

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Lİ-İON BATARYA KARAKTERİZASYONU, MODELLEMESİ VE BATARYA
YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Cahit Özdemir

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Programı

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Lİ-İON BATARYA KARAKTERİZASYONU, MODELLEMESİ VE BATARYA
YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Cahit Özdemir
(504141213)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zümray Dokur Ölmez

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504141213 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Cahit Özdemir**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Lİ-İON BATARYA KARAKTERİZASYONU, MODELLEMESİ VE BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Zümray Dokur**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hakan Temeltaş**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Halit Pastacı
Haliç Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Kasım 2017
Savunma Tarihi : 29 Aralık 2017





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca olumlu eleştirilerde bulunan, bilgisi ve tecrübesiyle bana yol gösteren kıymetli hocam Zümray Dokur Ölmez'e, Arçelik'teki çalışma hayatım boyunca ilk günden beri desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini paylaşan çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta babam Orhan Özdemir, annem Mehriye Özdemir olmak üzere tüm dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2017

Mehmet Cahit Özdemir
(Elektronik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
2. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ (BMS)	5
2.1 Batarya Sistemleri	5
2.2 BMS Fonksiyonları	12
2.2.1 Koruma fonksiyonları	14
2.2.1.1 Akım korumaları	15
2.2.1.2 Gerilim korumaları	17
2.2.2 Monitor etme fonksiyonları	19
2.2.2.1 Batarya gerilim kontrolü	19
2.2.2.2 Batarya akım kontrolü	20
2.2.2.3 Batarya yüzey sıcaklığı ve ortam sıcaklığı kontrolü	21
2.2.2.4 Şarj ve deşarj sıcaklık kontrolleri	22
2.3 Batarya Durum Göstergesi (Gauge).....	22
2.3.1 Hücre göstergesi (Cell Gauge)	23
2.3.2 Bataryanın şarj durumu (SOC).....	23
2.3.3 Bataryanın sağlık durumu (SOH).....	24
2.4 Dengeleme (Balanslama)	25
2.4.1 Aktif balanslama yöntemleri	27
2.4.2 Pasif balanslama yöntemleri.....	34
2.5 BMS Topolojileri	36
3. BATARYA MODELLERİ VE BENZETİMLERİ	41
3.1 Batarya Modelleri.....	41
3.1.1 Thevenin batarya modelinin benzetim sonuçları	45
3.1.2 Thevenin batarya modelinde sıcaklık etkisi	47
3.1.3 6-Sigma yöntemleri ile deney düzeni tasarımı (DOE)	48
3.2 Kullanılan Test Ekipmanları ve Özellikleri.....	51
3.3 Toplanan Verilerin Analizi.....	54
3.4 Batarya Modelinin İyileştirilmesi.....	57
4. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	67
4.1 Geliştirme Kartları.....	67
4.1.1 BQ76930 evm modülü	67
4.1.2 ISL94202 evm modülü.....	69
4.2 BMS Donanım Tasarımları	70

4.2.1 BQ76930 entegresi ile kart tasarımları.....	70
4.2.2 ISL94202 entegresi ile kart tasarımı.....	77
4.3 BMS Yazılım Akış Diagramı ve Modelleme Parametrelerinin Kullanımı	80
5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR.....	87
EKLER.....	91
ÖZGEÇMİŞ	101



KISALTMALAR

BMS	: Battery Management System (Batarya Yönetim Sistemi)
DoD	: Depth Of Discharge (Deşarj Derinliği)
IC	: Integrated Chip
I2C	: Inter Integrated Communication
JEITA	: Japan Electronics and Information Technology Industries Association
MCU	: Microcontroller Unit
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NTC	: Negative Thermal Coefficient
PWM	: Pulse Width Modulation
PTC	: Positive Thermal Coefficient
SMBUS	: System Management Bus
SOC	: State Of Charge (Şarj Durumu)
SOH	: State Of Health (Sağlık Durumu)
SOA	: Safe Operating Area
VRLA	: Valf Regulated Lead Acid



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Literatürde kullanılan modelleme teknikleri ve parametreleri [6-14]. ...	3
Çizelge 2.2 : IEC62133 2.edt Li-ion hücre testleri [21]	15
Çizelge 3.1 : Deşarj testi çıktıları ve hesaplanan değerler örneği (3°C, 3A testi). ...	58
Çizelge 3.2 : Tüm deney sonuçları ile hesaplanan batarya modeli parametreleri	59



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Batarya yönetim sistemi topolojileri[16].	4
Şekil 2.1 : Partian bataryası kesiti [17].	5
Şekil 2.2 : Alessandro Volta'nın ilk pil çalışmaları [18].	6
Şekil 2.3 : Kurşun Asit akü kesiti [19].	8
Şekil 2.4 : Magnezyum Bakır İyodür (Mg-CuI) [19].	8
Şekil 2.5 : Gümüş Çinko Oksit (Ag-Zn) [19].	9
Şekil 2.6 : VRLA tipi kurşun-asit bataryalar [19].	9
Şekil 2.7 : Li-ion batarya çeşitleri ve anot katot materyalleri [20].	10
Şekil 2.8 : Li-ion batarya paketleme tipleri.	11
Şekil 2.9 : Li-ion güvenli çalışma aralığı [20].	13
Şekil 2.10 : Genel BMS Blok Şeması.	14
Şekil 2.11 : Batarya içi ve dışı kısa devre gösterimi [20].	16
Şekil 2.12 : Batarya Paketi kısa devre koruma önlemleri [20].	17
Şekil 2.13 : Batarya gerilimleri kontrol yapısı [20].	18
Şekil 2.14 : Kimyasal sigorta ve çevresel devre elemanları[22].	19
Şekil 2.15 : Batarya gerilimlerini kontrol sınırları ve histerizis yapısı[20].	20
Şekil 2.16 : BMS akım koruma limitleri ve gecikmeleri [20].	20
Şekil 2.17 : Sıcaklık izleme fonksiyonlu BMS blok yapısı [20].	21
Şekil 2.18 : Normal(a) ve JEITA(b) şarj/sıcaklık ilişkisi.	22
Şekil 2.19 : Gauge algoritması genel çıktıları [20].	23
Şekil 2.20 : Li-ion batarya deşarj eğrisi [17].	24
Şekil 2.21 : a) ideal b) eşlenik gerilim düşümlü c) gerçek durum batarya [17].	26
Şekil 2.22 : Aynı uç gerilimli dengeli/dengesiz batarya paketleri [17].	26
Şekil 2.23 : Hücre balanslama yöntemleri topoloji ağacı [23].	27
Şekil 2.24 : Anahtarlama tekil kapasite topolojisi [23].	28
Şekil 2.25 : Anahtarlama çoklu kapasite topolojisi [23].	29
Şekil 2.26 : Tekli endüktans topolojisi [23].	29
Şekil 2.27 : Texas Instruments PowerPump topolojisi [25].	30
Şekil 2.28 : Tek sargılı trafo topolojisi [24].	31
Şekil 2.29 : Çoklu trafo topolojisi [24].	31
Şekil 2.30 : Çok çıkışlı trafo yapıları a) flyback yapısı b) forward yapısı [23].	32
Şekil 2.31 : Cuk çevirici topolojisi ile balanslama yapısı [23].	32
Şekil 2.32 : Buck çevirici topolojisi ile balanslama yöntemi [23].	33
Şekil 2.33 : Buck/Boosk çevirici ile balanslama yöntemi [23].	34
Şekil 2.34 : Quasi rezonant balanslama topolojisi [23].	34
Şekil 2.35 : Sabit dirençli pasif balanslama yöntemi [23].	35
Şekil 2.36 : Anahtarlama direnç ile pasif balanslama topolojisi [25].	36
Şekil 2.37 : Merkezi BMS örneği.	37
Şekil 2.38 : Modüler BMS örneği.	37

Şekil 2.39 : Master Slave BMS örneği.	38
Şekil 2.40 : Dağıtılmış, ayrık haberleşmeli BMS örneği.	39
Şekil 2.41 : Ayrık Haberleşmesiz (Powerline comm), Dağıtılmış BMS örneği.	39
Şekil 3.1 : Basit batarya modeli.	41
Şekil 3.2 : Geliştirilmiş 1. Tip batarya modeli.	42
Şekil 3.3 : Geliştirilmiş 2. Tip batarya modeli.	43
Şekil 3.4 : Geliştirilmiş 3. Tip batarya modeli.	43
Şekil 3.5 : Thevenin batarya modeli [26].	44
Şekil 3.6 : Lineer elektrik modeli [26].	44
Şekil 3.7 : Değiştirilmiş Thevenin modeli [26].	45
Şekil 3.8 : PSIM programında tasarlanan “değiştirilmiş Thevenin modeli”.	46
Şekil 3.9 : PSIM’de “değiştirilmiş Thevenin modeli” deşarj grafiği.	47
Şekil 3.10 : Simülasyon verileri ile ölçüm verilerinin karşılaştırması.	47
Şekil 3.11 : Farklı sıcaklıklarda için ölçüm(üstte), simulasyon(altta).	48
Şekil 3.12 : 6-Sigma tanım çemberi [28].	49
Şekil 3.13 : Reliasoft test tasarım programı arayüzü.	50
Şekil 3.14 : Reliasoft ile çıkartılan deney adımları.	51
Şekil 3.15 : Cadex C8000 şarj/deşarj cihazı.	52
Şekil 3.16 : Chroma 63804 ve Gwinstek PEL300 elektronik yükleri.	52
Şekil 3.17 : Graphtec midi datalogger GL820 modeli.	53
Şekil 3.18 : Stmstudio PC arayüzü ve yazılım değişkenleri.	54
Şekil 3.19 : Batarya şarj ve deşarj adımları gerilim grafiği [29].	54
Şekil 3.20 : Batarya Paketi deşarj adımları grafiği (5A deşarj).	55
Şekil 3.21 : Batarya Paketi deşarj adımları grafiği (10A deşarj).	55
Şekil 3.22 : GWINSTEK markalı elektronik yük ile oluşan akım aşımı.	56
Şekil 3.23 : Croma elektronik yük cihazı arayüzü ve akım sınırları.	57
Şekil 3.24 : Deney verileri ve değerlendirmesi (3°C, 3A deşarj).	57
Şekil 3.25 : Elde edilen data grafiği (R drop ve R rise).	60
Şekil 3.26 : RC R rise (üstte) ve RC C rise (altta) grafikleri.	61
Şekil 3.27 : RC R drop (üstte) ve RC C drop (altta) grafikleri.	61
Şekil 3.28 : Minitab programı ile yapılan regresyon analizi.	62
Şekil 3.29 : Tüm etkilerin tek grafik üzerinde işlendiği “multivari chart”.	62
Şekil 3.30 : Regresyon analizi sonucu elde edilen etkin faktörler grafiği.	63
Şekil 3.31 : Sıcaklık faktörü tekil alındığında yapılan regresyon analizi.	63
Şekil 3.32 : Elde edilen datalar ışığında önerilen yeni batarya modeli.	65
Şekil 4.1 : BQ76930 benchmarkı için kullanılan geliştirme kartı.	68
Şekil 4.2 : ISL94202 benchmarkı için kullanılan geliştirme kartı.	69
Şekil 4.3 : BQ76930 gerilim okuma devresi.	70
Şekil 4.4 : BQ76930 akım okuma devre şeması.	71
Şekil 4.5 : BQ76930 entegresi yüksüz durum şönt gerilimi.	71
Şekil 4.6 : BQ76930 3.Versiyon (G03) BMS kartı.	72
Şekil 4.7 : BQ76930 G03 mosfet soğutma alanı.	72
Şekil 4.8 : STD45NF75 soğutma alanı ve termal direnç grafiği.	73
Şekil 4.9 : BQ76930 4.versiyon BMS baskı devresi mosfet soğutma alanı.	73
Şekil 4.10 : IPT007N06N soğutma alanı ve termal direnç tablosu.	74
Şekil 4.11 : BQ76930 4.versiyon BMS baskı devresi.	74
Şekil 4.12 : Mosfet geçit ve savak-kaynak gerilimi ilişkisi.	75
Şekil 4.13 : Mosfet geçit, savak-kaynak grafiği ve jonksiyon kapasiteleri.	75
Şekil 4.14 : Devre şeması üzerindeki ölçüm noktaları ve anahtarlama yapısı.	76
Şekil 4.15 : Mosfet geçit gerilimi dalga formu (düşük frekans).	76

Şekil 4.16 : Mosfet geçit gerilimi dalga formu (yüksek frekans).	77
Şekil 4.17 : ISL94202 BMS baskı devresi.....	78
Şekil 4.18 : ISL94202 BMS devre şeması ve varyasyonları	78
Şekil 4.19 : Intersil ISL94202 charge pump kapasiteleri.	79
Şekil 4.20 : Intersil ISL94202 charge pump benzetim devresi.....	79
Şekil 4.21 : Intersil ISL94202 charge pump benzetim devresi çıktıları.	79
Şekil 4.22 : Intersil ISL94202 EEPROM hafıza haritası.	80
Şekil 4.23 : Intersil ISL94202 RAM hafıza haritası.	81
Şekil 4.24 : ISL94202 EEPROM’a yazmak için oluşturulan örnek fonksiyon.	81
Şekil 4.25 : BQ76930 hafıza haritası (kısmen).....	82
Şekil 4.26 : BQ76930 hücre gerilimlerini okuma örnek fonksiyonu.....	82
Şekil 4.27 : Durum makinası örnek fonksiyon yapısı.....	83





Lİ-İON BATARYA KARAKTERİZASYONU, MODELLEMESİ VE BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

ÖZET

Enerji, geçmişten günümüze kadar bütün insanlığın vazgeçilemez kavramları arasında yer almıştır. İnsanlığın işlerini kolaylaştıran veya tamamen elinden alan makinelerin icadı ile bu kavramın önemi daha da artmıştır, günümüzde ise gündelik yaşamın vazgeçilmezi, yokluğunda birkaç çağ geriye düşüldüğü hissi yaratan bir kavram olmuştur. Bu denli parçamız haline gelen enerji ve özellikle elektrik enerjisi insanlığın kullanımına girerken yanında “kablo karmaşasını ve kablo bağımlılığını” da getirmiştir. Bu nedenden dolayı elektrik enerjisi ilk bulunduğundan beri kablosuz enerji iletme ve enerjiyi yanında taşıyabilme/depo edebilme kavramları araştırılmaya, çalışmaya başlanmıştır. Bu tez kapsamında işlenecek olan ana konu kimyasal enerji depolama sistemleri yani bataryalar ve bu sistemlerin en güvenli, en verimli şekilde kullanımının sağlanması olacaktır. Bu bağlamda; bataryaların yıllar içerisindeki gelişimi, geldiği noktalardan bahsedilmiş, günümüze kadar olan süreçte yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda elde edilen farklı tiplerdeki bataryaların avantajları, dezavantajları incelenmiş, günümüzde en yaygın kullanımı olan lityum iyon bataryaların özellikleri ve gereksinimleri detaylı olarak izah edilmiştir.

Lityum iyon bataryanın uygun koşullarda en verimli şekilde kullanılabilmesi için gerekli olan batarya modelinin elde edilmesi ve gösterge (gauge) algoritmaları için altyapı sağlanması, hata koşullarında koruma önlemlerinin alınması için gerekli olan “batarya yönetim sistemi” tasarımı yapılması, yapılan tasarımın gerçekleştirilmesi, yapılan farklı ortam koşullarındaki testler ile elde edilen batarya model parametrelerinin gömülü yazılım çalışmaları ile batarya yönetim sistemine entegre edilmesi işlemleri tez çalışmasının genel çatısını oluşturmaktadır.



LI-ION BATTERY CHARACTERIZATION, MODELLING AND BATTERY MANAGEMENT SYSTEM DESIGN

SUMMARY

Energy has always been one of the most valuable thing in the World. After the invention of machines that sometimes facilitates human life or sometimes takes all charge of human works, the energy concept is getting more and more attention in these days. Moreover the absence of energy makes the people feels like they are living in one or two era before. The energy concept especially electrical energy concept became a vital for human life but this concepts brings some other complaints like cable complexity or cable depency. Because of these issues wireless energy transfer concepts and energy storage concepts are being worked on nearly since the invention of electricity. The main topic of this thesis is chemical energy storage systems, batteries and also safe and efficient operating ways of these batteries. A glance at the improvement of battery industry, invention steps and types of batteries takes places alongside with the survey on today's battery types and their safe operating regions, advantages, disadvantages and especially lithium ion battery specifications and its requirements, in this thesis.

The modelling of lithium ion battery for efficient usage in appropriate conditions, to make an infrastructure for gauge algorithm and to take protection precautions via "battery management system" design, analysing the results of different conditioned battery cycle tests and getting the parameters of battery model, embedding these parameters and battery models in battery management system's microcontroller construct the main steps of this theses.

The first topic in this theses will be the origin of battery and battery needs of human. The ancient battery which found while the train rail installation, belongs to Babilon Empire times. An also the near time history of batteries which are founded by Volta is one of the topic in history of batteries.

After the history of battery, modern battery types and their power density levels, usage properties, use cases has been mentioned in this thesis. Use cases also includes the topics of "which battery needs what" type data. The battery stacking properties, ambient temperature properties, maximum working temperature, minimum working temperature, maximum charge voltage, minimum charge voltage, minimum charge current and maximum charge current properties creates the basic battery management system spectrs. Moreover of these properties, the prediction of battery capacity and prediction of battery health condition are makes the battery management system, more reliable, more useful, more resourceful. Because these extra features comes with more efficiency of battery, more safety of battery.

"The prediction" word is actually related to getting restricted information from somewhere that we couldn't get or measure the all information in control theory. These

restricted info becomes input of some mathematical models and the outputs of this model will be the data that we couldn't measure or get from system. That's why the main part of this thesis is modelling the battery. Battery modelling is used for getting right information about battery remaining capacity, remaining working time and also full capacity of battery without making full charge and full discharge the battery. And also the modelling of battery comes with the information about battery health condition. The battery health related to two main things, one of them is internal resistance change (increase) of battery, other one is the change of battery capacitance in the predefined time period. The state of health data and state of charge data need to battery modelling.

Extracting the battery model parameters from real battery is based on battery discharge tests in different ambient temperature and different discharge currents. In this thesis total 25 discharge tests are performed and all parameter data collected. These parameters evaluated by 6Sigma -statistical control tool- regression analyses with "Minitab" and "Reliasoft" pc softwares. Analyses includes model factors selection and model factors reduction for simple modelling.

The protection of battery and the prediction of battery functions establish the battery management system. Even some battery management systems includes other functions, the fundamental aspects are these two and this thesis covers these topics detailed. When we looked from a wide angle, battery management systems also includes arrangement serial or parallel of battery packs to establish more powerful battery units. The communication protocols, communication types, connection types, connection arrangements, fail safe operation algorithms, master-slave organisation and their duty sharing is also the topics of this thesis in the battery management system point of view.

At the end of thesis work, the last topic is designing the battery management system hardware and software. Different, dedicated BMS ICs which are Texas Instruments Bq76930 and Intersil ISL94202, are used in this phase. For different type of communication topology, two types of hardware with Texas Instruments Bq76930 and one type of ISL94202 hardware, totally three different types of battery management system hardware and software that includes proposed battery model are designed in this thesis.

As a result of all works in this thesis, history of battery, types of battery chemicals and their usage, protection, power density requirements, the effects on human health topics are mentioned. After these topics, battery management system requirements mentioned for lithium ion type batteries, for example, voltage protections, current protections, temperature protections etc. battery management system general system topologies like central BMS, master-slave configured BMS etc. mentioned in battery management system topologies header. Beside the battery management system topologies, also battery balancing systems and their topologies mentioned in two main header; active balancing and passive balancing. Also their subcategory topologies mentioned in detail in this thesis work. All these headers actually creates literature research.

In literature research, another header is battery modelling requirement for state of health estimation and their simulated electronic circuit topologies. More than one topologies are merged and suggested a new model in this thesis work that includes ambient temperature effects and discharge current effects. So that, suggested new model became more robust and more flexible for different types of ambient condition

and load condition of battery pack. This new suggested model also coded in battery management systems microcontroller and got the results of these model output as estimated battery cell and battery pack voltage. As a result of all these thesis work, complete battery management system hardware, software, battery model that acts like infrastructure of state of health estimation.





1. GİRİŞ

Batarya teknolojisinin doğuşu aslında bilinen tarihi süreçte öncelikle 1660 yılında Otto von Guericke'nin statik elektriği keşfi ile başlamıştır. Bu keşfi, bir sülfür kürenin ovalanması sonrası minik kağıt parçalarını ve kuş tüyünü etkilediğini görmesi ve bunun üzerinden doğadaki şimşek yıldırım gibi olayların oluşum prensibi ile bağdaştırılması ile başlamıştır. Fakat günümüz batarya çalışma prensibine sahip yani kimyasal reaksiyonlar ile potansiyel fark oluşturma ve bir elektrolit ile anot katot arasında elektron akışı sağlanması prensibi ile çalışan bataryalar, bilinen tarihte ilk olarak Alessandro Volta tarafından 1800'lü yıllarda bulunmuştur.

Batarya Teknolojisindeki en önemli nokta birincil ve ikincil batarya kavramlarını oluşturan şarj edilebilir batarya hücrelerinin keşfedilmesidir. Bu noktadan sonra enerji depolamaya, taşınabilir enerji kaynaklarına, tekrar tekrar kullanılabilir enerji kaynaklarına sahip olma konuları birçok teknolojik gelişimin yolunu açmıştır.

Taşınabilir telefon, telsiz teknolojileri, uydu teknolojileri ve günümüzde sıklıkla gündeme gelen ulaşım teknolojilerinde batarya kullanımı ve veriminin artırılması konuları, batarya teknolojilerinin çalışılması ve geliştirilmesi elzem konuları arasına girmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Tez çalışmaları kapsamında Li-ion batarya hücrelerinin kimyasal yapısı incelenmiş, uygun elektriksel model literatür çalışmalarından seçilmiş ve deneysel veriler ile elektriksel modelin parametreleri belirlenmiştir.

Literatürdeki elektriksel modelin gelişime açık yanı olarak görülen sıcaklığa bağlı değişimi 6-sigma test tasarım yöntemleri ile belirlenmiştir. Elde edilen parametre değişim fonksiyonları literatürdeki modele eklenerek model geliştirilmiş ve performansı test edilmiştir.

Yapılan analiz ve simülasyon çalışmalarının gerçekleştirilebilmesi için batarya yönetim sistemi (BMS) donanım tasarımları yine tez kapsamında tasarlanmış ve

üretilmiştir. Koruma önlemleri olmadan Li-ion batarya kullanımının tehlikeli olmasından dolayı donanım tasarımında gerekli olan tüm önlemler göz önünde bulundurulmuş ve tasarıma aktarılmıştır.

Sistemin test edilebilmesi, literatürdeki yöntem ile geliştirilmiş yöntemin karşılaştırılabilmesi için gömülü yazılım çalışmaları yapılmış, donanıma entegre edilmiştir.

Tüm bu çalışmalar daha verimli, daha tehlikesiz batarya kullanımı sağlayabilmek, batarya içinde kalan enerji miktarını daha doğru ölçebilmek ve kalan kullanım süresini daha doğru tahmin edebilmek için bu tez kapsamında çalışılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Literatürde yapılan çalışmalar batarya kullanım alanlarının gelişimi ile doğru orantılı olarak ilerlemektedir. Bu bağlamda da batarya modelleme, enerji miktarı tahmini ve kalan kullanım süresi tahminleri ile ilgili çalışmalar çoğunlukla son yıllara dayanmaktadır. Bunun nedeni ise son yıllarda gelişmekte olan elektrikli ulaşım araçlarının popülaritesinin artmasıdır. Daha öncesinde ise uzay, uydu teknolojileri ve mobil telefon, telsiz teknolojileri için çalışmalar yapılmıştır fakat nicel olarak bakıldığında son yıllara göre daha azdır [1].

Tez çalışması kapsamındaki literatür araştırmaları, batarya modelleme ve batarya yönetim sistemi adı altında iki bölümde ele alınmıştır. Batarya modelleme ile ilgili ilk yayınlar kurşun-asit bataryaların modellemesi üzerinedir [2-4].

1873 yılında *Journal of the Society of Telegraph Engineers* dergisinin ilk sayısında yayınlanan makalede bataryaların modellemesi adına yapılan ilk deneyler ve iç direnç ölçme konusunda karşılaşılan ilk sorunlardan bahsedilmiştir[2]. Batarya modelleme adına yapılan ilk çalışmalar bu yıllarda başlamış ve iç direnç ölçümü modelleme için yeterli görülmüştür.

1954 yılında kurşun asit bataryanın deşarj akımı genliği ile toplam kapasite ilişkisini deneysel olarak gösteren çalışmalar E. A. Hoxie tarafından yapılmış ve yayınlanmıştır [3]. Burada gösterilen çalışmanın ana çıktısı 1987 de Alman bilim adamı William Puekert'in öne sürdüğü ve yasalaşan teorisinin, deneysel olarak gösterilmesi üzerine yapılmıştır ve günümüzde de bu çalışmanın geçerliliği devam etmektedir [4].

Batarya modelleme ve kullanım ömrü tahmin (Gauge) algoritmalarının aktif ve düşük hata paylı kullanım ihtiyacı genel anlamda mobil telefon/telsiz ve sonrasındaki taşınabilir bilgisayar uygulamaları ile yani 90'lı yıllardan itibaren artış göstermeye başlamıştır. Bunu “The Earth is Mobile - Power” başlıklı ve yazarı Texas Instruments Güç Elektroniği Departmanında yer alan Taylor R. Efland'ın yayını ile görmemiz pek de güç değil [1].

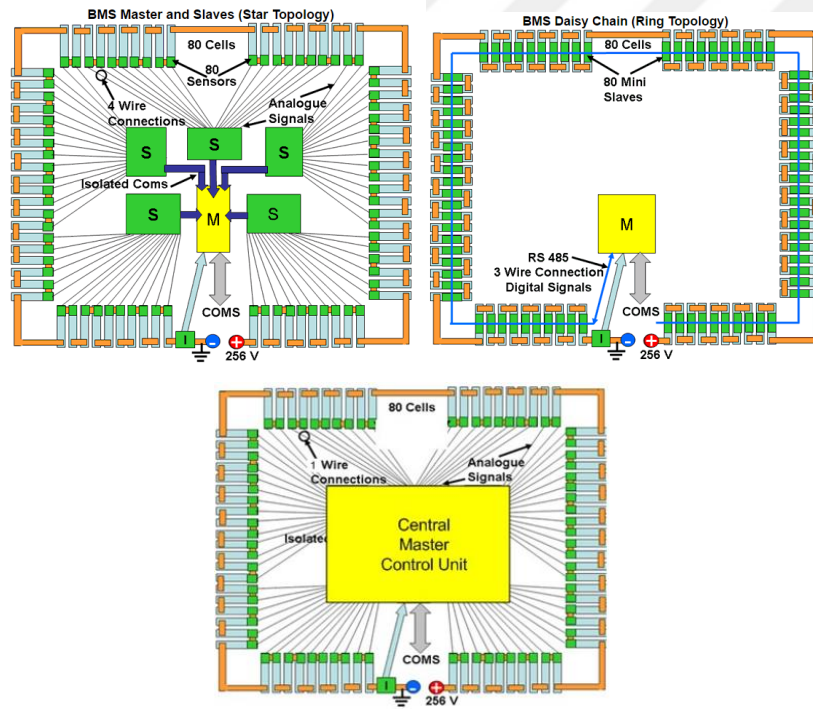
Bu alandaki gelişimler cep telefonlarında yer alan batarya durum çubuklarının kesinliği ile görülebilmektedir. Daha önceleri tek led ile şarj bittiği ifade edilirken, daha sonraları, üç bölmeli bargraf şeklinde olan “kalan batarya” simgesi şimdilerde rahatlıkla yüzdesel olarak verilebilmekte, üstelik daha önceki kullanım alışkanlıklarını ve bataryanın yaşlanma etkisini göz önünde bulundurarak kalan kullanım miktarını zaman birimleri ile verebilmektedir [5]. Bu çözünürlükte bir batarya modellemesinde, seçilen yöntem ve model girdilerinin doğru belirlenmesi önemlidir. Literatürde standart yöntemler ve devre şemaları ile yapılan modellemelere karşın, tablolama yöntemi, Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi yöntemi, EKF (Extentended Kalman Filter) gibi yöntemler ile de modelleme, parametre kestirimi Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi yapılabilmektedir [6].

Çizelge 1.1 : Literatürde kullanılan modelleme teknikleri ve parametreleri [6-14].

Model Değişkenleri	Model Tipi	Parametre Kullanım Tekniği
SOC	Look-Up tablosu	En küçük kareler yöntemi
SOC	Polinom	EKF
SOC, Sıcaklık	Polinom	Tanımlanmamış
SOC, Sıcaklık, Akım	Polinom	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
SOC, Sıcaklık, Akım	Polinom	EKF
SOC, Sıcaklık, Akım, SOH	Tanımlanmamış	
SOC, Sıcaklık, Akım, SOH	Polinom ve düzeltme faktörü	Tanımlanmamış
SOC, Sıcaklık, Akım, SOH	Polinom	Tanımlanmamış

Bu modellere ek olarak ideal batarya modelinden başlayıp kompleks modellere kadar Akron Üniversitesi yüksek lisans tezi olarak yayınlanan kaynakta [14] ideal model, iç direnç modeli, Thevenin modeli, geliştirilmiş Thevenin modeli ve nonlinear batarya modelleri incelenmiş ve bu modellerin avantajları, dezavantajları ve gerçek davranışa yaklaşıklığı incelenmiştir.

Literatürde modellemenin yanında batarya yönetim sistemleri ve bu sistemlerin yüksek güç seviyelerinde kullanımı için kurgulanan batarya yönetim sistemi topolojileri ile ilgili de yayınlar bulunmaktadır. Bu topolojiler en genel anlamıyla incelenmiş ve “Institute for Data Processing Technische Universität München”de “A Smart Battery Management System for Electric Vehicles using Powerline Communication” başlığı ile yayınlanan master tezinde yer almıştır [15]. Burada işlenen BMS topolojileri; Merkezi BMS, Dağıtılmış BMS, Master-Slave BMS ve Güç hattı (Powerline) Haberleşmeli BMS şeklinde olmuştur. Benzer yapıda uygulama örnekleri “mpoweruk” adlı batarya bilgi paylaşım sitesinde [16] de işlenmiştir. Görüldüğü üzere farklı haberleşme yapıları ve farklı seviyelerde kontrol ünitesi ile kurgulanan batarya yönetim sistemleri Şekil 1.1 de yer almaktadır.



Şekil 1.1 : Batarya yönetim sistemi topolojileri[16].

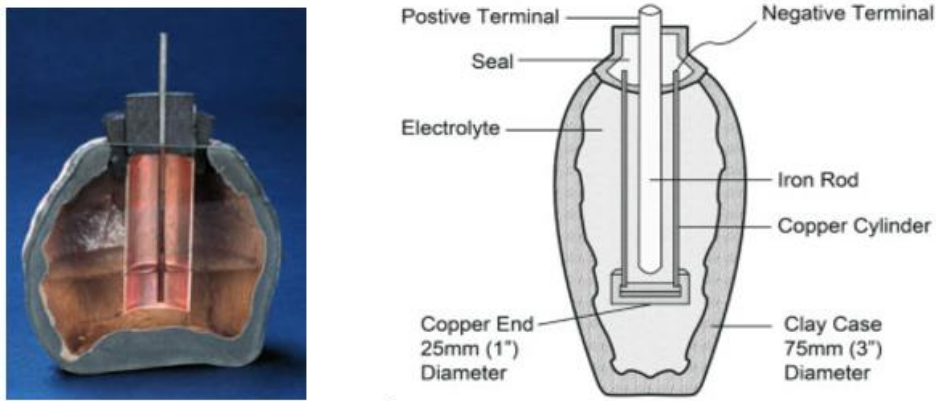
Burada görülen “daisy chain” tipinde haberleşme yapısına sahip batarya yönetim sistemi tez çalışmaları kapsamında çalışılmış ve Bq76930 kart tasarımı başlığında detay bilgiler verilmiştir.

2. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ (BMS)

2.1 Batarya Sistemleri

Batarya sözcüğü eski bir Fransız kelimesi olan “batterie”den gelmekte ve anlamı “yenme/kazanma eylemi”dir. Kelime anlamının geldiği nokta ise savaş alanında çoklu gruplu savaş topunun savaşı kazandırma eylemi ile oluşmuştur. 1700’lü yıllarda bu kelimenin enerji depolama üniteleri için kullanılma sebebi ise ilk bataryaların düşük gerilimde olması ve kullanışlı bir gerilim seviyesine gelmesi için seri olarak birçok bataryanın bağlanması gerektiğinden dolayıdır. Sıralanmış batarya hücreleri, savaş alanındaki toplara yani yine dilimizde eş anlamlı olarak kullanılan savaş bataryalarına benzetilmiş ve kullanılmıştır [11].

Giriş kısmında “ilk batarya hücresinin bulunuşu bilinen tarihte 1660’ta Otto von Guericke tarafından” ifadesi yer almaktadır. Burada “bilinen tarih” olarak bahsedilmesinin sebebi, çok daha önceki yıllara ait batarya benzeri yapıların da günümüzde bulunmuş ve incelenmiş olmasıdır. Bahsedilen ve Şekil 2.1’de verilen batarya “Parthian bataryası” olarak bilinmekte ve yapılış tarihinin yaklaşık 2000 yıl öncesine dayandığı düşünülmektedir [11].



Şekil 2.1 : Partian bataryası kesiti [17].

1936 yılında Bağdat yakınlarında tren yolu çalışmaları için kazı yapan işçilerin şans eseri bulduğu bu tarih öncesi batarya, dışı çamurdan yapılmış çömlek tipi bir yapıya

sahiptir. İçinde bulunan boşluk kısmı elektrolitik bölümü olarak düşünülmemekte ve elektrolitik olarak tahminen sirke kullanılmaktadır. Anot katot yapıları bakır ve demir elementlerinden yapılmıştır. Fakat bilim çevreleri bu yapının enerji depolama yerine metal kaplama yapmak için kullanıldığı kanısındadır. Bu nedenle ilk batarya olarak kabul edilmemektedir.

1660'da Otto von Guericke'nin bulduğu ilk batarya örneği üzerine, 1774'te Ewald Georg von Kleist, Leyden Kavanozu ile batarya çalışmaları yapmış ve Şekil 2.2'de görülen Alessandro Volta 1800 yılında ilk kullanılabilir bataryayı yapmıştır.



Şekil 2.2 : Alessandro Volta'nın ilk pil çalışmaları [18].

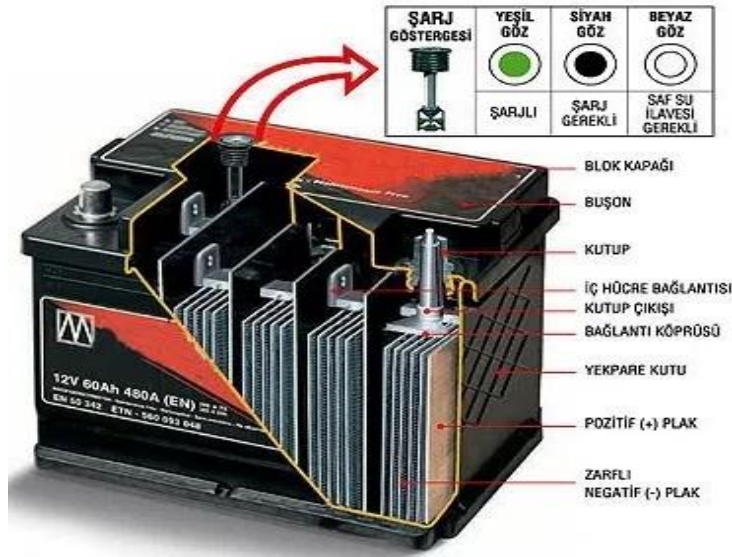
Volta'nın ilk çalışmaları dahil yapılan batarya örneklerinin tamamı sadece tek sefere mahsus çalışan ve çalışma prensibi ark ile elektriksel deşarj yapma olan yapılarıdır. Fakat voltanın çalışmalarının devamında daha uzun süreli enerji akışı ve dolayısıyla depolama sağlayan bataryayı geliştirmiş ve Fransız hükümeti bu çalışmaları tanıyan ilk devlet olmuştur. Geliştirilen bu teknolojinin kullanım alanları genellikle çelik kablo eritme, şok veren silah yapımı ve suyun elementlerine ayrılması konuları olmuştur. Bunun yanında Sir Humphry Davy madencilerin kullanabilmesi için batarya yapısından faydalanarak lamba yapmıştır [18]. 1802 yılında William Cruickshank ilk seri üretilebilir bataryayı yapmıştır. Bu bataryanın yapımı için kare olarak kesilmiş bakır ve çinko elektrotlar, yaprak yaprak kesilip bir kutu içerisine yerleştirilir ve sonrasında bu tahta kutu içerisine elektrolitik sıvı (seyreltilmiş asit) doldurularak yalıtımlı bir kapakla kapatılırdı ve batarya kullanıma hazır hale gelirdi. Bu yapı ile ilk akışkan batarya (flooded battery) elde edildi ve halen günümüzde kullanılmakta olan

kurşun-asit akülerin yapısı ile çok benzerlik göstermektedir. Fakat bu elde edilen batarya şarj edilebilir batarya yani ikincil batarya değil aksine birincil yani şarj edilemeyen batarya tipindedir.

Batarya teknolojisindeki tarihi gelişmelerin en önemlilerinden bir tanesi de ikincil bataryanın yani şarj edilebilir bataryanın bulunmasıdır. 1859 yılında Fransız fizikçi Gaston Plante ilk şarj edilebilir bataryayı keşfetmiştir. Bulunan bu batarya günümüzdeki kurşun-asit bataryaya teknolojik ve kullanım özellikleri bakımından çok yakındır.

1899 yılında İsveçli bilim adamı Waldmar Jungner nikel kadmium (Ni-Cd) batarya tipini buldu. Bu bataryada nikel elementi pozitif elektrodu oluştururken kadmium elementi ise negatif kutbu oluşturmaktaydı. Fakat o dönemlerde kadmium elementi zor bulunan ve pahalı elementler arasında olduğu için yaygınlaşması gecikti. Bunun devamında Thomas Edison bu elementin yerine kolay bulunabilen demir elementini koydu ve yeni bir batarya tipi olan nikel-demir(Ni-Fe) bataryasını buldu. Bu iki batarya tipi de düşük enerji kapasitesi ve kendi kendine deşarjlarının fazla olması nedeniyle bu halleri ile yaygınlaşamadılar. 1932 yılına kadar bu şekilde devam eden batarya teknolojisi, Schlecht ve Ackermann'ın buluşları ile (sintered pole plate) elde ettiği yüksek akım kapasitesi ve uzun ömür sayesinde yaygınlaştı. Bu gelişmeler ile Ni-Cd bataryalar uzun yıllar şarj edilebilir batarya olarak kullanılmaya devam etti. 1990 yıllarında çevreci örgütlerin kadmium elementinin çevreye ve insan sağlığına verdiği zararı öne sürmeleri üzerine kadmium içerikli pillerin kullanımı azaldı ve hatta yayınlanan “*The Battery Directive 2006/66/EC*” direktifi ile Avrupa Birliğinde satışı yasaklandı. Bunun yerine nikel metal adlı kadmium içeriği olmayan bataryalar kullanım alanı buldu. 1991 yılında Sony markasının yaptığı araştırma geliştirme faaliyetleri sonucunda lityum temelli piller ilk kez satışa ve kullanıma sunuldu. Günümüzde birçok elektronik cihaz lityum bazlı bataryalar ile enerjilenmektedir.

