

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

**HAMİT SERHAT GÜL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRONİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DR. ÖĞR. ÜYESİ Umut Engin AYTEN**

**İSTANBUL, 2018**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

Hamit Serhat GÜL tarafından hazırlanan tez çalışması 08.11.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

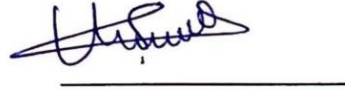
Dr. Öğr. Üyesi Umut Engin AYTEN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Umut Engin AYTEN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Herman SEDEF  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Volkan SEZER  
İstanbul Teknik Üniversitesi



## ÖNSÖZ

---

Tez çalışmam süresince bana rehberlik eden tez danışmanım Umut Engin Ayten'e, akademik hayatım boyunca hiçbir desteği esirgemeyen arkadaşlarım Olcay Korkmaz ve Serkan Akbulut'a, çalışmalarına maddi manevi destek veren ve bir üyesi olmaktan kıvanç duyduğum Altınay Robot Teknolojileri ailesine ve çalışma arkadaşlarıma, aileme ve hayatın her alanındaki en büyük destekçim eşim Simay Başol GÜL'e sonsuz teşekkürler.

Kasım, 2018

Hamit Serhat GÜL

## İÇİNDEKİLER

---

Sayfa	
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	2
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Bulgular.....	4
BÖLÜM 2	
ELEKTRİKLİ ARAÇLAR.....	5
2.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi.....	5
2.2 Elektrikli Araç Türleri ve Elektrikli Araç Bileşenleri.....	6
BÖLÜM 3	
BATARYALAR.....	9
3.1 Lityum İyon Hücreler.....	9
3.2 Elektrikli Araç Bataryaları.....	11
BÖLÜM 4	
BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ.....	13

4.1	Batarya Yönetim Sistemi Görevleri .....	15	
4.1.1	Bataryayı İzleme Görevleri.....	15	
4.1.2	Bataryayı Koruma Görevleri.....	17	
4.1.3	Şarj-Deşarj Yönetimi ve Hücre Dengeleme Görevleri.....	17	
4.1.3.1	Pasif Dengeleme .....	18	
4.1.3.2	Aktif Dengeleme.....	19	
4.1.4	Teşhis ve Kestirim Görevleri .....	20	
4.1.5	Veri Yönetme Görevleri .....	22	
4.2	Batarya Yönetim Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	22	
4.2.1	Merkezi Topoloji .....	22	
4.2.2	Modüler Topoloji .....	24	
4.2.3	Ana-Uydu Topoloji .....	24	
4.2.4	Dağınık Topoloji .....	25	
<b>BÖLÜM 5</b>			
<b>BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI .....</b>			<b>28</b>
5.1	BYS Gereksinimlerinin Belirlenmesi.....	28	
5.2	Uydu Kart Tasarımı.....	30	
5.3	Ana Kart Tasarımı.....	40	
5.4	BYS Donanımı Maliyet Analizi .....	44	
<b>BÖLÜM 6</b>			
<b>TEST ÇALIŞMALARI .....</b>			<b>45</b>
6.1	Test Cihazları ve Test Düzenekleri .....	45	
6.2	Hücre Gerilimi Ölçümleri .....	48	
6.3	Şarj-Deşarj Çevrimleri .....	50	
6.4	Termal Testler .....	51	
6.5	Hücre Dengeleme Testleri .....	53	
6.6	isoSPI Haberleşme Testleri.....	54	
6.7	Akım Ölçüm Testleri.....	55	
6.8	Gerilim Ölçüm Testleri .....	56	
6.9	BYS Güç Tüketimi Testleri .....	57	
<b>BÖLÜM 7</b>			
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>			<b>58</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>			<b>60</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>			<b>63</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

°C	Celsius
Ω	Ohm
kΩ	kiloohm
mΩ	miliohm
W	Watt

## KISALTMA LİSTESİ

---

A	Amper
AC	Alternating Current
ADC	Analog to Digital Converter
AEC	Automotive Electronics Council
BEV	Battery Electric Vehicle
BMIC	Battery Management Integrated Circuit
BMS	Battery Management System
BW	Bandwidth
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
CAN	Controller Area Network
dB	Desibel
DC	Direct Current
E2PROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
ESD	Electrostatic Discharge
GUI	Grafic User Interface
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HIL	Hardware in the Loop
isoSPI	Isolated Serial Peripheral Interface
kHz	Kilohertz
kV	Kilovolt
kWh	Kilowattsaat
LCO	Lithium Cobalt Oxide
LED	Light Emitting Diode
LFP	Lithium Iron Phosphate
Li-air	Lithium Air
LiFePO4	Lityum Demir Fosfat
LIN	Local Interconnect Network
Li-S	Lithium Sulfur
LMO	Lithium Manganese Spinel
LTO	Lithium Titanate
mA	miliamper
Mbps	Mega bit per second
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MUX	Multiplexer

mV	milivolt
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide
Ni-Cd	Nickel Cadmium
Ni-Mh	Nickel Metal Hydride
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
NTC	Negative Temperature Coefficient
Pb-acid	Lead Acid
PCB	Printed Circuit Board
PEC	Packet Error Counter
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PWM	Pulse Width Modulation
RTC	Real Time Clock
SD	Secure Digital
SOAP	State of Available Power
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
SPI	Serial Peripheral Interface
TME	Total Measurement Error
V	Volt
W	Watt
Zn-air	Zinc Air



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	1997 Model Toyota Prius..... 5
Şekil 2.2	Tesla Model S, BMW i3, Jaguar I-PACE ..... 6
Şekil 2.3	Elektrikli araçların dünya genelindeki artışı ve ülkelere dağılımı [5] ..... 6
Şekil 3.1	Lityum hücrelerin kimyasal yapısı [13] ..... 10
Şekil 3.2	Farklı fiziksel yapıdaki lityum iyon hücreler ..... 11
Şekil 3.3	Hücrelerden batarya oluşturulması [13]..... 12
Şekil 4.1	Lityum iyon güvenli çalışma bölgesi [4] ..... 14
Şekil 4.2	Bataryanın elektrik/elektronik blok diyagramı ..... 14
Şekil 4.3	BYS'nin görevleri ..... 15
Şekil 4.4	Hücre dengeleme yöntemleri (a) Pasif dengeleme (b)Hücreden hücreye aktif dengeleme (c) hücreden seri'ye aktif dengeleme ..... 18
Şekil 4.5	Aktif dengeleme yöntemleri [6]..... 20
Şekil 4.6	SOC kestirim yöntemleri [24]..... 21
Şekil 4.7	SOH kestirim yöntemleri [11] ..... 21
Şekil 4.8	Merkezi BYB yapısı ..... 23
Şekil 4.9	Merkezi topolojideki ticari BYB [25]..... 23
Şekil 4.10	Modüler BYB yapısı ..... 24
Şekil 4.11	Ana-uydu topoloji ..... 25
Şekil 4.12	Ana-uydu topolojideki ticari BYB elektronik kartları [26] ..... 25
Şekil 4.13	Dağınık BYB topolojisi ..... 26
Şekil 4.14	Dağınık topolojiye sahip ticari BYB elektronik kartları [27] ..... 27
Şekil 5.1	BYB Blok Diyagramı ..... 30
Şekil 5.2	Uydu kart devre blokları ..... 33
Şekil 5.3	Tasarlanan BYB uydu elektronik kartı ..... 33
Şekil 5.4	LTC6804 blok diyagramı [28] ..... 34
Şekil 5.5	Hücre ölçümü koruma devresi..... 35
Şekil 5.6	Sıcaklık ölçüm devresi ..... 36
Şekil 5.7	LTC6804 ile pasif dengeleme yöntemleri (a) Dahili mosfet ile dengeleme (b) Harici mosfet ile dengeleme [28]..... 37
Şekil 5.8	Hücre dengeleme devresi ..... 37
Şekil 5.9	Hücre dengeleme devresinin eşdeğer devre modeli ..... 38
Şekil 5.10	LTC6804-1 bağlantı yapısı [28]..... 39
Şekil 5.11	isoSPI haberleşme hızının kablo uzunluğuyla ilişkisi [28] ..... 39
Şekil 5.12	Haberleşme devresi ..... 40
Şekil 5.13	Ana kart devre blokları ..... 41

Şekil 5.14	Tasarlanan BYS ana elektronik kartı .....	41
Şekil 5.15	Ana kart güç regülatörleri .....	42
Şekil 5.16	BYS elektronik kartları maliyet oranları .....	44
Şekil 6.1	Test bataryası ve BYS elektronik kartları .....	47
Şekil 6.2	LTC6804 görsel arayüzü .....	47
Şekil 6.3	BYS test kurulumu .....	48
Şekil 6.4	Farklı ölçüm modlarındaki hata oranları .....	49
Şekil 6.5	1C Deşarj grafiği .....	50
Şekil 6.6	0,66C Şarj grafiği .....	51
Şekil 6.7	Kapasiteye bağlı deşarj grafiği .....	51
Şekil 6.8	Hücrelerin termal kamera görüntüleri (a) şarj başlangıcı (b) şarj ortası .....	52
Şekil 6.9	Uydu kartın dengeleme sürecindeki termal görüntüsü .....	54
Şekil 6.10	isoSPI sinyalleri osiloskop görüntüsü (a) kısa mesafe (b) uzun mesafe .....	55
Şekil 6.11	BYS ana kart güç tüketimi .....	57



## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 2.1 Elektrikli araç türleri [5] .....	7
Çizelge 3.1 Bataryalarda kullanılan hücre türleri [13], [22], [23] .....	10
Çizelge 3.2 Piyasadaki elektrikli araçlar ve özellikleri [13] .....	12
Çizelge 4.1 BYS topolojileri karşılaştırması [2] .....	27
Çizelge 5.1 BYS donanım gereksinimleri .....	29
Çizelge 5.2 Batarya kontrol IC'lerin karşılaştırılması .....	32
Çizelge 5.3 LTC6804 ölçüm modları .....	35
Çizelge 5.4 BYS Elektronik kartlarının maliyet kalemleri.....	44
Çizelge 6.1 Testlerde kullanılan cihazlar .....	46
Çizelge 6.2 Uydu kart gerilim ölçüm modları .....	48
Çizelge 6.3 Birden çok uydu kartın hücre ölçüm sonuçları .....	49
Çizelge 6.4 Hücre sıcaklık ölçümleri .....	52
Çizelge 6.5 Dengeleme parametreleri.....	53
Çizelge 6.6 BYS Ana akım ölçümü testi sonuçları.....	56
Çizelge 6.7 BYS Ana gerilim ölçümü testi sonuçları.....	56

## ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Hamit Serhat GÜL

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi. Umut Engin AYTEN

Günümüzde elektrikli araçların kullanım alanı giderek artmaktadır. Bu artışa paralel olarak elektrikli araç teknolojileri günden güne gelişmektedir. Elektrikli araçların en önemli bileşenlerinden biri enerji depolama sistemleridir. Enerji depolama birimi olarak çoğunlukla lityum iyon bataryalar kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda bataryanın performansı, aracın performansını ve kullanıcı deneyimini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple lityum iyon batarya teknolojileri, üzerinde kapsamlı araştırmalar ve çalışmalar yapılan bir alandır.

Bataryaların en önemli bileşenlerinden birisi batarya yönetim sistemi adı verilen elektronik kontrol birimi ve bu birim üzerinde koşan algoritmalarıdır. Bataryayı güvenli ve verimli bir şekilde kullanmanın yolu başarılı bir batarya yönetim sistemi kullanmaktır. Bu amaç için batarya yönetim sistemlerinin onlarca önemli görevi hatasız bir şekilde yerine getirmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında elektrikli araçların bataryasında kullanılmaya uygun batarya yönetim sistemi özellikleri belirlenmiş ve bu doğrultuda özgün bir batarya yönetim sistemi donanımı geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem modüler topolojiye uygun şekilde bir adet ana(master) ve bir adet uydu(slave) elektronik birimden oluşmaktadır. Geliştirilen batarya yönetim sistemi donanımının tasarım adımları ve maliyet analizi tez kapsamında sunulmuştur.

Geliştirilen batarya yönetim sistemi donanımı üretilerek bataryayı güvenli ve verimli bir şekilde çalıştırabilmesi için yerine getirmesi gereken önemli görevler, 12 adet lityum iyon hücreden oluşan gerçek bir test bataryası üzerinde test edilmiş, donanımın performansı değerlendirilmiştir ve test sonuçları verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli araç, lityum iyon batarya, batarya yönetim sistemi, BYS



**BATTERY MANAGEMENT SYSTEM DESIGN FOR ELECTRIC VEHICLES**

Hamit Serhat GÜL

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Umut Engin AYTEN

Nowadays, the usage area of electric vehicles is increasing. With this increase, electric vehicle technologies are developing day by day. Energy storage systems are one of the most important system in electric vehicles. Lithium-ion battery packs are mostly used as energy storage systems. In electric vehicles, battery performance affect vehicle performance and user experience directly. Therefore, lithium-ion battery technology are a field where extensive researches and studies are carried out.

One of the most important component of batteries are an electronic control unit named battery management system and an algorithm running on it. Right way to using a battery efficient and safe is using a proper battery management system.

In this study, proper battery management system features for electric vehicles have been identified and a novel battery management system hardware has been developed accordingly. The developed system consists of one "master" and one "slave" electronic unit in accordance with the modular topology. The design steps and cost analysis of the developed battery management system are presented in the thesis. The important tasks that must be fulfilled in order for the developed battery management system to operate

the battery safely and efficiently have been tested on a physical test battery which consist of 12 lithium ion batteries and the performance of the hardware is evaluated and experimental results are given.

**Keywords:** Electrical vehicle, lithium ion battery pack, battery management system, BMS



### GİRİŞ

Fosil yakıtların doğaya verdiği zarar ve bu yakıt kaynaklarının giderek azalması, toplumun her alanında bu yakıtlardan uzaklaşma eğilimini doğurmuştur. Günümüzde evlerimizde, sanayide, ulaşımda ve daha birçok alanda yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji kullanılmaktadır. Bu sayede artan enerji ihtiyacına cevap verebilmek için yeni bir yol ortaya çıkmakta ve çevreye verilen zarar azaltılmaktadır.

Fosil yakıtlardan uzaklaşma eğiliminin en fazla görüldüğü alanlardan biri ulaşım sektörü ve kara araçlarıdır. Gerek ticari alanlarda gerekse son kullanıcılar arasında elektrikli araçlar gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Binek araçlar sektöründe elektrikli araçlar pazar paylarını arttırırken, taşımacılık sektöründe ise belediyeler elektrikli otobüsler ile hizmete başlamakta, lojistik firmaları elektrikli tırları kullanmaktadır.

Elektrikli araçların popülerleşmesi ile birlikte bu araçları oluşturan alt sistemler ve elektrikli araçların barındırdığı teknolojiler de hızla gelişmektedir. Otomotiv elektroniği, tüm sektörde hızla gelişmekte, elektrikli araçlar ise hem bu gelişimin nimetlerinden yararlanmaktadır hem de kendine has olan batarya, çekiş motoru gibi teknolojileri de ileri taşımaktadır.

Elektrikli araçların en önemli bileşenlerinden biri bataryalarıdır. Bataryanın performansı doğrudan elektrikli aracın performansını etkilemektedir. Ayrıca bataryanın güvenli bir şekilde çalışması ve performansının zaman içinde kaybolmaması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı elektrikli araçlarda bataryalar, batarya yönetim sistemi (BYS) olarak adlandırılan sistemler ile yönetilmektedirler



Bu tez çalışmasında özgün bir batarya yönetim sistemi tasarlanmış, üretilmiş ve testleri yapılmıştır. İkinci bölümde elektrikli araçlarla ilgili, üçüncü bölümde bataryalarla ilgili, dördüncü bölümde ise batarya yönetim sistemleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde tasarlanan ve üretilen batarya yönetim sistemi donanımı anlatılmıştır. Altıncı bölümde ise batarya yönetim sistemi donanım testlerine yer verilmiştir. Son bölümde ise çalışmanın sonucu ve gelecek çalışmalar anlatılmıştır.

## **1.1 Literatür Özeti**

Batarya teknolojilerinin kullanımının gün geçtikçe artması, bu alanda yapılan bilimsel çalışmaların da artmasına yol açmıştır. Batarya teknolojileri alanındaki araştırmaların yanında literatürde batarya yönetim sistemleri ile ilgili de çok sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalar, bataryaların şarj ve deşarj süreçlerini, şarj durumu tahminini, sağlık durumu tahminini, batarya hücrelerinin aktif ve pasif olarak dengelenmesini, batarya yönetim sisteminin veri depolama frekansını, haberleşme yapılarını, kontrol algoritmalarını, elektronik donanımını ve daha birçok konuyu incelemektedir.

Elektrikli araçlar ve elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar kendi başına kapsamlı bir araştırma alanıdır ve bu alanda çok sayıda yayın bulunmaktadır. Bu yayınların en önemlilerinden biri Scrosati, Garche ve Tillmetz'in yaptığı derlemedir [1]. Bu derlemede elektrikli araçlar, bataryalar ve batarya yönetim sistemleri ile ilgili kapsamlı incelemeler ve araştırmalara yer verilmiştir.

2010 yılında Andrea tarafından yayınlanan kitap ise batarya yönetim sistemlerini birçok açıdan ele almaktadır [2]. Bu kitapta batarya yönetim sistemlerinin yapısı, görevleri, tasarım süreçleri, ticari BYS'ler gibi önemli konu başlıkları yer almaktadır.

2013 yılında Rahimi-Eichi vd. tarafından [3], 2013 yılında Lu vd. tarafından [4] ve 2014 yılında Waag vd. tarafından yapılan çalışmalarda batarya yönetim sistemlerinin özellikleri ve görevleri incelenmiş, bu konularda yapılan çalışmalar derlenmiş ve anlatılmıştır.

Hoque vd. tarafından 2017 yılında yayınlanan çalışmada elektrikli araçlar ve BYS'ler hakkında bilgi verilmiş ve BYS'lerde kullanılan dengeleme yöntemleri anlatılmış ve karşılaştırılmıştır [5]. Lozano vd. tarafından yayınlanan 2014 tarihli çalışmada [6] ve

Baronti'nin vd. tarafından 2014 yılında yayınlanan çalışmada aktif dengeleme teknikleri hakkında bilgi verilmiştir [7].

Farmann vd. tarafından 2015 yılında [8], Barrera vd. tarafından 2017 yılında [9] ve Hannan vd. tarafından 2017 yılında yapılan [10] çalışmalarda kapasite durumu (State of Charge, SOC) kavramı anlatılmış, SOC kestirimi için kullanılan yöntemlere ve karşılaştırmalı analizlerine yer verilmiş ve bu alanda literatürde yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

Berecibar vd. tarafından 2016 yılında yapılan [11] ve Rezvanizani vd. tarafından 2014 yılında yapılan [12] çalışmalarda batarya sağlık durumu (State of Health, SOH) kavramına, SOH tahmini için kullanılan yöntemlere ve literatürde yer alan çalışmalara yer verilmiştir.

Bataryaların tasarımında termal yönetim önemli bir yere sahiptir. Wang vd. tarafından 2016 yılında yayınlanan çalışmada elektrikli araçlardaki termal yönetim konusu kapsamlı bir şekilde işlenmiştir [13].

Birçok mühendislik uygulamasında olduğu gibi batarya yönetim sistemi tasarımında da test ve doğrulama faaliyetleri çok önemlidir. Fleischer vd. tarafından 2016 yılında yapılan yayında BYS için Hardware in the loop (HIL) testi anlatılmıştır [14]. Dai vd. tarafından 2016 yılında yapılan yayında ise BYS'nin HIL testinde kullanılmak üzere bir hücre emülatörü tasarlanmıştır [15].

Aldoğan çalışmasında elektrikli araçlarda kullanılabilecek bir batarya yönetim sistemi donanımı tasarlamıştır [16]. Tasarım modüler yapıda olup CANBus ve LINBus haberleşme yeteneğine sahiptir. Tasarlanan batarya yönetimine sistemi gerilim okuma, haberleşme, güç tüketimi gibi testler uygulanmıştır.

Altun çalışmasında batarya yönetimi için yazılım algoritmaları geliştirerek uygun bir elektronik donanım üzerinde bu algoritmaları gerçekleştirmiş ve sonuçları değerlendirmiştir [17].

Baykal çalışmasında batarya yönetim sisteminde kullanılmak üzere hücre izleme kartları gerçekleştirmiş ve bu kartları laboratuvar ortamında test etmiştir [18].

Nafiz çalışmasında elektrikli otobüslerde kullanıma uygun bir batarya yönetim sistemi geliştirmiştir. Bu BYS'de aktif dengeleme sistemi kullanılmıştır. BYS laboratuvar ortamında yüksek kapasiteli piller ile test edilmiştir [19].

Kılıç çalışmasında BYS sistemi gerçekleştirmiş ve bu sistemi lityum demir fosfat hücrelerden oluşan bir batarya paketi ile bir araya getirerek test etmiştir. BYS'nin grafik arayüzü ve telemetri yeteneği de çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir [20].

Yılmaz çalışmasında tasarladığı BYS'ye bluetooth ve wifi özelliği ekleyerek sistemin internete bağlanmasını sağlamıştır [21].

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu tezde modern elektrikli araçlarda kullanılacak, her türdeki lityum hücre ile uyum içinde çalışabilecek, geliştirilecek tüm algoritmalara uygun bir altyapı sağlayacak ve modern batarya yönetim sistemlerinde yer alan birçok teknolojiyi içerecek bir batarya yönetim sistemi donanımı geliştirilmesi ve geliştirilen donanımın uygun testler ile test edilmesi hedeflenmektedir.

## **1.3 Bulgular**

Tez çalışması kapsamında bir batarya yönetim sistemi donanımı tasarlanmış, üretilmiş ve testleri gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte görülmüştür ki BYS tasarımı ayrı disiplinlerin bir arada çalışmasını gerektiren ve uygulamanın özelliklerinin fazlaca göz önünde bulundurulmasının gerekli olduğu bir süreçtir. Bu sürecin başında batarya yönetim sistemlerini, bataryaları ve elektrikli araçları iyi tanımak, donanım tasarımında ise isterleri iyi belirlemek çok önemlidir.

