

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİTYUM TABANLI AKÜLER İÇİN ŞARJ TAHMİNİ VE BİR
YÖNETİM SİSTEMİ UYGULAMASI

DEMET ÇAKRAK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİTYUM TABANLI AKÜLER İÇİN ŞARJ
TAHMİNİ VE BİR YÖNETİM SİSTEMİ
UYGULAMASI

DEMET ÇAKRAK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE
2019

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

**ESTIMATION OF STATE-OF-CHARGE AND
APPLICATION OF A MANAGEMENT
SYSTEM FOR LITHIUM-BASED
BATTERIES**

DEMET AKRAK
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE
2019



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02./10./2019 tarih ve 2019./45 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15./10./2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Demet ÇAKRAK'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

ÜYE

: DR. TUBA GÖZEL

ÜYE

: DR. ENGİN HÜNER

ONAY

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

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Hücreler, daha yüksek gerilim ve kapasiteye sahip bir batarya paketi elde etmek için seri ve paralel bağlanır. Çünkü tek bir hücrenin gerilim ve kapasite değeri çoğu uygulama için yeterli değildir. Ancak hücre sayısının artması beraberinde bir kontrol mekanizmasını da gerekli kılar. Aşırı şarj ve aşırı deşarj bataryalarda geri dönüşü olmayan hasarlara yol açabileceği gibi patlamasına dahi neden olabilir. Bu sebeple hücrelerin gerilim, sıcaklık gibi önemli parametreleri gözlenerek oluşabilecek problemlerin önüne geçebilmek için bir batarya yönetim sistemine ihtiyaç duyulur.

Bu çalışmada günümüzde kullanımı oldukça yaygın olan lityum iyon piller için bir yönetim sistemi geliştirildi. "Analog Devices" firmasının dengeleme kartı olan DC2100B-C kartı için bir gömülü yazılımlar geliştirilerek, kart otomatik hücre dengelemesi yapabilir hale getirildi. Dengelemenin doğru yapılabilmesi için, hücre yük durumunun yüksek doğrulukla tahmin edilebilmesi gereklidir. Bu nedenle bazı yük tahmin metodları kullanılarak, karşılaştırmaları yapılmıştır. Ayrıca, aşırı şarj, deşarj durumlarını engellemek için yazılıma gerekli kontroller eklendi. Bataryanın uygun şartlarda çalışma durumu güvence altına alınarak, batarya ömrü uzatılmış oldu.

Anahtar Kelimeler: Batarya yönetim sistemi, lityum batarya, hücre dengeleme.

SUMMARY

Cells are connected in series and parallel to obtain a battery pack with higher voltage and capacity, because the voltage and capacity of a single cell is not enough for most applications. However, increasing number of cells necessitates a control mechanism. Overcharging and undercharging a battery can cause irreversible damage to it, even make it explode. For these reasons, a battery management system is required to prevent problems that can occur by monitoring important parameters of cells such as voltage and temperature.

In this work, a battery management system is developed for lithium-ion batteries, which is in widespread use nowadays. Embedded softwares have been developed for Analog Devices DC2100B-C cell balancer board, which enabled it to perform automatic cell balancing. The estimation of state-of-charge (SoC) with high accuracy is necessary for accurate cell balancing. Therefore, several SoC estimation methods are employed and compared. Furthermore, controls, which are necessary to prevent overcharge and undercharge, are implemented in the software. This increased the operation life of the battery by ensuring proper working conditions for the battery.

Key Words: Battery management system, lithium battery, cell balancing.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca çalışmalarımı yürütmemde bana yardımcı olan ve yol gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI'ya, tez çalışmam boyunca bilgisini ve yardımlarını benden esirgemeyen Dr. Cengiz BİRLİKSEVEN'e, tüm çalışmam boyunca yanımda olup beni destekleyen Çağrı ŐENEL, Ceyhun SEZENOĞLU ve Murat CEYLAN'a ve hayatım boyunca beni her zaman destekleyen annem Zeynep ÇAKRAK, babam Adnan ÇAKRAK, kardeşlerim Dilek ÜNAL, Melek DEMÜR ve Samet ÇAKRAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. BATARYALAR	3
2.1. Lityum İyon Bataryalar	4
2.2. Temel Batarya Kavramları	5
2.3. Bataryanın Modellenmesi	8
2.4. Bataryanın Şarj Durumunun Belirlenmesi	9
2.4.1. Coulomb Sayma Yöntemi	10
2.4.2. Kalman Filtresi Yöntemi	11
2.4.2.1. Sistem Çözümlerinde Durum Uzay Denklemleri	11
2.4.2.2. Durum-Uzay Denklemlerinin Fark Denklemlerine Dönüştürülmesi	11
2.4.2.3. Standart Kalman Filtresi	12
2.4.2.4. Genişletilmiş (Extended) Kalman Filtresi	14
2.4.2.5. Batarya Thevenin Modeli İçin Durum-Uzay Fark Denklemlerinin Elde Edilmesi	15
2.4.2.6. Batarya Standart Kalman Filtresi Fark Denklemlerinin Elde Edilmesi	17
3. HÜCRE Dengeleme Sistemleri	19
3.1. Pasif Dengeleme	19
3.2. Aktif Dengeleme	20
4. FLYBACK DÖNÜŞTÜRÜCÜ	30

4.1. Flyback Dönüştürücü Yapısı	30
4.2. Çift Yönlü Flyback Dönüştürücü	32
5. DC2100B-C KARTI İÇİN OTOMATİK DENGELEME ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ	35
5.1. DC2100B-C Kart Yapısı	35
5.1.1. LTC6804-2 Entegresi	36
5.1.2. LTC6820 Entegresi	36
5.1.3. LTC3300-1 Entegresi	37
5.1.4. 24AA64 Entegresi	38
5.1.5. LTC1380 Entegresi	38
5.2. Batarya Dengeleme	39
5.2.1. Samsung ICRF18650-26F Pillerin Özellikleri	39
5.2.2. Pil Şarj-Deşarj İşlemleri	40
5.2.3. Batarya Akım Ölçme	43
5.2.4. Thevenin Model Parametrelerinin Hesaplanması	47
5.2.5. Coulomb Sayma Yöntemiyle SoC Eğrilerinin Elde Edilmesi	49
5.2.6. Kalman Filtresi Yöntemiyle SoC Eğrisinin Elde Edilmesi	52
5.2.7. Kalman Filtresi ve Coulomb Sayma Yönteminin Karşılaştırılması	58
5.2.8. Pil Dengeleme Düzeneği	60
5.3. Geliştirilen Gömülü Yazılım	62
5.4. Gerçekleştirilen Batarya Dengeleme İşlemi	64
6. SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	71
EKLER	72
Diğer Ekler (CD)	72

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar Kısaltmalar

A	: Amper
ADC	: Analog Sayısal Çevirici
Ah	: Amper-Saat
CC	: Sabit Akım
CCV	: Kapalı Devre Gerilimi
CSB	: Chip Select
CV	: Sabit Gerilim
DoD	: Deşarj Derinliği
GPIO	: Genel Amaçlı Giriş/Çıkış
I	: Akım
ICE	: Bireysel Hücre Eşitleyici
I ² C Bus	: Dahili Bütünleşik Devre Veriyolu (Inter-Integrated Circuit Bus)
Kg	: Kilogram
Li	: Lityum
LiCoO ₂	: Lityum Kobalt Oksit
LiMnO ₂	: Lityum Manganez Oksit
LiNiO ₂	: Lityum Nikel Oksit
OCV	: Açık Devre Gerilimi
SCK	: Serial Clock
SDIO	: Serial Data In-Out
SoC	: Pil Doluluk Oranı (State of Charge)
SoH	: Pil Sağlık Durumu (State of Health)
V	: Volt
W	: Watt
Wh	: Watt-Saat

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Bir hücrenin temel elektrokimyasal yapısı.	3
2.2: a) Silindirik, b) prizmatik, c) torba bataryalar.	3
2.3: Li-iyon kristal yapısı.	4
2.4: Pil enerji yoğunluğu karşılaştırması.	5
2.5: Batarya paket yapısı.	6
2.6: Elektriksel pil eşdeğer devre modelleri.	9
2.7: Thevenin modeli.	16
3.1: Pasif dengeleme yöntemi.	20
3.2: Pasif dengeleme.	20
3.3: Aktif dengeleme yöntemleri.	21
3.4: Anahtarlama kapasitör hücre dengeleme topolojisi.	21
3.5: Tek anahtarlama kapasitör hücre dengeleme topolojisi.	22
3.6: Çift aşama anahtarlama kapasitör hücre dengeleme topolojisi.	23
3.7: Modülerize anahtarlama kapasitör şarj dengeleyicisinin şeması.	23
3.8: Tekli İndüktör dengeleme topolojisi.	24
3.9: Çoklu indüktör dengeleme topolojisi.	24
3.10: Tek sarımlı transformatör dengeleme topolojisi.	25
3.11: Çok sarımlı transformatör.	25
3.12: Cuk dönüştürücü yapısı.	26
3.13: Seviyeyi düşüren yükselten dönüştürücü dengeleme topolojisi.	26
3.14: Flyback dönüştürücü yapısı.	27
3.15: Ramp dönüştürücü.	27
3.16: Tam köprü dönüştürücü yapısı.	28
3.17: Yarı rezonant dönüştürücü yapısı.	28
3.18: Aktif dengeleme.	29
4.1: Anahtar iletimde.	30
4.2: Anahtar kesimde.	31
4.3: Sürekli ve süreksiz akım dalga formları.	31
4.4: Çift yönlü flyback yapısı.	32
4.5: DC2100B-C kartının dönüştürücü yapısı.	34

5.1:	DC2100B-C demo kartın görüntüsü.	35
5.2:	IsoSPI arayüzü.	37
5.3:	24AA64 blok diyagram yapısı.	38
5.4:	LTC1380 yapısı.	39
5.5:	Pil bağlantı şeması.	40
5.6:	TP4056 pil şarj devresi.	41
5.7:	Pil deşarj devresi.	42
5.8:	Pil deşarj gerilimi ölçüm düzeneği.	42
5.9:	Pil deşarj kontrolü arayüzü.	43
5.10:	RS dirençlerinin devre bağlantısı.	44
5.11:	Şarj akımı grafiği.	45
5.12:	Deşarj akımı grafiği.	46
5.13:	Pil boşalma eğrisi.	48
5.14:	Pil SoC eğrileri.	48
5.15:	Farklı batarya hücreleri için hesaplanan SoC eğrileri.	50
5.16:	Uydurulan fonksiyon eğrisi.	51
5.17:	Pilin iç direncinin değişimi.	52
5.18:	Pil gerilimi boşalma eğrisi.	53
5.19:	SoC zaman eğrisi.	53
5.20:	SoC-OCV eğrisi.	54
5.21:	Doğrusal Kalman filtre grafiği.	55
5.22:	Genişletilmiş Kalman fitresi grafiği.	56
5.23:	Kalman filtrelerin hata karşılaştırması.	57
5.24:	Kalman filtrelerin hata karşılaştırması (filtrelenmiş).	57
5.25:	Hücre efektif iç direncinin Kalman filtresine etkisi.	58
5.26:	Kalman filtresi yöntemi ve Coulomb sayma yöntemi karşılaştırması.	60
5.27:	Pil ölçüm düzeneği.	61
5.28:	PIC32MX460F512L geliştirme kartı.	61
5.29:	Hyperterminal veri ekranı.	62
5.30:	Ölçülen gerilim değerleri.	63
5.31:	Ölçülen sıcaklık değerleri.	63
5.32:	Batarya dengeleme grafiği.	64

TABLULAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
5.1: ICRF18650-26F model pilin özellikleri.	39
5.2: Hücre şarj-deşarj akımları.	47
5.3: SoC hesabı için oluşturulan Gaussyen fonksiyon katsayıları.	50
5.4: İç direnç hesabı için oluşturulan Gaussyen fonksiyon katsayıları.	51
5.5: Pil gerilim değerleri.	59
5.6: Tahmini pil akım değerleri.	59
5.7: Hesaplanan hücre efektif iç direnç değerleri.	59
5.8: Pilin boşaltılmasından önceki doluluk oranları.	59
5.9: Pilin boşaltıldıktan sonraki doluluk oranları.	60
5.10: Kalman filtresi ile hesaplanan pil doluluk oranları.	60
5.11: Coulomb sayma ile hesaplanan pil doluluk oranları.	60

1. GİRİŞ

1912 yılında Gilbert N. Lewis tarafından icat edilen ve ilk ticari versiyonu 1991 yılında John B. Goodnough yönetimindeki çalışma grubu Sony tarafından ticarileştirilen [1] lityum-iyon piller günümüzde hayatımızın vazgeçilmezleri olan telefon ve bilgisayar dünyası için büyük bir öneme sahiptir. Li-iyon piller başta telefon ve bilgisayar olmak üzere, hayatımızı kolaylaştıran birçok elektronik cihazda kullanılmaktadır. Bunların yanında lityum pillerin öneminin her geçen gün biraz daha artmasını sağlayan bir diğer etken, daha çevreci ve temiz bir ulaşım sağlamak için elektrikli araç kullanımına olan yönelimin artmasıdır.

Bu çalışmada lityum pil grubundan olan lityum iyon piller üzerinde çalışılmıştır. Bu piller ikinci nesil pillerle (gümüş-çinko, nikel-çinko, nikel-hidrojen) kıyaslandığında birçok avantaja sahiptir. Hafıza etkisinin yok denecek kadar az olması önemli özelliklerinden biridir. Hafıza etkisinin yok denecek kadar az olması neticesinde li-iyon pilin tam dolmadan şarjının kesilmesi veya şarjının tamamen bitmeden şarj edilmeye başlanması durumunda pil ömrü etkilenmez. Ancak li-iyon piller üretildikleri yıldan itibaren ömürlerini tüketmeye başlar. Yine bu pillerin avantajlarının arasında kapalı hücre olması, yüksek enerji verimliliği, uzun ömürlü olması, çabuk şarj olabilme özellikleri vardır. Geniş çalışma sıcaklık aralığına sahiptirler. Ancak yüksek sıcaklıklarda bozunmaya uğrayabilirler. Aşırı şarj sonucunda kapasite kaybı yaşayabilir ve dolayısıyla bir koruyucu devreye ihtiyaç duyarlar. Birçok avantaja sahip olan lityum iyon pillerin ömrünün artırılıp korunması için bir batarya yönetim sistemine ihtiyacı vardır. Bu çalışmada lityum pillerin hücre dengelemesini otomatik yapabilen özgün bir algoritma ve Kalman filtre kullanan SoC dengeleme algoritması geliştirilmiştir ve hücre dengeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

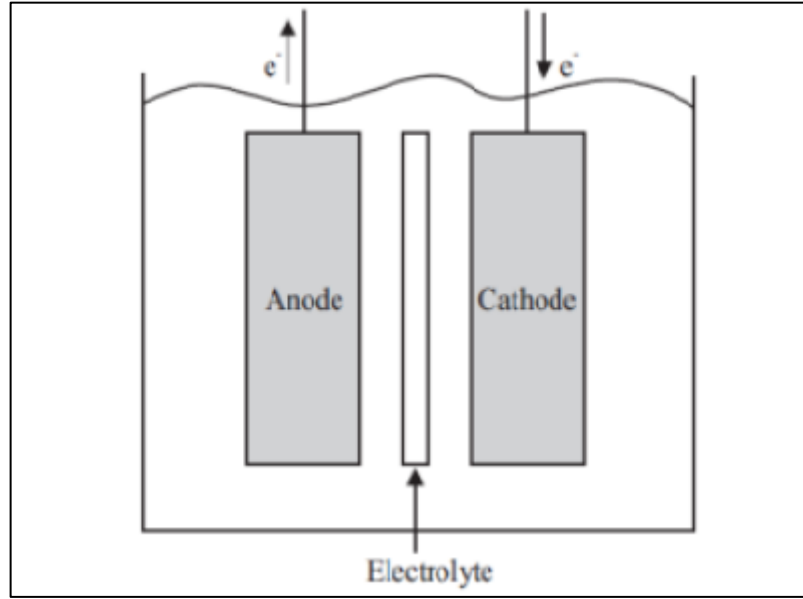
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

İyi bir batarya yönetim sistemi, lityum batarya kullanılan tüm alanlar için büyük önem taşır. Çünkü batarya yönetim sistemi ile batarya paketi korunur ve bataryanın ömrü uzatılır. Ayrıca batarya sıcaklık kontrolleri de yapılarak uygun çalışma ortamında daha verimli bir çalışma gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada, batarya yönetimi için geliştirilen algoritma ile batarya paketinin verim kaybına uğraması engellenmeye çalışılmıştır. DC2100B-C (Analog Devices) batarya yönetim ve dengeleme kartı için yazılım geliştirilerek, batarya dengeleme işlemi otomatikleştirilmiştir. Ayrıca bazı yük tahmin metodları kullanılarak karşılaştırmaları yapılmıştır.

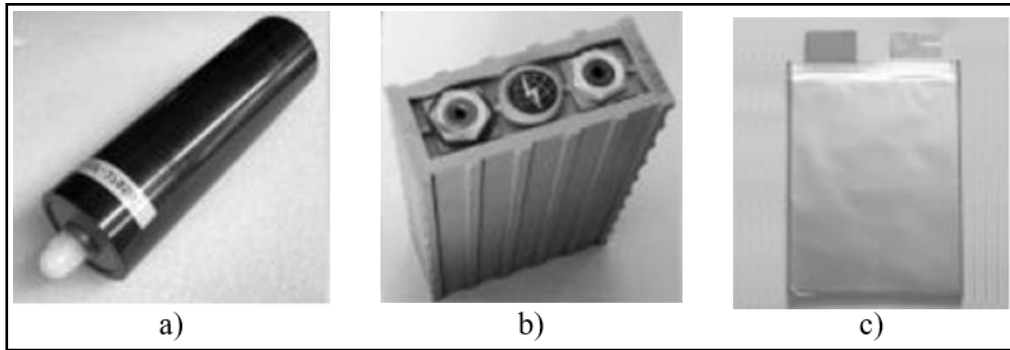
2. BATARYALAR

Bir veya daha fazla batarya hücresinin seri veya paralel bağlanmasıyla oluşan yapıya batarya denir. Bu hücreler anot, katot ve elektrolit olmak üzere üç temel bileşen içerir. Şekil 2.1’de bir batarya hücresinin kimyasal yapısı gösterilmektedir [2].



Şekil 2.1: Bir hücrenin temel elektrokimyasal yapısı.

Bataryalar, kimyasal yapısına, şekillerine ve farklı özelliklerine göre gruplandırılabilir. Şekillerine göre prizmatik, silindirik ve torba şeklinde bataryalar vardır. Şekil 2.2’de farklı şekillere sahip bataryalar gösterilmiştir [3].



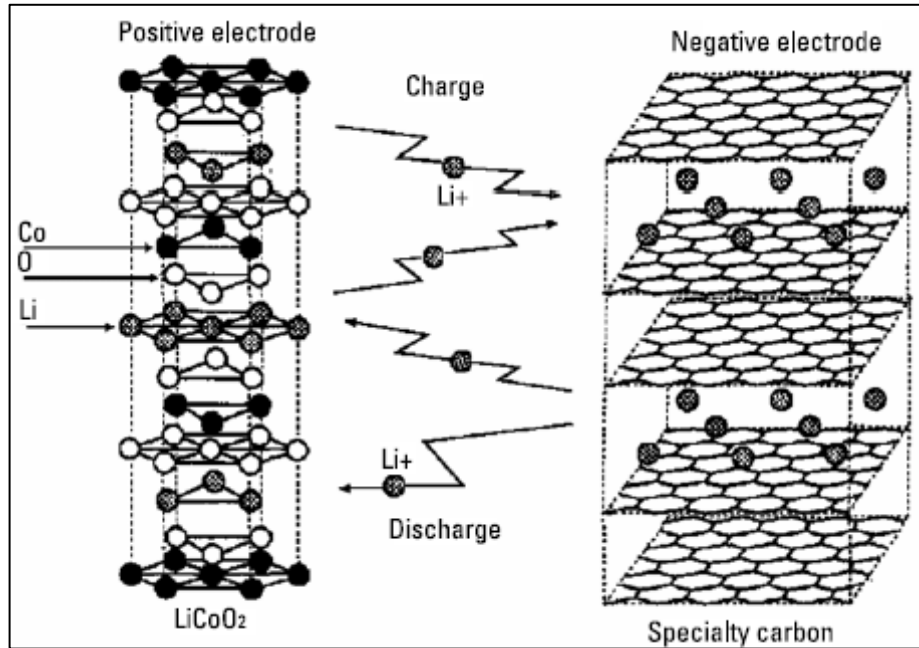
Şekil 2.2: a) Silindirik, b) prizmatik, c) torba bataryalar.

Bataryalar birincil (şarj edilemeyen) ve ikincil (şarj edilebilen) bataryalar olarak ikiye ayrılır. Birincil pil grubuna örnek, çinko, alkalın ve lityum, ikincil pil grubuna da örnek olarak nikel-kadmiyum, nikel-metal hidrit, lityum-iyon ve lityum-polimer piller verilebilir [4]. Bu çalışmada ikincil pil grubundan olan lityum iyon piller kullanılmıştır.

2.1. Lityum İyon Bataryalar

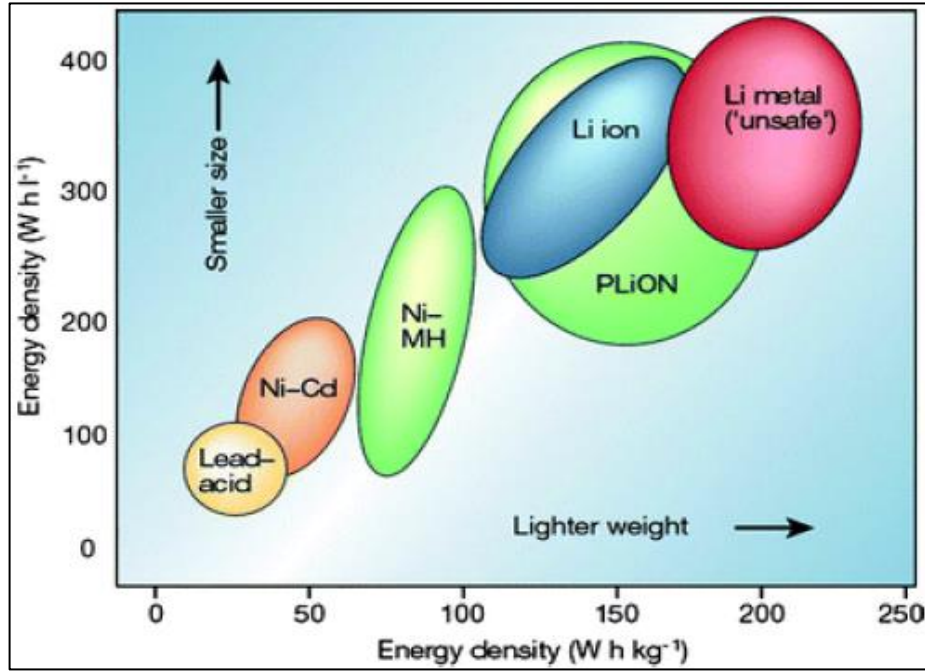
Lityum iyon piller enerjiyi üretmek ve depolamak için anot, katot ve elektrolit olmak üzere üç temel bileşen içerir. Katot olarak lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum nikel oksit (LiNiO_2), lityum mangan oksit (LiMn_2O_2) kullanılabilir. Anot olarak grafit karbon ve elektrolit olarak lityum tuzu kullanılır.

Lityum iyon bataryaların nominal (anma) voltaj değeri 3.6 Volt (V), maksimum şarj gerilimi 4.2 Volt ve minimum deşarj gerilimi 2.7 Volt'tur. Şekil 2.3'te Li-iyon malzemenin şarj/deşarj reaksiyon şeması ve kristal yapısı gösterilmektedir [5]. Deşarj sırasında iyonlar anottan (negatif elektrot) katoda (pozitif elektrot), şarj sırasında katottan anoda akmaktadır.



Şekil 2.3: Li-iyon kristal yapısı.

Lityum iyon pillerin tercih edilebilir olmasının sebebi diğer pil çeşitlerine göre birçok üstünlüğe sahip olmalarıdır. Bu üstünlüklerden biri de lityum pillerin yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarıdır. Yani lityum pillerin birim hacim başına depolayabileceği enerji diğer pil gruplarından daha yüksektir. Şekil 2.4'te lityum pillerin diğer pillere göre enerji yoğunluğu açısından karşılaştırılması verilmiştir [6].



Şekil 2.4: Pil enerji yoğunluğu karşılaştırması.

Lityum iyon pillerin avantajlarının yanında dezavantajları da vardır. Bu piller dikkatli kullanılmadıklarında büyük problemler doğurabilirler. Örneğin, pilin minimum deşarj seviyesinin altına inilmesi pilin kullanılmaz hale gelmesine sebep olabilir, aşırı şarj edilmesi de pilin yanmasına neden olabilir. Ayrıca lityum metali sıvılarla çok çabuk tepkimeye girdiği için kullanımına ayrıca dikkat edilmesi gerekmektedir.

2.2. Temel Batarya Kavramları

Batarya yapısını iyi anlamak için bazı temel batarya kavramlarının açıklanması gerekmektedir. Temel batarya kavramlarının açıklamaları için ağırlıklı olarak [7]'den faydalanılmıştır.

- Hücree

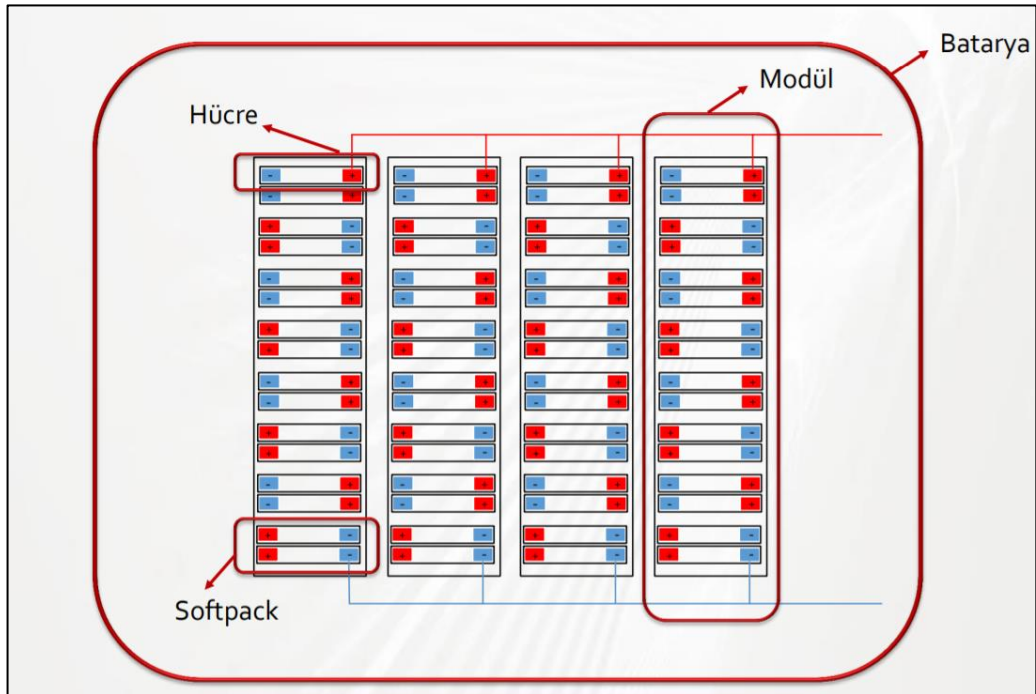
Bir anot, bir katot ve anot ile katotu ayıran elektrolitten oluşmaktadır.

