T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİTYUM TABANLI BATARYALAR İÇİN KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Ender DÖNMEZ

DANIŞMAN
Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Haziran, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Ender DÖNMEZ tarafından, **Prof. Dr. Fırat KAÇAR** danışmanlığında hazırlanan **"LİTYUM TABANLI BATARYALAR İÇİN KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **18/06/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Fırat KAÇAR İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Yasin ÖZÇELEP İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KONAL Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

LİTYUM TABANLI BATARYALAR İÇİN KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında bilimsel yaklaşımı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği alanında öncü çalışmaları ve ilham verici akademik duruşuyla gelişimimde önemli bir rehber olan danışman hocam Sn. Prof. Dr. Fırat KAÇAR'a, bu proje fikrinin ortaya çıkarılması ve yenilikçi teknolojiler ile desteklenmesi konusunda hiçbir zaman desteğini esirgemeyen DigiEye Dijitalleşme Teknolojileri kurucusu Sn. Süleyman Onur AKPINAR'a, projenin yazılım ve algoritma tarafında aralıksız mesai harcayan değerli arkadaşım İbrahim TOP'a, donanım tasarım ve elektronik dizgi süreçlerinde teknik çalışmalarıma uygun ortam sağlayan, benimde bünyesinde çalışmaktan onur duyduğum Dünya'nın en büyük SİHA üreticisi olan Baykar'a, değerli geri beslemeleri ile projenin olgunlaşmasına destek sağlayan mesai arkadaşlarıma ve beni her zaman koşulsuz bir şekilde destekleyen aileme teşekkür ederim.

Haziran 2025 Ender DÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xiv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xviii**
ABSTRACT ..... **xx**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **5**
2.1. BATARYA TEKNOLOJİSİ 5
2.1.1. Batarya Bileşenleri 8
2.1.2. Bataryaların Sınıflandırılması 10
2.1.3. Bataryaların Elektriksel Detayları 14
2.1.4. Batarya ile İlgili Terimler 15
2.1.5. Lityum Tabanlı Batarya Kimyaları 18
2.1.6. Batarya Hücresi Tipleri 32
2.2. BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ 38
2.2.1. Geleneksel Batarya Yönetim Sistemleri 40
2.2.2. Kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri 58
3. YÖNTEM **71**
3.1. KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ MODÜL BİLGİLERİ 71
3.1.1. Dengeleyici Modül 72
3.1.2. Kontrol Modülü 74
3.2. BATARYA DENGELEME VE GÖRÜNTÜLEME 76
3.3. TERMAL KONTROL 79

3.3.1. Dahili Termal Kontrol 80
3.3.2. Harici Termal Kontrol 83
3.4. BATARYA ŞİŞME TESPİTİ 84
3.5. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ GÜÇ TÜKETİMİ 85
3.6. KONTROL MODÜLÜ HABERLEŞME ARAYÜZLERİ 88
3.7. AKIM SAYMA METODU 89
3.8. ŞARJ VE DEŞARJ KONTROLÜ 91
3.9. BATARYA SAĞLIĞI VE BATARYA ŞARJ DURUMLARI (SOC VE SOH) 91
3.9.1. Batarya Şarj Durumu (SOC) 92
3.9.2. Batarya Sağlık Durumu (SOH) 92
3.10. KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ KONTROLÜ 93
4. BULGULAR 101
4.1. GELİŞTİRME KARTI TESTLERİ 107
4.2. KONTROL VE DENGELEYİCİ MODÜL TESTLERİ 110
4.2.1. Kontrol Modülü Testleri 112
4.2.2. Dengeleyici Modül Testleri 114
4.3. KABLOSUZ HABERLEŞME MENZİL TESTLERİ 116
4.3.1. Engelsiz Oda Menzil Testi 116
4.3.2. Cam Bölmeli Oda Menzil Testi 117
4.4. 3 ADET LİTYUM BATARYA İLE DENGELEME TESTİ 118
4.5. 3 ADET LİTYUM BATARYA VE 1 ADET GÜÇ KAYNAĞI İLE DENGELEME TESTİ 119
4.6. 3 ADET LİTYUM BATARYA VE 1 ADET GÜÇ KAYNAĞI İLE DENGELEME TESTİ-2 121
4.7. YÜKSEK SICAKLIK İLE DENGELEME DURDURMA TESTİ 122
4.8. GERİLİM DENGESİZLİĞİ İLE DENGELEME DURDURMA TESTİ 123
4.9. LİTYUM BATARYALAR İLE DENGELEME TESTİ 124
4.10. LİTYUM BATARYALAR İLE DENGELEME TESTİ-2 125
5. TARTIŞMA 127
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 132
KAYNAKLAR 135
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 143
ETİK KURUL İZİN YAZISI 144
KURUM İZNİ YAZILARI 145

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Araç Tiplerine ve Bölgelere Göre Batarya Arz-Talep Verileri [10].....5

Şekil 2.2: Batarya Kimyasalları Arz-Talep Verileri [10].....6

Şekil 2.3: Batarya Kimyalarının Yıllara Göre Kullanım Verileri [10] 7

Şekil 2.4: Silindirik Batarya Yapısı [17].....8

Şekil 2.5: Silindirik Batarya İç Yapısı [17].....8

Şekil 2.6: Şarj Edilemez Batarya Örneği [21].....11

Şekil 2.7: Şarj Edilebilir Batarya Örneği [22].....13

Şekil 2.8: Lityum Tabanlı Batarya Kimyalarının Birbirlerine Göre Kıyaslaması [30].....19

Şekil 2.9: Li-ion Batarya Görseli 20

Şekil 2.10: Li-Po Batarya Görseli 21

Şekil 2.11: LCO Batarya Görseli 22

Şekil 2.12: NCA Batarya Görseli.....23

Şekil 2.13: LFP Batarya Görseli 24

Şekil 2.14: NMC Batarya Görseli 25

Şekil 2.15: LMO Batarya Görseli 26

Şekil 2.16: LTO Batarya Görseli 28

Şekil 2.17: Li-ion ve Li-S Batarya Farkları Görseli [39].....29

Şekil 2.18: Li-ion Batarya ve Li-Metal Batarya Yapısı [40] 31

Şekil 2.19: Üretim Türlerine Göre Farklı Tip Bataryalar [43].....33

Şekil 2.20: Lityum İyon Batarya İmalat Süreci [42].....33

Şekil 2.21: Batarya Hücresi Türlerinin Karşılaştırması [42] 33

Şekil 2.22: Silindirik Batarya Hücresi Yapısı [48] 35

Şekil 2.23: 18650 Tipi Silindirik Batarya Görseli [46].....35

Şekil 2.24: 18650 Serisi Silindirik Bataryaların Arz-Talebi [46] 36

Şekil 2.25: Prizmatik Hücre Yapısı [46] 36
Şekil 2.26: Kese Tipi Batarya [46] 37
Şekil 2.27: Şişmiş Kese Batarya [46] 38
Şekil 2.28: Otomotiv Batarya Yapısı [51] 39
Şekil 2.29: Batarya Yönetim Sisteminin Çalışma Algoritması [53, 54] 39
Şekil 2.30: Elektrikli Araçlarda Güç Sistemi Maliyet Dağılımı [55] 40
Şekil 2.31: Örnek Batarya Paketi Mimarisi [57] 41
Şekil 2.32: CAN-Bus Haberleşmesi Örnek Mimari [58] 42
Şekil 2.33: Örnek Batarya Paketi Hücre İzleme ve İletişim Mimarisi [59] 43
Şekil 2.34: Batarya Terimleri Bilgi Görseli [65] 46
Şekil 2.35: Seri Bağlı Batarya Grubu [65] 46
Şekil 2.36: Sabit ve Kontrollü Şönt Dirençli Dengeleme Mimarisi [64] 47
Şekil 2.37: Kapasitör Tabanlı Aktif Dengeleme Mimarisi [64] 49
Şekil 2.38: Transformatör Tabanlı Aktif Dengeleme Mimarisi [64] 49
Şekil 2.39: Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme Mimarisi [64] 50
Şekil 2.40: Termal Ped 52
Şekil 2.41: Isı Emici (Head Sink) 52
Şekil 2.42: Elektrikli Araçlarda Sıvı Soğutmalı Batarya Sistemi 53
Şekil 2.43: Hava Soğutma Sistemleri Çeşitleri [56] 53
Şekil 2.44: Batarya Şarj Durumu Gösterimi [77] 56
Şekil 2.45: Kablolu ve Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarileri [53] 59
Şekil 2.46: İzole Ekipmanlar ile Kablolu Tip Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [59] 60
Şekil 2.47: İzoleli Haberleşme Arayüzü Örneği [83] 60
Şekil 2.48: Örnek Bir Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [84] 61
Şekil 2.49: Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [85] 62
Şekil 2.50: Bluetooth Tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [3] 64
Şekil 2.51: Örnek Zigbee Tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Mimarisi [90] 67

Şekil 2.52: Wi-Fi Tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [94] 68
Şekil 2.53: Texas Instruments WBMS Geliştirme Kartı Görseli [96] 69
Şekil 2.54: Analog Devices Firması Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Entegresi [84] 70
Şekil 3.1: Kontrol Modülü ve Dengeleyici Modül Mimarisi 71
Şekil 3.2: Dengeleyici Modül 3 Boyutlu Üst Görünüm 72
Şekil 3.3: Dengeleyici Modül 3 Boyutlu Alt Görünüm 72
Şekil 3.4: Kontrol Modülü 3 Boyutlu Üst Görünüm 74
Şekil 3.5: Kontrol Modülü 3 Boyutlu Alt Görünüm 74
Şekil 3.6: Gerilim Bölücü Devre Yapısı 76
Şekil 3.7: Opamp Fark Alıcı Devre Yapısı 77
Şekil 3.8: Pasif Batarya Dengeleme Donanım Yapısı 78
Şekil 3.9: Termal Ped Kontrolü Donanım Yapısı 79
Şekil 3.10: Devre Üzeri Analog Sıcaklık Sensörü Donanım Yapısı 80
Şekil 3.11: Analog Sıcaklık Sensörü Gerilim-Sıcaklık Grafiği 80
Şekil 3.12: Devre Üzeri NTC Termistör Donanım Yapısı 81
Şekil 3.13: Kablolu Tip NTC Termistör Görseli 83
Şekil 3.14: Kablolu Tip NTC Termistör Donanım Yapısı 83
Şekil 3.15: Tipik Bir Gerinim Ölçer Ölçüm Metodu 84
Şekil 3.16: Batarya Gerinim Ölçer Donanım Yapısı 85
Şekil 3.17: Güç Girişi Akım Ölçümü Yapısı 86
Şekil 3.18: CAN-Bus Haberleşme Protokolü Donanım Yapısı 88
Şekil 3.19: RS-232 Haberleşme Protokolü Donanım Yapısı 88
Şekil 3.20: Şönt Direnç Örneği 89
Şekil 3.21: Şönt Direnç Üzerinden Akım Okuma Donanım Yapısı 90
Şekil 3.22: Kontaktör Anahtarlama-1 Donanım Bloğu 91
Şekil 3.23: Kontaktör Anahtarlama-2 Donanım Bloğu 91
Şekil 3.24: Dengeleyici Modül Kablosuz Mikrodenetleyici Donanım Yapısı 94

Şekil 3.25: Kontrol Modülü Kablosuz Mikrodenetleyici Donanım Yapısı 95
Şekil 3.26: Yavaş ve Hızlı Dengeleme Modu Algoritma Akış Diyagramı 98
Şekil 3.27: Termal Kontrol Algoritma Akış Diyagramı 99
Şekil 3.28: Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Çalışma Algoritması 99
Şekil 3.29: Proje Sistem Mimarisi 100
Şekil 4.1: Modül Programlama Görseli 102
Şekil 4.2: Kontrol Modülü ve Dengeleyici Modül Haberleşme Kurulumu 103
Şekil 4.3: Dengeleyici Modül-1 Veri Akışı Görseli 103
Şekil 4.4: Dengeleyici Modül-2 Veri Akışı Görseli 103
Şekil 4.5: Dengeleyici Modül Adres Belirleme 104
Şekil 4.6: Dengeleyici Modül İletilen Veri Seti 105
Şekil 4.7: Kontrol Modülü Gelen Veri Seti 105
Şekil 4.8: Sınıflandırılmış Verilerin Yazılım Arayüzü 106
Şekil 4.9: Dengeleyici Modül Sensör Verileri Hesaplama 106
Şekil 4.10: Kontrol Modülü Sensör Verileri Hesaplama 107
Şekil 4.11: Texas Instruments CC2662 Serisi Mikrodenetleyici Geliştirme Kartı Görseli ... 107
Şekil 4.12: SmartRF Studio 7 Kullanıcı Arayüzü Görseli 108
Şekil 4.13: Kablosuz Haberleşme Ayar Arayüzü 108
Şekil 4.14: Ayar Ekranı Değişiklikleri Görseli 109
Şekil 4.15: Kablosuz Veri Aktarım Ekranı 109
Şekil 4.16: Kontrol Modülü Yazılım Arayüzünde Dengeleyici Modül-2 Verileri 110
Şekil 4.17: Kontrol Modülü Üst Görünümü 111
Şekil 4.18: Kontrol Modülü Alt Görünüm 111
Şekil 4.19: Dengeleyici Modül Üst Görünümü 111
Şekil 4.20: Dengeleyici Modül Alt Görünüm 112
Şekil 4.21: Engelsiz Oda Test Ortamı Mimarisi 117
Şekil 4.22: Engelsiz Oda Test Ortamı Görseli 117

Şekil 4.23: Cam Bölmeli Oda Test Ortamı Mimarisi 118

Şekil 4.24: 3 Adet Lityum Batarya ile Dengeleme Testi Grafiği..... 118

Şekil 4.25: 3 Adet Lityum Batarya ve 1 Adet Güç Kaynağı Gerilim Seviyeleri Grafiği 119

Şekil 4.26: Lityum Batarya ve Güç Kaynağı Akım Değerleri Grafiği 120

Şekil 4.27: 3 Adet Lityum Batarya ve 1 Adet Güç Kaynağı Gerilim Seviyeleri Grafiği-2 ... 121