Genel olarak günümüzde kullanılan bataryaları inceleyecek olursak, Şekil 2.3'te görülen kurşun-asit bataryalar ulaşım, kesintisiz güç kaynaklarında, telekomünikasyon ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Enerji yoğunluğu yani enerji/hacim oranı yeni teknolojilere göre düşük olduğundan yerini yeni teknoloji bataryalara bırakma eğiliminde olmasına rağmen günümüzde kullanımı oldukça yaygındır. Teknolojik gelişimine elektrolit tipinde yapılan değişiklikler/katkılar ile devam etmektedir.



Şekil 2.3 : Kurşun Asit akü kesiti [19].

Nikel Kadmiyum Bataryalar Starter Akülerde, Uçak Ve Helikopterlerde (muhabere amaçlı cihazlarda) kullanım alanı bulmaktadır. Nikel kadmiyum bataryalar şarj edilebilir bataryalar içerisinde tarihsel bir öneme sahiptir. Fakat daha önce bahsedildiği üzere zararları nedeniyle kullanım alanı azaldı.

Şekil 2.4'te görülen Magnezyum Bakır İyodür (Mg-CuI) gibi özel kimyaya sahip bataryalar, genel maksatlı kullanımda olmayıp, özel kullanım alanlarına sahiptir. Mg-CuI batarya tipi genellikle su altı çalışmalarında (Sonoboy Bataryası) kendine yer bulmaktadır.



Şekil 2.4 : Magnezyum Bakır İyodür (Mg-CuI) [19].

Gümüş Çinko Oksit (Ag-Zn) kimyasında anot ve katoda sahip bataryalar yaygın kullanım alanına sahip değildir. Askeri amaçlarla kullanılan bu tip bataryaların deşarj akım kapasitesi yüksektir [9]. Şekil 2,5'te görülen Gümüş Çinko Oksit bataryanın genel özellikleri;

Gerilim: 1.5 V

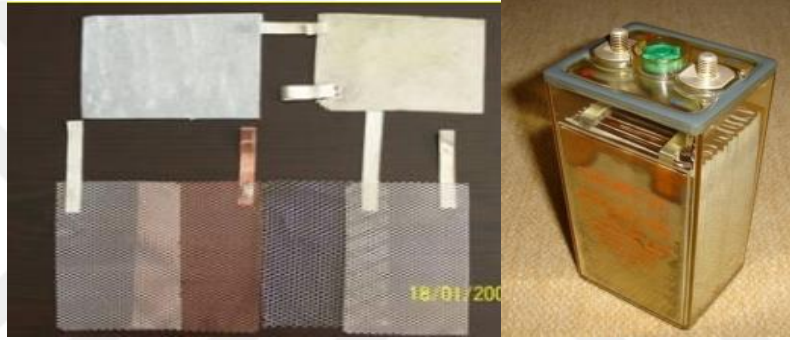
Kapasite: 120 Ah

Elektrolit: KOH (%38) (Potasyum Hidroksit)

Anot : Bakır / Çinko Oksit (ZnO)

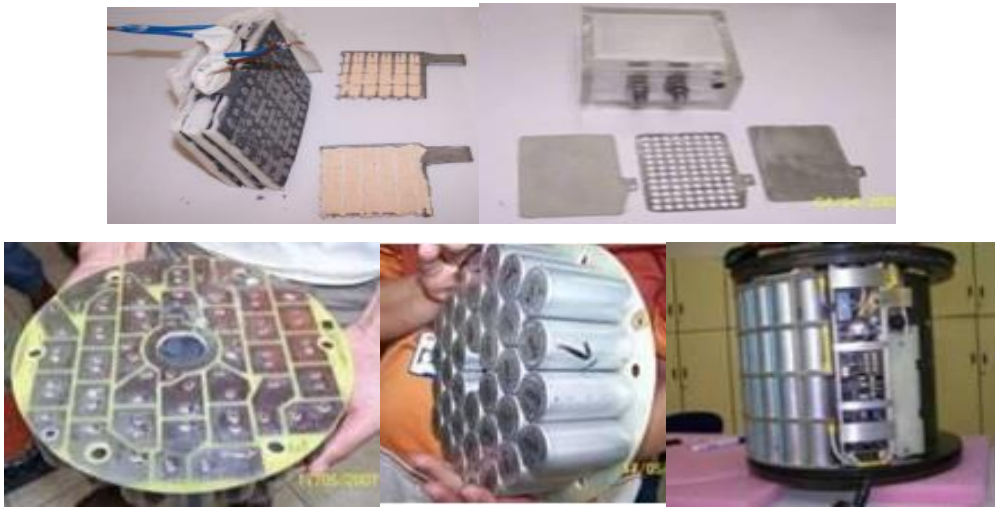
Katot : Gümüş / Gümüş Oksit (Ag/AgO)

Kullanım alanları: Harp ve talim torpido bataryalarıdır.



Şekil 2.5 : Gümüş Çinko Oksit (Ag-Zn) [19].

Şekil 2.6'da verilmiş olan VRLA Tipi Kurşun-Asit (Valf Regulated Lead Acid) batarya tipinin kullanım alanları: Telekom, kesintisiz güç kaynakları, otomotiv, sonar şeklindedir.



Şekil 2.6 : VRLA tipi kurşun-asit bataryalar [19].

Nikel Metal Hidrür Batarya, nikel kadmiyum batarya tiplerinin kullanım zararları üzerine onun yerine yaygınlaşan şarj edilebilir batarya tipidir. Bu batarya kimyasının dezavantajları sırasıyla; yüksek kendi kendine deşarj, şarj esnasında sıcaklık yükselmesi, düşük şarj verimi, görece pahalı olması şeklinde sıralanabilir. Avantajları ise yine sırasıyla; NiCd bataryalara göre daha yüksek kapasite, bakım gerektirmeyen sızdırmaz yapı, kadmiyum içermediğinden dolayı en düşük çevre zararı, hızlı şarj kabiliyeti, uzun çevrim ömrü, uzun raf ömrü olarak sıralanabilir. Hibrit Elektrikli Araç teknolojilerinde, enerji ve güç yoğunluğu (kullanım süresinin uzunluğu ve kısa anda maksimum akım çekilmesi) nedeniyle özellikle tercih edilir [19].

Anod (negatif elektrot) : Metal Hidrür Alaşım

Katod (pozitif elektrot) : Nikel Hidroksit (NiOOH)

Elektrolit : Kostik (KOH)

Ayırıcı(seperatör) : Nonwoven PP (polypropylene)

Li-İon olarak genel isimlendirme, alt başlıklarında birçok farklı bileşiklerden oluşan anot ve katod yapılarından oluşmaktadır. Farklı materyallerin kullanımı sonucunda genel ismi Lityum iyon olan fakat farklı gerilimlerde çalışan, farklı çalışma sıcaklığı aralığına sahip, farklı deşarj akım sınırlarına sahip bataryalar, farklı çevrim ömrüne sahip bataryalar bulunmaktadır. Bu nedenle her farklı kimyadaki batarya için farklı BMS tasarımları yapılmalı ve koruma önlemleri alınmalıdır. Şekil 2.7’de verilen tabloda anot ve katod materyalleri lityum iyon batarya genel başlığının alt kırımlarını oluşturmaktadır. Bunlarda genellikle kullanılan ayırıcı materyali ve elektrolit maddeleri de şu şekildedir:

Elektrolit: Poliolefinler

Ayırıcı(seperatör): LiAsF₆ (Lityum hekzafloroarsenit), LiPF₆ (Lityum hekzaflorofosfat), LiBF₄ (Lityum hekzafloroborat)

Katod Materyali	Li-CoO ₂	Li-Mn ₂	Li-FePO ₄	Li-NMC	Li-NCA	Li-CoO ₂ -	Li-MnO ₂ -	Li-CoO ₂	Li-CoO ₂
Anot Materyali	Grafit							Sert Karbon	LTO (titanate)
V _{max}	4,2	4,2	3,6	4,2	4,2	4,35	4,2	4,2	2,7
V _{mid}	3,6	3,8	3,3	3,65	3,6	3,7	3,75	3,75	2,2
V _{min}	3	2,5	2	2,5	2,5	3	2	2,5	1,5

Şekil 2.7 : Li-ion batarya çeşitleri ve anot katod materyalleri [20].

Avantajlarını sıralayacak olursak;

- Yüksek enerji yoğunluğu ($>150\text{Wh/kg}$, 300Wh/l)
- Yüksek voltaj (3,6V)
- Şarj Verimliliği yüksek
- Düşük kendiliğinden deşarj hızı
- Uzun raf ömrü (5-10yıl)
- Diğer batarya kimyalarına göre yüksek sıcaklıklarda iyi performans

Bunlara karşılık dezavantajlarını da sıralayacak olursak;

- Düşük sıcaklıklarda performansı düşüktür,
- Yüksek hızda performansları düşüktür,
- Zamanla kapasite kaybı mevcuttur,
- Sıcaklığın aşırı yükselmesi sonucu şiddetli reaksiyon oluşmakta, bu nedenle güvenlik problemleri mevcuttur,
- Derin deşarj sonucu bataryanın enerji depolama özelliğini kaybetme olasılığı çok yüksektir

Genel olarak bakıldığında güvenli çalışma aralığı (SOA) düşük olan ama bu düşük alana rağmen avantajları (enerji yoğunluğu, yüksek deşarj akımı, düşük kendi kendine deşarj) nedeniyle oldukça yaygınlaşan ve ulaşım, uzay, iletişim, askeri alanlar dahil birçok alanda kendine yer bulmuş bir teknolojidir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi bataryalar çeşitli paketleme teknikleri ile üretilmektedir.



Şekil 2.8 : Li-ion batarya paketleme tipleri.

Lityum iyon batarya paketleri de çeşitlilik göstermektedir. Bunları genel olarak dört başlık altında toplayabiliriz. *Prizmatik bataryalar*, genellikle bataryası çıkarılabilen cep telefonlarında, telsizlerde yaygın olarak kullanılmışlardır. Bu bataryaların çıkış terminalleri pozitif, negatif ve sıcaklık sensörünün iki kutbu şeklindedir.

Silindirik bataryalar, anot, ayraç ve seperatörü birleştirildikten sonra silindir şeklinde sarılması ve silindir haznenin içine yerleştirilmesi şeklinde üretilir. Mekanik olarak diğer batarya paketlerinden daha sağlamdır. “*Tesla*” marka otomobillerin bataryaları bu tip batarya hücrelerinin binlerce adedinin biraraya gelmesiyle oluşturulmaktadır.

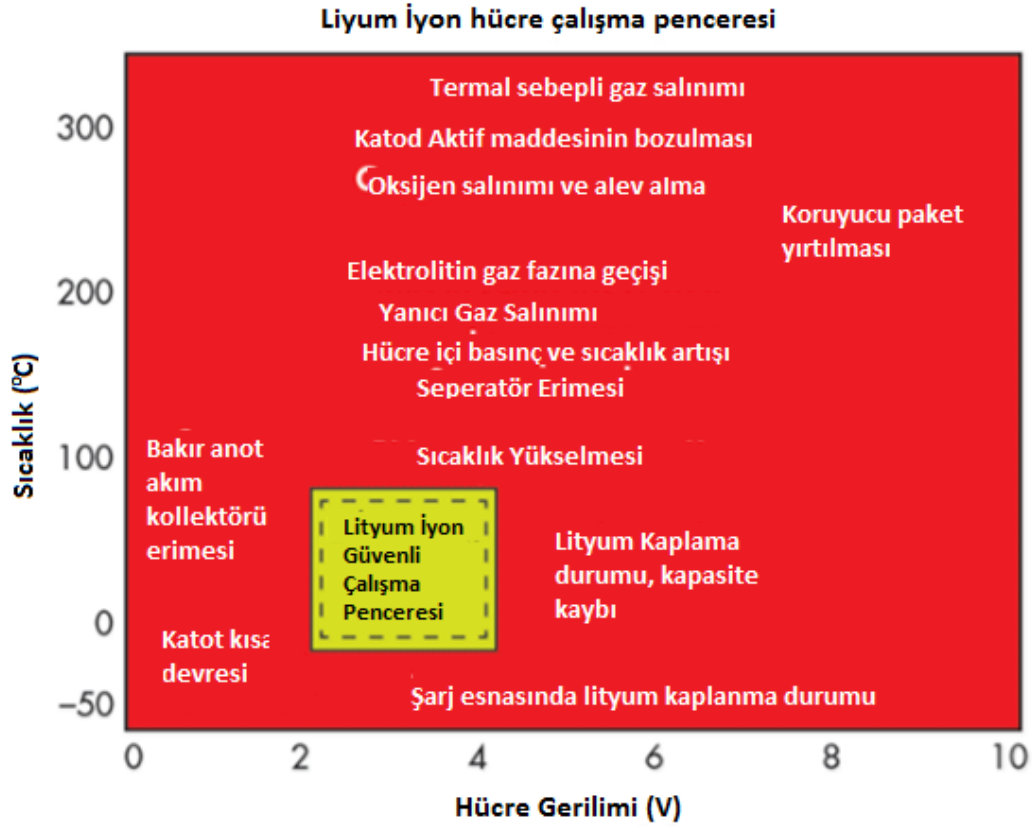
Para tipi hücreler genellikle saatlerde ya da düşük güç tüketimi olan sensör sistemlerinde kullanılmaktadır. Enerji kapasitesi, küçük hacimde olmasından dolayı düşüktür.

Kese (pouch) tipi bataryalar ise boyutları istenildiği gibi ayarlanabilen, mekanik olarak en zayıf olan batarya tipidir. Oyuncak/model sektöründe yoğunlukla kullanılmaktadır.

2.2 BMS Fonksiyonları

Batarya ile enerjilenen birçok ürün, bataryanın uygun şekilde çalışmaması ya da kimyasal yapısının değişmesi sonucu bozulmakta ve daha kötüsü maddi zarara sebep olabilmektedir. Bu durum Li-ion batarya hücresi içeren ürünler için daha sık karşılaşılabilecek bir durumdur. Bunun ana nedeni olarak lityum-iyon bataryanın güvenli çalışma bölgesinin dar olmasından kaynaklanmaktadır. Güvenli çalışma aralığı sıcaklık ve gerilim ile sınırlandırılmaktadır. Fakat burada yer almayan akım parametresinin etkisi ise bataryanın iç direnci ile birlikte sıcaklığını artırmakta ve dolaylı olarak Şekil 2.9’da yer almaktadır.

Bu çalışma aralığı tek bir Li-ion batarya hücresi için geçerli olduğu gibi seri ya da paralel bağlı olaran batarya paketleri için de geçerlidir. Fakat batarya paketi haline geldiğinde ek güvenlik noktaları da ortaya çıkmaktadır. Şöyle ki seri bağlı olan batarya hücrelerinden bazıları diğer batarya hücrelerine nazaran daha yüksek ya da daha düşük gerilim değerine sahip olabilir.



Şekil 2.9 : Li-ion güvenli çalışma aralığı [20].

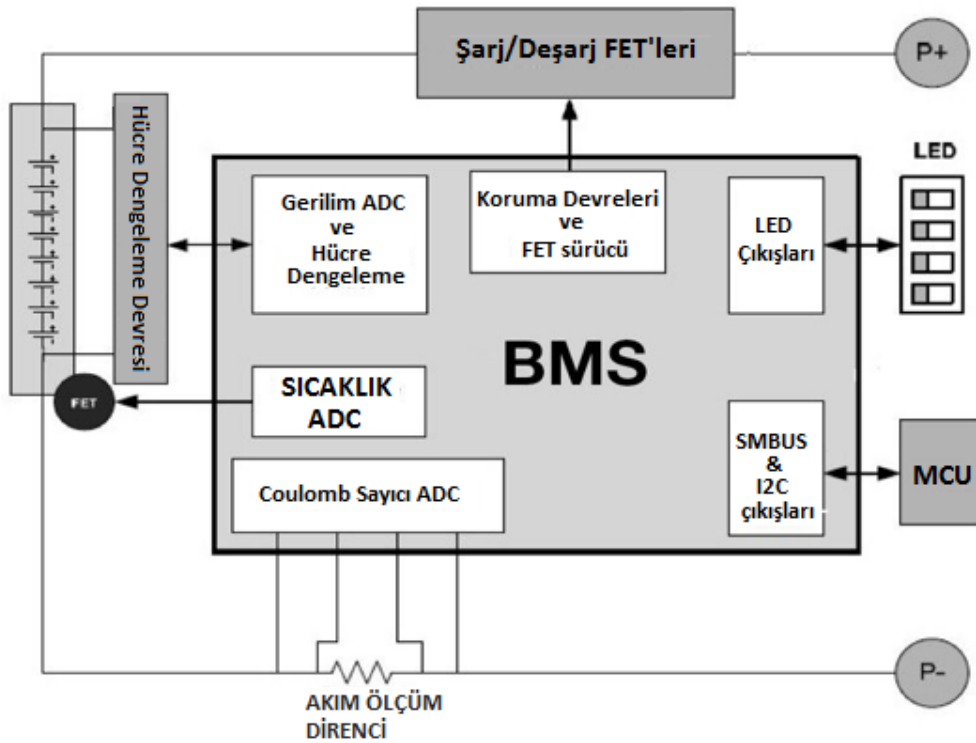
Bu durum hem batarya hücrelerinin eşit şekilde şarj/deşarj olmalarını engeller hem de batarya paketinin tam kapasitesinin kullanılmasına engel olur. Bu durumlar diğer batarya hücrelerinde olan stresi artırır ve ömrünün kısılmasına ya da kimyasal yapısının bozulmasına sebep olabilir.

Tüm bu hassas noktalar yani sıcaklık, akım, gerilim -hücre gerilimleri ve paket gerilimi- gibi parametrelerin sürekli takip edilmesi ve gerekli noktalarda önlem alınması için batarya yönetim sistemi devreleri (BMS) kullanılmaktadır. Bu devreler herhangi bir sorun olduğunda batarya çıkışlarını keserek geçici, kontrollü sigortaları kullanarak da kalıcı olarak önlem alabilmektedirler.

Bunun yanında gerilim dengesi bozulmuş olan bataryalar için de yine BMS devreleri içerisinde yer alan aktif ya da pasif balanslama devreleri ile pil gerilimleri eşitlenmektedir. Şarj vedeşarj sırasında batarya hücrelerinin sıcaklıklarını uygun sensörler ile kontrol etmekte ve güvenli çalışma bölgesinden çıkıldığında önlem almaktadır.

Genel anlamda Şekil 2.9’da blok diagramı görülen batarya yönetim sistemi; akım ölçüm, gerilim ölçüm, balanslama, Mosfet sürücü ve haberleşme bloklarını içerir ve

genellikler bu blokları özel bir IC (integrated circuit) içerir. Haberleşme bloğu I2C ya da benzeri SMBUS haberleşme protokolüne sahiptir. Bu protokol üzerinden host mikrokontrolör ile haberleşir ve hata konumundan normale geçme, uyku moduna geçme, taşıma moduna geçme gibi modları değiştirir ve normal çalışma zamanında kullanacağı gerilim limitlerini, akım limitlerini bu mikrokontrolör üzerinden alır. Kullanılan bu IC'nin en önemli özelliklerinden birisi kendi içerisinde mosfet kapı sürme devresi bulundurmasıdır. Bu sayede mosfet kapısı uygun gerilimlerde (>9V) sürülebilmekte ve ek sürücü devre ya da gerilim kaynağı gerektirmemektedir. Fakat bu kapı sürücü devresi PWM sinyali ile sürüş özelliği barındırmamakta ve sadece açık/kapalı modlarda çalışmaktadır. Şekil 2.10'da bu özelliklerin genel şema görseli verilmiştir.



Şekil 2.10 : Genel BMS Blok Şeması.

2.2.1 Koruma fonksiyonları

Birçok farklı kimyada lityum iyon batarya olmasına rağmen tüm bu bataryaların ortak özellikleri; enerji yoğunlukları yüksek ve herhangi bir hata durumunda sırasıyla yüksek akım, ısınma, gaz salınımı ve alev alma durumlarının gözlenebilir olmasıdır.

Bu nedenle 2012 yılında nikel bazlı ve lityum bazlı bataryalar “IEC-62133 standardı” adı altında uygulanması gereken güvenlik koşulları yayınlandı. Bu standart taşıma, saklama ve kullanım koşullarını içermektedir. Bu standardın içeriği; batarya paketinin, batarya hücresinin dışından oluşabilecek hatalara karşı olan testleri içermektedir. Batarya hücresi üretim ve iç kısa devreleri (Samsung Note7 batarya hücresi durumu) için aşağıda Çizelge 2.2’de 8.3.9 başlığı bulunmaktadır. Test içeriği Li-ion için genel anlamda Çizelge 2.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.2 : IEC62133 2.edt Li-ion hücre testleri [21].

2 nd Edition Tests
8.2.1 Continious charging at constant voltage (cells)
8.2.2 Moulded case stress at high ambient temperature (battery)
8.3.1 External short circuit (cell)
8.3.2 External short circuit (battery)
8.3.3 Free fall
8.3.4 Thermal abuse (cells)
8.3.5 Crush (cells)
8.3.6 Over-Charging of battery
8.3.7 Forced discharge (cells)
8.3.8 Transport tests
8.3.9 Design evaluation – Forced internal short circuit (cells)

Bu standartları sağlayabilmek ve bataryaları güvenli olarak kullanabilmek için batarya yönetim sistemi -yani izleme, koruma ve kapasite tahmin etme- gereksinimi doğmaktadır [21].

2.2.1.1 Akım korumaları

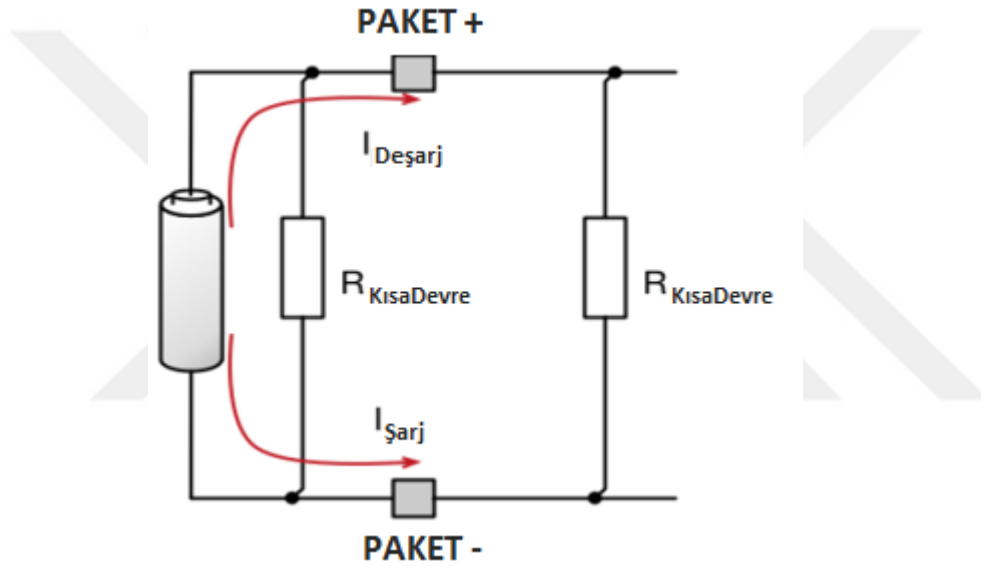
Batarya hücresinin içerisinde alınan/alınabilecek önlemler genellikle batarya üreticilerinin uygulaması gereken önlemler kapsamına girmektedir. Zira batarya hücresi seçimleri için batarya üretim standart testlerinden (IEC62133, UN38.3) geçmesi “hücre içi” akım korumaları adına alınabilecek başlıca önlemdir.

Daha küçük alanda daha yüksek kapasiteli batarya üretimi hedefi ile ilerleyen cep telefonu sektöründe meydana gelen Samsung Note 7 faciası da yine hücre içi kısa devre ile oluşmuştur.

Batarya hücresi için üretim proseslerinde alınabilecek önlemler olduğu gibi hücre içine eklenen koruma komponentleri (PTC, devre kesici, sigorta) de “hücre içi” koruma

önlemleri arasındadır. Oluşabilecek olan hücre içi ve dışı kısa devre yapıları Şekil 2.11’de verilmiştir.

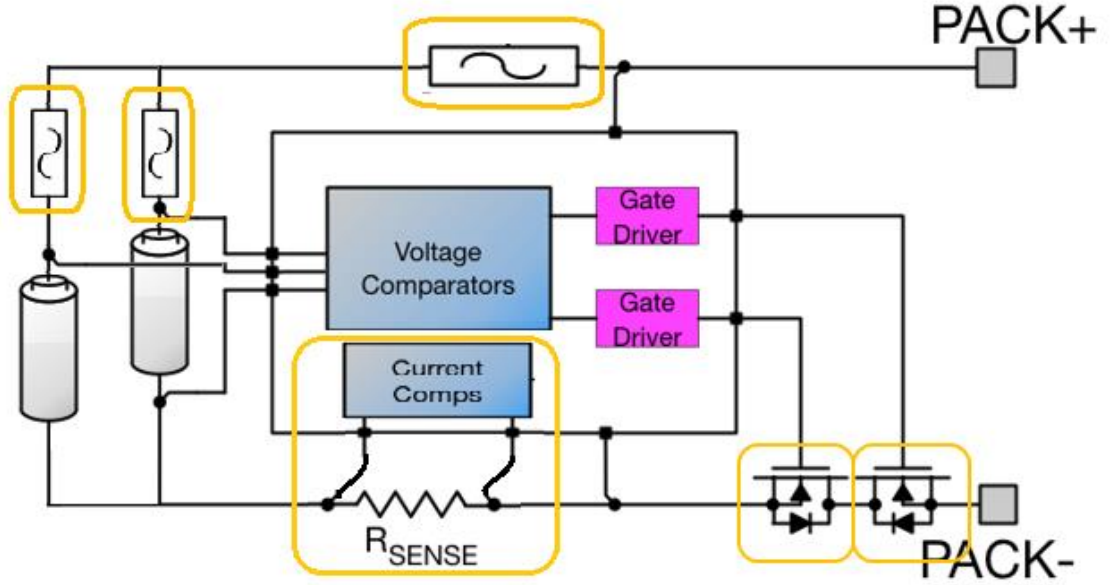
Batarya paketi, ilgili sistemin akım ve gerilim ihtiyacını karşılayabilmek adına, birden fazla batarya hücresinin seri ya da paralel bağlanması sonucu oluşan yapıdır. Bu yapı içerisinde her hücrenin kutupları batarya yönetim sistemi elektronik kartına bağlanmakta ve ilgili ölçümler alınmaktadır. Bu bağlantıların üzerinde bir kısa devre meydana gelmesi paket içi kısa devre tanımımızı oluşturmaktadır. Bunun için alınabilecek önlemler paralel bağlı hücrelerden çekilmesi güvenli olan değere göre sigorta seçilmesi ve herhangi bir kısa devre durumunda bu sigortanın açık devre olmasıyla koruma önlemi alınmaktadır.



Şekil 2.11 : Batarya içi ve dışı kısa devre gösterimi [20].

Batarya yönetim sistemleri ile alınan kısa devre korumaları genellikle Şekil 2.11’de gösterilen “paket+, paket-” isimleri verilen düğüm noktalarından sonrası için önlem almaktadır. Bu noktalardan içeride kalan kısa devrelerde, Şekil 2.12’de verilen çoklu paralel kullanılan bir batarya paketi konfigürasyonlarında ise çeşitli sigortalar batarya hücrelerinin hemen çıkışındaki terminal ile ana bara arasına yerleştirilmektedir. Eğer tekil batarya hücresi ise “hücre içi” olarak bahsedilen koruma önlemleri alınır.

Seri bağlı bataryalarda ise ana koldan akan akım bataryalardan akan toplam akıma eşit olmakta ve koruma önlemi de ana çıkış kolunun pozitif ya da negatif kolunu kontrollü anahtarlarla ya da yine fuse ile keserek alınmaktadır.

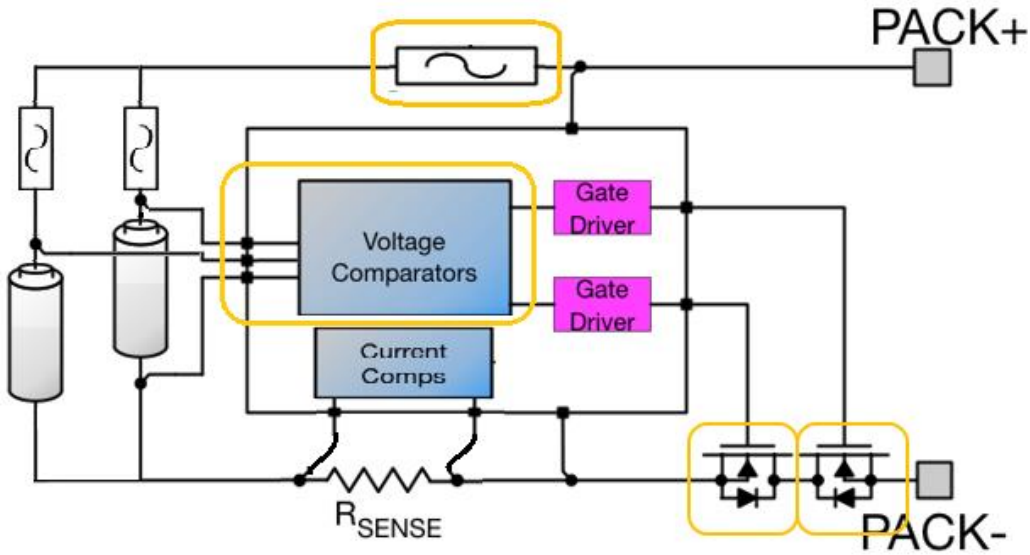


Şekil 2.12 : Batarya Paketi kısa devre koruma önlemleri [20].

Şekil 2.12 de görüldüğü gibi hem kontrollü hem de kontrolsüz akım koruma önlemleri görülmektedir. Ana bara akım sigortası bara akımı limitine göre, her batarya hücresi terminali ile ana bara arasına yerleştirilen ve her hücreden çekilmesi gereken maximum akıma göre belirlenen daha küçük değerli sigortalar, negatif terminalden sönt direnci üzerinden ölçülen diferansiyel akım ölçüm devresi ve son olarak batarya paketinin ana çıkışlarını açıp kapatan “source-drain-drain-source” şekline bağlı ikili kesici mosfet devresi batarya yönetim sistemi içerisindeki akım korumalarını oluşturmaktadır.

2.2.1.2 Gerilim korumaları

Gereğinden fazla şarj batarya hücresinin ya da paketinin maximum gerilim değerinden daha yüksek gerilime şarj etme durumudur. Batarya yönetim kartı bu şekilde bir durum ile karşılaştığında alacağı önlemler; kontrol ettiği anahtarlar ile şarj akımını kesmek ya da varsa kontrollü kimyasal sigortayı açık devre ederek devreye uygulanan yüksek gerilimi kesmektir. Şekil 2.12 de görüldüğü gibi gerilim kontrolleri ve buna bağlı korumalar da batarya yönetim sistemi koruma önlemleri arasında yer almaktadır.



Şekil 2.13 : Batarya gerilimleri kontrol yapısı [20].

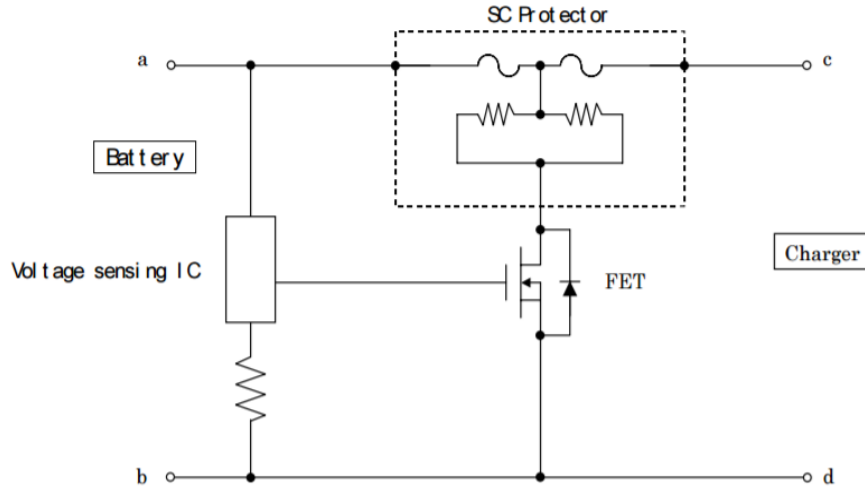
Batarya yönetim sistemleri üzerinde sadece akım korumaları değil bunlara ek olarak hücre gerilimlerini ve batarya paketinin tümünün gerilimi kontrol eden gerilim korumaları ve Şekil 2.17’de gösterilen sıcaklık korumaları da batarya yönetim sistemlerinde bulunmaktadır.

Batarya yönetim sistemlerinde yeralan gerilim korumaları, batarya paketi ya da batarya hücresinin uçlarındaki gerilimi ölçerek uygun sınırlar içerisinde olup olmadığına karar verir ve hata durumlarında uygun aksiyonu alır. Batarya hücresinin gerilim için verilen sınırlarının üstünde gerilim uygulandığında batarya elektrolitiğinin kimyasal yapısının bozulmasına, iç direncinin artmasına sebep olmaktadır. Bu durum kullanım sırasında daha çok ısınmaya ve belirli bir noktadan sonra elektrolitiğin gaz salınımı yapmasına sebep olmaktadır. Bu durumda batarya ömrü ve kapasitesi gözle görülür oranda azalmaktadır.

Aynı şekilde düşük gerilimlere kadar deşarj edilmesi de yine elektrolitiğin yapısında bozulmaya ve bataryanın tekrar şarj olamamasına sebep olmaktadır.

Bir diğer kontrollü gerilim/akım, kontrolsüz akım koruma önlemi ise şekil 2.14’te görülen 3 uçlu kimyasal sigortadır. Bu komponent Schott-NEC işbirliği ve Sony tarafından üretilen ve genellikle lityum iyon bataryaların koruması olarak kullanılan bir komponenttir. İç yapısı iki adet termal sigorta ve iki adet ısıtıcı direnç şeklindedir. Sigorta yüksek sıcaklıkta, ya da yüksek akım sebebiyle yüksek sıcaklıkta kontrolsüz olarak kendisi atabildiği gibi içindeki ısıtıcı dirençler vasıtası ile kontrollü olarak

ısıtılarak da sigorta devreyi kesebilmektedir [21].



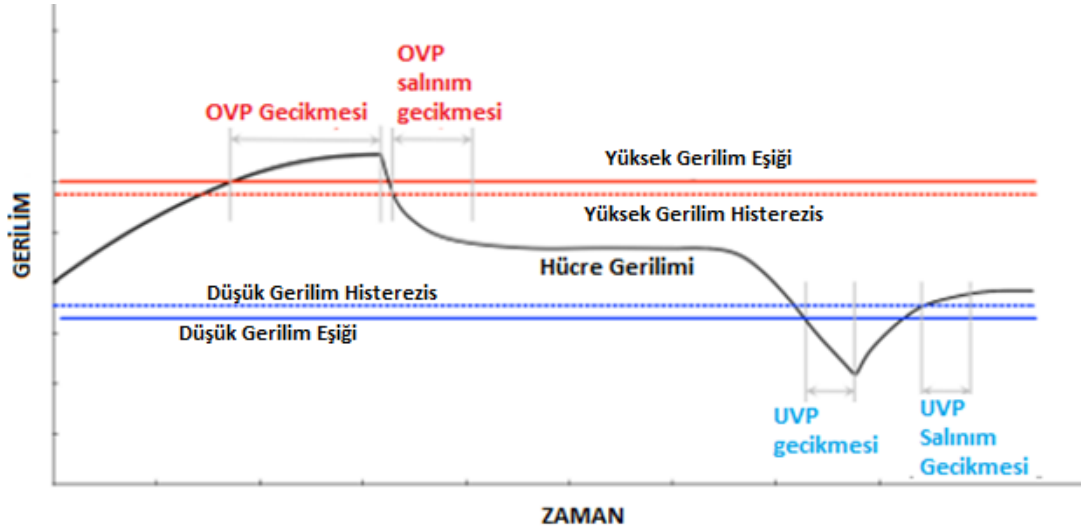
Şekil 2.14 : Kimyasal sigorta ve çevresel devre elemanları[22].

2.2.2 Monitor etme fonksiyonları

Monitör etme fonksiyonları batarya paketi üzerinden alınabilecek tüm verilerin incelenme ve uygun limitlerde olup/olmadığının kontrolünü yapma görevlerini üstlenmektedir. Bu limitler dışındaki durumlarda uygun koruma fonksiyonları için girdi oluşturur.

2.2.2.1 Batarya gerilim kontrolü

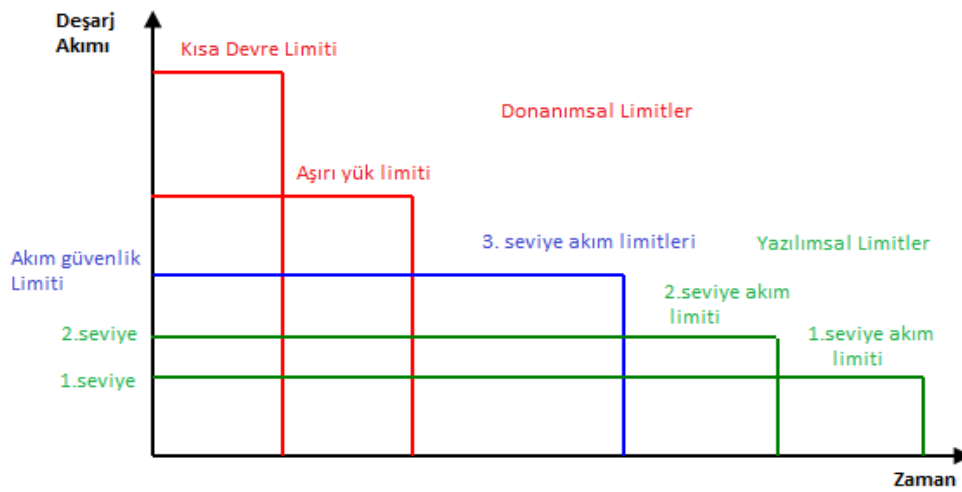
Koruma önlemini alacak donanımı oluşturduktan sonra koruma limitleri ve limitlere göre hata konumuna geçme için algoritma belirlenmelidir. Algoritma içerisinde limitler üzerinde histerizis belirlemenin yanısıra hata geçikmeleri de eklenmelidir. Bunun ana nedeni bataryanın kimyasal yapısından dolayı ani yüklenmelerde gerilim değerleri aşırı yükselme ya da aşırı düşüş gösterebilir. Bu yüzden gerilim değerlerinin gerçekten bu noktalara indiğini algılamak için geçici hal değerleri pas geçecek bir gecikme eklenmelidir. Şekil 2.15’de gerilim koruma sınırları ve bu sınırlara uygulanan histerizis limitleri görülmektedir.



Şekil 2.15 : Batarya gerilimlerini kontrol sınırları ve histerizis yapısı[20].

2.2.2.2 Batarya akım kontrolü

Batarya yönetim sisteminde akım kontrolleri iki başlık altında değerlendirilmektedir. Bunlardan ilki kısa devre akım kontrolü ve diğer başlık ise aşırı yük akım kontrolüdür. Bu iki koruma sınırının birbirinden ayrılma noktası çekilen yüksek akım seviyesi ve bu seviyedeki akan akımın sistemden çekilme süresidir. Yani kısa devre akımı sınırında alınan koruma önlemi gecikmesi çok kısa sürelerde yani nano saniye mertebelerinde ayarlanabilir iken aşırı yük korumaları 100ms mertebelerinde alınabilmektedir. Şekil 2.16’da gösterilen limitlerden yeşil renk ile gösterilen limitler BMS içeriisinde yer alan işlemci üzerinden belirlenen yazılımsal limitlerdir.



Şekil 2.16 : BMS akım koruma limitleri ve gecikmeleri [20].

