

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YÜKSEK DOĞRULUKLA ŞARJ KESTİRİMİ
SUNAN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Mert SERİNBAŞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YÜKSEK DOĞRULUKLA ŞARJ KESTİRİMİ
SUNAN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mustafa Mert SERİNBAŞ
(504201040)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur GÜLBAHÇE

HAZİRAN 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504201040, numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa Mert SERİNBAŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YÜKSEK DOĞRULUKLA ŞARJ KESTİRİMİ SUNAN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur GÜLBAHÇE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Tayfun GÜNDOĞDU**
İstanbul Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Alparslan ZEHİR
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : **25.05.2023**

Savunma Tarihi : **14.06.2023**





Aileme ve eşime,



ÖNSÖZ

Yapılan tez çalışması boyunca desteklerini esirgemeyen aileme, arkadaşlarıma ve değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur GÜLBAHÇE'ye teşekkürleri borç bilirim.

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: MYL-2022-43660) lisanüstü tez projeleri kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Haziran 2023

Mustafa Mert SERİNBAŞ
(Elektrik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Taraması	3
2. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ.....	7
2.1 Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri	8
2.1.1 Gerilim ölçümü	9
2.1.2 Akım ölçümü.....	13
2.1.3 Sıcaklık ölçümü.....	15
2.1.4 Veri kontrolü	15
2.2 Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri	16
2.2.1 Merkezi batarya yönetim sistemi	16
2.2.2 Modüler batarya yönetim sistemi.....	17
2.2.3 Dağıtılmış batarya yönetim sistemi.....	18
3. BATARYA MODELLEME ve PARAMETRE KESTİRİMİ.....	19
3.1 Batarya Modelleme Yaklaşımları ve Karşılaştırılması	19
3.1.1 Elektrokimyasal modeller	20
3.1.2 Veri tabanlı modeller	21
3.1.3 Elektriksel eşdeğer devre modelleri.....	21
3.2 Parametre Kestirimi.....	26
3.2.1 HPPC testi	26
3.3 SoC-OCV Matematiksel Eşitliği.....	29
4. ŞARJ DURUMU KESTİRİMİ YÖNTEMLERİ.....	31
4.1 Açık Devre Gerilimi Yöntemi.....	31
4.2 Yük Sayma Yöntemi	32
4.3 Kalman Filtresi	32
4.3.1 Genişletilmiş Kalman Filtresi	33
4.3.2 Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi.....	38
5. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI	43
5.1 Parametre Kestirimi ve SoC-OCV Matematiksel Eşitliği.....	43
5.2 Şarj Durumu Kestirimi Simülasyonları.....	48
5.2.1 Genişletilmiş Kalman Filtresi ile şarj durumu kestirimi	48
5.2.2 Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi ile şarj durumu kestirimi	50

5.3 Batarya Yönetim Sistemi Elektronik Kart ve Arayüz Tasarımı	53
5.3.1 LTC6802-2 entegre devresi	53
5.3.2 ATMEGA328PAU mikrodeneleyici devresi	58
5.3.3 Kullanıcı arayüz tasarımı	59
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	65
EKLER.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	75



KISALTMALAR

ADC	: Analog Digital Converter
BYS	: Batarya Yönetim Sistemi
DA	: Doğru Akım
GKF	: Genişletilmiş Kalman Filtresi
HPPC	: Hybrid Pulse Power Characterization
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineer
I2C	: Inter-Integrated Circuits
KF	: Kalman Filtresi
LFP	: Lityum Demir Fosfat
LiFePO₄	: Lityum Demir Fosfat
LiNiMnCoO₂	: Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
Li-ion	: Lityum İyon
NiCd	: Nikel Kadmiyum
NiMH	: Nikel Metal Hidrit
OCV	: Open Circuit Voltage
PNGV	: Partnership for New Generation Vehicles
SOC	: State of Charge
SOH	: State of Health
SPI	: Serial Peripheral Interface
UDDS	: Urban Dynamometer Driving Schedule
UGKF	: Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi



SEMBOLLER

Ah	: Amper Saat
C_i	: Polarizasyon kapasiteleri
C_n	: Anma kapasitesi
I_b	: Batarya akımı
k	: Zaman adımı
K	: Kalman Kazancı
Q	: Süreç gürültü kovaryansı
Q(t)	: Anlık kapasite
R₀	: Batarya iç direnci
R_i	: Polarizasyon dirençleri
SoC(k)	: k anındaki şarj durumu
u_k	: Giriş değeri
U_i	: Polarizasyon gerilimleri
U_{oc}	: Açık devre gerilimi
U_T	: Terminal gerilimi
x_k	: Durum değişkeni
y_k	: Çıkış değeri
ΔI_b	: Batarya akım değişimi
ΔU	: Gerilim değişimi
τ	: Zaman sabiti



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Batarya kimyaları ve özellikleri	1
Çizelge 3.1 : Batarya modellerinin karşılaştırılması.....	26
Çizelge 4.1 : Şarj durumu kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması	41
Çizelge 5.1 : Şarj durumu-açık devre gerilim değerleri	43
Çizelge 5.2 : İkinci dereceden Thevenin eşdeğer devre parametreleri.....	46
Çizelge 5.3 : Birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre parametreleri	46
Çizelge 6.1 : Eşdeğer devre modellerine göre hata oranı	62
Çizelge 6.2 : Şarj durumu kestirim yöntemlerine göre hata oranları.....	63



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: BYS blok şeması	8
Şekil 2.2	: BYS görevleri.....	8
Şekil 2.3	: Farklı denge durumuna sahip batarya paketleri	10
Şekil 2.4	: Batarya hücre bağlantısı topolojileri	10
Şekil 2.5	: Pasif dengeleme bağlantı şeması.....	11
Şekil 2.6	: Aktif dengeleme bağlantı şeması	12
Şekil 2.7	: Farklı akım değerlerine göre deşarj eğrisi	14
Şekil 2.8	: Farklı akım değerlerine göre kullanılabilir kapasite değerleri	14
Şekil 2.9	: Farklı akım değerlerine göre çevrim ömrü eğrisi	14
Şekil 2.10	: Farklı sıcaklık değerlerine göre çevrim ömrü eğrisi	15
Şekil 2.11	: Merkezi BYS yapısı	16
Şekil 2.12	: Modüler BYS Yapısı.....	17
Şekil 2.13	: Dağıtılmış BYS Yapısı.....	18
Şekil 3.1	: Lityum iyon batarya hücresinin kimyasal yapısı.....	19
Şekil 3.2	: Lityum iyon batarya modelleri.....	20
Şekil 3.3	: Yapay sinir ağı modeli	21
Şekil 3.4	: Seri direnç modeli	23
Şekil 3.5	: Sıfırıncı dereceden Thevenin modeli	23
Şekil 3.6	: Birinci dereceden Thevenin Modeli.....	24
Şekil 3.7	: İkinci dereceden Thevenin modeli	25
Şekil 3.8	: PNGV modeli.....	25
Şekil 3.9	: HPPC testi gerilim ve akım profilleri.....	27
Şekil 3.10	: Terminal gerilim tepkisi	27
Şekil 3.11	: Dinlendirilen batarya hücresinin terminal gerilim tepkisi.....	30
Şekil 4.1	: Klasik Kalman filtresi şarj durumu kestirim diyagramı	33
Şekil 4.2	: Durum uzay modeline dayanan şarj durumu kestirim diyagramı	34
Şekil 4.3	: Şarj durumu kestirimi için GKF algoritması.....	38
Şekil 4.4	: Şarj durumu kestirimi için UGKF algoritması.....	40
Şekil 5.1	: Şarj durumu - açık devre eğrisi	44
Şekil 5.2	: Şarj durumu açık devre gerilimi polinom katsayıları.....	44
Şekil 5.3	: Terminal gerilimi yakınsama eğrileri	45
Şekil 5.4	: Birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli doğrulama eğrileri..	47
Şekil 5.5	: İkinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli doğrulama eğrileri ...	47
Şekil 5.6	: Başlangıç durumu %100 iken UDDS akım profiline göre GKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi.....	48
Şekil 5.7	: Başlangıç durumu %100 iken LA92 akım profiline göre GKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi.....	49
Şekil 5.8	: Başlangıç durumu %50 iken UDDS akım profiline göre GKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi.....	49
Şekil 5.9	: Başlangıç durumu %50 iken UDDS akım profiline göre GKF yöntemiyle yakınsama süresi	49

Şekil 5.10 : Başlangıç durumu %50 iken LA92 akım profiline göre GKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi.....	50
Şekil 5.11 : Başlangıç durumu %50 iken LA92 akım profiline göre GKF yöntemiyle yakınsama süresi.....	50
Şekil 5.12 : Başlangıç durumu %100 iken UDDS akım profiline göre UGKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi.....	51
Şekil 5.13 : Başlangıç durumu %100 iken LA92 akım profiline göre UGKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi.....	51
Şekil 5.14 : Başlangıç durumu %50 iken UDDS akım profiline göre UGKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi.....	52
Şekil 5.15 : Başlangıç durumu %50 iken UDDS akım profiline göre UGKF yöntemiyle yakınsama süresi.....	52
Şekil 5.16 : Başlangıç durumu %50 iken LA92 akım profiline göre UGKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi.....	52
Şekil 5.17 : Başlangıç durumu %50 iken LA92 akım profiline göre UGKF yöntemiyle yakınsama süresi.....	53
Şekil 5.18 : Yardımcı elektronik kart şematiği	54
Şekil 5.19 : Dengeleme ve filtreleme şematiği	55
Şekil 5.20 : LTC6802-2 uç bağlantı şematiği	55
Şekil 5.21 : Piyano anahtar uç bağlantı şematiği	56
Şekil 5.22 : Yardımcı elektronik kart üç boyutlu baskı devre tasarımı	57
Şekil 5.23 : Batarya yönetim sistemi baskı devre kartı.....	57
Şekil 5.24 : ATMEGA328PAU uç bağlantı şematiği.....	58
Şekil 5.25 : Sıcaklık ve akım sensörü şematiği	59
Şekil 5.26 : Arayüz tasarımı	59
Şekil A.1 : Batarya yönetim sistemi kurulumu.....	72
Şekil B.1 : Parametre kestirim kodları.....	73

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YÜKSEK DOĞRULUKLA ŞARJ KESTİRİMİ SUNAN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

ÖZET

Fosil yakıtlar elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması; ulaşım, sanayi, ısınma gibi sektörlerin birçoğunda uzun yıllardır birincil enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ancak artan nüfus yoğunluğu ve modern yaşamla enerji ihtiyacındaki artış yenilenemez enerji kaynağı olan fosil yakıtların tükenmesini ve küresel ısınmaya neden olan zararlı gazların atmosfere salınımını beraberinde getirmektedir. Çevresel kaygılar ve sürdürülebilir enerji politikaları göz önünde bulundurulduğunda alternatif enerji kaynaklarına ve enerji depolama sistemlerine yönelik çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Elektrikli araçlar bu dönüşümün önemli bir parçası olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda elektrikli araçlar, performanslarının geliştirilmesiyle içten yanmalı motora sahip araçlara alternatif olarak sunulmaktadır. Elektrikli araçların performansını belirleyen önemli faktörlerden birisi menzilleridir. Bundan dolayı araç yapısının ergonomisi düşünüldüğünde düşük ağırlık ve yüksek güç yoğunluğuna sahip batarya paketlerinin kullanılması kaçınılmaz olmuştur.

Lityum tabanlı bataryalar sahip olduğu yüksek güç yoğunluğunun yanında geri dönüşümü ve sürdürülebilirliğiyle, elektrikli araçların enerji depolama sistemleri için çevre dostu bir yaklaşım sunar. Fakat kimyasal yapısının çevresel koşullardan etkilenmesi ve aşırı şarj-deşarj durumlarına karşı hassas olmasından dolayı lityum tabanlı bataryalar güvenli ve verimli şekilde çalışması için takip sistemine ihtiyaç duyarlar. Batarya paketlerinin elektrikli ve termal optimizasyonunu sağlayan bu teknolojiye batarya yönetim sistemi (BYS) adı verilir. Batarya yönetim sistemi, batarya paketinin gerilim, akım, sıcaklık değerlerini gerçek zamanlı ölçerek batarya kullanılabilir çevrim ömrünün korunmasını ve güvenlik problemlerinin önüne geçilmesini amaçlayan elektronik bir çözümdür. Bu doğrultuda batarya yönetim sistemleri batarya paketinin anlık şarj durumunu tespit ederek bataryanın aşırı şarj-deşarj olmasını engeller, kapasite kaybını ve oluşabilecek güvenlik problemlerini minimize ederek güvenli aralıklarda çalışmasını sağlar. Fakat batarya şarj durumu gerilim, akım, sıcaklık gibi doğrudan ölçülebilen bir büyüklük değildir. Ayrıca ölçülen bu değerlerin hiçbirisiyle doğrusal bir matematiksel ilişkiye sahip değildir. Bundan dolayı şarj durumu tespiti için kestirim algoritmaları kullanılır. Batarya yönetim sistemleri elde ettiği ölçüm değerlerini kestirim fonksiyonlarında değerlendirerek batarya şarj durumu tespiti yapar. Batarya yönetim sistemlerinin tasarımı batarya kimyasına, hücre sayısına, kullanım yerine ve beklenen meziyetlere göre özgün tasarım gerektirir. Yapılan bu çalışmada yüksek doğrulukla şarj durumu kestirimi sunan batarya yönetim sistemi tasarlanması ve gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında batarya yönetim sistem topolojileri, batarya modelleri, şarj durumu kestirimi algoritmaları gibi sistem bileşenleriyle ilgili literatür de yapılan çalışmalar; başarımları, anlaşılabilirliği, uygulanabilirliği ve maliyeti açısından incelenmiştir.

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketlerinin yapısı, batarya paketinde bulunan hücre sayıları göz önünde bulundurulduğunda; sağlamış olduğu mekanik ve donanımsal avantajlardan dolayı modüler batarya yönetim sistem topolojisi seçilmiştir. Topoloji gereği batarya paketinin gerilim, akım ve sıcaklığını ölçmek için algılayıcılar ve tüm devrelerle donatılmış yardımcı elektronik kart ve elde edilen verilerin kaydının tutulduğu ve bilgisayara aktarıldığı elektronik kart tasarlanmıştır. Yardımcı elektronik kartta hücre gerilim değerlerinin ölçülmesi için LTC6802-2 tüm devresi, batarya paket akım değerinin ölçülmesi için LTS 25-NP , sıcaklık değerinin ölçülmesi için LM35 sıcaklık sensörü kullanılmıştır.

Batarya paketlerinde bulunan hücreler kullanılmaya başladıkları ilk çevrimlerde denge bakımından iyi bir duruma sahip olabilirler. Ancak zamanla, şarj-deşarj döngüleri, yüksek sıcaklık ve genel yaşlanma nedeniyle hücreler arası denge uyumu bozulur. Gerçekleştirilen batarya yönetim sistemi ile batarya paket performansını artırmak ve bataryanın verimli olarak kullanılması için pasif dengeleme algoritması ve devre tasarımı geliştirilmiştir. Batarya model seçiminde ise lityum iyon bataryaların doğrusal olmayan kimyası dikkate alındığında bataryanın dinamik davranışını sergilemede, elektrokimyasal ve veri tabanlı modellere göre daha düşük işlem yoğunluğuna sahip ve anlaşılabilirliği daha kolay olan elektriksel eşdeğer devre modeli seçilmiştir. Tez kapsamında kullanılan LG18650HG2 batarya hücresinin HPPC testi kullanılarak eşdeğer devre modelleri için parametre kestirimi gerçekleştirilmiştir. C/20 test verileri kullanılarak SoC-OCV matematiksel eşitliği elde edilmiştir. Gerilim tepkisi en yüksek benzetim oranına sahip elektriksel eşdeğer devre modelinin belirlenmesi için LG18650HG2 lityum iyon bataryanın HPPC test verileri kullanılarak MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. İkinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli, birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeline daha düşük hata oranı ile ölçüm verilerine yakınsamıştır.

Batarya şarj durumu, batarya yönetim sisteminin önemli çıktılarından biridir. Bataryaların aşırı şarj-deşarjdan korunması ve verimli çalıştırılması, şarj durumunun yüksek doğrulukla elde edilmesiyle mümkündür. Literatürde şarj durumu kestirimi ile ilgili birçok yöntem önerilmektedir. Tasarlanan batarya yönetim sisteminde kullanılmak üzere durum uzay modeline dayanan Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemleri farklı akım profilleri altında MATLAB ortamında karşılaştırılmıştır. Ölçüm ve süreç belirsizliğinin göz önünde bulundurulduğu Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemiyle daha stabil ve yüksek başarımlı şarj durumu kestirim eğrileri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, 4S1P LG18650HG2 batarya paketi için batarya yönetim sistemi elektronik kartı gerçekleştirilerek tasarlanan arayüzde batarya durumları gerçek zamanlı olarak izlenmektedir.

DESIGN OF BATTERY MANAGEMENET SYSTEM PROVIDING HIGH ACCURACY STATE OF CHARGE ESTIMATION FOR ELECTRIC VEHICLES

SUMMARY

Fossil fuels have been used as the primary energy source for many sectors such as transportation, industrial heating, and meeting electricity demands. However, the increasing population density and the rise in energy consumption due to modern lifestyles have led to the depletion of non-renewable fossil fuel resources and the release of harmful gases causing global warming. Considering environmental concerns and sustainable energy policies, there has been a significant focus on alternative energy sources and energy storage systems in recent years. Electric vehicles (EVs) have emerged as a significant part of this transformation. In line with this, electric vehicles are being offered as an alternative to internal combustion engine vehicles by improving their performance. One of the important factors determining the performance of electric vehicles is their range. Therefore, considering the ergonomics of vehicle structure, it has become inevitable to use battery packs with low weight and high-power density.

Lithium-based batteries offer an environmentally friendly approach to energy storage systems for electric vehicles due to their high-power density, recyclability, and sustainability. However, lithium-based batteries require a monitoring system to ensure their safe and efficient operation due to their susceptibility to environmental conditions and sensitivity to overcharging and discharging situations. The technology that enables the electrical and thermal optimization of battery packs is called Battery Management System (BMS). The Battery Management System is an electronic solution that aims to preserve the usable cycle life of the battery pack and prevent safety issues by measuring real-time voltage, current, and temperature values of the battery pack. In this regard, battery management systems detect the instantaneous charging status of the battery, preventing overcharging and discharging, minimizing capacity loss, and ensuring safe operation within specified ranges. However, battery charge status is not a directly measurable quantity in terms of voltage, current or temperature. Moreover, none of these measured values has a linear mathematical relationship. Therefore, estimation algorithms are used for charge status detection. Battery management systems evaluate the measured values in estimation functions to determine the battery charge status. The design of battery management systems requires unique design based on battery chemistry, cell count, application, and desired characteristics. This study aims to design and implement a battery management system that provides accurate state-of-charge estimation. In this work, studies related to system components such as battery management system topologies, battery models, and state-of-charge estimation

algorithms in the literature were examined in terms of performance, comprehensibility, applicability, and cost. Considering the structure of battery packs used in electric vehicles and the number of cells in the battery pack, a modular battery management system topology was selected due to its mechanical and hardware advantages. Accordingly, an auxiliary electronic board equipped with sensors and all necessary circuits to measure the voltage, current, and temperature of the battery pack was designed, and the obtained data was recorded and transferred to a computer. For measuring cell voltage values on the auxiliary electronic board, LTC6802-2 integrated circuit was used, LTS 25-NP was used for measuring the battery pack current, and LM35 temperature sensor was used for measuring temperature.

Cells in battery packs may initially have a good balance in terms of their capacity during the first cycles of usage. However, over time, due to charge-discharge cycles, high temperature, and general aging, the balance between cells deteriorates. A passive balancing algorithm and circuit design were developed with the implemented battery management system to improve the battery pack performance and ensure efficient use of the battery. For battery modeling, an electrical equivalent circuit model was selected, as it exhibits lower computational intensity and higher comprehensibility compared to electrochemical and data-driven models, considering the nonlinear chemistry of lithium-ion batteries. Parameter estimation for equivalent circuit models was performed using the HPPC test of the LG18650HG2 battery cell used in this thesis. The state-of-charge to open-circuit voltage mathematical equation was obtained using C/20 test data. Simulations were conducted in MATLAB using the HPPC test data of the LG18650HG2 lithium-ion battery to determine the electrical equivalent circuit model with the highest simulation accuracy. The second order Thevenin equivalent circuit model converged closer to the measurement data with lower error compared to the first order Thevenin equivalent circuit model.

Battery charge status is one of the important outputs of battery management systems. Protecting batteries from overcharging and over-discharging and operating them efficiently relies on accurately obtaining the charge status. In the literature, various methods are proposed for charge status detection. The most popular methods among these are direct estimation methods known as coulomb counting and open circuit voltage methods. In these methods, measurement accuracy is crucial for high-performance charge status detection. Although direct estimation methods are simple in terms of implementation and cost, they fall short in exhibiting the battery's dynamic behaviors. In the conducted study, a second-order Thevenin electrical equivalent circuit model was used. Another method used for charge status detection is model-based filtering algorithms. Model-based filtering algorithms are indirect charge estimation methods used to determine the charge status. These methods predict the battery's open circuit voltage using measured inputs such as current, voltage, and temperature, and associate it with the battery's charge status. With each measurement, the system gain is recursively updated to minimize the prediction error. Modeling methods are used in this approach to mathematically express the battery's dynamic behavior. Model-based algorithms based on the Kalman Filter are used as methods for predicting the state of charge in electric vehicles. The classical Kalman Filter is not suitable for estimating battery state of charge because it is designed for linear systems. However, the Extended Kalman Filter, which deals with the variations in state variables, can be used for state of charge estimation. The performance of the algorithm decreases due to factors such as the trial-and-error selection of noise covariances,

battery aging, and improper model selection in the state variable prediction using the Extended Kalman Filter method. Therefore, different approaches from the literature are adapted to the Extended Kalman Filter algorithm to improve its performance. Algorithms implemented by adapting different methods to the EKF method are called Adapted Extended Kalman Filter algorithms. The Adapted Extended Kalman Filter includes updating the state equations, considering the points where noise, uncertainty, and battery model approaches fall short.

The Extended Kalman Filter based on the state-space model and the Adaptive Extended Kalman Filter methods were compared in the MATLAB environment for use in the designed battery management system under different current profiles. With the Adaptive Extended Kalman Filter method, considering measurement and process uncertainties, more stable and higher performance charge state estimation curves were obtained. In the scope of the study, the battery status is monitored in real-time through the interface designed by implementing the battery management system electronic board for the 4S1P LG18650HG2 battery pack.





1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler ve sanayileşmeyle geleneksel enerji kaynağı olan fosil yakıtların kullanımı, atmosfere zararlı gaz salınımını artırmıştır. İçten yanmalı motora sahip araçlar, bu salınımların başlıca sebeplerindendir. Ayrıca fosil yakıtların birkaç yüzyıl içerisinde tükeneceği göz önünde bulundurulduğunda, elektrikli araç teknolojisi son yıllarda popülerlik kazanmıştır. Elektrikli araçlarda güç kaynağı olarak kullanılan bataryaların, uygulanabilirlik ve verimlilik açısından dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekir. Çizelge 1.1’de farklı batarya kimyalarının sahip olduğu özelliklerden bahsedilmiştir [1].

Çizelge 1.1 : Batarya kimyaları ve özellikleri

Özellikler	Kurşun Asit	NiCd	NiMH	Lityum İyon		
				Kobalt	Manganez	Fosfat
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	150-190	100-135	90-120
İç direnç (mΩ)	<100	100-	200-300	150-300	25-75	25-50
Kullanılabilir Çevrim Sayısı	200-300	1000	300-500	500-1000	500-1000	1000-2000
Şarj Süreleri	8-16 saat	1 saat	2-4 saat	2-4 saat	<1saat	<1 saat
Nominal Gerilim (V)	2	1.2	1.2	3.6	3.8	3.3
Maksimum Akım	5C	20C	5C	>3C	>30C	>30C
Kullanılmaya Başlandığı Tarih	1800’lerin sonu	1950	1990	1991	1996	1999
Aşırı Şarj-Deşarj Toleransı	Yüksek	Normal	Düşük	Aşırı şarj ve deşarja toleransı yoktur.		
Güvenlik Gereksinimleri	Termal stabilite	Termal stabilite ve akım koruması		Akım, sıcaklık ve gerilim değerlerinin sürekli izlenmesi gerekir.		

Diğer batarya kimyalarıyla karşılaştırıldığında lityum tabanlı bataryalar; yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, düşük bakım gereksinimi ve hızlı şarj olabilme gibi avantajlara sahip olduğundan dolayı elektrikli araç teknolojisinde öne çıkmaktadır.

Fakat sahip olduğu avantajların yanında lityum tabanlı bataryaların emniyetli çalıştırılması, diğerkimyalara göre daha kritiktir. Aksi takdirde bataryaların çevrim ömründe, performansında ve kapasitelerinde kayıplar yaşanabilir veya ısınmaya bağı olarak güvenlik problemleri oluşabilir. Batarya paketlerinin güvenilir ve emniyetli çalışması, batarya yönetim sistemleri ile sağlanır. Batarya yönetim sistemleri, her bir batarya hücresinin gerilimini, akımını ve batarya paketlerinin sıcaklığını gerçek zamanlı ölçerek doğabilecek muhtemel hataların ortadan kaldırılmasını veya minimize edilmesini sağlar. Ayrıca batarya yönetim sistemi ile lityum iyon bataryaların performansı ve verimliliğı açısından önemli olan batarya şarj durumu kestirilerek, bataryaların sahip olduğı kullanılabilir enerji hesaplanır, aşırı şarj-deşarj koruması sağlanır. Batarya şarj durumu kestirimini karmaşıklaştıran durum ise doğrudan ölçülememesidir. Batarya şarj durumu; batarya gerilimi, akımı ve sıcaklığı ile doğrusal ilişkiye sahip değildir. Bundan dolayı elde edilen veriler ile yüksek doğrulukla şarj durumu kestirimi yapabilecek yöntemin seçilmesi gerekir.