Şekil 4.28: 4 Adet Lityum Bataryanın Gerilim Seviyeleri Grafiği 122

Şekil 4.29: 4 Adet Lityum Bataryanın Sıcaklık Değerleri Grafiği 123

Şekil 4.30: 4 Adet Lityum Bataryanın Gerilim Dengesizliği Test Grafiği 124

Şekil 4.31: Yüksek Kapasiteli Lityum Bataryalar ile Dengeleme Testi 125

Şekil 4.32: Yüksek Kapasiteli Lityum Bataryalar ile Dengeleme Testi-2 125

Şekil 4.33: Dengeleyici Modüllerin Dengeleme Akımı Grafiği 126

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Birincil ve İkincil Bataryaların Karşılaştırılması [23] 13

Tablo 2.2: LCO Batarya Özellikleri [30] 22

Tablo 2.3: NCA Batarya Özellikleri [30] 23

Tablo 2.4: LFP Batarya Özellikleri [30] 24

Tablo 2.5: NMC Batarya Özellikleri [30] 25

Tablo 2.6: LMO Batarya Özellikleri [30] 27

Tablo 2.7: LTO Batarya Özellikleri [30] 28

Tablo 2.8: Farklı Dengeleme Mimarilerinin Avantaj ve Dezavantajları [64] 50

Tablo 2.9: Kablolu ve Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Karşılaştırması [83] 61

Tablo 2.10: Bluetooth Teknolojisi Özellikleri 65

Tablo 2.11: Zigbee Haberleşme Protokolü Genel Bilgiler 66

Tablo 3.1: Dengeleyici Modül Devre Tasarımı Teknik Bilgileri 73

Tablo 3.2. Kontrol Modülü Devre Tasarımı Teknik Bilgileri 75

Tablo 3.3. NTC Termistör Sıcaklık-Direnç Değerleri Tablosu 82

Tablo 3.4: Dengeleyici Modül Güç Tüketim Tablosu 87

Tablo 3.5: Kontrol Modülü Güç Tüketim Tablosu 87

Tablo 3.6. Kablosuz Mikrodenetleyici Teknik Özellikleri 94

Tablo 4.1: Kontrol Modülü Test Sonuçları 113

Tablo 4.2: Dengeleyici Modül Test Sonuçları 115

Tablo 5.1: Kablosuz Protokollerin Karşılaştırılması 128

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Ampere
Ah	: Ampere-hour
C	: Capacity
℃	: Centigrade
dBm	: Decibel-milliwatts
GHz	: Gigahertz
GWh	: Gigawatt-hour
Hz	: Hertz
Kbps	: Kilobits per second
kg	: Kilogram
KΩ	: Kiloohm
m	: Meter
mA	: Milliampere
mAh	: Milliampere-hour
MHz	: Megahertz
mV	: Millivolt
mW	: Milliwatt
sn	: Second
um	: Micrometer
V	: Volts
Wh	: Watt-hour
Wh/kg	: Watt-hour per kilogram
Wh/L	: Watt-hour per liter

Kısaltmalar	Açıklama
AC	: Alternating Current
ADC	: Analog to Digital Converter
ADI	: Analog Devices, Inc.

AEC : Automotive Electronics Council

AES : Advanced Encryption Standart

ASIL-D : Automotive Safety Integrity Level D

BLE : Bluetooth Low Energy

BMS : Battery Management System

BYS : Batarya Yönetim Sistemi

CAN-Bus : Controller Area Network Bus

CC : Constant Current

CID : Charge Interruption Device

CV : Constant Voltage

DC : Direct Current

DM : Dengeleyici Modül

DOD : Depth of Discharge

ECU : Engine Control Unit

EDR : Enhanced Data Rate

EIS : Electrochemical Impedance Spectroscopy

EV : Electrical Vehicle

FreeRTOS : Free Real-Time Operating System

GK : Güç Kaynağı

GPIO : General Purpose Input/Output

HS : High Speed

I2C : Inter-Integrated Circuit

IEA : International Energy Agency

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT : Internet of Things

ISM : Industrial, Scientific and Medical

ISO/SAE : International Organization for Standardization/Society of Automotive Engineers

JTAG : Joint Test Action Group

KBYS : Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi

KM : Kontrol Modülü

LCO : Lithium Cobalt Oxide

LE : Low Energy

LFP : Lithium Iron Phosphate

Li-Ion : Lithium-Ion

Li-Po : Lithium-Polymer
Li-S : Lithium-Sulfur
LMO : Lithium Manganese Oxide
LTO : Lithium Titanate Oxide
MCU : Microcontroller Unit
NCA : Nickel Cobalt Aluminum
NFC : Near Field Communication
Ni-Cd : Nickel-Cadmium
Ni-MH : Nickel-Metal Hydride
NMC : Nickel Manganese Cobalt
NTC : Negative Temperature Coefficient
PCB : Printed Circuit Board
PE : Polietilen
PID : Proportional-Integral-Derivative
PLM : Phase Change Materials
PP : Polipropilen
PTC : Positive Temperature Coefficient
RF : Radyo Frekans
ROM : Read-Only Memory
RS : Recommended Standard
RX : Receive
SD : Secure Digital
SEI : Solid Electrolyte Interphase
SOC : State of Charge
SOH : State of Health
SRAM : Static Random Access Memory
SSI : Synchronous Serial Interface
TEC : Thermoelectric Cooler
TI : Texas Instruments
TIM : Thermal Interface Material
TX : Transmit
UART : Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
WBMS : Wireless Battery Management System
Wi-Fi : Wireless Fidelity

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİTYUM TABANLI BATARYALAR İÇİN KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Ender DÖNMEZ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Gelişen teknolojiler ile birlikte lityum tabanlı bataryaların günlük yaşamdaki kullanım alanları sürekli olarak artış göstermektedir. Özellikle elektrikli araçlardaki ve yenilenebilir enerji santrallerindeki yüksek enerji talebi hem lityum tabanlı bataryaların kullanım alanlarını artırmakta hem de yeni teknolojilerin araştırılmasına öncülük etmektedir. Kullanıldıkları sistemlerde en kritik unsur olan lityum tabanlı bataryalar, sürekli olarak uygun sıcaklık ve gerilim değerlerinde tutulmalıdır. Bu nedenle lityum tabanlı batarya paketlerinde uygun sıcaklık ve gerilim değerlerinde çalışılmasına olanak sağlayan Batarya Yönetim Sistemleri kullanılmaktadır. Batarya Yönetim Sistemleri, batarya paketindeki tüm hücrelerin gerilimlerini izlemekte, sıcaklık değerlerini kontrol etmekte ve soruna yol açabilecek veriler tespit ettiğinde ise güvenlik amacıyla sistemi kapatabilmektedir. Aynı zamanda batarya şarj durumu, batarya sağlık durumu, deşarj oranı vb. gibi birçok matematiksel hesaplamaları da yaparak kullanıcıyı bilgilendirmektedir. Geleneksel Batarya Yönetim Sistemleri, merkezi bir işlemci birimi ve ona bağlı olan yardımcı birimler ile sensörler arasında zincirleme bir mimari kullanmaktadır. Bu zincirleme mimari içeriği kablolu haberleşme ve kablolu sensör ara bağlantılarını kapsamaktadır. Haberleşme ve sensörler için kullanılan kablolu sistemler, karmaşık batarya

paketlerinde güvenlik ve verimlilik problemlerine yol açabilmektedir. Bu nedenle karşılaşılan problemlere çözüm sunabilmek amacıyla alternatif mimari tasarımları arayışına gidilmiştir.

Bu tez çalışmasında, Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ile kabloların bataryalar arasında yol almasının önüne geçilmekte, batarya paketi içerisinde yer alan modüllerin seri bir haberleşme arayüzüne ihtiyaç duymadan kablosuz olarak haberleşebilmesi sağlanmakta, gerinim ölçer sensörleri vasıtasıyla bataryalarda oluşabilecek şişme gibi fiziksel deformasyonlar saptanabilmekte ve hücre dengeleme sistemi için kullanılan devrelerdeki izoleli elektronik komponent kullanımı ortadan kaldırılmaktadır. Sistem tasarımı içerisinde yer alan bu özellikler ile batarya paketi güvenliği artırılmış ve entegrasyon veya onarım gibi işlemlerin süreçlerinin kısalması sağlanmıştır. Kontrol Modülü üzerinden elde edilen veriler kaydedilerek batarya paketinin kullanımı ile ilgili teknik veriler kullanıcıya sunulmuştur. Kablosuz haberleşme altyapısı desteğiyle sensörler gibi harici güvenlik ekipmanlarının batarya paketine entegre edilebilmesi geleneksel sistemlere göre daha da kolay hale getirilmiştir.

Haziran 2025 , 167 sayfa.

Anahtar kelimeler: Batarya Yönetim Sistemi (BYS), Hücre Dengeleme, Şişme Tespiti, Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi (kBYS), Kablosuz Haberleşme

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

WIRELESS BATTERY MANAGEMENT SYSTEM DESIGN FOR LITHIUM-BASED BATTERIES

Ender DÖNMEZ

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering Program

Supervisor: Prof. Dr. Fırat KAÇAR

With the advancement of technology, the applications of lithium-based batteries in daily life have been continuously expanding. In particular, the high energy demand in electric vehicles and renewable energy power plants not only increases the usage areas of lithium-based batteries but also drives the investigation of novel technologies. As the most critical component of the systems in which they are employed, lithium-based batteries must be consistently maintained within appropriate temperature and voltage ranges to ensure safe and efficient operation. To meet this requirement, Battery Management Systems (BMS) are integrated into lithium-based battery packs to regulate and monitor temperature and voltage levels. BMSs monitor the voltages of all cells within the battery pack, track temperature data, and have the capability to shut down the system for safety if any parameter deviates from safe limits. In addition, they perform various mathematical calculations—such as determining the State of Charge (SoC), State of Health (SoH), and discharge rates—to keep the user informed about the current condition of the battery system. Traditional Battery Management Systems are built on a daisy-chain architecture involving a central processing unit and several peripheral modules

connected through sensors and wired communication interfaces. This architecture typically includes numerous wired connections for both data communication and sensor interlinking. However, such wired infrastructures can introduce safety hazards and efficiency losses, especially in complex or large-scale battery configurations. As a response to these challenges, researchers and engineers have sought alternative architectural designs that reduce complexity and enhance system reliability.

In this thesis study, the design of a Wireless Battery Management System (WBMS) eliminates the need for physical cabling between battery modules, enabling wireless communication among modules within the battery pack without relying on a serial communication interface. Additionally, potential physical deformations—such as battery swelling—can be detected through strain gauge sensors integrated into the system. The use of isolated electronic components traditionally required for cell balancing circuits has also been eliminated, thereby simplifying the overall system design. These design features contribute to enhanced battery pack safety and enable significant reductions in system integration and maintenance times. Data collected via the Control Module is stored and processed to provide the user with essential technical information regarding the battery pack's operational performance. Furthermore, the adoption of a wireless communication infrastructure facilitates the seamless integration of external safety equipment—such as sensors—into the battery system, making it considerably more adaptable than conventional wired systems.

June 2025, 167 pages.

Keywords: Battery Management System (BMS), Cell Balancing, Swelling Detection, Wireless Battery Management System (wBMS), Wireless Communication

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiler ile birlikte elektrik enerjisi ihtiyacı sürekli olarak artış göstermektedir. Artan bu talep karşısında yeni enerji üretim tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ev, ofis, fabrika vb. gibi sabit konuma sahip yapılardaki enerji, büyük oranda hidroelektrik, petrol, gaz gibi enerji santrallerinden elde edilmektedir. Fakat kullanılan bu enerji kaynakları yenilenemez enerji türleri olduğu için çevre sorunlarına yol açmaktadır. Bu duruma ek olarak enerji ihtiyacının artış göstermesi, elektrik enerjisinin daha verimli kullanılması konusunda çalışmalar yapılmasına sebep olmuştur [1].

Günlük yaşamda elektrik enerjisi daha çok taşınabilir sistemlerde kullanılmaktadır. Taşınabilir cihazların başında da bilgisayarlar ve cep telefonları gelmektedir. Taşınabilir cihazlardaki artan enerji talebi ile batarya teknolojilerinin gelişimi hız kazanmıştır. Laboratuvar ortamlarında farklı kimyasal yapılar bir araya getirilerek kapasiteyi artırma çalışmaları yürütülmektedir. Kapasite artışının yanında bataryaların ağırlığı da önem kazanmaktadır. Bu nedenle taşınabilir cihazların tasarımlarında batarya seçimi yapılırken kapasite/ağırlık oranı dikkate alınmaktadır. Yapılan birçok literatür çalışmasında ve kullanılan çoğu bataryaya sahip elektronik cihazlarda kapasite/ağırlık oranı en yüksek pil türü lityum tabanlı piller olarak kabul edilmektedir [2]. Lityum tabanlı piller genel olarak yüksek enerji yoğunluğu ve düşük ağırlık istenen sistemlerde sıklıkla tercih edilmektedir.

Lityum tabanlı piller tek hücre halinde kullanıldıklarında kolay bir kontrol yapısına sahiptir. Fakat hücre sayısının artması ile kontrol sistemleri karmaşık hale gelmektedir. Cep telefonlarında tek lityum hücre kullanıldığından dolayı basit bir sistem söz konusudur. Ancak elektrikli aracı örnek alırsak sistem oldukça karmaşık yapıdadır. Birden fazla batarya hücresinin bir araya gelmesiyle oluşan karmaşık batarya sistemi mimarilerinin, hücre dengelemesi, batarya paketi kontrolü, elektriksel güvenlik, üretim ve paketleme, termal yönetim vb. gibi birçok zorluğu bulunmaktadır.

Lityum tabanlı olarak geliştirilen bataryalar, birden fazla seri bağlantı yapısında kullanıldıklarında, şarj ve deşarj esnasında farklı gerilim seviyelerine sahip olabilmektedir. Bu gerilim seviyelerindeki fark, lityum tabanlı bataryaların kimyasal yapılarından

kaynaklanmaktadır. Batarya paketi içerisinde yer alan tüm seri grubun gerilim seviyelerinin belirli bir aralıkta olması sistemin daha güvenli ve verimli çalışmasına imkan sağlamaktadır. Olası bir gerilim dengesizliği lityum bataryalarda patlamaya neden olabilmektedir. Bu nedenle lityum tabanlı batarya sistemlerinde, gerilim seviyelerini eşitlemek amacıyla dengeleyici sistemler, uygun sıcaklık değerlerini ve gerilim değerlerini izlemek amacıyla izleme ve ikaz sistemleri kullanılmaktadır.