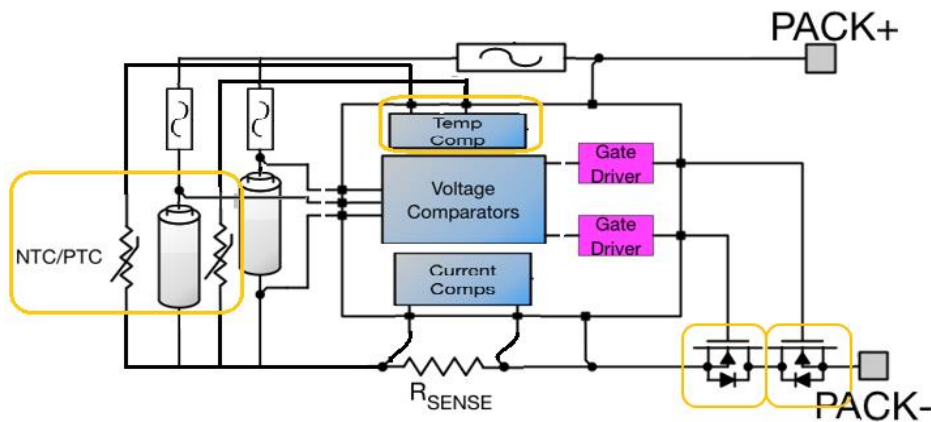
Belirlenen bu limitlerde akım aktığı bilgisi öncelikle özel BMS entegresinden işleciye haberleşme protokolü üzerinden gelir. Sonrasında işlemci bu datayı işler ve daha öncesinde belirlenen koruma adımlarını devreye sokar. Kırmızı ile belirlenen limitler doannımsal olarak alınan koruma limitleridir. Bu limit değerlerinde akım devre üzerinden aktığında özel BMS entegresi işlemci ile haberleşmeyi beklemeden kedisı çıkışlarını keser ve devreyi koruma altına alır. Buradaki önemli nokta özel entegreler için belirlenen bu akım limitleri devre ilk enerjilendiğinde işlemci tarafından ilgili hafıza adresine bu limit değerleri yazılarak belirlenmektedir.

Mavi ile gösterilen limit opsiyonel olarak yine işlemci tarafından belirlenmektedir. Bu limitin en önemli özelliği daha önceden belirlenen kırmızı ya da yeşil limitlerin değerine ve sistemin çalışma özelliğine göre ara değerlerde dinamik olarak belirlenen limittir.

2.2.2.3 Batarya yüzey sıcaklığı ve ortam sıcaklığı kontrolü

Bataryanın koruma alması gereken noktalar diğer başlıklarda da belirtildiği üzere genellikle ortak sonuç doğurmaktadır, “ısınma”. Isınma durumu bataryanın kendini ısıtması(self heating) ile olabildiği gibi bataryanın bulunduğu dış ortam sıcaklığının yüksek olması da benzer sonuçlar doğurmaktadır.

Bataryanın kendisinin sıcaklığının yükselmesi, batarya şarj edilirken ya da deşarj edilirken, bataryanın iç direncinden dolayı oluşmaktadır. Diğer yandan dış ortam sıcaklığının da belirli değerlerin altında ya da üstünde olması da bataryanın sıcaklık ile ilgili oluşabilecek problemlerini oluşturmaktadır.



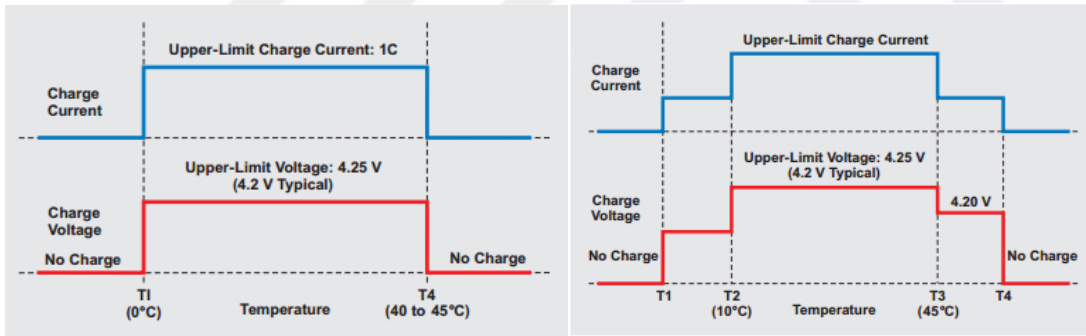
Şekil 2.17 : Sıcaklık izleme fonksiyonlu BMS blok yapısı [20].

Bataryanın içerisinde elektron alışverişini anot ve katot arasında yapmasını sağlayan elektrolitikten dolayı sıcaklık faktörü bataryanın ömür ve kapasite değerlerini büyük ölçüde etkilemektedir.

Bu duruma önlem alabilmek ve şarjdeşarj zamanlarında on-off şeklinde olsa dahi sıcaklık kontrolü yapabilmek için batarya hücrelerinin üzerine, eğer BMS kartı destekliyor ise her batarya hücresine ya da batarya paketinin en çok ısındığı bilinen bölgesine sıcaklık sensörü (NTC, PTC vb.) eklenir ve batarya hücresi sağlığı için en önemli parametrelerden birisi daha izlenebilir, kontrol edilebilir hale getirilir.

2.2.2.4 Şarj vedeşarj sıcaklık kontrolleri

Li-ion batarya kataloglarına bakıldığında şarj sıcaklık aralığı iledeşarj sıcaklık aralığı arasında fark vardır. Bu fark, tez kapsamında kullanılan Sony 18650VTC6 bataryanın kataloğundan da görülebilir. Buna ek olarak Şekil 2.18’de akım ve gerilim sınırları gösterilen JEITA standardı kapsamında da şarj sıcaklığı kontrolü ve buna bağlı olarak şarj akımı kontrolü yapılması gerekmektedir. Eğer akım kontrolü şarj devresinde ise sıcaklık bilgisi o şarj devresine de gönderilmelidir.



2.3 Batarya Durum Göstergesi (Gauge)

Batarya durum göstergesi batarya üzerinden güvenlik önlemleri için ölçülen birçok datayı alıp, kendi içerisinde belirlenen batarya modeli içerisinde değerlendirip sonrasında Şekil 2.19 ile örneklendirilen bataryanın ömrüne, çalışma süresine, içerisinde kalan enerjisine, şarj edilme ihtiyacına ya da bataryanın değiştirilme ihtiyacını tahmin eden matematiksel algoritmalarıdır. Bu algoritmaların içerdikleri modeller kullanım alanlarına göre, batarya tipine göre, kullanım şekline göre farklılık

göstermektedir. Batarya hücresi için farklı gauge algoritması, batarya paketi için farklı gauge algoritması ve girdi parametreleri belirlenmelidir.

2.3.1 Hücre göstergesi (Cell Gauge)

Batarya yönetim sistemleri içerisinde gauge algoritmasının getireceği faydalar birkaç başlık altında toplanabilir.



Şekil 2.19 : Gauge algoritması genel çıktıları [20].

Bataryanın geleceğini tahmin eder. Kalan kapasite tahmini (SOC), harcanan kapasite ölçümü yapar. Kalan çalışma süresi tahmini yapar. Normal/ortalama çalışma rutinine göre kalan çalışma süresi tahmini yapar. Bunlara ek olarak farklı çalışma modları olduğunda bu tahminlerin nasıl değişeceğini öngörerek süreleri günceller.

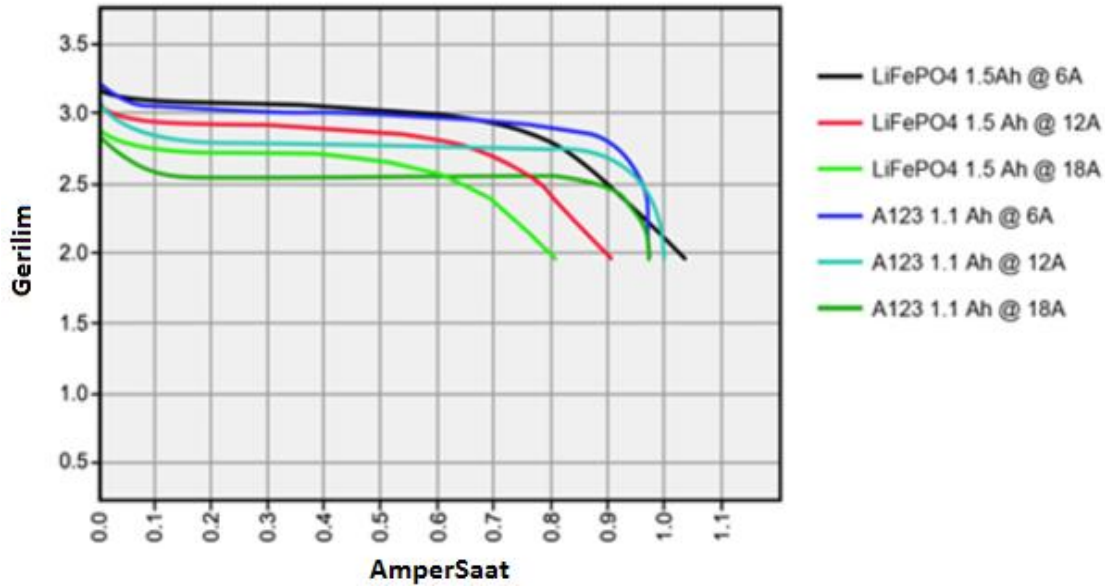
Şarj zamanı tahmini yapar. Bataryanın sahip olduğu enerji miktarını (SOC) bilerek şarjın sonlandırılması için gereken toplam süreyi şarj akımına göre tahmin eder.

SOC, ve SOH tahminlerine göre bataryanın ömrü, kullanım alışkanlıklarına göre kalan ömrü ile ilgili tahminleri yapar. Ve olası hata durumlarını önceden tahmin eder. Bataryanın kara kutusudur, kayıt merkezidir. Bataryanın ya da batarya paketinin kullanım koşullarını, kullanım alışkanlıklarını ve hata durumlarını kaydeder. Hata analizinin kolay yapılmasını sağlar. Batarya kullanım zamanını artırır. Batarya kapasite tahmini sayesinde kullanılmayan kapasite miktarı minimum düzeyde olur. Erken kapatma ve verimsiz kullanım durumlarını azaltır.

2.3.2 Bataryanın şarj durumu (SOC)

En genel anlamda bataryanın şarj durumu bataryanın içinde kalan kullanılabilir enerji miktarının toplam kullanılabilir enerji miktarına oranıdır. Bu değer yani SOC değeri genellikle yüzde olarak ifade edilir [8].

Şekil 2.20’den görüleceği gibi deşarj eğrisi üzerinden sadece gerilim ile bataryanın kalan kapasite miktarı çıkarımı yapılırsa farklı yüklerde aynı kalan kapasite miktarı için farklı değerde çıkarım yapılabilir. Bu nedenle kalan kapasite tahmini, bataryanın şarj durumu, yani SOC tahminleri sadece açık uç gerilimlerine göre yapılmaz. Bataryanın modeli üzerinden iç direnç hesaplanır, gerekli ise geçici hal zamanları için filtre kapasite ve direnç değerleri girdi olarak alınır ve bu değerler üzerinden kalan kapasite tahmini yapılır.



Şekil 2.20 : Li-ion batarya deşarj eğrisi [17].

Şekil 2.19 da verilen eğriler LiFePO4(lityum demir fosfat) kimyali batarya hücresine ve A123 markalı lityum iyon batarya hücresine ait farklı akımlardaki deşarj eğrileridir. Buradan görülebileceği gibi her kimyadaki batarya için ve her akım değeri için farklı karakteristiğe sahiptir. Bu eğrilerin üzerinde farklı sıcaklıklardaki davranışlar da eklendiğinde tablolama çalışması ile batarya modellemenin çok zahmetli olacağı görülebilmektedir.

2.3.3 Bataryanın sağlık durumu (SOH)

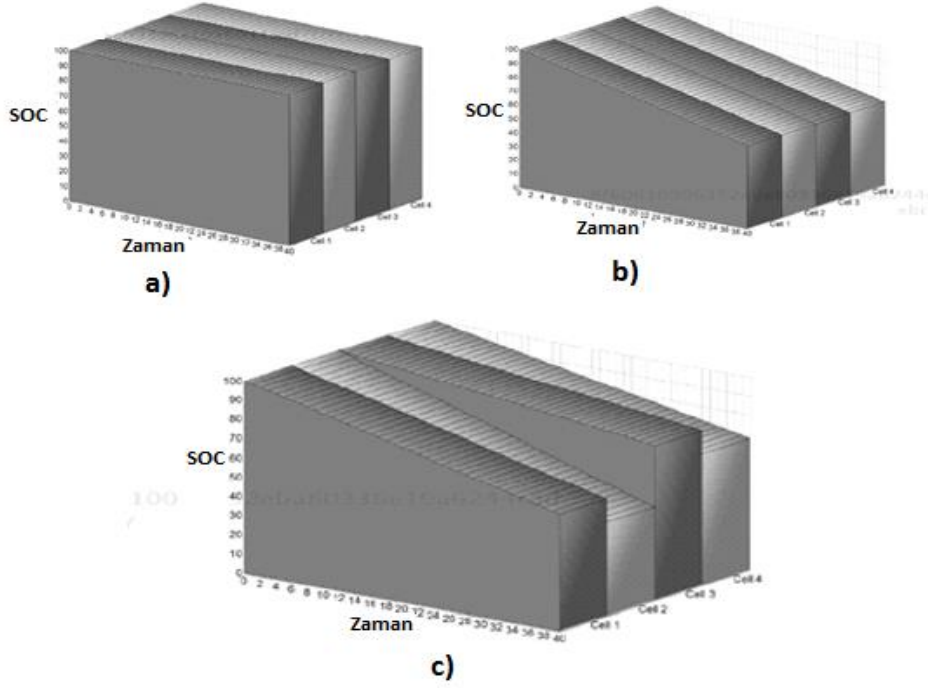
Batarya hücresi ya da paketi için sağlık durumunu belirlemek şarj durumunu belirlemek kadar kolay ve deterministik değildir. Sağlık durumu aslında bataryanın kaç çevrim çalıştığı, iç direncinin ilk haline göre ne kadar değiştiği, kapasite kaybını hangi oranda yaşadığı (lithium plating) ile ilgilidir. Fakat tüm bu değerler ilk durumu ile karşılaştırmalı olarak elde edilebilecek verilerdir. Bu bilgiye neden ihtiyaç

duyulduğu noktası ana karar mekanizmasını oluşturmaktadır. Yani “kullanılan bir üründe ana parametre nedir? Ve bataryanın sağlık durumu bu parametreye nasıl etki ediyor?” sorularının cevabına göre sağlık durumunu tanımlanmaktadır. Örnek vermek gerekirse tam elektrikli araçlarda bataryadan beklenti kapasite kaybı yaşamaması ve menzili hep yüksek tutmasıdır. Bu nedenle bataryanın ilk zamanları ile “ Δt ” zaman kadar sonraki durumu toplam kapasite üzerinden değerlendirilir ve buna göre batarya değişim kararı alınır [9]. Fakat bu tahmin hibrit elektrikli araçlar için daha farklıdır. Çünkü hibrit elektrikli araçlarda sürekli şarj deşarj yaşandığı için iç direnç değişiminin verimliliğe etkisi çok daha büyüktür. Bu nedenle bataryanın ilk zamanları ile “ Δt ” zaman kadar sonraki durumu aynı koşullardaki iç direnç değişimi üzerinden değerlendirilir [16].

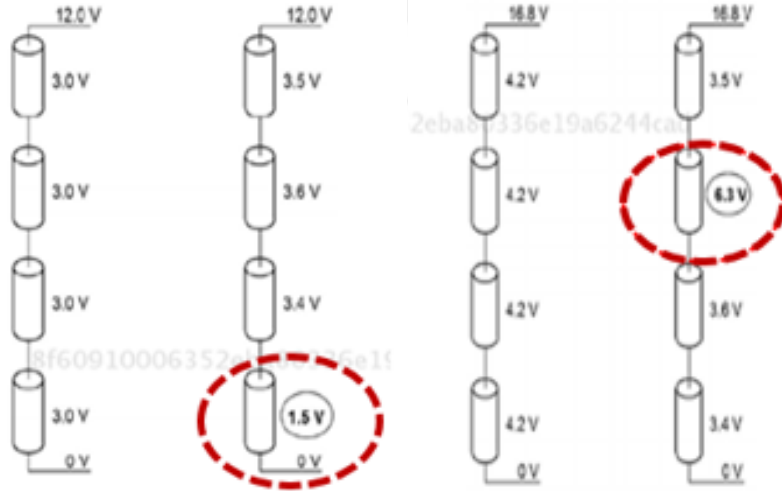
2.4 Dengeleme (Balanslama)

Dengeleme konusu ve uyumlayan hücreler ile oluşturulan batarya paketleri birlikte değerlendirilmesi gereken konulardır. Zira balanslama olarak bahsedilen konu birçok seri batarya hücresinden oluşturulan batarya paketlerinde, hücrelerin birbirlerinden farklı gerilimde, farklı iç dirençte, farklı şarj ve deşarj karakteristiğinde, farklı ısınma profilinde, farklı kapasitede (ve farklı SOC’da) olması durumudur. Şöyle ki aynı üretici de olsa, aynı tip batarya hücresi de olsa, hatta aynı batch’te üretilen batarya hücresi de olsa, hiçbir batarya hücresi birbirinin bire bir aynısı değildir. Bunu göz önüne alarak batarya üreticileri olabildiğince yakın özellikteki hücreler ile batarya paketi yapmakta, bunun için de bir sıralama seçme prosesinden geçtikten sonra paket oluşturmaktadırlar. Buna rağmen zaman içinde batarya karakteristikleri değişebilmekte ve aynı paket içindeki hücreler ayrışabilmektedirler.

Batarya hücrelerinin bu şekilde farklı olduğu batarya paketlerinde iki durumla karşılaşılması söz konusudur. Paket uçlarında aynı gerilime sahip olmalarına rağmen düşük ve yüksek gerilimlere sahip dengeleme yapılmamış batarya paketleri ve ideal ve gerçek durum hücre gerilimleri dengesizlikleri Şekil 2.21 ve Şekil 2.22’de verilmiştir.



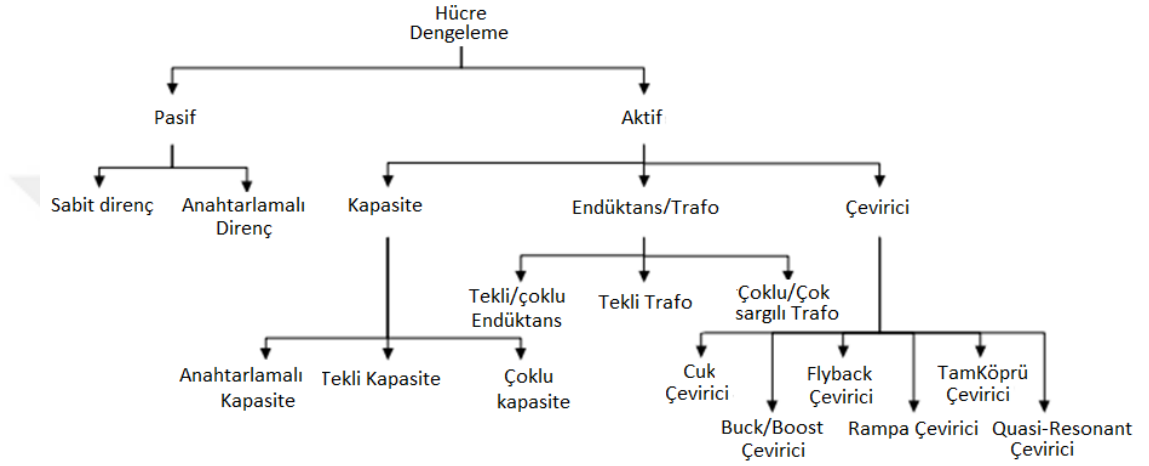
Şekil 2.21 : a) ideal b) eşlenik gerilim düşümlü c) gerçek durum batarya [17].



Şekil 2.22 : Aynı uç gerilimli dengeli/dengesiz batarya paketleri [17].

Bunlardan ilki batarya hücrelerinin herbirinin gerilimleri izleniyor ise en düşük batarya hücresine göre deşarj sonlandırılır. Tersî durumda ise gerilimi en yüksek olan batarya hücresine göre şarj sonlandırılır, diğêr batarya hücrelerinin gerilimleri daha aşğı seviyelerde kalır. Hem şarj hem de deşarj için ilk senaryoda batarya zarar görmez fakat tam kapasitesi ile kullanılmamış olur.

İkinci senaryo ise hücre gerilimlerinin kontrol edilmediği durumdur. Bu durumda kapasitesi yüksek olan bataryalara göre (paket gerilimi uygun sınırlar içerisinde olsa bile) deşarj işlemi yapıldığında, gerilim değeri/kapasite değeri düşük olan batarya hızla güvenli çalışma sınırlarının altına düşecek ve hatta bu işlem uzun süre devam ederse batarya polaritesi iç direncinden dolayı terse dönebilir. Bu noktada bataryada anot ve katodun negatif polariteye dayanımı olmadığı ya da çok düşük olduğundan batarya paketi zarar görecektir. Literatürde yeralan dengeleme yöntemleri şekil 2.23'te özet olarak sıralanmıştır.



Şekil 2.23 : Hücre balanslama yöntemleri topoloji ağacı [23].

Batarya balanslama için literatürde birçok balanslama yöntemi olmasına rağmen yaygın olanları pasif balanslamada anahtarlamalı şönt direnç, aktif balanslamada -ki elektrikli araçlar nedeniyle yakın zamanlarda yaygınlaşmaya başladı- ise anahtarlamalı çoklu endüktans yöntemidir. Bu çıkarımlar entegre üreticilerinin çıkarttıkları özel batarya yönetim sistemi entegrelerinde destekledikleri yöntemler üzerinden yapılmıştır. Bu yöntemlerden verim oranı düşük de olsa en çok tercih edilen topoloji olan anahtarlamalı şönt direnç bu tez kapsamında tasarlanan ve gerçekleştirilen BMS kartlarında kullanılmıştır. Şekil 2.23'de gösterilen aktif ve pasif dengeleme yöntemleri 2.4.1 ve 2.4.2 başlıklarında kısaca açıklanmıştır.

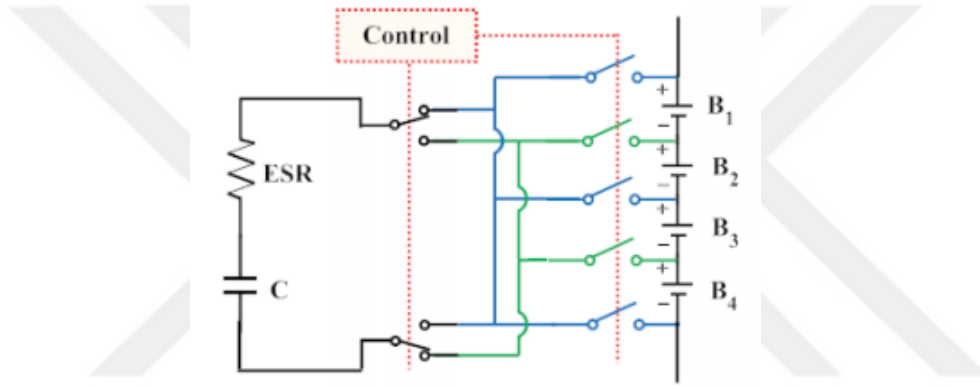
2.4.1 Aktif balanslama yöntemleri

Aktif balanslama batarya verimliliği ve kapasite kullanımı açısından daha verimli olan bir yöntemdir. Bu yöntem enerji kaybını minimum düzeyde yaptığı için pasif balanslama gibi sadece şarj zamanında yapılmayıp, kullanım sırasında da balanslama yapılabilmektedir. Kapasite ve kullanım süresi kritik olan elektrikli araçlarda aktif balanslama yöntemi tercih edilmektedir. Yöntemin negatif tarafları ise işlemci

tarafında karar mekanizmaları ve zamanlamalar nedeniyle işlem yükünü artırmaktadır. Buna ek olarak kullanılan topolojiye bağlı olarak kontrollü ve kontrolsüz elemanların sayısının bir hayli artması ve daha büyük PCB alanına ihtiyaç duyması aktif topolojilerin olumsuz özelliklerini oluşturmaktadır.

Anahtarlamalı tekil kapasite topolojisi:

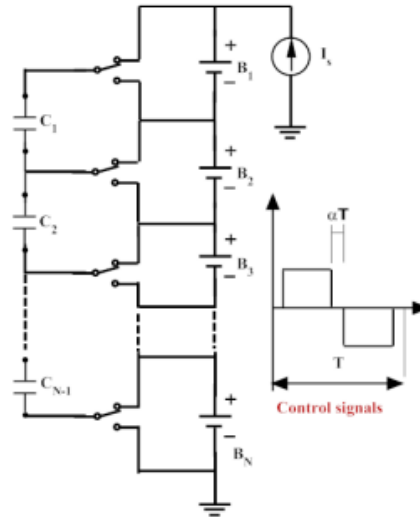
Şekil 2.24'te devre şeması verilen bu topolojide enerjinin tamamını üzerinde depolayan büyük değerli bir kapasite bulunur ve anahtar yapıları ile bu kapasite gerilimi/kapasitesi düşük olan ya da yüksek olan bataryanın uçlarına paralel olacak şekilde bağlanır ve buradaki gerilimi/kapasiteyi batarya paketindeki diğer hücreler ile aynı seviyeye getirir.



Şekil 2.24 : Anahtarlamalı tekil kapasite topolojisi [23].

Anahtarlamalı çoklu kapasite topolojisi:

Şekil 2.25'te devre şeması verilen çoklu kapasite topolojisinde ise tekil kapasite topolojisinden daha az anahtar kullanılır fakat her iki batarya hücresinin arasına bir kapasite gelecek şekilde anahtar ve kapasite kombinasyonu içerir. Bu sayede birbirleri arasında gerilim/kapasite farkı olan iki komşu hücrenin fark enerjisi bu kapasite üzerinden komşu hücreye aktarılır. Bu topolojinin dezavantajı ise komşu olmayan hücreler arasında gerilim farkı var ise sıra ile tüm ara kapasiteler üzerinden enerji aktarılacağından dolayı dengeleme süresi çok uzamaktadır.

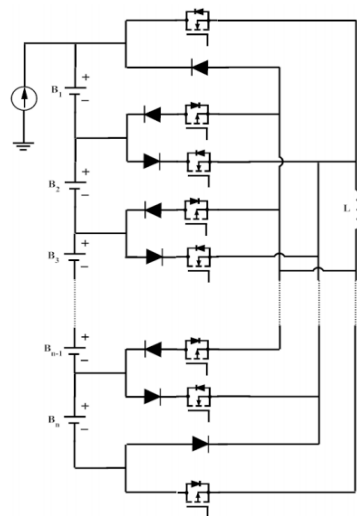


Şekil 2.25 : Anahtarlama çoklu kapasite topolojisi [23].

Genel anlamda Şekil 2.24 ve Şekil 2.25'te görülen kapasite anahtarlama yöntemleri kapasitelerin deşarj karakteristiklerinden dolayı yavaş olmaktadır. Bu nedenle genel olarak tercih edilen aktif balanslama yöntemlerinden değildir. Bu sav entegre üreticilerinin bu topoljiye uygun entegre üretimlerinin hiç/çok az olması ile de desteklenmektedir.

Tekli Endüktans Topolojisi:

Şekil 2.26'te devre şeması verilen tekli endüktans topolojisinde batarya hücrelerinin tamamının hem şarj olabilmesi hem de deşarj olabilmesi için her iki yön için anahtar ve diyot kombinasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

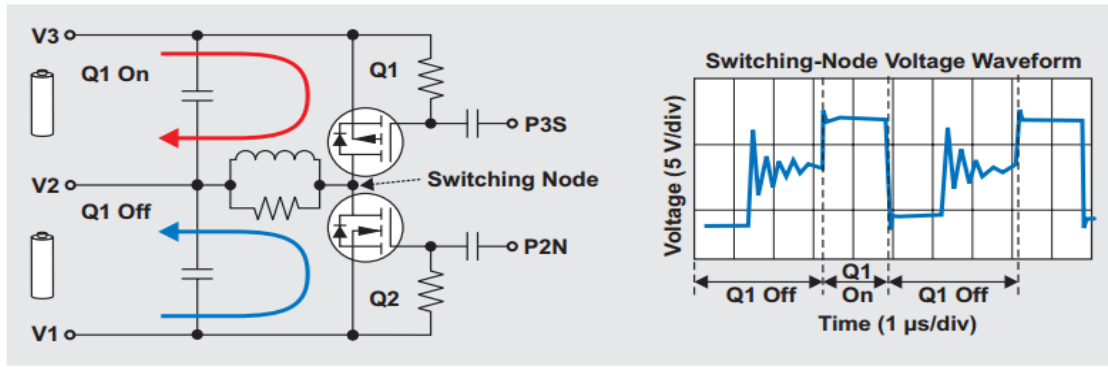


Şekil 2.26 : Tekli endüktans topolojisi [23].

Tekli endüktans topolojisinde sıralı şekilde şarj aktarımı gerekmediğinden çoklu endüktans yapısına göre daha hızlı balanslamaya imkan sağlamaktadır. Şarj eşitleme durumunda diyotlar ve anahtarlar üzerindeki gerilim düşümleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Çoklu Endüktans Topolojisi:

Şekil 2.27’de devre şeması verilen Texas Instruments’in PowerPump olarak adlandırdığı , yukarıdaki topoloji ağacında “çoklu endüktans” olarak yer alan topoloji ile, şarjı yüksek olan batarya hücresinin , diğer batarya hücreleri ile şarjları eşitlenene kadar komşu batarya hücresine enerji aktarımını, anahtarlanan bir endüktans üzerinde depolanan enerji ile sağlayan bir topolojidir.



Şekil 2.27 : Texas Instruments PowerPump topolojisi [25].

Bu topolojide şarj seviyesi (gerilim seviyesi üzerinden karar verilir) yüksek olan batarya, işlemci/özel IC tarafından tespit edilir ve öncelikle bu hücrenin karşısındaki anahtar iletime geçirilir ve bu süre zarfında endüktans üzerinden bir yönde akım akıtılır ve endüktansta depolanan enerji, düşük kapasiteli batarya hücresinin karşısındaki anahtar devreye girdiğinde bu hücreyi şarj eder. Bu şekilde sıralı olarak bataryalar arasında enerji aktarılır. Bu yöntemin dezavantajı çok sayıda seri hücre var ise baştan sona kadar sırasıyla enerji aktarım ve eşitleme uzun zaman almaktadır.

Tek Sargılı Trafo Topolojisi:

Şekil 2.28’de devre şeması verilen tek sargılı trafo topolojisinde batarya paketinden hücreye doğru bir enerji akışı olmaktadır. Kullanılan trafonun birincil sargısı batarya paketinin kutuplarına bir anahtar ile bağlıdır. Trafonun sekonderi ise birçok anahtar barındıran bir matris ile tüm batarya hücrelerinin kutuplarına bağlanabilir konumdadır. Kapasitesi (gerilim değeri) düşük olan batarya hücresi tespit edildiğinde trafonun

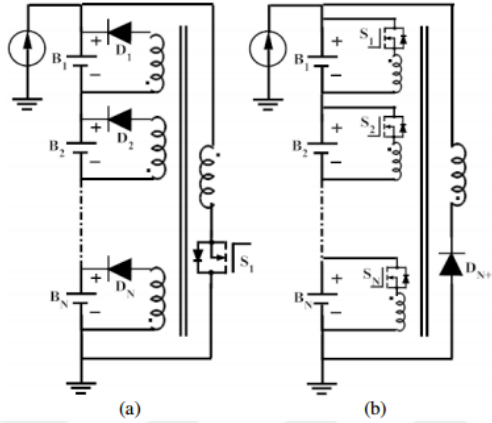
Şekil 2.28 : Tek sargılı trafo topolojisi [24].

Çoklu Sargılı ve Çoklu Trafo Topolojisi:

Çoklu Sargılı ve Çoklu Trafo Topolojisi:

31

Şekil 2.30’da devre şeması verilen çoklu sargılı trafo topolojisi tek trafo çekirdeği ve çok çıkışlı sekonder yapısı sayesinde Şekil 2.29’da verilen topolojiye göre daha az maliyetli olmaktadır. Özellikle flyback çevirici topolojisine benzer olan versiyonda anahtar sayısı ve trafo sayısı nedeniyle sistem oldukça sadeleştirilmeye çalışılmıştır. Bu topolojide çalışma prensibi daha çok trafo sargılarının oranı ile devrenin doğal davranışına bırakılmıştır. Sofistike algoritmalara ve zamanlama planlarına ihtiyaç duyulmamaktadır.

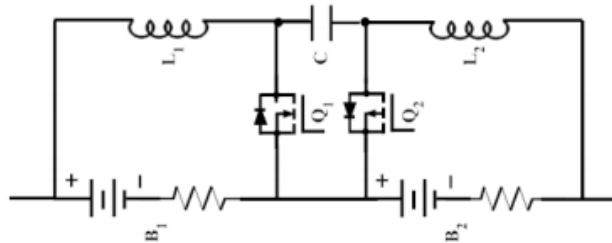


Şekil 2.30 : Çok çıkışlı trafo yapıları a) flyback yapısı b) forward yapısı [23].

Cuk çeviricili balanslama topolojisi :

Şekil 2.31’de devre şeması verilen iki yönlü (BiDirectional) olarak çalışan Cuk çevirici yapısı aktif balanslama yöntemlerinden birisi olarak kullanılabilir. Bu yapı sayesinde her hücreyi tekil olarak balanslayabilme şansı elde edilir. Fakat tekil balanslama işlemi bir hücreden komşu hücreye şeklinde olduğundan şerit halindeki seri devrenin tamamının balanslanması zaman almaktadır.

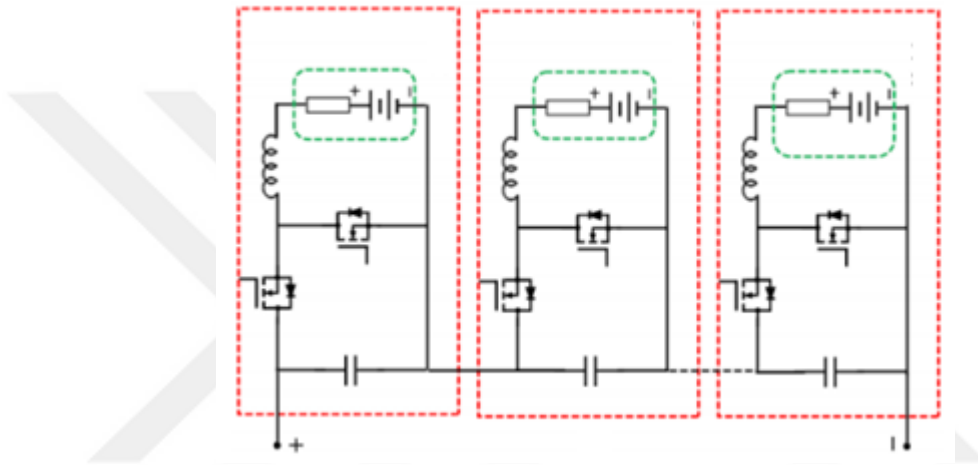
Bu topolojinin kullanılması için hücre sayısından(n adet) bir eksik sayıda(n-1 adet) çevirici devresi kurulmalıdır. Çevirici devresi Şekil2.30’da görülebileceği gibi iki adet endüktans, iki adet anahtar ve bir adet kapasite gerektirmektedir.



Şekil 2.31 : Cuk çevirici topolojisi ile balanslama yapısı [23].

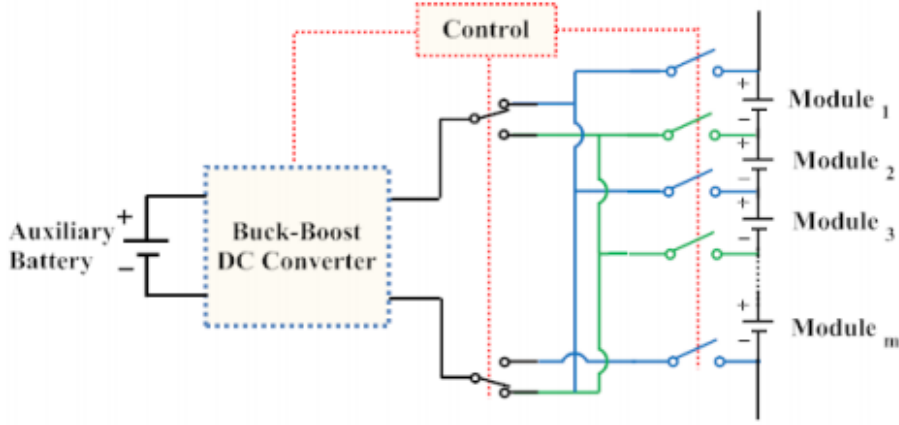
Buck/Boost çeviricili balanslama topolojisi :

Şekil 2.32’de devre şeması verilen DC-DC çevirici topolojilerinden Buck tipi,-yüksek voltajdan düşük voltaja düşüren topoloji- kullanıldığında, batarya paketinden batarya hücresine doğru bir şarj akışı gerçekleştirilmektedir. Bu durum en düşük şarjlı batarya hücresinin diğer batarya hücreleri ile eşit hale gelmesini sağlamaktadır. Şekilde gösterildiği gibi her hücre için iki anahtarlı senkron buck yapısı kurulmaktadır. Bu devre yapısının çevresel komponentleri ve kaplayacağı boyut, maliyet açısından yük getirdiği gibi her hücre için kurulan bu devrenin ikişer anahtarının kontrol edilmesi ve zamanlamalarının ayarlanması da karmaşıklığını artırmaktadır.



Şekil 2.32 : Buck çevirici topolojisi ile balanslama yöntemi [23].

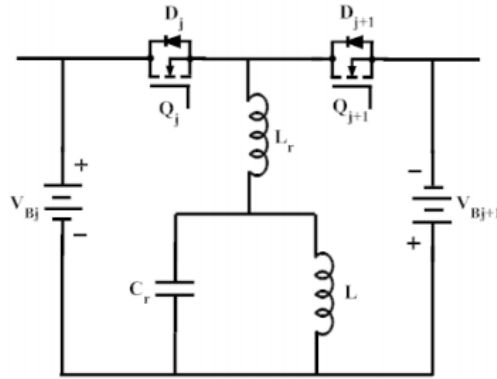
Şekil 2.33’de devre şeması verilen buck-boost tipi DC-DC çevirici yapısı ile balanslama devresi kurulduğunda ise dışardan ek bir batarya ile ana batarya modülündeki dengelenmemiş bataryalara enerji aktarabilir ya da gerilimi yüksek olan batarya hücrelerinden enerji çalarak kendi ek bataryasını şarj edebilir. Hem iki yönlü çalışıp hem de düşük gerilimden yüksek gerilime (boost) ya da yüksek gerilimden düşük gerilime (buck) doğru çalışarak aktif balanslama yapmaktadır. Bu yöntemin negatif noktaları ise yedek bir bataryaya ihtiyaç duyması, diğer yandan da Şekil 2.33’te görüleceği gibi birçok anahtarlama yapısı ve bu yapının kontrolcüsü ile sistemin karmaşık hale gelerek kullanımının zorlaşmasıdır.



Şekil 2.33 : Buck/Boosk çevirici ile balanslama yöntemi [23].