1.1 Tezin Amacı

Yapılan bu çalışmada lityum tabanlı bataryalar için yüksek doğrulukla şarj durumu kestirimi yapabilen batarya yönetim sistemi tasarlanması ve gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında batarya yönetim sistem topolojileri, batarya modelleri, şarj durumu kestirimi algoritmaları gibi sistem bileşenleriyle ilgili literatürde yapılan çalışmalar; başarıml oranı, anlaşılabilirliği, uygulanabilirliği ve maliyeti açısından incelenecektir.

Öncelikle sistem topolojisi seçimi için literatürde bulunan batarya yönetim sistem topolojileri karşılaştırılacak, sağlayacağı mekanik ve donanımsal esneklikte göz önünde bulundurularak seçilecektir.

Batarya model seçiminde ise lityum iyon bataryaların doğrusal olmayan kimyası dikkate alındığında bataryanın dinamik davranışını sergilemede, elektrokimyasal ve veri tabanlı modellere göre daha düşük işlem yoğunluğuna sahip ve anlaşılabilirliği daha kolay olan elektriksel eşdeğer devre modeli düşünülmüştür. Gerilim tepkisi en yüksek benzetim oranına sahip elektriksel eşdeğer devre modeli, tez kapsamında kullanılan LG18650HG2 lityum iyon batarya test verileri kullanılarak MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda seçilecektir. Seçilen modelin HPPC test verileri ile parametre kestirimi; C/20deşarj test verileri ile SoC-OCV

matematiksel eşitliği elde edilmesi düşünülmektedir. Yapılan çalışmalarda McMaster Üniversitesi'nde gerçekleştirilen test verileri kullanılacaktır.

Batarya şarj durumu, batarya yönetim sisteminin önemli çıktılarından biridir. Bataryaların aşırı şarj-deşarjdan korunması ve verimli çalıştırılması, şarj durumunun yüksek doğrulukla elde edilmesiyle mümkündür. Literatürde şarj durumu kestirimi ile ilgili birçok yöntem önerilmektedir. Tasarlanan batarya yönetim sisteminde kullanılmak üzere durum uzay modeline dayanan Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemleri farklı akım profilleri altında MATLAB ortamında karşılaştırılacak, test verilerine en yüksek başarımla yakınsayan yöntem kullanılarak batarya yönetim sistemi gerçekleştirilecektir.

1.2 Literatür Taraması

Teknolojik gelişmeler ve sanayileşmeyle geleneksel enerji kaynağı olan fosil yakıtların kullanımı atmosfere zararlı gaz salınımını artırmıştır. İçten yanmalı motora sahip araçlar bu salınımların başlıca sebeplerindendir. Ayrıca fosil yakıtların birkaç yüzyıl içerisinde tükeneceği de göz önünde bulundurulduğunda, elektrikli araç teknolojisi son yıllarda popülerlik kazanmıştır [2].

Elektrikli araçlar, içten yanmalı motora sahip araçların çevreye verdiği zararları azaltması için çözüm olarak düşünülen yeni nesil araçlardır. Bu sebeple hükümetler içten yanmalı motora sahip araçlar yerine elektrikli araçların kullanılmasını teşvik etmektedir. Raporlara göre, 2018'de elektrikli araçların küresel satışları 2017'ye kıyasla %72 artmış ve pazar payı %2,1'e yükselmiştir [3]

Elektrikli araçlar içten yanmalı motora sahip araçlardan daha verimli ve çevre dostu olmasına rağmen son yıllara kadar tercih edilmemesinin sebebinin menzil problemi olduğu üreticiler tarafından bilinmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda yeniden doldurulabilir lityum tabanlı batarya hücreleri ile bu problemin önüne geçileceği düşünülmektedir [4].

Lityum tabanlı bataryalar yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrüne sahip çevre dostu güç kaynaklarıdır. Fakat kimyasal yapısının, çevresel koşullardan etkilenmesi ve aşırı şarj-deşarj durumlarına karşı hassas olmasından dolayı sahip olduğu kapasitenin verimli kullanılması için batarya yönetim sistemine ihtiyaç duyarlar [5].

Batarya yönetim sistemleri batarya paketinin anlık akım, gerilim, sıcaklık değerlerini izleyerek bataryanın optimum çalışma bölgesinde kalmasını sağlar. Bataryanın aşırı şarj ve deşarja karşı korunması batarya yönetim sisteminin önemli çıktılarından. Bundan dolayı batarya doluluk oranının yüksek doğrulukla tespit edilmesi gerekir. Fakat batarya doluluk oranının doğrudan ölçülebilen bir büyüklük olmaması ve çevresel koşullardan etkilenmesi hesaplanmasını karmaşıktırır [6].

Literatürde şarj durumu tespiti için birçok yöntem önerilmektedir. Bu yöntemlerin en popülerleri doğrudan şarj durumu kestirimi yöntemleri olarak bilinen yük sayma ve açık devre gerilimi yöntemleridir. Bu yöntemlerde, yüksek başarımlı şarj durumu tespiti için ölçüm doğruluğu oldukça önemlidir. Doğrudan şarj durumu kestirim yöntemleri uygulama ve maliyet açısından basit olsa da bataryanın dinamik davranışlarını sergilemede yetersiz kalmaktadır [7].

Şarj durumu tespiti için kullanılan bir diğer yöntem ise model tabanlı filtreleme algoritmalarıdır. Model tabanlı filtreleme algoritmaları şarj durumu belirlenmesi için kullanılan dolaylı şarj durumu kestirim yöntemlerindendir. Bu yöntemler, bataryanın ölçülen akım, gerilim, sıcaklık gibi girdilerini kullanarak batarya açık devre gerilimini tahmin eder ve batarya şarj durumu ile ilişkilendirir. Alınan her ölçümle beraber özyinelemeli olarak sistem kazancı güncellenerek tahmin hatası en aza indirilmeye çalışılır. Bu yöntemde bataryanın dinamik davranışını matematiksel denklemlerle ifade edebilmek için modelleme yöntemleri kullanılır [8].

Elektriksel eşdeğer devre modelleri, lityum tabanlı batarya hücrelerinin davranışını temsil etmek için kullanılan en yaygın modelleme yöntemlerindendir [9]. Model tabanlı filtre algoritmaları başlangıç şarj durumuna duyarlı değildir fakat yüksek başarımlı sonuçlar elde edebilmek için batarya modelinin dikkatli seçilmesi gereklidir [10].

Kalman Filtresine dayalı model tabanlı algoritmalar elektrikli araçlarda şarj durumu kestirimi için kullanılan yöntemlerdendir. Kalman filtresi doğrusal sistemlerde kullanıldığı için batarya şarj durumu kestirimi için uygun değildir. Fakat durum değişkenlerinin değişimiyle ilgilenen Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemi, düşük hata oranı ile şarj durumu kestirimi yapılabilir [11].

Genişletilmiş Kalman Filtresinin başarımı seçilen batarya modeline ve belirlenmiş sistem gürültüsü değerlerine bağlıdır. Başlangıçta yanlış gürültü değerleri

seçilmesinden kaynaklanan şarj durumu tahmininde dikkate değer hatalar görülebilir. Bundan dolayı Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemiyle süreç ve ölçüm gürültüsü özyinelemeli olarak güncellenerek şarj durumu tahmini başarımlı artırılır. UGKF yönteminin işlem adımları GKF yöntemi ile benzerdir. Bu yöntemde GKF ‘den farklı olarak her hesaplama döngüsünün sonunda süreç ve ölçüm gürültüleri de güncellenir [12].





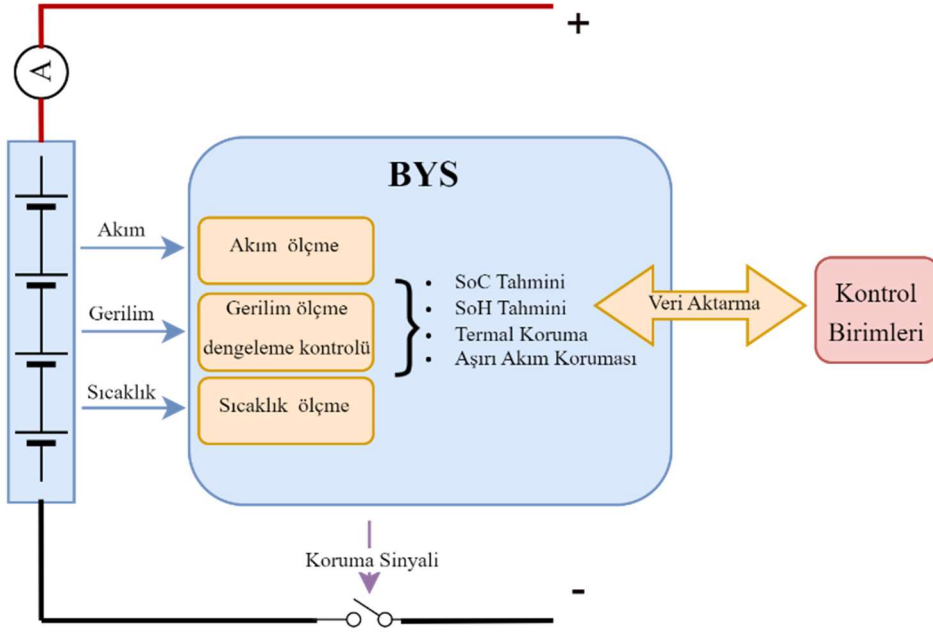
2. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ

Batarya paketlerinin optimum aralıklarda çalışması batarya ile çalışan sistemlerin verimliliği için önemlidir. Optimum çalışma aralığının sağlanması için batarya paketleri kontrol sistemine ihtiyaç duyarlar. Bu kontrol sistemi ise ilgili batarya paketinin kimyasına ve hücre sayısına bağlı olarak özgün bir tasarım gerektirir. Batarya paketlerinin elektriksel ve termal yönetimini sağlayan bu teknolojiye batarya yönetim sistemi (BYS) adı verilir. Bu sistem batarya karakteristiğine ve beklenen meziyetlere göre karışık bir sistem haline dönüşür [13].

Batarya teknolojisinin gelişmesi ve sürdürülebilir enerji gereksinimlerinin artmasıyla taşınabilir cihazlardan büyük ölçekli sistemlere kadar birçok alanda bataryalar kullanılmaya başlamıştır [14]. Batarya kullanımının paralelinde batarya yönetim sisteminin önemi de artmaktadır. Batarya yönetim sistemleriyle; bataryanın gerilim, akım, sıcaklık gibi değerleri gerçek zamanlı ölçülerek batarya kullanılabilir çevrim ömrünün korunması ve güvenlik problemlerinin önüne geçilmesi amaçlanır.

Günümüzde elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla yüksek güç yoğunluğuna sahip batarya paketlerinin kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Elektrikli araçların sürüşü sırasında bataryadan talep edilen akım profili sürekli değişiklik göstereceğinden dolayı batarya yönetim sistemleri batarya paketini izleyerek sürücüye ve diğer birimlere batarya hakkında bilgiler sağlar. Ayrıca batarya performansını optimize ederek elektrikli aracın sürüş menzilini artırır [15]. Bu sebeple elektrikli araç teknolojisinin gelişimi için batarya yönetim sistemi önemli bir bileşendir.

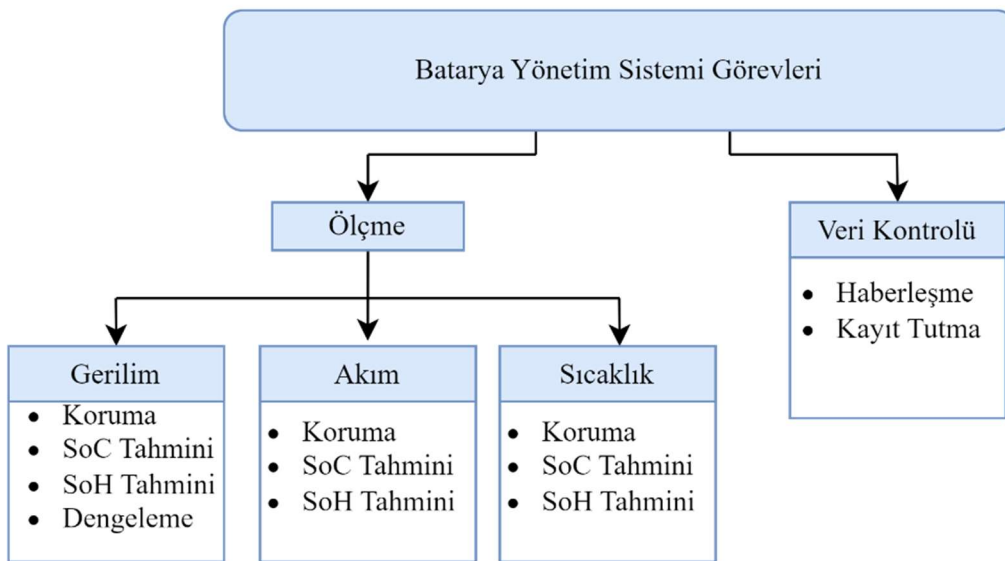
Batarya yönetim sistemleri gerilim, akım ve sıcaklık değerlerinin takip edilmesi için algılayıcılarla; güvenlik ve dengeleme gereksinimlerini sağlamak için elektrik devre elemanlarıyla; diğer birimler ile senkron çalışması için haberleşme sistemleriyle donatılır. Şekil 2.1’de örnek bir BYS blok şeması verilmiştir



Şekil 2.1 : BYS blok şeması

2.1 Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri

Algılayıcılar ve sensörlerle ölçülen gerilim, akım, sıcaklık değerleri batarya yönetim sisteminin girdileridir. Bu girdiler ile batarya koruma ve kestirim fonksiyonları gerçekleştirilir, elde edilen çıktılar diğer birimlere aktarılır. Şekil 2.2’de batarya yönetim sisteminin görevleri görülmektedir.



Şekil 2.2 : BYS görevleri

2.1.1 Gerilim ölçümü

Batarya yönetim sisteminin girdilerinden olan hücre gerilimlerinin yüksek doğrulukla ölçülmesi gerekir. Gerilim değeri batarya hakkında birçok bilgi verir. Gerilim değerini ölçmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden basitliği ve doğruluğu açısından tüm devreler ile ölçüm ön plana çıkmaktadır.

Batarya terminal gerilimiyle şarj durumu ve sağlık durumu elde edilir. Elde edilen şarj durumuna göre bataryanın aşırı şarj veya deşarj olması önlenerek bataryanın korunması sağlanır. Ayrıca aşırı şarj ve deşarj önlenerek bataryanın daha çok çevrim içinde ömrünü tamamlayarak yüksek performansla çalışması sağlanır. Bir diğer önemli nokta ise hücreler arası gerilim farkı ölçülerek hücrelerin dengeli bir şekilde çalıştırılması sağlanır.

2.1.1.1 Hücre dengelemesi

Batarya hücrelerinin seri veya paralel bağlanmasıyla istenilen seviyede akım ve gerilim değerlerinin sağlanması mümkündür. Fakat hücreler aynı üretim hattında üretilseler dahi kimyasal yapıları gereği birebir benzer olmaz. Batarya hücrelerinin üretiminden sonra paketlenme, depolanma veya muhafaza işlemlerinde maruz kaldığı çevresel koşullardan dolayı kimyasal yapılarında bozulma gerçekleşebilir. Bu kimyasal bozulma kapasite kaybına ve dahili parametrelerin değişimine sebep olur [16].

Lityum bataryalar üretildiği kimyasal yapıya göre farklı dahili parametre değerlerine sahip olmaktadır. Diğer kimyalara görece daha yüksek dahili direnç değerine sahip lityum demir fosfat kimyasında bozulmaya bağlı olarak dahili direncin artmasıyla önemli seviyede kapasite kaybı meydana gelir [17].

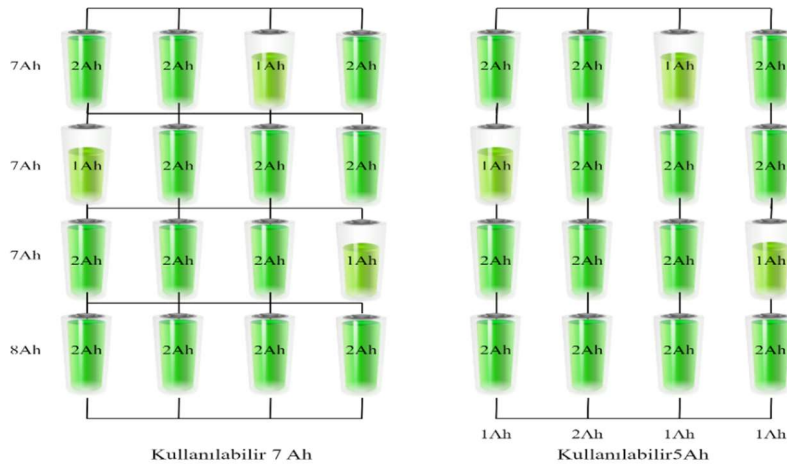
Bataryaların kimyasal yapılarındaki bozulmadan dolayı şarj ve deşarj esnasında aynı akım geçse dahi doluluk oranlarının farklılığından kaynaklı hücreler arası gerilim farkı oluşacaktır. Herhangi bir hücrede gerçekleşen gerilim değerinin farklılığı bulunduğu paketteki diğer seri hücreleri de etkiler. Şekil 2.3'te sırasıyla dengeli, düşük gerilimli hücreye sahip dengesiz ve yüksek gerilimli hücreye sahip dengesiz batarya paketleri görülmektedir.



Şekil 2.3 : Farklı denge durumuna sahip batarya paketleri

Düşük gerilimli hücreye sahip batarya paketinde; deşarj esnasında düşük gerilime sahip bataryanın kapasitesi tükendikten sonra diğer hücrelerde kullanılabilir kapasite olsa dahi bağlı olduğu devreye akım sağlayamayacak ve batarya paketinde kapasite kaybı yaşanacaktır.

Yüksek gerilimli hücreye sahip batarya paketinde ise şarj esnasında yüksek gerilime sahip batarya şarj olduktan sonra batarya paketi akım çekemeyeceği için diğer hücreler tam kapasitede şarj olamayacak ve batarya paketinde kapasite kaybı yaşanacaktır. Şekil 2.4'te denge durumunda iken aynı kapasiteye sahip batarya paketleri bulunmaktadır.



Şekil 2.4 : Batarya hücre bağlantısı topolojileri

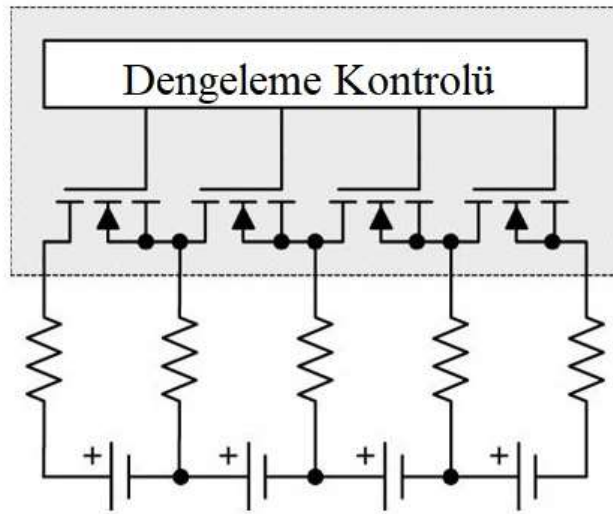
Bu iki batarya paketinde aynı hücrelerde meydana gelmiş dengesizlik bulunmaktadır. Bu durumun kullanılabilir kapasiteye etkisi bağlantı topolojisinden dolayı farklılık gösterecektir.

Şekil 2.4'te gösterilen ilk topolojide kapasite kaybına neden olan hücrenin batarya paketine etkisi, paralel bağlı olduğu diğer hücreler tarafından kompanize edilir ve toplam kapasitede daha az kayıp olur. İkinci topolojide ise seri kolda meydana gelen kapasite kaybı tüm hücreleri etkileyeceği için daha fazla kullanılabilir kapasite kaybı oluşur.

Batarya paketlerinin performansı, pakette bulunan en düşük kapasiteli hücre tarafından sınırlandırılır. En zayıf hücre tükendiğinde, bataryanın sağlayacağı kapasitede tükenir. Batarya yönetim sistemleri batarya paketinin performansını artırmak için pasif veya aktif hücre dengeleme yöntemleriyle hücreler arası dengesizlik problemine çözüm sağlar.

Pasif dengeleme

Batarya paketlerinde bulunan hücreler kullanılmaya başladıkları ilk çevrimlerde denge bakımından iyi bir duruma sahip olabilirler. Zamanla şarj-deşarj döngüleri, yüksek sıcaklık ve genel yaşlanma nedeniyle hücreler arası denge uyumu bozulur. Zayıf batarya hücresi, daha yüksek kapasiteli hücrelerden daha hızlı şarj vedeşarj olur. Bu sebeple dengesiz hücreler batarya paketi için sınırlayıcı faktör haline gelir. Şekil 2.5'te pasif dengeleme bağlantıları görülmektedir.



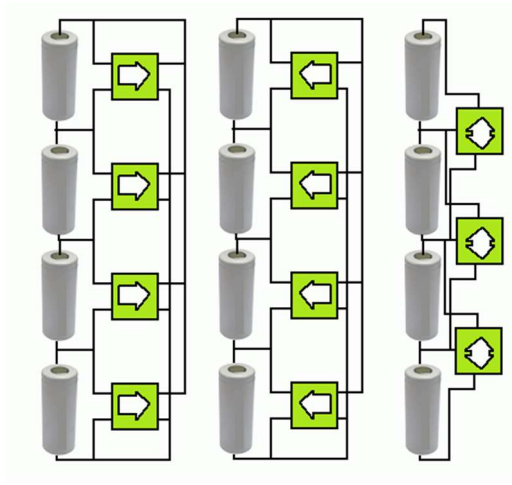
Şekil 2.5 : Pasif dengeleme bağlantı şeması

Pasif dengeleme, paketin her hücresinin, pakette bulunan en zayıf hücreyle aynı kapasiteye gelmesini sağlar. Bundan dolayı bataryanın çalışma süresini iyileştirmez. Bu yöntem sadece şarj esnasında uygulanır, deşarj esnasında uygulanmaz. Şarj durumu yüksek olan her bir hücrenin düşük bir akım ile yükten bağımsız olarak deşarjı sağlanarak hücreler arası şarj durumu eşitlenir. Bu işlem, şarj durumu yüksek olan hücrelerin bağlı olduğu anahtarların kontrolüyle başlatılır. Anahtarın iletme geçmesiyle bağlı olduğu hücrenin fazla kapasitesi direnç üzerinde ısı enerjisine dönüştürülür. Böylece pakette bulunan bütün hücreler aynı şarj durumuna getirilerek bataryanın tam kapasiteye kadar şarj olması sağlanır.

Düşük maliyeti ve kolay kontrol edilmesinden dolayı birçok batarya yönetim sisteminde kullanılmaktadır. Fakat şarj durumunu eşitlemek için direnç üzerinde enerji kaybına neden olur. Ayrıca ısı çıkışına sebep olduğu için termal açıdan dikkatli bir şekilde takip edilmesi gerekir [18].

Aktif dengeleme

Aktif dengeleme, batarya sisteminin genel sağlığını ve ömrünü korumak için batarya paketindeki her bir hücrenin eşit şekilde şarj ve deşarj edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Aktif dengeleme sisteminde, batarya paketinde her bir hücre batarya yönetim sistemi tarafından izlenir ve herhangi bir hücrenin fazla veya eksik şarj olduğu tespit edilirse; tüm hücrelerin doluluk oranları eşitlenene kadar yüksek doluluk oranına sahip hücrelerden düşük doluluk oranına sahip hücrelere şarj aktarır. Şekil 2.6'da sırasıyla hücreden pakete, paketten hücreye ve hücreden hücreye aktif dengeleme bağlantıları görülmektedir.



Şekil 2.6 : Aktif dengeleme bağlantı şeması

Aktif hücre dengeleme tekniklerinde şarj aktarımı için kapasitörler, endüktanslar veya DA/DA dönüştürücüler kullanılır.

Hücreden hücreye dengeleme için kapasitörler kullanılır. Kapasitörler başlangıçta şarj olması için anahtarlar ile en yüksek kapasiteye bağlı hücreye paralel bağlanır. Şarj durumu düşük olan bir hücre olması durumunda ise daha önceden depolanan enerji kapasitörler ile düşük kapasiteli hücreye aktarılır. Bu yöntemin dezavantajı ise dengeleme süresinin nispeten uzun olması, şarjın sadece komşu hücreler arasında aktarılması, kapasitenin şarj-deşarj kayıpları ve anahtarlardan kaynaklı kayıplar olarak sıralanır.

Hücreden pakete dengelemede, enerji paketdeki en yüksek şarj durumuna sahip hücreden çekilir ve geri kalan hücreler arasında eşit olarak dağıtılır.

Paketten hücreye dengelemede ise enerji aktarımı batarya paketinden şarj durumu en düşük olan hücreye aktarılarak gerçekleşir. Hem hücreden pakete hem de paketten hücreye verimlilik, hücreden hücreye dengelemeye göre daha düşük ve karmaşıktır [19].