- Modül

Bir batarya modülü, birbirine seri veya paralel bağı hücrelerin bir araya getirilmesiyle oluşur.

- Batarya

Birden fazla batarya modülünün bir araya gelmesiyle oluşur. Şekil 2.5'te bir batarya paketi yapısı gösterilmektedir [8].



Şekil 2.5: Batarya paket yapısı.

- Şarj Durumu (SoC)

Bataryanın doluluk durumunu gösterir. SoC, kalan kapasitenin bir hücrenin toplam kapasitesine oranını gösterir. Bu değer, bir hücrede ne kadar enerji kaldığını gösterir ve böylece batarya yönetim sistemi (BYS) tarafından hücrenin SoC değerine göre yüklenip deşarj edilip edilmeyeceğine karar verilir [9]. Tam şarj durumunda batarya SoC değeri %100 kabul edilir. Tam deşarj durumu ise, batarya geriliminin kesim değerine ulaştığı nokta olarak kabul edilir ve bu noktada SoC değeri %0 olarak kabul edilir. SoC tahmini için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Temelde şu üç

yöntem çok kullanılır. Bunlar, açık devre gerilim ölçme yöntemi, Coulomb sayma yöntemi ve Kalman filtresi yöntemidir. Açık devre gerilim ölçümü en doğru SoC göstergesidir.

- Sağlık Durumu (SoH)

Pilin sağlık durumu tahmini için kullanılır. Eski pilin maksimum şarj durumunun yeni haldeki maksimum şarj durumuna olan oranıdır.

- Hücre Terminal Gerilimi (V)

Batarya aktifken batarya uçları arasında ölçülür. Uygulanan akım ve şarj durumuna göre değişiklik gösterebilir.

- Açık Devre Gerilimi (V)

Yük uygulanmadığında batarya uçları arasında ölçülen gerilimdir.

- Kapasite (Ah)

Belli bir süre için sağlanan akım miktarıdır.

- C-rate

Bir batarya hücresinin ne kadar hızda akım boşaltabileceğini belirlemede kullanılır.

- Çevrim Ömrü

Bir şarj-boşalma işlemi için geçen süre 1 çevrim ömrü olarak ifade edilir. Tekrar şarj edilemeyen piller için çevrim ömrü 1'dir. Ancak şarj edilebilen piller için çevrim ömrü değişmektedir. Çevrim ömrü sıcaklık ve nemden etkilenir.

- İç Direnç

Bataryanın içindeki dirençtir. İç direnç arttıkça batarya verimliliği düşer.

- Deşarj Derinliği

Bataryanın boşalma durumunu ifade eder. Formül 1.1'de DoD ile SoC arasındaki ilişki verilmiştir.

$$\text{DoD} = 1 - \text{SoC} \quad (2.1)$$

- Depolanan Enerji (Wh)

Depolanan enerji bataryanın kapasite (Ah) ve gerilimine (V) bağlıdır. Birimi watt-saattir.

$$\text{Wh} = V \times \text{Ah} \quad (2.2)$$

- Özel Enerji

Bataryada kg başına depolanan enerjidir. Birimi Wh/kg'dır.

$$\text{Özel Enerji} = \frac{\text{Depolanan Enerji}}{\text{Batarya Kütlesi}} \quad (2.3)$$

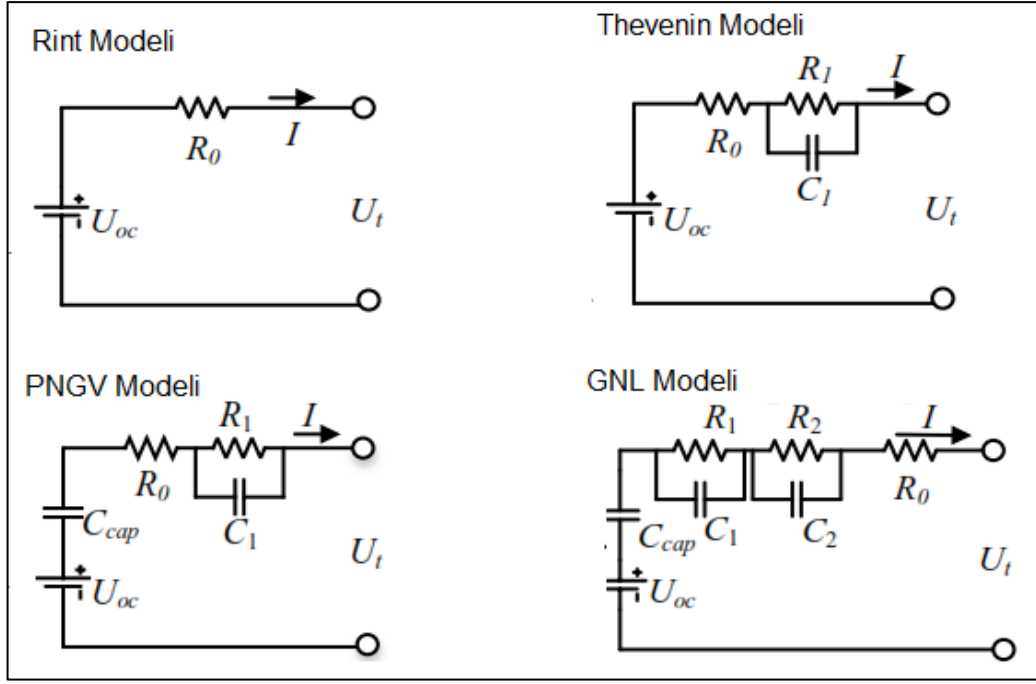
- Özel Güç

Her kg kütle için bataryada depolanan güçtür. Birimi W/kg.

$$\text{Özel Güç} = \frac{\text{Depolanan Güç}}{\text{Batarya Kütlesi}} \quad (2.4)$$

2.3. Bataryanın Modellenmesi

Pilin bazı parametrelerini doğrudan olarak ölçmek mümkün değildir. Mesela, pilin şarj durumu, iç direnci doğrudan ölçülemeyen parametrelerden bazılarıdır. Bu nedenle ölçülebilen değerler ile doğru bir pil modeline ihtiyaç duyulur [10]. Farklı uygulamalar için farklı modelleme tekniklerine ihtiyaç duyulur. Pil modelleme metodları arasında analitik, istatistiksel, elektrokimyasal ve elektriksel devre metodları vardır [10]. Eşdeğer devre modellerinin temel amacı, akım ve şarj durumunun pil terminal gerilimine etkisini modellemektir. Bu çalışmada elektriksel pil eşdeğer devre modelinden faydalanılmıştır. Kullanımı çokça tercih edilen dört elektriksel devre modeli vardır. Şekil 2.6'da bu devre modelleri gösterilmektedir [11].



Şekil 2.6: Elektriksel pil eşdeğer devre modelleri.

Bu modellerden Rint modeli yalnızca pil iç direncini dikkate alırken diğer modellerde pil gerilimi gevşeme (relaxation) etkilerini de dikkate almak için ilave olarak RC devreleri eklenmiştir. En çok kullanılan model Thevenin modelidir. Thevenin modelinde, kullanılan RC devresi elemanları polarizasyon direnci ve polarizasyon kapasitesi olarak adlandırılır. PNGV modelde bu RC devresine ilave bir kapasite daha kullanılır ve bu kapasite gövde kapasitesi (bulk capacitance) olarak adlandırılır. GNL modeli ise ilave bir RC devresi ile polarizasyon etkilerinin daha iyi hesaplanması amacı ile oluşturulmuştur. Bu çalışmada Thevenin modelinden faydalanılmıştır.

2.4. Bataryanın Şarj Durumunun Belirlenmesi

Bir bataryanın yük durumu (SoC) bataryanın kullanılabilir potansiyel enerjisinin bir ölçütüdür. Bir pil tam doluyken $SoC = \%100$, tamamen boşaltıldığında $SoC = \%0$ kabul edilir. Yüksek doğruluklu yük durum tahmini batarya ömrünü önemli ölçüde artırır. Doğru yapılmayan yük durum tahmini, bataryaların aşırı şarj veya aşırı deşarj durumlarına maruz kalmalarına neden olabilir. Bu durum sadece batarya ömrünü etkilemez, bataryada ağır hasara sebebiyet verebilir. Şarj ve deşarj sırasında

batarya içerisinde karmaşık kimyasal ve fiziksel olaylar gerçekleştiğinden, bir bataryanın yük durumunu sağlıklı bir şekilde tahmin edebilmek önemlidir.

Yük durumunu tahmin etmenin en genel yöntemi, bir batarya yapısına giren çıkan yük değerlerinin ve akımların kesin ölçümlerini ve bu değerlerden faydalanarak yük durumlarının hesabını içerir. Bu hesap bataryaların şarj ve deşarj durumunda olmalarına, batarya sıcaklıklarına, şarj ve deşarj akım seviyelerine, bataryaların yaşlarına, toplam şarj deşarj sayılarına bağlı çeşitli parametrelerinin de bilinmesini gerektirir.

Bir bataryanın SoC değerini belirlemek için birçok yöntem vardır. Gerilim ölçümü tabanlı SoC belirleme, Coulomb sayma yöntemiyle SoC belirleme, Kalman filtre yöntemiyle Soc belirleme yöntemlerine ilave olarak, SoC tahmini için, yapay sinir ağı ve uyarlamalı bulanık mantık yöntemleri de kullanılabilir [12]. Ancak SoC tahmini için temel olarak 3 yaklaşım kullanılır. Bunlar Coulomb sayma yöntemi, Gerilim yöntemi ve Kalman filtresi yöntemidir. Bu çalışmada Coulomb sayma yönteminden ve Kalman filtresi yönteminden faydalanılmıştır.

2.4.1. Coulomb Sayma Yöntemi

Coulomb sayma yöntemi amper-saat yöntemi veya akım integrasyonu yöntemi olarak da bilinir. Bu yöntem bataryaya giren ve çıkan akımların integrali alınarak hesaplanır. Kullanılan temel denklem aşağıda verilmiştir.

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{C_{bat}} \int_{t_0}^t (I_B - I_K) dt \quad (2.5)$$

Burada, $SoC(t_0)$ t_0 anındaki yük durumu, I_B batarya akımı, C_{bat} batarya kapasitesi ve I_K kayıp akımlardır.

Denklem 2.5'te görüldüğü üzere bu yöntemin doğruluğu, akımların doğru ölçümüne ve t_0 anındaki yük durumunun doğru olarak bilinmesine bağlıdır. Sürekli çalışan bir batarya sisteminde, ölçümlerde ve t_0 anındaki yük durumu tahmininde yapılabilecek küçük hatalar birikerek yüksek hatalı yük tahminlerine sebep olabilir.

2.4.2. Kalman Filtresi Yöntemi

Kalman filtresi yöntemi, dinamik bir sistemin iç durumlarını tahmin etmekte kullanılan bir sinyal işleme yöntemidir ve bu yöntem batarya SOC tahmini için de kullanılabilir. Kalman filtresini kullanmak için sistemin kesin bir modelini oluşturmak gereklidir. Diğer taraftan yoğun matematiksel işlem gerektirir. Literatürde bu yöntemlerin kullanıldığı pek çok kaynak mevcuttur. Bu yöntemin iyi anlaşılabilmesi için, bu yöntem bazı adımlara bölünerek incelenebilir.

2.4.2.1. Sistem Çözümlerinde Durum Uzay Denklemleri

Bir sistemin durum-uzay modelinin genel formu aşağıdaki gibidir [13].

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.6)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.7)$$

Yukarıdaki birinci denklem durum denklemi, ikinci denklem ise çıkış denklemi olarak adlandırılır. Burada, x durum vektörü, y çıkış vektörü, u giriş vektörü, A sistem matrisi, B giriş matrisi, C çıkış matrisi ve D ileri besleme matrisidir.

Diferansiyel denklem modeli bilinen bir sistemin, bu diferansiyel denklem modelinin durum-uzay formuna sokulmasına ilişkin aşamalar şu şekildedir [13]:

- Durum değişkenlerinin seçilmesi.
- Diferansiyel denklem modelinin, cebirsel işlemlere her biri durum değişkenlerinden birinin birinci mertebeden diferansiyel denklemi olacak şekilde yeniden yazılarak durum denkleminin oluşturulması.
- Çıkış denkleminin oluşturulması.

2.4.2.2. Durum-Uzay Denklemlerinin Fark Denklemlerine Dönüştürülmesi

Genel fark denklem formu aşağıdaki gösterimle verilir.

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k \quad (2.8)$$

Durum uzay denklemleri, fark denklem formuna getirmek için türev ifadesi açılır. Aşağıdaki ifade ile yaklaşık türev değeri elde edilir.

$$\frac{dx}{dt} \sim \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \quad (2.9)$$

Δt sabit seçilirse, $x(t) = x(k\Delta t)$ olarak yazılabilir. $x(t + \Delta t)$ ise $x((k + 1)\Delta t)$ yazılır. Kolay gösterim için, $x(k\Delta t) = x_k$ ve $x((k + 1)\Delta t) = x_{k+1}$ olarak yazılır. Türev ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\frac{dx}{dt} \sim \frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t} \quad (2.10)$$

Buna göre durum denklemi “ $\dot{x} = Ax + Bu$ ” yerine aşağıdaki fark denklemleri yazılabilir.

$$x_{k+1} - x_k = A_k x_k \Delta t + B_k u_k \Delta t \quad (2.11)$$

$$x_{k+1} = (A_k + I)x_k \Delta t + B_k u_k \Delta t \quad (2.12)$$

2.4.2.3. Standart Kalman Filtresi

Kalman filtresi, en iyi tahmin problemi için geliştirilmiş bir algoritmadır. Macar asıllı Amerikan bilim adamı Rudolf E. Kalman tarafından önerilmiştir [14]. Kalman filtresi, durum uzayı modeli ile gösterilen bir dinamik sistemde, modelin önceki bilgileriyle birlikte giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumlarını tahmin edebilen filtredir [14]. En iyi tahminden anlaşılan, dolaylı, hatalı ve kesin olmayan ölçümlerden en iyi sonuç tahmininin yapılmasıdır. Bunun önemli bir şartı tüm sistem gürültülerinin Gaussyen olmasıdır.

Standard Kalman filtresi yalnızca doğrusal modellere uygulanır. Çünkü, lineer bir sistemde eğer gözlem gürültüleri Gaussyen ise, denklem içerisindeki diğer gürültülerde Gaussyen kalır.

Buna göre Kalman filtresinin uygulanabileceği genel durum-uzay fark denklemini aşağıdaki yapıda olmalıdır. İsimlendirme karmaşasını kaldırmak için aşağıdaki gösterim önerilmektedir.

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (k = 1 \dots N) \quad (2.13)$$

$$y_m = C_m x_m + D_m u_m + v_m \quad (m = 2 \dots N) \quad (2.14)$$

Kalman filtre algoritması temel olarak iki aşamadan oluşur. İlk aşama tahmin aşaması, ikinci aşama düzeltme aşamasıdır. Kalman filtresi durum tahmini ile birlikte hata matrisleri de hesaplayarak, durum tahmininin belirsizliğini küçültmeye çalışan bir algoritmadır.

Kalman filtresinin ilk tahmin değerleri ($x_1, A_1, B_1, C_1, D_1, u_1$ ve P_v, P_w, P_1) verildikten sonra aşağıdaki adımlar takip edilir [15].

- Adım 1: Yeni durum tahmini yapılır.

$$x_2 = A_1 x_1 + B_1 u_1 \quad (2.15)$$

- Adım 2: Kovaryans matris tahmini yapılır.

$$P_2 = A_1 P_1 A_1^T + P_w \quad (2.16)$$

• Adım 3: Kalman kazanç matrisi hesabı yapılır. Eğer doğrusallaştırma gerekiyorsa, bu adımdan önce doğrusallaştırma işlemini yapmak gereklidir.

$$L_2 = P_2 C_2^T [C_2 P_2 C_2^T + P_v]^{-1} \quad (2.17)$$

- Adım 4: Ölçüm yapılır. Çıkış değeri hatası hesaplanır.

$$y_{2,hata} = y_{2,\text{ölçülen}} - (C_2 x_2 + D_2 u_2) \quad (2.18)$$

- Adım 5: Durum vektörü düzeltilir.

$$x_2 = x_2 + L_2 y_{2,hata} \quad (2.19)$$

- Adım 6: Kovaryans matris tahmini düzeltilir.

$$P_2 = (I - L_2 C_2) P_2 \quad (2.20)$$

Her bir seferde alt indisler birer artırılarak, işlemler adım 1'den itibaren tüm süreç boyunca tekrarlanır.

2.4.2.4. Genişletilmiş (Extended) Kalman Filtresi

Genişletilmiş filtresi, lineer olmayan bir sistemin Jakobyen matrisleri aracılığı ile doğrusallaştırılması prensibine dayanan filtredir. Genişletilmiş Kalman filtresi için aşağıdaki biçimde bir fark denklem takımı gereklidir. İsimlendirme karmaşasını ortadan kaldırmak için aşağıdaki gösterim önerilebilir [15].

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (k = 1 \dots N) \quad (2.21)$$

$$y_m = g(x_m, u_m) + v_m \quad (m = 2 \dots N) \quad (2.22)$$

Bu fark denklem takımı, Taylor serisi yaklaşımı ile doğrusal hale getirilir.

$$f(x_k, u_k) \approx f(x_{k-1}, u_{k-1}) + \left. \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k=x_{k-1}} (x_k - x_{k-1}) \quad (2.23)$$

$$g(x_k, u_k) \approx g(x_{k-1}, u_{k-1}) + \left. \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k=x_{k-1}} (x_k - x_{k-1}) \quad (2.24)$$

$$f(x_k, u_k) \approx f(x_{k-1}, u_{k-1}) + A_k (x_k - x_{k-1}) \quad (2.25)$$

$$g(x_k, u_k) \approx g(x_{k-1}, u_{k-1}) + C_k (x_k - x_{k-1}) \quad (2.26)$$

Bu denklemlerden faydalanılarak eşitlik (2.27) ve eşitlik (2.28) gibi doğrusal durum uzay modeline benzer bir form oluşturulmuş olur.

$$x_{k+1} \approx A_k x_k + f(x_{k-1}, u_{k-1}) - A_k x_{k-1} + w_k \quad (2.27)$$

$$y_m = C_m x_m + g(x_{m-1}, u_{m-1}) - C_m x_{m-1} + v_m \quad (2.28)$$

İlerletilmiş Kalman filtresinin ilk tahmin değerleri verildikten sonra aşağıdaki adımlar takip edilir. İlk tahmin değerleri: x_1 , A_1 , C_1 , u_1 ve P_v , P_w , P_1 , $f(x_1, u_1)$, $g(x_1, u_1)$.

- Adım 1: Yeni durum tahmini yapılır.

$$x_2 = f(x_1, u_1) \quad (2.29)$$

- Adım 2: Kovaryans matris tahmini yapılır.

$$P_2 = A_1 P_1 A_1^T + P_w \quad (2.30)$$

- Adım 3: Kalman kazanç matrisi hesabı yapılır.

$$L_2 = P_2 C_2^T [C_2 P_2 C_2^T + P_v]^{-1} \quad (2.31)$$

- Adım 4: Ölçüm yapılır. Çıkış değeri hatası hesaplanır.

$$y_{2,hata} = y_{2,ölçülen} - g(x_2, u_2) \quad (2.32)$$

- Adım5: Durum vektörü düzeltilir.

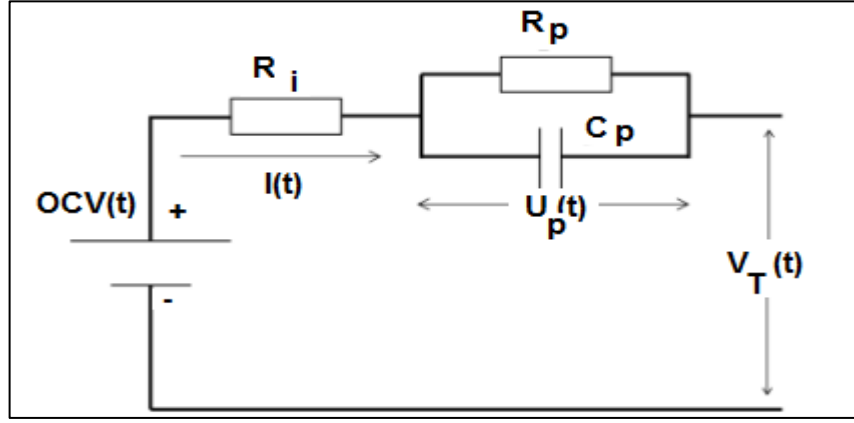
$$x_2 = x_2 + L_2 y_{2,hata} \quad (2.33)$$

- Adım 6: Kovaryans matris tahmini düzeltilir.

$$P_2 = (I - L_2 C_2) P_2 \quad (2.34)$$

2.4.2.5. Batarya Thevenin Modeli İçin Durum-Uzay Fark Denklemlerinin Elde Edilmesi

Bu tez çalışmasında pilin modellenmesi için, Thevenin modeli kullanılacaktır. Çalışılan batarya sistemi için bu yöntem uygulanarak, durum uzay denklemleri oluşturulur. Durum uzay denklemlerinin durum değişkenleri SOC(t) ve Up(t) olarak seçilir. Çıkış değişkeni olarak da terminal voltajı $V_T(t)$ alınır.



Şekil 2.7: Thevenin modeli.

Şekil 2.7’de gösterilen Thevenin modelinden, SOC-OCV ilişkisinden ve Coulomb sayma kuralından aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_0} \int_{t_0}^t I(t) dt \quad (2.35)$$

$$V_T(t) = OCV(t) - U_p(t) - R_i I(t) \quad (2.36)$$

$$I(t) = \frac{U_p(t)}{R_p} + C_p \frac{dU_p(t)}{dt} \quad (2.37)$$

$$OCV(t) = F(SOC(t)) \quad (2.38)$$

Önce durum ve çıkış değişkenlerini seçilip, bu değişkenlere göre durum denklemini ve çıkış denklemini oluşturabilir. Denklem 2.39’da durum ve çıkış değişkenleri verilmektedir.

$$x_1 = SOC(t), x_2 = U_p(t), u = I(t), y = V_T(t) \quad (2.39)$$

2.35 denkleminin türevi alınıp, denklemler tekrar düzenlenirse aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = -\frac{1}{Q_0}I(t) \quad (2.40)$$

$$\frac{dU_p(t)}{dt} = \frac{I(t)}{C_p} - \frac{1}{R_p C_p}U_p(t) \quad (2.41)$$

$$V_T(t) = F(SOC(t)) - U_c(t) - R_i I(t) \quad (2.42)$$

2.4.2.6. Batarya Standard Kalman Filtresi Fark Denklemlerinin Elde Edilmesi

Standard Kalman Filtresi için, çıkış denklemini durum değişkenleri cinsinden yazmak gerekir. Önce OCV-SOC eğrisinden yararlanıp, sonra bu eğriyi lineer denklem halinde yazılabilir. $OCV(t) = F(SOC(t))$ değerini doğrusal bir denklem olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz. Bunun için OCV-SOC eğrisi parçalı doğrusal denklem kabul edilir ve eğri noktaları arasına doğrular uydurulur [16].

$$OCV(t) = m * SOC(t) + n \quad (2.43)$$

Burada m ve n değişken parametrelerdir. Bu değerler yerine konulduğunda durum - uzay denklem sistemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{dSOC(t)}{dt} \\ \frac{dU_p(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_p C_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(t) \\ U_p(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{Q_0} \\ \frac{1}{C_p} \end{bmatrix} I(t) + w \quad (2.44)$$

$$V_T(t) = [m \quad -1] \begin{bmatrix} SOC(t) \\ U_p(t) \end{bmatrix} - R_i I(t) + n + v \quad (2.45)$$

Batarya Thevenin modeli için 2.44 ve 2.45 eşitliklerinde verilen durum uzay modelleri, fark denklemlerine dönüştürüldüğünde 2.46 ve 2.47 eşitlikleri elde edilir.

$$\begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ U_{p,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{1}{R_p C_p} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{p,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{Q_0} \\ \frac{1}{C_p} \end{bmatrix}_{k-1} I_k + w_k \quad (2.46)$$

$$V_{T,k} = [m_k \quad -1]_k \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{p,k} \end{bmatrix} - R_i I_k + n_k + v_k \quad (2.47)$$

m_k ve n_k değerleri SOC-OCV eğrisinin parçalı doğrusal yapısından elde edilecek bir iki dizinden alınabilir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında elde edilen pil ölçüm verilerinden faydalanarak bu model için grafikler oluşturulacaktır.

3. HÜCRE Dengeleme Sistemleri

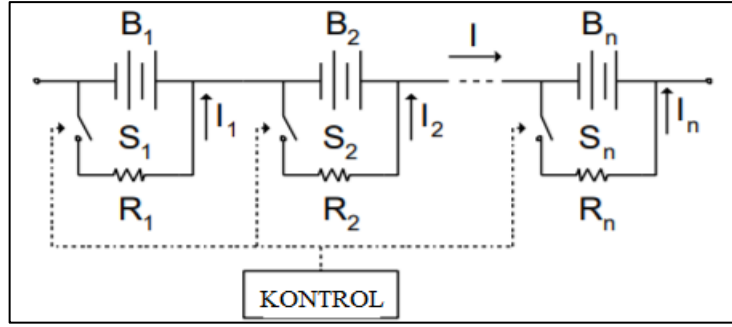
Bir batarya paketindeki hücreler şarj ve deşarj durumunda aynı yük durumuna (SoC) sahipse hücreler dengededir. İzleme, koruma, tahmin ve kontrol işlevleri güvenli çalışma, yüksek performans ve bataryaya daha uzun bir ömür sağlamak bir batarya yönetim sisteminin görevleridir [17]. Bir lityum-iyon batarya paketini dengede tutabilmek önemlidir. Çünkü batarya kendi limit değerleri arasında olmazsa yani aşırı şarj veya deşarj durumuna uzun süre maruz kalırsa batarya patlayabilir veya tamir edilemez seviyede hasarlı bir hale gelebilir. Ayrıca batarya hücreleri dengede değilse, batarya paketinin verimi düşer. Çünkü bataryanın kapasitesini hücredeki en düşük gerilime sahip hücre belirler. Bu nedenle hücre dengeleme yöntemleri önemlidir.