Quasi Rezonant çeviricili balanslama topolojisi:

Şekil 2.34’te devre şeması verilen bu topolojiden genel olarak bahsedilecek olursa, bir batarya üzerindeki fazlalık olan enerjinin bir anahtar vasıtasıyla LC rezonant tankına aktarılması ve anahtarın açık devre haline getirilmesi, daha sonrasında komşu hücrenin anahtarının ilettime geçmesi ile bu enerjinin bu hücreye aktarılmasıdır. LC parametrelerinin ve batarya hücresinden çalınacak olan enerji miktarının detaylı hesaplanmasını gerektirmektedir. Anahtarların açılış kapanış zamanlarında yüksek “inrush” akımlarının çekileceği de gözönünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.34 : Quasi rezonant balanslama topolojisi [23].

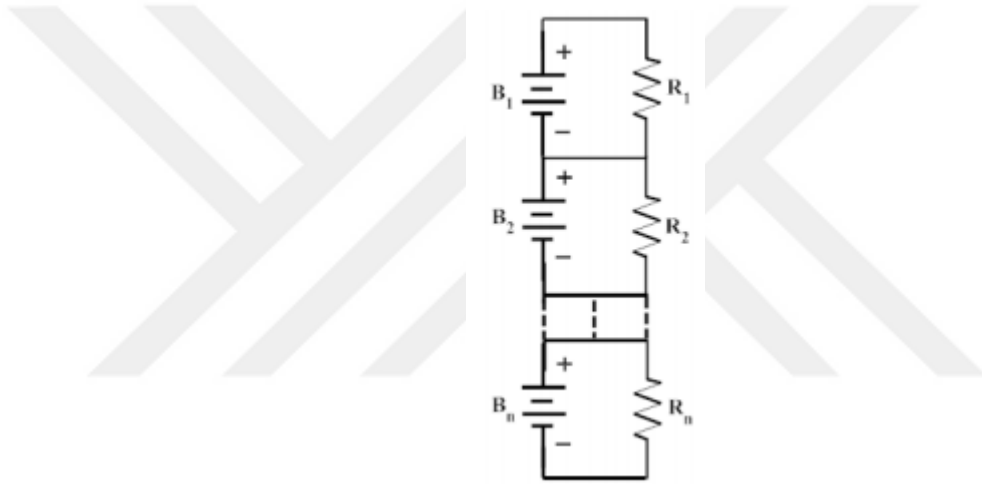
2.4.2 Pasif balanslama yöntemleri

Pasif balanslama yöntemleri, literatürde kullanılan en basit yöntemlerdir. Aktif yöntemlere göre çok daha düşük verim değerlerine sahiptir. Karmaşıklığı ve kontrol gereksinimleri daha az olan bu topolojiler BMS tasarımcılarının büyük çoğunluğu tarafından tercih edilmektedir. Ana prensip olarak gerilim farkı olan batarya hücresinin bir direnç üzerinden deşarj edilmesi yani kanatılması (bleeding) prensibi ile çalışır. İki

ana tip topoloji üzerinden tasarlanmaktadır; pasif balanslamada kontrol ihtiyacı hiç duyulmayan sabit direnç topolojisi ile kontrole ve zamanlama planının hazırlanmasına ihtiyaç duyulan anahtarlama direnç topolojisi.

Sabit direnç topolojisi:

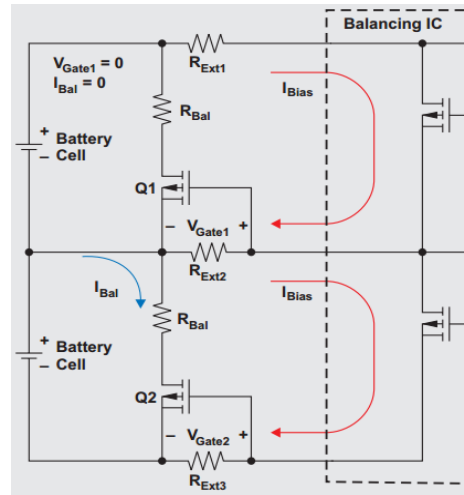
Sabit direnç topolojisi Şekil 2.35'te görüldüğü gibi, seri bağlanan bataryaların paralelinde birer direnç ile de birbirine bağlanması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu sayede batarya hücrelerinin herhangi birinde diğerlerine oranla daha yüksek gerilim var ise ebu dirençler üzerinden deşarj edilmektedir. Herhangi bir kontrol yapısı gerektirmeden devrenin kendi doğal davranışı ile dengeleme yapılmaktadır. Bu devre yapısı kullanılan balanslama yöntemlerinden en verimsiz olanıdır.



Şekil 2.35 : Sabit dirençli pasif balanslama yöntemi [23].

Anahtarlama direnç topolojisi:

Şekil 2.36'da devre şeması verilen anahtarlama direnç topolojisi tez kapsamında çalışılan batarya yönetim sistemleri dahil olmak üzere birçok üründe hatta bazı elektrikli araçlarda dahi kullanılmaktadır. Tasarlanması ve uygulanması kolay olan, kontrolü kolay olan bu yöntem en çok tercih edilen balanslama yöntemidir. Negatif yanları her bir bataryayı sıra ile balanslamak gerekmektedir. Aynı anda birden çok batarya balanslanamamaktadır. Buna rağmen kapasitif aktif balanslama yöntemlerinden çok daha hızlıdır. Balanslama hızını deşarj edilen direnç değerleri ve kullanılan anahtarın akım taşıma kapasitesine göre değiştirmek tasarımcının elindedir.



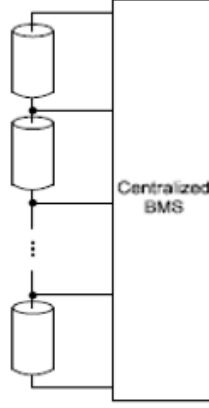
Şekil 2.36 : Anahtarlamalı direnç ile pasif balanslama topolojisi [25].

2.5 BMS Topolojileri

Batarya yönetim sistemi topolojileri genellikle batarya hücrelerinin oluşturduğu modüllerin nasıl daha büyük batarya paketi haline getirileceği ile ilgili yapılardır. Bu modüllerin -ki bu tez kapsamında çalışılan alt modül 6S1P olarak gösterilen 6 seri batarya hücresinin seri olarak bağlanması ile oluşturulmuştur- de daha büyük batarya modülü oluştururken -örneğin elektrikli otomobil batarya modülü, ev enerji sistemi batarya modülü, vb.- hangi konfigürasyon ile oluşturulacağı, bu oluşturulan konfigürasyonun getirdiği faydaları/zararları bakış açısı ile değerlendirilip karar verilmektedir.

Merkezi BMS

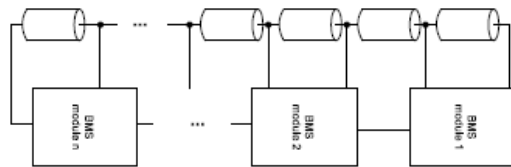
Şekil 2.37’de blok şeması verilen merkezi batarya yönetim sistemi genellikle büyük modüllerde- yüksek gerilimli ve yüksek enerji kapasitesine sahip- değil daha küçük boyutlarda oluşturulan modüllerde ya da alt modüllerde tercih edilen topolojidir. Her batarya hücresi nodu elektronik karta bağlanmaktadır. Tüm hücreler batarya yönetim kartına fiziksel olarak kablolandığı için herhangi bir haberleşme hattı ve protokolü gerektirmez. Fakat büyük boyutlu batarya gruplarında ya da batarya yönetim sistemi elektroniği ile bataryaların yerleşim yerleri uzak olan tasarımlarda bu topoloji kullanımı uygun değildir. Tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen Intersil ISL94202 entegresi kullanılan batarya yönetim sistemi kartı ile Texas Instruments BQ76930 entegresi kullanılan 3 numaralı gerber versiyonlu batarya yönetim sistemi elektronik kartında bu topoloji tercih edilmiştir.



Şekil 2.37 : Merkezi BMS örneği.

Modüler BMS

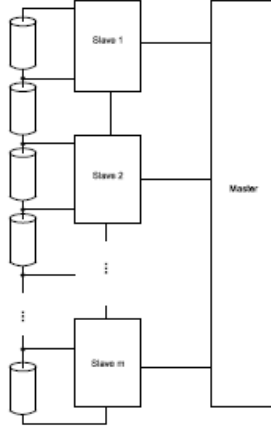
Şekil 2.38’de blok şeması verilen modüler batarya yönetim sistemi topolojisinde merkezi bir kontrolcü bulunmayıp, aynı hiyerarşi seviyesindeki batarya yönetim kartları gerekli m n t r etme ve koruma fonksiyonlarını kendi batarya hücreleri için yapmakta ve diğer batarya yönetim sistemi kartları ile kendi aralarında haberle mektedir. Bu topoloji aynı özellikteki BMS elektronik kartları kullanıldığı için üretimi kolaylaştırmaktadır. Batarya yönetim sistemlerinde hiyerarşik sıralama olmadığında her modül kendi içerisinde koruma önlemi alabilir fakat tahmin (gauge) algoritmaları, tüm sistemi görerek ko turulmalı ve daha çok girdi ile daha doğru tahminler yapılmalıdır.



Şekil 2.38 : Modüler BMS  rne i.

Master-Slave-BMS

Şekil 2.39’de blok şeması verilen master slave yapısı koruma algoritmalarının ve tahmin algoritmalarının paylaşımı açısından en doğru yapıdır. Bu yapıda dikkat edilmesi gereken noktalar haberleşme hatlarının görece artması nedeniyle bu hatların konumlandırılması (harness) ve çeşitli gürültülerden (elektromanyetik, kablo hattı direnci, kapasitif kuplaj vb.) korunması önemli hale gelmektedir.

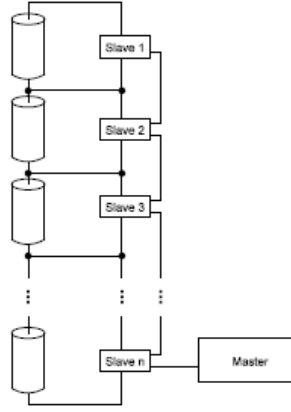


Şekil 2.39 : Master Slave BMS örneği.

Ayrık Haberleşmeli, Dağıtılmış BMS

Şekil 2.40’da blok şeması verilen ayrık ya da dağıtılmış haberleşmeli batarya yönetim sistemi topolojisi ile master slave topolojisi arasındaki en belirgin fark haberleşme yapısıdır. Haberleşme şekli master slave’deki gibi genele yayın (broadcast) şeklinde değil, zincir haberleşme (daisy chain) şeklinde uygulanmaktadır. Bu tip haberleşmenin en büyük sorunu ise master her bir slave karta ulaşmayıp her bir slave kartı durak olarak kullanmakta olup ara bağlantılardan herhangi birisi koptuğunda master kartının sadece bu slave kartla haberleşmesi kesilmez buna ek olarak geri kalan slave kartlarıyla da haberleşemez hale gelir.

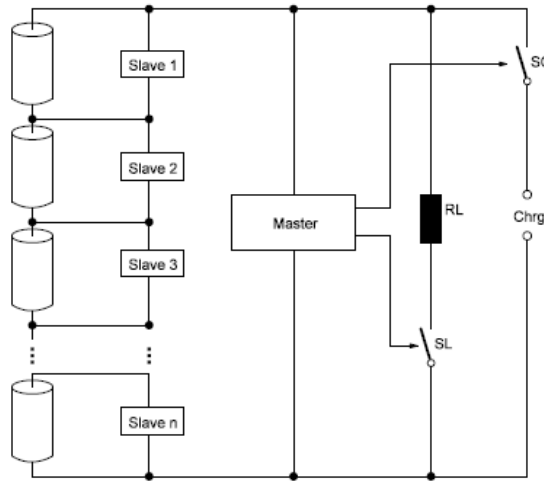
Tez çalışmaları kapsamında, Texas Instruments BQ76930 entegresi kullanılan 4 numaralı gerber versiyonlu batarya yönetim sistemi elektronik kartı tasarımında bu topoloji tercih edilmiştir. Bu kartta işlemcinin 2 adet UART kanalı kullanılarak alt ve üst slave karta izole olarak haberleşme hattı taşınır. Yapılan çalışmada batarya modülleri arasındaki mesafenin çok uzun olmayacağı (<1m) öngörülerek UART haberleşmesi seçilmiştir. Aksi durumlarda haberleşme protokolü daha gürbüz olan versiyonları (CANBUS, RS485) ile değiştirilmelidir.



Şekil 2.40 : Dağıtılmış, ayrı haberleşmeli BMS örneği.

Ayrık Haberleşmesiz (Powerline comm), Dağıtılmış BMS

Şekil 2.41’de blok şeması verilen bu topolojide ise haberleşme hattı olarak ana güç aktarım hattı kullanılmaktadır. Ek kablolama ihtiyacı duyulmaması sebebiyle tercih edilebilen bu topolojide enerji hattındaki gürültüler daha büyük problem olarak geri dönmektedir. Haberleşme sinyalleri DC bara hattının üzerine bindirilen farklı frekanslardaki sinyaller ile sağlanmaktadır ve DC bara üzerinde oluşacak olan tüm gürültüler haberleşmenin negatif yönde etkilenmesine sebep olacaktır.



Şekil 2.41 : Ayrık Haberleşmesiz (Powerline comm), Dağıtılmış BMS örneği.



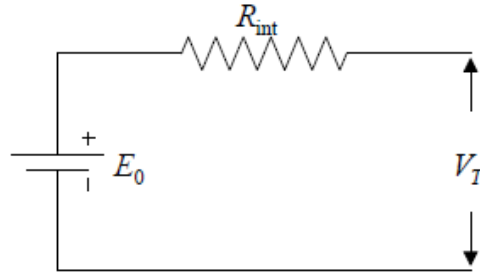
3. BATARYA MODELLERİ VE BENZETİMLERİ

Bu bölümde batarya modelleri , test ve analiz araçları hakkında bilgi verilmiştir. Bunun yanısıra bu test ekipmanları kullanılarak gerçekleştirilen farklı sıcaklıklardaki deşarj akımlarına ait ölçümlerin sonuçları incelenmiş, analiz edilmiş ve yeni batarya modeli önerisi oluşturulmuştur. Literatürde kullanılan elektriksel batarya modelleri en basit topolojiden en kapsayıcı topolojiye kadar incelenerek avantaj ve dezavantajları verilecektir. Referanslarda [13,25-27] görüleceği gibi kullanılan yöntemler genel olarak thevenin modeli üzerinden geliştirilmektedir fakat elde edilen modeller için yapılan deneyler her zaman tek bir sıcaklık üzerinden yapılmış ve farklı şartlar için durumlar incelenmemiştir. Sıcaklık etkinin belirtildiği ve bu tez çalışmasına benzer referansta [27] ise akım-sıcaklık etkilerinin modele birlikte yaptığı etkiler incelenmemiş/belirtilmemiştir. Buna ek olarak yine aynı referansta geçici hal modellemesi için modele eklenen kapasiteler ve dirençlerin sıcaklık etkisi ile değişimi ile ilgili bilgi verilmemiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde standart batarya modelleri incelenmiş sonrasında sıcaklık-akım faktörlerinin etkileri istatistik yöntemleri (regresyon analizi) kullanılarak incelenmiş ve modele eklenmiştir.

3.1 Batarya Modelleri

En basit batarya modeli bir gerilim kaynağı ile buna seri olan ve batarya iç direncini temsil eden Şekil 3.1’de devre şeması verilen modeldir.

Basit Batarya Modeli

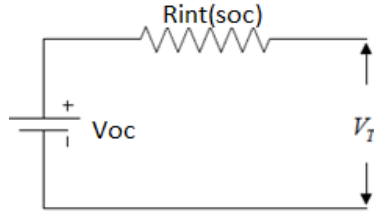


Şekil 3.1 : Basit batarya modeli.

Basit batarya modelinde batarya ideal gerilim kaynağına ek olarak sabit bir iç direnç ile modellenmiştir. Bu modelde gecici hal davranışları ve bataryanın SOC değerine göre gerilim düşümü yeralmamaktadır.

Geliştirilmiş Basit Batarya Modelleri

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de devre şemaları verilen geliştirilmiş batarya modellerinde ise basit modele ek olarak bataryanın SOC değerine göre değişen direnç ve gerilim kaynağı eklenerek model geliştirilmiştir.



Şekil 3.2 : Geliştirilmiş 1. Tip batarya modeli.

Fakat bu modelde de geçici hal davranışları görülememektedir. Ve SOC gerilim düşümü direnç üzerinden modellendiği için, doğru olarak ifade edilememektedir. İkinci tip batarya modelinde (Şekil 3.3) gerilim düşümü gerilim kaynağı üzerinde hesaplanarak gerçeğe daha yakın modelleme yapılmaktadır.

$$R_{int} = \frac{R_0}{S^K} \quad (3.1)$$

S: State of charge

R_0 : Başlangıç İç direnci

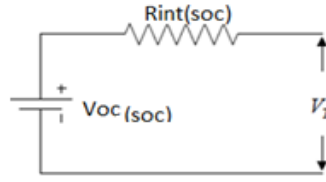
R_{int} : Batarya uç direnci

K: Deneysel elde edilen katsayılar

$$S = 1 - \frac{Ah}{C} \quad (3.2)$$

Ah: Deşarj edilmiş kapasite (Amper-Saat biriminde)

C: Batarya başlangıç Kapasitesi (Farad biriminde)



Şekil 3.3 : Geliştirilmiş 2. Tip batarya modeli.

$$V_t = V_{oc}(SOC) - IR_{int}(SOC) \quad (3.3)$$

$$V_{oc} = V_o - AD \quad (3.4)$$

$$R_{int} = R_o - BD \quad (3.5)$$

I: Deşarj akımı

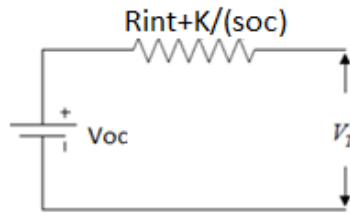
D: State of discharge yani (1-SOC)

A,B: deneysel elde edilen katsayılar

V_{oc} : Bataryanın yüksüz açık devre gerilimi

V_o : Bataryanın full şarjda açık devre gerilimi

Şekil 3.4’de devre şeması verilen ikinci modelde gerçek batarya yapısına yakın modellenen devre üçüncü modelde tekrar direnç üzerinde modellemeye dönmektedir. Fakat burada birinci modelden farkı bir düzenleme katsayısı belirlenerek dirençten bağımsız bir faktör ile gerilim düşümü hesaplanmaktadır.



Şekil 3.4 : Geliştirilmiş 3. Tip batarya modeli.

$$V_t = V_{oc} - (R_{int} + \frac{K}{SOC})I \quad (3.6)$$

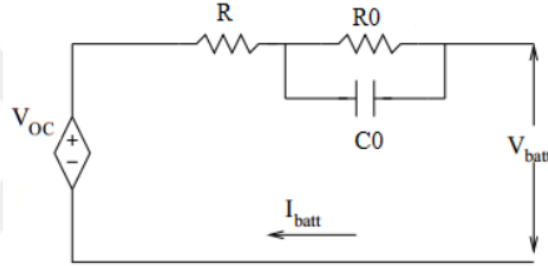
K: Deneysel elde edilen katsayılar

V_t : Batarya uç gerilimi

Modele eklenen kapasitör yapıları ile geçici hal davranışlarını içeren modellerin ilk hali thevenin modeli olarak adlandırılmaktadır. Daha sonrasında bu modele eklemeler yapılarak model çıktıları gerçek batarya davranışlarına daha çok benzetilmiştir.

Thevenin Batarya Modeli

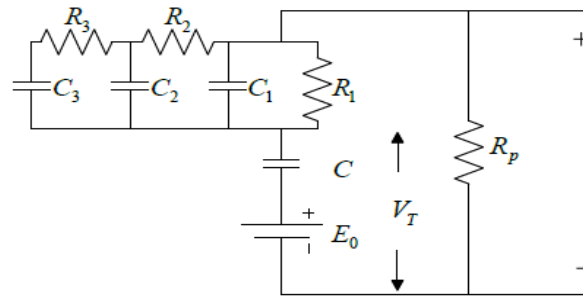
Thevenin batarya modelinde sabit iç direnç modellemesine ek olarak “R ve C” komponentleri devreye eklenmiş ve bataryanın geçici hal davranışları da modele dahil edilmiştir. Thevenin batarya modelinin ilk halinde SOC değerine göre gerilim düşümü bağımlı gerilim kaynağı üzerinden modellenmiştir. Bu model üzerinden geliştirilen diğer devre modellerinde SOC’a göre olan gerilim düşümü yüksek değerli bir kapasite ile ya da Şekil 3.5’teki gibi gerilim kaynağı üzerinde kurulan denklem ile modele dahil edilmiştir.



Şekil 3.5 : Thevenin batarya modeli [26].

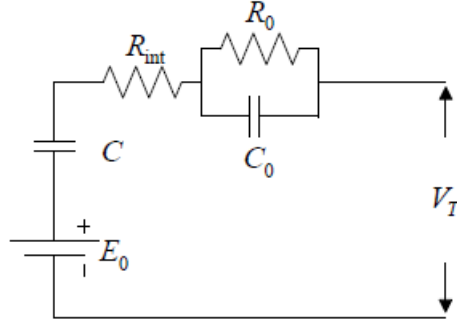
Lineer Batarya Modeli

Lineer batarya modeli Şekil 3.6’da görülen değiştirilmiş/geliştirilmiş batarya modelinden türetilmiş modeldir. Bu modelde hem SOC gerilim düşümü hem de birden çok zaman sabitine sahip geçici hal davranışı modellenmiştir. “R_p” değeri ile bataryanın kendi kendine yaptığı deşarj da modellenmiştir.



Şekil 3.6 : Lineer elektrik modeli [26]

Bu tez çalışmaları kapsamında lineer elektrik model ile Şekil 3.7’de devre şeması verilen değiştirilmiş thevenin modelinin karması bir model üzerinde çalışılmış ve farklı sıcaklık değerlerine göre değişkenlikler bu model üzerinden geliştirilmiştir.



Şekil 3.7 : Değiştirilmiş Thevenin modeli [26].

Thevenin ve bu model üzerinden türetilmiş diğer modeller hem geçici hal davranışlarını hem de kalıcı hal davranışlarını göstermektedir. Bu nedenle bu modellerin matematiksel denklemleri iki ayrı fazda incelenmelidir. Kalıcı hal fazında kapasitelerin tamamen şarj olduğu ya da tamamen deşarj olduğu yani devre şemasında sadece dirençler ve bunlara bağlı gerilim düşümleri/yükselmeleri olduğu düşünülmelidir. Geçici hal fazları için zaman sabitleri (3.8) ve bu zaman zarfında kapasite ve direnç üzerinde oluşan gerilim (3.7) değerleri model üzerinde hesaplanır ve gerçek ölçümlere benzetilir.

$$V_C = V_S e^{\frac{-t}{T}} \quad (3.7)$$

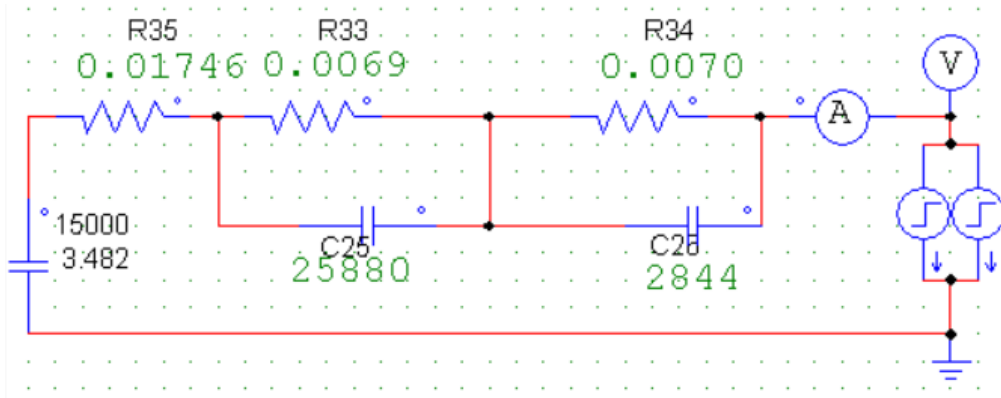
$$T = RC \quad (3.8)$$

Geçici hal davranışlarında ise kapasite ve direnç ile birlikte oluşan yapının zaman sabiti (3.7) elde edilir ve bu zaman sabiti süresince oluşacak gerilim düşümü ya da yükselimi (3.8) hesaplanır.

3.1.1 Thevenin batarya modelinin benzetim sonuçları

Thevenin batarya modeli üzerine bazı eklemeler yapılarak elde edilen benzetim devresi sayesinde, deneyler ile elde edilen gerçek datalara benzer çıktılar elde edilecek hale getirilmiştir. Bu benzetim modelinin oluşturulması, modifiye edilmesi ve oda sıcaklığında yapılan deney datalarına fit edilmesinin nedeni elde ettiğimiz gerçek

datalara en yakın davranış gösteren bir modelin elde edilebileceğini göstermek ve bir sonraki adımda da farklı sıcaklıklarda bu modelin zayıf noktalarını elde etmektir. Sonrasında da tez çalışmaları kapsamında önerilecek olan ve Şekil 3.8’de simulasyon devre şeması verilen model ile bu zayıf noktaların iyileştirilmesi sağlanacaktır. Benzetimler PSIM benzetim programı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.8 : PSIM programında tasarlanan “değiştirilmiş Thevenin modeli”.

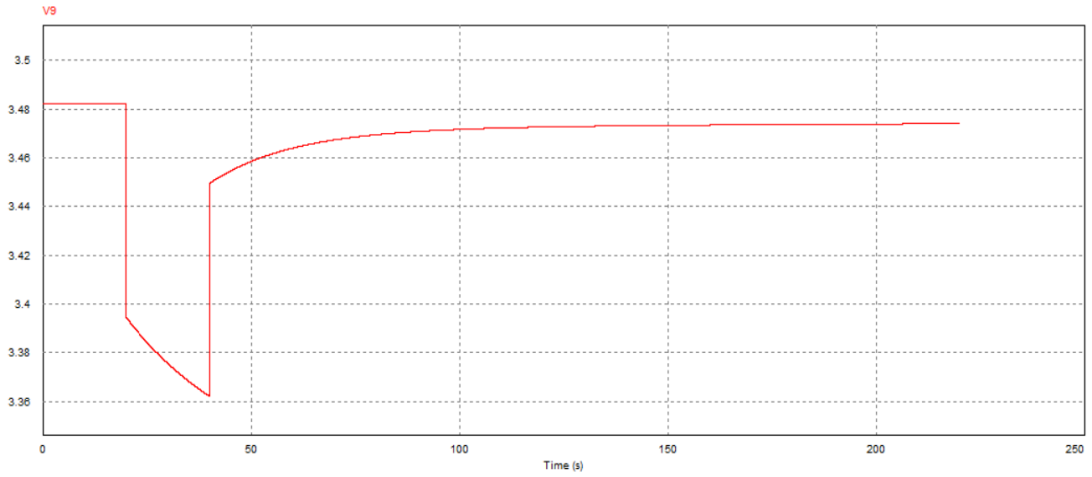
Benzetim datalarından da görüleceği gibi literatürde yer alan sabit gerilim kaynağı kullanmak bataryanın gerçek davranışında yer alan gerilim kaybı (kapasite kaybı) hareketlerini içermemektedir. Bu nedenle model, gerilim kaynağı ile değil ilk gerilim değeri olan yüksek değerli bir kondansatör ile sağlanmıştır. Modelde gerilim kaynağı yerine kullanılan kondansatör üzerindeki enerji Denklem (3.9) ve (3.10) ile hesaplanır.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \text{ (joule)} \quad (3.9)$$

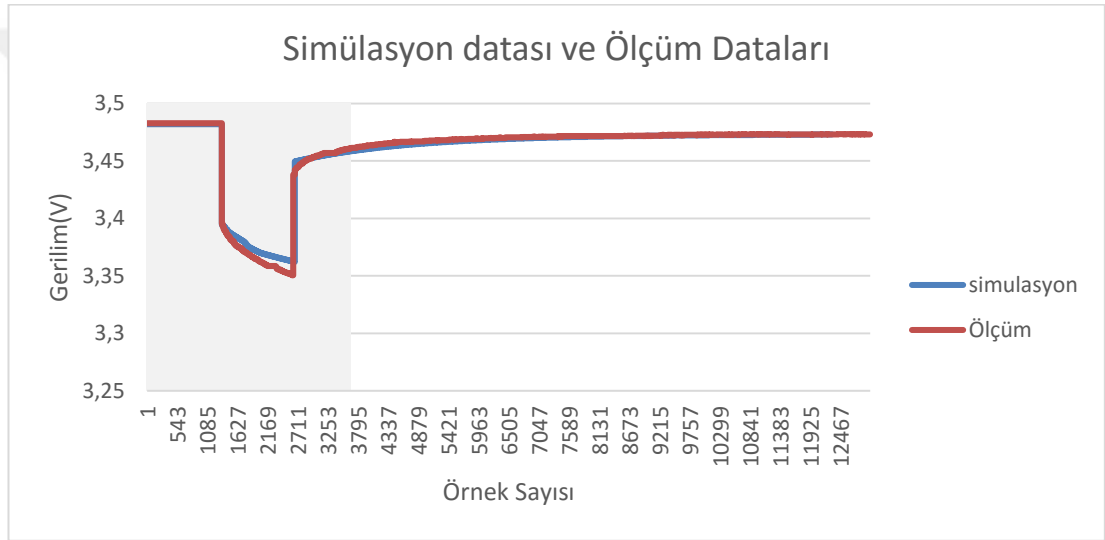
$$1Wh = 3600 \text{ joule} \quad (3.10)$$

Seçilen kapasite değeri kullanılan bataryanın enerji (3000mAh*3.7V) kapasitesine denk olacak şekilde Denklem (3.9) ve (3.10) kullanılarak seçilmiştir.

Bu değerler ile elde edilen simulasyon grafiği Şekil 3.9’da ve gerçek ölçümler Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.9 : PSIM’de “değiştirilmiş Thevenin modeli” deşarj grafiği.



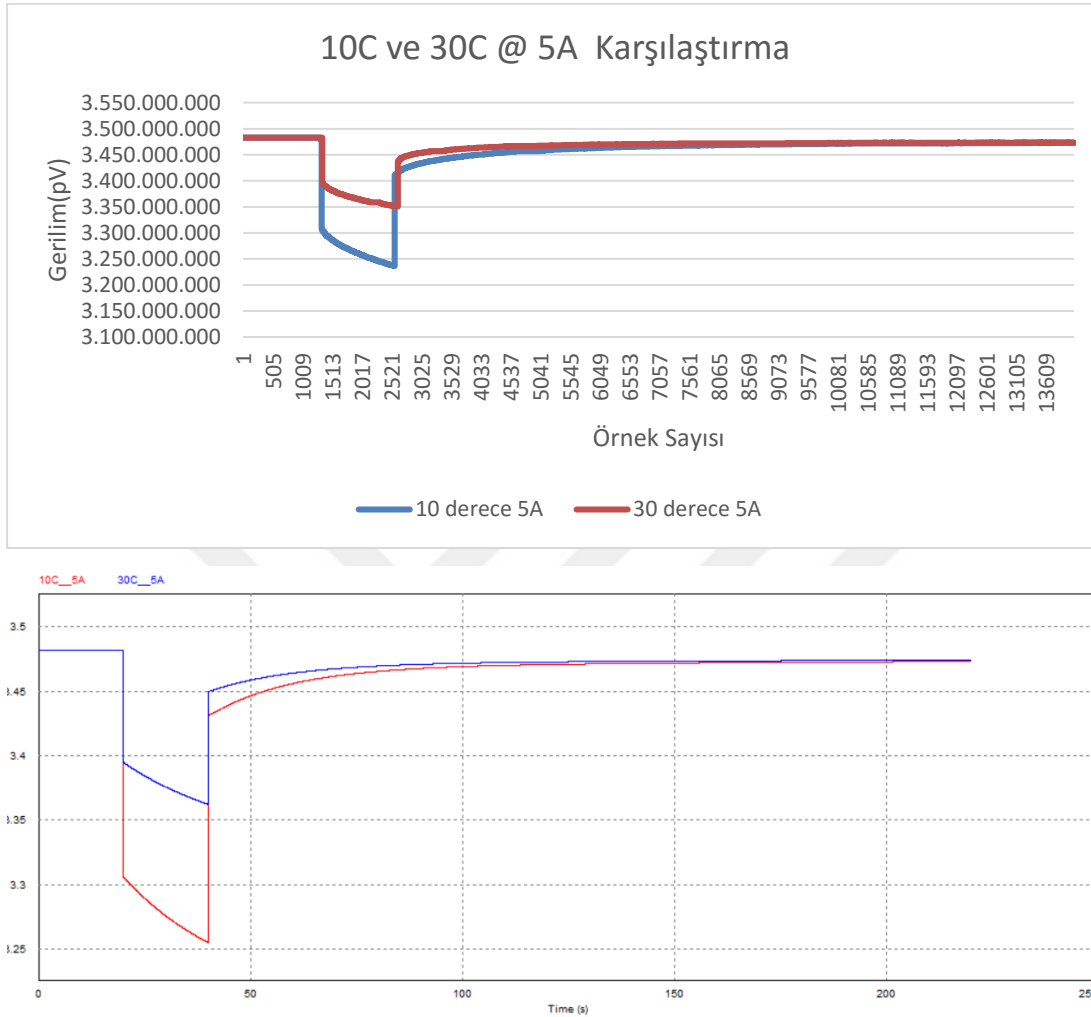
Şekil 3.10 : Simülasyon verileri ile ölçüm verilerinin karşılaştırması.

Şekil 3.10’den görüldüğü üzere simulasyon dataları ile gerçek ölçüm dataları birbiri ile örtüşmektedir. Paralel R ve C değerlerinin bataryanın doğası nedeniyle değişkenlik göstermesi ve tam netlikte formüle edilememesi sonucu geçic hal davranışlarında minör farklılıklar gözlenmesine rağmen modellemenin gerçeğe yakınlığı yeterli görülmüş ve tez kapsamında bu model üzerinden ilerlenmiştir.

3.1.2 Thevenin batarya modelinde sıcaklık etkisi

Başlık 3.1.1 de kullanılan ve gerçek datalara fitlenen model ile farklı sıcaklıkta yapılan gerçek deney sonuçları grafiğe döküldüğünde ise Thevenin modelinin zayıf noktası yani farklı sıcaklıklara göre modelin adaptif olmaması durumu görülmektedir. Tez çalışması içerisinde yapılması hedeflenen nokta bu sıcaklık ile değişen parametrelerin

taini ve modellenmesidir. Şekil 3.11’den de görüldüğü üzere sıcaklık ile iç direnç negatif sıcaklık katsayısı ile değişmektedir.



Şekil 3.11 : Farklı sıcaklıklarda için ölçüm(üstte), simülasyon(altta).

Yani sıcaklık arttıkça bataryanın iç direnci düşmekte ve bu sayede verimi artmaktadır. Fakat bu noktada şu unutulmamalıdır ki lityum iyon bataryanın sağlıklı çalışma penceresi küçüktür ve bu pencerenin sınırlarını oluşturan etmenlerden en önemlisi sıcaklıktır. Sıcaklığın üst sınırı kullanılan elektrolit katkı maddelerine göre değişmekle beraber 60 ila 80 derece aralığında maximum değere sahiptir. Bu değerlerin geçilmesi bataryaya kalıcı zarar vermektedir.

3.1.3 6-Sigma yöntemleri ile deney düzeni tasarımı (DOE)

Deney tasarımı tanımı öncesi 6-Sigma tanımlaması ve kullanım nedeni açıklanacaktır. Tanımla, ölç, analiz et, geliştir, kontrol et adımlarını içeren bu yöntem genel olarak tarif edilecek olursa “istatistiksel kalite kontrol” başlığı ile özetlenebilir [27]. Üretim

kalitesinin artırılması, israfın azaltılması ve maliyetlerin düşürülmesi için kullanılan bu yöntemin içerdiği adımlar genel olarak düşünüldüğünde sadece üretim ve kalite kontrol için değil, test düzeneği oluşturmak için de, test datalarını analiz etmek için de kullanılabileceği görülmektedir. Bu tez kapsamında Şekil 3.12’de aşamaları verilen 6-Sigma’nın ölçme, analiz etme ve geliştirme adımları kullanılmıştır.



Şekil 3.12 : 6-Sigma tanım çemberi [28].

Deneyin tam olarak tanımını yapmak gerekirse, sistematik bir prosedür içerisinde kontrollü koşullar altında, bilinmeyen etkileri öğrenebilmek için tasarlanan testlerdir. Testler sonrasında yapılan analiz ise bilinen giriş değerleri ile çıkışın nasıl ve ne oranda etkilendiğinin bulunması ve bunun akabinde istenilen sonucun elde edilmesi için girişin nasıl ayarlanması gerektiği bilgisinin elde edilmesine dayanır. Gerekli verileri toplayabilmek için birçok şekilde ve düzende deney yapılabilir.

DOE ifadesi, tasarlanan deneyler ya da deneysel tasarım anlamlarında kullanılmaktadır –ki her iki anlamı da doğrudur. Bu yöntemin kullanılma amacı deney maliyetlerini ve deney karmaşıklığını azaltmak, deney sonuçlarının değerlendirme kriterlerini doğru belirleyebilmek, deney sayılarını optimum noktada tutmak ve optimum zamanda sonuçları elde etmektir.

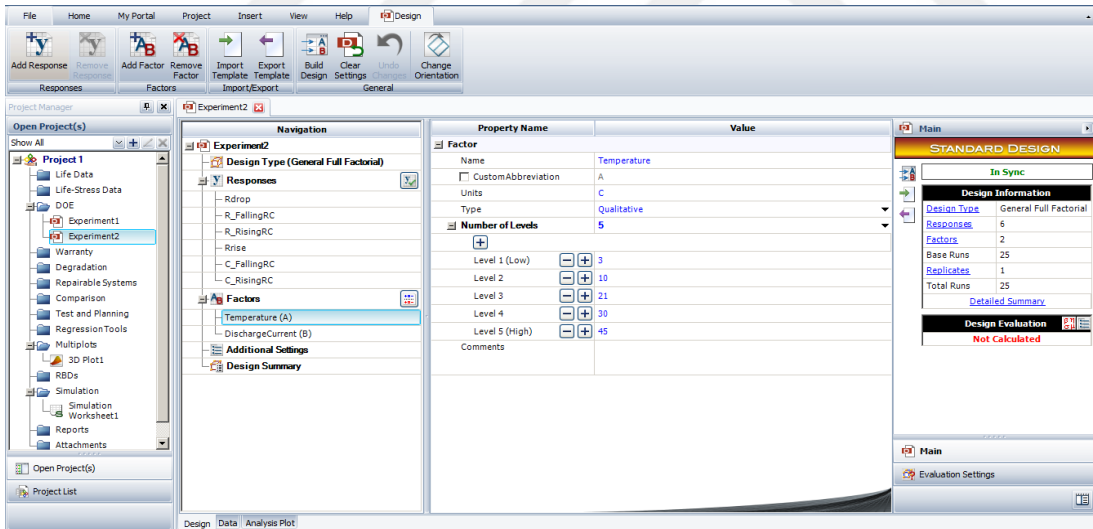
Bu yöntemi bir benzetim ile açıklamak gerekirse, bir kek yapma sürecini ele alalım. Deney tasarımı sürecinde olduğu gibi burada da ele alacağımız parametre başlıkları: *Faktörler* diğer bir adıyla *girişler*, *seviyeler* ve *tepkiler* diğer bir adıyla *çıkışlar*’dır.

Faktörleri inceleyecek olursak; bu değerler kontrol edilebilir ya da kontrol edilemeyen değerler olabilir. Başladığımız örnek için kek malzemeleri ve pişirilecek olan fırın kontrol edilebilir faktörlerdir. Bunlara ek olarak karıştırma tipi, sırası gibi faktörlerin de etkisi deney tasarımı faktör olarak eklenebilir.

Seviyeler aslında her faktör için belirlenen ayarlardır. Yine bu örnek içinde devam edersek kek malzemelerinin miktarları, fırının sıcaklık seviyeleri, karıştırma sıraları gibi değerler seviyeleri oluşturur.

