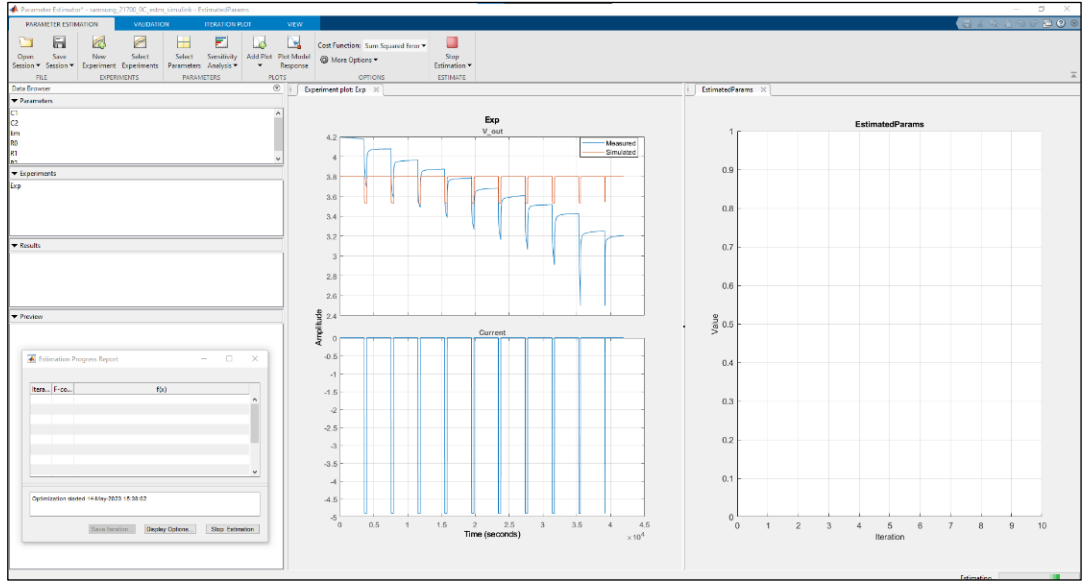


Şekil 2.11: Simulink'te ikinci dereceden RC eşdeğer devre simülasyon modeli.



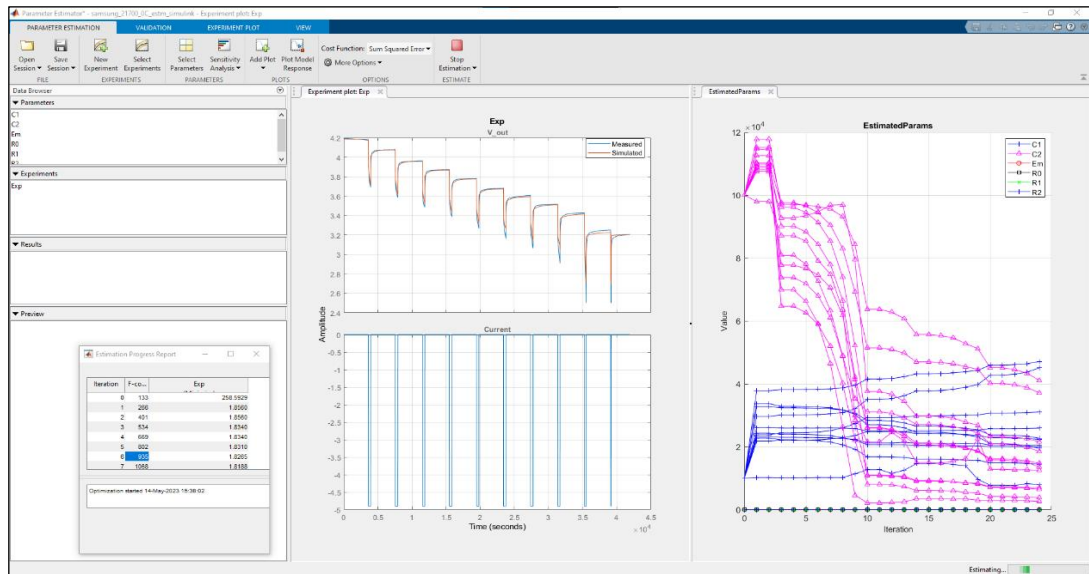
Şekil 2.12: Simulink'te ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin terminal voltajı hesaplama alt modülü.

Yukarıdaki modelde bulunan parametrelerden, tahmini yapılacak olan parametreler seçilir. Parametrelere atanan ilk değerler için simülasyon çalıştırılır ve aşağıda Şekil 2.13 deki turuncu renkteki simülasyon grafiği elde edilir.



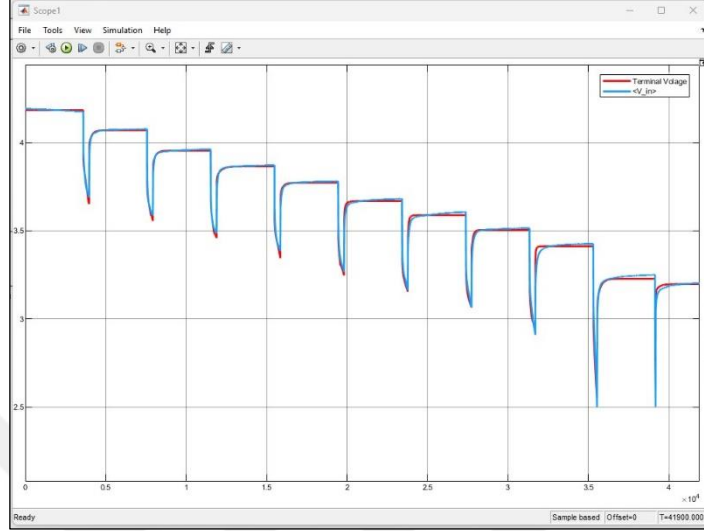
Şekil 2.13: Simulink’te ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin “Parametre Estimation Toolbox” arayüzünde hazırlanan parametre tahmin başlangıç durumu.

İkinci aşamada tahmin parametre seçenekleri, yapılacak iterasyon sayısı, tahmin toleransları, tahmin metodu gibi özellikler belirlendikten sonra parametre tahmini çalıştırılır. İstenilen özellikler gerçekleştirildiğinde tahmin aşaması sonlanır ve Şekil 2.14’ teki gibi simülasyon grafiği ile test grafikleri üst üste denk gelerek yakınsanır. Parametrelerin son değerleri program tarafından sonuçlar bölümünde tanımlanır.

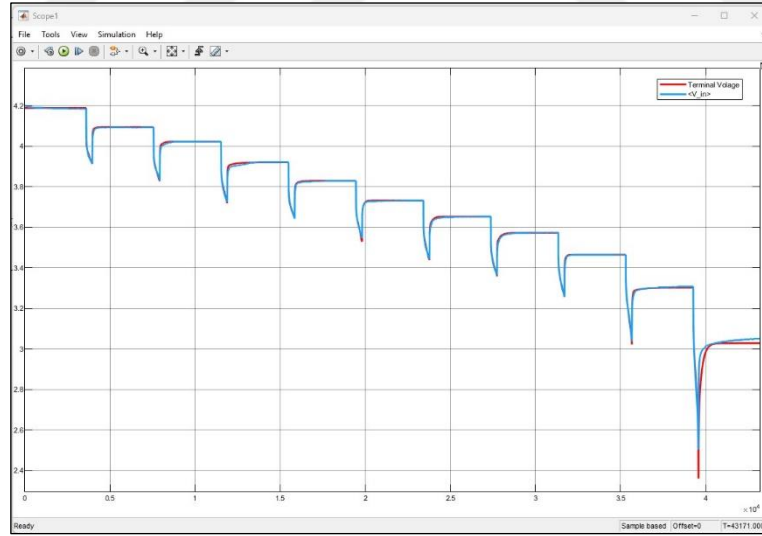


Şekil 2.14: Simulink’te ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin “Parametre Estimation Toolbox” arayüzünde parametre tahmini.

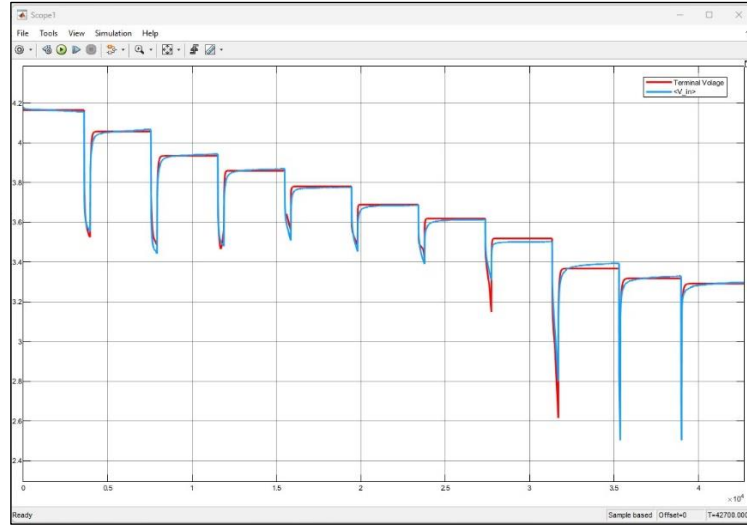
Aşağıdaki şekillerde -10 °C, 0 °C, 25 °C sıcaklıktaki parametre tahmini sonrası elde edilen voltaj grafikleri gösterilmiştir. Elde edilen grafiklerdeki mavi renkli grafik deneysel sonuçları kırmızı renk grafik ise simülasyon sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 2.15: Parametre tahmini sonrası 25 °C sıcaklıkta Simülasyon ve deney sonuçlarının voltaj grafiği.



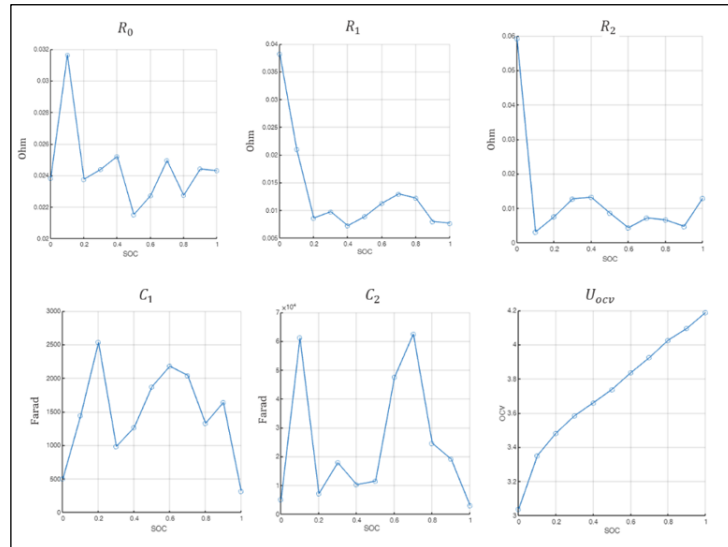
Şekil 2.16: Parametre tahmini sonrası 0 °C sıcaklıkta Simülasyon ve deney sonuçlarının voltaj grafiği.



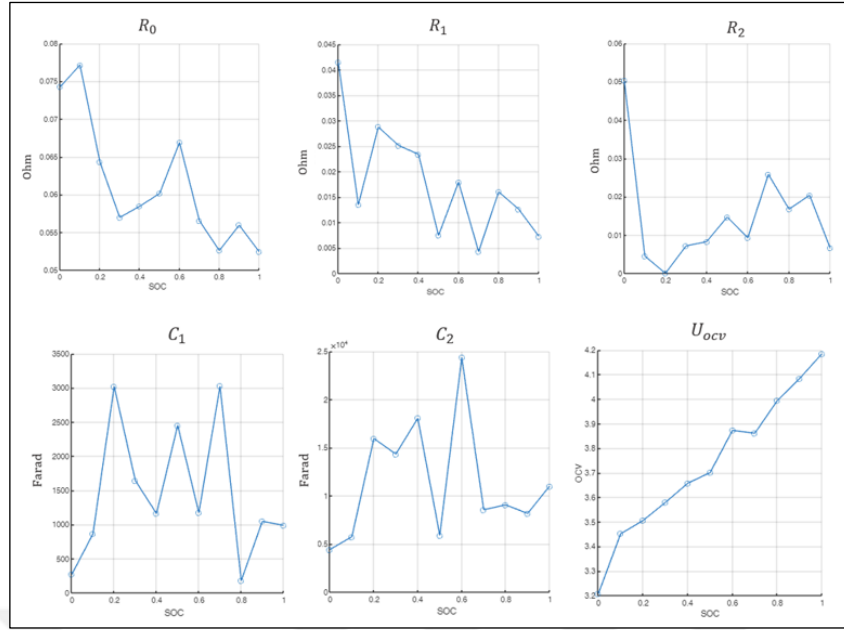
Şekil 2.17: Parametre tahmini sonrası -10 °C sıcaklıkta Simülasyon ve deney sonuçlarının voltaj grafiği.

En iyi parametre tahmininin 25 °C sıcaklıkta yapıldığı, -10 °C sıcaklıkta ise tahminin zor olduğu sonucuna varılabilir.

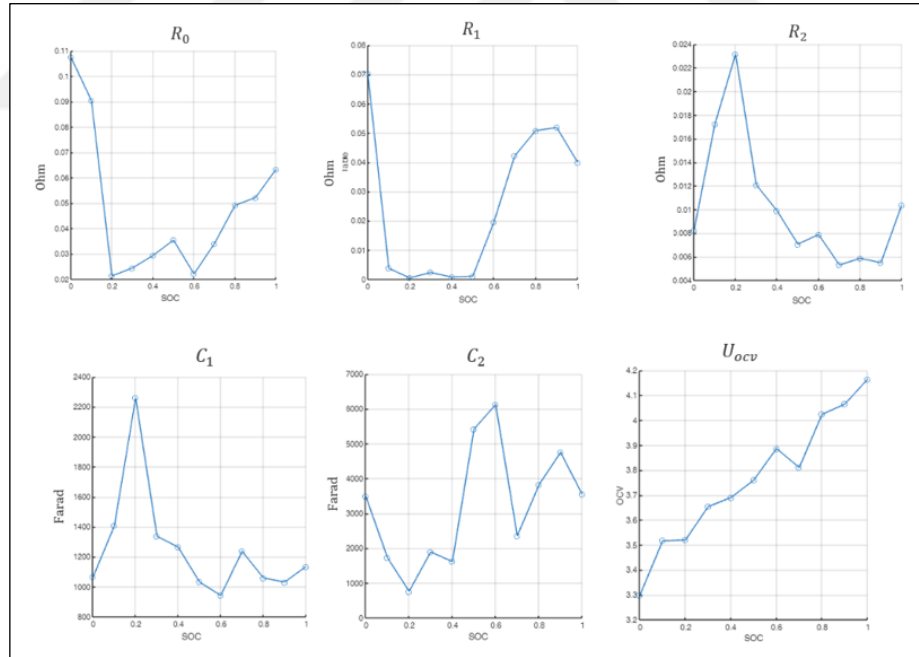
Simülasyonlar sonucunda her bir SoC değerine karşılık gelen U_{OCV} , R_0 , R_1 , R_2 , C_1 , C_2 değerleri Şekil 2.18, 2.19 ve 2.20’de ki gibi elde edilir. Elde edilen bu değerler tezin 3. Bölümünde yer alan termal modelleme hesaplamasında kullanılacaktır.



Şekil 2.18: 25 °C Sıcaklıktaki simülasyon sonucunda SoC değerlerine karşılık gelen U_{OCV} , R_0 , R_1 , R_2 , C_1 , C_2 parametre grafikleri.



Şekil 2.19: 0 °C Sıcaklıktaki simülasyon sonucunda SOC değerlerine karşılık gelen U_{ocv} , R_0 , R_1 , R_2 , C_1 , C_2 parametre grafikleri.



Şekil 2.20: -10 °C Sıcaklıktaki simülasyon sonucunda SoC değerlerine karşılık gelen U_{ocv} , R_0 , R_1 , R_2 , C_1 , C_2 parametre grafikleri.

3. TERMAL MODELLEME

Farklı kimyalardan oluşan lityum iyon bataryaların kullanım ömrü, depolama kapasitesi, uzun süreli hücre performansı çalışma, sıcaklık ve çevre koşullarına karşı değişiklik göstermektedir. İç dirençlerinden geçen akım ve kimyasal reaksiyonlar hücrelerde ısı üretimine sebep olurlar. Oluşan bu ısıyla hücrelerdeki sıcaklık tetikleme sıcaklığına ulaşırsa termal kaçaklar oluşabilir ve kontrol edilemeyen tehlikeli sonuçlara sebep olabilir.

Uzun süreli hücre performansı, hücre çalışma sıcaklığına çok duyarlıdır ve şarj etme ve boşaltma sırasında sıcaklık dar bir aralıkta (25–50 °C) tutulmazsa hücre depolama kapasitesi hızla düşebilir. Bu bozuşmaya başlıca, kullanılan elektrolitlerdeki elektrokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan sıcaklık artışı ve dallanmaların neden olduğu anot malzemelerinin, katot malzemelerinin ve dahili kısa devrelerin bozulması neden olur. Hücreler iç dirençlerinden geçen akımla ısı üretirler. Bununla birlikte, kimyasal reaksiyonlar, hücrelerin içindeki sıcaklık reaksiyon başlangıç sıcaklığına (bazı kimyalar için 50 °C kadar düşük olabilir) ulaşırsa, bazen kontrol edilemeyen ek ısı üretebilir. Bu nedenle, sayısal simülasyon ve sonlu elemanlar analizi (FEA), lityum iyon bataryaların (LIB) elektro-termal davranışını incelemek, geliştirmek ve optimize etmek için temel araçlar haline gelmiştir.

Hücre iç direnci ve joule ısınması nedeniyle yüksek deşarj hızlarında tersinmez ısı oluşumu meydana gelir. Daha düşük deşarj hızlarında, katot ve anotta tersinir ısı üretimi gerçekleşir. Farklı deşarj hızlarında iç sıcaklıkların kesin olarak belirlenmesi ve ısı-fiziksel özelliklerin kullanılması yöntemleri, batarya termal yönetim sistemlerinin optimize edilmiş tasarımı için gereklidir.

Piller içindeki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle yeterli ısı üretildiğinde, en yaygın olarak termal kaçak olarak bilinen sıcaklıkta kontrolsüz bir sıcaklık artışı meydana gelebilir. Termal kaçak, LIBların ana arıza mekanizmalarından biridir ve birincil güvenlik sorunudur. Elektrolitler son derece yanıcıdır ve sıcaklıkta yeterli bir artış olursa tutuşabilir, bu da muhtemelen bir patlamaya veya yangına, kapasite kaybına, eskimeyle birlikte özellik değişikliğine ve kısa devreye neden olabilir. Tekrarlanan şarj deşarj döngüsü kapasitesini kaybeden lityum iyon pili yaşlandırır. Ekzotermik reaksiyon kontrol edilemez olduğunda sıcaklıkta daha fazla artışa ve ardından reaksiyon hızının artmasına neden olur. Bir kimyasal reaksiyonun

başlangıç sıcaklığı kimyaya bağlıdır ve genellikle 90 °C'nin üzerindedir, bu da termal kaçağa yol açabilir.

Tablo 3.1: Farklı termal modellerin karşılaştırılması.

Model	Avantaj	Dezavantaj
Elektrokimyasal-termal model	Termal özellikler hesaplama doğruluğunu artırabilir.	Sistem modeli boyutu, pratik hesaplama süresi nedeniyle sınırlıdır.
Elektro-termal model	LIB'in modeli basitleştirildiği için minimum hesaplama çabası gereklidir.	LIB modeli sadece tüm kimya için ortalama bir sıcaklık hesapladığından potansiyel olarak daha az doğrudur.
Termal kaçak yayılım modeli	Termal kaçağı tahmin edebilir geniş formatlı bir lityum iyon pil içinde yayılma modülü.	Hesaplama maliyeti yüksektir.

LIB'in performansı sıcaklıkla yakından ilişkili olduğundan bataryanın termal dinamiklerini anlamak önemlidir. Isıl çift ile ölçülen sıcaklık, iç sıcaklık dağılımını değil, yalnızca orta nokta sıcaklığını gösterir. Batarya iç sıcaklığının yerinde izlenmesi hala zordur. Isıl modellere dayalı benzeşimler genellikle batarya iç sıcaklık dağılımını belirlemek ve deneysel maliyeti azaltmak için kullanılır.

Hücre düzeyindeki ısı modeller, fiziksel mekanizmaya göre elektro-termal model, elektro-kimyasal termal model ve termal kaçak yayılım modeli olarak sınıflandırılabilir (Tablo 3.1). Bu modeller ayrıca boyutlarına göre yığın, 1D eksenel simetrik, 2D ve 3D olarak da sınıflandırılabilir.

Isıl model, (Eşitlik (3.1))'de gösterildiği gibi zamana bağlı ısı üretimi ve ısı transferini içerir. Isı üretimi, şarj ve deşarj sırasında hücre içi elektrokimyasal reaksiyon hızına güçlü bir şekilde bağlıdır. Isıl enerji denklemi çözülerek hücre sıcaklığı belirlenir:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_e \cdot \nabla T \right) \approx \frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T + q \quad (3.1)$$

Burada ρ bataryanın ortalama yoğunluğu, c_p sabit basınçta ortalama özgül ısısı, v_e elektrolit hızıdır. λ tüm yönlerdeki ortalama ısı iletkenlik, q ısı üretim hızıdır. Taşınım ile iç ısı transferi olan $v_e \cdot \nabla T$ teriminin, LIB sıvı elektrolitinin sınırlı hareketliliği nedeniyle genellikle ihmal edilebilir [18].

Yığın ısıl model, Eşitlik (3.2)'de belirtildiği gibi batarya ile çevresi arasındaki ısı transferini dikkate alır. Bataryanın ısı transferinin tüm yönlerde eşit olarak dağıldığını varsayar ve genellikle küçük kalınlığa sahip hücrelerde kullanılır.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_e \cdot \nabla T \right) \approx \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T + q \quad (3.2)$$

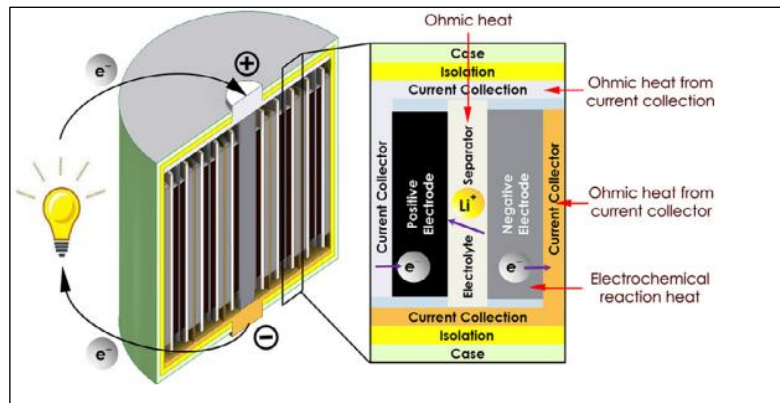
Burada h ısı taşınım katsayısıdır. A_s hücrenin çevresine temas ettiği yüzey alanıdır. T_∞ çevre sıcaklığıdır.

LIB'de ısı üretimi tersinir ve tersinmez ısıdan oluşur. Basitleştirilmiş LIB ısı üretim denklemini deneylerden aşağıdaki gibi elde etmişlerdir,

$$q = I(U - V) - I(T \frac{dU}{dT}) \quad (3.3)$$

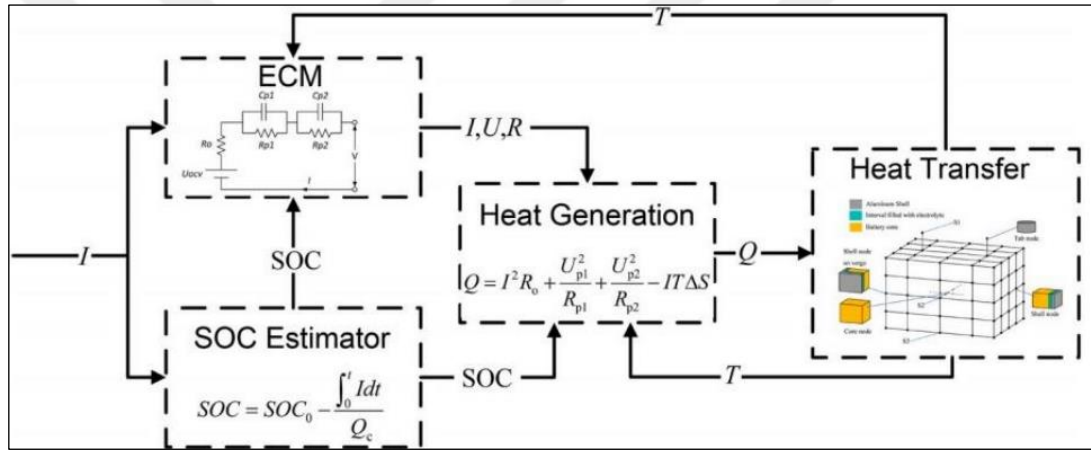
q , I , U ve V sırasıyla ısı üretim hızı, elektrik akımı, açık devre voltajı ve LIB'nin hücre voltajı, $I(U-V)$ terimi, hücre elektrik direnci sebebiyle tersinmez ısı üretim hızı, $U-V$ elektrot/elektrolit ara yüzlerindeki yük transfer reaksiyonları, Lityum iyonunun elektrolit ve elektrotlar boyunca difüzyonu ve göçü ve omik kayıplar gibi süreçlerin neden olduğu bataryanın toplam iç aşırı potansiyelidir. İkinci terim $I(TdU/dT)$ elektro-kimyasal reaksiyon sebebiyle tersinir ısı üretim hızıdır.