BYS donanımının elektronik olarak geniş kabiliyetlere ve üst düzey performans özelliklerine sahip olması gerektiği çalışma kapsamında görülmüştür.

### ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

#### 2.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi

Elektrikli araçların tarihi 1800'lü yılların ortasına kadar dayanmaktadır. İlk elektrikli araç denemeleri yeniden şarj edilemeyen piller ile gerçekleştirilmiştir fakat günlük kullanıma uygun bir araç üretilmemiştir. 19. yüzyılın sonlarına doğru elektrik motorları ve pillerdeki gelişmeler ile günlük kullanıma uygun elektrikli araçlar üretilmiş ve ticari olarak piyasaya sürülmüşlerdir

1900'lü yılların başında içten yanmalı motor teknolojisinde meydana gelen gelişmeler, petrol fiyatlarının düşmesi ve Ford gibi firmaların başını çektiği seri üretim devrimi yüzünden elektrikli araçlar piyasadan neredeyse silinmişlerdir [22].

20. yüzyılın sonlarına doğru binek araçların küresel ısınmaya olan etkisi önemini arttırmıştır. Bu durum, elektrik-elektronik alanındaki gelişmeler ile birleşince 1997 yılında ilk ticari hibrit elektrikli otomobil olan Toyota Prius Japonya'da piyasaya çıkmış ve ilk yılında 18.000 adet satılmıştır [22].



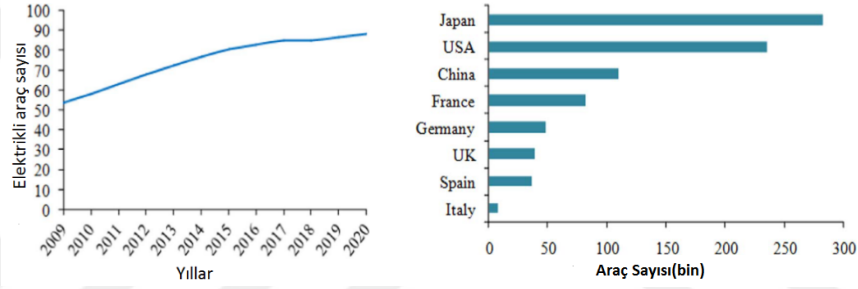
Şekil 2.1 1997 Model Toyota Prius

Günümüzde elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesi ve maliyetlerin azalması, elektrikli araçları oldukça popüler hale getirmiştir. Tesla Model S, BMW i3, Jaguar I-PACE gibi elektrikli araçlar sınıflarında fosil yakıtlı araçlarla rekabet eder hale gelmiştir.



Şekil 2.2 Tesla Model S, BMW i3, Jaguar I-PACE

Birçok araştırma elektrikli araçların geleceğin ulaşım yöntemi olacağını göstermektedir. Şekil 2.3'te Elektrikli araçların dünya çapındaki durumu ve gelecek tahminleri yer almaktadır.



Şekil 2.3 Elektrikli araçların dünya genelindeki artışı ve ülkelere dağılımı [5]

## 2.2 Elektrikli Araç Türleri ve Elektrikli Araç Bileşenleri

Elektrikli araçların geleneksel araçlardan ayrıldığı en önemli nokta, aracın ilerlemesi için elektrik enerjisinden faydalanılması, dolayısıyla elektrik enerjisini kinetik enerjiye çevirecek alt sistemlerin varlığıdır. Bu alt sistemlerin en önemlileri elektrik enerjini depolama sistemi olarak bataryalar, enerjiyi kinetik enerjiye çeviren elektrik motorları ve gerekli güç dönüşümlerini yapan güç elektroniği birimleridir.

Elektrik alt sistemlerinin farklı türlerde ve farklı şekillerde bir araya gelmesi ile birçok farklı yapıda elektrikli araç topolojisi üretilmiştir. Bu farklı araç sistemlerinin karşılaştırmalı görselleri ve açıklamaları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Elektrikli araç türleri [5]

**Kısaltmalar:** M:Elektrik motoru, G: Elektrik jeneratörü, T: şanzıman, D: Diferansiyel, ICE: içten yanmalı motor, GB: Dişli kutusu, FG: Sabit vites, FT: Yakıt deposu, B: Batarya, BMS: Batarya yönetim sistemi, UC: Ultrakapasitör, PC: Güç dönüştürücüsü, MD:Motor sürücü, I: Evirici, DDC: DC-DC dönüştürücü, C: Şarj cihazı

Elektrikli Araç Tipi	EA Güç Aktarım Yapısı	Özellikler
Hafif HEA		İçten yanmalı motor aracı ilerleten asıl güç kaynağıdır. Bunun yanında 12V 5kW'lık bir yardımcı elektrik motoru yer alır ve kalkış anında ana motoru destekler.
Seri HEA		Araç sadece elektrik motoru ile tahrik edilir. İçten yanmalı motor bataryayı şarj etmek için kullanılır. Bu yapı şehir içi kullanım için düşük verimlidir.
Paralel HEA		Bu yapıda şanzımana hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motor bağlıdır ve araç iki motorla da tahrik edilir. Verim daha yüksektir ve hem şehir içi hem de ottoyol kullanımına uygundur.
Seri-Paralel HEA		Bu yapı seri hibrit ve paralel hibrit yapısının bir kombinasyonudur. Elektrik motoru aracı tahrik ederken içten yanmalı motor hem aracı tahrik eder hem de elektrik motoru için elektrik üretir.
Karmaşık HEA		Bu yapı seri-paralel yapısına benzer, farkı içten yanmalı motorun bataryayı şarj etmesi için bir güç dönüştürücüsü yer almasıdır.
Seri-Paralel Plug-in HEA		Bu yapı her hibrit yapısının bir türevidir. Bu yapılarda bataryayı şarj etmek için içten yanmalı motor yerine bir şarj cihazı kullanılır ve araç şebekeden şarj edilir.
Dişli kutulu ve Kavramalı EA		BEV'lerde içten yanmalı motor bulunmaz, tüm güç bataryadan ve elektrik motorundan karşılanır. Bu yapıda elektrik motorunun gücü dişli kutusu ile diferansiyele verilir. Bu yapının verimi azdır.

Çizelge 2.1 Elektrikli Araç Türleri [5] (Devamı)

Elektrikli Araç Tipi	EA Güç Aktarım Yapısı	Özellikler
Sabit vitesli EA		Bu yapıda dişli kutusu yerine sabit dişli vardır. Elektrik motorunun gücü ve torku motor sürücü tarafından ayarlanır. Bu yapının verimi görece azdır.
Tüleşik sabit vitesli ve diferansiyelli EA		Bu yapıda elektrik motoru, sabit dişli ve diferansiyel tahrik milinde bir arada yer alır.
İki bağımsız sabit vitesli ve motorlu EA		Bu yapıda diferansiyel yerine iki tekerlekte elektrik motoru ve bu motorları kontrol eden motor sürücüler yer alır.
Tekerlek içi sabit vitesli EA		Bu yapı tekerlek içinde motor yer alan yapıdan önce geliştirilen yapıdır ve tekerlek içinde dişli bulunmaktadır.
Tekerlek içi motorlu EA		Bu yapıda elektrik motorları tekerleğe entegredir. Bu yapı şehir ve otoyol kullanımı için daha sade bir yapı sunar.
Seri hibritleştirilmiş EA		Bu yapı herhangi bir BEV yapısının türevi olabilir. Sistemde birbirini tamamlayan iki elektrik depolama sistemi (ör: ultrakapasitör) seri olarak kullanılmaktadır.
Paralel hibritleştirilmiş EA		Bu yapı herhangi bir BEV yapısının türevi olabilir. Sistemde birbirini tamamlayan iki elektrik depolama sistemi (ör: ultrakapasitör) paralel olarak kullanılmaktadır.

Tüm sistemlerde yer alan ve en önemli bileşenler olan elektrik motorları ve bataryalar, elektrikli araçların performansını doğrudan etkileyen bileşenlerdir. Son kullanıcı ile doğrudan ilgili olan hızlanma, en yüksek hız, menzil, şarj süresi, akustik gürültü, bakım ve onarım maliyetleri gibi özellikler doğrudan elektrik motoru ve batarya ile ilgilidir. Bu sebeple elektrikli araçlar üzerinde yapılan çalışmalar bu bileşenlerde yoğunlaşmıştır.



### BATARYALAR

Bataryalar, elektrik enerjisini kimyasal enerji formunda depolayan birimlerdir. Elektrik enerjisinin depolanmasını gerektiren taşınabilir elektronik cihazlar, telekomünikasyon altyapıları, yenilebilir enerji santralleri ve elektrikli araçlar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bataryalar şarj edilebilir bataryalar ve şarj edilemeyen bataryalar olarak ikiye ayrılır. Şarj edilemeyen bataryalar “birincil bataryalar” olarak isimlendirilirken, şarj edilebilen bataryalar ise “ikincil bataryalar” olarak isimlendirilirler.

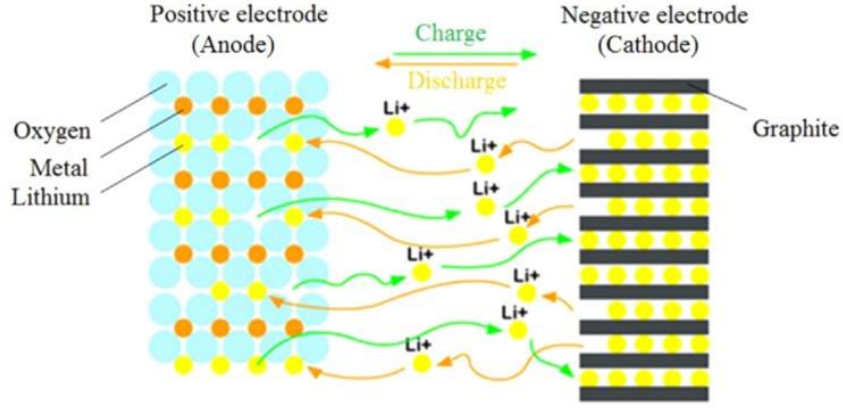
Bataryalar hücre adı verilen enerji depolama birimlerinden oluşur. Bir batarya, bir adet hücreden oluşabileceği gibi, onbinlerce hücreden de oluşabilir.

Bataryayı oluşturan hücreler farklı kimyasal yapıda ve geometrik özelliklerde olabilir. Hücrelerin bu özellikleri, bataryaların özelliklerini doğrudan etkiler. Bataryalarda Ni-Mh, Ni-Cd, kurşun asit gibi hücre yapıları kullanılsa da özellikle elektrikli araçlarda lityum tabanlı hücreler yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### 3.1 Lityum İyon Hücreler

Lityum İyon hücreler, pozitif elektrodundan (anot) lityum metalinin bileşikleri bulunan hücrelerdir. Şekil 3.1’de lityum iyon hücrenin kimyasal yapısının basit gösterimi mevcuttur.





Şekil 3.1 Lityum hücrelerin kimyasal yapısı [13]

Lityum iyon hücreler, kendinden önce kullanılan hücre teknolojilerine kıyasla birim hacimde ve birim ağırlıkta daha yüksek enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu sunar. Bu özellikleri sayesinde lityum iyon hücreler çok geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Bunun yanında bu hücrelerin yüksek hücre gerilimi, hafıza etkisinin olmayışı gibi farklı avantajları bulunmaktadır.

Lityum iyon hücreler kendi içlerinde birçok alt türe ayrılmaktadır. Lityum iyon alt türleri ve diğer hücre türlerinin karşılaştırmalı açıklamaları, Çizelge 3.1’de verilmiştir

Çizelge 3.1 Bataryalarda kullanılan hücre türleri [13], [22], [23]

Kısaltma	İsim	Nominal Hücre Gerilimi (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Sayısı (#)	Maliyet
Pb-acid	Lead acid	2,0	35	1000	Düşük
Ni-Cd	Nickel cadmium	1,2	50 - 80	2000	Düşük
Ni-MH	Nickel-metal hydride	1,2	70 - 95	<3000	Düşük
ZEBRA	Zebra	2,6	90 - 120	>1200	Düşük
Zn-air	Zinc-air	1,65	460	200	Düşük
LCO	Lithium cobalt oxide	3,7 - 3,9	150	500 - 1000	Orta
NCA	Lithium nickel cobalt aluminium oxide	3,65	130	500	Orta
NMC	Lithium nickel, manganese cobalt oxide	3,8 - 4,0	170	1000 - 2000	Orta
LMO	Lithium manganese spinel	4,0	120	300 - 700	Orta
LFP	Lithium iron phosphate	3,3	130	1000 - 2000	Yüksek
LTO	Lithium titanate	2,3 - 2,5	85	3000 - 7000	Yüksek
Li-S	Lithium-sulfur	2,5	350 - 650	300	Düşük
Li-air	Lithium-air	2,9	1300 - 2000	100	-

Görüldüğü gibi lityum tabanlı hücreler, enerji yoğunluğu, çevrim sayısı, hücre gerilimi, maliyet gibi parametrelerde farklılık göstermektedir. Uygulamanın isterlerine göre bu türler arasından seçim yapılarak bataryalar oluşturulmaktadır. Örneğin binek araçlar için yüksek enerji yoğunluğu önemli bir kriter iken, toplu taşımada kullanılacak bir elektrikli araç için yüksek çevrim sayısı önem kazanmaktadır.

Ayrıca lityum iyon hücreler farklı fiziksel yapılarda üretilmektedirler. Hücrenin kapasitesine bağlı olarak aynı kimyasal yapıda bir hücre birkaç gramdan birkaç kilograma kadar ağırlıkta olabilmektedir. Lityum iyon hücreler silindirik, prizmatik, buton veya torba (pouch) yapıda paketlenirler. Bu paketlere örnekler Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2 Farklı fiziksel yapıdaki lityum iyon hücreler

### 3.2 Elektrikli Araç Bataryaları

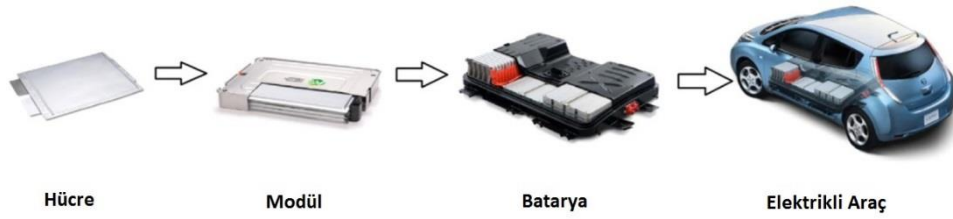
Elektrikli araçlar, spor otomobillerden kamyonlara, golf araçlarından otobüslere ve trenlere kadar çeşitlilik göstermektedir. Bunun sonucunda çok farklı karakteristik özelliklerde elektrikli araç bataryası ihtiyacı doğmaktadır. Bir elektrikli araç bataryasının karakteristik özellikleri aşağıda listelenmiştir:

- Nominal gerilim
- En yüksek gerilim
- En düşük gerilim
- Nominal şarj/deşarj akımı
- En yüksek şarj akımı
- En yüksekdeşarj akımı

- Kapasite
- Çalışma sıcaklığı
- Çevrim sayısı
- Ağırlık ve hacim

Bu karakteristik özellikler, bir aracın hız, hızlanma, menzil, şarj süresi, ağırlığı gibi önemli özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple bataryanın elektrikli aracın performansındaki yeri büyüktür.

Bataryanın karakteristik özellikleri, kullanılan hücrenin türü, hücrelerin adedi, hücrelerin seri-paralel bağlantı yapısı ve bataryada kullanılan hücreler haricindeki yapısal elemanlar tarafından belirlenir. Bir bataryada hücreler bir araya gelerek modülleri, modüller de bir araya gelerek bataryanın kendisini oluşturur. Bu yapı Şekil 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3 Hücrelerden batarya oluşturulması [13]

Piyasadaki elektrikli araçların bataryaları farklı sayılarda hücrenin bir araya getirilmesi ile farklı özellikler kazanmışlardır. Çizelge 3.2’de piyasadaki elektrikli araçların bataryaları karşılaştırmalı olarak anlatılmıştır.

Çizelge 3.2 Piyasadaki elektrikli araçlar ve özellikleri [13]

Model	Batarya Tipi	Batarya Ağırlığı (kg)	En Yüksek Hız (km/h)	Menzil (km)	Şarj Süresi (h)	Satış Fiyatı	Piyasaya Çıkış Tarihi
BMW i3	22 kWh Lityum iyon	230	150	130-160	0.5-9	\$52,000	2013
Chevrolet Spark EV	21.3 kWh nanophosphate Lityum iyon	254	144	132	0.33-7	\$12,170	2013
Volkswagen e-Up!	18.7 kWh Lityum iyon	230	130	160	0.5	\$34,500	2013
Tesla Model S	60–85 kWh Lityum iyon	535–556	193–214	370–426	1.5–20 min	\$63,570	2012
Ford Focus	23 kWh Lityum iyon	300	135	122	3–4, 18–20	\$35,170	2011
BYD e6	75 kWh LiFePO4	500	140	330	10-20min	\$52,000	2010
Citroën C-Zero	16 kWh Lityum iyon	240 (200)	130	100–160	0.5–7 (0.5–14)	\$48,000	2010
Nissan Leaf	24 kWh Lityum iyon	294	150	117–200	0.5–20	\$35,430	2010
Tesla Roadster	53 kWh Lityum iyon	450	209	390	3-5	>\$92,000	2008-2012
Venturi Fetish	54 kWh LiPo	450	200	340	3-8	\$400,000	2006

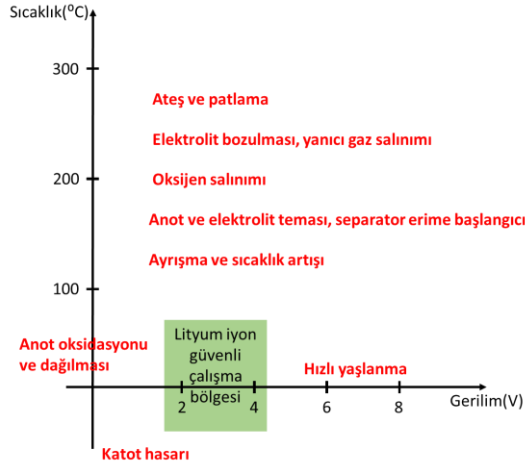
### BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ

Bataryalar, bir önceki bölümde anlatıldığı gibi oldukça çeşitli ve karışık sistemlerdir. Bu sistemlerin doğru bir şekilde çalışması için hücrelerin yanında birçok farklı bileşen de bulunmaktadır. Bu bileşenler mekanik ve elektriksel bağlantı elemanları, termal koşullandırma elemanları ve mekanik ve elektriksel güvenlik elemanlarıdır.

Hücrelerden ve ek bileşenlerden oluşan bu karışık sistemin yönetimini sağlayan birime ise batarya yönetim sistemi (BYS) ismi verilir. Bu sistem bir veya daha fazla türde elektronik birimden ve bu birimler üzerinde koşan gömülü yazılımlardan oluşur. BYS bataryanın güvenli ve istenildiği şekilde çalışmasını sağlayan bir kontrol yapısıdır.

Yüksek hücre sayısına sahip ve otomotivde kullanılan bataryalarda BYS, bataryanın en önemli bileşenidir. BYS'nin iki ana görevi olan güvenli kullanım ve tam performans ile kullanım, otomotiv uygulamaları için çok önemlidir. Otomotivde kullanılan her sistem gibi bataryanın da güvenlik kuralları çok katıdır. BYS, bataryanın bu katı güvenlik kurallarına uymasını sağlar. Aynı zamanda bataryalar BYS tarafından ne kadar iyi yönetilirse o kadar yüksek performans gösterirler.

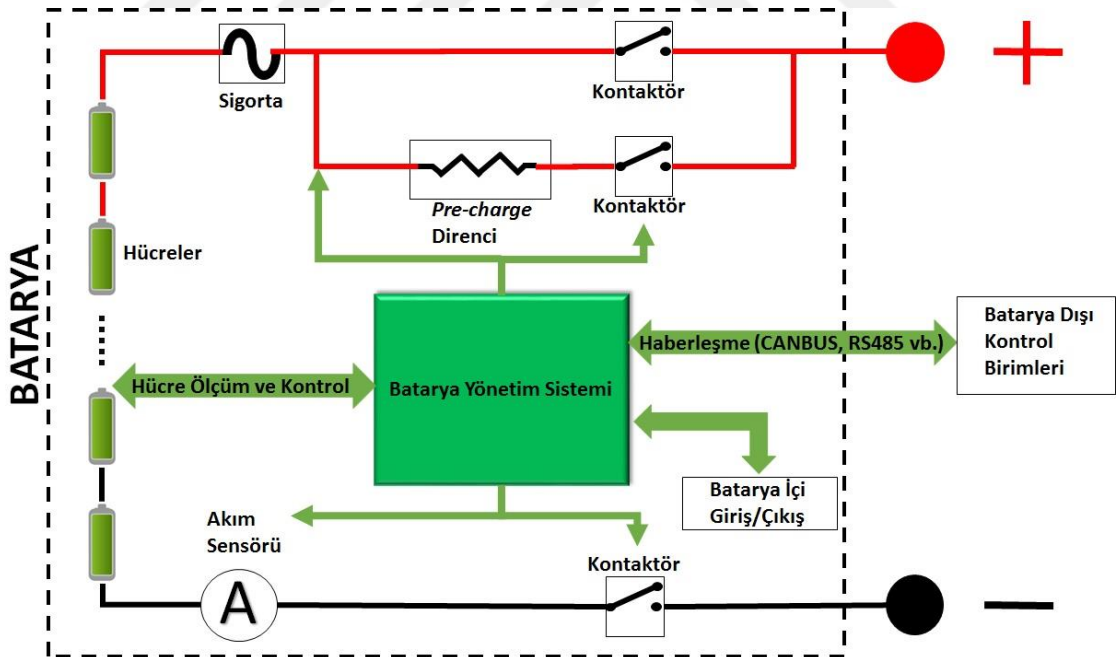
Lityum iyon hücreler, yerine geçtikleri pil teknolojilerine göre daha yüksek performanslar sunsalar da güvenlik dezavantajları vardır. Bu hücreler uygun çalışma bölgelerinde kullanılmazlarsa, kalıcı performans kaybı yaşayabilirler, ısınma ve patlama gibi ciddi güvenlik riskleri oluşturabilirler. Şekil 4.1'de tipik bir lityum iyon hücrenin güvenli çalışma bölgesi görülmektedir. Bataryadaki tüm hücrelerin bu bölgede tutulması ise ağırlıklı olarak BYS'nin görevidir.