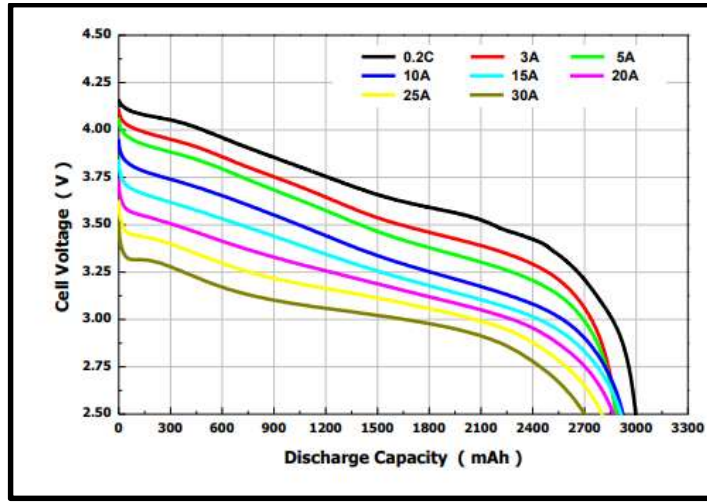
2.1.2 Akım ölçümü

Bataryaların sağlayabileceği maksimum akım değeri karakteristiği ile alakalıdır. Üreticiler tarafından bu değerler bataryaların veri sayfalarında kullanıcılara sunulmaktadır. Bu değerler dışındaki akım değerleri güvenlik problemlerine veya çevrim sayısında kayıplara neden olur. Batarya yönetim sistemleriyle aşırı akım ve kısa devre durumlarına karşı yazılımsal ve donanımsal önlemler geliştirilerek batarya paket akımının çalışma aralığında kalması sağlanır. Bunun yanında batarya akım değeri, şarj durumu ve sağlık durumu kestiriminde kullanılan girdilerdendir. Akım değeri yönlü olarak algılayıcılar veya seri bir direnç ile ölçülür.

2.1.2.1 C -Oranı

C oranı, batarya yüklüken çalışma süresini hesaplamak için kullanılan birimdir. Bataryaların şarj vedeşarj akımı üreticiler tarafından C-oranı ile belirtilir [20].

Şekil 2.7’de verilendeşarj eğrisinde çekilen akım değerine göre lityum tabanlı bir hücrenin gerilim ve şarj durumu değeri görülmektedir. Çekilen akım değeri arttıkça hücrenin kapasitesinde kayıp gözlenir.



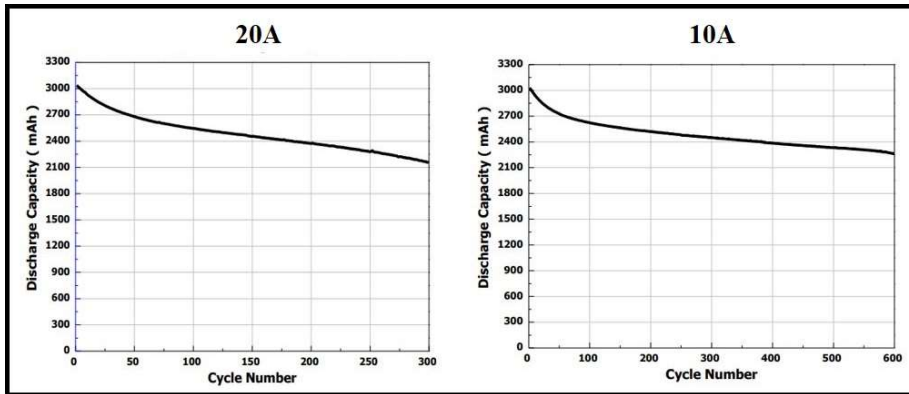
Şekil 2.7 : Farklı akım değerlerine göre deşarj eğrisi [21].

Şekil 2.8’de ise artan akım değerine göre kullanılabilir kapasite oranı gösterilmektedir. Akım değeri arttıkça kullanılabilir kapasite ve enerjinin azaldığı görülmektedir.

	0.2C	3A	5A	10A	5A	20A	25A	30A
Capacity (mAh)	2998	2886	2884	2925	2913	2873	2802	2702
% C_N	100	96	96	98	97	96	93	90
Energy (Wh)	11.0	10.3	10.1	9.8	9.5	9.2	8.7	8.2
% W_N	102	95	94	91	88	85	81	76

Şekil 2.8 : Farklı akım değerlerine göre kullanılabilir kapasite değerleri [21]

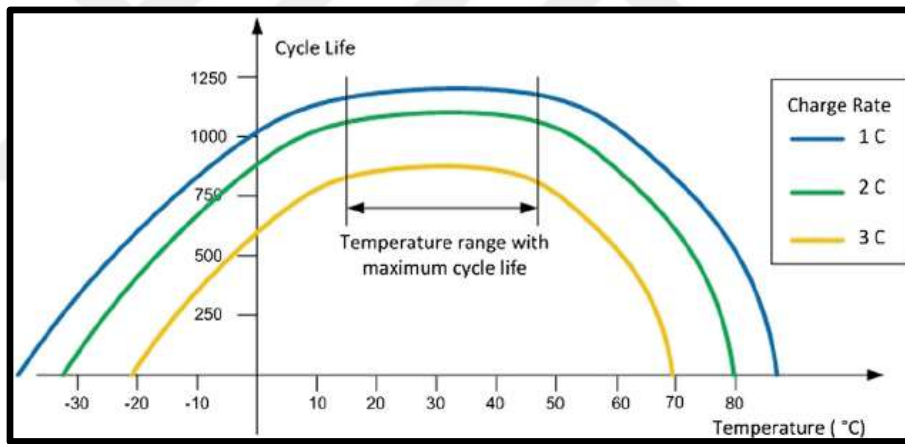
Şekil 2.9’da farklı akım değerlerine göre çevrim ömrü eğrileri bulunmaktadır. Çekilen akım değeri arttıkça bataryaların kullanılabilir çevrim sayıları azalır.



Şekil 2.9 : Farklı akım değerlerine göre çevrim ömrü eğrisi [21]

2.1.3 Sıcaklık ölçümü

Batarya hücrelerinin sıcaklığı, güvenli çalışma aralığında kalması için önemli parametrelerdendir. Batarya yüklenme akım değerine göre veya ortam şartlarına göre hücre sıcaklıklarında değişiklikler görülür. Bu sıcaklık değerlerinin güvenli çalışma aralığında kalması batarya yönetim sistemin görevlerinden biridir. Güvenli çalışma aralığının dışına çıkıldığı takdirde batarya yönetim sistemi bataryanın şarj veya deşarjını keserek tekrar çalışması için güvenli sıcaklık aralığına gelmesini bekler. Ayrıca sıcaklık değişimi ile ters orantılı olarak hücrelerin dâhili direnç değeri değişir. Dâhili direncin artması ve azalması da bataryanın çevrim sayısını etkileyen bir etkidir. Sıcaklığa bağlı olarak dâhili direnç değerinin değişmesi ile oluşan terminal gerilimindeki değişim bataryanın şarj ve sağlık durumunu etkiler. Bundan dolayı hücre sıcaklık değeri akım ve gerilim değeri gibi gerçek zamanlı olarak batarya yönetim sistemi fonksiyonlarında değerlendirilir. Şekil 2.10'da sıcaklığın çevrim ömrüne etkisi görülmektedir.



Şekil 2.10 : Farklı sıcaklık değerlerine göre çevrim ömrü eğrisi [22]

2.1.4 Veri kontrolü

Hücrelerden sağlanan her bir girdi, batarya yönetim sistemi tarafından fonksiyonlarda değerlendirildikten sonra elde edilen çıktılara göre bataryanın güvenli aralıklarda çalışması sağlanır. Herhangi bir arıza durumunda ise batarya yönetim sistemi tarafından bataryanın yükten kesilmesi ve arıza durumunun diğer birimlere bildirilmesi sağlanır. Ayrıca elde edilen çıktılar indikatör aracılığıyla kullanıcıya ya da bir haberleşme protokolüyle diğer birimlere aktarımı gerçekleştirilerek, bataryalı sistemin diğer birimlerle senkron çalışması sağlanır. Batarya yönetim sisteminde kullanılan haberleşme protokolü batarya yönetim sisteminin topolojisine, kullanılan

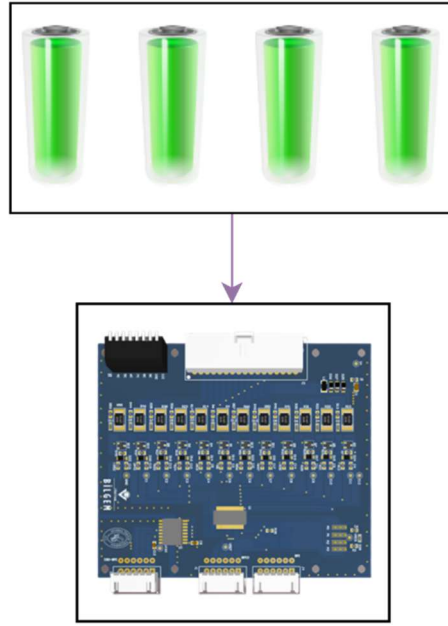
tüm devre veya haberleşeceği diğer birimlerin isterlerine göre değişiklik gösterebilir. Batarya yönetim sistemi tüm devrelerinde genellikle SPI, I2C, CANbus, RS485 seri haberleşme protokolleri kullanılır [23].

2.2 Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri

Batarya yönetim sistem topolojisi, sistemin işleyişini yöneten bileşenlerin mimarisidir. Batarya yönetim sistemleri, topolojilerine göre üç kategoriye ayrılır [24].

2.2.1 Merkezi batarya yönetim sistemi

Merkezi batarya yönetim sistemi batarya paketinde bulunan hücrelerin tamamının tek bir noktadan kontrol edildiği topolojidir. Şekil 2.11’de merkezi topoloji bağlantıları görülmektedir.



Şekil 2.11 : Merkezi BYS yapısı

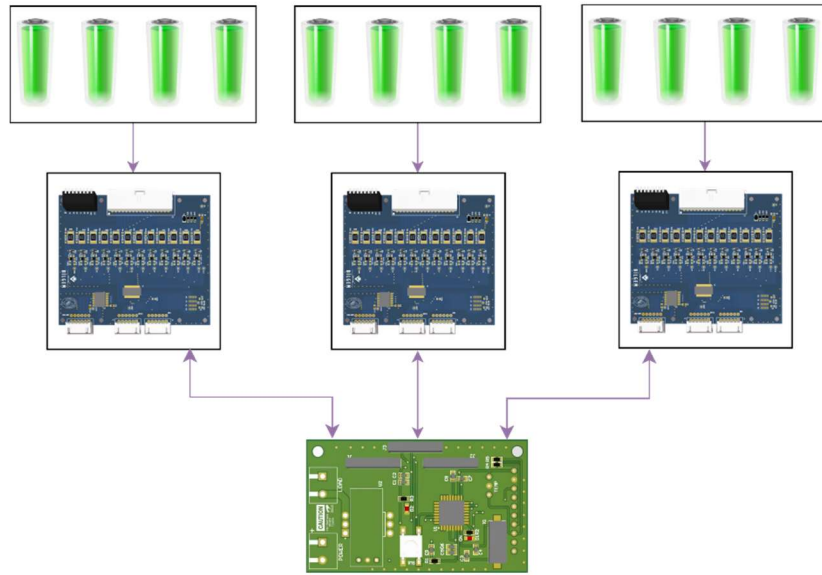
Batarya hücre gerilim, akım ve sıcaklığının ölçülmesi için kullanılan tüm devreler ve algılayıcıların hepsi aynı elektronik kartta bulunur. Ölçülen parametrelerin anlamlandırılması, iletilmesi ve fonksiyonların uygulanması aynı kartta gerçekleştirilmektedir.

Bu topolojide tek bir kart kullanılmasından dolayı kompakt ve ekonomiktir. Fakat bütün hücre ölçümleri aynı kartta toplandığı için çok sayıda bağlantı noktası,

kablolama gerekir. Hücre sayısı fazla olan batarya paketleri için kurulum ve bakım onarım faaliyetlerinde mekanik olarak dezavantaja sahiptir [25].

2.2.2 Modüler batarya yönetim sistemi

Literatürde yıldız topolojisi olarak da bilinen modüler batarya yönetim sistemi pakette bulunan batarya hücrelerinin farklı elektronik kartlar tarafından takip edildiği mimaridir. Bu yöntem birden fazla merkezi batarya yönetim sisteminin birleşmesinden oluşmaktadır. Bir yönetici ve an az bir adet yardımcı karttan oluşan bu sistemde toplamda en az iki elektronik kart bulunur. Yardımcı kartlar tarafından elde edilen gerilim, sıcaklık, akım değerleri yönetici kartında toplanır. Ölçülen değerlerin anlamlandırılması yönetici kartında gerçekleşir. Dengeleme işlemi yardımcı kartlarda gerçekleştirilir fakat dengeleme için anahtar sinyallerinin açılmasına yönetici kart karar verir. Şekil 2.12’de modüler topoloji bağlantıları görülmektedir.



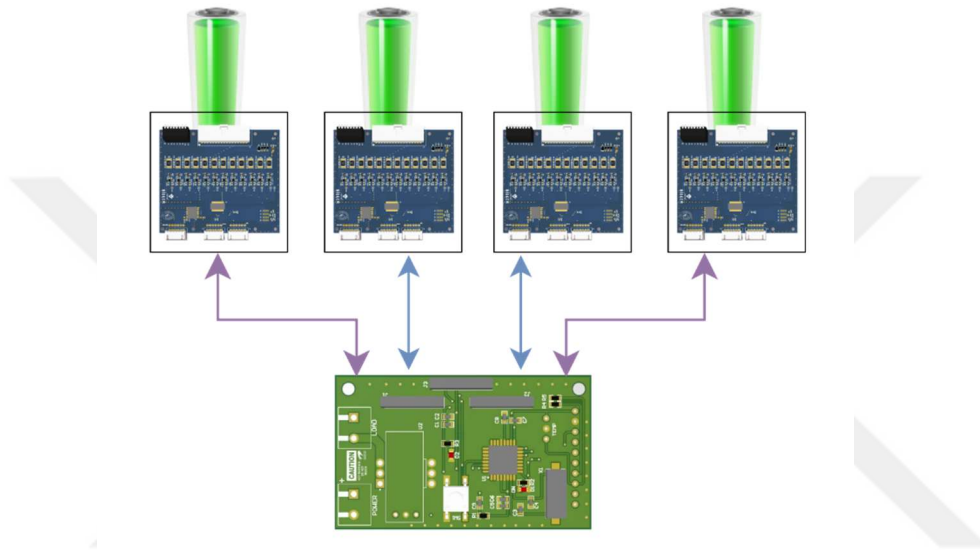
Şekil 2.12 : Modüler BYS Yapısı

Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken nokta; hücreler arası kısa devre meydana gelmemesi için haberleşme hatlarının referansların izole edilmesidir. İzole etme işlemi transformatörler, dijital izolatörler, kablosuz haberleşme gibi elektronik çözümlerle sağlanır.

Batarya hücrelerinin farklı kartlarda izlenmesinden dolayı nispeten daha basit kartlara sahiptir. Merkezi yönetim sistemlerine göre daha basit kablolama ve konektörlerle hücre geçişleri sağlanır. Fakat kart sayısının fazla olmasından dolayı ekonomik olarak dezavantaja sahiptir [24].

2.2.3 Dağıtılmış batarya yönetim sistemi

Dağıtılmış batarya yönetim sistemi diğer yöntemlere göre doğruluğu daha yüksek olan bir sistemdir. Bu yöntemde pakette bulunan seri hücre sayısında yardımcı elektronik kart ve bir tane yönetici kart kullanılır. Her bir hücrenin gerilim, sıcaklık değerinin izlenmesi ve dengelenmesi yardımcı kartlarda gerçekleştirilir. Elde edilen ölçüm değerleri merkez karta aktarılır. Şekil 2.13'te dağıtılmış topoloji bağlantıları görülmektedir.

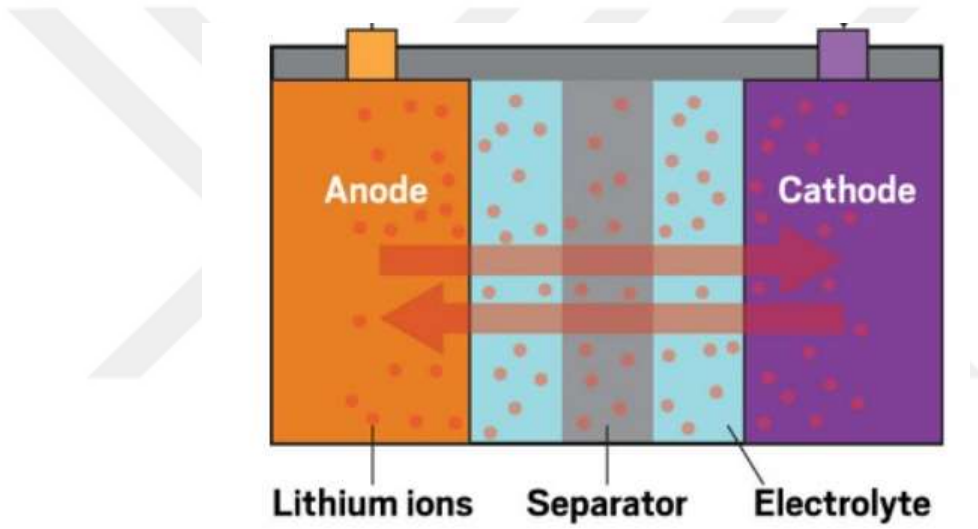


Şekil 2.13 : Dağıtılmış BYS Yapısı

Her kart birbirinden bağımsız olduğu için sinyal girişimleri daha azdır. Her bir hücre arasında haberleşme hatlarının referanslarının izole edilmesi gerekir. Basit yapıda yardımcı elektronik kartlardan oluşan bu topoloji hata oranı kritik olan sistemlerde tercih edilir. Elektronik kartların küçük olmasından dolayı konumlandırılması basittir. Fakat çok sayıda kart olmasından dolayı maliyetlidir [24].

3. BATARYA MODELLEME ve PARAMETRE KESTRİMİ

Lityum tabanlı bataryalar için modelleme; bataryaların farklı çalışma koşulları altında davranışını tanımlayan matematiksel eşitlikler geliştirme sürecini ifade eder. Modelleme elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve enerji depolama sistemleri gibi çeşitli uygulamalarda lityum iyon bataryaların performansını tahmin etmek ve optimize etmek için önemli bir araçtır [26]. Şekil 3.1’de lityum iyon bataryanın kimyasal yapısı görülmektedir.



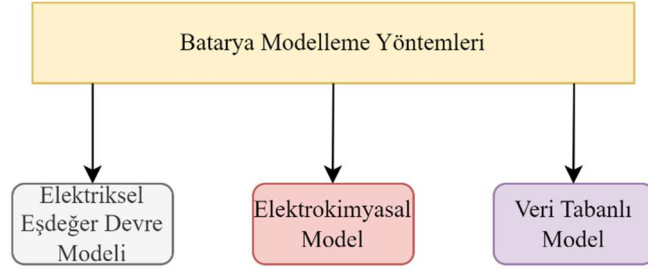
Şekil 3.1 : Lityum iyon batarya hücresinin kimyasal yapısı

Batarya modellemede kullanılan parametreler bataryanın kapasitesini, iç direncini, açık devre gerilimini ve şarj-deşarj eşitliklerini içerir. Bu parametreler deneysel olarak veya üretici dokümanlarından elde edilir. Model geliştirildikten sonra farklı sıcaklık ve akım değeri altında bataryanın davranışını ve durum değişkenlerini tahmin etmek için kullanılır. Batarya yönetim sistemi tarafından ölçülen akım, gerilim ve sıcaklık değerleri, kullanılan batarya modeline göre elde edilen fonksiyonlarda değerlendirilir.

3.1 Batarya Modelleme Yaklaşımları ve Karşılaştırılması

Enerji yoğunluğu gibi birçok avantaja sahip olan lityum tabanlı bataryaların dezavantajı kimyasal yapısının getirmiş olduğu doğrusal olmayan çalışma şeklidir. Lityum iyon bataryalarda şarj vedeşarj esnasında karmaşık kimyasal reaksiyonlar

gerçekleşir. Ayrıca çevre koşulları kimyasal reaksiyonları etkiler. Bundan dolayı doğrusal olmayan dinamik batarya sistemlerinde düşük hata oranı ile durum tahmini yapmak için literatürde birden çok modelleme yaklaşımı bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan batarya model yaklaşımları; eşdeğer devre modeli, elektrokimyasal model ve veri tabanlı modeller olarak sıralanabilir [27]. Şekil 3.2’de batarya modelleme yöntemleri görülmektedir.



Şekil 3.2 : Lityum iyon batarya modelleri

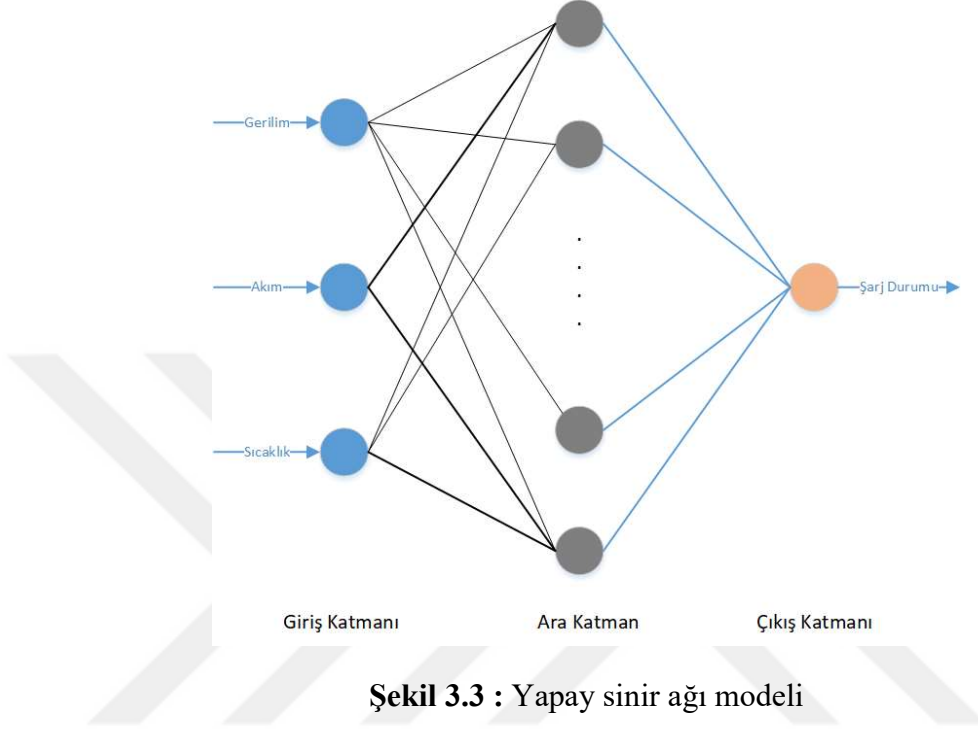
Uygulamalarda kullanılan batarya modellerinin uygulanabilirlik ve işlem performans açısından birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Batarya yönetim sisteminde kullanılan model; farklı akım, gerilim ve sıcaklık profilinde bataryanın davranışını, şarj durumunu, sağlık durumunu doğru bir şekilde tahmin etmelidir. Fakat tahmin adımları gerçekleştirilirken işlem performansı açısından basit olmalıdır. Batarya durum tahmini yapılırken birçok parametrenin izlenmesi ve çevre koşullarının doğrudan etkili olmasından dolayı karmaşık bir model verimlilik açısından pratik olmaz.

3.1.1 Elektrokimyasal modeller

Elektrokimyasal modeller şarj-deşarj esnasında bataryanın içinde meydana gelen kimyasal reaksiyonları tanımlar. Bu yöntem termodinamiğin ve kinetiğin temel ilkelerine dayanır. Elektrokimyasal batarya modeli tipik olarak, bataryanın içindeki iyonlar ve elektronlar gibi yük taşıyıcıların taşınmasını tanımlayan bir dizi birleştirilmiş diferansiyel denklemlerden oluşur. Elektrokimyasal batarya modeli bataryanın davranışı hakkında yüksek doğruluk sağlar. Fakat hesaplama açısından yoğun ve uygulanması karmaşıktır. Ayrıca batarya hücrelerinin deneysel olarak ölçülmesi zor olan elektrokimyasal özellikleri ve parametreleri hakkında bilgi gerektirir [28].

3.1.2 Veri tabanlı modeller

Veri tabanlı modeller, paralel ve karmaşık işlemlerin çözümü için matematiksel algoritmalar kullanır. Bu algoritmalar ile birçok karmaşık parametreler arasındaki ilişkinin çözümü gerçekleştirilir. Şekil 3.3'te yapay sinir ağı yapısı görülmektedir.



Sinir ağı metodu doğrusal olmayan sistemlerin çözümü için kullanılan yenilikçi metotlarından birisidir. Sinir ağı üç katmandan oluşmaktadır. Birinci katman giriş katmanıdır. Batarya yönetim sistemi ile ölçülen girdilerden oluşur. Ara katman ise matematiksel denklemler gerçekleştirilerek, verilerin anlamlandırıldığı kısımdır. Ara katman sayısı sistemin karmaşıklığına bağlıdır. Çıkış katmanı ise durum değişkenlerinin elde edildiği kısımdır. Bu metot ile yüksek doğrulukla durum değişkenleri elde edilmektedir. Fakat bu yöntemin başarımı için çok sayıda şarj ve deşarj verisiyle desteklenmesi gerekir. Ayrıca aynı etikete sahip olmasına rağmen bataryalar muhafazasına veya yaşlanmasına göre kimyasal yapısında oluşacak değişikliklerden dolayı farklı karakteristik gösterebilmektedir. Belirsizlik durumları da göz önünde bulundurulduğunda minimum kestirim hatası için sistem birçok veri ile öğretilmelidir [29].

3.1.3 Elektriksel eşdeğer devre modelleri

Batarya elektriksel eşdeğer devre modeli, bataryanın elektriksel davranışını temsil eden basitleştirilmiş bir modeldir. Eşdeğer devre modeli batarya ile benzer şekilde

davranan elemanların oluşturduğu toplu devre elemanları ilkesine dayanmaktadır. Bataryanın farklı bileşenlerini temsil etmek için devre elemanları olarak direnç, kapasite ve gerilim kaynağı kullanılır. Bu model batarya yönetim sistemlerinin kestirim fonksiyonlarında ve batarya hücrelerinin karakterizasyonunda kullanılmaktadır [30].