Tepkiler deney girişleri ve seviyeleri ile elde edilen sonuçlardır. Sonuçların tıpkı girişler gibi başlıkları ve dolayısıyla değerlendirme kriteri olacaktır. Yine örnek üzerinden gitmek gerekirse, kekin tadı, kabarıklığı, yumuşaklığı, görünüşü gibi kriterler tepkileri, çıktıları oluşturur. Bu noktadan bakıldığında bu çıkışların tamamı girişlerden ve seviyelerinden azami ölçüde etkilenecektir. Dolayısıyla optimum girişi ve seviyeyi bulmak, yapılan deney sonuçlarını değerlendirme ve sonrasında uygun korelasyonu kurma ile elde edilecektir.

Deney tasarımı adımlarının belirlenmesi ve daha sonrasında elde edilen datanın istatistik yöntemleri ile analiz edilmesi için iki farklı program kullanılabilmektedir. Bunlardan ilki olan Minitab daha çok excel tabanlı bir kullanıcı arayüzüne sahiptir. Daha iyi kullanıcı arayüzüne sahip olan ve Şekil 3.13'te verilen Reliasoft programı da aynı amaçla kullanılabilmektedir.



Şekil 3.13 : Reliasoft test tasarım programı arayüzü.

Bahsedildiği üzere faktörlerin yani girdi parametrelerimizin hangilerinin “response” yani ölçtüğümüz parametreler üzerinde etkili olduğunu görmek için deney adımları belirlenmiştir. Bu deney adımlarında batarya modeline etki edebilecek olan pil yüzeyi sıcaklığı ve bataryanın deşarj akım değerleri alınmıştır. Çıktılarımız ise deşarj ilk başladığında oluşan gerilim düşümü ve buna bağlı direnç (Rdrop) daha sonra kavisli(eksponansiyel) şekilde deşarj olmasını sağlayan direnç kapasite ikilisinin

değerleri (R fallingRC, C fallingRC) ve bu parametrelerin benzerlerinin deşarj bitirildiğindeki değerleridir (Rrise,R risingRC, C risingRC). Şekil 3.14'te görüldüğü gibi programın verdiği tek tekrarlı testleri ve sırası oluşturulmuştur.

	A:Temperature (C)	B:Discharge Current (A)	Rdrop (ohm) ☒	R_FallingRC (ohm) ☒	R_RisingRC (ohm) ☒	Rrise (ohm) ☒	C_FallingRC (Farad) ☒	C_RisingRC (Farad) ☒
1	30	7						
2	3	7						
3	3	3						
4	30	10						
5	10	3						
6	3	5						
7	45	3						
8	21	1						
9	3	10						
10	45	1						
11	10	10						
12	21	3						
13	30	3						
14	30	1						
15	21	10						
16	21	5						
17	10	5						
18	21	7						
19	3	1						
20	10	1						
21	45	10						
22	10	7						
23	45	7						
24	45	5						
25	30	5						

Şekil 3.14 : Reliasoft ile çıkartılan deney adımları.

Buradan sonra yapılacak olan işlemler faktörlerin oluşturulduğu ortamda çıktıları elde etmek ve tabloda yerlerine yerleştirmek olacaktır. Sonrasında programın sağladığı sayısal analiz araçları ile değerlendirilip etkili parametreler ve nasıl etkilediği, hangi fonksiyon ile etkilediği elde edilecektir.

3.2 Kullanılan Test Ekipmanları ve Özellikleri

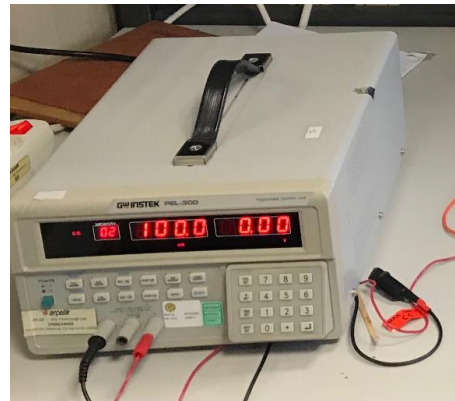
Tezi oluşturan ana nokta sıcaklığa göre adaptif değişen batarya modeli elde etmek ve bu modeli içeren batarya yönetim sistemi oluşturmaktır. Bu gaye için öncelikle batarya davranışları farklı parametrelere göre ölçülmeli ve karşılaştırma yapılabilecek verilerin elde edilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle farklı sıcaklıklarda ortamların oluşturulabilmesi için şartlandırılmış kabinlerin olması, farklı yüklerin test edilebilmesi için de ayarlanabilir elektronik yük gereksinimi vardır. Bunların dışında bu test parametrelerinin yani akım, gerilim ve sıcaklık ölçülmesi, kaydedilmesi gereklidir. Şekil 3.15'te verilen bataryaların kontrollü şarj ve deşarj edilmesini sağlayan ve batarya hücrelerinin testi için özel olarak üretilen Cadex8000 cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 4 ayrı kanallı, tekil hücre ve çoklu seri hücre testi yapabilir, şarj ve deşarj için profil girişi yapılabilir, 10A'e kadar deşarj yapabilir ve kendi

arayüzü ile data toplayabilir. Fakat data toplama için minimum örnekleme zamanı tez içerisinde kullanım için yeterli gelmemiş ve geçici hal davranışları buradan alınan datalar ile modellenememektedir. Bu nedenle farklı data toplama sistemleri denenmiştir.



Şekil 3.15 : Cadex C8000 şarj/deşarj cihazı.

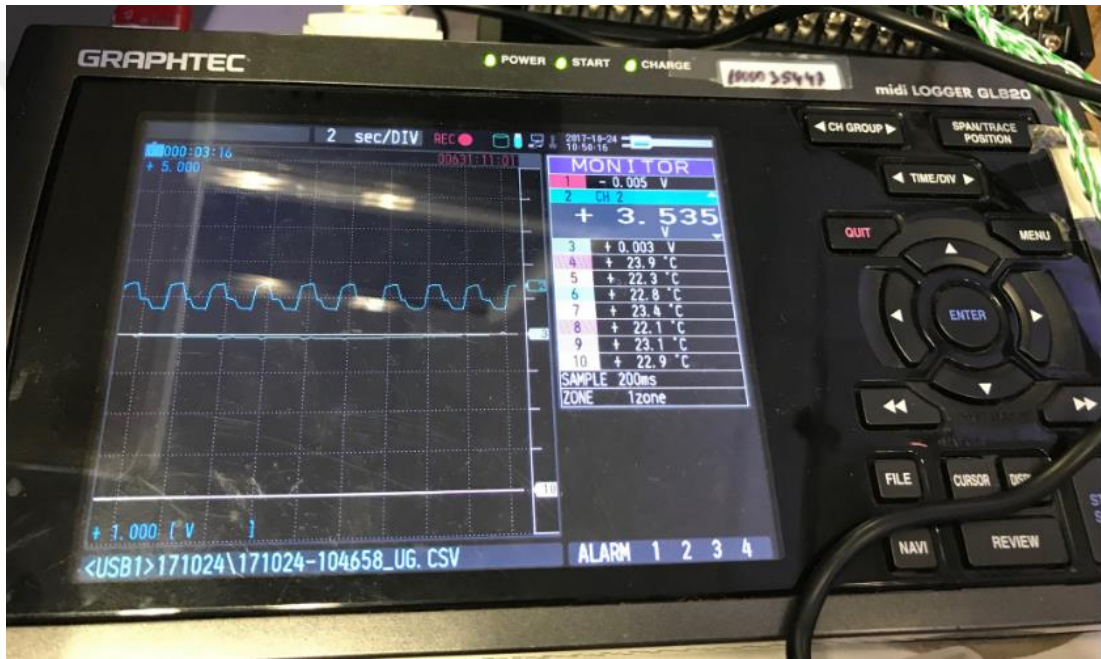
Bataryanın kontrollü olarakdeşarj edilebilmesi için kullanılan Gwinstek ve Şekil 3.16’da verilen Croma(63804) markalı elektronik ayarlı yüklerin temel ayrımı Croma markalı elektronik yükün yüksek gerilimli kaynaklar için tasarlanmış olması ve minimum gerilim sınırının 5V olmasıdır. Bu nedenle Croma ile tekil hücre testleri yapılamamış bunun yerine 6 seri hücre barındıran batarya paketi üzerinden testler yapılmıştır. Gwinstek markalı ayarlanabilir yük ise tekil hücre testlerinde kullanılabilmektedir. Fakat tez çalışmaları sırasında bu elektronik yükün kendi içerisindeki yük regülasyonu nedeniyle bazı hatalı ölçümler yapılmasına neden olduğu görülmüştür.



Şekil 3.16 : Chroma 63804 ve Gwinstek PEL300 elektronik yükleri.

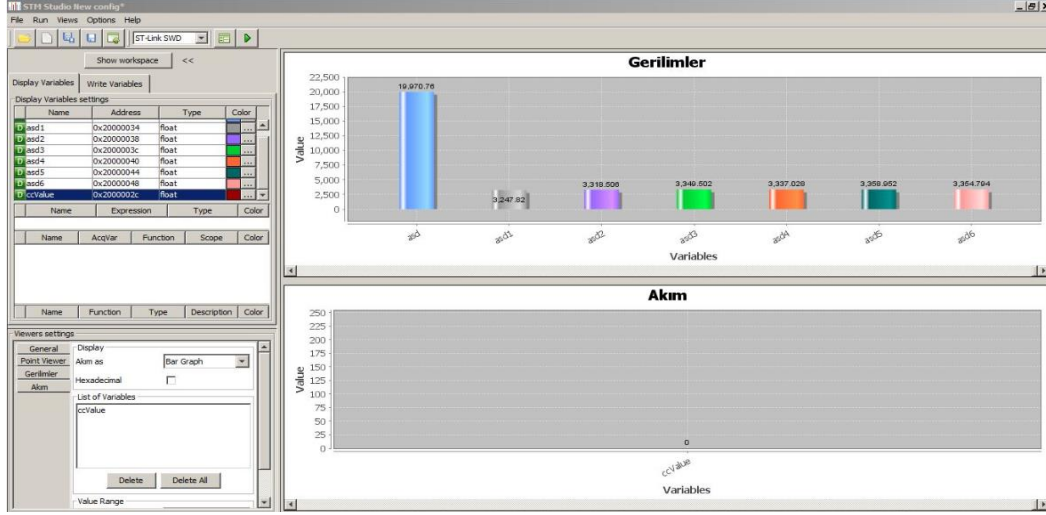
Daha gelişmiş özelliklere sahip olan Croma elektronik yükün sabit akım modunda maximum akım sınırının yanısıra akım di/dt 'si hem yük devreye girerken hem de çıkarken ayarlanabilmektedir.

Verilerin kaydedilmesi için kullanılan Graphtec datalogger sistemi Şekil 3.17'de verilmiş ve tez çalışmalarının ilk aşamalarında kullanılmıştır fakat yine Cadex gibi örneleme zamanının çok düşürülememesi nedeniyle kullanımına devam edilmemiştir. Tez çalışmaları kapsamında yapılan BMS sistemi üzerinden veri toplanmasını sağlayan STMstudio adlı arayüz ve PC üzerine log etme özelliği tez çalışmalarındaki dataları oluşturan ana kaynak olmuştur.



Şekil 3.17 : Graphtec midi datalogger GL820 modeli.

Şekil 3.18'de arayüzü gösterilen STMstudio, ST markalı işlemciler için tasarlanmış olup değişkenlerin izlenebildiği ve bu değişkenlerin değerlerinin görsel olarak grafiklere dönüştürülebildiği bir bilgisayar arayüzüdür. İşlemci ile haberleşme yöntemi “serialwire” programlama hattı üzerinden olduğu için hızı yüksektir ve dolayısıyla 1ms'ye kadar örnekleme hızı artırılabilir.

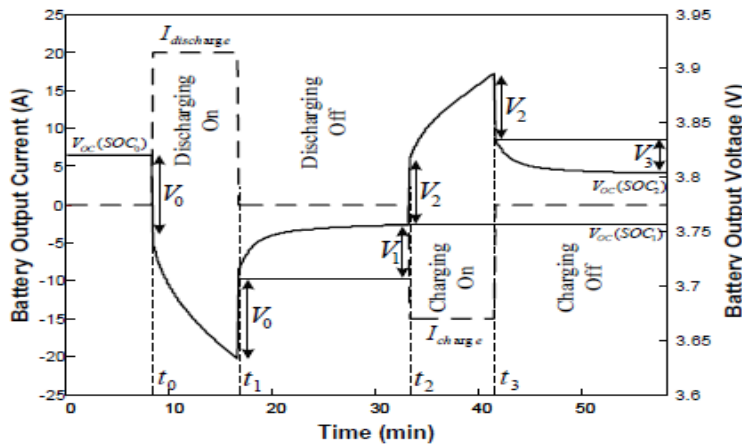


Şekil 3.18 : Stmstudio PC arayüzü ve yazılım değişkenleri.

Farklı sıcaklıklara ve nem değerlerine ayarlanabilen şartlandırılmış kabin sistemleri de tez kapsamında farklı sıcaklıklardaki batarya davranışlarını görmek için kullanılmıştır.

3.3 Toplanan Verilerin Analizi

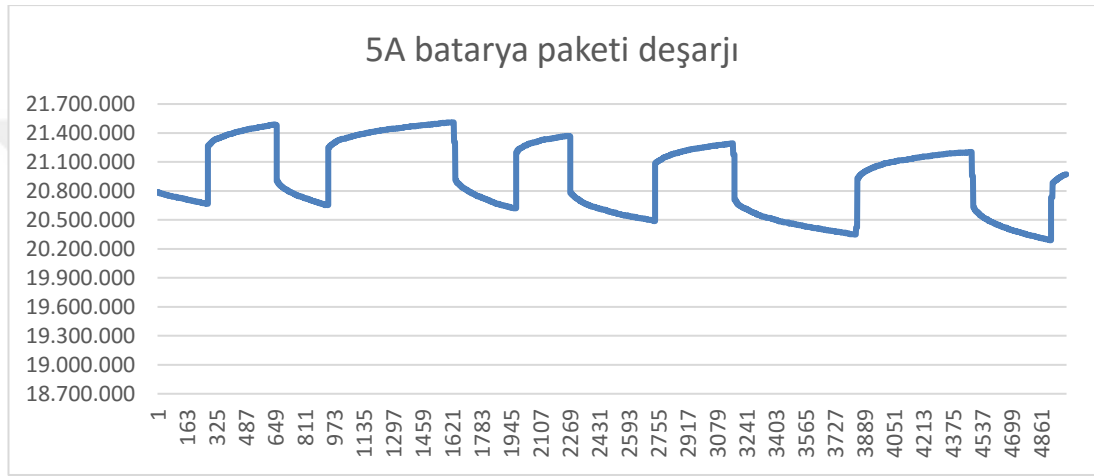
Batarya hücresi üzerinden parametre analizi yapılırken kullanılan ana yöntem adım adım deşarj ve adım adım şarj etmektir. Bu sayede bataryanın geçici hal davranışları elde edilir. Geçici hal davranışları kullanılan Thevenin batarya modelinde farklı köşe kesim frekanslarına sahip birden fazla paralel direnç, kapasite ile sağlanmaktadır. Şekil 3.19’da deşarj ve şarj adımları ile elde edilen gerilim dalga şekilleri verilmiştir.



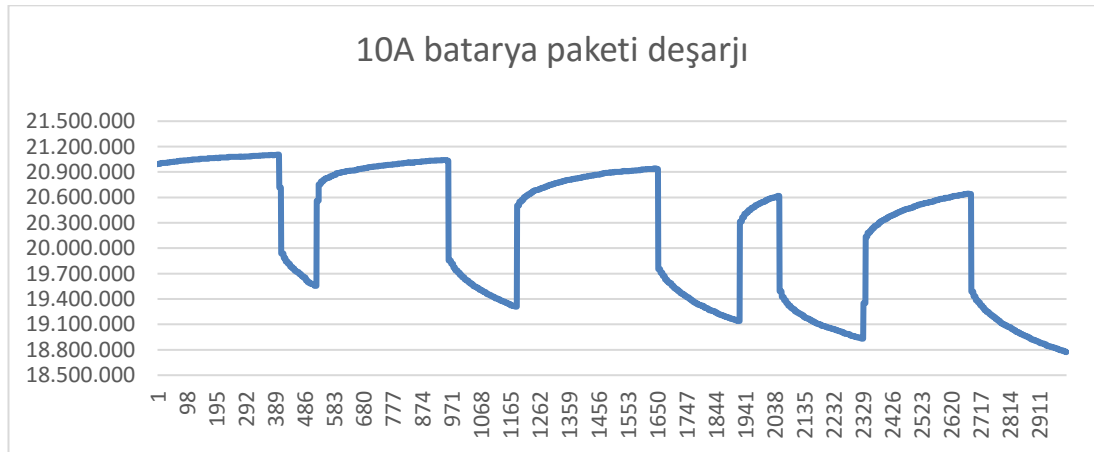
Şekil 3.19 : Batarya şarj ve deşarj adımları gerilim grafiği [29].

Şekil 3.19’den de görüleceği gibi deşarj ve şarj adımları ile elde edilen gerilim düşümleri, deşarj eğimi, ilk gerilim ve dinlenme sonrası gerilim farkı, şarj gerilim

artışı, şarj eğimi, ilk gerilim ve şarj sonrası gerilim farkı, bu iki ayrı süreçteki şarj akımı ve deşarj akımı batarya hücresinden elde edilmek isten parametreler ile ilgili ip ucu vermektedir. Bu değerlerin sıcaklıkla, şarj akım miktarıyla, deşarj akım miktarıyla ve bu faktörlerin her birinin birbiri ile korelasyonu ile nasıl etkilendiği bilgisi, yapılan deneyler sonucu elde edilmiştir. Elde edilen verilerin Thevenin modelindeki karşılıkları ise batarya iç direnci, batarya paralel kapasitesi, kapasite-direnç ikilisi değerleridir. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’deki deşarj adımları 6 seri hücreli batarya paketine uygulanmış ve adımlar el ayarı ile verilmiştir.



Şekil 3.20 : Batarya Paketi deşarj adımları grafiği (5A deşarj).

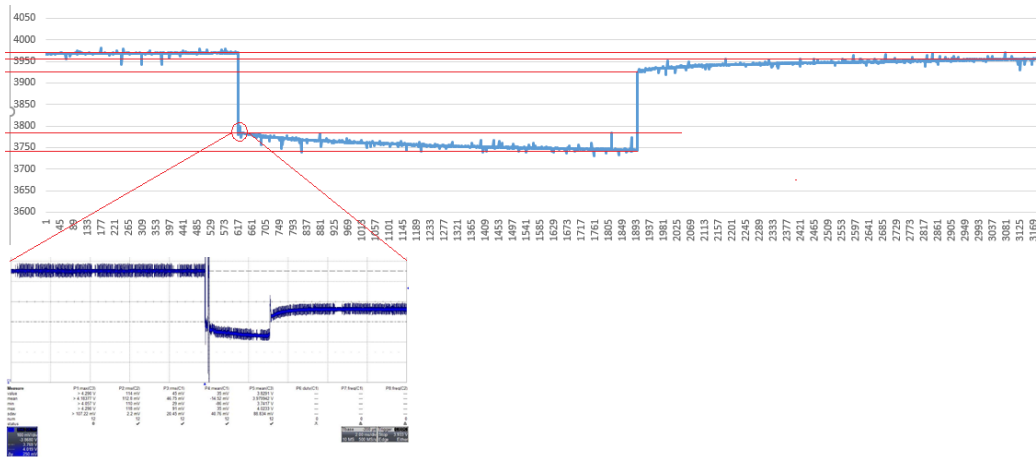


Şekil 3.21 : Batarya Paketi deşarj adımları grafiği (10A deşarj).

Deney düzeneği ile alınan datalar tekil hücrelere uygulanmış olup tez çalışmalarında önerilen modelde bu tekil hücrelerin dataları kullanılmıştır. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’deki datalar ise paket davranışını görmek ve önerilen model parametrelerinin

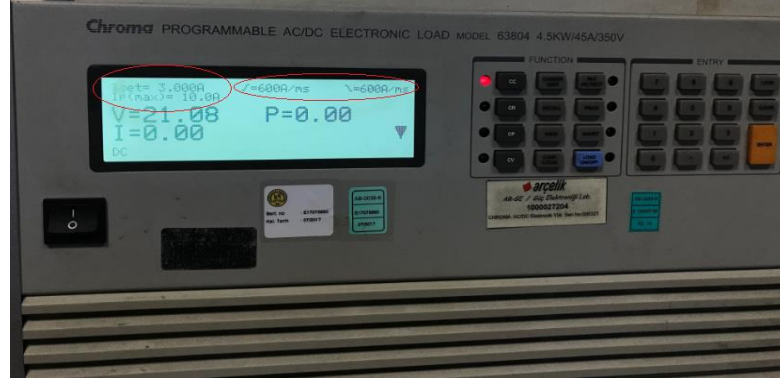
paket modeli ile olan uyumunun görülmesi için yapılmış ve tez çalışmasına eklenmiştir. Deşarj grafiğinden de görüleceği gibi farklı akımlarda deşarj için farklı gerilim düşümleri ve farklı geçici hal davranışları olmaktadır.

Deneyler gerçekleştirilirken gözlenen bir diğer durum ise deşarj sırası ve deşarjın bırakılması sırasında oluşan farklı zaman sabitli, eğimli gerilim grafiğinin yanı sıra yükün ilk devreye girmesi, yani bataryanın ilk deşarj olmaya başlaması anında da oluşan ayrı bir eğimli gerilim farkı karakteristiği Şekil 3.22’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.22 : GWINSTEK markalı elektronik yük ile oluşan akım aşımı.

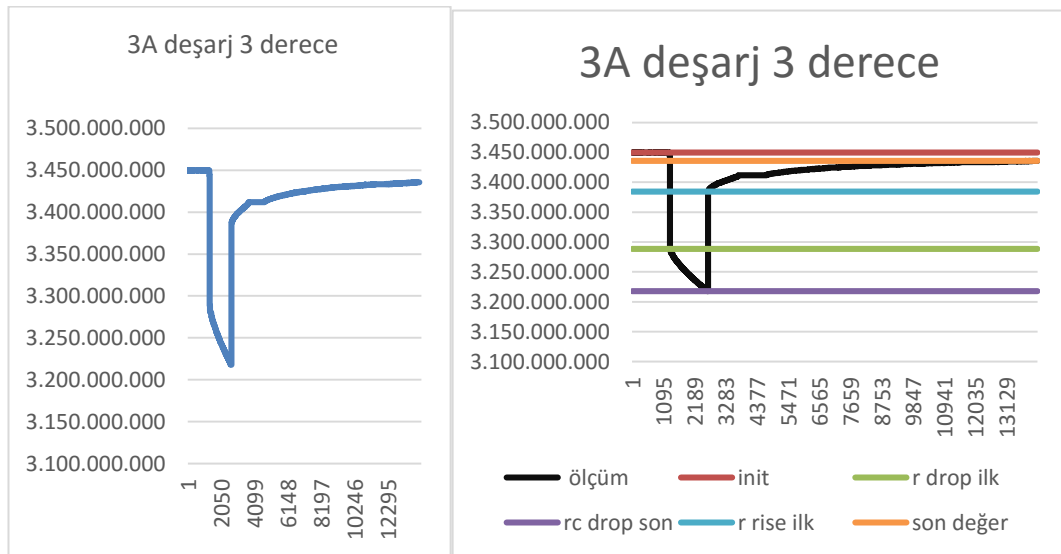
Şekil 3.22’de görülen geniş zaman aralığındaki ve daha dar zaman aralığındaki iki grafik kullanılan GWINSTEK markalı elektronik yükün kendi içindeki yük regülasyonu nedeniyle oluşmuştur. Gözlenen bu durum tez çalışmaları süresince yapılan deney sürelerini uzatmıştır fakat tez çalışması süresince bu datalar kullanılmamıştır. Bunun yerine Şekil 3.23’de verilen CHROMA markalı yüksek güçlü elektronik yük kullanılmıştır. Bu elektronik yük cihazında GWINSTEK’teki gibi “sabit akım” modunda akım değerleri seçilir fakat farklı olarak deşarj başlangıcı ve bitiş için di/dt sınırları da belirlenebilmektedir. Bunun yanında maksimum tepe akım değeri de girilebilmektedir. Yani yukarıdaki kontrolör nedeniyle oluşan yüksek akım ve sonrasında düzelme durumunun da sınırı belirlenebilmektedir.



Şekil 3.23 : Croma elektronik yük cihazı arayüzü ve akım sınırları.

3.4 Batarya Modelinin İyileştirilmesi

Seçilen batarya modelinin iyileştirilebilmesi için öncelikle lityum iyon bataryanın farklı ortam koşullarındaki durumları incelenmiştir. Deneysel dataların oluşturulması için daha önceden yapılan deney tasarımı yönteminden elde edilen tek tekrarlı testlerin dataları elde edilmiştir. Elde edilen datalar, bir örneği Şekil 3.24'te örneği verildiği gibi toplamda yirmi beş adet olmak üzere grafiğe dökülmüştür. Daha sonrasında elde edilmek istenen iç direnç ve Thevenin modelindeki direnç kapasite ikilisi için limit çizgileri çizilerek bu çizgiler arasındaki zaman ve gerilim farkı ölçülmüş, bu değerler üzerinden kapasite ve direnç değerleri hesaplanmış ve bir örneği Çizelge 3.1'de görülebileceği gibi tablo haline getirilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan tüm değerler analiz aşamasına geçilmeden önce toplanmış ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.24 : Deney verileri ve değerlendirmesi (3°C, 3A deşarj).

Yapılan deneylerdeki faktörler yani sıcaklık ve akım 5'er adet seviyeye sahiptir. Bu seviyeler akım için 1A, 3A, 5A, 7A ve 10A; sıcaklık için ise 3°C, 10°C, 21°C, 30°C ve 45°C olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin her biri için toplamda 25 adet deney yapılmış ve dataları elde edilmiştir. Her deney için ilk bekleme süresi 20sn, deşarj süresi 20 sn ve pil gevşeme süresi (relaxation time) 3 dk olarak alınmıştır. Tablo üzerinden elde edilen doğrudan datalar ve bu datalar üzerinden hesaplanan değerler aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Deşarj testi çıktıları ve hesaplanan değerler örneği (3°C, 3A testi).

Parametreler	Değerler
V R drop (mV)	161.028.076
V R rise (mV)	166.697.998
V RC drop (mV)	70.686.035
V RC rise (mV)	51.030.029
t RC drop (sn)	20
t RC rise (sn)	180
Deşarj akımı (A):	3
Gerilim düşümü (mV)	13.986.084
R drop	0,053676025
R rise	0,055565999
RC R rise (Ohm)	0,01701001
RC C rise (F)	1175,778285
RC R Drop (ohm)	0,018899984

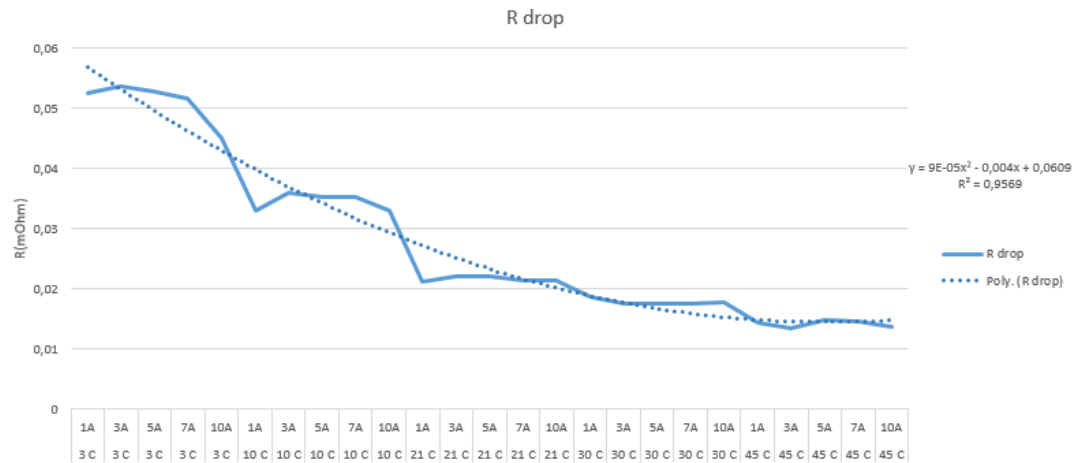
Grafiklerden elde edilen gerilim farkları üzerinden deşarj akımı bilindiği için deşarj başlangıç direnci(R drop), deşarj bitiş direnci(R rise) hesaplanmıştır. Deşarj sonrası gevşeme evresindeki direnç hesabı, süreç başlangıcı ve sonu arasındaki gerilim farkının deşarj akımına bölünmesi ile elde edilmiştir. Bu işlem rahatlıkla yapılabilmektedir çünkü rahatlama evresindeki gerilim yükselişinin ana nedeni bu direnç kapasite üzerindeki gerilimdir. Kapasite hesabı ise toplam gevşeme evresi süresi bilindiğinden ve $R \times C$ 'ye eşit olduğundan dolayı, bu sürenin dirence bölümü ile elde edilir. Elde edilen kapasite değerinin doğruluğunun sağlamasını yapmak için klasik kapasite akımı formülü (3.12) de kullanılmış ve yakın değerler elde edilmiştir. Süreler için 180 sn kullanılmış, bu süre boyunca gerilim değişimleri de tablodan “**V RC rise (mV)**” değerinden alınmıştır.

$$i = C \frac{d_v}{d_t} \quad (3.12)$$

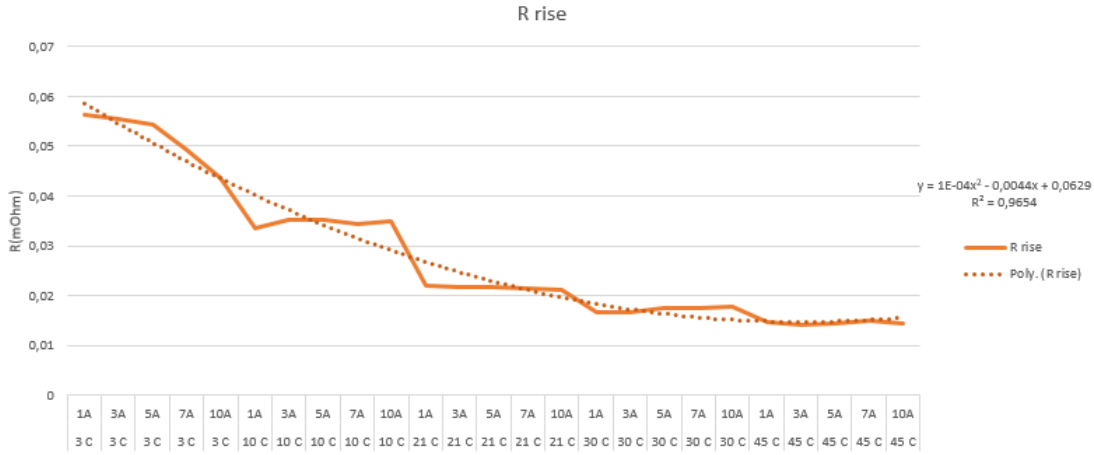
Çizelge 3.2 : Tüm deney sonuçları ile hesaplanan batarya modeli parametreleri.

		R drop	R rise	RC R rise (Ohm)	RC C rise (F)	RC R Drop(ohm)	RC C Rdrop(F)
3 C	1A	0,052542	0,05632202	0,012852051	1556,171851	0,016632079	10822,45942
3 C	3A	0,053676	0,055566	0,01701001	1175,778285	0,018899984	9523,817754
3 C	5A	0,052693	0,0543564	0,018143994	1102,293121	0,019807178	9087,614693
3 C	7A	0,051732	0,04919402	0,019547991	1023,123034	0,01701001	10582,00445
3 C	10A	0,044982	0,04365901	0,009790186	2042,862211	0,008467212	21258,47352
10 C	1A	0,032886	0,03364185	0,011340088	1763,654744	0,012095947	14881,01758
10 C	3A	0,03591	0,03527995	0,014238037	1404,68802	0,013607991	13227,52165
10 C	5A	0,03523	0,03507842	0,012247168	1633,030591	0,012095996	14880,95706
10 C	7A	0,035154	0,03445201	0,013985979	1430,003533	0,013284005	13550,13011
10 C	10A	0,032924	0,0348894	0,015422388	1296,816057	0,017387988	10351,97384
21 C	1A	0,021168	0,02192407	0,009449951	2116,41309	0,010205811	17637,01091
21 C	3A	0,02205	0,02167204	0,010079997	1984,12764	0,009702067	18552,74757
21 C	5A	0,022075	0,0217728	0,009676807	2066,797532	0,009374414	19201,20061
21 C	7A	0,021384	0,02149198	0,008639997	2314,815542	0,008747977	20576,18545
21 C	10A	0,02147	0,0212436	0,007597803	2632,339971	0,007370996	24420,03701
30 C	1A	0,018522	0,01663184	0,007182129	2784,689609	0,005291992	34013,65686
30 C	3A	0,017514	0,01650594	0,007182047	2784,721274	0,006173991	29154,56145
30 C	5A	0,017464	0,01738804	0,007030762	2844,642037	0,006955176	25880,00723
30 C	7A	0,017388	0,017604	0,007667969	2608,252638	0,007883963	22831,15613
30 C	10A	0,017615	0,01780381	0,010357202	1931,023419	0,010546216	17067,73327
45 C	1A	0,014364	0,01474194	0,009450195	2116,358446	0,009828124	18314,78724
45 C	3A	0,013482	0,01411206	0,01033195	1935,743073	0,010961995	16420,36824
45 C	5A	0,014818	0,01451523	0,010130371	1974,261318	0,009828027	18314,96725
45 C	7A	0,014472	0,01484999	0,008802002	2272,210382	0,009179966	19607,91484
45 C	10A	0,013721	0,0144396	0,0119448	1674,368791	0,012663013	14214,62671

Şekil 3.25’den görüleceği gibi direnç değerleri sıcaklık yükseldikçe düşmektedir.

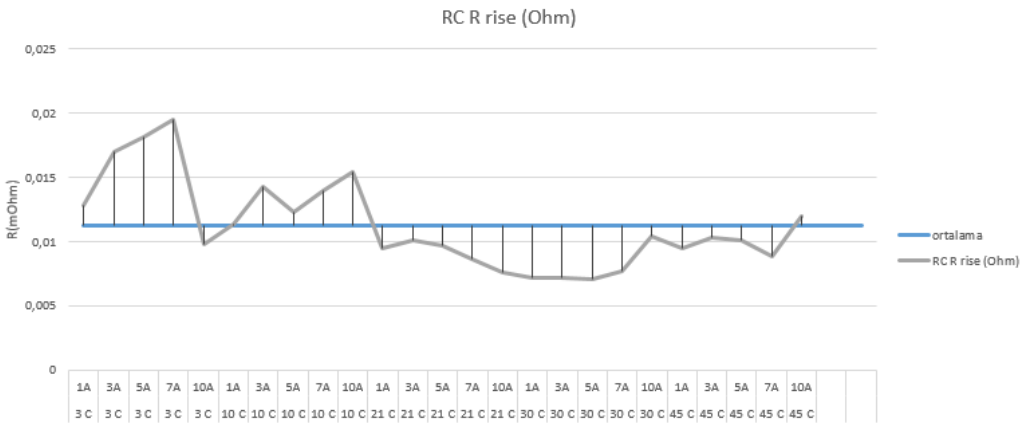


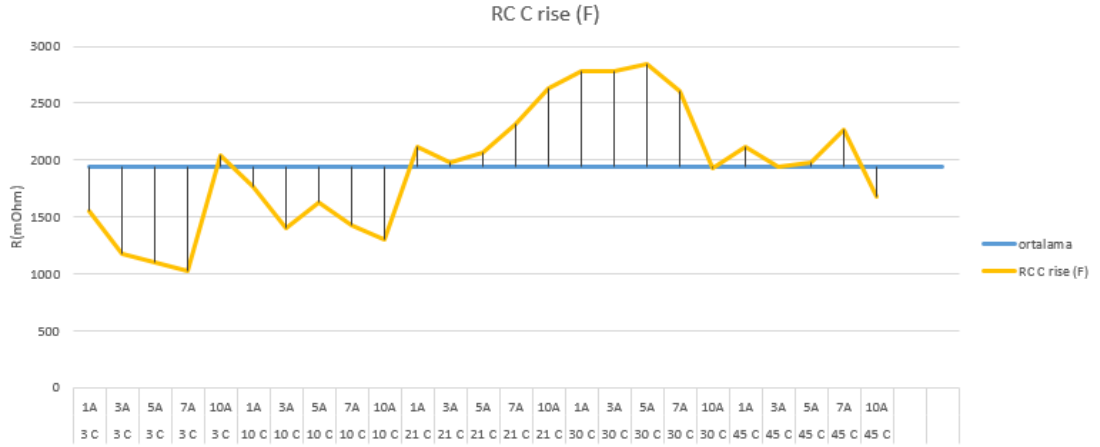
Şekil 3.25 : Elde edilen data grafiği (R drop).



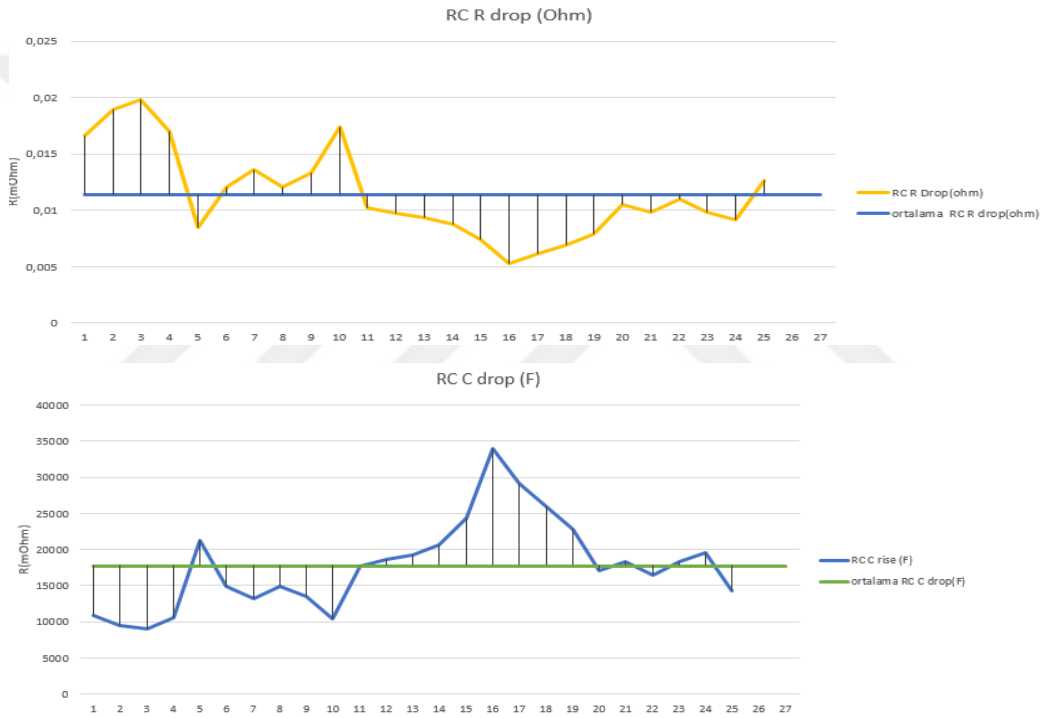
Şekil 3.26 : Elde edilen data grafiği (R rise).