LIB elemanlarında ısı üretimi ve transferi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Etkili batarya ısıl modelleri, farklı şarj/deşarj modelleri altında hücrelerin, modüllerin ve paketlerin sıcaklık dağılımını öngörebilir [19].



Şekil 3.1: LIB'da ısı üretimi ve transferi.

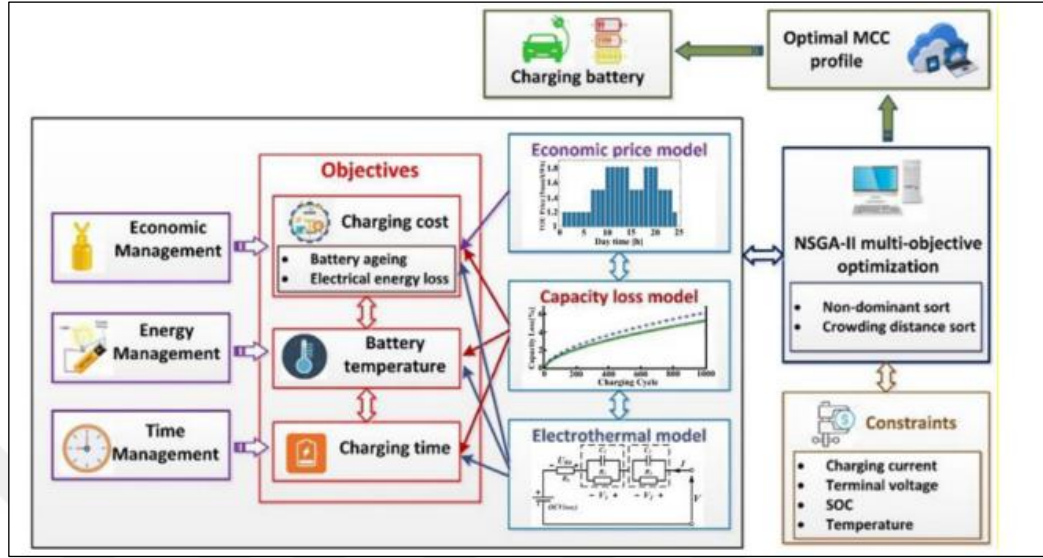
Elektro-termal modele dayanarak, aşırı şarj sürecinin empedans tabanlı modeli ve kapasite azalma modeli gibi alt modeller, öngörülen sıcaklık dağılımının doğruluğunu artırmak için eklenmiştir. Feng ve arkadaşları [20] bir elektrokimyasal-termal-nöral-ağ (ETNN) modeli formüle etmiştir. Batarya sıcaklığı 20 ila 40 °C arasında değiştiğinde sıcaklık tahmin hatası 0,7 °C'den azdır. Pan ve arkadaşları [21] ikinci dereceden eşdeğer devre modeline dayalı bir ısı üretim modeli ve Şekil 3.2'de gösterildiği gibi batarya geometrisine dayalı yeni birçok düğümlü ısı geçiş modeli oluşturmuştur. Deneysel döngüler boyunca maksimum sıcaklık tahmin hatası 2 °C'den az olurken, hesaplama maliyeti elektrokimyasal modele kıyasla %90 oranında azalmıştır. Önerilen model, gelişmiş lityum-iyon BTMS tasarımında çevrimiçi sıcaklık tahmini için büyük bir potansiyele sahiptir.



Şekil 3.2: Çok bağlantılı birleşik elektro-termal modelin şematik gösterimi.

Batarya modülü ve paketinin ısııl modeline gelince, ısı transferi analizi ve sıcaklık gradiyenti, kullanım ömrü ve maliyeti için temel sınırlayıcı faktörlerdir. Birçok çalışma sadece öngörülen sıcaklığın doğruluğunu optimize etmeyi amaçlamış, ekonomik faktörleri dikkate almamıştır. Feng ve diğerleri [22] deney verileriyle uyumlu bir termal kaçak yayılım modeli geliştirmiştir. Modelleme analizi, termal kaçak (TR) yayılımını önlemek için alt kademeli sayısal çözümler sağlayabilecekleri sonucuna varmıştır. Liu ve arkadaşları [23] ekonomiye duyarlı şarj yönetimi geliştirmek için kısıtlanmış çok amaçlı bir optimizasyon çerçeve çalışması önermiştir. Spesifik olarak hem batarya yaşlanma maliyetini hem de elektrik enerjisi kaybını içeren toplam şarj maliyetinin ekonomik göstergesi farklı zaman ölçeklerine sahip

birleşik bir elektro-termal yaşlanma modeline dayalı olarak en aza indirilir olduğunu savunmuştur. Şekil 3.3 de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Ekonomik bilinçli ücretlendirme için genel çok amaçlı optimizasyon çerçevesi.

Çalışma, kesme voltajı, ısı taşınım direnci ve ortam sıcaklığının küçük değerlerinin, şarj hızından ödün vererek sıcaklık artışını ve ekonomik şarj maliyetini azaltabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı lityum iyon batarya hücresinin enerji dengesine dayalı ısıl model ile bataryanın sıcaklık dağılımı hesaplamaktır. Bu nedenle bu bölümde önceden yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Elektriksel modelin çıktılarını termal modele aktararak elektriksel model ile termal model doğrudan bağlanmıştır. İkinci derece Thevenin elektriksel model katot ile anot arasında oluşan tepkime sonucunda ortaya çıkan ısıyı modellemek için kullanılmıştır. Şarj akımı belirli sınırlar içindeyken batarya yüzeyinin homojen bir sıcaklıkta olduğu varsayılır. Isıl modelde bir parçacık hücresi göz önüne alınır. Isıl davranış modeli aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

Sistemde depolanan ısı = Sistem tarafından üretilen ısı- Sistemden çıkan ısı

$$m_{batt}c_{batt} \frac{dT_{batt}}{dt} = Q_{gen} - Q_{conv} \quad (3.4)$$

Burada m_{batt} bataryanın kütlesi (kg), c_{batt} bataryanın özgül ısısını (J/kg K), T_{batt} bataryanın sıcaklığı (K), Q_{gen} bataryanın ısı üretimini, Q_{conv} batarya hücresinden çevresine ısı taşınımıdır.

Şarj işlemi sırasında, LIB tarafından üretilen ısı Q_{gen} esas olarak dört bölümden oluşur: Reaksiyon ısısı $Q_{entropi}$, Joule ısısı Q_{joule} , polarizasyon ısısı $Q_{polarizasyon}$ ve yan reaksiyon ısısı Q_s .

$$Q_{gen} = Q_{entropi} + Q_{joule} + Q_{polarizasyon} + Q_s \quad (3.5)$$

Reaksiyon ısısı batarya içindeki tersinir kimyasal reaksiyonun neden olduğu elektrokimyasal entropi değişiminin ürettiği ısıdır. Reaksiyon ısısı şu şekilde ifade edilir:

$$Q_{entropi} = T_{batt} \Delta S \frac{1}{nF} \quad (3.6)$$

$$\Delta S = - \frac{\partial \Delta G}{\partial T_{batt}} = n F \frac{\partial E}{\partial T_{batt}} \quad (3.7)$$

Burada F Faraday sabiti, I şarj akımı, n hücre reaksiyonunda transfer edilen elektronların mol sayısı (lityum-iyon pil için n = 1), ΔG hücre reaksiyonu için Gibbs serbest enerji değişimi ve E hücre enerjisi olup, yaklaşık olarak dengeye yakın açık devre voltajı ile de değiştirilebilir. $\frac{\partial E}{\partial T_{batt}}$ kısmi türevi negatiftir ve $Q_{entropi}$ şarj sırasında endotermiktir. Bu bilgiler ile eşitlik 6'ya eşitlik 7, ∂E hücre enerji değişimi yerine dU_{OCV} yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$Q_{entropi} = IT_{batt} \frac{dU_{OCV}}{dT} \quad (3.8)$$

Burada $\frac{dU_{OCV}}{dT}$ tersinir gerilim-sıcaklık sabitidir.

Pilin iç omik direnci sebebiyle Joule ısısı açığa çıkar. Joule ısısı şu şekilde ifade edilir:

$$Q_{joule} = I^2 R_0 \quad (3.9)$$

Pilin polarizasyon direnci sebebiyle polarizasyon ısısı açığa çıkar. Polarizasyon ısısı şu şekilde ifade edilir:

$$Q_{polarizasyon} = IU_p \quad (3.10)$$

İkinci derece RC eşdeğer devre modelinde her bir polarizasyon direncinde oluşan ısılar (güç kaybı karşılığı) şu şekilde ifade edilir:

$$Q_1 = IU_1 = I^2 R_1 \quad (3.11)$$

$$Q_2 = IU_2 = I^2 R_2 \quad (3.12)$$

$$Q_{polarizasyon} = Q_1 + Q_2 = I^2 R_1 + I^2 R_2 \quad (3.13)$$

Hem Joule hem de polarizasyon ısısı tersinmezdir; yan reaksiyon ısısı Q_s , polarizasyon ısısından ve Joule ısısından çok daha küçüktür ve genellikle dikkate alınmaz.

Batarya hücresi ile çevresi arasında taşınım yoluyla ısı değişim gücü aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Q_{conv} = hA (T_{batt} - T_{amb}) \quad (3.14)$$

Burada h taşınım ısı transferi katsayısı, A hücrenin toplam yüzey alanı ve T_{amb} batarya şarjının yapıldığı ortam sıcaklığıdır. Isı yayılımı değerlendirilirken, pil bir bütün olarak ele alınır, pil sıcaklığı homojen varsayılarak yalnızca yüzey sıcaklığı dikkate alınır. Lityum-iyon pillerin sıcaklık ve elektriksel özellikleri arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir:

$$m_{batt} \times C_{batt} \times \frac{dT_{batt}}{dt} = I^2 \times R_0 + I^2 \times R_1 + I^2 \times R_2 + IT_{batt} \frac{dU_{OCV}}{dT} - (hA (T_{batt} - T_{amb})) \quad (3.15)$$

Denklemin sağ tarafındaki ikinci, üçüncü ve dördüncü terimler elektrokimyasal polarizasyon kaynaklı tersinmez ve beşinci terim entropi değişimi kaynaklı tersinir

batarya ısı üretim hızlarıdır. Batarya hücresi açık devre voltajının sıcaklığa göre türevi $(\frac{dU_{OCV}}{dT})$ ile orantılı tersinir ısı üretim hızı ihmal edilebilecek kadar küçüktür [24].

Batarya sıcaklığının şarj sırasında zamanla sürekli değiştiği göz önüne alındığında, denklem (3.16)'yı elde etmek için batarya sıcaklığı zamanın bir fonksiyonu olarak ayarlanır.

$$m_{batt} \times C_{batt} \times \frac{T_{batt,t} - T_{batt,t-1}}{\Delta t} = I^2(t) \times R_0 + I^2(t) \times R_1 + I^2(t) \times R_2 + I(t)T_{batt} \frac{dU_{OCV}}{dT} - (hA (T_{batt,t-1} - T_{amb})) \quad (3.16)$$

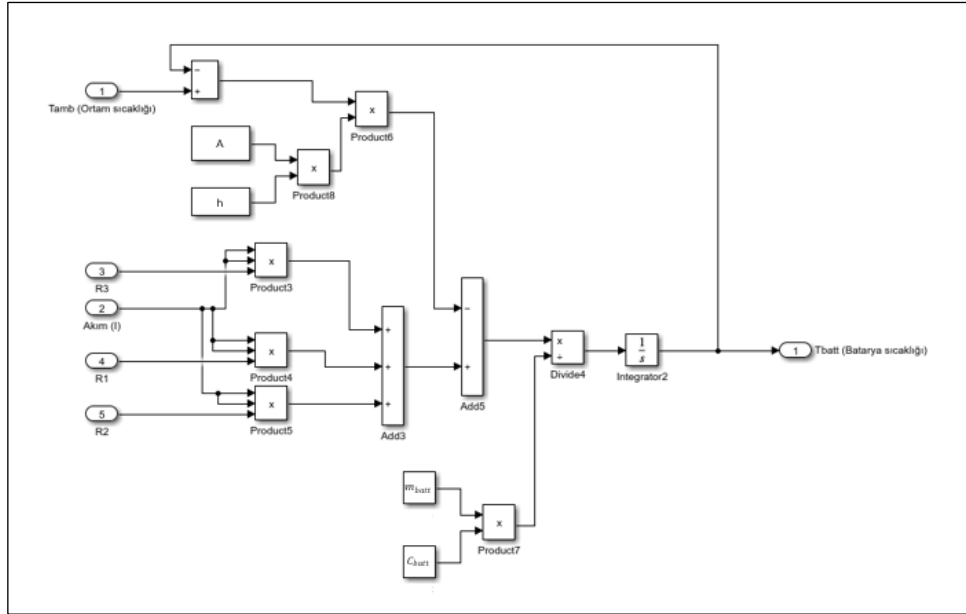
1 sn örnekleme zaman aralığı kullanılarak ayrıklaştırıldığında t zamanındaki batarya sıcaklığı:

$$T_{batt,t} = T_{batt,t-1} + \frac{I^2(t) \times R_0 + I^2(t) \times R_1 + I^2(t) \times R_2 - (hA(T_{batt,t-1} - T_{amb}))}{m_{batt} C_{batt}} \quad (3.17)$$

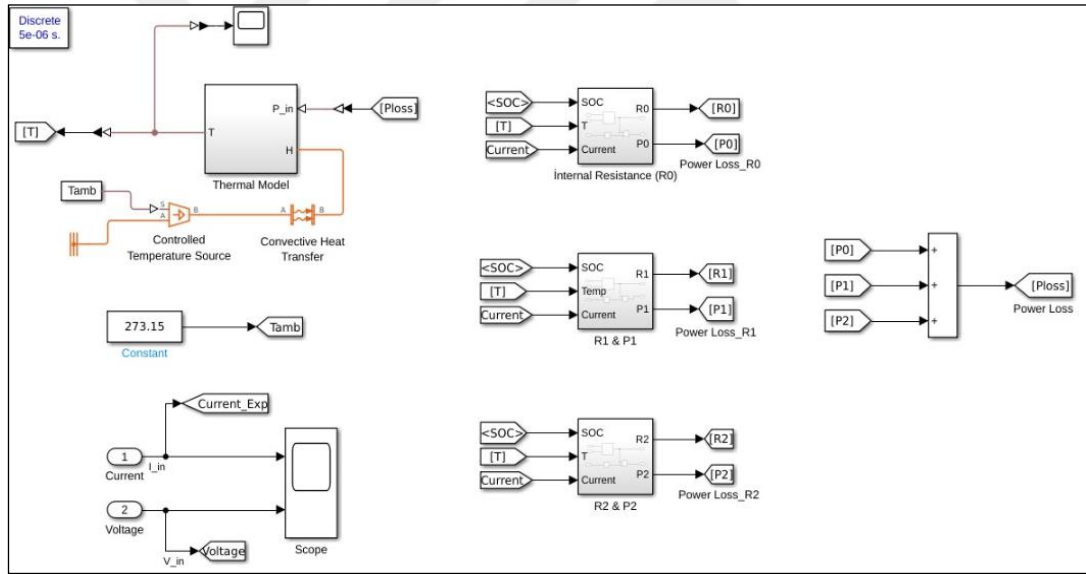
Batarya sıcaklık artışının matematiksel modeli:

$$\Delta T = \sum_{t=1}^N \frac{I^2(t) \times R_0 + I^2(t) \times R_1 + I^2(t) \times R_2 - (hA(T_{batt,t-1} - T_{amb}))}{m_{batt} C_{batt}} \quad (3.18)$$

Batarya ısı enerji diferansiyel denkleminin Matlab/Simulink ısı modeli Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Simulink'te ikinci dereceden RC modelinin ısı modellemesi.



Şekil 3.5: Simulink'te ikinci dereceden RC modelinin Simulink fiziksel modelleme kullanarak ısı modellemesi.

Simulink fiziksel modelleme, termal modelleme, termal sistemlerin davranışını simüle etmek ve analiz etmek için güçlü bir araçtır. Simulink fiziksel modelleme kullanarak, ikinci dereceden bir RC sisteminin termal davranışını kolayca simüle ve analiz edebilmektedir. Bu yaklaşım, ısı transferi, termal tepki ve diğer termal olayları uygun ve sezgisel bir şekilde incelememizi sağlamaktadır.

Simulink'te ikinci dereceden bir RC sisteminin termal modelini oluşturmak için, Simulink Kütüphane Tarayıcısı, Simscape kütüphanesine, termal etki alanı içinde, termal bileşenleri temsil eden çeşitli bloklar vardır. İkinci dereceden RC modeli için Termal Kütle ve Termal İletkenlik blokları kullanılmıştır. Sıcaklık kaynakları veya ısı akısı girişleri gibi giriş sinyallerini modelin uygun portlarına bağlanmaktadır. İsteğe bağlı olarak, daha karmaşık termal sistemleri temsil etmek için termal dirençler veya diğer termal kütleler gibi ek termal bileşenler eklene bilmektedir. Simülasyon süresi, çözücü seçenekleri ve giriş sinyalleri gibi simülasyon ayarlarını yapılandırdıktan sonra simülasyonu çalıştırılarak sistemin zaman içindeki termal davranışını gözlemlenebilmektedir. Simülasyonlar sonucunda termal davranış sonuçları son bölümde gösterilmektedir.



4. LİTYUM İYON PİLLER İÇİN ŞARJ STRATEJİLERİ

Lityum iyon pillerin şarj performansının iyileştirilmesi için şarj süresi, enerji kaybı, sıcaklık artışı, yaşlanma ve kullanım ömrü gibi çeşitli amaçlarla ilişkili olarak farklı şarj teknikleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu şarj tekniklerini basit şarj teknikleri ve optimize edilmiş şarj teknikleri olarak iki temel gruba ayırabiliriz. Basit şarj yöntemleri en ilkel şarj yaklaşımlarıdır. Sabit akım şarjı (CC) ve sabit voltaj şarjı (CV) olarak ikiye ayrılabilir. Bu şarj etme teknikleri eskidir ve bu tekniklerin hücre sağlığı üzerinde olumsuz etkileri vardır. Bu nedenle optimize edilmiş farklı şarj teknikleri bulunmaktadır.

Optimize edilmiş şarj teknikleri, uzun bir çevrim ömrünü korurken kısa bir şarj süresi, iyi bir kapasite kullanımı ve yüksek bir enerji verimliliği sağlamayı amaçlar. Lityum iyon pillerin şarj işlemi anotta lityum kaplama ve katotta yüksek potansiyeller nedeniyle elektrolit çözeltisinin oksidasyonu olmak üzere başlıca iki faktörle sınırlıdır. İstenmeyen her iki yan reaksiyon da geri dönüşümsüz bir şekilde çevrilebilir lityum kaybına yol açar. Ayrıca, elektrolit bileşenlerini tüketirler ve dirençli yüzey tabakalarının büyümesini desteklerler.

Lityum kaplama, elektrolit içinde çözünen Li^+ iyonlarının anodun aktif maddesinin yüzeyinde metal lityuma indirgenmesini tanımlar. Bu reaksiyonlar, lityumun aktif maddenin kafes yapısına düzenli olarak eklenmesi yerine gerçekleşir. Yük transferi veya lityum katı difüzyonundaki sınırlamalardan kaynaklanabilir. Anot potansiyeli Li^+/Li standart potansiyelinin altına düştüğünde lityum kaplama meydana gelebilir. Kaplanan lityumun bir kısmı daha sonra elektrolit ile geri dönüşümsüz olarak reaksiyona girer ve çözünmeyen yan ürünler oluşturur. Çoğu lityum iyon hücrede kullanılan grafit anotlar, özellikle yüksek şarj durumunda (SoC) düşük denge potansiyelleri nedeniyle lityum kaplamaya çok eğilimlidir. Genel bir eğilim olarak, lityum kaplama daha yüksek SoC, daha yüksek şarj akımı ve daha düşük sıcaklık ile artar. Ayrıca, lityumun grafit anoda eklenmesi hacim değişikliklerine ve mekanik strese neden olarak pilin eskimesine yol açabilir. Referans [25]'te gösterildiği gibi yaşlı hücreler lityum kaplamaya daha duyarlı hale gelebilir. Sonuç olarak, grafit bazlı

lityum-iyon piller için şarj akımları esas olarak anottaki interkalasyon kinetiği ile sınırlıdır [26].

Şarj voltajı, yüksek katot (aşırı) potansiyellerinde meydana gelen elektrolit çözücülerin oksidasyonu ile sınırlıdır. Bir lityum-iyon hücrenin aşırı şarj edilmesi, ısı oluşumunu teşvik eder ve katot malzemesi tamamen delityasyon olduğunda katodun kristalografik yapısında geri dönüşü olmayan hasara neden olur [27]. Bu, gaz oluşumu, hücre içinde aşırı basınca, hücrenin güvenlik havalandırmasının açılmasına ve elektrolit sızıntısına yol açabilen daha fazla oksidatif yan reaksiyonlara yol açar. Lityum-iyon pillerin organik elektrolitleri oldukça yanıcı olduğundan, bu durum yangına neden olabilir veya hücrenin patlamasına neden olabilir. Bu nedenle, üretici tarafından belirtilen maksimum hücre voltajına uyulması esastır.

Sonuç olarak, lityum iyon piller için herhangi bir şarj prosedürü, güvenli çalışma ve iyi çevrim ömrü elde etmek için bu temel sınırlamaları dikkate alınmalıdır. Aşağıdaki bölümde, lityum iyon piller için farklı şarj stratejileri ve bunların belirli özelliklerinden bahsedilmiştir.

4.1.Basit Şarj Yöntemleri

Batarya şarj problemlerini çeşitli amaçlar ve sonlandırma koşulları ile çözmek için geleneksel olarak şarj etme yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu şarj yaklaşımlarında, şarj parametrelerinden biri, akım veya voltaj, şarj işlemi boyunca sabit kalır. Ancak kullanılan yüksek akımlar nedeniyle batarya ömrü azalabilir.

4.1.1. Sabit Akım Şarjı (CC)

Sabit akım şarj yöntemi, tüm şarj işlemi boyunca sabit akımı korumanız gereken bir işlemdir. Basit olan bu şarj işlemi sırasında şarj süresi ve kapasitesinden şarj akımını anlamak oldukça kolaydır. Bu teknik, büyük ölçüde SOC'ye bağlıdır ve sonuç olarak, hücre bazen aşırı yüklenir ve bazen de yetersiz kalır. Bu davranış, hücrenin ömrü üzerinde önemli bir etki yaratabilir. Lityum-iyon hücre kapasitesini daha hızlı bozabilir. Sabit akım şarj işlemi sırasında sabit akım 0.2C ile 1C arasında kalır. Şarj durumunun artmasıyla akım sınırı ters yönde azalmaktadır. Şarj durumunun artmasıyla akım değişmiyorsa, elektrotun aktif maddeleri reaksiyona girerek kapasiteyi

düşürmeye başlar. Bazen bu şarj tekniği, hücrenin tam şarjını korumasına yardımcı olan damlama şarjını kullanır.

4.1.2. Sabit Voltaj Şarjı (CV)

Sabit voltajlı şarj yöntemi, tüm şarj dizisi boyunca sabit bir voltajın uygulandığı başka bir basit şarj yöntemidir. Sabit voltaj şarjı sırasında hücre terminal voltajı artmaya başlar, ancak aynı zamanda şarj akımı da azalmaya başlar. Şarjı durdurduğu andaki şarj akımı için önceden ayarlanmış değerler vardır. Şarj işleminin avantajı, aşırı şarjı önlemesidir. İlk şarj aşamasında SOC düşük kalır, ancak mevcut seviye yüksek kalır ve bu da lityum iyon hücre sağlığı üzerinde önemli bir etki yaratır.