Şekil 4.1 Lityum iyon güvenli çalışma bölgesi [4]

BYS'nin bataryayı güvenli çalıştırması dışında bataryanın dış dünya ile olan tüm ilişkilerini yönetmesi gerekir. Bunlar güç aktarımları (şarj/deşarj) ve bilgi aktarımlarıdır. Tüm aktarımların yönetimi BYS'nin görevidir.

Şekil 4.2'de BYS ve batarya sisteminin tipik bir blok diyagramı gösterimi yer almaktadır. Tüm sistem otomotiv uygulamaları için uygun bir batarya oluştururlar.

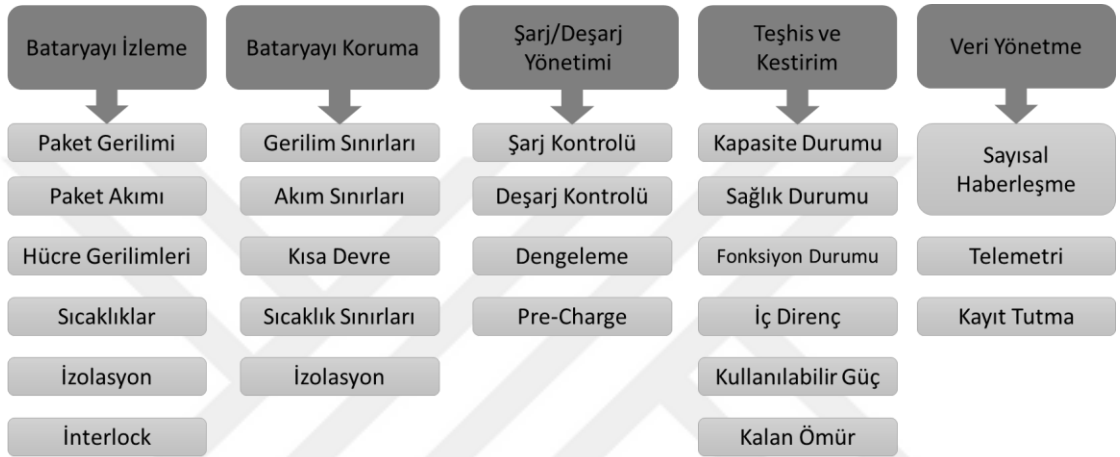


Şekil 4.2 Bataryanın elektrik/elektronik blok diyagramı

#### 4.1 Batarya Yönetim Sistemi Görevleri

Modern batarya yönetim sistemleri, hücre sayısına ve kullanıldığı alana göre onlarca farklı görevi yerine getirebilir. Elektrikli araçlarda kullanılan BYS'ler ise teknolojinin tüm imkanlarından yararlanan, araç içerisindeki diğer elektronik kontrol birimlerine benzer şekilde birçok farklı görevi yerine getiren sistemlerdir. Gün geçtikçe BYS'ler karmaşıklaşmakta ve yerine getirebildiği görev sayısı artmaktadır.

Şekil 4.3'de gelişmiş bir BYS'nin yerine getirebileceği görevler görülmektedir.



Şekil 4.3 BYS'nin görevleri

Bir BYS'nin görevleri uygulamanın isterlerine göre çok farklı sayıda ve türde olabilmesine rağmen bu görevler kabaca beş ana başlıkta sınıflandırılabilir. Bunlar bataryayı izleme, bataryayı koruma, şarj-deşarj yönetimi ve hücrelerin dengelenmesi, teşhis/kestirim ve veri yönetme görevleridir [2].

##### 4.1.1 Bataryayı İzleme Görevleri

Bir batarya yönetim sisteminin tüm görevlerinin başında bataryayı izleme görevleri gelir. BYS yaptığı ölçümler ile diğer görevlerini yürütebilir. Modern bir BYS'nin batarya içerisindeki yaptığı ölçümler aşağıda listelenmiştir:

- Tüm hücrelerin ayrı ayrı gerilimleri
- Hücrelerin toplam gerilimi
- Her bir seri hücre kolunun akımı
- Hücre sıcaklıkları
- Ortam sıcaklığı

- Soğutma sıvısı/gazı sıcaklığı
- Bataryanın izolasyon direnci değeri
- Ortamın nemi
- Konnektörlerin ve kapakların konumu

BYS tüm hücrelerin gerilimlerini yüksek doğrulukla ölçmelidir. Bu görev BYS'nin en temel görevlerinden biridir. Bu sayede şarj ve deşarj sırasında her bir hücre güvenli çalışma bölgesi içinde tutulabilmektedir. Ayrıca BYS kapasite hesabı, sağlık kestirimi gibi algoritmalar için hücre gerilimlerine ihtiyaç duyar.

Tüm hücrelerin meydana getirdiği batarya paketinin toplam gerilimi ve akımı da BYS tarafından ölçülmelidir. Batarya gerilimi ve akımı kullanım sırasında kritik değerlerin dışına çıkmamalıdır. Ayrıca akımın doğru ölçülmesi, bataryanın kapasite hesabının yapılması için çok önemlidir.

Lityum tabanlı hücreler sıcaklıkların değişimlerinden fazlaca etkilenirler. Bu sebepten dolayı bataryalar termal olarak uygun koşullarda kullanılmalı, mümkünse bir termal yönetim sistemine sahip olmalıdır. Bu yüzden BYS, her hücrenin veya iki hücrede, üç hücrede bir olacak şekilde hücre sıcaklıklarını ölçmeli, ayrıca ortam sıcaklığını ve termal yönetim için gerekli noktaların sıcaklığını ölçmelidir.

Elektrikli araçlarda yüksek gerilim batarya ile aracın diğer düşük gerilim sistemleri birbirinden tamamen izole olmalıdır. Bu izolasyonun dayanabileceği seviye, sektörde yaklaşık 2 kV olarak kabul görmüştür [1]. Ayrıca yüksek gerilim artı ve eksi uçları ile aracın düşük gerilimi toprak hattı (şase) arasında ölçülebilecek izolasyon direnci, ECE-R100 gibi otomotiv standartları tarafından belirlenmiştir. Normal şartlarda bu değer  $M\Omega$ - $G\Omega$  mertebelerinde olması gerekir. Fakat izolasyon azalması ve delinmesi durumlarında bu değer  $0 \Omega$ 'a kadar düşer ve bu durum bataryada kaçak olması şeklinde isimlendirilir. Bataryada kaçak olması bataryayı bozabilecek ve insan sağlığına zarar verebilecek bir durumdur. Bu olumsuz durumları yaşamamak için bataryanın izolasyon direnci BYS tarafından sürekli ölçülmeli ve kritik sınırlar içinde olduğu kontrol edilmeli, aksi durumda gerekli önlemler alınmalıdır.

Bunların yanında BYS, batarya ile ilgili farklı ortam koşullarını, kapak açık/kapalı, konnektör bağlı/değil gibi durumları algılayabilmelidir. Tüm bu ölçümler sayesinde BYS, bataryanın güvenli ve verimli çalışmasını sağlamaktadır.

#### **4.1.2 Bataryayı Koruma Görevleri**

BYS, bataryayı yöneterek doğru kullanılmasını sağlamaktadır fakat yönetimin yeterli olmadığı önlenemez durumlarda (ortam sıcaklığının değişmesi, batarya kapağının açılması, aşırı akım çekilmesi vb.) BYS, bataryayı korumak için, artı ve eksi hattaki kontaktörleri açık konuma getirerek bataryayı yükten ayırır. Ayrıca BYS ürettiği uyarıları ve hataları haberleşme kanalları ile dış birimlere iletir.

#### **4.1.3 Şarj-Deşarj Yönetimi ve Hücre Dengeleme Görevleri**

Bataryanın temel kullanım amacı araçtaki elektrik motorunun tahrik edilmesidir. Bu işlem için batarya çıkışları bir motor sürücü birimine bağlıdır ve batarya motorun çalıştırıldığı sırada deşarj olur. Bataryanın şarjı ise araç üzerinde ve/veya araç dışında yer alan bir şarj cihazıyla gerçekleşir. Her iki işlem de BYS'nin yönetimi altında gerçekleşir.

Şarj sırasında BYS şarj cihazı ile haberleşerek gerekli şarj akımını regüle eder. Bataryanın yapısal özelliklerine göre şarj akımını, doluluk oranını da gözeterek belirler. Aynı şekilde deşarj sırasında da BYS motor sürücü ile haberleşerek bataryadan anlık olarak çekilebilecek akımı sürekli olarak motor sürücüyü bildirir. Her iki durumda da akım ve gerilimin istenmeyen değerler alması durumunda BYS koruma işlevini yerine getirir.

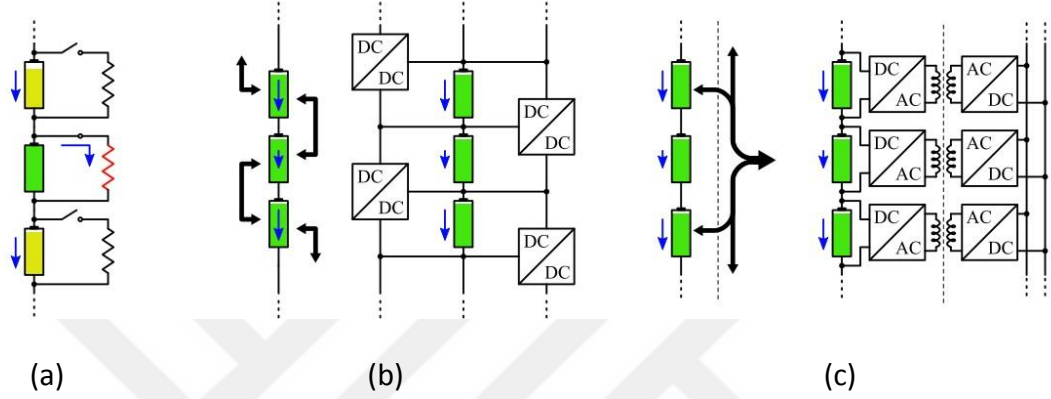
Bir bataryayı oluşturan hücreler tam olarak özdeş değildir. Üretimden farklılıklarından dolayı yeni hücreler dahi özdeş değildir. Ayrıca batarya oluşturulduktan sonra kullanım sırasında farklı ısı profillerine maruz kalmak, hücrelerin özdeşliğini bozmaktadır ve hücreler arası enerji kapasitesi farkı oluşmaktadır.

Seri kolu oluşturan hücreler farklı kapasiteye sahip olduklarında, şarj sırasında kapasitesi en az olan hücre ilk önce şarjı bitirme gerilimine (örneğin 4.2 V) ulaşmaktadır. BYS, diğer hücreler henüz kapasitelerini doldurmamış olmasına rağmen bu noktada şarjı bitirmek zorundadır çünkü seri koldan akım akıtarak şarja devam edilirse, şarj bitirme gerilimine ulaşan hücre aşırı şarj edilmiş olur ve bu durum kesinlikle istenmeyen bir durumdur.



Benzer şekilde de deşarj sırasında deşarjı bitirme gerilimine ulaşan hücre ile diğerk hücrelerde kullanılabilir enerji olsa dahi deşarj bitirilmelidir.

Bu verimsiz durumun önüne geçmek için batarya yönetim sistemleri hücre dengeleme işlemi gerçekleştirirler. Hücre dengeleme işlemi sayesinde batarya hücreleri arasında farklar oluşsa dahi kullanılmayacak kapasitenin bir kısmı veya tamamı kullanılabilir. Dengeleme türleri Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.4 Hücre dengeleme yöntemleri (a) Pasif dengeleme (b) Hücreden hücreye aktif dengeleme (c) hücreden seri'ye aktif dengeleme

#### 4.1.3.1 Pasif Dengeleme

Bir bataryanın seri bağlı hücreleri arasında yaşlanmaya bağlı sebeplerde bir hücrenin kapasitesi azaldıysa, şarj sırasında diğerk sağlıklı hücelere de yaşlı hücrenin kapasitesi kadar enerji depolanabilir. Yaşlı hücrenin kapasitesi dolup maksimum şarj gerilimine ulaştığında sağlıklı hücelerde hala enerji depolanabilecek boşluk vardır fakat bu noktadan sonra şarja devam edilemez çünkü yaşlı hücrenin gerilimi sınırların üstüne çıkar ve hücre zarar görür.

Bu durumda sağlıklı hücelerdeki boşlukları doldurmanın yolu, yaşlı hücelerden enerji boşaltıp yer açmaktır. Bunu yapmanın en basit yolu hücredeki enerjiyi harcamaktır. Bu sayede yapılan dengeleme işlemine pasif dengeleme denir.

Pasif dengelemede enerji genellikle direnç üzerinde harcanır. Her hücre için bir adet dengeleme direnci olabileceği gibi bir adet büyük dengeleme direncine hüceler sırayla da bağlanabilirler. Direnç ile dengeleme yapılırken depolanmış elektrik enerjisi ısı olarak açığa çıkar

Direncin yerine enerji harcamak için lamba, LED, anten gibi bileşenler de kullanılabilir [2].

Pasif dengeleme yönteminin en büyük artısı uygulamasının çok basit olmasıdır. Maliyetli ve büyük elektronik devreler gerektirmez ve elektromanyetik gürültü yaratmaz.

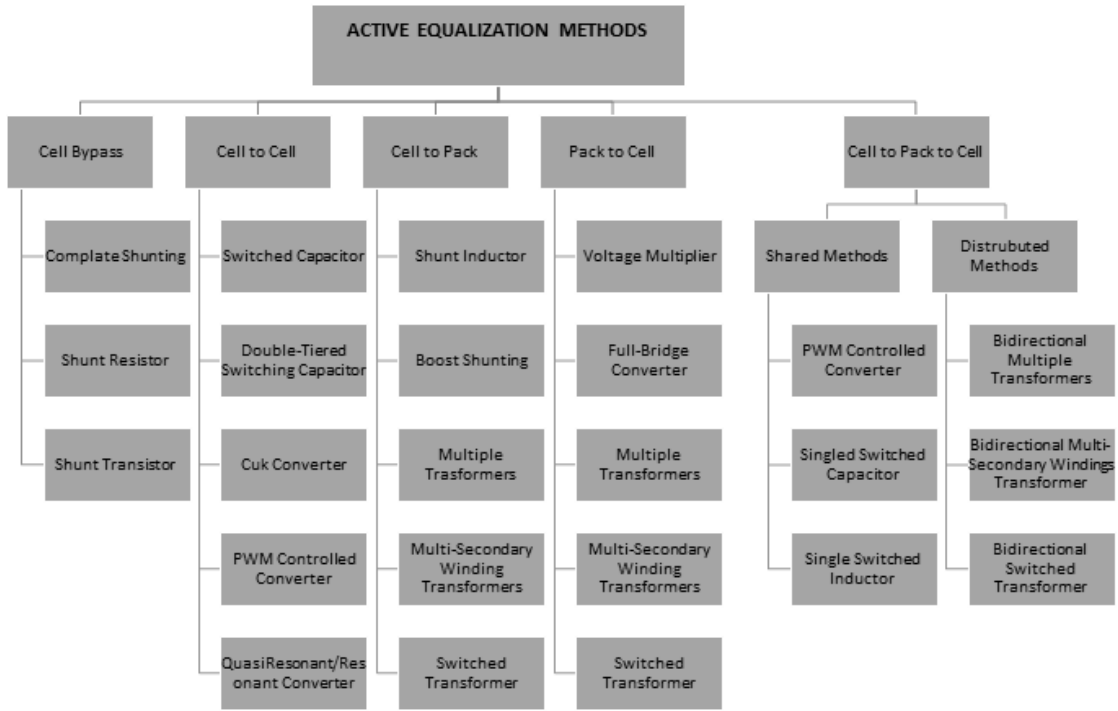
Bunun yanında bu yöntemin eksileri de mevcuttur. Bu dengeleme yöntemi sadece şarj sırasında uygulanabilir ve boşa gidecek kapasitenin kullanılmasını sağlar, deşarj sırasında bunu yapamaz. Bunun yanında enerji boşa harcandığı için verimsizdir. Dengeleme akımları aktif dengelemedeki kadar yüksek olamadığı için hücrelerin dengelenmesi uzun sürer. Ayrıca enerji ısı şeklinde atıldığı için batarya içerisinde istenmeyen sıcak noktalar oluşabilir.

#### **4.1.3.2 Aktif Dengeleme**

Bu yöntemde pasif dengelemede olduğu gibi şarj sırasında boş kalan kapasiteler doldurulmaya çalışılır fakat bunu yapmak için enerji harcamak yerine enerji hücreden hücreye veya hücreden pakete transfer edilir. Bu sayede hem şarj hem de deşarj sırasında dengeleme işlemi gerçekleştirilebilir. Deşarj sırasında yaşlı hücre en önce biter ve geriliminin daha da düşmemesi için bu hücreye diğer hücrelerden enerji transferi yapılır.

Aktif dengeleme metodu pasif dengeleme metoduna göre daha karışık, pahalı ve büyük elektronik devreler gerektirir. Fakat yüksek dengeleme akımları, enerjinin harcanmıyor oluşu ve deşarj sırasında da dengelemenin gerçekleştirilebiliyor oluşu bu yöntemi çoğu uygulamada tercih sebebi yapar.

Aktif dengeleme yöntemi, karışık ve çeşitli mekanizmaları sayesinde pasif dengeleme yöntemine göre çok daha fazla araştırma alanı olan bir konudur ve aktif dengelemenin birçok alt türü vardır. Şekil 4.5'te aktif dengeleme yöntemlerinin sınıflandırılması görülmektedir.



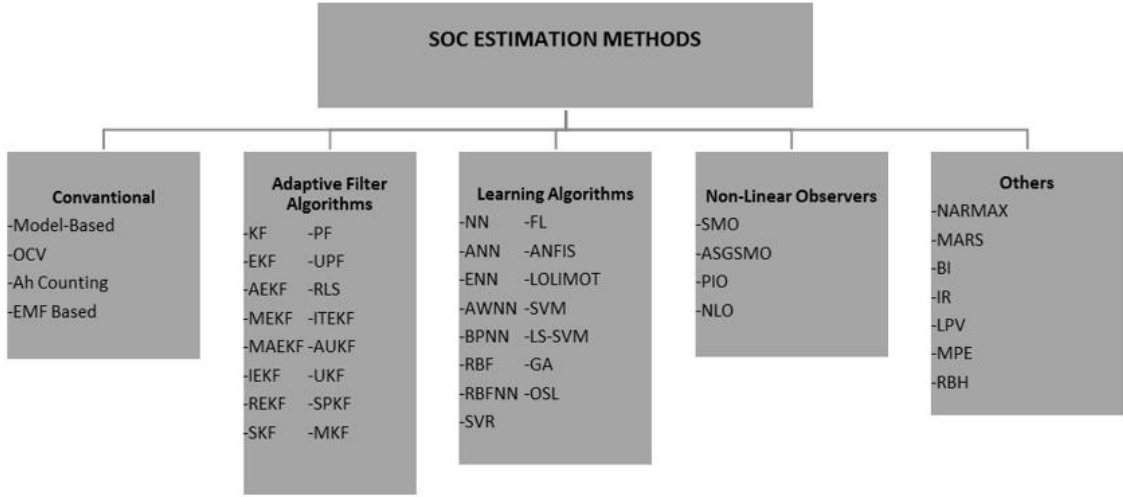
Şekil 4.5 Aktif dengeleme yöntemleri [6]

#### 4.1.4 Teşhis ve Kestirim Görevleri

BYS, ölçtüğü gerilim, akım, sıcaklık parametrelerinden ve zaman parametresinden yola çıkarak batarya ile ilgili birçok değeri hesaplamak veya tahmin etmek zorundadır.

Bunların başında bataryanın kapasitesi gelmektedir. Bu terim kapasite durumu (State of Charge-SOC) olarak isimlendirilir ve bataryanın doluluk oranını ifade eder. (örneğin: SOC=%50)

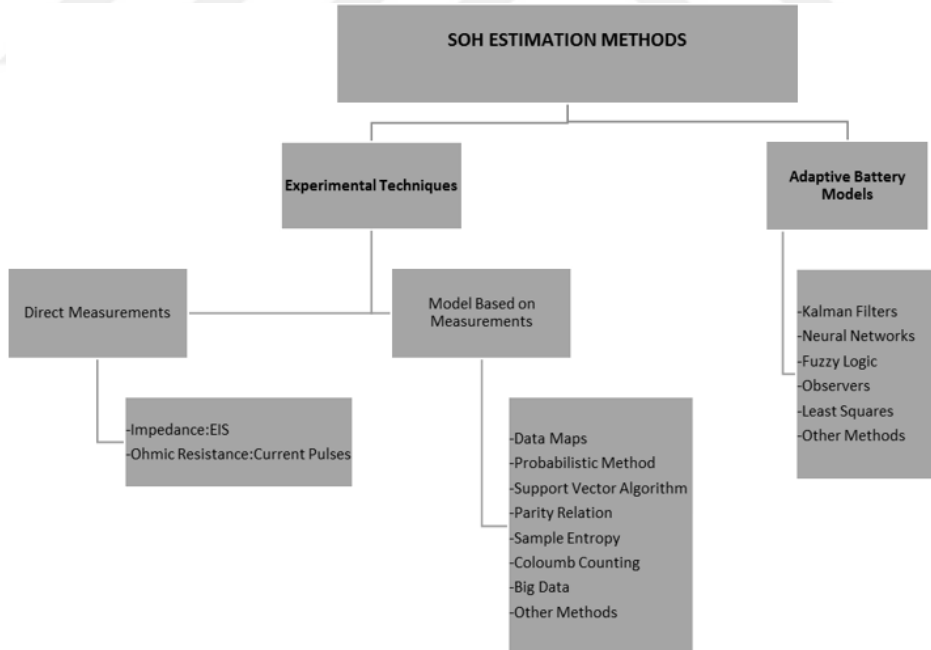
SOC, bataryadan doğrudan ölçülebilecek bir parametre değildir ve batarya gerilimi gibi ölçülebilen parametreler ile de doğrudan ilişkili değildir. Bu sebeple eldeki veriler ile bir kestirim yapmak gerekmektedir. Şekil 4.6’da bu kestirim yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6 SOC kestirim yöntemleri [24]

Bataryaların çevrim sayısı, kullanım şekli, maruz kaldığı sıcaklıklar gibi etkilere dolayı kullanılabilir kapasiteleri azalmaktadır ve bu bataryanın sağlık durumu (State of Health-SOH) olarak adlandırılmaktadır.

