

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİNİ SINIF ELEKTRİKLİ İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN BATARYA
KAPASİTESİ KESTİRİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Muharrem Aykan KÜLÜNK

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

NİSAN 2022

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Muharrem Aykan KÜLÜNK

ÖZET

Yüksek Lisans

MİNİ SINIF ELEKTRİKLİ İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN BATARYA KAPASİTESİ KESTİRİMİ

Muharrem Aykan KÜLÜNK

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Tarih: Nisan 2022

Yeniden doldurulabilir ikincil bataryalar; cep telefonu, dizüstü bilgisayar gibi elektronik cihazların, taşınabilirlik ihtiyacını karşılamak amacıyla birincil bataryaların ekonomik ve uzun ömürlü alternatifleri olarak piyasaya çıkmış olsa da günümüzde hava araçlarından otomobillere kadar elektrikle çalışan her türlü sisteme güç vermektedir. İkincil bataryalara, yeniden doldurulabilme yeteneği aynı zamanda limitlerinin dışına zorlandığında kolayca yanma ve patlama gibi güvenlik zafiyetini de beraberinde getirmiştir.

Yeniden doldurulabilir bataryaları güvenli ve verimli olarak kullanmak amacıyla durumunu anlık olarak izleyen ve kontrol edebilen batarya yönetim sistemleri görev yapmaktadır. Batarya yönetim sistemleri, sensörler vasıtasıyla yük altındaki bir bataryanın terminalinden akımını, gerilimini sürekli olarak ölçer. Bataryanın deşarjı esnasında aşırı boşalmasını ve çok yüksek akım çekilmesini önler. Aynı şekilde şarj esnasında da aşırı şarj olmasını ve yüksek akım ile şarj edilmesini engellemek için çalışmaktadır. Şarj esnasında limitlerin dışına çıkılmasını önlemek dışında, birden fazla hücrenin seri ya da paralel bağlanması ile elde edilmiş batarya paketinde, hücrelerin dengeli olarak şarj edilmesinden de sorumludur.

Batarya yönetim sistemleri, güvenliği sağlama görevinin yanı sıra; bataryanın anlık kapasitesi, sağlığı, kalan ömrü gibi durumlarını hesaplamak için tahmin algoritmaları çalıştırmaktadır. Tahmin edilmeye çalışılan batarya durumları içerisinde batarya kapasitesi, bataryayı kullanan aracın görevine başlamadan önce uygun planlamayı yapabilmesi ve görev esnasında uygun stratejiyi belirleyebilmesi için oldukça kritik bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır. Batarya kapasitesini hesaplamak için literatürde; Coulomb sayacı, açık devre gerilim tahmini, elektrokimyasal empedans spektroskopisi, elektriksel eşdeğer devre modelleri, elektrokimyasal hücre modelleri, uyarlamalı filtre temelli kestirim ya da yapay zekâ temelli tahmin yöntemleri bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, kestiricinin donanımı ve gerçek zamanlı yazılımı hazırlanarak, sabit kanatlı elektrik motor tahrikli insansız hava aracı üzerinde denenmiştir. Tahmin algoritmasının gerçek zamanlı olarak bir mikrodenetleyici üzerinde koşması sebebiyle, önerilen tahmin yöntemlerinden, doğruluk hassasiyet ve karmaşıklık takası göz önünde bulundurularak, uyarlamalı filtre temelli kestirim yöntemi olan Kalman filtresi uygulanmıştır. Batarya model parametrelerinin ölçülmesi ve test edilmesi amacıyla laboratuvar ortamı kurulmuş ve benzetim çalışmaları yapılmıştır. Hava aracı üzerinde bulunan batarya kestirici donanımının uçuş testi ile doğrulaması yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeniden doldurulabilir bataryalar, İkincil bataryalar, Batarya kapasitesi tahmini, Kalman filtresi

ABSTRACT

Master of Science

STATE OF CHARGE ESTIMATION FOR MINI CLASS UNMANNED AIR VEHICLE

Muharrem Aykan KÜLÜNK

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Coşku Kasnakoglu

Date: April 2022

Rechargeable secondary batteries; It has been introduced to the market as economical and long-lasting alternatives to primary batteries in order to meet the portability needs of electronic devices such as mobile phones and laptops. Today it powers all kinds of electrically powered systems, from aircraft to automobiles. Secondary batteries, the ability to be recharged, also brought safety weaknesses such as easily burning and bursting when forced beyond their limits.

In order to use rechargeable batteries safely and efficiently, battery management systems that can instantly monitor and control their status are in operation. Battery management systems continuously measure the current and voltage from the terminal of a battery under load by means of sensors. It prevents excessive discharge and very high current draw during discharge of the battery. Likewise, it works to prevent overcharging and charging with high current during charging. Apart from preventing going beyond the limits during charging, it is also responsible for the balanced charging of cells in the battery pack obtained by connecting more than one cell in series or parallel.

Battery management systems, in addition to the task of providing safety; It runs estimation algorithms to calculate the instantaneous capacity, health, remaining life of the battery. Among the battery situations that are tried to be estimated, the battery capacity stands out as a very critical parameter for the vehicle using the battery to make the appropriate planning before starting its mission and to determine the appropriate strategy during the mission. In the literature to calculate the battery capacity; There are Coulomb counter, open circuit voltage estimation, electrochemical impedance spectroscopy, electrical equivalent circuit models, electrochemical cell models, adaptive filter based estimation or artificial intelligence based estimation methods.

In this study, the hardware and real-time software of the estimator were prepared and tested on a fixed wing electric motor driven unmanned aerial vehicle. Since the estimation algorithm runs on a microcontroller in real time, the Kalman filter, which is an adaptive filter-based estimation method, has been applied, taking into account the trade-off between accuracy, sensitivity and complexity among the proposed estimation methods. In order to measure and test battery model parameters, a laboratory environment was established and simulation studies were carried out. The battery estimator hardware on the aircraft was verified by flight test and the results were evaluated.

Keywords: Rechargeable batteries, Secondary batteries, Battery capacity estimation, Kalman filter

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok kıymetli hocam Prof. Dr. Coşku KASNAKOğLU'na, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine çok teşekkür ederim.

Bu süreçte fikirlerini ve emeğini hiç esirgemeyen, tecrübeleriyle beni yönlendiren değerli arkadaşım Tuęrul AYDEMİR'e, tezimde kullandığım donanımın geliştirme sürecinde; donanım tasarım tecrübelerini, desteğini ve emeğini esirgemeyen değerli arkadaşım Uęur ŐAHİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde en büyük katkıya sahip olan ve hayatım boyunca destekleri ile hep yanımda olan sevgili aileme, çalıőmam boyunca beni yalnız bırakmayan sevgili eőim Kübra KÜLÜNK'e ve moral kaynağım olan oğlum Ali Barlas KÜLÜNK'e en içten sevgilerimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
RESİM LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1 İnsansız Hava Aracı Sistemleri ve Sınıflandırılması	5
2.2 Batarya Sistemleri	8
2.2.1 Birincil bataryalar.....	8
2.2.2 İkincil bataryalar	11
2.2.3 Lityum iyon bataryalar	13
2.2.4 Batarya parametreleri	16
2.2.5 Batarya yönetim sistemleri.....	19
2.3 Batarya Kapasitesi Kestirim Yöntemleri	21
2.4 Kestirim ve Kalman Filtresi	23
2.4.1 Sıralı olasılıksal çıkarım.....	23
2.4.2 Kalman filtresinin türetilmesi	26
2.4.3 Genişletilmiş kalman filtresi	28
2.4.4 Gerilim temelli kestirim	29
2.4.5 Akım temelli kestirim	29
2.4.6 Model temelli kestirim	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1 Batarya Modeli.....	33
3.1.1 Açık devre gerilimi	33
3.1.2 Coulomb sayma.....	34
3.1.3 Eşdeğer seri direnç	36
3.1.4 Difüzyon gerilimi	37
3.1.5 Histerezis gerilimi	40
3.1.6 Gelişmiş kendini düzeltmeli hücre modeli.....	43
3.1.7 ESC hücre modelinin genişletilmiş kalman filtresi uygulaması	44
4. SİSTEM MİMARİSİ	45
4.1 Genel Sistem Tasarımı	45
4.2 Donanım Mimarisi	46
4.3 Yazılım Mimarisi	47
4.4 Model Temelli Kestirim Mimarisi	48

4.5	Kalman Döngüsü.....	49
4.6	Test ve Değerlendirme Ortamları.....	50
4.6.1	Veri toplama ortamı	51
4.6.2	Laboratuvar test ortamı	52
4.6.3	Uçuş test ortamı.....	53
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	55
5.1	Parametrelerin Elde Edilmesi.....	55
5.1.1	Açık devre gerilimi-batarya kapasitesi eğrisinin elde edilmesi	55
5.1.2	Eşdeğer devre parametrelerinin elde edilmesi	58
5.2	Kestiricinin Test Edilmesi.....	63
5.2.1	Kestiricinin sabit akım profili ile test edilmesi	64
5.2.2	Kestiricinin dinamik akım profili ile test edilmesi.....	70
5.2.3	Kestiricinin test uçuşu ile test edilmesi	76
5.2.4	Sıcaklığın parametreler üzerindeki etkisi.....	79
6.	SONUÇLAR	81
	KAYNAKLAR.....	83
	EKLER.....	87

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : İHA Sınıfları	6
Şekil 2.2 : Birincil Bataryaların Gelişimi.....	8
Şekil 2.3 : Lityum-iyon Hücrenin Çalışma Prensibi	15
Şekil 2.4 : Aşırı Deşarj Durumunda Oluşan Tepkimeler	17
Şekil 2.5 : Aşırı Deşarj Durumdaki Hücrenin Tepkisi.....	17
Şekil 2.6 : Batarya Yönetim Sistemi Blok Şeması.....	20
Şekil 2.7 : Model Temelli Kestirim Blok Şeması	30
Şekil 3.1 : Farklı Tipteki Lityum Bataryaların Açık Devre Gerilimi-Batarya Kapasitesi Eğrileri	34
Şekil 3.2 : Basit Batarya Eşdeğer Devre Modeli.....	34
Şekil 3.3 : Batarya Seviyesi Bağımlı Eşdeğer Devre Modeli	35
Şekil 3.4 : Seri Direnç Eklenmiş Eşdeğer Devre Modeli.....	36
Şekil 3.5 : Polarizasyon Oluşumu	37
Şekil 3.6 : Difüzyon Gerilimi Eşdeğer Devre Modeli.....	38
Şekil 3.7 : Lityum-İyon Hücresinin Darbe Cevabı	39
Şekil 3.8 : Histerezis Gerilimi Deney Sonuçları	40
Şekil 3.9 : Açık Devre Gerilimi Çıkarılmış Histerezis Grafiği.....	41
Şekil 3.10 : ESC Modeli	43
Şekil 4.1 : Genel Sistem Mimarisi Blok Şeması	45
Şekil 4.2 : Donanım Mimarisi Blok Şeması.....	46
Şekil 4.3 : Çok Katmanlı Yazılım Mimarisi	47
Şekil 4.4 : Yazılım Akış Diyagramı	47
Şekil 4.5 : Model Temelli Kestirim Blok Şeması	48
Şekil 4.6 : Kalman Filtresi Blok Şeması	49
Şekil 4.7 : Test ve Değerlendirme Ortamı Blok Şeması	50
Şekil 4.8 : Veri Toplama Ortamı Blok Şeması	51
Şekil 4.9 : Laboratuvar Test Ortamı Blok Şeması	52
Şekil 4.10 : Uçuş Test Ortamı Blok Şeması.....	53
Şekil 5.1 : C/20 Deşarj Eğrisi.....	55
Şekil 5.2 : Sabit Akım-Sabit Gerilim Bölgeleri	56
Şekil 5.3 : C/20 Şarj Eğrisi.....	56
Şekil 5.4 : Şarj ve Deşarj Eğrilerinin Ortalaması.....	57
Şekil 5.5 : Açık Devre Gerilimi - Batarya Kapasitesi İlişkisi	57
Şekil 5.6 : Simulink Batarya Modeli.....	58
Şekil 5.7 : HV Lipo Darbe Cevabı Sonucu	59
Şekil 5.8 : Azami Negatif Polarizasyon	60
Şekil 5.9 : Darbe Akım Profili	61
Şekil 5.10 : Bölgelere Ayrılmış Darbe Akım Cevabı	61
Şekil 5.11 : Parametre Optimizasyonu.....	62
Şekil 5.12 : Sabit Akım Profili	64
Şekil 5.13 : Sabit Akım ile Kestirici Terminal Gerilimi Tahmini.....	65

Şekil 5.14 : Sabit Akım ile Batarya Kapasitesi Tahmini.....	66
Şekil 5.15 : Sabit Akım Kestirici Hatası	66
Şekil 5.16 : Bölgelere Ayrılmış Sabit Akım Kapasite Tahmin Grafiği	67
Şekil 5.17 : Sabit Akım Korelasyon Katsayıları	68
Şekil 5.18 : Sabit Akım Tahmin Hatası İstatistik Grafiği	69
Şekil 5.19 : Dinamik Akım Profili	70
Şekil 5.20 : Dinamik Akım ile Kestirici Terminal Gerilimi Tahmini	71
Şekil 5.21 : Dinamik Akım ile Batarya Kapasitesi Tahmini	72
Şekil 5.22 : Dinamik Akım Kestirici Hatası	72
Şekil 5.23 : Bölgelere Ayrılmış Dinamik Akım Kapasite Tahmin Grafiği.....	73
Şekil 5.24 : Dinamik Akım Korelasyon Katsayıları	74
Şekil 5.25 : Dinamik Akım Tahmin Hatası İstatistik Grafiği	75
Şekil 5.26 : Uçuş Testi Akım Profili	76
Şekil 5.27 : Uçuş Testi Terminal Gerilimi Tahmini.....	77
Şekil 5.28 : Durağan Batarya ile Batarya Kapasitesi Tahmini.....	78
Şekil 5.29 : Uçuş Testi Batarya Kapasitesi Tahmini.....	78
Şekil 5.30 : Sıcaklığın Parametreler Üzerindeki Etkisi.....	79
Şekil 5.31 : Farklı Sıcaklıklarda Kestirim Sonuçları.....	80
Şekil 5.32 : Farklı Sıcaklıklarda Kestirim Hatası.....	80

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Mini Sınıf Sabit Kanatlı Elektrikli İHA Parametreleri	7
Çizelge 2.2 : Mini Sınıf Döner Kanatlı Elektrikli İHA Parametreleri	7
Çizelge 2.3 : Birincil Bataryaların Karakteristikleri ve Uygulama Alanları.....	10
Çizelge 2.4 : İkincil Bataryaların Karakteristikleri ve Uygulama Alanları	12
Çizelge 2.5 : Doğrudan Ölçüm Yöntemleri	21
Çizelge 2.6 : Dolaylı Tahmin Yöntemleri.....	22
Çizelge 2.7 : Genel Gauss Sıralı Olasılıksal Çıkarım	25
Çizelge 2.8 : Kalman Filtresi	27
Çizelge 2.9 : Genişletilmiş Kalman Filtresi	28
Çizelge 5.1 : Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Parametreler.....	62
Çizelge 5.2 : Sabit Akım Tahmin Hatası İstatistik Tablosu.....	69
Çizelge 5.3 : Dinamik Akım Tahmin Hatası İstatistik Tablosu	75

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AGL	: Above Ground Level – Yer Seviyesinin Üstünde
BYS	: Batarya Yönetim Sistemi
CAN Bus	: Controller Area Network Bus - Kontrol Alan Ağı Veri Yolu
CC-CV	: Constant Current Constant Voltage – Sabit Akım Sabit Gerilim
DC	: Direct Current – Doğru Akım
DMM	: Digital Multimeter – Sayısal Mutimetre
ESC	: Enhanced Self Correcting – Gelişmiş Kendini Düzeltmeli
GKF	: Genişletilmiş Kalman Filtresi
HALE	: High Altitude Long Endurance – Yüksek İrtifa Uzun Havada Kalış
I2C Bus	: Inter-Integrated Circuit Bus – Entegre Devreler Arası Veriyolu
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LCO	: Lityum Kobalt Oksit
LFP	: Lityum Demir Fosfat
Li/S	: Lityum Sülfür
LTO	: Lityum Titanat Oksit
MALE	: Middle Altiude Long Endurance – Orta İrtifa Uzun Havada Kalış
MSE	: Mean Squared Error – Ortalama Hata Karesi
MSL	: Mean Sea Level – Ortalama Deniz Seviyesi
NCM	: Nickel, Cobalt, Manganese – Nikel, Kobalt, Manganez
OCV	: Open Circuit Voltage – Açık Devre Gerilimi
PCI	: Peripheral Component Interconnect - Çevresel Bileşen Ara Bağlantısı
PXI	: PCI Extension for Instrumentation – Enstrümantasyon için PCI Uzantısı
RLS	: Recursive Least Square – Yinelemeli En Küçük Kareler
RUL	: Remaining Useful Life – Kalan Kullanılabilir Ömür
SEI	: Solid Electrolyte Interface – Katı Elektrolit Arayüzü
SOC	: State of Charge – Sarj Durumu
SOH	: State of Health – Sağlık Durumu
SOP	: State of Power – Güç Durumu

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Amper
Ah	Amper Saat
ft	Feet
g	Gram
l	Litre
lb	Libre
m	Metre
oz	Ons
V	Volt
Wh	Watt Saat

RESİM LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Resim 2.1 : Lityum-iyon Polimer Batarya Paketi Görünümü.....	18
Resim 4.1 : Batarya Veri Toplama Ortamı Görünümü.....	51
Resim 4.2 : Laboratuvar Test Ortamı Görünümü	52



1. GİRİŞ

Son yıllarda elektronik cihazların kullanımı, askeri alandan sağlık sektörüne, bilimsel görevlerden günlük hayata kadar her alana yayılmış durumdadır. Gün geçtikçe bu cihazların taşınabilirlik kavramı ön plana çıkmış ve akabinde enerji depolayabilen elemanların önemi artmıştır. Burada, elektrik yükünü soğurabilen, saklayabilen ve serbest bırakabilen, başka bir deyişle enerjiyi depolayabilme yeteneğine sahip olan kimyasal bir eleman olarak bataryalar kendini göstermektedir.

Elektronik cihazlara güç veren ilk kimyasal hücreler, birincil hücreler olarak adlandırılan tek kullanımlık batarya örnekleridir. Bu bataryalar radyo, kumanda, el feneri gibi cihazlara güç vererek, ihtiyaç anında hızlı çözüm sunabilmektedir.

Akabinde daha uzun ömürlü, ikincil hücreler olarak adlandırılan, yeniden doldurulabilir bataryalara ihtiyaç duyulmuştur. Piyasaya sürülen ilk yeniden doldurulabilir bataryalar cep telefonu, müzik çalar, dizüstü bilgisayar gibi elektronik cihazların taşınabilirlik ihtiyacından dolayı ortaya çıkmış ve bu cihazların tüm dünya pazarını kapsayacak kadar gelişmesinde kilit rol oynamıştır [1].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, eskiye nazaran daha yüksek güce ve deşarj oranlarına sahip, daha verimli ve uzun ömürlü yeniden doldurulabilir bataryalar, içten yanmalı motorların yerini almaya başlayan elektrikli itki sistemlerine güç üretecek seviyelere ulaşmıştır.

Günümüzde enerji ihtiyacımızı karşılamak amacıyla kullanılan fosil yakıtların, tükenme tehlikesi içerisinde olması ve kullanımının çevreye verdiği zararlar konusunda endişelerin artması da araştırmacıların yüksek verimli bataryalara karşı ilgisini artmıştır.

Fosil yakıtlı motorların yerine elektrikli itki sistemlerinin kullanım alanı olarak ilk akla gelen sektör otomotiv olsa da elektrikli insansız araçlar keşif-gözetlemeden kara, hava, demiryolu ve deniz taşımacılığına, tarım uygulamalarından altyapı gerektirmeyen kablosuz haberleşme sistemlerine kadar birçok alanda faaliyet göstermektedirler.

Dünya çapında bu araçların pazar payı, sivil ve askeri olmak üzere her geçen yıl katlanarak artmaktadır. Bütün bu gelişmelerin neticesinde doğan depo enerji ihtiyacı, yüksek enerji yoğunlukları ve uzun çevrim ömürleriyle, diğer batarya tiplerine nazaran çoğunlukla lityum temelli bataryalar tarafından karşılanmaktadır. Ancak hem lityum temelli bataryaların uzun ömürlü, verimli ve güvenli olarak kullanılabilmesi hem de bataryayı kullanan sistemin doğru stratejiyi belirleyebilmesi için bataryanın durumu hakkında bazı verilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu sebeplerle, lityum iyon bataryalardan maksimum verimi almak ve olası tehlikelerden kaçınmak için bahsi geçen veri edinme işlemlerini yürüten, BYS'lere (Batarya Yönetim Sistemleri) ihtiyaç duyulmaktadır. BYS, hücrenin sağlık durumunu ve kapasitesini kestirmek, sıcaklığını izlemek ve güvenli çalışma bölgesinin dışına çıkmasını engellemek gibi görevleri yürütür.

Lityum iyon bataryalar, yüksek özgül enerjiye, yüksek çıkış gücüne ve uzun ömre sahip olmaları sebebiyle büyük avantajlar vadetmektedirler. Dezavantajı ise bu bataryaların doğrusal olmayan ve zamanla değişen bir karakteristiğe sahip olmasıdır. Bu da batarya kapasitesinin, kendi kendine deşarj olma oranının ve kapasite kayıplarının zamanla değişeceği anlamına gelmektedir. Oluşan bu değişimler bataryadan alınan performansı düşürdüğü gibi aşırı deşarj durumlarına sebebiyet vererek ani güç kaybıyla birlikte, yanma ve patlama riskini de doğurmaktadır. Bütün bu sebepler doğrultusunda, bataryayı güvenli ve uzun ömürlü olarak kullanmak için bataryanın terminal geriliminin ve çekilen akımın izlenmesi, kapasite ve sağlık durumu kestiriminin yapılması gerekmektedir.

Batarya kapasitesi kestirim çalışmaları, günümüzde özellikle elektrikli otomobiller üzerine yoğunlaşmıştır ancak mini İHA (İnsansız Hava Aracı) sistemlerinin ihtiyaçları farklılık göstermektedir. Mini İHA'ların uçuş süresi, taşıdığı batarya büyüklüğüne bağlıdır fakat batarya büyüdükçe aracın ağırlığı da artacağından uçuş süresi tekrar düşüş gösterecektir. Optimum performans için tasarlanması gereken mini İHA batarya paketleri; maliyet, hacim ve ağırlık olarak farklı niteliklere sahiplerdir. Bu gereksinimleri sağlayabilen bataryalar otomotiv sektörüne kıyasla düşük kapasitelere sahiptir. Mini İHA'ların kullandığı bu düşük kapasitedeki bataryaların kapasite kestirimini doğru olarak yapabilmek, mini İHA'ların kısıtlı görev sürelerini önemli ölçüde etkilemektedir.

BYS’de, batarya kapasitesi verisinin hesaplanması en önemli konudur. Çünkü mini İHA’ların uçuş ve eve dönüş planlarını yapma ve görev değişim zamanlarını belirleme, batarya seviyesi azaldığında uygulanacak acil durum eylemlerini harekete geçirme gibi işlemler bu veri sayesinde mümkün olur. Ayrıca bataryayı tam verimle kullanıp, şarj-deşarj döngüsünü azaltarak, bataryanın ömrünü arttırmaya da katkı sağlamaktadır.

Literatürde batarya seviyesini hesaplamak için kullanılan çeşitli yöntemler mevcuttur [2]. Bunlardan Coulomb sayacı, açık devre gerilim tahmini veya elektrokimyasal empedans spektroskopisi gibi geri beslemesiz yöntemler yalnızca ideal koşullar altında çalışabilmektedir. Elektriksel eşdeğer devre modelleri veya elektrokimyasal hücre modelleri ise üreticiler tarafından sağlanmayan parametreleri elde etmek için kapsamlı araştırmaya ihtiyaç duymaktadır. Yapay zekâ temelli tahmin yöntemleri kapsamlı eğitim veri kümelerine ve yüksek işlem gücüne ihtiyaç duyar. Uyarlamalı filtre temelli kestirim yöntemleri ise model doğruluğuna aşırı bağımlıdır ve numerik istikrarsızlık gösterebilir. Önerilen yöntemlerden hiçbiri, her koşulda doğru, tamamen verimli ve güvenilir değildir. Tüm bu yöntemler, doğruluk ve karmaşıklık arasında bir takasa tabidir. Bu nedenle, algoritmanın seçimi, hedeflenen uygulamaya bağlı olarak tasarımcıya kalır. Bu çalışmada kestiricinin bir mikrodenetleyicide koşturulacağı göz önünde bulundurularak; doğruluk, karmaşıklık ve işlem yükü bakımından en uygun yöntem olarak uyarlamalı filtrelerden, genişletilmiş Kalman filtresi kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında, mini sınıf İHA’larda kullanılan lityum temelli bataryalar ele alınmıştır. Lityum temelli bataryaların çalışma prensipleri, farklı koşullardaki performansları, tehlike arz edebilecek davranışları incelenmiştir. Kullanılan batarya kestirim yöntemleri araştırılmış ve genişletilmiş Kalman filtresi kullanılarak, gerçek ölçüm verileri ile kestiricinin bilgisayar ortamında benzetimi yapılmıştır. Batarya kapasitesi kestiricisinin donanımı gerçekleştirilmiş ve kestirim algoritmasının gömülü yazılımı donanım üzerinde çalıştırılmıştır. Hazırlanan batarya kapasitesi kestiricisinin, bilinen akım profilleri ile laboratuvar ortamında testi yapılarak sonuçların, teorik olarak beklenen kapasite verileri ile arasındaki istatistiksel ilişki incelenmiştir. Son olarak batarya kapasitesi kestiricisi, uçuş testleri ile doğrulanarak, sonuçları değerlendirilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 İnsansız Hava Aracı Sistemleri ve Sınıflandırılması

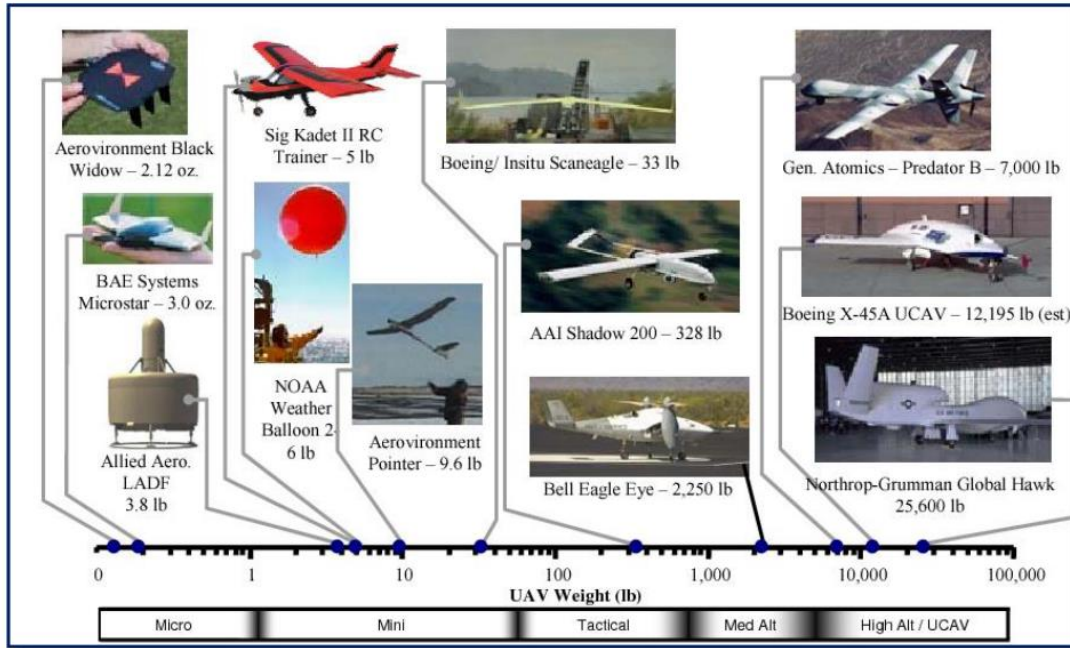
İHA'lar pilot taşımayan, uçuş bilgisayarı veya uzaktan verici ile çalıştırılabilen, faydalı yüke sahip olabilen motorlu hava araçlarıdır. İnsansız hava araçlarının tarihine bakıldığında konuyla ilgili yapılan araştırmalar, İHA veya dron kavramının 1800'lerin ortalarına, Avusturya'nın Venedik'e saldırmak için taktik bir araç olarak insansız bomba dolu bir balon gönderdiği zamanlara kadar uzandığını göstermektedir. Bugün gördüğümüz İHA'ların gelişimi 1900'lerin başlarına dayanmaktadır. Bu tür insansız hava araçları, başlangıçta askeri personeli eğitmek için hedef tatbikatı amacıyla kullanılmaktaydı. Yayınlanan makaleler, İHA konseptini göstermeye yönelik ilk girişimin 1943'te yapıldığını ortaya koymaktadır. O zamandan beri, çeşitli ticari ve askeri uygulamalar için İHA teknolojisi geliştirilmiştir. İkinci Dünya Savaşı sırasında ordu topçularını eğitmek ve saldırı görevlerini uçurmak için daha fazla İHA geliştirilmiştir. Hitler tarafından, müttefik savaşçıları ve bombardıman uçaklarını yok etmek için Alman bilim adamlarına ve mühendislere, 1951'de Teledyne Ryan Firebee firmasının kullanmış olduğu minyatür jet motorlarını tasarlamaları ve geliştirmelerini emredilmiştir. Beechcraft Company de 1955'te Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Donanması için İHA geliştirmek için pazara girmiştir. 1960'lı yılların başlarında ABD Savunma bakanlığı tarafından başlatılan İHA programları, 11 Eylül 2001 saldırılarından sonra, geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır [3].

Günümüzde İHA'ların kullanım alanları bilimsel çalışmalar, askeri uygulamalar ve ticari amaçlı kullanım olmak üzere üç ana başlığa ayrılmaktadır [4]. Bilim araştırmalar ve ticari amaçlarla, tarım, sanayi, ulaşım, iletişim, gözetim ve çevre uygulamalarında geniş kullanım alanı bulmuştur. Hassas tarımda mahsul sağlığı izleme, mahsul verimi ve hasar değerlendirmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Tarımın yanı sıra, izdiham riskini azaltmak için arkeolojik araştırmalarda ve yoğun bölgelerde trafik kontrolünün sürdürülmesinde de kullanılmaktadır. Rekreasyon sektöründe, fotoğraf ve film yapımında özel efektler için İHA teknolojisi yaygın olarak başvurulmaktadır [5].

İnsansız sistemler, öncelikle askeri amaçlı olarak ortaya çıktığı ve ülkelerin ihtiyaçları doğrultusunda zamanla farklı özelliklere sahip olacak şekilde türediği için bu sistemlerin sınıflandırılmasında çok net çizgiler bulunmamaktadır [6].

ABD Savunma Bakanlığı 2005'te, İHA'ları "bir insan operatörü taşımayan, uçmak için aerodinamik kuvvetleri kullanan, motorlu hava aracıdır. Otonom olarak uçabilir veya uzaktan kumanda edilebilir, tek kullanımlık veya geri getirilebilir ve ölümcül veya ölümcül olmayan bir yük taşıyabilir." şeklinde tanımlamaktadır. Daha sonra yine ABD Savunma Bakanlığı tarafından 2013'te "bileşenleri, insansız bir hava aracını kontrol etmek için gerekli ekipman, ağ ve personeli içeren bir sistem" olarak tanımlanmıştır [7].

Bu araçların sınıflandırılması konusunda yapılan çoğu çalışma (Austin, 2011; Anderson, 2013; Cai, 2014; Gupta, 2013; Hasanalyan, 2017; Weibel, 2014) İHA'ları, HALE (High Altitude Long Endurance) (Yüksek İrtifa Uzun Havada Kalış) İHA, MALE (Medium Altitude Long Endurance) (Orta İrtifa Uzun Havada Kalış) İHA, Taktik İHA, Küçük İHA, Mini ve Mikro İHA olarak sınıflandırmaktadır. Sınıflandırma için kullanılan parametreler, küçük değişikliklerle birlikte dayanıklılık, menzil, irtifa ve ağırlığı içermektedir [6]. Şekil 2.1'de insansız hava aracı sınıflandırmaları ve hava aracı örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : İHA Sınıfları. [6]

Marin (2014), 25-150 kg ağırlığa sahip, 10 km'den az menzil ve 150-300 m AGL (Above Ground Level) (Yer Seviyesinin Üstünde) irtifada 2 saatten daha süre hava kalabilen İHA'lara, Gupta (2013), 2-20 kg ağırlığa sahip, 25 km menzil ve 3000 ft. AGL irtifada uçabilen İHA'lara, Austin (2011) ise 30 km menzile sahip İHA'lara, mini İHA sınıflandırması yapmıştır [6].

Mini İHA için yapılan sınıf tanımlamalarında da kesin çizgiler bulunmamaktadır. Çizelge 2.1'de sabit kanatlı ve Çizelge 2.2'de döner kanatlı olmak üzere bazı üreticilerin mini İHA sınıfında kullandığı parametreler gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : Mini Sınıf Sabit Kanatlı Elektrikli İHA Parametreleri. [6] [8]

Platform	Üretici	Kanat Açıklığı (m)	Menzil (km)	İrtifa (m - MSL)	Havada Kalma Süresi	Azami Kalkış Ağırlığı (kg)
RQ-11B Raven	Aero Vironment	1.4	10	4419	90 dk	1.9
BirdEye 650	Israel Aerospace Industries	3	20	457	240 dk	11
Bayraktar Mini İHA	Kale-Baykar	2	15	1000	80 dk	3.5
Scan Eagle	Boeing	3.1	-	5000	22 saat	18
Orbiter II	Aeronautics Defense Systems	3	50	5486	180 dk	10.3
Alpagu	STM	1	10	3500	15 dk	2

Çizelge 2.2 : Mini Sınıf Döner Kanatlı Elektrikli İHA Parametreleri. [6] [8]

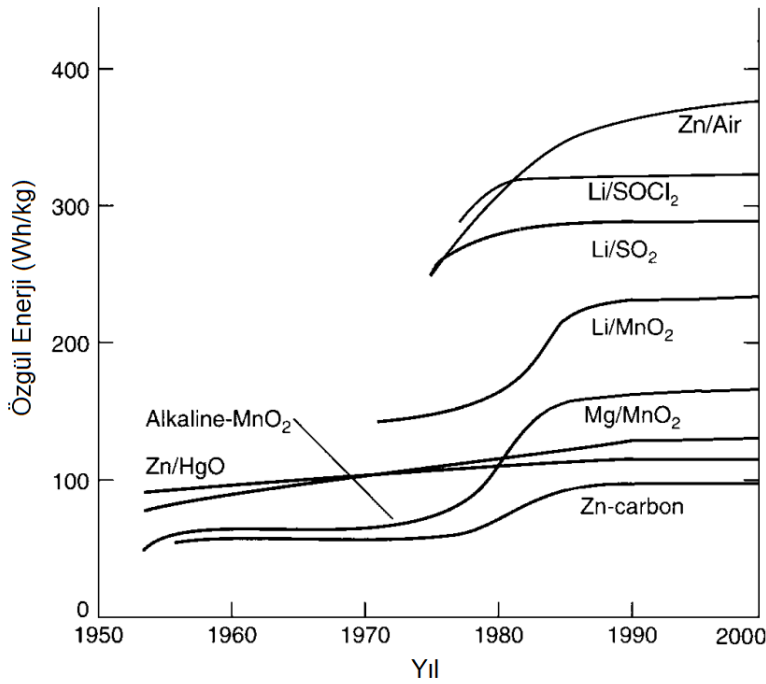
Platform	Üretici	Rotor Çapı (m)	Menzil (km)	İrtifa (m - MSL)	Havada Kalma Süresi	Azami Kalkış Ağırlığı (kg)
RMAX Type II	Yamaha Motor Company	3.1	0.15	2800	60 dk	94
Cypher	Sikorsky Aircraft	1.22	18	2438	120 dk	120
Vapor-55	Aero Vironment	2.29	8	3657	60 dk	24.9
Israel Aerospace Industries	Panther VTOL	8	75	3048	6 saat	63.5
Kargu	STM	0.35	10	2450	30 dk	22

2.2 Batarya Sistemleri

2.2.1 Birincil bataryalar

Birincil bataryalar, aydınlatma, iletişim cihazları, işitme cihazları, fotoğraf ekipmanları, saatler veya oyuncaklar gibi birçok cihazın, şebeke gerilimine ihtiyaç duymadan çalışmasını sağlayabilecek uygun güç kaynaklarıdır. Bu bataryaların, basit ve kolay kullanımlı olması, bakım gerektirmemesi ya da çok az gerektirmesi, farklı uygulamalara uygun boyutlarının bulunması gibi avantajları onu kullanışlı hale getirmiştir. Ayrıca uygun maliyetlerle üretilen bu bataryalar, iyi bir raf ömrüne ve makul güç yoğunluğuna sahip olmasının yanı sıra güvenli olması sebebiyle de 100 yılı aşkın süredir tercih edilmektedirler [1].

İkinci dünya savaşına kadar yaygın olarak çinko-karbon bataryalar kullanılmış ancak savaş ve sonrası dönemde; farklı batarya türlerinde de önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bataryalar, yüksek sıcaklıklarda uzun süre süre depolanabilecek hale getirilmiştir ve sıfırın altındaki sıcaklıklarda çalışabilecek şekilde geliştirilmiştir. Ayrıca hücre içerisinde kullanılan malzemeler üzerine yapılan çalışmalar ile özgül enerji de zamanla artırılmıştır. Birincil bataryaların özgül enerjisinin yıllara göre gelişimi Şekil 2.2’de gösterilmiştir [1].