CV şarjı aynı zamanda aküleri şarj etmek için sabit voltaj uygulayan geleneksel bir şarj yöntemidir. Aşırı voltaj ve geri dönüşü olmayan yan reaksiyonlardan kaçınmanın yanı sıra, CV şarjı kullanmanın bir başka avantajı da pil ömrünün uzamasıdır. Bununla birlikte, bu yaklaşım, akımın ilk aşamalarında sabit terminal voltajını korumak için yüksek bir akıma ihtiyaç duyar. Bu da pil kafesine oldukça zararlı olan ve kutuplarının kırılmasına neden olabilecek şarj işlemidir. Şarj hızı, elektrolit bozulması ve kapasite kullanımı arasında doğru dengeyi elde etmek için uygun bir sabit voltaj ayarlamak gerçek bir zorluktur.

4.2. Optimize Edilmiş Şarj Yöntemleri

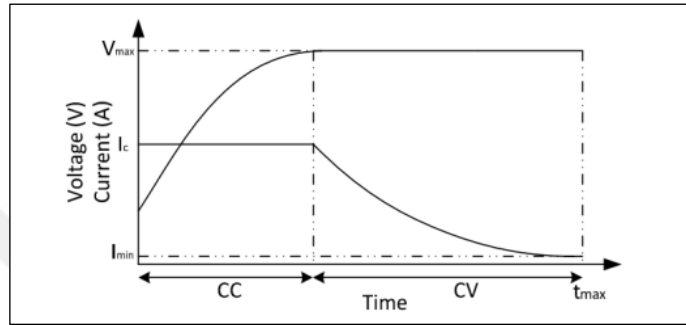
Optimize edilmiş şarj yöntemleri, hızlı şarj, minimum şarj kaybı, yüksek verimlilik ve daha uzun kullanım ömrü sağlamak için lityum iyon pilin çeşitli akım ve voltaj topolojileriyle şarj edilmesine dayanır.

4.2.1. Sabit Akım-Sabit Voltaj (CC-CV) Şarj Yöntemi

Araştırmacılar tarafından CC-CV şarj yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurularak, potansiyel faydaları birleştirilerek, CC-CV yöntemi adı verilen yeni bir şarj tekniği geliştirilmiştir. CC-CV şarj algoritması basitliği, uygulanmasının kolaylığı ve hücre modelinden bağımsız olması nedeniyle en yaygın

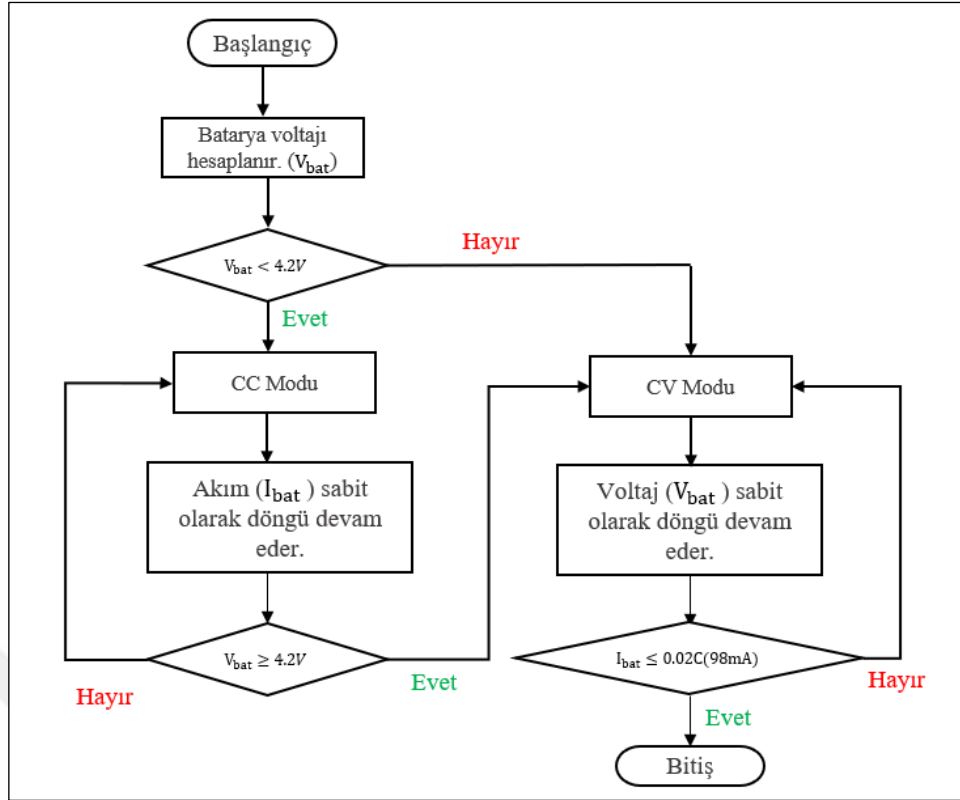
kullanılan şarj metodudur ve lityum-iyon piller için geleneksel şarj protokolü olarak kabul edilir.

CC-CV şarjı sırasında, ilk CC fazı aşamasında bataryaya sabit bir akım uygulanır, batarya voltajı önceden ayarlanmış bir maksimum voltaja ulaştığında, CV fazına geçilir, voltaj sabit tutulur ve ardından akım sıfıra yakın olana kadar akım katlanarak azalır. Şekil 4.1, CC-CV şarjı sırasında tipik bir akım ve gerilim profilini göstermektedir [28].



Şekil 4.1: CC-CV şarj tekniği akım ve gerilim grafiği.

CC-CV şarj yöntemi için tipik bir akış şeması Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Bu şarj metodunda doğru sabit akım ve sabit voltaj değerini seçmek çok önemlidir. Sabit akım şarj modu, voltaj önceden ayarlanmış değere ulaştığında sona erer. Şarj süresi maksimum süreye ulaşırsa veya akım önceden ayarlanmış bir seviyeye düşerse tüm şarj işlemi tamamlanır. Genel olarak, sabit akım ne kadar düşükse, şarj o kadar uzun olur, ancak aynı zamanda şarj verimliliği ve kullanım ömrü de o kadar iyi olur. Ayrıca CV fazı, elektrot parçacıkları içindeki konsantrasyon gradyanlarının dağılmasına izin verir ve genellikle maksimum voltajı aşmadan yüksek kapasite kullanımı elde etmek için gereklidir. Bununla birlikte, CV fazı sırasında akım kademeli olarak azaldığından, yalnızca CC şarjına kıyasla şarj süresi önemli ölçüde artar. Kullanım ömrünü uzatmak için CC-CV şarj yönteminde daha fazla iyileştirme yapılabilir.



Şekil 4.2: CC-CV şarj tekniği akış şeması.

Başlangıcındaki voltaj değeri, kesme voltajından küçük olan tamamen boşalmış piller için (3V'un altındaki voltajlar) hücre derin deşarj olduğunda damlama şarj modu etkinleştirilir. Bataryanın hala güvenli bir şekilde şarj edilip edilemeyeceğini ve çok derin deşarjdan zarar görüp görmediğini test etmek için başlangıç akımı, 0,1C gibi küçük bir akımla, voltaj istenen seviyeye ulaşana kadar yavaş şarj modunda şarj edilecektir. Bu damlama şarjı olarak adlandırılan şarj etme aşaması sırasında sağlıklı bir pil, normal CC aşamasının başlayabileceği 3 volta kadar yavaşça şarj olur. Genellikle, bu işlem döngü süresini artırır. Hasarlı pillerde muhtemelen anot ile katot arasında voltajın yükselmesini önleyen dahili bir kısa devre olacaktır. Burada damlama şarjı asla bitmez ve ek bir zamanlayıcı tarafından sonlandırılabilir.

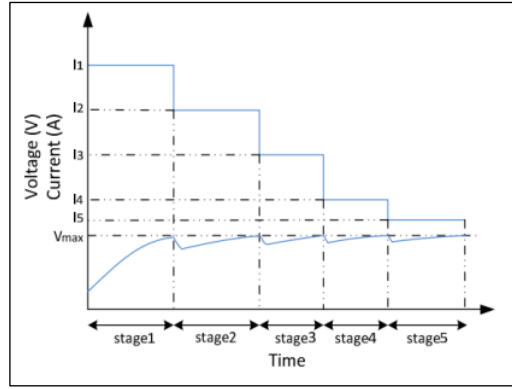
Yıllardır CC-CV şarj yöntemi, lityum-iyon piller için güvenli ve eksiksiz bir şarj sağlamıştır. Ancak bu yöntemin kullanımına ilişkin bazı kısıtlamalar vardır. Örneğin, toplam şarj süresi yaklaşık olarak sabittir, bu da bu yöntemi hızlı şarj için uygun hale getirmez. Şarj akımı artırılrsa bile, bu yalnızca daha kısa bir CC fazına neden olur. Daha yüksek akım nedeniyle aküdeki aşırı potansiyel artar ve CV fazına erken geçişe neden olur. Bununla birlikte, pillerin SoC'si hala düşüktür, bu da CC aşamasında kazanılan

sürenin kabaca CV aşamasına eklendiği anlamına gelir. Bu şarj tekniği bir BMS ile verimlidir. Buna ek olarak, CC-CV, merkezi elektrikli araç şarj istasyonlarında, özellikle yoğun saatlerde, elektrikli araç başına kuyruk gecikmesini en aza indirmede ana katkı sağlayıcı olarak kabul edilir. Referans [10]'daki yazarlar, voltaj, kesme voltajını aştığında CV şarj aşamasının sunucu bozulmasına neden olabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, ani geçiş noktası sistemde bazı kararlılık sorunlarına yol açabilir. Şarj cihazı CC'den CV'ye geçer geçmez akım azalabilir ve bu da akü voltajının anahtarlama eşiğinin altına düşmesine neden olabilir. Böyle bir durumda şarj cihazı CC ve CV fazı arasında gidip gelir.

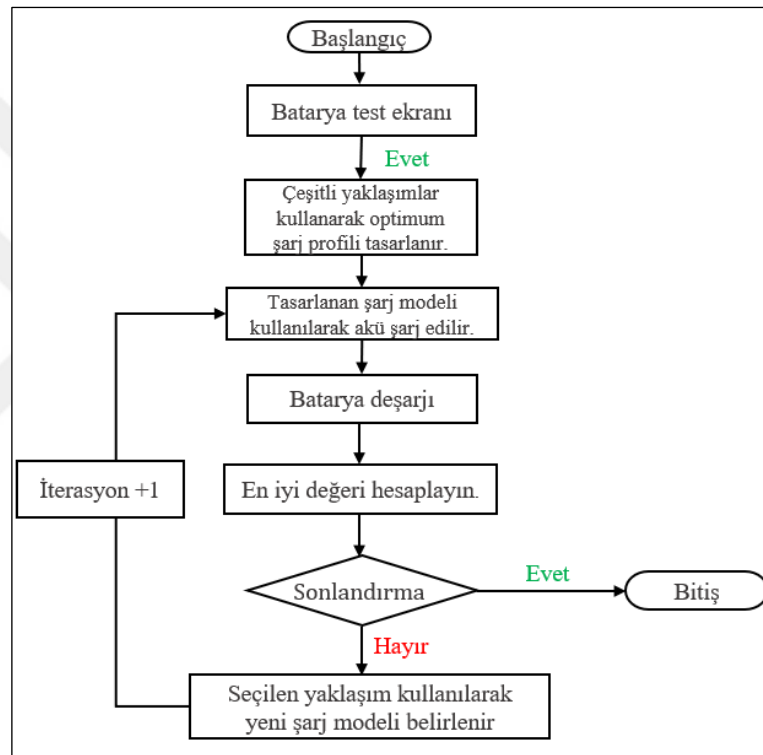
Bu dezavantajlara rağmen, örneğin aşırı şarj riski olmayan yüksek iç dirençli eski piller nedeniyle aşırı potansiyel yüksek olsa bile %100 SOC'ye yakın bir tam şarj garanti edilir. Bu güvenli ve iyi geliştirilmiş yapısı nedeniyle bu algoritma, diğer algoritmalara rağmen hala geleneksel şarj protokolü olarak kabul edilmektedir.

4.2.2. Çok Kademeli Sabit Akım Şarjı (MSCC)

CC-CV şarjı sırasında, CV aşamasının istenen ön ayar değerine ulaşması uzun zaman alır. Bu zorluğun üstesinden gelmek ve hücrenin sağlık kalitesini korumak için bazı farklı şarj teknikleri uygulanmaktadır. Çok aşamalı sabit akım şarjı (MSCC) böyle bir tekniktir. Hızlı şarj için akım seviyesini artırmak önemlidir, ancak yüksek akım terminal voltajını artırabilir. MSCC'de bu zorluk aşılabılır ve şarj sırasında yüksek şarj akımı uygulanabilir. MSCC'nin birden fazla şarj akımı aşaması vardır. En başta, şarj için önceden ayarlanmış akım kullanılır. Bu şarj akımı, önceden ayarlanmış bir voltaj seviyesine ulaşılan kadar devam eder. Daha sonra şarj akımı seviyesi değişir ve akım ile gerilim arasındaki bu değişim dört ila beş aşama boyunca kalır. Şarj yöntemi çok yüksek akımla başlar ve bu akım seviyesi her aşamada azalır. Şekil 4.3 ve 4.4, MSCC şarj grafiğini ve algoritmasını göstermektedir [27].

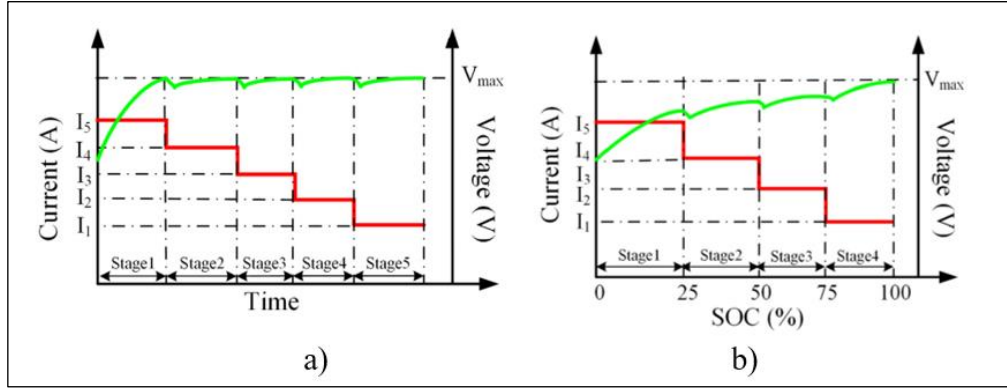


Şekil 4.3: MSCC şarj tekniği akım ve gerilim grafiği.



Şekil 4.4: MSCC şarj tekniği akış şeması.

Bu değişiklikler, gerilim üst kesme gerilimi sınırına ulaştığında gerçekleşirse, bu durum üst kesme gerilimine dayalı olarak kayma koşulu olarak bilinir. Ve eğer bu değişiklik şarj durumuna bağlı olarak gerçekleşirse, bu durum şarj durumuna bağlı olarak kayma durumu olarak bilinir. Şekil 4.5 'de kayma koşuluna bağlı farklı şarj grafikleri verilmiştir. MSCC sırasında, optimum şarj akımı modelini bulmak çok önemlidir. En uygun modeli bulmak için farklı teknikler kullanılır. Bulanık kontrollü temelli şarj, Taguchi yöntemi ve Karınca Kolonisi Sistemi, optimum şarj modelini bulmak için en çok kullanılan yöntemlerdir.



Şekil 4.5: a) Üst kesme gerilimine dayalı kaydırma koşulu ile b) SoC' ye dayalı kaydırma koşulu MSCC şarj teknikleri.

4.2.3. Pulse Şarjı

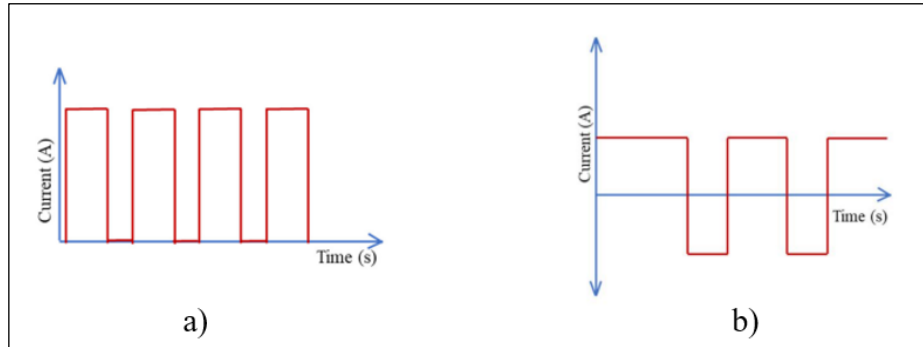
Lityum-iyon pillerin şarj işleminde CC, CV, CC-CV ve MSCC stratejilerine alternatif olarak darbeleri şarj akımı (PCC) tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik şarj oranını hızlandırmak, pili düşük sıcaklık koşullarında ısıtmak ve lityum dendritlerin büyümesini engellemek için uygulanmaktadır. Bunun nedeni, konsantrasyon polarizasyonunu ortadan kaldırmak, güç aktarım hızını artırmak ve CV modunu kaldırmaktır. Kısa süreli bir dinlenme süresi uygulanarak daha az polarizasyon voltajı etkisi elde etmeye ve aynı zamanda pildeki iyon konsantrasyonunu korumaya yardımcı birden çok kez yüksek akımı kabul edebilir. Bu işlem, pilin şarj verimliliğini artırmaya yardımcı olur.

Lityum-iyon piller için darbe şarjı, pozitif darbeleri şarj akımı (PPCC), negatif darbeleri şarj akımı (NPCC) veya Çift Yönlü Darbeleri Şarj Akımı (BPCC) olarak sınıflandırılabilir. Darbe şarjı, genliği ve görev döngüsü ayarlanabilir darbe akımları kullanılarak gerçekleştirilebilir. Pozitif darbe şarjı, bir süre şarj etmeyi ve ardından bir süre duraklatmayı ve bu döngüyü tekrarlamayı içerir. Şarj işlemi sırasında bir duraklama getirilmesi, omik polarizasyonu ve elektrokimyasal polarizasyonu kısmen ortadan kaldırabilir, ancak konsantrasyon polarizasyonunu ortadan kaldırmadaki faydası sınırlıdır. Bu sorunu çözmek için pozitif-negatif darbe şarjı kullanılabilir; burada deşarj darbesi ve duraklama kullanılarak depolarizasyonu artırmak için pozitif darbe şarjından sonra bir deşarj darbesi eklenir. Negatif darbeleri şarj akımı ise akımın periyodik olarak yön değiştirdiği ve kısa süreler için negatif hale geldiği akü şarjında

kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, akü polarizasyonu ve sülfatlaşma gibi sorunların azaltılmasına yardımcı olarak akü verimliliğini ve ömrünü artırır. Gaz kabarcıklarının oluşumunu engeller ve otomotiv, denizcilik ve sabit güç sistemleri için kurşun-asit akülerde yaygın olarak kullanılan kurşun sülfat kristallerini parçalar. Bu tekniği kullanırken belirli parametreler için üretici yönergelerini takip etmek önemlidir. Şekil 4.6'da pozitif darbeli şarj akımı (PPCC), çift yönlü darbeli şarj akımı (BPCC) grafikleri gösterilmiştir.

Darbe şarjı üç önemli aşamadan oluşur: ön şarj, sabit akım şarjı, ve nabız şarjı. Geleneksel şarj etme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, darbe şarjı daha yüksek bir akımda şarj edebilir ve duraklama süresi boyunca pilin konsantrasyon polarizasyonu ve omik polarizasyonu ortadan kaldırılabilir ve bu da bir sonraki şarj turunu daha yumuşak hale getirir. Darbeli şarj, hızlı şarj etme hızı, küçük sıcaklık değişimi ve pil ömrü üzerinde çok az etki gibi avantajlara sahiptir ve bu nedenle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, dezavantajları sınırlı akım işlevine sahip bir güç kaynağı gerekli olmasıdır, bu da darbe şarjının maliyetini artırır.

Genel olarak, darbe şarj etme tekniği zaman tasarrufu için iyidir. Bununla birlikte, yüksek şarj akımı kalın bir katı elektrolit arayüzü (SEI) oluşturabileceğinden, şarj işleminin sürdürülmesinde bazı güçlü kısıtlamalar vardır. Bu kalınlık artarsa, iç voltajı artırabilir ve hücre içinde geri dönüşü olmayan bazı hasarlar oluşturabilir.



Şekil 4.6: a) Pozitif darbeli şarj akımı (PPCC), b) Çift Yönlü Darbeli Şarj Akımı (BPCC) grafiği.

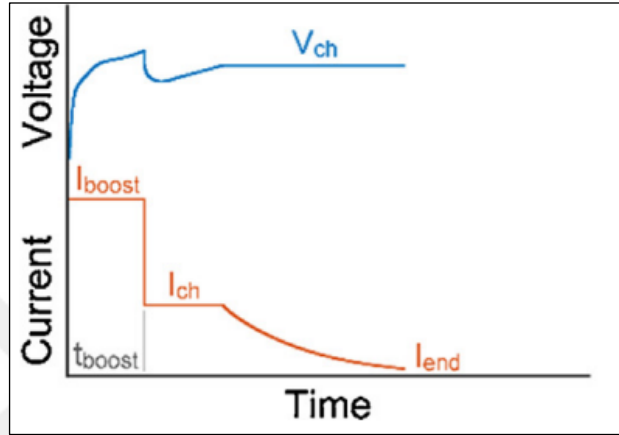
4.2.4. Boost Şarj

Lityum iyon pillerde "boost şarj" genellikle "hızlı şarj" olarak da adlandırılan bir şarj yöntemini ifade etmek için kullanılır. Şarj başlangıcındaki yüksek ortalama akım ile karakterize edilir ve ardından daha orta akımlara sahip bir CC-CV aşamasına geçer. Takviye şarj aşaması, genel şarj süresini azaltmak için her durumda CC-CV aşamasına kıyasla daha yüksek akımlara veya daha yüksek maksimum gerilime izin vermelidir. Ancak şarj süresini kısaltılırken aynı zamanda hücrenin kapasitesi de düşmektedir. Basit bir yöntem 300 devir gidiyorsa, boost şarjı 100-150 devir gidiyordur. Bunun için, kullanıcılar için ciddi bir endişe haline gelir.

Bazı durumlarda, örneğin elektrikli araçlarda veya yaşam destek cihazlarında, bataryanın beklenmedik ve uygunsuz bir anda boşaldığı görülür. Kullanıcılar bu durumda pillerini kullanım ömrünü kısaltmadan çok hızlı bir şekilde kullanılabilir bir SoC'ye şarj edebilmek isterler. Boost şarj tam olarak bunu yapan bir yöntemdir. Neredeyse boşalmış pillerin, kullanım ömrünü olumsuz etkilemeden sınırlı bir süre için çok yüksek şarj akımlarını kaldırabildiği gösterilmiştir. Bu teknikte, toplam kapasitenin üçte birine kadarı beş dakikadan daha uzun olmayan bir sürede yeniden şarj edilebilir. Diğer üçte ikisi ise standart CC-CV şarjı ile şarj edilir. Bu, zaman varsa tam bir şarjın yanı sıra sadece beş dakika içinde kullanıma hazır bir sistem sağlar.

Akım yalnızca düşük SoC'de yüksek olduğundan, yüksek SOC'de meydana gelen yaşlanma etkileri, geleneksel CC-CV şarj yöntemiyle karşılaştırıldığında değişmez. Piller daha düşük SoC'de lityum kaplamaya daha az duyarlı olduğundan, bu ek takviye aralığı, döngü ömrünü bozmadan şarj süresini azaltacaktır. Şekil 4.7'de bataryaya önemli miktarda yük aktarılınca kadar başlangıçta yüksek akımlı bir I_{boost} ile şarj edilir. Yükseltme aralığı, bir zaman değeri t_{boost} veya bir maksimum voltaj V_{boost} ile sınırlıdır. Bu üç parametre tarafından tanımlanan bir CC-CV periyodu olarak da uygulanabilir. Takviye aralığından sonra şarj prosedürü, I_{ch} , V_{ch} ve I_{end} parametreleriyle geleneksel bir CC-CV protokolüne değişir. Şarj hızı, I_{boost} ve t_{boost} tarafından uyarlanabilir. Ayrıca kapasite kullanımı ve şarj hızının ayarlanması için CC-CV şarjı ile aynı kurallar burada da geçerlidir. Deneysel bir çalışma, bir lityum-iyon pilin BC protokolüyle önemli ölçüde daha hızlı şarj edilebileceğini ve başlangıçta yüksek yükseltme akımı olmadan standart bir CC-CV protokolüyle şarj edilen bir hücreyle aynı döngü ömrünü sağlayabileceğini göstermiştir [10]. Başka bir çalışma da

BC protokolüne kısa şarj süresi ve iyi döngü ömrü atfetmektedir [29]. Ancak, çalışmaların hiçbirisi BC protokolünü $I_{ch} = I_{boost}$ olan hızlı şarj eden bir CC-CV protokolüyle karşılaştırmadı. Bu nedenle, şarj akımını daha yüksek SoC'de azaltmanın hücrelerin döngü ömrü için yararlı olup olmadığı veya bu çalışmalarda kullanılan hücrelerin yüksek şarj akımlarına duyarlı olup olmadığı ve yüksek akım CC-CV protokolü ile de şarj edilip edilemeyeceği belirsizliğini koruyor.