Lityum-iyon bataryalardaki hücreler arası farkların kaynağı hücrelerin iç dirençlerindeki ya da doluluk oranlarındaki sapmalardır. Lityum-iyon bataryalardaki dengesizliği gidermek ve bataryanın ömrünü artırmak için bir dengeleme sistemi kullanmamız gerekmektedir [18].

Temelde iki tip hücre dengeleme yöntemi vardır. Bunlar aktif dengeleme ve pasif dengelemedir.

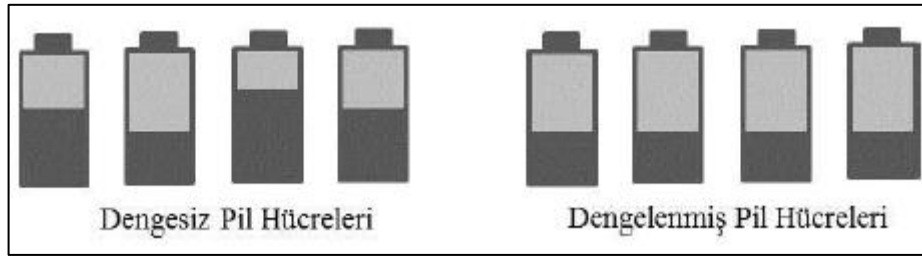
3.1. Pasif Dengeleme

Pasif dengeleme yöntemi, batarya hücrelerini dengelemek için kullanılan basit ve ucuz bir yöntemdir. Her bir hücreye bağlı olan paralel dirençler üzerinden fazlalık gerilim boşaltılır ve referans alınan gerilim seviyesine ulaştırılır. Fazlalık olan gerilim direnç üzerinden ısı olarak atıldığı için bir kayıp söz konusudur. Her ne kadar bu yöntem ucuz ve basit olsada verimliliğinin düşük olması büyük bir dezavantajdır. Ancak yine de pasif dengeleme, ucuz ve basit olmasından dolayı hibrit elektrikli araç uygulamaları için kullanılan cazip bir dengeleme yöntemidir [18]. Şekil 3.1'de pasif dengeleme yapısı gösterilmektedir [19].



Şekil 3.1: Pasif dengeleme yöntemi.

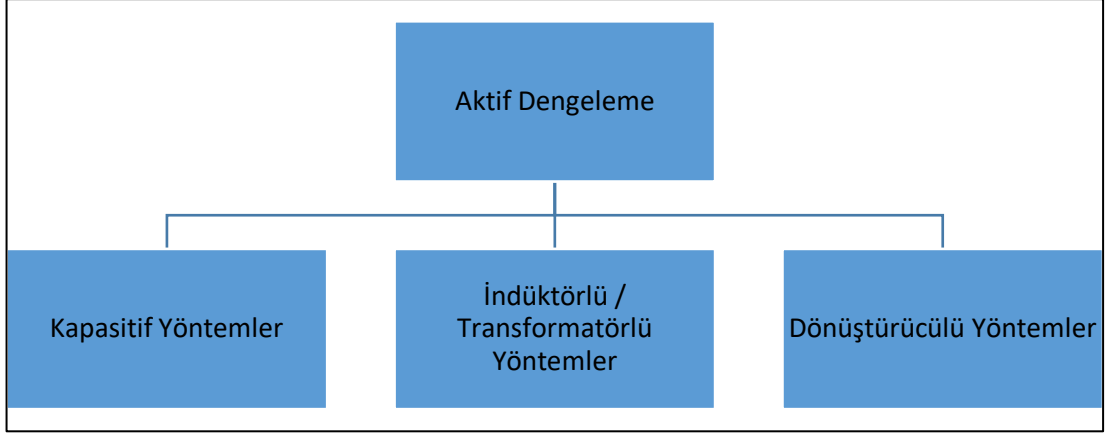
Pasif dengeleme sonrası oluşan verimsizlik Şekil 3.2’de pil gerilim sevipleri gösterilerek daha açık bir şekilde ifade edilmektedir. Şekil 3.2’de dengeleme öncesi ve sonrası pil gerilim seviyeleri gösterilmektedir [10]. Koyu renkli kısımlar pilin dolu bölümünü göstermektedir. Görüldüğü gibi önemli ölçüde bir enerji kaybı söz konusudur.



Şekil 3.2: Pasif Dengeleme.

3.2. Aktif Dengeleme

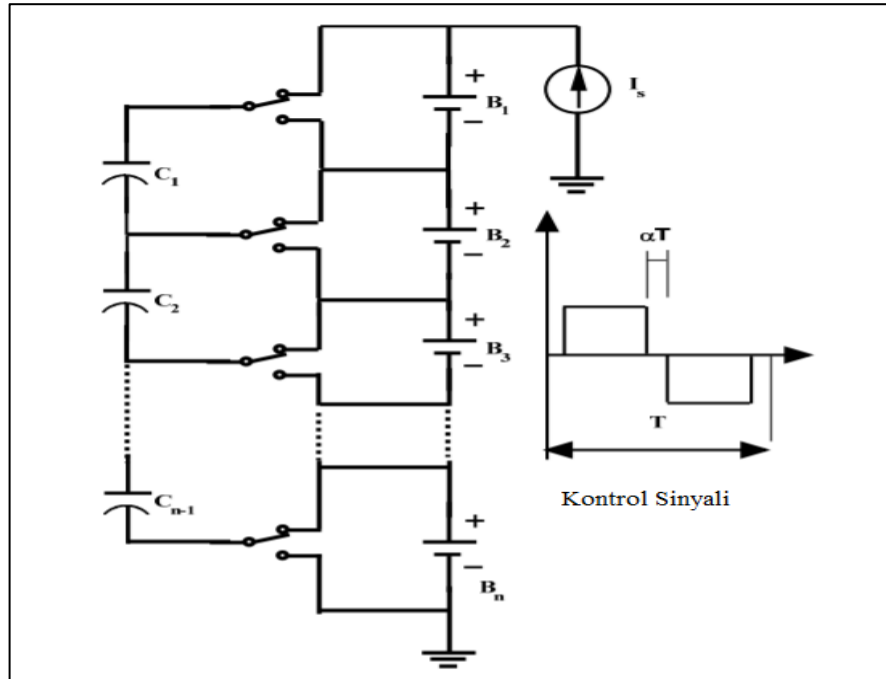
Aktif dengeleme yöntemi, batarya hücrelerini dengelemek için kullanılan diğer bir yöntemdir. Aktif dengelemede hücreler arası gerilim aktarımı olur, gerilimi yüksek olan hücreden düşük olan hücreye gerilim aktarımı yapılarak hücre dengeleme işlemi gerçekleştirilir. Pasif dengelemede olduğu gibi fazlalık enerji sistemden dışarıya aktarılmaz, bu fazlalık enerji sistem içinde hücreler arasında dağıtılmaya çalışılır. Bu açıdan aktif dengeleme verim açısından pasif dengelemenin önündedir. Üç temel aktif dengeleme yöntemi vardır. Bu yöntemler ağırlıklı olarak [20] referans alınarak anlatılmıştır.



Şekil 3.3: Aktif dengeleme yöntemleri.

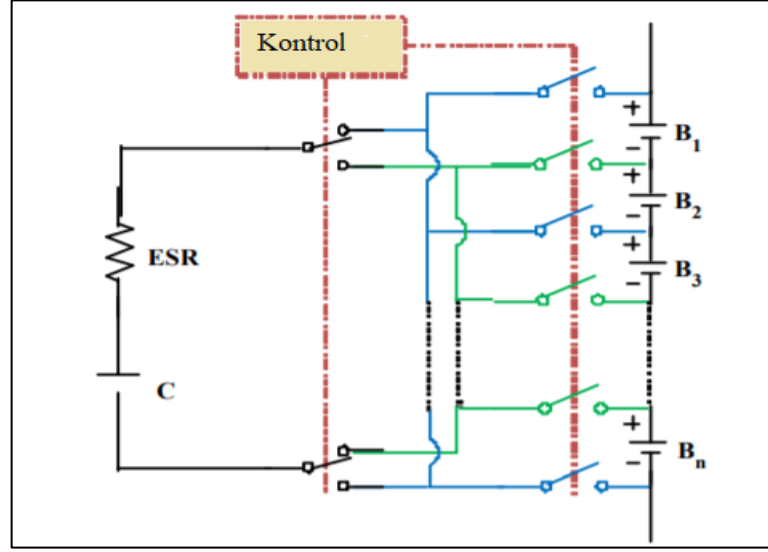
Üç temel başlık altında topladığımız aktif dengeleme yöntemleri kendi içerisinde de gruplara ayrılır. Kapasitif yöntemler dört başlık altında toplanabilir [21].

- Anahtarlama Kapasitör Yöntemi: n adet hücreyi dengelemek için $n-1$ adet kapasitör ve $2n$ adet anahtar kullanılmaktadır. Basit bir kontrol yapısı vardır ancak bu topolojide dengeleme süresi uzundur. İlk pilin kapasitöre aktardığı enerji sırasıyla diğer hücelere aktarılır [22]. Şekil 3.4’de anahtarlama kapasitör hücre dengeleme topolojisi gösterilmektedir [21].



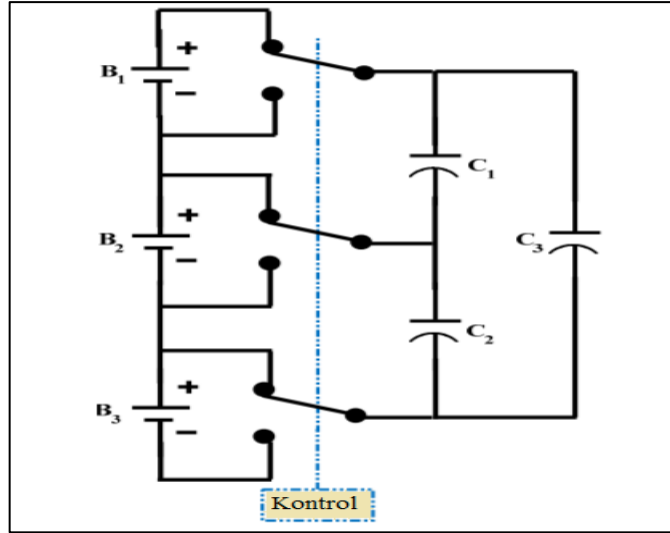
Şekil 3.4: Anahtarlama kapasitör hücre dengeleme topolojisi.

- Tek Kapasitörlü Anahtarlama Yöntemi: n adet hücreyi dengelemek için $n+5$ anahtar ve 1 adet kapasite kullanılır. Bu yöntem anahtarlama kapasitör yönteminin bir alt başlığı gibi düşünülebilir. Basit bir kontrol stratejisi kullanılır. Enerji en dolu hücreden boş hücreye aktarılır [22]. Bu işlem fazla vakit almaktadır. Ancak işlem hızını artırmak için çeşitli yöntemler uygulanabilir. Tek anahtarlama kapasitör hücre dengeleme topolojisi şekil 3.5’de gösterilmektedir [21].



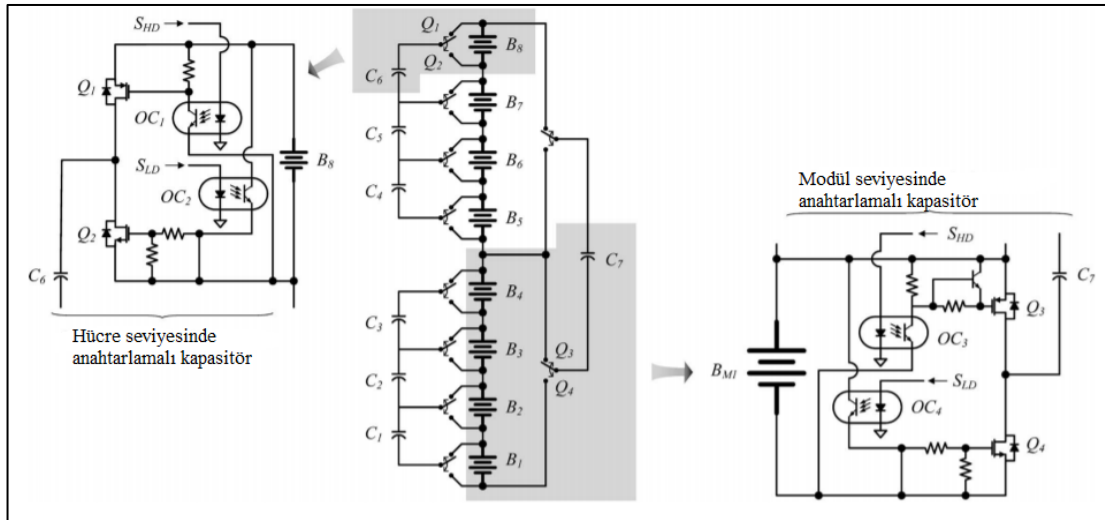
Şekil 3.5: Tek anahtarlama kapasitör hücre dengeleme topolojisi.

- Çift Aşama Anahtarlama Kapasitör Yöntemi: Anahtarlama kapasitör yönteminin türevidir. n adet hücreyi dengelemek için, n adet kapasiteye ve $2n$ adet anahtara ihtiyaç vardır. Bu yöntemin anahtarlama kapasitör yöntemine göre avantajı dengeleme süresini dörtte birine düşürmesidir. Şekil 3.6 da çift aşama anahtarlama kapasitör hücre dengeleme topolojisi verilmiştir [21].



Şekil 3.6: Çift aşama anahtarlama kapasitör hücre dengeleme topolojisi.

- Modülerize Anahtarlama Kapasitör Yöntemi: Bu yöntemde batarya paketi gruplara ayrılır. Böylece dengeleme süresi azalır ancak kapasitör ve anahtar sayısı artar. Bu da maliyeti artırır. Şekil 3.7’de bu dengeleme yöntemine ait yapı gösterilmiştir [23].

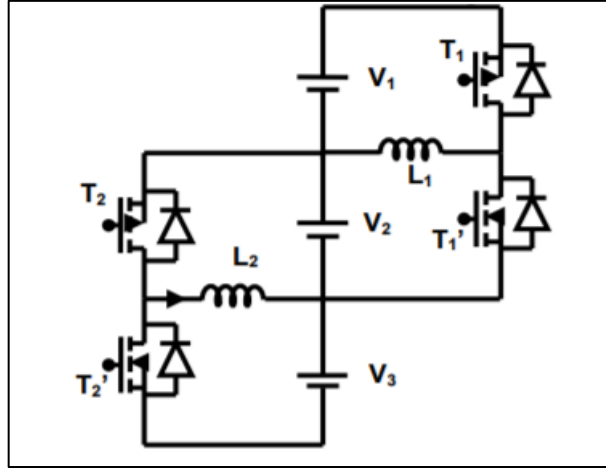


Şekil 3.7: Modülerize anahtarlama kapasitör şarj dengeleyicisinin şeması.

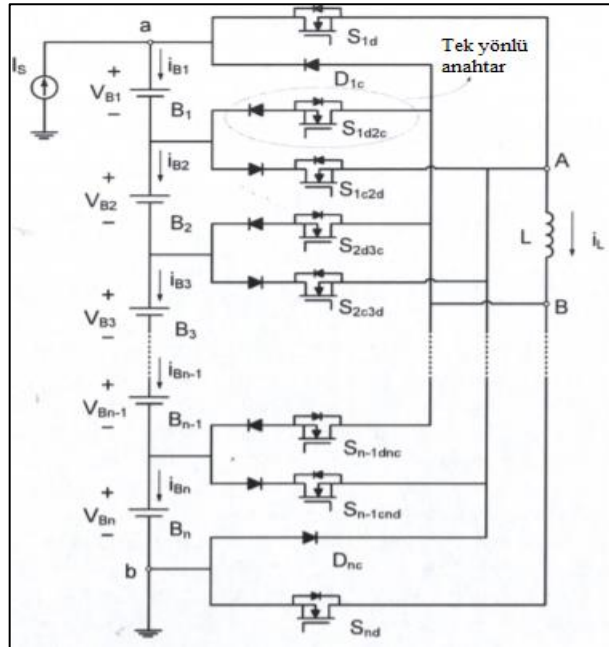
İndüktörlü / transformatörlü yöntemler kendi içerisinde üç gruba ayrılırlar.

- Tekli / Çoklu İndüktör Yöntemi: Tekli indüktör yönteminde, tüm paket arasında enerji aktarımı için bir indüktör kullanılır. Çoklu indüktör yönteminde n adet

hücreyi dengelemek için $n-1$ adet indüktör kullanılır. Ana dezavantajı ilk hücreden son hücreye enerji aktarımı için fazla süre geçmesidir. Tekli indüktör yönteminde bu süre çoklu indüktör yöntemine göre daha azdır. Tekli indüktör dengeleme topolojisi Şekil 3.8’de gösterilmektedir [24]. Çoklu indüktör dengeleme topolojisi de Şekil 3.9’da gösterilmektedir [25].



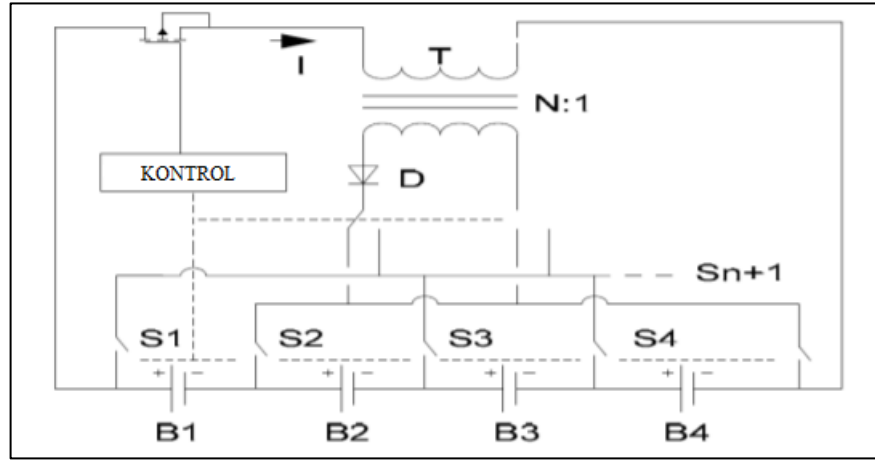
Şekil 3.8: Tekli indüktör dengeleme topolojisi.



Şekil 3.9: Çoklu indüktör dengeleme topolojisi.

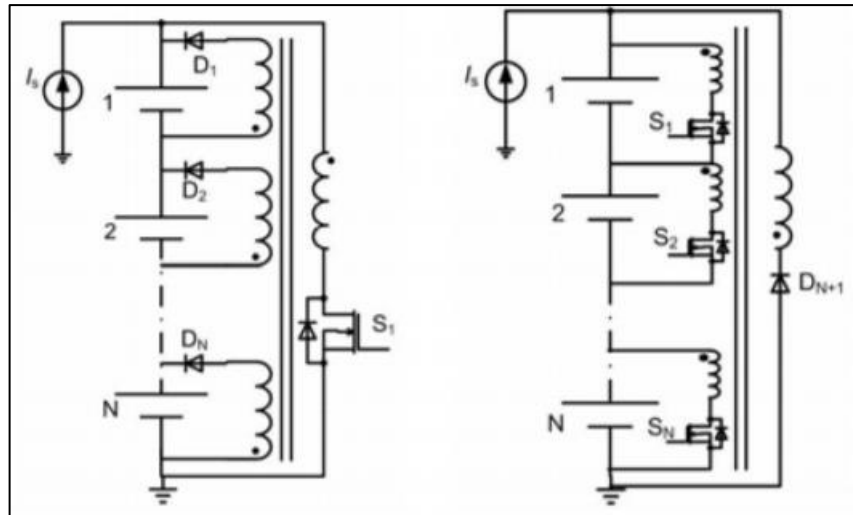
- Tek Sarımlı Transformatör: Bu yöntem anahtarlama transformatör yöntemi olarak da bilinmektedir. Bu yöntem hücre dengelemek için iki ayrı tekniğe sahiptir.

Bu teknikler, “paketten hücreye” ve “hücreden pakete” olarak adlandırılabilir. Paketten hücreye tekniğinde, tüm paket enerjisi anahtarlar kullanılarak zayıf hücre veya hücrelere aktarılır. Hücreden pakete tekniğinde de yüksek enerjili hücreden batarya paketine enerji aktarımı söz konusudur. Tek sarımlı transformator dengeleme topolojisi Şekil 3.10’da verilmiştir [20].



Şekil 3.10: Tek sarımlı transformator dengeleme topolojisi.

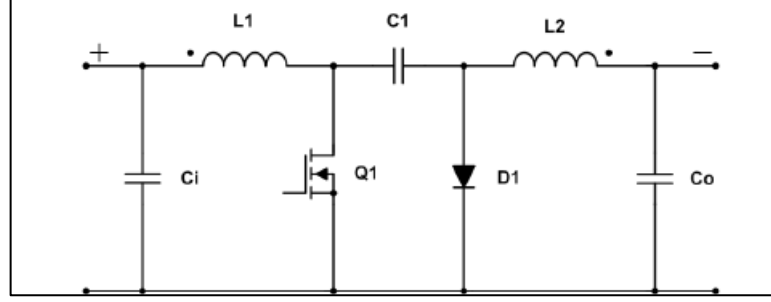
- Çok Sarımlı Transformator: Bu dengeleme yöntemi ikiye ayrılabilir. Şekil 3.11’de bu yapılar gösterilmektedir [26].



Şekil 3.11: Çok sarımlı transformator.

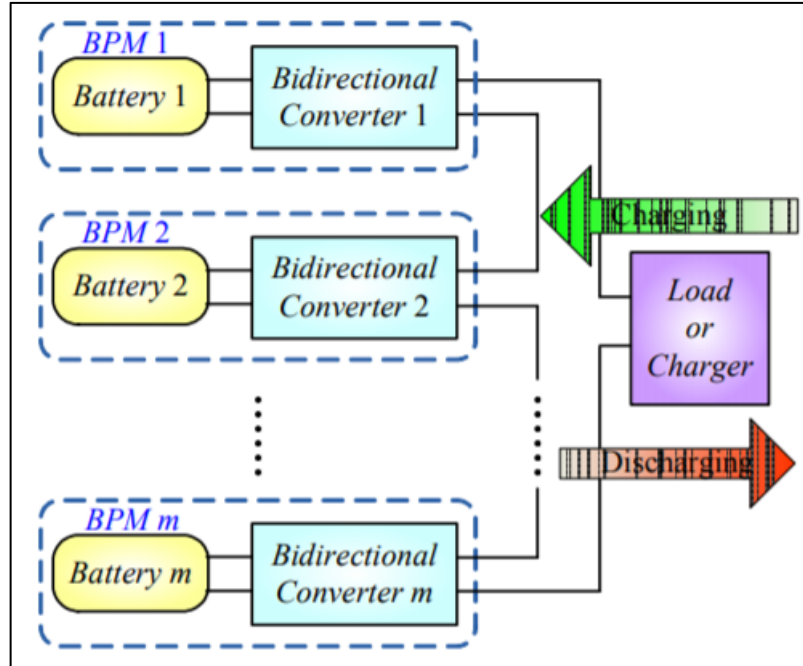
Dönüştürücü yöntemler altı gruba ayrılır.

- Cuk Dönüştürücü : Bireysel hücre eşitleyici (ICE) olarak kabul edilebilir. N adet hücre dengelemek için (N-1) adet ICE gerekir. Her ICE 2 adet indüktör, 2 adet anahtar ve 1 kapasitörden oluşur. Enerji komşu iki hücre arasında aktarıldığı için, bu dönüştürücü büyük batarya paketlerini dengelemede uzun zaman alacaktır. Şekil 3.12’de cuk dönüştürücü yapısı gösterilmektedir [27].



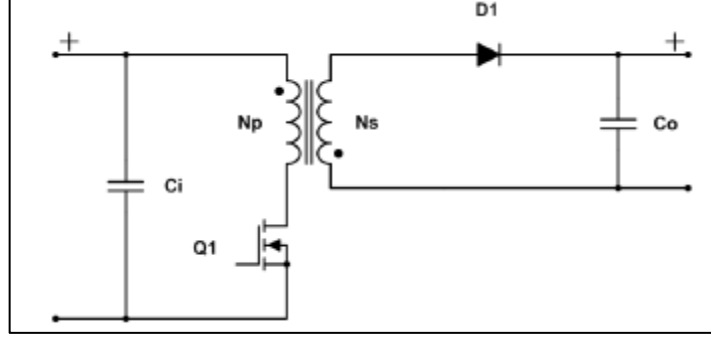
Şekil 3.12: Cuk dönüştürücü yapısı.

- Seviyeyi Düşüren Yükselten Dönüştürücü: Kullanımı yaygın olan bir yöntemdir. Birkaç dengeleme topolojisine sahiptir. Akıllı kontrolcülere ihtiyaçları vardır. Pahalı ve komplekstir. Ancak modüler yapılar için uygundur. Şekil 3.13’de seviyeyi düşüren yükselten dönüştürücü dengeleme topolojisi gösterilmiştir [28].



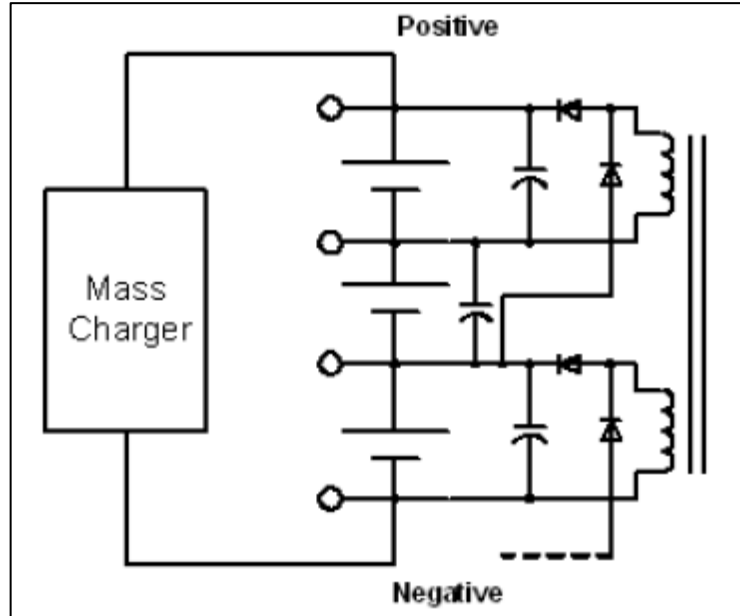
Şekil 3.13: Seviyeyi düşüren yükselten dönüştürücü dengeleme topolojisi.