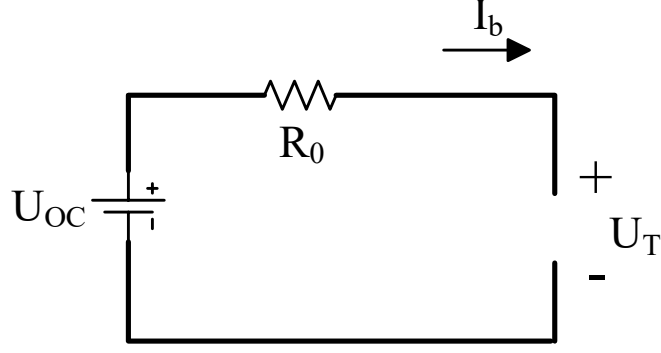
Elektriksel eşdeğer devre modeli üç ana bileşenden oluşur. Bu bileşenler seri direnç, RC ağı ve gerilim kaynağıdır. Seri direnç, elektrotların direnci nedeniyle bataryanın içinde akım akışına karşı koyan direnci temsil eder. RC ağı bataryanın geçici durum davranışını temsil eder ve eşdeğer devrede paralel bir direnç ve kapasite ile gösterilir. Gerilim kaynağı ise bataryanın açık devre gerilimini temsil eder.

Eşdeğer devre modeli sıcaklık ve yaşlanmanın etkileri gibi bataryanın ideal olmayan davranışını temsil etmek için ek öğeler eklenerek geliştirilebilir. Bu ek elemanlar; gerilim kaynağı, akım kaynağı diyot, direnç veya kapasite olabilir.

Batarya elektriksel eşdeğer devre modelleri basit ve kolay uygulanabilmesiyle öne çıkmaktadır. Modeller daha büyük batarya sistemlerine kolayca ölçeklendirilebilir ve farklı kimyaya sahip bataryalar içinde kullanılabilir. Fakat elektriksel eşdeğer devre modelleriyle benzetimde bazı sınırlamalar vardır. Model bataryanın davranışıyla ilgili basitleştirmelere, varsayımlara dayanmasından dolayı bataryanın davranışını her koşulda doğru şekilde temsil edemeyebilir. Kısa devre gibi aşırı koşullar altında bataryanın davranışını tahmin etmek için uygun değildir.

3.1.3.1 Seri direnç modeli

Seri direnç modeli, gerilim kaynağı ve dirençten oluşan batarya modelidir. U_{OC} batarya açık devre gerilimi, U_T terminal gerilimidir. R_0 ise bataryanın iç direncidir. R_0 direnci, bataryanın ısınma ile kaybettiği enerjiyi temsil etmektedir. Şekil 3.4'te seri direnç eşdeğer devre modeli görülmektedir.



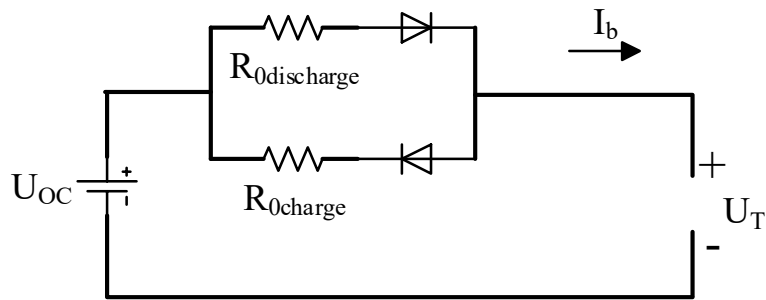
Şekil 3.4 : Seri direnç modeli

$$U_T = U_{OC} - (R_0 I_b) \quad (3.1)$$

Bu modelde R_0 direnç değeri sabittir. Terminal gerilimi 3.1 denklemindeki gibidir. Bataryanın dinamik karakteristiği ihmal edildiği için durum hesapları için yetersizdir [31].

3.1.3.2 Sıfırıncı dereceden Thevenin modeli

Seri direnç modeline benzeyen bir modeldir. Fakat bu modelde batarya iç direnci ve açık devre gerilimi şarj durumunun bir fonksiyonudur. Batarya şarj ve deşarj eğrilerinin farklı karakteristik göstermesinden dolayı R_0 direnç değeri şarj ve deşarj durumunda farklılık gösterir. Şekil 3.5'te sıfırıncı dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli görülmektedir.



Şekil 3.5 : Sıfırıncı dereceden Thevenin modeli

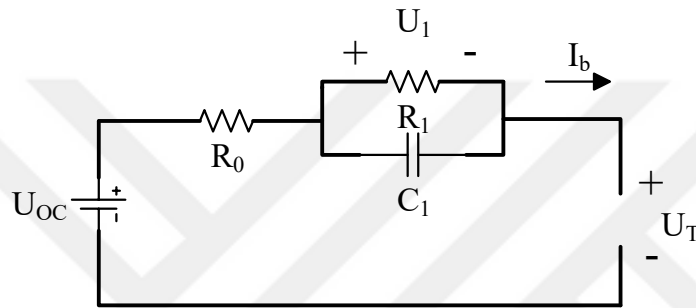
Terminal gerilimi hesabı şarj ve deşarj çalışma moduna göre aşağıdaki eşitliklerdeki gibi hesaplanır. Bu model bataryanın geçici davranışlarına cevap vermese de basit uygulamalarda seri direnç tabanlı modele göre daha başarılıdır. Terminal gerilimi 3.2 ve 3.3 denklemindeki gibidir [32].

$$U_T = U_{OC}(s) - (R_{0discharge}(s)I_b) \quad I_b > 0 \quad (3.2)$$

$$U_T = U_{OC}(s) + (R_{0charge}(s)I_b) \quad I_b < 0 \quad (3.3)$$

3.1.3.3 Birinci dereceden Thevenin modeli

Birinci dereceden Thevenin eşdeğer modelinde iç dirence seri, bataryanın dinamik davranışlarının sergileyen paralel RC ağı eklenir. Şekil 3.6'da birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli görülmektedir.



Şekil 3.6 : Birinci dereceden Thevenin Modeli

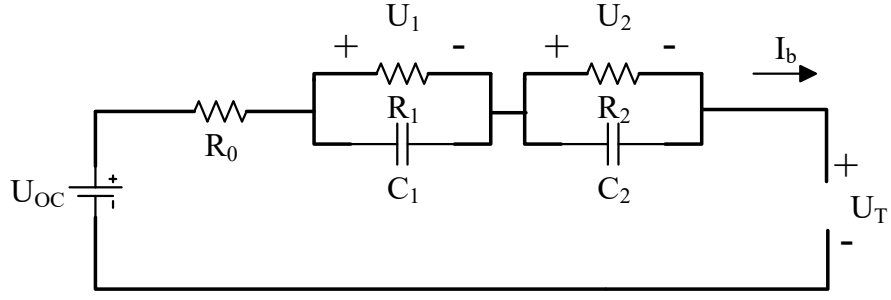
Thevenin eşdeğer devresi üç temel kısımdan oluşmaktadır; gerilim kaynağı U_{OC} , iç direnç R_0 , şarj ve deşarj anında geçici cevapları oluşturan R_1 ve C_1 'dir. Bu modelde batarya akımının kesilmesinden sonra terminal gerilimi RC parametresinin zaman sabitinden dolayı açık devre gerilimine doğrudan eşitlenmez [33].

$$U_T = U_{OC}(s) - U_1(s) - (I_b R_0(s)) \quad (3.4)$$

Batarya terminal gerilimi 3.4 eşitliğindeki gibidir. Batarya iç direnci, açık devre gerilimi ve RC parametreleri şarj durumunun fonksiyonudur.

3.1.3.4 İkinci dereceden Thevenin modeli

Birinci dereceden eşdeğer devre modeline seri olarak RC ağı eklenerek elde edilir. Birinci dereceden eşdeğer devre modelinin cevap veremediği batarya geçici durum davranışları için geliştirilmiştir. Şekil 3.7'de ikinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli görülmektedir.



Şekil 3.7 : İkinci dereceden Thevenin modeli

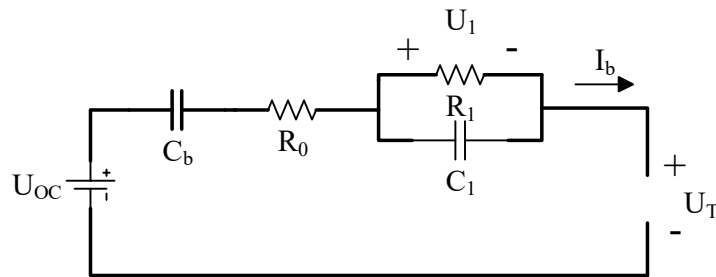
Batarya terminal gerilimi 3.5 eşitliğindeki gibidir. Batarya iç direnci, açık devre gerilimi ve RC parametreleri şarj durumunun fonksiyonudur. Batarya davranışlarının kestiriminde birinci dereceden eşdeğer devre modeline göre daha başarılıdır [33].

$$U_T = U_{OC}(s) - U_1(s) - U_2(s) - (I_b R_0(s)) \quad (3.5)$$

3.1.3.5 PNGV modeli

PNGV modeli, hibrit elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların performansını tahmin etmek için geliştirilmiş elektrikselsel bir modeldir. Model, araçların yakıt verimliliğini artırmak ve emisyonlarını azaltmak amacıyla ABD hükümeti ile otomotiv endüstrisi arasındaki bir ortaklığın sonucu olarak geliştirilmiştir [34].

PNGV eşdeğer devre modeli, U_{OC} açık devre gerilimi, R_0 iç direnci, RC ağı ve seri kapasite C_b 'den oluşur. Şekil 3.8'de PNGV eşdeğer devre modeli görülmektedir.



Şekil 3.8 : PNGV modeli

$$U_T = U_{OC}(s) - U_1(s) - U_b(s) - (I_b R_0(s)) \quad (3.6)$$

C_b kapasitörü batarya akımı kesildikten sonra açık devre geriliminin davranışını karakterize eder. Batarya terminal gerilimi 3.6 eşitliğindeki gibidir.

Çizelge 3.1’de bu bölümde bahsedilen batarya modellerinin avantaj ve dezavantajları görülmektedir.

Çizelge 3.1 : Batarya modellerinin karşılaştırılması

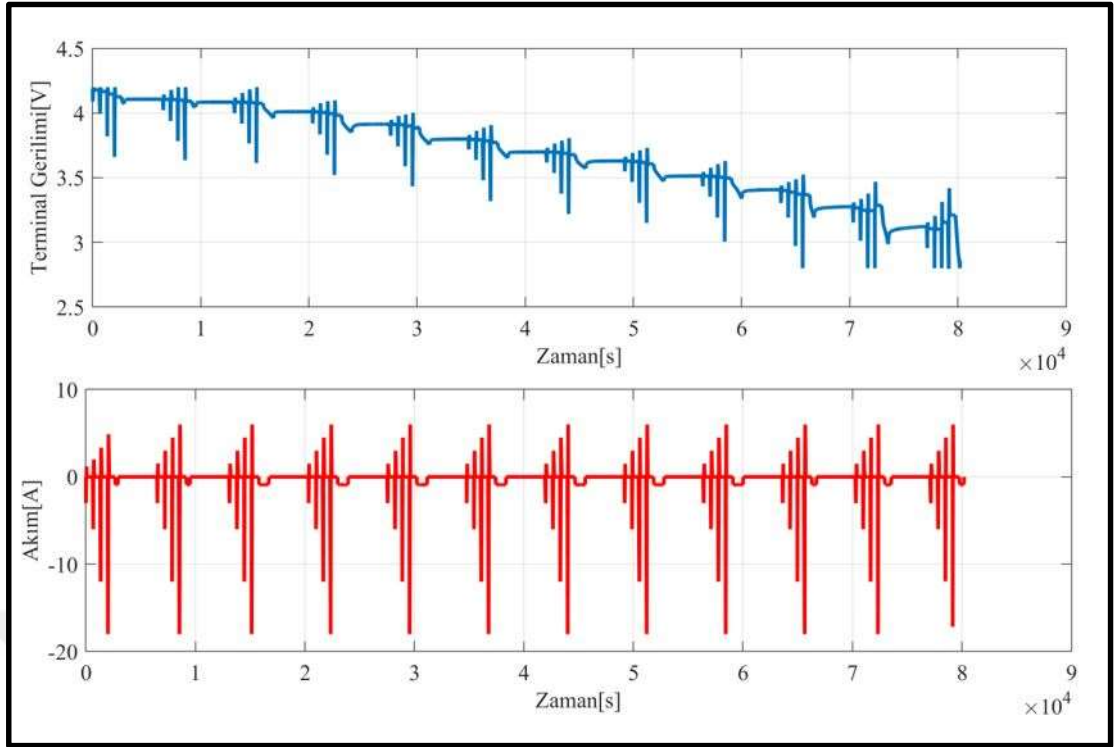
Batarya Modeli	Avantaj	Dezavantaj
Elektriksel Eşdeğer Devre Modeli (ECM)	Anlaşılabilirliği basittir.	Devre parametrelerinin hesaplanması karışık işlemler gerektirir.
Elektrokimyasal Model	Yüksek doğruluğa sahiptir.	Batarya kimyası hakkında ön bilgi gerekir.
Veri Tabanlı Model	Yüksek doğruluğa sahiptir.	Çok sayıda test verisi gerekir.

3.2 Parametre Kestirimi

Batarya şarj durumunun doğru kestirimi için batarya elektriksel eşdeğer devre modelinin parametrelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Batarya parametrelerinin belirlenmesi için batarya test verileri kullanılmaktadır.

3.2.1 HPPC testi

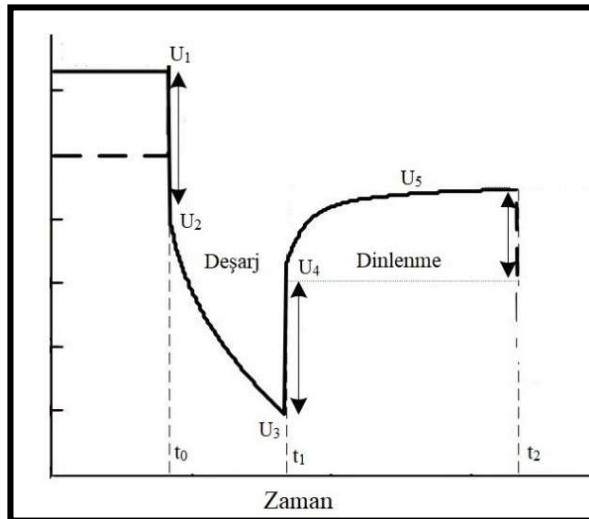
HPPC testi, batarya hücreleri farklı şarj durumunda iken farklı genliğe sahip pozitif ve negatif akım darbeleri uygulanmasıyla gerçekleştirilir [35]. Gerçekleştirilen test profiline göre HPPC testi ile batarya hücreleri farklı streslere maruz bırakılır. Test profilleri uygulanan akım darbelerinin büyüklüğüne, sayısına ve uygulanma sürelerine göre değişiklik gösterir. HPPC testi ile terminal geriliminin tepkisi gözlenerek elektriksel eşdeğer devre parametreleri elde edilir. Şekil 3.9’da bu çalışma kapsamında kullanılan batarya hücresinin HPPC testi akım ve gerilim profili görülmektedir.



Şekil 3.9 : HPPC testi gerilim ve akım profilleri

HPPC testinde batarya akımının kesilmesiyle elde edilen gerilim tepkisi Şekil 3.10'daki gibidir.

Şekil 3.10'daki grafikte, $t < t_0$ bataryanın belli bir süre dinlendirildiği yani çıkış akımının yeterli süre boyunca sıfır olarak kabul edildiği aralıktır.



Şekil 3.10 : Terminal gerilim tepkisi

$t_0 \leq t \leq t_1$ aralığında deşarj akımı sabittir ve sıfırdan büyüktür. Bu aralıkta R_0 nedeniyle batarya terminal gerilimi U_1 gerilim seviyesinden, U_2 gerilim seviyesine hızlıca düşer.

Fakat RC ağının şarj olmasından dolayı batarya terminal gerilimi U_2 gerilim seviyesinden, U_3 gerilim seviyesine eksponansiyel olarak daha yavaş düşer.

$t_1 \leq t \leq t_2$ aralığında ise batarya çıkış akımı sıfır olduğundan dolayı terminal gerilimi R_0 iç direncinin üzerine düşen gerilimin ortadan kalkmasıyla beraber hızlı bir şekilde U_3 gerilim seviyesinden U_4 gerilim seviyesine yükselir. Fakat şarj olmuş RC ağının deşarj olmasından dolayı terminal gerilimi U_4 gerilim seviyesinden, U_5 gerilim seviyesine eksponansiyel olarak daha yavaş yükselir. [33].

Thevenin elektriksel eşdeğer devre modeli için dahili direnç R_0 hesabı 3.7 eşitliğindeki gibidir. Eşitlikteki verilen gerilim değerler Şekil 3.10’da gösterilmiştir.

$$R_0 = \frac{(U_1 - U_2) + (U_4 - U_3)}{2I_b} \quad (3.7)$$

Bataryanın dinamik davranışına yaklaşmak için elektriksel eşdeğer devre modellerine eklenen RC ağının parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. RC ağının zaman sabiti eşitlik 3.8’de verilmiştir.

$$\tau = R_i C_i \quad (3.8)$$

RC ağının anlık gerilimi ise 3.9 eşitliğindeki gibi hesaplanır. Eşitlikteki $U_i(0)$ RC ağının başlangıç gerilimi, τ ise zaman sabitidir.

$$U_i(t) = U_i(0)e^{-t/\tau_i} + IR_i(1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (3.9)$$

Şekil 3.10’daki grafikte $t_1 \leq t \leq t_2$ dinlenme periyodunda RC ağının deşarj olmasından dolayı terminal geriliminde eksponansiyel artış görülmektedir. Terminal gerilimi 3.10 verilen eşitlikteki gibi hesaplanır.

$$U_T = U_{OC} - \sum_{i=0} U_i - \Delta I_b R_0 \quad (3.10)$$

RC ağının deşarjı ile terminal gerilimindeki değişim Şekil 3.10’da gösterilmiştir. U_4 - U_5 geriliminin eksponansiyel değişimi 3.11 eşitliğindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta U_{5-4} = U_i = \Delta I_b \sum_{i=0} R_i(1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (3.11)$$

RC parametre hesabı bütün şarj durumları için 3.10 ve 3.11 eşitlikleri uygulanarak hesaplanır [36].

3.3 SoC-OCV Matematiksel Eşitliği

Batarya terminal gerilimi batarya uçlarından doğrudan ölçülen gerilim değeridir. Açık devre gerilimi (OCV) ise şarj veya deşarj sonrası uzun süre dinlendirilmeye bırakılmış lityum iyon bataryaların uçlarından ölçülen gerilimdir. Batarya elektriksel eşdeğer devre model parametreleri şarj veya deşarj esnasında üzerinde gerilim tutacağından dolayı akım geçen lityum iyon bataryaların terminal gerilimleri, açık devre gerilimlerine eşit olmayacaktır. Fakat lityum iyon bataryaların şarj durumu ve açık devre gerilimi arasında doğrusal olmayan matematiksel ilişkisi vardır ve bataryanın kimyasına ve diğer faktörlere bağlı olarak değişir. Bu matematiksel ilişki anlık şarj durumu kestiriminde ve bataryanın genel sağlığını belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bundan dolayı açık devre gerilimi tespiti önemlidir [37].

Önceki bölümde SoC-OCV eğrisinin batarya akımına, batarya sıcaklığına veya bataryanın yaşlanmasına bağlı olarak farklılık gösterdiğinden bahsedilmiştir. Fakat şarj durumu- açık devre gerilim eğrisi genellikle üç bölgeye sahiptir.

İlk bölge "sabit gerilim" bölgesi olarak adlandırılan şarj veya deşarj döngüsünün başlangıcında meydana gelir. Bu bölgede, şarj durumu değişse bile batarya gerilimi nispeten sabit kalır.

İkinci bölge, şarj durumu değiştikçe batarya geriliminin daha hızlı artmaya veya azalmaya başladığı "eğim" bölgesidir. Bu bölge genellikle şarj veya deşarj döngüsünün ortasıdır.

Üçüncü bölge ise şarj veya deşarj döngüsünün sonunda meydana gelen "kesme" bölgesidir. Bu bölgede, şarj durumu maksimum veya minimum kapasitesine yaklaştıkça bataryanın gerilimi daha hızlı artar veya azalır. Lityum iyon bataryaların (SoC-OCV) ilişkisi deneysel ölçüm yöntemlerine dayanan birkaç farklı şekilde elde edilebilir.

Birinci yöntem HPPC test verilerinden yararlanılarak SoC-OCV ilişkisinin elde edilmesidir. Bu yöntemde batarya hücresi darbe akımına maruz bırakıldıktan sonra yeterince süre dinlendirilir ve terminal gerilimi ölçülür. Dinlenme periyodunun

sonunda ölçülen terminal gerilimi ilgili şarj durumunda, batarya hücresinin sahip olduğu açık devre gerilimini verir [38].

Gerilim	Akım	Şarj Durumu
4.147	-3	1
...	...	...
4.17315	0	0.99167
4.17315	0	0.99167
4.17315	0	0.99167
4.19625	1.09316	0.99169

Şekil 3.11 : Dinlendirilen batarya hücresinin terminal gerilim tepkisi [38]

Şekil 3.12’de yeterli süre dinlendirilen batarya hücresinin ilgili şarj durumundaki gerilim değeri gösterilmiştir. HPPC test prosedürüne göre %10 azalacak şekilde her şarj durumuna ait batarya terminal gerilim değerleri kaydedilir. Kaydedilen değerlerin oluşturduğu eğri ile SoC-OCV ilişkisi elde edilir. Böylelikle açık devre gerilimi şarj durumunun ait bir fonksiyon ile ifade edilebilir.

Literatürde SoC-OCV ilişkisini elde etmek için kullanılan diğer yöntem ise batarya hücresinin C/20 akım değeri ile deşarj edilerek anlık olarak terminal geriliminin ve şarj durumunun kaydedilmesidir. Bu yöntemde bataryanın deşarj akımı oldukça düşük olduğu için elektriksel eşdeğer devrede bulunan bileşenler üzerine düşen gerilim değerleri ihmal edilecek kadar düşüktür. Bundan dolayı ölçülen terminal gerilimi açık devre gerilimine eşit olacaktır [39]. Bu yöntemde %10 azalacak şekilde her şarj durumuna ait batarya terminal gerilim değerleri kaydedilir. Kaydedilen değerlere göre SoC-OCV matematiksel eşitliği elde edilir. SoC-OCV ilişkisi lityum iyon bataryalar için batarya yönetim sistemleri tasarlanırken gereken önemli bir eşitliktir. Yönetim sistemleri bu ilişkiyi birçok kestirim algoritmasında kullanır.

4. ŞARJ DURUMU KESTİRİMİ YÖNTEMLERİ

Batarya şarj durumu kestirimi; elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve taşınabilir elektronik cihazlar dâhil olmak üzere batarya içeren birçok uygulamada önemlidir. Şarj durumu, bataryanın anlık olarak sağlayacağı kapasitenin, anma kapasitesine oranı ile hesaplanır [40]. Bataryaların veri sayfalarında amper-saat (Ah) cinsinden anma kapasite değerleri belirtilir. 4.1 numaralı eşitlikte anlık kapasite değeri $Q(t)$, anma kapasite değeri ise C_n olarak tanımlanmaktadır.

$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{C_n} \quad (4.1)$$

Lityum iyon bataryaların şarj durumu doğrudan ölçülemeyen büyüklüktür. Ayrıca gerilim, akım ve sıcaklık gibi parametrelerle doğrusal olmayan bir ilişkiye sahip olduğu için lityum iyon bataryaların uygulanabilirliğinde zorluk yaratmaktadır. Kimyasal yapısının neden olduğu bu zorluk aşılmadığı sürece uygulamalarda batarya bozulmaları ve kapasite kayıpları kaçınılmazdır. Bataryalarda kalan kapasitenin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi bataryayı korur, aşırı deşarjı önler ve batarya ömrünün uzamasını sağlar. Bununla birlikte enerji ve güç tasarrufu sağlayarak akıllı kontrol stratejisinin oluşturulmasına olanak sağlar. Bundan dolayı şarj durumunun doğru kestirimi batarya yönetim sisteminin önemli bir çıktısıdır.

Yaygın olarak kullanılan şarj durumu kestirimi yöntemlerinden en çok bilinenleri; açık devre gerilimi yöntemi, yük sayma yöntemi, model tabanlı filtreleme algoritmaları olarak sıralanır. Ayrıca birkaç yöntemin birleştirilmesiyle şarj durumu kestiriminin doğruluğu artırılabilir[47].

4.1 Açık Devre Gerilimi Yöntemi

Açık devre gerilimi yöntemi, batarya paketinde bulunan hücre gerilimlerinin sürekli ölçülmesi ile gerçekleştirilir. Bu yöntemde bataryaların SoC -OCV matematiksel eşitliği kullanılarak şarj durumu kestirimi gerçekleştirilir. Fakat lityum iyon bataryaların terminal gerilimlerinden açık devre gerilimlerine doğrudan

ulaşılamamaktadır. Açık devre geriliminin, terminal geriliminden elde edilebilmesi için şarj ve deşarj sonrasında bataryanın yüksüz bir şekilde dinlendirilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı dinamik sistemlerde bu yöntemin kullanılması uygun değildir. Açık devre gerilimi yöntemi doğrudan ölçüm yöntemi olmasından dolayı ölçümde kullanılan akım ve gerilim sensörlerinin neden olduğu gürültülerden etkilenmektedir. Bundan dolayı basit bir yöntem olmasına rağmen kestirim doğruluğu düşük olduğu için dinamik sistemlerde tercih edilmemektedir [41].