Şekil 4.7: Boost şarj grafiği.

Boost şarjı dikkatli bir şekilde kontrol etmek ve pilin sınırlarını aşmamak önemlidir. Pilin aşırı şarj olmasını ve buna bağlı olarak aşırı ısınma veya zarar görmesini önlemek için şarj süreci sıkı bir şekilde izlenmelidir. Ayrıca, pilin ömrünü etkileyebilecek aşırı şarjın uzun süreli kullanım da kaçınılması önerilir.

Keil ve Jossen [30], CC-CV, boost şarj ve darbe şarj stratejileri ile şarj edilen farklı kimyalara sahip üç tip 18650 hücreden elde edilen çevrim verilerini deneysel olarak karşılaştırdıktan sonra çelişkili sonuçlara ulaştı. Benzer bir şarj süresine sahip CC-CV'ye kıyasla boost şarj için artan bir kapasite zayıflama oranı rapor edilirken, darbe şarjı için kapasite azalma oranlarında önemli bir fark gözlenmedi. Yazarlar, CC-CV'nin yüksek güçlü pilleri boost şarj etmek için uygun olduğu sonucuna vardılar, ancak MCC'nin lityum kaplamanın meydana gelme olasılığının yüksek olduğu durumlarda yararlı olabileceğinden bahsettiler.

4.2.5. Model Bazlı Şarj Yöntemleri

Eşdeğer devre sıcaklık modeli: Sıcaklık, pil performansında hayati bir rol oynar. Şarj sırasında pil sıcaklığı çok hızlı yükselir. Sıcaklık maksimum limiti aşarsa katot malzemelerini etkileyebilir ve hücrenin kapasitesini düşürebilir. Bu nedenle, şarj sırasında sıcaklığı korumak önemlidir. Eşdeğer devre sıcaklık modeli, optimum akım yükleme modelinin sıcaklık limitini takip edecek şekilde seçildiği bir modeldir. Eşdeğer devre güç kaybı modeli: Minimum güç kaybını akılda tutarak, eşdeğer devre modeli tasarımı bazen en uygun şarj modelini bulmak için kullanılabilir. Şarj süresi, sıcaklık, şarj akımı ve voltaj limiti, pilin güç kaybını en aza indirecek şekilde kontrol edilir.

4.2.6. Elektriksel-ısıl yaşlanma modeli

Bu devre sistemi, hücrenin termal yaşlanmasını belirleme yeteneğine sahiptir. Bu model, güvenli ve hızlı şarjı koruyabilir. Şarj dizisi, elektriksel, termal yaşlanmanın etkisini takip eden her parametreyi destekler. Tasarımı karmaşıktır.

4.2.7. Diğer Optimizasyon Şarj Yöntemleri

Bu son bölüm, literatürde önerilen bazı daha farklı şarj protokollerine genel bir bakış sunar. Aynı zamanda, şarj akımlarını gerçek durumundaki lityum iyon pilin özelliklerine bağlı olarak ayarlayan uyarlamalı prosedürleri içerir. Bu şarj stratejilerinin ana özellikleri aşağıdaki paragraflarda sunulmaktadır.

Çeşitli şarj prosedürleri, yüksek şarj akımlarıyla başlayan ve artan SoC ile akımları azaltan değişken akım profillerine dayanır. Belirli voltaj, sıcaklık, stres veya konsantrasyon sınırlamalarını aşmadan hızlı şarj elde etmek için optimizasyon yöntemleri kullanılır. Şarj profilleri ya deneysel olarak belirlenir ya da lityum kaplamayı kısıktırmadan uygulanabilir maksimum şarj akımını elde etmek için simülasyon modellerinden türetilir. Bu tür protokoller, pratik uygulamalarda neredeyse hiç kullanılmamıştır, çünkü bu akımlar hücrenin sıcaklığına ve bozulmasına göre önemli ölçüde değiştiğinden, maksimum şarj akımlarının belirlenmesi zor görünmektedir. Hücre içindeki gerçek polarizasyon veya konsantrasyon gradyanları hakkında kesin bilgi gerekli olduğundan, kısa vadeli ve uzun vadeli yük geçmişinden

de etkilenen hücrenin dahili değişkenlerini belirlemek için ek durum tahmin rutinleri gereklidir. Ayrıca, dahili dirençler genellikle düşük SoC'de en yüksek değerlere sahip olduğundan, şarj işleminin başlangıcında daha düşük bir şarj akımı içeren bazı şarj protokolleri vardır. Çok düşük SoC'de [31] kayıpları en aza indirmek için düşük şarj akımı veya sürekli artan akım ile periyot kullanılır.

Ayrıca, Referans [31], artık önceden tanımlanmış şarj akımlarına dayalı olmayan, ancak bir voltaj yörüngesi kullanan bir şarj protokolü önermektedir. Yeni bir hücrenin referans akım profiliyle şarj edilmesinin sonucu olan bu yörünge, tüm pil ömrü boyunca sabit kalır. Böylece, şarj süresi sabit kalırken, ilerleyen kapasite ile şarj akımları azalır.

Daha egzotik şarj stratejileri sunan çalışmaların çoğu, doğrulama için yalnızca birkaç deneysel veri sağlar. Ayrıca, yalnızca simülasyona dayalı olan ve şarj işlemi için hiçbir deneysel doğrulama sunmayan lityum-iyon pillerin şarj edilmesiyle ilgili çeşitli araştırmalar da vardır.

4.3. Önerilen Hızlı Şarj Tekniği

Bu tezin amacı, lityum-iyon hücre kapasitesinin bozulmasını artırmadan pilin şarj süresini azaltmaya yardımcı olacak bir hızlı şarj etme tekniği geliştirmektir. Bu bölümde deney düzeneği, önerilen hızlı şarj algoritması, karşılaştırma için kullanılan şarj süresi, kapasite düşüşü ve çıktıların sonucu açıklanmaktadır. Burada çıktı sonucunu tartışılmıştır ve önerilen tekniğin neden mevcut CC-CV şarjından daha iyi olduğuna dair bir fikir vermektedir. Hedefimiz mevcut CC-CV şarja kıyasla süreyi en aza indirmek olduğu için sadece bu teknikle kıyaslanmıştır.

Bir önceki bölümde bahsedilen, mevcut protokolleri iyileştirmek ve yeni araştırmalar başlatmak için diğer literatür incelemelerinde dünya çapında ve farklı mevsimlerde uygulanabilirlik için farklı sıcaklıklarda ve bağıl nemde şarj sürecini geliştirmeye yönelik doğrudan bir ihtiyaç vardır. Bu nedenle, minimum şarj akımı, maksimum verimlilik ve daha uzun kullanım ömrü ile güvenli bir şarj işlemi sağlamak için dinamik bir şarj protokolü önermek ve lityum iyon pilin çeşitli ortam koşullarında modellemesini geliştirmek için yapay zekanın (AI) uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Mükemmel şarj protokolünün hala geliştirilmesi gerekmektedir. Bu algoritmanın her zaman güvenli şarj koşullarını garanti etmesi, kontrol etmesi, basit

olması gerekmektedir. Ayrıca lityum-iyon bataryaların çalışma performanslarını yükseltmek, ömürlerini uzatmak, pilin aşırı yaşlanmasını önlemek ve mümkün olan en kısa sürede, en az enerji kaybıyla hedeflenen kapasiteye kadar şarj edilebilmelerini sağlamak amacıyla optimal hızlı şarj stratejileri geliştirmek gerekir. Bu bölümde, potansiyel olarak bu işlevleri sağlayabilecek yeni bir şarj algoritması önerilmiştir. Bu algoritmanın performansını klasik algoritması ile iki kritere göre karşılaştırılacaktır. İlk karşılaştırma kriteri batarya şarj süresidir. Özellikle pil tamamen bitmiş ve sistem kapanmışsa bir an önce sistemin kullanıma hazır olması istenir. Bu nedenle, yalnızca tam şarj için gereken süreyi değil, aynı zamanda toplam kapasitenin yalnızca üçte birini yeniden şarj etme süresini de dikkate alıyoruz. Klasik CC-CV algoritmasının ve önerilen algoritmanın performansı, Matlab/Simulink'te simüle edilen tam bir şarj döngüsü temelinde karşılaştırılır.

İkinci karşılaştırma kriteri, beklenen sıcaklık artışıdır. Bunun için deneysel olarak ölçülen CC-CV algoritmasının mevcut bir uygulamasının sıcaklık artışı ile, önerilen algoritmanın beklenen sıcaklık artışı karşılaştırılır. Ayrıca, süreç varyasyonları üzerinden beklenen kararlılık ve davranış hakkında bazı açıklamalar yapılmıştır. Daha sonra önerilen algoritmanın sisteme uygun olup olmadığı sonucuna varılacaktır. İlk olarak önerilen genetik algorithmadan, genetik algoritmanın temellerinden, akış şemasından sonrasında genetik algoritmanın bir çeşidi olan çok amaçlı genetik algorithmadan bahsedilecektir.

4.3.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritma, hesaplamalı matematik kullanarak optimizasyon yapmak için kullanılan bir arama algoritmasıdır ve orijinal evrimsel algoritmalarından biridir. Evrimsel algoritmalar (EA), optimum çözümleri seçmek için güçlü hesaplama algoritmaları geliştirmek üzere doğal seçim süreçlerini taklit eder. Genetik algoritmalar (GA), benzetimli tavlama (SA), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve tabu arama (TS) evrimsel algoritmalar şemsiyesi altına giren popüler tekniklerden bazılarıdır.

Biyolojik esintili hesaplama yaklaşımlarını kullanma motivasyonu iki temel gözlemden kaynaklanmaktadır. Birincisi, mühendislik, bilgi işlem ve diğer alanlardaki karmaşık problemlerin çözümünde matematiksel optimizasyon algoritmaları güçlü

sınırlamalara maruz kalmaktadır. Bu alanlardaki ortak zorluklar, fiziksel olayları tanımlayan matematiksel modellerin eksikliği, süreksiz fonksiyonlar ve yüksek doğrusal olmama etrafında dönmektedir. İkinci olarak, mühendislikte karşılaşılan birçok karmaşık problem doğada ilgili bir biçimde zaten mevcuttur. Optimizasyon, biyolojik organizmaların hayatta kalmak için gerçekleştirdiği adaptasyon sürecinde olduğu gibi doğanın da doğasında vardır. Mühendisler ve bilim insanları, doğal sistemleri optimize etmek için doğa tarafından kullanılan çeşitli verimli problem çözme tekniklerini keşfetmeye devam etmektedir.

EA'ların geleneksel optimizasyon yöntemlerine göre göreceli avantajları ve sınırlamaları aşağıdaki gibidir:

1. Geleneksel algoritmalar tipik olarak her iterasyonda optimal çözüme doğru ilerleyen tek bir aday optimum üretir. Evrimsel algoritmalar her iterasyonda bir nokta popülasyonu oluşturur. Popülasyondaki en iyi nokta optimal çözüme yaklaşır.

2. Geleneksel algoritmalar bir sonraki iterasyonda ki aday optimal noktayı deterministik bir hesaplama ile hesaplar. EA'lar genellikle bir sonraki popülasyonu rastgele sayı üreteçleri kullanan işlemlerin bir kombinasyonu ile seçer.

3. Geleneksel algoritmalar ilerlemek için gradyan ve/veya Hessian bilgisine ihtiyaç duyarken EA'lar genellikle sadece fonksiyon değerlerine ihtiyaç duyar. Sonuç olarak EA'lar, amaç fonksiyonunun düzgün olmadığı ve potansiyel olarak süreksiz olduğu çeşitli optimizasyon problemlerini çözebilir.

4. EA'ların dezavantajı, özellikle tek amaçlı optimizasyon için gradyan tabanlı yöntemlere kıyasla genellikle daha fazla fonksiyon değerlendirme gerektirmesidir. EA'larla ilişkili hesaplama süresi gradyan tabanlı yöntemlerden daha uzundur.

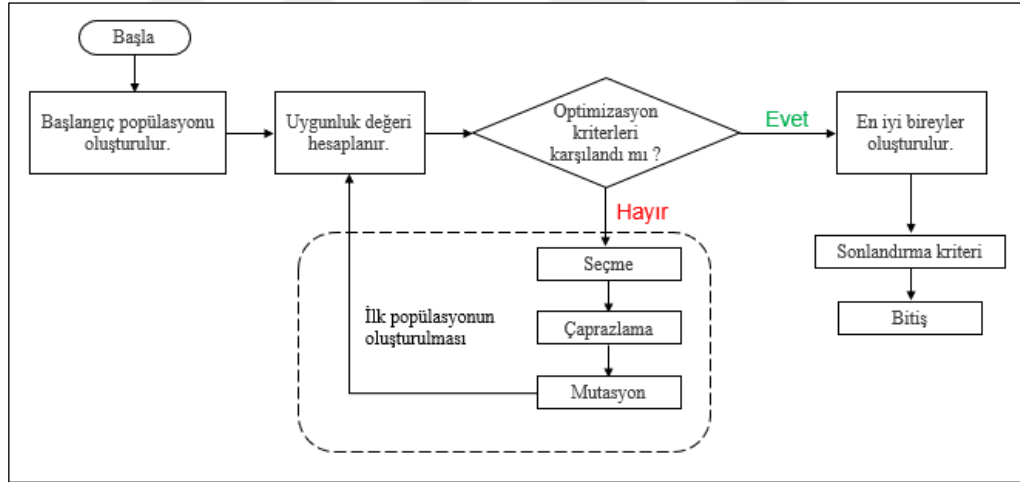
5. Evrimsel algoritmalar, tipik olarak rastgele seçimler içeren stokastik yöntemlerdir. Bu nedenle, aynı EA kodunun farklı çalıştırmaları farklı optimal çözümler üretebilir.

6. Evrimsel algoritmalar, en azından yerel bir optimumun yakınsama üzerine garanti edildiği gradyan tabanlı yöntemlerin aksine, optimum bir çözüme yakınsama kanıtlarına sahip değildir. Uygulamada, dikkatli ayarlarla kullanıldığında evrimsel algoritmaların küresel olarak optimum çözümler üretme potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. EA'ların arama sürecinin doğasında var olan rastgelelik nedeniyle, arama kapsamları sınırlı olan geleneksel yöntemlere kıyasla genellikle çok daha geniş bir çözüm uzayı keşfedilir.

4.3.2. Genetik Algoritmaların Temelleri

Bir genetik algoritma, tüm çalışma süresi boyunca bir birey popülasyonunu yinelemeli olarak değiştirir ve her adımda belirli kriterlere göre ebeveynleri seçer. Bu ebeveynler daha sonra çocuk olarak adlandırılan bir sonraki birey neslini oluşturmak için kullanılır. Birbirini takip eden nesiller ilerledikçe, popülasyon optimum çözüme veya çok amaçlı problemler söz konusu olduğunda bir dizi Pareto optimum çözüme ulaşmayı amaçlayan evrimsel süreçlerden geçer. Temel formülasyonunda, bir genetik algoritma uygulaması aşağıdaki temel aşamaları kapsar.

1. Kodlama, bireyleri temsil eden dizeler oluşturulur.
2. Başlangıç popülasyonu oluşturulur.
3. Yeni nesil üretilir.
4. Durdurma kriterlerine ulaşıldığında algoritma durdurulur.



Şekil 4.8: Genetik algoritma akış şeması.

1. Kodlama: (Encoding) Kodlama, evrimsel algoritmalar içinde bireyleri temsil etmek için bir mekanizma görevi görür. Genel olarak bireyler, 0 ve 1'lerden oluşan ikili bir dizi (kromozom olarak adlandırılır) gibi sabit uzunlukta bir dize formatı kullanılarak kodlanır. Alternatif olarak, değişken dize uzunluklu kodlamalar da kullanılabilir. Kodlama, bir sayının 0'lar ve 1'lerden oluşan bir diziye dönüştürülmesini içermektedir ve sayının 10 tabanlı ondalık formatta temsil edilmesini sağlar. Örneğin,

aşağıdaki örneği göz önünde bulundurun: Bir sayıyı ikili olarak kodlamak için dize uzunluğu 5 (örneğin 10001) kullanılabilir ve kodlanan dize daha sonra 10 tabanı kullanılarak ondalık sayıya dönüştürülebilir.

$$1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 16 + 1 = 17$$

2. Başlangıç popülasyonu: Algoritma, rastgele bir süreçle bir başlangıç popülasyonu oluşturarak başlar. Popülasyon büyüklüğü ve kodlamanın bit uzunluğu gibi önemli başlangıç kararları kullanıcılar tarafından yapılmalıdır. Bu kararlar genetik algoritmanın performansını önemli ölçüde etkiler ve dikkatle değerlendirilmeyi gerektirir.

Örnek: Mevcut örnek için popülasyonda altı birey olduğunu varsayalım. Her birey (Şekil 4.9'da bir satırda temsil edilir) yazı=1 ve tura=0 olmak üzere bir dizi yazı tura atılarak rastgele oluşturulur. 5 bitlik bir ikili dizi kullanarak her bir bireyi kodlamayı seçtiğimiz için beş yazı tura'nın gerekli olduğunu unutmayın. Başlangıç popülasyonunun 10101, 11001, 01001, 11101, 10111 ve 10000 ürettiğini varsayalım (Şekil 4.9'daki Sütun 2). Ondalık sistemde, başlangıç popülasyonu aşağıdaki sayı kümesidir {21, 25, 9, 29, 23, 16} (Şekil 4.9'da Sütun 3). Şimdi başlangıç popülasyonundaki her bir birey için uygunluk fonksiyonu değerini ($f(x) = x^2$) değerlendirin. Uygunluk fonksiyonu değer kümesi {441, 625, 81, 529, 256} (Şekil 4.9'da Sütun 4).

Initial Population				Reproduction				
	Initial random population	Decimal equivalent	Function value	Initial random population (parent)	Reproduction option (random choice)	New population (child)	Decimal equivalent	Function value
1	1 0 1 0 1	21	441	1 0 1 0 1	crossover with 2- bits 1,2,3	1 1 0 0 1	25	625
2	1 1 0 0 1	25	625	1 1 0 0 1	crossover with 1- bits 1,2,3	1 0 1 0 1	21	441
3	0 1 0 0 1	9	81	0 1 0 0 1	elite	0 1 0 0 1	9	81
4	1 1 1 0 1	29	841	1 1 1 0 1	crossover with 5- bit 2	1 0 1 0 1	21	441
5	1 0 1 1 1	23	529	1 0 1 1 1	crossover with 4- bit 2	1 1 1 1 1	31	961
6	1 0 0 0 0	16	256	1 0 0 0 0	mutation (bits 1,3)	0 0 1 0 0	4	16

Şekil 4.9: Genetik algoritmanın temelleri.

3. Üreme: Genetik algoritma bağlamında, çocuk nesil olarak adlandırılan bir sonraki popülasyonun üretimi, ebeveyn nesil olarak bilinen bir önceki nesli içeren üreme süreçleri yoluyla elde edilir. "En uygun olanın hayatta kalması" ilkesi genetik

algoritmaların işlemlerine sıklıkla rehberlik eder. Genetik algoritmalarda yeni neslin yapısını şekillendirmek için yaygın olarak üç temel mekanizma kullanılır. Bu mekanizmaların seçimi ve kombinasyonu, kendi özel gereksinimlerine göre uyarlanmış farklı uygulamalarda değişiklik gösterebilir.

a) Elitizm: Bu yaklaşımda, genetik algoritmalarda kullanılan önemli bir yaklaşımdır; mevcut nesilde en yüksek uygunluk değerlerine sahip bireylerin korunması ve bir sonraki nesle yayılması sağlanır. Bu strateji, en iyi performans gösteren bireylerin elde tutulmasını sağlar ve böylece ardışık iterasyonlarda popülasyonun genel uygunluğunu potansiyel olarak iyileştirir.

Örnek: Daha önce ele alınan örnekte, ana popülasyondaki beş bireyden, {10101, 11001, 01001, 11101, 10111}, üçüncü birey, 01001, mevcut minimizasyon problemi için en düşük fonksiyon değerine sahipti. Bu birey elit olarak kabul edilir ve bir sonraki neslin bir parçası olur.

b) Çaprazlama: Genetik algoritmalarda kullanılan temel bir teknik olan çaprazlama, iki ebeveyn bireyin kodlanmış dizeleri arasında belirli bitlerin değişimini içerir. Bir dizi rastgele seçim kullanılarak, bir ebeveynden belirlenen bitler diğer ebeveynden gelen karşılık gelen bitlerle değiştirilir. Bu mekanizma, yeni genetik kombinasyonların keşfedilmesini kolaylaştırır ve popülasyon içindeki genetik materyali çeşitlendirerek potansiyel olarak daha iyi çözümlere yol açar.

Örnek: Elit birey 01001'in bir sonraki neslin bir parçası olduğunu varsayın. İlk olarak, hangi bireyin hangi bireyle çaprazlanacağını seçin (örneğin, Birey 2 ile Birey 1, Birey 1 ile Birey 3 veya Birey 1 ile Birey 4). Seçim genellikle rastgele yapılır. Birey 1, 10101'in Birey 2, 11001 ile ve Birey 4, 11101'in Birey 5, 10111 ile çaprazlandığını varsayalım.

Ardından, bireylerdeki kaç bitin değiş tokuş edileceğine karar verin. Örneğin, 2 bit mi, 3 bit mi, yoksa 4 bit mi? Bu seçim de rastgele yapılır. Birey 1 ve 2 için dizideki 3 bitin değiş tokuş edildiğini ve Birey 4 için bir bitin değiş tokuş edileceğini varsayın (Şekil 4.9'da Satır 1, 2, 4 ve 5'teki gri gölgeli bölgelerle gösterilmiştir)

Yapılacak son seçim (yine rastgele sayılar kullanılarak uygulanır) bitlerin konumlarıdır. Örneğin, ilk üç biti veya son üç biti değiştirin. Bunun için ilk üç bit 1 ve 2 numaralı bireyler için, Bit 2 ise 5 numaralı birey için değiştirilecektir (Şekil 4.9'da Satır 1, 2, 4 ve 5'teki gri gölgeli bölgelerle gösterilmiştir).

c) Mutasyon: İki ebeveyni içeren çaprazlama işleminin aksine, mutasyon işlemi belirli bitleri rastgele değiştirerek, 0'dan 1'e veya tersine çevirerek tek bir ebeveynen yavru üretir. Genetik algoritma uygulamalarının çoğunda, bir mutasyon olayının gerçekleşme olasılığını belirlemek için tipik olarak bir olasılık değeri atanır. Bu olasılık, popülasyon içindeki genetik varyasyon oranını etkileyen bir kontrol parametresi görevi görerek potansiyel olarak faydalı genetik varyasyonların keşfedilmesine olanak tanır ve optimal olmayan çözümlere erken yakınsamayı önler.

Örnek: Birey 6'nın Bitler 1 ve 3 üzerinde bir mutasyondan geçmesi için rastgele bir seçim yapın. Şekil 4. 9'da gösterildiği gibi, bu iki pozisyon için bitler tersine çevrilir, lider çocuk (Şekil 4. 9'daki son satırda gri gölgeli bölgelerle belirtilmiştir).

Şekil 4. 9'daki 7. Sütun yukarıdaki üç mekanizma tarafından üretilen çocuk popülasyonunu göstermektedir. Ondalık karşılıklar Sütun 8'de raporlanmıştır.

4. Üretilen yeni popülasyon: Elitizm, çaprazlama ve mutasyon gibi seçim mekanizmalarının uygulanmasından sonra yeni bir popülasyon oluşturulur. Bu yeni popülasyon, bir önceki nesil üzerinde gerçekleştirilen üreme süreçleri sonucunda ortaya çıkan yavru bireylerden oluşur. Bu bireyler genetik özellikleri ebeveynlerinden miras alır ve onların genetik materyallerinin bir kombinasyonuna sahiptir. Yeni popülasyonun büyüklüğü, genetik algoritmanın başında belirlenen önceden belirlenmiş popülasyon büyüklüğü ile tutarlı kalır. Yeni popülasyonun bileşimi, çok amaçlı problemler söz konusu olduğunda potansiyel olarak iyileştirilmiş çözümlere veya Pareto optimal çözüm kümelerine doğru evrimsel ilerlemeyi yansıtır.

Fonksiyon değerleri Şekil 4. 9'da gösterildiği gibi hesaplanır. Yukarıdaki yeniden üretim seçeneklerinin bir kombinasyonunu kullanarak, algoritma istenen bir durdurma kriterine ulaşılan kadar ilerler. Durdurma kriterlerine örnek olarak nesil sayısı, zaman sınırı ve fonksiyon toleransı verilebilir. Örnek: Şekil 4.9'un son sütununda sunulan çocuk popülasyonunun fonksiyon değerlerini gözlemleyin. Çocuk neslindeki en iyi birey, ebeveyn nesline kıyasla fonksiyon değerinde bir düşüş göstermektedir [32].