- Flyback Dönüştürücü: Flyback dönüştürücüler izole yapıda kullanılırlar. Tek ve çift yönlü olabilirler. Çift yönlü flyback dönüştürücülerde enerji paketten hücrelere aktarılabilir. Dezavantajı manyetik kayıplar kaynaklıdır. Bu yapı şekil 3.14’de gösterilmektedir [27].



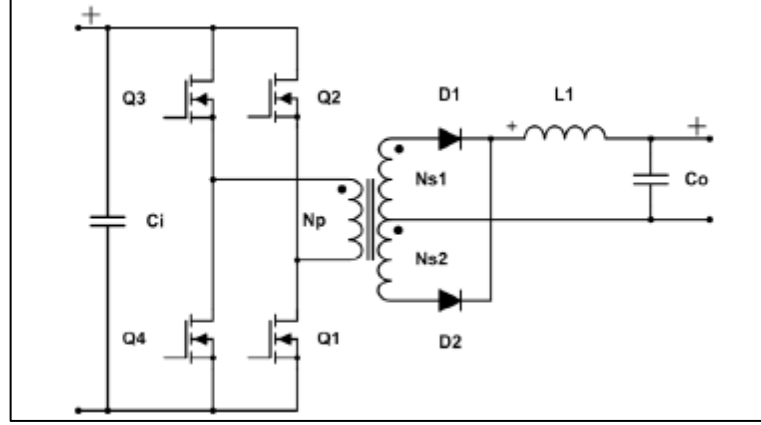
Şekil 3.14: Flyback dönüştürücü yapısı.

- Ramp Dönüştürücü: Çok sarımlı transformatör devresi ile aynı fikri paylaşır. Çok sarımlı transformatör dengeleme devresinin gelişmiş halidir. Hücre başına bir tane yerine her hücre çifti için sadece bir ikincil sargı gerektirir. Şekil 3.15’de Ramp dönüştürücü yapısı gösterilmektedir [29].



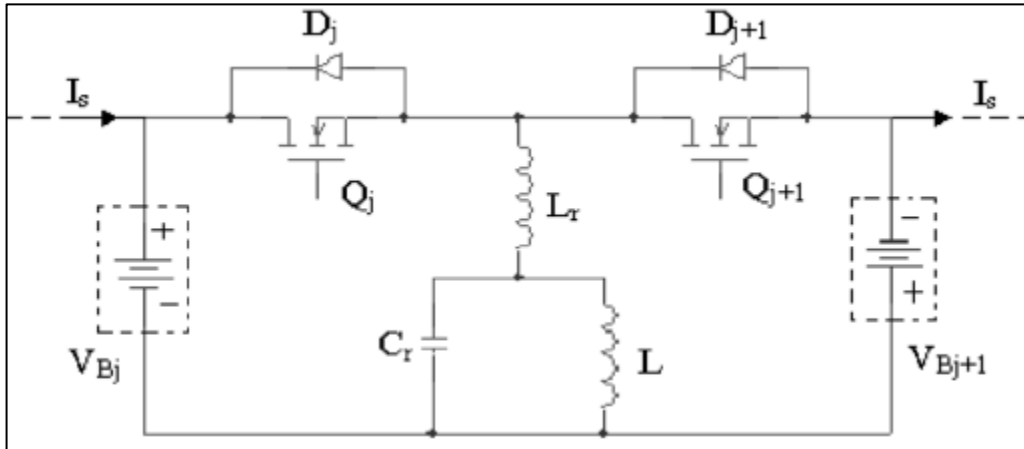
Şekil 3.15: Ramp Dönüştürücü.

- **Tam Köprü Dönüştürücü:** Tam köprülü PWM enerji dönüştürücü, tam kontrollü bir enerji dönüştürücüdür. Giriş gerilimi daha yüksek veya düşük olarak çıkışa aktarılır. Yüksek maliyetlidir ve karmaşık bir kontrole sahiptir. Şekil 3.16'da tam köprü dönüştürücü yapısı gösterilmektedir [27]. FET'ler iletimdeyken enerji çıkışa aktarılır.



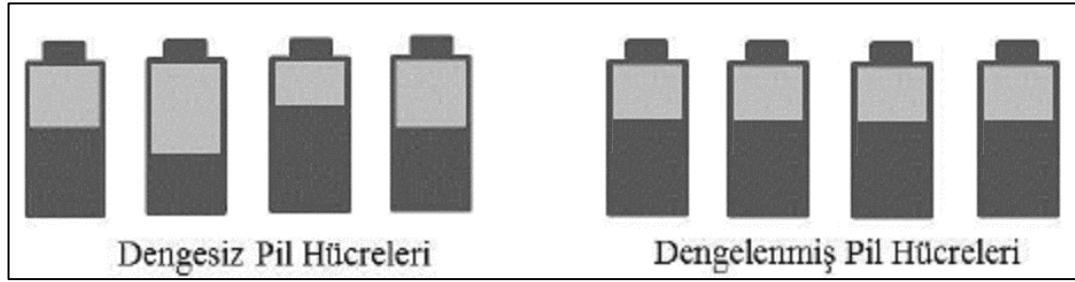
Şekil 3.16: Tam köprü dönüştürücü yapısı.

- **Yarı Rezonant Dönüştürücü:** PWM sinyalleri üretmek için akıllı kontrol kullanmak yerine, hem enerji transferi hem de anahtarları sürmek için rezonans devreleri kullanılır. Bu sistemde anahtarlama kayıpları azaltılıp dengeleme sisteminin verimliliği artırılır. Ancak bu sistem de yüksek maliyetli ve karmaşık bir kontrol yapısına sahiptir. Şekil 3.17'de yarı rezonant dönüştürücü yapısı gösterilmektedir [30].



Şekil 3.17: Yarı rezonant dönüştürücü yapısı.

Aşağıdaki şekilde de görüldüğü üzere aktif dengeleme pasif dengelemeye göre daha verimlidir. Ancak aktif dengeleme pasif dengelemeye göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Şekil 3.18’de aktif dengeleme şarj durumunda pil gerilim seviyesi değişimi verilmiştir [10]. Koyu renkli kısım pil doluluk oranını, açık renkli kısım pilin boş kısmını göstermektedir.



Şekil 3.18: Aktif dengeleme.

İncelenen yöntemlere bakıldığında aktif dengelemenin pasif dengelemeden verim açısından daha üstün olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada aktif dengeleme yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan çalışmada flyback yapısını içinde barındıran DC2100B-C batarya ölçüm kartı kullanılmaktadır.

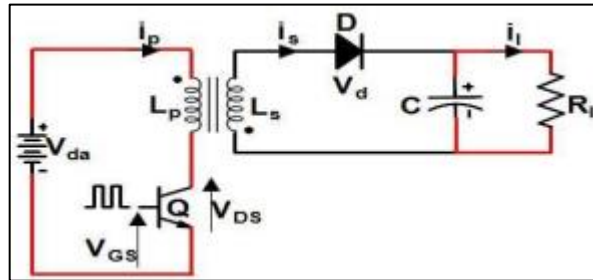
4. FLYBACK DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Flyback dönüştürücüler ucuz olması ve karmaşık bir yapıya sahip olmamasından dolayı kullanımı çokca tercih edilen anahtarlamalı güç kaynaklarından biridir. Temeli alçaltıcı (buck)-yükseltici (boost) dönüştürücülere dayanmaktadır. Flyback dönüştürücü alçaltıcı-yükseltici dönüştürücülerin izoleli halidir. Genellikle düşük güçlü uygulamalarda tercih edilirler ve verimleri yüksektir.

4.1. Flyback Dönüştürücü Yapısı

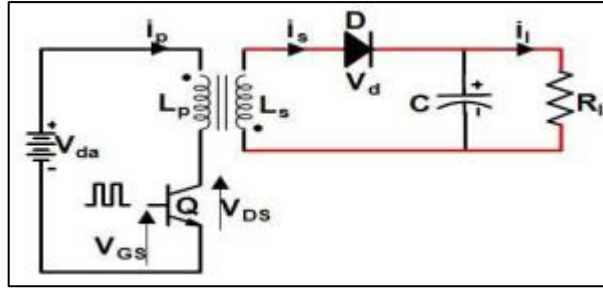
Şekil 3.14'te basitçe flyback dönüştürücü yapısı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere sargıların polariteleri ters kutuplanmıştır. Bu durumda birincil taraftan akım geçerken ikicil taraftan akım geçemeyecektir (diyottan dolayı), aynı şekilde ikinci taraftan da akım geçerken birincil taraftan akım geçemeyecektir.

Uygulan PWM sinyali ile iletim ve kesim süreleri belirlenir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de anahtar iletim ve kesim durumundayken flyback dönüştürücünün çalışma durumu gösterilmektedir [31].



Şekil 4.1: Anahtar iletimde.

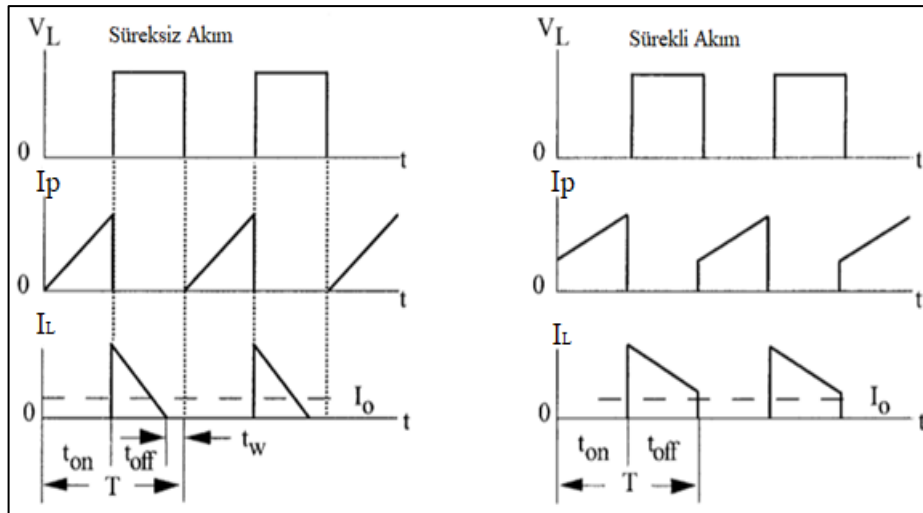
Şekil 4.2'de anahtar kapalıdır, akım primerden geçer. Enerji, transformatörün primeri ve çekirdeğinde depolanır. Bu durumda sekonder taraftaki yük kondansatör tarafından beslenir. L_p (primer endüktansı) uçları arasında sabit bir gerilim olduğundan primer akımın artışı sabit olacaktır [32].



Şekil 4.2: Anahtar kesimde.

Şekil 4.2’de anahtar açıktır, akım sekonderden akmaktadır. Bu durumda sekonder taraftaki yük beslenir ve kondansatör şarj olur. Tekrar anahtar kapandığında, yük kondansatörde depolanan bu enerji tarafından beslenir. Akış bu şekilde tekrarlanarak devam eder.

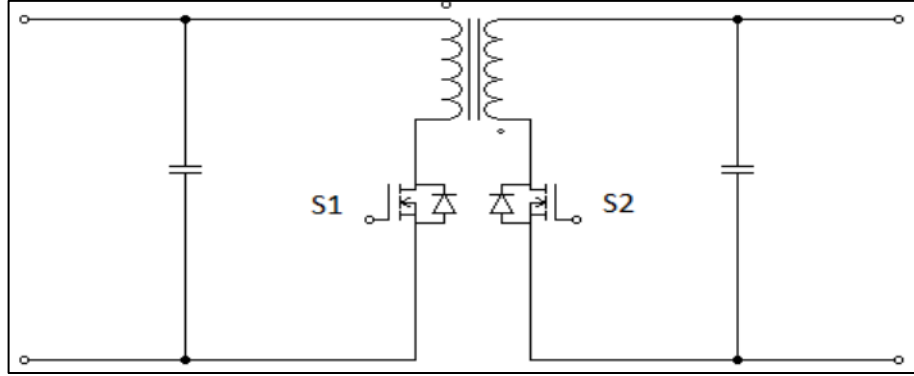
Flyback dönüştürücü devresi farklı çalışma modlarına sahiptir. Bunlar sürekli, süreksiz ve sınır çalışma modlarıdır [33]. Şekil 4.3’de sürekli ve süreksiz çalışma modları gösterilmektedir [34]. Sınır modunda, sekonder akımı sıfıra düşükten hemen sonra primer anahtar tekrar açılır. Dolayısı ile sınır çalışma modu, sürekli ve süreksiz çalışma modlarının tam ortasındaki çalışma modu olarak düşünülebilir. Bu çalışmada kullanılan DC2100B-C kartının sahip olduğu LTC3300-1 entegresi süreksiz çalışma modunu kullanmaktadır.



Şekil 4.3: Sürekli ve süreksiz akım dalgaformları.

4.2. Çift Yönlü Flyback Dönüştürücü

Bu çalışmada kullanılan DC2100B-C kartı çift yönlü flyback dönüştürücü yapısına sahiptir. Basitçe bir çift yönlü flyback dönüştürücü yapısı Şekil 4.4'te gösterilmektedir [35]. Temel flyback yapısındaki diyot kaldırılmış ve yerine S2 anahtarı eklenmiştir. Yani diyot görevini S1 ve S2 anahtarlarına bırakmıştır.



Şekil 4.4: Çift yönlü flyback yapısı.

Çift yönlü flyback dönüştürücü, hücreler arası enerji alışverişini çift yönlü yapabilir. Ayrıca giriş gerilimini daha da yükseltebilir ya da düşürebilir. Pozitif veya negatif bir çıkış gerilimi elde edilmesine olanak sağlar. Çıkışta elde edilen sinyalin büyüklüğü anahtarlama elemanına uygulanan PWM sinyaline bağlıdır. Çünkü anahtarın iletim ve kesim süreleri bu PWM sinyali tarafından belirlenir.

DC2100B-C kartında WURTH-750312504 model çift yönlü flyback transformatörü kullanılmıştır. Şekil 4.5'te bu flyback dönüştürücünün bağlantısı gösterilmektedir [36]. Genel gösterimde kullanılan transformatörün değeri 10 μ H dir, ancak gerçekte bu değer 3 μ H dir. Aynı şekilde R_{SNS_PRI} ve R_{SNS_SEC} direnç değerleri de sırasıyla 5m Ω ve 10m Ω dur. Şarj ve deşarj akımlarını değiştirmek için bu direnç değerleri değiştirilebilir [36].

$$I_{PEAK_PRI} = \frac{50mV}{R_{SNS_PRI}} \quad (4.1)$$

$$I_{PEAK_SEC} = \frac{50mV}{R_{SNS_SEC}} \quad (4.2)$$

Formül 4.1'den ve formül 4.2'den akım değerleri sırasıyla $I_{PEAK_PRI}=10$ A ve $I_{PEAK_SEC}= 5$ A olarak hesaplanmaktadır.

$$I_{Deşarj} = \frac{I_{PEAK_PRI}}{2} \left(\frac{S}{S+T} \right) \quad (4.3)$$

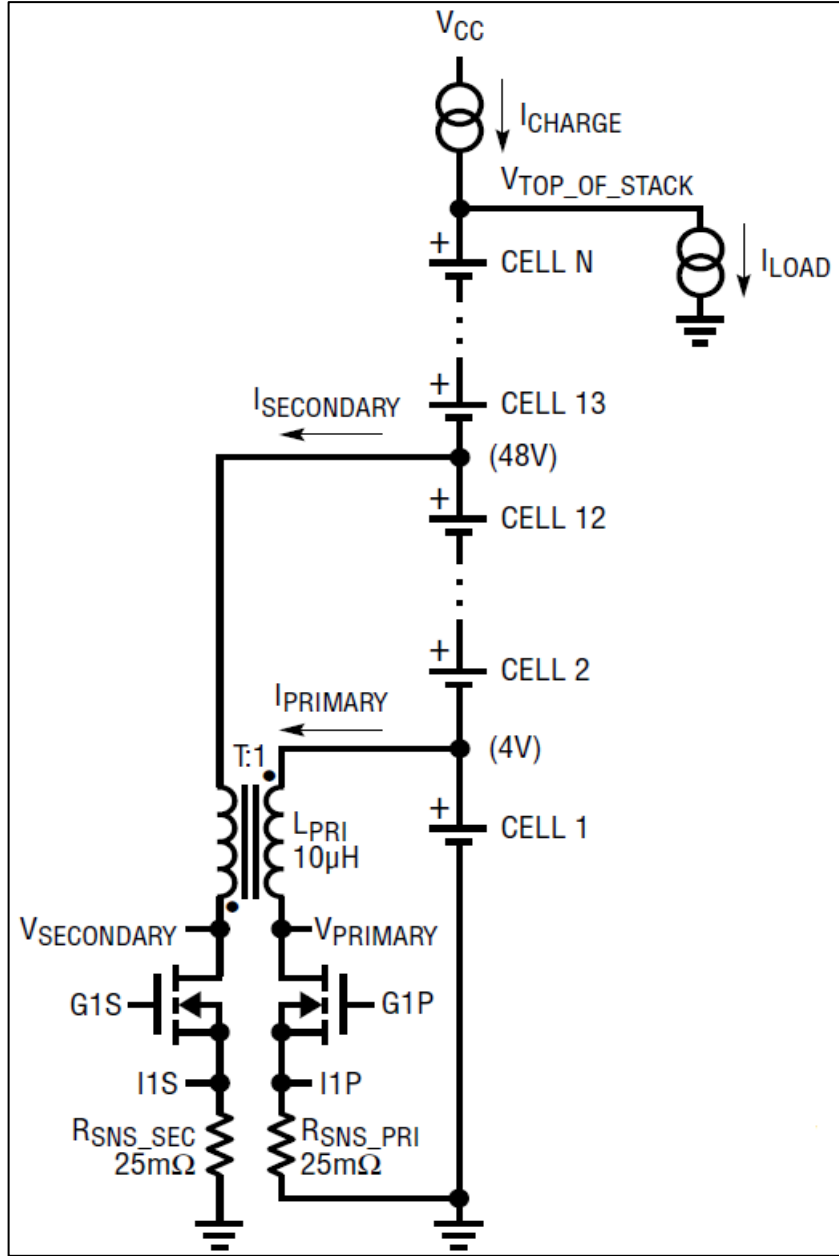
$$I_{SECONDARY} = \frac{I_{PEAK_PRI}}{2} \left(\frac{1}{S+T} \right) \eta_{Deşarj} \quad (4.4)$$

Formül 4.3 ve 4.4'teki ifadelerde S harfi hücre sayısını, T, dönüştürme sayısını ve η verimliliği ifade etmektedir. Kullanılan transformatörün dönüştürme oranı 1 ve kullanılan pil sayısı 4 olduğu için deşarj akımı 4 A, deşarj durumunda secondary akımı da yaklaşık olarak 1 A olarak hesaplanır.

$$I_{şarj} = \frac{I_{PEAK_SEC}}{2} \left(\frac{ST}{S+T} \right) \eta_{şarj} \quad (4.5)$$

$$I_{SECONDARY} = \frac{I_{PEAK_SEC}}{2} \left(\frac{T}{S+T} \right) \quad (4.6)$$

Formül 4.5 ve 4.6'dan şarj akımı yaklaşık 2A ve şarj durumunda secondary akımı 0.5 A olarak hesaplanır.



Şekil 4.5: DC2100B-C kartının dönüştürücü yapısı.

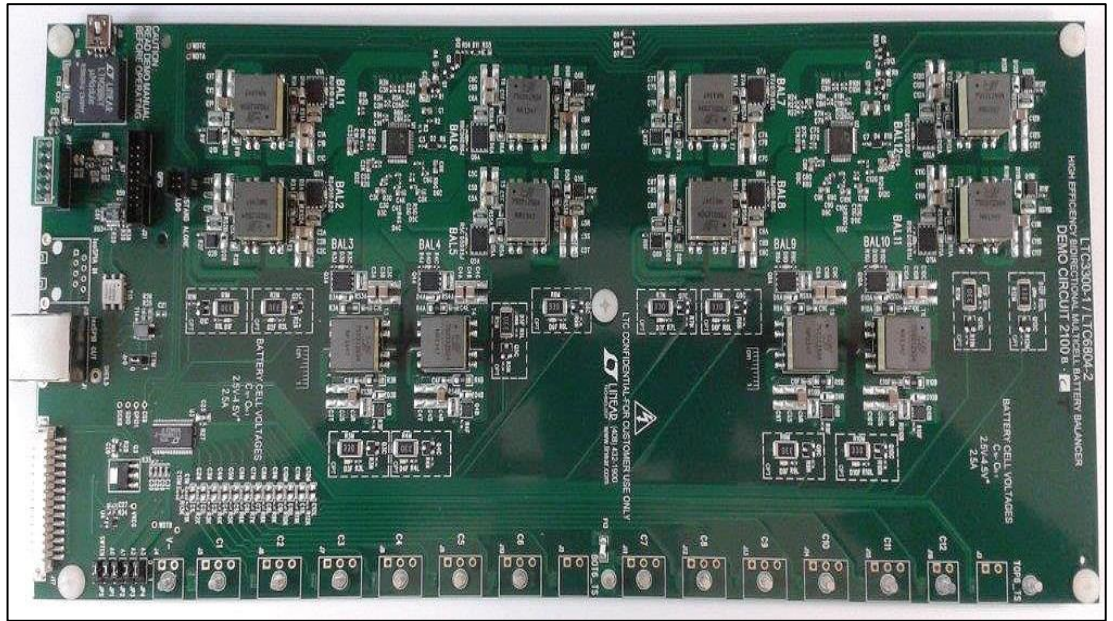
Burada R_{SNS} dirençleri pil akımını ayarlamak için kullanılabilir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de gerçekte ölçülen akım grafikleri gösterilmektedir.

5. DC2100B-C KARTI İÇİN OTOMATİK Dengeleme Algoritması Geliştirilmesi

5.1. DC2100B-C Kart Yapısı

Bu çalışmada aktif dengeleme yapısına sahip olan DC2100B-C kartı kullanılmaktadır. Kartın manual olarak kontrol edilebilen bir arayüz dengeleme programı vardır. Bu çalışmada dengeleme işlemini otomatik yapabilen bir program geliştirilmiştir. Ayrıca DC2100B-C kartının sahip olduğu PIC18F47J53 işlemcisi devre dışı bırakılıp, başka bir işlemci kullanılarak dengeleme işlemi yapılmıştır.

DC2100B-C geliştirme kartı Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Bu kart LTC3300-1, LTC6804-2, 24AA64, LTC1380, LTC6820 entegrelerine sahiptir. Bu entegreler hakkında bilgi vermek için Analog Devices’ın DC2100B-C kartı bilgi kağıtlarından faydalanılmıştır [36]. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında bu entegrelere kısaca değinilmektedir.



Şekil 5.1 DC2100B-C demo kartın görüntüsü.

DC2100B-C kartının şematik resimleri Diğer Ekler (CD)’de gösterilmektedir.

5.1.1. LTC6804-2 Entegresi

LTC6804-2 entegresi hücrelerin gerilim ve sıcaklık değerlerinin okunmasında ve okunan değerlerin sağlıklı bir aralıkta olup olmadığının kontrolünde kullanılır. İşlemci ile diğer entegrelerin haberleşmesini yönetir. Bu entegre, haberleşme işlemi için I2C ve SPI hatlarını kullanır. Entegrenin SPI haberleşme hattı izolelidir. Aktif dengeleme çok yüksek akımlar içerebileceği için izoleli bir haberleşme hattı ile gerekli korumalar sağlanmaktadır. Böylece işlemci, oluşabilecek yüksek akım ve gerilimlerden korunur. Yüksek akım ve gerilimler neticesinde işlemci ile LTC6804 haberleşmesi gürültüye son derece açıktır. Bu yüzden gerçekleştirilen haberleşmenin sağlıklı olup olmadığının kontrolü sürekli yapılmalıdır. Bu kontrol yapısını sağlamak için entegreye CRC15 hata kontrol yapısı eklenmiştir.

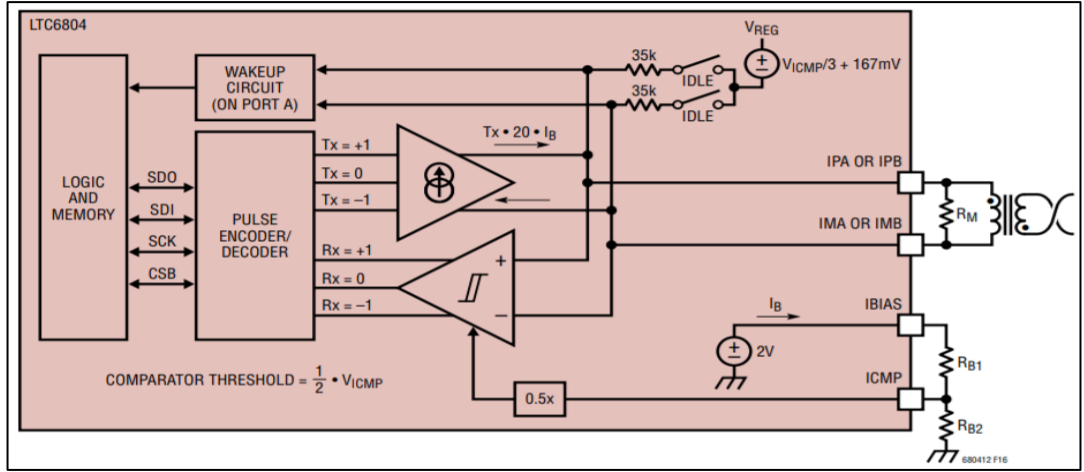
LTC6804-2 entegresi seri olarak bağlanan 12 hücreye kadar ölçüm alabilir. 12 den fazla hücre ölçümü için karta başka kart eklentisi yapılmalıdır. Toplam ölçüm hatası maksimum 1.2 mV'dur. Sistemdeki tüm hücreleri 290 μ s de ölçebilir. 16 bit delta-sigma ADC birimine ve 48 pinlik bir pakete sahiptir.