Şekil 2.2 : Birincil Bataryaların Gelişimi. [1]

Birincil bataryalarda, her ne kadar birkaç anot-katod kombinasyonu denendiyse de yalnızca birkaçı pratik başarı elde edebilmiştir. Bunlardan çinko, iyi elektrokimyasal davranışı, yüksek elektrokimyasal eşdeğerliği, sulu elektrolitlerle uyumluluğu, oldukça iyi raf ömrü, düşük maliyeti ve bulunabilirliği nedeniyle birincil piller için açık ara en popüler anot malzemesi olmuştur. Alüminyum, yüksek elektrokimyasal potansiyeli, elektrokimyasal eşdeğerliği ve bulunabilirliği nedeniyle ilgi çekicidir. Ancak pasifleştirme ve genel olarak sınırlı elektrokimyasal performansı nedeniyle, pratik bir aktif birincil pil sisteminde başarılı olamamıştır. Magnezyum uygun elektriksel özelliklere ve düşük maliyete sahiptir. Ayrıca yüksek enerji yoğunluğu ve iyi raf ömrü nedeniyle özellikle askeri uygulamalar için aktif olarak kullanılmıştır. Çinko/alkalin, mangan dioksit, çinko karbon bataryalar pazarda büyük pay elde etmesine rağmen, zamanla cıva içeren ve tek kullanımlık olan bu batarya atıklarının oluşturmuş olduğu çevresel kaygılar, cıva kullanan bataryaların aşamalı olarak kaldırılmasına yol açmıştır. Bu sebeple, cıva kullanan bataryaların yerini alabilecek çinko/hava ve lityum bataryalar geliştirilmeye başlanmıştır. Bu dönemde önemli bir başarı, anot aktif malzemesi olarak metalik lityum kullanan bir dizi lityum bataryanın geliştirilmesi ve pazarlanmış olmasıdır [1].

1970'lerde lityum anotlu ve susuz elektrolitli birincil hücreler geliştirilmiştir. Özellikle, Japon şirket Matsushita, hücre uygulaması için alışılmadık olan perflorlu karbondan yapılmış pozitif elektrotun aktif malzemesi ile 1973'te bataryaları piyasaya sürmüştür. Bu hücrelerdeki elektrolit, propilen karbonat içinde bir lityum perklorat çözeltisi olarak görülmektedir. Daha sonra, 1975'te bir başka Japon şirketi olan Sanyo, lityum anot ve geleneksel mangan dioksit katotlu bir hücre geliştirmede başarı elde etmiştir. Rekor seviyede yüksek özgül kapasite ve son derece negatif bir standart potansiyel ile karakterize edilen metalik lityumun kullanılması, bilinen tüm kimyasal güç kaynakları çeşitlerine kıyasla enerji yoğunluğunda önemli bir artışa neden olmuştur. Tüm birincil lityum hücrelerde, negatif elektrot olarak metalik lityumdan kullanılmıştır [9].

Son zamanlarda, tüm metaller arasında en yüksek enerji yoğunluğuna ve standart potansiyele sahip olan lityuma ilgi artmıştır. Lityumun kararlı olduğu bir dizi farklı susuz elektrolit ve farklı katot malzemeleri kullanan lityum anot batarya sistemleri, birincil sistemlerin performans özelliklerinde daha yüksek enerji yoğunluğunu ve güç yoğunluğunu mümkün kılmaktadır.

Çizelge 2.3’de farklı tiplerdeki birincil bataryaların özellikleri ve kullanım alanlarına yer verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Birincil Bataryaların Karakteristikleri ve Uygulama Alanları. [1]

Sistem	Karakteristik	Uygulama
Çinko-Karbon	Yaygın, düşük maliyetli, çeşitli boyutlarda bulunabilir.	El feneri, radyo, oyuncak
Magnezyum	Yüksek kapasiteli, uzun raf ömrü	Askeri alıcı-vericiler
Mercad	Uzun raf ömrü, düşük ve yüksek sıcaklık performansı iyi, düşük enerji yoğunluğu	Zorlayıcı sıcaklık koşullarında uzun ömür gerektiren özel uygulamalarda
Alkalin	En popüler genel amaçlı batarya, düşük sıcaklıkta çalışma, düşük maliyet	Batarya ile çalışan, taşınabilir cihazlarda çok yaygın
Gümüş/Çinko	Yüksek kapasite, düz deşarj eğrisi, uzun raf ömrü, maliyeti yüksek	İşitme cihazları, fotoğraf ekipmanları, saatler, sualtı ve uzay uygulamaları
Çinko/Hava	Yüksek enerji yoğunluğu, düşük maliyet, çevresel koşullara çok bağımlı	Askeri ve tıbbi uygulamalar
Lityum/Katı Katot	Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek deşarj oranı, düşük sıcaklık performansı, rekabetçi maliyet	Silindirik ve buton tipindeki geleneksel bütün bataryaların yerini aldı
Lityum/Katı Elektrolit	Oldukça uzun raf ömrü, düşük güçlü	Medikal elektronik

2.2.2 İkincil bataryalar

İkincil bataryalar veya diğer adıyla yeniden doldurulabilir bataryalar, kesintisiz güç kaynakları, elektrikli ya da hibrit otomobiller, insansız hava, kara veya deniz araçları gibi geniş kullanım alanına sahiptir. Ayrıca küçük boyutlu olan ikincil bataryalar, el aletleri, oyuncaklar, aydınlatma, radyo, fotoğraf ve video ekipmanları, cep telefonu ve dizüstü bilgisayarlar gibi tüketici elektroniğinde; iyileştirilmiş performansları ile birincil bataryaların kapasitesinin daha ötesinde güç tüketimine sahip; değiştirmek yerine, yeniden şarj edilebilir olduğu için de daha uygun maliyetli bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadırlar.

Geleneksel sıvı elektrolit kullanan ikincil bataryalar, yeniden şarj olma yeteneklerine ek olarak, yüksek güç yoğunluğu, düz deşarj profilleri ve düşük sıcaklıkta iyi performans göstermeleri ile karakterize edilmektedir. Bununla birlikte, enerji yoğunlukları ve özgül enerjileri genellikle daha düşüktür ve şarj tutmaları birincil bataryalardan daha zayıftır. Lityum iyon kullanımı ile yeniden şarj edilebilir bataryalar, daha yüksek enerji yoğunluklarına, daha iyi şarj tutma yeteneklerine kavuşmuşlardır [9].

Uzun yıllardır piyasada bulunan ikincil bataryaların ilk örneklerinden olan kurşun-asit batarya 1859'da Plante, nikel-demir alkalın batarya ise 1908'de Edison tarafından geliştirilmiştir. Bu bataryalar, dayanıklılık ve uzun ömür avantajlarına rağmen, yüksek maliyeti ve bakım gereksinimleri sebebiyle pazarda yer edinememiştir [1].

1909'da üretimine başlanan nikel-kadmiyum bataryaların plakalarında yapılan iyileştirmeler ile artan kapasite ve güç yoğunluğu sayesinde; havacılık, iletişim ve ağır endüstri uygulamaları ile 1950'lerde pazarda yeniden yer bulmuştur. Daha sonra sızdırmaz nikel-kadmiyum bataryaların gelişimi ile taşınabilir elektroniğin uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu teknolojinin hakimiyetini, başlangıçta nikel-metal hidrit, ardından yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluğu sağlayan lityum-iyon bataryalar almıştır. Yeni sistemler üzerine yapılan çalışmalar, taşınabilir tüketici elektroniği ve elektrikli araçların yüksek performans ihtiyaçları üzerine yönelmektedir [1].

Yeniden doldurulabilir bataryaların en önemli özellikleri, şarj ve deşarjın neredeyse tersine çevrilebilir olması ve çevrim ömrünü sınırlayabilecek minimum fiziksel değişikliklere sahip olmasıdır [1].

Çizelge 2.4'te farklı tiplerdeki birincil bataryaların özellikleri ve kullanım alanlarına yer verilmiştir.

Çizelge 2.4 : İkincil Bataryaların Karakteristikleri ve Uygulama Alanları. [1]

Sistem	Karakteristik	Uygulama
Kurşun-Asit	Yaygın, düşük maliyetli, düşük özgül enerji, iyi deşarj oranı, düşük sıcaklıkta iyi performans, bakım gerektirmiyor, iyi çevrim ömrü	Otomotiv, havacılık, deniz araçları, kesintisiz güç kaynakları, enerji depolama, taşınabilir elektronik ekipmanlar
Nikel-Kadmiyum	Yüksek deşarj oranı, düşük sıcaklıkta iyi performans, sabit gerilim, çok iyi çevrim ömrü	Uçak bataryası, endüstriyel uygulamalar, haberleşme, tüketici elektroniği
Nikel-Metal Hidrit	Sızdırmaz, bakım gerektirmez, Nikel-kadmiyum'a göre daha yüksek enerji ve kapasite	Taşınabilir tüketici elektroniği
Nikel-Çinko	Yüksek özgül enerji, Arttırılmış çevrim ömrü, yüksek güç	Bisiklet, el aletleri
Gümüş-Çinko	Yüksek özgül enerji, çok yüksek deşarj oranı, düşük çevrim ömrü, yüksek maliyet	Askeri uygulamalar; eğitim hedefleri, fırlatma sistemleri, İHA'lar
Lityum iyon	Yüksek özgül enerji ve güç yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, yüksek güç	Taşınabilir tüketici elektroniği, elektrikli ve hibrit araçlar, uzay uygulamaları

2.2.3 Lityum iyon bataryalar

Lityum anotlu birincil bataryalar elde ettikleri hızlı başarı ile hemen her sektörde taşınabilir cihazlar için güvenilir güç kaynakları olmuşlardır ancak şarj edilebilir lityum bataryaların gelişimi daha zorlu bir süreç geçirmiştir. Genel olarak, aprotik elektrolitlerdeki ikincil bataryaların kimyası, birincil bataryaların kimyasına çok yakındır. Her iki batarya tipinde de deşarj sırasında aynı işlemler meydana gelmektedir ancak elektrot işlemleri, negatif metalik lityum elektrotlu ikincil bataryanın şarjı altında ters yönde gerçekleşmelidir. 1970'lerin sonunda, lityumun katodik eklenmesi ve anodik çıkarılmasının pratik olarak geri dönüşümlü olarak gerçekleştiği pozitif elektrot malzemeleri bulunmuştur. Ancak asıl sorun, negatif elektrotla ilgili olarak ortaya çıkmıştır. Galvanik uygulama için tipik komplikasyonlar, yük altında, yani lityumun katodik birikimi altında ortaya çıkmaktaydı. Bu sorunlar, aprotik elektrolitlerdeki lityum yüzeyinin elektrolit bileşenleri ile kimyasal etkileşimi sonucunda oluşan, SEI (Solid Electrolyte Interface) (Katı Elektrolit Arayüzü) adındaki pasif bir film tabakası ile aşılmıştır. Birkaç nanometre kalınlığındaki bu SEI tabakası, lityum iyon iletkenliği olan katı elektrolit özelliklerine sahiptir ve lityumu güvenli bir şekilde kendi kendine deşarjdan korumaktadır ancak SEI tabakası sebebiyle, her şarjda lityumun bir kısmı döngüden çıkmaktadır. Bu sebeple, metalik lityum elektrotlu ikincil bataryalar için, 10 kata kadar daha fazla lityum gerekmektedir. Ayrıca lityumun teorik kapasitesi 3800 mAh/g seviyelerinde iken, pratikte bu kapasite 380-800 mAh/g seviyelerinde kullanılabilir [9].

Hücrenin boşalması sırasında negatif elektrottaki lityumun, karbon malzemeden deenterkalasyonu meydana gelmekte ve lityum, pozitif elektrot üzerindeki okside eklenmektedir. Şarj altında, işlemler tersine çevrilmektedir. Böylece deşarj ve şarj işlemleri esnasında sistemde lityum atomu değil; lityum iyonları bir elektrottan diğerine hareket etmektedir. Bu nedenle bu tür bataryalar lityum iyon adını almıştır [9].

Lityum iyon bataryaların tarihi 1962'ye dayanmaktadır. Negatif elektrotunda lityum bulunan ilk batarya 1972 yılında Sanyo tarafından piyasaya sürülmüştür. Moli Energy, 1985 yılında ilk şarj edilebilir lityum bataryayı geliştirmiştir. Bir sonraki adımda Sony, her iki elektrot için de lityum iyonlarının enterkalasyonunu ve deenterkalasyonunu sağlayan, yüksek gerilim aralığına sahip malzemeleri kullanarak ilk şarj edilebilir lityum iyon bataryayı, 1991 yılında piyasaya sürmüştür [10].

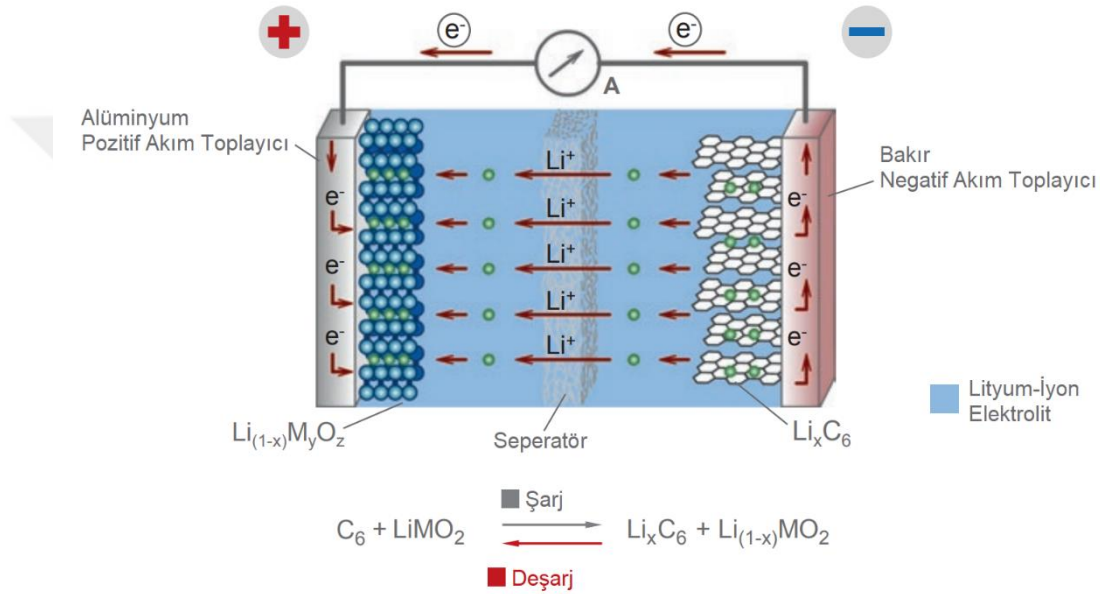
Lityum-iyon bataryalar, düşük ağırlıkları ve yüksek enerji depolayabilmeleri sebebiyle mobil cihazlarda çok fazla tercih edilmektedirler. 1991’de cep telefonu ve dizüstü bilgisayar ile başlayan lityum-iyon batarya kullanımı; son yıllarda askeri alandan sağlık sektörüne, bilimsel görevlerden günlük hayata kadar her alana yayılmış durumdadır [11].

Lityum iyon teknolojisinin gelişimine bakıldığında, birçok ticari bataryada benimsenen mevcut bir yaklaşım, katodu değiştirmek üzerinedir. En popüler olanı, LCO’yu (Lithium Cobalt Oxide) (Lityum Kobalt Oksit), LFP (Lithium Iron Phosphate) (Lityum Demir Fosfat) ile değiştirerek, anot ve elektrolitte geleneksel kimyayı sürdürmektir. LFP daha güvenli ve daha ucuz olduğu için katot olarak kullanılması pilin güvenilirliğini artırabilmekte ve maliyetini kısmen azaltabilmektedir. Bununla birlikte, grafitin ve özellikle kararsız sıvı organik elektrolitin korunması, bataryanın tamamı için güvenlik risklerini ortadan kaldırmamaktadır. Daha girişimci üreticiler, genellikle anot ve katot olmak üzere iki yenilikçi bileşene sahip bataryalar geliştirmeyi planlamıştır. Yaygın olarak bu bataryalar bir LTO-LFP çiftinden yararlanmaktadır. LTO (Lithium Titanate Oxide) (Lityum Titanat Oksit) anotunun, LFP katot ile birleştirilmesiyle, 2V aralığında çalışan lityum iyon bataryalar elde edilebilmektedir. Yüksek kapasite arayışı, hava katodu gibi diğer katotlara da yönelmektedir. Lityumu doğrudan havadaki oksijenle reaksiyona sokarak, 1200 mAh/g gibi çok yüksek bir kapasite elde edilebilmektedir. Bu herhangi bir ekleme katoduyla elde edilebilecek olandan çok daha büyük bir değerdir. Bununla birlikte, lityum hava bataryanın gelişimi; verimli, şarj edilebilir ve güvenli bir batarya konfigürasyonunda lityum metal ve oksijen elektrotlarında çalışmanın zorlukları nedeniyle hala pratik olamamaktadır. Yüksek enerjili sistemler için bir başka umut verici aday, Li/S (Lithium Sulfur) (Lityum Sülfür) bataryalardır. Tam dönüşüm varsayıldığında, 2500 Wh/kg özgül enerjiye ve 2800Wh/l enerji yoğunluğuna sahiptir. Li/S bataryalar umut verici olsa da pratikte, bir dizi eksiklik nedeniyle, hala piyasada gerçek atılımlar yapmaktan uzaktır [12].

Lityum pazarındaki talebin agresif artışı araştırmacıları alternatif arayışına da götürmektedir. Lityum talebi üzerine yapılan istatistiksel çalışmalar, mevcut rezervler ile en fazla 65 senelik daha kullanım mümkün olacağını ön görmektedir. Bu durum, lityumun daha verimli olması sebebiyle geri planda kalan sodyum iyon hücreler üzerinde ilginin yeniden artmasına sebep olmuştur. Sodyumun yeryüzünde en çok

bulunan dördüncü element olması sebebiyle, sodyum iyon bataryaların verimliliğini arttıracak çalışmalar sürdürülmektedir [13].

Şekil 2.3'te bir lityum-iyon hücrenin temel çalışma prensibi gösterilmektedir. Pozitif akım toplayıcı elektrot, anot; negatif akım toplayıcı elektrot, katot olarak adlandırılmaktadır. Anot genelde alüminyum, katot ise bakırdan üretilmektedir. Anot ve katot arasında lityum tuzu içeren, lityum-iyonlarını iletme özelliği bulunan elektrolit bulunmaktadır. Bu iki elektrot, içinden lityum iyonlarını geçirebilen bir zar ile elektriksel olarak izole edilmektedir [10].



Şekil 2.3 : Lityum-iyon Hücrenin Çalışma Prensibi. [10]

Lityum-iyon hücreler elektrolitik elektrokimyasal yapıdadır. Bu, kimyasal tepkimenin meydana gelmesi için elektrik enerjisinin kullandığı anlamına gelmektedir. Şarj esnasında, hücreye dışarıdan bir kaynak bağlandığında gerçekleşen tepkime neticesinde anot tarafında elektron miktarı artmaktadır. Böylece lityum-iyonları katot tarafındaki aktif maddeden ayrışarak, zardan geçmekte ve anot tarafındaki grafitte eklenmektedir. Batarya dolu haldeyken, anot tarafında lityum-iyonlarının yoğunluğu fazladır. Deşarj işlemi esnasında, lityum-iyonları anottan ayrılıp elektrolit vasıtasıyla zardan geçerek pozitif elektrotun olduğu tarafa göç etmektedirler. Anot tarafında serbest kalan elektronlar ise, kablo gibi bir dış bağlantı ile negatif elektrottan, pozitif elektrota doğru hareket ederler. Bu işlem pozitif elektrot tarafındaki lityum yoğunluğu doyuma ulaşana kadar devam etmektedir [10].

2.2.4 Batarya parametreleri

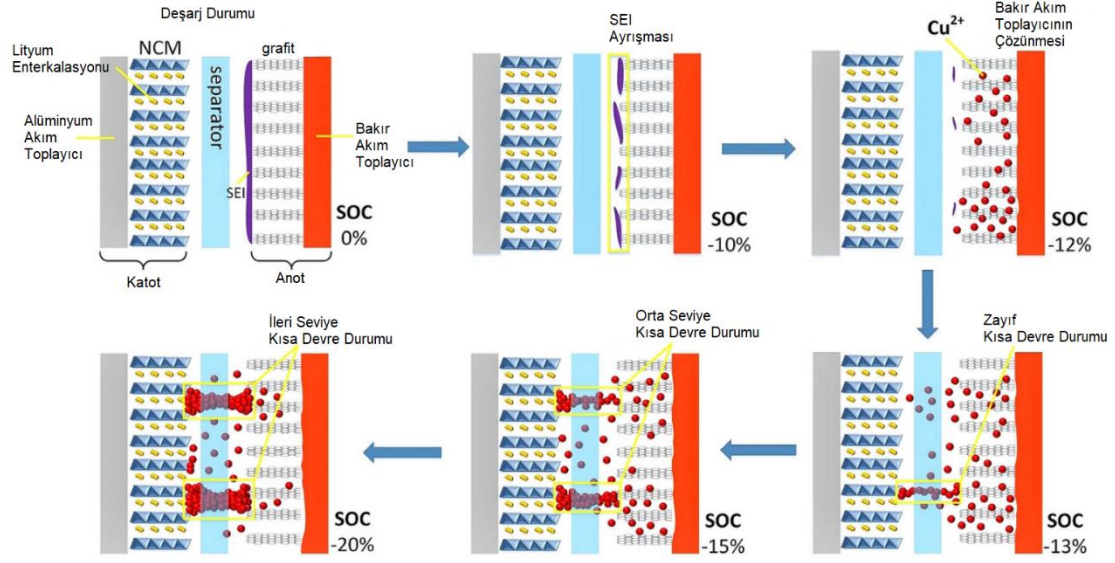
Nominal kapasite, özgül enerji, güç yoğunluğu, çalışma gerilimi gibi parametreler elektrokimyasal hücreleri karakterize etmek için kullanılmaktadır. Günümüzde insansız hava araçlarında sıklıkla tercih edilen lityum iyon ve lityum iyon polimer bataryalar, tipik olarak 3.2 V ile 4.2 V aralığında kullanılmaktadır.

En sık kullanılan katot malzemesi, 1991'de Sony piyasaya sürdüğünden beri LCO olmuştur. LCO'nun yapısından, lityum tamamıyla elektrokimyasal olarak ayrıştırılabilir ancak düşük lityum çözeltisi kararsızdır. İçerisindeki aktif kimyasal tepkime kontrol altında tutulmadığında, yanmaya aşırı meyillidir. Lityum-iyon hücre, şarj edilirken 4,6 voltun üzerindeki yüklemenin neden olduğu Fermi seviyesindeki azalma, oksijenin serbest kalmasını sağlar. Oksijen hücrelerden kaçamaz ve organik elektrolit ile alevlere ve hatta patlamaya neden olacak şiddetli reaksiyonlara girebilir. Bu kararsızlık sebebiyle şarj gerilimi 4.2 V ile sınırlandırılmıştır [10].

Batarya tamamen boşaldığında kullanılan anot materyaline göre farklı gerilim seviyeleri göstermektedir. Lityum-iyon hücrelerinin terminal gerilimi, 3 volttan sonra çok hızlı düşmektedir. Bu seviyenin altında anot ve zar arasındaki koruyucu katman olan, SEI katmanı ayrışmaya başlar. SEI katmanı tükendiğinde, anot olarak kullanılan bakır çözünerek hücre içerisinde kısa devreye sebep olur. Bu sebeple ticari olarak kullanılan lityum-iyon hücrelerinde, kesme gerilimi 3.2 V olarak kabul görülür [14].

Aynı şekilde hücrenin aşırı deşarj durumdan da korunması gerekmektedir. Batarya tamamen boşaldığında, anot tarafındaki lityum iyonları grafitten tamamen ayrılmış anlamına gelmektedir. Bu seviyeden sonra deşarj işlemi devam ederse, daha önce anlatıldığı gibi SEI katmanı ayrışmaya ve bakır elektrotu çözünmeye başlar. Bu noktada hücre, üretim esnasında oluşturulmuş olan SEI katmanını kaybettiği için geri döndürülemez şekilde hasar almaktadır [14].

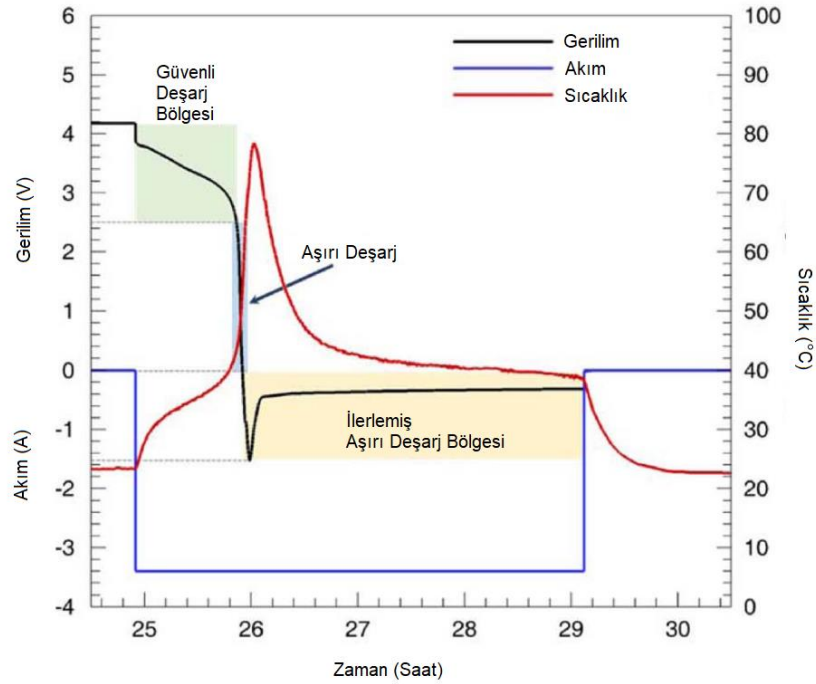
Şekil 2.4'te NCM'ye (Nickel, Cobalt, Manganese) (Nikel, Kobalt, Manganez) lityum enterkalasyonu gerçekleşmiş elektrolit ve alüminyum/bakır elektrotlardan oluşan bir lityum hücrenin negatif SOC'lerdeki (State of Charge) (Batarya Kapasitesi) tepkisi gösterilmektedir. Deşarj işlemi devam edecek olursa, gösterildiği gibi çözünen bakır elektrotlar arasında bulunan zarı delerek hücrenin kendi içinde kısa devre olmasına sebep olmaktadır.



Şekil 2.4 : Aşırı Deşarj Durumunda Oluşan Tepkimeler. [14]

Bu kontrolsüz tepkime sonucunda da açığa çıkan sıcaklık Şekil 2.5'te gösterildiği gibi lityum iyon hücresinin aşırı ısınmasına ve alev alarak patlamasına sebep olmaktadır.

Ayrıca bataryayı yüksek sıcaklıklarda ve yüksek akımlarda kullanmaktan kaçınılmalıdır. Bu durum da hücrenin ömrünü kısaltabileceği gibi yangın veya patlama gibi tehlikeli sonuçlara da sebep olabilmektedir.



Şekil 2.5 : Aşırı Deşarj Durumdaki Hücrenin Tepkisi. [15]

Resim 2.1’de bu çalışmada kullanılan, ticari olarak edinilebilen yüksek gerilimli bir lityum-iyon polimer batarya paketi gösterilmektedir. Bu paket üzerinde bazı parametreler yer almaktadır. Lityum hücrelerinin 3.2 V ila 4.2 V aralığındaki çalışma geriliminin orta noktası olan 3.7V nominal gerilim olarak ifade edilmektedir. Bu değer, bataryayı kullanacak sistemin güç hesaplamaları için referans olarak kullanılmaktadır. Yüksek gerilimli batarya ifadesi, hücrenin 4.35 V gerilim seviyesine kadar şarj edilebileceğini ifade etmektedir. Bu da 4.2 V azami gerilim ile çalışan lityum hücrelere kıyasla aynı hacimde daha fazla enerji depolayabileceği anlamına gelmektedir.



Resim 2.1 : Lityum-iyon Polimer Batarya Paketi Görünümü.

Resim 2.1’de 1 numara ile gösterilen 4300 mAh parametresi, paketin nominal kapasitesini göstermektedir. Resimde 2 numara ile gösterilen 3S1P parametresi, üç hücrenin seri olarak bağlı olduğunu ve paralel bağlantı yapılmadığını ifade etmektedir. Seri bağlı üç hücreden oluşan batarya paketinin terminal gerilimi 11.1 V olacaktır. Resimde 3 numara ile gösterilen 50C parametresi ise nominal kapasitesinin (1C = 4300) 50 katına kadar deşarj yapabileceğini göstermektedir. Bunların yanı sıra, şarj edilebilir hücrenin kütlesi, özgül enerji olarak ifade edilmektedir ve birimi Wh/kg’dır. Güç yoğunluğu ise şarj edilebilir hücrenin hacmini ifade etmektedir ve birimi Wh/l’dir. Lityum iyon hücreler genellikle %95’in üzerinde bir değer ile yüksek verimlilik göstermektedirler. Verimlilik, deşarj sırasında açığa çıkan enerjinin şarj sırasında depolanan enerjiye bölünmesiyle elde edilmektedir.

Hem lityum iyon bataryaların uzun ömürlü, verimli ve güvenli olarak kullanılabilmesi hem de bataryayı kullanan aracın doğru stratejiyi belirleyebilmesi için bataryanın durumu hakkında bazı verilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu sebeplerle, lityum

iyon bataryalardan maksimum verimi almak ve olası tehlikelerden kaçınmak için bahsi geçen veri edinme işlemlerini yürüten, batarya yönetim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [16].

2.2.5 Batarya yönetim sistemleri

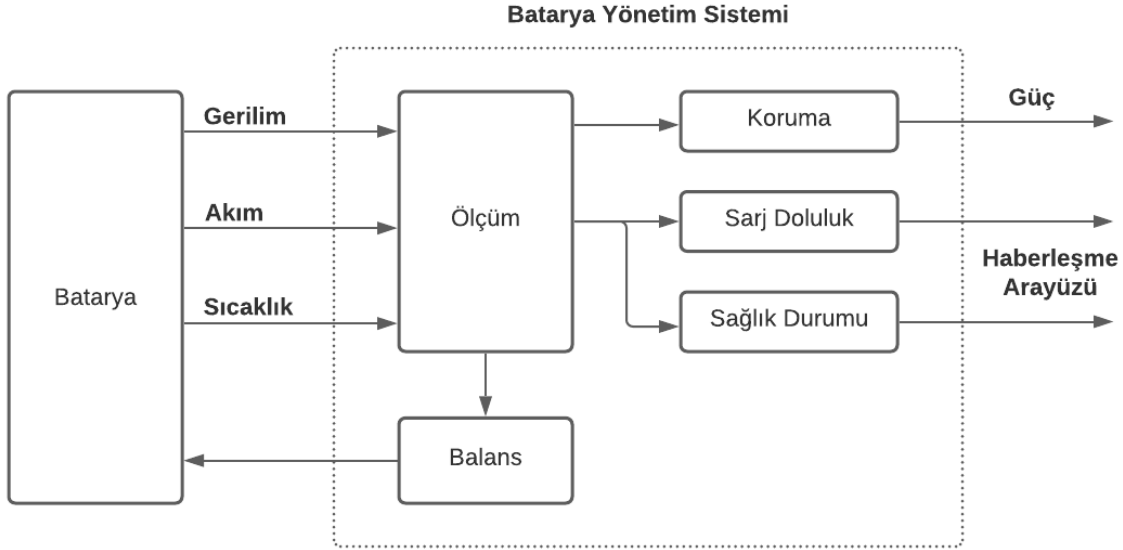
BYS'ler, bataryanın güvenliğini ve verimli kullanımını sağlayarak ömrünü uzatmak için çalışma koşullarını kontrol eden ve batarya kapasitesini, sağlık durumunu, kalan ömrünü hesaplamak için tahmin algoritmaları koşturan yazılım ve donanımlardan oluşmaktadır. BYS'nin ana işlevleri arasında veri toplama, durum izleme, güvenlik koruması, şarj kontrolü, enerji yönetimi, hücre dengeleme, termal yönetim ve bilgi yönetimi yer almaktadır [1].

İHA'ların çalışma ortamları farklılık gösterebilmektedir. Bu da İHA'ların ve dolayısıyla bataryaların farklı çalışma ortamlarına uyum sağlamasını gerektirmektedir. Batarya farklı sıcaklık ve nem ortamlarında, değişken tüketim koşullarında farklı davranışlar gösteren, gerçek zamanlı olarak değişen birden çok duruma sahip, karmaşık ve doğrusal olmayan, zamanla değişen bir sistemdir. Bu sebeple BYS, sensörler aracılığıyla, gerçek zamanlı olarak batarya paketinin terminal gerilimini, akımını ve sıcaklığını izlemektedir. Batarya durumunun doğru ve verimli bir şekilde izlenmesi, batarya hücresinin ve aynı zamanda İHA'ların enerji yönetimi ve kontrolünde kilit rol oynamaktadır. Bu nedenle BYS 'nin, SOC, SOH (State of Health) (Sağlık Durumu), SOP (State of Power) (Güç Durumu), RUL (Remaining Useful Life) (Kalan Batarya Ömrü) gibi batarya durumlarını anlık olarak elde etmek için, gömülü algoritmalar ve stratejiler kullanarak gerçek zamanlı toplanan batarya verilerine dayalı olarak bataryanın durumlarını tahmin etmesi gerekmektedir [17].

İzlenen bu durumlardan, batarya kapasitesi parametresi, bataryanın anlık kapasitesini yüzdesel olarak göstermektedir. Güç durumu, bataryanın azami gücünün, nominal gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır. Hücrenin kimyasal bileşenleri zamanla bozuma uğramakta ve enerji depolayabilme kapasitesi azalmaktadır. Bu bozunum, sağlık durumu parametresi ile gösterilmektedir. Ek olarak, kalan batarya ömrü parametresi ise bataryanın ömrü tükenene kadar, ne kadar süre daha kullanılabileceğini göstermektedir [18].

Şekil 2.6'da batarya yönetim sistemlerinin genel yapısı gösterilmektedir. Batarya yönetim sistemi, sensörler aracılığıyla bataryadan sürekli olarak gerilim, akım ve

sıcaklık parametrelerini okuyarak, koruma ve tahmin işlemlerini yürütmektedir. Tahmin edilen parametreler haberleşme arayüzü vasıtasıyla dışarıya aktarılmaktadır. Bunun yanı sıra şarj ve balans işlemleri de batarya kontrol sistemi tarafından yürütülmektedir.



Şekil 2.6 : Batarya Yönetim Sistemi Blok Şeması.

BYS'nin koruma işlevi, esas olarak batarya sisteminin çevrimiçi arıza teşhisi ve güvenlik kontrolüne atıfta bulunmaktadır. Bataryada gerçekleşebilecek aşırı şarj durumundaki gerilim aşımı, aşırı deşarj durumundaki gerilim düşümü, aşırı akım, yüksek sıcaklık, kısa devre, bağlantıların gevşemesi gibi arızaları tespit etmeye çalışmaktadır. Arıza türlerini teşhis ettikten sonra güvenliği sağlamak için YYS'nin bataryayı kullanan araca uyarı göndermesi ve mümkünse arızaya müdahale etmesi gerekmektedir [17].

BYS'nin tahmin ettiği parametreler içerisinde, batarya kapasitesi tahmini, kullanım esnasında kalan depo enerji miktarını gösterdiği için kilit rol oynamaktadır. Bu parametre, batarya gerilimi ve bataryadan çekilen akım sürekli ölçülerek tahmin edebilmektedir. Ancak batarya içerisinde gerçekleşen doğrusal olmayan ve karmaşık tepkimelerin yanı sıra karakteristiğinin de yaşlandıkça değişmesi sebebiyle, bu tahmini, kullanım esnasında yapmak zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır [18].

2.3 Batarya Kapasitesi Kestirim Yöntemleri

Batarya kapasitesi parametresini, batarya yük altında iken gerçek zamanlı olarak elde edebilmek için çeşitli tahmin algoritmaları incelenmiştir. Bu algoritmalar en genel anlamda doğrudan ölçüm ve dolaylı tahmin yöntemleri olarak 2 ana başlık altında ele alınmaktadır.

Çizelge 2.5'te gösterilen doğrudan ölçüm yöntemleri, terminal akım veya gerilimini ölçerek doğrudan batarya kapasitesini elde etmeye çalışır. Herhangi bir geri besleme ile düzeltmeye sahip olmayan bu yöntemler ancak deneysel olarak uygulanabilir ve gerçek zamanlı sistemler için kullanıma uygun değildir.

Çizelge 2.5 : Doğrudan Ölçüm Yöntemleri. [18]

Coulomb Sayma Yöntemi	Açık çevrim bir tahmin yöntemi olduğundan, oluşan hata birikimlerini düzeltemez. Ayrıca başlangıç tahminine, batarya sağlığına ve sensörün hassasiyetine doğrudan bağlıdır.
Açık Devre Gerilimi Yöntemi	Bataryanın dengeye ulaşarak, açık devre gerilimine yakınsaması için bir süre beklenmesi gerekir. Yük altında kullanıma uygun değildir. Kapasite tahmini anlamına gelen açık devre gerilimi, gerilim değişimi sebebiyle şarj veya deşarj esnasında batarya terminalinden ölçülemez.
Elektrokimyasal Empedans Spektroskopi	Bu tahmin yöntemi yalnızca aynı şarj koşulları için uygundur. Bu nedenle, farklı akımlarla tutarsız şarj edilebilen sistemler için uygun değildir. Yüksek sıcaklık etkisinden dolayı bu yöntem sadece kısa periyot ile uygulanabilmektedir.

Çizelge 2.6'da verilen dolaylı tahmin yöntemleri ise; hesap, uyarlamalı filtre ve yapay zekâ temelli tahmin yöntemleri olarak kendi içinde gruplara ayrılmaktadır. Hesap temelli tahmin yöntemlerinde modelleme süreci uzun ve maliyetlidir. Ayrıca doğruluğun yanında karmaşıklık da arttığı için işlem yükü fazladır ve gerçek zamanlı uygulamalarda tercih edilmez. Yapay zekâ temelli tahmin yöntemleri ise genel olarak fazla miktarda eğitim verisi gerektirir ve ağır optimizasyon hesaplarını sebebiyle mikrodenetleyicide çalıştırmak için işlem yükü oldukça fazladır. Bu çalışmada batarya kapasitesini kestirmek için uyarlamalı filtre yöntemlerinden Kalman filtresi tercih edilmektedir. Kalman filtresi, iyi bir model ve yüksek hassasiyete sahip sensörler ile yeterli seviye kestirim yapabilen ve iteratif olarak çalıştığı için gerçek zamanlı gömülü sistemlerde uygulamaya oldukça uygun görülmektedir. Bataryanın doğrusal olmayan

bir modele sahip olması sebebiyle, doğrusal olmayan model ile çalışan Kalman filtresi varyantları incelendiğinde; doğruluk, hassasiyet ve karmaşıklık kıyaslamaları göz önünde bulundurularak genişletilmiş Kalman filtresi tercih edilmiştir.