4.3.3. Önerilen Yeni Şarj, Çok Amaçlı Genetik Algoritma Optimizasyon Temelli Hızlı Şarj

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. İncelenen yöntemlerin çoğu, hedeflerin ağırlık temelli olarak (Weight-

Sum Method) tek bir fonksiyonda toplanmasını içermektedir. Ağırlık temelli yöntemlerin en önemli dezavantajlarından biri, uygun ağırlıkların belirlenmesi gerekliliğidir ve bu genellikle önemli bir zorluktur.

Çok amaçlı problemleri çözmek için evrimsel algoritmaları kullanma motivasyonu iki yönlüdür:

(1) EA'lar bir aday çözüm popülasyonu ile çalışır ve tahakkümsüzlük kavramını kullanır; böylece Pareto çözümlerinin sırayla, her seferinde bir çalıştırma ile bulunduğu geleneksel tekniklerin uygulanmasının aksine, bir dizi Pareto çözümünün tek bir yakınsamada bulunmasına izin verir.

(2) EA'lar Pareto sınırının şekline (dışbükey veya içbükey) veya süreksiz Pareto sınırlarına karşı önemli ölçüde daha az duyarlıdır.

Literatürde çok amaçlı genetik algoritmaların (MOGA) birçok uygulaması mevcuttur. Bir MOGA'nın ilk pratik uygulaması Schaffer tarafından vektör değerlendirmeli genetik algoritma (VEGA) olarak adlandırılmıştır [33]. VEGA yaklaşımının bir dezavantajı, bazı Pareto çözümlerine karşı önyargılı olmasıdır. Baskın olmayan sıralama prosedürü [34] daha sonra VEGA'nın dezavantajlarının üstesinden gelmek için birkaç araştırmacı tarafından uygulanmıştır. Bir popülasyondaki bireyleri sıralamak için bir sıralama prosedürü benimsenmiştir. Bir birey, a, en az bir hedefte b'den kesinlikle daha iyiye ve a tüm hedeflerde b'den daha kötü değilse, başka bir bireye, b, hakim olduğu söylenir. Eşit sıralamaya sahip bireyleri karşılaştırmak için bir mesafe ölçüsü kullanılır.

Çok amaçlı genetik algoritma optimizasyon tabanlı hızlı şarj, şarj işlemlerinin verimliliğini ve hızını artırmak için kullanılan son teknoloji bir yaklaşımdır. Teorik analizde, bu yenilikçi hızlı şarj sisteminin temel ilkelerini ve işleyişinden bahsedilmiştir. Sistem, çok amaçlı optimizasyon problemlerini ele alma yetenekleriyle tanınan MOGA'ları kullanarak, şarj süresini en aza indirme, enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarma ve pil ömrünü uzatma gibi çeşitli hedefleri aynı anda göz önünde bulundurarak optimum şarj performansı elde etmeyi amaçlamaktadır. Teorik yönlerin titiz bir şekilde araştırılmasıyla, MOGA Optimizasyon Tabanlı Hızlı Şarj sisteminin altında yatan mekanizmalara ışık tutmayı ve geleneksel şarj algoritmalarına göre potansiyel avantajlarına dair iç görüler sağlamayı amaçlıyoruz. Bu analiz, teorik çerçevenin anlaşılması için bir temel oluşturmakta ve bu şarj çözümünün pratik

uygulaması ve performans değerlendirmesine yönelik daha derinlemesine araştırmalar için zemin hazırlamaktadır.

Geleneksel lityum pil şarjı çoğunlukla CC-CV yöntemini benimser, ancak sürekli ve sık şarj uygulama, düşük sıcaklık koşullarında hızlandırılmış kapasite düşüşüne neden olur ve bu da verimsizlik, güvenlik sorunlarına yol açar. Bataryaya akan akımın maksimum şarj akımı değerinin ötesinde olması durumunda performans ve kullanım ömrü önemli ölçüde etkilenecek, hatta güvenlik sorunlarına yol açacaktır. Bununla birlikte, elektrokimya açısından gerçek zamanlı olarak maksimum şarj akımını elde etmekte zorluk çekilmektedir, çünkü batarya kimyasal parametreleri ve normalde BMS tasarımcıları için mevcut olmayan batarya malzeme özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi gerektirmektedir. Polarizasyon voltajı, batarya terminal voltajının dengeden sapmasını tanımlar ve bu sapma, parçalı eşdeğer devre modellerine dayalı olarak gözlemlenebilir. Bataryanın polarizasyonu çok büyük olduğunda şarj sırasında yan reaksiyonlar ve lityum birikimi meydana gelebilir, bu da batarya performansını ve ömrünü belirgin şekilde etkiler. Lityum iyon pillerin şarj süreciyle ilgili belirtilen sorunları çözmeyi hedefleyen bu çalışma, geliştirilmiş bir elektrik-termal bağlantı modeline dayalı olarak lityum-iyon piller için bir optimizasyon stratejisi ve soğuk ortamlarda şarj yöntemi önermektedir. Bu, büyük ölçüde bataryanın kabul edilebilir şarj akımına karşılık gelmektedir. Bu nedenle bu çalışmada maksimum şarj akımını hesaplamak için polarizasyon kısıtlaması kullanılmıştır.

Bu çalışmada, kurulacak batarya elektriksel eşdeğer devre, ısı transferi ve sıcaklığa bağlı kapasite kaybı bağlaşıklık modelleri kullanılarak, -10 ve 0 C ortam sıcaklığında SoC'ye bağlı olarak, çok kademeli sabit akım stratejisiyle şarj edilen bir lityum iyon bataryanın her kademe için uygulanacak şarj akımı, şarj süresi ve sıcaklık artışı amaç fonksiyonlarına göre çok amaçlı genetik algoritmayla optimize edilecektir. Böylece bir lityum iyon bataryanın, çalışma performansı ve ömrü kabul edilebilir seviyede kalmak üzere, şarj esnasında batarya sıcaklığı azami sınır değeri aşmadan, düşük ortam sıcaklıklarında şarj edilebilir kapasitesi mümkün olduğunca arttırılırken, toplam şarj süresi kısaltılacaktır.

HPPC deneyi aracılığıyla, ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin parametre tanımlaması Bölüm 2 de yapılmıştır ve lityum iyon pilin elektrik-termal bağlantı modeli Bölüm 3 de oluşturulmuştur. Bu bölümde şarj süresi ve şarj sıcaklık

faktörü dikkate alınarak, lityum-iyon pilin SoC değerlerindeki şarj akımları, kabul edilebilir şarj akımı sınır değerleri aralığında çok amaçlı genetik algoritma ile optimize edilecektir. Kabul edilebilir şarj akımı, batarya SoC'sinin düşük tarafında yüksektir ve polarizasyon özelliklerine dayalı olarak artan SoC ile azalır.

Batarya şarjı sırasında, şarj süresi ve batarya enerji kaybı, şarj yöntemini değerlendirmek için önemli indekslerdir. İkinci dereceden eşdeğer devre batarya modeli kullanılarak şarj işlemi analiz edilirken, bataryanın enerji kaybı Ohmik direnç ve polarize iç dirençten kaynaklanır. Bununla birlikte, şarj süresi genellikle şarj oranıyla ters orantılıdır. Şarj yönteminin temel sorunu, şarj süresini ve batarya enerji kaybını dengelemektir. Bu çok amaçlı işlevde üç amaç vardır: kısa şarj süresi, şarj sıcaklığı artışı ve maksimum şarj kapasitesi. Aslında, optimize edilmesi gereken yalnızca iki hedef vardır, şarj süresi ve şarj sıcaklığı. Şarj kapasitesi, pilin hedef kapasiteye kadar şarj edilmesini sağlamak için kullanılır. Batarya şarj verimliliğini ve şarj süresini garanti etmek için şarj kapasitesi deneysel olarak elde edilir. Şarj süresi ve sıcaklık artışı birbirinin aynısı olduğundan, hedef işlevin yalnızca belirli bir değere ulaşmak için gereken şarj miktarını karşılaması gerekir.

Temel adımlar: optimizasyon problemi sınıfını tanıma, tasarım değişkenlerinin tanımlanması, amaç fonksiyonunun oluşturulması, kısıtlamaların tanımlanması, ilk tahminin başlatılması, uygun rutinin çağırılması ve sonuçları analiz edilmesi şeklinde ilerlemektedir.

MATLAB, gamultiobj adı verilen GA'lara dayalı çok amaçlı bir optimizasyon algoritması sağlar. Gamultiobj'nin kullanılarak hazırlanan optimizasyon adımları aşağıda bölümde anlatılmıştır.

4.3.3.1. Şarj Akımının Sınır Koşulunun Belirlenmesi

Bir lityum-iyon pilin maksimum şarj akımı genellikle pil üreticisi tarafından, bataryanın tasarımı, kimyası ve kullanım amacı dahil olmak üzere çeşitli faktörlere göre belirler. Lityum iyon pillerin aşırı ısınmayı, bozulmayı ve hatta güvenlik tehlikelerini önlemek için önerilen bir şarj voltaj aralığı ve maksimum şarj akımı değeri vardır. Güvenli ve verimli şarj limitleri belirlemek için bu faktörleri göz önünde bulundurur. Bu çalışmada kullanılan Samsung INR21700-50E bataryanın maksimum

şarj akımı değeri 4.9 A olarak verilmiştir. Bu maksimum şarj akımı, farklı SoC'ler için şarj akımı seçiminin sınır koşulu olarak kabul edilir.

$$I_{min} = 0, I_{max} = 4.9A \quad (0 < I < 4.9A) \quad (4.1)$$

Bu sınırların Matlab kodlaması aşağıdaki adımlarda gösterilmiştir.

4.3.3.2. Amaç Fonksiyonunun Oluşturulması

Bu çalışmada, önerilen şarj stratejisine göre bataryanın sıcaklık artışı ve şarj süresi optimize edilecek iki parametredir. Amaç, şarj süresini kısaltırken, sıcaklığı arttırmaktır. Bu teknik pili düşük sıcaklık koşullarında ısıtmak ve lityum dendritlerin büyümesini engellemek için uygulanmaktadır. Düşük sıcaklıklarda şarj etmek polarizasyonu artırır, kapasiteyi etkiler, dahili bir kısa devreye neden olur ve lityum kaplama olasılığını sunar. Burada Joule ısısı, pilin iç direnci aracılığıyla kendi kendini ısıtmak ve herhangi bir harici ısıtma ekipmanından ısı kaybını ortadan kaldırmak için kullanılır. Bununla birlikte, bataryalar tarafından üretilen ısı, düşük sıcaklıklarda batarya bozulmasını hafifletmek için sıcaklığı yeterince artırabilir. Verimli düşük sıcaklık pil uygulamaları için düşük sıcaklıklarda aşırı şarj sırasında bozulma özelliklerini tam olarak anlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Bataryanın düşük ortam koşullarında farklı ısınma hızına sahip kademelerin sayısı SoC ye bağlı olarak belirlenmektedir.

Burada çok amaçlı bir optimizasyon problemi, minimize edilecek veya maksimize edilecek bir dizi amaç fonksiyonunu içerir. Şarj süresinin düşürmek gibi minimizasyon problemleri için amaç fonksiyonu değeri en düşük olan çözümü bulmaya çalışır. Bununla birlikte, batarya sıcaklık artışının daha iyi çözümleri gösterdiği maksimizasyon problemlerini, minimizasyon problemine dönüştürmek için amaç fonksiyonunu (-1) ile çarpabiliriz. Bu şekilde algoritma, orijinal maksimizasyon probleminde ki en yüksek pozitif değere karşılık gelen en düşük negatif değere sahip çözümleri arayacaktır.

Bu nedenle maksimum değer almak istediğimiz amaç fonksiyonunun önüne matlab'te kod oluşturulurken eksi işareti konulmuştur. Çok amaçlı optimizasyonlarda maksimizasyon problemlerini çözmek için genetik algoritmalarda kullanılan standart

minimizasyon teknikleri bu şekilde uyarlanabilmektedir. Sıcaklık artışı fonksiyonu için Bölüm 2’de oluşturulan termal model üzerinden bir fonksiyon oluşturulur.

Maksimum Sıcaklık Artışı Fonksiyonu;

$$\max f(1); \Delta T = \sum_{t=1}^N \frac{I^2(t) \times R_0 + I^2(t) \times R_1 + I^2(t) \times R_2 - (hA(T_{batt,t-1} - T_{amb}))}{m_{batt} C_{batt}} \quad (4.2)$$

Minimum Şarj Süresi Fonksiyonu:

$$\min f(2); t = \sum_{k=1}^{N-1} t_k + t_N = \sum_{k=1}^{N-1} t_k + \frac{Q_N}{I_N} \quad (4.3)$$

Bu fonksiyonlar Matlab arayüzünde “fitness_function.m” dosyası oluşturularak kodlanmıştır.

4.3.3.3. Kısıtlama Fonksiyonunun Oluşturulması

Bu çalışmada, optimizasyonun kısıtlama fonksiyonu batarya şarj cihazları veya şarj cihazlarındaki şarj algoritmaları ve kontrol sistemleri aracılığıyla uygulanan voltaj kısıtlamasıdır. Optimizasyon sırasında çok aşamalı akım grafiği oluşturulurken voltaj sınır değerinin aşılmaması sağlanır. Voltaj kısıtlama işlevine uymak, güvenli ve güvenilir şarj için çok önemlidir. Aşırı şarjı önlemeye, akü performansını optimize etmeye ve akünün genel ömrünü uzatmaya yardımcı olur. Voltaj kısıtlama işlevlerini içeren şarj sistemleri, potansiyel akü hasarına karşı bir koruma sağlar ve şarj işleminin belirtilen voltaj sınırları içinde kalmasını sağlar. Lityum iyon pillerde batarya üreticileri tarafından belirlenen voltaj maksimum değeri 4.2V’dir. Optimizasyon çalışmasında kısıtlama fonksiyonu Bölüm 2’ deki terminal voltaj formülü (2.5) kullanılarak sağlanacaktır.

$$U_t = U_{ocv} - IR_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - IR_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} - IR_0 \quad (4.4)$$

Bu fonksiyonların Matlab arayüzünde kodlaması aşağıdaki görsellerde gösterilmiştir.

Bu optimizasyon probleminin Matlab'da çözümü iki şekilde mümkündür: GA komutunu, GA Solver'ın grafik kullanıcı arayüzünden çağırabiliriz veya GA komutunu bir dosyadan çağırabiliriz. Bu durumda Matlab'da bir ana dosya, bir amaç fonksiyonu dosyası ve bir kısıtlama fonksiyonu dosyası oluşturmamız gerekmektedir. Bu dosyalardan “main.m” dosyası başlatmaları, sınırları, seçenekleri ve GA komutunu, “voltage_constrain.m” dosyası doğrusal olmayan eşitsizlik ve eşitlik kısıtlamalarını, “fitness_function.m” dosyası amaç veya uygunluk fonksiyonu tanımını içerir. Dosyalar aşağıda gösterilmiştir.

Genetik algoritma uygulaması için kontrol merkezi görevi gören ve evrimsel hesaplama algoritmalarını kullanarak verilen probleme optimum veya optimuma yakın çözümler aramak için işlem akışının düzenlendiği “main.m” dosyasının matlab kodu aşağıda verilmiştir. “main.m” dosyası tipik olarak popülasyonu başlatmak, evrimsel süreçleri (seçim, çaprazlama, mutasyon) gerçekleştirmek, bireylerin uygunluğunu değerlendirmek ve bir durdurma kriteri karşılanana kadar nesiller boyunca yinelemek için gereken ana mantığı ve adımları içerir.

```

clc
clear
clear all
% Fitness fonksiyonunun tanımlanması
FitnessFunction = @fitness_function(x);
% Değişkenlerinin sayısı
numberOfVariables = 11;
% Değişkenlerin alt sınırları
lb = [0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1];
% Değişkenlerin üst sınırları
ub = [4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9];
% Doğrusal eşitsizlik kısıtlaması
A = [];
b = [];
% Doğrusal eşitlik kısıtlaması
Aeq = [];
beq = [];
% Popülasyon sayısı
populationSize = 30;
% İterasyon sayısı
numIterations = 100;
% İlk popülasyonun oluşturulması
initialPopulation =
create_initial_population(populationSize,numberOfVariables);
% Kısıtlama fonksiyonlarının tanımlanması
constraintFcn = @(x) voltage_constraint(x);

% Optimizasyon seçeneklerini tanımlanması
options = optimoptions(@gamultiobj, ...
'Display', 'iter', ...
'PlotFcn', @gaplotpareto, ...
'FunctionTolerance', 1e-3, ...
'MaxStallGenerations', 150, ...
'ParetoFraction', 0.5, ...
'DistanceMeasureFcn', {@distancecrowding, 'genotype'}, ...
'Generations', numIterations, ...
'PopulationSize', populationSize, ...
'SelectionFcn', {@selectiontournament}, ...
'MutationFcn', {@mutationgaussian, 0.1, 0.01}, ...
'CrossoverFcn', {@crossoverheuristic, 0.8});

% Çok amaçlı genetik algoritmanın çalıştırılması
[x, Fval, exitFlag, Output] = gamultiobj(FitnessFunction, ...
numberOfVariables, A, b, Aeq, beq, lb, ub, constraintFcn, options);

% Pareto front grafiğinin çizdirilmesi
fprintf('The number of points on the Pareto front was: %d\n', size(x,1));
fprintf('The number of generations was: %d\n', Output.generations);
fprintf('The average distance measure of the solutions on the Pareto front was: %g\n', Output.averagedistance);
fprintf('The spread measure of the Pareto front was: %g\n', Output.spread);

```

Şekil 4.10: “main.m” dosyasının matlab kodu.

Optimizasyonun tanımlandığı kod bloğunda kullanılan seçeneklerin anlamları aşağıda açıklanmıştır.

1. 'Display', 'iter': Algoritmanın her iterasyonda ayrıntılarıyla ekrana yazdırılmasını sağlar.
2. 'PlotFcn', @gaplotpareto': Pareto çözüm kümesini grafik olarak çizmek için gaplotpareto fonksiyonunu kullanır.
3. 'FunctionTolerance', 1e-3': Optimizasyon algoritmasının fonksiyon değeri değişimindeki toleransı belirler.
4. 'MaxStallGenerations', 150': İlerlemenin duraklaması için maksimum iterasyon sayısını belirler.
5. 'ParetoFraction', 0.5': Pareto çözüm kümesinin yüzdesini belirler.

6. 'DistanceMeasureFcn', {@distancecrowding, 'genotype'}: Çözümler arasındaki uzaklık ölçümünü belirlemek için distancecrowding fonksiyonunu kullanır.
7. 'Generations', numIterations': Genetik algoritmanın kaç iterasyon çalışacağını belirler. numIterations değişkeni, bu değeri içerir.
8. 'PopulationSize', populationSize': Genetik algoritmanın popülasyon boyutunu belirler. populationSize değişkeni, bu değeri içerir.
9. 'SelectionFcn', {@selectiontournament}': Seçim işlevi olarak turnuva seçimini kullanır.
10. 'MutationFcn', {@mutationgaussian, 0.1, 0.01}': Mutasyon işlevi olarak Gauss mutasyonunu kullanır. İkinci ve üçüncü parametreler, mutasyonun gen ve gen aralığındaki etkisini belirler.
11. 'CrossoverFcn', {@crossoverheuristic, 0.8}': Çaprazlama işlevi olarak sezgisel çaprazlamayı kullanır. İkinci parametre, iki ebeveynin nasıl birleştirileceğini belirler.

Bu seçenekler, genetik algoritmanın nasıl çalışacağını ve optimizasyon sürecinde hangi işlevlerin kullanılacağını belirlemek için kullanılır. gamultiobj fonksiyonu, bu seçeneklerle birlikte hedef fonksiyonları ve sınırları belirleyerek çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılabilir.

2. Aşamada main.m dosyasında belirtilen fitnessfunction.m dosyası hazırlanır. Bu dosya genetik algoritma uygulamasında, uygunluk fonksiyonunun tanımını içerir. Uygunluk işlevi, popülasyon içindeki bir bireyin kalitesini veya uygunluğunu nicel olarak değerlendirdiği için genetik algoritmanın çok önemli bir bileşenidir. Uygunluk işlevi, belirli bir çözümün veya bireyin, çözülmekte olan sorunun amaçlarına veya kısıtlamalarına göre ne kadar iyi performans gösterdiğini değerlendirir. Uygunluk fonksiyonunun her çalışmada kullanılacak matematiksel modellere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Optimize edilecek hedefleri veya karşılanacak kısıtlamaları kapsar. Uygunluk fonksiyonu, problemin değerlendirme kriterlerini yansıtacak şekilde tasarlanarak, uygunluk değerleri daha yüksek olan bireylerin genetik algorithmada hayatta kalma ve sonraki nesillere katkıda bulunma olasılıklarının daha yüksek olmasını sağlar.

“fitness_function.m” dosyasının matlab kodu bataryanın maksimum sıcaklık artışı fonksiyonu $\max f(1)$ i ve minimum şarj süresi fonksiyonu $\min f(2)$ ‘yi içermektedir. Ayrıca bu fonksiyonlarda bulunan sabit değerler ve her SOC değerine

karşılık gelen $R0$, $R1$, $R2$ parametre değerlerini de tanımlanmaktadır. Her akım değerine karşılık gelen değeri hesaplamak için for döngüsü ile çalıştırılmıştır.

```
function f = fitness_function(x)
    f = zeros(2, 1); % İki elemanlı bir dizi oluşturulması
    temperatureRise = zeros(1, 11); % Sıcaklık artışı için boş bir dizi
    chargeTime = zeros(1, 11); % Şarj süresi için boş bir dizi
    % Ortam sıcaklığı
    Tamb = 0;
    h = 10; % W/K*m^2
    A_s = 5311 / 1000000; % m^2
    C_bat = 885; % J/(kg*K)
    m_bat = 69 / 1000; % kg
    Tamb = 273; % K
    Q = 4.9; % Ah
    Delta_SOC = 0.1;

    OCV = [3.2065 3.4515 3.5054 3.5792 3.6575 3.7007 3.8728 3.861 3.9935
    4.0837 4.1851];
    R0 = [0.074246 0.077174 0.064343 0.056972 0.058455 0.06014 0.066904
    0.056542 0.052585 0.055949 0.052441];
    R1 = [0.041509 0.013496 0.028771 0.025164 0.023418 0.0074502 0.01795
    0.0042864 0.016031 0.012626 0.0073108];
    R2 = [0.050287 0.0045191 3.4542e-05 0.0071666 0.0082801 0.014714
    0.0092926 0.02584 0.016768 0.020397 0.0066063];
    C1 = [270.543761 864.4651797 3023.74647 1644.087859 1161.120351
    2453.120399 1173.562895 3025.658865 178.0762759 1047.536262 989.299763];
    C2 = [4426.691022 5757.292069 15959.14072 14339.02166 18058.99873
    5896.341146 24359.72519 8558.66079 9061.793218 8172.604035 11021.30035];

    temperatureRise(1) = 0;
    chargeTime(1) = 0;
    for i = 2:11
        tk(i) = (Q * Delta_SOC) ./ x(i-1);
        integral1 = integral(@(t) (x(i-1).^2 * (R0(i-1) + R1(i-1) + R2(i-1))), tk(i-1), tk(i), 'ArrayValued', true);
        integral4 = integral(@(t) (A_s * h * (temperatureRise(i-1) - Tamb)), tk(i-1), tk(i), 'ArrayValued', true);
        temperatureRise(i) = ((integral1 - integral4) / (m_bat * C_bat));
        chargeTime(i) = chargeTime(i-1) + (Q * Delta_SOC) / x(i-1);
    end

    f(1) = -(temperatureRise(11)-temperatureRise(1)); % Sıcaklık artışını
    dizi olarak atanması
    f(2) = chargeTime(i); % Şarj süresini atanması
end
```

Şekil 4.11: “fitness_function.m” dosyasının matlab kodu.