4.2 Yük Sayma Yöntemi

Yük sayma yöntemi şarj durumu tahmini için literatürde kullanılan doğrudan kestirim yöntemlerindendir. Bu yöntem başlangıç şarj durumuna duyarlıdır. Başlangıç şarj durumu terminal geriliminin ölçümüyle SoC-OCV eşitliği kullanılarak gerilim tabanlı olarak elde edilir. Daha sonra batarya şarj ve deşarj akımları kümülatif olarak toplanarak şarj durumu hesaplanır. Bu yöntemde anlık şarj durumu SoC(t) 4.2 numaralı eşitlikteki gibi elde edilir. Yöntemin doğruluğu başlangıç şarj durumuna bağlıdır. Bu değer doğru tespit edilmediği takdirde şarj durumu kestiriminde hatalar meydana gelir. Batarya terminal geriliminin geçici durum davranışından dolayı dinamik sistemlerde başlangıç şarj durumunu tahmin etmek zordur [42].

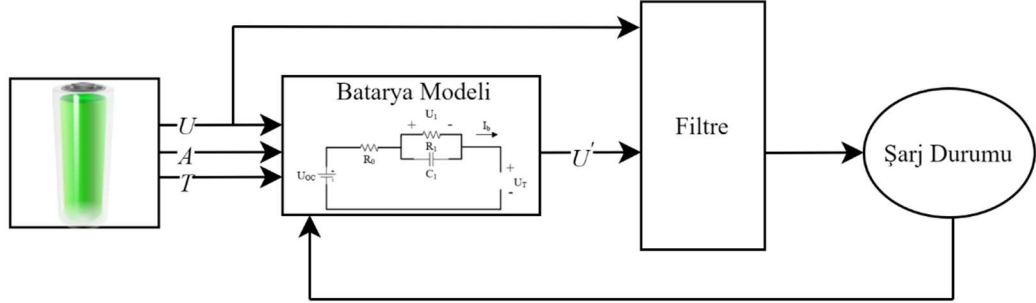
$$SoC(t) = SoC(t - 1) + \frac{1}{C_n} \int_0^t I_b(t) dt \quad (4.2)$$

Yük sayma yönteminin en önemli avantajı basit ve düşük maliyetli elektronik devre kartları kullanılarak uygulanabilmesidir. Fakat yük sayma yönteminin bazı sınırlamaları vardır. Bataryanın başlangıç değer tespitinin zorluğu, şarj-deşarj akımı ölçümü için kullanılan algılayıcı kaynaklı gürültüler, ortam koşulları, batarya yaşlanması ve parazitlik yükler nedeniyle yük sayma yöntemi şarj durumu kestiriminde yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlamalardan dolayı daha başarılı sonuç tahminleri için gerilim tabanlı yöntemler ve elektriksel eşdeğer devre modelleri ile kullanılmaktadır.

4.3 Kalman Filtresi

Kalman filtresi, geçmiş tahminler ve ölçüme dayalı olarak bir sistemin anlık ve gelecek durumunu tahmin etmek için kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan önemli bir

matematiksel algoritmadır. Kalman filtresi, hatalı ve belirsiz ölçümlere dayanarak durum değişkenlerin tahminlerini üretir [43]. Şekil 4.1’ de Kalman filtresi algoritması görülmektedir.



Şekil 4.1: Klasik Kalman filtresi şarj durumu kestirim diyagramı

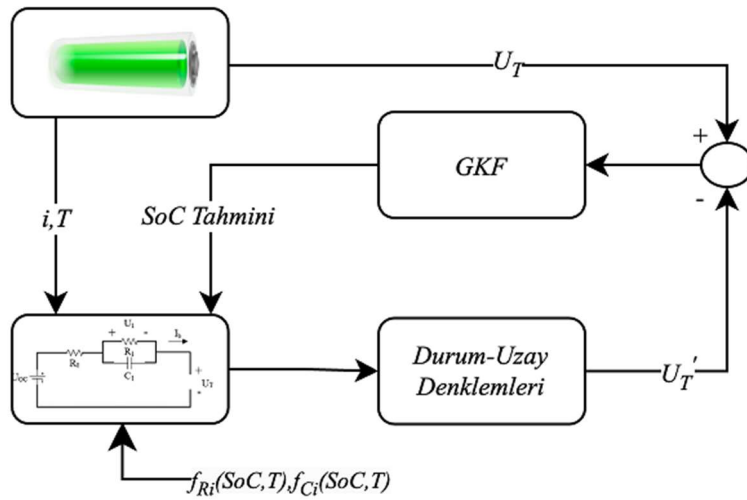
Batarya şarj durumu kestiriminde Kalman filtresi kullanılabilmesi için batarya davranışı bir önceki bölümde bahsedilen elektriksel eşdeğer devrelerden herhangi birisiyle modellenir. Bataryanın ölçülen akımı, gerilimi, sıcaklığı ve diğer değişkenleri bataryanın şarj durumu ile ilişkilendirilir. Bu ölçülebilir değerler modelin girdisi olarak kullanılırken, model çıkışındaki tahmin edilen terminal gerilimi ile terminal geriliminin gerçek değeri arasındaki hata hesaplanır. Ardından, durum değişkenlerinin gerçek değerini elde etmek için geri besleme kazancı ile hata çarpılır. Kalman filtresi doğrusal sistemlerde kullanılan bir hesaplama yöntemidir. Ancak lityum iyon batarya eşdeğer devre modelinde bulunan polarizasyon direnci ve polarizasyon kapasitesinin zamanla değişen bir karakteristik göstermesinden dolayı SoC-OCV ilişkisi doğrusal değildir. Kalman filtresinin batarya sistemlerinde uygulanabilmesi için durum değişkenlerinin değişimi ile ilgilenen Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanılmaktadır [44].

4.3.1 Genişletilmiş Kalman Filtresi

Genişletilmiş Kalman Filtresi sistemdeki durum değişkenlerini tahmin etmek ve ölçümlerden gelen belirsizlikleri azaltmak için kullanılan model tabanlı filtreleme algoritmasıdır. Klasik Kalman Filtresi gibi durum uzay denklemleri kullanılarak durum değişkenlerinin son değerleri hesaplanır. Fakat Klasik Kalman Filtresi doğrusal sistemlerde durum tahmini için kullanılmaktadır. Genişletilmiş Kalman Filtresi doğrusal olmayan sistemlerin durum tahmini için geliştirilmiştir. GKF yöntemiyle her hesaplama adımında doğrusal olmayan ölçüm ve durum modelleri Taylor serisi açılımı

kullanılarak doğrusal modellere yaklaştırılır [45]. Elde edilen doğrusalla yakın modellerle, örnekleme süresi içinde gerçekleştirilen ölçüm değerleri (akım, gerilim, sıcaklık) GKF algoritmasında işlenerek dinamik batarya sistemdeki bilinmeyen değişkenler tahmin edilir.

Literatürde batarya dinamik davranışının benzetiminde en sık kullanılan batarya modeli, ikinci dereceden Thevenin elektriksel eşdeğer devre modelidir [46]. Bu bölümde ayrık zamanlı ikinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli eşitlikleri GKF algoritmasında işlenerek durum değişkenleri elde edilmiştir. Şekil 4.2’de GKF yöntemiyle durum uzay modeline dayanan şarj durumu kestirim diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.2 : Durum uzay modeline dayanan şarj durumu kestirim diyagramı

Şekil 3.7’de gösterilen ikinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modelinde, açık devre gerilimi U_{OC} , terminal gerilimi U_T , iç direnç R_0 ve sırasıyla RC ağlarının üzerine düşen gerilimler U_1 ve U_2 olarak gösterilmektedir. Eşdeğer devre modelinin ayrık zamanlı eşitlikleri 4.3 numaralı denklemlerindeki gibidir.

$$SoC(k+1) = SoC(k) + \frac{\eta \Delta t I_b(k)}{C_n} \quad (4.3a)$$

$$U_t(k) = U_{OC}(k) - U_1(k) - U_2(k) - I_b(k)R_0(k) \quad (4.3b)$$

$$U_1(k+1) = U_1(k)e^{-\frac{t}{\tau_1}} + R_1(k)I_b(k)(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (4.3c)$$

$$U_2(k+1) = U_2(k)e^{-\frac{t}{\tau_2}} + R_2(k)I_b(k)(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (4.3d)$$

İkinci dereceden Thevenin eşdeğer elektriksel modeline göre elde edilen eşitliklerde k zaman adımındaki model girdisi $i(k)$ 'dir. t örnekleme zamanı, SoC şarj durumu, R_1, C_1, R_2 ve C_2 ise elektriksel eşdeğer devre parametreleridir. Ayrıca her k zaman adımında kullanılan açık devre gerilimi ve eşdeğer devre parametreleri şarj durumunun ve paket sıcaklığının bir fonksiyonudur.

$$U_{OC} = f_{U_{OC}}(SoC, T) \quad (4.4)$$

$$R_0 = f_{R_0}(SoC, T) \quad (4.5)$$

$$R_i = f_{R_i}(SoC, T) \quad (4.6)$$

$$C_i = f_{C_i}(SoC, T) \quad (4.7)$$

İkinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli durum uzay denklemleri 4.8 ve 4.9'da sırayla gösterilen süreç ve ölçüm fonksiyonlarında türetilir.

$$f(x_k, u_k) = \begin{bmatrix} SoC(k) + \frac{\eta \Delta t I_b(k)}{C_n} \\ V_1(k)e^{-\frac{t}{\tau_1}} + R_1 I_b(k)(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \\ V_2(k)e^{-\frac{t}{\tau_2}} + R_2 I_b(k)(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$g(x_k, u_k) = V_{OC}(k) - V_1(k) - V_2(k) - I_b(k)R_0 \quad (4.9)$$

Durum uzay denklemleri 4.10 ve 4.11 numaralı eşitliklerindeki gibidir [48].

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (4.10a)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k \quad (4.10b)$$

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (4.11a)$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \quad (4.11b)$$

k indisi denklem değişkenlerinin k zamanındaki, k+1 ise denklem değişkenlerinin k+1 zamanındaki değerlerini gösterir. Eşitliklerdeki x_k durum değişkeni $[SoC, U_1, U_2]^T$ matrisi, u_k sistem girdisi $i(k)$, y_k sistem çıktısı $U_T(k)$, w_k süreç gürültüsü, v_k ise ölçüm gürültüsüdür. GKF yönteminde doğrusal olmayan süreç ve ölçüm fonksiyonlarının doğrusallaştırması gerekir. Durum fonksiyonu ve ölçüm fonksiyonu Taylor serisi ile açılarak, ikinci ve daha yüksek dereceli terimler ihmal edilir. Yalnızca birinci derece kısmi türevlerden oluşan A_k, B_k, C_k, D_k Jacobian matrisleri aşağıdaki eşitliklerdeki gibi elde edilir [48].

$$\frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} = A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{t}{\tau_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{t}{\tau_2}} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial u_k} = B_k = \begin{bmatrix} -\frac{\eta \Delta t}{C_n} \\ R_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} = C_k = \begin{bmatrix} \frac{dV_{OC}}{dSoC} & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial u_k} = D_k = [-R_0] \quad (4.15)$$

Elde edilen matrislere göre ikinci dereceden Thevenin elektriksel eşdeğer devre modelinin durum uzay denklemlerinin açılımı 4.16 ve 4.17 numaralı eşitliklerdeki gibidir.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} SoC(k+1) \\ U_1(k+1) \\ U_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{t}{\tau_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{t}{\tau_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SoC(k) \\ U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} -\frac{\eta \Delta t}{C_n} \\ R_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \end{bmatrix} [I(k)] + \begin{bmatrix} w_{SoC} \\ w_{u1} \\ w_{u2} \end{bmatrix} \quad (4.16)
\end{aligned}$$

$$U_T(k) = \begin{bmatrix} \frac{dV_{oc}}{dSoC} & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SoC(k) \\ U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} + [-R_0][I(k)] + [v(k)] \quad (4.17)$$

Durum uzay eşitlikleri elde edildikten sonra GKF uygulaması için Kalman filtresinin beş eşitliği verilen sırayla izlenir [49].

1. Durum tahmin eşitliği;

$$x_{k+1,k} = Ax_{k,k} + Bu_k \quad (4.18)$$

2. Hata kovaryansı tahmin eşitliği;

$$P_{k+1,k} = AP_{k,k}A^T + Q_k \quad (4.19)$$

3. Kalman kazancı güncelleme eşitliği;

$$K_{k+1} = P_{k+1,k}C^T(CP_{k+1,k}C^T + R_{k+1})^{-1} \quad (4.20)$$

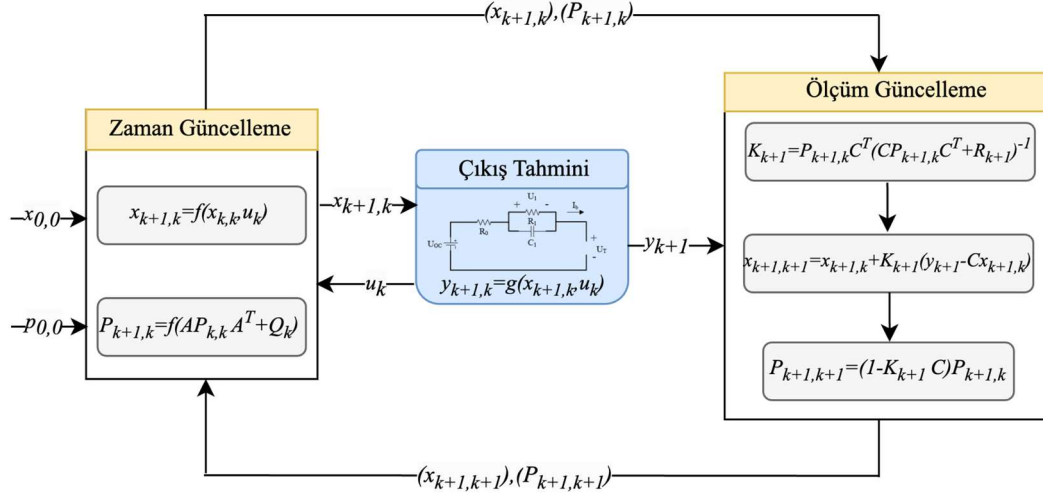
4. Durum ölçüm güncelleme eşitliği;

$$x_{k+1,k+1} = x_{k+1,k} + K_{k+1}(y_{k+1} - Cx_{k+1,k}) \quad (4.21)$$

5. Hata kovaryansı ölçüm güncelleme eşitliği

$$P_{k+1,k+1} = (1 - K_{k+1}C)P_{k+1,k} \quad (4.22)$$

Verilen eşitlikler her örnekleme süresi için sırasıyla hesaplanarak yinelenmeli olarak şarj durumu kestirimi gerçekleştirilir. Şekil 4.3 'te Genişletilmiş Kalman Filtresi algoritma akışı gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Şarj durumu kestirimi için GKF algoritması

Kalman kazancı sıfır ile bir arasında bir değerdir. Bu değer sıfıra yakın olduğu takdirde ölçüm belirsizliğinin (v_k) baskın olduğu tahmin odaklı bir kestirim olacaktır. Kalman kazancının bire yakın olması ise yapılan kestirimde süreç belirsizliğinin (w_k) baskın olduğu ölçüm odaklı kestirim olacaktır [50].

4.3.2 Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi

Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemiyle durum değişkeni tahmininde, gürültü kovaryanslarının deneme yanılma yöntemiyle seçilmesi, batarya yaşlanması, uygun model seçilmemesi gibi etkenlerden dolayı algoritmanın başarımlı oranı düşmektedir. Bundan dolayı Genişletilmiş Kalman Filtresi algoritmasına literatürdeki farklı yaklaşım yöntemleri uyarlanarak algoritmanın başarımlı oranı geliştirilmektedir. Farklı yöntemlerin GKF yöntemine adapte edilmesiyle gerçekleştirilen algoritmalara Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman filtresi algoritmaları adı verilir. Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi; gürültü, belirsizlik ve batarya model yaklaşımlarının yetersiz kaldığı noktaları, göz önünde bulundurarak durum denklemlerinin güncellenmesini içerir [12]. Bu yöntemle çevrimiçi şarj durumu kestirimi gerçekleştirilir.

Batarya yaşlanmasının göz önünde bulundurulduğu çalışmada; GKF algoritmasının her adımında elektriksel eşdeğer model parametrelerinin yaşlanmaya bağlı olarak

değişiminin şarj durumuna etkisi denkleme eklenmiştir. Elektrokimyasal eşitlikler kullanılarak LiFePO_4 kimyasına sahip batarya hücresi için yapılan çalışmada elektriksel eşdeğer model parametre fonksiyonları güncellenerek 4.23 numaralı eşitliklerdeki gibi elde edilir. Eşitliklerde b_k , c_k , d_k batarya yaşlanma etkisini göstermektedir.

$$R_0(k) = f_0(\text{SoC}, T) + b_k(1 + Q_l(k)) \quad (4.23a)$$

$$R_i(k) = f_1(\text{SoC}, T) + c_k(1 + Q_l(k)) \quad (4.23b)$$

$$C_i(k) = f_2(\text{SoC}, T) + d_k(1 + Q_l(k)) \quad (4.23c)$$

Arrhenius elektrokimyasal eşitliğine göre;

$$Q_l(k) = B e^{-\frac{E_a}{RT} t^z} \quad (4.24)$$

Eşitlikte, Q_l zayıflama miktarı, B deneysel sabit, E_a batarya kimyasının taşıyabileceği enerji, R batarya sabiti, T sıcaklık, t zamandır. GKF yöntemi her adımda güncellenmiş elektriksel eşdeğer devre parametreleri kullanılarak uyarlanır. Uyarlanma sonucunda şarj durumu kestiriminde batarya yaşlanması hesaplamalara eklenerek kestirim başarımları geliştirilir [51].

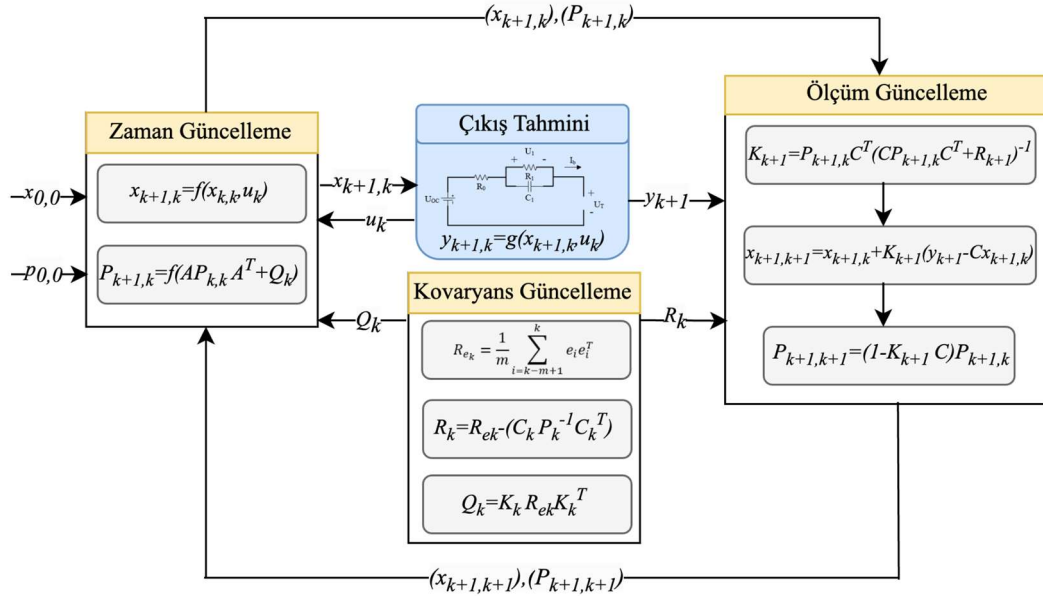
Ölçüm ve süreç belirsizliğinin göz önünde bulundurulduğu kovaryans uyumlama metoduna dayanan farklı bir uyarlanmış GKF yönteminde, süreç ve ölçüm gürültüsü yinelemeli olarak güncellenerek algoritmanın başarımları geliştirilir. Başlangıç değeri hatalı belirlenen ölçüm ve süreç kovaryansları, kestirim çıktısının tahmin veya ölçüm odağına yakınsamasına neden olur. Kovaryans uyumlama yaklaşımına göre hesaplamaların başlangıcında hatalı bilinen ölçüm ve süreç gürültüleri her örnekleme adımında güncellenerek gerçek gürültü değerine yakınsaması sağlanır. Bu metot ile GKF yöntemine göre daha az salınıma sahip ve hatalı kovaryanslara karşı kararlı şarj durumu kestirimi gerçekleştirilir [52]. 4.25 numaralı eşitliklerde Q ve R kovaryanslarının güncelleme eşitlikleri gösterilmektedir. Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi algoritma akışı Şekil 4.4'te verilmiştir.

$$e_k = z_k - C_k x_k \quad (4.25a)$$

$$R_{e_k} = \frac{1}{m} \sum_{i=k-m+1}^k e_i e_i^T \quad (4.25b)$$

$$R_k = R_{e_k} - (C_k P_k^{-1} C_k^T) \quad (4.25c)$$

$$Q_k = K_k R_{e_k} K_k^T \quad (4.25d)$$



Şekil 4.4 : Şarj durumu kestirimi için UGKF algoritması

Verilen eşitliklerde R_{ek} ölçüm gürültü varyansının güncelleme değerini, m tahmin penceresi genişliğini göstermektedir.

Bölümde bahsedilen şarj durumu kestirim yöntemlerin avantajları ve dezavantajları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Şarj durumu kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması [53]

Kestirim Yöntemleri	Avantaj	Dezavantaj
Açık Devre Yöntemi	Basit ve geleneksel bir yöntemdir. Yüksek doğruluk ile şarj durumu kestirimi yapılabilmektedir.	Ölçüm ve bekleme süresi oldukça uzundur. Dinamik sistemler için uygun değildir.
Yük Sayma Yöntemi	Donanımsal olarak basit yapıya sahiptir. Ölçüm gereksinimleri azdır. Oldukça hızlı bir yöntemdir.	Doğru bir kestirim için sensör verilerinin ve başlangıç şarj durumunun tespitinin doğruluğu çok önemlidir.
Genişletilmiş Kalman Filtresi	Doğrusal olmayan sistemler için uygundur. Dinamik değişiklikler altında uygulanabilmektedir.	Doğrusallaştırma işlemlerinde bazı terimlerin göz ardı edilmesinden dolayı kestirim hataları oluşabilmektedir.
Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi	Gerçek zamanlı olarak sistem gürültüsü güncellenerek yüksek kararlılıkla tahminler gerçekleştirilebilmektedir.	Sabit gürültü kovaryanslı sistemler için önerilmiştir.



5. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Bu bölümde Genişletilmiş Kalman Filtresi ve kovaryans uyumlama tabanlı Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi algoritmaları kullanılarak LG18650HG2 lityum iyon batarya hücresi için farklı yük profilleri altında şarj durumu kestirimi simülasyonları gerçekleştirilip, başarımlar oranları karşılaştırılmıştır. Şarj durumu kestirimi için elektriksel eşdeğer devre model parametreleri hesaplanmış ve doğrulanmıştır. Çalışma kapsamında, 4S1P LG18650HG2 batarya paketi için batarya yönetim sistemi elektronik kartı gerçekleştirilerek, tasarlanan arayüzde batarya durumları gerçek zamanlı olarak izlenmektedir. Simülasyonlarda McMaster Üniversitesi'nde gerçekleştirilen test verileri kullanılmıştır [54].

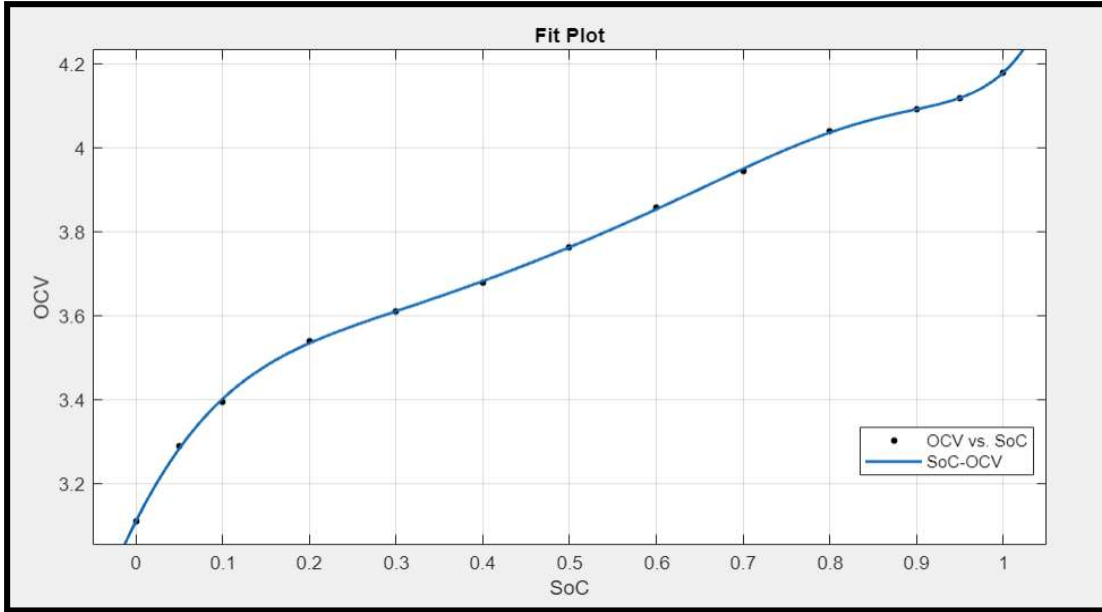
5.1 Parametre Kestirimi ve SoC-OCV Matematiksel Eşitliği

Yapılan bu çalışmada şarj durumu – açık devre gerilimi matematiksel eşitliği için C/20 deşarj test verileri kullanılmıştır. Test verilerinde %10 kademeli olarak azalan her bir şarj değeriyle eşleşen açık devre gerilimleri MATLAB ortamına aktarılmış ve Curve Fitting Toolbox yardımıyla şarj durumu – açık devre gerilimi matematiksel eşitliği bulunmuştur. Çizelge 5.1 'de batarya hücresinin ilgili şarj durumundaki açık devre gerilimleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Şarj durumu-açık devre gerilim değerleri

SoC(%)	OCV(V)	SoC(%)	OCV(V)
100	4.180	40	3.680
90	4.093	30	3.611
80	4.039	20	3.539
70	3.945	10	3.395
60	3.858	5	3.290
50	3.763	0	3.110

Kaydedilen test verileri ile MATLAB ortamında şarj durumu – açık devre gerilim eğrisi ve polinom eşitliği Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.1 : Şarj durumu - açık devre eğrisi

Test verileri ile uydurulan fonksiyonun yakınsama hatasının en düşük seviyede tutulması için uygun polinom seviyesi seçilmelidir. En fazla yakınsama sekizinci dereceden polinom eşitliği ile sağlanmıştır.