Lityum tabanlı bataryalarda pasif ve aktif olmak üzere iki farklı dengeleme metodu kullanılmaktadır. Pasif olarak çalışan dengeleyici sistemler bataryaların enerjisini seri bir direnç üzerinden harcarken, aktif olarak çalışan sistemler boşa gitmesi planlanan enerjiyi dönüştürerek tekrar batarya paketine geri kazandırmaktadır. Aktif sistemler verimlilik açısından daha iyi olsalar da karmaşık yapılarından ve kontrol sistemlerinden dolayı çok fazla tercih edilmemektedirler. Dengeleyici olarak tasarlanan kontrol sistemleri her lityum batarya üzerinden kablo ile ölçüm alma temeline dayanmaktadır. Bu durum, karmaşık sistemlerde yüzlerce kablonun bataryaların arasında yol alarak, arıza ve tehlikeli durumlar oluşmasına sebebiyet vermektedir. Aynı zamanda üretim aşamasında hem uzun süren batarya paketi entegrasyonlarına hem de ciddi bir maliyet kaybına yol açmaktadır. Özellikle elektrikli araçlarda ve yüksek batarya kapasitesine sahip yerleşik enerji depolama sistemlerinde çok sık görülen bu dezavantajları ortadan kaldırmak için kablosuz sistemlere yönelim gözlemlenmektedir.

Shell ve diğ. [3] çalışmalarında, Oklahoma Üniversitesi Sooner Electric Racing (SER) ekibinin yarış için tasarlamış olduğu elektrikli go-kart aracındaki güvenilirlik sorununa çözüm üretmek amacıyla, modüler değişimli bir batarya paketi tasarımına ve Bluetooth tabanlı bir kablosuz batarya yönetim sistemi uygulamasına değinmektedir. Modüller arası veri haberleşmesi için ise Bluetooth tabanlı bir batarya yönetim sistemi kullanılmaktadır. Bu sayede kablo tipi batarya yönetim sisteminde yaşanılan temas sorunu kaynaklı veri kesilmesinin önüne geçilmektedir.

Bansal ve Nagaraj [4] çalışmalarında, geleneksel batarya yönetim sistemlerinde kullanılan izole-SPI ve izole-CAN gibi kablolu tip haberleşme mimarilerinin dezavantajlarından yola çıkarak farklı kablosuz protokoller üzerinde detaylara yer vermektedir. Yapılan çalışma, kablosuz sistemler temelinde kullanılabilecek olan ZigBee/ZigBee-Pro, Bluetooth Low Energy (BLE5.0), Yakın Alan İletişimi (NFC), Wi-Fi (IEEE 802.11), Wi-Fi

HaLow (IEEE 802.11 ah) protokollerini menzil, güç ve verimlilik açısından karşılaştırmaktadır. Wi-Fi tabanlı protokollerin uygulanması maliyet anlamında dezavantaj sağlamaktadır. Yakın Alan İletişimi (NFC) ise menzil anlamında diğerlerine göre kısıtlıdır. İlgili çalışma, en ideal çözümün ZigBee veya Bluetooth tabanlı protokollerin olduğunu vurgulamaktadır.

Kablosuz olarak tasarlanan sistemler, sadece batarya yönetim sistemleri özelinde kısıtlı kalmamaktadır. Kablosuz batarya yönetim sistemlerinin diğer farklı sistemler ile yine kablosuz olarak haberleşmesi de çalışmalara konu olmaktadır. Gherman ve diğ. [5] çalışmalarında, kablosuz batarya yönetim sistemini herhangi bir elektriksel bağlantı olmadan yine kablosuz olarak Seviye 2 şarj cihazı ile birleştirmektedir. Çalışmanın amacı, batarya yönetim birimlerini ve şarj kontrol birimlerini ortak bir noktadan kontrol edebilmektir. Bu sayede hem kablolu sistemlerin ortadan kaldırılması hem de entegrasyon açısından büyük bir avantaj sağlanması planlanmaktadır.

Huang ve diğ. [6] çalışmalarında kablosuz batarya yönetim sistemi kullanarak, batarya seri gruplarındaki şarj durumuna (SOC) ve sağlık durumuna (SOH) dayanan denge algoritmaları öne sürmektedir. Farklı batarya gruplarındaki değerleri kablosuz batarya dengeleme sistemi ile kontrol ederek, iki adımlı hücre dengeleme algoritması üzerine önerilerde bulunmaktadır.

Kablosuz batarya yönetim sistemlerinde farklı tiplerde kablosuz haberleşme protokolleri kullanılmaktadır. Tüm bu kablosuz protokollerde en önemli unsurlardan birisi şüphesiz ağ güvenliğidir. Faika ve diğ. [7] çalışmalarında, IoT özellikli bir kablosuz batarya yönetim sisteminin kötü niyetli siber saldırılara karşı, kablosuz sistemin iletişimini ve veri güvenliğini sağlamak için bir blockchain teknolojisi araştırmaktadır. Çalışmanın asıl amacı, olabilecek bir siber saldırı altında batarya paketindeki pilleri kontrol eden elektronik blokların ele geçirilmesine karşı güvenli bir ortam yaratmaktır.

Bu tez çalışmasında belirtilen kablosuz batarya yönetim sistemi tasarımı ile kabloların bataryalar arasında yol almasının önüne geçilmekte, batarya yönetim sistemi ekipmanlarının seri bir haberleşme arayüzüne ihtiyaç kalmadan kablosuz haberleşmesi sağlanmakta, stres sensörleri vasıtasıyla bataryalarda oluşabilecek şişme gibi fiziksel deformasyonlar saptanabilmekte ve batarya dengeleme sistemi için kullanılan devrelerdeki izoleli elektronik komponent kullanımı ortadan kaldırılmaktadır. Sistem tasarımı içerisinde yer alan bu özellikler ile batarya paketi güvenliğinin artırılması ve entegrasyon veya onarım gibi işlemlerin

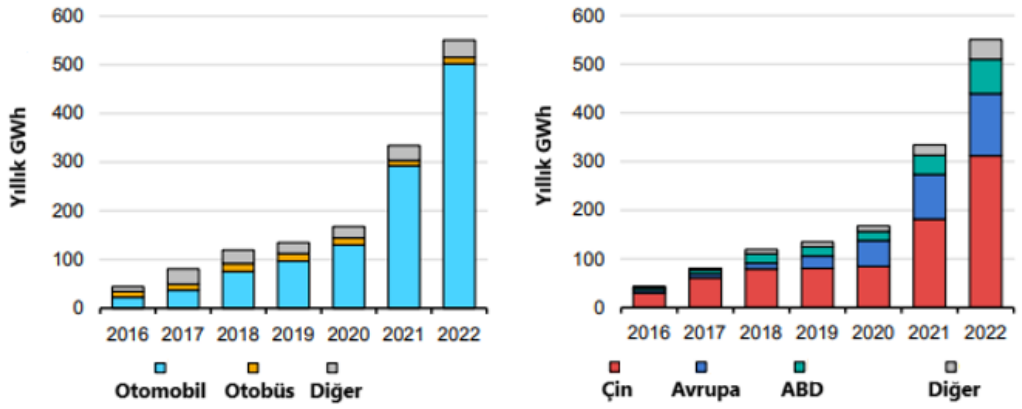
süreçlerinin kısaltılması amaçlanmaktadır. Aynı zamanda verilerin kablosuz olarak ana kontrolcü tarafından kayıt edilmesi ile elektrikli araçlar veya taşınabilir lityum batarya tabanlı sistemler ile ilgili yapay zeka kaynaklı enerji tüketimi, batarya sağlık durumu, batarya çevrim durumu gibi verilerin istenilen periyot aralığında analiz edilebilmesine olanak sağlanmaktadır. Projenin kablosuz haberleşme altyapısı olması nedeniyle sensörler gibi harici güvenlik ekipmanlarının platforma dahil edilebilmesi geleneksel sistemlere göre daha kolay olmaktadır. Tasarımı yapılan bu kablosuz batarya yönetim sistemi, sadece elektrikli araçları değil, lityum bataryaların fazlaca kullanıldığı tüm sistemleri de ürün pazarına dahil etmektedir. Giderek artan yenilenebilir enerji kaynaklarındaki (özellikle rüzgar ve güneş enerjisi) enerji depolama sistemleri de kablosuz batarya yönetim sisteminin kullanılacağı yeni bir alan olarak değerlendirilmektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. BATARYA TEKNOLOJİSİ

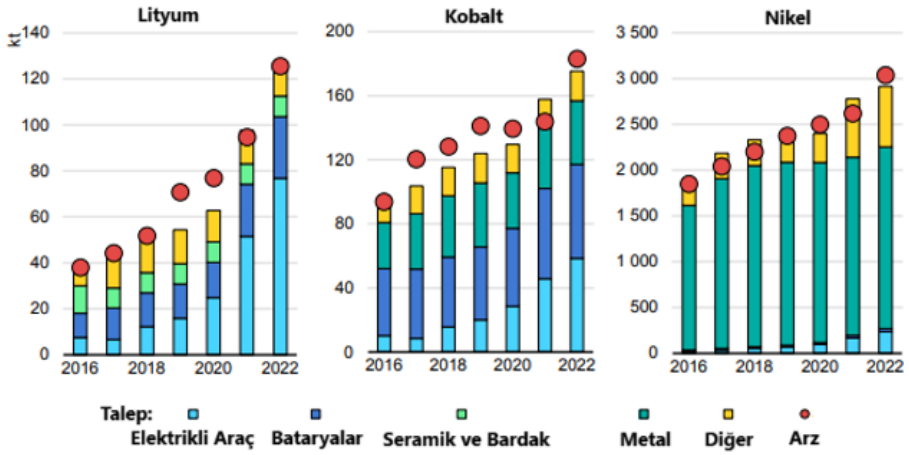
Gelişen teknolojiler ile birlikte taşınabilir cihazların çeşitliliği sürekli olarak artış göstermektedir. Temizlik robotları, insansı robotlar, elektrikli süpürgeler, cep telefonları, tabletler, elektrikli araçlar vb. birçok ticari ürün taşınabilir cihaz olduğu için batarya kullanmaktadır. Fakat her cihazın farklı kullanım alanı ve buna bağlı olarak farklı isteri bulunmaktadır. Bu nedenle elektronik cihazlarda farklı tip bataryalar tercih edilmektedir. Ticari ürünler arasında kullanıcılar tarafından en çok tercih edilen batarya türleri kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel-metal-hidrit, lityum-iyon ve lityum-polimer'dir. Bu bataryalar arasında ise özellikle lityum tabanlı bataryalar, yeni bir batarya teknolojisi olduklarından dolayı büyük bir gelişme göstermektedir. Lityum tabanlı bataryaların tercih sebebi olmasının arkasındaki en büyük etkenler, ağırlıklarının düşük ve enerji yoğunluklarının yüksek olmasıdır [8, 9].

Batarya kullanım oranının son zamanlarda en çok artış gösterdiği sektör otomotiv'dir. Bu sektöre baktığımızda ise elektrikli araç pazarındaki batarya türlerinde lityum tabanlı bataryalara doğru bir kayma görülmektedir. Sadece otomotiv sektöründeki lityum-iyon (Li-ion) batarya talebinin, 2021 yılında 330 GWh iken, 2022 yılında yaklaşık %65 artış göstererek 550 GWh olduğu görülmektedir [10]. Şekil 2.1 üzerinde sektördeki araç tiplerine ve bölgelere göre batarya talebi detaylı olarak gösterilmektedir.



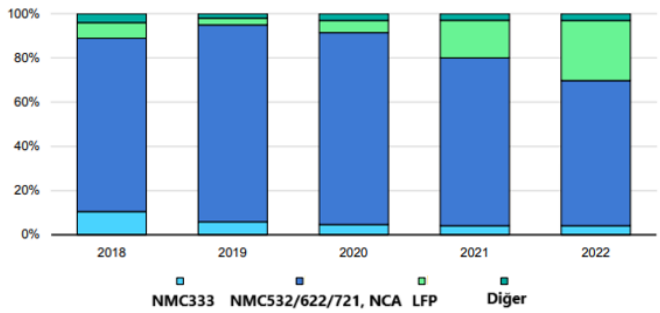
Şekil 2.1: Araç Tiplerine ve Bölgelere Göre Batarya Arz-Talep Verileri [10]

Lityum batarya talebindeki artış farklı kimyasallara olan malzeme talebini de artırmaktadır. 2017-2022 yılları arasında batarya üretiminde %180 artış yapılmış olsa da sektörde oluşan talebin arzı aştığı görülmektedir. Sadece 2022 yılında, toplam lityum talebinin yaklaşık %60, toplam kobalt talebinin %30'u ve toplam nikel talebinin %10'unun elektrikli araç sektöründe kullanıldığı görülmektedir [10]. Şekil 2.2 üzerinde batarya kimyasallarının arz talep detayları gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Batarya Kimyasalları Arz-Talep Verileri [10]

Lityum bataryalarda kullanılan kimyasalların pazardaki kullanım paylarına baktığımızda ise NMC türünün yaygın olduğu görülmektedir. 2018-2022 yıları arasında, lityum-nikel-manganez-kobalt-oksit (NMC) batarya türünün pazar payının yaklaşık %60 olduğu görülmektedir. %30'luk bir Pazar payı ile NMC türü bataryayı lityum-demir-fosfat (LFP) batarya türü takip etmektedir. Yine bir başka lityum batarya türü olan lityum-nikel-kobalt-alüminyum-oksit (NCA) ise pazardaki %8'lik payı ile üçüncü sırada yer almaktadır [10]. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) verilerine bakıldığında lityum-demir-fosfat (LFP) batarya türlerinin de ciddi bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu artışın sebebi elektrikli hafif ticari araçlara yönelimin artmasıdır. Üretimi yapılan LFP türü bataryaların %95'i Çin'de üretilen araçlarda kullanılmaktadır. Bu %95'lik kısmın %50'sini tek başına BYD markası üstlenmektedir. Tesla Motors LFP batarya türü pazarının %15'lik kısmını oluşturmaktadır [10]. Şekil 2.3 üzerinde farklı batarya kimyalarının yıllara göre kullanılma yüzdeleri verilmektedir.