Matlab genetik algoritma uygulamasındaki main.m dosyasında belirtilen "voltage_constrain.m" dosyası ise voltaj kısıtlama fonksiyonunun tanımını içermektedir. "voltage_constrain.m" dosyasının amacı voltaj kısıtlamalarını genetik algoritma optimizasyon sürecine dahil etmektir. Genetik algoritma, voltaj kısıtlama fonksiyonunu dahil ederek, evrimsel arama sırasında yalnızca belirtilen voltaj kısıtlamalarına uyan uygulanabilir çözümlerin dikkate alınması sağlanmıştır. Voltaj kısıtlamalarını ihlal eden bireyler cezalandırılabilir veya atılabilir, bu da algoritmayı şarj boyunca istenen gerilim seviyelerini koruyan çözümleri keşfetmeye ve iyileştirmeye yönlendirir. “voltage_constrain.m” dosyasının matlab kodu aşağıda verilmiştir.

```

function [c, ceq] = voltage_constraint(x)
% Batarya üst kesme voltajı ile ilgili kısıtlamaların kontrolü
% Batarya voltajının hesaplanması
voltage = calculate_voltage(x);
% Kısıtlama değerlerinin belirlenmesi
upperLimit = 4.2; % Üst kesme voltajı sınırı
% Kısıtlama eşitsizliklerinin hesaplanması
c = voltage - upperLimit;
% Kısıtlama eşitliklerinin hesaplanması
ceq = [];
end

```

Şekil 4.12: “voltage_constraint.m” dosyasının matlab kodu.

Bu kodun içerdiği “calculate_voltage.m” dosyasında ise Bölüm 2’deki terminal voltaj formülünü (2.5), ayrıca bu fonksiyonlarda bulunan sabit değerler ve her SOC değerine karşılık gelen U_{ocv} , R_0 , R_1 , R_2 parametre değerlerini de tanımlanmaktadır. Her akım değerine karşılık gelen değeri hesaplamak için for döngüsü ile çalıştırılmıştır.

GA işleminin, GA Solver’ın grafik kullanıcı arayüzü çağırılarak yapılması da diğer bir seçenektir. MATLAB GA Solver’ın grafiksel kullanıcı arayüzünü (GUI) çeşitli seçeneklere sahip optimizasyon aracının bir ekranını sunmaktadır. Bu ekran Komut Penceresinde optimtool (‘gamultiobj’) yazılarak açılabilir. Alternatif olarak, Komut Penceresine optimtool yazıp ardından sol üstteki açılır menüden gamultiobj çözücü seçeneğini seçebilirsiniz. Bu aracı kullanmadan önce, aşağıda gösterildiği gibi iki hedefi tanımlayan objsin.m hedef fonksiyonunu içeren bir dosya oluşturmanız gerekir.

GA Solver’ın grafik kullanıcı arayüzü için oluşturulan “fitness_function.m” dosyasının matlab arayüzü ise dosyadan çağırılan genetik algorithmada kullanılan dosya ile aynı kodu içermektedir.

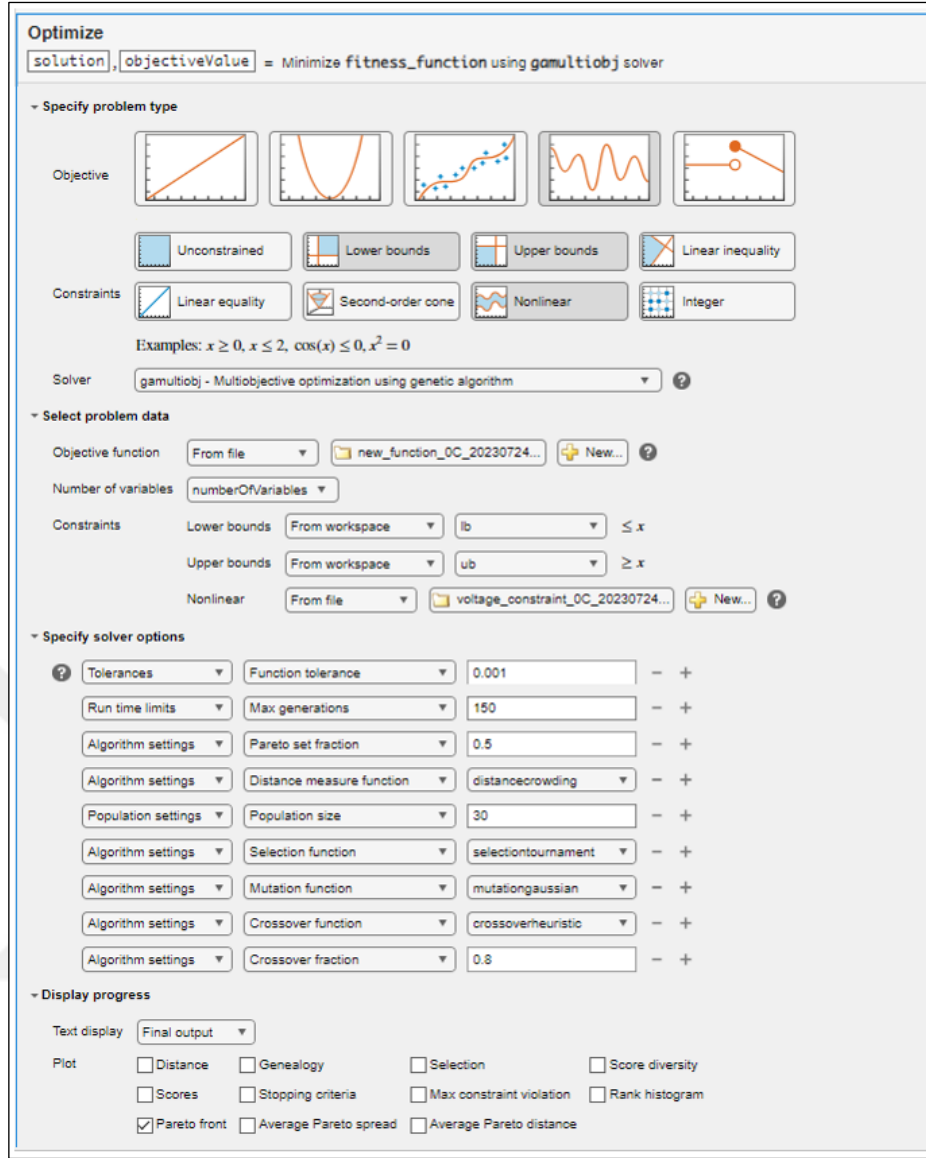
Değişkenin alt ve üst sınırı ve değişken sayısı aşağıdaki şekilde GUI ara yüzünde belirtilir.

```

% Değişkenlerin alt sınırları
ub=[4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9];
% Değişkenlerin üst sınırları
lb=[0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1];
% Değişken sayısı
numVariables = length(lb);

```

Şekil 4.13: Değişkenin alt ve üst sınırı ve değişken sayısı matlab kodu.

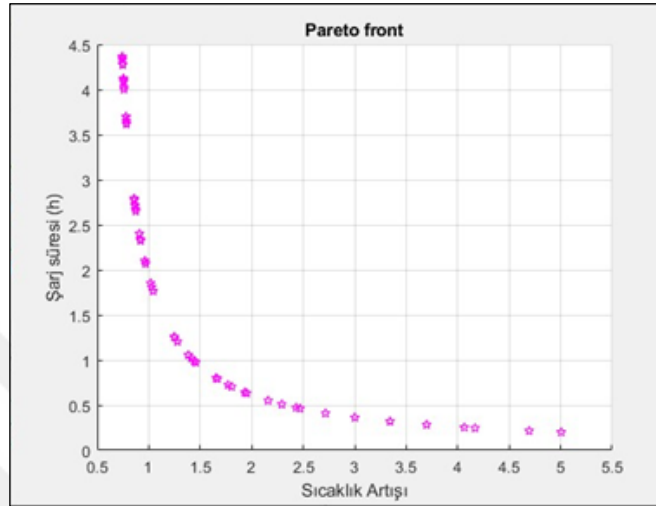


Şekil 4.14: Matlab GA Solver'ın grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI).

GA Çözücü için GUI'de, kullanıcı yukarıda şekilde gösterilen uygunluk fonksiyonu için fonksiyon tanıtıcısını sağlayabilir. Burada fitness_function.m dosyası Matlab'daki geçerli dosyaya kaydedilmesi gerekmektedir. Matlab GA Solver'ın grafiksel kullanıcı arayüzünde, kutularla vurgulanan seçimlere dikkat ettiğimizde farklı seçeneklerinde olduğu bilinmelidir. Bu seçeneklere bağlı olarak çözümler değişebilir.

Aşağıdaki Şekil 4.11, Matlab çok amaçlı genetik algoritma çözücüsü tarafından oluşturulan optimizasyon probleminin, optimal çözümlerini temsil etmektedir. Bu çözümler pareto optimal cephesinde yer almaktadır. Bu grafikten anlaşıldığı üzere çok amaçlı bir optimizasyon problemi, optimal olabilecek birden çok çözüme sahip olabilir

yani burada tek bir çözüm söylenemez. Ancak tek amaçlı optimizasyon problemlerinde her zaman tek bir çözüm elde edilir. Aşağıda ki grafikteki çözümlerin oluşturduğu eğri pareto optimal cephesi olarak tanımlanır. Bu grafikteki yıldızla işaretli çözümler, ödünleşimli, verilen problem için en uygun çözümlerdir. Bu çoklu çözümlerden daha yüksek seviye kullanarak bir çözüm elde edilir.



Şekil 4.15: Pareto sınırı grafiği.

GA yöntemi kullanılarak optimum şarj akımı tahmininin akış şeması Şekil 4.8’de gösterilmiştir ve spesifik prosedür aşağıdaki gibi özetlenmiştir. İlk olarak temel akımlar olarak bir başlangıç popülasyonu üretilmiştir. Bu süreçte, N şarj akımına sahip m sütun vektörü, kabul edilebilir şarj akımı sınırlarına göre rastgele oluşturulmuştur. İkinci olarak, şarj süresi ve sıcaklık artışının optimizasyon hedefleri olarak kabul edildiği uygunluk değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra parametreleri optimize etmek için popülasyonda seçim operatörü, çaprazlama operatörü ve mutasyon operatörü uygulanmıştır. Son olarak, önceden belirlenmiş sonlandırma kriteri karşılandığında prosedür sonlandırılmıştır. Aslında her bir SoC segmenti m adet isteğe bağlı şarj akımına sahiptir, dolayısıyla tüm şarj işlemi için m^N şarj akımı permütasyonuna sahip olacaktır. Her permütasyonun bir uygunluk değeri vardır ve en yüksek puana sahip şarj akımı permütasyonu en sonunda seçilecektir.

5. DENEYLER, SİMÜLASYON SONUÇLARI ve GELECEK ÇALIŞMALAR

5.1. Deneysel Kurulum

5.1.1. Lityum İyon Hücresi

Elektrikli araçlar için lityum-iyon pil tercih edildiğinden, test için bir lityum-iyon pil seçilmiştir. Bu hücre Birikim Pilleri A.Ş.'den tedarik edilmiştir ve Birikim Pilleri A.Ş'nin chamber'ı kullanılarak test edilmiştir. Samsung INR21700-50E, önde gelen pil ve enerji depolama çözümleri üreticisi Samsung SDI tarafından üretilen lityum-iyon şarj edilebilir bir pildir. Güvenli ve verimli şarj sağlamak için bu pil türü için özel olarak tasarlanmış bir şarj cihazı kullanılması önerilir. Üreticinin önerdiği tüm güvenlik parametreleri takip edilmiştir. Samsung INR21700 50E, 21 mm çapında ve 70 mm uzunluğunda silindirik bir hücre olan 21700 pil formatına aittir.

Katot malzemesi olarak lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA), anot malzemesi olarak Silikon (Si)/grafit kimyası kullanılan bir lityum-iyon pildir. NCA kimyası yüksek enerji yoğunluğu, iyi kapasite koruması ve termal kararlılığı ile bilinir, bu da onu elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi uygulamalar için uygun hale getirir. Bu hücre 4900 mAh (4.9Ah) nominal kapasiteye sahiptir. Bu, pilin teorik olarak bir saat boyunca 4.9 A sürekli akım sağlayabileceği anlamına gelir. Nominal voltaj 3.6V, tam şarjlı voltaj yaklaşık 4,2V ve şarj kesme voltajı 2.5 V'tur. Şarj ve deşarj sırasında kullanım sıcaklığı 0°C ile 45°C ve -20°C ile 60°C arasında değişir. Batarya için standart şarj 2.450mA olarak ayarlanmıştır ve şarj işleminin tamamlanması yaklaşık 3 saat sürer. İzin verilen maksimum şarj akımı 4.900mA'dır, ancak daha uzun çevrim ömrü için önerilmez. Öte yandan, sürekli deşarj için maksimum deşarj akımı 9.800mA iken, 14.700mA'lık daha yüksek bir deşarj akımına izin verilir, ancak sürekli deşarj için önerilmez.

Kullanılan bu pil yüksek kapasite ve orta düzeyde güç çıkışı gerektiren çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Genellikle taşınabilir elektronik cihazlarda, elektrikli aletlerde, elektrikli araçlarda ve enerji depolama sistemlerinde bulunur.

Samsung INR21700-50E, aşırı şarj, aşırı deşarj ve kısa devrelere karşı koruma sağlayan güvenlik mekanizmalarına sahiptir. Bununla birlikte, olası tehlikeleri önlemek için lityum iyon pillerin dikkatli bir şekilde kullanılması önemlidir. Her aküde olduğu gibi, güvenliği sağlamak ve akünün ömrünü en üst düzeye çıkarmak için üretici tarafından sağlanan uygun taşıma, saklama ve kullanım yönergelerine uymak çok önemlidir. Güvenlik nedeniyle, algoritmamızı üreticinin belirtilen tüm parametrelerine göre tasarlamak için önerilen tüm parametreler incelenmiştir. Tablo 5.1 de bu çalışmada kullanılan Samsung INR 21700-50E lityum iyon pile ait özellikler listelenmiştir.



Şekil 5.1: INR21700-50E batarya görseli.

Tablo 5.1: Samsung 21700-50E model bataryanın özellikleri.

Özellikler	Parametreler
Akü Kapasitesi	4900 mAh
Nominal Voltaj (Voltaj Aralığı)	3.6V (2.5-4.2V)
Standart Şarj Akımı / C-oranı	2450 mA/ 0.5 C
Maks. Şarj Akımı / C oranı	4900 mA / 1C
Şarj Sıcaklık Aralığı	0-45 °C
Maksimum deşarj akımı	9800 mA(Devamlı) 14700 mA(Devamlı olmayan)
Deşarj Sıcaklık Aralığı	-20 -60 °C
Hücre Ağırlığı	69g max
Hücre Boyutu	Hücre yüksekliği: Max.70.80 mm Çap: Max. 20.25 mm

5.1.2. Hücre test sistemi

Pil Test Sistemi TEMI800 Dijital Kontrolörlü EMC Sıcaklık Nem Çevresel Test Odası, iyi bilinen bir lityum iyon hücre test sistemidir. Ve döngü ömrü testleri ile şarj ve deşarj testleri için oldukça sık kullanılır. TEMI800 Dijital Kontrolörlü EMC sıcaklık, nem çevresel test odası, elektronik cihazların ve bileşenlerin değişen çevresel koşullar altında performansını ve güvenilirliğini değerlendirmek için kullanılan özel bir test ekipmanıdır. Elektronik cihazların ve bileşenlerin farklı stres faktörleri altında nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek için sıcaklık ve nem seviyelerini simüle ederek ve kontrol ederek çalışır. Oda, geniş bir aralıkta hassas sıcaklık kontrolü sağlar ve test süreci boyunca tutarlı bağıl nem sağlamak için doğru nem kontrolü sunar. Sezgisel kontrollere, veri kaydı ve alarm bildirimleri gibi gelişmiş işlevlere ve test döngüleri için programlama seçeneklerine sahiptir. Kabin, elektronik cihazların elektromanyetik uyumluluğunu değerlendiren, elektromanyetik yayılım (EMI) karşı duyarlılıklarını ve elektromanyetik alanların varlığında doğru çalışma yeteneklerini değerlendiren EMC testi için özel olarak tasarlanmıştır. Elektronik, telekomünikasyon, otomotiv, havacılık ve tıbbi cihazlar gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılan bu test odası, üreticilerin ürünlerinin performansını, güvenilirliğini ve dayanıklılığını çeşitli çevresel koşullar altında ilgili standartlara ve spesifikasyonlara uygun olarak değerlendirmelerine yardımcı olur. Sıcaklık nem odaları (iklimsel veya iklim test odaları olarak da bilinir), bir dizi sıcaklık ve nem koşullarının bir ürün veya malzeme üzerindeki etkilerini simüle eder. Çevre test odalarının temel işlevi, her gün kullandığımız ürünlerin aşırı iklim koşullarındaki davranışını test etmektir. Ayrıca, yüksek-düşük sıcaklık değişimli testin çeşitli malzemeleri için de kullanılabilir. Test sıcaklığı, nem ve süresi programlanabilir.

Birikim Pilleri A.Ş'nin test laboratuvarında bulunan bu test cihazı Şekil 5.2 ve 5.3'de gösterilmiştir ve hücrelerin şarj için nasıl hazırlandığı Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Farklı sıcaklık testleri için programlanabilir sıcaklık-nem odası.



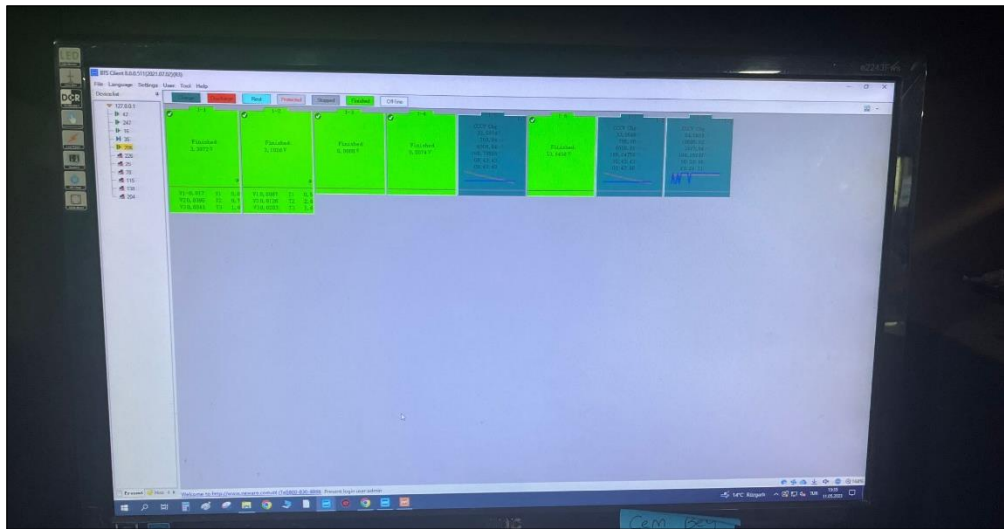
Şekil 5.3: Test aşamasında chamber ve kontrol panelinin görüntüsü.

Sıcaklık ve nem testi yöntemi, testin gerçekleştirilmesi için birkaç adım içerir. İlk olarak, çevresel test cihazı hatlarının ve su yolunun güvenliğini kontrol etmek önemlidir. Su tankına saf su eklenmeli ve su seviyesinin %80 civarında olması sağlanmalıdır. Su tankının düzenli olarak boşaltılması temizlik için gereklidir. Kutuya emici bir kumaş şerit takılarak lavabodaki nemi emmesi sağlanır. Daha sonra güç açılır

ve numune kutunun içine yerleştirilir. İstenen test süresiyle birlikte gerekli sıcaklık ve nem seviyeleri ayarlanır. Test, ayarlanan süreye ulaşıldığında otomatik olarak durur veya test sonuçları gereksinimleri karşılıyorsa manuel olarak durdurulabilir. Testten sonra, gerçek grafik ve test raporu incelenebilir. Program, her test bölümü için sıcaklık ve zaman ayarlamak üzere düzenlenebilir ve birden fazla test grubu tamamlanana kadar otomatik olarak yürütülebilir. Sonuçlar gereksinimleri karşılıyorsa testi manuel olarak durdurmak da mümkündür. Son olarak, test verileri işletim arayüzü ile görüntülenmiştir.



Şekil 5.4: Testler için hücreye yerleştirilen termokupl düzeneği.

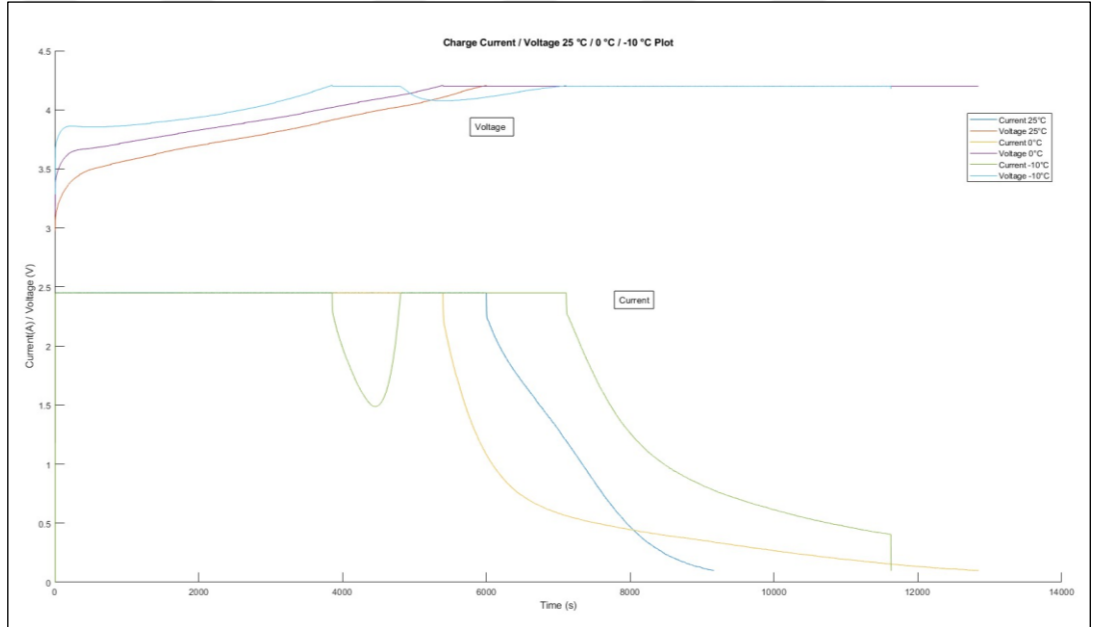


Şekil 5.5: Test verileri işletim arayüzü.

5.1.3. Deney Sonuçları

Testin başlangıcında, test için gerekli sıcaklık koşulları 25 °C / 0 °C ve -10 °C, olarak ayrı ayrı ayarlanmıştır. Her sıcaklık koşulunda da pilin test edilmesi için aynı hücre kullanılmıştır. Şarj işlemi için diğer tüm yöntemler arasında CC-CV şarj yöntemi seçilmiştir çünkü şu anda çoğu küçük elektrikli araç endüstrisi pillerini şarj etmek için bu teknik kullanılmaktadır. CC-CV şarj için, üretici veri sayfasında belirtilen 0,5C (2450mA) oranı seçilmiştir. Her şarj döngüsüne başlamadan önce hücreler dinlendirilmiştir.

Bu üç sıcaklık değeri için şarj sırasında elde edilen test sonuçlarına ait grafik ve tablolar aşağıda incelenmiştir.



Şekil 5.6: 25 °C / 0 °C ve -10 °C CC-CV şarj testi grafikleri.

Şekil 5.6' da 3 farklı sıcaklık için yukarıdaki prosedürlere uygun olarak yapılan CC-CV şarj grafikleri gösterilmektedir. Şarj olan batarya 3 farklı sıcaklık için 0,5 C akım ile 4,2 gerilime kadar sabit akım ile şarj edilmiş, 4,2'ye ulaştığında ise tam şarj olana kadar sabit gerilim ile akım azaltılmıştır. Burada 25 °C / 0 °C ve -10 °C sıcaklıkta ki akım ve voltaj grafiklerini incelediğimizde 25 °C sıcaklıkta CC-CV şarj akımının CV aşamasının (3120 sn) CC aşamasına (6000 sn) göre daha kısa olduğu ancak 0 derece ve -10 derece sıcaklıkta ki CV aşamasının çok uzun olduğu sonucuna

varılmaktadır. Bu da düşük sıcaklıklarda bu şarj yöntemin dezavantaj olduğunu göstermektedir.

Ayrıca CV aşamasında çok düşük kapasiteler elde edilmesine rağmen sürelerin çok daha uzun olduğu testlerden elde edilmiştir. Bu değerler sayısal olarak Tablo 5.2’ de verilmiştir.

Tablo 5.2: 25 °C / 0 °C ve -10 °C sıcaklıkta CC-CV şarj yönteminin deneysel olarak CC ve CV aşaması zaman ve kapasite değerleri tablosu.