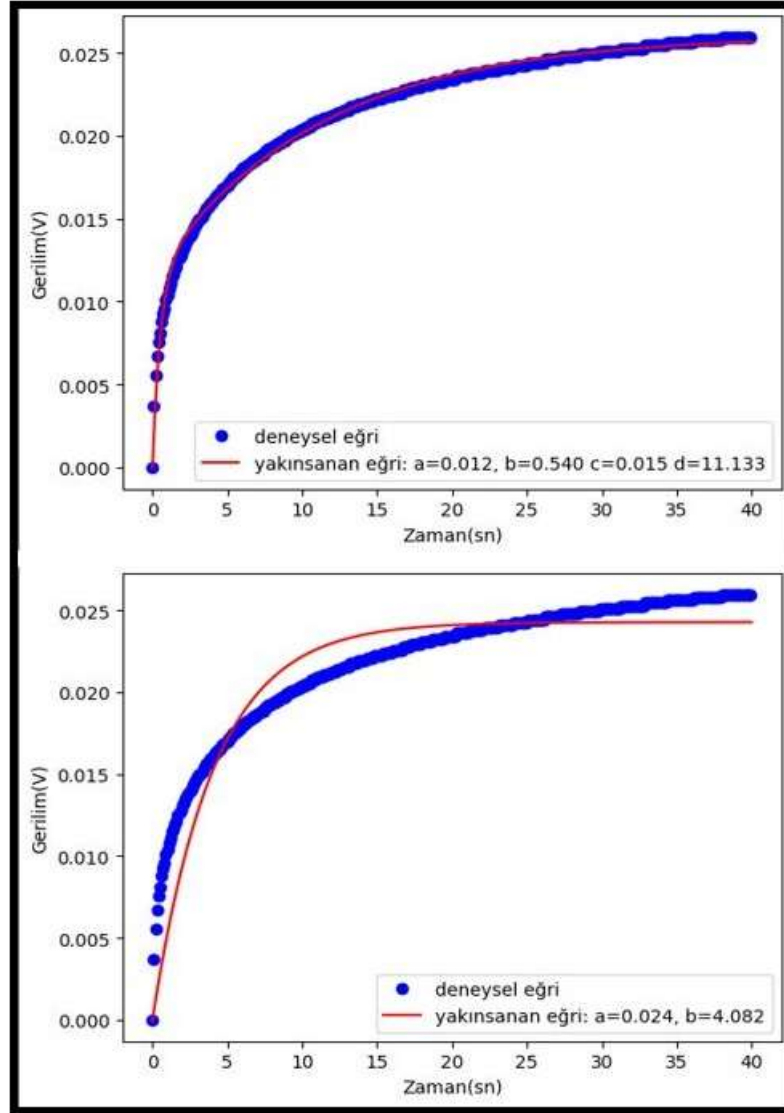
Linear model Poly8:

$$f(x) = p1*x^8 + p2*x^7 + p3*x^6 + p4*x^5 + p5*x^4 + p6*x^3 + p7*x^2 + p8*x + p9$$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = 78.87 (-154.9, 312.6)
p2 = -282.7 (-1219, 653.8)
p3 = 403.3 (-1126, 1933)
p4 = -282.2 (-1590, 1025)
p5 = 84.6 (-539.7, 708.9)
p6 = 8.28 (-155.5, 172)
p7 = -13.19 (-34.68, 8.308)
p8 = 4.087 (2.961, 5.212)
p9 = 3.111 (3.094, 3.129)

Şekil 5.2 : Şarj durumu açık devre gerilimi polinom katsayıları

Eşdeğer devre modeli parametrelerinin hesaplanması için Python curve fitting kütüphanesi kullanılmıştır. HPPC test verilerinden yararlanılarak bütün şarj durumları için dinlenme periyodunun terminal gerilimi üzerindeki etkisi 3.11 eşitliği kullanılarak ikinci dereceden ve birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre model parametreleri hesaplanmıştır.

Yazılımda parametre hesabı yapılırken eşitlik 3.11 birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli için eşitlik 5.1, ikinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli için eşitlik 5.2 gibi güncellenerek Şekil.5.3'te gösterilen katsayılar hesaplanmıştır. İkinci dereceden eşdeğer devre modeli, ölçüm değerlerine birinci dereceden eşdeğer devre modeline göre daha yüksek başarımla yakınsadığı Şekil 5.3'te gözlenmektedir.



Şekil 5.3 : Terminal gerilimi yakınsama eğrileri

$$\Delta U_{RC1} = a(1 - e^{-t/b}) \quad (5.1)$$

$$\Delta U_{RC2} = a(1 - e^{-t/b}) + c(1 - e^{-t/d}) \quad (5.2)$$

$$R_1 = \frac{a}{\Delta I}, R_2 = \frac{c}{\Delta I} \quad (5.3)$$

$$C_1 = \frac{b}{R_1}, C_2 = \frac{d}{R_2} \quad (5.4)$$

5.2, 5.3 ve 5.4 eşitliklerine göre elde edilen ikinci dereceden Thevenin eşdeğer devre parametreleri Çizelge 5.2'deki gibidir.

Çizelge 5.2 : İkinci dereceden Thevenin eşdeğer devre parametreleri

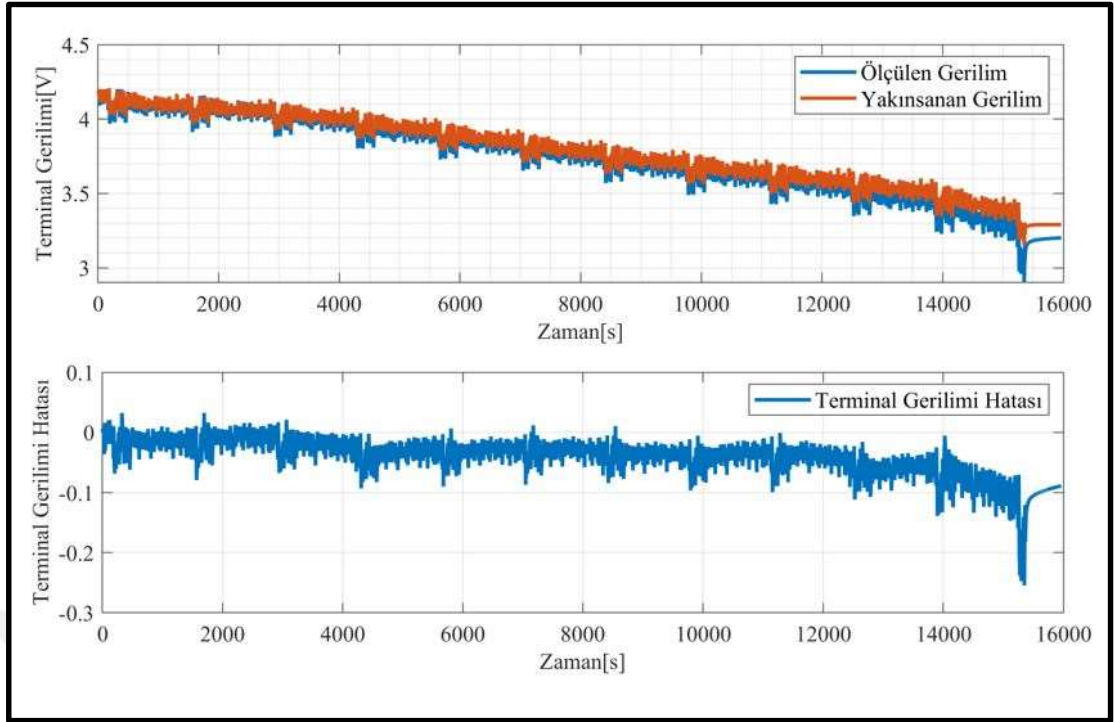
SoC (%)	R ₀ (mΩ)	R ₁ (mΩ)	C ₁ (F)	R ₂ (mΩ)	C ₂ (F)
100	19.48	4.6	135.45	5.4	2226.62
95	18.81	3.6	257.36	4.1	3022.84
90	18.30	3.6	304.64	5.3	2640.36
80	17.91	3.3	375.81	6.2	2591.08
70	16.65	9.1	127.28	5.6	2151.16
60	17.90	2.6	374.63	3.6	4006.65
50	17.01	7.3	136.47	4.3	2637.26
40	17.90	2.6	379.46	3.6	4552.76
30	18.24	2.6	366.69	3.3	4657.84
20	19.25	3.3	310.33	5.3	2803.14
15	20.71	5.7	166.87	6.4	2277.83
10	22.56	10.2	124.45	8.1	1421.47

5.1, 5.3 ve 5.4 eşitliklerine göre elde edilen birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre parametreleri Çizelge 5.3'teki gibidir.

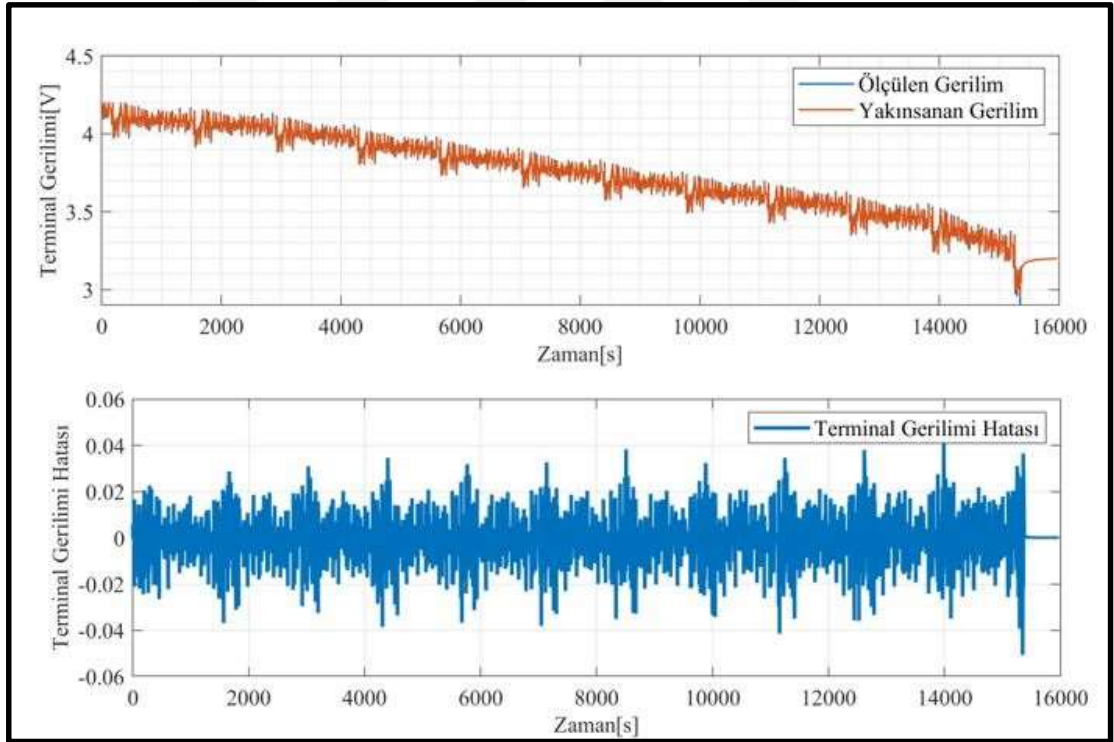
Çizelge 5.3 : Birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre parametreleri

SoC (%)	R ₀ (mΩ)	R ₁ (mΩ)	C ₁ (F)
100	19.48	8.66	115.46
95	18.81	7.86	127.12
90	18.30	8.37	179.20
80	17.91	8.86	225.71
70	16.65	9.35	128.34
60	17.90	6.29	206.60
50	17.01	7.41	188.76
40	17.90	6.24	224.23
30	18.24	5.84	239.45
20	19.25	9.20	206.52
15	20.71	10.79	141.27
10	22.56	17.98	103.45

Elde edilen eşdeğer devre parametreleriyle LA92 sürüş verileri kullanılarak ölçülen gerilimler ve yakınsanan gerilimlerin hata eğrileri her iki elektriksel eşdeğer devre modeli için Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : Birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli doğrulama eğrileri



Şekil 5.5 : İkinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli doğrulama eğrileri

Birinci dereceden elektriksel eşdeğer devre modeli için karesel ortalama hata değeri 0.042, ikinci dereceden elektriksel eşdeğer devre modeli için karesel ortalama hata değeri 0.036 olarak hesaplanmıştır. İkinci dereceden Thevenin eşdeğer modelinin daha

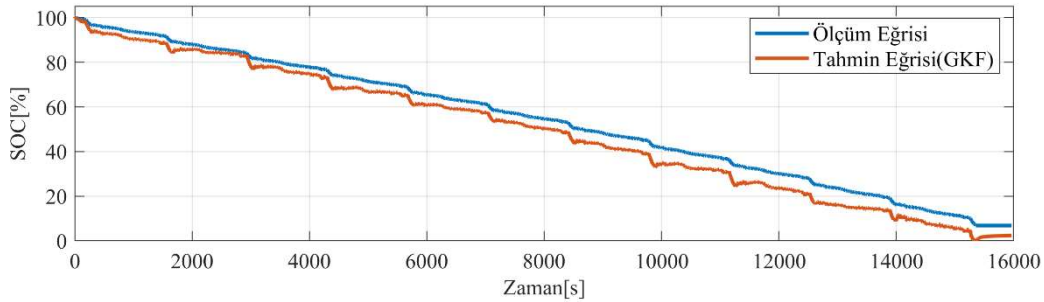
yüksek başarımla ölçüm değerine yakınsadığı görülmektedir. Elde edilen SoC-OCV eşitliği ve model parametreleri 25 °C’deki test verileri kullanılarak hesaplanmıştır.

5.2 Şarj Durumu Kestirimi Simülasyonları

Bu bölümde genişletilmiş kalman filtresi ve uyarlanmış genişletilmiş kalman filtresi kestirim yöntemleri ikinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modellerine uygulanarak MATLAB ortamında LA92 sürüş akım profili ve UDDS sürüş akım profiline göre şarj durumu kestirimi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Batarya modellerinde bir önceki bölümde elde edilen parametreler kullanılmıştır. Her bir simülasyon için karesel ortalama hata ve maksimum hata oranı yüzde cinsinden belirtilmiştir.

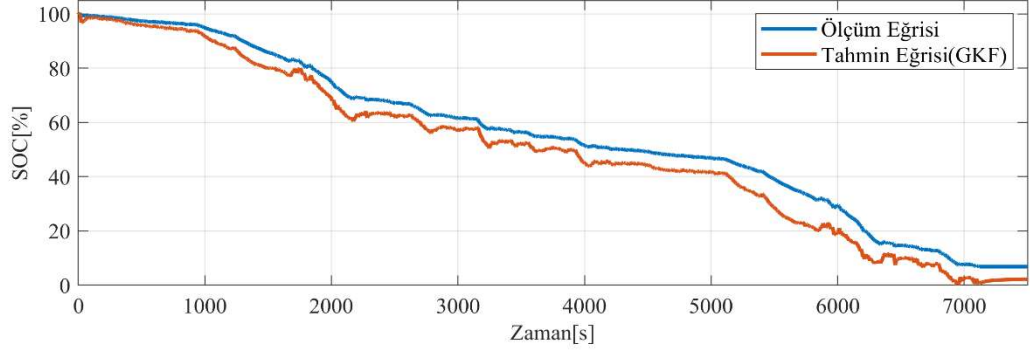
5.2.1 Genişletilmiş Kalman Filtresi ile şarj durumu kestirimi

Başlangıç şarj durumu 100% olan batarya hücresi için GKF yöntemi kullanılarak UDDS ve LA92 akım profillerine göre elde edilen şarj durumu eğrileri sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Başlangıç durumu %100 iken UDDS akım profiline göre GKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi

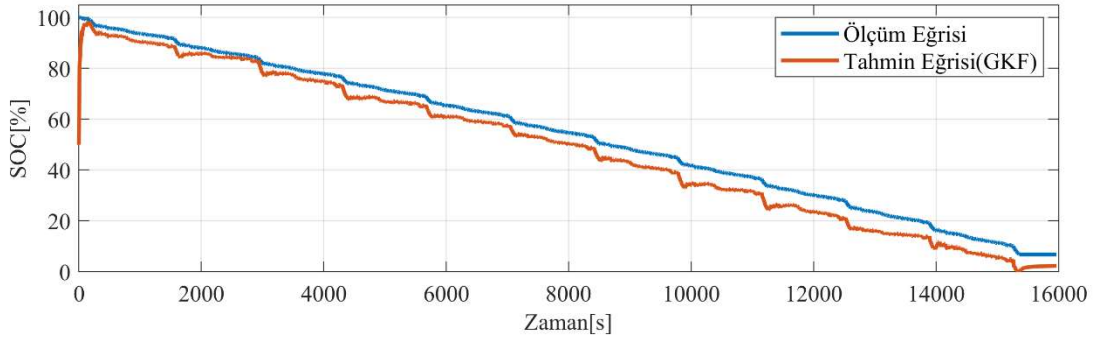
UDDS akım profiline göre karesel ortalama hata oranı 4.078%, maksimum hata oranı ise 9.122% olarak hesaplanmıştır.



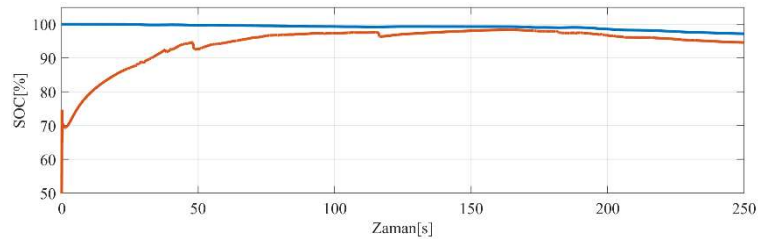
Şekil 5.7 : Başlangıç durumu %100 iken LA92 akım profiline göre GKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi

LA92 akım profiline göre karesel ortalama hata oranı 5.806%, maksimum hata oranı ise 12.026% olarak hesaplanmıştır.

Başlangıç şarj durumu 50% olan batarya hücresi için GKF yöntemi kullanılarak UDDS ve LA92 akım profillerine göre elde edilen şarj durumu eğrileri sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.10'da sırasıyla gösterilmiştir. Yakınsama eğrileri ise sırasıyla Şekil 5.9'da ve 5.11 'de gösterilmiştir.

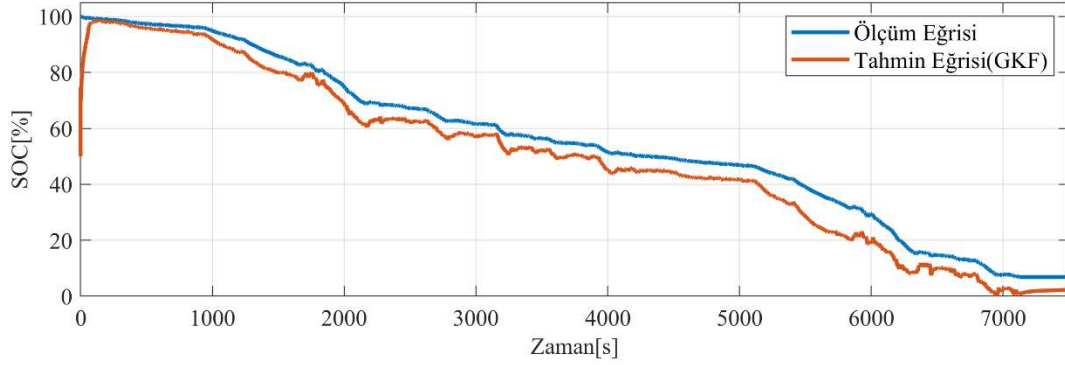


Şekil 5.8 : Başlangıç durumu %50 iken UDDS akım profiline göre GKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi

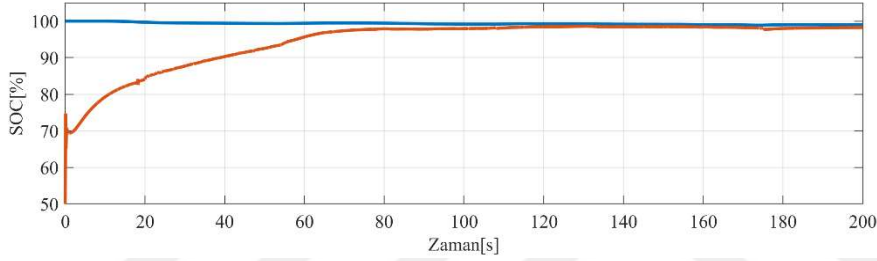


Şekil 5.9 : Başlangıç durumu %50 iken UDDS akım profiline göre GKF yöntemiyle yakınsama süresi

UDDS akım profiline göre karesel ortalama hata oranı 5.12%, maksimum hata oranı 50% ve tahmin eğrisinin ölçüm eğrisine yakınsama süresi yaklaşık 150 saniyedir.



Şekil 5.10 : Başlangıç durumu %50 iken LA92 akım profiline göre GKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi

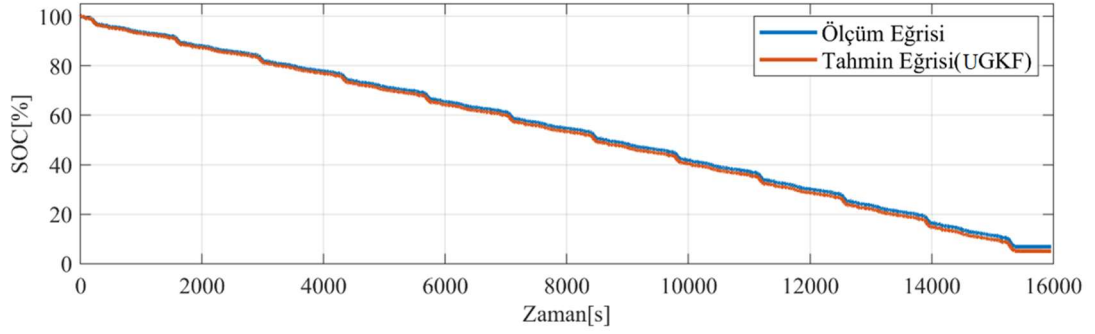


Şekil 5.11 : Başlangıç durumu %50 iken LA92 akım profiline göre GKF yöntemiyle yakınsama süresi

LA92 akım profiline göre karesel ortalama oranı 5.964%, maksimum hata oranı 50% ve tahmin eğrisinin ölçüm eğrisine yakınsama süresi yaklaşık 100 saniyedir.

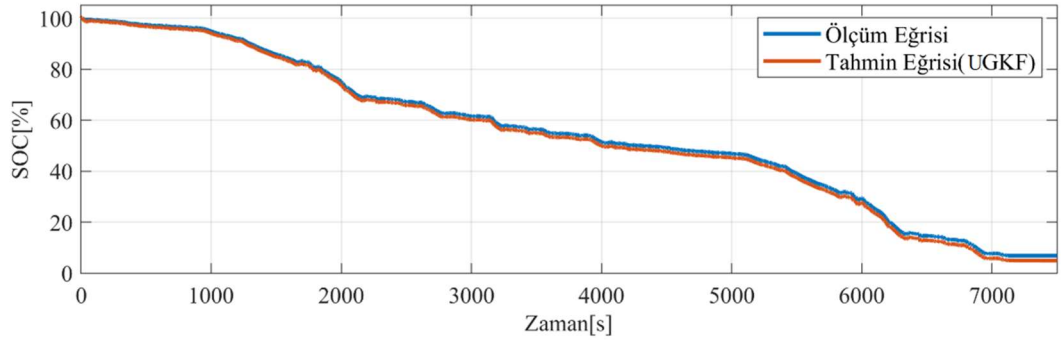
5.2.2 Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi ile şarj durumu kestirimi

Başlangıç şarj durumu 100% olan batarya hücresi için UGKF yöntemi kullanılarak UDDS ve LA92 akım profillerine göre elde edilen şarj durumu eğrileri sırasıyla Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 5.12 : Başlangıç durumu %100 iken UDDS akım profiline göre UGKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi

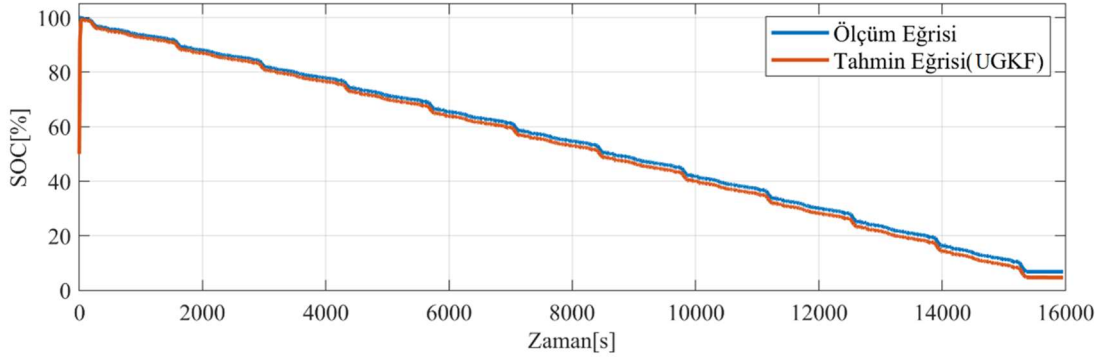
UDDS akım profiline göre karesel ortalama hata oranı 1.221%, maksimum hata oranı ise 1.732% olarak hesaplanmıştır.