Fakat literatürde bahsedildiği ve Şekil 3.15’te verildiği üzere R drop ve R rise değerleri birebir aynı gelmemektedir. Korelasyonu ve davranışları benzer olmakla beraber değerleri farklı çıkmaktadır. Bunun yanında buradaki grafikte hem sıcaklık hem de deşarj akımlarının etkileri birlikte görülmektedir. Bunlardan hangisinin daha baskın olduğu ya da herhangi birinin etkisinin göz ardı edilip edilemeyeceği anlaşılmamaktadır. Buna ek olarak Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’te görülen RC değerlerinin değişimi ile ilgili bir denklem çıkarımı da yapılamamaktadır. Bu nedenle simulasyonda bu değerler yerine grafiğin ortalama değerine yakın değerler, gerçek dataya benzer davranış segileyecek şekilde belirlenmiştir.





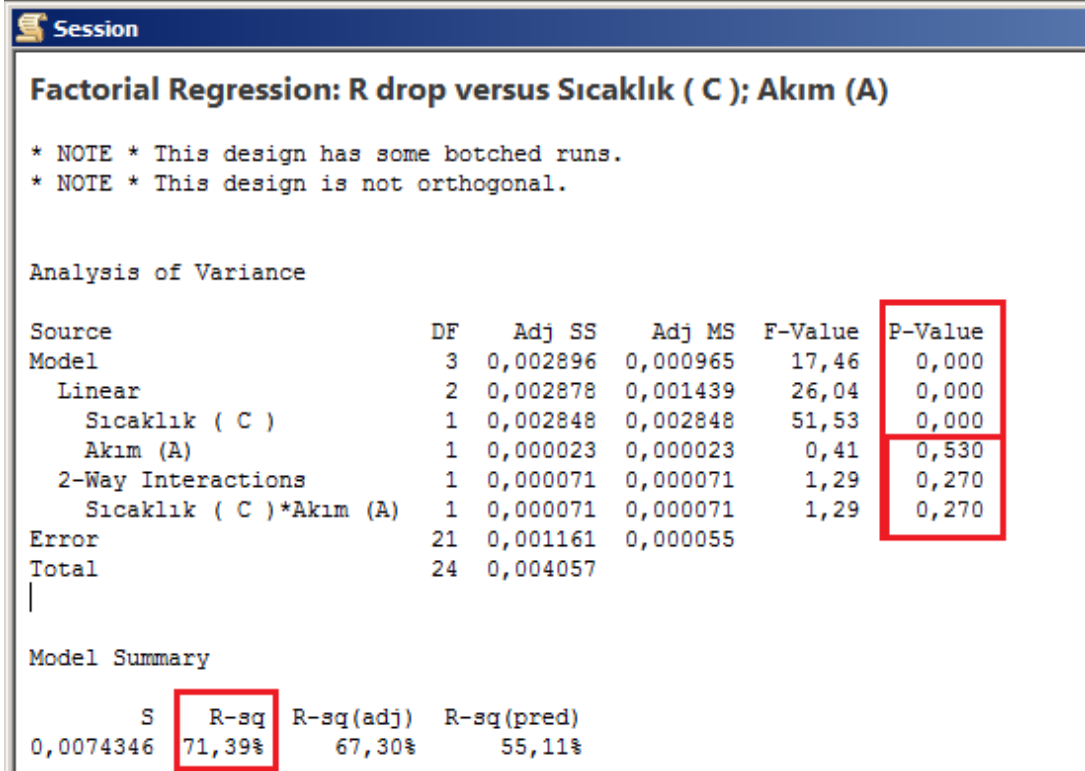
Şekil 3.27 : RC R rise (üstte) ve RC C rise (altta) grafikleri.



Şekil 3.28 : RC R drop (üstte) ve RC C drop (altta) grafikleri.

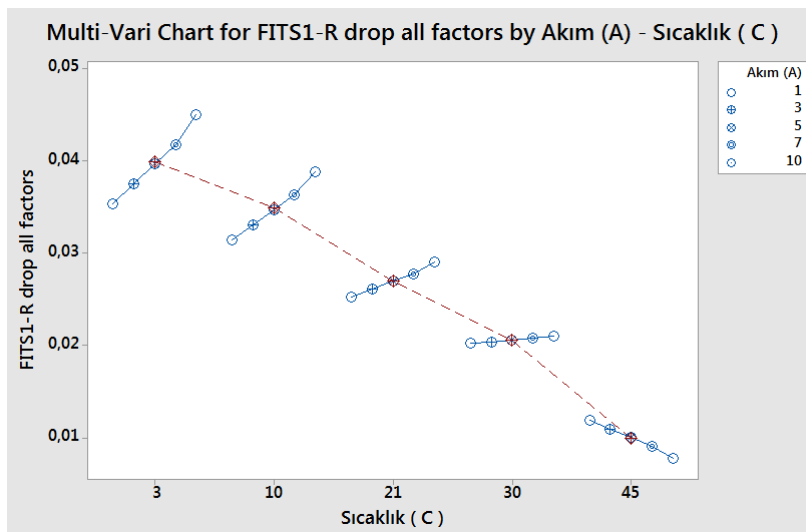
Datalar arasında nasıl bir korelasyon olduğu ve deney tasarımıdaki tüm faktörlerin etkilerinin testi için bu dataların tamamı reliasoft yazılımına ya da minitab yazılımına girilir ve sayısal korelasyon ve etki analizleri yapılır.

Şekil 3.28’de çıktıları verilen, Minitab programı ile yapılan data analizi R drop ve R rise değerleri için yapılmış olup diğer parametreler için yapılan değerlendirmeler tez kapsamında değerlendirilmemiştir.

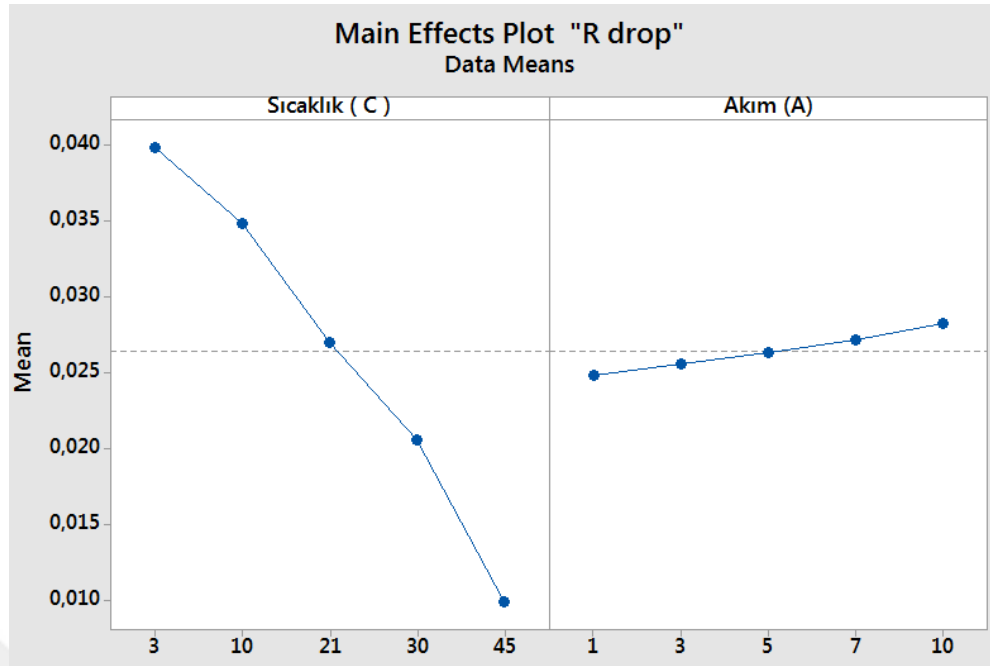


Şekil 3.29 : Minitab programı ile yapılan regresyon analizi.

Regresyon analizi ile hem sıcaklık hem akım değerinin etkisinin yanı sıra ikili ilişkisinin de model olan etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak elde edilen değerlerin %5'ten küçük olmaması yani %95 güven aralığına girmemesi sebebiyle sıcaklık değeri ve sıcaklık akım değerinin göz önüne alınmaması gerektiği görülmüştür. Fakat bu savın doğrulanması için sadece sıcaklığın alındığı değerler ile hem akım hem sıcaklığın alındığı değerler hem birleşik hem de ayrık grafikler ile Şekil 3.29'te ve Şekil 3.30'da incelenmiştir.



Şekil 3.30 : Tüm etkilerin tek grafik üzerinde işlendiği “multivari chart”.



Şekil 3.31 : Regresyon analizi sonucu elde edilen etkin faktörler grafiği.

Tekil halde sıcaklık ve akım değerlerinin etkisi ayrı grafiklerde “R drop” değişkenine olan etkisi Şekil 3.31’de verilmiştir. Hem Şekil 3.29’dan hem de Şekil 3.30’dan rahatlıkla görüleceği gibi R drop değerine etki eden ana faktör sıcaklıktır. Akım ve akım×sıcaklık ikili ilişkisinin toplam sisteme olan etkisinin sayısal karşılığı yine minitab kullanılarak yapılan tekil regresyon analizi sonucu elde edilmiştir.

Factorial Regression: R drop versus Sıcaklık (C)

* NOTE * This design has some botched runs.
* NOTE * This design is not orthogonal.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	1	0,002788	0,002788	50,56	0,000
Linear	1	0,002788	0,002788	50,56	0,000
Sıcaklık (C)	1	0,002788	0,002788	50,56	0,000
Error	23	0,001268	0,000055		
Total	24	0,004057			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0074261	68,73%	67,37%	61,54%

Şekil 3.32 : Sıcaklık faktörü tekil alındığında yapılan regresyon analizi.

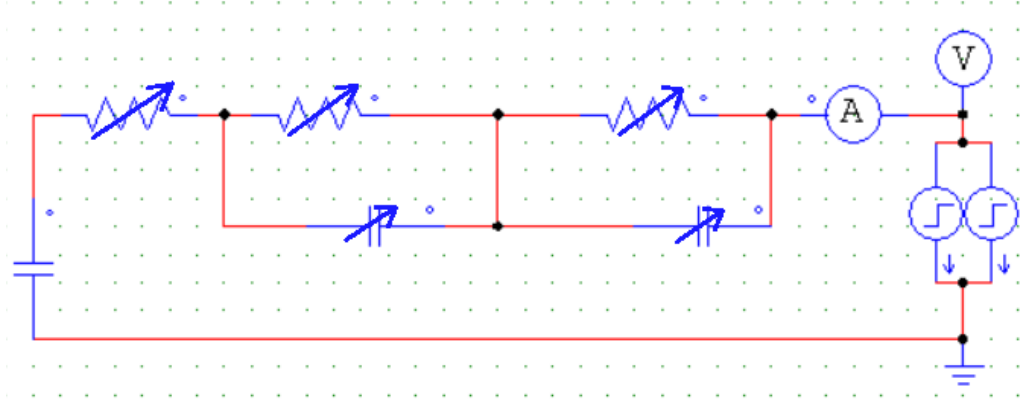
Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'ten görüleceği üzere R^2 (R-sq) değeri akım faktörü ve akım×sıcaklık faktörü çıkarıldığında sadece %3 oranında değişmiş ve halen sıcaklık faktörü ile yapılan regresyon toplam modelin yaklaşık %69'unu kapsamaktadır.

$$R_{drop} = 0,04198 - 0,000712 \times Sıcaklık(^{\circ}C) \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} R_{drop} = & 0,03584 - 0,000523 \times Sıcaklık(^{\circ}C) \\ & + 0,001181 \times Akım(A) \\ & - 0,000036 \times Sıcaklık(^{\circ}C) \times Akım(A) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Denklem (3.13) modelin %69'unu kapsayan sadece sıcaklık parametresinin alındığı modelin regresyon denklemi iken Denklem (3.14) tüm model parametrelerinin ve bu parametrelerin ikili ilişkilerinin göz önüne alındığı regresyon denklemidir.

Yapılan tüm deney tasarımı ve sonrasında yapılan analizler ile elde edilen çıkarım ise: sıcaklık tek parametre olarak alınabilir ve sıcaklığa göre olan değişim batarya iç direncini değiştiren ana etmendir. Akım ve akım×sıcaklık faktörlerinin etkisi, çok kesin, hata oranı çok düşük model elde edilmesi gerekiyorsa kullanılmalıdır fakat daha fazla deney düzeneği oluşturularak akım etkisinin “P değeri” 0.05'in altına yani regresyon hesabındaki güzen aralığı %95 üstüne getirilmelidir. Dolayısıyla deney adımlarını uzatmakta, deney zamanlarını ve altyapı ihtiyaçlarını artırmaktadır. Ekonomik ve zamansal verimlilik göz önüne alındığında sadece sıcaklık değişimi ile batarya model parametreleri elde edilebilmektedir. Elde edilen iç direnç matematiksel modeli içerisinde yağ parametresi yani SOH parametresi göz önüne alınmamıştır. Aynı denklem kullanılarak parametrelerin zamana yani yaşa bağlı olarak değişimi ise modellemeden daha çok gauge algoritmasına eklenmesi gerekmektedir. Şekil 3.32'den de görüleceği gibi önerilen modelde iç direnç değerleri, elde edilen Denklem 3.13'e bağlı olarak değişkenlik gösterecektir.



Şekil 3.33 : Elde edilen datalar ışığında önerilen yeni batarya modeli.

Bu tez içerisinde çalışılmayan ve ileride yapılması planlanan işler kapsamında, yüksek dereceden modelleme yapılması gereken, geçici hal davranışlarını temsil eden, paralel RC değerleri de değişken değerli olarak modelde yer almıştır.



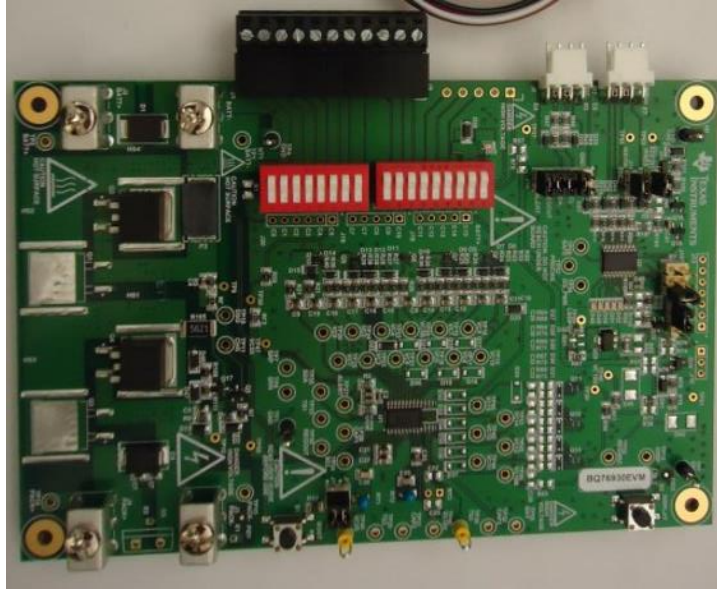
4. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

4.1 Geliştirme Kartları

Batarya yönetim sistemleri genellikle bu işlem için özel entegreler ile kurulmaktadır. Bunun nedeni ise analog çalışıp digital haberleşme arayüzüne sahip olan bu entegrelerin barındırdığı özellikleri ayırık komponentlerle yapmanın daha büyük alan kaplaması, EMI bağışıklığının sağlanmasının zorlaşması ve kombine yapı sayesinde daha hızlı koruma önlemi alınabilmesidir. Bu nedenle birçok firmanın farklı özelliklere sahip entegrelerinden seçilmiş ve yine o firmalara ait geliştirme boardları üzerinde çalışmaya başlanmıştır. İlk önce bu firmaların sağladığı PC arayüzü kullanılmış çalışma mantığı gözlemlenmiş ve daha sonrasında bir işlemci geliştirme boardu ile haberleşme hattı bağlanarak entegre sürülmüştür. Bu aşamalarda donanım tasarımı yapılmadan sadece gömülü yazılım çalışmaları yapılmıştır. Sonrasında donanım çalışmaları yapılarak (SCH-PCB) tez içerisinde çalışılan elektronik kartlar elde edilmiştir.

4.1.1 BQ76930 evm modülü

Texas Instruments batarya yönetim sistemleri için birçok kategoride özel entegre üretmektedir. Bu entegreleri koruma, izleme, şarj ve gösterge (gauge) başlıkları altında toplamıştır. Bu tez çalışması kapsamında çalışmak için tercih edilen entegre ise hem izleme hem koruma yapabilen BQ76930 olmuştur. Bu entegrenin geliştirme kartında BQ78350 kodlu gösterge entegresi de yer almaktadır. İki entegre birbirleri arasında I2C haberleşme protokolünü kullanırken gösterge entegresi PC ile haberleşirken SMBUS protokolünü kullanmaktadır. Tez kapsamında BQ76930 entegresi kısmı çalışılmış ve gösterge algoritmasının altyapısı olan batarya modelleme çalışmaları mikrokontrolör içerisine algoritma olarak gömülmüştür. Tez kapsamındaki yapılan ilk çalışmalar öncelikle Şekil 4.1’de verilen geliştirme kartı ile yapılmıştır.



Şekil 4.1 : BQ76930 benchmarkı için kullanılan geliştirme kartı.

Kullanılan entegrenin genel özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

İzleme özellikleri(AFE):

Analog bloklarla okuma dijital arayüz ile haberleşme

Kendi içindeki ADC yapısı ile hücre gerilimleri, die sıcaklıkları ve dışardan takılan NTC okumalarını yapabilme

Bunların yanında ayrı bir ADC bloğu ile akım okuma ve coulomb sayıcı özelliği.

Koruma özellikleri:

Yüksek gerilim koruması

Yüksek akım koruması

Kısa devre koruması

Düşük gerilim koruması

Diğer özellikleri:

Entegre içinde balanslama FET'leri bulunmakta

N tipi power mosfetler için sürücüleri

MCU için alarm çıkışı

3.3V ya da 2.5V regülatör çıkışı

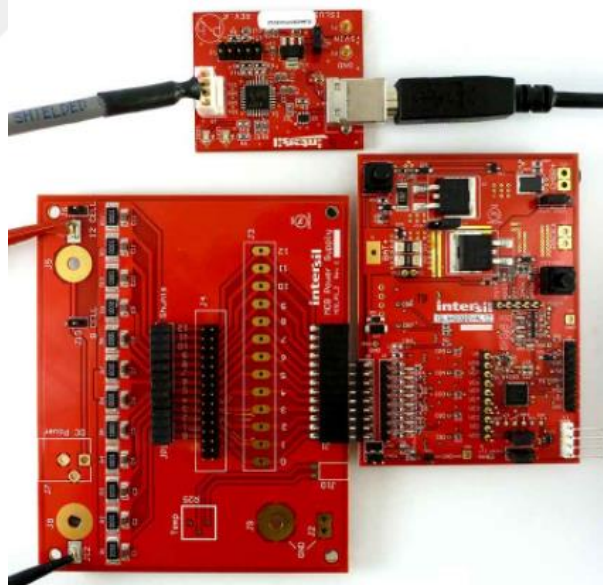
108V'a kadar besleme gerilimi bulunmaktadır.

Entegre teknik dökümanında yer alan muhtemel uygulama alanları olarak; hafif elektrikli araçlar, eBike'lar, baz istasyonu yedek batarya sistemleri ve UPS'lerdir.

Bu entegre ile 12V, 18V, 24V, 36V, ve 48V batarya paketleri oluşturulabilmektedir.

4.1.2 ISL94202 evm modülü

ISL94202 entegresini barındıran bu geliştirme boardu 3 ila 8 batarya hücrelerini desteklemektedir. Fakat geliştirme kartında bu özellik komponent çıkartarak değil sadece pillerin girişlerinin kısa devre edilmesi şeklinde kurgulanmıştır ve yazılımında halihazırda (default) olarak 3 hücre korumaları ve izlemeleri açıktır. EEPROM'dan bu değerlerin düzenlenmesi gerekmektedir. Batarya paketi gerilimi desteği bu hücre sayısına bağlı olarak 4V ila 36V aralığında değişmektedir. Hücre balanslaması için entegrenin içerisinde mosfetler yoktur, bu nedenle dengeleme devre yapısı eklenmelidir. Akım algılama ve kesim/iletim mosfetleri Bq76930'un aksine pozitif taraftadır. Şarjdeşarj için ayrık iki çıkışı desteklememektedir. Kendi başına bu entegre kullanılabilir ve harici işlemci ihtiyacı yoktur. "Daisy chain" şeklinde birbirine bağlanıp büyük batarya oluşturmak için desteği yoktur. Bu nedenle dışardan işlemci ile bu özellik kazandırılabilir. Tez kapsamında bu entegre ile yapılan ilk çalışmalar öncelikle Şekil 4.2'de verilen geliştirme kartı ile yapılmıştır.



Şekil 4.2 : ISL94202 benchmarkı için kullanılan geliştirme kartı.

Li-Ion CoO₂, Li-ion Mn₂O₄, and Li-ion FePO₄ kimyalarındaki batarya hücrelerini desteklemektedir. Açma/kesme mosfetleri pozitif tarafta olduğundan ve Nmos kullanıldığından dolayı "chargepump" yapısı içermektedir. Bu yapı kart tasarımı

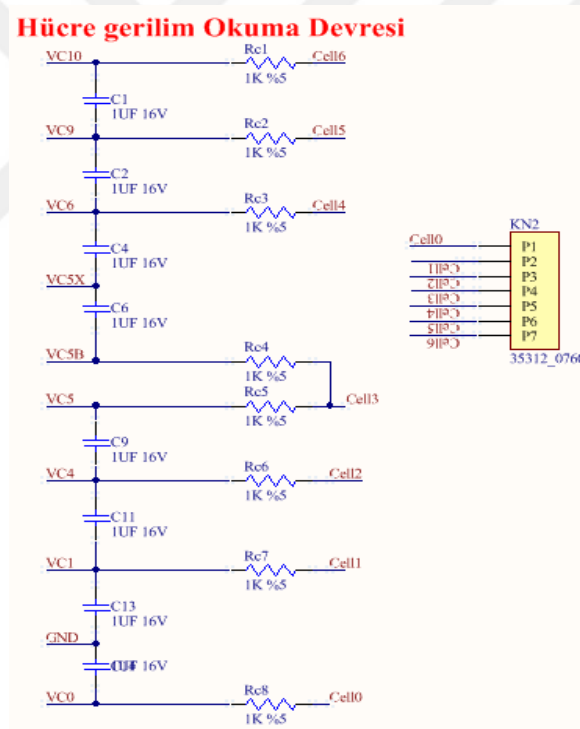
sırasında detaylı incelenmiş ve benzetimi yapılmıştır. Gerilim okuma ADC'si 12 bit çözünürlüğe sahiptir.

4.2 BMS Donanım Tasarımları

4.2.1 BQ76930 entegresi ile kart tasarımları

Gerilim Okuma:

Gerilim okuma devresi batarya yönetim sistemi için elzem yapılardan bir tanesidir. Bunun nedeni lityum iyon bataryanın sağlıklı çalışma penceresinin sınırlarını sıcaklık ve gerilim değeri belirlemektedir. Yüksek ya da düşük gerilimlerde batarya yapısı bozulmakta ve hata modlarına girmektedir. Şekil 4.3'te görülen devre şeması üzerinde, hücre gerilimlerini bir konnektör yardımıyla aldıktan sonra RC filtreler ile entegreye götürülmektedir.



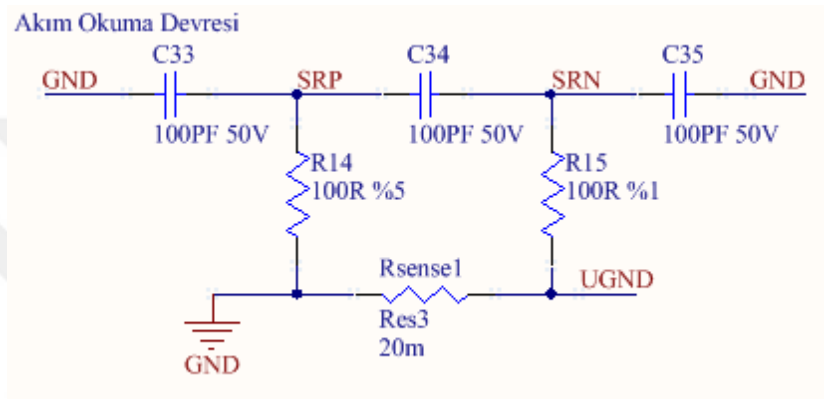
Şekil 4.3 : BQ76930 gerilim okuma devresi.

Hücre gerilimi okuma devresi doğal olarak paket gerilimini de okumamızı sağlamaktadır. Bu fonksiyonlarının yanı sıra BQ76930 entegresi kendi içinde dengeleme yapmak için mosfetler de bulundurmaktadır. Bu devre şemasında görülen 1K dirençler üzerinden gerilim değeri yüksek olan hücreler deşarj edilmekte ve anahtarlama pasif balanslama topolojisi bu devrede entegre tarafından

uygulanmaktadır. BMS kartındaki işlemci ile balanslama yapması ya da balanslamayı durdurması bilgisi entegreye verildiğinde bu işlevleri yerine getirebilmektedir.

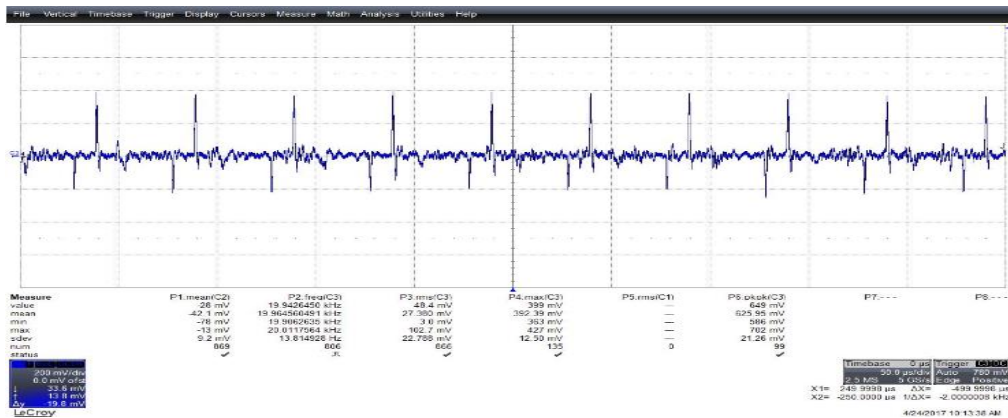
Akım Okuma:

Şekil 4.4'te verilen devre yapısı ana akım hattı üzerine konumlandırılmış bir şönt direnç ile sağlanmaktadır. Şönt direnç negatif tarafta yani yük akımının dönüş yolu üzerine konumlandırılmıştır. Şönt direncin her iki ucu diferansiyel olarak alınmakta, filtrelenmekte ve BQ76930 entegresine bağlanmaktadır.



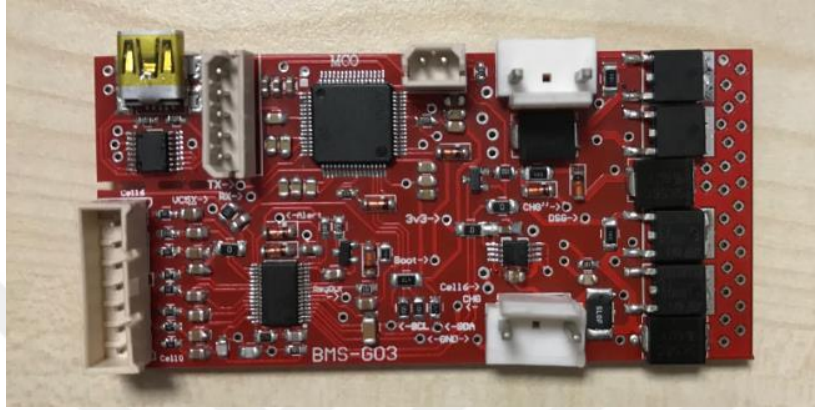
Şekil 4.4 : BQ76930 akım okuma devre şeması.

Akım okuma pinlerinde belirli frekansta peakler Şekil 4.5'teki osiloskop çıktısı gibi görülmektedir. Bunun nedeni ise BQ serisi entegrenin önemli bir özelliği olan; şarj aleti ya da yükün batarya paketinin uçlarına takılıp takılmadığını algılamak için kullandığı bir yöntemin sonucunda olduğu düşünülmektedir. Fakat bu peakler entegre tarafından ve filtrelenmekte ve işlemciye iletilen akım değerinde bu değerlere rastlanmamaktadır.



Şekil 4.5 : BQ76930 entegresi yüksüz durum şönt gerilimi.

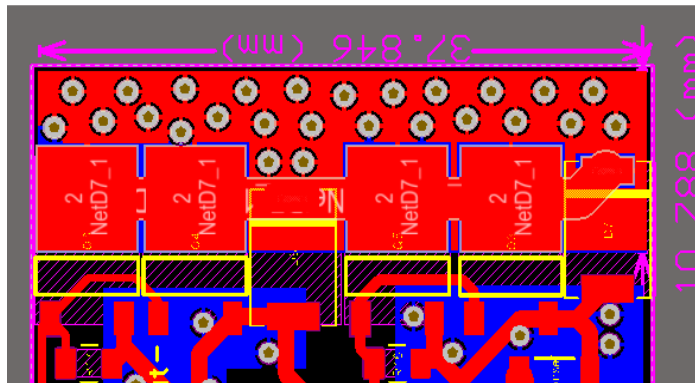
Şekil 4.5'te ölçüm alınan SRP ve SRN noktaları Şekil 4.4'te gösterilmekte olup şönt direncinin her iki ucunun filtrelenmiş (RC lowpass filtre ile) sinyal noktalarıdır. Şekil 4.6'da da üretilen ve dizilen devre prototipi görülmektedir. Devre üzerinde ayrıca data alışverişini sağlamak ve gömülü yazılım geliştirilirken kolay debug edebilmek için USB-uart çevirici devresi kullanılmıştır.



Şekil 4.6 : BQ76930 3.Versiyon (G03) BMS kartı.

Texas Instrumentsin BQ76930 kodlu entegresi kullanılarak iki ayrı devre tasarımı yapılmış ve iki ayrı gerber kodunda devre üretilip çalıştırılmıştır. Aynı entegre ile farklı tasarımların kullanılma sebepleri şu şekilde izah edilebilir:

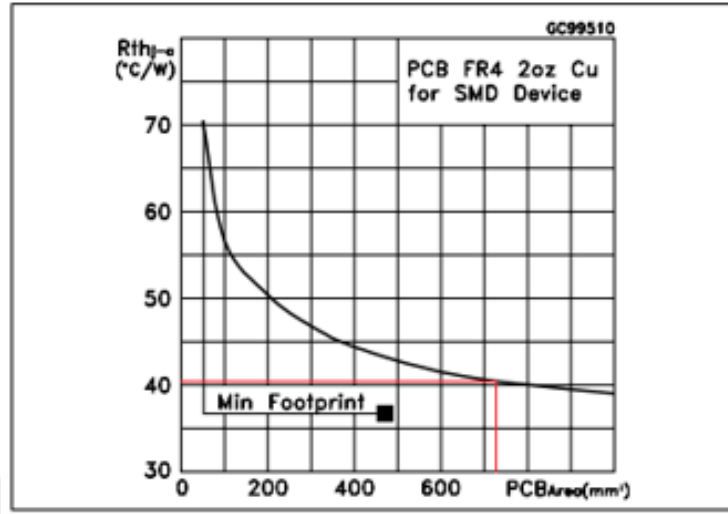
Daha verimli batarya yönetim sistemi kartı yapabilmek ve yüksek akımlarda deşarja izin vermek için anahtar konfigürasyonu ve tipi değiştirilmiştir. İlk devrede Şekil 4.7'de görüldüğü gibi iki adet dpack kılıflı STD45NF75 kodlu mosfet paralel kullanılmıştır. Bu sayede Rdson değerinin (18 mΩ) yarıya düşmesi ve ısı atma yüzeyinin iki katına çıkması hedeflenmiştir.



Şekil 4.7 : BQ76930 G03 mosfet soğutma alanı.

PCB soğutma alanı yaklaşık $380mm^2$ üst katman ve $380mm^2$ alt katman olmak üzere toplamda $760mm^2$ 'dir. Burada iki katman arasındaki via sayısı ile pcb üzerindeki ısı

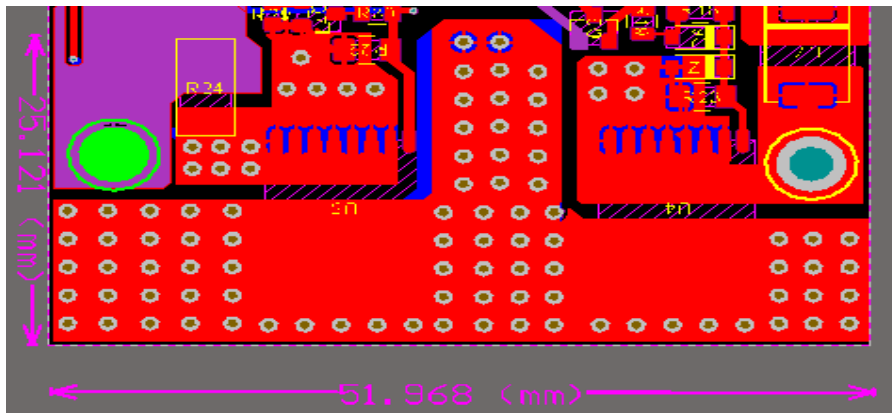
iletim katsayısı farkı göz önüne alınmamıştır. PCB soğutma alanı ve ısı direnç grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 : STD45NF75 soğutma alanı ve termal direnç grafiği.

Bu tablodaki değer 41 olarak alınıp yaklaşık 130 derece jonksiyon sıcaklığı güvenli üst sınır alındığında maximum deşarj akım sınırı 12A mertebelerinde kalmaktadır. Bu nedenle Rdson değerinin düşük olması, PCB soğutma alanının büyütülmesi ile maximum deşarj akım değerinin yükseltilmesi yeni versiyonda hedeflenmiştir.

Yeni modülde Şekil 4.9’da görüldüğü gibi kullanılan anahtarlar Infineon firmasının IPT007N06N kodlu HSOF 8-1 kodlu kılıfa sahip anahtarı kullanılmıştır. Bu anahtarın iç direnci 0,75 mΩ olarak geçmektedir. Yeni gerberde tasarlanan soğutma alanı ise yaklaşık 6.1cm²’dir (güvenli bölgede kalınması için sadece mosfet savak bölgesindeki soğutma alanı hesaplanmıştır).



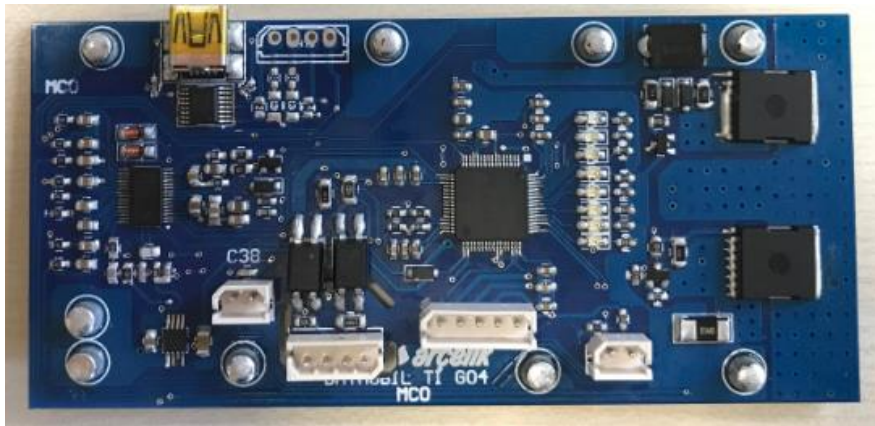
Şekil 4.10’da verilen teknik döküman bilgileri ile 6cm^2 için mosfetin ısı iletim direnci 40 K/W olarak gözükmemektedir.

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Thermal resistance, junction - case	$R_{\theta JC}$	-	0.2	0.4	K/W	-
Device on PCB, minimal footprint	$R_{\theta JA}$	-	-	62	K/W	-
Device on PCB, 6 cm ² cooling area ¹⁾	$R_{\theta JA}$	-	-	40	K/W	-

Şekil 4.10 : IPT007N06N soğutma alanı ve termal direnç tablosu.

Buradan da hesapladığımızda jonksiyon sıcaklığı yine 130°C için akıtabileceğimiz maximum akım ekstra soğutucu kullanmadan, teorik olarak 43A’in üzerine çıkartılmıştır.

Versiyon geçişleri arasındaki farklılıklardan bir diğeri de ilk versiyonda batarya yönetim modülleri arasında haberleşme olanağının olmaması ve dolayısıyla birden çok modülün birbirine bağlanarak büyük modül oluşturma olasılığı yoktu. Yeni versiyonda ise işlemcinin seri port kanallarından birisi kendisinden bir önce gelen modül ile izole olarak haberleşecek ve işlemcinin diğeri bir UART modülü kendisinden bir sonraki modüle izole olmayan şekilde direkt bağlanacak şekilde yani “daisy chain” olarak adlandırılan sıralı haberleşme yöntemi ile bağlanabilecektir. Bu yöntem sayesinde tez içerisinde bahsedilen “ring topolojisine” sahip büyük batarya yönetim sistemi kurulabilecektir.

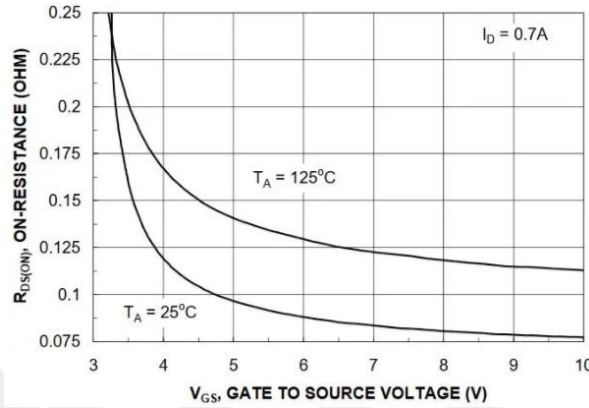


Şekil 4.11 : BQ76930 4.versiyon BMS baskı devresi.

Eklenen bir diğeri devre yapısı ise tez kapsamında çalışılan modelleme çalışmaları sonucunda altyapısı hazırlanmış olan SOC tahmin yapısının kullanıcıya bildirilebilmesi ve bu bildirim için PC’ye ihtiyaç duymaması için uygun renklerde led

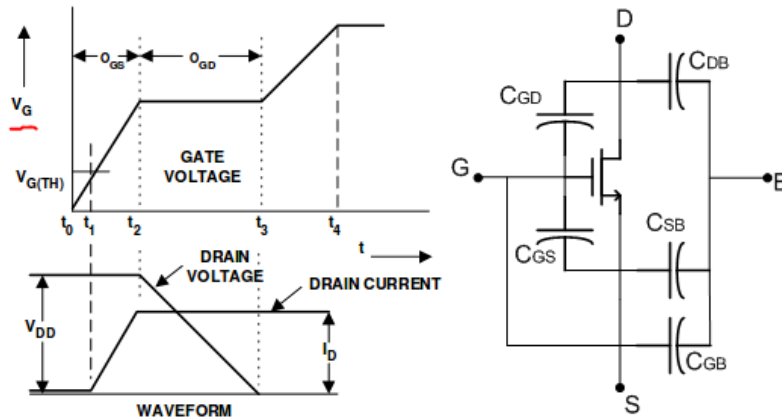
yapıları eklenmiştir. Bu sayede hem SOC seviyesini görebilirken hem de şarj bitişi uyarısı ve deşarj sonlandırma uyarıları da görsel olarak verilebilmektedir.

Mosfet sürme devresine eklenen devre yapısının anlatımı öncesinde mosfet sürüşü, lineer bölge, satürasyon bölgesi geçit kapasitesi ve geçit şarjı ile ilgili noktalardan bahsedilecektir. Şekil 4.12'den görüldüğü üzere gate-source gerilimi yükseldikçe(üst sınırı da var) mosfet akım yolu(drain-source) direnci düşmektedir.