SOH kestirimi için SOC’de olduğu gibi ölçülen verilerden yola çıkarak kestirim yapmak gerekmektedir. Şekil 4.7’de SOH kestirim algoritmaları görülmektedir.



Şekil 4.7 SOH kestirim yöntemleri [11]

SOC ve SOH’nin yanında batarya ile ilgili “State of Function”, “State of Available Power”, gibi birçok kestirim, BYS tarafından yapılabilir.

#### **4.1.5 Veri Yönetme Görevleri**

Batarya yönetim sisteminde, sistemi oluşturan elektronik kartlar arasında farklı protokollerde sayısal haberleşme yapıları bulunur. Bu haberleşme yapılarında CANBus, RS-485, SPI, isoSPI gibi protokoller kullanılabilir. Sayısal haberleşme yapıları ile hücre gerilimleri, sıcaklıkları gibi veriler hızlı ve güvenli bir şekilde ölçüm noktasından değerlendirileceği noktaya iletilir.

BYS, bataryayla ilgili bilgileri sayısal haberleşme yöntemleri ile batarya dışındaki diğer kontrol birimleri ile paylaşabilmeli ve gerektiğinde dışarıdan komutlar alabilmelidir. Bu ihtiyaca cevap verebilmesi için BYS'nin merkezi kontrol birimi dış dünyaya açılan haberleşme kanallarına sahiptir. Otomotivde kullanılan BYS'lerde, tüm sektörde kabul gören ve araç içi elektronik haberleşmede yaygın olarak kullanılan CANBus protokolü, BYS'lerde de sıkça kullanılmaktadır. Bunun yanında dış dünya ile kablosuz olarak haberleşebilen BYS'ler ile ilgili çalışmalar da mevcuttur.

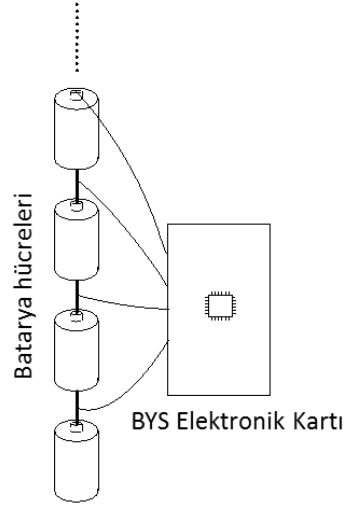
BYS, bataryayla ilgili kritik verilerin bazılarını anında dış dünyaya ilettiği gibi, bazı verileri de hafıza birimlerine kayıt etmesi gerekmektedir. Bu kayıtlar bataryanın bakımı ve servisi sırasında kullanılacağı gibi bataryanın geliştirilmesi amacıyla da kullanılabilir. Kayıt tutma işlemi için SD kart, E2PROM, flash hafıza gibi hafıza birimleri, BYS tarafından kullanılır.

#### **4.2 Batarya Yönetim Sistemlerinin Sınıflandırılması**

Batarya yönetim sistemleri, topolojilerine göre dört ana kategoriye ayrılır [2].

##### **4.2.1 Merkezi Topoloji**

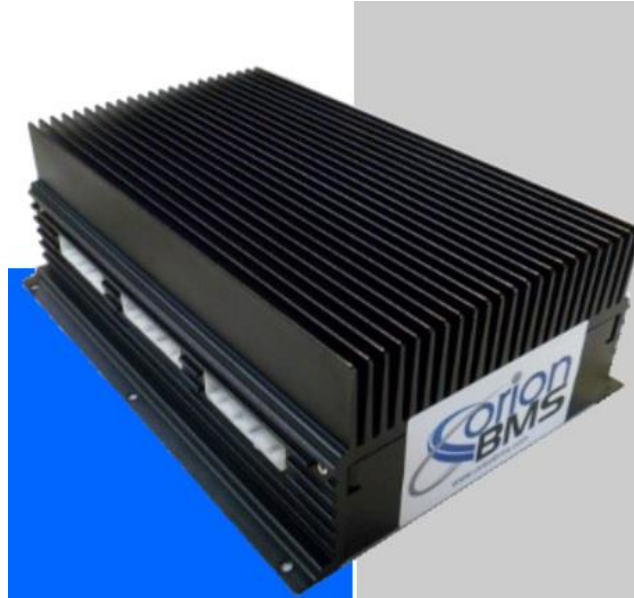
Bu topolojide BYS'nin tüm görevlerini üstlenen tek bir elektronik kart mevcuttur. Ölçümlerin yapılması için tüm hücrelerin terminalleri, sıcaklık sensörleri gibi bağlantıların hepsi bir karta yapılır. Şekil 4.8'de merkezi topoloji yapısı görülmektedir.



Şekil 4.8 Merkezi BYS yapısı

Bu yapıda tek bir elektronik birim olduğu için maliyet düşüktür. Ayrıca tümleşik bir yapıdadır ve arızalara müdahale etmek kolaydır. Fakat hücre sayısı arttıkça aynı karta bağlanacak kablo sayısı ve kablo uzunluğu artacağı için fiziksel zorluklar yaşanmaya başlayacaktır. Ayrıca hücre sayısının çok fazla olduğu bataryalarda tüm işlem yükü tek bir elektronik kartta olacağı için gömülü yazılım karmaşıklaşacak ve yavaşlayacaktır.

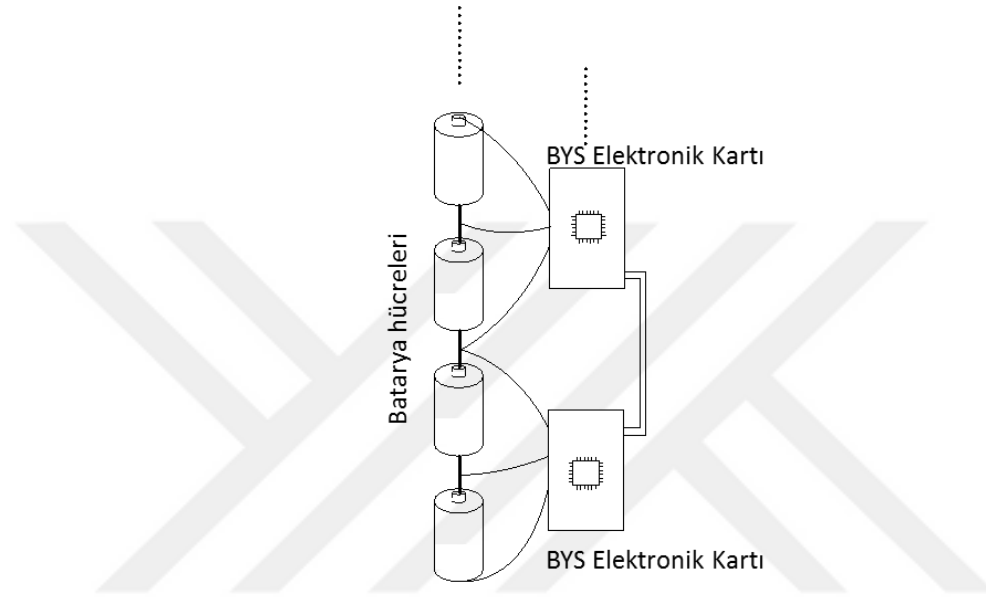
Şekil 4.9'da Orion firmasının merkezi topolojideki BYS'si görülmektedir.



Şekil 4.9 Merkezi topolojideki ticari BYS [25]

#### 4.2.2 Modüler Topoloji

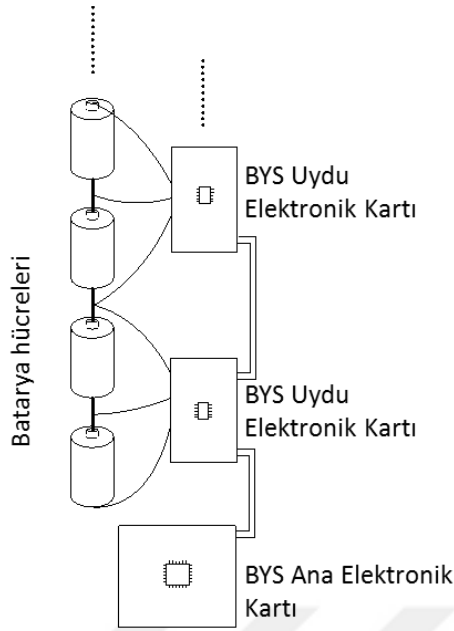
Bu topolojide BYS aynı elektronik yapıya sahip birden çok modülden oluşur. Hücre bağlantı sayısı ve işlem yükü modüller arasında paylaştırılmış olur ve modüller fiziksel olarak hücelere daha yakına konumlandırılabilir. Fakat maliyet bir miktar daha fazladır ve merkezi yapıya göre modüller arası haberleşme bağlantıları yapılması gerekmektedir. Şekil 4.10'da modüler topoloji yapısı görülmektedir.



Şekil 4.10 Modüler BYS yapısı

#### 4.2.3 Ana-Uydu Topoloji

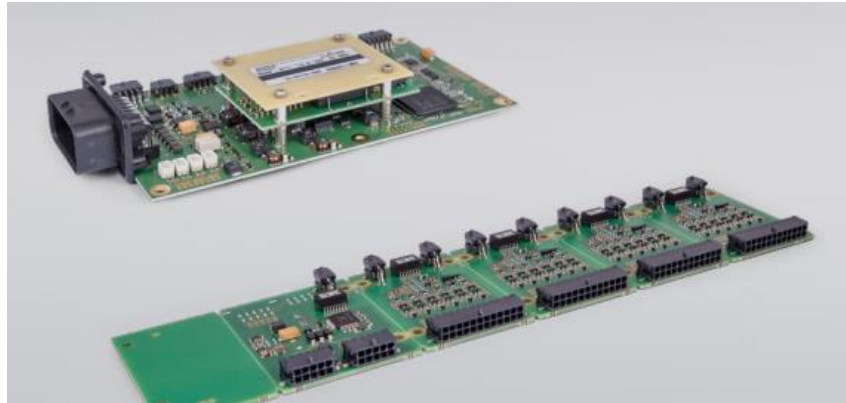
Bu topolojide iki farklı elektronik kart kullanılır. Hücre gerilimleri, sıcaklıkları gibi ölçümleri yapan birden çok elektronik kart (uydu kartlar) ve tüm ölçüm verilerini toplayıp işleyen ve BYS'nin kestirim, haberleşme, güvenlik görevleri gibi ana görevleri yerine getiren merkezi kontrol kartı (ana kart) sistemi oluşturmaktadır. Şekil 4.11'de ana-uydu topolojisi görülmektedir.



Şekil 4.11 Ana-uydu topoloji

Ana-uydu topoloji, modüler topolojiyle benzer avantajlara ve dezavantajlara sahipken, maliyet olarak daha avantajlıdır ve uygulamaya daha iyi uyum sağlayan yapılar kurulabilir. Otomotivde kullanılan geniş ölçekli bataryalarda çoğunlukla ana-uydu topolojisi kullanılmaktadır.

Şekil 4.12’de Sensor-Technik Wiedemann firmasının ana-uydu topolojisindeki BYS’sinin elektronik kartları görülmektedir.



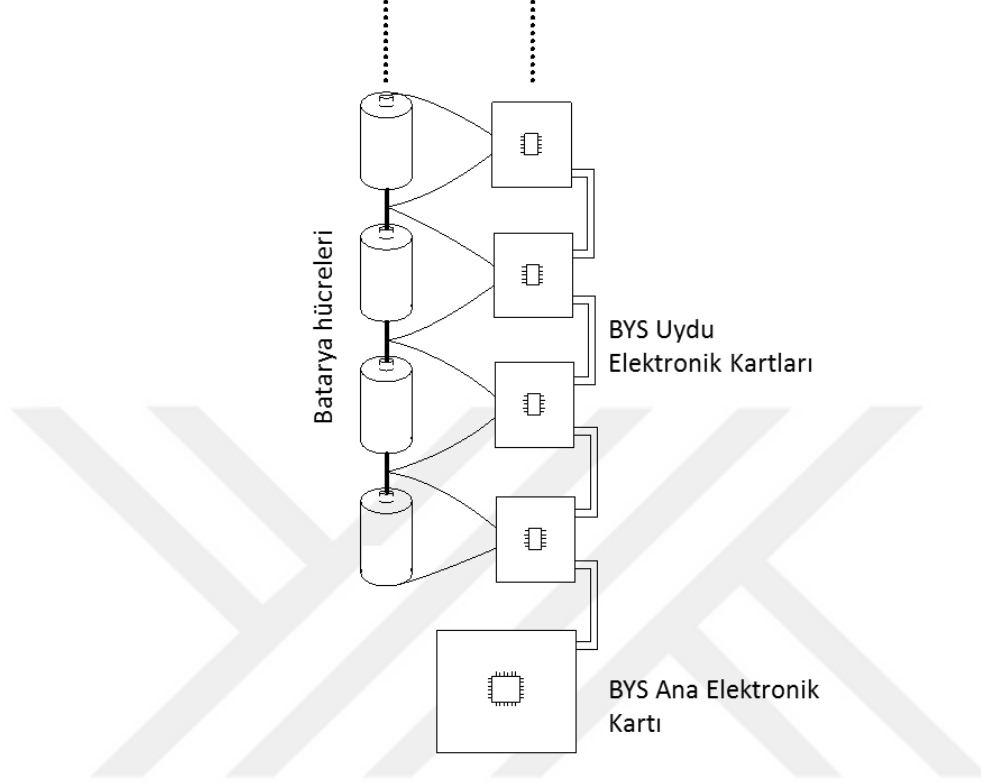
Şekil 4.12 Ana-uydu topolojideki ticari BYS elektronik kartları [26]

#### 4.2.4 Dağınık Topoloji

Dağınık BMS topolojisi, ana-uydu topolojisine benzer şekilde ölçüm yapan kartlardan ve merkezi kartlardan oluşmakla beraber, farklı uydu kartlara tek bir hücre bağlıyor



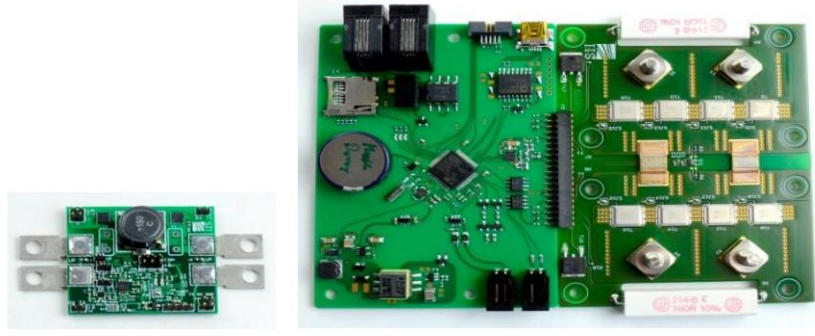
olmasıdır. Her bir hücreye ayrı ayrı bağlı olan uydu kartlar hücre ile ilgili ölçümleri yaparken, merkezi kontrol kartı da BYS'nin diğer görevlerini yerine getirmektedir. Şekil 4.13'de dağılık topoloji yapısı görülmektedir.



Şekil 4.13 Dağılık BYS topolojisi

Bu topolojide uydu kartlar hücrenin doğrudan terminallerine monte edilebileceği için ölçüm kablosu külfetinden kurtulunmaktadır. Bu sayede elektromanyetik gürültüden daha az etkilenen ölçümler yapılabilmektedir ve kablo bağlantılarından kaynaklanabilecek arızaların da önüne geçilebilmektedir. Fakat bu topolojide elektronik kart sayısı fazla olacağından maliyet de yüksektir.

Şekil 4.14'de dağılık topoloji yapısına sahip, Fraunhofer Enstitüsü tarafından geliştirilmiş bir BYS örneği görülmektedir.



Şekil 4.14 Dağılık topolojiye sahip ticari BY3 elektronik kartları [27]

Sonuç olarak bu dört BY3 topolojisinin avantajları ve dezavantajları, Çizelge 4.1’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1 BY3 topolojileri karşılaştırması [2]

Topoloji	Ölçüm Kalitesi	Esneklik	Güvenlik	Elektronik Donanım Maliyeti	Kurulum Maliyeti	Bakım Maliyeti
Merkezi	++	+	+	+	+++	+++
Modüler	++	++	+	++	++	++
Ana-Uydu	+++	++	+	++	++	++
Dağılık	+++	+++	+++	+++	+	+

### BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Batarya yönetim sistemleri elektronik donanımlardan, bu donanımları çalıştıran gömülü yazılımlardan ve yazılımda yüksek katmanda koşan kontrol algoritmalarından oluşur. Elektrikli araçlarda kullanılacak bir BYS tasarlamak, gereksinimleri doğru belirlemek, bu üç başlıkta kapsamlı tasarımlar ve testler yapmak ile mümkün olur.

Bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda, elektrikli araçlarda kullanılan yüksek hücreye sahip bataryaları yönetebilecek bir BYS elektronik donanımı tasarlanmıştır ve tasarlanan donanımın başlangıçta belirlenen gereksinimleri karşılayabileceğini gösterilmiştir.

#### 5.1 BYS Gereksinimlerinin Belirlenmesi

Tez çalışmasında elektronik donanımı tasarlanacak BYS'nin hedeflenen özellikleri belirlenmiştir. Bu özellikler büyük ölçüde BYS'nin kullanılacağı bataryanın özellikleriyle ve bataryanın kullanılacağı aracın özellikleriyle ilişkilidir. Tasarlanacak BYS'nin güncel ihtiyaçlara cevap vermesi ve kullanım alanının geniş olması istenmiştir.

Elektrikli araç bataryalarında çokça tercih edilen ana-uydu topoloji, bu çalışmada da tercih edilmiştir. BYS'nin diğer özelliklerini belirlemek için elektrikli araç bataryaları, piyasada yer alan BYS'ler ve elektronik bileşen teknolojisinin geldiği nokta incelenmiş ve Çizelge 5.1'de yer alan gereksinimler belirlenmiştir.

Çizelge 5.1 BYS donanım gereksinimleri

Tasarım Maddesi	Değer/Özellik	Açıklama
BYS Topolojisi	Master-Slave	
Hücre Sayısı Aralığı	8-256	1000 V'a kadar bataryalara uyumlu
Uydu Başına Düşecek Hücre Sayısı Aralığı	8-16	
Hücre Gerilim Aralığı	0.5 V-5 V	Tüm Li-iyon türlerine uyumlu
Hücre Dengeleme Yöntemi	Pasif Dengeleme	
Hücre Gerilimi Ölçüm Hassasiyeti	2.5 mV	
Hücre Sıcaklık Sensorü Hassasiyeti	En az üç hücrede bir	
Hücre Sıcaklık Sensorü Hassasiyeti	1°C	
BYS Ana Besleme Gerilimi	Harici 9 V-36 V	12 V ve 24 V sistemlere uyumlu
Batarya Akımı Ölçüm Hassasiyeti	0.1%	
Batarya Gerilimi Ölçüm Hassasiyeti	0.1%	
CANBus Haberleşme	Evet	

BYS ana-uydu topolojisinde tasarlandığından dolayı tasarım uydu kart tasarımı ve ana kart tasarımı olmak üzere iki adımda gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan elektronik donanımların otomotiv sektöründe kullanılması hedeflenmiştir. Otomotivde çalışan elektronik cihazlar sıcaklık, titreşim, nem, elektromanyetik girişimler, elektriksel gürültüler gibi çok zorlu koşullarla başa çıkmalıdır. Ayrıca otomotivde kullanılan elektronik donanımların hatalı çalışma/bozulma ihtimalleri, diğer sektörlerde göre (sanayi, ev ürünleri vb.) çok daha düşük olmalıdır. Bu sebeple bu cihazlar çok zorlu testlerden geçmektedir. Tasarlanan BYS donanımı bu testlerde başarılı olma hedefiyle tasarlanmıştır. Otomotive uygunluğu gösterecek bu test süreçleri bu tez kapsamında ele alınmamıştır.

Otomotive uygunluğu sağlayacak tasarım maddeleri sistem seviyesinde, elektronik kart seviyesinde ve elektronik bileşen seviyesinde gruplanır. Bu tezde sistem seviyesinde ve elektronik kart seviyesinde alınan önlemler ele alınmamıştır.

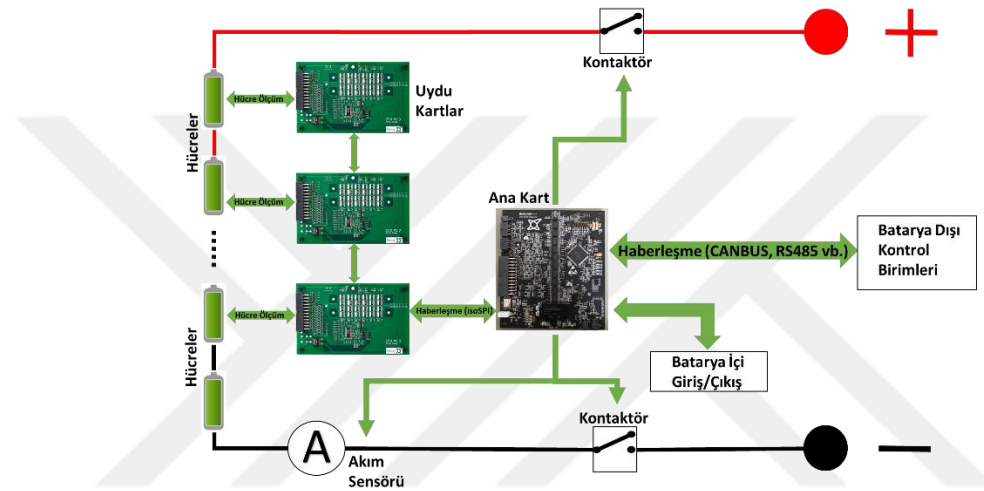
Elektronik bileşen seviyesinde otomotive uygunluğu sağlamak için bileşen seçimleri, Otomotiv Elektronikleri Konseyi (Automotive Electronics Council, AEC) standartlarına uygun seçilmiştir.