Bu işlemcinin 5 adet GPIO hattı mevcuttur. Bunlardan 3 tanesi haberleşme için kullanılır. Bu GPIO hattının 3 ucu, haberleşmeyi sağlamak için CSB (chip select), SCK (serial clock), SDIO (serial data in-out) pinleri olarak kullanılır.

LTC6804 gücünü V^+ ve V_{REG} den sağlar. V^+ gerilimi tüm hücrenin toplam gerilimine eşit ya da daha büyük olmak zorundadır. V_{REG} , gerilimi devreden sağlanabileceği gibi dışarıdan da sağlanabilmektedir.

5.1.2. LTC6820 Entegresi

LTC6820 bir isoSPI birimidir. IsoSPI birimi, 4 telli SPI hattını 2 telli transformatör izoleli bir hatta dönüştürür. Şekil 5.2'de bu yapı açıkça gösterilmektedir.



Şekil 5.2: isoSPI arayüzü.

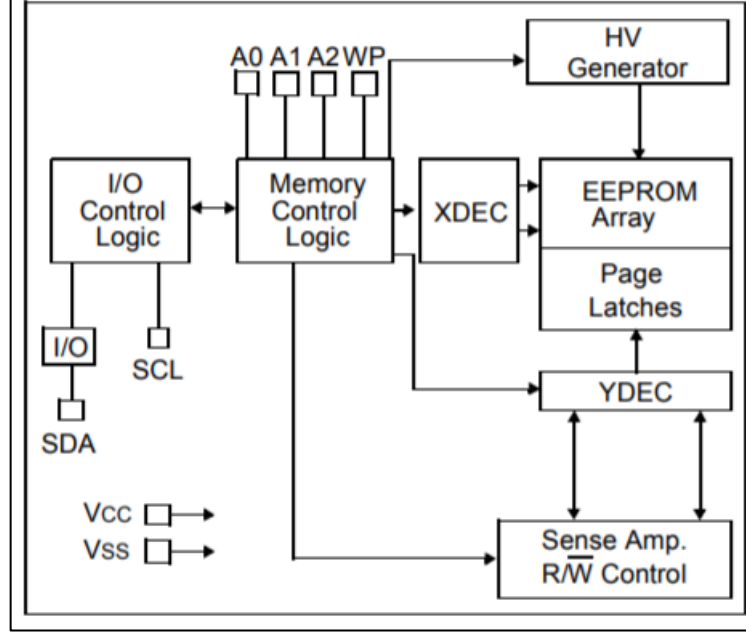
İki telli bir haberleşme birimi ile 3 farklı gerilim karşı tarafa iletilebilir (+V, -V ve 0). Dolayısı ile SPI haberleşmesi 2 tel üzerinden sinyal zamanının uzunluğu ve kısıklığı ayarlanarak yapılabilir. Örneğin LTC6820 entegresinde, 150 ns +V sinyali ve ardından 150 ns -V sinyali CS yükselmesi olayı için, 150ns -V sinyali ve ardından 150 ns +V sinyali CS alçalması olayı için kullanılmaktadır. Data hatlarındaki değişim için ise zamanlar 50 ns'dir.

5.1.3. LTC3300-1 Entegresi

LTC3300-1 çift yönlü Flyback dönüştürücüler ile kullanmak üzere geliştirilen bir dengeleme entegresidir. Monitör, şarj cihazı ve mikroişlemci ile çalışmak üzere tasarlanmıştır. Entegre üzerinde Flyback dönüştürücü MOSFET'lerin sürülmesini sağlayacak gerekli sürücü elektroniği, akım algılaması elektroniği bulunmaktadır. Akım algılaması elektroniği ile MOSFET'lerin maksimum açık kalma zamanı ayarlanmaktadır. Bu sayede, bataryaların dengeleme akımları kontrol altında tutulmaktadır. LTC3300-1, LTC6804-2 entegresi ile SPI hattı üzerinden haberleşmektedir. Bir LTC3300-1 entegresi 6 adet hücreyi dengeleyebilir. DC2100B-C kartında bu entegreden 2 adet mevcuttur ve 12 tane hücreye kadar dengeleme yapılabilmektedir.

5.1.4. 24AA64 Entegresi

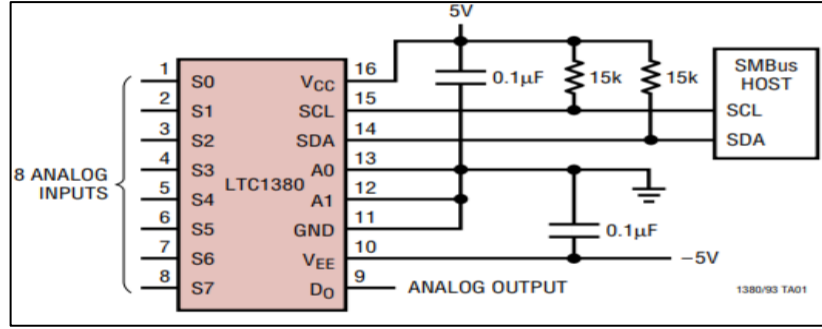
24AA64 bir EEPROM entegresidir. Devrede 1 adet bulunur. I2C haberleşmesi ile LTC6804 entegresi ile haberleşmektedir. Kart üretim bilgisi, çeşitli akım ve gerilim kalibrasyon değerlerinin saklamakta kullanılmaktadır. Blok diyagram yapısı Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3: 24AA64 blok diyagram yapısı.

5.1.5. LTC1380 Entegresi

LTC1380 analog seçici (multiplexer) entegresidir. DC2100B-C kartında 2 adet bulunmaktadır. 12 adet pilin sıcaklık değerlerini ölçmek için LTC1380 entegresinin analog giriş uçlarına NTC sensörleri bağlanır. Hangi giriş ucu ölçülmek isteniyorsa o giriş ucunun adresi I2C üzerinden programlanarak, ölçülecek olan giriş ucu D0 hattına bağlanır. D0 hattı ise LTC6804-2 GPIO2 hattı üzerinden LTC6804-2 entegresinin iç ADC sine bağlıdır. Bu şekilde LTC6804-2 ile batarya sıcaklık değerleri okunabilmektedir. Şekil 5.4'te LTC1380 yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5.4: LTC1380 yapısı.

5.2. Batarya Dengeleme

Bu çalışmada Samsung marka li-iyon piller, DC2100B-C kartı, PIC32MX460F512L geliştirme kartı, MikroC PRO Pic32 işlemci programı kullanılarak batarya dengeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Samsung ICRF18650-26F Pillerin Özellikleri

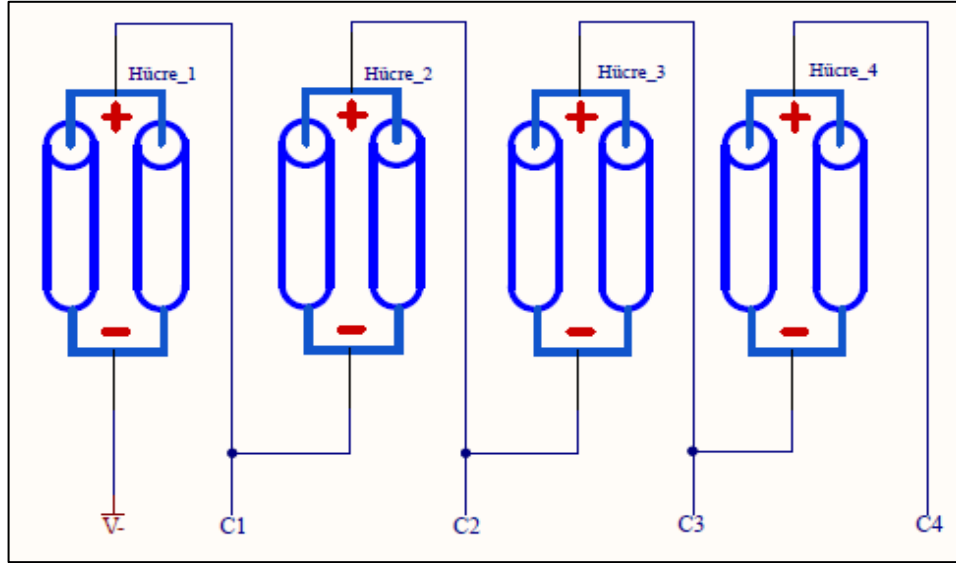
Çalışmada kullanılan piller, ICR18650-26F model Samsung marka tekrar şarj edilebilen li-iyon pillerdir. Bu pilin özellikleri Tablo 5.1’de belirtilmektedir [37].

Tablo 5.1: ICRF18650-26F model pilin özellikleri.

Anma Kapasitesi Değeri	2600 mAh (0.2 C, 2.75 V discharge)
Şarj gerilimi	4.2 ± 0.05 V
Anma Gerilimi	3.7 V
Şarj Metodu	CC – CV
Şarj Akımı	Standart Şarj: 1300 mA
Şarj Zamanı	Standart Şarj: 3 saat
Maksimum Şarj Akımı	2600 mA
Maksimum Deşarj Akımı	5200 mA
Deşarj Kesim (Cut-Off) Gerilimi	2.75 V
Çalışma Sıcaklığı	Şarj: 0-45 °C Deşarj :-20 - 45 °C

Batarya dengeleme işlemi için toplam 8 adet li-iyon pil kullanılmaktadır. Bu 8 adet pille piller ikişer ikişer paralel bağlanarak 4 hücre oluşturulmuştur. Böylece 5200 mAh kapasiteye sahip hücreler oluşturulmaktadır. Yapılan dengeleme çalışmasında,

oluşturulan dört adet hücrenin dengeleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Şekil 5.5'te bu bağlantı şeması gösterilmektedir.



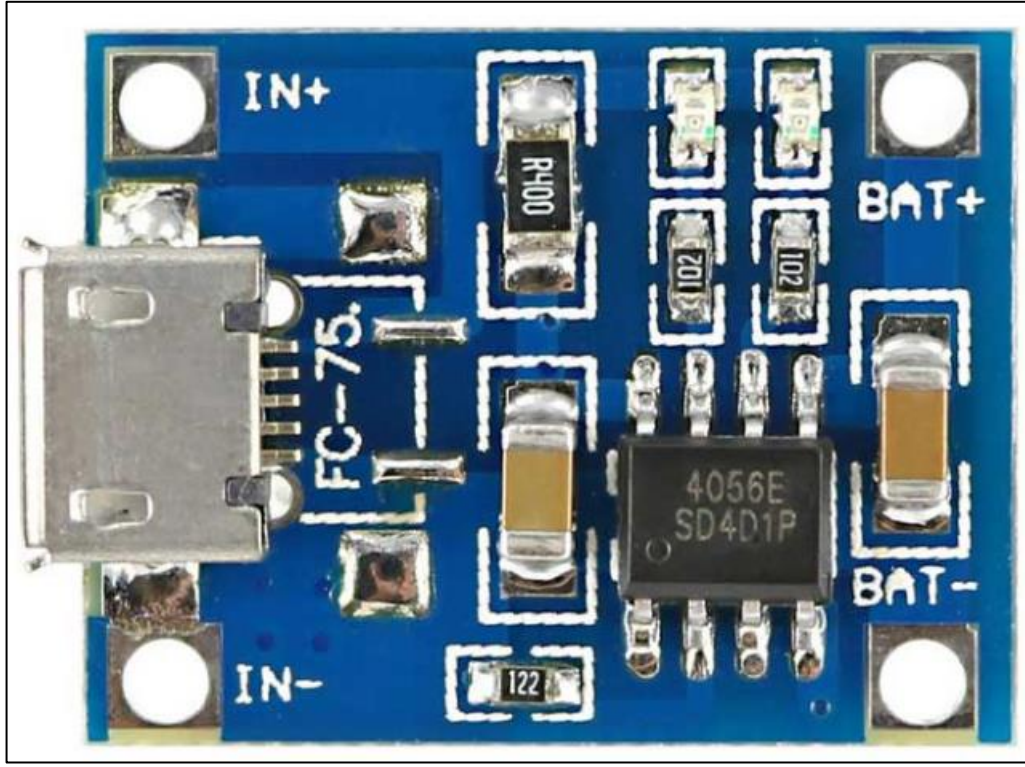
Şekil 5.5: Pil bağlantı şeması.

5.2.2. Pil Şarj-Deşarj İşlemleri

Hücre gerilimlerini farklı değerlere getirip ölçüm alabilmek için pillerin şarj veya deşarj edilmesi gerekmektedir. Batarya sağlığı açısından şarj işlemleri CC (sabit akım)-CV (sabit voltaj) modunda gerçekleştirilir. Şarj işlemi toplam 4 aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar sırasıyla damla şarj, sabit akım şarj, sabit gerilim şarj ve şarj bitirme aşamalarıdır [38]. Damla şarj, eğer batarya çok fazla deşarj olmuşsa bataryayı düşük akımla şarj ederek sabit akım modunda şarj etmeye hazırlar. Damla şarj ile kesim noktasına ulaşıldığında şarj akımı yükseltilir, sabit akımla şarj başlar. Kesim noktası 4.2 Volta ulaştığında sabit akım modundan çıkıp, sabit gerilim moduna geçilir. Lityum iyon pillerde şarj işlemi, ya bir zamanlayıcının süresi dolduğunda ya da belirlenmiş bir en küçük şarj akımı durumuna gelindiğinde durdurulabilir. En küçük akım kontrol yönteminde, şarj işlemi akım değerinin 0.02C ile 0.07C arasında olduğu bir durumda bitirilebilir. Sabit zaman yönteminde ise, sabit gerilim aşaması 2 saat devam ettirildikten sonra şarj işlemine son verilir [38].

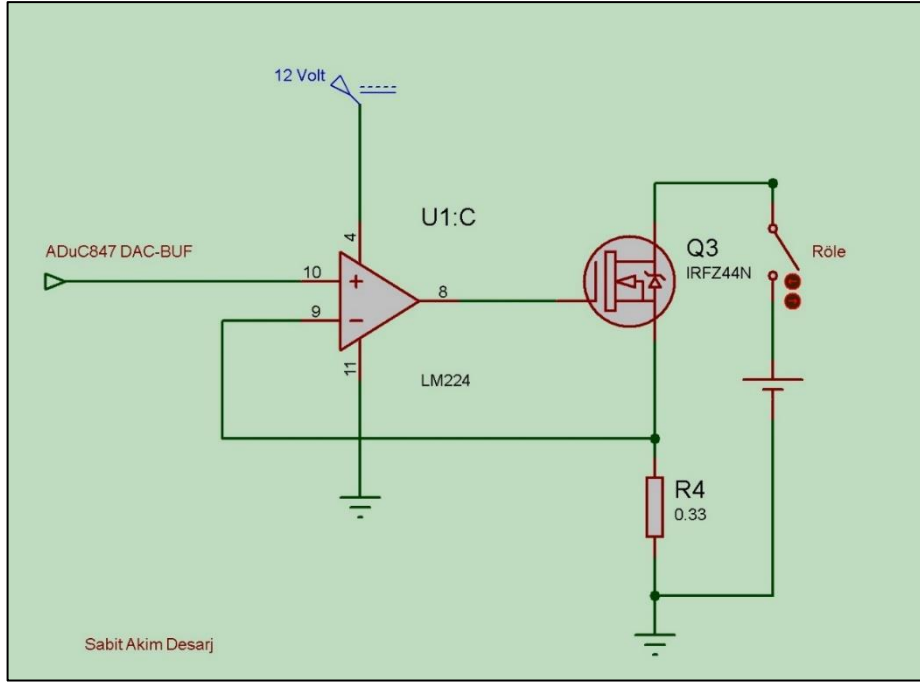
Çalışmada kullanılan pilleri şarj etmek için CC-CV modunda çalışan hazır bir pil şarj devresi kullanıldı. Bu devre TP4056 şarj çipine sahip, lityum iyon pil 18650

şarj devresidir ve devrenin şarj akımı 1 A olarak ayarlıdır. 5 V besleme gerilimi ile devre beslenir. TP4056 şarj devresi Şekil 5.6'da gösterilmektedir [39].



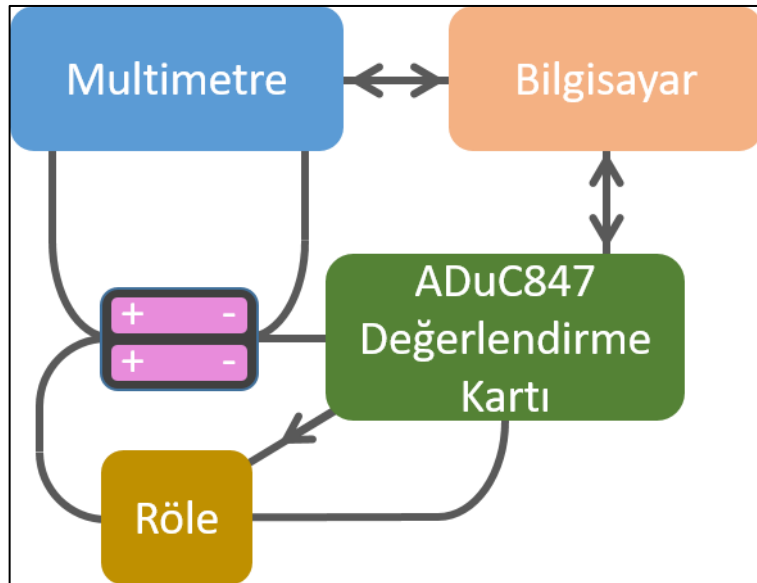
Şekil 5.6: TP4056 pil şarj devresi.

Hücrelerin gerilimini boşaltmak için ise yeni bir devre yapıldı. Bu devre için ADuC847 geliştirme kartı kullanıldı. ADuC847 kartı ile röle kontrolü sağlanmaktadır. Şekil 5.7'de ADuC847 kart üzerine kurulan devre şeması gösterilmektedir.



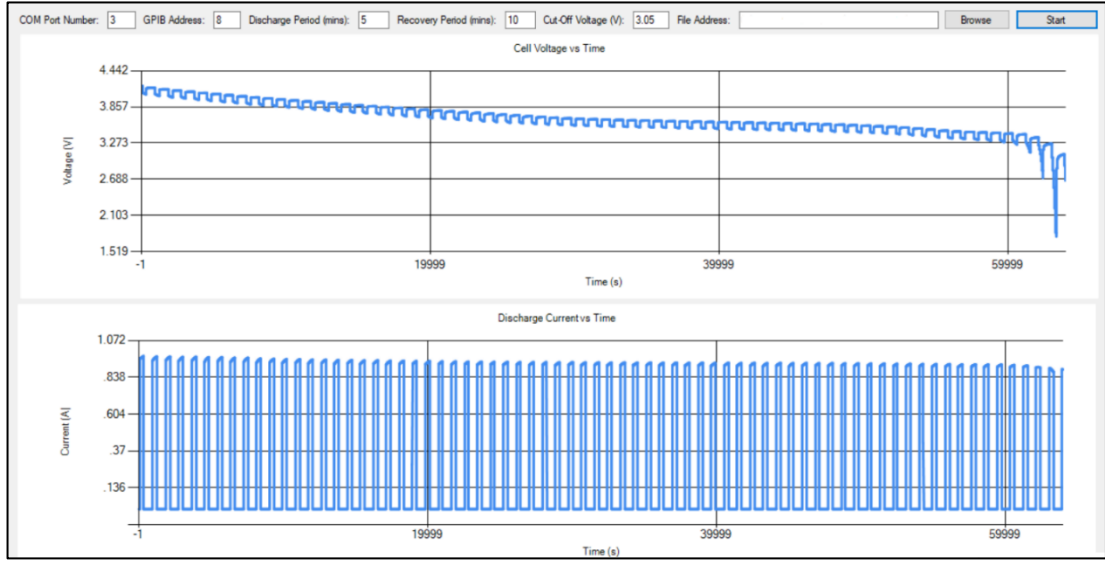
Şekil 5.7: Pil deşarj devresi.

Pil deşarj devresi için kurulan düzenek daha anlaşılır olması açısından Şekil 5.8'de açıkça gösterilmektedir. Bilgisayar ile multimetrednin haberleşme işlemi yapılarak, multimetre üzerinden okunan pil gerilim değerleri bilgisayara aktarılmaktadır. AduC847 kart üzerine kurulan röle kontrol devresi yardımıyla da istenilen sürelerde açma kapama işlemleri gerçekleştirilir.



Şekil 5.8: Pil deşarj gerilimi ölçüm düzeneği.

Şekil 5.8’ de gösterilen düzenek ile sadece pil deşarj işlemi yapılmamaktadır. Bunun yanında bu deşarj işlemi kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Yani oluşturulan bir arayüz kontrol programı ile pilin ne kadar süre yük boşaltacağı, bu boşaltma işleminden sonra ne kadar beklenileceği, pil boşaltma işleminin hangi gerilim değerine kadar gerçekleşeceği kontrol edilebilmektedir. Oluşturulan bu pil deşarj kontrol arayüzü Şekil 5.9’da gösterilmektedir.



Şekil 5.9: Pil deşarj kontrolü arayüzü.

Şekil 5.9’da gösterilen grafikler 5 dk CCV, 10 dk OCV ölçümü alınarak elde edilmiştir. Bu program kullanılarak elde edilen boşalma eğrilerinden yararlanarak bazı hesaplamalar yapılabilmektedir. SoC ve pil iç direnç hesabı için bu verilerden faydalanılmaktadır.

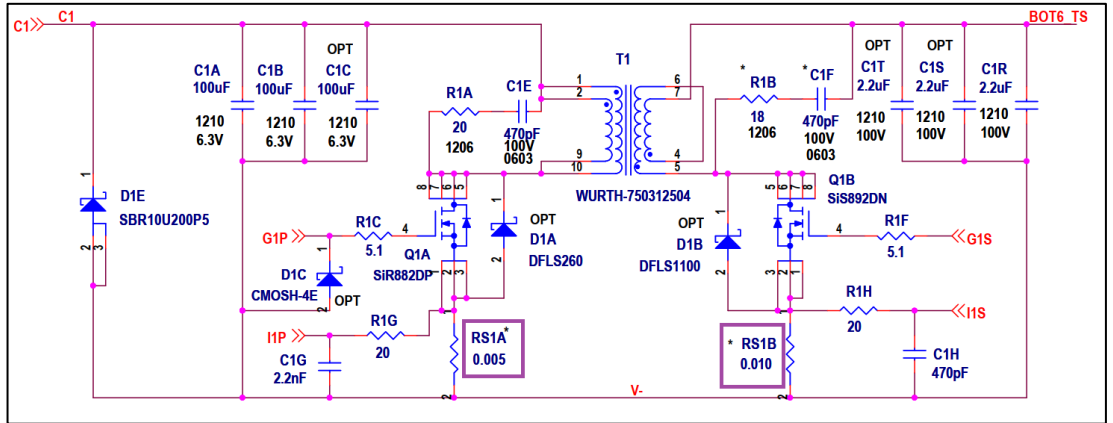
Şekil 5.9 ile elde edilen grafik yardımıyla gerilim-boşalma eğrileri elde edilir. Tam dolu tüm piller için boşalma işlemleri gerçekleştirilip SoC eğrileri elde edilir. Çalışmada kullanılan piller için elde edilen SoC eğrileri Şekil 5.15’de gösterilmektedir.

5.2.3. Batarya Akım Ölçme

Bu çalışmada kullanılan DC2100B-C kartı, hücre akımlarını ölçmemektedir. Bu nedenle hücre akımlarını ölçmek için ayrıca akım sensörlerinin kullanılması gerekmektedir. Akım ölçmek için kalibre edilen ACS712 akım sensörleri, tüm

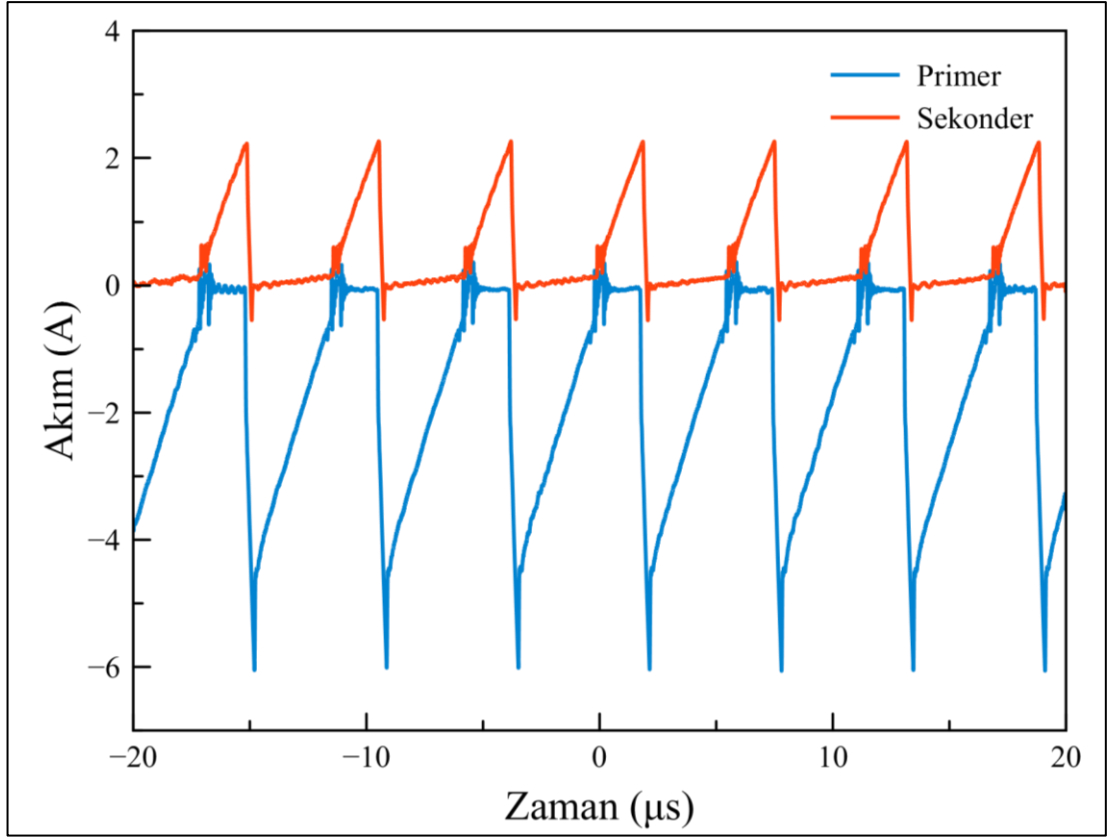
hücrelere bağlandı. Akım okumaları ADUC847 kart üzerinden yapıldı. ACS712 için 5V gerektiği için, ADUC847 kart üzerine 5V gerilim referansını sağlamak için küçük bir devre kuruldu. Ancak akım sensörleri manyetik alandan çok fazla etkilendiği için, okunan değerlerde salımlar çok fazla oldu. Bu nedenle hücre akımlarını ölçmek için bu sensör kullanımının uygun olmadığına karar verildi. Akım okumak için ACS712 yerine MAX471 sensörleri kullanılarak akım okuma çalışmaları yapıldı. MAX471 kullanılarak maksimum 3 amper okuma yapılabildiği için iki kart paralel bağlanarak 6 ampere kadar okuma yapabilecek hale getirildi. Fakat bu kart ile yapılan okuma sonuçlarındanda şarj deşarj veriminin oldukça düştüğü gözlemlendi. Bu durum MAX471 kartta kullanılan ölçüm direncinden kaynaklanmıştır (35- 70 miliohm). Bu yüzden akımı canlı olarak gözlemlemekten vazgeçildi ve hücre akımları osiloskop ile ölçüldü. Farklı şarj ve deşarj durumu için grafikler Şekil 5.11 ve 5.12’de gösterilmiştir.