Şekil 4.12 : Mosfet geçit ve savak-kaynak gerilimi ilişkisi.

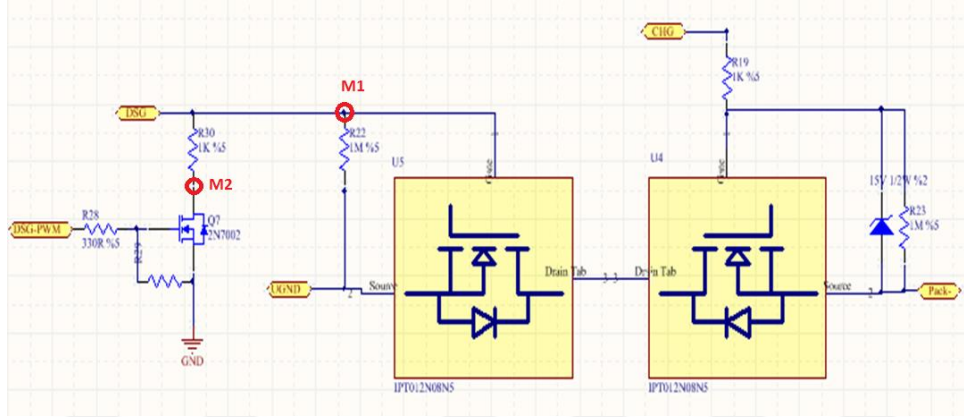
Bu gerilim değeri ile yol üzerinden akıtılmak istenen akım sınırlanabilmektedir. Şekil 4.13'ten de görüleceği gibi geçit gerilimi eşik (threshold) gerilimini geçtikten sonra savak-kaynak arasında akım akmaya başlamakta fakat mosfet üzerindeki gerilim halen düşmediği için mosfet üzerinde kayıplar yüksek olmaktadır. Bu durum ısınmaya yol açtığından normal şartlarda istenmeyen bir durumdur.



Şekil 4.13 : Mosfet geçit, savak-kaynak grafiği ve jonksiyon kapasiteleri.

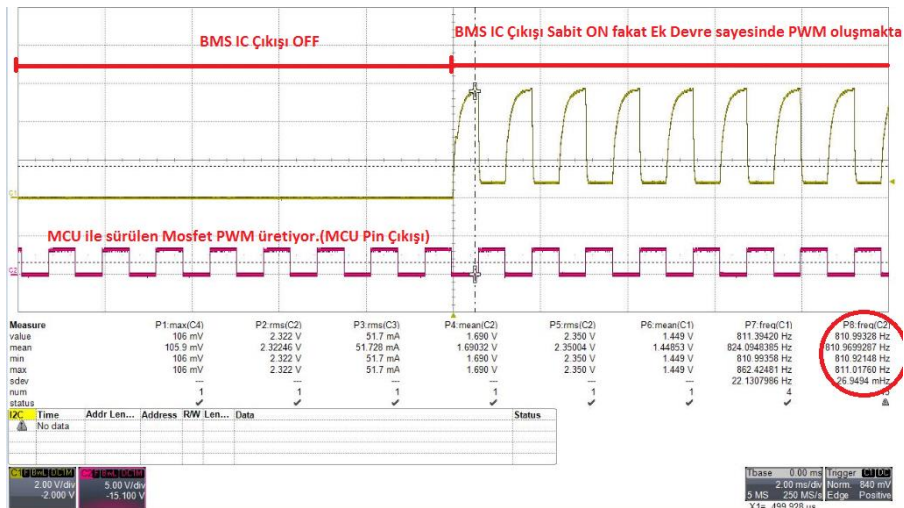
Yeni versiyon kartta yer alan devre ve çalışma algoritması tam olarak bu yüksek kayıplı bölgede çok kısa süreli olarak çalışmayı önermektedir. Bu sayede yol üzerindeki yüksek empedans yük değil, anahtar direnci ile olacak ve yüksek inrush akımı akmasını engelleyecektir. Yük tarafında da yük kapasitif ise yavaş şarj olmaya,

motor ise yavaş dönmeye başlayacak ve yüksek akım çekme (inrush) fazını geçecektir. Şekil 4.14'te önerilen devre şeması sayesinde BMS IC ile sürülen mosfete mikrokontrolör tarafından PWM uygulanabilme özelliği eklenmiştir. Bu sayede mosfetin geçit şarjı istenilen seviyede yapılabilmektedir.



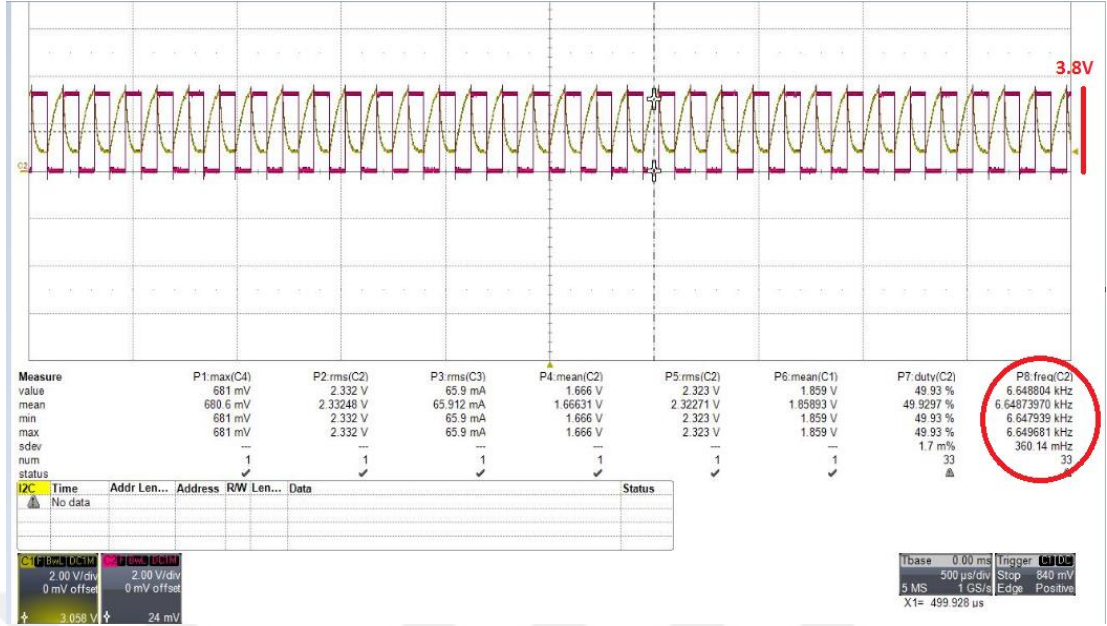
Şekil 4.14 : Devre şeması üzerindeki ölçüm noktaları ve anahtarlama yapısı.

M1 ve M2 noktalarından ölçümler yapılmıştır. Buradaki M1 noktası BMS IC tarafından mosfet geçidine gelen sinyal, M2 noktasındaki ölçüm ise mikrokontrolör ile verilen PWM'in BMS IC tarafından gönderilen sinyali nasıl manipüle ettiğini gösteren ölçümdür. Not: Şekil 4.15'te görülen ölçümler sırasında batarya paketi gerilimi çok düşük olduğu için geçit gerilimi maximum 6V olmuştur. Normal şartlarda geçit gerilimi >9V olmaktadır.



Şekil 4.15 : Mosfet geçit gerilimi dalga formu (düşük frekans).

Şekil 4.16'da görüleceği gibi düşük frekansta gate gerilimi 6V bandına çıkabilirken yüksek frekansta gerilim değeri çok daha düşükken geçidi kapatıp, mosfeti daha yüksek empedanslı bölgede kullanabilmekteyiz.

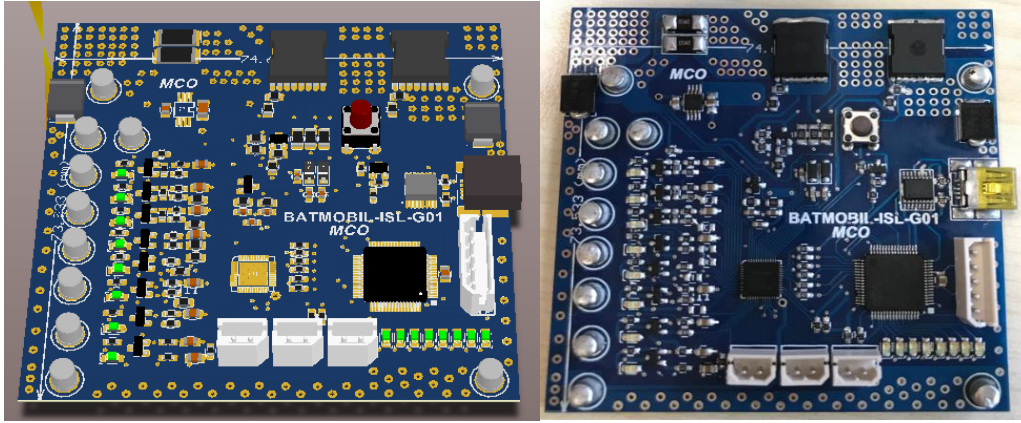


Şekil 4.16 : Mosfet geçit gerilimi dalga formu (yüksek frekans).

Bu sayede yüksek frekanslara çıkıldıkça inrush akımı ayarı yapılabilmekte, düşük frekanslarda da motor hızını değiştirebilecek saturasyon bölgesinde PWM işareti uygulanabilmektedir.

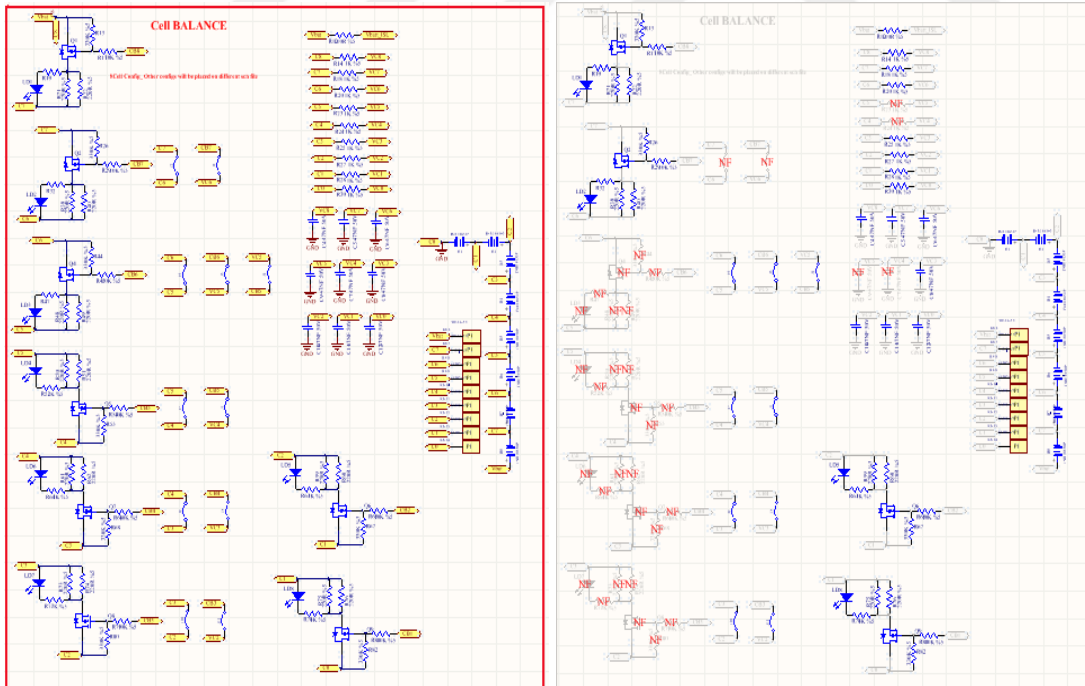
4.2.2 ISL94202 entegresi ile kart tasarımı

Intersil entegresinin kullanılmasının ve buna özel kart tasarımı yapılmasının en önemli sebeplerinden bir tanesi BQ76930 gibi mikrokontrolöre ihtiyaç duymamasıdır. Kendi başına kullanıldığında bir kereye mahsus EEPROM'una ilgili koruma limitleri girildiğinde kendisi çalışmaktadır. Hata durumlarına girdiğinde kendisini bir süre sonra bu moddan çıkarmakta ve tekrar çalışmayı denemektedir. Bu duruma rağmen işlemci ile kart tasarımı yapılmasının ana sebebi tez çalışmaları kapsamında yapılan modelleme ve SOC tahmin altapısının bu entegre içerisine gömülemiyor olmasıdır. Konulan işlemci sayesinde dinamik olarak koruma limitleri değiştirilebilir hale de gelmektedir. Zira sıcaklık değerlerine göre şarj ve deşarj akım değerleri pilin sağlığı için farklı sınır değerlerine sahip olmalıdır (JEITA standardı da bunu zorunlu kılmıştır). Şekil 4.17'de ISL94202'ye ait donanım tasarımı ve gerçekleştirilmiş devre tasarımı görülmektedir.



Şekil 4.17 : ISL94202 BMS baskı devresi.

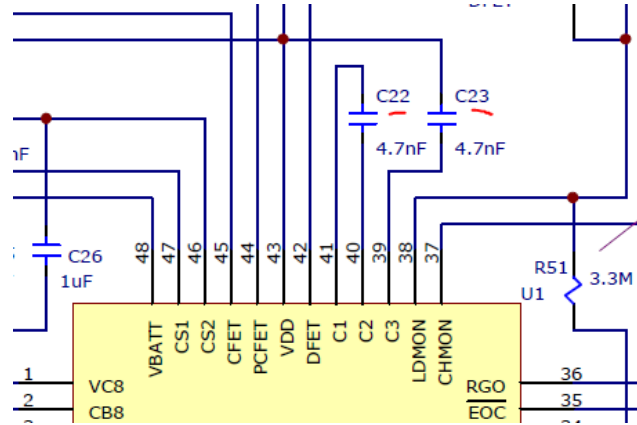
Entegre kendi içerisinde dengeleme yapısı içermediğinden devre şemasına dengeleme yapısı eklenmiş ve birden çok batarya hücresi için tek kartın konfigure edilebilmesi için devre şeması varyasyonlu şekilde hazırlanmıştır. Bu sayede Şekil 4.18’de bir varyasyon örneği verilen fakat diğer varyasyonları ile birlikte 3 hücre için de 8 hücre için de aynı devre kartı kullanılabilir. BQ76930da bu tasarıma dikkat edilmemiş ve sadece 6 hücre için tasarımlar yapılmıştır.



Şekil 4.18 : ISL94202 BMS devre şeması ve varyasyonları

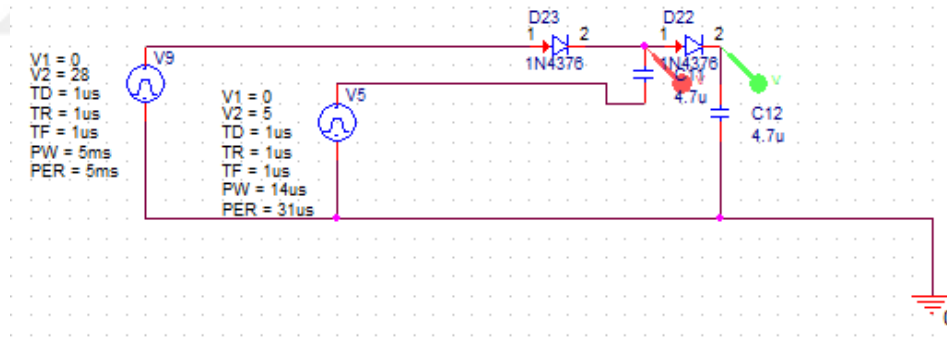
Şekil 4.18’de yer alan şema çalışmaları EK A ve EK B de detaylı olarak verilmiştir. BQ76930 devre kartından farklı olarak açma/kesme mosfetlerinin pozitif tarafta olması, “charge pump” yapısı gereksinimini ortaya çıkarmış ve Şekil 4.19’da görülen

işlemci pinlerinde C1-C2-C3 adlı üç pine belirli bir değerde kapasite bağlanması zorunlu tasarım kriteri olarak teknik dökümanda belirtilmiştir.

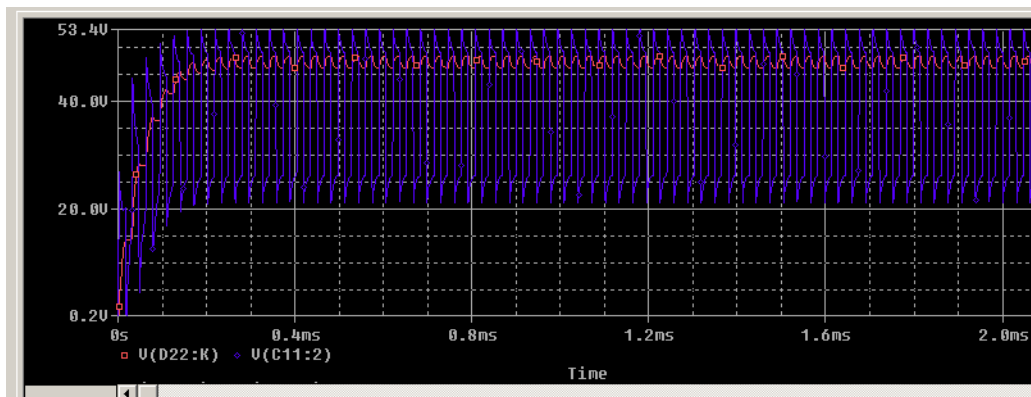


Şekil 4.19 : Intersil ISL94202 charge pump kapasiteleri.

Bu yapı, Nmosların geçit-kaynak gerilim değerini çıkış geriliminin üzerine bindirebilmek ve bu sayede açma/kapama yaptırabilmek için kullanılmaktadır. Batarya paketinin toplam geriliminin iki katını elde edebilmek için iki kapasiteli bir “bootstrap” yapısı oluşturulmuştur. Şekil 4.20’de bu yapı modellenmiştir ve Şekil 4.21’de çıkış grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.20 : Intersil ISL94202 charge pump benzetim devresi.



Şekil 4.21 : Intersil ISL94202 charge pump benzetim devresi çıktıları.

28V+28V şeklinde benzetim sonucu elde edilmiş ve en yüksek çıkış değeri görülmüştür. Bu gerilim elde edildikten sonra Nmosların geçitlerine verilmeden önce bir zener diyot ile 15V'a sabitlenir ve mosfetlerin geçit girişleri sağlıklı şekilde sürülür. Genel tasarım özelliklerinin dışında entegreye özel olan yapılar tez kapsamında detaylı incelenmiş ve uygun devre şemaları oluşturulmuştur. Daha sonrasında üretim dosyaları üretilip baskı devre üreticilerine gönderilmiştir. Gelen PCB'ler el dizgisine tabi tutulmuş daha sonrasında da yazılım çalışmaları için hazır hale getirilmiştir.

4.3 BMS Yazılım Akış Diagramı ve Modelleme Parametrelerinin Kullanımı

Batarya yönetim sistemi kartlarına yerleştirilmiş olan STM32f100 kodlu ARM cortex M3 mimarisine sahip mikrokontrolör ile gömülü yazılım çalışmaları yapılmış, batarya yönetim sistemlerine özel olarak üretilen entegreler ile haberleştirilmiştir. İlk olarak bu haberleşme protokolü ve içeriği kurulmuş daha sonra durum makinası yapısı işlemci içine kurularak çalışma modları belirlenmiştir. Tez çalışmaları ilerledikçe ve model parametreleri elde edildikçe bu parametreleri içeren model yazılıma entegre edilmiştir.

Haberleşme yapısında batarya yönetim sistemi entegreleri genellikle “Inter Integrated Communication” yani I2C protokolünü kullanmakta ya da bu protokole benzer yapıda olan SMBUS protokolünü kullanmaktadır. Hem ISL94202 entegresi hem de BQ76930 entegresi I2C protokolünü kullanmakta olduğundan haberleşme yapısı benzer çalışılmıştır fakat ISL94202’de farklı olarak Şekil 4.22’de ve Şekil 4.23’de adres haritası verilen EEPROM’a yazma ve bu değerleri -ki genelde koruma limit değerleri- koruma özelliği vardır.

EEPROM (Configured as 32 4-Byte Pages)						
Page	ADDR	0x	1x	2x	3x	4x
0	0	Overvoltage Level	Overvoltage Delay Timer	Minimum CB Delta	Charge Over-Temperature Level	Internal Over-Temperature Level
	1					
	2	Overvoltage recovery	Undervoltage Delay Timer	Maximum CB Delta	Charge Over-Temp Recovery	Internal Over-Temperature Recovery
	3					
1	4	Undervoltage Level	Open Wire Timing	Cell Balance On time	Charge Under-Temperature Level	Sleep Voltage
	5					
	6	Undervoltage Recovery	Discharge Overcurrent Timeout Settings, Discharge Setting	Cell Balance Off Time	Charge Under-Temperature Recovery	Sleep Delay Timer/ Watchdog Timer
	7					
2	8	OVLO Threshold	Charge overcurrent Timeout Settings, Charge overcurrent Setting	Minimum CB Temperature Level	Discharge Over-Temperature Level	Sleep Mode Timer
	9					CELLS Config
	A	UVLO Threshold	Short-Circuit Timeout Settings/ Recovery Settings, Short-Circuit Setting	Minimum CB Temperature Recovery	Discharge Over-Temperature Recovery	Features 1
	B					Features 2
3	C	EOC Voltage Level	Minimum CB Volts	Maximum CB Temperature Level	Discharge Under-Temperature Level	Reserved
	D					
	E	Low Voltage Charge Level	Maximum CB Volts	Maximum CB Temperature Recovery	Discharge Under-Temperature Recovery	
	F					

Şekil 4.22 : Intersil ISL94202 EEPROM hafıza haritası.

RAM				
Page	ADDR	8x	9x	Ax
0	0	Status1	CELL1 Voltage	IT Voltage
	1	Status2		xT1 Voltage
	2	Status3		
	3	Status4		
1	4	Cell Balance	CELL3 Voltage	xT2 Voltage
	5	Analog Out	CELL4 Voltage	VBATT/16 Voltage
	6	FET Cntl/Override Control Bits		
	7	Override Control Bits		
2	8	Force Ops	CELL5 Voltage	VRGO/2 Voltage
	9	EE Write Enable	CELL6 Voltage	14-bit ADC Voltage
	A	CELLMIN Voltage		
	B			
3	C	CELLMAX Voltage	CELL7 Voltage	Reserved
	D		CELL8 Voltage	
	E	ISense Voltage		
	F			

Şekil 4.23 : Intersil ISL94202 RAM hafıza haritası.

Bu adreslere ulaşmak yazmak ya da okumak için öncelikle hem BQ76930 için hem de ISL94202 için kütüphane hazırlanmıştır. Bu kütüphaneye ait örnek eeproma yazma fonksiyonu Şekil 4.24'te verilmiştir.

```

void ISL94202_writeEEPROM(uint8_t reg, uint8_t value)
{
    if ((reg > 0x58 && reg < 0x7F) || reg > 0xAB)
        return;
    //^ Datasheet mentions a warning not to write to these areas as they are for factory use

    enableEEPROMAccess();
    uint8_t buffer[4]; //We need to write in pages
    uint8_t i;
    uint8_t base = reg & 0xFC;
    buffer[0] = I2C_readReg8(slaveAdd, base);
    HAL_Delay(1000); //delay to allow EEPROM refresh
    I2C_readMany(slaveAdd, base, 4, buffer);

    //We have read in the buffer
    //Update the buffer
    buffer[(uint8_t) (reg & 0x03)] = value;

    I2C_writeReg8(slaveAdd, base, buffer[0]);
    HAL_Delay(35000); //delay to allow EEPROM write

    //^Special case for first uint8_t causing EEPROM reload
    for (i = 0; i < 4; i++)
    {
        I2C_writeReg8(slaveAdd, base + i, buffer[i]);
        HAL_Delay(35000); //35ms
        //pause for EEPROM write
    }

    disableEEPROMAccess();
}

```

Şekil 4.24 : ISL94202 EEPROM'a yazmak için oluşturulan örnek fonksiyon.

Benzer şekilde BQ76930 için oluşturulan hafıza haritası ve örnek fonksiyon aşağıdaki gibi oluşturulmuştur. Şekil 4.26’da verilen hafıza haritaları ve ilgili tabloları entegre üreticilerinin yayınladıkları teknik dökümanlar (datasheet) üzerinden alınmıştır. Aynı şekilde fonksiyonların içerisinde, bu adreslerden alınan dataların anlamlı hale gelmesi için uygulanması istenen ve Şekil 4.26’da verilen işlemler teknik dökümanlarda belirtildiği gibi uygulanmıştır.

Name	Addr	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
SYS_STAT	0x00	CC_READY	RSVD	DEVICE_XREADY	OVRD_ALERT	UV	OV	SCD	OCD
CELLBAL1	0x01	RSVD	RSVD	RSVD	CB<5:1>				
CELLBAL2 ⁽¹⁾	0x02	RSVD	RSVD	RSVD	CB<10:6>				
CELLBAL3 ⁽²⁾	0x03	RSVD	RSVD	RSVD	CB<15:11>				
SYS_CTRL1	0x04	LOAD_PRESENT	RSVD	RSVD	ADC_EN	TEMP_SEL	RSVD	SHUT_A	SHUT_B
SYS_CTRL2	0x05	DELAY_DIS	CC_EN	CC_ONESHOT	RSVD			DSG_ON	CHG_ON
PROTECT1	0x06	RSNS	RSVD	RSVD	SCD_DELAY		SCD_THRESH		
PROTECT2	0x07	RSVD	OCD_DELAY			OCD_THRESH			
PROTECT3	0x08	UV_DELAY		OV_DELAY		RSVD			
OV_TRIP	0x09	OV_THRESH							
UV_TRIP	0x0A	UV_THRESH							
CC_CFG	0x0B	RSVD	RSVD	Must be programmed to 0x19					
VC1_HI	0x0C	RSVD	RSVD	<13:8>					
VC1_LO	0x0D	<7:0>							
VC2_HI	0x0E	RSVD	RSVD	<13:8>					
VC2_LO	0x0F	<7:0>							
VC3_HI	0x10	RSVD	RSVD	<13:8>					
VC3_LO	0x11	<7:0>							
VC4_HI	0x12	RSVD	RSVD	<13:8>					
VC4_LO	0x13	<7:0>							
VC5_HI	0x14	RSVD	RSVD	<13:8>					
VC5_LO	0x15	<7:0>							
VC6_HI ⁽¹⁾	0x16	RSVD	RSVD	<13:8>					
VC6_LO ⁽¹⁾	0x17	<7:0>							
VC7_HI ⁽¹⁾	0x18	RSVD	RSVD	<13:8>					
VC7_LO ⁽¹⁾	0x19	<7:0>							

Şekil 4.25 : BQ76930 hafıza haritası (kısmen).

```

float readCellVoltage(u8 cellNumber)
{
    registerNumber = bq796x0_VC1_HI + (cellNumber * 2);
    cellValue = I2C2_DoubleReadReg(registerNumber);

    //if(cellValue == 0) return(0);

    cellVoltage = cellValue * adcGain + offset; //0x1800 * 0.37 + 60 = 3,397mV
    cellVoltage /= (float)1000;

    return(cellVoltage);
}

```

Şekil 4.26 : BQ76930 hücre gerilimlerini okuma örnek fonksiyonu.

Bu fonksiyonlar her adres için ayrı ayrı uygulanmış ve alınan datalar anlamlandırılmıştır. Bunun üzerine Şekil 4.27’de kısmen verilen şarj olma modu, deşarj olma modu, dengeleme modu, hata modu gibi çeşitli durumları içeren durum makinası yapısı kurulmuştur.

```

case Balancing :
{
    //....
    state_of_machine_old      = Balancing;

}
break;

case TransportationMode :
{
    //....

    state_of_machine_old      = TransportationMode;

}
break;

default:
{
    //....
    state_of_machine          = IdleMode;

}
break;
}

```

Şekil 4.27 : Durum makinası örnek fonksiyon yapısı.

Yazılım iskeleti kurulduktan sonra tez çalışmaları içerisinde elde edilen modelleme parametreleri ile gerilim kompanzasyonu tahminleri ve buna uygun olarak SOC tahmin çalışmaları yazılıma eklenmiştir.



5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Sonuç olarak yapılan deneyler göstermiştir ki batarya üzerinden çekilen akım batarya modeline etki etmemektedir. Batarya modelinde adaptif olarak tasarlanması ya da modellenmesi gereken ana kısım iç dirençler ve modeldeki direnç kapasite ikilileridir. Direnç kapasite ikilileri için bir korelasyon, değişim grafiği denklemi elde etmek için daha fazla sayıda ve tekrarda deney yapılması gerektiği görülmüştür. Fakat yapılan deneyler şunu göstermiştir ki lityum iyon batarya kullanımında en verimli kullanım iç direncin düşük olduğu, sağlıklı çalışma bölgesinin (SOA) üst noktalarına yakın yerlerde çalışması ile elde edilir. Fakat bu bölgede çalışabilmek için öncelikle bataryaların yüzey sıcaklığı değil iç sıcaklığı ölçülmeli ve batarya paketlemesi sırasında sıcaklık sensörü yerleştirilmiş batarya hücreleri kullanılmalıdır. Zira 3°C ve 10°C pil yüzey sıcaklığı testinden açıkça görüleceği gibi yüksek akım akıtıldığında, iç sıcaklık hemen yükselerek iç direnci düşürürken yüzey sıcaklığı halen aynı kalabilmektedir. Dolayısıyla yüksek sıcaklıkta çalışma noktası seçilirken yüzey sıcaklığına bakılarak bu bölgede çalışılırsa bataryanın güvenli çalışma bölgesinden çıkıldığı görülmez ve bataryanın ömrü kısalmaya ya da daha tehlikelisi insan sağlığına zararlı gaz salınımlarına ya da alev alma noktasına gelebilir.

En verimli batarya kullanımı için, batarya iç sıcaklığı, çözünürlüğü yüksek bir sensör ve algılayıcı yapısı ile kontrol edilmeli, bu kontrolörün çıkışı duruma göre ısıtma ya da soğutma sistemlerine bağlanmalı ve çalışma noktası sıcaklığı iç direncin düşük, sağlıklı çalışma bölgesinin en üst sınırlarından kısmen uzak noktalarda belirlenmelidir.



KAYNAKLAR

- [1] **Antaloe C, Marco J, Assadian F.**(2012) A novel method for the parameterization of a li-ion cell model for EV/HEV control applications. IEEE Trans Veh Technol 2012;61(9):3881–92
- [2] **J Graves.** .(1873) On the Measurements of The Internal Resistance of Batteries, Journal of the Society of Telegraph Engineers, Volume:2 Issue:4, 1873.
- [3] **P.L.Moreton et al.** .(1972) Fuel Gauge For The Electric Car, Proc. IEE, Vol. 119, No. 6, JUNE 1972.
- [4] **J.R. Lee et al.** .(1988) Modeling and Simulation of Spacecraft Power Systems, IEEE Transactions On Aerospace And Electronics Systems, VOL. 24. NO. 3 , MAY 1988.
- [5] **Url-5** < <https://smartphones.gadgethacks.com/news/from-backpack-transceiver-smartphone-visual-history-mobile-phone-0127134/>>, erişim tarihi 09.10.2017.
- [6] **A. Fotouhi et al** .(2015).A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward Lithium–Sulphur 2015; 56 (2016) 1008–1021
- [7] **Hu X, Li S, Peng H.** .(2012) A comparative study of equivalent circuit models for Liion batteries. J Power Sources 2012;198:359–67
- [8] **Tremblay O, Dessaint LA, Dekkiche AI.** .(2007) A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In: Proceedings of the IEEE vehicle power and propulsion conference. Arlington, TX; 2007.
- [9] **Chen M, Rincon-Mora GA.** .(2006) Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I–V performance. IEEE Trans Energy Convers 2006;21(2):504–11.

- [10] **Nadeau J, Dubois MR, Desrochers A, Denis N.** (2013) Ageing estimation of lithiumion batteries applied to a three-wheel PHEV roadster. In: Proceedings of the IEEE vehicle power and propulsion conference. Beijing; 2013.
- [11] **Randles JEB.** (1947) Kinetics of rapid electrode reactions. Discuss Faraday Soc 1947;1:11. <http://dx.doi.org/10.1039/df9470100011> ISSN 0366-9033.
- [12] **Papazoglou A, Longo S, Auger D, Assadian F.** (2014) Nonlinear filtering techniques comparison for battery state estimation. J Sustain Dev Energy Water Environ Syst 2014;2(3):259–69.
- [13] **Serrao L, Chehab Z, Guezennec Y, Rizzoni G.** (2005) An aging model of Ni–MH batteries for hybrid electric vehicles. In: Proceedings of the IEEE conference on vehicle power and propulsion; 2005.
- [14] **Yarlagadda S.** (2011) A BATTERY MANAGEMENT SYSTEM USING AN ACTIVE CHARGE EQUALIZATION TECHNIQUE BASED ON DC-DC CONVERTER TOPOLOGY. In: Thesis of the graduate faculty of The University of Akron, 2011 .
- [15] **Scherer A.** (2013) A Smart Battery Management System for Electric Vehicles using Powerline Communication. In: Thesis of Institute for Data Processing, Technische Universitat München, March 2013 .
- [16] **Url-16** < <http://www.mpoweruk.com/bms.htm> >, erişim tarihi 09.10.2017.
- [17] **Url-17** < <http://batteryuniversity.com/learn> >, erişim tarihi 09.09.2017.
- [18] **Url-18** < <http://www.edisontechcenter.org/batteries.html> >, erişim tarihi 09.10.2017.
- [19] **Url-19** < <http://www.akuder.org.tr/sunum/20170412-03.pdf> >, erişim tarihi 11.10.2017.
- [20] **Url-20** < <https://training.ti.com/battery-management-deep-dive-technical-training> >, erişim tarihi 08.10.2017.
- [21] **Url-21** <<http://www.batterypoweronline.com/conferences/wp-content/uploads/2013/06/UL-IJ-Contact-Included.pdf>>, erişim tarihi 07.10.2017.

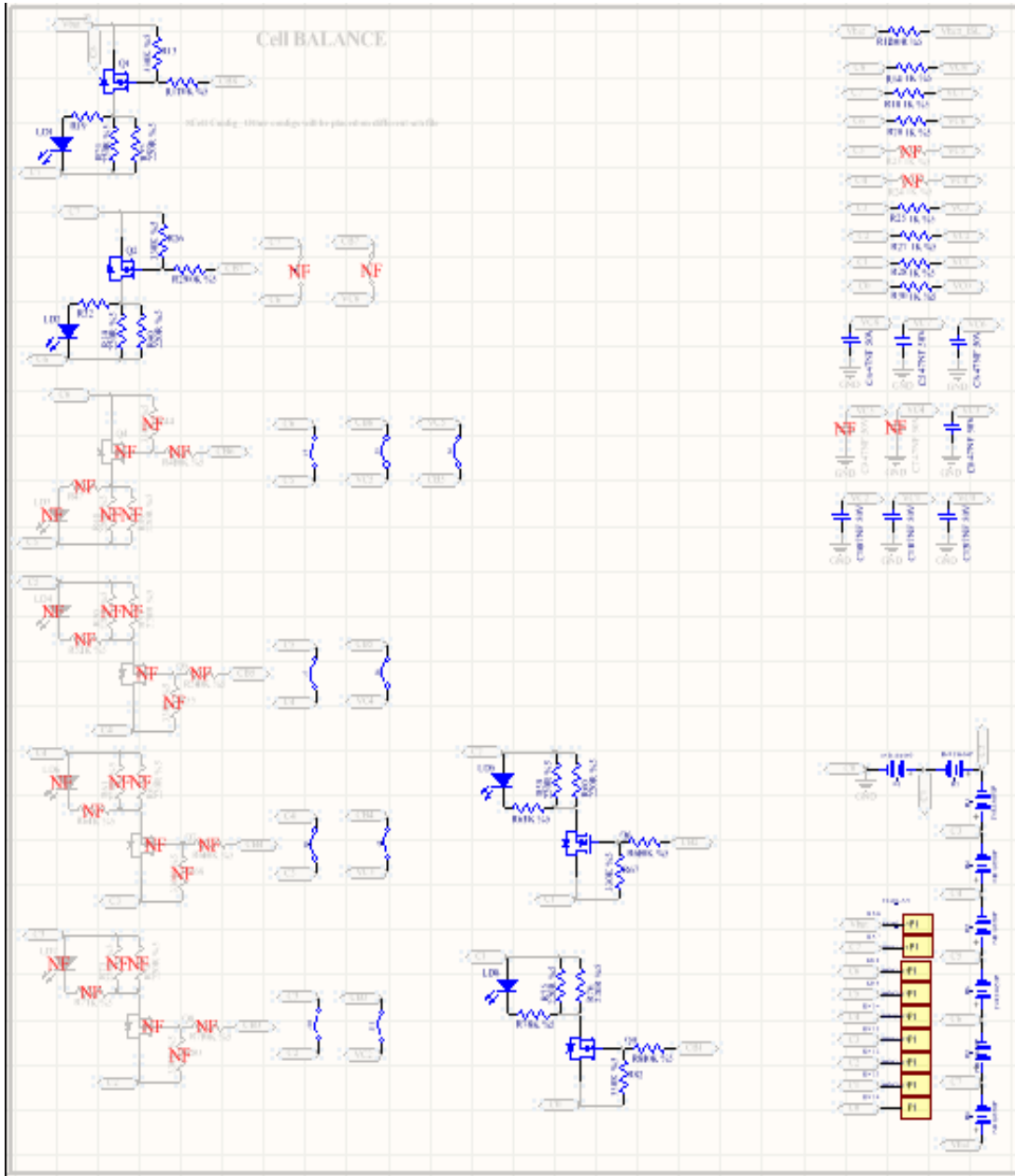
- [22] **Url-22** < http://www.nec-schott.co.jp/english/cutoff/sh_type.html>, erişim tarihi 07.08.2017.
- [23] **Daowd M, Omar N, Boessche P, Mierlo J.** (2011) A review of passive and active battery balancing based on Matlab/Simulink. In: International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. xx, n. X in 2011.
- [25] **Url-25** < <https://www.digikey.se/en/articles/techzone/2011/dec/battery-cell-balancing-for-improved-performance-in-evs---part-ii-active-balancing-technologies>>, erişim tarihi 07.08.2017.
- [26] **Mousavi G., Nikdel M.** (2014) Various battery models for various simulation studies and applications. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 32(2014) 477-485, 2014 .
- [27] **Bahramipناه M., Torregrossa D., Cherkaoui R.** (2017) Enhanced Equivalent Electrical Circuit Model of Lithium Based Batteries Accounting for Charge Redistribution, State-of-Health and Temperature. In: IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol.3, No. 3, September 2017.
- [28] **Url-28** < <https://www.sigmacenter.com.tr/alti-sigma.html> >, erişim tarihi 08.11.2017.
- [29] **A Rahmoun et al.** (2012) Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7b/2012.