Otomotiv Elektronikleri Konseyi, dünya çapında otomotivde kullanılan elektronik bileşenlerin kalitesini arttırmak ve standartlar oluşturmak üzerine çalışır [29].

Bu standartlarda bileşen seviyesinde ESD testleri, mekanik testler ve elektriksel dayanım testleri yer almaktadır.

AEC standartlarına uygun bileşenlerden oluşan bir elektronik kartın, sistem seviyesinde gireceği otomotive uygunluk testlerinde başarılı olma ihtimali artacağı için, bu tez kapsamında tasarlanan BYS donanımında AEC uyumlu elektronik bileşenler kullanılmıştır. Bu durumun olumsuz etkisi ise donanım maliyetlerinin artmasıdır.

Sonuç olarak batarya yönetim sistemi hücre ölçümlerini ve dengeleme işlemini yapacak, ana karttan komutları alıp sonuçları iletecek uydu kartlardan ve uydu karttan gelecek bilgiler ile BYS görevlerini yerine getirecek bir ana karttan oluşacaktır. Sistemin blok diyagramı gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 BYS Blok Diyagramı

## 5.2 Uydu Kart Tasarımı

Ana-uydu topolojideki BYS’lerde uydu kartlar hücre ölçümleri ve hücre dengelemesi işlemlerini üstlenirler. Ölçtükları verileri herhangi bir işlemde geçirmeden ana karta iletirler.

Hücre dengeleme yöntemi olarak pasif dengeleme yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem ucuz ve uygulaması kolay bir yöntemdir, buna rağmen birçok uygulamada yeterli olmaktadır.

Uydu kartın tasarımında yoğunlaşılması gereken konular aşağıda listelenmiştir:

- Ölçülebilecek en az hücre
- Ölçülebilecek en fazla hücre
- Gerilim ölçüm doğruluğu

- Sıcaklık sensörü sayısı
- Pasif dengeleme
- Güç tüketimi
- Boyut
- Haberleşme yapısı
- Otomotive uygun elektronik bileşen kullanımı
- Maliyet

Ölçülebilecek en az ve en çok hücre sayısı batarya modüllerine uyum sağlamada çok önemlidir. Örneğin bir modül dört hücreden oluşabileceği gibi on iki hücreden de oluşabilmektedir. Ayrıca bataryadaki toplam uydu kart sayısı, bir kartın ölçebileceği hücre sayısı ile doğrudan ilgilidir.

Uydu karta bağlanacak sıcaklık sensörlerinin sayısının artması ile hatalara daha dayanıklı bir sistem oluşturulabilir, ayrıca hücre gerilimi ölçüm doğruluğunun yüksek olması ile kestirim algoritmaları daha düzgün çalışır, koruma görevleri ve şarj-deşarj çevrimleri daha düzgün gerçekleştirilir.

Ana-uydu topolojide uydu kartlar enerji ihtiyaçlarını ölçüm yaptıkları batarya hücrelerinden sağlarlar. Bu sayede kartlara ayrı ayrı güç bağlantısı yapılmasına gerek kalmaz. Ana kart ise araçta bulunan düşük gerilim aküsünden beslenir. Uydu kartlar batarya hücrelerinden beslendiği için zaman içerisinde batarya kapasitesini düşürmektedir ve bu istenmeyen bir durumdur. Bu sebepten dolayı uydu kartların güç tüketiminin çok düşük olması istenmektedir.

Uydu kartların ana kart ile haberleşme yapısı, sistemin performansı için çok önemlidir. Haberleşmenin kaç kablo ile yapılacağı kurulum maliyetini etkilerken, haberleşme hızının yüksek olması, kontrol algoritmalarının performansını artırır. Ayrıca haberleşmenin, elektromanyetik gürültülere dayanıklı olması gerekmektedir.

Ana-uydu topolojideki bir BYS'de yüze yakın uydu kart olabilmektedir. Bu durumda uydu kartların maliyeti, BYS maliyetini büyük ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla uydu kartın birim maliyetinin düşük olması istenmektedir.

Bu tasarım maddelerinin her biri yüksek önem arz etmektedir ve yüksek başarı ile ulaşılması gereken hedeflerdir. Bu şekilde bir uydu kart tasarımı mikrodenetleyici tabanlı bir devre ile gerçekleştirilebilir. Fakat yarıiletken üreticisi firmalar, batarya yönetim sistemleri tasarımında kullanılmak üzere atanmış ürünler piyasaya sunmaktadır. Bu ürünler “Battery Management Integrated Circuit (BMIC)” veya “Battery Monitor” adı altında piyasaya sürülen entegre devrelerdir. Bu ürünler yukarıda bahsedilen görevlerin düşük maliyet ve boyut ile ve yüksek başarımla gerçekleşmesini sağlarlar.

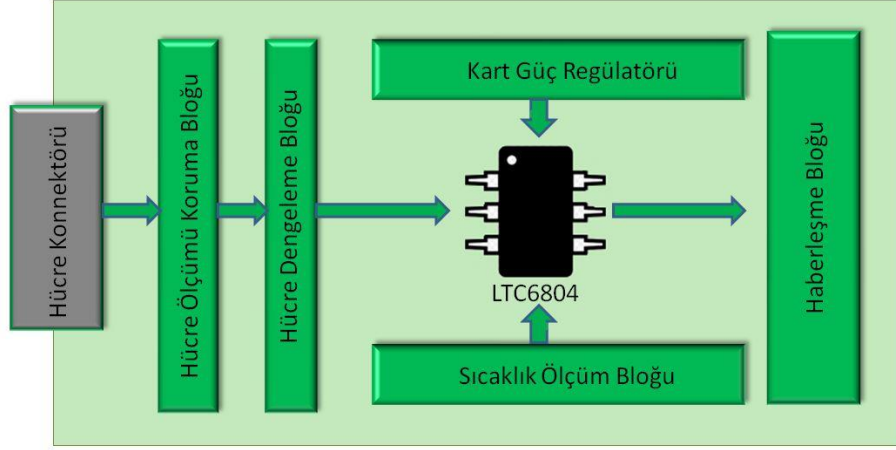
Piyasada yer alan BMIC’ler detaylıca incelenmiş ve bu çalışmada tasarlanacak BYS’ye uygun olanlar belirlenmiştir. Bu BMIC’lerin karşılaştırma tablosu Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Batarya kontrol IC’lerin karşılaştırılması

	AD7280	LTC6804-1	bq76PL455	bq76PL536	ISL78600	ATA6870N
<b>Üretici firma</b>	Analog Devices	Linear Technology	Texas Instruments	Texas Instruments	Intersil	Atmel
<b>Ölçülebilecek en az hücre</b>	3	4	5	3	3	3
<b>Ölçülebilecek en çok hücre</b>	6	12	16	6	12	6
<b>Oluşturulabilecek en fazla seri hücre</b>	300	Sınırsız	256	192	192	96
<b>En düşük gerilim ölçüm hatası</b>	3,7 mV	1,2 mV	0,75 mV	1 mV	0,6 mV	10 mV
<b>Sıcaklık Sensörü</b>	12	5	8	2	4	2
<b>Çalışma sıcaklığı</b>	-40°C - 105°C	-40°C - 125°C	-40°C - 105°C	-40°C - 105°C	-40°C - 105°C	-40°C - 125°C
<b>Termal koruma</b>	Hayır	Evet	Evet	Evet	Hayır	Hayır

Yapılan incelemeler ve değerlendirmeler sonucunda Linear Technology firmasının LTC6804 BMIC’in tasarım için uygun olduğu değerlendirilmiştir.

LTC6804-1 kataloğunda ve yardımcı dokümanlarında verilen bilgiler ve çalışmanın başında belirlenen gereksinimler doğrultusunda BYS uydu kartın elektronik donanım tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Uydu kartın blok diyagramı Şekil 5.2’de, üretilen elektronik kart ise Şekil 5.3’te verilmiştir.



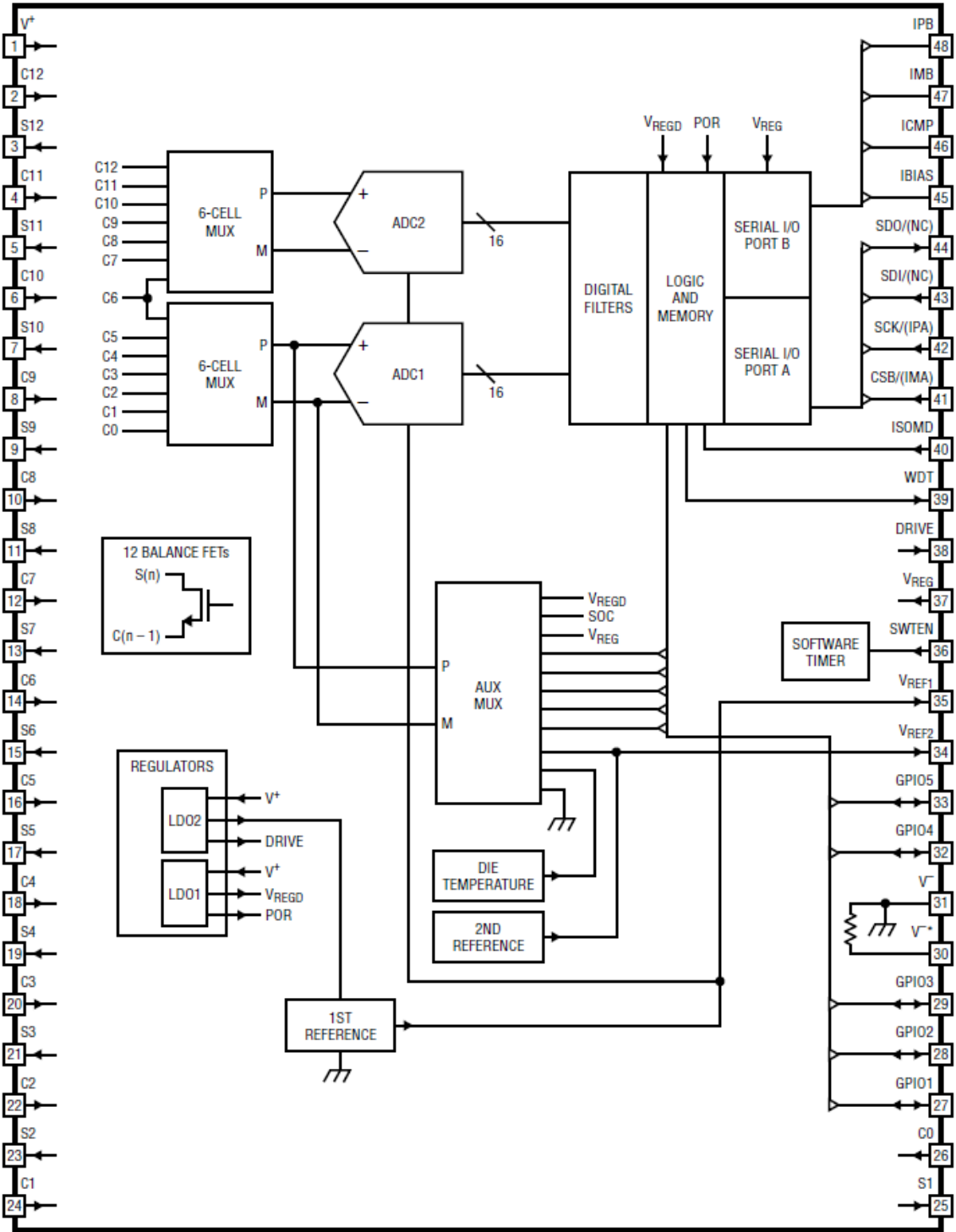
Şekil 5.2 Uydu kart devre blokları



Şekil 5.3 Tasarlanan BYS uydu elektronik kartı

LTC6804 entegre devresi, çok sayıda seri hücreyi kontrol edebilecek BYS tasarımları için özel olarak geliştirilmiş bir üründür. LTC6804'ün iç yapısı Şekil 5.4'te verilmiştir.





Şekil 5.4 LTC6804 blok diyagramı [28]

Blok diyagramda görüldüğü gibi LTC6804 ile 12 adede kadar hücre gerilimi ölçülebilmektedir. 12 adet hücre iki adet 6'lı gruba ayrılır ve her grup için bir adet MUX ve bir adet ADC birimi bulunur. Hücreler sırasıyla yüksek doğrulukla ölçülerek sonuçlar cihaz hafızasında saklanır.

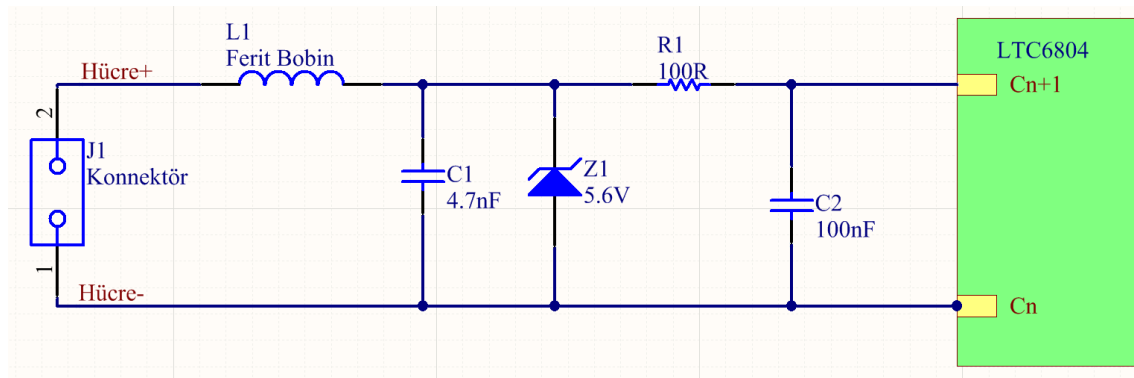
LTC6804'ün farklı ADC ölçüm modları vardır. Bu modlarda ölçüm doğruluğu ve çevrim hızı arasındaki denge değişmektedir. Ölçüm modları Çizelge 5.3'te görülmektedir.

Çizelge 5.3 LTC6804 ölçüm modları

	-3 dB Kesim Frekans	-40 dB Kesim Frekans	Toplam Ölçüm Hatası (25°C)	Toplam Ölçüm Hatası (-40°C, +125°C)
<b>27 kHz (Hızlı Mod)</b>	27 kHz	84 kHz	±4.7 mV	±4.7 mV
<b>14 kHz</b>	13.5 kHz	42 kHz	±4.7 mV	±4.7 mV
<b>7 kHz (Normal Mod)</b>	6.8 kHz	21 kHz	±1.2 mV	±2.2 mV
<b>3 kHz</b>	3.4 kHz	10.5 kHz	±1.2 mV	±2.2 mV
<b>2 kHz</b>	1.7 kHz	5.3 kHz	±1.2 mV	±2.2 mV
<b>26 Hz (Filtreli Mod)</b>	26 Hz	82 Hz	±1.2 mV	±2.2 mV

Ölçüm hızı arttıkça toplam ölçüm hatası (total measurement error, TME) artmaktadır. BYS algoritmasının gereksinimlerine göre uygun hız seçilmelidir.

Tasarlanan uydu kartta hücre ölçüm bloğu yer almaktadır ve bu blok, batarya hücreleri ve LTC6804 entegre devresi arasında yer alan filtreleme ve koruma elemanlarından oluşur. LTC6804, 12 adet hücre ölçümü yapabildiği için hücre ölçüm bloğu, tekrarlayan 12 adet koruma devresi yapısından oluşur. Bu koruma devresi Şekil 5.5'te görülmektedir.

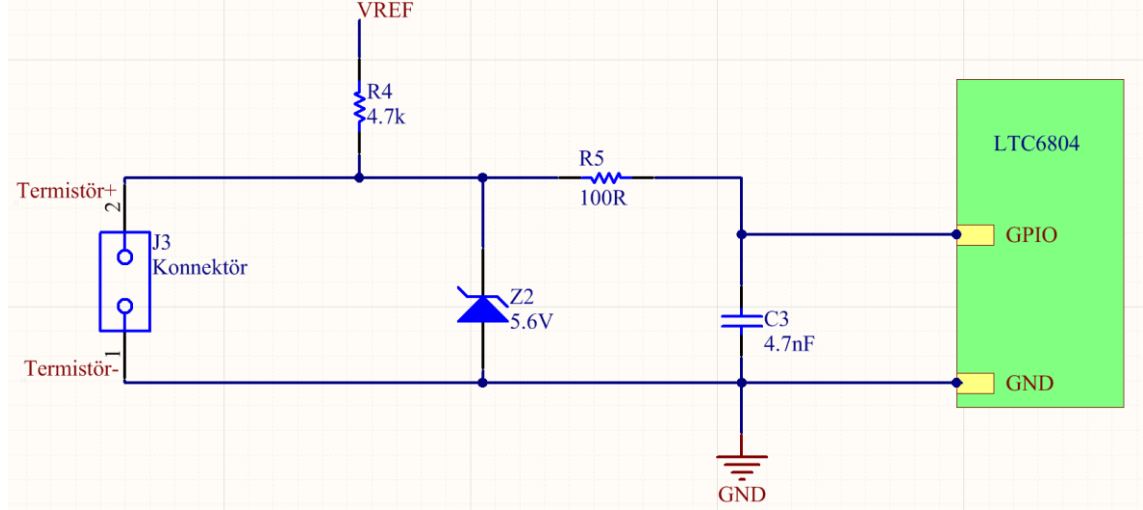


Şekil 5.5 Hücre ölçümü koruma devresi

LTC6804, hücre ölçümünün yanında 5 adet genel amaçlı giriş/çıkışa sahiptir. Bu kanallardan sıcaklık ölçümü yapmak için analog sinyal okunabilmektedir. Ayrıca LTC6804 çip sıcaklığını ölçebilmekte, iç yapısındaki MUX, dijital filtre gibi blokların sağlamlık testini

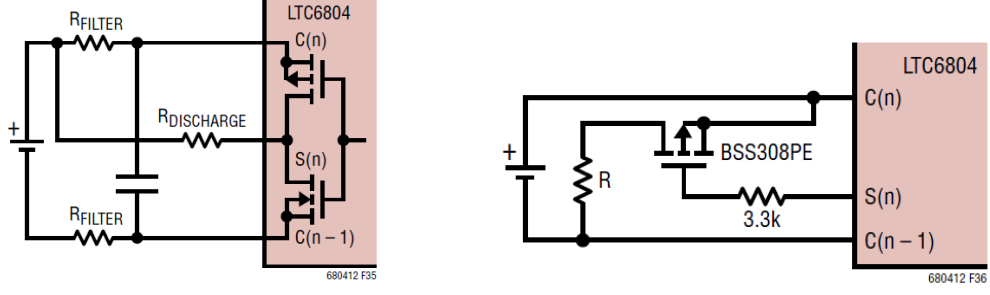
yapabilmekte, hücre bağlantısının kopmasını algılayabilmektedir. Bu fazladan güvenlik önlemleri sayesinde sistemin güvenilirliği artmaktadır.

Sıcaklık ölçüm bloğu, hücre sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan 4 adet sıcaklık sensöründen ölçüm yapabilen bir devredir. Bu devre sayesinde NTC tipindeki sıcaklık sensörü ile sıcaklıktan gerilime dönüşüm yapılabilir ve sıcaklık ölçülebilmektedir. Sıcaklık ölçümü devresi Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6 Sıcaklık ölçüm devresi

LTC6804, hücre dengeleme işlemi için de farklı devre yapıları barındırmaktadır. Hücre dengeleme işlemi için LTC6804 entegre devresi ile aktif ve pasif dengeleme işlemleri yapılabilmektedir. Aktif dengeleme için seçilen yöntem göre bazı ek devre yapıları gerekmektedir. Pasif dengeleme için ise iki farklı yöntem kullanılabilir. İlki harici bir dengeleme direnci ve dahili bir dengeleme mosfeti, ikincisi ise harici bir dengeleme direnci ve mosfeti kullanmaktır. Yüksek dengeleme akımı istendiği takdirde entegre devrenin sıcaklığını fazla arttırmamak için harici mosfet kullanılması daha uygundur. Her iki yöntemin devre yapısı Şekil 5.7'de verilmiştir.

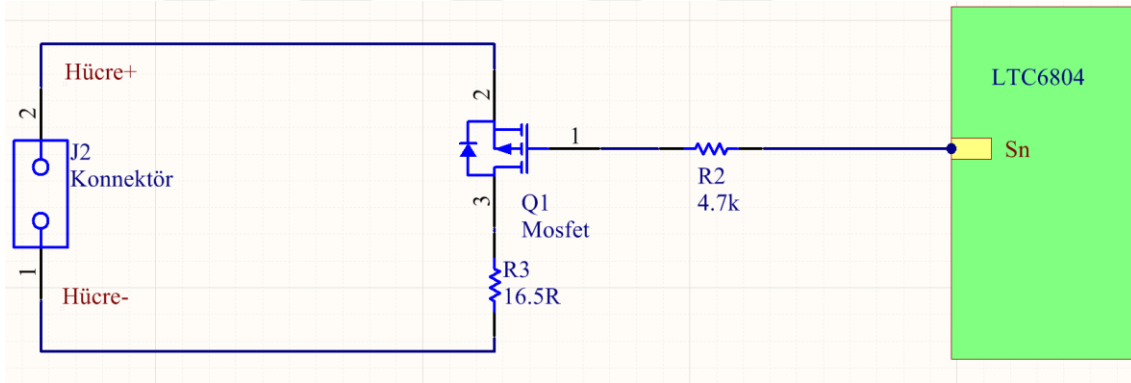


(a)

(b)

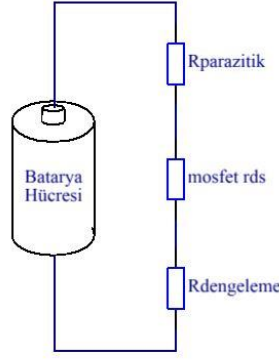
Şekil 5.7 LTC6804 ile pasif dengeleme yöntemleri (a) Dahili mosfet ile dengeleme (b) Harici mosfet ile dengeleme [28]

Tasarlanan hücre dengeleme bloğu, batarya şarjı sırasında ihtiyaç duyulduğunda pasif dengeleme yapılması için gerekli dengeleme direncini ve direnci devreye alan anahtarlama elemanından oluşmaktadır. Dengeleme bloğu 12 adet dengeleme devresinden oluşmaktadır. Bu devre Şekil 5.8’de görülmektedir.