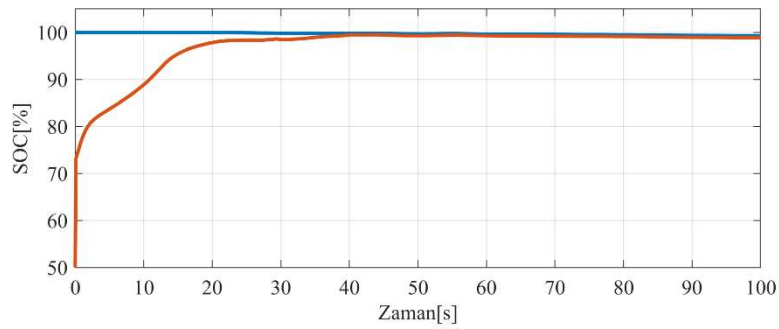
Şekil 5.13 : Başlangıç durumu %100 iken LA92 akım profiline göre UGKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi

LA92 akım profiline göre karesel ortalama hata oranı 1.437%, maksimum hata oranı ise 1.926% olarak hesaplanmıştır.

Başlangıç şarj durumu 50% olan batarya hücresi için UGKF yöntemi kullanılarak UDDS ve LA92 akım profillerine göre elde edilen şarj durumu eğrileri sırasıyla Şekil 5.14 ve Şekil 5.16'da sırasıyla gösterilmiştir. Yakınsama eğrileri ise sırasıyla Şekil 5.15'te ve 5.17 'de gösterilmiştir.

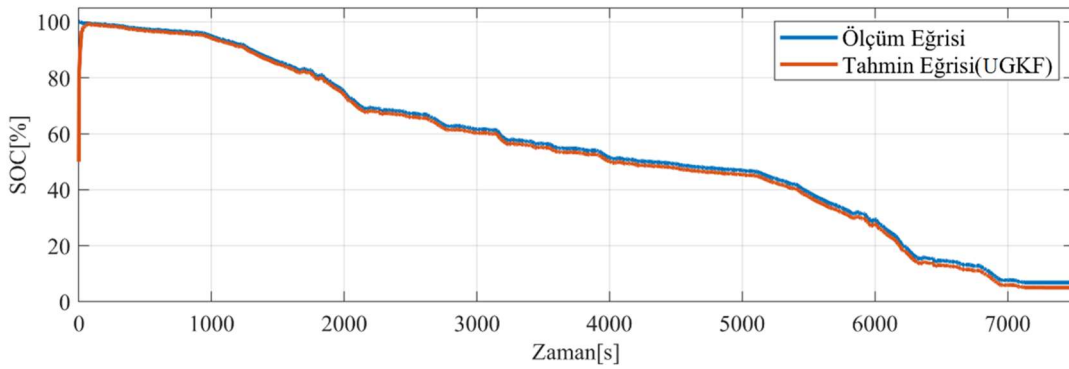


Şekil 5.14 : Başlangıç durumu %50 iken UDDS akım profiline göre UGKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi

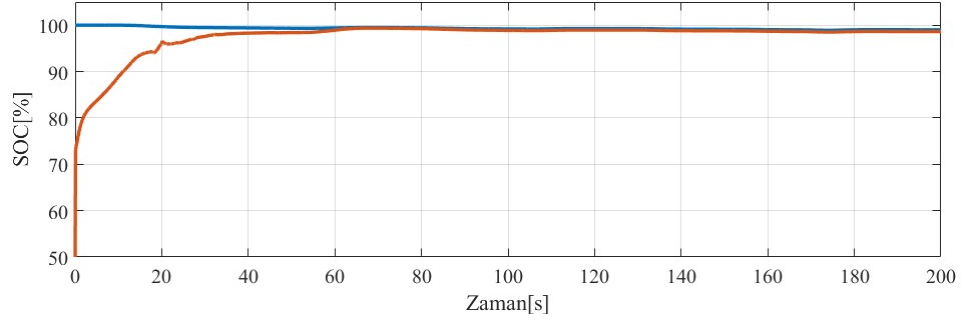


Şekil 5.15 : Başlangıç durumu %50 iken UDDS akım profiline göre UGKF yöntemiyle yakınsama süresi

UDDS akım profiline göre karesel ortalama hata oranı 2.11%, maksimum hata oranı 50% ve tahmin eğrisinin ölçüm eğrisine yakınsama süresi yaklaşık 40 saniyedir.



Şekil 5.16 : Başlangıç durumu %50 iken LA92 akım profiline göre UGKF yöntemiyle şarj durumu kestirim eğrisi



Şekil 5.17 : Başlangıç durumu %50 iken LA92 akım profiline göre UGKF yöntemiyle yakınsama süresi

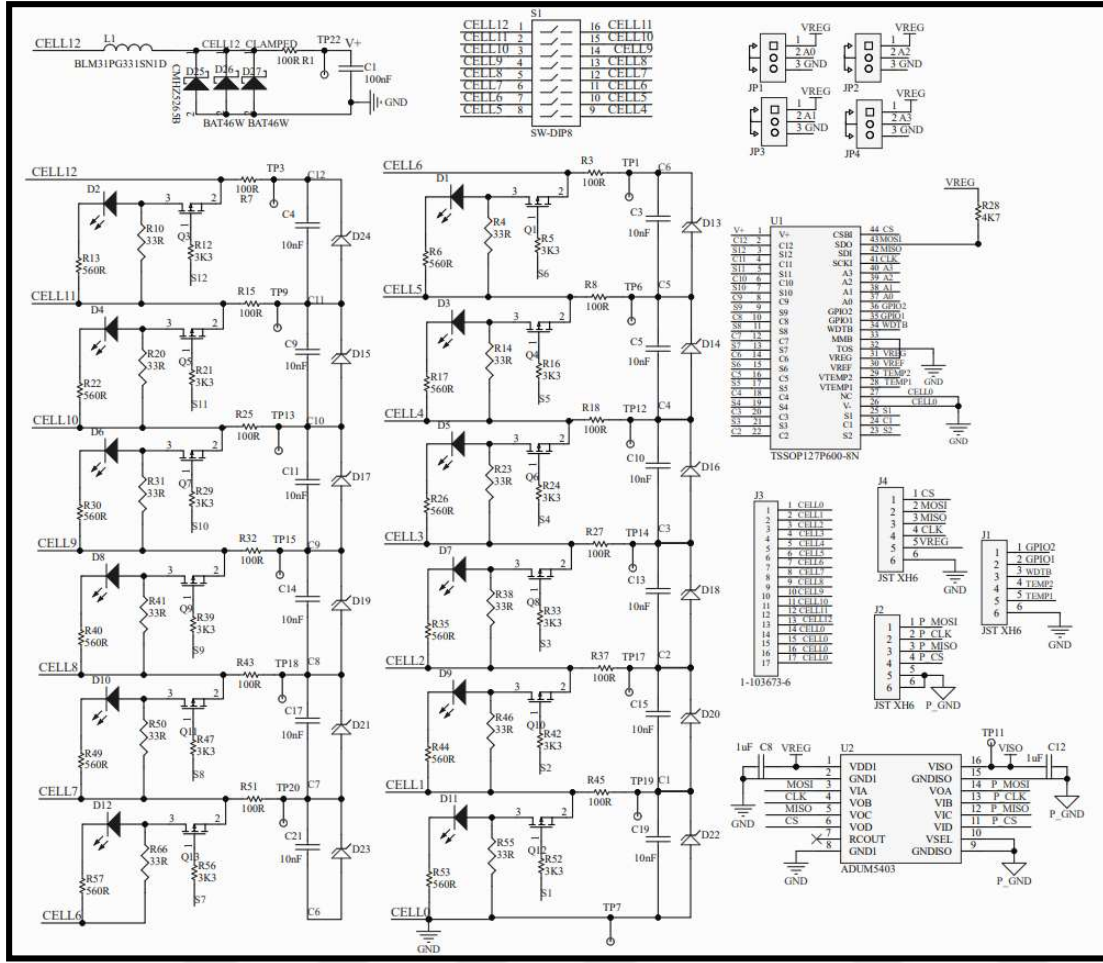
LA92 akım profiline göre karesel ortalama oranı 2.66%, maksimum hata oranı 50% ve tahmin eğrisinin ölçüm eğrisine yakınsama süresi yaklaşık 60 saniyedir.

5.3 Batarya Yönetim Sistemi Elektronik Kart ve Arayüz Tasarımı

Elektronik kart tasarımında her bir hücrenin geriliminin ölçülmesi ve dengelenmesi için LTC6802-2 entegre devresi ve elde edilen verilerin bilgisayara aktarılması için ATMEGA328PAU mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Bunun yanında hücre paketinden geçen akım değerinin ölçülmesi için LTS 25-NP ve paket sıcaklığının ölçülmesi için LM35 algılayıcıları kullanılmış ve algılayıcıların analog çıkışları 12-bit ADS1115 entegre devresi ile okunmuştur. Ayrıca aşırı şarj ve deşarjı önlemek amacıyla röle kontrolünü sağlayan sayısal çıkış kart tasarımına eklenmiştir.

5.3.1 LTC6802-2 entegre devresi

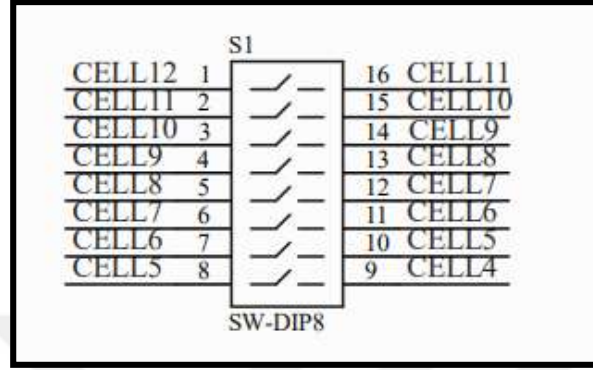
LTC6802-2, Analog Devices firması tarafından tasarlanmış çok hücreli batarya paketi izleme entegre devresidir. 12 bit ADC içeren entegre devresi her bir hücrenin gerilimini yüksek doğruluk ve çözünürlükle ölçer. LTC6802-2, en az dört en fazla ise on iki seri bağlı hücreden oluşan batarya paketlerinde kullanılabilir. Entegre devresinin güvenli çalışması için dahili sıcaklık sensörü ve batarya paketinin sıcaklığının ölçülebilmesi için analog giriş bulunmaktadır. SPI veya I2C seri haberleşme protokollerini kullanarak bir mikrodenetleyici veya başka bir cihazla iletişim kurar. Modüler bağlantı topolojisine sahip batarya yönetim sistemleri için adreslenebilir olmasından dolayı 16 adet LTC6802-2 entegre devresinin eş zamanlı olarak kullanılmasına olanak sağlar. Ayrıca her hücre için bulunan p kanal mosfet ve dengeleme direnciyle hücre dengelenmesi gerçekleştirir. Şekil 5.18’de yardımcı elektronik kart bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 5.18 :Yardımcı elektronik kart şematiği

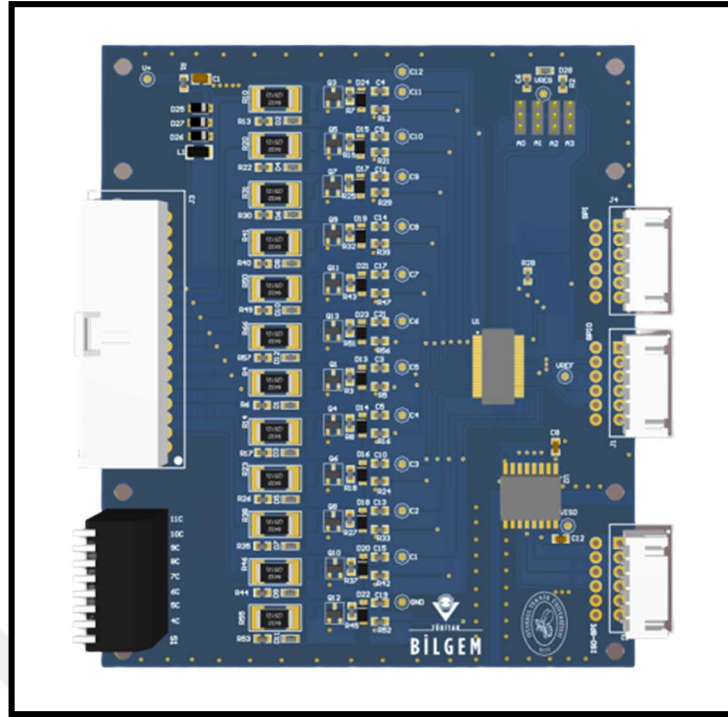
LTC6802-2 entegresi ile her bir hücrenin gerilimi diferansiyel olarak ölçülmektedir. Hücre gerilimlerinin dengelenmesi, filtrelenmesi ve entegre devresinin korunması için kullanılan hücre sayısı kadar Şekil 5.19’da bulunan devre yapısı kullanılmıştır. Pasif dengeleme işlemi bir mosfet ve boşalma direnci ile gerçekleştirilir. Dengeleme işlemi ölçüm işleminin ardından gerçekleştirilir. Her bir hücrenin gerilimi ölçüldükten sonra gerilim seviyesi diğer hücrelere göre daha yüksek olan hücrelerin deşarj edilmesi ile sağlanır. Dengeleme işleminin başlaması için gerekli mosfet kapı sinyalinin sağlanması ve mosfetin sürülmesi LTC6802-2 entegre devresiyle gerçekleştirilir.

sayesinde besleme gerilimi kadar izole gerilim sağlamaktadır. Bundan dolayı izole kısımda bulunan çevresel birimler için ayrıca regülatör kullanılmasına gerek kalmamıştır. Yalnızca tek batarya paketi kullanılıyorsa isoSPI hattının kullanılmasına gerek yoktur. Elektronik kart tasarımında her iki kullanım içinde bağlantı uçları bulunmaktadır. Şekil 5.21’de sekizli piyano anahtar bağlantı uçları gösterilmiştir

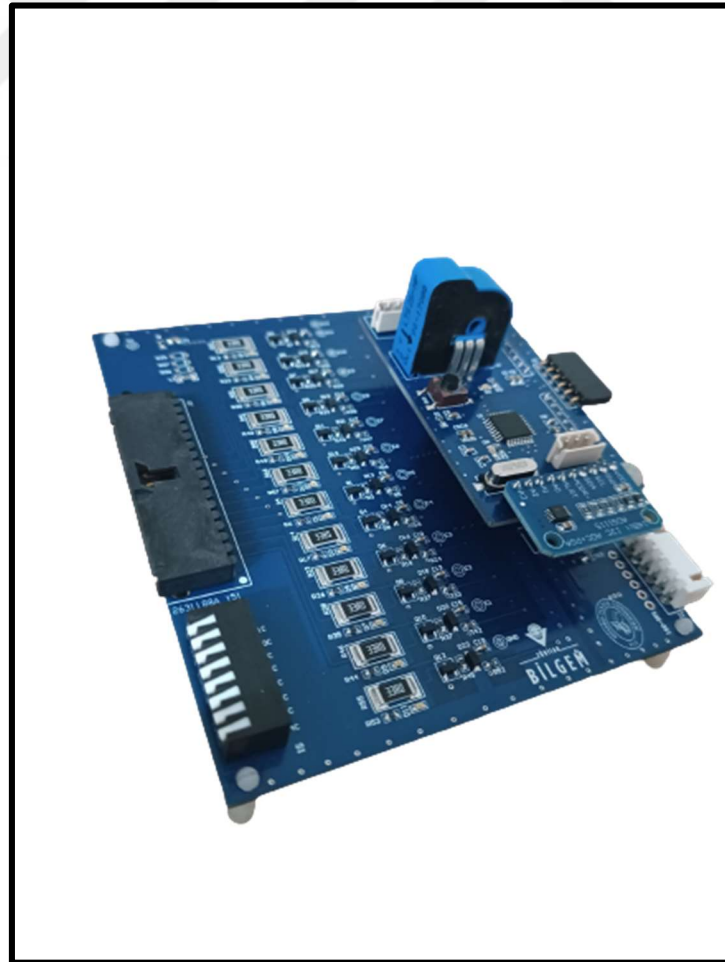


Şekil 5.21 : Piyano anahtar uç bağlantı şematığı

LTC6802-2, en az dört en fazla ise on iki seri bağlı hücreden oluşan batarya paketlerinde kullanılabilir. Proje kapsamında tasarlanan elektronik kartta esneklik sağlaması açısından sekizli piyano anahtar eklenmiştir. Kullanılmayan hücrelerin anahtarları kapatılarak gerilim değeri en yüksek olan hücre ile en son hücre olan on ikinci hücre kısa devre edilir ve entegre devresinin çalışması için gerekli gerilim sağlanır. Tasarımda bulunan sekizli anahtar ile kart üzerinde herhangi bir tasarım değiştirilmeden farklı sayıda hücreye sahip batarya paketleri için batarya yönetim sistemi tasarlanabilir. Proje kapsamında tasarlanan ve gerçekleştirilen yardımcı elektronik kartın Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’te sırasıyla üç boyutlu ve iki boyutlu görünümü verilmiştir.



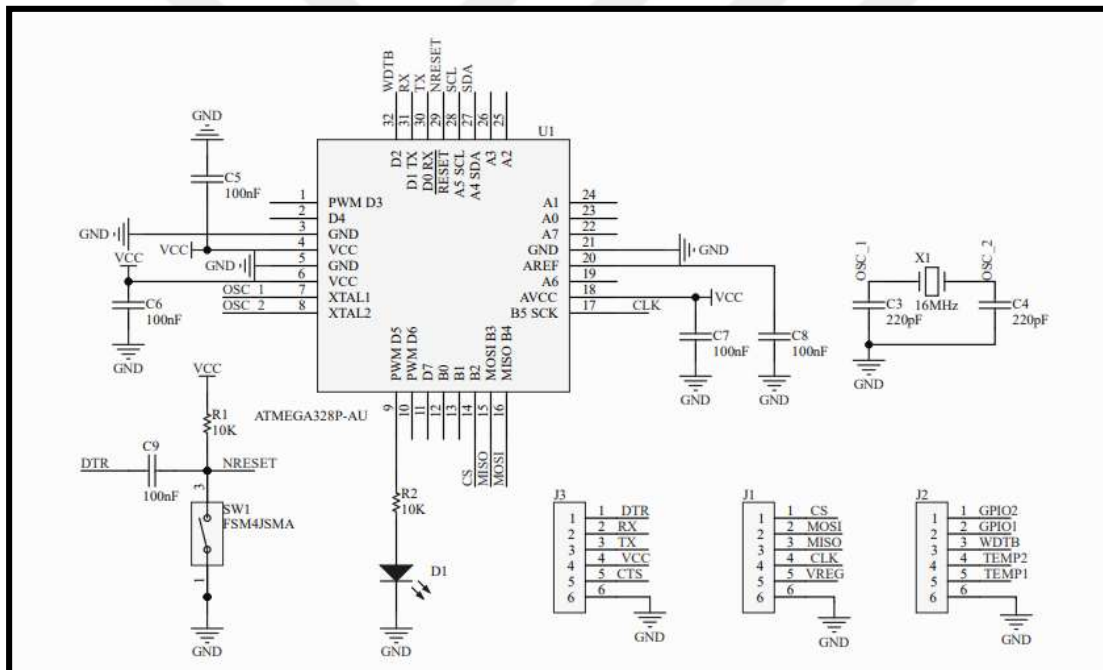
Şekil 5.22 : Yardımcı elektronik kart üç boyutlu baskı devre tasarımı



Şekil 5.23 : Batarya yönetim sistemi baskı devre kartı

5.3.2 ATMEGA328PAU mikrodenetleyici devresi

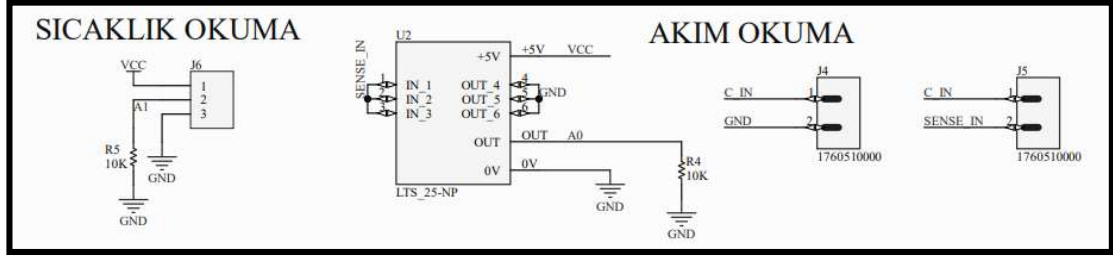
Proje kapsamında batarya akımı, batarya paket sıcaklığı, hücre gerilimlerinin elde edilmesi ve elde edilen verilerin bilgisayara aktarılması amacıyla ATMEGA328P-AU mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Batarya paketinde bulunan hücre gerilimlerinin elde edilmesi için LTC6802-2 entegre devresi ile SPI haberleşme arayüzü, mikrodenetleyicinin programlanması ve bilgisayarla haberleşmesi için UART haberleşme arayüzü kullanılmıştır. Mikrodenetleyici kartının beslenmesi için gerekli gerilim USB-TTL dönüştürücü aracılığıyla bilgisayardan sağlanmaktadır. Ayrıca LTC6802-2 entegre devre elektronik kartı ve mikrodenetleyici elektronik kartının anahtar-kilit bağlantısı için bağlantı uçları elektronik kartlara eklenmiştir. Mikrodenetleyici kartının haberleşme ve beslenmesi için gerekli uç bağlantıları Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24 :ATMEGA328PAU uç bağlantı şematiği

Batarya akımını ölçmek için LTS 25-NP akım algılayıcısı kullanılmıştır. LTS 25-NP düşük güç tüketimi, yüksek doğruluk ve hassasiyet sağlayan bir manyetik algılayıcı içerir. Manyetik algılayıcı sensörün birincil sargısı tarafından oluşturulan manyetik alanı ölçer ve bu alanın şiddeti sensörün çıkış voltajını belirler. LTS 25-NP, 0 ila 25 Amper aralığında ölçüm yapabilir ve 5 volt DC besleme gerilimi kullanır. Batarya paket sıcaklığının elde edilmesi için LM35 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Sensörün analog çıkışı sıcaklık ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Ölçüm aralığı -55°C ila

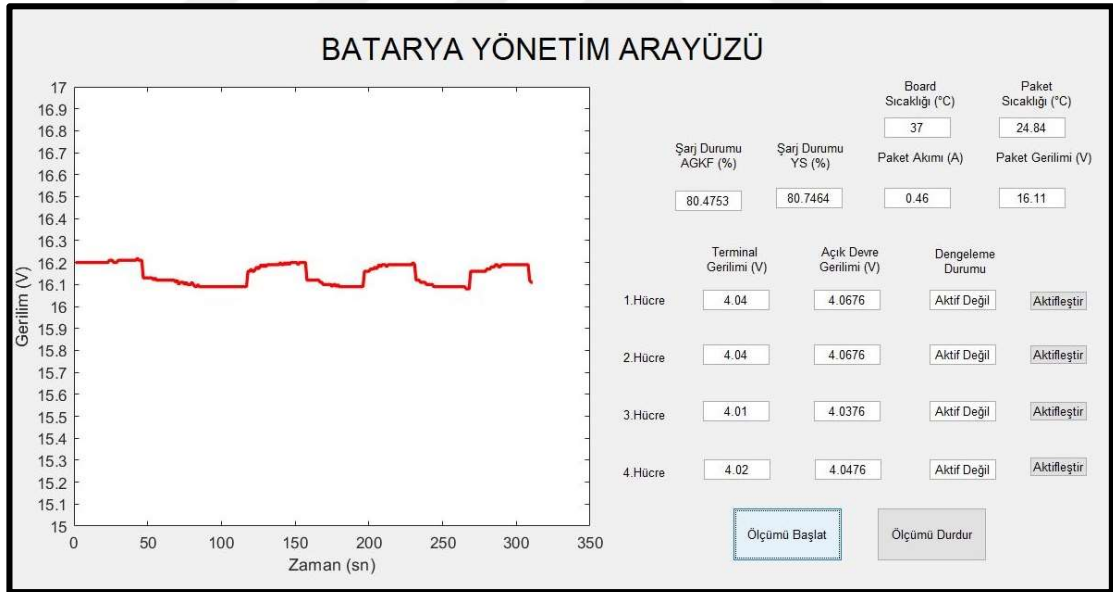
+150°C arasındadır ve hassasiyeti $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 'dir. 5 volt DC besleme gerilimi kullanılır. Sıcaklık ve akım okunması için gerekli uç bağlantıları Şekil 5.25'teki gibidir.



Şekil 5.25 : Sıcaklık ve akım sensörü şematığı

5.3.3 Kullanıcı arayüz tasarımı

Kullanıcı arayüzü MATLAB GUIDE ortamında geliştirilmiştir. Elektronik karttan okunan gerilim, akım, sıcaklık değerlerinin ve bu değerlerle hesaplanan anlık şarj durumunun gerçek zamanlı olarak takip edilmesini sağlayan arayüzdür. Batarya verileri mikrodenetleyici kartının USB-TTL bağlantısı ile seri port üzerinden bilgisayara aktarılmaktadır. Şekil 5.26'da tasarlanan arayüz gösterilmektedir.