Şekil 2.3: Batarya Kimyalarının Yıllara Göre Kullanım Verileri [10]

Lityum tabanlı bataryalar birçok alanda diğer batarya türlerine göre ciddi avantajlar sunmaktadır. Hücre başına gerilim değerleri 3-5 Volt mertebelerinde olduğu için düşük bir akım çekilme durumunda uzun süre enerji sağlayabilmektedirler. Aynı zamanda yüksek enerji yoğunluğuna sahip oldukları için hafif ve küçük hacimlidirler. Lityum bataryalarda, nikel-kadmiyum ve nikel-metal-hidrit türü bataryalarda olduğu gibi hafıza etkisi bulunmamaktadır. Dolayısıyla uzun raf ömürlerine sahiptirler. Buna ek olarak iyi şarj tutma özelliğinden kaynaklı olarak yüksek deşarj akım kapasitelerine sahiptirler. Lityum bataryaların en önemli dezavantajları maliyet ve güvenlik sorunlarıdır. Diğer batarya türlerine göre oldukça pahalıdırlar. Ayrıca kullanımları esnasında güvenlik nedeniyle kontrol ve yönetim devrelerine ihtiyaç duymaktadırlar. Ticari olarak kullanılan lityum bataryaların birden fazla kimyasal türü bulunmaktadır [11].

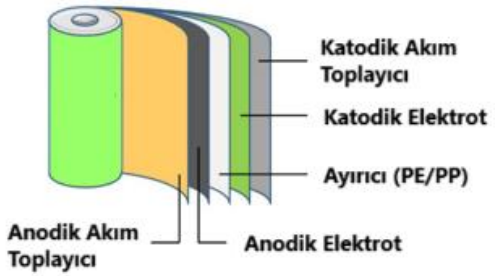
Örneğin; cep telefonları, laptop gibi elektronik cihazlarda en yaygın kullanılan lityum batarya türü lityum-kobalt-oksit'tir (LiCoO2/LCO). Elektrikli araç sektörünün öncülerinden olan Tesla Motors'da bu lityum batarya türlerini kullanmaktadır [12]. Yangın tehlikesi olabilecek cihazlarda ise lityum-demir-fosfat (LiFePO4/LFP) sıklıkla tercih edilmektedir. Bu bataryalar oldukça uzun ömre sahiptir. Aynı zamanda düşük maliyete, yüksek güç kapasitelerine ve yüksek seviyede güvenliğe sahiptir [13, 14]. Fakat düşük sıcaklıklarda çok iyi performans göstermemektedirler.

Bataryalar kullanım alanlarına göre yüksek enerji yoğunluğu ya da yüksek güç yoğunluğu gibi farklılaştırılabilmektedir. Güç yoğunluğu, deşarj esnasında kg veya litre cinsinden ne kadar enerji açığa çıkarılabildiğidir. Enerji yoğunluğu ise kg veya litre cinsinden enerji miktarıdır. Yüksek enerji yoğunluklu bataryalar, akım kapasitesinin düşük olduğu yani uzun süre çalışılabilirlik istenilen cihazlar için tercih edilmektedir. Yüksek güç yoğunluklu bataryalar ise anlık akım değerlerinin yüksek olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir [11].

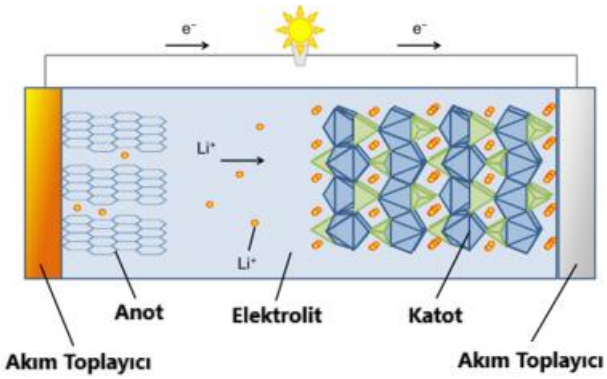
2.1.1. Batarya Bileşenleri

Bataryalar, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve hemen hemen her alanda yaygın olarak kullanılan doğru akım enerji kaynağıdır. Cep telefonları, elektrikli otomobiller, dizüstü bilgisayarlar, uçaklar, yenilenebilir enerji kaynakları depolama sistemleri bataryaların en yaygın kullanıldıkları alanlar arasında gösterilebilir. Elektrikli araçlarda tek ve ana güç kaynağı olarak kullanılan bataryalar, uçaklarda ikincil yani yedek güç kaynağı olarak kullanılmaktadır [15, 16].

Bataryalar genel olarak üç ana başlık altında incelenmektedir. Bunlar; anot (negatif elektrot), katot (pozitif elektrot) ve elektrolitlerdir [15]. Bataryalardaki enerji oluşumu elektrokimyasal redoks tepkimeleri sonucunda meydana gelmektedir. Redoks tepkimesi, elektronların bir maddeden diğer maddeye bir elektrik devresi aracılığıyla iletilmesi olarak açıklanabilir [16]. Şekil 2.4 üzerinde silindirik bir bataryanın yapısı ve sarılmış hali gösterilmektedir. Şekil 2.5 üzerinde sarılmış bir batarya yapısının daha detaylı iç yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Silindirik Batarya Yapısı [17]



Şekil 2.5: Silindirik Batarya İç Yapısı [17]

- **Anot (Negatif Elektrot)**

Anot bir diğer adı ile negatif elektrot, elektrokimyasal reaksiyon esnasında oksitlenen ve elektronları dış devreye aktararak elektron akışını başlatan kısımdır. Negatif elektrotta yer alan malzemenin bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bunlar; iyi iletkenliğe sahip olmak, indirgeyici madde olarak yüksek verimli olmak, kolay imal edilebilir olmak ve düşük maliyete sahip olmaktır [18, 19]. 2000'li yıllara kadar anot malzemesi olarak çinko elementi kullanılmaktaydı. Fakat 2000'li yıllardan sonra çinko elementinin yerini lityum elementi almaya başlamıştır. Mevcut batarya yapılarında üç farklı aktif malzeme kullanılmaktadır. Bunlar; saf lityum metali, lityum alaşımları ve grafittir. Lityum elementi, standart bir hidrojen elektroduna göre en hafif ve en elektropozitif olanıdır. Fakat batarya üretimi sırasında saf lityumun işlenmesi, oksijen ve su ile güçlü reaksiyonlar nedeniyle zordur. Bu durum da maliyeti oldukça artırmaktadır. Maliyet artışı ticari alanlarda istenmeyen bir unsur olduğu için grafit malzemesinin bataryalarda daha sık kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Grafit'in lityum elementine göre kapasitesi (Ah/kg) düşük olsa da üretiminin kolay olması ve buna bağlı olarak maliyetinin düşük olması daha fazla tercih edilmesine olanak sağlamaktadır [17, 18].

- **Katot (Pozitif Elektrot)**

Katot bir diğer adı ile pozitif elektrot, elektrokimyasal reaksiyon esnasında indirgenen ve elektronları dış devreden alan kısımdır. Pozitif elektrotta yer alan malzemenin bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir [19]. Bunlar; reaksiyon sırasında lityum elementi ile yüksek serbest enerjiye sahip olmak, elektrolitte çözünmeyen bir yapıya sahip olmak, üretim süreçlerinde düşük maliyete sahip olmak ve yapısal anlamda bir bozulmaya maruz kalmadan lityum elementi ile ters tepkimeye girebilmektir [18]. Lityum tabanlı bataryalarda en yaygın kullanılan katot malzemeleri $LiCoO_2$ ve $LiFePO_4$'tür. Bu malzemelerin tercih edilmelerinin asıl sebebi yarı hücre potansiyellerinin yüksek olmasıdır [18]. Katot kısmı için iki tür elektrot bulunmaktadır. Bunlar; interkalasyon ve dönüşüm elektrotlarıdır. İnterkalasyon elektrotları, lityum iyonlarının araya girebileceği bir ana malzeme olarak işlev görmektedir. Bu elektrot tipleri için genel olarak $LiCoO_2$ kullanılmaktadır. Bu bileşik NCA (Ni–Co-Al) ve NMC (Ni-Mn-Co) gibi farklı metaller de içerdiği için en çok kullanılan malzeme türü haline gelmiştir [17]. Diğer elektrot çeşidi olan dönüşüm elektrotları ise aynı davranışı göstermemektedir. Şarj etme veya deşarj işlemlerinde iki farklı fazı bir arada bulundurmaktadır. Dönüşüm elektrodu

olan LiFePO4'ün yarı hücre potansiyeli bir miktar daha düşüktür. Fakat yine de tercih sebebi olabilmektedir [17].

- **Elektrolitler**

Elektrolitler, batarya iç yapısında yer alan ayırıcı, anot ve katot arasındaki teması engelleyen, iyon taşınmasına yardımcı olan önemli bir kısımdır. İyi bir elektrolitte olması gereken bazı özellikler vardır. Bunlar; düşük omik direnç göstermek, iyi bir iyonik iletkenliğe sahip olmak, yüksek güvenliğe sahip olmak, maliyet etkin olmak, elektrotlarla kimyasal reaksiyona girmiyor olmak, elektrotların doğrudan temasıyla sonuçlanabilecek ayırıcının büzülmesini veya erimesini önlemek için termal stabiliteye sahip olmak ve iyi tanımlanmış bir gözenek boyutuna sahip olmaktır. Elektrolitler arasında termal kaynaklı güvenliği artırmak amacıyla kapatma mekanizması biçiminde ayırıcılar kullanılmaktadır. Günümüzde çoğu bataryada ayırıcı olarak PE (Polietilen) – PP (Polipropilen) çift katmanlı ayırıcı kullanılmaktadır. Polietilen'in (PE) kapanma sıcaklığı (PE'nin erime noktası) yaklaşık olarak 130 ℃'dir. Polipropilen'in ise kapanma sıcaklığı (PP'nin erime noktası) yaklaşık olarak 165 ℃'dir. Burada bahse konu olan kapanma mekanizması ifadesi, malzemelerin erime sıcaklığına ulaştıkları için iyon taşınmasının engellenmesi anlamına gelmektedir [17, 18, 19].

2.1.2. Bataryaların Sınıflandırılması

Bataryalar, kimyasal yapıları, boyutları, kullanım durumları vb. gibi birçok parametre özelinde sınıflandırılabilirler. Fakat tüm parametreler göz önüne alındığında genel olarak iki tür batarya vardır. Bunlar;

1. Birincil (şarj-edilemez) Bataryalar
2. İkincil (şarj-edilebilir) Bataryalar

Birincil sınıf altında yer alan bataryalarda elektrotlardan biri aşınmaktadır. Aşınan bu elektrot genellikle negatif elektrottur. Bu nedenle tekrar kullanılma imkanı yoktur. İkincil sınıfta yer alan bataryalarda ise bu durum söz konusu değildir. İkincil bataryalar, elektrotların ve elektrolitin, hücre akım sağladığında meydana gelen kimyasal etkiyle değiştirildiği bataryalardır [15]. Deşarj yönüne ters yönde bir akım geçirildiğinde tekrar ilk durumlarına geri dönebilmektedir. Bu nedenle tekrardan kullanılabilmeleri söz konusudur.

- **Birincil (Şarj-Edilemez) Bataryalar**

Birincil bataryalar, kullanıldıklarında tekrar şarj edilemeyen bataryalar olarak adlandırılmaktadır. Bu durum bataryalar içerisinde kullanılan materyallerin, elektrokimyasal reaksiyonu tersine çeviremeyen elektrokimyasal hücrelerden yapılmasından kaynaklanmaktadır. Günümüzde birçok farklı boyutta birincil batarya bulunmaktadır. Birincil bataryalar, uzun süre dayanabilmesi için daima düşük güç tüketecek şekilde tasarlanmıştır [15]. Bu bataryalar daima yüksek özgül enerjiye sahiptir. Kullanım alanları arasında kalp pilleri, uzaktan kumandalı sistemler, oyuncaklar, kol saatleri örnek gösterilebilir. 1940'lara kadar birincil batarya olarak çinko-karbon bataryalar kullanılmaktaydı. Özellikle 2. Dünya Savaşı'nda ve sonrasında bataryalar konusunda ciddi gelişmeler yaşandı. Başlangıçta 1 yıl raf ömrü olan birincil bataryaların, bu gelişmeler ile birlikte raf ömürlerinin 2-5 yıl arasına geldiği görülmektedir [20]. Günümüzde en popüler birincil batarya alkalin tür olandır. Bu bataryaların birçok avantajı vardır. Bunlar avantajlar arasında enerjilerinin yüksek olması, çevre dostu olmaları, güvenli olmaları, uzun süre saklanabilmeleri, maliyetlerinin düşük olması örnek gösterilebilir. Tek dezavantajları yüksek akım gerektiren sistemlerde kullanılamamaktadır. Bu nedenle çalışma alanları oldukça sınırlıdır. Şekil 2.6 üzerinde şarj edilemez bataryalar için örnek gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Şarj Edilemez Batarya Örneği [21]

- **İkincil (Şarj-Edilebilir) Bataryalar**

İkincil bataryalar, kullanıldıktan sonra tekrar şarj edilebilen bataryalar olarak adlandırılmaktadır. Bu durum bataryalar içerisinde kullanılan materyallerin, kimyasal reaksiyonları tersine çevirebilen elektrokimyasal hücrelerden yapılmasından kaynaklanmaktadır. Enerji ihtiyacının yüksek olduğu ve tek kullanımlık bataryaların pratik olmadığı sistemlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Enerji ihtiyacının düşük olduğu fakat sürekli

olarak değişimi istenmeyen yerlerde de bu bataryalar tercih edilebilmektedir. Buna örnek cep telefonları, fotoğraf makineleri ya da diğer taşınabilir cihazlar örnek verilebilir. Günümüzde en yaygın kullanım alanı ana güç kaynağı olarak kullanılan elektrikli araçlardır. Bir diğer yaygın kullanım alanı ise yük dengeleme amacı ile kullanılan enerji depolama sistemleridir. İkincil bataryalar başlangıçta birincil bataryalara oranla daha yüksek maliyete sahip olsa da zamanla bu durum tersine dönmektedir. Çünkü şarj etme işlemi doğrudan değişim işlemine göre daha ucuzdur [15, 20].

İkincil bataryaların varlığı yaklaşık 160 yıl öncesine dayanmaktadır. İlk kurşun-asit batarya Gaston Plante tarafından 1859 yılında geliştirilmiştir. Üzerinden yıllar geçmesine ve teknolojinin ileri düzeyde ilerlemesine rağmen bu bataryalar hala daha otomotiv başta olmak üzere birçok farklı alanda sıklıkla kullanılmaktadır. 1900'lü yıllara yaklaşırken ilk çalışmalarına Waldemar Jungner tarafından başlanan nikel-kadmiyum bataryalar geliştirildi. Enerji yoğunluklarının yüksek olması nedeniyle uçaklarda dahil olmak üzere birçok sektörde kullanılmaya başlandı [20].