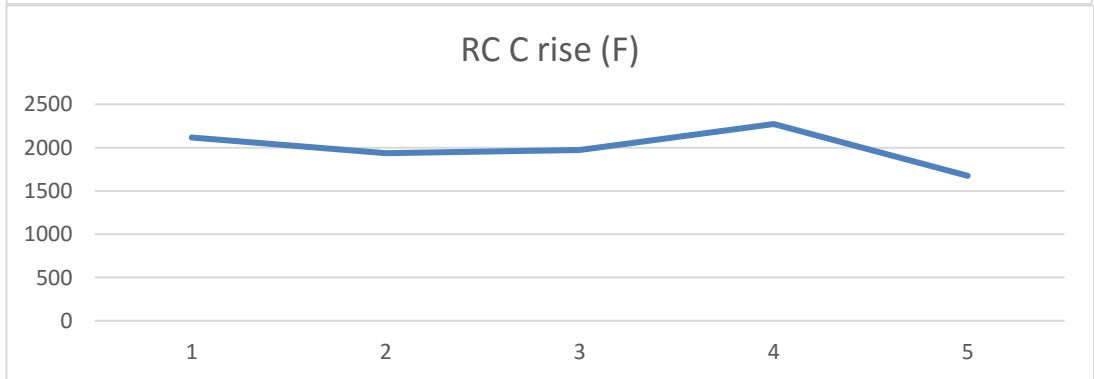
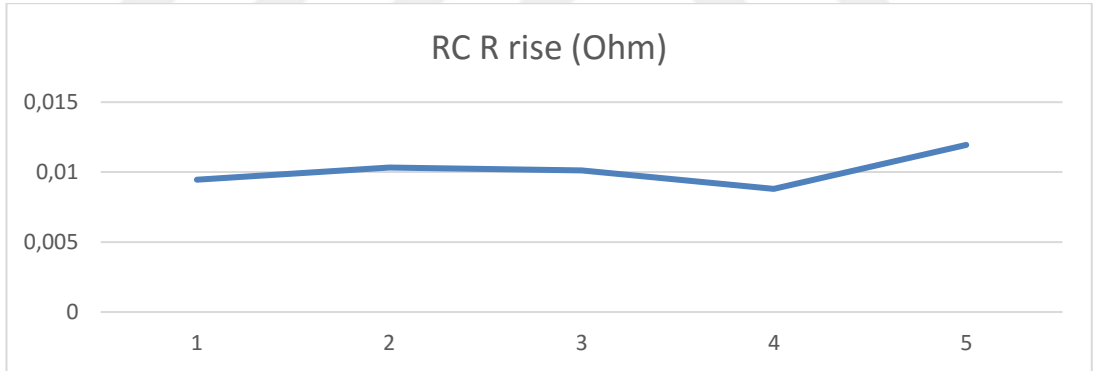
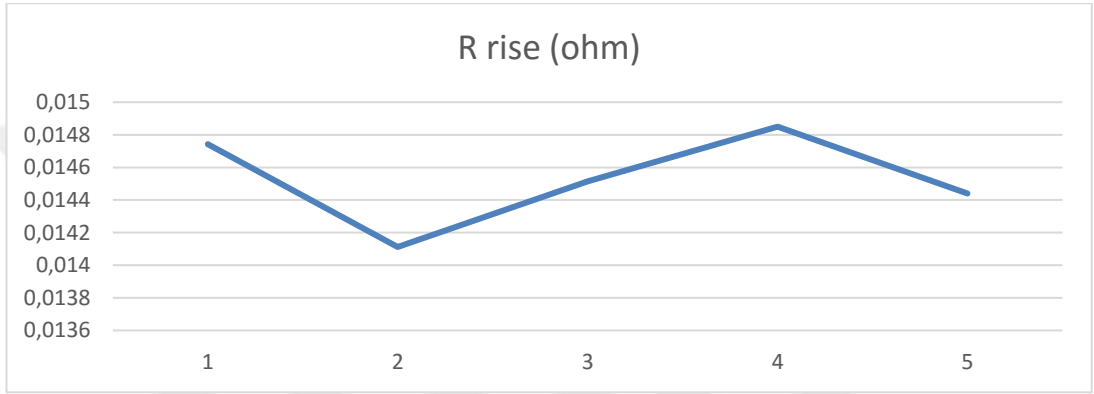
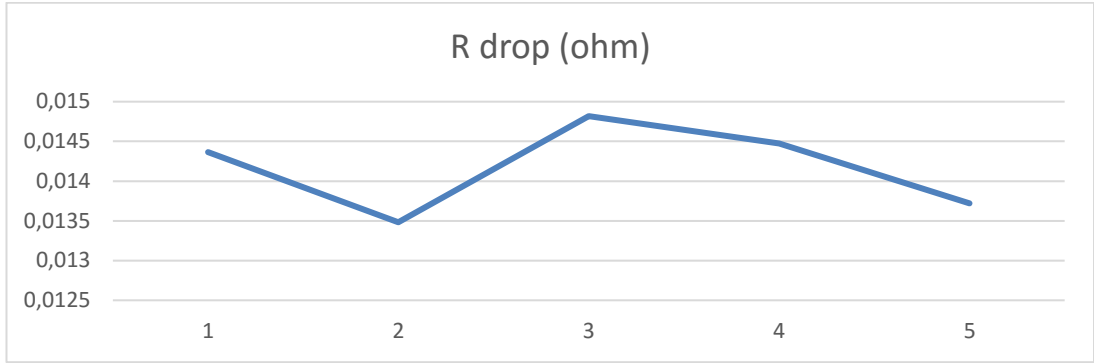
EK A Intersil Balanslama Devresi Varyans Şematiği



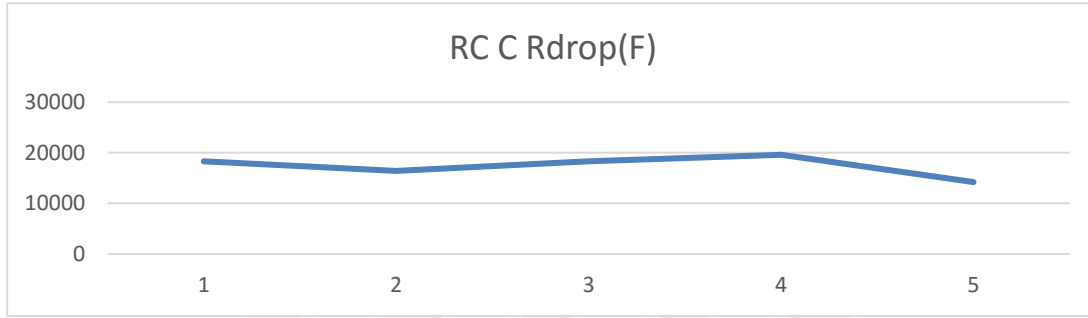
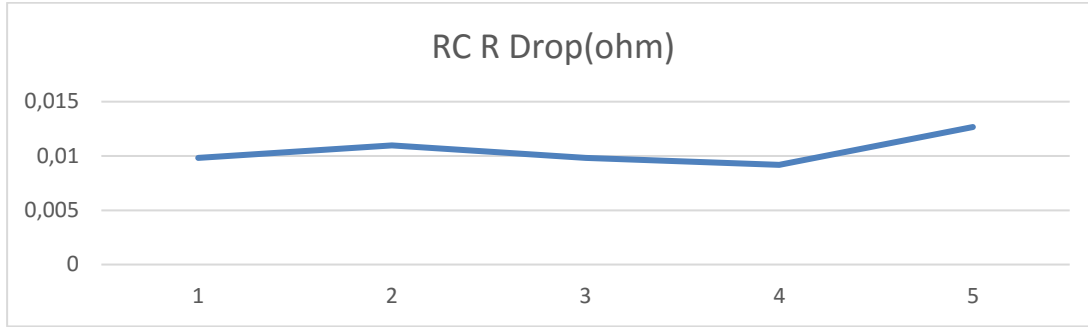
EK B Intersil Balanslama Devresi Varyans Şematiği



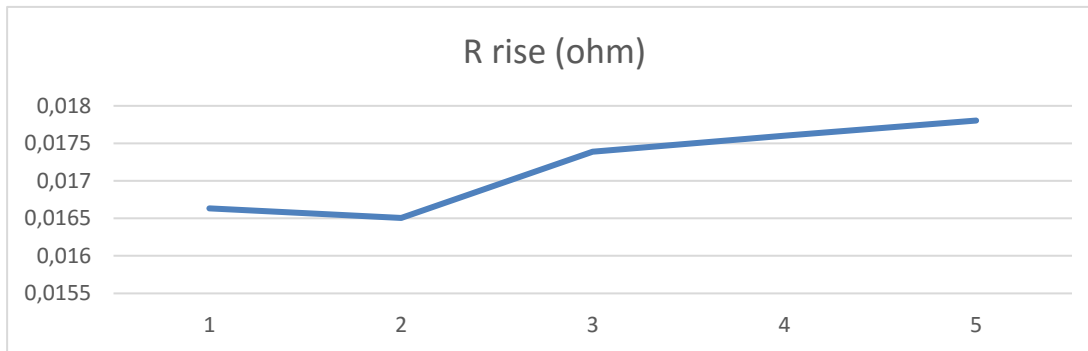
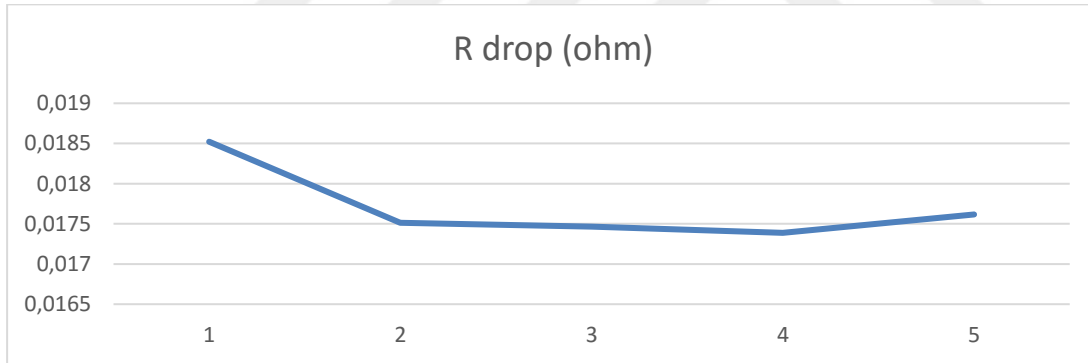
EK C 45°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenini 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



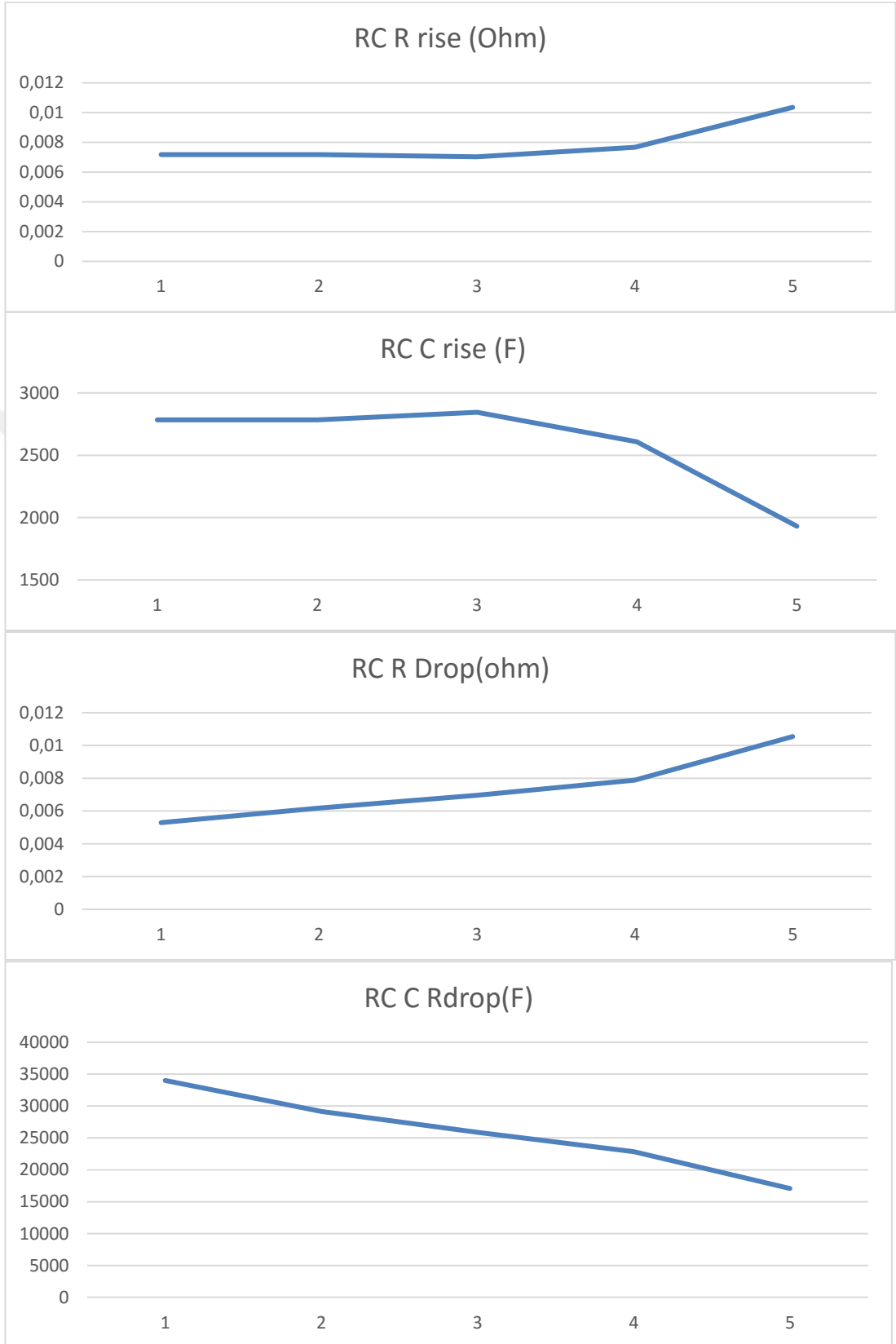
EK D 45°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenini 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



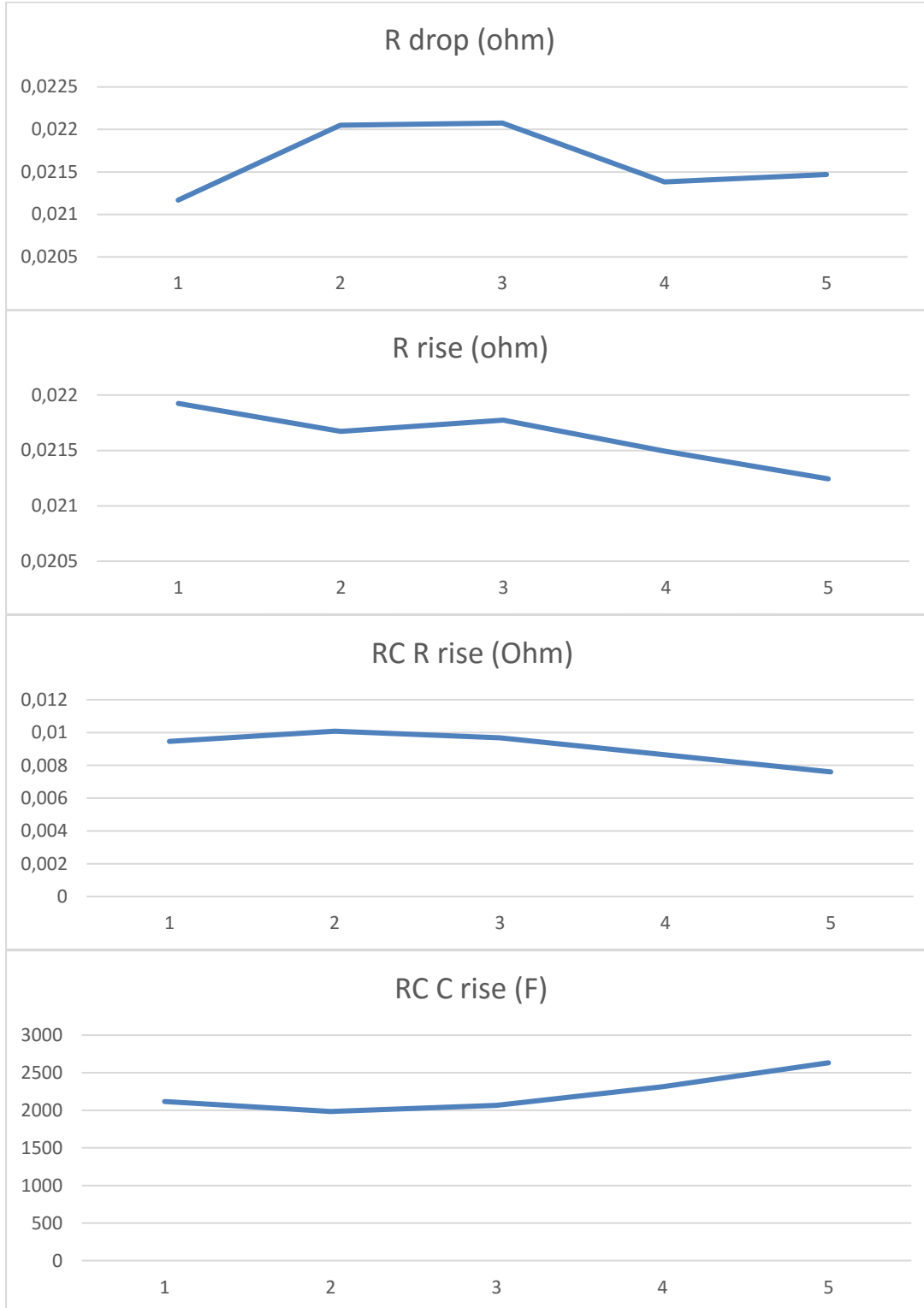
30°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenini 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



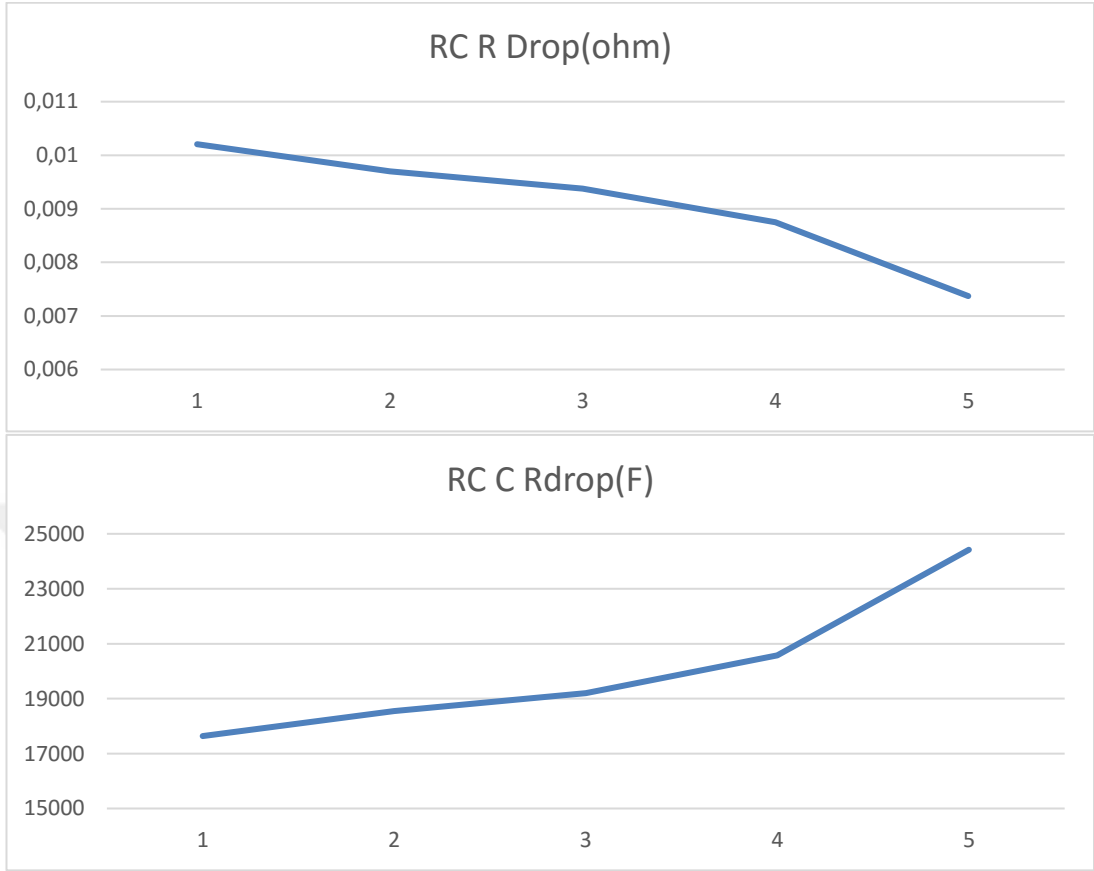
EK E 30°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenı 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



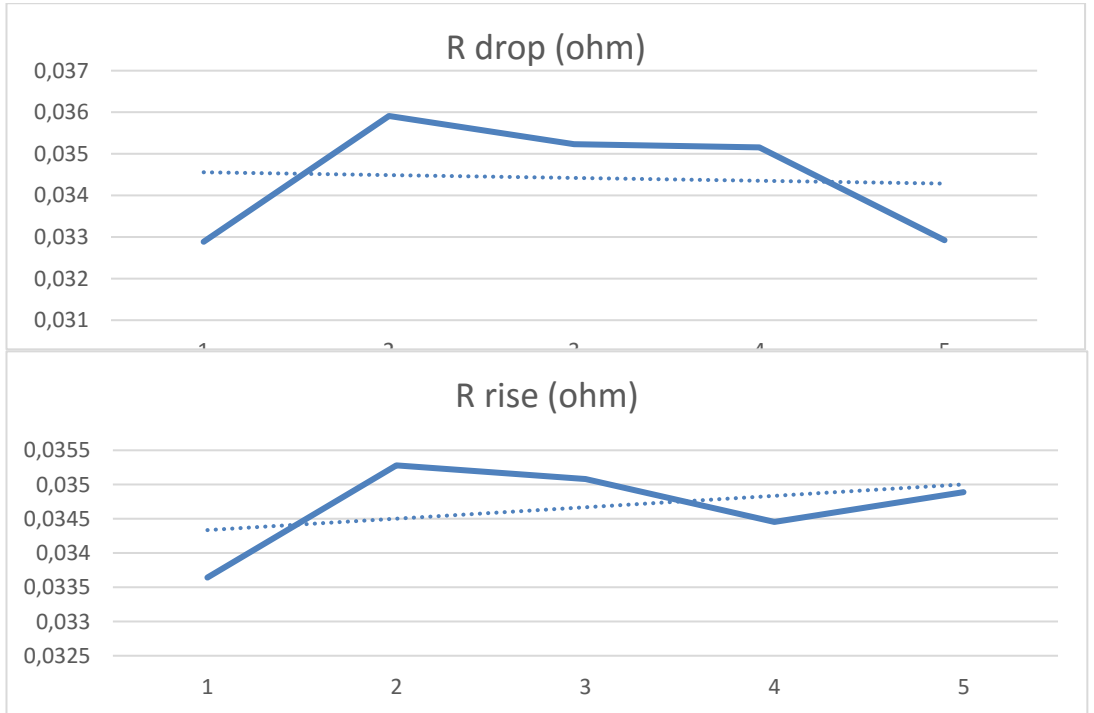
EK F 21°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenini 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



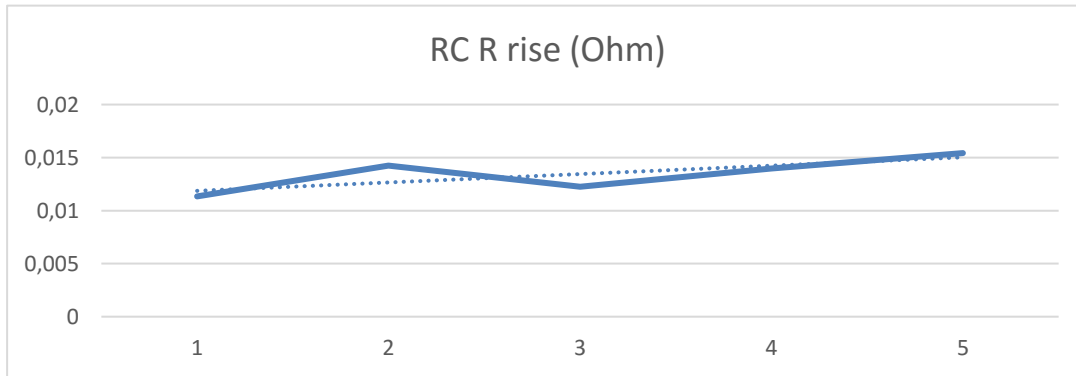
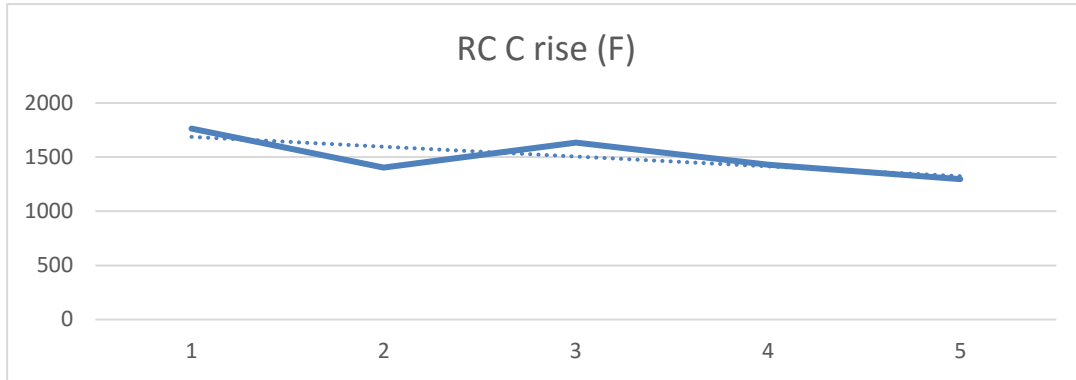
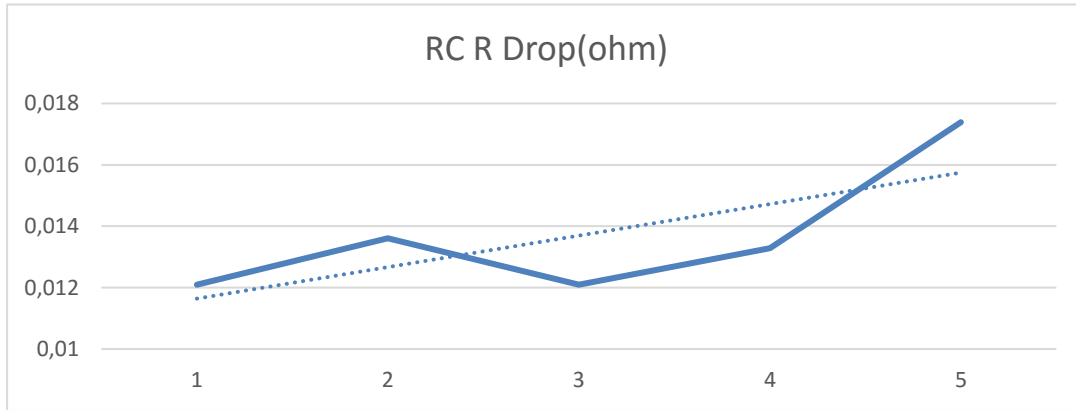
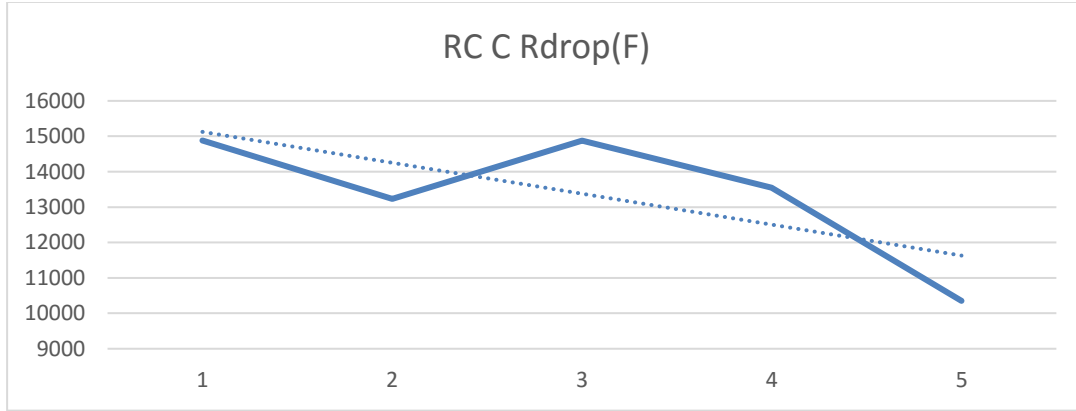
EK G 21°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenini 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



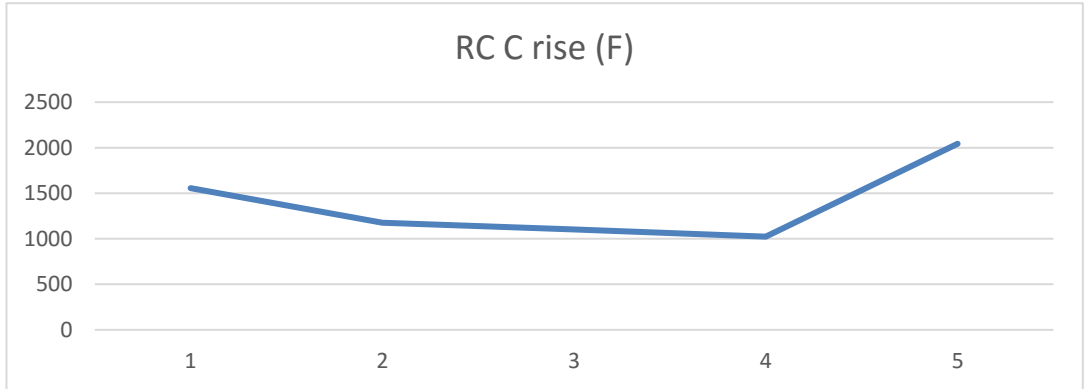
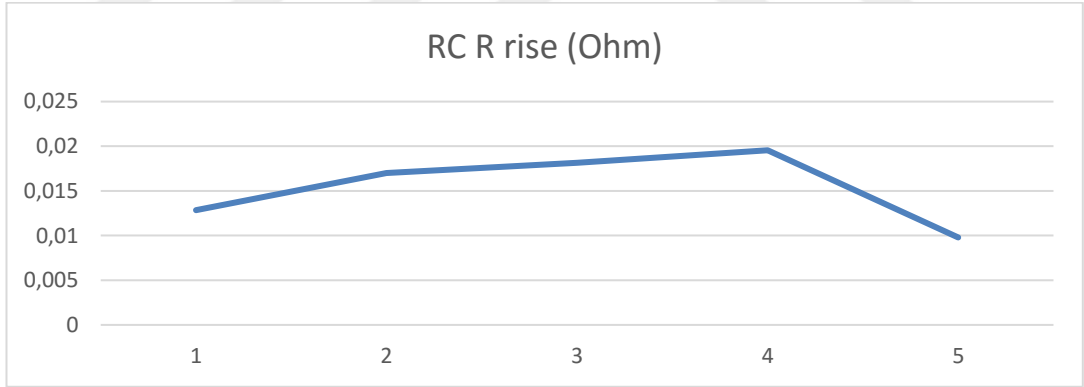
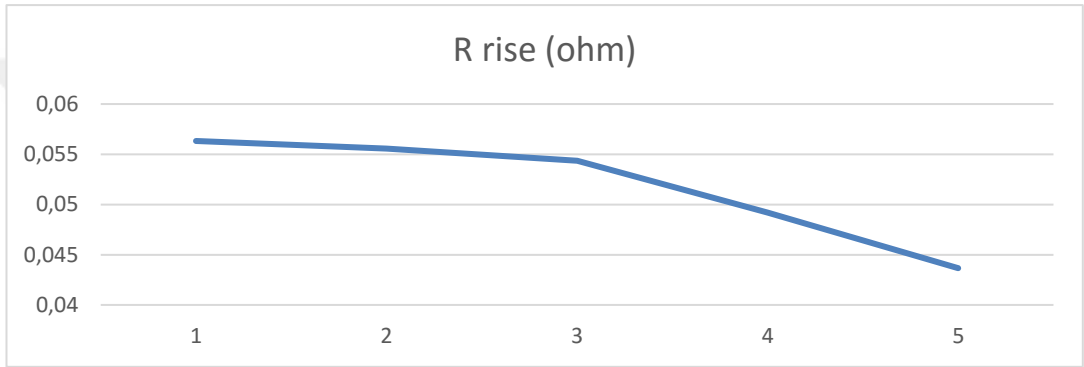
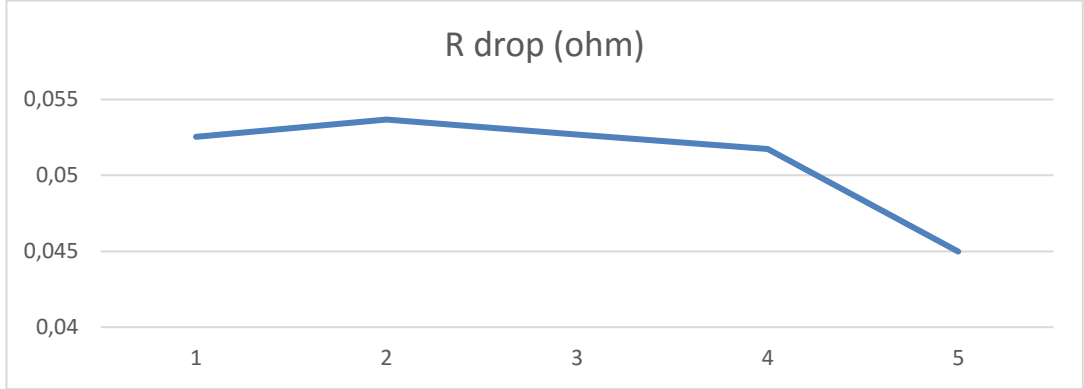
10°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenini 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



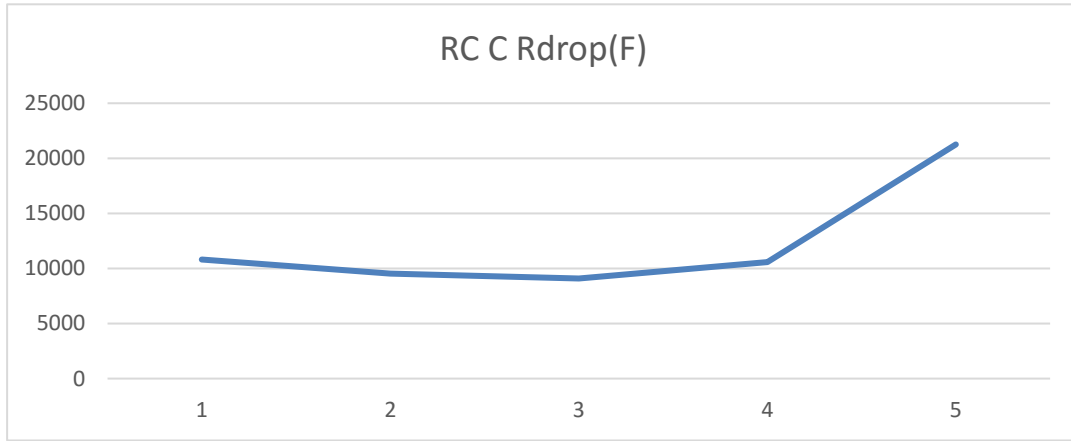
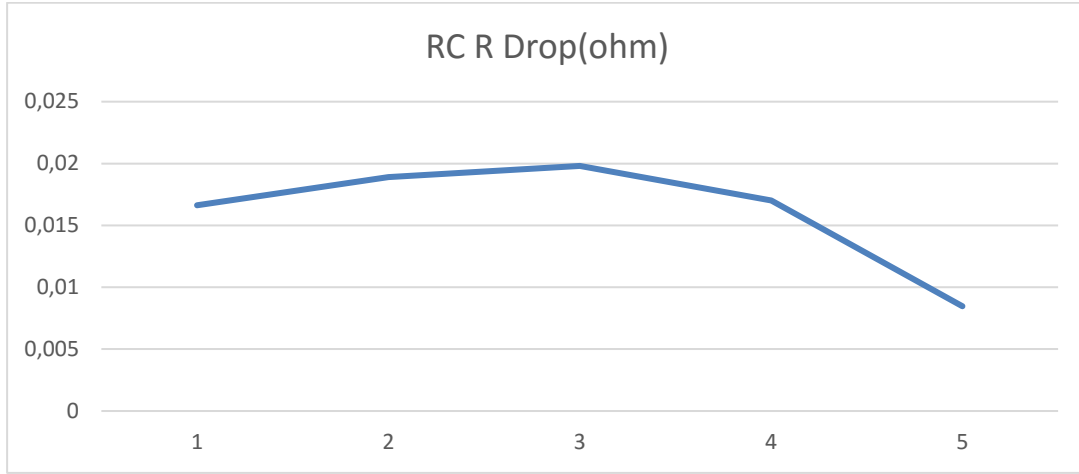
EK H 10°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenini 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



EK I 3°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenini 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



EK J 3°C sıcaklık için tekil grafikleri: (x eksenini 1=1A, 2=3A, 3=5A, 4=7A ve 5=10A)



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Mehmet Cahit Özdemir
Doğum Tarihi ve Yeri : Kayseri, 1991
E-posta : mehmetcahit02@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Otomasyon ve Kontrol Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Mühendisliği Bölümü

İş Tecrübesi

ARÇELİK AŞ, İstanbul //

R&D Specialist Engineer (April 2017 -)

R&D Engineer (August 2014- April 2017)

- Battery Management System(BMS) for multicell Battery Pack HW & SW Design
 - HW includes AFE,LDO,MCU,Uart-USB converter
 - SW includes AFE communication and safety limits and Gauge Algorithm
- Battery Powered Variable Speed Low Voltage BLDC Compressor Driver Hardware & Software update and additional function application
- Battery Powered Vacuum Cleaner Project Electronics HW & SW Design Responsible
- Sensorless BLAC Washing Machine Motor Control Card HW. Design support

- Sensorless BLAC Washing Compressor Motor Control Card HW. Designer (which is in mass Production 750K/year)
- Various Patent Applications about on Sensors,HVAC,Motor Control, Wireless Energy transfer etc.

ARÇELİK AŞ, Istanbul // Undergraduate Project Engineer (December 2012 –August 2014)

- IR Proximity Sensor application on Turkish Coffee Machine/TELVE
- Patent Application about IR transceiver
- Benchmarking- Reverse Engineering on Single Hob Induction
- Capacitive Touch User Interface Design (Hardware-Software)
- HVDC Closed Loop Motor Control on New Concept Food Cooker Machine

ARÇELİK AŞ, Istanbul // Long Term Intern (18 June - 30 September 2012)

- A new research on High Voltage Ioniser Research and Patent Application
- High Voltage circuit design and application
- Patent Research

Teknotel Elektronik Ltd. Şti., Istanbul // Intern (15August - 16 November 2011)

- STM32F103Z (ARM CORTEX-M3 based 32 bit MCU) hardware identification and software development ,Mentor Graphics , hardware development and design

Ödüller

- **Arçelik Patent Champion 2017-** with 9 patent application in one year period
- **Arçelik Patent Prize 2016, 2015-** with two and more patent application in one year period
- **Ten Outstanding Young Person 2013(TOYP)** competition -that is organized by Junior Chamber International(JCI)- Invited Competitor on Scientific and Technological Development
- **PROJISTOR 2013** (Doğuş University IEEE Student Branch) National Project Competition **1nd Rank**
- **ROBOLEAGUE 2012**(Izmir HighTechnology Institue-IEEE Sb.) National Project Competition **3nd Rank**
- **PROJISTOR 2012** (Doğuş University IEEE Student Branch) National Project Competition **3nd Rank**
- **SkillsTurkey National Competition(2011)** **2nd Rank** in Mobile Robotics category

- PROJISTOR 2011 (Doğuş University IEEE Student Branch) National Project Competition **2nd Rank**
- ITURO 2011 (İstanbul Teknik Üniversitesi Ulusal Robot Olimpiyatları) The Freestyle Project Category **1st Rank**