Çizelge 2.6 : Dolaylı Tahmin Yöntemleri. [18]

Hesap Temelli	Eşdeğer Devre Modeli	Model parametreleri, yalnızca yeni bataryalar için hassas şekilde elde edilebilir. Parametrelerin tümü pratik bir şekilde elde edilemez. Maliyetlidir ve zaman gerektiren bir yöntemdir. Parametrelerin sayısı arttıkça, doğruluğun yanısıra karmaşıklık da artar.
	Elektrokimyasal Model	Parametreler üretici tarafından sağlanmadığı için kapsamlı bir test süreci gerektirir. Model doğruluğu arttıkça karmaşıklık da artar. Çok parametrelili kısmi diferansiyel denklemler kümesi ile modellendiğinden, çözme süreci çok zahmetlidir ve gerçek zamanlı uygulamalarda tercih edilmez.
Uyarlanabilir Filtre Temelli	Kalman Filtresi	Batarya modeline ve sensör hassasiyetine büyük ölçüde bağlıdır ve Jacobian matrislerinden kaynaklı doğrusallaştırma doğruluğu gibi sınırlamaları vardır. Performansı, model ve ölçüm gürültüsünün kovaryansı hakkındaki ön bilgilere bağlıdır. Model ve gürültü kovaryansındaki herhangi bir yanlışlık, filtrenin performansını düşürerek zayıf yakınsama veya yavaş adaptasyona neden olabilir.
	Yinelenen En Küçük Kareler Yöntemi	Sistem ve gözlem gürültüsünün Gauss dağılımını karşılaması ve model parametrelerinin doğru olması gerekir. Unutma faktörü değeri uygun değilse, ağır hesaplama ve kararsız çalışmaya sahiptir.
	H_∞ Yöntemi	Kalman ile aynı dezavantajlara sahiptir. Yaşlanma, histerezis ve sıcaklık etkileri modelin doğruluğunu saptırabilir.
Yapay Zeka Temelli	Bulanık Mantık	Hesaplama maliyeti yüksektir ve net bir batarya karakteristik kuralı gerektirir. Lityum bataryaların karakteristiği ömrü boyunca önemli ölçüde değiştiğinden, kapasite tahmini yeterince doğru olmayabilir.
	Yapay Sinir Ağları	Doğruluğu artırmak için daha fazla nörona ihtiyaç duyar, bu da gerçek zamanlı uygulamaları sınırlar. Mini sınıf hava araçlarında, yoğun hesaplama ve uzun öğrenme süreci nedeniyle uygun değildir.
	Uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım	Açık döngü batarya kapasitesi tahmini uygulandığı için hatalara açıktır. Önemli miktarda eğitim verisine ihtiyaç vardır ve çok sayıda hesaplama gereklidir. Yeni bir bataryanın vektör makinesi, eski bir pil için doğru değildir. Bu sebeple bataryanın eskimesine adaptasyonu mümkün değildir.
	Genetik Algoritma Yöntemi	Etkili sonuçlar elde etmek için parametrelerin ince ayarı gereklidir. Ağır hesaplama gerektirir ve optimizasyon yanıt süresinde gecikmeye sahiptir.

2.4 Kestirim ve Kalman Filtresi

2.4.1 Sıralı olasılıksal çıkarım

Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2, doğrusal olmayan bir sistemin uzay-zaman modelini temsil etmektedir.

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (2.1)$$

$$y_k = h(x_k, u_k, v_k) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de yer alan u_k ölçümü, diğer bir deyişle uzay-zaman modelinin girdisini gösterirken, Eşitlik 2.1’de yer alan u_{k-1} ölçümün bir önceki iterasyondaki değerini ifade eder. Yine Eşitlik 2.2’de yer alan y_k ise gözlem olarak adlandırılmaktadır. Modelin durumları x_k vektörü ile gösterilirken; süreç gürültüsü w_k , ölçüm gürültüsü ise v_k ile ifade edilmektedir.

Sıralı olasılıksal çıkarım, k zamanına kadar tüm girdi ve çıktıları kullanarak, modelin durumlarını özyinelemeli olarak tahmin etmeye çalışmaktadır.

Yöntem bir önceki durum tahminlerini ve o anki çıkışı kullanarak özyinelemeli olarak çalıştığı için sıralı, süreç ve ölçüm gürültülerinin rastgeleliğinden dolayı da olasılıksal olarak adlandırılır [19].

Sıralı olasılıksal çıkarım, ölçümün başlangıcından itibaren, uzay-zaman modelinin bütün girdi ve çıktıları kullanarak, Eşitlik 2.3’te ifade edildiği gibi durum tahmininde, MSE’yi (Mean Square Error) (Ortalama Karesel Hata) minimize etmeye çalışmaktadır [20].

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^{MMSE} &= \arg \min_{\hat{x}_k} (\mathbf{E}[\|x_k - \hat{x}_k\|_2^2 | Y_k]) \\ &= \arg \min_{\hat{x}_k} (\mathbf{E}[x_k^T x_k - 2x_k^T \hat{x}_k + \hat{x}_k^T \hat{x}_k | Y_k]) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Fonksiyonu minimum yapan, \hat{x}_k argümanını bulabilmek için, Eşitlik 2.4’te gösterildiği gibi ifadenin türevi sıfıra eşitlenmektedir.

$$0 = \frac{d}{d\hat{x}_k} \mathbf{E}[x_k^T x_k - 2x_k^T \hat{x}_k + \hat{x}_k^T \hat{x}_k | Y_k] \quad (2.4)$$

$$0 = \mathbf{E}[(0 - 2x_k + 2\hat{x}_k) | Y_k] = 2\hat{x}_k - 2\mathbf{E}[x_k | Y_k]$$

Türevin sonucu olan Eşitlik 2.5'teki ifade, en küçük MSE durum tahmincisinin, şu ana kadarki bütün ölçümleri barındıran durum değerlerinin koşullu beklenen değeri olduğunu göstermektedir.

$$\hat{x}_k = \mathbf{E}[x_k|Y_k] \quad (2.5)$$

Burada Y_k sıfırdan başlayarak bütün çıkış değerlerini içeren kümeyi ifade etmektedir.

$$Y_k = \{y_0, y_1, \dots, y_k\} \quad (2.6)$$

Tüm rastgele değişkenlerin ortak olasılık yoğunluk fonksiyonlarına ihtiyaç duyulmasından dolayı Eşitlik 2.5'te ifade edilen beklenen değeri bulmak, çözülmesi zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca Y_k zamanla büyüyeceğinden ve durumu hesaplamak için her adımda, durum sayısı kadar katlı integral çözümü gerektirdiğinden, işlem yükü oldukça fazla olmaktadır.

Bunun yerine merkezi limit teoremine dayanarak, bütün rastgele değişkenlerin gauss dağılımına sahip olduğu varsayımını yapılmaktadır. Bu varsayım ile Eşitlik 2.5'teki ifadenin 2 adımda özyinelemeli olarak hesaplama kolaylığı sağlanmaktadır [19].

- Y_{k-1} gözlemleri verildiğinde $\hat{x}_k^- = E[x_k|Y_{k-1}]$ tahmini hesaplanır.
- $\hat{x}_k = E[x_k|Y_k]$ kestirimini bulmak için, Y_k gözleminde tahmin doğrulanır.

Özyinelemeli algoritmayı türetmek için tahmin hatası, Eşitlik 2.7'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\tilde{x}_k = x_k - \hat{x}_k \quad (2.7)$$

$E[\tilde{x}_k^-|Y_k]$ beklenen değeri Eşitlik 2.7'deki gibi ifade edildiğinde, Eşitlik 2.8'de gösterilen özyinelemeli doğrulama sistemini vermektedir.

$$E[\tilde{x}_k^-|Y_k] = \underbrace{E[x_k|Y_k]}_{\hat{x}_k} - \underbrace{E[x_k|Y_{k-1}]}_{\hat{x}_k^-} \quad (2.8)$$

\tilde{x}_k^- , geçmiş ölçümler ile ilintisiz olduğu için $E[\tilde{x}_k^-|Y_k]$ ifadesinin koşul kısmı, Eşitlik 2.9'da gösterildiği gibi yazılabilmektedir.

$$E[\tilde{x}_k^-|Y_k] = E[\tilde{x}_k^-|Y_{k-1}, y_k] = E[\tilde{x}_k^-|y_k] \quad (2.9)$$

Sonuç olarak Eşitlik 2.10'da gösterildiği gibi sıralı olasılıksal çıkarım çözümü elde edilmektedir.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- - E[\tilde{x}_k^-|y_k] \quad (2.10)$$

Doğrusal en küçük MSE kestiriciyi kullanarak $E[\tilde{x}_k^- | y_k]$ ifadesi, Eşitlik 2.11’de gibi yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned} E[\tilde{x}_k^- | y_k] &= E[\tilde{x}_k^-] + \Sigma_{\tilde{x}\tilde{y},k}^- \Sigma_{\tilde{x},k}^{-1} (y_k - E[y_k]) \\ &= 0 + \Sigma_{\tilde{x}\tilde{y},k}^- \Sigma_{\tilde{x},k}^{-1} (y_k - \hat{y}_k) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$\Sigma_{\tilde{x}\tilde{y},k}^- \Sigma_{\tilde{x},k}^{-1}$ ifadesi, güncelleme döngüsünün kazanç katsayısıdır ve L_k ile gösterilmektedir. Sonuç olarak güncelleme döngüsü Eşitlik 2.12’de gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + L_k (y_k - \hat{y}_k) \quad (2.12)$$

\hat{x}_k tahmininin belirsizliği, $\Sigma_{\tilde{x},k}$ kovaryans matrisi ile bulunur ve Eşitlik 2.13’te gösterildiği gibi güncellenmektedir.

$$\begin{aligned} \Sigma_{\tilde{x},k} &= E[(\tilde{x}_k)(\tilde{x}_k)^T] \\ &= E[(\tilde{x}_k^- - L_k (y_k - \hat{y}_k))(\tilde{x}_k^- - L_k (y_k - \hat{y}_k))^T] \\ &= \Sigma_{\tilde{x},k}^- - L_k \Sigma_{\tilde{y},k} L_k^T \end{aligned} \quad (2.13)$$

Son olarak bulunan Eşitlik 2.12 ve Eşitlik 2.13 ile birlikte genel Gauss sıralı olasılıksal çıkarım döngüsünü tamamlanmaktadır. Genel Gauss sıralı olasılıksal çıkarım döngüsünü 3 adım tahmin ve 3 adım doğrulama olarak Çizelge 2.7’teki gibi özetlemek mümkündür [19].

Çizelge 2.7 : Genel Gauss Sıralı Olasılıksal Çıkarım.

Tahmin	1a) Durum Tahminleri	$\hat{x}_k^- = E[x_k Y_{k-1}]$
	1b) Hata Kovaryansı Tahmini	$\Sigma_{\tilde{x},k}^- = E[(\tilde{x}_k^-)(\tilde{x}_k^-)^T]$ $= E[(x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T]$
	1c) Gözlem Tahmini	$\hat{y}_k = E[y_k Y_{k-1}]$
Doğrulama	2a) Kestirici Kazancının Hesaplanması	$L_k = \Sigma_{\tilde{x}\tilde{y},k}^- \Sigma_{\tilde{y},k}^{-1}$
	2b) Durum Tahminlerinin Güncellemesi	$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + L_k (y_k - \hat{y}_k)$
	2c) Hata Kovaryansı Tahminlerinin Güncellemesi	$\Sigma_{\tilde{x},k} = \Sigma_{\tilde{x},k}^- - L_k \Sigma_{\tilde{y},k} L_k^T$

2.4.2 Kalman filtresinin türetilmesi

Kalman Filtresi, genel Gauss sıralı olasılıksal çıkarım çözümünün, modellenen sistem dinamiklerinin doğrusal olduğu durumdaki uygulamasını göstermektedir.

Bu doğrusal sistemin, uzay-zaman gösterimi Eşitlik 2.14'teki gibi yapılmaktadır.

$$\begin{aligned}x_k &= A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \\y_k &= C_kx_k + D_ku_k + v_k\end{aligned}\quad (2.14)$$

Genel Gauss sıralı olasılıksal çıkarım döngüsündeki adımlar, Eşitlik 2.15'teki varsayımlar ile uygulanarak Kalman Filtresi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}w_k &\sim N(0, \Sigma_{\tilde{w}}) & v_k &\sim N(0, \Sigma_{\tilde{v}}) \\E[w_n w_k^T] &= \begin{cases} \Sigma_{\tilde{w}}, & n = k \\ 0, & n \neq k \end{cases} & E[v_n v_k^T] &= \begin{cases} \Sigma_{\tilde{v}}, & n = k \\ 0, & n \neq k \end{cases} \\E[w_n x_0^T] &= 0, & k &> 0\end{aligned}\quad (2.15)$$

Çizelge 2.7'nin 1a adımındaki durum tahminlerinin, Kalman filtresi için türetilmesi Eşitlik 2.16'da gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}\hat{x}_k^- &= E[x_k | Y_{k-1}] \\ \hat{x}_k^- &= E[A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} | Y_{k-1}] \\ \hat{x}_k^- &= A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1}\end{aligned}\quad (2.16)$$

Çizelge 2.7'nin 1b adımındaki hata kovaryansı tahmininin, Kalman filtresi için türetilmesi Eşitlik 2.17'de gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}\Sigma_{\tilde{x},k}^- &= E[(\tilde{x}_k^-)(\tilde{x}_k^-)^T] = E[(x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T] \\ \Sigma_{\tilde{x},k}^- &= E[(A_{k-1}\tilde{x}_{k-1} + w_{k-1})(A_{k-1}\tilde{x}_{k-1} + w_{k-1})^T] \\ \Sigma_{\tilde{x},k}^- &= A_{k-1} \Sigma_{\tilde{x},k-1} A_{k-1}^T + \Sigma_{\tilde{w}}\end{aligned}\quad (2.17)$$

Çizelge 2.7'nin 1c adımındaki gözlem tahmininin, Kalman filtresi için türetilmesi Eşitlik 2.18'de gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}\hat{y}_k &= E[y_k | Y_{k-1}] \\ \hat{y}_k &= E[C_kx_k + D_ku_k + v_k | Y_{k-1}] \\ \hat{y}_k &= C_k\hat{x}_k^- + D_ku_k\end{aligned}\quad (2.18)$$

Çizelge 2.7'nin 2a adımıdaki kestirici kazancı hesabının, Kalman filtresi için türetilmesi Eşitlik 2.19'da gösterilmektedir.

$$L_k = \Sigma_{\tilde{x}\tilde{y},k}^- \Sigma_{\tilde{y},k}^{-1}$$

$$\tilde{y}_k = y_k - \hat{y}_k = (C_k x_k + D_k u_k + v_k) - (C_k \hat{x}_k^- + D_k u_k) = C_k \hat{x}_k^- + v_k$$

$$\Sigma_{\tilde{y},k} = E[(\tilde{y}_k)(\tilde{y}_k)^T] = E[(C_k \hat{x}_k^- + v_k)(C_k \hat{x}_k^- + v_k)^T] = C_k \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T + \Sigma_{\tilde{v}} \quad (2.19)$$

$$\Sigma_{\tilde{x}\tilde{y},k}^- = E[\tilde{x}_k^- (C_k \tilde{x}_k^- + v_k)^T] = \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T$$

$$L_k = \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T [C_k \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T + \Sigma_{\tilde{v}}]^{-1}$$

Çizelge 2.7'nin 2b adımıdaki durum tahminleri güncellemesinin, Kalman filtresi için türetilmesi Eşitlik 2.20'de gösterilmektedir.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + L_k (y_k - \hat{y}_k) \quad (2.20)$$

Çizelge 2.7'nin 2c adımıdaki hata kovaryansı tahminleri güncellemesinin, Kalman filtresi için türetilmesi Eşitlik 2.21'de gösterilmektedir.

$$\Sigma_{\tilde{x},k} = \Sigma_{\tilde{x},k}^- - L_k \Sigma_{\tilde{y},k} L_k^T \quad (2.21)$$

Sonuç olarak elde edilen Kalman Filtresi, Çizelge 2.8'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.8 : Kalman Filtresi.

Tahmin	1a) Durum Tahminleri	$\hat{x}_k^- = A_{k-1} x_{k-1} + B_{k-1} u_{k-1}$
	1b) Hata Kovaryansı Tahmini	$\Sigma_{\tilde{x},k}^- = A_{k-1} \Sigma_{\tilde{x},k-1} A_{k-1}^T + \Sigma_{\tilde{w}}$
	1c) Gözlem Tahmini	$\hat{y}_k = C_k \hat{x}_k^- + D_k u_k$
Güncelleme	2a) Kestirici Kazancının Hesaplanması	$L_k = \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T [C_k \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T + \Sigma_{\tilde{v}}]^{-1}$
	2b) Durum Tahminlerinin Güncellemesi	$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + L_k (y_k - \hat{y}_k)$
	2c) Hata Kovaryansı Tahminlerinin Güncellemesi	$\Sigma_{\tilde{x},k} = \Sigma_{\tilde{x},k}^- - L_k \Sigma_{\tilde{y},k} L_k^T$

2.4.3 Genişletilmiş kalman filtresi

Kalman Filtresi, sistemdeki bütün gürültülerin beyaz gürültü ve Gauss dağılımına sahip olduğu varsayımı yapıldığında, doğrusal sistemler için optimal bir en küçük MSE kestiricisini ifade etmektedir. Ancak batarya modelinin doğrusal olmaması sebebiyle, Çizelge 2.8'de verilen döngü doğrudan kullanılamamaktadır. Doğrusal olmayan sistemlerde, Kalman Filtresi'nin uygulanması için çeşitli yöntemler mevcuttur.

Bu uygulamada, her adımda modelin doğrusallaştırılması ile uygulanan ve Çizelge 2.9'da gösterilen genişletilmiş Kalman filtresi kullanılacaktır. Genişletilmiş Kalman Filtresi, işlem yapılan noktada sistem denklemlerinin Taylor serisi açılımını kullanıp, yüksek dereceli terimlerinin ihmal ederek doğrusallaştırma yapmaktadır [21].

Çizelge 2.9 : Genişletilmiş Kalman Filtresi.

Tahmin	1a) Durum Tahminleri	$\hat{x}_k^- \approx f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, \bar{w}_{k-1})$
	1b) Hata Kovaryansı Tahmini	$\Sigma_{\tilde{x},k}^- = \hat{A}_{k-1} \Sigma_{\tilde{x},k-1} \hat{A}_{k-1}^T + \hat{B}_{k-1} \Sigma_{\tilde{w}} \hat{B}_{k-1}^T$
	1c) Gözlem Tahmini	$\hat{y}_k \approx h(\hat{x}_k^-, u_k, v_k)$
Güncelleme	2a) Kestirici Kazancının Hesaplanması	$L_k = \Sigma_{\tilde{x},k}^- \hat{C}_k^T [\hat{C}_k \Sigma_{\tilde{x},k}^- \hat{C}_k^T + \hat{D}_k \Sigma_{\tilde{v}} \hat{D}_k^T]^{-1}$
	2b) Durum Tahminlerinin Güncellemesi	$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + L_k (y_k - \hat{y}_k)$
	2c) Hata Kovaryansı Tahminlerinin Güncellemesi	$\Sigma_{\tilde{x},k} = \Sigma_{\tilde{x},k}^- - L_k \Sigma_{\tilde{y},k} L_k^T$

Burada $p_k = \{\hat{x}_k, u_k, \bar{w}_k\}$ olmak üzere, \hat{A}_k, \hat{B}_k ve $q_k = \{\hat{x}_k^-, u_k, \bar{v}_k\}$ olmak üzere \hat{C}_k, \hat{D}_k matrisleri, Eşitlik 2.22'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \hat{A}_k &= \left. \frac{df(x_k, u_k, w_k)}{dx_k} \right|_{p_k} & \hat{C}_k &= \left. \frac{dh(x_k, u_k, v_k)}{dx_k} \right|_{q_k} \\ \hat{B}_k &= \left. \frac{df(x_k, u_k, w_k)}{dw_k} \right|_{p_k} & \hat{D}_k &= \left. \frac{dh(x_k, u_k, v_k)}{dv_k} \right|_{q_k} \end{aligned} \quad (2.22)$$

2.4.4 Gerilim temelli kestirim

Bataryanın terminalinden ölçülen gerilim değeri kullanılarak, gerilim temelli bir batarya seviyesi kestiriminden bahsedilebilmektedir. Batarya dinlenme halindeyken, diğer bir deyişle dinamik etkilerin ihmal edilebildiği durumda iken, terminal gerilimi $v_T \approx OCV(z[k])$ olarak ifade edilebilmektedir.

Bu durumda, bataryanın açık devre gerilimi-batarya kapasitesi eğrisinden faydalanarak batarya kapasitesi, Eşitlik 2.23'teki gibi ifade edilebilmektedir.

$$z \approx OCV^{-1}(v_T) \quad (2.23)$$

Sadece terminal gerilimi kullanarak yük altında iken batarya kapasitesini tahmin etmenin, iç dirençler, kapasitif etkiler ve histerezis sebebiyle hatalı sonuçlar vereceği aşıkardır. Tüm etkenler hesaba katılarak Eşitlik 2.24'teki gibi bir denklem elde etmek mümkün olmaktadır.

$$z \approx OCV^{-1}(v_T + i R_0 + i_{R_1} R_1 - M_0 \text{sgn}(i) - Mh) \quad (2.24)$$

Eşitlik 2.24, ideal koşullar altında, gerçeğe en yakın batarya seviyesini vermektedir ancak bu denklemden doğru sonuçların alınabilmesi için, model parametrelerinin ve terminal akımının kusursuz olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bu varsayımların gerçekleşmediği durumda, açık çevrimde Eşitlik 2.24 de büyük tahmin hatalarına sebep olmaktadır [22].

2.4.5 Akım temelli kestirim

Akım temelli kestirim, terminalden çekilen akımın sürekli toplanarak, deşarj edilen toplam enerjinin hesaplanması temeline göre çalışmaktadır.

Eşitlik 2.25'te gösterildiği gibi terminal akımı sürekli olarak toplanmakta ve batarya kapasitesine bölünerek, toplam tüketim yüzdesel olarak elde edilmektedir. Hesaplanan bu değer, z_0 başlangıç değerinden çıkartılarak kalan batarya kapasitesi hesaplanmaktadır [23].

$$z_k = z_0 - \frac{\Delta t}{Q} \sum i_{ölçülen} \quad (2.25)$$

Akım temelli kestirim yöntemi ile batarya kapasitesini tahmin etme uygulamasındaki ilk zorluk, yöntemin doğruluğunun z_0 'a, yani batarya durağan haldeyken yapılan ilk batarya seviyesi tahmininin doğruluğuna tamamen bağımlı olmasıdır. Terminalden

deşarj edilen toplam enerji, z_0 'dan çıkartılarak, kalan seviye tahmin edilmeye çalışıldığından, z_0 bulunurken yapılacak hata kalıcı olacak ve sonraki tahminlerin tamamının hatalı olmasına sebep olacaktır. Ayrıca terminalden çekilen akım ölçülürken birçok parazitik etkiyi de beraberinde getirmektedir [24].

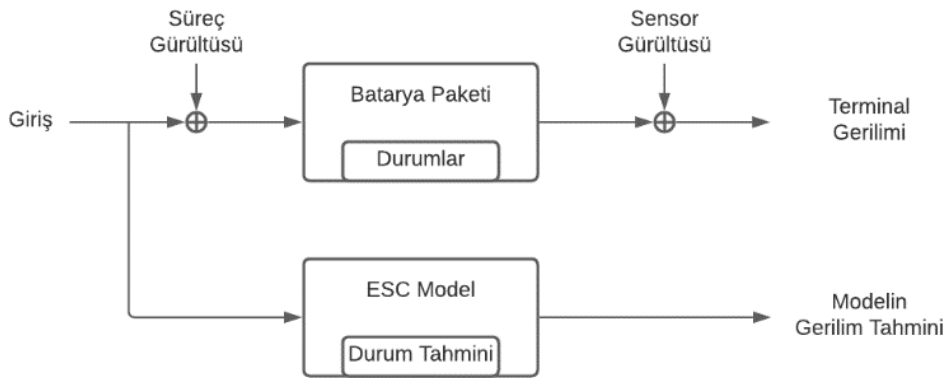
Eşitlik 2.26'da gösterildiği gibi ölçülen akımda, gerçek akımın ($i_{gerçek}$) yanı sıra, ölçüm devresinden kaynaklanan DC (Direct Current) (Doğru Akım) bias (i_{bias}), sensör gürültüsü ($i_{gürültü}$) ve doğrusal olmayan etkiler (i_{nonlin}) bulunmaktadır. Ayrıca hücrenin kendi kendine boşalması ($i_{özboşalım}$) ve sızıntı akımları da ($i_{sızıntı}$) ölçüm doğruluğunu etkileyen faktörlerdir. Bu parazitik etkiler zamanla birikerek batarya kapasitesi tahmininde hatalara sebep olmaktadır [19].

$$i_{ölçülen} = i_{gerçek} + i_{bias} + i_{gürültü} + i_{nonlin} - i_{özboşalım} - i_{sızıntı} \quad (2.26)$$

Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda, akım temelli kestirim yönteminin de açık çevrimde güvenilir olmadığı anlaşılmaktadır.

2.4.6 Model temelli kestirim

Gerilim temelli ve akım temelli kestirim yöntemlerinin birleşimi ile geliştirilen kapalı çevrim model temelli bir kestirim yöntemi Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 : Model Temelli Kestirim Blok Şeması.

Batarya paketinden çekilen akım, modelin girdisi olarak alınmaktadır. Çekilen akım, bir sensör vasıtasıyla ölçülmektedir ancak akımın gerçek değeri bilenemeyeceğinden ve bu belirsizlik iç durumları doğrudan etkileyeceğinden, bu belirsizlik süreç gürültüsü olarak modellenmektedir. Çekilen akıma karşılık, bataryanın terminal gerilimindeki değişimler de bir sensör vasıtası ile elde edilmektedir. Çıkış gerilimindeki gürültü,

durumları doğrudan etkilememektedir ancak bu belirsizliğin varlığı gerilim ölçümlerine tam olarak güvenilemeyeceğini gösterdiğinden, bu durum da sensör gürültüsü olarak modellenmektedir. Batarya kapasitesi doğrudan ölçülememektedir ancak bataryanın akım ve gerilimi ölçülerek tahmin edilebilmektedir. Ölçülen akım, matematiksel modelin girdisi olarak verildiğinde, modelin durum tahminleri ve çıktısı hesaplanabilmektedir [25].

Batarya kapasitesi, bu durum tahminlerinden birisidir. Bu tahminin doğruluğu, matematiksel modelin çıktısı olan gerilim tahmini, diğer bir deyişle uzay-zaman modelinin gözlem tahmini ile batarya paketinden ölçülen terminal gerilimi kıyaslanarak elde edilmektedir. Gerilim tahminini hesaplamak için, akım temelli kestirim yönteminden faydalanılmaktadır. Eşitlik 2.25'te gösterildiği gibi giriş akımı sürekli toplanarak, batarya kapasitesi tahmini (z_k) hesaplanmaktadır. Bulunan batarya kapasitesi ile Eşitlik 2.24 kullanılarak, bataryanın terminal gerilimi tahmini elde edilmektedir. Elde edilen gerilim tahmini ile batarya terminalinden ölçülen gerilimin farkı Eşitlik 2.27'de gösterildiği gibi hata olarak adlandırılmaktadır.

$$V_{hata} = V_{terminal} - V_{tahmin} \quad (2.27)$$

Eğer hata sıfır ise akım temelli kestirim yöntemi ile hesaplanan batarya kapasitesi tahmini doğru kabul edilmektedir. Ancak sıfırdan farklı ise, bu hata tahmini, sistemin güncellemesi için bir geri besleme olarak kullanılmaktadır. Bu geri besleme ile durum tahminini güncellemek için, ölçüm ve model hatalarından kaynaklanan belirsizliklere rağmen bazı özel koşullar altında iyi çalıştığı kanıtlanmış, sıralı olasılıksal çıkarım yönteminin özel bir durumunu kapsayan genişletilmiş Kalman filtresi kullanılmaktadır [26].



3. MATERYAL VE YÖNTEM

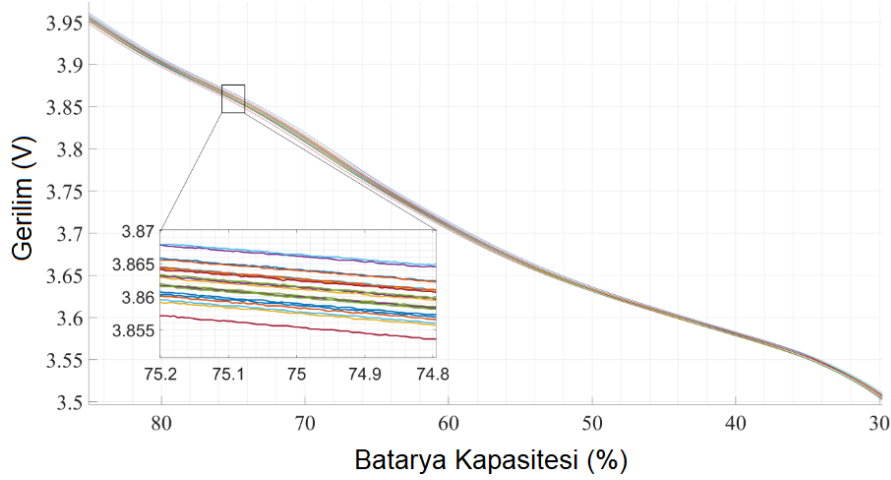
3.1 Batarya Modeli

Bir batarya hücresinde, modellenen ilk durum, hücre geriliminin, batarya kullanıldıkça düşmesi durumudur. Bu gerilim seviyesi lityum hücrelerin terminalerinden ölçüldüğünde tam dolu seviyede 4.2V, tam boşalmış halde 3.2V olarak görülmektedir. Batarya seviyesi, hücre tam dolu iken %100, tam boş iken %0 olarak tanımlanmaktadır. Tam dolu ve tam boşalma arasında bir durumda ise batarya seviyesi, %0 ile %100 arasında bir yerde bulunmaktadır. Genellikle z sembolü ile gösterilir ve birimsizdir. Batarya seviyesinin elde edilebilmesi için, bataryanın toplam kapasitesinin bilinmesi gerekmektedir. Toplam kapasite, bataryanın %100'den %0'a gelene kadar boşalttığı toplam enerji miktarıdır. Toplam kapasite genellikle mAh veya Wh cinsinden ifade edilir ve Q sembolü ile gösterilmektedir [27]. Toplam kapasite, eşdeğer devre modelinde hücreden hücreye farklılık gösteren bir sabittir, sıcaklığın ya da akımın bir fonksiyonu değildir ancak hücre kimyasalının parazitik yan reaksiyonları ve elektrot malzemelerinin yapısal olarak bozulmaları sebebiyle, hücre yaşlandıkça azalma göstermektedir [28].

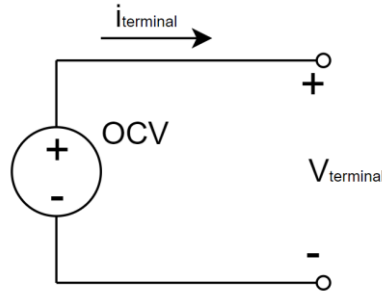
3.1.1 Açık devre gerilimi

Şekil 3.1'de açık devre gerilimi ile batarya kapasitesi arasındaki doğrusal olmayan ilişki gösterilmiştir. Batarya hücresinin açık devre gerilimi elde edildiğinde, doğrudan bu eğri yardımıyla batarya kapasitesi elde edilebilir. Ancak batarya terminalerinden ölçülen gerilim, sadece batarya durağan halde ve ideal koşullarda iken açık devre gerilimine eşit olmaktadır.

Şekil 3.2'de gösterilen eşdeğer devre modeli, durağan halde değilken bataryanın davranışını açıklayamamaktadır. Fakat eşdeğer devre modeline başlamak için ilk adım olarak gösterilmektedir [29].



Şekil 3.1 : Farklı Tipteki Lityum Bataryaların Açık Devre Gerilimi-Batarya Kapasitesi Eğrileri. [30]



Şekil 3.2 : Basit Batarya Eşdeğer Devre Modeli.

3.1.2 Coulomb sayma

Hücrenin şarjı esnasında, yükün büyük çoğunluğu hücrenin şarj seviyesini yükselten reaksiyonlara katılırken, küçük bir kısmı ise istenmeyen reaksiyonlar ile kaybolmaktadır. Bunun sonucu olarak hücreye gönderilen yük miktarı, hücre tarafından soğurulan yük miktarından farklı olmaktadır. Hücreye gönderilen yük ve soğurulan yükün oranına hücrenin şarj verimliliği veya Coulombic verimlilik denir ve Eşitlik 3.1'de yer alan $\eta(t)$ terimi ile gösterilir. Batarya seviyesinin zamana göre değişimi Eşitlik 3.1 ile açıklanabilmektedir.

$$\dot{z}(t) = \frac{-\eta(t) \cdot i(t)}{Q} \quad (3.1)$$

Coulombic verimlilik değeri; şarj durumuna, şarj hızına, sıcaklığa ve hücrenin iç elektrokimyasal durumuna bağlı olduğundan, Coulombic verimliliğin doğru bir modelini oluşturmak çok zor bir problemdir ancak lityum iyon hücrelerde 1'e yakın değerlerde olduğundan (~ 0.98), 1 olarak alınması çoğu zaman makul kabul edilmektedir [29].

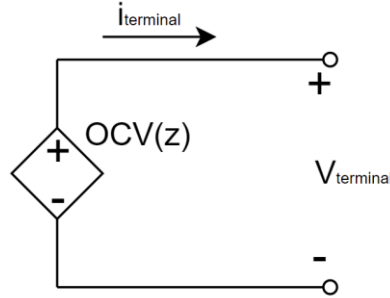
Bataryanın seviyesini tahmin etmek için kullanılan akım temelli tahmin yöntemi, Coulomb sayma yöntemine dayanmaktadır. Akım temelli tahmin yönteminde anlatıldığı gibi terminal akımı sürekli olarak toplanmaktadır. Batarya durağan halde iken ölçülen terminal gerilimi ile Şekil 3.1’de yer alan eğriden faydalanılarak, başlangıçtaki batarya kapasitesi elde edilir. Başlangıçtaki batarya kapasitesinden, Coulomb sayma yöntemiyle hesaplanan toplam tüketim çıkartılarak, kalan batarya kapasitesi hesaplanır. Bu hesaplama, Eşitlik 3.2’de gösterilmiştir [29].

$$z(t) = z(t_0) - \frac{1}{Q} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

Bu çalışmada yer alan hesaplamalar bir mikrodenetleyicide çalıştırılacağı için, sürekli zaman yerine, ayrık zamanlı modellerle ilgilenilmektedir. Bu sebeple sürekli zamandaki Eşitlikler, Eşitlik 3.3’teki gibi ayrık zamanda ele alınmaktadır.

$$z[k + 1] = z[k] - \frac{i[k] \Delta t}{Q} \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3, batarya kapasitesi için matematiksel bir model göstermektedir. Bu Eşitlikten yola çıkılarak, eşdeğer devre modeli geliştirilebilmektedir. Hücrenin açık devre geriliminin, şarj durumunun bir fonksiyonu olduğunun kabulü ile model Şekil 3.3’te gösterildiği gibi değiştirilmektedir [29].



Şekil 3.3 : Batarya Seviyesi Bağımlı Eşdeğer Devre Modeli.

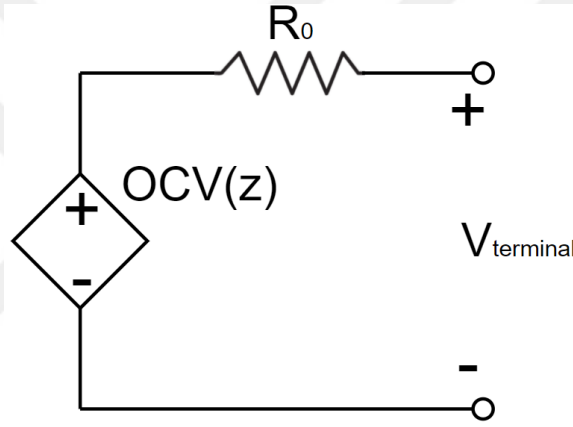
Bu model, temelde sadece Coulomb sayma yöntemine dayandığı için hala zayıf bir tahmin yöntemi olarak gösterilmektedir. Bu şekilde yapılan kalan batarya seviyesi tahmini, akım sensörünün ve başlangıç tahmininin hassasiyetine doğrudan bağımlı olmaktadır. Ayrıca bu model kullanılarak, sadece sağlıklı bir batarya ile doğruya yakın sonuçlar elde edilebilmektedir [29].

3.1.3 Eşdeğer seri direnç

Bu noktaya kadar geliştirilen zayıf eşdeğer devre modeli, yalnızca hücrenin durağan haldeki davranışını açıklayabilmektedir. Hücre zamanla değişen bir akıma maruz kaldığında, gerçekleşen durumları açıklamak için dinamik özelliklerin de modele eklenmesi gerekmektedir.

Eklenmesi gereken ilk dinamik davranış, batarya deşarj edildiğinde terminal geriliminin; açık devre geriliminin altına düşmesi, şarj edildiğinde ise açık devre geriliminin üzerine çıkmasıdır.

Bu durum Şekil 3.4'te gösterildiği gibi devreye, hücrenin iç direncini temsil eden bir eşdeğer seri direnç eklenmesi ile kısmen açıklanabilmektedir.



Şekil 3.4 : Seri Direnç Eklenmiş Eşdeğer Devre Modeli.