İkincil bataryaların kullanım amaçlarına bakıldığında ikiye ayrıldığı görülmektedir. Bunlar:

- Enerji depolama cihazlarında kullanılan ikincil bataryalar. Bu amaçları doğrultusunda doğrudan elektrik sistemine dahil değildirler. Tam şarj edilmiş halde sistemde yedek enerji kaynağı olarak bulunurlar. Örnek kullanım yerleri olarak uçaklar, yük dengeleme amacıyla enerji depolama sistemleri gösterilebilir.

- Ana güç kaynağı olarak kullanılan ikincil bataryalar. Bu amaçla kullanılan bataryalar doğrudan elektrik ihtiyacı olan sisteme bağlıdır. Sistemin harcadığı enerji doğrultusunda sürekli olarak şarj-deşarj işlemine maruz kalmaktadırlar. Örnek kullanım yerleri olarak elektrikli araçlar, taşınabilir tüketici elektronikleri gösterilebilir [15].



Şekil 2.7: Şarj Edilebilir Batarya Örneği [22]

Şekil 2.7 üzerinde şarj edilebilir bataryalara örnek gösterilmektedir. İkincil bataryalar kimyalarına göre temel olarak dört grupta incelenebilir. Bunlar; Lityum-iyon (Li-ion), Nikel-kadmiyum (Ni-Cd), Nikel-Metal-Hidrit (Ni-MH) ve Kurşun-Asit bataryalardır. Tablo 2.1 üzerinde birincil ve ikincil bataryaların karşılaştırması yer almaktadır.

Tablo 2.1: Birincil ve İkincil Bataryaların Karşılaştırılması [23]

Birincil Bataryalar	**İkincil Bataryalar**
Düşük başlangıç maliyeti	Yüksek başlangıç maliyeti
Yüksek yaşam-döngü maliyeti	Düşük yaşam-döngü maliyeti (uygun şarj durumunda)
Tek kullanımlık	Normal bakım gereksinimi
Tek kullanımlık	Periyodik şarj etme gereksinimi
Kolayca değiştirilebilir	Birincil bataryalara göre sınırlı üretim
Şarj başına daha uzun hizmet ve iyi şarj tutma	Birincil pil sistemlerine göre daha düşük şarj tutma özelliği
Yük dengeleme, acil durum yedekleme, hibrit batarya ve yüksek maliyetli askeri uygulamalar için ideal değil	Yük dengeleme, acil durum yedekleme, hibrit batarya ve yüksek maliyetli askeri uygulamalar için ideal
Ağır yük / yüksek deşarj oranı performansı için ideal değil	Ağır yüklerde üstün yüksek deşarj performansı
Geleneksel olarak belirli uygulamalarla sınırlı	İkincil batarya sistemlerinin çok yönlülüğü, geniş bir uygulama yelpazesi için kullanılmasına ve araştırmaların sürdürülmesine olanak tanır

2.1.3. Bataryaların Elektriksel Detayları

Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrokimyasal tepkimeler aracılığıyla elektrik enerjisine çevirebilen elektrokimyasal cihazlardır. Bu bataryaların birçok farklı uygulamalar için performanslarını ve uygunluklarını belirleyen bazı elektriksel özellikleri bulunmaktadır. Bu elektriksel bazı özellikleri 5 ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar; gerilim, kapasite, enerji, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğudur [11].

- **Gerilim:** Batarya gerilimi, pozitif ve negatif terminaller arasındaki elektriksel potansiyel enerji farkı olarak açıklanabilir. Batarya gerilimi Volt (V) cinsinden ifade edilmektedir. Bataryaların gerilim seviyeleri kimyasal yapısında kullanılan malzemelere göre farklılık göstermektedir. Standart potansiyel, standart elektrot potansiyellerinden aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

- **Kapasite:** Bir batarya kapasitesi, elektrokimyasal reaksiyonda yer alan toplam elektrik miktarı olarak ifade edilmektedir. Batarya hücresi içinde yer alan aktif madde miktarına göre elektrik yükü miktarı değişmektedir. Kapasite genel olarak Coulomb veya amper-saat (Ah) cinsinden ifade edilmektedir. Yüksek kapasiteye sahip batarya hücreleri daha fazla yük depolayabildikleri için uzun süre enerji sağlayabilmektedir.

- **Enerji:** Batarya hücresi, iç yapısında meydana gelen kimyasal tepkimeler aracılığıyla elektrik enerji depolamaktadır. Depolanan bu enerji ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilmektedir. Batarya hücresinin kimyası, boyutu, tasarımı gibi çeşitli faktörler depolanan enerji miktarına etki etmektedir. Depolanan enerjinin ölçü birimi watt-saat (Wh) olarak ifade edilir. Bir watt-saat, bir saat boyunca tüketilen bir watt gücüne eşittir.

- **Enerji Yoğunluğu:** Batarya hücrelerindeki enerji yoğunluğu, birim hacim ya da birim kütle başına bataryada depolanabilen enerji miktarını ifade etmektedir. Enerji yoğunluğu, bataryanın kullanılacağı sistemin tasarım aşamasında büyük bir öneme sahiptir. Bataryalar kendi içerisinde iki temel enerji yoğunluğu ölçüsüne sahiptir [24].

    - **Gravimetrik Enerji Yoğunluğu:** Gravimetrik enerji yoğunluğu, birim kütleye düşen enerji olarak ifade edilmektedir. Wh/kg cinsinden ifade edilmektedir. Gravimetrik enerji yoğunluğu değeri arttıkça, hücrenin birim kütle başına depolayabildiği enerji miktarı da artmaktadır. Bu nedenle kütlenin önemli

olduğu sistemlerde bu ölçünün yüksek olması ciddi ağırlık avantajı sağlamaktadır.

- **Volümetrik Enerji Yoğunluğu:** Volümetrik enerji yoğunluğu, birim hacim başına düşen enerji olarak ifade edilmektedir. Wh/L cinsinden ifade edilmektedir. Volümetrik enerji yoğunluğu değeri arttıkça, hücrenin birim hacim başına depolayabildiği enerji miktarı da artmaktadır. Bu nedenle hacmin önemli olduğu sistemlerde bu ölçünün yüksek olması ciddi boyut avantajı sağlamaktadır.

- **Özgül Güç – Güç Yoğunluğu:** Batarya hücrelerindeki güç yoğunluğu, bir batarya hücresinin birim hacim veya birim kütlesinden sağlayabileceği gücü ifade etmektedir. Bu yoğunluk, batarya hücresinin enerjiyi ne kadar hızlı sağlayabileceğini ifade etmektedir. Yüksek ve hızlı enerji talebi olan elektriksel sistemlerde bu parametre çok önemlidir. Batarya hücresi güç yoğunluğu, batarya kimyası, elektrotların ve elektrolitin tasarımı, hücrenin ambalajı gibi çeşitli faktörlere göre değişiklik göstermektedir [24].

  - **Gravimetrik Güç Yoğunluğu:** Gravimetrik güç yoğunluğu, birim kütle başına sağlanabilen gücü ifade etmektedir. W/kg cinsinden ifade edilmektedir. Gravimetrik güç yoğunluğu değeri arttıkça, hücrenin belirli bir ağırlık için sağlayabileceği güç değeri de artmaktadır.

  - **Volümetrik Güç Yoğunluğu:** Volümetrik güç yoğunluğu, birim hacim başına sağlanabilen gücü ifade etmektedir. W/L cinsinden ifade edilmektedir. Volümetrik güç değeri arttıkça, hücrenin belirli bir hacim başına sağlayabileceği güç değeri de artmaktadır.

2.1.4. Batarya ile İlgili Terimler

Bataryalar arasında karşılaştırma yapabilmek ve kullanılacak sistemlere uygun batarya tasarımları yapabilmek için, hücrelerin karakteristik özellikleri ile ilgili bazı parametreleri bilmek gerekmektedir. Sorunsuz ve güvenli sistemlerin tasarlanmasında bu özellikler büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde, alt başlıklar halinde batarya hücrelerinin özelliklerinden bahsedilmektedir [25].

- **Nominal Gerilim (V):** Batarya hücresinin kullanıcıya bildirilen normal gerilimi olarak ifade edilir. Aynı zamanda, batarya hücresinin 0.2C oranında tamamen tükenmesi sırasındaki ortalama gerilimi olarak da ifade edilebilmektedir [9, 24].

- **Kesme Gerilimi (V):** Kesme gerilimi, batarya hücresinin tamamen deşarj olduğu ve hücrenin zarar görmesini önlemek için daha fazla deşarjın engellendiği gerilim seviyesini ifade etmektedir. Batarya hücrelerinin kimyasal yapılarına göre kesme gerilimi değişiklik göstermektedir. Bu bilgi üretici firmalar tarafından kullanıcılara belirtilmektedir [9, 24].

- **Deşarj Eğrisi:** Deşarj eğrisi, bataryanın deşarj süresi boyunca geriliminin nasıl değiştiğini ifade etmektedir. Bu eğri, batarya geriliminin bataryadan çekilen deşarj akım değerine göre çizdirilmesi ile elde edilmektedir. Burada deşarj akım değeri ise amper-saat (Ah) cinsinden ifade edilmektedir. Deşarj eğrisinin şekli, batarya kimyasına, yük özelliklerine, sıcaklığa ve bataryanın yaşı gibi faktörlere göre değişmektedir. Bataryaların deşarj eğrisini anlamak, şarj durumunu izlemeye, kalan kapasiteyi tahmin etmeye ve bataryanın çalışma süresini tahmin etmeye yardımcı olmaktadır [24].

- **Nominal Kapasite (Ah, C oranı):** Nominal kapasite, batarya tamamen dolu iken, kesme gerilimine kadar bataryanın belirli bir deşarj akımında (C oranı cinsinden ifade edilebilmektedir) deşarj edildiğinde ortaya çıkan amper-saat (Ah) olarak ifade edilmektedir. Kapasite, deşarj akımının (Amper cinsinden) deşarj süresiyle (Saat cinsinden) çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Bataryalardaki nominal kapasite 1C olarak ifade edilmektedir [26].
- **Nominal Enerji (Wh, C oranı):** Nominal enerji, batarya tamamen dolu iken, kesme gerilimine kadar bataryanın belirli bir deşarj akımında (C oranı cinsinden ifade edilebilmektedir) deşarj edildiğinde ortaya çıkan watt-saat (Wh) olarak ifade edilmektedir. Nominal enerji, deşarj gücünün (Watt cinsinden) deşarj süresiyle (saat cinsinden) çarpılmasıyla hesaplanmaktadır [9].

- **Döngü Ömrü:** Döngü ömrü, bir bataryanın nominal kapasitesi, nominal değerinin %80'inin (önceden belirlenen farklı bir değer de olabilir) altına düşmeden önce kaç kez şarj edilmesi ve boşaltılması gerektiğini ifade etmektedir. Batarya tipi, kimyasal

bileşim, deşarj derinliği, sıcaklık, nem gibi unsurlar döngü ömrüne etki eden faktörler arasındadır [9].

- **Maksimum Sürekli Deşarj Akımı:** Bataryanın sürekli olarak sağlayabildiği maksimum deşarj akımı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer, bataryaya zarar verecek veya kapasitesini düşürecek aşırı deşarj oranlarını önlemek amacıyla üreticiler tarafından kullanıcılara sağlanmaktadır [24].

- **Açık Devre Gerilimi:** Açık devre gerilimi, bataryanın şarj veya deşarj olmadığı yani herhangi bir reaksiyonun gerçekleşmediği durum olarak ifade edilmektedir. Açık devre gerilimi, batarya şarj durumunun bir fonksiyonudur ve batarya ömrü boyunca aynı kalması beklenir. Ancak bu değer dışındaki diğer değerler zamanla değişmektedir. Kapasite, şarj-deşarj döngüsü zamanla azalmaktadır [9].

- **Çalışma Gerilimi:** Çalışma gerilimi, kapalı devre gerilim olarak ifade edilmektedir. Bataryada akım akışı meydana geldiği andaki gerilim değerini ifade etmektedir. Çalışma gerilimi, şarj durumu ve şarj-deşarj akımına göre değişiklik göstermektedir. Buna ek olarak farklı kimyasal yapıdaki bataryalar için farklı çalışma gerilimleri olabilmektedir [24].

- **Deşarj Oranı (C oranı):** Deşarj oranı, bir bataryanın ne kadar hızlı enerji sağlayabileceğini ifade etmektedir. C oranı, bir bataryanın maksimum kapasitesine göre boşalma hızının bir ölçüsüdür. 1C oranı, deşarj akımının bataryanın tamamını 1 saatte boşaltacağı anlamına gelmektedir. Deşarj oranı bataryalardaki güç çıkış yeteneğini değerlendirmek için kullanılmaktadır [24].

- **İç Direnç:** İç direnç, akım toplayıcılardan, elektrottan, aktif maddelerden, ayırıcılardan ve elektrolitlerden gelen direnç de dahil olmak üzere, bataryanın iki elektrotu arasındaki toplam dirençtir. İç direncin bir diğer tanımı, batarya hücresindeki mümkün olan en büyük gerilim düşüşü olan omik, aktivasyon ve difüzyon polarizasyon dirençlerinin toplamıdır. [27, 28] Bataryalarda iç direnç değeri ne kadar düşük ise batarya verimliliği o kadar iyidir. İç direnç arttığında, batarya verimliliği düşer ve şarj-deşarj enerjisinin daha fazlası ısıya dönüştüğü için termal kararlılık azalmaktadır [24].

- **Kendi Kendine Deşarj:** Kendi kendine deşarj, elektrotlar arasında herhangi bir bağlantı olmadan, dahili kimyasal yan reaksiyonların batarya kapasitesini azalttığı bir olgudur. Kendi kendine deşarj, bataryaların raf ömürlerini azalmaktadır ve gerçekte kullanıma sunulduklarında başlangıçta tam şarjdan daha az şarj sahip olmalarına neden olmaktadır [24].

- **Deşarj Derinliği (DOD):** Bataryalardaki deşarj derinliği, belirli bir deşarj döngüsü sırasında bataryanın kullanılabilir kapasitesinin ne kadarının kullanıldığının bir göstergesidir. Genellikle bataryanın toplam kapasitesinin yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Örneğin, bir batarya hücresinin toplam kapasitesi 100 amper-saat (Ah) ise ve 30 amper-saat (Ah) deşarj edilmişse, deşarj derinliği %30 olmaktadır. Deşarj derinliği aynı zamanda şarj durumunun (SOC) tersi olarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki örnekte şarj durumu (SOC) %70 olarak ifade edilmektedir [9].