Şekil 5.8 Hücre dengeleme devresi

Hücre dengeleme direncinin yanında kullanılan mosfetin sahip olduğu  $r_{ds}$  direnci ve kablo, konnektör, pcb yolu vb. gibi parazitik bileşenlerin sahip olduğu  $r_{parazitik}$  direnci söz konusudur. Tüm bu dirençleri gösteren eşdeğer dengeleme devresi Şekil 5.9’da görülmektedir.



Şekil 5.9 Hücre dengeleme devresinin eşdeğer devre modeli

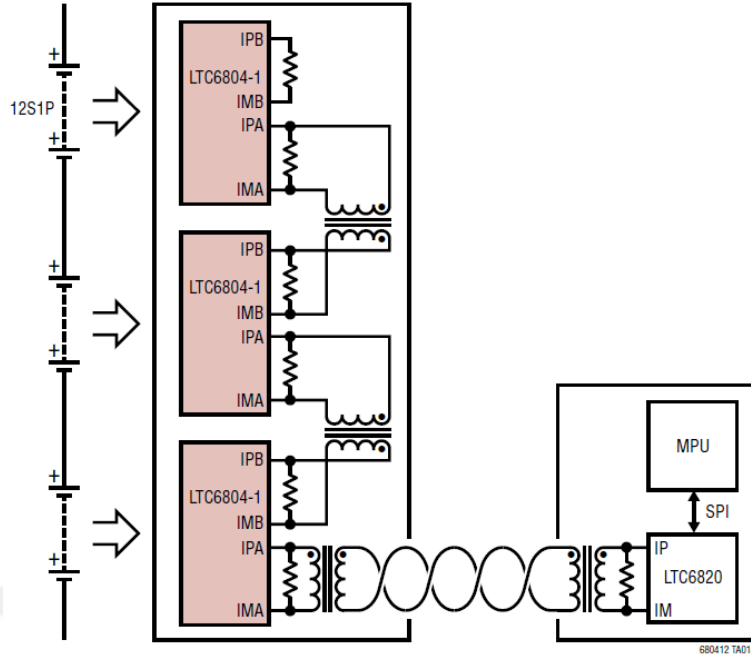
Dengeleme sırasında bataryadan uzaklaştırılan enerji bu üç rezistif bileşen üzerinde harcanarak ısıya dönüşür. Dengeleme sırasında dengeleme direnci üzerinde harcanan güç (5.1) eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte  $I_d$  dengeleme akımını,  $R_d$  ise dengeleme direncini ifade eder.

$$P = I_d^2 \cdot R_d \quad (5.1)$$

Ana-uydu BYS yapısında uydu kartların ve ana kartın arasında bir haberleşme yapısı kurulmalıdır. Bu yapı bir fiziksel katmandan ve bir protokolden oluşmaktadır. LTC6804 haberleşme yapısı için farklı seçenekler sunmaktadır. LTC6804-1 kodlu alt ürün “daisy-chain” topolojisinde bağlanabilirken, LTC6804-2 kodlu ürün adresli yapıya sahiptir ve “BUS” şeklinde bağlanabilir.

Her iki üründe de protokol olarak SPI protokolü kullanılır fakat fiziksel katmanda, Linear Technology firmasının geliştirdiği, “isolated SPI” kısaca “isoSPI” yapısı kullanılmaktadır.

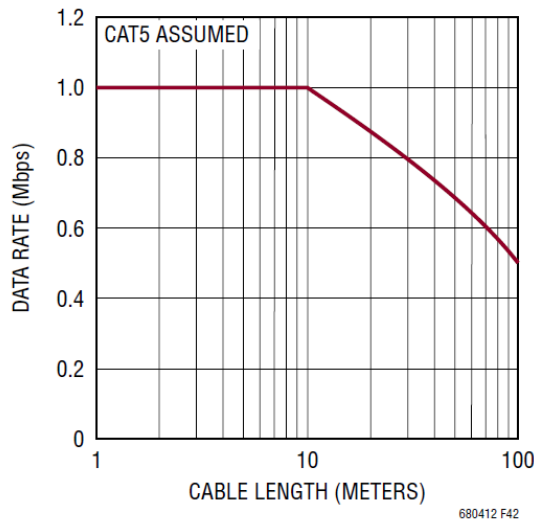
IsoSPI yapısında bir adet sinyal trafosu ile haberleşme hattı izole edilir ve iki telli bir bağlantı yapısı kullanılır. Ana karttaki klasik SPI yapısını isoSPI’ya çevirmek için ayrı bir transceiver entegre devresi kullanılır. LTC6804-1 entegre devrelerinin bağlantı yapısı Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10 LTC6804-1 bağlantı yapısı [28]

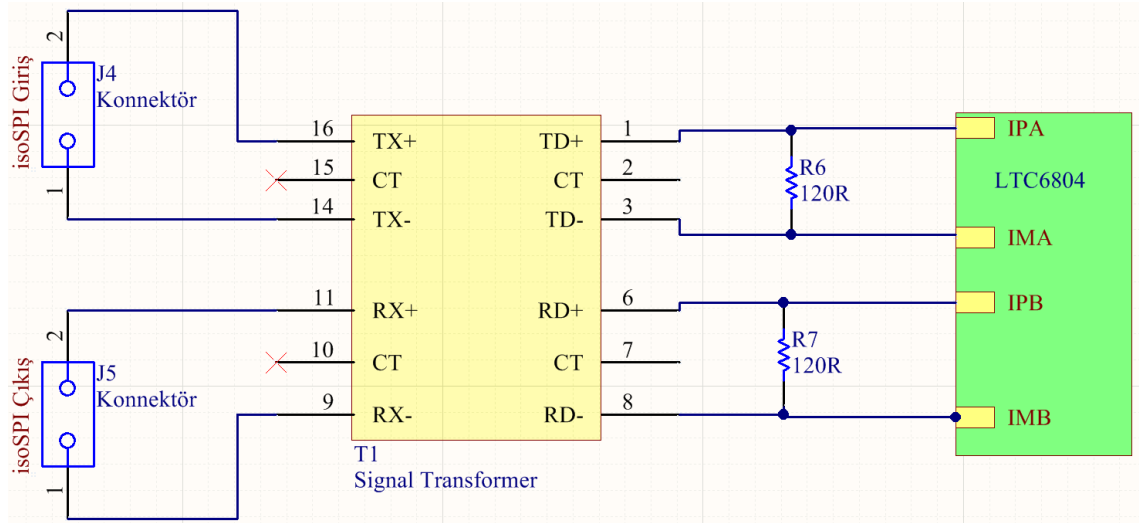
IsoSPI yapısı sayesinde her bir uydu kartın haberleşme hattı birbirinden izoledir ve sadece iki kablo ile haberleşme sağlanır. Ayrıca isoSPI haberleşmesi elektromanyetik gürültülere karşı oldukça dayanıklı bir haberleşmedir.

IsoSPI haberleşmesinin maksimum hızı 1 Mbps'dır. Bu hızı düşürerek 100 metreye kadar haberleşme sağlanabilmektedir. Şekil 5.11'de haberleşme hızı ve mesafe arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 5.11 isoSPI haberleşme hızının kablo uzunluğuyla ilişkisi [28]

isoSPI haberleşmesini sağlamak için uydu kartta tasarlanan devre yapısı Şekil 5.12’de verilmiştir.



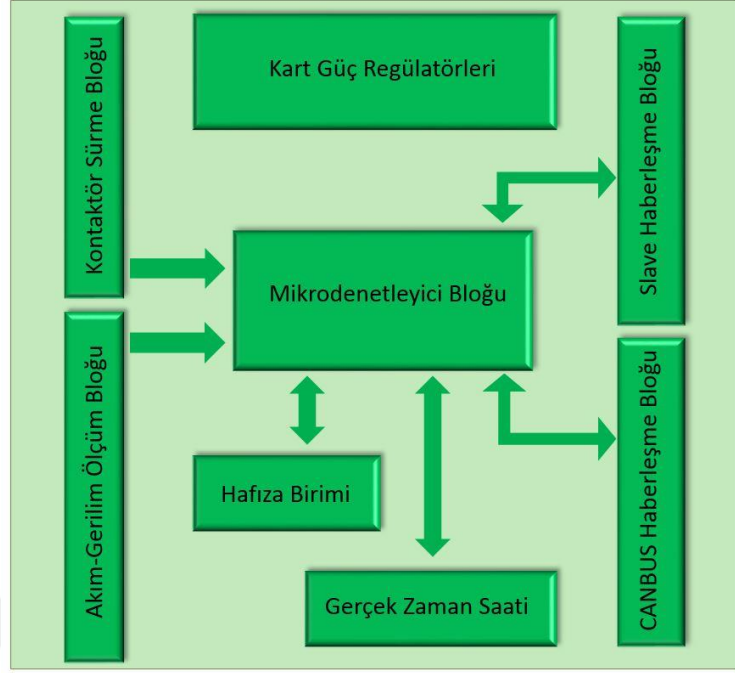
Şekil 5.12 Haberleşme devresi

### 5.3 Ana Kart Tasarımı

Ana-uydu topolojiye sahip BYS’lerde en az bir adet ana kart bulunur ve bu elektronik kart sistemin merkezi kontrol birimidir. Tasarlanan ana kart elektronik devresinin yerine getirmesi gereken görevler aşağıda listelenmiştir:

- Uydu kartlar ile isoSPI ile haberleşmek
- CANBus haberleşmesi ile araçtaki diğer elektronik birimler ile haberleşmek
- 12V DC / 24V DC Besleme gerilimi ile çalışabilmek
- Batarya kontaktörlerini kontrol etmek
- Batarya akımını ölçmek
- Batarya toplam gerilimini ölçmek
- Batarya izolasyon direncini ölçmek
- Gerçek zamanı tutmak (Real Time Clock-RTC)
- Kontrol algoritmalarını koşturmak ve batarya parametrelerini hesaplamak

Bu ihtiyaçlar doğrultusunda tasarlanan ana kart blok diyagramı Şekil 5.13’te, üretilen kartın görseli ise Şekil 5.14’te yer almaktadır.



Şekil 5.13 Ana kart devre blokları

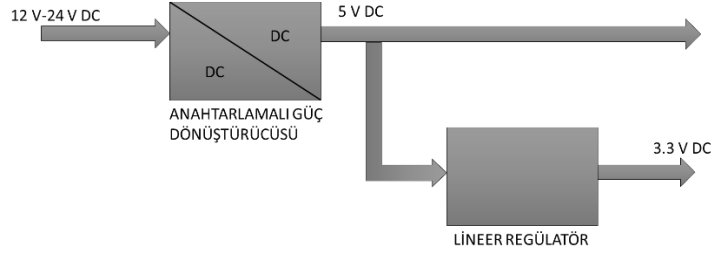


Şekil 5.14 Tasarlanan BYS ana elektronik kartı

Ana kartın devrelerine gerekli gücü sağlamak için regülatör bloğu bulunmaktadır. Bu blok besleme geriliminden gerekli güç dönüşümlerini gerçekleştirir. BYS otomotivde kullanılacağı için otomotivde kullanılan iki adet besleme gerilim seviyesi olan 12 V DC ve 24 V DC'ye uyumlu bir tasarım yapılmıştır. Bu sebepten güç regülatörlerinin girişi gerilim aralığı 12 V – 24 V DC'dir. Bu girişten, verimi arttırmak için anahtarlamalı güç dönüştürücüsü ile 5 V DC regüle edilmiştir. Daha sonra 5 V DC, lineer regülatör ile 3.3 V



DC seviyesine çevrilmiştir. 5 V DC ve 3.3 V DC devre bloklarını beslemektedir. Ana kartın güç regülatörleri yapısı Şekil 5.15'te görülmektedir.



Şekil 5.15 Ana kart güç regülatörleri

BYS Ana kartın mikrodenetleyici seçimi yapılırken, yeterli çevre birimlerine sahip, karmaşık kestirim algoritmalarını koşturabilecek çalışma frekansına ve işlem gücüne sahip ve otomotivde kullanıma uygun, "fonksiyonel güvenlik" yaklaşımındaki tasarımlara uygun, Texas Instruments firmasını Hercules serisinden bir mikrodenetleyici seçilmiştir. Mikrodenetleyicinin işlem yeteneklerini arttırmak için harici bir E2PROM ve gerçek zaman saati (Real-Time Clock, RTC) entegre devresi kullanılmıştır.

Bataryanın ana kontaktörlerini sürmek için, röle, kontaktör, motor gibi endüktif yükleri sürmek için özel olarak tasarlanmış ve birçok koruma özelliği olan entegre devreler kullanılmıştır.

Ana kartın dış dünya ile haberleşmesi iki şekilde olmaktadır. Bunlardan biri uydu kartlar ile haberleşmeyi sağlayan isoSPI haberleşmesidir. Uydu kartlardaki LTC6804 entegre devresi dahili olarak isoSPI dönüştürücüsü bulundururken, ana kartta bu dönüştürme işlemini yerine getirmesi için LTC6820 entegre devresi kullanılmıştır [30].

Ana kartın ikinci haberleşme mekanizması CANBus'tır. Mikrodenetlecinin izin verdiği sayıda, üç adet CANBus dönüştürücüsü ana kart bünyesinde yer almaktadır. Bu CANBus kanallarından, ana kart (sistemde birden çok batarya olması halinde) diğer ana kartlarla, araç içerisindeki diğer elektronik birimlerle haberleşebilmektedir.

Ana kart, bataryanın gerilimini ve akımını ölçmek için devre bloklarına sahiptir. Batarya gerilimi gerilim bölücü devresi ile ölçülmektedir.

BYS'nin ana görevlerinden biri de batarya akımını isabetli bir şekilde ölçmektir. Bu ölçüm sayesinde BYS, şarj-deşarj çevrimlerini yönetir, koruma görevlerini yerine getirir ve SOC,

SOH, SOAP gibi kestirimleri yapar. Kestirimlerin isabetli yapılması için akımın yüksek doğrulukla ölçülmesi gerekmektedir.

Batarya yönetim sistemlerinde akım ölçümünde başvurulan iki yöntem hall-effect sensör ile ölçüm ve shunt direnç ile ölçüm yöntemleridir. Shunt direnç yönteminin artıları aşağıda listelenmiştir:

- Düşük maliyet
- Yüksek lineerlik
- Yüksek doğruluk

Buna karşılık shunt direnç yönteminin eksileri şu şekildedir:

- Güç tüketimi
- Isınma problemi
- Ölçülen büyüklüğe müdahale edilmesi
- İzolasyon ve sinyal koşullandırma için ek devreler gerektirmesi

Hall effect sensörün yüksek akımları ölçme kolaylığı, yapısal olarak izolasyon sağlaması, düşük güç tüketimi, düşük yükleme etkisi gibi artılarının yanında yüksek maliyet, kötü lineerlik, saturasyon problemi, sıcaklığa bağımlılık, manyetik gürültülerden etkilenme, gibi problemleri mevcuttur.

Proje isterleri göz önüne alındığında shunt direnç ile ölçüm yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. BYS Ana üzerinde, shunt direnç gerilimini kuvvetlendirmek için özel olarak geliştirilmiş "current monitor" olarak isimlendirilen bir entegre devre mevcuttur.

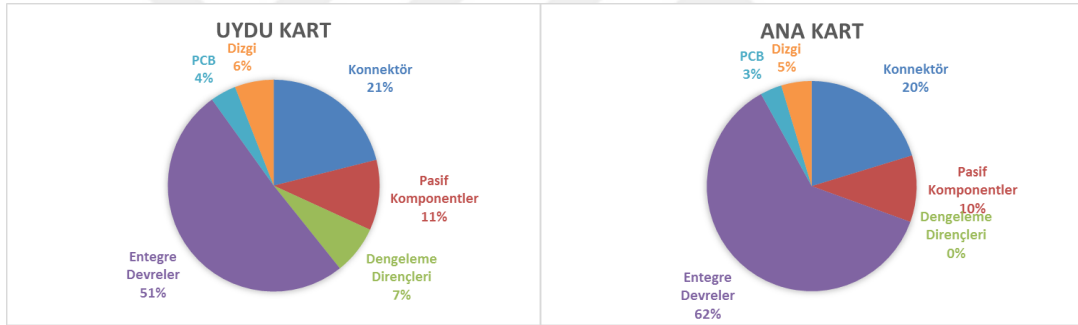
#### 5.4 BYS Donanımı Maliyet Analizi

Batarya yönetim sistemini oluşturan uydu elektronik kartı ve ana elektronik kartının üretimi maliyet kalemleri Çizelge 5.4'te, bu kalemlerin oransal dağılımı Şekil 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.4 BYS Elektronik kartlarının maliyet kalemleri

	Uydu Kart Maliyeti*	Ana Kart Maliyeti*
<b>Konnektör</b>	\$14.11	\$38.56
<b>Pasif Komponentler</b>	\$7.19	\$19.48
<b>Dengeleme Dirençleri</b>	\$4.97	\$0.00
<b>Entegre Devreler</b>	\$34.02	\$116.81
<b>PCB</b>	\$2.64	\$6.34
<b>Dizgi</b>	\$3.98	\$8.91
<b>Toplam</b>	\$66.92	\$190.10

\*100 adet kart üretiminde



Şekil 5.16 BYS elektronik kartları maliyet oranları

Maliyetler incelendiğinde görülmektedir ki her iki kartta da entegre devreler önemli bir orana sahiptir. Bunun yanında konnektörler ve uydu kartlarda yer alan dengeleme dirençleri de önemli bir maliyet kalemi oluşturmaktadır.

Örnek bir proje üzerinde maliyetler incelenecek olursa, günümüzde çok sık kullanılan 96 adet hücreden oluşan 400V gerilime sahip bir batarya ile BYS elektronik donanım maliyeti incelenebilir. Böyle bir bataryada 8 adet uydu kart ve 1 adet ana kart kullanılacak ve elektronik donanım maliyeti 725,46\$ olacaktır.





### TEST ÇALIŞMALARI

Tasarımı ve üretimi yapılan BYS uydu kart ve ana kartın, hedeflenen donanımsal özelliklere sahip olup olmadığının tespiti için çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sırasında hedeflenen, uydu kart ve ana kart elektronik yapılarında, kavramsal tasarımdan, ürün seçiminden, devre tasarımından ve üretimden ileri gelen bir hata olup olmadığını görmek ve tasarlanan ana ve uydu kartın performanslarının, otomotivde kullanılacak bir BYS sistemine uygun olup olmadığını tespit etmektir. Bu çalışma sırasında BYS yazılımı ve kontrol algoritmaları ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır.

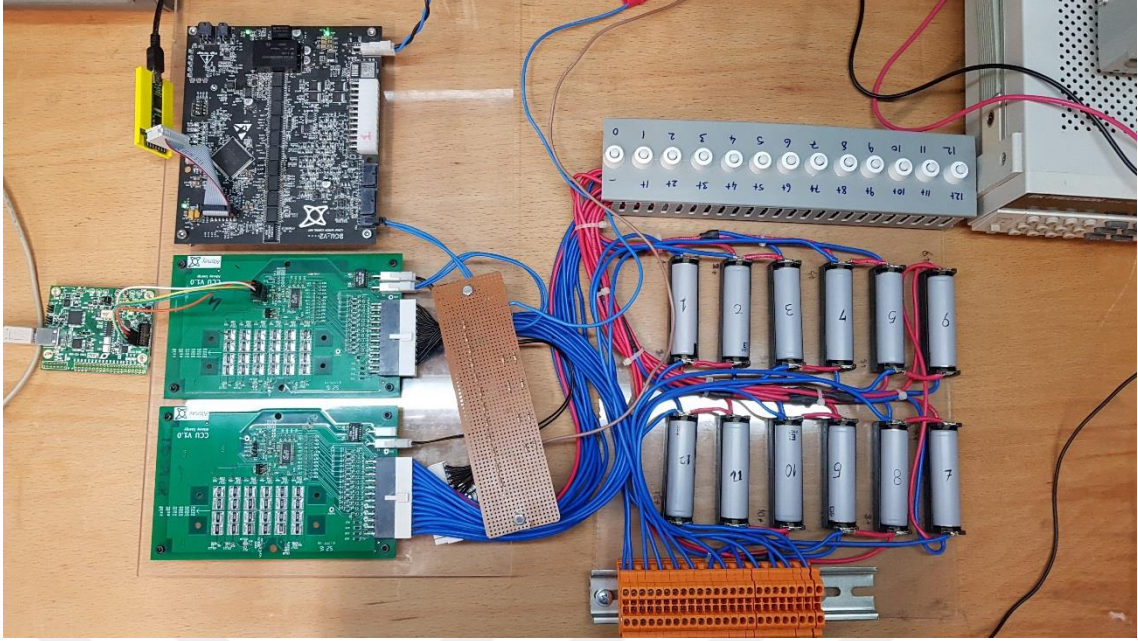
#### 6.1 Test Cihazları ve Test Düzenekleri

Yapılan çalışmalar sırasında kullanılan test ve ölçüm cihazları ve cihazların özellikleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Testlerde kullanılan cihazlar

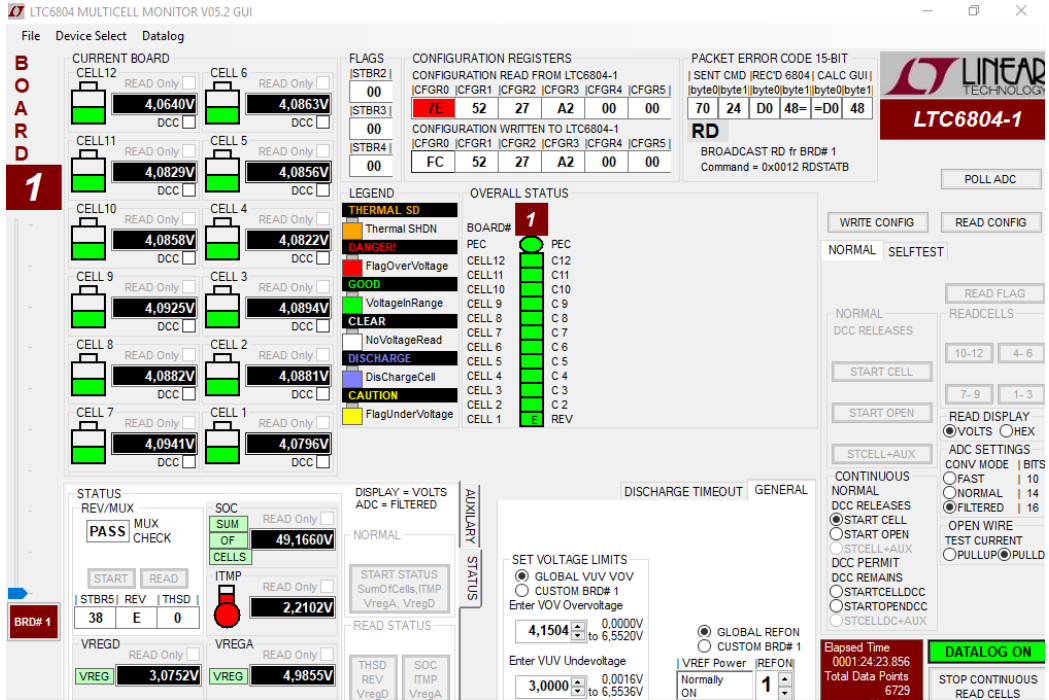
Test Cihazı	Marka/Model	Kullanım Yeri	Görsel
Elektronik Yük	BK Precision 8514	Hücrelerin deşarj işlemi	
Ana Güç Kaynağı	TTI CPX400D	Hücrelerin şarj işlemi	
Yardımcı Güç Kaynağı	GW Instek GPS-3030D	Master Kartın Beslenmesi	
Hassas Multimetre	Fluke 8846A	Hücre gerilimlerinin ölçülmesi	
Taşınabilir Multimetre	Fluke 87-V	Hücre gerilimlerinin ölçülmesi	
Hücre Test Cihazı	HIOKI BT3554	Hücrelerin iç direncinin ölçülmesi	
Osiloskop	Tektronix MS03014	Haberleşme sinyallerinin izlenmesi	
Termal Kamera	Fluke Ti125	Hücre ve kart sıcaklıklarının izlenmesi	
CAN-SPI Dönüştürücü	LT DC590	Slave Kart-PC haberleşmesi	

Yapılacak testler için 12 adet Panasonic marka CGR18650CG hücreden oluşan bir test bataryası üretilmiştir. Bu batarya uydu kartlara bağlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1’de test bataryası ve test edilen uydu ve ana kartlar görülmektedir.