Geliştirilen yeni modele göre terminal gerilimi eşitliği (3.4)'teki halini almaktadır.

$$v[k] = OCV(z[k]) - i[k] R_0 \quad (3.4)$$

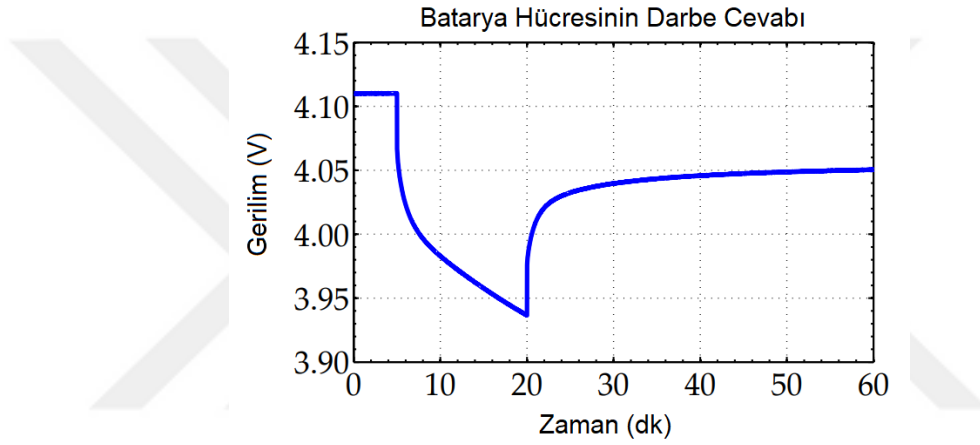
Bu direncin varlığı, gücün bir kısmının hücre iç direnci tarafından ısıya dönüştürüldüğünü ve verimliliğinin mükemmel olmadığını göstermektedir.

Bu model, basit elektronik araçlar için yeterli sayılabilecek bir modeldir ancak elektrik tahrikli araçlar gibi yüksek güç talep eden ve büyük ölçekli batarya paketleri kullanan uygulamalarda, batarya kapasitesini kestirmek için modele eklenmesi gereken birkaç dinamik özellik daha bulunmaktadır.

3.1.4 Difüzyon gerilimi

Polarizasyon, hücreden akım çekildiğinde, terminal geriliminin açık devre geriliminden uzaklaşmasını ifade etmektedir. Buraya kadar oluşturulan modelde, anlık polarizasyon kaynağı R_0 ile gösterilmektedir. Ancak gerçekte hücreden akım çekildiğinde polarizasyon geriliminin yavaş yavaş arttığı, hücre dinlenmeye geçtiğinde ise yavaş yavaş bozulduğu gözlemlenmektedir.

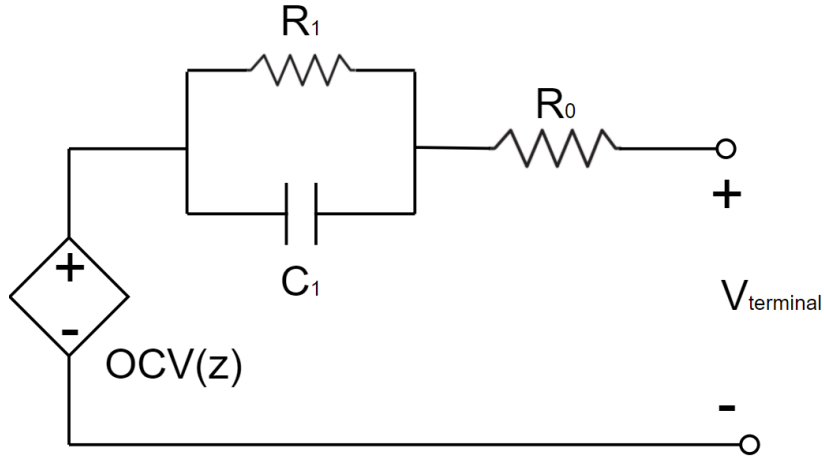
Şekil 3.5'te gerçek bir hücrenin polarizasyon davranışı gösterilmiştir. Hücre ilk 5dk'da dinlenme halindedir. 5.dk'dan 20.dk'ya kadar hücreden sabit akım çekilmekte, sonrasında yük kaldırılarak hücrenin dinlenmesine izin verilmektedir.



Şekil 3.5 : Polarizasyon Oluşumu. [29]

R_0 direnci, 20.dk'da yük kaldırıldığında ani voltaj yükselmesini açıklamaktadır ancak hücre geriliminin 20.dk'dan sonra yavaş yükselme davranışı, lityum iyon hücrelerindeki difüzyonu göstermektedir.

Yavaş difüzyon süreci, devreye eklenecek bir veya daha fazla paralel direnç-kapasitör devresi ile açıklanabilmektedir. Bu çalışmada, parametre tahminini ve hesaplamaları zorlaştırmamak için, modele bir tane paralel direnç-kapasitör devresi eklenmiştir. Şekil 3.6'da gösterilen eşdeğer devre modelindeki $R_1 - C_1$ devresi bu işlevi yerine getirmektedir.



Şekil 3.6 : Difüzyon Gerilimi Eşdeğer Devre Modeli.

Difüzyon davranışının eklenmiş olduğu hücre modelinin son halinde terminal gerilimini ifade eden çıkış eşitliği, Eşitlik 3.5'te gösterildiği gibi verilebilmektedir.

$$v[k] = OCV(z[k]) - R_1 i_{R_1}[k] - R_0 i[k] \quad (3.5)$$

$$i_{R_1}(t) + C_1 \dot{v}_{C_1} = i(t) \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.5 ile terminal gerilimini elde etmek için, i_{R_1} akımının hesaplanması gerekmektedir.

$$v_{C_1}(t) = R_1 i_{R_1}(t) \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.6'da verilen $i(t)$ denkleminde, Eşitlik 3.7'de verilen $v_{C_1}(t)$ yerine konulduğunda, Eşitlik 3.8'de gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$i_{R_1}(t) + C_1 R_1 \frac{di_{R_1}(t)}{dt} = i(t) \quad (3.8)$$

Denklem düzenlendiğinde, $i_{R_1}(t)$ akımının elde edileceği diferansiyel denklem, Eşitlik 3.9'da gösterilmektedir.

$$\frac{di_{R_1}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} i_{R_1}(t) + \frac{1}{R_1 C_1} i(t) \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9'daki diferansiyel denklem çözüldüğünde, ayrık zamana dönüştürülmüş haliyle Eşitlik 3.10'da gösterilen, $i_{R_1}(t)$ denklemi elde edilmektedir.

$$i_{R_1}[k+1] = \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right) i_{R_1}[k] + \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right)\right) i[k] \quad (3.10)$$

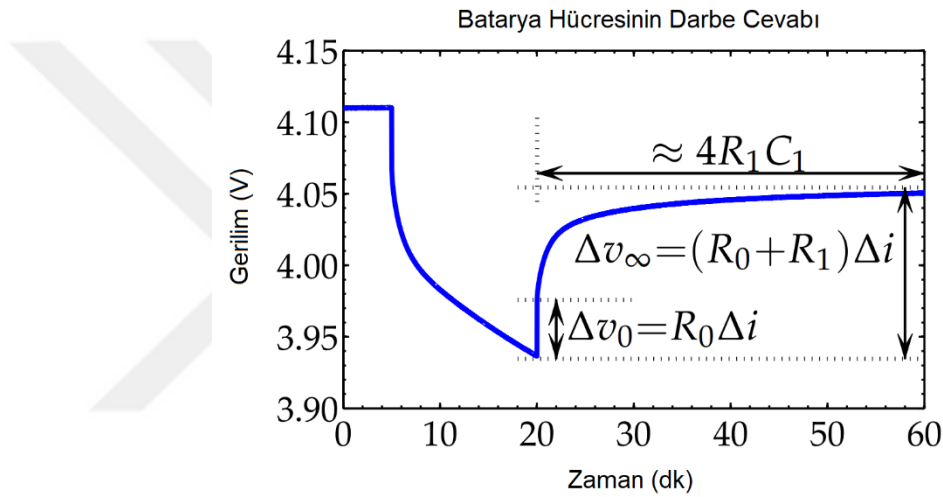
Sonuç olarak, Eşitlik 3.3, Eşitlik 3.5 ve Eşitlik 3.10 ile elde edilen ayrık zamanlı eşdeğer devre modeli, Eşitlik 3.11’de gösterilmektedir.

$$z[k + 1] = z[k] - \frac{i[k] \Delta t}{Q}$$

$$v[k] = OCV(z[k]) - R_1 i_{R_1}[k] - R_0 i[k] \quad (3.11)$$

$$i_{R_1}[k + 1] = \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right) i_{R_1}[k] + \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right)\right) i[k]$$

Elde edilen denklemlerdeki parametrelerin hücre üzerindeki etkileri Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Lityum-İyon Hücresinin Darbe Cevabı. [29]

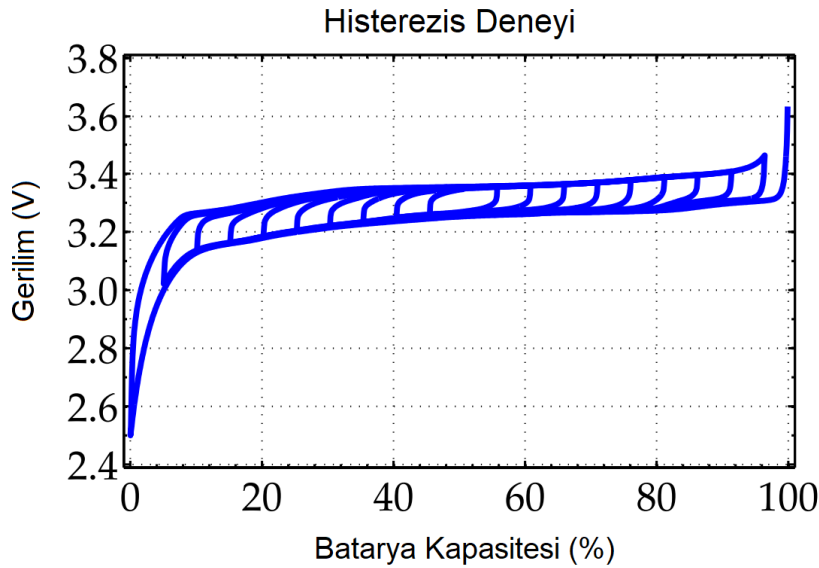
Darbe cevabını göstermek için Şekil 3.7’de uygulanan prosedürde, hücre sabit bir akım ile 20 dakika boyunca deşarj edilmiş ve 20.dakikada deşarj işlemi sonlandırılmıştır. Kapasitör gerilimi anlık olarak değişmeyeceği için, deşarj sonlandırıldığındaki ani gerilim yükselmesi R_0 seri direncinin etkisini göstermektedir. Deşarj edilen sabit akım Δi bilindiğinden, $\Delta v_0 = R_0 \Delta i$ denklemi kullanılarak R_0 direnci hesaplanabilmektedir. Sonrasında, gerilim sabit duruma gelene kadar geçen süreç gözlemlenmektedir. Bu durumun Şekil 3.7’de yaklaşık olarak 60. dakikada gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Gerilim sabit duruma geçene kadar oluşan gerilim farkı, Δv_∞ ile ifade edilmektedir. R_0 ve Δi değerleri de yerine koyularak $\Delta v_\infty = (R_0 + R_1) \Delta i$ denkleminde R_1 direnci hesaplanmaktadır. Son olarak, $R_1 C_1$ devresinin yaklaşık 4τ süresinde kararlı duruma geçeceği bilindiğinden, $4\tau = 4R_1 C_1$ eşitliğinden faydalanarak C_1 değeri de hesaplanmaktadır.

3.1.5 Histerezis gerilimi

Şekil 3.6'da gösterilen eşdeğer devre modelinde, deşarj ya da şarj işlemi sonlandırıldığında hücre gerilimi R_0 direncinin etkisiyle aniden değişmekte, C_1 kapasitesi üzerindeki gerilim ise R_1 direnci üzerinden boşalarak ve terminal gerilimi zamanla açık devre gerilimine yakınsamaktadır. Ancak pratikte batarya hücresi bundan farklı bir davranış göstermektedir. Örnek olarak, dolu bir batarya hücresi %50'ye kadar boşaltıp bir süre dinlendirildiğinde; terminal geriliminin, açık devre geriliminden daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Benzer şekilde, boş bir batarya hücresi %50'ye kadar doldurulup bir süre dinlendirildiğinde de terminal geriliminin, açık devre geriliminden büyük olduğu gözlemlenmektedir [31].

Bu fenomeni test etmek için laboratuvar ortamında tamamen dolu bir hücre, R_0 direnci üzerindeki gerilim düşümleri ve difüzyon voltajı etkilerini en aza indirmek için $C/30$ düzeyinde düşük bir akımla %0'a kadar deşarj edilir. Bu sayede, terminal gerilimi, açık devre gerilimine çok yakın seyretmektedir. Hücre %0'a kadar boşaltıldıktan sonra yine $C/30$ oranında %95'e kadar şarj edilir. Sonra %5'e kadar tekrar deşarj edilir ve %50'e kadar prosedür devam ettirilir.

Bu deney sonucunda kaydedilen eğrilerin toplu olarak çizimi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen grafik, hücrenin doğrudan zamana bağlı değil, hücre şarj durumu ve kullanım geçmişine bağlı olan bir histerezis gerilimine sahip olduğunu göstermektedir.



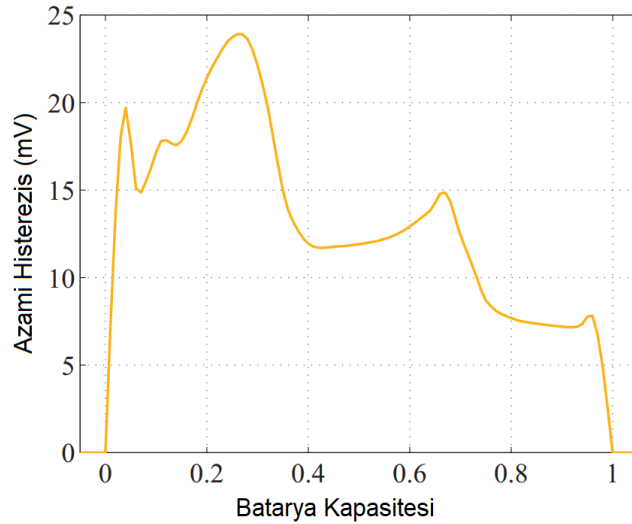
Şekil 3.8 : Histerezis Gerilimi Deney Sonuçları. [29]

Histerezis ve difüzyon gerilimleri arasındaki farka dikkat edilmelidir. Difüzyon gerilimleri zamanla değişmekte, ancak histerezis gerilimleri yalnızca şarj durumu değiştiğinde değişmektedir. Bir hücrenin dinlenmesine izin verildiğinde, difüzyon gerilimi sıfıra düşmektedir ancak histerezis gerilimi değişmemektedir. Eşdeğer devreye eklenecek olan histerezis modeli ile bu davranışı gösterilmektedir.

Şekil 3.8’de şarj durumundaki herhangi bir değişikliğin, histerezis gerilimini de atalet ile değiştirdiği gözlenmektedir. Bu ataleti temsil etmenin bir yolu, Eşitlik 3.9’da RC devresi için yazılmış olan sönümlenme denklemi gibi, birinci dereceden bir sönümlenme denklemi yazmaktır. Histerezis geriliminin zamana ve batarya kapasitesine göre değişimini $h(z, t)$ ile gösterilmektedir. Eşitlik 3.12’de $h(z, t)$ ’nin hesaplanacağı diferansiyel denklem gösterilmiştir.

$$\frac{dh(z, t)}{dz} = \gamma \operatorname{sgn}(\dot{z})(M(z, \dot{z}) - h(z, t)) \quad (3.12)$$

$M(z, \dot{z})$, histerezis kaynaklı maksimum polarizasyonu ifade eden fonksiyondur. Histerezis gerilimini daha iyi ifade etmek için, Şekil 3.8’deki histerezis grafiğinden, açık devre gerilimi çıkartılarak, Şekil 3.9’daki hali elde edilmiştir.



Şekil 3.9 : Açık Devre Gerilimi Çıkarılmış Histerezis Grafiği. [32]

Eşitlik 3.12’yi modele uydurmak için, batarya kapasitesine göre değil, zamana göre bir diferansiyel denklem olacak şekilde, iki tarafı da dz/dt ile çarpılarak Eşitlik 3.13’teki gibi manipüle edilmektedir.

$$\frac{dh(z, t)}{dz} \frac{dz}{dt} = \gamma \operatorname{sgn}(\dot{z})(M(z, \dot{z}) - h(z, t)) \frac{dz}{dt} \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13, $\frac{dz}{dt} = -\frac{i(t)}{Q}$ ve $\dot{z} \operatorname{sgn}(\dot{z}) = |\dot{z}|$ ifadelerinden faydalanılarak tekrar yazıldığında, Eşitlik 3.14'teki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{dh(z, t)}{dt} = -\left|\frac{i(t)\gamma}{Q}\right| h(t) + \left|\frac{i(t)\gamma}{Q}\right| M(z, \dot{z}) \quad (3.14)$$

Histeresis modeli, Eşitlik 3.14'te sürekli zamanda ifade edilmektedir. Ayırık zamanda geliştirilen uygulamada kullanılması için Eşitlik 3.14 yerine Eşitlik 3.15'te gösterildiği gibi fark denklemi kullanılmaktadır.

$$h[k + 1] = \exp\left(-\left|\frac{i(t)\gamma}{Q}\right|\right) h[k] + \left(1 - \exp\left(-\left|\frac{i(t)\gamma}{Q}\right|\right)\right) M(z, \dot{z}) \quad (3.15)$$

Gösterimi basitleştirmek için $M(z, \dot{z})$ fonksiyonu $-M \operatorname{sgn}(i[k])$ şeklinde ifade edilmektedir. Bu ifade yerine koyulduğunda, Eşitlik 3.16 elde edilmektedir.

$$h[k + 1] = \exp\left(-\left|\frac{i(t)\gamma}{Q}\right|\right) h[k] - \left(1 - \exp\left(-\left|\frac{i(t)\gamma}{Q}\right|\right)\right) M \operatorname{sgn}(i[k]) \quad (3.16)$$

Bu denklemde $h[k]$ gerilimi her zaman $-M \leq h[k] \leq M$ aralığında yer almaktadır. Bu denklem, M olmadan yazıldığında, $h[k]$ birimsiz ve $-1 \leq h[k] \leq 1$ aralığında değişen bir terim haline dönüşmektedir.

$$h[k + 1] = \exp\left(-\left|\frac{i(t)\gamma}{Q}\right|\right) h[k] - \left(1 - \exp\left(-\left|\frac{i(t)\gamma}{Q}\right|\right)\right) \operatorname{sgn}(i[k]) \quad (3.17)$$

Dinamik histeresisi ifade etmek için, $M h[k]$ çıkış denklemi kullanılmaktadır. Ek olarak, akımın yönü değiştiğinde aniden değişen anlık histeresisi tanımlamak için ise $M_0 s[k]$ ifadesi kullanılmaktadır. Burada $s[k]$, Eşitlik 3.18'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

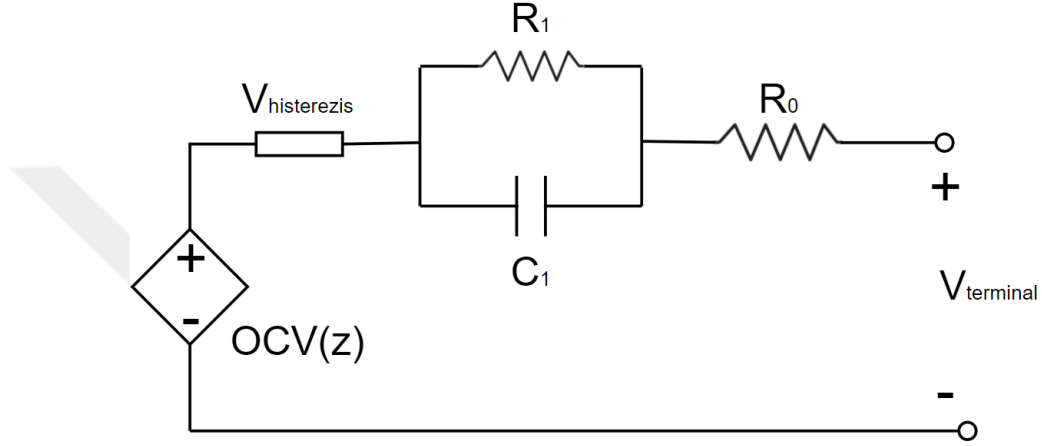
$$s[k] = \begin{cases} \operatorname{sgn}(i[k]), & |i[k]| > 0 \\ s[k - 1], & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.18)$$

Sonuç olarak, terminal geriliminin hesaplandığı çıkış denkleminde, histeresis gerilimi Eşitlik 3.19'daki gibi ifade edilmektedir.

$$M_0 s[k] + M h[k] \quad (3.19)$$

3.1.6 Gelişmiş kendini düzeltmeli hücre modeli

Şekil 3.10’da verilen ESC (Enhanced Self-Correcting Cell) (Gelişmiş Kendini Düzelten Hücre) modeli, buraya kadar anlatılan hücre modellerinin birleşimini göstermektedir. Histerezis gerilimini modellediği için gelişmiş olarak adlandırılmaktadır. Hücre dinlenme halinde ya da sabit akımla deşarj ediliyorken, terminal gerilimi, açık devre gerilimi ve histerezis geriliminin toplamına yakınsadığı için kendi kendini düzelten olarak ifade edilmektedir [29].



Şekil 3.10 : ESC Modeli.

Elde edilen Eşitlik 3.3, Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.17 kullanılarak, ESC modelin durum uzay denklemleri yazılabilir.

$A_{RC} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right)$ ve $A_H[k] = \exp\left(-\left|\frac{i[k] \gamma \Delta t}{Q}\right|\right)$ olmak üzere durum uzay denklemleri, Eşitlik 3.20’de gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} z[k+1] \\ i_R[k+1] \\ h[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & A_{RC} & 0 \\ 0 & 0 & A_H[k] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z[k] \\ i_R[k] \\ h[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t}{Q} & 0 \\ (1-A_{RC}) & 0 \\ 0 & A_H - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i[k] \\ \text{sgn}(i[k]) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

ESC modelinin çıkışı olan terminal gerilimi denklemi ise Eşitlik 3.21’de gösterilmektedir.

$$v[k] = OCV(z[k]) + M_0 s[k] + M h[k] - R_1 i_{R_1} - R_0 i[k] \quad (3.21)$$

3.1.7 ESC hücre modelinin genişletilmiş kalman filtresi uygulaması

Batarya modelini oluşturan Eşitlik 3.3, Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.17 eşitliklerinin, türevleri hesaplanarak; GKF (Genişletilmiş Kalman Filtresi) için kullanılacak eşitlikler aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

Eşitlik 3.3 için, türev sonucu Eşitlik 3.22’de gösterilmektedir.

$$\left. \frac{\partial z_{k+1}}{\partial z_k} \right|_{z_k=\hat{z}_k} = 1 \quad \left. \frac{\partial z_{k+1}}{\partial w_k} \right|_{w_k=\bar{w}_k} = -\frac{\Delta t}{Q} \quad (3.22)$$

Eşitlik 3.10 için, $A_{RC} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right)$ olmak üzere türev sonucu Eşitlik 3.23’te gösterilmektedir.

$$\left. \frac{\partial i_{R,k+1}}{\partial i_{R,k}} \right|_{i_{R,k}=\hat{i}_{R,k}} = A_{RC} \quad \left. \frac{\partial i_{R,k+1}}{\partial w_k} \right|_{w_k=\bar{w}_k} = 1 - A_{RC} \quad (3.23)$$

Eşitlik 3.17 için, $A_H[k] = \exp\left(-\left|\frac{i[k]\gamma\Delta t}{Q}\right|\right)$ olmak üzere türev sonucu Eşitlik 3.24’te gösterilmektedir.

$$\left. \frac{\partial h_{k+1}}{\partial h_k} \right|_{\substack{h_k=\hat{h}_k \\ w_k=w}} = \bar{A}_{H,k} \quad (3.24)$$

$$\left. \frac{\partial h_{k+1}}{\partial w_k} \right|_{\substack{h_k=\hat{h}_k \\ w_k=w}} = -\left|\frac{\gamma\Delta t}{Q}\right| \bar{A}_{H,k} (1 + \text{sgn}(i_k + \bar{w})\hat{h}_k)$$

Eşitlik 3.21 için, türev sonuçları ise Eşitlik 3.25’te gösterilmektedir.

$$\frac{\partial y_k}{\partial i_{R_1,k}} = -R_1$$

$$\frac{\partial y_k}{\partial h_k} = M$$

$$\frac{\partial y_k}{\partial v_k} = 1$$

$$\frac{\partial y_k}{\partial s_k} = M_0$$

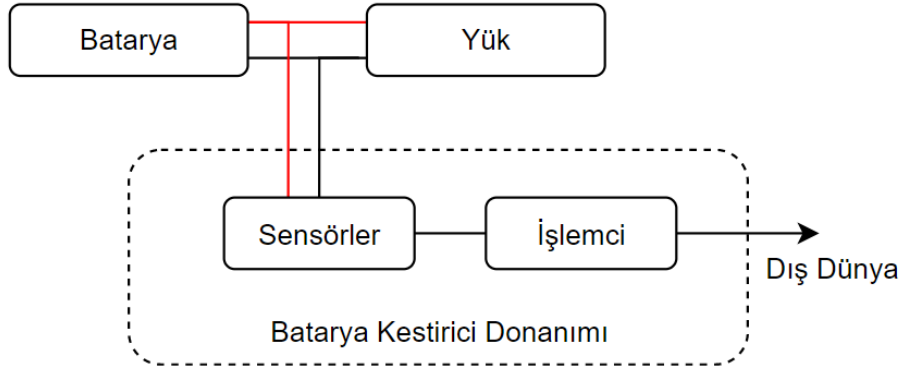
$$\left. \frac{\partial y_k}{\partial z_k} \right|_{z_k=\hat{z}_k} = \left. \frac{\partial OCV(z_k)}{\partial z_k} \right|_{z_k=\hat{z}_k}$$

(3.25)

4. SİSTEM MİMARİSİ

4.1 Genel Sistem Tasarımı

Şekil 4.1’de genel sistem mimarisi gösterilmektedir. Hava aracında, bir lityum-iyon polimer bataryanın terminalinden, yük altında akım ve gerilim ölçümü yapılmaktadır. Sensörler aracılığı ile elde edilen akım ve gerilim bilgisi, seri haberleşme arayüzü ile işlemciye gönderilmektedir. Batarya modeli ve Kalman iterasyonunu içeren kestirim algoritması mikrodenetleyici içerisinde çalışmaktadır. Algoritma sürekli bir döngü halinde çalışarak, bataryanın kapasitesini anlık olarak tahmin etmekte ve yine bir seri haberleşme arayüzü vasıtasıyla akım, gerilim, batarya kapasitesi bilgilerini ve uyarı mesajlarını dış dünyaya göndermektedir.

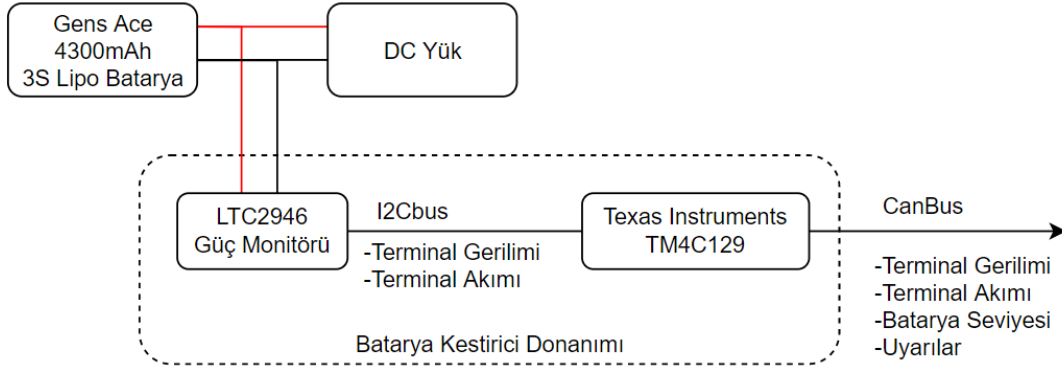


Şekil 4.1 : Genel Sistem Mimarisi Blok Şeması.

Genel sistem mimarisi, donanım bağımsız olarak çalışmaktadır. Bataryayı kullanan sistemin ihtiyacına göre, batarya kapasitesi ya da çalışma gerilimi değiştirilebilmektedir. Kullanılacak herhangi bir lityum-iyon bataryanın eğrileri ve parametreleri algoritmada değiştirilerek, istenilen batarya kullanılabilir. Kullanılacak bataryaya karar verildikten sonra, azami batarya gerilimi ve akımına uygun aralıkta örnekleme yapabilen ve sistemin gereksinimlerine uygun hassasiyette çalışan analog-sayısal çevirici, akım-gerilim sensörleri ya da güç monitörleri tercih edilebilmektedir. Son olarak kestirim algoritmasını çalıştırabilecek saat hızına, hafızaya ve gerekli haberleşme arayüzlerine sahip herhangi bir mikrodenetleyici kullanılabilir.

4.2 Donanım Mimarisi

Uygulama yapılan sistemin donanım bileşenleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Sistemde 3S1P paket yapısına sahip, nominal gerilimi 11.1V olan, 4300mAh kapasiteli Gens Ace marka yüksek gerilim lityum iyon polimer batarya tercih edilmiştir. Bataryanın yük altındaki benzetimini yapmak için elektronik DC yük kullanılmaktadır.



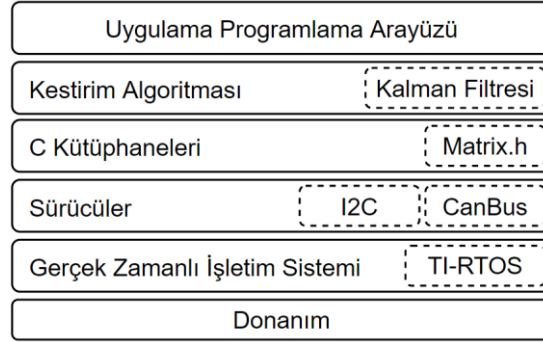
Şekil 4.2 : Donanım Mimarisi Blok Şeması.

Batarya yük altındaki iken akım ve gerilimi okumak için Linear Technology firmasına ait 12-bit çözünürlüklü analog-sayısal çeviriye sahip, 0.6% doğruluk ile akım ve gerilim ölçümü yapabilen LTC2946 güç monitörü kullanılmıştır. Entegre, I2C (Inter-Integrated Circuit) (Entegre Devreler Arası) seri haberleşme arayüzü ile ölçüm sonuçlarını mikrodeneleyiciye göndermektedir.

İşlem birimi olarak, ARM Cortex-M4 mimarisine sahip Texas Instruments firmasına ait TM4C129 serisi 32 bit mikrodeneleyici kullanılmıştır. Kullanılan mikrodeneleyicinin veri sayfası EK-1’de yer almaktadır. Mikrodeneleyici, güç monitöründen aldığı akım ve gerilim bilgilerini, batarya kapasitesi tahminini ve bilgiler neticesinde ürettiği uyarı mesajlarını CAN Bus (Controller Area Network Bus) (Kontrol Alan Ağı Veri Yolu) seri haberleşme hattı aracılığı ile uzak birimlere göndermektedir. Güç monitörü ve işlemciyi içeren batarya kestirici donanımı bir devre kartı olarak hazırlanmıştır. Batarya doğrudan bu devre kartına bağlanarak; güç çıkışı, kart üzerinde bulunan ölçüm direnci üzerinden verilmektedir. Böylelikle bataryadan yük çekildiğinde, direnç üzerindeki gerilimin düşümü LTC2946 tarafından okunmakta ve akım hesaplaması yapılmaktadır. Güç monitörünün veri sayfası EK-2’de yer almaktadır.

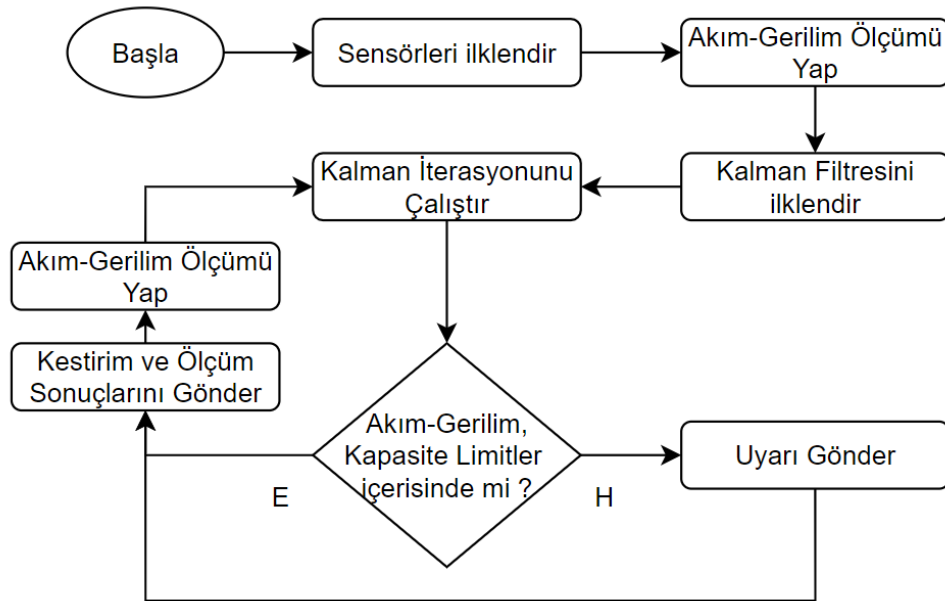
4.3 Yazılım Mimarisi

Batarya kapasitesi kestirim yazılımı, Şekil 4.3'te gösterilen çok katmanlı yazılım mimarisinde, kestirim algoritmaları katmanında bulunmaktadır. Bu yapı sayesinde kestirici yazılımı, seri haberleşme sürücülerinin koşabileceği farklı bir donanım ya da işletim sisteminde, farklı bir dille yazılan yazılım bileşenleriyle donanım bağımsız olarak çalışabilmektedir.



Şekil 4.3 : Çok Katmanlı Yazılım Mimarisi.

Şekil 4.4'te yazılım akış diyagramı gösterilmiştir. İşlemci öncelikle, akım ve gerilim ölçümü için kullanılacak sensörün ilk ayarlamalarını yapmaktadır. Akabinde, laboratuvar testleri ile elde edilmiş ve bataryaya özel olan açık devre gerilimi-batarya kapasitesi eğrisi, batarya kapasitesi, eşdeğer devre elemanlarının değerlerinin ve Kalman filtresi parametrelerinin iklendirmesi yapılmaktadır.

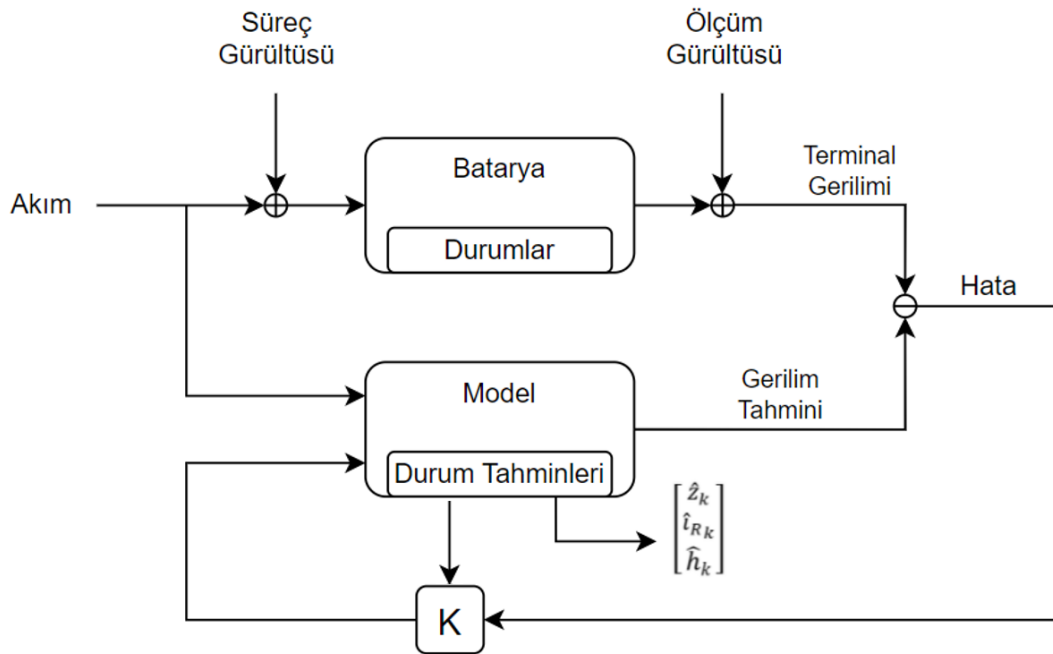


Şekil 4.4 : Yazılım Akış Diyagramı.

İklendirme safhası bittikten sonra, Kalman filtresi sürekli bir döngü halinde çalıştırılarak, her yeni akım ve gerilim ölçümünde tahmin güncellemesi yapmaktadır. Elde edilen tahminler ve uyarı mesajları periyodik olarak uçuş kontrol sistemine gönderilmektedir.

4.4 Model Temelli Kestirim Mimarisi

Şekil 4.5'te model temelli kestiricinin işleyişi gösterilmiştir. Sistemde gerçek batarya, bataryanın matematiksel modeli ile karşılaştırılarak, kapasite tahmini yapılmaya çalışılmaktadır.



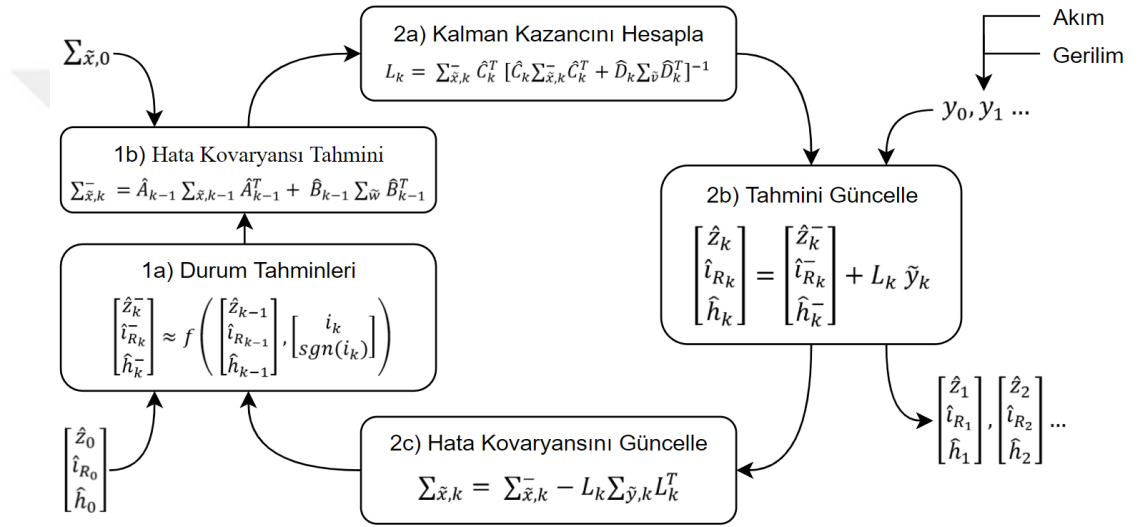
Şekil 4.5 : Model Temelli Kestirim Blok Şeması.