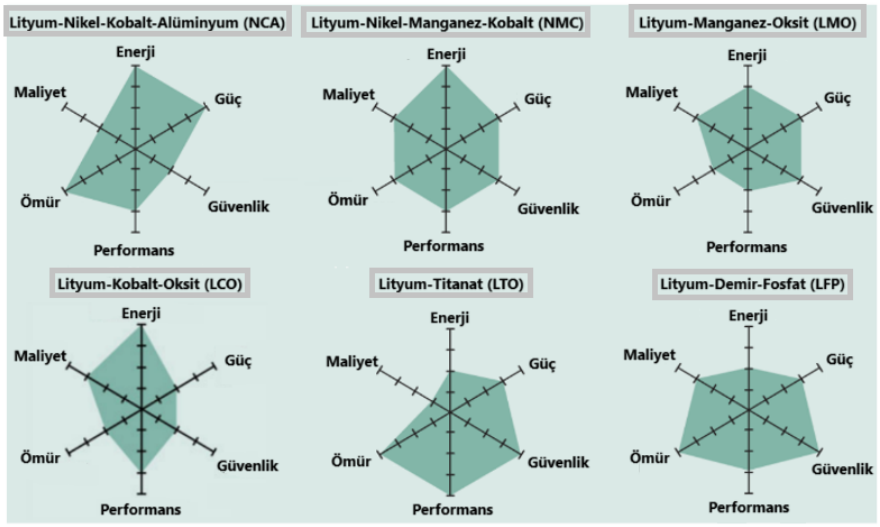
- **Şarj Durumu (SOC):** Bataryalardaki şarj durumu, bataryanın toplam kapasitesine göre depolanan elektrik enerjisi miktarını ifade etmektedir. Tipik olarak yüzde cinsinden ifade edilmektedir. Örneğin, bir batarya hücresinin kapasitesi 100 amper-saat (Ah) ise ve hali hazırda 80 amper-saat (Ah) şarj tutuyorsa, şarj durumu %80 olmaktadır. Şarj durumu aynı zamanda deşarj derinliğinin (DOD) tersi olarak da ifade edilmektedir. Yukarıdaki örnekte deşarj derinliği (DOD) %20 olarak ifade edilmektedir [24].

- **Sağlık Durumu (SOH):** Batarya hücrelerinde sağlık durumu, bataryanın orijinal kapasitesi ve performans yetenekleriyle karşılaştırıldığında genel durumunu veya sağlığını ifade etmektedir. Bu değer, bataryanın, yeni olduğu zamanki gibi enerjiyi depolama ve sağlama kabiliyetini ne kadar iyi sürdürebildiğini göstermektedir. Bataryalardaki sağlık durumu, yaş, çalışma koşulları, şarj-deşarj döngüleri gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Zamanla batarya bozulduğunda, sağlık durumu, kapasite, performans azalır. Sağlık durumunu izlemek, bataryanın kalan kullanışlı ömrünü değerlendirmek ve ne zaman değiştirilmesi veya servis edilmesi gerekebileceğini tahmin etmek için önemlidir [24].

2.1.5. Lityum Tabanlı Batarya Kimyaları

Lityum bataryaların ilk çalışmaları 1912 yılında GN Lewis tarafından başlamıştır. Fakat ilk şarj edilemeyen lityum bataryaların ticari olarak piyasaya girmesi 1970'leri bulmuştur. 1980'lerde ise şarj edilebilir batarya çalışmaları başlamıştır. Ama anot malzemesi olarak

kullanılan metalik lityumdaki dengesizlik nedeniyle başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Lityum tüm metaller arasında en hafif olan elementtir. Aynı zamanda en büyük elektrokimyasal potansiyele ve birim kütlede en büyük spesifik enerjiye sahip olan elementtir. 1991 yılında Sony ilk lityum iyon bataryaları ticari hale getirmiştir. Günümüzde bu kimya en fazla çalışma yapılan tür haline gelmiştir. Lityum-iyon bataryaların katkı maddeleri değiştirilerek farklı alternatif ürünler geliştirilmektedir. Aşağıdaki tabloda günümüzde kullanılan farklı yapılardaki lityum-iyon bataryaların karşılaştırma görseli verilmiştir. Farklı kullanım alanlarına göre farklı tür bataryalar tercih edilebilmektedir [19, 29]. Lityum tabanlı bataryaların birbirlerine göre detaylı özelliklerinin kıyaslaması Şekil 2.8 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Lityum Tabanlı Batarya Kimyalarının Birbirlerine Göre Kıyaslaması [30]

2.1.5.1. Lityum-İyon Bataryalar (Li-ion)

Lityum-iyon batarya, lityum iyonlarının katot ve anot arasında hareket ettiği bir tür şarj edilebilir bataryadır. Bu bataryalar genel olarak elektronik cihazlarda, elektrikli araçlarda, enerji depolama sistemlerinde ve daha birçok yerde kullanılmaktadır. Lityum iyon bataryalar, katot, anot ve elektrolit olmak üzere üç ana bileşen içermektedir. Şarj ve deşarj esnasında lityum iyonlarının hareket etmesiyle elektrik enerjisi oluşmaktadır [9].

Lityum-iyon bataryaların birden çok çeşidi bulunmaktadır. Fakat hepsinin ortak sloganı lityum-iyon'dur. Bu farklı tipteki lityum iyon bataryalar, farklı aktif malzeme seçimleri ile birbirlerinden ayrılmaktadır.

Sony'nin 1997'deki orijinal lityum iyon bataryasında anot olarak kok kömürü kullanıldı. Fakat zamanla Sony de dahil olmak üzere neredeyse tüm üreticiler daha düz bir deşarj eğrisi için grafit kullanımına geçti. Grafit, uzun vadeli döngü stabilitesine sahip olan ve kurşun kalemlerde kullanılan bir karbon şeklidir. En yaygın karbon malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Grafit anodun performansını arttırmak için silikon bazlı alaşımlar da dahil olmak üzere çeşitli katkı maddeleri denenmiştir. Tek bir lityum iyonuna bağlanmak için altı karbon (grafit) atomu gerekmektedir. Tek bir silikon atomu da dört lityum iyonuna bağlanabilmektedir. Bu durum, silikon anodun teorik olarak grafitin enerjisinin 10 katından fazlasını depolayabileceği anlamına gelmektedir. Fakat anodun şarj sırasında genleşmektedir. Bu nedenle saf silikon anotlar için pratik değildir. İyi bir çevrim ömrü elde etmek için silikon bazlı anotlara yalnızca %3-5 oranında silikon eklenmektedir [29].

Günümüzde lityum-iyon bataryalar, alüminyum akım toplayıcı üzerine kaplanmış metal oksit pozitif elektrot (katot), bakır akım toplayıcı üzerine kaplanmış karbon/grafitten yapılmış negatif elektrot (anot), bir ayırıcı ve elektrolitten oluşan yapı kullanmaktadır. Lityum iyon bataryaların avantajları arasında; yüksek özgül enerji, uzun döngü ve raf ömrü, düşük iç direnç, kısa şarj süreleri, düşük kendi kendine deşarj gösterilebilir. Dezavantajları ise yüksek sıcaklıkta bozulma, düşük sıcaklıklarda düşük şarj imkanı, koruma devresi ihtiyacı olarak sıralanabilir [18]. Şekil 2.9 üzerinde Li-ion batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Li-ion Batarya Görseli

2.1.5.2. Lityum-Polimer Bataryalar (Li-Po)

Lityum-polimer batarya, geleneksel lityum-iyon bataryalarda bulunan sıvı elektrolit yerine polimer elektrolit kullanan bir tür şarj edilebilir bataryadır. Bu polimer elektrolit, çoğunlukla katı veya jel benzeri bir maddedir. Dolayısıyla batarya tasarımları ve üretimleri konusunda esneklik sağlamaktadır. Lityum polimer bataryaların genel özellikleri aşağıdaki gibidir [31, 32].

- **Esneklik:** Katı metal kasa olmaması ve esnek bir polimer elektrolit kullanılması, lityum polimer bataryaların çeşitli şekil ve boyutlarda üretilebilmesini sağlamaktadır. Bu tasarım esnekliği, alan kısıtlamalarının veya geleneksel olmayan form faktörlerinin önemli olduğu uygulamalar için oldukça önemli bir avantajdır.

- **Hafiflik:** Lityum polimer bataryalar genellikle ağır metal kasa olmaması ve hafif polimer malzemelerin kullanılması nedeniyle oldukça hafiftir.

- **Enerji Yoğunluğu:** Lityum polimer bataryalar, diğer şarj edilebilir bataryalara oranla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu durum birim hacim veya kütlede daha fazla enerji depolayabildikleri anlamına gelmektedir.

- **Düşük Kendiliğinden Boşalma Oranı:** Lityum polimer bataryalar, diğer bataryalara oranla daha az kendiliğinden boşalma oranına sahiptir. Bu nedenle uzun süre şarj koruma özelliği barındırmaktadır.

- **Güvenlik:** Lityum polimer bataryalar uygun şekilde kontrol edildiğinde güvenlidir. Ancak yanlış veya kontrolsüz kullanımda, şişme, sızıntı gibi hasarlar oluşturabilmektedir.

Lityum polimer bataryaların kullanım alanları oldukça fazladır. Özellikle tüketici elektroniği ve elektrikli araç sistemleri ana kullanım yerleridir. Şekil 2.10 üzerinde Li-Po batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.10: Li-Po Batarya Görseli

2.1.5.3. Lityum-Kobalt-Oksit Bataryalar (LCO-LiCoO2)

Yüksek özgül enerjisi, lityum-kobaltı cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve dijital kameralar için popüler seçim haline getirmektedir. Batarya, bir kobalt oksit katot ve bir grafit karbon anottan oluşmaktadır. Genel olarak katot katmanlı bir yapıya sahiptir ve deşarj sırasında lityum iyonları anottan katoda doğru hareket etmektedir. Bu akış şarj işlemi için tersi yönde

ilerlemektedir. Lityum-kobaltın dezavantajları nispeten kısa ömrünün, düşük termal kararlılığının ve sınırlı kapasitesinin olmasıdır [30].

Lityum kobalt bataryalar kendi kapasite değerlerinden daha yüksek bir akımla şarj edilmemeli ya da boşaltılmamalıdır. Yani 2400 mAh kapasiteli bir lityum kobalt hücresi, yalnızca 2400 mAh kadar şarj ve deşarj edilebilmektedir. Daha yüksek akımlardaki kullanımlarda batarya hücresi aşırı ısınmalara maruz kalabilmektedir. Lityum-kobalt bataryalar, kobaltın yüksek maliyeti ve diğer aktif katot malzemeleriyle harmanlanarak geliştirilmiş performans nedeniyle lityum-manganeze, özellikle NMC ve NCA türü bataryalara oranla desteğini kaybetmektedir [33]. Şekil 2.11 üzerinde LCO batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.11: LCO Batarya Görseli

Tablo 2.2: LCO Batarya Özellikleri [30]

Gerilimler	3.6 V ortalama Çalışma aralığı 3-4.2V/hücre
Kapasite	150-200 Wh/kg. Özel hücreler 240 Wh/kg'a kadar enerji sağlayabilir.
Şarj (C Oranı)	0.7-1C; 3 saatlik şarj 1C'nin üzerindeki şarj akımı pil ömrünü kısaltır. Akım 0.05C'ye ulaştığında şarj kapatılmalıdır.
Deşarj (C Oranı)	1C; 2.5V'ta kesilmelidir. 1C'nin üzerindeki deşarj akımı pil ömrünü kısaltır.
Yaşam Döngüsü	500-1000. Boşaltma derinliği, yük ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilir.
Termal Kaçak	150 °C. Tam şarj termal kaçağı teşvik edebilir.
Uygulamalar	Cep telefonları, tabletler, dizüstü bilgisayarlar, kameralar.

2.1.5.4. Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum-Oksit Bataryalar (NCA-LiNiCoAlO2)

Lityum-nikel-kobalt-alüminyum-oksit batarya, nikel, kobalt, alüminyum ve oksijenden oluşan bir katot malzemesi içeren lityum iyon batarya türüdür. Bu batarya kimyası, belirli bir hacim veya kütlenin içinde depolanabilecek enerji miktarı olarak bilinen yüksek enerji yoğunluğu ile tanınmaktadır. 1999 yıllarından bu yana özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek spesifik enerji, yüksek spesifik güç ve uzun ömürleri ile birlikte NMC türü bataryalar ile benzer özellikler taşımaktadır. NCA, lityum-nikel-oksidin daha da geliştirilmiş halidir. Alüminyum eklenmesi ile birlikte kimyasal yapısı daha stabil bir duruma gelmiştir [34]. Şekil 2.12 üzerinde NCA batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.12: NCA Batarya Görseli

Tablo 2.3: NCA Batarya Özellikleri [30]

Gerilimler	3.6 V ortalama Çalışma aralığı 3-4.2V/hücre
Kapasite	200-260 Wh/kg. 300Wh/kg'da öngörülebilir.
Şarj (C Oranı)	0.7C; 3 saatlik şarj. Akım 0.05C'ye ulaştığında şarj kapatılmalıdır.
Deşarj (C Oranı)	1C; 3V'ta kesilmelidir. Yüksek deşarj akımı pil ömrünü kısaltır.
Yaşam Döngüsü	500. Boşaltma derinliği, yük ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilir.
Termal Kaçak	150 °C. Tam şarj termal kaçağı teşvik edebilir.
Uygulamalar	Tıbbi cihazlar, elektrikli güç aktarma organları

2.1.5.5. Lityum-Demir-Fosfat Bataryalar (LFP-LiFePO4)

1996 yılında Texas Üniversitesi tarafından, şarj edilebilir bataryalar için katot malzemesi olarak fosfat keşfedilmiştir. Fosfat, katot malzemesi olarak kullanıldığında düşük dirence sahip iyi bir elektrokimyasal yapı sunmaktadır. LFP türü bataryalar başlıca avantajları arasında; yüksek akım değeri, uzun çevrim ömrü, iyi termal stabilite, artırılmış güvenlik bulunmaktadır.