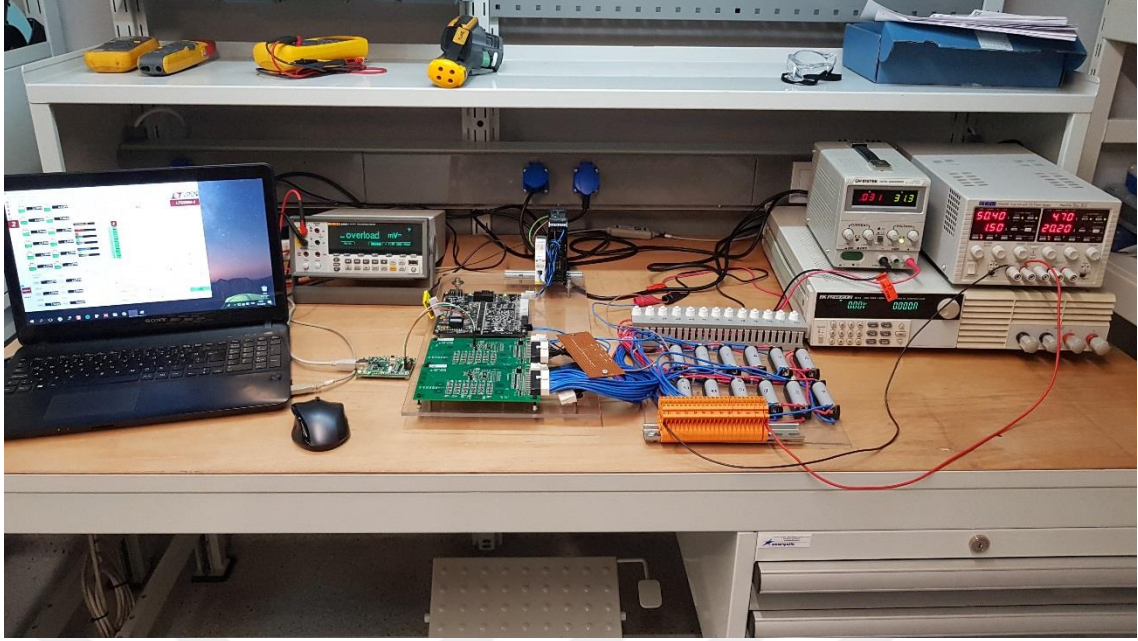
Şekil 6.1 Test bataryası ve BYS elektronik kartları

Testler sırasında görsel arayüz olarak kullanılmak ve kayıt almak için Linear Technology firmasının LTC6804 ürünü için yayınladığı grafik kullanıcı arayüzü (Grafic User Interface-GUI) kullanılmıştır. Bilgisayarda koşan bu GUI ile BYS kartları arasındaki haberleşmeyi sağlamak için ise Linear Technology firmasının DC590 CAN-SPI dönüştürücü kartı kullanılmıştır. Grafik arayüz Şekil 6.2’de ve test kurulumu Şekil 6.3’de görülmektedir.



Şekil 6.2 LTC6804 görsel arayüzü





Şekil 6.3 BYS test kurulumu

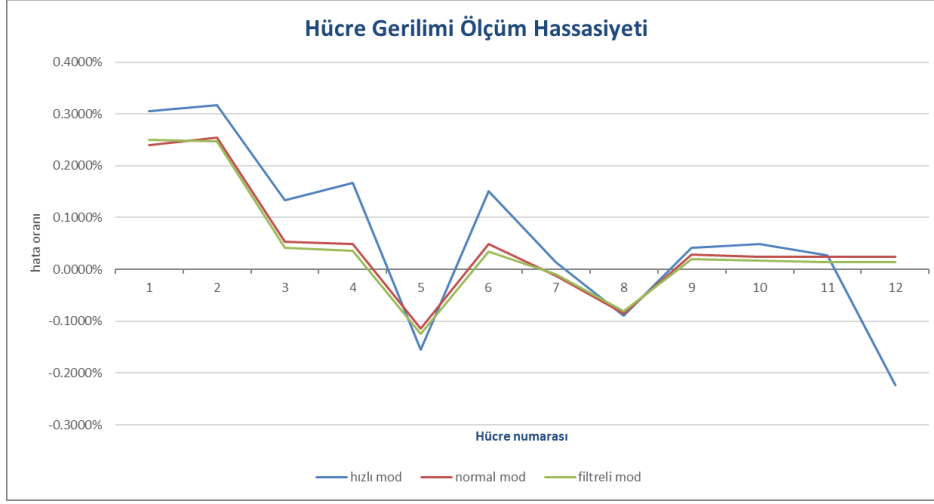
## 6.2 Hücre Gerilimi Ölçümleri

Tasarlanan uydu kart on iki adet hücreyi sırasıyla farklı bir şekilde ölçebilmektedir. LTC6804'ün altı farklı ölçüm modu bulunmaktadır. Bu modlarda ölçüm doğruluğu ve ölçüm hızı değişmektedir. Hız artarken doğruluk düşmektedir.

Prototip olarak üretilen bir uydu kart test bataryasına bağlanmış ve hızlı mod, normal mod ve filtreli modda ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler FLUKE 8846A multimetresi referans alınarak Çizelge 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.4'de ise her bir sonuç için hata oranı verilmiştir.

Çizelge 6.2 Uydu kart gerilim ölçüm modları

Hücre Numarası	Multimetre Ölçüm Sonucu (mV)	Hızlı Mod Ölçüm Sonucu (mV)	Normal Mod Ölçüm Sonucu (mV)	Filtreli Mod Ölçüm Sonucu (mV)
1	4129.1	4116.5	4119.2	4118.8
2	4129.6	4116.5	4119.1	4119.4
3	4121.0	4115.5	4118.8	4119.3
4	4122.9	4116.0	4120.9	4121.4
5	4112.0	4118.4	4116.7	4117.1
6	4123.2	4117.0	4121.2	4121.8
7	4121.0	4120.4	4121.5	4121.4
8	4114.5	4118.2	4118.0	4117.8
9	4124.9	4123.2	4123.7	4124.1
10	4121.6	4119.6	4120.6	4120.9
11	4121.7	4120.6	4120.7	4121.1
12	4112.8	4122.0	4111.8	4112.2



Şekil 6.4 Farklı ölçüm modlarındaki hata oranları

Beklendiği gibi ölçüm hızı arttıkça doğruluk kötüleşmektedir. Uygulama isterlerine bağlı olarak uygun ölçüm hızı bu veriler doğrultusunda seçilmelidir. Farklı hücrelerde hata oranının farklı olması ise, LTC6804 entegre devresi haricinde kalan devre yapısı, lehim noktaları, kablo-konnektör bağlantı noktaları gibi prototip üretimde özdeş olmayacak noktalardan kaynakladığı değerlendirilmektedir.

İkinci testte prototip üretim yerine otomatik dizgi makinasında üretilen 23 adet uydu kart kullanılmıştır. Aynı test bataryası her bir uydu ile ölçülerek nasıl bir dağılım olduğu incelenmiştir Çizelge 6.3’de 6 test bataryasının 23 adet uydu kart ile gerilim ölçüm sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 6.3 Birden çok uydu kartın hücre ölçüm sonuçları

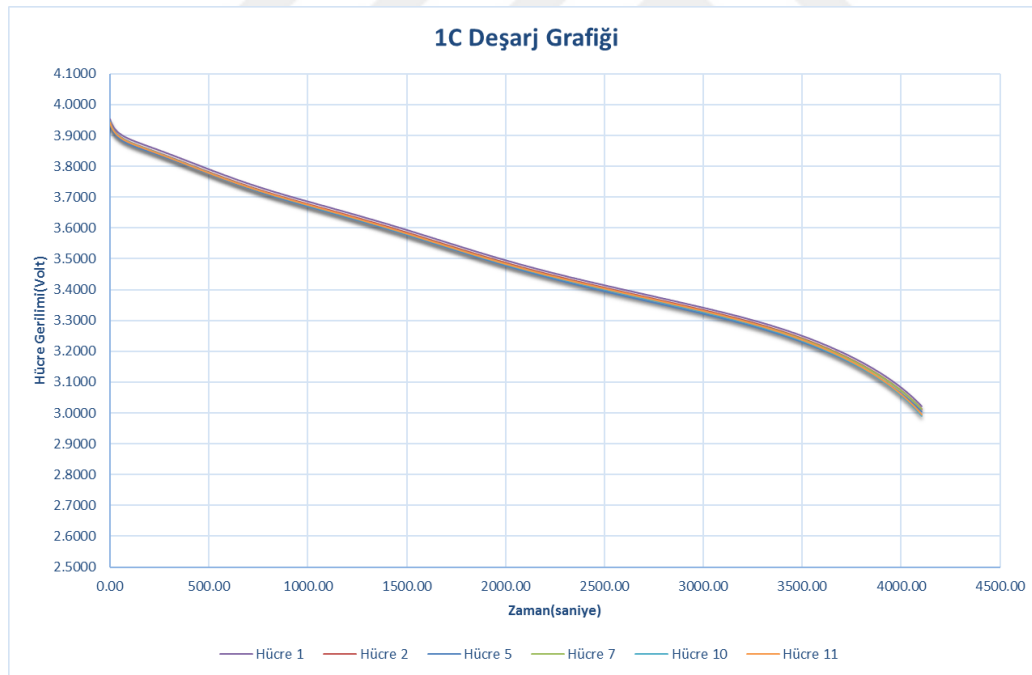
	HÜCRE1 (mV)	HÜCRE2 (mV)	HÜCRE3 (mV)	HÜCRE4 (mV)	HÜCRE5 (mV)	HÜCRE6 (mV)	HÜCRE7 (mV)	HÜCRE8 (mV)	HÜCRE9 (mV)	HÜCRE10 (mV)	HÜCRE11 (mV)	HÜCRE12 (mV)
SLAVE1	3205.1	3204.8	3204.8	3205.3	3204.9	3204.4	3204.4	3205.1	3205.4	3205	3204.5	3204.2
SLAVE2	3204.9	3204.7	3204.7	3205.3	3204.8	3204.3	3204.3	3205	3205.3	3204.9	3204.5	3204.1
SLAVE3	3205.1	3204.9	3204.9	3205.5	3204.9	3204.5	3204.5	3205.2	3205.6	3205.1	3204.6	3204.4
SLAVE4	3204.9	3204.7	3204.7	3205.3	3204.8	3204.3	3204.5	3205.3	3205.6	3205.1	3204.8	3204.4
SLAVE5	3205.1	3205	3204.9	3205.5	3205.1	3204.6	3204.6	3205.3	3205.6	3205.2	3204.8	3204.5
SLAVE6	3205.3	3205.1	3205.1	3205.8	3205.2	3204.8	3204.8	3205.5	3205.8	3205.3	3204.9	3204.6
SLAVE7	3205	3204.9	3205	3205.5	3205	3204.5	3204.6	3205.3	3205.6	3205.2	3204.7	3204.4
SLAVE8	3205.1	3204.8	3204.8	3205.4	3205	3204.5	3204.5	3205.3	3205.6	3205.1	3204.6	3204.4
SLAVE9	3205.2	3204.9	3205	3205.5	3205	3204.6	3204.5	3205.3	3205.5	3205.1	3204.7	3204.3
SLAVE10	3205.5	3205.3	3205.2	3205.8	3205.4	3204.9	3204.8	3205.6	3205.9	3205.4	3205	3204.7
SLAVE11	3205.2	3205	3205	3205.6	3205.1	3204.6	3204.6	3205.3	3205.6	3205.2	3204.7	3204.4
SLAVE12	3205	3204.8	3204.9	3205.5	3205	3204.5	3204.5	3205.3	3205.5	3205.1	3204.6	3204.4
SLAVE13	3205.1	3205	3204.9	3205.5	3205	3204.6	3204.5	3205.2	3205.6	3205.2	3204.6	3204.3
SLAVE14	3204.9	3204.8	3204.8	3205.4	3204.9	3204.5	3204.5	3205.2	3205.5	3205.1	3204.7	3204.4
SLAVE15	3205	3204.8	3204.9	3205.4	3204.9	3204.4	3204.3	3205.1	3205.5	3205	3204.5	3204.3
SLAVE16	3205.4	3205.1	3205.1	3205.7	3205.3	3204.9	3204.7	3205.5	3205.8	3205.3	3204.9	3204.6
SLAVE17	3205.1	3204.9	3204.9	3205.4	3205	3204.5	3204.4	3205.2	3205.5	3205	3204.6	3204.3
SLAVE18	3205.2	3205	3205	3205.6	3205.1	3204.6	3204.5	3205.3	3205.6	3205.2	3204.7	3204.4
SLAVE19	3205.2	3204.9	3204.9	3205.5	3205	3204.5	3204.6	3205.3	3205.5	3205.2	3204.7	3204.5
SLAVE20	3205.5	3205.2	3205.2	3205.8	3205.3	3204.9	3204.8	3205.6	3205.8	3205.5	3204.9	3204.7
SLAVE21	3204.9	3204.7	3204.7	3205.2	3204.8	3204.4	3204.2	3205	3205.3	3204.9	3204.5	3204.1
SLAVE22	3205.1	3204.9	3204.8	3205.4	3205	3204.5	3204.4	3205.1	3205.5	3205	3204.6	3204.3
SLAVE23	3205	3204.9	3204.8	3205.4	3204.9	3204.5	3204.5	3205.2	3205.6	3205.1	3204.6	3204.4
MAX-MIN	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6
STANDART SAPMA	0.17	0.15	0.14	0.16	0.16	0.17	0.15	0.16	0.15	0.14	0.14	0.15



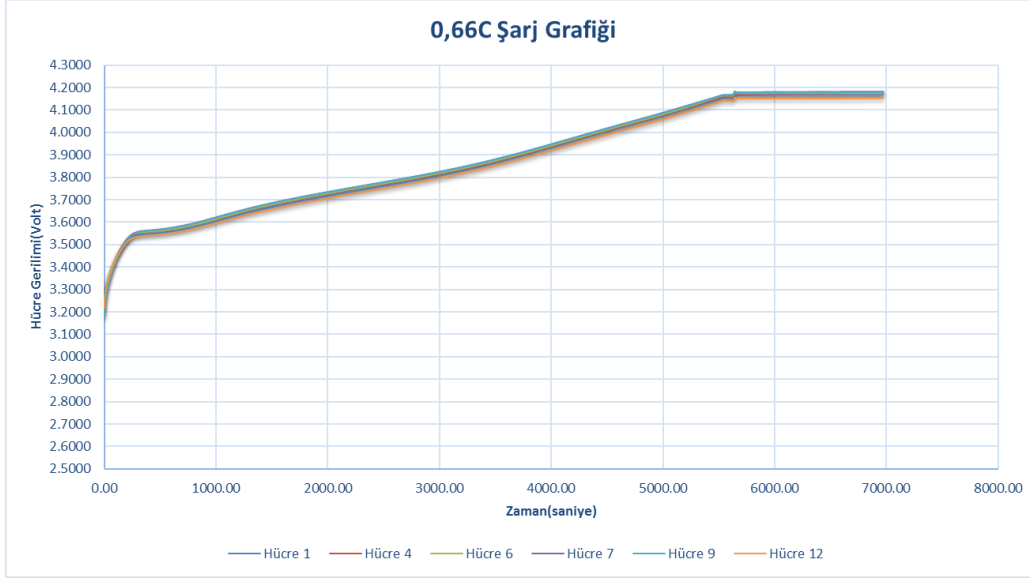
Görüldüğü gibi farklı uydu kartlar arasındaki ölçüm farkları oldukça düşüktür. 23 adet kart aynı hücreleri ortalama 0.15mV standart sapma ile ölçebilmektedir. Ayrıca hassas multimetre ile her hücre ölçülen 3205mV değeri referans alındığında, 23 adet kartın ve 12 ölçümün ortalama yüzde hatası %0,01 olarak hesaplanmaktadır.

### 6.3 Şarj-Deşarj Çevrimleri

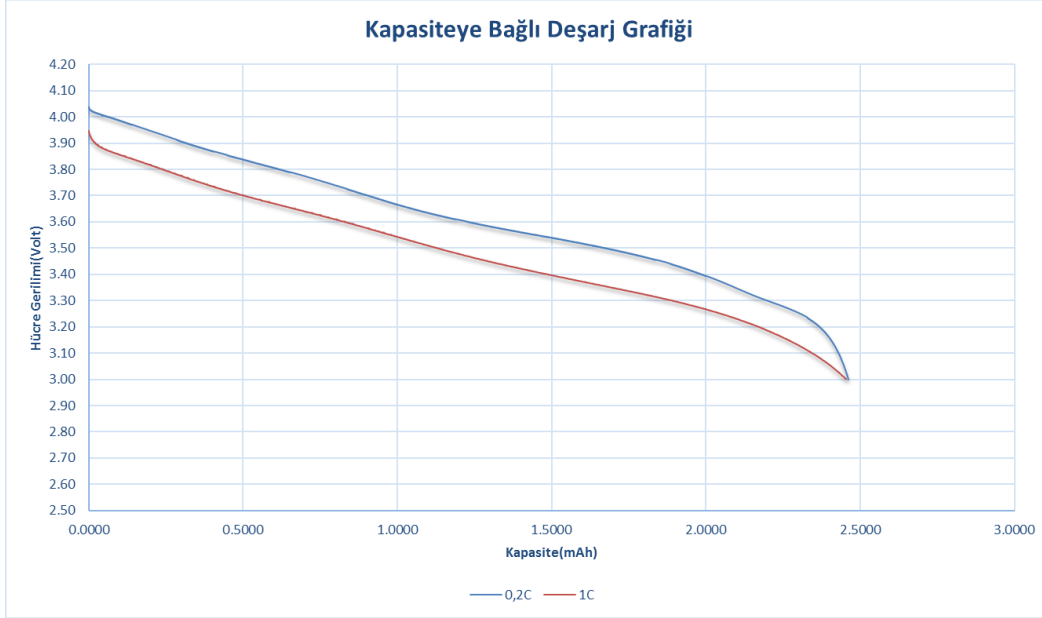
Bataryanın çalışması sırasında şarj ve deşarj olmak üzere iki durum söz konusudur ve BYS bu iki durumda da bataryayı izleyebilmeli ve verileri kaydedebilmelidir. Uydu kartların bu göreve uygun olduğunun tespiti için test bataryası DC güç kaynağı ile şarj edilmiş ve DC elektronik yük ile deşarj edilmiştir ve bu sırada uydu kart ile hücre gerilimleri sürekli kaydedilmiştir. Şarj sırasında hücrelerin kataloğunda tarif edildiği üzere 0,66C oranı seçilirken, deşarj sırasında ise 1C oranı seçilmiştir. Kapasiteye bağlı deşarj grafiği oluşturulurken ise 0,2C ve 1C oranları seçilmiştir. Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de test sonuçları yer almaktadır.