Öncelikle gerçek bataryanın terminalinden akım ve gerilim ölçümü yapılmaktadır. Ölçülen akım, matematiksel modele girdi olarak verilerek bir terminal gerilimi tahmini elde edilmektedir. Batarya terminalinden ölçülerek elde edilen gerçek terminal gerilimi ile matematiksel modelin üretmiş olduğu terminal gerilimi tahmininin farkı alınarak tahmin hatası elde edilmektedir.

Elde edilen tahmin hatası, Kalman filtresine girdi olarak verilmektedir. Kalman filtresinin uyarlamalı olarak hesapladığı kazanç katsayısı bu hata ile çarpılarak, bir önceki iterasyonda hesaplanan tahminler güncellenmektedir.

4.5 Kalman Döngüsü

Şekil 4.6’da bir Kalman filtresinin işleyişi gösterilmektedir. Adım 1a ve 2a, zaman güncellemesi ya da diğer bir deyişle tahmin adımları olarak adlandırılmaktadır. Kalman filtresinin, yalnızca ilk döngüsünde; hata kovaryansı $\Sigma_{\bar{x},0}$ ve durum vektörünün elemanları olan; eşdeğer devredeki RC akımı \hat{i}_{R_0} ile histerezis gerilimi \hat{h}_0 değerleri başlangıçta sıfır olarak alınır. Yalnızca durum vektöründeki batarya kapasitesi tahmini olan \hat{z}_0 için, durağan haldeki terminal gerilimi kullanılarak açık devre gerilimi – batarya kapasitesi eğrisi vasıtasıyla batarya kapasitesi elde edilmekte ve ilk değer olarak atanmaktadır.

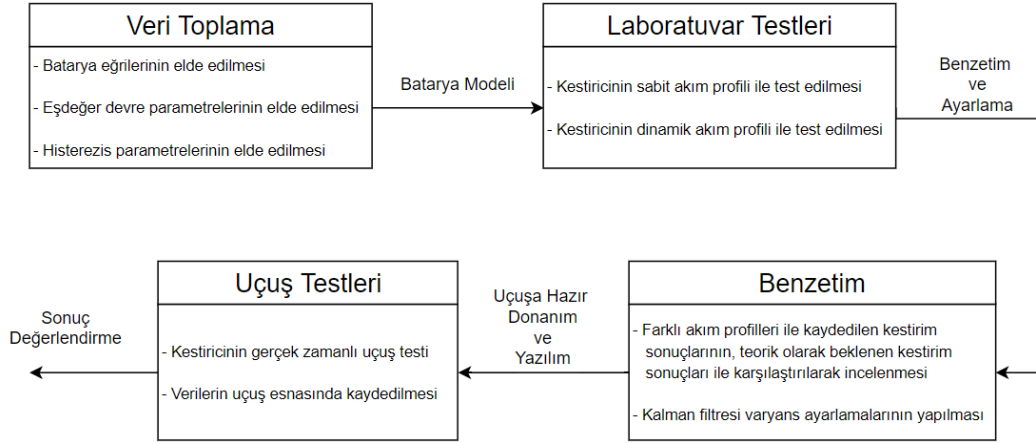


Şekil 4.6 : Kalman Filtresi Blok Şeması.

Adım 2a, 2b ve 2c, filtrenin ölçüm güncellemesi ya da diğer bir deyişle doğrulama adımları olarak adlandırılır. Adım 2a’da hata kovaryansı kullanılarak her döngüde Kalman kazancı güncellenmektedir. Adım 2b de ise güncel Kalman kazancı ve güncel tahmin hatası \tilde{y}_k ’nin çarpımı kadar, geçmiş tahmin üzerinde bir düzeltme yapılmaktadır. Tahmin hatası \tilde{y}_k ’nin hesaplaması için ölçülen akım değeri bu adımda girdi olarak kullanılmakta ve Eşitlik 3.21’de gösterildiği gibi terminal gerilimi tahmini hesaplanmaktadır. Ölçülen terminal geriliminden, tahmin edilen terminal gerilimi çıkarılarak \tilde{y}_k tahmin hatası elde edilmiş olmaktadır. Bu adım sonunda güncellenen \hat{z}_k değeri, sistemin çıktısı olarak verdiği batarya kapasitesi değeridir. Adım 2c’de hata kovaryansı güncellenerek, tekrar zaman güncellemesi adımlarına geçilmekte ve aynı işlemler yeni ölçümler ile iteratif olarak tekrarlanmaktadır.

4.6 Test ve Değerlendirme Ortamları

Şekil 4.7’de veri toplama safhasından itibaren, batarya kestirici donanımı ve yazılımının doğrulaması gösterilmiştir. Laboratuvarda kurulan veri toplama ortamı ile öncelikle batarya açık devre gerilimi-batarya kapasitesi eğrisi, eşdeğer devre komponentlerinin değerleri ve histerezis parametreleri hesaplanmaktadır.



Şekil 4.7 : Test ve Değerlendirme Ortamı Blok Şeması.

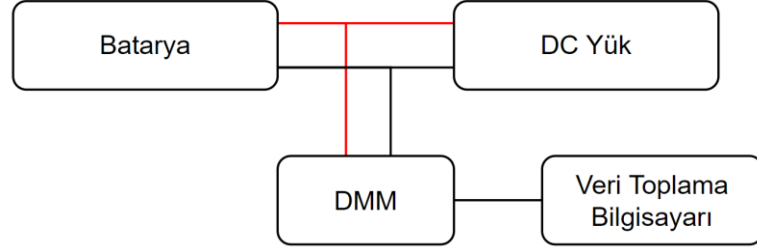
Veri toplama ortamı aracılığı ile oluşturulan batarya parametreleri ile gerçek donanım üzerindeki işlemcide koşan, batarya kestirim algoritmaları çalıştırılmaktadır. Batarya kestirici donanımı, laboratuvar ortamındaki DC yük ile, sabit akım ve darbe akım profilleri uygulanarak test edilmektedir. Bu testler sonucunda, uçuş önce incesi ayar ve iyileştirmeler yapılmaktadır.

Laboratuvar testleri sonrasında uçuşa hazırlanan batarya kestirici donanımı, uçuşta denenmesi için uçuşa hazır sabit kanatlı İHA'ya entegre edilmektedir. Kestirici donanımı, uçuş esnasında kestirim algoritmalarını çalıştırarak batarya kapasitesini tahmin etmeye çalışmaktadır. Hem tahmin edilen batarya kapasitesi değeri hem de gerçek zamanlı olarak ölçülen akım ve gerilim değerleri, seri haberleşme arayüzü üzerinden uçuş kontrol birimine gönderilerek, uçuş kontrol birimi üzerindeki hafıza kartına kaydedilmektedir.

Uçuş sonrasında kaydedilen uçuş verileri alınarak, bilgisayardaki benzetim ortamında kestirim algoritması tekrar çalıştırılmaktadır. Benzetim sonucundaki batarya kapasitesi tahmini ile uçuş esnasında gerçek zamanlı olarak yapılan batarya kapasitesi tahmini karşılaştırılarak, doğrulama ve iyileştirme yapılmaktadır.

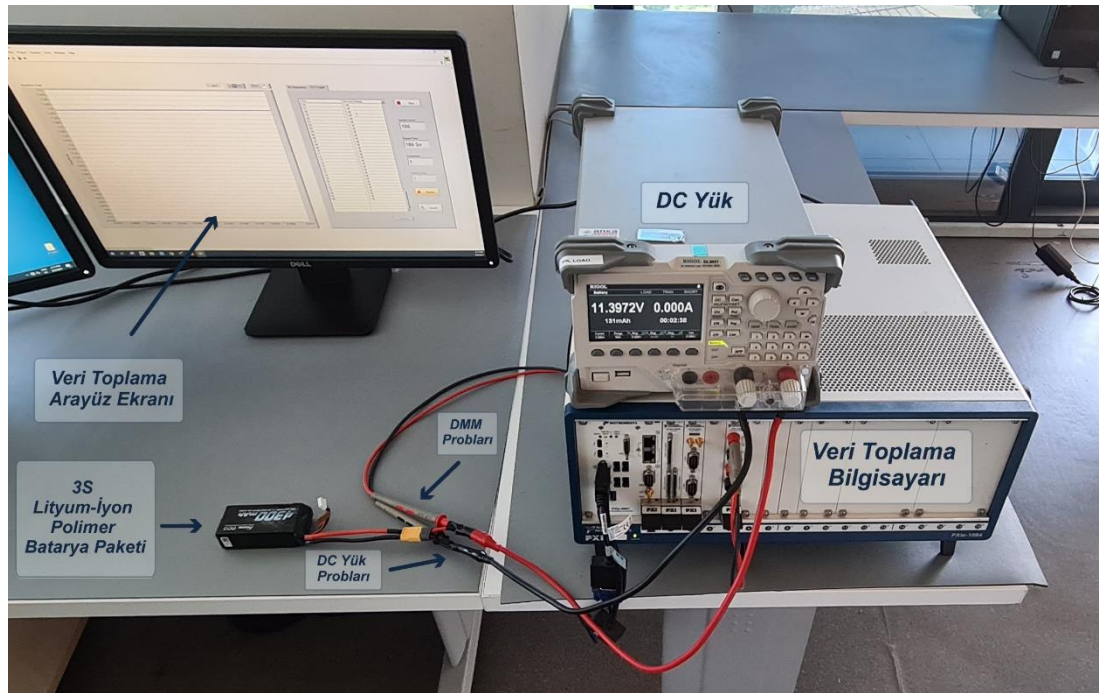
4.6.1 Veri toplama ortamı

Açık devre gerilimi ve batarya kapasitesi arasında doğrusal olmayan ilişkiyi elde etmek için Şekil 4.8’de gösterilen veri toplama ortamı kurulmuştur.



Şekil 4.8 : Veri Toplama Ortamı Blok Şeması.

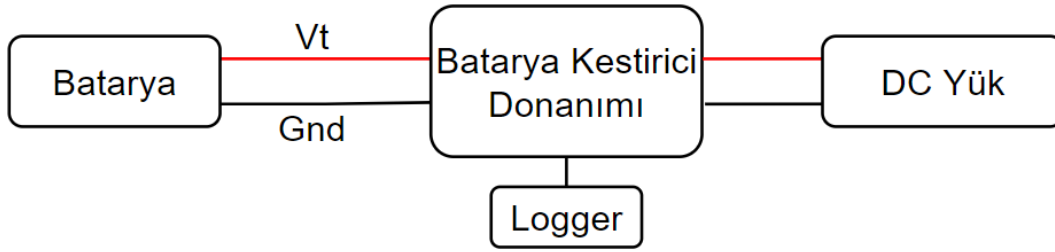
Açık devre gerilimi ve batarya kapasitesi arasında doğrusal olmayan ilişkiyi elde etmek için resim 4.1’de gösterilen veri toplama ortamı kurulmuştur. Kullanılan batarya 4300 mAh toplam kapasiteye sahip, 3S lityum-iyon polimer yapıda 4.35V azami çalışma gerilimine sahip yüksek gerilim bir batarya paketidir. Rigol DL3031 DC yük ile bataryaya yük uygulanmış ve deşarj esnasında National Instrument firmasının PXI bilgisayarı ve DMM (Dijital Multimetre) modülü ile batarya paketinin terminal gerilimi anlık olarak kaydedilmiştir. DC yük ile ilgili veri sayfaları EK-3’de, PXI ile ilgili veri sayfaları EK-4’de ve DMM ile ilgili veri sayfaları EK-5’te yer almaktadır.



Resim 4.1 : Batarya Veri Toplama Ortamı Görünümü.

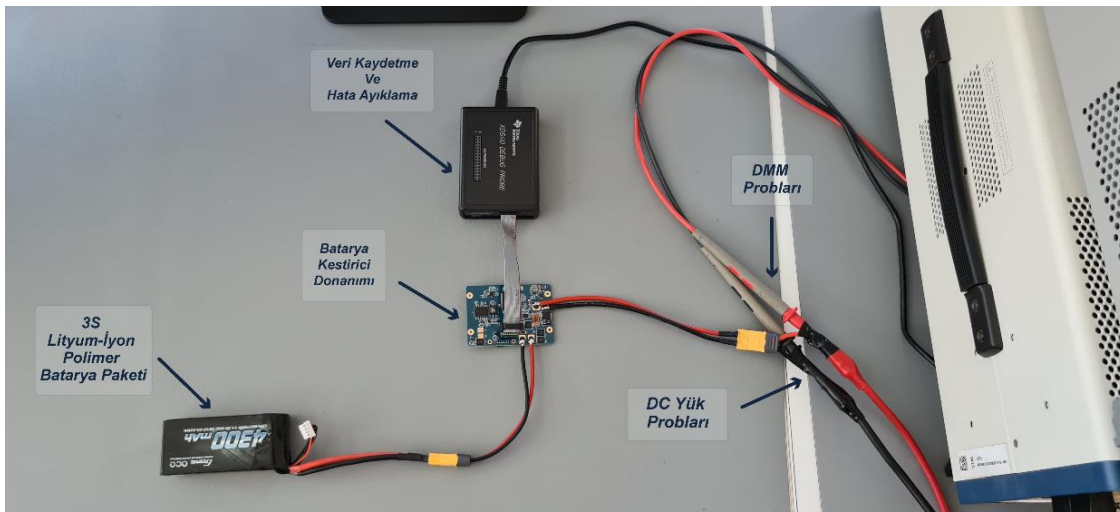
4.6.2 Laboratuvar test ortamı

Batarya kestirici donanım ve yazılımını, laboratuvar ortamında sabit ya da darbe akımı profili ile test etmek için Şekil 4.9’de gösterilen laboratuvar test ortamı kurulmuştur. Bu ortamda batarya kestirici donanımı, batarya ile DC yük arasında bulunmaktadır. Bataryadan yük çekilirken, akım batarya kestirici donanımı üzerinden akmaktadır. Batarya kestirici ortamı yük altında akım ve gerilimi ölçerek hem kestirim algoritmasını çalıştırmakta hem de bu verileri daha sonra incelenebilmesi için kaydetmektedir. DC yük vasıtasıyla istenilen tüketim profili sabit ya da değişken olarak uygulanabilmektedir.



Şekil 4.9 : Laboratuvar Test Ortamı Blok Şeması.

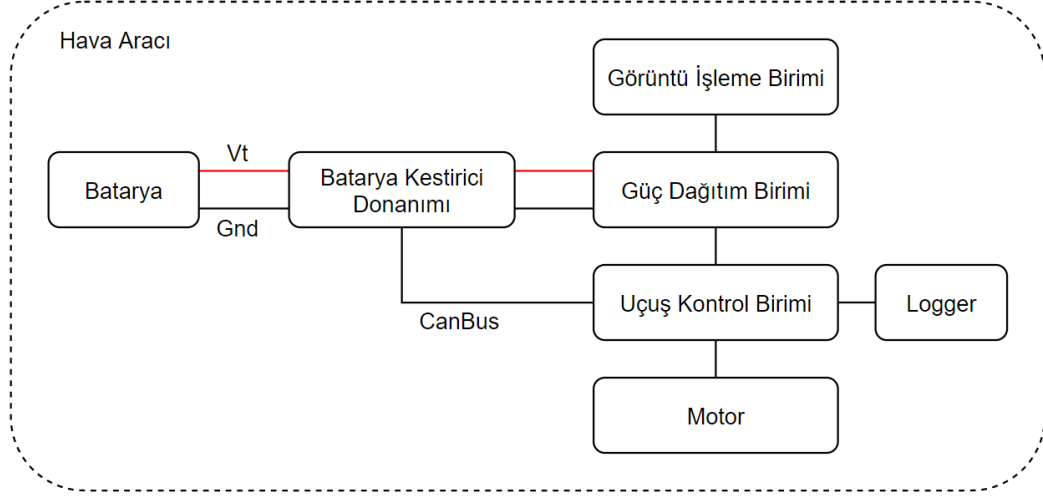
Resim 4.2’de laboratuvar test ortamının gerçek görüntüsüne yer verilmiştir. Ayrıca resimde veri kaydetme ve hata ayıklama olarak gösterilen “Texas Instrument XDS110 Debug Probe” vasıtasıyla, işlemci üzerinde koşan kestirici algoritması anlık olarak izlenebilmektedir.



Resim 4.2 : Laboratuvar Test Ortamı Görünümü.

4.6.3 Uçuş test ortamı

Batarya kestirim sistemini, uçuş esnasında gerçek tüketim verileri ile test etmek için Şekil 4.10'da gösterilen uçuş test ortamını kullanılmaktadır. Batarya, ana motor ve kanat servo motorları, motor sürücü, pervane ile birlikte uçuş kontrol birimi, görüntü işleme birimi gibi tüm aviyonikleri barındıran uçuşa hazır sabit kanatlı bir hava aracı, batarya kestirici donanımının eklenmesi ile uçuş test ortamı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.10 : Uçuş Test Ortamı Blok Şeması.

Batarya kestirici donanımı, hava aracına güç verildiği andan itibaren ölçüm yaparak hem batarya kapasitesini hesaplamakta hem de ölçüm ve kestirim verilerini CAN Bus seri haberleşme arayüzü vasıtasıyla uçuş kontrol birimine göndermektedir. Bu veriler uçuş kontrol birimi tarafından, veri bağı ile yerde uçağı kontrol ve izleme görevini yürüten yer kontrol istasyonundan gözlenebilmektedir. Ayrıca veriler uçuş kontrol birimi üzerinde bulunan hafıza kartına kaydedilerek, uçuş sonrasında incelenebilmektedir.

Uçuş esnasında kaydedilen veriler, uçuş sonrasında simülasyon ortamında tekrar koşturularak, batarya kestirici donanımında koşan algoritma ve bilgisayar ortamında koşan algoritmaların çıktıları karşılaştırılarak doğrulama yapılmaktadır. Ayrıca algoritma performansını iyileştirmek için gereken ince ayarlar da uçuş esnasında kaydedilen veriler sayesinde simülasyon ortamında yapılabilir.

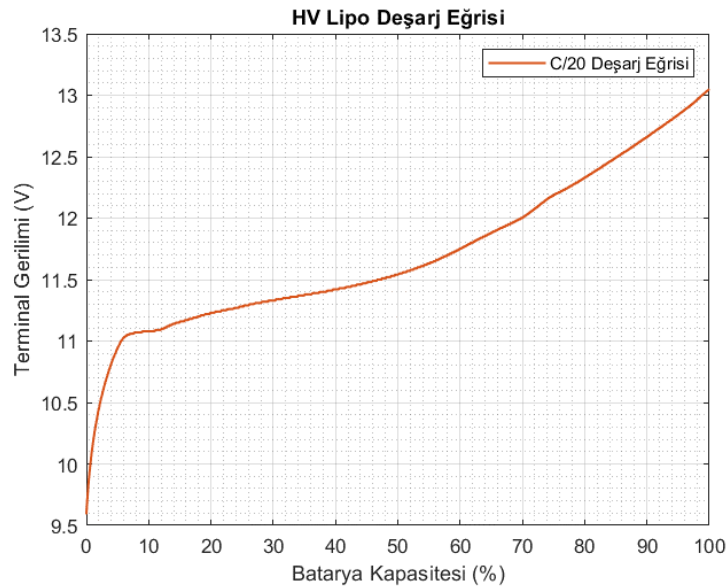


5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Parametrelerin Elde Edilmesi

5.1.1 Açık devre gerilimi-batarya kapasitesi eğrisinin elde edilmesi

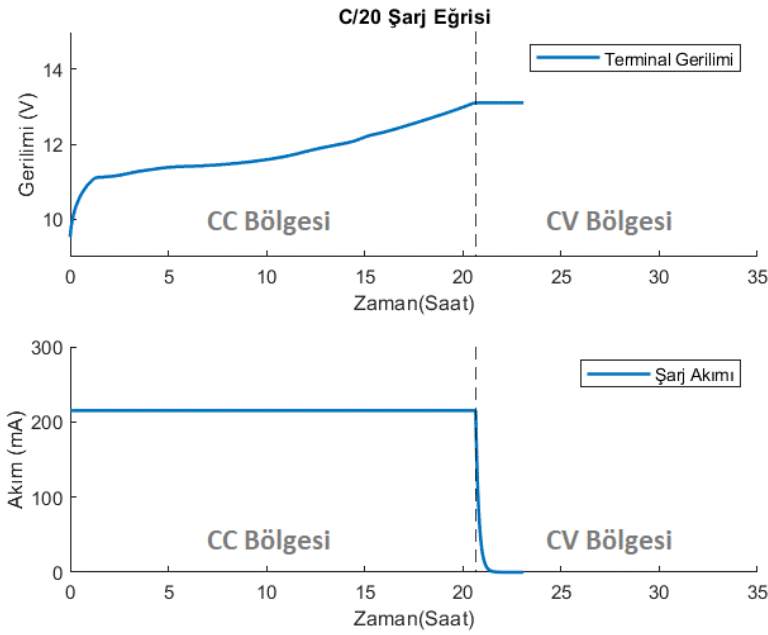
Açık devre gerilimi ve batarya kapasitesi ilişkisini elde etmek için, batarya tamamen dolu iken; DC yük kullanılarak, C/20 (215mA) seviyesinde sabit akım ile deşarj edilmektedir. DC yük, 9.6 V seviyesinde yük uygulamayı sonlandıracak şekilde ayarlanarak, bataryanın %0'a kadar deşarj olması sağlanmaktadır. Deşarj işlemi sırasında veriler 2 saniye periyod ile DMM vasıtasıyla kaydedilmektedir. Kaydedilen veriler ile elde edilen şarj eğrisi Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 : C/20 Deşarj Eğrisi.

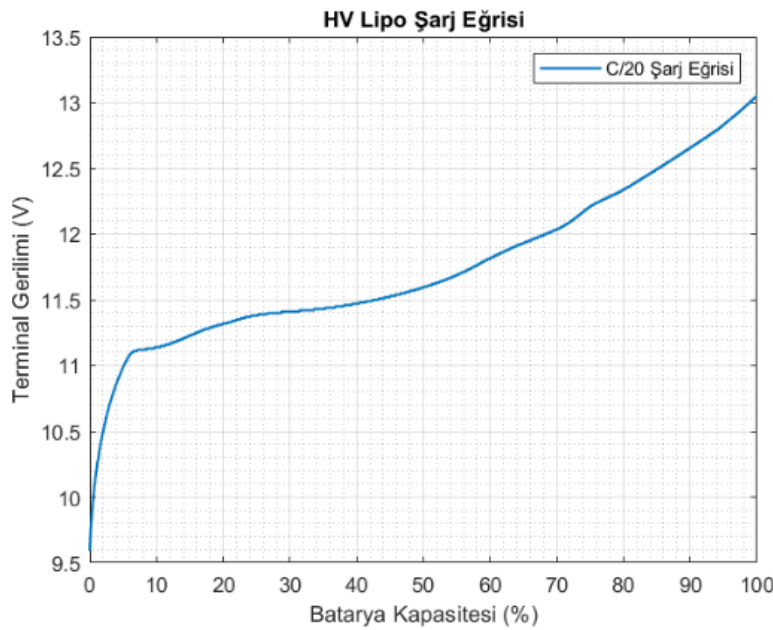
Aynı işlem DC yük yerine, bir güç kaynağı kullanılarak şarj için tekrarlanmaktadır. Kullanılan batarya yüksek gerilim lityum polimer olduğu için, güç kaynağının azami gerilimi 13.05 V olarak ayarlanmaktadır. Batarya 4300mAh kapasiteye sahip olduğundan 1C oranında şarj işlemi için, güç kaynağının azami akımı 4300mA seviyesinde sınırlandırılmaktadır. Gerekli ayarlamaları yapılan güç kaynağı batarya terminaline bağlanılarak CC-CV (constant current-constant voltage - sabit akım-sabit gerilim) şarj işlemi uygulanmaktadır. Deşarj işleminde olduğu gibi, şarj işlemi

esnasında da veriler 2 saniye periyod ile DMM vasıtasıyla kaydedilmektedir. Kaydedilen veriler ile elde edilen şarj eğrisi Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



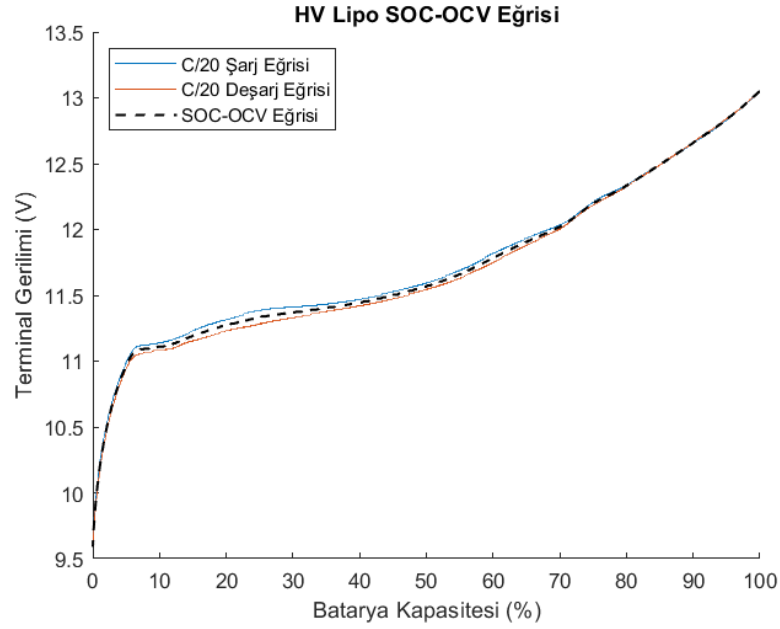
Şekil 5.2 : Sabit Akım-Sabit Gerilim Bölgeleri.

Açık devre gerilimi ve batarya kapasitesi ilişkisi şarj ve deşarj eğrilerinin ortalamasıdır. Bu ortalamayı hesaplamak için şarj eğrisinin sabit akım (CC Bölgesi) bölgesindeki eğrisi kullanılır. Sabit akım bölgesinden elde edilen şarj eğrisi Şekil 5.3’te gösterilmektedir.



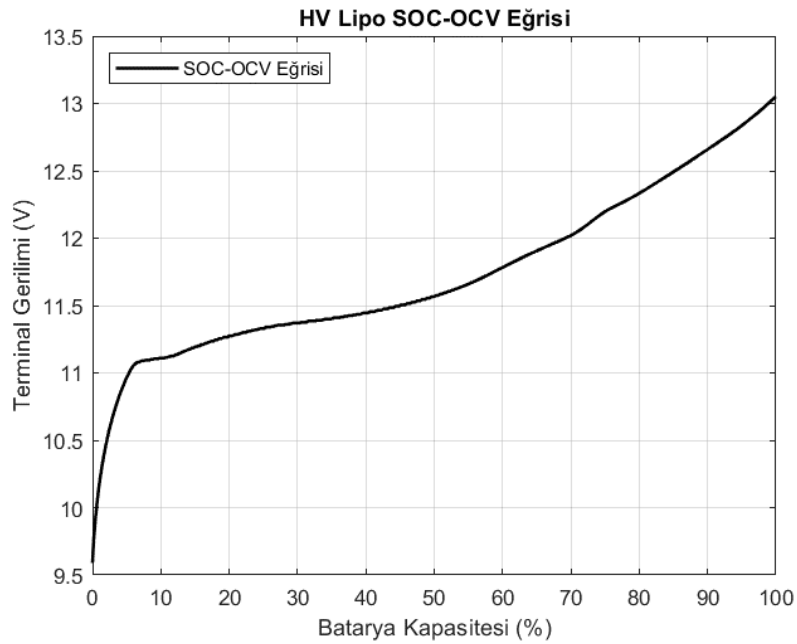
Şekil 5.3 : C/20 Şarj Eğrisi.

Açık devre gerilimi ve batarya kapasitesi ilişkisini elde etmek için Şekil 5.1 ve Şekil 5.3'te gösterilen deşarj ve şarj eğrilerinin ortalaması hesaplanmaktadır. Şarj ve deşarj eğrilerinin ortalaması Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



Şekil 5.4 : Şarj ve Deşarj Eğrilerinin Ortalaması.

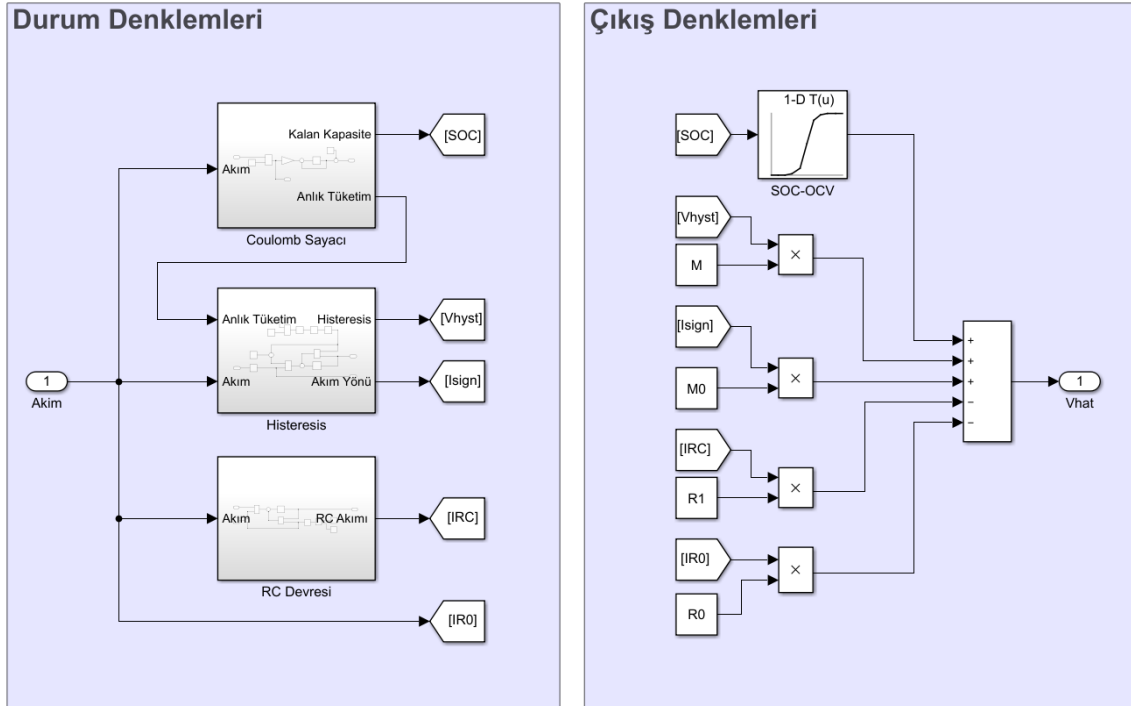
Elde edilen nihai eğri Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Bu nihai eğri ile batarya durağan halde iken terminal gerilimini ölçerek, başka bir deyişle yaklaşık olarak açık devre gerilimini tahmin ederek, batarya kapasitesi öğrenilebilmektedir.



Şekil 5.5 : Açık Devre Gerilimi - Batarya Kapasitesi İlişkisi.

5.1.2 Eşdeğer devre parametrelerinin elde edilmesi

Şekil 3.10'da gösterilen eşdeğer devre modelindeki R_0 , R_1 ve C_1 devre elemanlarının değerlerini ve histerezis geriliminin katsayıları olan M_0 , M ve γ parametrelerini hesaplamak için Şekil 5.6'da gösterilen Simulink batarya modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model kullanılarak, Simulink ortamında parametre tahmin aracı vasıtasıyla model parametrelerinin kestirimi gerçekleştirilmiştir.

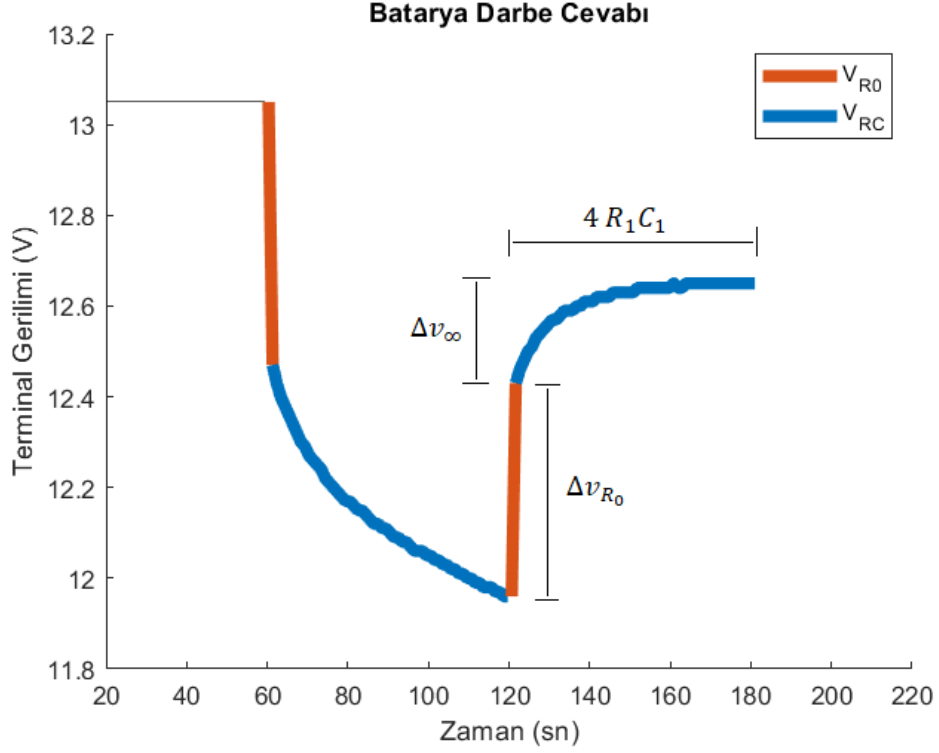


Şekil 5.6 : Simulink Batarya Modeli.

Parametrelerin optimizasyonunu doğru ve hızlı bir şekilde gerçekleştirmek için batarya paketi üzerinde deneyler yapılarak, sonuçlar gözlenmektedir. Bu gözlemler neticesinde parametre tahminine başlamadan önce kabaca başlangıç değeri ve azami-asgari sınırlar belirlenmektedir.

R_0 , R_1 ve C_1 devre elemanlarının değerlerini hesaplamak için tamamen dolu bir bataryaya akım darbeleri uygulanmış ve Şekil 3.7'de gösterildiği gibi ani gerilim düşümünden R_0 direncinin değeri, gevşeme süresinden ise R_1C_1 değeri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Histerezis için ise Şekil 5.4'te gösterilen deşarj eğrisinden batarya kapasitesi açık devre gerilimi eğrisi çıkartılarak elde edilen azami polarizasyon grafiği ile M_0 , M ve γ parametrelerinin değeri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

R_0 , R_1 ve C_1 devre elemanlarının değerlerini hesaplamak için bataryadan 1 dakika süresince 25.8 A (6C) akım çekilerek, terminal gerilimi kaydedilmiştir. Bataryaya uygulanan akım darbesiyle oluşan terminal gerilimindeki değişim Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7 : HV Lipo Darbe Cevabı Sonucu.

Deşarj sonlandırıldığında oluşan gerilim farkı Δv_0 kaydedilerek, Eşitlik 5.1’de gösterildiği gibi R_0 direnci hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}\Delta v_0 &= R_0 \Delta i \\ 0.07 \text{ V} &= R_0 4.3 \text{ A} \\ R_0 &= 16.28 \text{ m}\Omega\end{aligned}\tag{5.1}$$

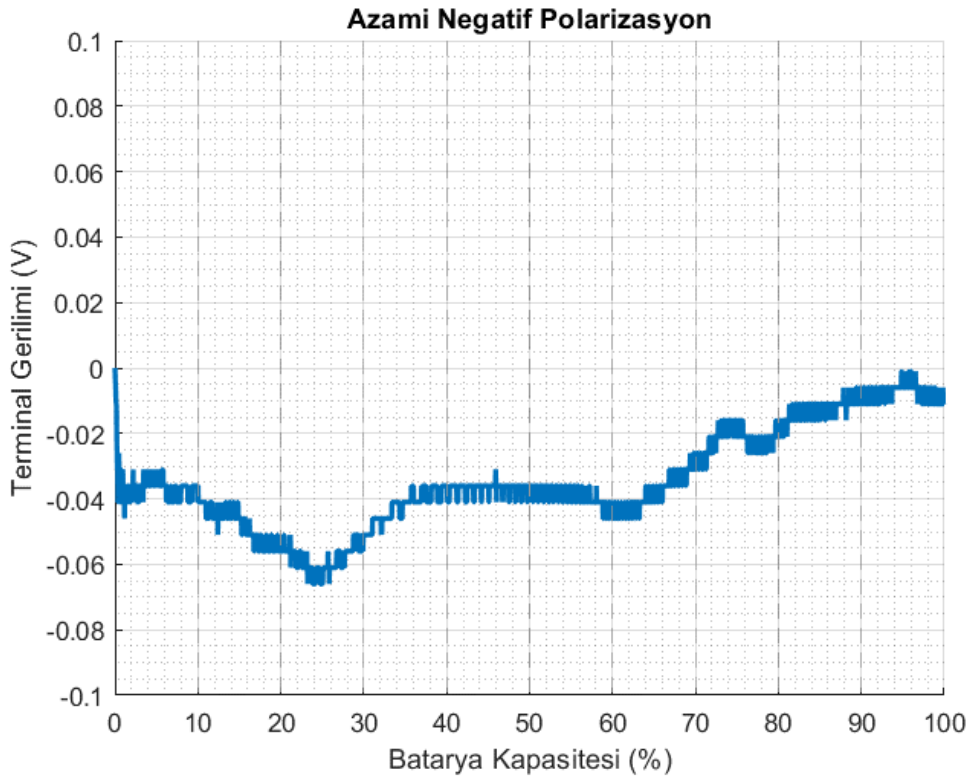
Deşarj sonlandırıldığında oluşan ani gerilim değişimi sonrasında, terminal gerilimi nihai değerine ulaşana kadar oluşan gerilim farkı kaydedilmektedir. Elde edilen gerilim farkı Δv_∞ ile Eşitlik 5.2’de gösterildiği gibi R_1 direnci hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}\Delta v_\infty &= (R_0 + R_1) \Delta i \\ 0.09 \text{ V} &= (16.28 \text{ m}\Omega + R_1) 4.3 \text{ A} \\ R_1 &= 4.65 \text{ m}\Omega\end{aligned}\tag{5.2}$$

Deşarj sonlandırıldığında yine terminal gerilimi nihai değerine ulaşana kadar geçen süre kaydedilir. Elde edilen bu süre yaklaşık olarak 4τ değeri olarak alınmaktadır. Parametre tahmininde başlangıç değeri olarak kullanmak üzere $R_1 C_1$ değeri, Eşitlik 5.3'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

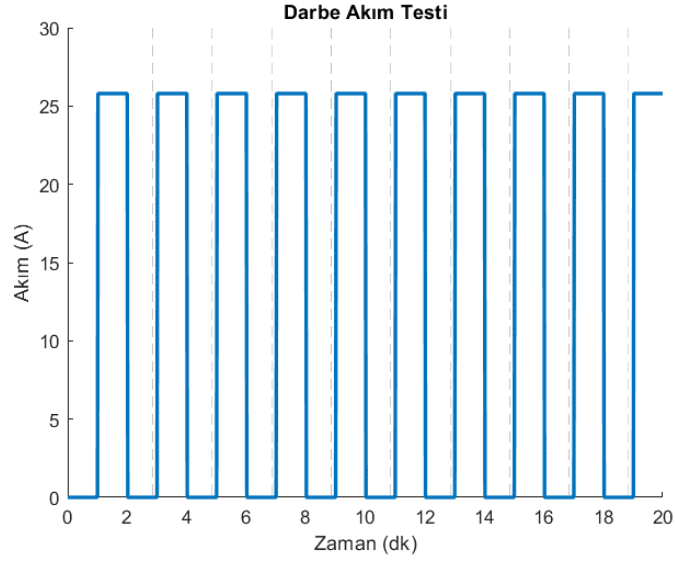
$$\begin{aligned} 4\tau &= 4 R_1 C_1 \approx 60 \text{ sn} \\ R_1 C_1 &\approx 15 \text{ sn} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Histeresis geriliminin parametreleri olan M_0 , M ve γ sabitlerinin, parametre tahmin aracıyla ile kestirimini yapmak için bataryanın azami polarizasyon grafiğinden faydalanılarak azami sınırlar belirlenmektedir. $C/20$ seviyesinde deşarj edilerek elde edilen deşarj eğrisinden SOC-OCV eğrisi çıkartılarak oluşturulan azami negatif polarizasyon grafiği Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Polarizasyon grafiği tüm bölgelerde aynı davranışı göstermediği için grafik 10 bölgeye ayrılarak, her bölge için farklı sınırlar belirlenmiştir ve her bir bölge için ayrı parametre optimizasyonu yapılmaya çalışılmıştır.