LFP türü bataryalar, tam şarj koşullarında daha iyi toleransa sahiptir. Bu nedenle uzun süre yüksek gerilimde tutulduğunda diğer lityum bataryalara oranla daha az strese maruz kalmaktadır. Lityum-demir-fosfat kimyaya sahip bataryaların kendi kendine deşarjı diğer lityum türevlerine göre daha yüksektir ve bu durum yaşlanma ile birlikte dengeleme sorunları ortaya çıkarmaktadır. Dengeleme sorunları hafifletmek için daha yüksek kaliteli bataryalar kullanılması gerekmektedir. Bu da batarya maliyetini artırmaktadır [35]. Şekil 2.13 üzerinde LFP batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.13: LFP Batarya Görseli

Tablo 2.4: LFP Batarya Özellikleri [30]

Gerilimler	3.2 V ortalama Çalışma aralığı 2.5-3.65V/hücre
Kapasite	90-120 Wh/kg
Şarj (C Oranı)	0.7C; 3 saatlik şarj. Akım 0.05C'ye ulaştığında şarj kapatılmalıdır.
Deşarj (C Oranı)	Bazı hücrelerde 1C, 25C. 2V'ta kesilmesi gerekmektedir.
Yaşam Döngüsü	2000 ve üzeri. Boşaltma derinliği, yük ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilir.
Termal Kaçak	270 °C. Tamamen şarj olsa ile çok güvenli yapıdadır.
Uygulamalar	Yüksek yük akımları ve dayanıklılık gerektiren taşınabilir ya da sabit sistemler.

2.1.5.6. Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt-Oksit Bataryalar (NMC-LiNiMnCoO2)

Lityum türü bataryalarda en başarılı türlerden birisi nikel-manganez-kobaltın katot birleşimidir. Bu bataryalar enerji hücreleri veya güç hücreleri olarak ticari sektörde kullanılmaktadır. NMC türü bataryanın asıl sırrı nikel ve manganezin birleşiminde yatmaktadır. Nikel, yüksek spesifik enerjisiyle ancak zayıf stabilitesiyle bilinmektedir. Manganez, düşük iç direnç elde etmek için spinel bir yapı oluşturma avantajına sahiptir ancak spesifik enerji

açısından düşüktür. Bu iki metallerin birleşmesi ile güçlü bir yapı ortaya çıkmaktadır. Bunun bir benzetmesi, ana bileşenler olan sodyum ve klorürün kendi başlarına toksik olduğu, ancak bunların karıştırılmasının baharat tuzu ve gıda koruyucusu olarak hizmet ettiği sofra tuzudur [36].

NMC türü bataryalar, elektrikli aletler, e-bisikletler ve diğer elektrikli güç aktarma organlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bataryaların katot kombinasyonu, tipik olarak 1-1-1 olarak bilinen üçte bir nikel, üçte bir manganez ve üçte bir kobalttır. Kobalt pahalı olduğu için sınırlı miktarda kullanımı söz konusudur. Bu nedenle birden fazla başarılı kombinasyon vardır. 5 kısım nikel, 3 kısım kobalt ve 2 kısımdan oluşan NMC532 başarılı bir kombinasyondur. Bir diğer başarılı kombinasyonlar NMC622 ve NMC811'dir. Kobalt burada yüksek enerjili aktif bir malzeme olan nikeli stabilize etmektedir. Günümüzde sistemin ekonomik olarak kurulabilmesi ve iyi bir performans sağlaması nedeniyle NMC karışımlı lityum-iyonlara doğru bir yönelim görülmektedir. Özellikle elektrikli araçlar sektöründe ciddi bir yönelim söz konusudur [30]. Şekil 2.14 üzerinde NMC batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.14: NMC Batarya Görseli

Tablo 2.5: NMC Batarya Özellikleri [30]

Gerilimler	3.6V veya 3.7V ortalama Çalışma aralığı 3-4.2V/hücre
Kapasite	150-220 Wh/kg
Şarj (C Oranı)	0.7-1C; 3 saatlik şarj. 1C'nin üzerindeki şarj akımı pil ömrünü kısaltmaktadır. Akım 0.05C'ye ulaştığında şarj kapatılmalıdır.
Deşarj (C Oranı)	1C, bazı hücrelerde 2C. 2.5V'ta kesilmesi gerekmektedir.
Yaşam Döngüsü	1000-2000. Boşaltma derinliği, yük ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilir.
Termal Kaçak	210 °C. Tam şarj termal kaçağı teşvik edebilir.
Uygulamalar	Elektrikli bisikletler, tıbbi cihazlar, endüstriyel uygulamalar

2.1.5.7. Lityum-Manganez-Oksit Bataryalar (LMO-LiMn2O4)

Manganezli yapıya sahip lityum-iyon bataryalar ilk olarak 1983 yılında Malzeme Araştırma Bülteni'nde yayınlandı. 1996 yılında Moli Energy, katot malzemesi olarak lityum manganez oksit içeren lityum iyon batarya piyasaya sürdü. Batarya yapısı, elektrot üzerindeki iyon akışını iyileştiren üç boyutlu bir spinel yapı oluşturur. Bu durum bataryada düşük iç dirence ve gelişmiş akım yönetimi sağlar. LMO, düşük dahili hücre direnci, hızlı şarj ve yüksek akım deşarjını mümkün kılmaktadır. 18650 boyut yapısına sahip lityum manganez, orta derecede bir ısı oluşumuyla 20-30 amper akım boşaltabilmektedir. Ayrıca 50 ampere kadar birkaç saniyelik yük darbelerine de izin vermektedir. Lityum manganezler, elektrikli aletler, tıbbi aletler, hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılmaktadır.

Lityum manganez, lityum kobalttan kabaca üçte bir oranında daha düşük bir kapasiteye sahiptir. Tasarım esnekliği, mühendislerin bataryayı optimum uzun ömür, maksimum yük akımı veya yüksek kapasite için en üst düzeye çıkarmasına olanak tanımaktadır. Günümüzde saf lityum manganez bataryalar çok yaygın kullanılmamaktadır. Sadece özel uygulamalarda tercih edilmektedir. Çoğu lityum manganez batarya, spesifik enerjiyi iyileştirmek ve ömrünü uzatmak için lityum-nikel-manganez-kobalt-oksit (NMC) ile harmanlanmaktadır. Bu kullanım kombinasyonu, her sistemde en iyiyi ortaya çıkarmaktadır. Nissan Leaf, Chevy Volt ve BMW i3 gşbş çoğu elektrikli araç bu yapıdaki bataryaları tercih etmektedir. Bataryanın %30 civarında olabilen LMO kısmı hızlanmalarda yüksek akım artışı sağlarken, NMC kısmı ise uzun sürüş menzili sağlamaktadır [37]. Şekil 2.15 üzerinde LMO batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.15: LMO Batarya Görseli

Tablo 2.6: LMO Batarya Özellikleri [30]

Gerilimler	3.7V ortalama Çalışma aralığı 3-4.2V/hücre
Kapasite	100-150 Wh/kg
Şarj (C Oranı)	0.7-1C tipik; 3C maksimum. Akım 0.05C'ye ulaştığında şarj kapatılmalıdır.
Deşarj (C Oranı)	1C, bazı hücrelerde 10C. 30C darbe (5sn). 2.5V'ta kesilmesi gerekmektedir.
Yaşam Döngüsü	300-700. Boşaltma derinliği, yük ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilir.
Termal Kaçak	250 ℃. Tam şarj termal kaçağı teşvik edebilir.
Uygulamalar	Elektrikli el aletleri, tıbbi cihazlar, elektrikli güç aktarma organları

2.1.5.8. Lityum-Titanat-Oksit Bataryalar (LTO-Li4Ti5O12)

Lityum titanat bataryaların bilinirliği 1980'li yıllara dayanmaktadır. Li-titanat, tipik bir lityum iyon bataryanın anodundaki grafitin yerini almakta ve spinel yapıya dönüşmektedir. Bu bataryalarda katot malzemesi lityum-manganez-oksit veya NMC olabilmektedir. Lityum titanat bataryaların en iyi özelliği düşük sıcaklıklarda da çalışabilmeleridir. Yaklaşık olarak -30℃'de %80 kapasite elde etmektedir [38].

Lityum titanat oksit batarya, yüksek güç yoğunluğu, uzun ömür ve yüksek güvenlik özellikleriyle bilinen bir tür şarj edilebilir bataryadır. Lityum-iyon batarya ailesine aittir fakat bileşimi ve performansıyla geleneksel lityum-iyon bataryalardan farklılık göstermektedir.

LTO, hızlı şarj ve düşük sıcaklıkta şarj sırasında sıfır gerilim özelliği, SEI (katı elektrolit arayüzü) film oluşumu olmaması ve lityum kaplama olmaması nedeniyle, grafit anotlu geleneksel kobalt karışımlı lityum-iyona göre avantaja sahiptir. Yüksek sıcaklık altında termal stabilitesi çok iyidir fakat oldukça pahalıdır. Şekil 2.16 üzerinde LTO batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.16: LTO Batarya Görseli

Tablo 2.7: LTO Batarya Özellikleri [30]

Gerilimler	2.4V ortalama Çalışma aralığı 1.8-2.85V/hücre
Kapasite	50-80 Wh/kg
Şarj (C Oranı)	1C tipik; 5C maksimum. Akım 0.05C'ye ulaştığında şarj kapatılmalıdır.
Deşarj (C Oranı)	10C, 30C darbe (5sn). 1.8V'ta kesilmesi gerekmektedir.
Yaşam Döngüsü	3000-7000
Termal Kaçak	En güvenli li-ion bataryalardan birisidir.
Uygulamalar	Kesintisiz güç kaynakları, elektrikli aktarma organları, güneş enerjili sokak aydınlatmaları

2.1.5.9. Lityum-Kükürt Bataryalar-Yeni Nesil (Li-S)

Lityum-kükürt batarya, lityum metali anot olarak ve kükürtü katot olarak kullanan tekrar şarj edilebilir bir batarya türüdür. Deşarj esnasında, anottan gelen lityum iyonları elektrolit aracılığıyla kükürt katota göç eder, burada kükürt ile reaksiyona girerek lityum kükürt (Li_2S) oluşturur. Böylece elektrik enerji açığa çıkmaktadır. Şarj esnasında ise bu süreç tersine döner ve lityum kükürt tekrar lityum iyonlarına ve kükürte ayrışır.

Lityum kükürt bataryaların avantajları, geleneksel bataryalara göre 4 başlık altında toplanabilir.

1. **Yüksek Enerji Yoğunluğu:** Lityum-kükürt bataryaların, birim ağırlık başına potansiyel olarak daha fazla enerji depolayabilmeleri bu bataryaları avantajlı duruma getirmektedir.

2. **Malzeme Tedariği:** Katot malzemesi olan kükürt, bol miktarda bulunmaktadır. Bu yüzden maliyet olarak büyük bir avantaj sağlamaktadır.

3. **Hafif Tasarım:** Kükürt hafiftir. Bu durum lityum ile birlikte kullanımlarında genel anlamda ağırlık avantajı sağlamaktadır.

4. **Azaltılmış Çevresel Etki:** Kükürt, bazı lityum iyon bataryalarda kullanılan malzemelere kıyasla çevreye daha az zararlıdır. Bu durum üretim ve imha sırasında azaltılmış çevresel etki sunmaktadır.

Lityum-kükürt bataryaların avantajları kadar ticari ürün olmadan çözülmesi gereken bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar genel olarak 3 başlık altında incelenebilir.

1. **Ömür Döngüsü:** Şu anda lityum-kükürt bataryalar, döngü sırasında polikükürtlerin çözünmesinden kaynaklanan sınırlı döngüye ömrüne sahiptir. Bu da zamanla kapasite anlamında dezavantaj oluşturmaktadır.

2. **Güvenlik:** Kükürt bazlı katotlar, döngü sırasında hacim değişikliklerine girebilmektedir. Bu durum mekanik stres ve potansiyel güvenlik sorunlarına yol açabilmektedir.

3. **Elektrolit Kararlılığı:** Elektrolit seçimi, lityum-kükürt bataryaların performansını ve kararlılığını büyük ölçüde etkilemektedir. Şarj-deşarj döngüsü boyunca kararlı hal sergileyebilecek elektrolitler bulmak zor olmaktadır.

Lityum-kükürt bataryaların ticari alanda kullanımlarına yönelik araştırma ve geliştirme faaliyetleri devam etmektedir. Şekil 2.17 üzerinde Li-S bataryaların Li-ion bataryalardan en önemli farkı gösterilmektedir.



Şekil 2.17: Li-ion ve Li-S Batarya Farkları Görseli [39]

2.1.5.10. Lityum Hava Bataryalar-Yeni Nesil

Lityum-hava batarya, havadan oksijeni reaktif olarak kullanan yeni tür bir şarj edilebilir bataryadır. Genel olarak bir lityum anodu, gözenekli bir katot ve bir sulu olmayan elektrolit içerir. Deşarj sırasında, anottan gelen lityum iyonları, katotta havadan oksijenle reaksiyona girerek lityum oksit (Li2O) oluşturmaktadır. Böylece elektrik enerjisi açığa çıkmaktadır. Şarj olayı ise tam tersi süreç ile gerçekleşmektedir ve lityum oksit, lityum iyonlarına ve oksijene parçalanmaktadır [19].

Teorideki yüksek enerji yoğunlukları sebebiyle lityum hava bataryalar oldukça dikkat çekmektedir. Geleneksel bataryalara oranla yaklaşık 2 kata kadar yüksek enerji yoğunluğu sunmaktadır. Lityum hava bataryaların ticari ürün haline gelebilmesi için bazı zorlukları aşması gerekmektedir. Bunlar 4 ana başlık altında listelenebilir.

1. **Kararlılık:** Lityum-hava bataryalar, şarj-deşarj döngüleri sırasında lityum oksit oluşumu ve ayrışması ile kararlılık sorunlarıyla karşılaşmaktadır. Bu durum zamanla kimyasal olarak bozulmaya neden olmaktadır.

2. **Elektrolit Uyumluluğu:** Elektrolit seçimi, lityum-hava bataryaların performansı ve kararlılığı için kritik bir öneme sahiptir. Lityum iyonlarını etkili bir şekilde taşıyabilen ve aynı zamanda lityum metal ve oksijenle temas halinde stabil olan bir elektrolit bulmak önemli bir zorluktur.

3. **Hava Elektrodu Tasarımı:** Bu tür bataryalarda, yüksek enerji verimliliği ve uzun süre ömür döngüsü için hava elektrodu tasarımı gerekmektedir.

4. **Güvenlik:** Diğer lityum bazlı bataryalarda olduğu gibi, lityumun yüksek reaktif doğasından ve termal kaçış tepkimelerinin olasılığından dolayı güvenlik endişeleri bulunmaktadır.