Şekil 6.5 1C Deşarj grafiği



Şekil 6.6 0,66C Şarj grafiği



Şekil 6.7 Kapasiteye bağlı deşarj grafiği

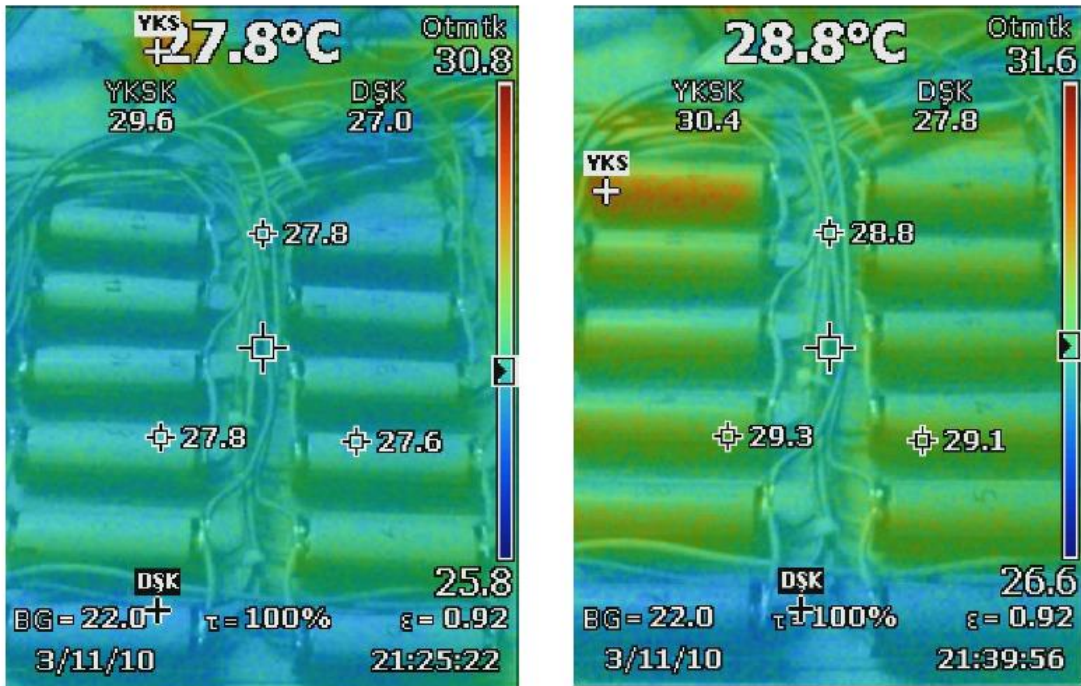
Yapılan testler göstermiştir ki tasarlanan uydu kart şarj ve deşarj durumları süresince veri ölçümü ve kaydı yapabilmektedir. Ayrıca yapılan testlerde katalogda verilen şarj ve deşarj grafikleri elde edilebilmiştir.

#### 6.4 Termal Testler

Lityum iyon tabanlı bataryaların çalışma performanslarını ve ömürlerini etkileyen en önemli faktörlerden biri termal etkilerdir. Termal etkilerin çok iyi izlenmesi ve kontrol algoritmalarına sokulması gerekmektedir.

BYS'nin olabildiğince çok hücrenin sıcaklığını ölçmesi gerekmektedir. Bu sebeple uydu kart üzerinde 4 adet 10 k $\Omega$  NTC (Negative Temperature Coefficient) termistör okuma girişi bulunmaktadır. Bu girişler sayesinde her 3 hücrenin birinden sıcaklık ölçümü alınabilmektedir.

Şekil 6.8'de Fluke Ti125 termal sıcaklıkölçer ile elde edilmiş batarya görüntüsü yer almaktadır.



(a)

(b)

Şekil 6.8 Hücrelerin termal kamera görüntüleri (a) şarj başlangıcı (b) şarj ortası

Bu test sırasında hücreler 1C oranıyla şarj edilmektedir. Bu sırada Şekil 6.8 (a) ve (b) anlarında uydu karta bağlanan  $R_{nom}=10$  k $\Omega$  ve  $\beta=3535K$  olan NTC termistör ile 2. Hücrenin sıcaklığı ölçülmüştür. Sonuçlar Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4 Hücre sıcaklık ölçümleri

	Termal Kamera Ölçümü (°C)	Slave Ölçümü (°C)
Şarj Başlangıcı	27.6	27.3
Şarj Ortası	29.1	29.7

Görüldüğü gibi ölçüm hatası  $1^{\circ}\text{C}$ 'nin altındadır ve bu doğruluk BYS algoritmaları için yeterlidir.

## 6.5 Hücre Dengeleme Testleri

Uydu kart pasif dengeleme özelliğine sahiptir ve hücre dengeleme direnci olarak  $R_{\text{dengeleme}} = 16.5 \Omega$  seçilmiştir. Hücre dengeleme sırasında bir mosfet anahtarlama elemanı olarak kullanılarak bu dengeleme direnci üzerinden hücre enerjisi harcanmaktadır.

Tasarlanan uydu kartta  $R_{\text{dengeleme}}$  direnci hassas multimetre ile ölçülmüştür ve bilinmektedir. Bu değerden yola çıkarak dengeleme akımı  $I_{\text{dengeleme}}$ , direnç üzerindeki gerilim ölçülerek hesaplanmıştır.

$r_{\text{DS}}$  ve  $R_{\text{parazitik}}$ , gerilim ölçümleri ve bilinen  $I_{\text{dengeleme}}$  akımı sayesinde hesaplanmıştır ve sonuçlar Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5 Dengeleme parametreleri

Hücre No	$V_{\text{hücre}}$ (mV)	$R_{\text{dengeleme}}$ (m $\Omega$ )	$I_{\text{dengeleme}}$ (mA)	$r_{\text{DS}}$ (m $\Omega$ )	$R_{\text{parazitik}}$ (m $\Omega$ )
12	2205	17020	111	2521.5	315.2
11	2205	17020	117.5	1446.7	297.9
10	2205	17020	107.5	3255.2	232.5
9	2205	16990	87.7	8209.9	285.1
8	2205	17020	111.6	2535.1	197.1
7	2205	16990	108.3	3167.2	203.1
6	2205	17090	113.5	2061.4	273.1
5	2205	17030	102.8	4106.7	321.1
4	2205	17030	105.1	3586.8	361.5
3	2205	17010	101.1	4450.3	346.1
2	2205	17030	109.2	2820	338.8
1	2205	17010	107.6	3374.1	111.5

Yapılan çalışma sonucunda batarya hücreleri  $R_{\text{dengeleme}}$ ,  $r_{\text{DS}}$  ve  $R_{\text{parazitik}}$  toplamında yaklaşık 20  $\Omega$  direnç değeri ile dengelenmektedir. (5.1) denklemine göre, 4.2 V gerilimdeki bir hücrede dengeleme sırasında 0.882 Watt ısı güç açığa çıkmaktadır.

Şekil 6.9'da uydu kartın, dengeleme dirençlerinin aktif edildiği ve ısıl dengeye geldiği andaki termal görüntüsü yer almaktadır. PCB yolları ve soğutma yüzeyleri her bir dengeleme direnci için özdeş olmadığı için bir bölgede ısı birikimi gözlemlenmektedir. Çalışma sonucunda dengeleme algoritması kurgulanırken termal davranışlar hesaba katılmalı ve sıcaklıkların güvenli bölgede tutulması gerekliliği görülmüştür.



Şekil 6.9 Uydu kartın dengeleme sürecindeki termal görüntüsü

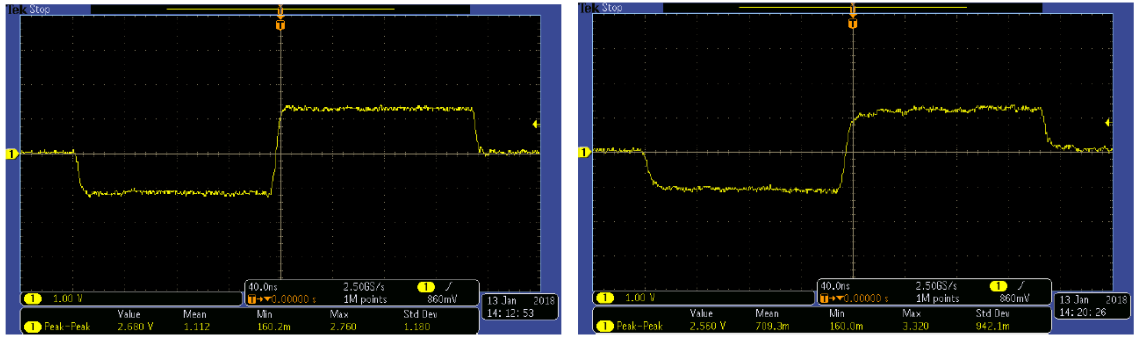
## 6.6 isoSPI Haberleşme Testleri

Tasarlanan uydu kartlar kendi aralarında ve ana kart arasında isoSPI haberleşme yapısı ile haberleşmektedir. Bu haberleşme yapısının, haberleşme hattı uzadıkça nasıl davrandığını incelemek için uzun mesafe testleri yapılmıştır.

Haberleşme sırasında alınan “Packet Error Rate-PEC” değerinin idealde sıfır olması beklenir. Yüksek mesafelerde ve elektromanyetik gürültünün yüksek olduğu ortamlarda PEC yükselebilir ve hatalı veri alma olasılığı artar [28].

Haberleşmenin dayanıklılığının tespiti için uzun mesafe testi yapılmıştır. Bu test için ekransız, 0.25 mm<sup>2</sup> kesitli 0,2 metre uzunluğunda kablo ve yine ekransız, 0,25 mm<sup>2</sup> kesitli 10 metre kablo ile haberleşme gerçekleştirilmiş ve hatalı veriler gözlenmiştir.

Her iki durumda da herhangi bir hatalı veri gözlenmemiş ve PEC hatası alınmamıştır. Mesafenin haberleşme sinyallerini nasıl etkilediği osiloskop ile incelenmiştir. Şekil 6.10'da 0,2 metrede ve 10 metrede isoSPI sinyalleri görülmektedir. Mesafe uzadıkça sinyalde bozulma olarak nitelendirilemeyecek küçük değişimler olmaktadır.



Şekil 6.10 isoSPI sinyalleri osiloskop görüntüsü (a) kısa mesafe (b) uzun mesafe

## 6.7 Akım Ölçüm Testleri

Bataryaya bağlanan shunt direnç ve BYS Ana kartı ile akım ölçüm testi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6 BYS Ana akım ölçümü testi sonuçları

Test Akımı (A)	Ölçülen Akım (A)	Hata Oranı
-500	-500.98	-0.20%
-300	-300.5	-0.17%
-200	-200.18	-0.09%
-100	-99.98	0.02%
-50	-49.95	0.10%
-25	-24.95	0.20%
-10	-10	0.00%
10	9.9	-1.00%
25.05	24.9	-0.60%
50	49.8	-0.40%
100	99.65	-0.35%
200	199.6	-0.20%
300	299.68	-0.11%
500	500.93	0.19%

Test sonucunda tüm ölçüm aralığındaki hatanın düzgün dağılmamasının sebebinin sistemdeki gürültü olduğu değerlendirilmiş ve ölçüm sisteminin çeşitli donanımsal ve yazılımsal filtreler ile iyileştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

## 6.8 Gerilim Ölçüm Testleri

BYS Ana kartın yüksek gerilim ölçme devresi, uygulanan çeşitli DC gerilimler ile test edilmiştir. Test sonuçları Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7 BYS Ana gerilim ölçümü testi sonuçları

Test Gerilimi (V)	Ölçülen Gerilim (V)	Hata Oranı
10.00	9.90	-1.00%
50.00	49.65	-0.70%
100.00	100.50	0.50%
200.00	199.75	-0.13%
300.00	299.85	-0.05%
400.00	400.40	0.10%
500.00	500.55	0.11%
600.00	599.90	-0.02%
700.00	700.10	0.01%
800.00	800.10	0.01%
900.00	899.70	-0.03%
1000.00	999.80	-0.02%

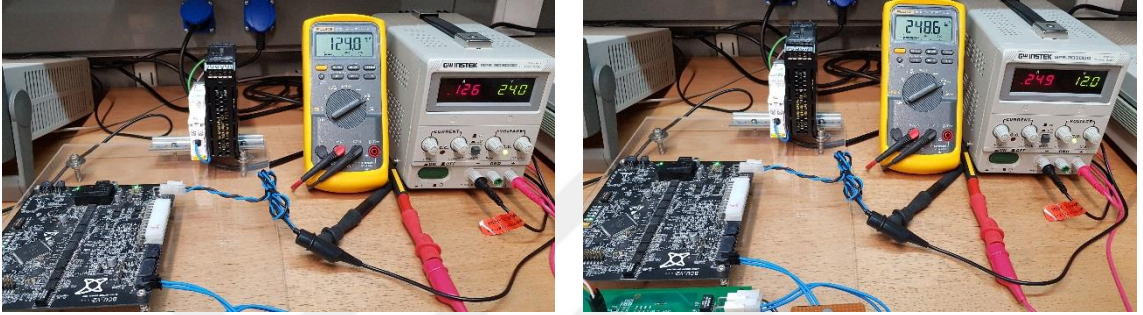
Test sonucunda BYS gerilim ölçme devresinin proje isterlerini karşıladığı görülmüştür.



## 6.9 BYS Güç Tüketimi Testleri

BYS Ana kartın güç tüketimi ölçülmüştür. Bu ölçüm sırasında merkezi mikrodenetleyicinin tüm çevre birimleri aktiftir ve çalışma modu en çok güç harcayan moddur.

Yapılan ölçüm sonucunda ana kart 24 V DC ile beslenirken 124 mA, 12 V DC ile beslenirken, 249 mA akım çekmektedir. Bu değerlerden yola çıkarak BYS Ana kartın harcadığı güç 2,976 Watt'tır. Güç tüketimi testleri Şekil 6.11'de görülmektedir.



Şekil 6.11 BYS ana kart güç tüketimi

Bu test sonucunda görülmüştür ki ana kartın güç tüketimi normal çalışma koşulları için kabul edilebilir çerçevededir fakat güç tasarrufu sağlamak için BYS ana görevlerini gerçekleştirmediği sürelerde (bataryanın kullanılmadığı, aracın kapalı olduğu) uyku moduna geçerek güç tüketimini azaltmalıdır. Yapılacak gömülü yazılımda uyuma-uyanma senaryoları üzerinde çalışılacaktır.

Uydu kartların güç tüketimleri haberleşme hızına, haberleşme moduna, gerilim ölçüm moduna ve benzeri parametrelere bağlı olarak değişeceği için gömülü yazılım belli bir aşamaya gelmeden güç tüketim testlerinin yapılmaması düşünülmüştür.



### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında elektrikli araçlarda kullanılacak bir batarya yönetim sisteminin elektronik donanımı tasarlanmıştır. Tasarlanan elektronik donanımın üretimi gerçekleştirilmiş ve bu elektronik kartlar laboratuvar ortamında test edilmiştir. Testler sonucunda geliştirilen batarya yönetim sistemi donanımının hedeflenen özelliklere sahip olduğu ve elektrikli araçlarda kullanıma uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Tasarım sırasında BYS'nin otomotiv sektöründe kullanılacağı göz önünde bulundurularak otomotiv isterlerine uygun bir donanım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Batarya yönetim sistemleri için özel olarak geliştirilen Linear Technology firmasının ürettiği LTC6804 entegre devresi ile profesyonel ve verimli bir ürün ortaya konulmuştur.

Uydu kartlar yüksek doğrulukla ve hızlı bir şekilde hücre gerilimlerini, sıcaklıkları ölçebilecek, hücrenin pasif dengelemesini gerçekleştirebilecek ve isoSPI haberleşmesi ile diğer uydu kartlarla ve ana kartla haberleşecek yetenektedir. Ana kart ise sistemin ana kontrolcü kartı görevini üstlenmekte ve birçok ölçüm, hesaplama ve haberleşme görevini yerine getirebilmektedir.

Tasarımı doğrulamak ve elektronik donanımın performansını görmek için yapılan laboratuvar testleri sonucunda görülmüştür ki, elektronik donanımın belirlenen isterlere cevap vermektedir ve gelişmiş bir batarya ve batarya kontrol algoritması kurmak için, ölçüm performansı, elektronik devrelerin kabiliyetleri ve mikrodenetleyicinin işlem kapasitesi olarak uygun bir altyapı sunmaktadır. Modüler yapısı sayesinde kolayca ölçeklendirilip küçükten büyüğe birçok batarya sisteminde kullanıma uygundur. Yapılan maliyet analizi sonucunda görülmüştür ki tasarlanan BYS, rakiplerine göre oldukça

avantajlı durumdadır. Maliyet ve yetenekler göz önüne alındığında tasarımın ürüne dönüşme sürecinde olduğu görülmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda bu tez kapsamında tasarlanan ve üretilen elektronik donanımlar kullanılarak batarya kontrol algoritmaları ve batarya durumu kestirim algoritmaları tasarlanacak ve bu algoritmaların gömülü yazılımları oluşturulacaktır. Ardından donanım ve yazılım gerçek bir elektrikli araç bataryasına entegre edilerek proje nihai amacına ulaşacaktır. Bu aşamalarda gerçekleştirilecek analizler, simülasyonlar ve testler ile konu hakkında bilgi birikiminin artırılması hedeflenmektedir.



- [1] Scrosati, B., Garche, J. ve Tillmetz, W., (2015). *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, 80, Elsevier.
- [2] Andrea, D., (2010). *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, Artech House, Boston.
- [3] Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F. ve Chow M., (2013). " Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 1-16.
- [4] Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J. ve Ouyang, M., (2012). "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles", *Journal of Power Source*, 226:272-288.
- [5] Waag, W., Fleischer, C., ve Sauer D., U., (2014). "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles", *Journal of Power Source*, 258:321-339.
- [6] Lozano, G., J., Cadaval, R., E., Montero, M., I., M. ve Martinez, M., A., G., (2014). "Battery equalization active methods", *Journal of Power Source*, 246:934-949.
- [7] Baronti, F., Roncella, R. ve Saletti, R., (2014). "Performance comparison of active balancing techniques for lithium-ion batteries", *Journal of Power Source*, 267:603-609.
- [8] Farmann, A., Waag, W., Marongiu, A. ve Sauer, U., D., (2015). "Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium- ion batteries in electric and hybrid electric vehicles", *Journal of Power Source*, 281:114-130.
- [9] Barrera, J., P., R., Galeano, N., M. ve Maldonado, H., O., S., (2017). "SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges", *electronics*, 102:1-33.
- [10] Hannan, M., A., Lipu, M., S., H., Hussain, A. ve Mohamed, A., (2017). "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78:834-854.
- [11] Berecibar, M., Gandiaga, I., Villarreal, I., Omar, N., Van Mierlo, J. ve Van den Bossche, P., (2016). "Critical review of state of health estimation methods of Li-

- ion batteries for real applications”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56:572-587.
- [12] Rezvanizani, S., M., Liu, Z, Chen, Y. ve Lee, J., (2014). " Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility ", Journal of Power Source, 256:110-124.
- [13] Wang, Q., Jiang, B., Li, B. ve Yan, Y., (2016). "A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64:106-128.
- [14] Fleischer, C., Sauer, D.,U., Barreras, J., V., Schaltz, E. ve Christensen, A., E., (2016). "Development of Software and Strategies for Battery Management System Testing on HIL Simulator", International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies(EVER), 6-8 Nisan 2016, Monte Carlo.
- [15] Dai, H., Zhang, X., Wei, X., Sun, Z., Wang, J. ve Hu, F., (2013). "Cell-BMS validation with a hardware-in-the-loop simulation of lithium-ion battery cells for electric vehicles”, Electrical Power and Energy Systems, 52:174-184.
- [16] Aldoğan, E., (2012). Elektrikli Araçlar İçin Batarya Yönetim Sistemi Donanımı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [17] Altun, Ş., (2012). Elektrikli Araçlar İçin Batarya Yönetim Sistemi Algoritması Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [18] Baykal, T., (2013). Lityum Polimer Bataryalar İçin Batarya Yönetim Sistemi Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] Nafiz, S., (2014). Elektrikli Otobüsler İçin Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [20] Kılıç, A., (2016). Batarya Yönetim Sisteminde Ana ve Uydu Denetleyici Modül Tasarımı ve CAN Protokolü Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [21] Yılmaz, E., (2017). Internet of Things Based Battery Management Systems Applications, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] Yong, J., Y., Ramachandaramurthy, V., K., Tan, K., M. ve Mithulananthan, N., (2015). " A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49:365-385.
- [23] Battery University, Types of Lithium-ion, [https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion), 11 Haziran 2018.

- [24] Cuma, M., U. ve Koroglu, T., (2015). "A comprehensive review on estimation strategies used in hybrid and battery electric vehicles", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42:517-531.
- [25] Orion BMS, Orion BMS datasheet [https://www.orionbms.com/downloads/documents/orionbms\\_specifications.pdf](https://www.orionbms.com/downloads/documents/orionbms_specifications.pdf), 1 Temmuz 2018.
- [26] STW Technic, Powermela mbms datasheet, [https://www.stw-technic.com/wp-content/uploads/2015/08/powermela-mbms\\_data-sheet.pdf](https://www.stw-technic.com/wp-content/uploads/2015/08/powermela-mbms_data-sheet.pdf), 1 Temmuz 2018.
- [27] Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, FlexBMS datasheet, [https://www.mikroelektronik.fraunhofer.de/content/dam/mikroelektronik/Datenblätter/IIS\\_Batteriemanagement\\_DB.pdf](https://www.mikroelektronik.fraunhofer.de/content/dam/mikroelektronik/Datenblätter/IIS_Batteriemanagement_DB.pdf), 1 Temmuz 2018.
- [28] Linear Technology, LTC6804 Datasheet, <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/680412fc.pdf>, 10 Temmuz 2018.
- [29] Automotive Electronics Council, <http://www.aecouncil.com/>, 15 Eylül 2018.
- [30] Linear Technology, LTC6820 Datasheet, [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6820fb.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6820fb.pdf), 15 Eylül 2018.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Hamit Serhat GÜL  
**Doğum Tarihi ve Yeri** :10.11.1990, Çanakkale  
**Yabancı Dili** :İngilizce  
**E-posta** :h.serhat.gul@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektronik ve Hab. Müh.	YTÜ	2012
Lise	Fen Bilimleri	T.C. Ziraat Bankası Fen Lisesi	2008

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016- Devam ediyor	Altınay Robot Teknolojileri	Elektronik Donanım Tas. Müh.
2012-2015	Mavili Elektronik	Elektronik Donanım Tas. Müh.

## **YAYINLARI**

### **Bildiri**

1. Gül, H. S. ve Ayten U.A., (2018). "Elektrikli Araçlar İçin Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı" 9. Uluslararası Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 7-8 Mayıs, Bursa.