Şekil 5.10’de RS1A ve RS1B dirençleri gösterilmektedir. Bu dirençler pil üzerinden geçen akımın ayarlanmasında kullanılır. Kartın akım davranışını gözlemleyebilmek için osiloskop yardımıyla bu dirençler üzerindeki akım değerleri ölçüldü.



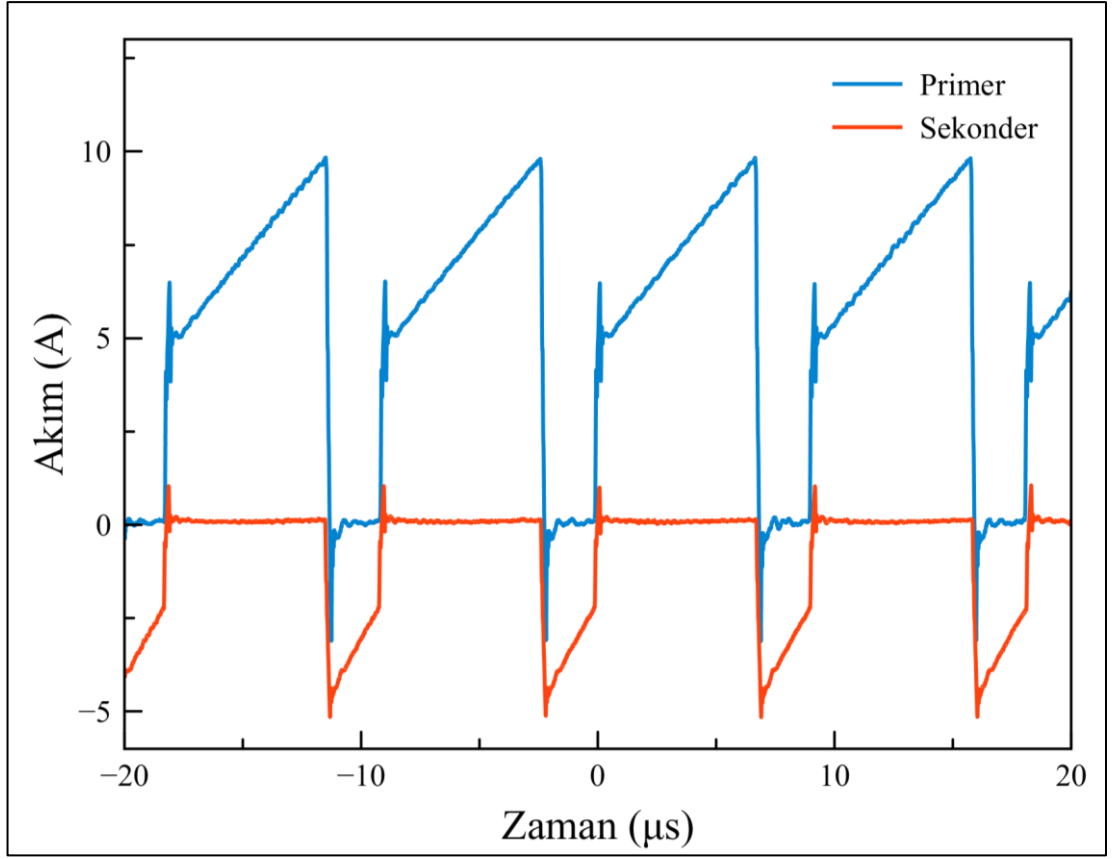
Şekil 5.10: RS dirençlerinin devre bağlantısı.

RS1A direnci üzerinden primer akımı verileri elde edilirken, RS1B üzerinden sekonder üzerinden geçen akım verileri elde edilir.



Şekil 5.11: Şarj akımı grafiği.

Şekil 5.11'de gösterilen grafik, devreye bağlı olan dört hücreden birinci hücrenin şarj edilmesi durumunda devrenin üzerinden geçen primer ve sekonder akımlarını ifade eder. Mavi renk, pil şarj olurken primer üzerinden geçen akımı, turuncuyu da sekonder tarafta görülen akımı belirtmektedir.



Şekil 5.12: Deşarj akımı grafiği.

Şekil 5.12’de gösterilen grafik, devreye bağlı olan dört hücreden birincisinin deşarj edilmesi sonucunda devrenin üzerinden geçen primer ve sekonder akımları ifade eder. Mavi renk, pil deşarj olurken primer üzerinden geçen akımı, turuncuda da sekonder tarafında görülen akımı belirtmektedir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’deki grafiklerdeki akım formlarının normalde üçgen olması beklenmektedir. Bu formların tam üçgen dalga formunda olmaması, indüktans kaçak kapasiteleri kaynaklı olabilir.

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de sadece tek hücre için eğriler çizilmiştir. Tüm hücrelerin şarj ve deşarj durumları için bu akım verileri alınmıştır. Tablo 5.2’de bu veriler verilmektedir. Tabloda şarj durumu 2, deşarj durumu da 3 ile gösterilmektedir. Örneğin, 0030 olarak ifade edilen gösterim sadece üçüncü hücrenin şarj durumunu ifade eder ve ya 2000 gösterimi sadece birinci hücrenin deşarj edildiğini ifade eder.

Tablo 5.2: Hücre şarj-deşarj akımları.

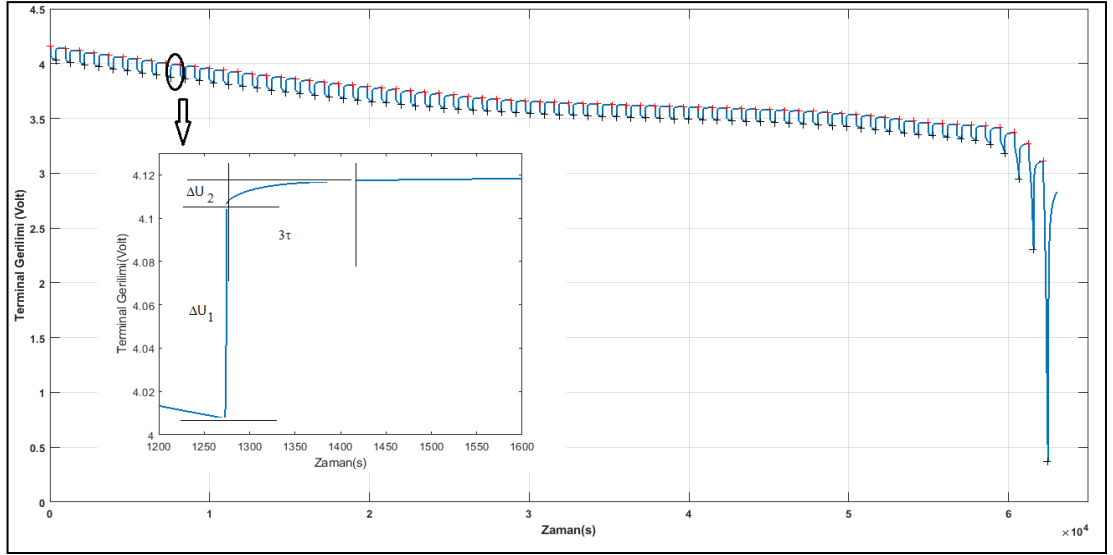
Komut	Primer Akımı	Seconder Akımı	Verim
3000	-1.7174	0.5044	%80.2
0300	-1.4559	0.5293	%58.3
0030	-1.3640	0.5610	%47.7
0003	-1.3116	0.4510	%60.6
2000	5.4648	-0.7618	%48.6
0200	5.3098	-0.7667	%66.2
0020	5.1769	-0.8897	%62.2
0003	5.5399	-0.7409	%43.3

Başlangıçta farklı seviyede gerilim değerlerine sahip dört hücre için şarj-deşarj işlemleri ayrı ayrı her hücre için yapıldığında Tablo 5.2'deki akım değerleri gözlenmektedir.

5.2.4. Thevenin Model Parametrelerinin Hesaplanması

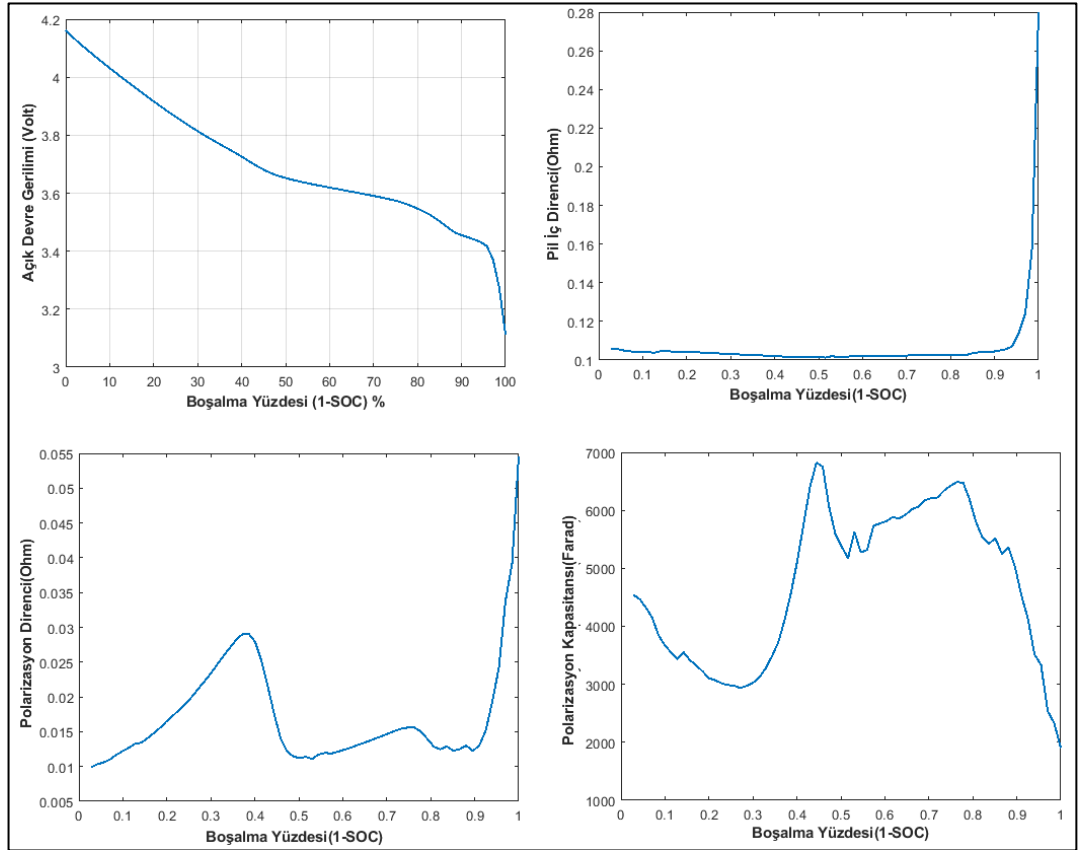
Bölüm 2.4'te pil eşdeğer devre modelleri hakkında bilgi verilmişti. Bu çalışmada Thevin eşdeğer devre modelinden faydalanılmaktadır. Bir pilin boşalma eğrisinden Thevenin modeli için, pil iç direnci, polarizasyon direnç ve kapasitesi hesaplanabilir. Şekil 5.13'te gösterilen ΔU_1 , ΔU_2 ve τ değerlerinden Thevenin model parametreleri hesaplanır [40].

$$R_0 = \frac{\Delta U_1}{I}, R_p = \frac{\Delta U_2}{I}, C_p = \frac{\tau}{R_p} \quad (5.1)$$



Şekil 5.13: Pil boşalma eğrisi.

Şekil 5.13'te verilen adım adım boşalma eğrisinde, akım sabit olduğundan, boşalma eğrisi için, pil şarj durumu ve her bir adımda pil şarj durumuna bağlı olarak, iç direnç, polarizasyon direnci ve polarizasyon kapasitesi hesabı yapılabilir.



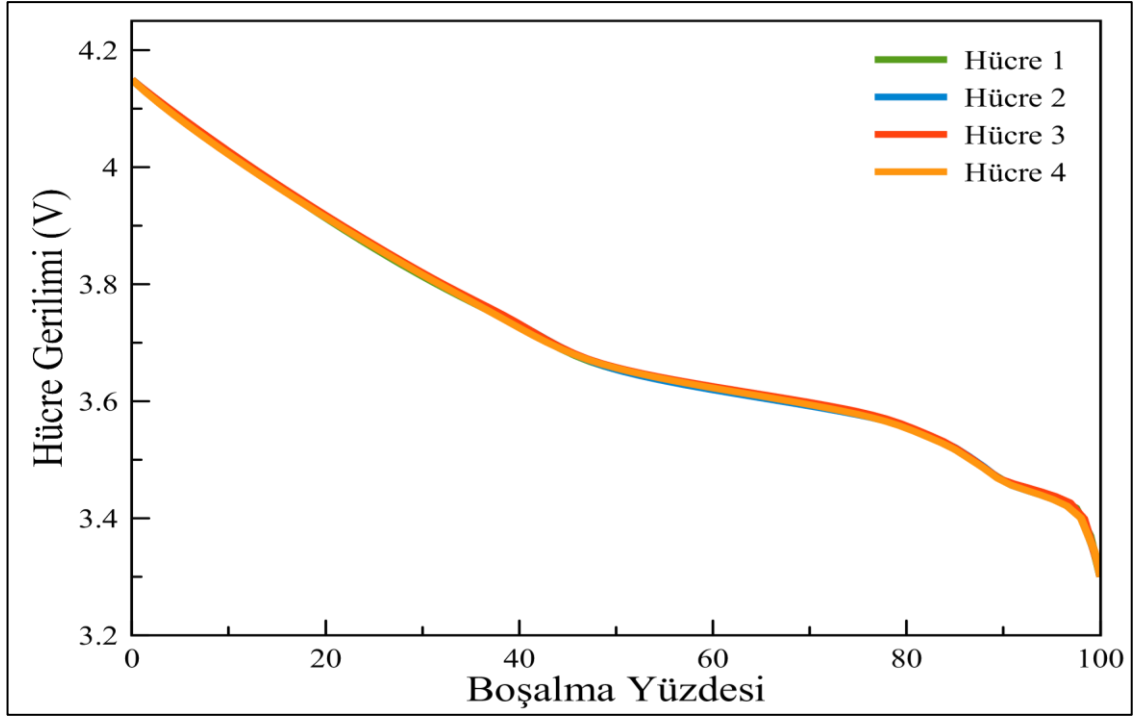
Şekil 5.14: Pil SoC eğrileri.

Grafiklerden görüldüğü üzere, pil iç direnci neredeyse sabittir. Ancak pildeki yük miktarının neredeyse sıfıra yaklaştığı bölümlerde direnç eğrisinde keskin bir artış gözlenmektedir. Polarizasyon direnç değeri ise sabit bir davranış göstermemektedir. Fakat pilin tamamen boş haline yaklaştığı bölgelerde polarizasyon direnç değerinde de keskin bir artış görülmektedir. Polarizasyon direnç değeri pil iç direncinin onda bir mertebesindedir. Dolayısıyla pil şarj veya deşarj işlemi sırasında terminal gerilim değerini çok fazla etkilemeyecektir. Polarizasyon direnci ve kapasitesi, birlikte oluşturdukları zaman sabiti ile, pilin gevşeme davranışını modellemek için kullanılır. Bu nedenle polarizasyon direnç ve kapasite değerleri için eğrilerden elde edilen ortalama bir değer kullanılması çoğu zaman yeterli olacaktır.

5.2.5. Coulomb Sayma Yöntemiyle SoC Eğrilerinin Elde Edilmesi

SoC değerinin coulomb counting yöntemi ile düzgün bir şekilde ölçülebilmesi için öncelikle bataryanın tamamen doldurulması gerekmektedir. Sonrasında da tamamen boşaltılmalıdır ve boşaltma işlemi sırasında aynı anda akım ölçümü de yapılmalıdır. Şekil 5.9'daki arayüz kullanılarak elde edilen verilerden yararlanarak pilin SoC eğrisi elde edilir.

Çalışmada kullanılan 4 pil için ayrı ayrı pil boşalma grafikleri elde edilmiştir. Pillerin SoC eğrileri Şekil 5.15'te üst üste çizdirilmiştir.



Şekil 5.15: Farklı batarya hücreleri için hesaplanan SoC eğrileri.

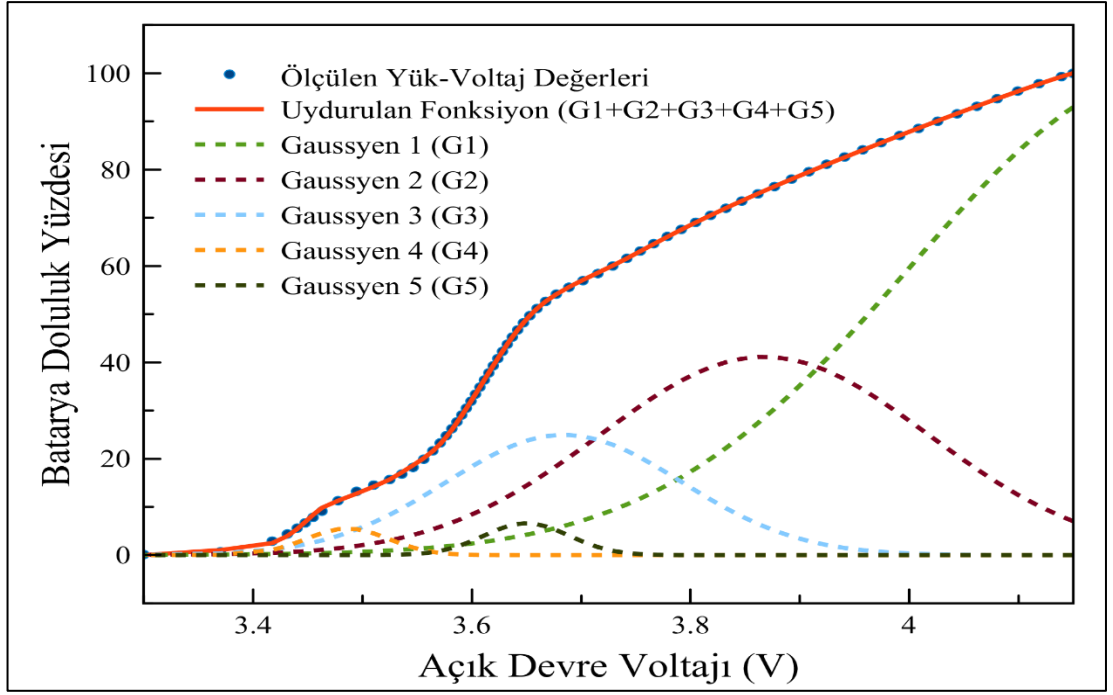
SOC grafiği dikkatli bir şekilde incelendiğinde kullanılan pillerin davranışlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Pillerden birinin SoC eğrisi için bir fonksiyon uydurulmuştur. Uydurulan fonksiyon beş gaussiyen fonksiyonun toplamıdır. Tek bir gaussiyen için fonksiyonun formülü 5.2’de verilmektedir. Her bir fonksiyon için katsayılar Tablo 5.3’de verilmektedir.

$$f(x) = a * e^{-(\frac{x-b}{c})^2} \quad (5.2)$$

Tablo 5.3: SoC hesabı için oluşturulan Gaussiyen fonksiyon katsayıları.

	a	b	C
1	0.995398083157737	4.236491274732180	0.329934916653441
2	0.411342021943893	3.867583459733400	0.212538444993212
3	0.249389429972857	3.684324619957390	0.152633644429258
4	0.055190915872662	3.486157649862110	0.053402351686095
5	0.065829037708307	3.650031004675510	0.055585799733654

Toplanan beş gaussiyenin her birinin ve bu fonksiyonların toplamı Şekil 5.16’da gösterilmektedir.

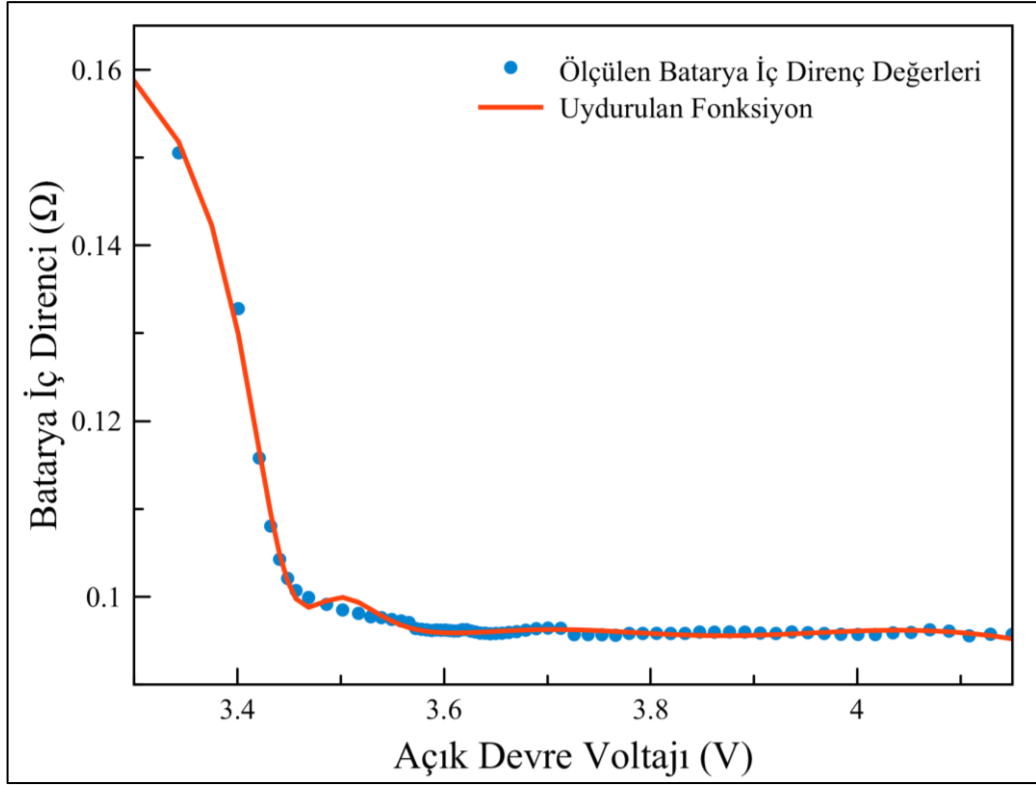


Şekil 5.16: Uydurulan fonksiyon eğrisi.

Şekil 5.9'daki arayüz programı kullanılarak elde edilen ölçüm sonucu, SoC eğrileri elde edilebildiği gibi pillerin iç direnç grafikleride elde edilebilir. Yine SoC için bir fonksiyon uydurulduğu gibi iç direnç içinde bir fonksiyon oluşturmak için bir fonksiyon eğrisi uydurulmuştur. Bu fonksiyon 5 Gaussiyen fonksiyonun toplamıdır. Uydurulan fonksiyon eğrisi için katsayılar Tablo 5.4'te ve direnç eğrisi de Şekil 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.4: İç direnç hesabı için oluşturulan Gaussiyen fonksiyon katsayıları.

	a	b	C
1	0.188222597564786	2.96627068363215	0.374196434149568
2	0.0282578078841383	3.35260036558057	0.111925332414106
3	-0.0145349781273499	3.44793274210230	0.0412961745165073
4	0.00956320299278072	3.65215035202120	0.196353738283008
5	0.0959902317819969	4.06212488394018	0.958339908869479

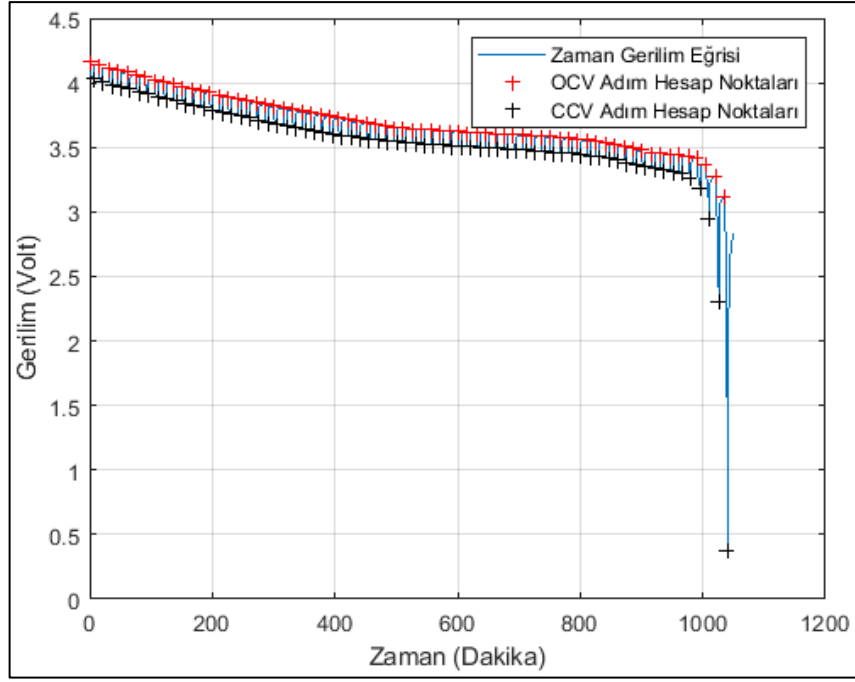


Şekil 5.17: Pilin iç direncinin değişimi.

Şekil 5.16 incelendiğinde pilin iç direncinin yük durumuna göre çok fazla değişmediği görülmektedir. Yük miktarının sıfıra yakın olduğu noktalarda direncin daha büyük olduğu gözlenmektedir. Gerilimin çok düşük olması durumunda pilin kendi yapısından dolayı pilin yüksek iç direnci varmış gibi modellenmektedir.