Şekil 5.26 : Arayüz tasarımı



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada endüstride birçok alanda kullanılan lityum tabanlı bataryalar için batarya yönetim sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Ayrıca verimli ve etkili batarya yönetim sistemi başarımının en önemli parametrelerinden biri olan batarya şarj durumu kestirimine odaklanılmıştır.

Literatürde kullanılan şarj durumu kestirimi yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilerek Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi algoritmaları ile şarj durumu kestirimi simülasyonu gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen batarya yönetim sistemi modüler topolojide tasarlanmıştır. Bundan dolayı birden fazla batarya paketinin kontrolü mümkündür. Yardımcı elektronik kartlarda batarya hücrelerinin geriliminin izlenmesi ve mikrodenetleyiciye aktarması için LTC6802-2 tüm devresi kullanılmıştır. Batarya paket performansını artırmak ve bataryanın verimli olarak kullanılması için pasif dengeleme algoritması geliştirilmiştir. Mikrodenetleyici kartıyla gerçek zamanlı olarak batarya hücreleri izlenmektedir. Elektronik kart üzerinde bulunan USB-TTL bağlantısı ile saniye de bir bilgisayara veri aktarılması gerçekleştirilerek tasarlanan arayüzde hücrelerin durumu izlenmektedir. Ayrıca elektronik kart tasarlanırken farklı sayıda hücre bağlantısı gerçekleştirilebilmesi için elektronik karta donanımsal çözümlerle esneklik sağlanmıştır.

C/20 deşarj test verileri kullanılarak SoC-OCV matematiksel eşitliği elde edilmiştir. Ayrıca batarya performansını tahmin etmek ve matematiksel ilişkilerin kullanılması için anlaşılabilirlik ve batarya dinamik davranışını yüksek başarımla sergileyen batarya elektriksel eşdeğer devre modelleri kullanılmıştır.

HPPC test verileri kullanılarak birinci dereceden ve ikinci dereceden Thevenin eşdeğer devre model parametreleri hesaplanmıştır. Birinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli 0.042 karesel ortalama hata ile ikinci dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli ise 0.036 karesel ortalama hata ile ölçülen terminal gerilimine yakınsamıştır. İkinci

dereceden Thevenin eşdeğer devre modeli daha yüksek oranla başarımlı gösterdiği için simülasyonlarda ve batarya yönetim sistemi tasarlanırken bu model kullanılmıştır. Çizelge 6.1’de eşdeğer devre modellerinin başarımlı oranları gösterilmektedir.

Çizelge 6.1 : Eşdeğer devre modellerine göre hata oranı

Birinci Dereceden Thevenin Eşdeğer Devre Modeli		İkinci Dereceden Thevenin Eşdeğer Devre Modeli	
Karesel Ortalama Hata Oranı	Maksimum Hata (mV)	Karesel Ortalama Hata Oranı	Maksimum Hata (mV)
0.042	234.26	0.036	41.73

Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi kestirim yöntemleri ikinci dereceden thevenin eşdeğer devre modellerine farklı başlangıç şarj durumlarında uygulanarak MATLAB ortamında şarj durumu kestirimi simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Başlangıç şarj durumu 100% doluluk oranı sahip batarya hücresi için genişletilmiş kalman filtresi 4.07% karesel ortalama hata oranı ve 9.12% maksimum hata oranı ile UDDS sürüş ölçüm verilerine, 5.80% karesel ortalama hata oranı ve 12.02% maksimum hata oranı ile LA92 sürüş ölçüm verilerine yakınsamıştır.

Başlangıç şarj durumu 50% doluluk oranı sahip batarya hücresi için genişletilmiş kalman filtresi 5.12% karesel ortalama hata oranı ile yaklaşık 150 saniyede UDDS sürüş ölçüm verilerine, 5.96% karesel ortalama hata oranı ile yaklaşık 100 saniyede LA92 sürüş ölçüm verilerine yakınsamıştır.

Başlangıç şarj durumu 100% doluluk oranı sahip batarya hücresi için Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi 1.22% karesel ortalama hata oranı ve 1.73% maksimum hata oranı ile UDDS sürüş ölçüm verilerine, 1.43% karesel ortalama hata oranı ve %1.92 maksimum hata oranı ile LA92 sürüş ölçüm verilerine yakınsamıştır.

Başlangıç şarj durumu 50% doluluk oranı sahip batarya hücresi için Uyarlanmış Genişletilmiş Kalman Filtresi 2.11% karesel ortalama hata oranı ile yaklaşık 40 saniyede UDDS sürüş ölçüm verilerine , 2.66% karesel ortalama hata oranı ile yaklaşık 60 saniyede LA92 sürüş ölçüm verilerine yakınsamıştır.

Elde edilen sonuçlara göre her iki yöntemde farklı başarımlı oranı ile ölçüm verilerine yakınsamıştır. Ayrıca farklı akım profillerine göre de başarımlı oranı değişmektedir.

Fakat UGKF yöntemi GKF yöntemine göre daha yüksek başarımla ve daha kısa sürede ölçüm değerlerine yakınsamaktadır.

Yapılan bu çalışmada lityum tabanlı bataryaların şarj durumu kestirimi için GKF yöntemine, süreç ve ölçüm hata kovaryans belirsizliğinin de göz önünde bulundurulduğu denklemler uyarlanarak; GKF yöntemine oranla daha yüksek başarıma sahip batarya yönetim sistemi tasarlanarak, gerçekleştirilmiştir. Gerçeklenen sistem Ek-A'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 : Şarj durumu kestirim yöntemlerine göre hata oranları

İkinci Dereceden Thevenin Eşdeğer Devre Modeli					
Akım Profilleri	Başlangıç Şarj Durumu	GKF		UGKF	
		Karesel Ortalama Hata	Maksimum Hata	Karesel Ortalama Hata	Maksimum Hata
UDDS	50%	5.12%	50%	2.11%	50%
	100%	4.07%	9.12%	1.22%	1.73%
LA92	50%	5.96%	50%	2.66%	50%
	100%	5.80%	12.02%	1.43%	1.92%

Son yıllarda yapılan çalışmalarda yapay zekâ tabanlı yenilikçi yöntemlerle batarya modellemesi ve şarj durumu kestirimi yüksek başarımla gerçekleştirilmektedir. Fakat bu yöntemler çok sayıda test verisine ihtiyaç duymaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Lipschultz, A. (2015). Batteries in a portable world. *Biomedical Instrumentation & Technology*, 49(2), 134-134.
- [2] Aktaş, M., Baygüneş, B., KIVRAK, S., Çavuş, B., & Sözen, F. (2020). Elektrikli araç için düşük maliyetli bir batarya yönetim sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 227-238.
- [3] Amirkhani, A., Haghanifar, A., & Mosavi, M. R. (2019). Electric Vehicles Driving Range and Energy Consumption Investigation: A Comparative Study of Machine Learning Techniques. In 2019 5th Iranian Conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS) (pp. 1-6). IEEE.
- [4] Kadav, P., & Asher, Z. D. (2019, October). Improving the range of electric vehicles. In 2019 Electric Vehicles International Conference (EV) (pp. 1-5). IEEE.
- [5] Darwish, M., Ioannou, S., Janbey, A., Amreiz, H., & Marouchos, C. C. (2021, October). Review of battery management systems. In 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Jadhav, D. R., & Patil, D. (2022, February). State of Charge Estimation of Electrical Vehicle Battery. In 2022 Interdisciplinary Research in Technology and Management (IRTM) (pp. 1-7). IEEE.
- [7] Zhu, W., Ling, C., Yuan, X., Shi, M., Miao, H., & Lu, X. (2021, December). Research on Estimation of State of Charge of Lithium-Ion Battery. In 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC) (pp. 1348-1354). IEEE.
- [8] Spagnol, P., Rossi, S., & Savaresi, S. M. (2011, September). Kalman filter SoC estimation for Li-ion batteries. In 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) (pp. 587-592). IEEE.
- [9] Zhang, C., Li, K., Mcloone, S., & Yang, Z. (2014, June). Battery modelling methods for electric vehicles-A review. In 2014 European Control Conference (ECC) (pp. 2673-2678). IEEE.
- [10] Saboo, K., Mangsule, R., & Deshpande, A. S. (2021, March). State of Charge (SoC) Estimation of Li-Ion Battery. In 2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI) (pp. 340-345). IEEE.
- [11] Shiekh, S. S., Khan, K. L., Mir, T. N., & Bhat, A. H. (2022, March). Analysis of Extended Kalman Filter for SOC Estimation in Lithium-ion Batteries. In 2022 Second International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T) (pp. 1-6). IEEE..

- [12] **Manthopoulos, A., & Wang, X.** (2020, October). A review and comparison of lithium-ion battery SOC estimation methods for electric vehicles. In *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 2385-2392). IEEE.
- [13] **Emanet, B., & Kıyak, İ.** (2021, October). Performance Effective Battery Management System (BMS) Design of Mini Electric Vehicles. In *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (pp. 744-749). IEEE.
- [14] **Rzepka, B., Bischof, S., & Blank, T.** (2021). Implementing an extended Kalman filter for SOC estimation of a Li-ion battery with hysteresis: A step-by-step guide. *Energies*, 14(13), 3733.
- [15] **Buccolini, L., Ricci, A., Scavongelli, C., DeMaso-Gentile, G., Orcioni, S., & Conti, M.** (2016, June). Battery Management System (BMS) simulation environment for electric vehicles. In *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [16] **Cao, J., Schofield, N., & Emadi, A.** (2008, September). Battery balancing methods: A comprehensive review. In *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1-6). IEEE.
- [17] **Gao, F., Hui, D., Yang, K., Zhao, F., Yang, L., Yu, H., ... & Fan, M.** (2020, October). Study on thermal effect of LiFePO₄/C battery with different capacity retention rate in adiabatic environment. In *2020 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture (AIAM)* (pp. 345-348). IEEE.
- [18] **Shukla, A. P., & Patel, R. A.** (2022, January). Battery Management System by Passive Cell Balancing for Electric vehicle. In *2022 2nd International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [19] **Valda, L., & Kosturik, K.** (2015, September). Comparison of Li-ion active cell balancing methods replacing passive cell balancer. In *2015 International Conference on Applied Electronics (AE)* (pp. 267-270). IEEE.
- [20] **Sangwan, V., Sharma, A., Kumar, R., & Rathore, A. K.** (2016, November). Estimation of optimal li-ion battery parameters considering c-rate, SOC and temperature. In *2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)* (pp. 1-6). IEEE..
- [21] **“Technical Information of LG 18650HG2 (3.0Ah).”** Accessed: April 16,2023.[Onliene]. Available: <https://btobattery.com/product-attachment,pr96.html>.
- [22] **Rezvanizani, S. M., Liu, Z., Chen, Y., & Lee, J.** (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. *Journal of power sources*, 256, 110-124.

- [23] Wang, H., Tsang, K. F., Wu, C. K., Wei, Y., Liu, Y., & Lai, C. S. (2022). IEEE P2668 Compatible Evaluation Strategy for Smart Battery Management Systems. *Sensors*, 22(16), 6057.
- [24] Popp, A., Fechtner, H., Schmuelling, B., Kremzow-Tennie, S., Scholz, T., & Pautzke, F. (2021, October). Battery Management Systems Topologies: Applications: Implications of Different Voltage Levels. In *2021 IEEE 4th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)* (pp. 43-50). IEEE
- [25] Gao, D. W. (2015). Interfacing Between an ESS and a Microgrid. *Energy Storage for Sustainable Microgrid*, 79-121.
- [26] Stan, A. I., Świerczyński, M., Stroe, D. I., Teodorescu, R., & Andreasen, S. J. (2014, May). Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications—An overview. In *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)* (pp. 713-720). IEEE.
- [27] Meng, J., Luo, G., Ricco, M., Swierczynski, M., Stroe, D. I., & Teodorescu, R. (2018). Overview of lithium-ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles. *Applied sciences*, 8(5), 659.
- [28] Barcellona, S. (2017, June). A novel lithium ion battery model: A step towards the electrochemical storage systems unification. In *2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* (pp. 416-421). IEEE.
- [29] Kleiner, J., Stuckenberg, M., Komsijska, L., & Endisch, C. (2021). Advanced monitoring and prediction of the thermal state of intelligent battery cells in electric vehicles by physics-based and data-driven modeling. *Batteries*, 7(2), 31.
- [30] HUANG, K., Wang, Y., & Juqiang, F. E. N. G. (2020, December). Research on equivalent circuit Model of Lithium-ion battery for electric vehicles. In *2020 3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)* (pp. 492-496). IEEE.
- [31] Zhao, R., Kollmeyer, P. J., Lorenz, R. D., & Jahns, T. M. (2018). A compact methodology via a recurrent neural network for accurate equivalent circuit type modeling of lithium-ion batteries. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(2), 1922-1931.
- [32] Hinz, H. (2019). Comparison of lithium-ion battery models for simulating storage systems in distributed power generation. *Inventions*, 4(3), 41.
- [33] Rahmoun, A., & Biechl, H. (2012). Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(7), 152-156.
- [34] Pai, K. J. (2019). A reformatory model incorporating PNGV battery and three-terminal-switch models to design and implement feedback compensations of LiFePO₄ battery chargers. *Electronics*, 8(2), 126..
- [35] Li, Z., Shi, X., Shi, M., Wei, C., Di, F., & Sun, H. (2020, May). Investigation on the impact of the HPPC Profile on the battery ECM parameters'

offline identification. In *2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)* (pp. 753-757). IEEE..

- [36] **Liu, R., & Zhang, C.** (2021). An active balancing method based on SOC and capacitance for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Frontiers in Energy Research*, 9, 773838.
- [37] **Elmahdi, F., Ismail, L., & Noureddine, M.** (2021). Fitting the OCV-SOC relationship of a battery lithium-ion using genetic algorithm method. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 234, p. 00097). EDP Sciences..
- [38] **Nacu, R. C., & Fodorean, D.** (2022). Lithium-Ion Cell Characterization, Using Hybrid Current Pulses, for Subsequent Battery Simulation in Mobility Applications. *Processes*, 10(10), 2108.
- [39] **Yang, K., Tang, Y., & Zhang, Z.** (2021). Parameter identification and state-of-charge estimation for lithium-ion batteries using separated time scales and extended kalman filter. *Energies*, 14(4), 1054.
- [40] **Chiasson, J., & Vairamohan, B.** (2003, June). Estimating the state of charge of a battery. In *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.* (Vol. 4, pp. 2863-2868). IEEE.
- [41] **Xiong, R., & Yu, Q.** (2017). Open circuit voltage and state of charge online estimation for lithium ion batteries. *Energy Procedia*, 142, 1902-1907.
- [42] **Fathoni, G., Widayat, S. A., Topan, P. A., Jalil, A., Cahyadi, A. I., & Wahyunggoro, O.** (2017, October). Comparison of State-of-Charge (SOC) estimation performance based on three popular methods: Coulomb counting, open circuit voltage, and Kalman filter. In *2017 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT)* (pp. 70-74). IEEE.
- [43] **Li, Q., Li, R., Ji, K., & Dai, W.** (2015, November). Kalman filter and its application. In *2015 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)* (pp. 74-77). IEEE..
- [44] **da Costa, S. C. L., Araujo, A. S., & da Silva Carvalho, A.** (2016, June). Battery state of charge estimation using extended Kalman filter. In *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)* (pp. 1085-1092). IEEE.
- [45] **Zhi, L., Peng, Z., Zhifu, W., Qiang, S., & Yinan, R.** (2017). State of charge estimation for Li-ion battery based on extended Kalman filter. *Energy Procedia*, 105, 3515-3520.
- [46] **Stroe, A. I., Stroe, D. I., Swierczynski, M., Teodorescu, R., & Kær, S. K.** (2017, May). Lithium-ion battery dynamic model for wide range of operating conditions. In *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)* (pp. 660-666). IEEE..
- [47] **Zhang, M., & Fan, X.** (2020). Review on the state of charge estimation methods for electric vehicle battery. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), 23.

- [48] **Zhi, L., Peng, Z., Zhifu, W., Qiang, S., & Yinan, R.** (2017). State of charge estimation for Li-ion battery based on extended Kalman filter. *Energy Procedia*, 105, 3515-3520.
- [49] **Khanum, F., Louback, E., Duperly, F., Jenkins, C., Kollmeyer, P. J., & Emadi, A.** (2021, June). A Kalman filter based battery state of charge estimation MATLAB function. In *2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)* (pp. 484-489). IEEE.
- [50] **Becker, A.** (2018). Kalman Filter. *Dipetik Juli*, 1, 2020.
- [51] **Luo, Z., Li, Y., & Lou, Y.** (2015, August). An adaptive Kalman filter to estimate state-of-charge of lithium-ion batteries. In *2015 IEEE International Conference on Information and Automation* (pp. 1227-1232). IEEE.
- [52] **Ma, D., Gao, K., Mu, Y., Wei, Z., & Du, R.** (2022). An adaptive tracking-extended kalman filter for soc estimation of batteries with model uncertainty and sensor error. *Energies*, 15(10), 3499.
- [53] **Zhou, W., Zheng, Y., Pan, Z., & Lu, Q.** (2021). Review on the battery model and SOC estimation method. *Processes*, 9(9), 1685.
- [54] **Kollmeyer, P., Vidal, C., Naguib, M., & Skells, M.** (2020). Lg 18650HG2 li-ion battery data and example deep neural network xEV SOC estimator script. *Mendeley Data*, 3, 2020.



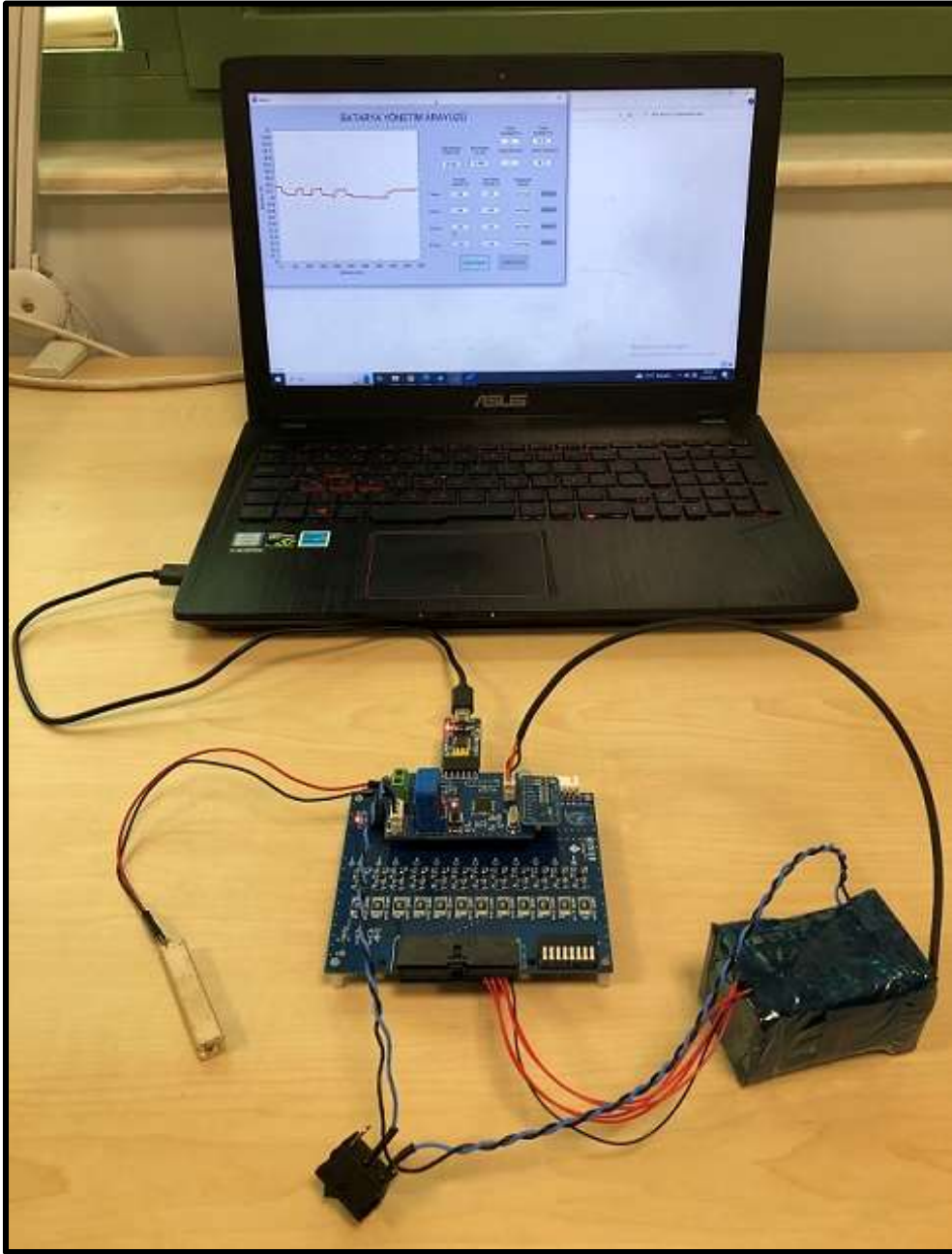
EKLER

EK A : Batarya Yönetim Sistemi Kurulumu

EK B : Parametre Kestirim Kodu

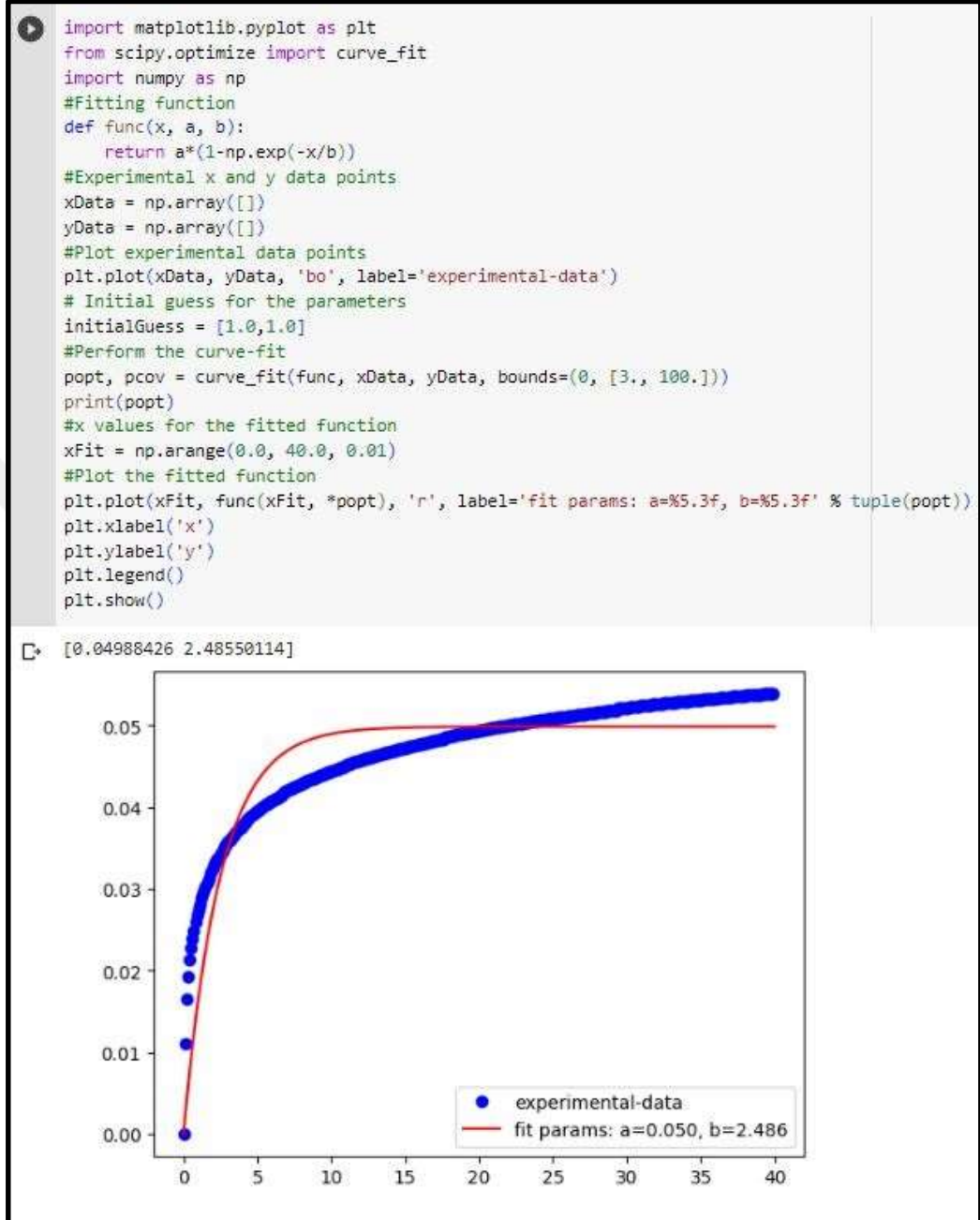


EK A



Şekil A. 1 : Batarya yönetim sistemi kurulumu

EK B



Şekil B.1 : Parametre kestirim kodları



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mustafa Mert SERİNBAŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014-2019, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
- **Lisans** : 2014-2020, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2019-2020 PAVOTEK, Donanım Tasarım Mühendisi
- 2020-Günümüz TÜBİTAK BİLGEM, Donanım Tasarım Mühendisi

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- **Serinbaş, M. M., & Gülbahçe, M. O.** (2022) Batarya Şarj Durumu Kestirim Yöntemleri Üzerine İnceleme Review on the SOC Estimation Methods. *GÜÇ SİSTEMLERİ KONFERANSI*, Ekim 18-19, 2022 Ankara, Türkiye