Sıcaklık	Şarj							
	Akım (A)	Kapasite (mAh)				Zaman (sn)		
		CC	CV (4.2V)	%	CC-CV	CC	CV	CC-CV
25 °C	2.450 (0.5C)	4079.3	794	16.29%	4872.8	6000	3120	9120
0 °C	2.450 (0.5C)	3667.6	946.8	20.52%	4614.4	5400	7200	12780
-10 °C	2.450 (0.5C)	2619.2	3162.1	54.70%	5781.3	3840	7620	11580

Şekil 5.7’ de 3 farklı sıcaklık için CC-CV şarj kapasite grafikleri gösterilmektedir. Üretici veri sayfasında bulunan kapasite değerine en uygun şarj kapasitesinin 25 °C sıcaklıkta elde edildiği gözlemlenmiştir. 0 °C’ de kapasite hücreden beklenen kapasite değerinden daha düşük bir değer olan 4614.4 Ah değerine kadar şarj edilebilmiştir. Üretici veri sayfasında şarj için uygun sıcaklık olarak belirtilmeyen -10 °C sıcaklıkta ise hücrenin şarj aşamasında sergilediği davranış incelendiğinde, uygulanan şarj metodunun yanlış olduğunu gösterir bir durum gözlemlenmiştir. Bataryanın aşırı düşük sıcaklıklarda şarj ederken bazı durumlarda aşırı kapasite gözlemlenebilmektedir buradaki şarj aşamasında da böyle bir durum gözlemlenmiştir.

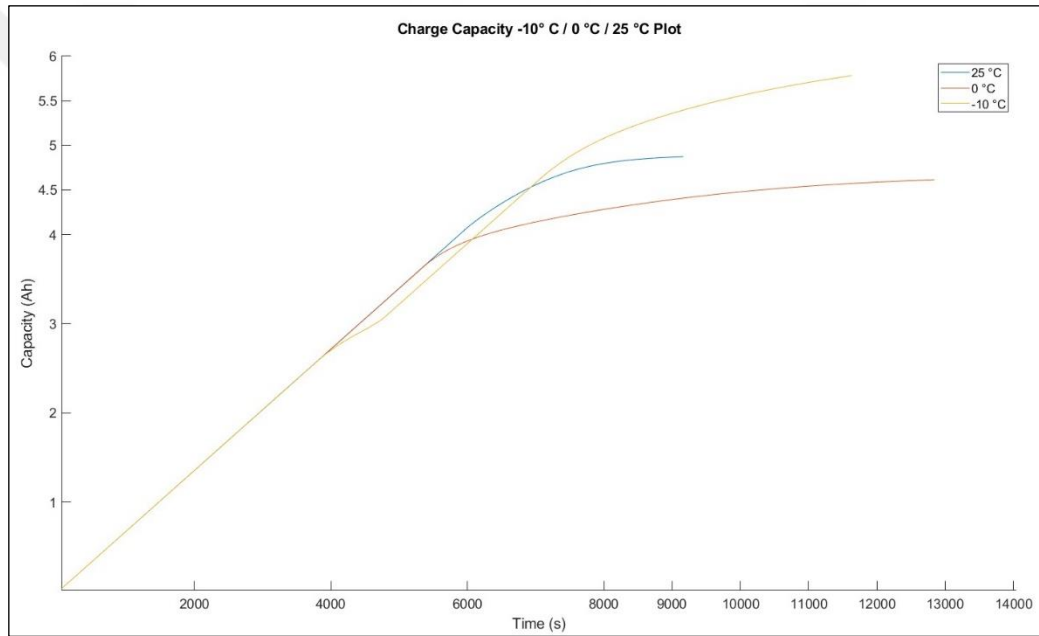
Lityum kaplama, şarj akımı, lityum iyonlarının anot malzemesi içinde interkalasyonu yerine pilin anot yüzeyinde metalik lityum birikmesine neden olduğunda meydana gelir. Bu durum iyon hareketliliğinin azalması, elektrolit iletkenliğinin azalması ve düşük sıcaklıklarda iç direncin artması gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak ortaya çıkabilir. Lityum kaplama meydana geldiğinde, batarya daha yüksek bir voltaj sergileyebilir ve başlangıçta daha yüksek bir kapasiteye sahip gibi görünebilir.

Ancak, lityum kaplama son derece istenmeyen bir durumdur ve pilin uzun vadeli performansı ve güvenliği açısından ciddi sonuçlara yol açabilir. Biriken metalik lityum dendritik yapılar oluşturarak ayırıcıya nüfuz edebilir ve dahili kısa devrelere neden

olabilir. Bu kısa devreler batarya arızalarına, çevrim ömrünün azalmasına, kapasite kaybına ve hatta termal kaçaklara yol açarak güvenlik riski oluşturabilir.

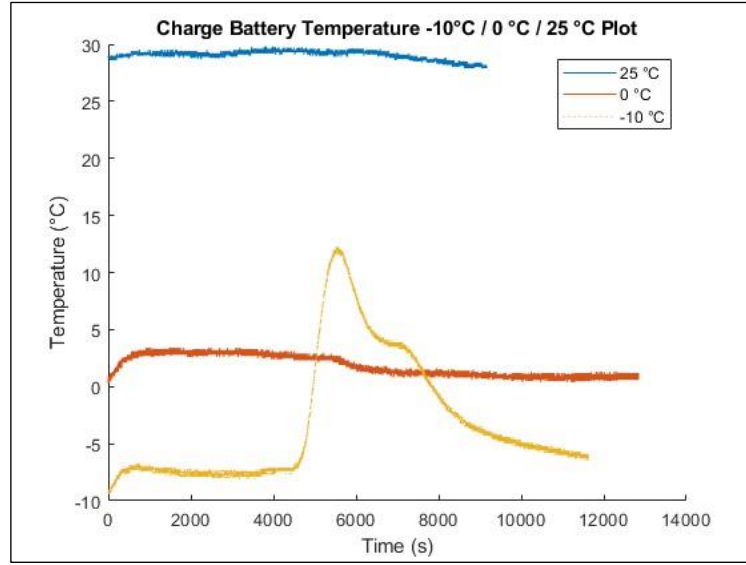
Lityum kaplamayı ve buna bağlı riskleri önlemek için lityum-iyon piller genellikle pilin durumunu izleyen ve aşırı şarjı veya çok düşük sıcaklıklarda şarjı önleyen koruma devreleri içerir. Bu koruma devreleri şarj akımını sınırlayabilir veya akü sıcaklığı güvenli bir çalışma aralığına ulaşana kadar şarjı geçici olarak askıya alabilir.

Lityum kaplamayla ilişkili risklerin geçici kapasite kazanımlarından daha ağır bastığını belirtmek önemlidir. Bu nedenle, lityum iyon pillerin performansını, uzun ömürlülüğünü ve güvenliğini korumak için genellikle belirtilen sıcaklık aralıklarında şarj edilmesi önerilir.



Şekil 5.7: 25 °C / 0 °C ve -10 °C CC-CV şarj kapasite-zaman grafikleri.

Şekil 5.8’de 3 farklı sıcaklık için, Şekil 5.4’de görseli bulunan hücre üzerine yerleştirilmiş termokupllar ile ölçülen şarj sıcaklıklarına ait grafikler verilmiştir. Her ne kadar 25 °C / 0 °C’deki sıcaklıklar stabil bir şekilde değişmiş olsa da -10 °C’de şarj edilen bataryanın sıcaklığında aşırı sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir. Tüm bu grafikler elde edilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve elde edilen optimize akım grafikleri ile 0 °C ve -10 °C’de şarj verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 5.8: 25 °C / 0 °C ve -10 °C şarj test sıcaklık grafikleri.

Tablo 5.3’ de 3 farklı sıcaklık koşulunda CC-CV şarj aşamasında bataryanın başlangıçta, CC aşamasında ve CV aşamasında sıcaklık değişim değerleri tablosu oluşturulmuştur.

Tablo 5.3: 25 °C / 0 °C ve -10 °C Şarj-Deşarj test sıcaklık değerleri.

Sıcaklık	Şarj						
	Akım (A)	Sıcaklık Değişimi					
		Başlangıç		CC		CV (4.2V)	
		T_{bat}	T_{amb}	T_{bat}	T_{amb}	T_{bat}	T_{amb}
25 °C	2.450 (0.5C)	25.9	25.6	29.4	27.3	28.1	27.6
0 °C	2.450 (0.5C)	0.6	1.4	0.5	1.3	0.6	1.1
-10 °C	2.450 (0.5C)	-9.4	-8.9	-7.4	-8.7	-6.3	-9.4

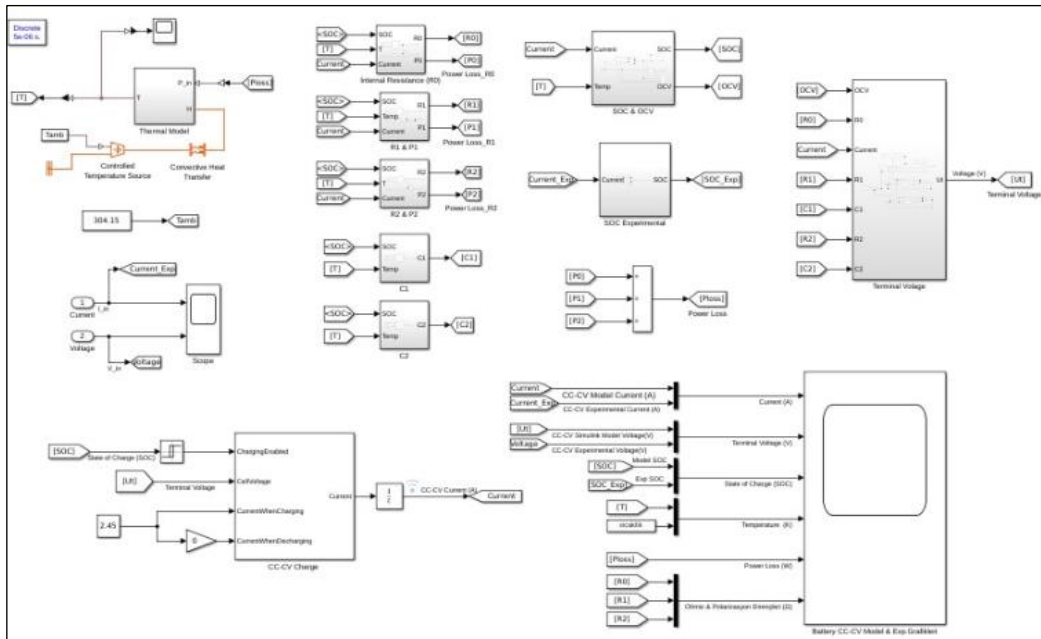
5.2. Simülasyon Kurulumu

Önerilen şarj algoritmasını klasik CC-CV yöntemiyle karşılaştırmak için her iki şarj modeli Matlab/Simulink ortamında simüle edilmiştir. Pili modellemek için Simulinkte oluşturulan ECM model kullanılmış, model parametreleri sıcaklık ve SoC’ ye bağlı 2D Look-up table ile modellenmiştir. Nominal kapasite 4.9 Ah olarak ayarlanmıştır. Her iki şarj algoritması için de uygun kaynaklarla bir kontrol döngüsü oluşturulmuş, CC-CV şarj modeli deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve model

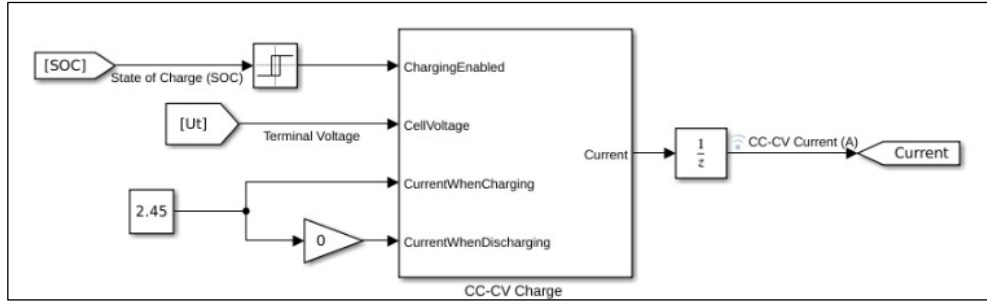
parametre doğruluğu gözlemlenmiştir. Bunlar aşağıdaki bölümlerde daha ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

5.2.1. CC-CV Simülasyonu

Lityum iyon bataryanın şarj ve yük yönetim sistemi ile ilgili simülasyon çalışmaları bu bölümde kısaca açıklanmıştır. Matlab/Simulink tabanlı batarya şarj simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9'da CC-CV batarya şarj Matlab/Simulink modeli gösterilmiştir. Batarya şarj sisteminde, bataryayı CC ve CV modunda şarj etmek için Matlab/Simulink'te bir durum anahtarı ile birlikte PI kontrolörü tasarlanmıştır. Hızlı şarj ve bataryanın aşırı voltaj koruması için belirli voltaj seviyelerinde CC ve CV modu arasında geçiş, tek bir PI kontrolörü ve durum anahtarı tarafından gerçekleştirilir. CC-CV Şarj bloğu Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Öncelikle tamamen deşarj olmuş batarya, hızlı şarj için başlangıçta sabit akımın uygulandığı CC modunda şarj edilir. Akım, bataryanın deneysel çalışmadaki şarj akımı 2.45A değerine eşit olarak belirlenmiştir. Voltaj değeri 4.2 V'a ulaşana kadar batarya hücresi CC modunda şarj edilmiştir. Akü 4.2V değerine ulaştığında CC modu, sabit voltajların uygulanacağı CV moduna geçmiştir. Ve kalan şarj işlemi bu modda gerçekleştirilmiştir.

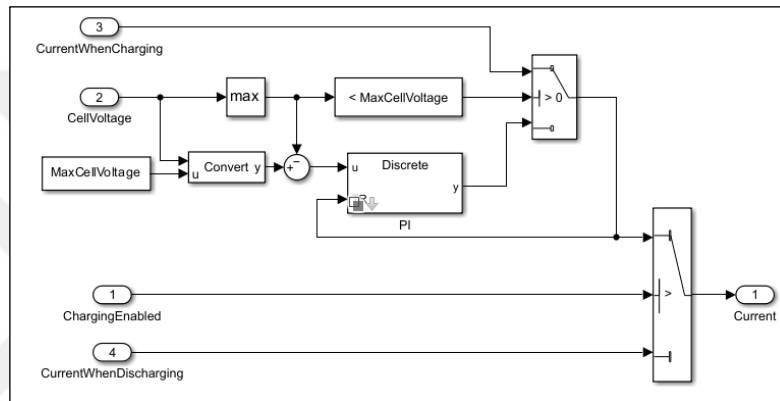


Şekil 5.9: CC-CV şarj algoritmasının genel Simulink modeli.

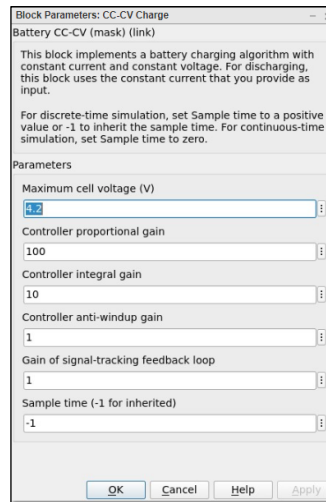


Şekil 5.10: CC-CV şarj Simulink bloğu.

Şekil 5.11' deki bloklar, Şekil 5.10' daki bloğun genel yapısını göstermektedir.



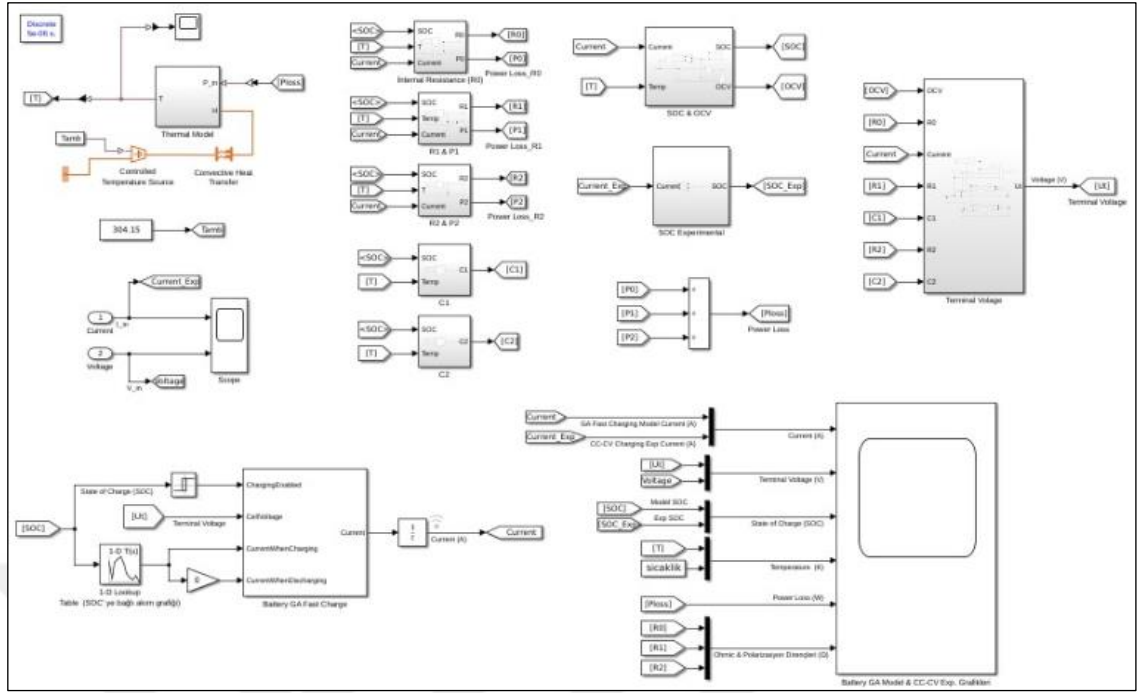
Şekil 5.11: CC-CV blok genel yapısı.



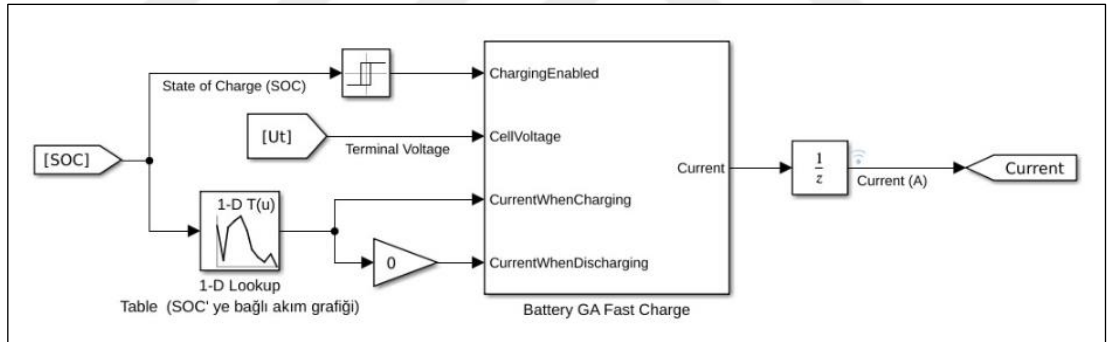
Şekil 5.12: CC-CV şarj blok parametreleri.

5.2.2. Önerilen Çok Amaçlı Genetik Algoritma Optimizasyon Temelli Hızlı Şarj Simülasyonu

Lityum iyon bataryanın sıcaklık ve şarj süresine bağlı olarak yapılan çok amaçlı genetik algoritma optimizasyonundan elde edilen şarj grafikleri ile Matlab/Simulink tabanlı batarya şarj simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şarj akımı, terminal voltajı, SoC ve sıcaklık gibi batarya durum parametrelerinin gözlemlenmesi ve analizi yoluyla, hızlı genetik algoritma tabanlı şarj yöntemi için en verimli frekansı ve görev döngüsü elde edilmiştir. Şarj süresi ve sıcaklık artışı, şarj algoritmasındaki iki önemli parametreden kaynaklanmaktadır. Sıcaklıktaki artış, şarj işlemi sırasında pil hücrelerinin iç direncindeki ısınmayı gösterir. Önerilen şarj sisteminin uygulanan simulink modeli Şekil 5.13'te gösterilmektedir. Batarya şarj sisteminde, modunda şarj etmek için Matlab/Simulink'te bir durum anahtarı ile birlikte PI kontrolörü tasarlanmıştır. Hızlı şarj ve bataryanın aşırı voltaj koruması için belirli voltaj seviyelerinin üzerine çıkmasını önlemek için CC-CV şarj modunda olduğu gibi tek bir PI kontrolörü ve durum anahtarı bulunmaktadır. Çok amaçlı şarj simülasyonunda pili şarj etmek için yalnızca bir kontrollü kaynak gerekmektedir. Teorik olarak, kontrol edilen kaynağın bir voltaj kaynağı mı yoksa bir akım kaynağı mı olduğu önemli değildir. Bununla birlikte, şarj algoritmasında, şarj akımının, pil voltajıyla oldukça doğru bir şekilde temsil edilebilen SoC'ye bağlı olması gerekmektedir. Bu nedenle akü voltajını algılamayı ve bir akım kaynağını kontrol etme seçilmiştir Her SoC değerine karşılık gelen akım değerini simulink 1-D Lookup table bloğu ile şarj algoritmasına tanımlanmıştır. Çok amaçlı genetik algoritmadan elde edilen akım grafiğinin simulink şarj bloğu Şekil 5.14'de gösterilmektedir.



Şekil 5.13: MOGA optimizasyon şarj algoritmasının Simulink modeli.

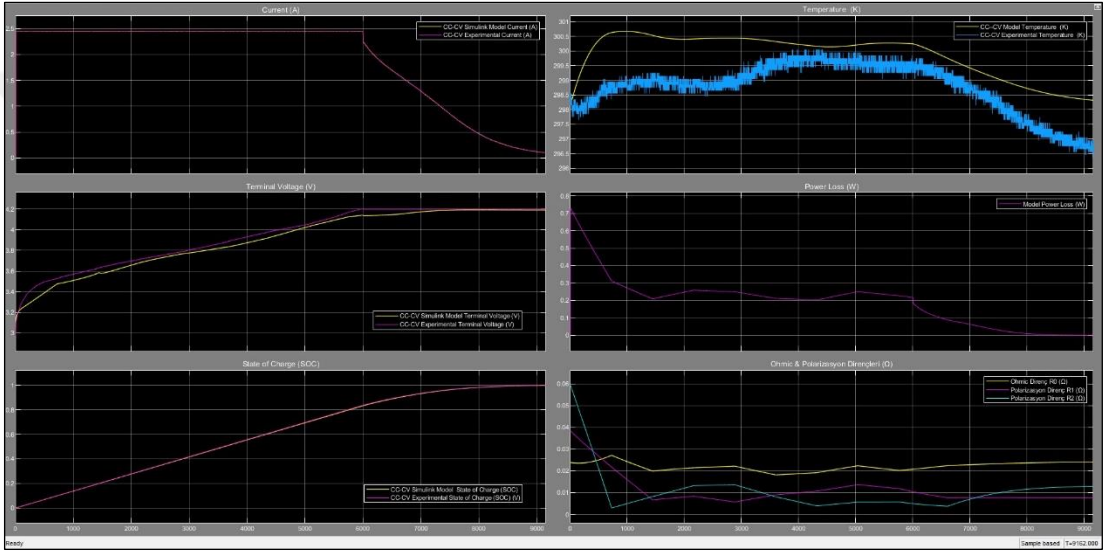


Şekil 5.14: MOGA optimizasyon şarj algoritmasının Simulink bloğu.

Şekil 5.9 ve 5.13 iki farklı şarj algoritmasının simulink modelini göstermektedir. Her iki yöntem için de simülasyonlar analiz edilmiştir. Simülasyon sırasında elde edilen CC-CV grafikleri test sonuçları ile karşılaştırılmış ve modelin doğruluğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki simülasyon sonuçları bölümünde açıklanmıştır.