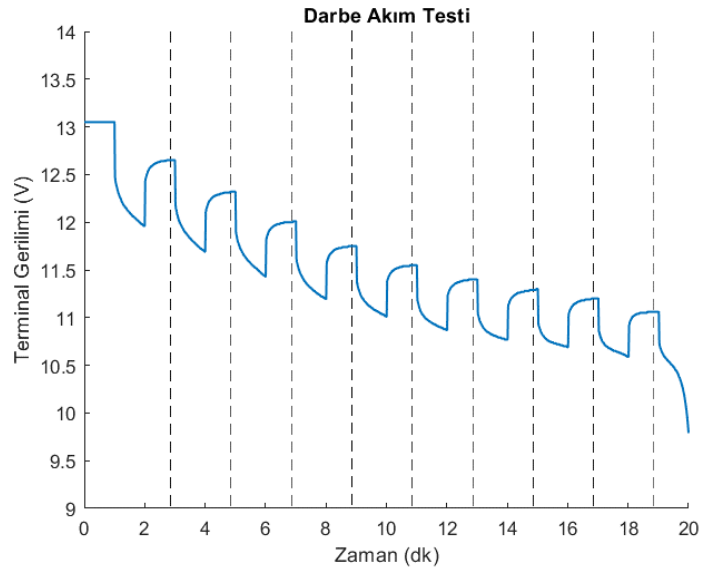


Şekil 5.8 : Azami Negatif Polarizasyon.

Tahmin edilecek parametrelerin başlangıç değerleri ve sınırları belirlendikten sonra, darbe akım testi sonucunda kaydedilen terminal gerilimi kullanılarak parametre optimizasyonu yapılmaktadır. Bataryanın davranışı tüm bölgeler için benzer olmadığından, batarya modelinin parametreleri de dinamik olarak ayarlanmaktadır. Bu sebeple, darbe akım testi sonucunda elde edilen terminal gerilimi grafiği 10 bölgeye ayrılarak, her bölge için parametre optimizasyonu yapılmaktadır. Uygulanan darbe akım profili Şekil 5.9'da, bu akım profiline karşı terminal geriliminde değişim ise Şekil 5.10'da gösterilmektedir.

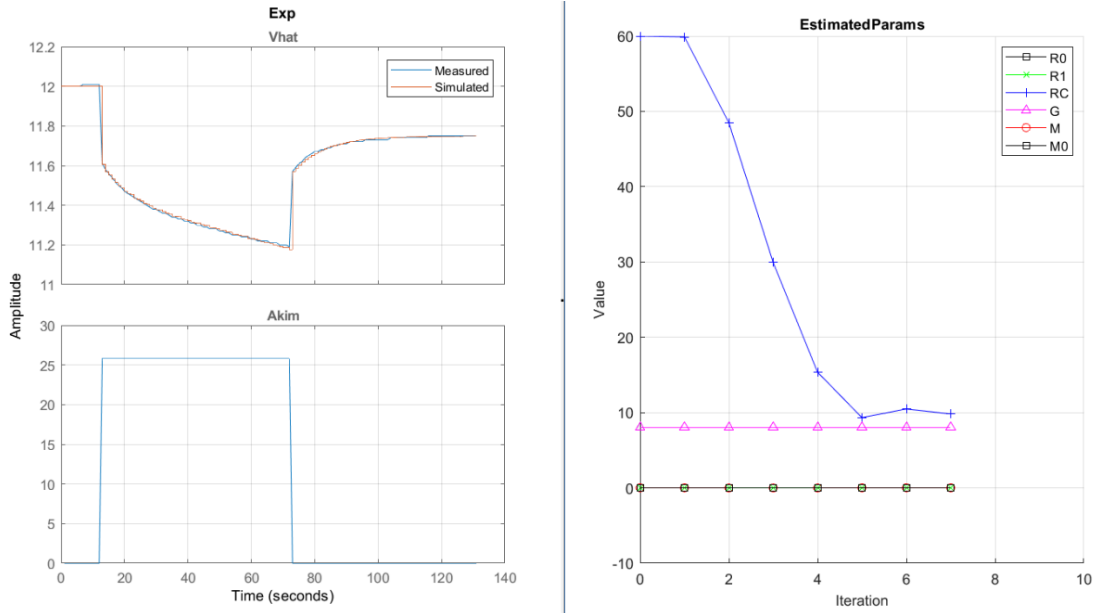


Şekil 5.9 : Darbe Akım Profili.



Şekil 5.10 : Bölgelere Ayrılmış Darbe Akım Cevabı.

Şekil 5.11’de birinci bölge için parametre optimizasyon aracı kullanılarak yapılan parametre tahmininin sonucu gösterilmektedir. Bu işlem 10 bölge için de tekrarlanarak her bir bölgeye ait parametreler hesaplanmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen parametreler Çizelge 5.1 : Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Parametreler’de gösterilmektedir.



Şekil 5.11 : Parametre Optimizasyonu.

Çizelge 5.1 : Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Parametreler.

	R_0	R_1	$R_1 C_1$	M	M_0	γ
Bölge 1	22.15 m Ω	6.51 m Ω	8.58 sn	0.008528	-2.07e-05	8.39
Bölge 2	18.37 m Ω	6.80 m Ω	9.33 sn	0.016107	-2.784e-05	8.39
Bölge 3	16.62 m Ω	6.24 m Ω	8.91 sn	0.009569	-2.5982e-05	8.39
Bölge 4	15.23 m Ω	6.97 m Ω	9.80 sn	0.015890	-1.3816e-04	8.39
Bölge 5	14.33 m Ω	6.19 m Ω	8.26 sn	0.011128	-1.3471e-04	8.39
Bölge 6	14.46 m Ω	6.56 m Ω	13.63 sn	0.024705	-1.3299e-04	8.39
Bölge 7	14.30 m Ω	6.84 m Ω	14.19 sn	0.029028	-1.3193e-04	8.39
Bölge 8	13.39 m Ω	4.50 m Ω	3.09 sn	3.5191e-05	3.5191e-05	1.17
Bölge 9	14.03 m Ω	4.03 m Ω	3.04 sn	2.4721e-06	-1.491e-06	1.17
Bölge 10	9.53 m Ω	2.19 m Ω	0.87 sn	2.4721e-06	-1.491e-06	1.17

5.2 Kestiricinin Test Edilmesi

Kestiricinin performansını test etmek amacıyla bölüm 4.6.2’de gösterilen laboratuvar ve bölüm 4.6.3’te gösterilen uçuş test ortamları kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında iki adet test senaryosu oluşturulmuştur. İlk senaryoda, kestirici sabit akım ile test edilmiş ve sonuçlar alınmıştır. İkinci senaryoda ise uçuşta gerçekleşen dalış ve tırmanış manevralarına benzer olarak ani akım değişimlerine karşı, kestiricinin tepkisini inceleyebilmek amacıyla darbe akım profili uygulanmıştır.

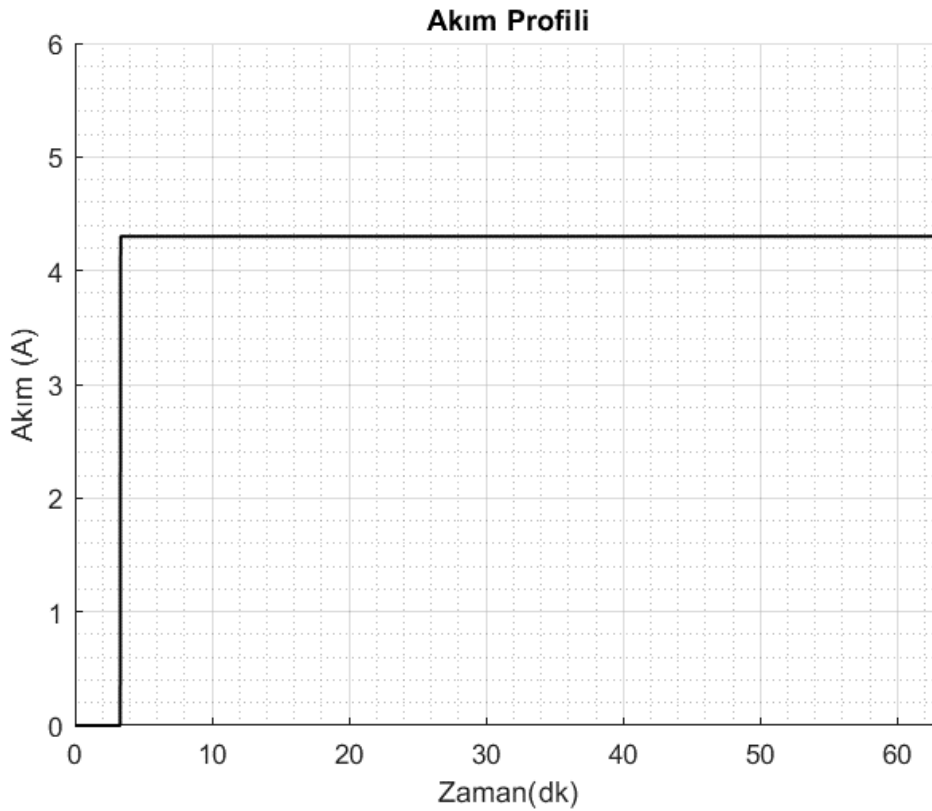
Bu iki laboratuvar testinde, akım profili DC yük vasıtasıyla belirlenebildiği için beklenen batarya kapasitesi teorik olarak hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla beklenen kapasite değeri ile kestirilen kapasite verisi karşılaştırılabilmektedir. Buradan hareketle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Tüm veri seti boyunca terminal gerilimini ölçülerek, süreç tahmini olan terminal gerilimi tahmini ile karşılaştırılmıştır.
- Tüm veri seti boyunca beklenen ve kestirilen kapasite sonuçları görsel olarak elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, yine tüm veri seti boyunca beklenen ve kestirilen kapasite arasındaki hata gösterilmiştir.
- Beklenen ve kestirilen kapasite verileri arasındaki hatanın ortalaması, karekök ortalaması, standart sapması, beklenen ve kestirilen kapasitenin korelasyon katsayısı değerleri tüm veri kümesi için hesaplanarak, kestiricinin istatistiksel karakteristiği elde edilmiştir.
- Kestiricinin farklı kapasite seviyelerindeki tepkisini ortaya koymak için veri kümesi pencerelere bölünerek, her bir pencere için ortalama, karekök hata, standart sapma ve korelasyon katsayısı sonuçları elde edilmiştir.

Laboratuvar testleri sonucunda hem değişken hem de sabit akım senaryoları ile sistemin doğruluğuna ilişkin istatistiksel sonuçlar elde edilmiştir. Sonrasında yapılan uçuş testleri, sistemin gerçek zamanlı olarak da çalışabildiğini gösterme amacı taşımaktadır. Bu testlerde laboratuvar testlerindeki gibi harici bir doğrulama imkânı olmadığından doğrudan gerçek zamanlı olarak çalışan sistem üzerinden; terminal gerilimi, çekilen akım ve batarya kapasitesi kestirim sonucu kaydedilmiştir. Uçuş sonrasında sistemin kestirdiği son batarya kapasitesi ve hava aracı indikten bir süre sonra, bataryanın açık devre gerilimine yakınsayan terminal geriliminin harici bir sistemle ölçülmesiyle elde edilen kapasite değeri de karşılaştırılmıştır.

5.2.1 Kestiricinin sabit akım profili ile test edilmesi

Kestiricinin sabit akım ile testini gerçekleştirmek için bataryadan, DC yük vasıtasıyla 4.3A (1C) akım çekilmektedir. DC yük sonlandırma şartları 4300mAh enerji, 3600 saniye süre ya da 9.55V terminal gerilimi olarak ayarlanmaktadır. Terminal gerilimi şartı, son bölgede yaklaşık $\sim 11.5\text{m}\Omega$ iç direnç üzerinden gerilim düşümü olacağı için, 9.6V yerine 9.55V olarak belirlenmiştir. Uygulanan akım profili Şekil 5.12’de gösterilmektedir.

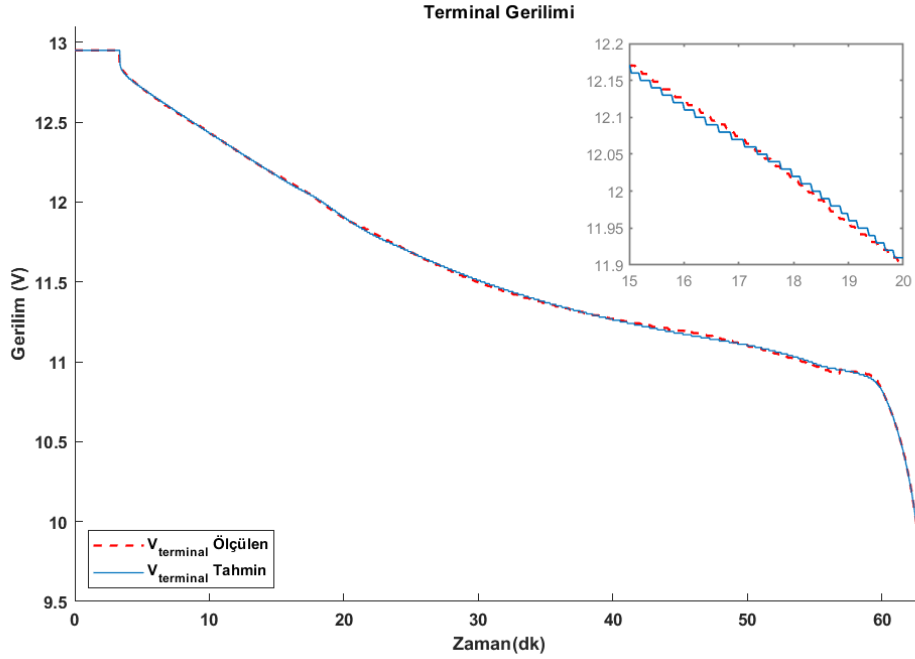


Şekil 5.12 : Sabit Akım Profili.

DC yük ile batarya terminalinden yük çekildiği esnada, terminal gerilimindeki değişim veri toplama bilgisayar tarafından DMM ile her saniye kaydedilmektedir. Deşarj sonlanana kadar kaydedilen terminal gerilimi ve uygulanan akım profili ile batarya kestirici algoritması simülasyon ortamında çalıştırılarak; batarya kestirici algoritmasının terminal gerilimi tahmini, batarya kapasitesi tahmini ve beklenen değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki istatistiksel veriler incelenmektedir.

Terminal gerilimi kestirimi, bataryanın matematiksel model çıktısının, Kalman döngüsü ile güncellenerek elde edilmiş olan değeridir. Bu değer, ölçülen terminal gerilimi ile karşılaştırılarak, elde edilen hata Kalman Filtresi tarafından bir sonraki

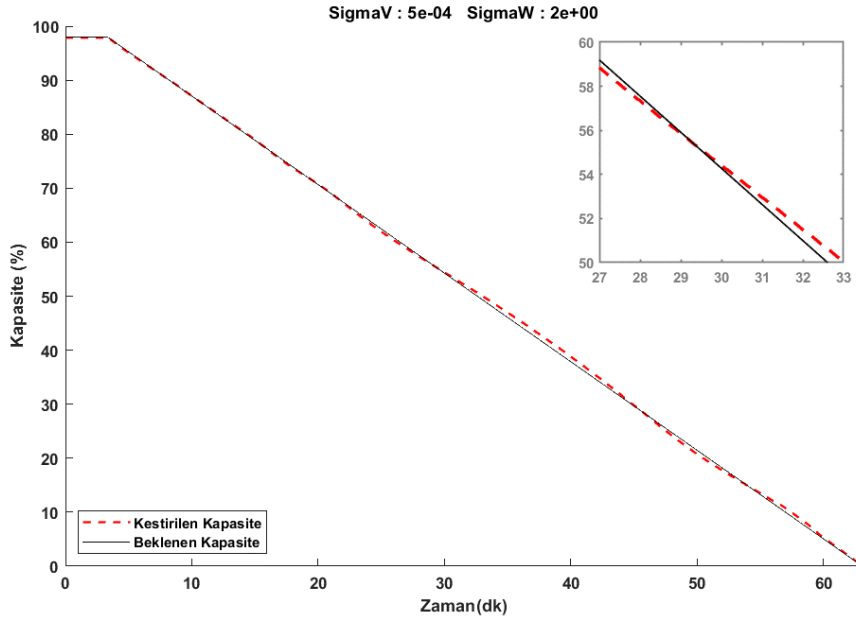
iterasyonda kullanılır. Sonraki kısımlarda doğrudan batarya kapasitesi kestirimi sonuçları karşılaştırmalı ve istatistiksel olarak incelenecek olsa da bu kısımda terminal gerilim tahminine de yer verilmiştir. Sabit akım profili uygulandığında ölçülen terminal gerilimi ve terminal gerilimi kestirimi karşılaştırmalı olarak Şekil 5.13'te gösterilmektedir.



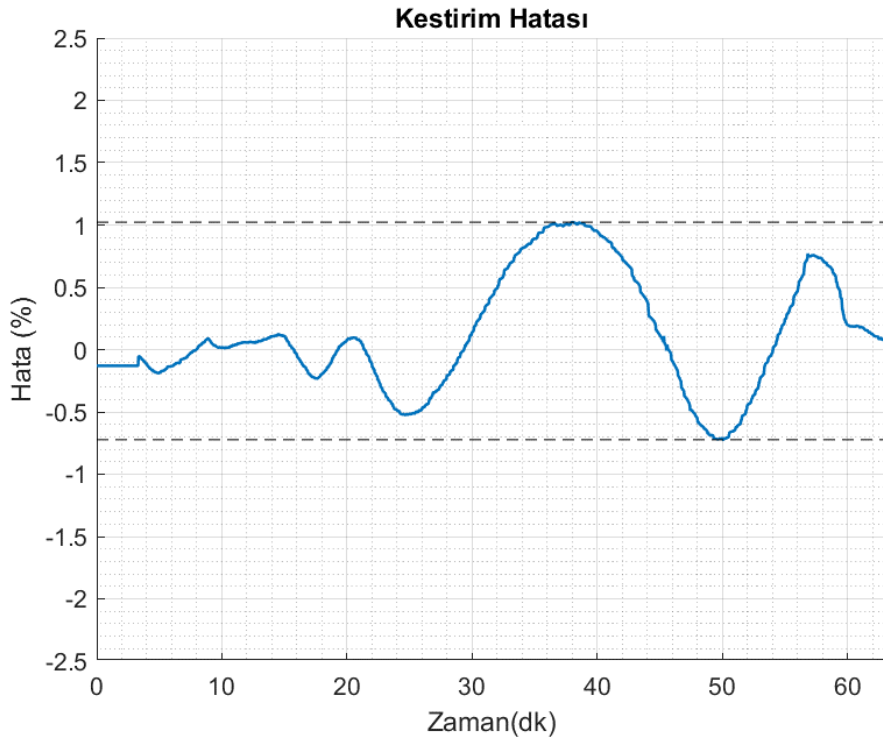
Şekil 5.13 : Sabit Akım ile Kestirici Terminal Gerilimi Tahmini.

Batarya kestiricisinin, sabit akım profili uygulandığında, kestirmiş olduğu batarya kapasitesi tahmini, sabit akım uygulandığında teorik olarak beklenen batarya kapasitesi grafiği ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.14'te gösterilmektedir. Batarya kapasitesi tahminin, teorik olarak beklenen batarya kapasitesine göre hatası ise Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Model parametrelerinin kestirimi, darbe akım profili ile yapılan testin sonucunda elde edilen terminal gerilimi ölçümüne göre yapıldığı için, sabit akım profilinde beklenenden daha yüksek hata gözlenmektedir. Bunun yanısıra sistemde modellemeyen ve görece düşük olan; sıcaklık etkisi, coulomb verimlilik etkisi ve geçiş geriliminin tek RC devresi ile modellemenin yetersizliği olarak tahmin edilmektedir. Fakat sonuç olarak batarya kapasite kestirim hatasının mutlak olarak ~%1 değerinin altında kaldığı görülmektedir. Bu hata düzeyinin var olan uygulama alanlarının gereksinimlerini yüksek seviyede karşıladığı öngörülmektedir.

Şekil 5.14'ün başlığında yer alan SigmaV ve SigmaW değerleri normal dağılım olarak modellenen ölçüm ve süreç gürültülerinin varyans değerleridir. SigmaV, gerilim sensörü gürültüsünün, diğer bir deyişle ölçüm gürültüsünün varyansıdır. SigmaW ise süreç gürültüsü olarak modellenen, akım sensörü gürültüsünün varyansını ifade eder.

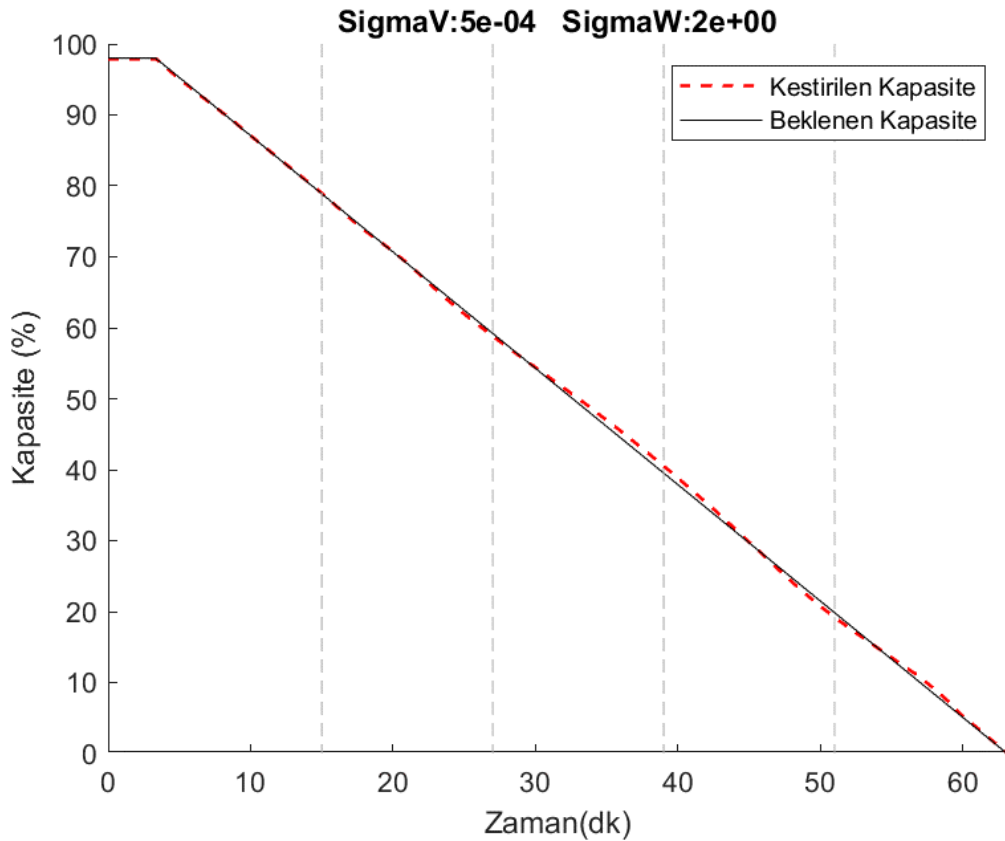


Şekil 5.14 : Sabit Akım ile Batarya Kapasitesi Tahmini.



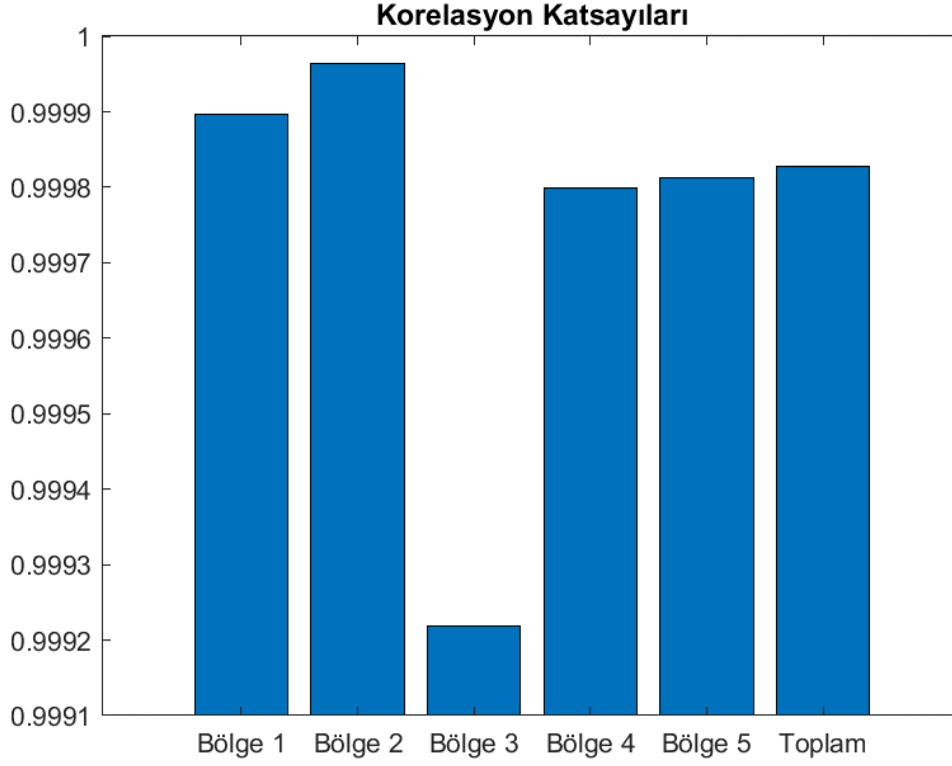
Şekil 5.15 : Sabit Akım Kestirici Hatası.

Sonuçları daha detaylı olarak inceleyebilmek için batarya kapasitesi kestirim sonuçlarını içeren veri kümesi bölgelere ayrılmaktadır. Batarya kapasitesi kestirim sonuçlarının, farklı kapasite seviyelerindeki davranışını bölgesel olarak incelemek amacıyla 5 bölge belirlenmiş ve her bir bölge için, teorik olarak beklenen kapasite değeri ile arasındaki hatanın istatistiksel analizi irdelenmiştir. Şekil 5.16'da batarya kapasitesi tahminini gösteren grafik üzerinde ayrılan inceleme bölgeleri gösterilmektedir.



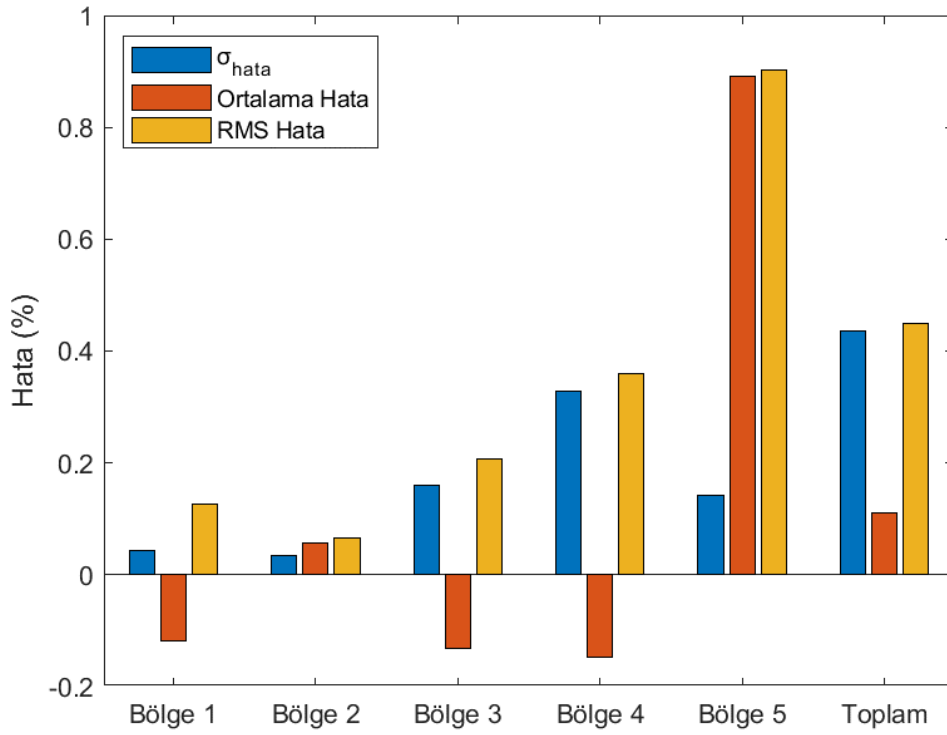
Şekil 5.16 : Bölgelere Ayrılmış Sabit Akım Kapasite Tahmin Grafiği.

Bölünen 5 bölgedeki sonuçları ortaya koymak için ilk olarak korelasyon katsayıları incelenmiştir. Şekil 5.17'de korelasyon katsayıları gösterilmektedir. Hem ayrılan bölgelerde hem de tüm veri kümesi için korelasyon katsayılarını gösteren grafik incelendiğinde, tüm bölgelerde korelasyon katsayısının 1'e çok yakın olarak seyrettiği sonucuna varılmaktadır. Bu sonuçlara bakarak, teorik olarak beklenen kapasite değeri ile kestirilen kapasite değerinin birbirleriyle güçlü doğrusal ilişkili olduğu yorumu yapılabilmektedir.



Şekil 5.17 : Sabit Akım Korelasyon Katsayıları.

Şekil 5.18’de bölünen her bölge için ayrı ayrı olmak üzere standart sapma, ortalama hata ve hatanın karekök ortalaması gösterilmektedir. Ortalama hata ve hatanın karekök ortalaması temelde aynı durumu ifade etse de hatanın yönünü göstermek amacıyla incelemeye birlikte dahil edilmişlerdir. Standart sapma sonucunun bütün bölgelerde oldukça düşük ve bölgeler arasında da değişimlerinin az olduğu değerlendirilmiştir. Kendi içerisinde değişimin az olması sistemde harici olarak baskın bir gürültü oluşturacak, modellenmemiş bir bozucunun olmadığı sonucuna ortaya çıkarmaktadır. Standart sapmanın düşük seviyede olması, kestirim hassasiyetinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Karekök ortalaması, standart sapma ve bayasın toplamını ifade ettiğinden genel anlamda ortalama hata verileri bölgesel olarak incelendiğinde artmaya meyilli bir seyir çizdiği söylenebilmektedir. Bu durumun, bataryanın iç direnci, geçiş gerilimi ve histerezisi gibi dinamik parametrelerinin, farklı yük altında veya batarya kapasitesi azaldıkça doğrusal olmayan bir şekilde değişiminin kusursuz olarak modellenememesi olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.18 : Sabit Akım Tahmin Hatası İstatistik Grafiği.

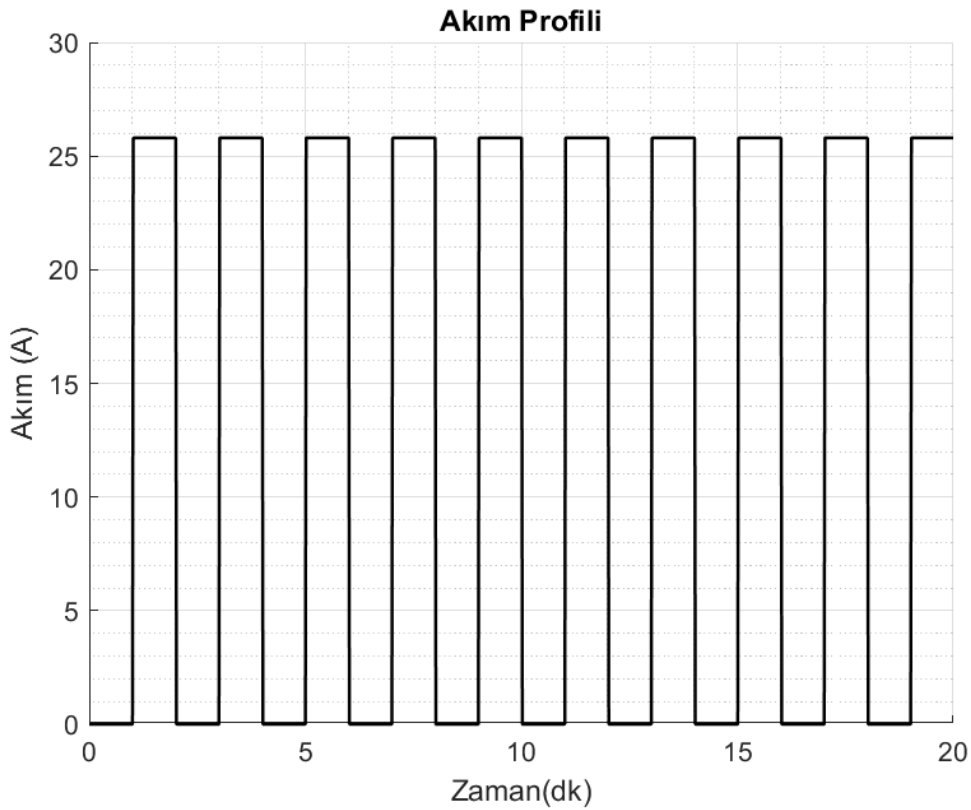
Şekil 5.17’de ve Şekil 5.18’de grafikleri verilen istatistiksel verilerin hem ayrılan 5 bölge için hem de bütün veri kümesi için elde edilen değerleri sayısal olarak Çizelge 5.2’de tablo halinde gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 : Sabit Akım Tahmin Hatası İstatistik Tablosu.

	σ_{Hata}	Ortalama Hata	RMS Hata	Korelasyon Katsayıları
Bölge 1	0.043	-0.118	0.126	0.999896
Bölge 2	0.035	0.056	0.066	0.999963
Bölge 3	0.161	-0.131	0.207	0.999217
Bölge 4	0.329	-0.147	0.359	0.999798
Bölge 5	0.142	0.891	0.903	0.999811
Bütün Veri Kümesi	0.435	0.110	0.449	0.999827

5.2.2 Kestiricinin dinamik akım profili ile test edilmesi

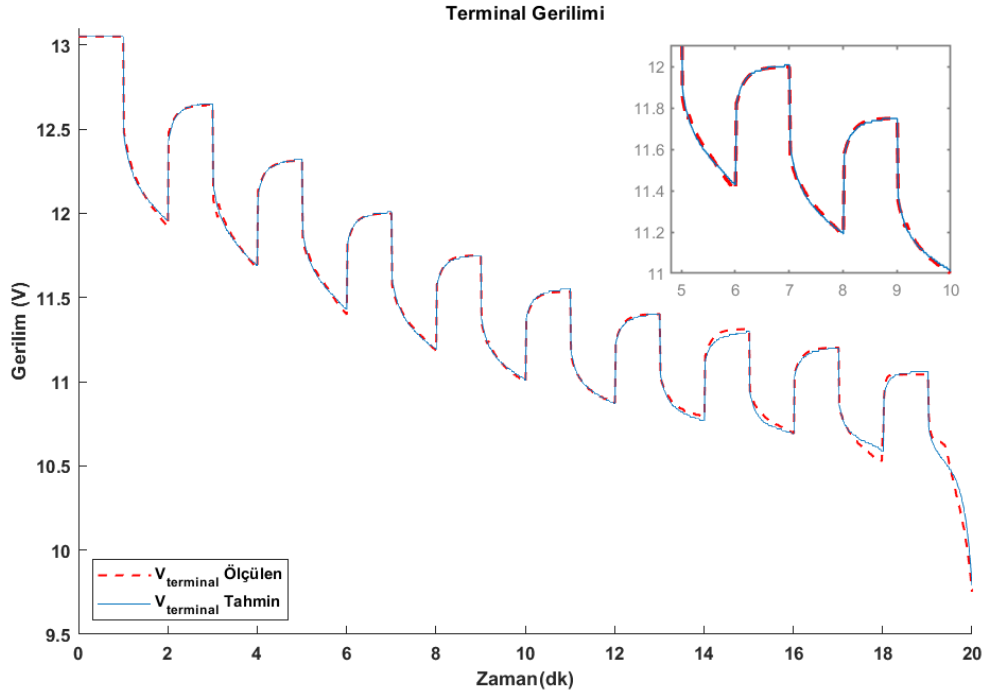
Kestiricinin, değişken akıma karşılık terminal gerilimini ölçebilmek için, bataryadan DC yük vasıtasıyla 25.8A (6C) seviyesinde 60 saniye yük uygulanıp 60 saniye duracak şekilde dinamik akım profili uygulanmaktadır. DC yük sonlandırma şartları, sabit akım profilinde olduğu gibi 4300mAh enerji ya da 9.55V terminal gerilimi olarak ayarlanmaktadır. Dinamik akım uygulandığında, DC yük sonlandırma süresi, 60 saniye periyod ile 6C seviyesinde yük uygulandığında teorik olarak hesaplanan 1200 saniye olarak belirlenmiştir. Uygulanan dinamik akım profili Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.19 : Dinamik Akım Profili.