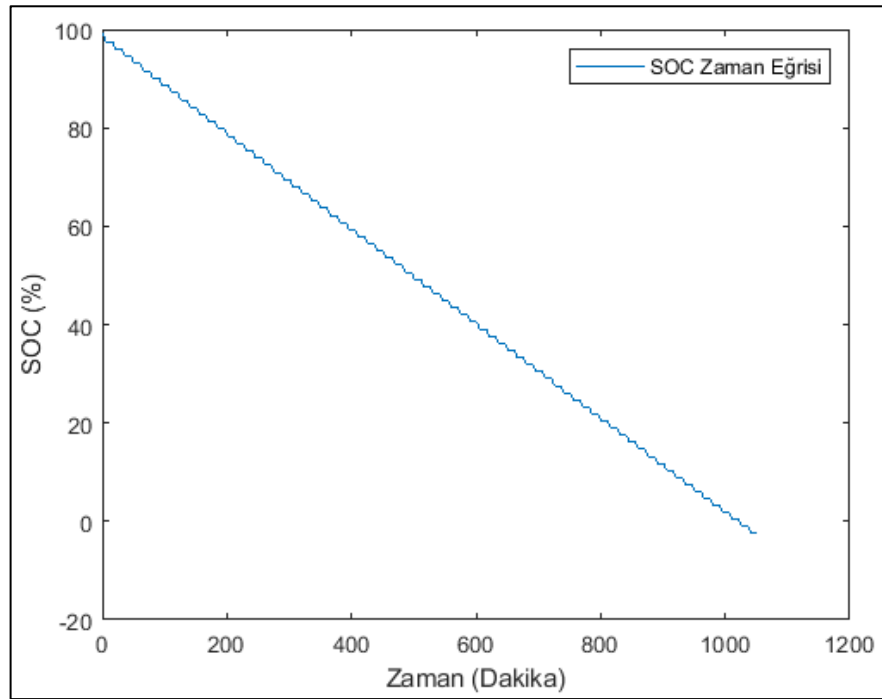
5.2.6. Kalman Filtresi Yöntemiyle SoC Eğrisinin Elde Edilmesi

Kalman filtresi yöntemi başlık 2.4.2.6' da detaylı bir şekilde anlatılmış ve batarya Thevenin model için durum-uzay fark denklemleri elde edilmişti. Bu yöntem için batarya sabit akım ile adım adım boşaltıldı. Her adımda batarya 5 dakika boşaltılıp, 10 dakika dinlenmeye bırakıldı. Bu işlemler gerçekleştirilirken alınan her veri için akımlarda kaydedildi. Boşalma eğrisi Şekil 5.18'de gösterilmektedir.



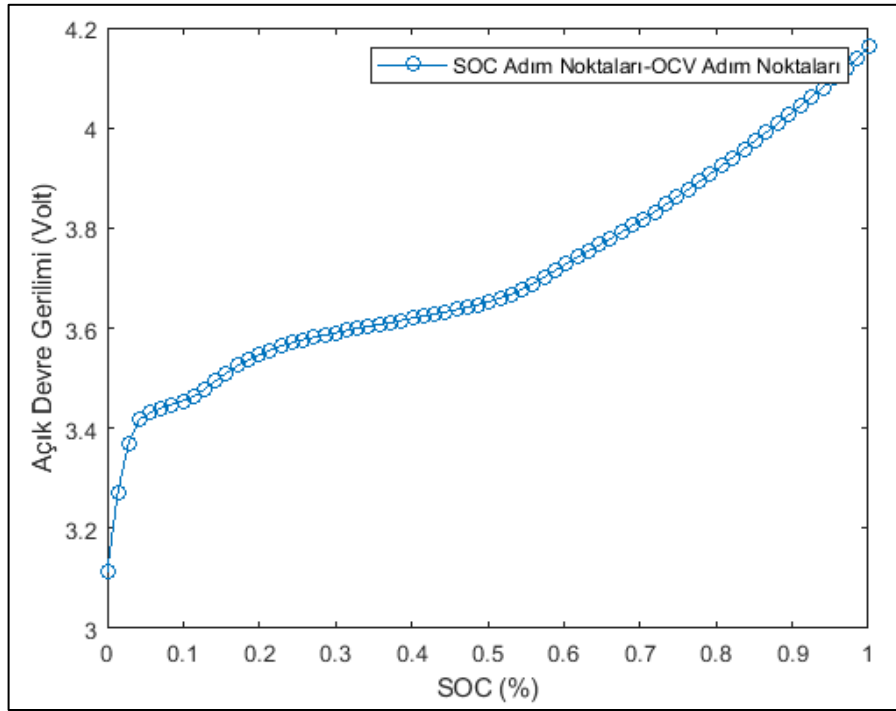
Şekil 5.18: Pil gerilimi boşalma eğrisi.

Coulomb sayma yöntemi ile zamana karşı batarya doluluk oranı hesaplandı. Şekil 5.19’da bu eğri gösterilmektedir.



Şekil 5.19: SoC zaman eğrisi.

Şekil 5.19'dan elde edilen eğri yardımıyla SoC-OCV eğrisi hesaplanır. Şekil 5.20'de bu eğri gösterilmektedir.



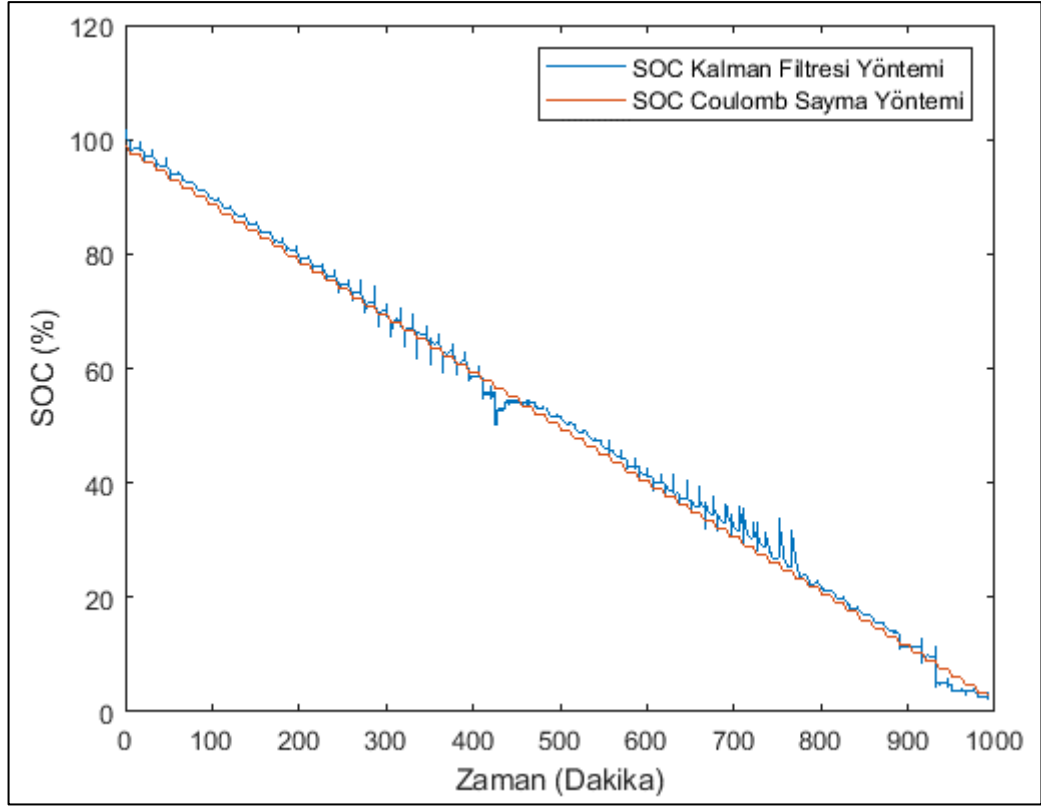
Şekil 5.20: SoC-OCV eğrisi.

Elde edilen SoC-OCV eğrisi doğrusal hale getirilerek m ve n dizileri oluşturulur.

$$OCV_k = m_k SOC_k + n_k \quad (5.3)$$

$OCV = F(SOC)$ eğrisini doğrusal hale getirmek için m ve n dizileri Diğer Ekler (CD)'de verilen Matlab kodu ile oluşturuldu.

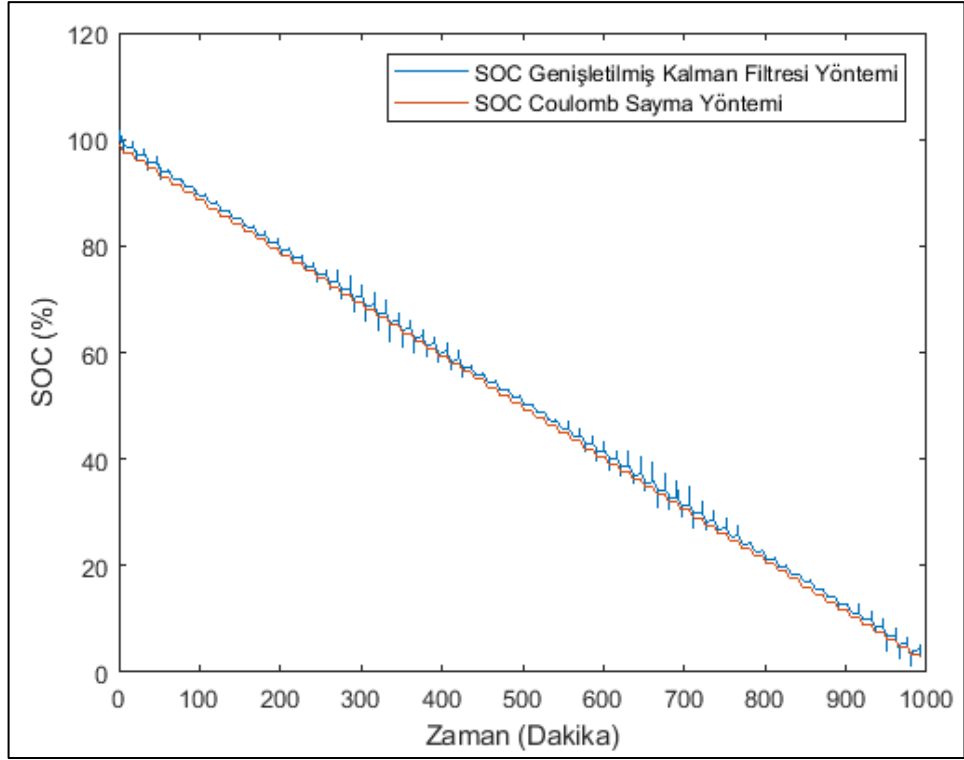
Şekil 5.21'de Kalman filtreleme gerçekleştirilerek, Zaman-SOC eğrisi ile karşılaştırıldı.



Şekil 5.21: Doğrusal kalman filtre grafiği.

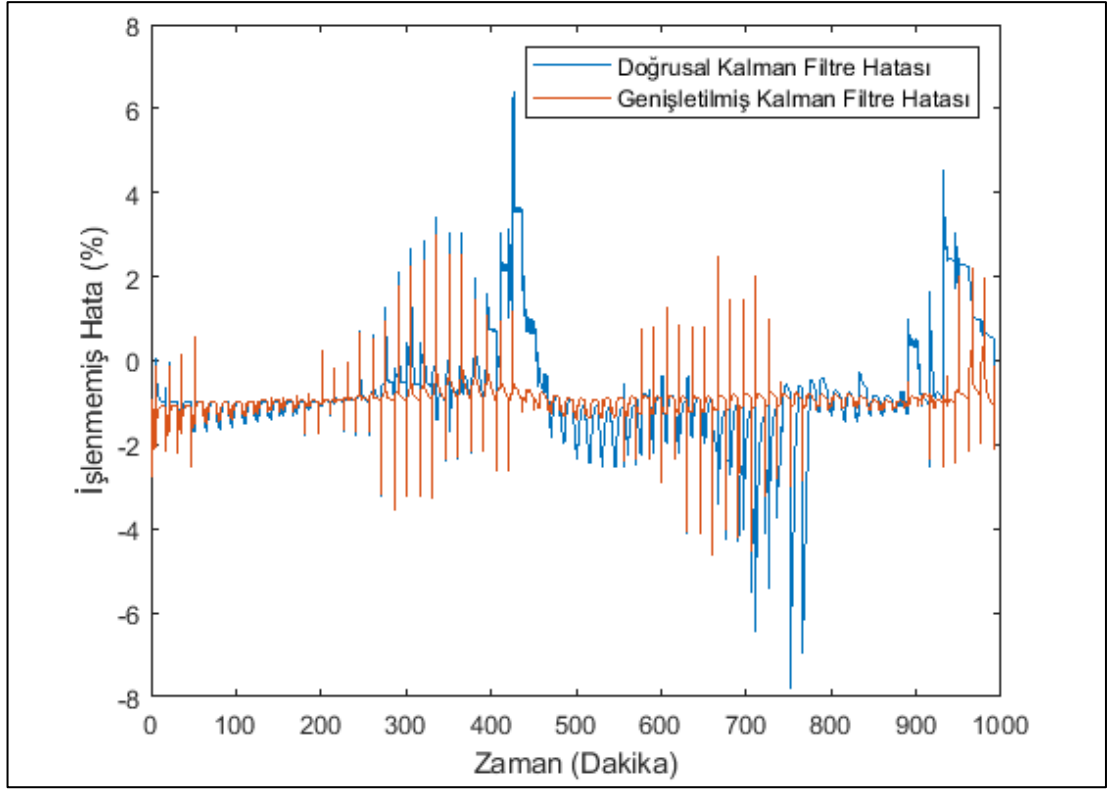
Doğrusal Kalman filtresinde olduğu gibi, adım adım boşaltma eğrisinden faydalanarak OCV-SOC eğrisi hesaplanır. OCV-SOC eğrisinden, ilerletilmiş Kalman filtresinde kullanılmak üzere $OCV_Curve(SOC)$ ve $OCV_Curve_Der(SOC)$ eğrileri oluşturulur. Bu eğrilerin oluşturulmasında kullanılan Matlab kodu Diğer Ekler (CD)'de verilmektedir.

Şekil 5.22'de genişletilmiş Kalman filtre gerçekleştirilerek, Zaman-SoC eğrisi ile karşılaştırılmıştır.

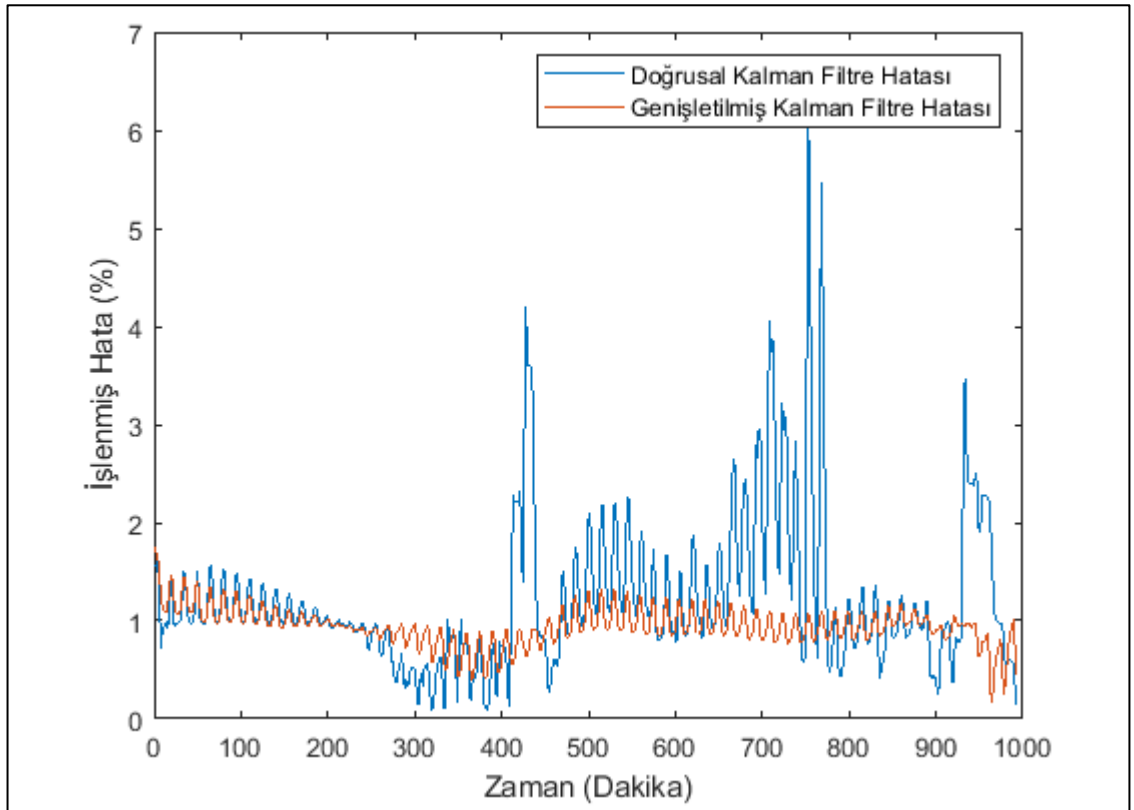


Şekil 5.22: Genişletilmiş Kalman filtresi grafiği.

Grafiklere kısa bir bakış ile ilerletilmiş Kalman filtresinin daha iyi bir tahmin gerçekleştirdiği söylenebilir. Bu karşılaştırma sonucunu daha net görebilmek için hata grafikleri çizdirildi. Şekil 5.23'te herhangi bir filtre uygulanmadan hata grafiği çizdirilmiştir. Şekil 5.24'de hatayı net görebilmek için 4 örnekle hareketli ortalama (moving average) alınmıştır.



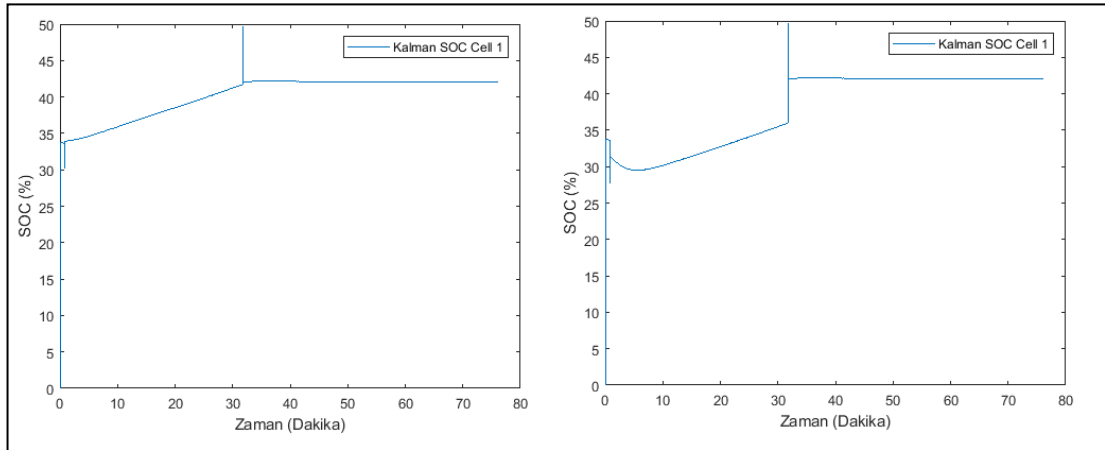
Şekil 5.23: Kalman filtrelerin hata karşılaştırması.



Şekil 5.24: Kalman filtrelerin hata karşılaştırması (filtrelenmiş).

Elde edilen grafikler incelendiğinde ilerletilmiş Kalman filtresinin daha iyi bir tahmin gerçekleştirdiği söylenebilmektedir. Bu nedenle genişletilmiş Kalman filtresinden yararlanarak bazı çalışmalar yapılmıştır. Kalman filtre ile SoC tahmini yapılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuç değerleri OCV gerilim metoduyla elde edilen SoC değerleri ve Coulomb sayma yöntemi ile elde edilen SoC değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Kalman filtresinin doğru tahmini için önemli parametrelerden biri efektif iç direnç parametresidir. Efektif iç direnç değerini DC2100B-C kart yapısı, bağlantılarda kullanılan kablolar etkilemektedir. Bu nedenle aynı pili farklı hücrelere bağladığımızda pil farklı davranışlar gösterir. Efektif iç direnç parametresinin yanlış tahmini SoC eğrisinde kesikli bir yapıya yol açar. Aşağıda doğru hesaplanmış ve yanlış hesaplanmış efektif iç direnç değerinin Kalman filtredeki etkisi görülmektedir. Kesikli yapı, şarj veya deşarj işlemi sırasında Kalman filtrenin doğru tahmin yapamadığını gösterir.



Şekil 5.25: Hücre efektif iç direncinin Kalman fitresine etkisi.

5.2.7. Kalman Filtresi ve Coulomb Sayma Yönteminin Karşılaştırılması

Kalman filtresi ve Coulomb sayma yöntemiyle SoC hesaplarının karşılaştırılması için bir ölçüm alındı. Doğru tahmin için, şarj-deşarj işlemi başlamadan hemen önceki gerilim değerinden, hemen sonraki gerilim değerleri farkı hesaplanarak, şarj deşarj akımlarına bölünür (üçüncü hücre deşarj edilmektedir ve DC2100B-C kartı yapısı gereği diğer hücreler şarj olurlar). Tablo 5.5’de 4. satır şarj-

deşarj durumu başlamadan hemen önceki verileri göstermektedir ve 5. satır da aynı şekilde şarj-deşarj durumu başladıktan hemen sonraki veriyi göstermektedir.

Tablo 5.5: Pil gerilim değerleri.

Hücre 1 (V)	Hücre 2 (V)	Hücre 3 (V)	Hücre 4 (V)
3.594641	3.62586	4.108453	3.518706
3.594641	3.62586	4.108453	3.518706
3.594641	3.62586	4.108351	3.518706
3.594641	3.62586	4.108351	3.518807
3.734926	3.887801	3.256463	3.919626
3.735430	3.888003	3.253340	3.919322
3.735833	3.888506	3.254247	3.916403

Akım değerleri aşağıdaki gibi tahmin edilmiştir. (+) değerlerdeşarj akımını (-) değerler şarj akımlarını göstermektedir.

Tablo 5.6: Tahmini pil akım değerleri.

Hücre 1 (A)	Hücre 2 (A)	Hücre 3 (A)	Hücre 4 (A)
-0.9	-0.9	4.5	-0.9

Tablo 5.7: Hesaplanan hücre efektif iç direnç değerleri.

Hücre 1 (Ω)	Hücre 2 (Ω)	Hücre 3 (Ω)	Hücre 4 (Ω)
0.1559	0.2910	0.189	0.4454

3 nolu pil boşaltılmaya başlanmadan önce pil doluluk değerleri (SoC), açık devre gerilimleri (OCV) ölçülerek hesaplanmıştır.

Tablo 5.8: Pilin boşaltılmadan önceki doluluk oranları.

Hücre 1	Hücre 2	Hücre 3	Hücre 4
31.3232	41.1743	89.9536	15.7104

3 nolu pil bir miktar boşaltılmış ve daha sonradeşarj işlemi sonlandırılmıştır. Fakat devre gerilimleri ölçülmeye devam edilmiştir (pil dinlendirilmiştir). En son ölçülen açık devre geriliminden elde edilen pil doluluk değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.9: Pilin boşaltıldıktan sonraki doluluk oranları.

Hücre 1	Hücre 2	Hücre 3	Hücre 4
41.2964	51.5747	56.5552	30.6030

Bu son değerlere, Kalman filtresi ve Coulomb sayma yönteminin ne kadar yaklaşabildiği aşağıda verilmiştir.

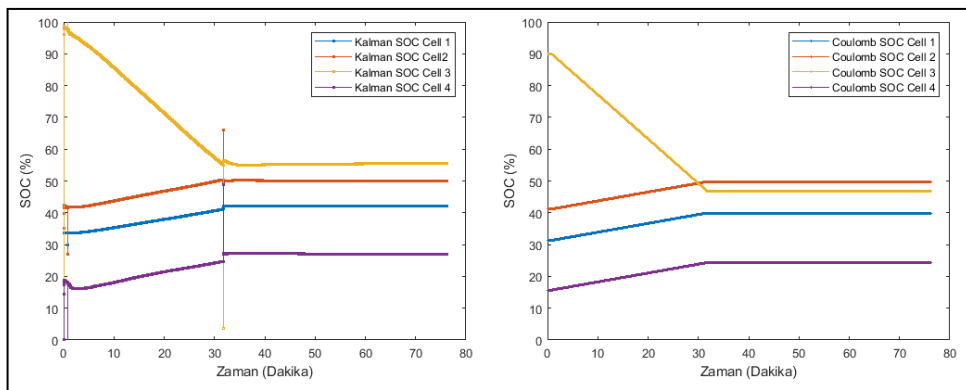
Tablo 5.10: Kalman filtresi ile hesaplanan pil doluluk oranları.

Hücre 1	Hücre 2	Hücre 3	Hücre 4
42.0061	49.9704	55.5082	27.0147

Tablo 5.11: Coulomb sayma ile hesaplanan pil doluluk oranları.

Hücre 1	Hücre 2	Hücre 3	Hücre 4
39.9403	49.7914	46.8684	24.3275

Görüldüğü gibi Kalman filtresi son değerlere daha iyi yakınsamaktadır. 4 nolu pildeki ölçüm hatası, çok düşük doluluk yüzdeleri için, pil iç direncinin çok daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun için iç direnci pil doluluk yüzdesine bağlayan bir fonksiyonun kullanılması faydalı olacaktır. Bütün bu sonuçlar aşağıdaki ölçüm sonuçları grafiklerinde özetlenmiştir.



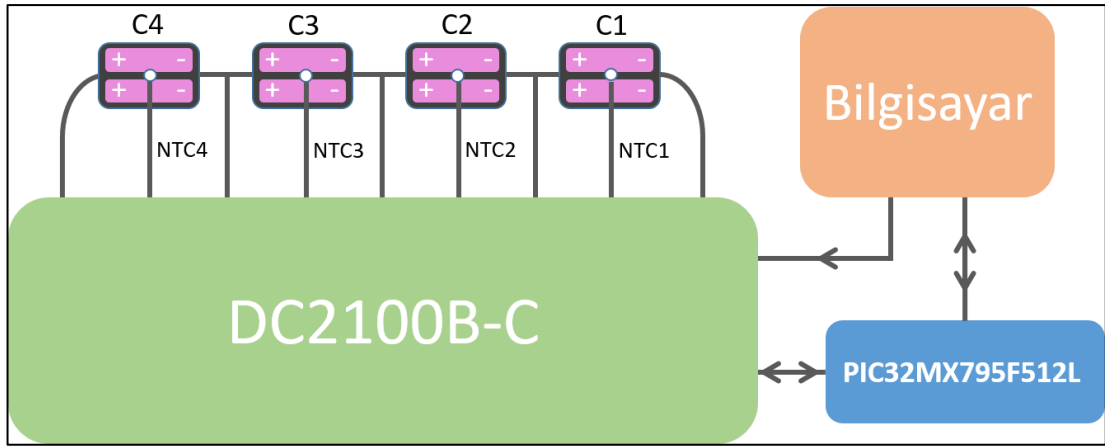
Şekil 5.26: Kalman filtresi yöntemi ve Coulomb sayma yöntemi karşılaştırması.