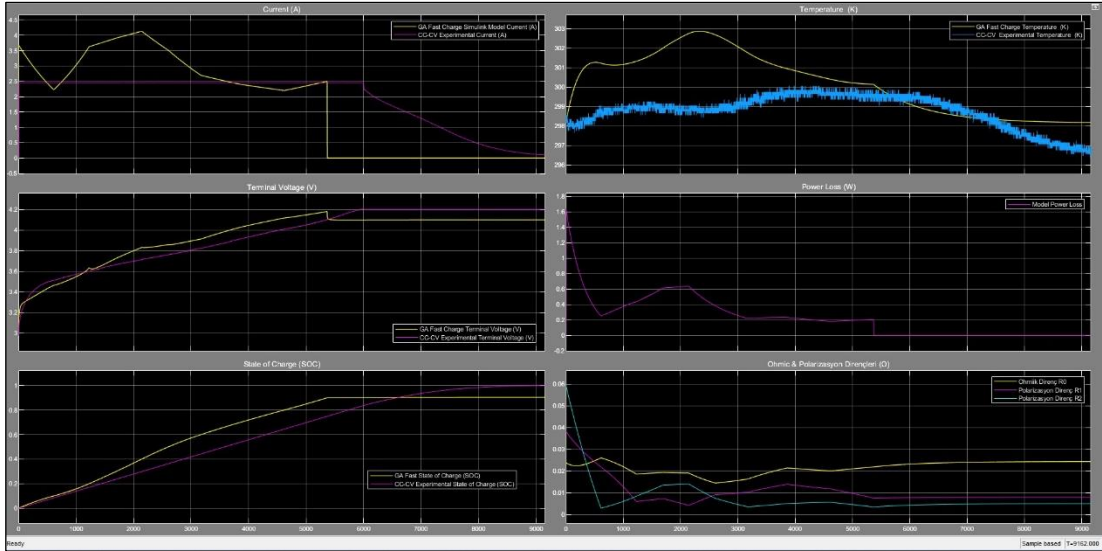
5.2.3. Simülasyon Sonuçları

İlk olarak -10 °C, 0 °C, 25 °C sıcaklıkların her biri için CC-CV simulink model ile deney dataları karşılaştırılmıştır. Elde edilen grafikler Şekil 5.15, 5.17 ve 5.19’ da verilmiştir. Şekil 5.15’te 25 °C sıcaklıkta, Şekil 5.17’de 0 °C sıcaklıkta ve Şekil 5.19’da -10 °C sıcaklıktaki CC-CV şarj yöntemiyle şarj edilen pilin, akım, voltaj, SoC ve sıcaklık için deneysel ve simulink model sonuçları grafikleri ve parametre tahmini sonucuyla elde edilen R_0 , R_1 ve R_2 direnç değerleri ve bu değerlere bağlı olarak hesaplanan güç kaybı grafiği gösterilmiştir.



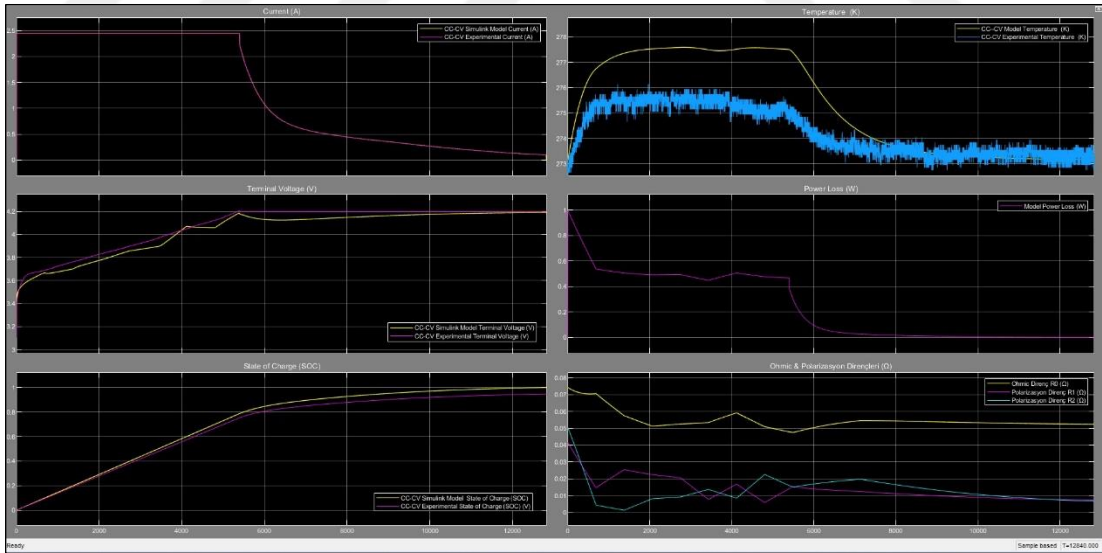
Şekil 5.15: 25 °C sıcaklıktaki CC-CV şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve Simulink model sonuç grafikleri.

Şekil 5.16’da 25 °C sıcaklıktaki MOGA şarj yöntemiyle şarj edilen pilin, akım, voltaj, SoC ve sıcaklık için deneysel ve simulink model sonuçları grafikleri ve parametre tahmini sonucuyla elde edilen R_0 , R_1 ve R_2 direnç değerleri ve bu değerlere bağlı olarak hesaplanan güç kaybı grafiğini göstermektedir.

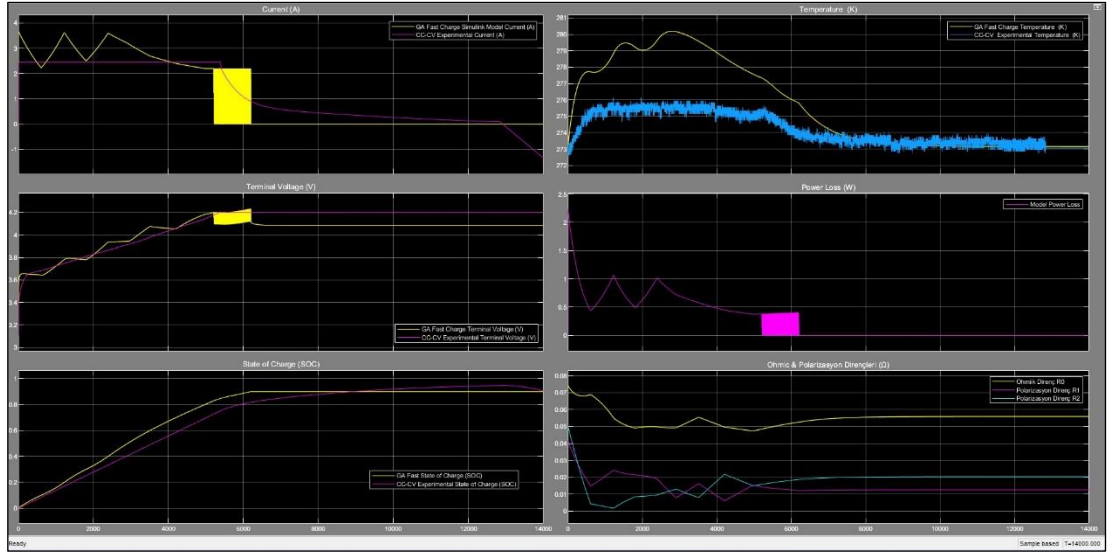


Şekil 5.16: 25 °C sıcaklıktaki MOGA şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve simulink model sonuç grafikleri.

Şekil 5.16'daki CC-CV şarj ve GA hızlı şarj simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında pil %90 SoC seviyesine, standart CC-CV şarj yönteminde 6606.8 sn de ulaşırken, önerilen şarj stratejisiyle 5366 sn de ulaşmıştır. Sıcaklık tepe noktaları karşılaştırıldığında ise 3 Kelvin artış olduğu gözlemlenmiştir.

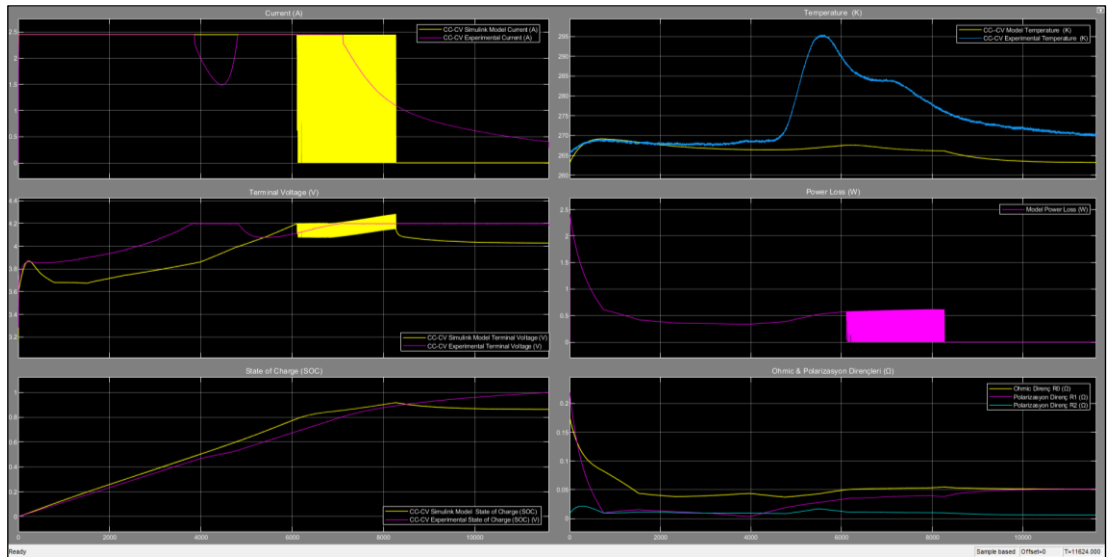


Şekil 5.17: 0 °C sıcaklıktaki CC-CV şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve simulink model sonuç grafikleri.

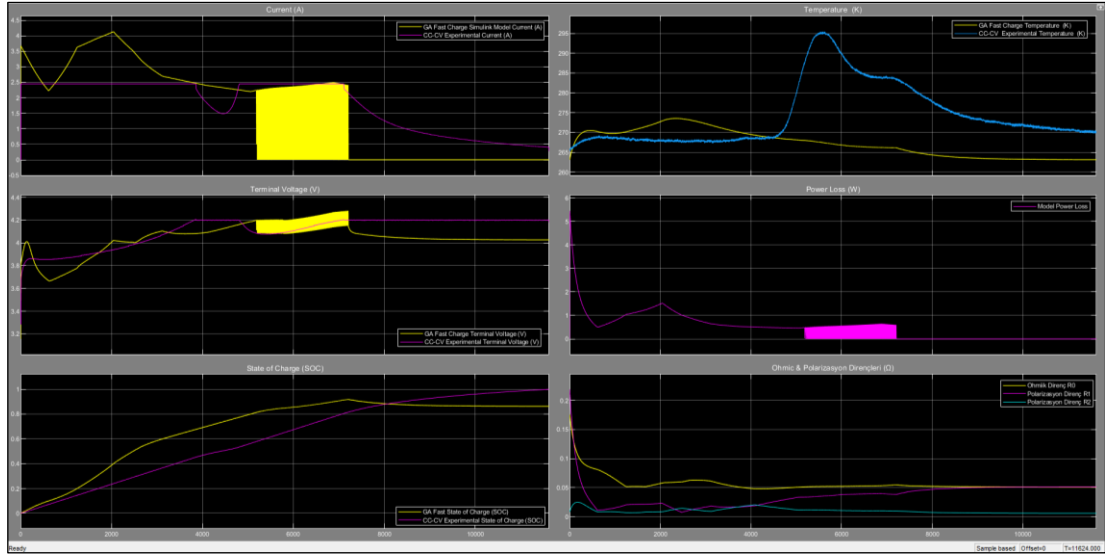


Şekil 5.18: 0 °C sıcaklıktaki MOGA şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve simulink model sonuç grafikleri.

Şekil 5.18'deki CC-CV şarj ve GA hızlı şarj simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında ise pil %90 SoC seviyesine, standart CC-CV şarj yönteminde 8874 sn de ulaşırken, önerilen şarj stratejisiyle 6275 sn de ulaşmıştır. Sıcaklık tepe noktaları karşılaştırıldığında ise 4.4 Kelvin artış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.19: -10 °C sıcaklıktaki CC-CV şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve simulink model sonuç grafikleri.



Şekil 5.20: -10 °C sıcaklıktaki MOGA şarj yöntemiyle şarj edilen pilin deneysel ve simulink model sonuç grafikleri.

Şekil 5.20'deki CC-CV şarj ve GA hızlı şarj simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında ise pil %90 SoC seviyesine, standart CC-CV şarj yönteminde 8386.7 sn de ulaşırken, önerilen şarj stratejisiyle 7523 sn de ulaşmıştır. Sıcaklık tepe noktaları karşılaştırıldığında ise 1. Kelvin artış olduğu gözlemlenmiştir.

5.3. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

5.3.1. Özet

Bu tez çalışması, lityum iyon pil için hızlı şarj tekniği geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu hızlı şarj etme tekniği, hücreyi daha hızlı şarj edebilecek ve hücre kapasitesini etkilemeden uzun süreli döngü kabiliyetini koruyabilecektir. Hedefe bağlı olarak hızlı şarj algoritması geliştirilmiştir ve bu 21700 lityum iyon hücreye uyarlanmıştır. Hücre bunun için mevcut lityum iyon hücrelerinin çoğu gibi standart özelliklere sahip olduğundan, bu teknik mevcut diğer lityum iyon hücrelere çevrilebilir. Lityum-iyon hücre testi alanında bir pil test sistemi kullanılmıştır. Bu tezde ana hedefimiz, düşük sıcaklıklarda pil şarj süresini kısaltmak ve kapasiteyi arttırmaktır. Farklı sıcaklıklardaki pillerin geliştirilmiş bir elektrik-termal bağlantı modeline dayalı olarak lityum-iyon piller için bir optimizasyon stratejisi ve soğuk ortamlarda şarj yöntemi önerilmiştir. HPPC deneyi aracılığıyla, ikinci dereceden RC eşdeğer devre modelinin

parametre tanımlaması yapılmıştır ve lityum pilin elektrik-termal bağlantı modeli oluşturulmuştur. Sınır temelinde, bir interpolasyon mutasyon işlemi yoluyla şarj stratejisini oluşturmak için optimizasyon hedefleri olarak hizmet eden en kısa şarj süresi ve geri döndürülemez ısının pili ısıtmada kullanılmasını optimize etmek için geliştirilmiş bir genetik algoritma kullanılmıştır.

5.3.2. Sonuç

Tez sonuçları, tezde sunulan bulgular ve içgörüler, özellikle düşük sıcaklıklarda batarya teknolojisi alanında gelecekteki araştırma çabaları için bir temel oluşturmaktadır. Soğuk ortamlarda batarya performansının artan önemine rağmen, özellikle sıfırın altındaki sıcaklıkların sunduğu zorluklara ve fırsatlara odaklanan nispeten sınırlı çalışma yapılmıştır. Bu tez, özellikle eksi sıcaklık koşulları altında batarya çalışması ve sağlık durumunun karmaşıklıklarını ve etkilerini ele alarak araştırma boşluğunu doldurmaktadır. Ayrıca eksi sıcaklıklarda genetik algoritma optimizasyonu kullanılarak şarj stratejisi geliştirilen ilk çalışmadır. Burada yürütülen deneysel çalışmalar, aşırı soğuğa maruz kaldığında bataryaların yaşadığı benzersiz bozulma mekanizmalarına, kapasite değişikliklerine ve empedans gelişimine ışık tutmaktadır, 0 °C sıcaklıkta önerilen metodun çok daha iyi sonuçlar verdiği, -10 °C sıcaklıkta ise CC-CV şarja göre daha stabil bir sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. 25 °C sıcaklıkta ise kısa şarj süresi elde edilmiştir ancak algoritmanın hedef fonksiyonu sıcaklığı artırma hedefinde olduğu için sıcaklık artmıştır. Yapılan çalışma düşük sıcaklıkları hedef aldığı için 25 °C sıcaklıkta şarj süresini olumlu yönde etkilerken sıcaklık artışı gözlemlenmesi olumsuz etkiye sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma sadece düşük sıcaklıklarda batarya davranışının anlaşılmasına katkıda bulunmakla kalmıyor, aynı zamanda bu önemli çalışma alanında gelecekte yapılacak araştırmalara da zemin hazırlıyor.

5.3.3. Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalarda, çalışmada kullanılan batarya sisteminin çeşitli çalışma koşulları altında batarya sağlık durumunun ve performans özelliklerinin araştırılması önerilir. Uzun vadeli bozulma mekanizmalarını, kapasite azalmasını ve bataryanın empedans gelişimini değerlendirmek için deneysel çalışmalar yapılabilir. Bu

alışmalar şarj durumu, sağlık durumu, i direnç ve çevrim ömrü gibi temel parametreleri içermelidir. Bu deneysel çalışmalar, batarya sağlığını etkileyen faktörler hakkında bilgiler verecek, etkili batarya yönetim stratejilerinin ve tahmin modellerinin geliştirilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, operasyonel verimliliği ve kullanım ömrünü optimize etmek için farklı şarj ve deşarj profillerinin, sıcaklık değişimlerinin ve yk koşullarının bataryanın performansı üzerindeki etkisi araştırılmalıdır. Elde edilecek deneysel sonuçlar, batarya teknolojisinin ilerlemesine katkı sağlayacak ve güvenilir enerji depolama sistemlerinin tasarımını kolaylaştıracaktır.

Ek olarak sonuçlarımız tek hücreli bir pil ile gerçekleştirilmiştir. Tek hücreleri olumsuz etkileyen uygun olmayan bir şarj yönetimi, pil takımını tahrip edebilir. Gelişmiş BMS, pil takımının daha kolay alıştırılmasına yardımcı olabilir. Gelecekteki diğer araştırmalar, sıcaklık değişikliklerinin, şarj durumunun, sağlık durumunun, basınç değişikliklerinin ve i malzeme değişikliklerinin etkisini keşfedebilir. Hücre performansındaki iyileştirme, gelecekteki elektrikli araç pazarını değiştirebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Liu, J., Duan, Q., Ma, M., Zhao, C., Sun, J., & Wang, Q. (2020), “Aging mechanisms and thermal stability of aged commercial 18650 lithium ion battery induced by slight overcharging cycling”, *Journal of power sources*, 445, 227263.
- [2] Togasaki, N., Yokoshima, T., Oguma, Y., & Osaka, T. (2020), “Prediction of overcharge-induced serious capacity fading in nickel cobalt aluminum oxide lithium-ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy”, *Journal of Power Sources*, 461, 228168.
- [3] Juarez-Robles, D., Vyas, A. A., Fear, C., Jeevarajan, J. A., & Mukherjee, P. P. (2020), “Overcharge and aging analytics of Li-ion cells. *Journal of the Electrochemical Society*”, 167(9), 090547.
- [4] Qian, K., Li, Y., He, Y. B., Liu, D., Zheng, Y., Luo, D., & Kang, F. (2016), “Abuse tolerance behavior of layered oxide-based Li-ion battery during overcharge and over-discharge”, *RSC advances*, 6(80), 76897-76904.
- [5] Liu, Y., Huo, R., Qin, H., Li, X., Wei, D., & Zeng, T. (2020), “Overcharge investigation of degradations and behaviors of large format lithium ion battery with Li (Ni_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}) O₂ cathode”, *Journal of Energy Storage*, 31, 101643.
- [6] Ouyang, D., Chen, M., Weng, J., & Wang, J. (2020), “A comparative study on the degradation behaviors of overcharged lithium-ion batteries under different ambient temperatures. *International Journal of Energy Research*”, 44(2), 1078-1088.
- [7] Jiang, J., Liu, Q., Zhang, C., & Zhang, W. (2014), “Evaluation of acceptable charging current of power Li-ion batteries based on polarization characteristics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*”, 61(12), 6844-6851.

- [8] Chen, L. R. (2007), "A design of an optimal battery pulse charge system by frequency-varied technique", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54(1), 398-405.
- [9] Chen, L. R. (2008), "Design of duty-varied voltage pulse charger for improving Li-ion battery-charging response", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(2), 480-487.
- [10] Notten, P. H., het Veld, J. O., & Van Beek, J. R. G. (2005), "Boostcharging Li-ion batteries: A challenging new charging concept", Journal of Power Sources, 145(1), 89-94.
- [11] Min, H., Sun, W., Li, X., Guo, D., Yu, Y., Zhu, T., & Zhao, Z. (2017), "Research on the optimal charging strategy for Li-ion batteries based on multi-objective optimization. Energies", 10(5), 709.
- [12] Chen, M., & Rincon-Mora, G. A. (2006), "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance", IEEE transactions on energy conversion, 21(2), 504-511.
- [13] Hu, X., Li, S., & Peng, H. (2012), "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries", Journal of Power Sources, 198, 359-367.
- [14] M Dubarry, M., & Liaw, B. Y. (2007), "Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries", Journal of Power Sources, 174(2), 856-860.
- [15] Zhang, L., Peng, H., Ning, Z., Mu, Z., & Sun, C. (2017), "Comparative research on RC equivalent circuit models for lithium-ion batteries of electric vehicles", Applied Sciences, 7(10), 1002.

- [16] Chu, Z., Feng, X., Lu, L., Li, J., Han, X., & Ouyang, M. (2017), “Non-destructive fast charging algorithm of lithium-ion batteries based on the control-oriented electrochemical model”, *Applied energy*, 204, 1240-1250.
- [17] Zhang, R., Xia, B., Li, B., Cao, L., Lai, Y., Zheng, W., & Wang, M. (2018), “A study on the open circuit voltage and state of charge characterization of high capacity lithium-ion battery under different temperature. *Energies*”, 11(9), 2408.
- [18] Shabani, B., & Biju, M. (2015), “Theoretical modelling methods for thermal management of batteries”, *Energies*, 8(9), 10153-10177.
- [19] Chen, J., Jiaqiang, E., Kang, S., Zhao, X., Zhu, H., Deng, Y. & Zhang, Z. (2019), “Modeling and characterization of the mass transfer and thermal mechanics of the power lithium manganate battery under charging process”, *Energy*, 187, 115924.
- [20] Feng, F., Teng, S., Liu, K., Xie, J., Xie, Y., Liu, B., & Li, K. (2020), “Co-estimation of lithium-ion battery state of charge and state of temperature based on a hybrid electrochemical-thermal-neural-network model”, *Journal of Power Sources*, 455, 227935.
- [21] Pan, Y. W., Hua, Y., Zhou, S., He, R., Zhang, Y., Yang, S., & Wu, B. (2020), “A computational multi-node electro-thermal model for large prismatic lithium-ion batteries”, *Journal of Power Sources*, 459, 228070.
- [22] Feng, X., He, X., Ouyang, M., Lu, L., Wu, P., Kulp, C., & Prasser, S. (2015), “Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25 Ah LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ large format lithium ion battery”, *Applied energy*, 154, 74-91.
- [23] Liu, K., Hu, X., Yang, Z., Xie, Y., & Feng, S. (2019), “Lithium-ion battery charging management considering economic costs of electrical energy loss and battery degradation”, *Energy conversion and management*, 195, 167-179.

- [24] Khamar, M., & Askari, J. (2014), "A charging method for Lithium-ion battery using Min-max optimal control", 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 1239-1243). IEEE.
- [25] Schuster, S. F., Bach, T., Fleder, E., Müller, J., Brand, M., Sextl, G., & Jossen, A. (2015), "Nonlinear aging characteristics of lithium-ion cells under different operational conditions", *Journal of Energy Storage*, 1, 44-53.
- [26] Yamada, Y., Yaegashi, M., Abe, T., & Yamada, A. (2013), "A superconcentrated ether electrolyte for fast-charging Li-ion batteries", *Chemical Communications*, 49(95), 11194-11196.
- [27] Doughty, D. H., & Roth, E. P. (2012), "A general discussion of Li ion battery safety", *The Electrochemical Society Interface*, 21(2), 37.
- [28] Shen, W., Vo, T. T., & Kapoor, A. (2012), "Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview", 7th IEEE conference on industrial electronics and applications (ICIEA) (pp. 1567-1572). IEEE.
- [29] Anseán, D., González, M., Viera, J. C., García, V. M., Blanco, C., & Valledor, M. (2013), "Fast charging technique for high power lithium iron phosphate batteries: A cycle life analysis", *Journal of Power Sources*, 239, 9-15.
- [30] Keil, P., & Jossen, A. (2016), "Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells", *Journal of Energy Storage*, 6, 125-141.
- [31] Guo, Z., Liaw, B. Y., Qiu, X., Gao, L., & Zhang, C. (2015), "Optimal charging method for lithium ion batteries using a universal voltage protocol accommodating aging", *Journal of Power Sources*, 274, 957-964.
- [32] Messac, A. (2015), "Optimization in Practice with MATLAB® for Engineering Students and Professionals", Publisher.

- [33] Schaffer, J. D. (2014), “Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms”,” In Proceedings of the first international conference on genetic algorithms and their applications (pp. 93-100). Psychology Press.
- [3] N. Srinivas and K. Deb. (1994), “Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms”, *Evolutionary Computation*, 2(3):221–248.



ÖZGEÇMİŞ

Gölsüm Gözde KADIZ, 2009 yılında Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliğı bölümüne başladı. Lisans eğitiminin 5. Dönemini kapsayan 2011 yılında Metalurji Malzeme Mühendisliğı bölümünde yandala başladı. 2013 yılında bölüm birinciliğı ve fakülte ikinciliğıyle lisans eğitimini tamamlayarak 2019 yılında yüksek lisans eğitime Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliğı Anabilim Dalında başladı. 2013 yılından bu yana çeşitli firmaların Ar-Ge departmanlarında Ar-Ge Mühendisi olarak görev almaktadır.



EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

G.G. Kadız, S.O. Ünverdi, (2023), “Genetic Algorithm-Based Multi-Objective Optimization of Fast-Charging Parameters of a Lithium-Ion Battery by a Coupled Equivalent Electric Circuit-Heat Transfer Model” 14th International Conference on Thermal Engineering (ICTEA'14)" held on May 25-27.