Şekil 5.20'de ölçülen ve tahmin edilen terminal gerilim değerleri gösterilmektedir. Görsel olarak genel anlamda, tahmin edilen terminal gerilimi, ölçülen terminal gerilimini düzgün olarak takip ettiği söylenebilmektedir. Daha düşük gerilimlerde farkın az da olsa açıldığı değerlendirilebilmektedir. Buradaki hata göstergesi doğrudan kapasite sonucuna etki edeceği için istatistiksel sonuçlar kapasite açısından sonraki kısımda irdelenecektir.

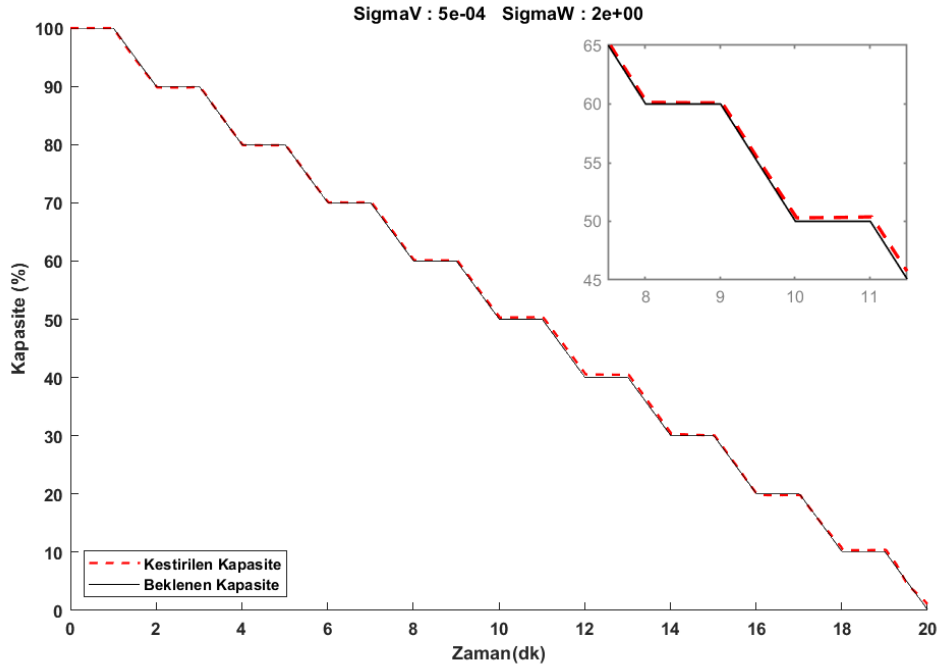
Sabit akım testinde olduğu gibi asıl olarak tahmin edilmek istenen değer olan batarya kapasitesi kestirimi sonuçları karşılaştırmalı ve istatistiksel olarak incelenecektir ancak terminal gerilimi tahminin, ölçülen terminal gerilimine göre hatası Kalman iterasyonunda kullanıldığı için, bu tahmin doğrudan sonuca etki etmektedir. Bu sebeple, dinamik akım profili uygulandığında tahmin edilen terminal gerilimi tahmini, ölçülen terminal gerilimi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.20’de gösterilmektedir.



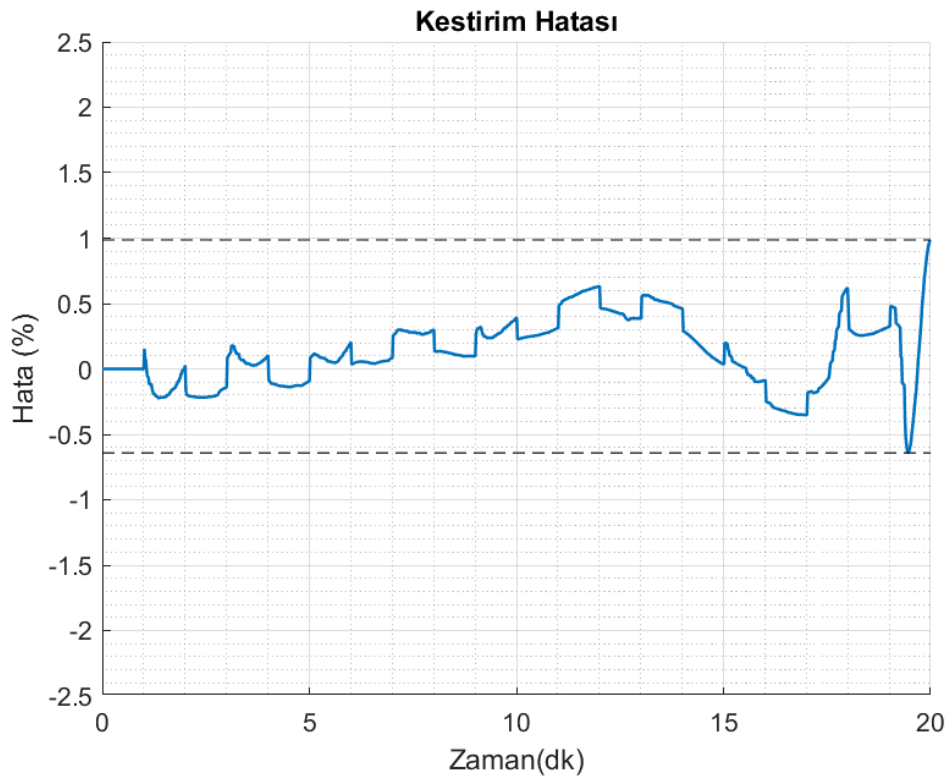
Şekil 5.20 : Dinamik Akım ile Kestirici Terminal Gerilimi Tahmini.

Şekil 5.21’de karşılaştırmalı olarak teorik olarak beklenen ve kestirilen kapasite değerleri, Şekil 5.22’de ise bu iki kapasite değerinin farkından elde edilen hata değeri grafiksel olarak gösterilmektedir. Kestirim hatasının yine sabit akım senaryosunda olduğu gibi %1’in altında kaldığı gözlenmektedir. Sabit akım testine kıyasla, model parametre tahmininde uygulan darbe akım profili ile aynı profilde tüketim gerçekleştiği için hata oranı daha düşüktür. Gerçekleştirilen iki testin hata profilindeki fark, akımın ani değiştiği noktalarda, hatanın artması ve yön değiştirmesidir. Bu davranışın, akımın işlem döngü süresinden daha hızlı gerçekleşen anlık değişimlerinden kaynaklı olarak ortaya çıktığı sonucuna varılmaktadır.

SigmaV, ölçüm gürültüsünün ve SigmaW, süreç gürültüsünün varyansları olarak, sabit akım testi ile aynı değerler kullanılmıştır. Varyans değerlerinin başlıkta yer aldığı batarya kapasitesi tahmini Şekil 5.21’de gösterilmektedir.

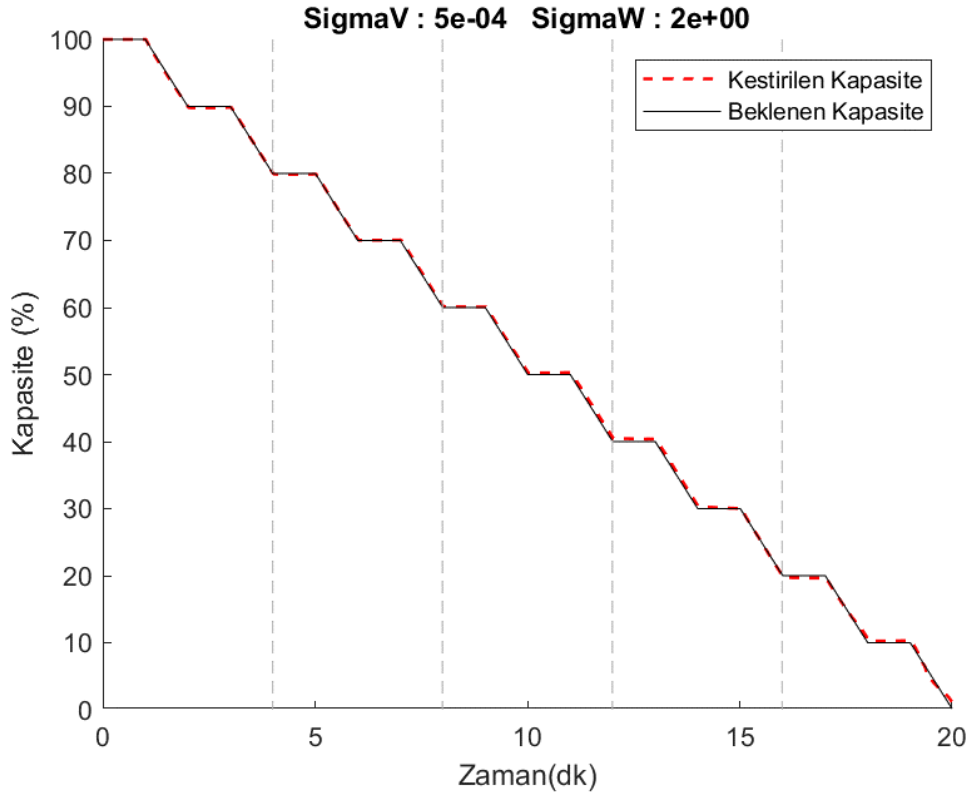


Şekil 5.21 : Dinamik Akım ile Batarya Kapasitesi Tahmini.



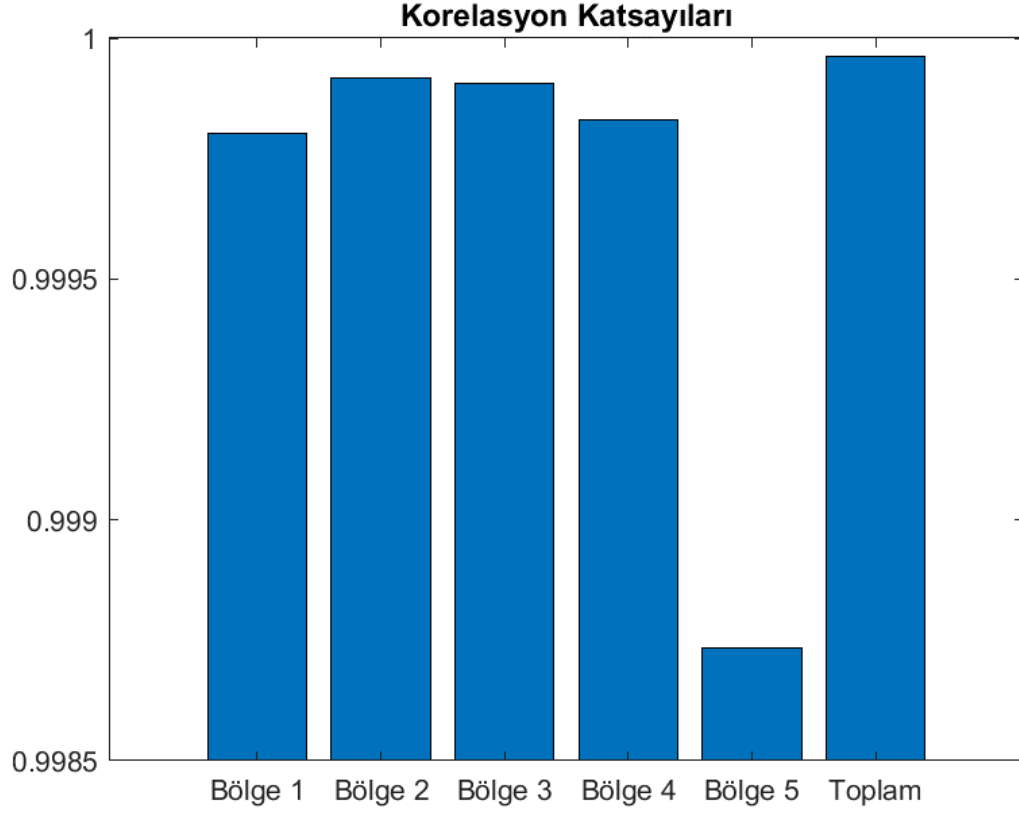
Şekil 5.22 : Dinamik Akım Kestirici Hatası.

Dinamik akım senaryosunda da sonucu daha detaylı olarak incelenmesi için batarya kapasitesi kestirim sonuçlarını içeren veri kümesinin farklı kapasite seviyelerindeki davranışını bölgesel olarak incelemek amacıyla 5 bölge belirlenmiş ve her bir bölge için, beklenen kapasite değeri ile arasındaki hatanın istatistiksel analizi irdelenmiştir. Şekil 5.23'te batarya kapasitesi tahminini gösteren grafik üzerinde ayrılan inceleme bölgeleri gösterilmektedir.



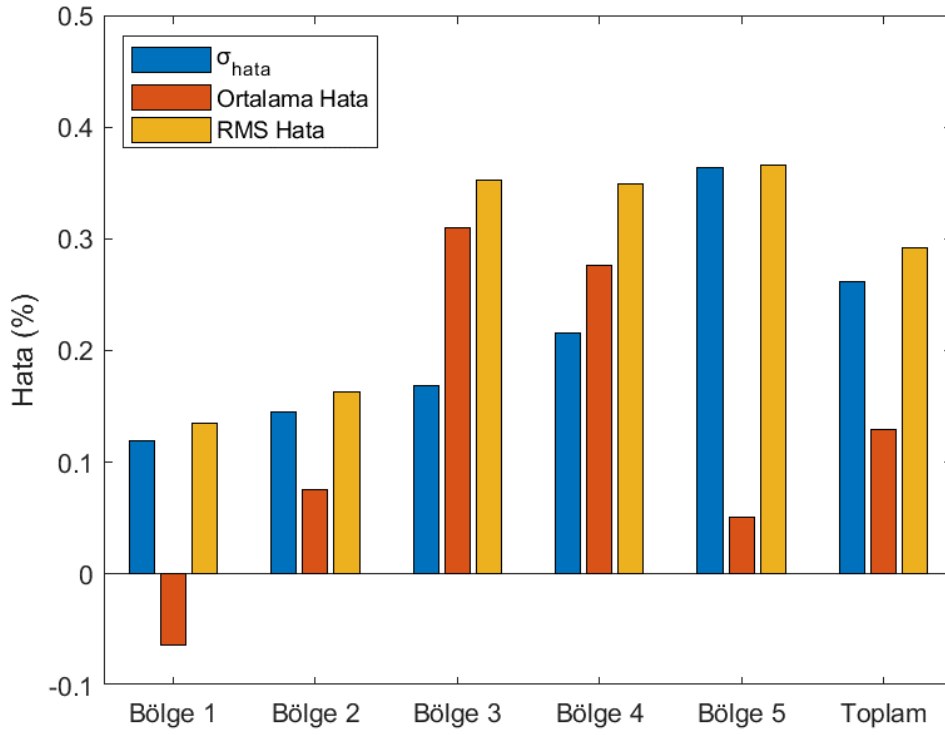
Şekil 5.23 : Bölgelere Ayrılmış Dinamik Akım Kapasite Tahmin Grafiği.

Şekil 5.24'te ayrılan her bir bölge ve veri kümesinin tamamı için korelasyon katsayıları grafiği gösterilmektedir. Sabit akım testinde olduğu gibi bu senaryoda da hem ayrılan bölgelerde hem de tüm veri kümesi için korelasyon katsayıları 1'e çok yakın olarak hesaplanmıştır. Sabit ve dinamik akım senaryolarının sonuçlarına göre elde edilen korelasyon katsayıları kıyaslandığında, dinamik akım profilinin, sabit akıma kıyasla, beklenen batarya kapasitesi ile daha güç bir lineer ilişkide olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebi, hata grafiğinde de gözlenen duruma benzer olarak, dinamik akım profiline göre parametre tahmini yapılan modelin, dinamik akım profilinde daha hassas sonuçlar elde etmesi olarak söylenebilir.



Şekil 5.24 : Dinamik Akım Korelasyon Katsayıları.

Şekil 5.25'te ayrılan bölgelerin her biri için standart sapma, ortalama hata ve hatanın karekök ortalaması gösterilmektedir. Sabit akım senaryosundan farklı olarak burada ortalama kare hata standart sapma sonuçlarının birbirlerine kıyasla daha yakın olduğu başka bir deyişle bu senaryoda sabit hata dışında da etkilerin olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun benzer şekilde, bataryanın iç direnci, geçiş gerilimi ve histerezisi gibi dinamik parametrelerinin, farklı yük altında veya batarya kapasitesi azaldıkça doğrusal olmayan bir şekilde değişiminin kusursuz olarak modellenememesi sebebiyle, bataryanın yüksek seviyede ve değişken akıma karşı verdiği farklı tepkiden kaynaklı olduğu öngörülmektedir. Standart sapmanın yine bütün bölgelerde oldukça düşük ve bölgeler arasında da değişimlerinin az olması sistemde harici olarak baskın bir gürültü oluşturacak, modellenmemiş bir bozucunun olmadığını ve kestirim hassasiyetinin dinamik akım profili ile de yüksek olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu hassasiyet, uygulama alanının gereksinimlerini yüksek seviyede karşılamaktadır.



Şekil 5.25 : Dinamik Akım Tahmin Hatası İstatistik Grafiği.

Şekil 5.24'te ve Şekil 5.25'te grafikleri verilen istatistiksel verilerin hem ayrılan 5 bölge için hem de bütün veri kümesi için elde edilen değerleri sayısal olarak Çizelge 5.3'de tablo halinde gösterilmektedir.

Çizelge 5.3 : Dinamik Akım Tahmin Hatası İstatistik Tablosu.

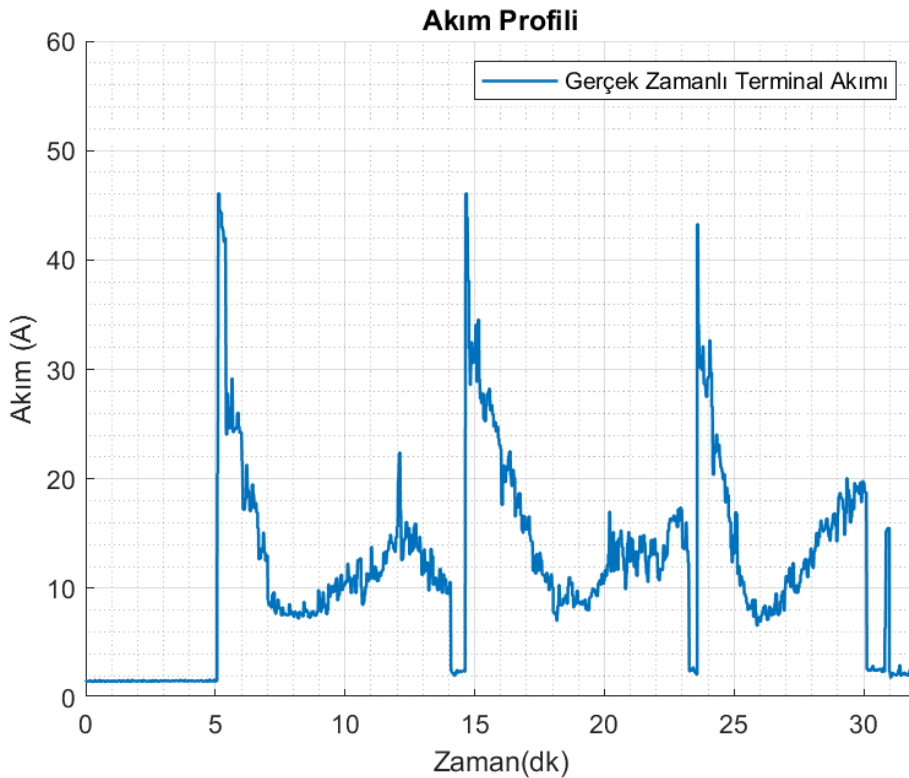
	σ_{Hata}	Ortalama Hata	RMS Hata	Korelasyon Katsayıları
Bölge 1	0.119	-0.064	0.135	0.99980
Bölge 2	0.145	0.076	0.163	0.99992
Bölge 3	0.169	0.310	0.353	0.99991
Bölge 4	0.215	0.276	0.350	0.99983
Bölge 5	0.364	0.051	0.366	0.99873
Bütün Veri Kümesi	0.262	0.130	0.292	0.99996

5.2.3 Kestiricinin test uçuşu ile test edilmesi

Bölümün başında anlatıldığı üzere sistemin gerçek zamanlı olarak donanım üzerinde ve uçuş esnasında performansını göstermek için mini sınıf insansız hava aracı ile uçuş testleri gerçekleştirilmiştir.

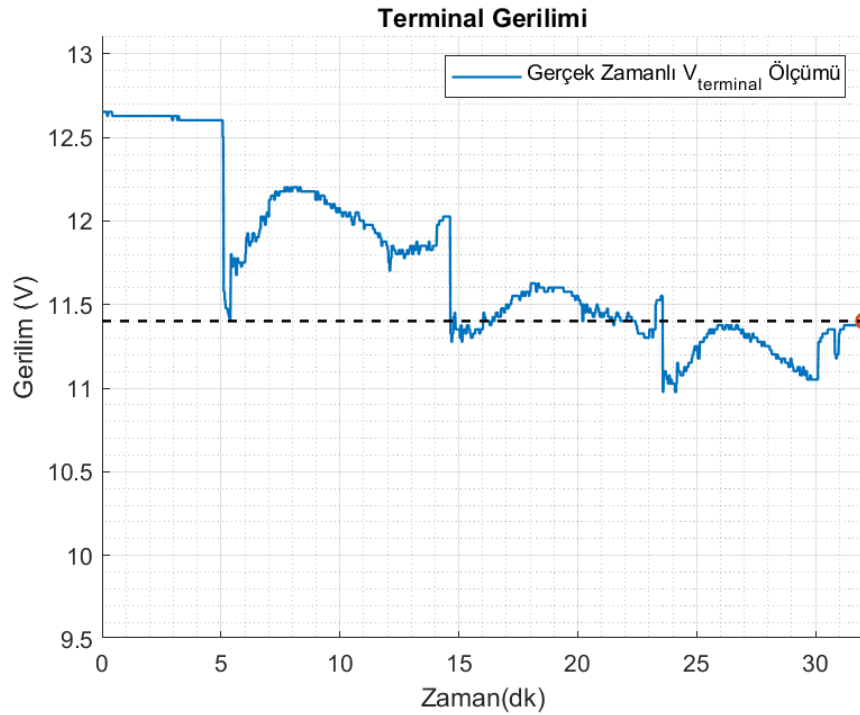
Uçuş esnasında batarya kestirici donanımı, MATLAB ortamında benzetimi yapılan batarya kapasitesi kestirici algoritmasını gerçek zamanlı olarak çalıştırarak hem anlık kapasite bilgisini hem de akım ve gerilim verilerini uçuş kontrol birimine iletmektedir. Anlık kapasite bilgisi, uçuş kontrol birimi tarafından acil durum kararlarının verilebilmesi için doğrudan kullanılmaktadır. Akım ve gerilim verileri ise uçuş kontrol sistemi tarafından değerlendirmeye alınmaz ancak uçuş sonrası inceleme amacıyla kaydedilmesi için uçuş kontrol birimine gönderilmektedir.

Şekil 5.26'da uçuş esnasında kaydedilen veriler kullanılarak çizdirilen gerçek zamanlı terminal akımı grafiği gösterilmektedir. Akım profili incelendiğinde, uçağın ilk 15 dakikaya kadar, kalkış ve tırmanış manevrasının ardından yaklaşık 10 dakikalık bir süresi seyir halinde geçirmiştir. Akabinde akımın düştüğü ve ani yükseldiği noktalarda, 2 kez dalış ve tırmanış manevrası yaparak indiği, son 2 dakikalık zaman diliminde ise yerde olduğu gözlemlenmektedir.



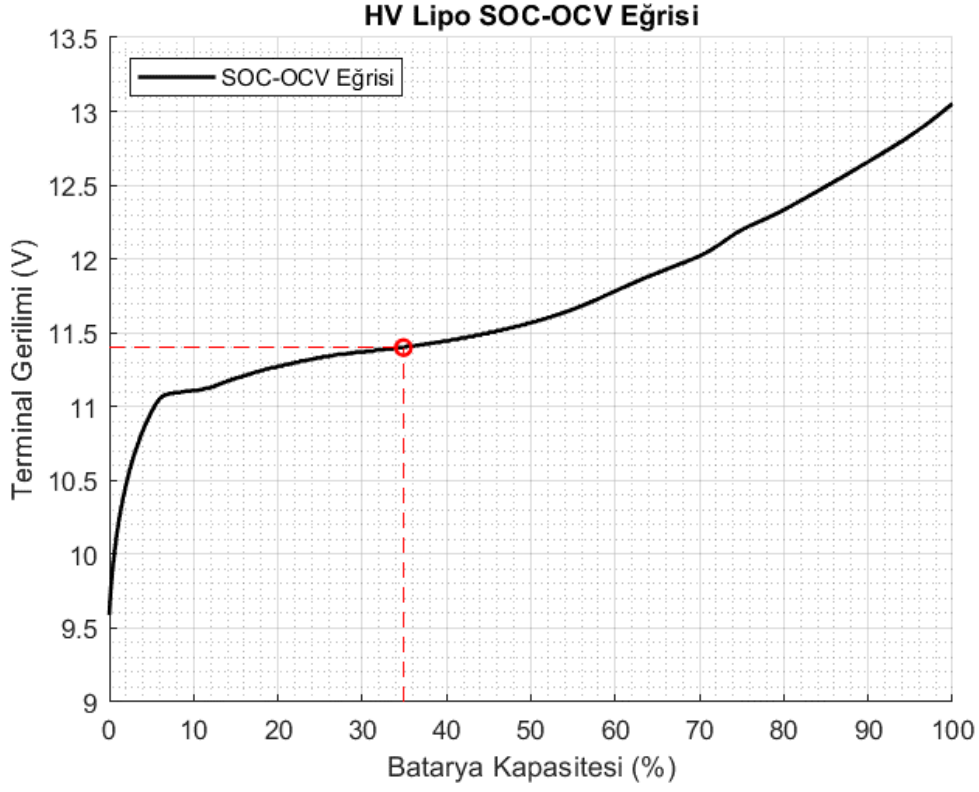
Şekil 5.26 : Uçuş Testi Akım Profili.

Şekil 5.27’de uçuş esnasında kaydedilen veriler kullanılarak çizdirilen gerçek zamanlı terminal gerilimi grafiği gösterilmektedir. Uçuş testi esnasında bataryadan çekilen akımın, laboratuvar testlerinde olduğu sabit ve bilinen bir profili olmadığından, teorik olarak beklenen bir batarya kapasitesi grafiği elde etmek mümkün değildir. Uçuş testinde kestirilen batarya kapasitesi doğrulamak için, uçuş sonlandığında bir süre dinlenerek; terminal gerilimi, açık devre gerilimine yakınsamış olan bataryanın terminal gerilimi 11.4 V olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değer Şekil 5.27’de kırmızı nokta ile işaretlenmiştir.

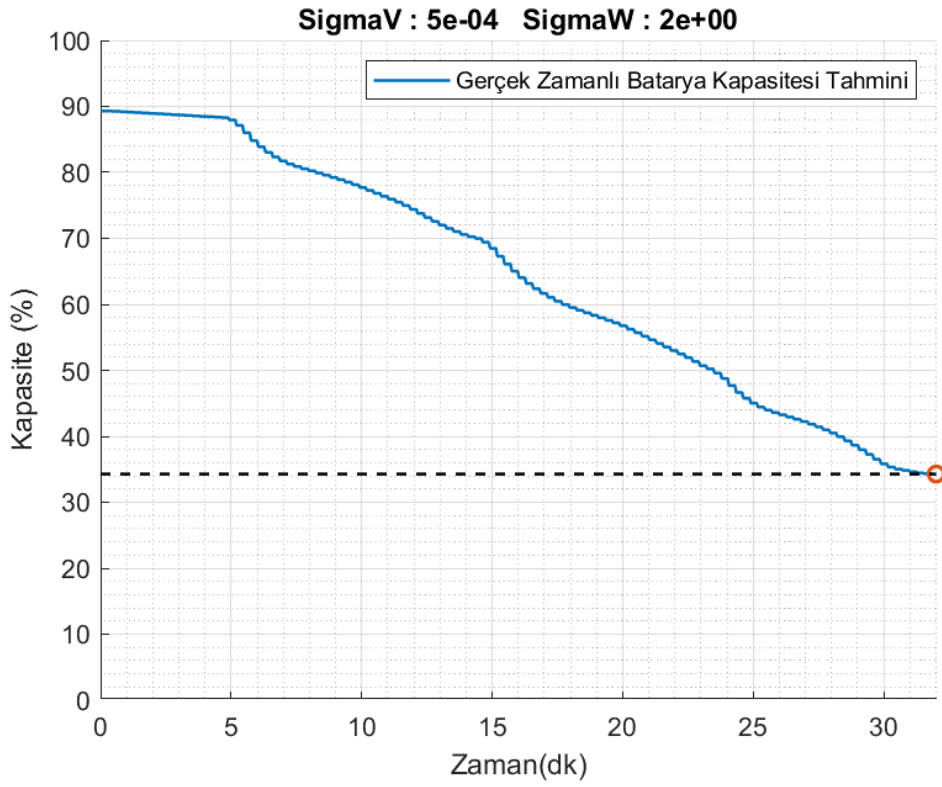


Şekil 5.27 : Uçuş Testi Terminal Gerilimi Tahmini.

Kaydedilen durağan gerilim değeri ile daha önce elde edilen açık devre gerilimi – batarya kapasitesi eğrisi kullanılarak batarya kapasitesi değerine ulaşılabilir. Şekil 5.28’de gösterilen bu eğri kullanılarak, durağan terminal gerilim değeri olan 11.4V ile batarya kapasitesi %34,88 olarak hesaplanmaktadır. Uçuş esnasında kestirilen batarya kapasitesinin grafiği ise Şekil 5.29’da gösterilmektedir. Grafik üzerinde kırmızı nokta ile işaretlenen ve uçuş sonlandığında kalan batarya kapasitesini gösteren değer %34,1 olarak elde edilmiştir. Elde edilen son değer karşılaştırıldığında, laboratuvar testlerinde de gözlemlendiği gibi %1’in altında bir hata payı ile yük altında da batarya kapasitesi kestirimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



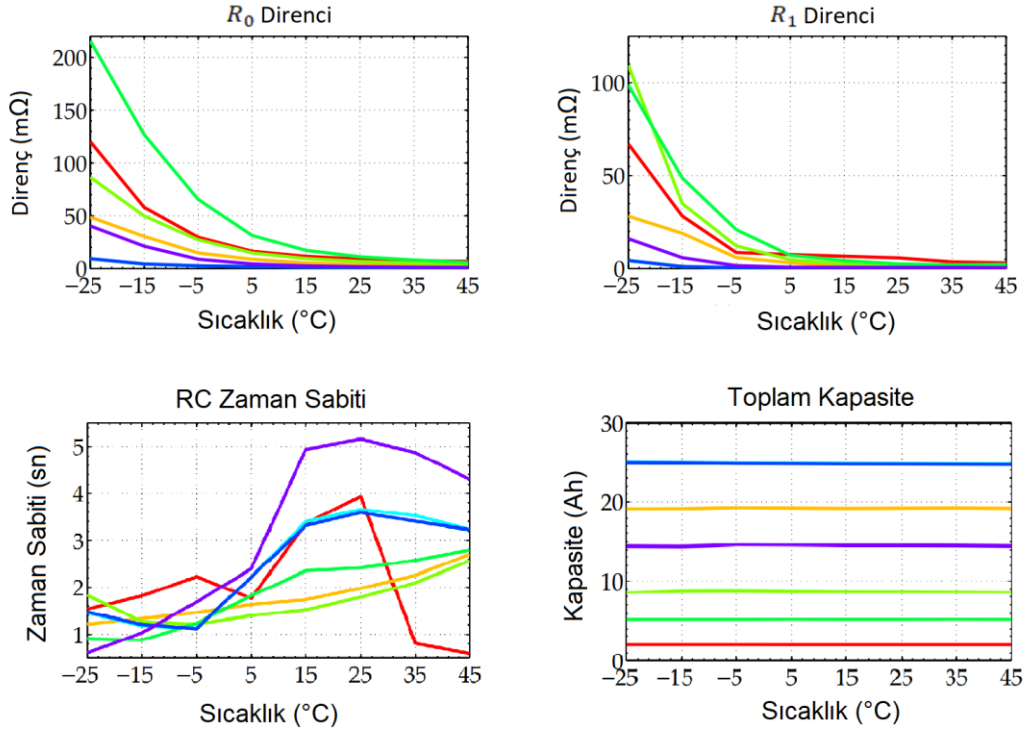
Şekil 5.28 : Durağan Batarya ile Batarya Kapasitesi Tahmini.



Şekil 5.29 : Uçuş Testi Batarya Kapasitesi Tahmini.

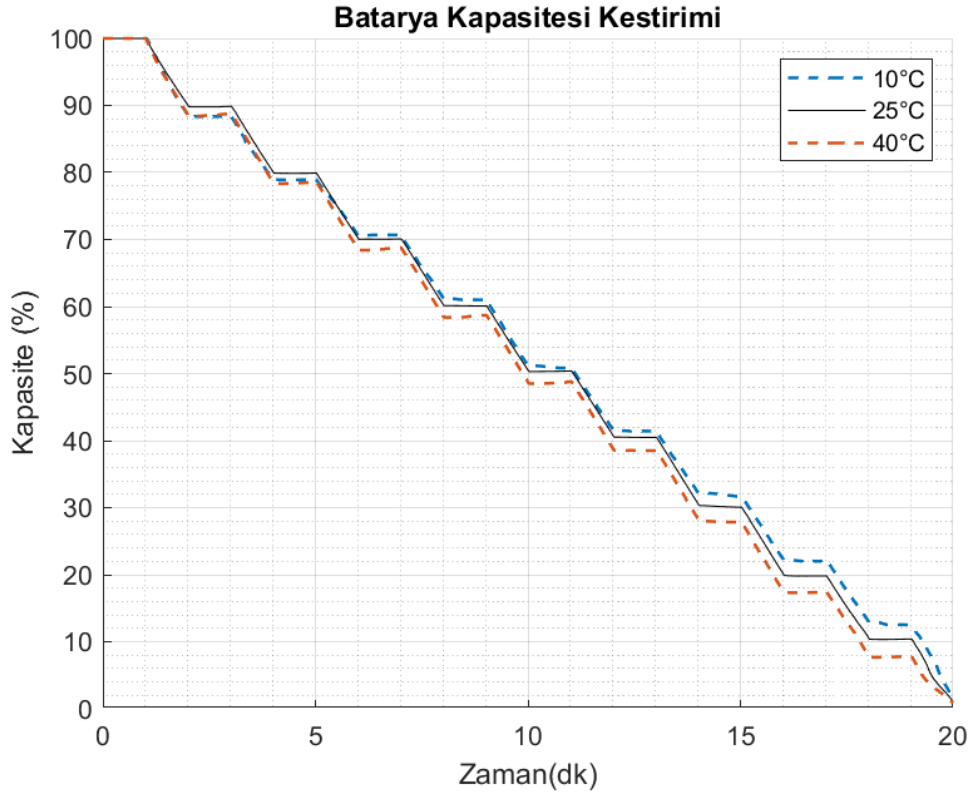
5.2.4 Sıcaklığın parametreler üzerindeki etkisi

Sıcaklığın, hem açık devre gerilimi-batarya kapasitesi ilişkisi hem de batarya parametreleri üzerinde etkisini test etmek için batarya farklı sıcaklıklarda şartlandırılarak test senaryoları tekrarlanmaktadır. Bu testler sonucunda, sıcaklığın batarya parametrelerini nasıl etkilediği Şekil 5.30'da gösterilmektedir.