5.2.8. Pil Dengeleme Düzeneği

Hücre gerilimlerini okumak için Şekil 5.5'te gösterilen pil düzeneği DC2100B-C kartının hücre ölçüm uçlarına bağlandı. Ayrıca pillerin sıcaklık değerini okumak

için kartın sıcaklık okuma uçlarına 10k değerinde NTC'ler bağlandı. Şekil 5.27'de bu düzenek gösterilmektedir.

DC2100B-C kartının sahip olduğu PIC18 işlemcisi devre dışarı bırakıldı. DC2100B-C kartının SPI uçları ile karta dışarıdan başka bir PIC işlemci bağlandı. Microelectronika'nın PIC32 işlemcisine sahip geliştirme kartı kullanıldı. Şekil 5.28'de bu kart gösterilmektedir [41]. PIC32MX460F512L işlemcili bu geliştirme kartı, 320x240 ekrana sahiptir. Ayrıca bu kart hem SPI, hem de I2C haberleşmesi yapabilmektedir.



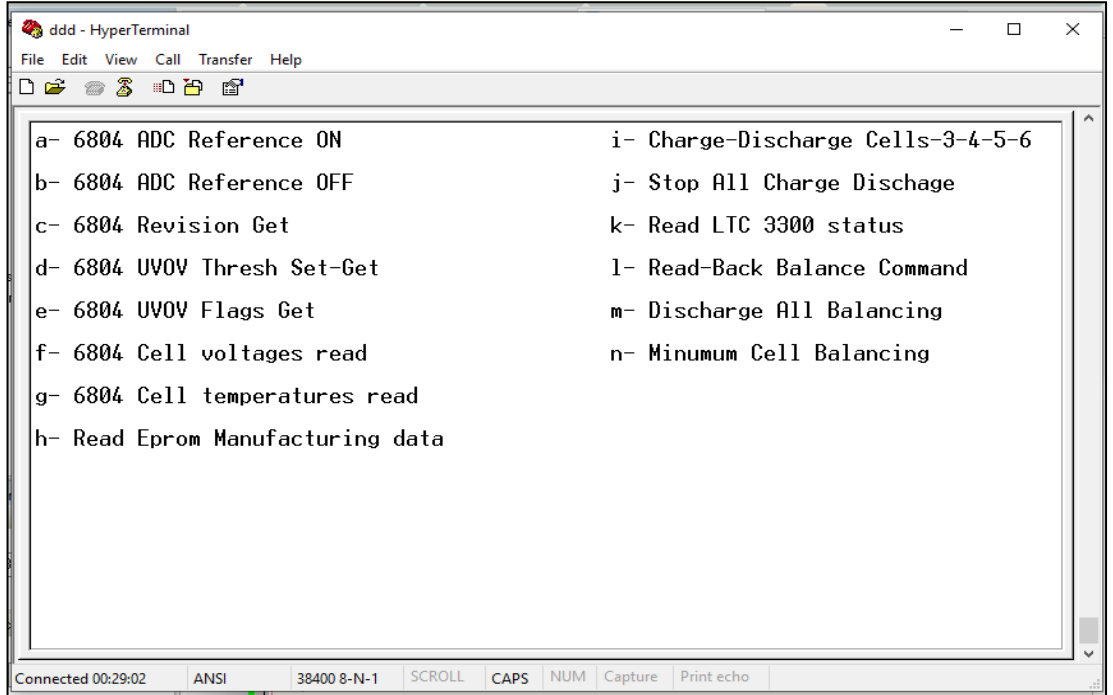
Şekil 5.27: Pil ölçüm düzeneği.



Şekil 5.28: PIC32MX460F512L geliştirme kartı.

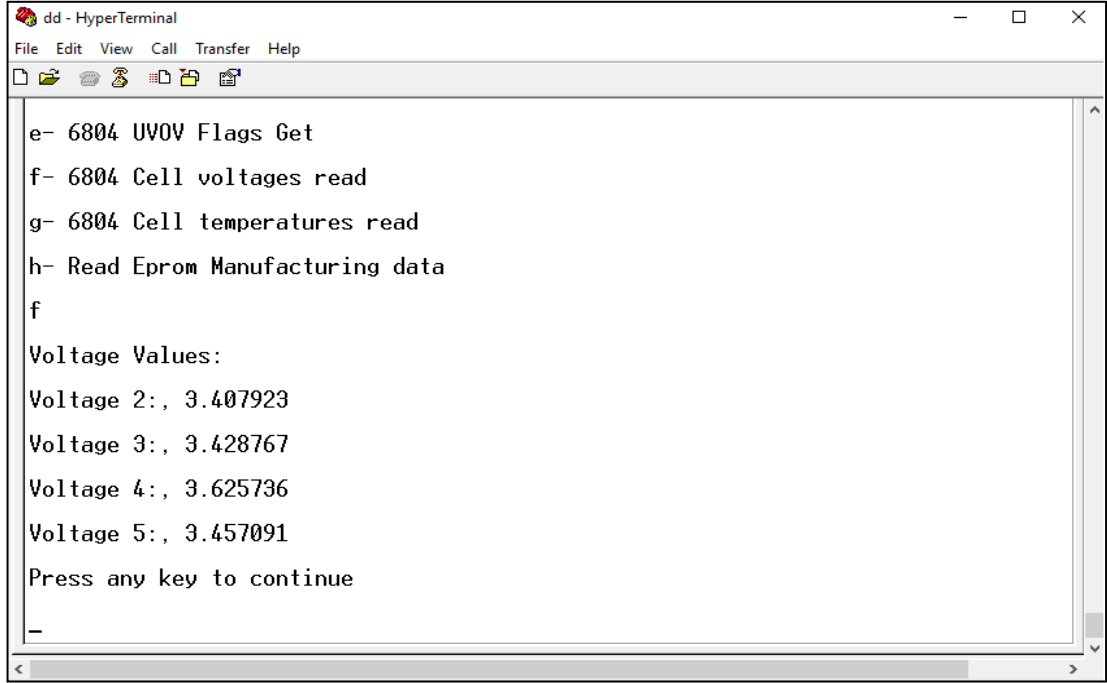
5.3. Geliştirilen Gömülü Yazılım

Gömülü yazılım MikroElektronika MikroC PRO Pic32 derleyicisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Gömülü yazılım RS232 hattı üzerinden, bilgisayar ile haberleştirilmektedir. Bilgisayar ve işlemci haberleşmesi ve veri toplama Hyperterminal programı ile gerçekleştirilmektedir. Toplanan veriler Matlab yazılımı ile analiz edilmektedir. Gerçekleştirilen gömülü yazılım menü tabanlıdır. Oluşturulan menü sistemi, RS232 hattı üzerinden Hyperterminal ekranına gönderilmekte ve yapılacak işlem bu menü üzerinden seçilmektedir. Şekil 5.29’da bu menü sistemi gösterilmektedir. İlk olarak minimum gerilime sahip hücrelerin şarj edilmesi yöntemine dayanan bir yazılım geliştirildi. Hücrelerin gerilimi %2 seviyesinde eşitlendiğinde dengeleme işlemi durdurulmaktadır. Geliştirilen gömülü yazılım DC2100B-C kartının tüm özelliklerini kullanabilmektedir. EEPROM, LTC6804-2, LTC3300-1, LTC1380 entegrelerinin programlanmasına yönelik tüm yazılımlar yeniden geliştirilip, DC2100B-C kartı üzerinde bulunan PIC18F47J53 gömülü yazılımı, MikroElektronika MikroC PRO derleyicisine ve PIC32MX460F512L işlemcisine uyarlanarak revize edilmiştir. Diğer Ekler (CD)’de bu kodlar verilmektedir.



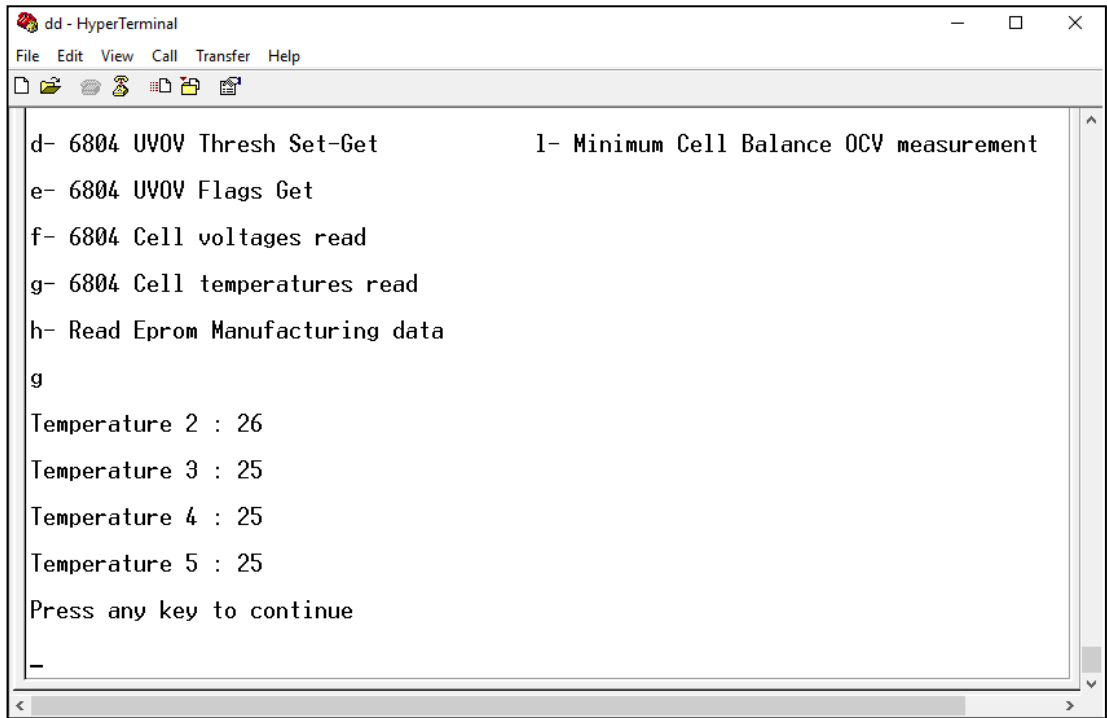
Şekil 5.29: Hyperterminal veri ekranı.

Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’de, oluşturulan menü yardımıyla ölçülen sıcaklık ve gerilim değerleri gösterilmektedir.



```
dd - HyperTerminal
File Edit View Call Transfer Help
e- 6804 UV0V Flags Get
f- 6804 Cell voltages read
g- 6804 Cell temperatures read
h- Read Eprom Manufacturing data
f
Voltage Values:
Voltage 2:, 3.407923
Voltage 3:, 3.428767
Voltage 4:, 3.625736
Voltage 5:, 3.457091
Press any key to continue
-
```

Şekil 5.30: Ölçülen voltaj değerleri.

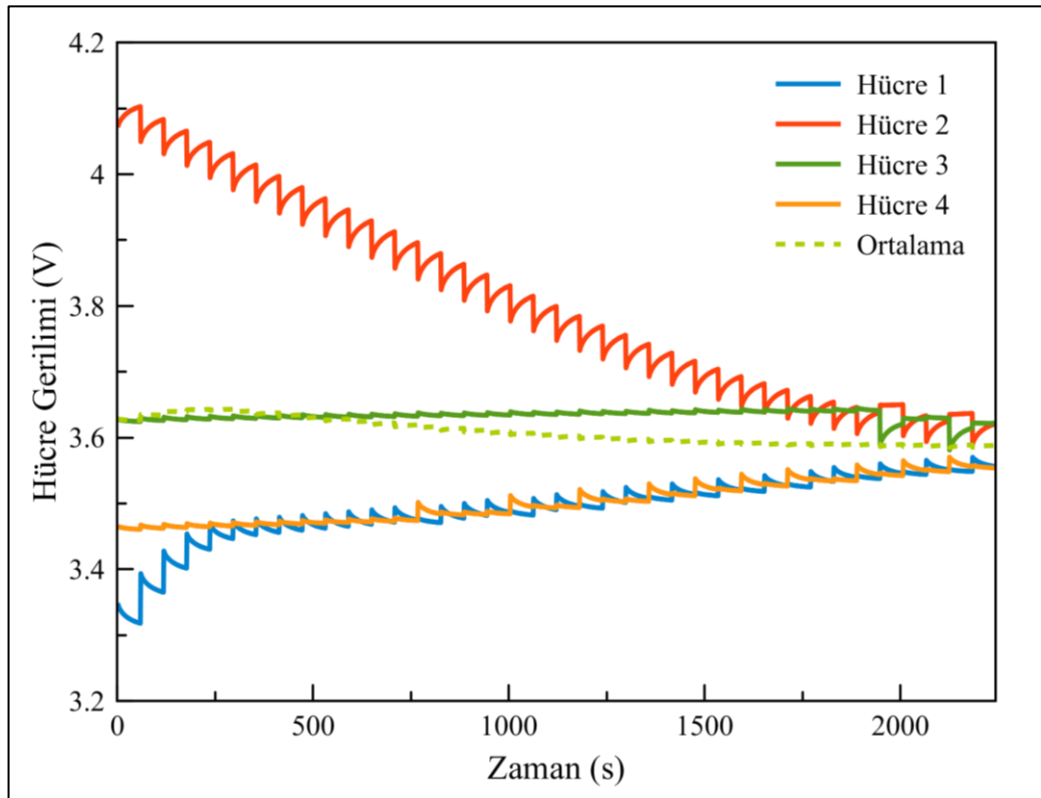


```
dd - HyperTerminal
File Edit View Call Transfer Help
d- 6804 UV0V Thresh Set-Get      1- Minimum Cell Balance OCV measurement
e- 6804 UV0V Flags Get
f- 6804 Cell voltages read
g- 6804 Cell temperatures read
h- Read Eprom Manufacturing data
g
Temperature 2 : 26
Temperature 3 : 25
Temperature 4 : 25
Temperature 5 : 25
Press any key to continue
-
```

Şekil 5.31: Ölçülen sıcaklık değerleri.

5.4. Gerçekleştirilen Batarya Dengeleme İşlemi

Batarya dengeleme işlemi, OCV gerilimleri üzerinden gerçekleştirildi. OCV gerilimleri okunarak maksimum, minimum gerilimler ve hücre gerilimlerinin ortalamadan farkları belirlendi. Eğer herhangi bir hücre geriliminin ortalamadan farkı %2 den büyükse, maksimum gerilime sahip hücre deşarj durumuna, minimum gerilime sahip hücre şarj durumuna getirildi. Bir dakika şarj-deşarj işlemi yapılarak, bir dakika dinlenme işlemi yapıldı. Dinlenme işleminden sonra, OCV gerilimleri tekrar okunarak denge durumuna bakıldı. Bu işlemler tüm hücrelerin OCV gerilimlerinin ortalamadan farkları %2'den küçük olduğu noktaya kadar devam edildi. Bu adımlar gerçekleştirildikten sonra elde edilen dengeleme grafiği Şekil 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.32: Batarya dengeleme grafiği.

Bu yöntem SOC-OCV gerilimleri arasındaki değişimden kaynaklı problemlerden dolayı geliştirildi. Şarj-deşarj işlemi ve dinlenme süreleri kısa tutuldu. Kısa şarj-deşarj işlemi ile batarya iç kimyasının çok fazla değişmesine izin verilmemiş

oldu. Böylece OCV gerilim ölçümü için genelde kullanılan 20 dakika dinlenme süresi de kısaltılabildi. Geliştirilen algorithmada, bu süre 1 dakikaya indirildi.

Özetle bu dengeleme yöntemiyle lityum pillerin voltaj dengelemesi başarılı bir şekilde yapıldı. Pil çalışma durumunda oluşabilecek aşırı voltaj ve aşırı deşarj durumlarına karşı koruma önlemi alınarak bu dengeleme işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmiş oldu.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, bir batarya yönetim sistemi oluşturulmuştur. DC2100B-C kartından faydalanılarak yapılan bu çalışmada, bir batarya algoritması kurularak dengeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu dengeleme işlemi öncesinde bazı çalışmalar yapılmıştır.

Tezin giriş kısmında bataryalar ve lityum bataryalar hakkında bilgi verilmiştir. Batarya ile ilgili çalışmanın daha rahat takip edilebilmesi için temel kavramlar üzerinde durulmuştur.

Tezin ikinci bölümünde dengeleme sistemleri anlatılmış, aktif ve pasif dengeleme arasındaki verim farkı sebepleriyle anlatılmıştır. Birçok aktif dengeleme yöntemi olduğu için, kendi içerisinde aktif dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılabilmesi için aktif dengeleme yöntemleri anlatılmıştır.

Tezin üçüncü kısmında çalışmanın temel yapıtaşını oluşturan flyback dönüştürücüler anlatılmıştır. Kartın çalışma mantığının iyi bir şekilde kavranabilmesi için DC2100B-C kartının dönüştürücü yapısı üzerinde durulmuştur.

Tezin dördüncü bölümünde batarya dengeleme işlemi için yapılan adımlar anlatılmıştır. DC2100B-C kartı anlatılarak, kartın çalışma mantığı anlaşılmıştır. Dengeleme işlemini yapmadan önce kullanılan piller tanınmıştır. Pillerin SoC ve direnç eğrileri kullanılan Coulomb yöntemi ve Kalman filtresi yöntemi ile hesaplanıp karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda Kalman filtresinin Coulomb sayma yönteminden daha etkin çalıştığı gözlenmiştir.

Tezin son adımı olarak bataryanın sıcaklık değerleri ve voltaj değerleri okunup, pilin çalışma durumları da göz önünde bulundurularak bir algoritma geliştirilip voltaj dengelemesi yapılmıştır. Ancak yapılan çalışmalar neticesinde dengeleme işleminin iyi yazılmış bir yazılım ile Kalman filtre veya Coulomb sayma yöntemiyle verimli bir şekilde gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2019), https://tr.wikipedia.org/wiki/Lityum_iyon_pil, (Erişim Tarihi: 10.03.2019).
- [2] Ceylan M., (2013), “Lityum-iyon Tabanlı Pillerin Elektriksel Eşdeğer Modelinin ıkartılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [3] Andrea D., (2010), “Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs”, 1th Edition, Artech Hause.
- [4] Web 2, (2019), <https://www.pilsitesi.com/news14/Pil-Nedir->, (Erişim Tarihi: 15.06.20019).
- [5] Barsukov Y., Qian J., (2013), “Battery Power Management for Portable Devices”, 1st Edition, Artech Hause.
- [6] Ceylan M., (2013), “Lityum-iyon Tabanlı Pillerin Elektriksel Eşdeğer Modelinin ıkartılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [7] McCurlie L., (2016), “Redistributive Non-Dissipative Battery Balancing Systems with Isolated DC/DC Converters: Theory, Design, Control and Implementation”, Yüksek Lisans Tezi, McMaster University.
- [8] Web 3, (2019), <https://challenge.tubitak.gov.tr/assets/batarya-yonetim-sistemleri.pdf>, (Erişim Tarihi: 23.06.2019).
- [9] Zong D., (2016), “Active Cell Balancing for Lithium-ion Battery in Battery Management System”, Yüksek Lisans Tezi, Hong Kong University of Science and Techonology.
- [10] Muratoğlu Y., Alkaya A., (2015), “Elektrikli Araç Teknolojisi ve Pil Yönetim Sistemi-İnceleme”, VIII. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 243-248, Adana, Türkiye, 15-16 Ekim.
- [11] Meng J., Luo G., Ricco M., Swierczyski M., Stroe D., Teodorescu R., (2018), “Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles”, 8 (5), 1-17.
- [12] Tezde E. İ., Okumuş H. İ., (2018), “Batarya Modelleri ve şarj Durumu (SoC) Belirleme Batrrey Models and State of Charge (SoC) Determination”, 8 (1), 21-25.
- [13] Web 4, (2019), http://akademik.duzce.edu.tr/Content/Dokumanlar/ugurhasirci/DersNot_lari/901dca8c-a3e7-4144-8c4e-3bdb7976f991.pdf, (Erişim Tarihi: 13.09.2019).

- [14] Web 5, (2019), https://tr.wikipedia.org/wiki/Kalman_Filtresi, (Erişim Tarihi: 01.09.2019).
- [15] Narayan A., (2017), “State and Parametric Estimation of Li-Ion Batteries in Electrified Vehicles”, Yüksek Lisans Tezi, KTH Royal Institute of Technology.
- [16] Yu Z., Huai R., Xiao L., (2015), “State-of-Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using a Kalman Filter Based on Local Linearization”, *Energies*, 8(8), 7854-7873.
- [17] Lukic S. M., Cao. J, Bansal R.C., Rodriguez F., Emadi A., (2008), “Energy Storage Systems for Automotive Applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (6), 2258-2267.
- [18] Sayın A. A., Yüksel İ., (2011), “Elektrikli Renault Fluence Aracı, Lityum-İyon Bataryasının Modellenmesi ve Batarya Yönetimi”, *Mühendis ve Makina*, 52 (615), 75-82.
- [19] Moore S. W., Schneider P.J., (2001), “A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems”, SAE Technical Paper 2001-01-0959.
- [20] Daowd M., Omar N., Van Der Bossche P., Van Mierlo J., (2011), “Passive and Active Battery Balancing comparison on MATLAB Simulation”, 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, IL, USA, 6-9 Eylül.
- [21] Daowd M., Antoine M., Omar N., Bossche P. V., Van Mierlo J., (2013), “Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements”, *Energies*, 6 (4), 2149-2174.
- [22] Web 6, (2019), https://challenge.tubitak.gov.tr/assets/2018_batarya_yonetim_sistemi.pdf, (Erişim tarihi: 12.08.2019).
- [23] Park H. S., Park K. B., Moon G. W., Lee J. H., (2009), “Design of a Charge Equalizer Based on Battery Modularization”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58 (7), 3216-3223.
- [24] Phung T. H., Crebier J. C., Chureau A., Collet A., Nguyen V., (2011), “Optimized Structure for Next-to-Next Balancing of Series-Connected Lithium-Ion Cells”, 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Fort Worth, TX, USA, 6-11 Mart.
- [25] Park S. H., Kim T. S., Park J.S., Moon G.V., Yoon M.J., (2007), “A New Battery Equalizer Based on Buck-Boost Topology”, 2007 7th International Conference on Power Electronics, IEEE, Daegu, Güney Kore, 22-26 Ekim.

- [26] Zhi-Guo K., Chun-Bo Z., Ren-Gui L., Shu-Kong C., (2006), “Comparison and Evaluation of Charge Equalization Technique for Series Connected Batteries”, 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Güney Kore, 18-22 Haziran.
- [27] Zehendner M., Ullmann M., (2016), “Power Topology Handbook”, Texas Instruments.
- [28] Hong W., Ng K. S., Hu J. H., Moo C. S., (2010), “Charge Equalization of Battery Power Modules in Series”, The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA, Sapporo, Japonya, 21-24 Haziran.
- [29] Cao. J, Schfield N., Emadi A., (2008), “Battery balancing methods: A comprehensive review”, 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, Çin, 3-5 Eylül.
- [30] Lee Y. S., Cheng G. T., (2006), “Quasi-Resonant Zero-Current-Switching Bidirectional Converter for Battery Equalization Applications”, IEEE Transactions on Power Electronics, 21 (5), 1213-1224.
- [31] Çoruh N., Erfidan T., Ürgün S., Öztürk S., (2009), “Flyback Dönüştürücü Tasarımı ve Analizi”, 3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 297-302, Kartepe, Kocaeli, Türkiye, 21-22 Mayıs.
- [32] Pressman A. I., Billings K., Morey T., (2009), “Switching Power Supply Design”, 3th Edition, McGraw-Hill
- [33] Salem T. E., Tipton W., Porschet D., (2006), “Fabrication and Practical Considerations of a Flyback Transformer for Use in High Pulsed-Power Applications”, 2006 Proceeding of the Thirty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory, 397-400, Cookeville, TN, USA, 5-7 Mart.
- [34] Mcllyman C. W. T., (2004), “Transformer and Inductor Design Handbook”, 3th Edition, Marcell Dekker.
- [35] Web 7, (2019), <https://docplayer.biz.tr/993000-Sarj-dengeleme-sistemleri-icin-cift-yonlu-flyback-devresi-tasarimi.html>, (Erişim Tarihi: 16.05.2019).
- [36] Web 8, (2019), <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/dc2100b-c.html#eb-overview>, (Erişim Tarihi: 24.05.2019)
- [37] Web 9, (2019), <http://gamma.spb.ru/media/pdf/liion-lipolymer-lifepo4-akkumulyatory/ICR18650-26F.pdf>, (Erişim tarihi: 23.01.2019).
- [38] Web 10, (2019), https://www.microchip.com/stellent/groups/designcenter_sg/documents/market_communication/en028061.pdf, (Erişim Tarihi: 13.08.2019).
- [39] Web 11, (2019), <https://rarecomponents.com/store/1718>, (Erişim Tarihi: 05.08.2019).

- [40] Cui W., Wang J., Chen Y., (2018), “Equivalent Circuit Model of Lead-acid Battery in Energy Storage Power Station and Its State-of-Charge Estimation Based on Extended Kalman Filtering Method”, Engineering Letters, 26(4).
- [41] Web 12, (2019), <https://download.mikroe.com/documents/smartdisplays/mikromedia/3/pic32/mikromedia-for-pic32-manual-v110f.pdf>, (Erişim Tarihi: 18.11.2018).

ÖZGEÇMİŞ

Demet ÇAKRAK 1991 yılında Giresun'da doğdu. 2009-2014 yılları arasında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimi gördü. 2015 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Aynı yıl TÜBİTAK UME'de "Yüksek Güçlü Lazer Sistemi Geliştirilmesi" adlı TÜBİTAK 1007 projesinde proje bursiyeri olarak göreve başladı. Şu an TÜBİTAK UME Zaman, Frekans ve Dalgaboyu Laboratuvarı'nda Araştırmacı olarak çalışmaktadır.

EKLER

Diğer Ekler (CD)