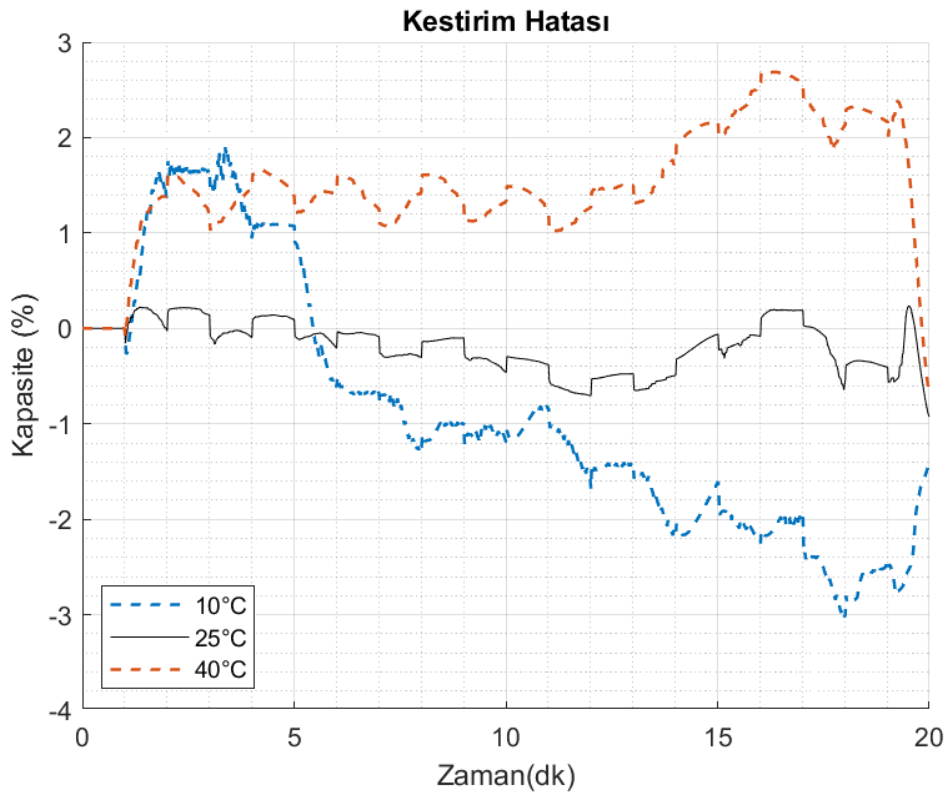


Şekil 5.30 : Sıcaklığın Parametreler Üzerindeki Etkisi. [29]

Bu çalışma kapsamında termal şartlandırma ekipmanlarının olmaması sebebiyle, sıcaklık etkisi batarya modeline dahil edilmemiştir. Şekil 5.30'da gösterilen farklı sıcaklıklardaki parametre değişimleri oda sıcaklığına oranla değişimi yüzdesel olarak değerlendirilmiş ve bu oran mevcut batarya modeli güncellenerek belirlenecek sıcaklık noktalarındaki hataları gösterilmeye çalışılmıştır. Düşük sıcaklık şartlarında yeterli verimin alınabilmesi için batarya paketine ön ısıtma işlemi yapılması sebebiyle, bataryanın asgari çalışma sıcaklık 10 °C olmaktadır. Azami çalışma sıcaklığı ise 40 °C olarak belirlenmiş ve bu sıcaklık seviyelerindeki parametre değişimleri ile darbe akım profili ile test senaryosu tekrar çalıştırılmıştır. Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de referans alınan asgari ve azami sıcaklık seviyelerinde kestirim sonuçları ve kestirim hatası gösterilmektedir. Kısıtlanan çalışma sıcaklıklarında, kestirici hatasının %3 seviyesini aşmadığı gözlemlenmektedir. Hava aracının kullanım senaryosuna göre bu hatası seviyesinin kabul edilebilir düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.31 : Farklı Sıcaklıklarda Kestirim Sonuçları.



Şekil 5.32 : Farklı Sıcaklıklarda Kestirim Hatası.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında ilk olarak bataryaların ortaya çıkışı, gelişim süreci ve son batarya teknolojileri hakkında ön bilgiler verilmiştir. Ardından yeniden doldurulabilir bataryaların kullanımında, batarya yönetim sistemlerinin görevi anlatılmıştır. Batarya yönetim sistemlerinin izlediği parametreler verilmiş ve İHA'larda bu verilerin hangi amaçla kullanıldığı, hangi durumlarda yüksek önem arz ettiği açıklanmıştır. Akabinde batarya yönetim sistemlerinin izlediği parametrelerin tahmin yöntemlerinden bahsedilerek, bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları konusu üzerinde durulmuştur. Bir sonraki bölümde batarya modeli ele alınmış; detaylı ve testlere dayalı verilerle desteklenmiş bir matematiksel batarya modeli elde edilmiştir. Bu model elde edilirken kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Tasarlanan sistemin mimarisi ve kullanılan kestirim algoritmasına yer verilmiştir. Kestirim algoritması için ortaya koyulan donanım ve yazılım mimarileri de bu kapsamda açıklanmıştır. Kestirim algoritmasının parametrelerinin belirlenmesi için oluşturulan veri toplama ortamından ve tasarlanan sistemin test edileceği laboratuvar test sisteminden bahsedilmiştir. Tasarlanan test ortamlarında, farklı test senaryolarıyla veriler toplanmıştır. Toplanan kestirim sonuçlarının, teorik olarak beklenen kapasitesi değeri ile kıyaslandığında elde edilen hata davranışı hem bölgesel hem de tüm veri kümesi için istatistiksel olarak değerlendirilerek kestiricinin; doğruluk ve hassasiyeti irdelenebilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, batarya kapasitesi kestiricisinin azami hata payı %3 olarak elde edilmiştir. Çalışma özelinde mini İHA'larda da acil durum, eve dönüş gibi fonksiyonların tetiklenmesi ve görev planlaması açısından bakıldığında tatmin edici seviyede olduğu değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalar açısından bakıldığında; sistemde ölçüm yapan sensörlerin sıcaklık, sabit kayma hatası gibi hata parametrelerinin modellenerek sisteme dahil edilerek doğruluğun artırılması düşünülmektedir. Bunun dışında sistemin daha farklı şartlarda, harici bir referans kaynak baz alınarak test edilmesi ve doğruluğunun elde edilmesi de değerlendirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Linden D., Thomas B. R.**, “*Linden’s Handbook of Batteries, 4th Edition*”, McGraw-Hill, New York, 2011.
- [2] **Rivera-Barrera J. P., Muñoz-Galeano N., Sarmiento-Maldonado H. O.**, “*Soc estimation for lithium-ion batteries: Review and future challenges*”, *Electronics*, vol. 6, no. 4, 2017.
- [3] **Jha A. R.**, “*Theory, Design, and Applications of Unmanned Aerial Vehicles*”, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- [4] **Özbek E., Yalin G., Ekici S., Karakoc T. H.**, “*Evaluation of design methodology, limitations, and iterations of a hydrogen fuelled hybrid fuel cell mini UAV*”, *Energy*, vol. 213, 2020.
- [5] **Suab S. A., Avtar R.**, “*Unmanned Aerial Vehicle System (UAVS) Applications in Forestry and Plantation Operations: Experiences in Sabah and Sarawak, Malaysian Borneo.*”, *Unmanned Aerial Vehicle: Applications in Agriculture and Environment* pp. 101–118, Springer, 2020.
- [6] **Ramesh P. S., Lal M.**, “*Mini unmanned aerial systems (UAV)-A review of the parameters for classification of a mini UAV*”, *Int. J. Aviat. Aeronaut. Aerosp.*, vol. 7, no. 3, 2020.
- [7] **Yanushevsky R.**, “*Guidance Of Unmanned Aerial Vehicles*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
- [8] **Ateş E.**, “*Türkiye’nin İnsansız Hava Aracı (İHA) İhracat Rekabet Gücünün Analizi*”, *Türkiye İnsansız Hava Araçları Derg.*, vol.3, no. 1, pp.7–16, 2021.
- [9] **Bagotsky V. S., Skundin A. M., Volkovich Y. M.**, “*Electrochemical Power Sources : Batteries, Fuel Cells and Supercapacitors*”, John Wiley Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015.
- [10] **Korthauer R.**, “*Lithium-ion batteries: Basics and applications*”, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018, Translation of the German book Korthauer: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Springer 2013.
- [11] **Fathoni G., Widayat S., Topan P., Jalil A., Cahyadi A., Wahyunggoro O.**, “*Comparison of State-of-Charge (SOC) estimation performance based on three popular methods: Coulomb counting, open circuit voltage and Kalman filter*”, *Proc. 2nd Int. Conf. Autom. Cogn. Sci. Opt. Micro Electro-Mechanical Syst. Inf. Technol. ICACOMIT 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 70–74, 2017.
- [12] **Scrosati B., Garche J.**, “*Lithium batteries: Status, prospects and future*”, *J. Power Sources*, vol. 195, no. 9, pp. 2419–2430, 2010.

- [13] **Hwang J. Y., Myung S. T., Sun Y. K.**, “*Sodium-ion batteries: Present and future*”, Chem. Soc. Rev., vol. 46, no. 12, pp. 3529–3614, 2017.
- [14] **Guo R., Lu L., Ouyang M., Feng X.**, “*Mechanism of the entire overdischarge process and overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries OPEN*”, Nat. Publ. Gr., 2016.
- [15] **Fear C., Juarez-robles D., Jeevarajan J. A., Mukherjee P. P.**, “*Elucidating Copper Dissolution Phenomenon in Li-Ion Cells under Overdischarge Extremes Elucidating Copper Dissolution Phenomenon in Li-Ion Cells under Overdischarge Extremes*”, J. Electrochem. Soc., pp. 165, 2018.
- [16] **Abada S., Marlair G., Lecocq A., Petit M., Sauvant-Moynot V., Huet F.**, “*Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review*”, J. Power Sources, vol. 306, pp. 178–192, 2016.
- [17] **Xiong R.**, “*Battery management algorithm for electric vehicles*”, Springer, Jointly Published with China Machine Press, 2020.
- [18] **Xiang S., Hu G., Huang R., Guo F., Zhou P.**, “*Lithium-ion battery online rapid state-of-power estimation under multiple constraints*”, Energies, vol. 11, no. 2, pp. 22–26, 2018.
- [19] **Plett G. L.**, “*Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods*”, Artech House, 2015.
- [20] **Özbek L.**, “*Kalman Filtresi*” Ankara: Akademisyen Kitabevi, 2017.
- [21] **Simon D.**, “*Optimal state estimation: Kalman, H-infinity, and nonlinear approaches*”, Wiley-Interscience, 2006.
- [22] **Meng J., Ricco M., Luo G., Swierczynski M., Stroe D., Stroe A., Teodorescu R.**, “*An Overview and Comparison of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-Ion Battery*”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 2, pp. 1583–1591, 2018.
- [23] **Baccouche I., Jemmali S., Mlayah A., Manai B., Amara N. E. B.**, “*Implementation of an improved Coulomb-counting algorithm based on a piecewise SOC-OCV relationship for SOC estimation of Li-ion battery*”, Int. J. Renew. Energy Res., vol. 8, no. 1, pp. 178–187, 2018.
- [24] **Movassagh K., Raihan A., Balasingam B., Pattipati K.**, “*A Critical Look at Coulomb Counting Approach for State of Charge Estimation in Batteries*”, Energies, vol. 14, no. 1, p. 4074, 2021.
- [25] **How D. N. T., Hannan M. A., Lipu M. S. H., Ker P. J.**, “*State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Model-Based and Data-Driven Methods: A Review*”, IEEE Access, vol. 7, pp. 136116–136136, 2019.
- [26] **Pakpahan J. F. J., Dewangga B. R., Pratama G. N. P., Cahyadi A. I., Herdjunanto S., Wahyunggoro O.**, “*State of charge estimation for lithium polymer battery using kalman filter under varying internal resistance*”, 2019 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. ICOIACT 2019, pp. 839–844, 2019.

- [27] **Madani S. S., Schaltz E., Kær S. K.**, “*An electrical equivalent circuit model of a lithium titanate oxide battery*”, Batteries by MDPI, vol. 5, no. 1, pp. 31, 2019.
- [28] **Xiong R., Pan Y., Shen W., Li H., Sun F.**, “*Lithium-ion battery aging mechanisms and diagnosis method for automotive applications: Recent advances and perspectives*”, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 131, no. 5, p. 110048, 2020.
- [29] **Plett G. L.**, “*Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*” Artech House, 2015.
- [30] **Zografopoulos I., Konstantinou C.**, “*DERauth: A battery-based authentication scheme for distributed energy resources*”, Proc.IEEE Comput. Soc. Annu. Symp. VLSI, ISVLSI, vol. 2020-July, no. May, pp. 560–567, 2020.
- [31] **Zhao X., Pan Y., Yan X., Li S.**, “*Modeling of Dynamic Hysteresis Characters for the Lithium-Ion Battery Modeling of Dynamic Hysteresis Characters for the Lithium-Ion Battery*”, J. Electrochem. Soc., vol.167, no.9, 2020.
- [32] **Baronti F., Femia N., Saletti R., Zamboni W.**, “*Comparing open-circuit voltage hysteresis models for lithium-iron-phosphate batteries*”, IECON Proc. Industrial Electron. Conf., no. 1, pp. 5635–5640, 2014



EKLER

EK 1 : TM4C129 Serisi Mikrodenetleyici Veri Sayfası

EK 2 : LTC2946 Güç Monitörü Veri Sayfası

EK 3 : Rigol DL3031 Veri Sayfası

EK 4 : PXIe-8861 Quad Core Controller Veri Sayfası

EK 5 : PXIe-4080 DMM Veri Sayfası



1 Architectural Overview

Texas Instrument's Tiva™ C Series microcontrollers provide designers a high-performance ARM® Cortex™-M-based architecture with a broad set of integration capabilities and a strong ecosystem of software and development tools. Targeting performance and flexibility, the Tiva™ C Series architecture offers a 120 MHz Cortex-M with FPU, a variety of integrated memories and multiple programmable GPIO. Tiva™ C Series devices offer consumers compelling cost-effective solutions by integrating application-specific peripherals and providing a comprehensive library of software tools which minimize board costs and design-cycle time. Offering quicker time-to-market and cost savings, the Tiva™ C Series microcontrollers are the leading choice in high-performance 32-bit applications.

This chapter contains an overview of the Tiva™ C Series microcontrollers as well as details on the TM4C1294NCPDT microcontroller:

- "Tiva™ C Series Overview" on page 51
- "TM4C1294NCPDT Microcontroller Overview" on page 52
- "TM4C1294NCPDT Microcontroller Features" on page 55
- "TM4C1294NCPDT Microcontroller Hardware Details" on page 78
- "Kits" on page 79
- "Support Information" on page 79

1.1 Tiva™ C Series Overview

The Tiva™ C Series ARM Cortex-M4 microcontrollers provide top performance and advanced integration. The product family is positioned for cost-effective applications requiring significant control processing and connectivity capabilities such as:

- Industrial communication equipment
- Network appliances, gateways & adapters
- Residential & commercial site monitoring & control
- Remote connectivity & monitoring
- Security/access systems
- HMI control panels
- Factory automation control
- Test and measurement equipment
- Fire & security systems
- Motion control & power inversion
- Medical instrumentation
- Gaming equipment
- Electronic point-of-sale (POS) displays
- Smart Energy/Smart Grid solutions
- Intelligent lighting control
- Vehicle tracking

Tiva™ C Series microcontrollers integrate a large variety of rich communication features to enable a new class of highly connected designs with the ability to allow critical, real-time control between performance and power. The microcontrollers feature integrated communication peripherals along with other high-performance analog and digital functions to offer a strong foundation for many different target uses, spanning from human machine interface to networked system management controllers.

In addition, Tiva™ C Series microcontrollers offer the advantages of ARM's widely available development tools, System-on-Chip (SoC) infrastructure, and a large user community. Additionally, these microcontrollers use ARM's Thumb®-compatible Thumb-2 instruction set to reduce memory requirements and, thereby, cost. Finally, the TM4C1294NCPDT microcontroller is code-compatible to all members of the extensive Tiva™ C Series, providing flexibility to fit precise needs.

Texas Instruments offers a complete solution to get to market quickly, with evaluation and development boards, white papers and application notes, an easy-to-use peripheral driver library, and a strong support, sales, and distributor network.

1.2 TM4C1294NCPDT Microcontroller Overview

The TM4C1294NCPDT microcontroller combines complex integration and high performance with the features shown in Table 1-1.

Table 1-1. TM4C1294NCPDT Microcontroller Features

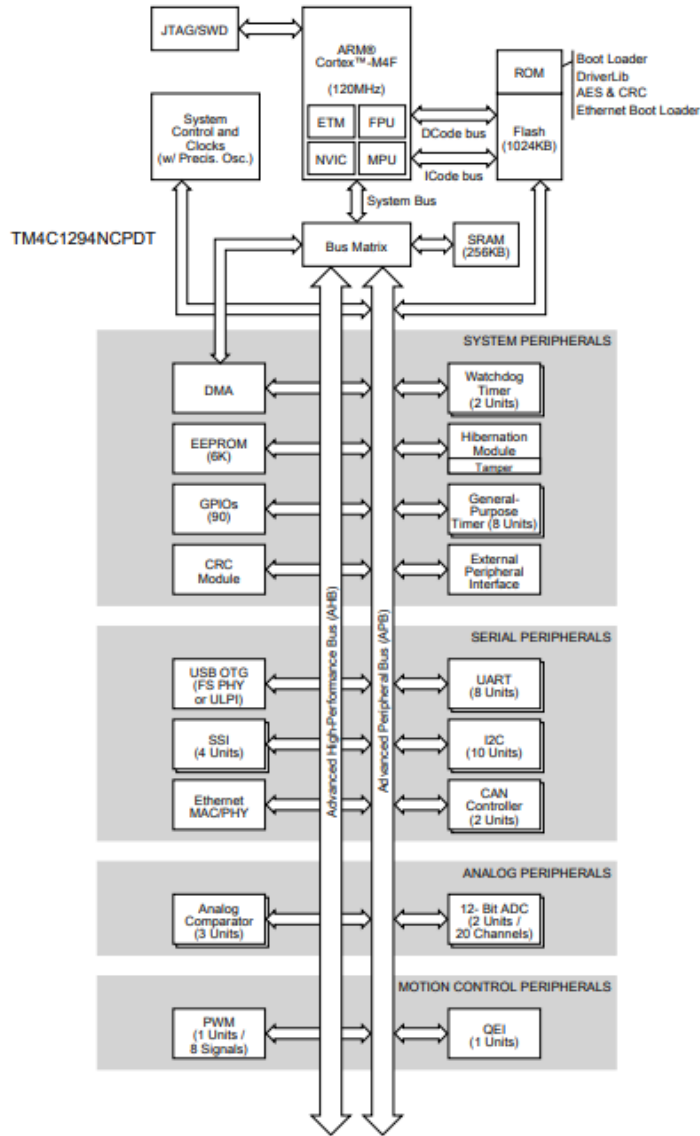
Feature	Description
Performance	
Core	ARM Cortex-M4F processor core
Performance	120-MHz operation; 150 DMIPS performance
Flash	1024 KB Flash memory
System SRAM	256 KB single-cycle System SRAM
EEPROM	6KB of EEPROM
Internal ROM	Internal ROM loaded with TivaWare™ for C Series software
External Peripheral Interface (EPI)	8-/16-/32-bit dedicated interface for peripherals and memory
Security	
Cyclical Redundancy Check (CRC) Hardware	16-/32-bit Hash function that supports four CRC forms
Tamper	Support for four tamper inputs and configurable tamper event response
Communication Interfaces	
Universal Asynchronous Receivers/Transmitter (UART)	Eight UARTs
Quad Synchronous Serial Interface (QSSI)	Four SSI modules with BI-, Quad- and advanced SSI support
Inter-Integrated Circuit (I ² C)	Ten I ² C modules with four transmission speeds including high-speed mode
Controller Area Network (CAN)	Two CAN 2.0 A/B controllers
Ethernet MAC	10/100 Ethernet MAC
Ethernet PHY	PHY with IEEE 1588 PTP hardware support
Universal Serial Bus (USB)	USB 2.0 OTG/Host/Device with ULPI interface option and Link Power Management (LPM) support
System Integration	
Micro Direct Memory Access (μDMA)	ARM® PrimeCell® 32-channel configurable μDMA controller
General-Purpose Timer (GPTM)	Eight 16/32-bit GPTM blocks
Watchdog Timer (WDT)	Two watchdog timers
Hibernation Module (HIB)	Low-power battery-backed Hibernation module
General-Purpose Input/Output (GPIO)	15 physical GPIO blocks
Advanced Motion Control	
Pulse Width Modulator (PWM)	One PWM module, with four PWM generator blocks and a control block, for a total of 8 PWM outputs.

Table 1-1. TM4C1294NCPDT Microcontroller Features (continued)

Feature	Description
Quadrature Encoder Interface (QEI)	One QEI module
Analog Support	
Analog-to-Digital Converter (ADC)	Two 12-bit ADC modules, each with a maximum sample rate of two million samples/second
Analog Comparator Controller	Three independent integrated analog comparators
Digital Comparator	16 digital comparators
JTAG and Serial Wire Debug (SWD)	One JTAG module with integrated ARM SWD
Package Information	
Package	128-pin TQFP
Operating Range (Ambient)	Industrial (-40°C to 85°C) temperature range Extended (-40°C to 105°C) temperature range

Figure 1-1 on page 54 shows the features on the TM4C1294NCPDT microcontroller. Note that there are two on-chip buses that connect the core to the peripherals. The Advanced Peripheral Bus (APB) bus is the legacy bus. The Advanced High-Performance Bus (AHB) bus provides better back-to-back access performance than the APB bus.

Figure 1-1. Tiva™ TM4C1294NCPDT Microcontroller High-Level Block Diagram





Wide Range I²C Power, Charge and Energy Monitor

FEATURES

- Rail-to-Rail Input Range: 0V to 100V
- Wide Input Supply Range: 2.7V to 100V
- Shunt Regulator for Supplies >100V
- $\Delta\Sigma$ ADC with Less Than $\pm 0.4\%$ Total Unadjusted Error
- 12-Bit Resolution for Current and Voltages
- $\pm 1\%$ Accurate Power and Energy Measurements
- $\pm 0.6\%$ Accurate Current and Charge Measurements
- Additional ADC Input Monitors an External Voltage
- Internal $\pm 5\%$ or External Time Bases
- Continuous Scan and Snapshot Modes
- Stores Minimum and Maximum Values
- Alerts When Limits Exceeded
- Split SDA Pin Eases Opto-Isolation
- Shutdown Mode with $I_Q < 40\mu A$
- Available in 4mm \times 3mm DFN and 16-Lead MSOP Packages

APPLICATIONS

- Telecom Infrastructure
- Industrial Equipment
- General Purpose Energy Measurement

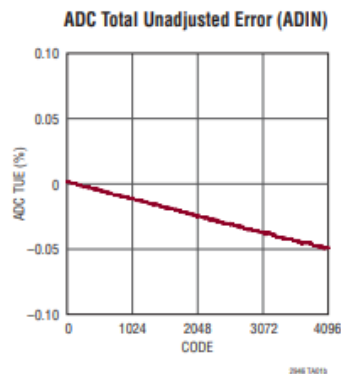
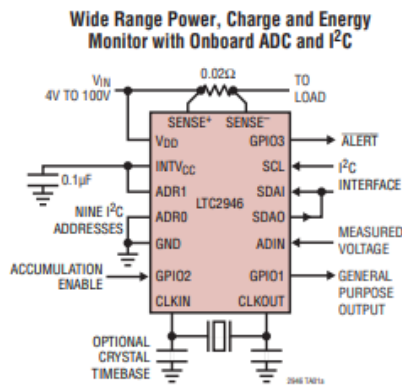
DESCRIPTION

The LTC2946 is a rail-to-rail system monitor that measures current, voltage, power, charge and energy. It features an operating range of 2.7V to 100V and includes a shunt regulator for supplies above 100V. The current measurement common mode range of 0V to 100V is independent of the input supply. A 12-bit ADC measures load current, input voltage and an auxiliary external voltage. Load current and internally calculated power are integrated over an external clock or crystal or internal oscillator time base for charge and energy. An accurate time base allows the LTC2946 to provide measurement accuracy of better than $\pm 0.6\%$ for charge and $\pm 1\%$ for power and energy. Minimum and maximum values are stored and an overrange alert with programmable thresholds minimizes the need for software polling. Data is reported via a standard I²C interface.

The LTC2946 I²C interface includes separate data input and output pins for use with standard or opto-isolated I²C connections. The LTC2946-1 has an inverted data output for use with inverting opto-isolator configurations.

LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks and Hot Swap is a trademark of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION

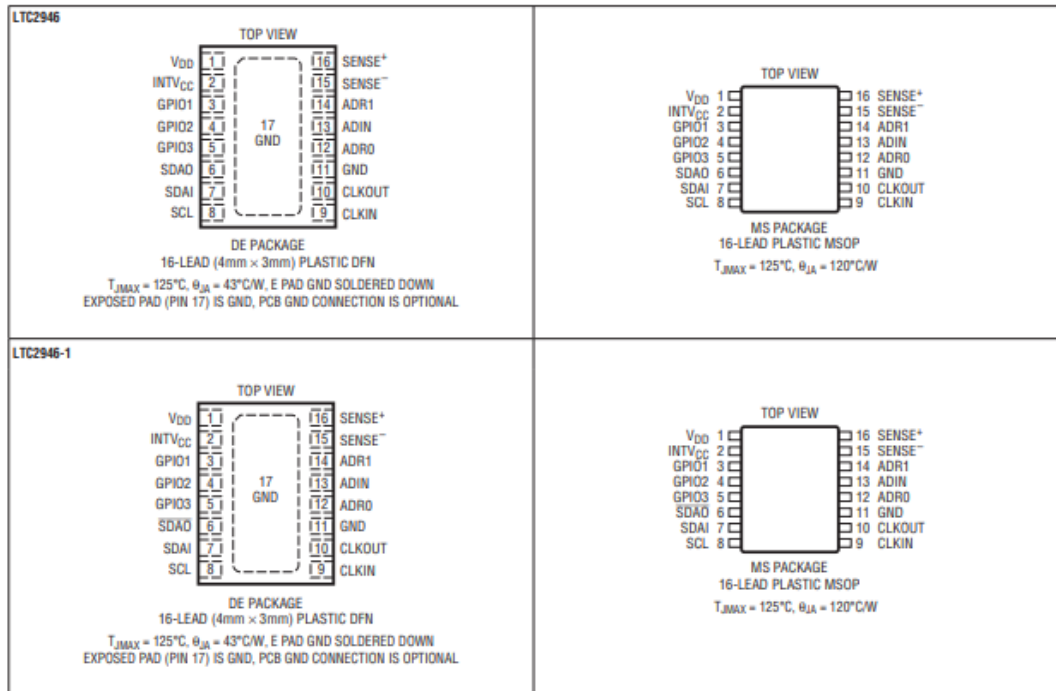


LTC2946

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Notes 1, 2)

V _{DD} Voltage.....	-0.3V to 100V	SCL, SDAI Voltages (Note 4).....	-0.3V to 5.9V
SENSE ⁺ Voltage.....	-1V to 100V	SCL, SDAI Clamp Current.....	5mA
SENSE ⁻ Voltage.....	-1V or SENSE ⁺ - 1V to SENSE ⁺ + 1V	Operating Temperature Range	
INTV _{CC} Voltage		LTC2946C.....	0°C to 70°C
(Note 3).....	-0.3V to Lesser of 5.8V, V _{DD} + 0.3V	LTC2946I.....	-40°C to 85°C
ADR1, ADR0, ADIN, SDA0, SDA0, GPIO1 TO GPIO3		LTC2946H.....	-40°C to 125°C
Voltages.....	-0.3V to 7V	LTC2946MP.....	-55°C TO 125°C
CLKOUT Voltage.....	-0.3V to INTV _{CC} + 0.3V	Storage Temperature Range.....	-65°C to 150°C
CLKIN Voltage.....	-0.3V to 5.5V	Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	
INTV _{CC} Clamp Current.....	35mA	MS Package Only.....	300°C

PIN CONFIGURATION



2946ta

2

For more information www.linear.com/LTC2946



DL3000 Series Overview

DL3000 is a cost-effective programmable linear DC electronic load with high performance. With a user-friendly interface and superb performance specifications, DL3000 series provides various interfaces for remote communication to meet your diversified test requirements. It can be widely used in various industries, such as automotive electronics, aerospace, and fuel cells.

Main Features:

- DL3021/DL3021A: single output, 150 V/40 A, total power up to 200 W
- DL3031/DL3031A: single output, 150 V/60 A, total power up to 350 W
- Dynamic mode: up to 30 kHz
- Adjustable current rising speed: 0.001 A/us to 5 A/us
- Temperature coefficient for voltage and current programming: lower than 50 ppm
- Accuracy error for voltage and current programming: lower than 0.05%
- Graphic transient recovery time test
- Support waveform capture of the graphical interface
- Ripple/transient recovery time/dynamic waveform sample rate: up to 250 kSPS
- 4.3-inch TFT LCD, capable of displaying multiple parameters and states simultaneously
- Overvoltage/overcurrent/overpower/overtemperature/reverse connection protection
- 4 static modes: CV, CC, CR, CP
- 3 dynamic modes: continuous, pulsed, toggled
- List function supports editing as many as 512 steps
- Rotary knob served as the encoder switch, making the operation fast and easy
- Battery test function
- Targeted factory test function
- Short-circuit test function
- Smart fan control
- Power-off memory function
- Log recording function
- Built-in buzzer to give off an alarm
- OCP and OPP test functions
- External analog control
- Support VISA/USB-TMC/LXI/SCPI communication protocol
- Built-in RS232/USB/LAN communication interface
- USB-GPIB module (optional)
- Software monitoring via PC
- PC software virtual panel

Appearance and Dimensions

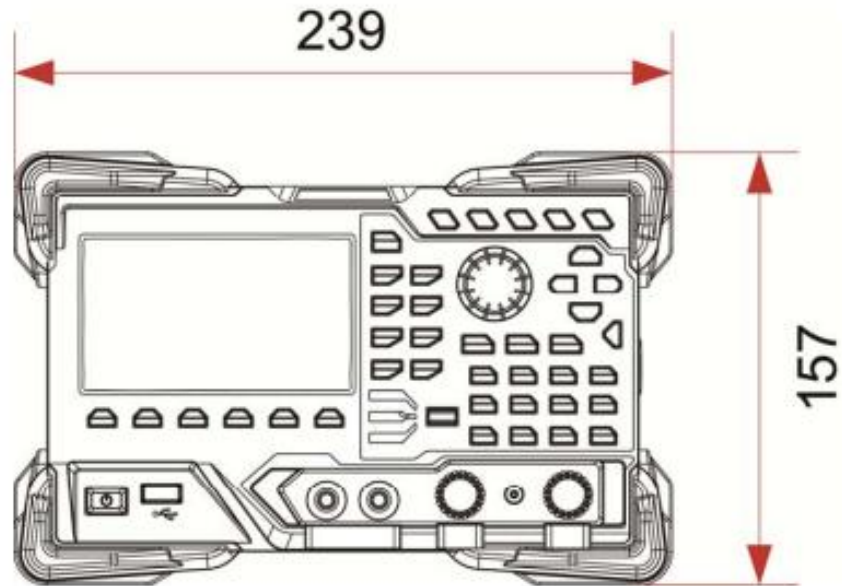


Figure 1-1 Front View

Unit: mm

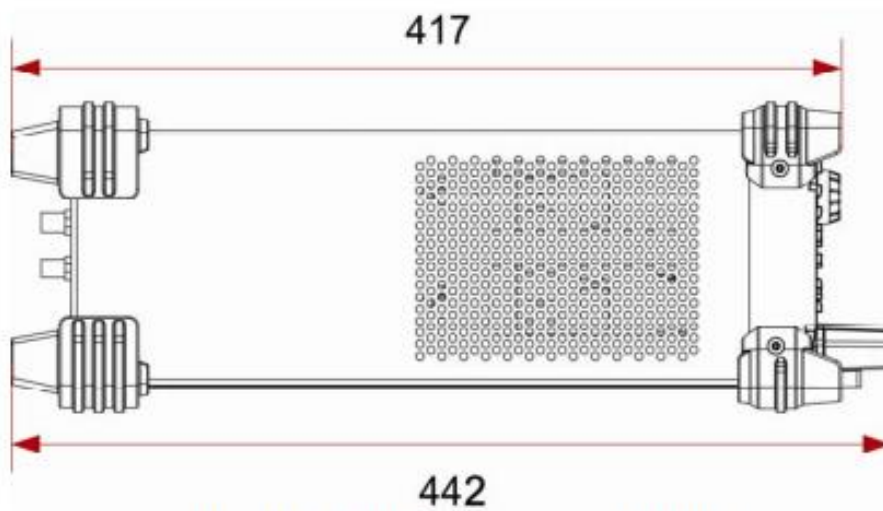


Figure 1-2 Side View

Unit: mm

PXIe-8861

Description

The PXIe-8861 PXI Express/CompactPCI Express embedded controller is a high-performance PXI Express/CompactPCI Express-compatible system controller. The PXIe-8861 controller integrates standard I/O features in a single unit by using state-of-the-art packaging. Combining a PXIe-8861 embedded controller with a PXI Express-compatible chassis, such as the PXIe-1095, results in a fully PC-compatible computer in a compact, rugged package.

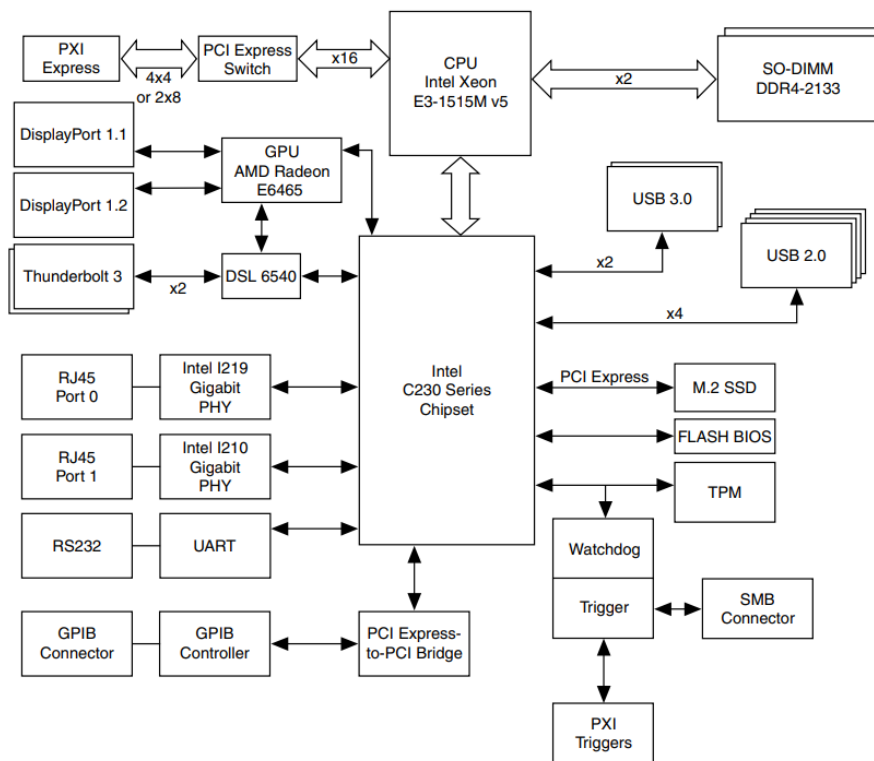
The PXIe-8861 has an Intel® Xeon® E3-1515M v5 processor (Quad Core, 2.8 GHz base, 3.7 GHz turbo frequency), all the standard I/O, and a 512 GB or larger solid state drive.

The standard I/O on each module includes two DisplayPort video, one RS-232 serial port, four Hi-Speed USB ports, two SuperSpeed USB ports, two Gigabit Ethernet ports (one enabled for 1588), two Thunderbolt 3 ports, a reset button, and an SMB connector for triggers.

Functional Overview

The PXIe-8861 is a modular PC in a PXI Express 3U-size form factor. The following figure is a functional block diagram of the PXIe-8861. Following the diagram is a description of each logic block shown.

Figure 1. PXIe-8861 Block Diagram



Definitions

Warranted specifications describe the performance of a model under stated operating conditions and are covered by the model warranty.

The following characteristic specifications describe values that are relevant to the use of the model under stated operating conditions but are not covered by the model warranty.

- *Typical* specifications describe the performance met by a majority of models.
- *Nominal* specifications describe an attribute that is based on design, conformance testing, or supplemental testing.

Specifications are *Warranted* unless otherwise noted.

T_{extcal} is the device temperature at last external calibration.

T_{selfcal} is the device temperature at last self-calibration.

Conditions

Specifications are valid under the following conditions unless otherwise noted. Refer to each section for additional conditions that apply.

- Self-calibration performed within the last 24 hours
- Calibration interval of 2 years
- 60 minutes warm-up time

DC Voltage Specifications

Accuracy

All DC voltage accuracy specifications apply to apertures of ≥ 100 ms, with Auto Zero and ADC calibration enabled. Assumes offset nulling. Otherwise, add 2 μV to the specifications.

Table 1. DC Voltage \pm (ppm of reading + ppm of range)

Range	Input Resistance ¹	24 Hr ² T_{selfcal} $\pm 1^\circ\text{C}$	90 Day T_{selfcal} $\pm 5^\circ\text{C}$	2 Year T_{selfcal} $\pm 5^\circ\text{C}$	Tempco/ $^\circ\text{C}$	
					Without Self-Cal	With Self-Cal
100 mV	10 M Ω \pm 2%, >10 G Ω	10 + 10	40 + 20	45 + 20	4 + 5	0.3 + 0.3
1 V		6 + 2	20 + 6	25 + 6	2 + 1	0.3 + 0.3
10 V		4 + 2	20 + 6	25 + 6	1 + 1	0.3 + 0.3
100 V	10 M Ω \pm 2%	6 + 2	30 + 6	35 + 6	4 + 1	0.3 + 0.3
300 V		6 + 6	30 + 20	35 + 20	4 + 1	0.3 + 0.3

Resistance Specifications

Accuracy

All resistance accuracy specifications apply to apertures of ≥ 100 ms, with Offset Compensated Ohms (for ranges ≤ 10 k Ω) or Auto Zero (for ranges ≥ 100 k Ω) and ADC calibration enabled.

Table 2. Resistance (4-Wire and 2-Wire³) \pm (ppm of reading + ppm of range)

Range	Test Current ⁴	Max Test Voltage	24 Hr ⁵ $T_{\text{selfcal}} \pm$ 1 °C	90 Day $T_{\text{selfcal}} \pm$ 5 °C	2 Year $T_{\text{selfcal}} \pm$ 5 °C	Tempco/°C	
						Without Self-Cal	With Self-Cal
100 Ω	1 mA	100 mV	15 + 10	50 + 15	80 + 15	5 + 1	0.8 + 1
1 k Ω	1 mA	1 V	12 + 2	50 + 3	80 + 3	5 + 0.1	0.8 + 0.1
10 k Ω	100 μ A	1 V	12 + 2	50 + 3	80 + 3	5 + 0.1	0.8 + 0.1
100 k Ω ⁶	10 μ A	1 V	15 + 2	90 + 6	95 + 6	5 + 0.5	2 + 0.5
1 M Ω	10 μ A	10 V	20 + 2	90 + 10	95 + 10	5 + 1	2 + 1
10 M Ω	1 μ A	10 V	100 + 2	800 + 10	800 + 10	20 + 3	20 + 3
100 M Ω ⁷	1 μ A 10 M Ω	10 V	500 + 10	3000 + 10	3000 + 10	300 + 10	300 + 10

³ Perform offset nulling or add 200 m Ω to reading.

⁴ -10% to 0% tolerance, typical.

⁵ Relative to external calibration source.

⁶ Perform offset nulling or add 2 ppm of range to the specifications.

⁷ 2-wire resistance measurement only. Use tempco outside $T_{\text{extcal}} \pm 10$ °C. Typical accuracy is 5% between 105 M Ω and 1.05 G Ω .