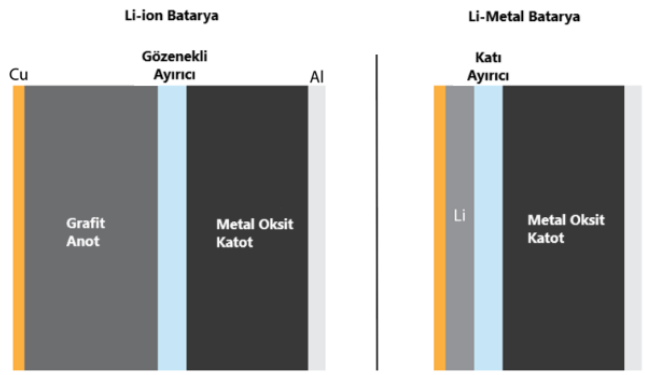
Bu zorluklara rağmen, devam eden araştırma ve geliştirme çabaları, bu engelleri aşmayı ve lityum-hava bataryaların gelecekteki enerji depolama uygulamaları için tam potansiyelini ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır.

2.1.5.11. Lityum-Metal Bataryalar-Yeni Nesil

Lityum metal bataryalar, periyodik tablodaki atom numarası 3 olan ve aynı zamanda bir alkali metal elementi olarak nitelendirilen metalik lityumu ifade etmektedir. Lityum elementi, oda sıcaklığında en hafif metal ve en hafif katı elementtir. Fakat reaktif özelliği yüksek olduğu

için ve özellikle saf metal formunda olduğu için yanıcıdır. Lityum metal, lityum iyon bataryalar ve lityum-metal bataryalar da dahil olmak üzere lityum tabanlı bataryaların temel bileşenidir. Bu bataryalarda anot (negatif elektrot) olarak kullanılmaktadır ve şarj-deşarj döngüleri sırasında elektrokimyasal reaksiyonlara girmektedir [19].

Lityum metal, iyi yükleme kapasitesi ve yüksek özgül enerjisi nedeniyle geleceğin batarya türü olarak sınıflandırılmaktadır. Normal lityum bataryalara oranla yaklaşık olarak 3 kat daha fazla enerji saklayabilmektedir. Fakat lityum metal bataryalar, bu tarz avantajlar sunsa da yüksek reaktivitesi nedeniyle saf lityum veya lityum içeren bileşiklerle çalışırken güvenlik zorlukları oluşturmaktadır. Bu nedenle güvenlik konusunda net bir sonuca ulaşılmadan ticari boyuta geçmesi öngörülmemektedir. Şekil 2.18 üzerinde Li-ion ve Li-Metal batarya yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.18: Li-ion Batarya ve Li-Metal Batarya Yapısı [40]

2.1.5.12. Katı Hal Lityum Bataryalar-Yeni Nesil

Katı hal lityum batarya, geleneksel olarak üretilen lityum iyon bataryalarda bulunan sıvı elektrot yerine katı bir elektrolit kullanan şarj edilebilir batarya türüdür. Katı elektrot, şarj ve deşarj sırasında bataryanın katodu ile anodu arasında lityum iyonlarının taşınması için bir ortam görevi görmektedir. Katı hal bataryaların mevcut durumda kullanılan lityum bataryalara göre oldukça önemli avantajları bulunmaktadır. Bunlar 5 ana başlık altında listelenebilir [19].

1. **Güvenlik:** Katı elektrolitler, sıvı elektrolitlere kıyasla daha az sızıntı ve termal kaçak oluşturma eğilimindedir. Bu eğilim, katı hal bataryalarını, özellikle yüksek sıcaklıklarda veya fiziksel hasar durumlarında daha güvenli hale getirmektedir.

2. **Yüksek Enerji Yoğunluğu:** Katı hal bataryaları daha yüksek enerji yoğunluğu potansiyeline sahiptir. Bu nedenle aynı hacim veya ağırlıkta daha yüksek enerji imkanı sunmaktadır.

3. **Ömür:** Katı hal bataryaları, geleneksel lityum bataryalara kıyasla daha uzun döngü ömrüne sahiptir. Bu nedenle uzun bir süre herhangi bir kimyasal bozulma yaşamadan çalışabilmektedir.

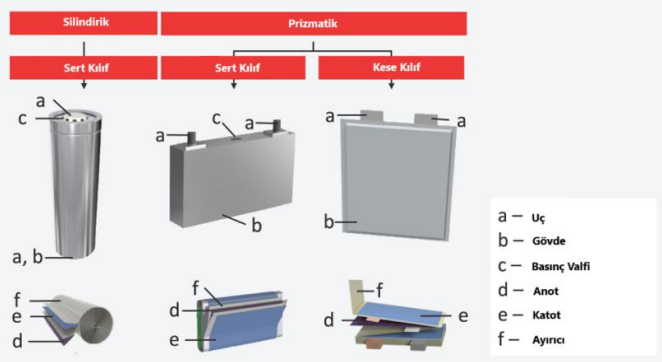
4. **Hızlı Şarj:** Katı hal bataryalarının, katı elektrolitteki iyonsal iletkenliğin artması nedeniyle daha hızlı şarj hızlarına sahip olma potansiyeli vardır.

5. **Geniş Sıcaklık Aralığı:** Katı hal bataryalar, çeşitli uygulamalar için uygun hale getirilen lityum iyon bataryalara kıyasla daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmektedir.

Belirtilen tüm bu avantajlara rağmen, katı hal bataryaları hala üretim ölçeklenebilirliği, maliyet etkinliği ve istenen performans özelliklerine ulaşma konusunda zorluklarla karşı karşıyadır. Dolayısıyla bu kimya türü için ticari ürün çalışmaları devam etmektedir.

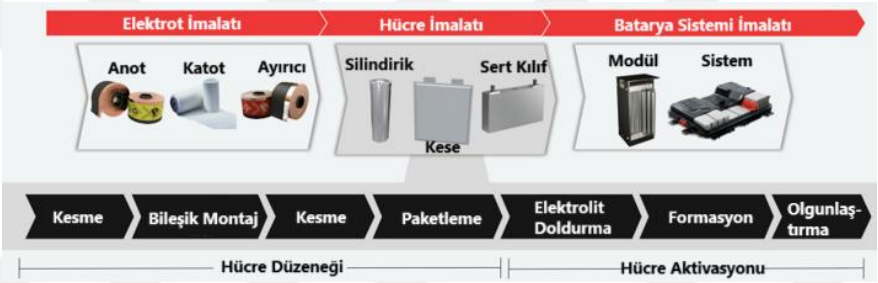
2.1.6. Batarya Hücresi Tipleri

Bataryalar genel olarak birincil ve ikincil olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Günümüzde en sık kullanılan bataryalar ikincil bataryalardır. İkincil bataryalar, anot, katot ve elektrolit olmak üzere temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Elektrolitler, anot ile katot arasındaki yük aktarımı sağlayan kısımdır. Şarj edilebilir bataryalar yüksek gerilim elde edebilmek ve yük çeken sistemin enerji taleplerini karşılayabilmek için farklı şekillerde bir araya getirilmektedir [41]. Bu birleştirme işlemi seri ve paralel olarak yapılmaktadır. Birleştirme esnasında bataryaların güvenlik açısından uygun şekilde kullanımlarını sağlamak amacıyla kontrol sistemleri kullanılır. Bu kontrol sistemleri batarya yönetim sistemleri ve termal kontrol sistemleri olabilmektedir. Genel olarak bataryalar silindirik, prizmatik ve kese olmak üzere üç farklı türde üretilmektedir [42]. Şekil 2.19 üzerinde üretim türlerine göre farklı tip bataryalar gösterilmektedir.



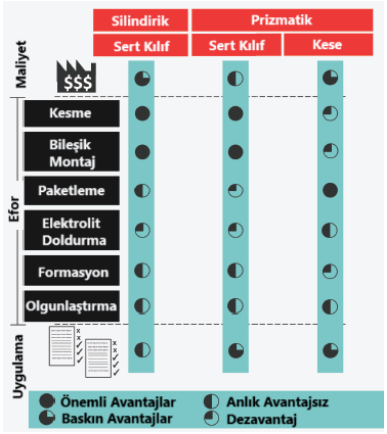
Şekil 2.19: Üretim Türlerine Göre Farklı Tip Bataryalar [43]

Kese hücreleri yapı benzerliği gereği prizmatik hücreler altında yer almaktadır. Çünkü kese hücreleri prizmatik hücrelerin dış koruma kılıflarının çıkarılmış hali gibi düşünülebilir [44]. Şekil 2.20 üzerinde bataryaların imalat süreçleri gösterilmektedir.



Şekil 2.20: Lityum İyon Batarya İmalat Süreci [42]

Elektrot üretimi aşaması, bir sonraki adımda bir araya getirilecek anot, katot ve ayırıcı malzemeleri kapsamaktadır. Batarya hücresi imalat aşamasında, bir önceki adımda üretilen malzemeler elektrikle etkinleştirilir ve farklı tip kılıflara göre bir araya getirilir. Son aşamada ise kullanılacak sisteme göre seri ya da paralel konfigürasyonlarda, kontrol ve yönetim elektronik ekipmanlarını da içerecek şekilde paketlenerek kullanıma hazır hale getirilir.



Şekil 2.21: Batarya Hücresi Türlerinin Karşılaştırması [42]

Şekil 2.21 üzerinde batarya hücre türlerinin karşılaştırmalı bir tablosu sunulmuştur. Burada her batarya türü için farklı avantaj ve dezavantajlar yer almaktadır. Kese türü bataryalarda, ek yalıtım ve basınç valfleri olmadığından dolayı ve diğer hücre türlerine göre daha az bileşene sahip olduğundan dolayı basit bir üretim bulunmaktadır. Bu nedenle kese türü bataryalar maliyet anlamında ciddi oranda avantaj sağlamaktadır. Fakat bu tip hücreler, içerisinde diğer hücre türlerine oranla çok fazla miktarda anot, katot ve ayırıcı bulundurduğundan kesme işlemlerinde büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Yaşlanma sürecine baktığımızda, birleştirme tipinden çok kimyasallar büyük önem arz ettiği için her batarya türü aynı oranda avantaja sahiptir.

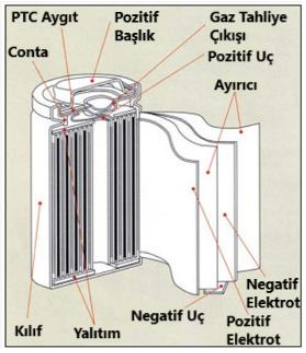
Elektrolitin bileşiğin içine süzülmesi ve katmanların ıslanması sıkı sarılmış yapılarda zorluk getirmektedir. Bu nedenle silindirik ve prizmatik batarya hücreleri elektrolit doldurma aşamasında dezavantaj göstermektedir. Birleştirme esnasında karmaşık üretim süreçlerini barındıran yapıların riski daha fazladır. Bu nedenle basit üretim sürecine sahip yapılarda risk çok daha azdır. Kese türü bataryalara baktığımızda, bileşiğin kese folyosunun alt yarısı ile üst yarısını kaplama sürecinin daha az karmaşık olduğu görülmektedir. Bu nedenle kese türü bataryalar bu aşamada avantaj sağlamaktadır [42].

- **Silindirik Batarya Hücresi**

Silindirik hücreler, ev tipi pillere benzer şekilde üretilmekte ve Şekil 2.19 üzerinde görüldüğü gibi iç katmanlardan oluşmaktadır. Silindirik bataryaların üretimleri kolay ve ucuzdur. Bu özelliğine ek olarak, iyi bir mekanik stabiliteye sahip olduğu için yüksek iç basınçlara dayanabilmektedir. Lityum tabanlı çoğu silindirik batarya Pozitif Termal Katsayı (PTC) anahtarı içermektedir. Bu anahtar, bataryanın aşırı akıma maruz kaldıktan sonra ısınarak yüksek direnç göstermesine ve buna bağlı olarak akım akışının durarak kısa devre korumasına olanak sağlamaktadır. PTC soğuduğunda ise batarya tekrar iletken duruma geçmektedir [45, 46].

Silindirik bataryaların neredeyse hepsi güvenlik amacıyla basınç tahliye mekanizmasına sahiptir. Olası olumsuz bir durumda içeride oluşan yüksek basınç, bu mekanizmada yer alan membran contayı yırtarak dışarıya tahliye edilmektedir. Membran yırtıldıktan sonra doğrudan müdahale olmadan onarılamamaktadır. Bu nedenle de içeride sızıntı ya da kuruma meydana gelebilmektedir. Bu durumun önüne geçmek için bazı üreticiler, ilgili bataryayı enerji

sisteminde komple ayıracak Şarj Kesme Cihazı (CID) kullanmaktadır [45, 46]. Şekil 2.22 üzerinde silindirik batarya hücresi yapısı gösterilmektedir.



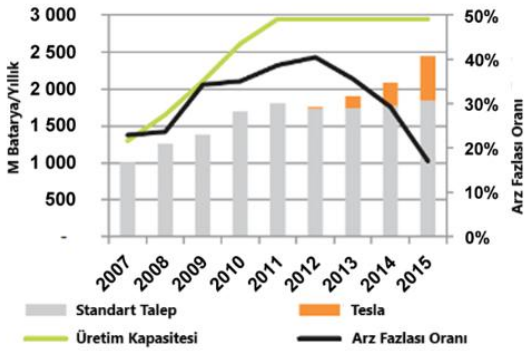
Şekil 2.22: Silindirik Batarya Hücresi Yapısı [48]

Silindirik bataryaların kullanım alanlarına örnek olarak tıbbi cihazlar, taşınabilir el fenerleri, dizüstü bilgisayarlar hatta elektrikli araçlar verilebilir. Günümüzde en sık kullanılan silindirik batarya 18650 serisidir. Bu seriden farklı boyutlara sahip silindirik bataryalarda üretilmektedir [45]. Şekil 2.23 üzerinde 18650 serisi silindirik batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.23: 18650 Tipi Silindirik Batarya Görseli [46]

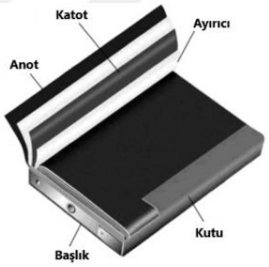
2013 yılında yaklaşık 2,5 milyar adet 18650 serisi silindirik batarya üretilmiştir. Bunun nedeni Wh başına en düşük maliyete sahip olmaları gösterilebilir. Günümüzde telefon ve tabletler düz tasarımlara geçtiği için bu serinin kullanımı azalmıştır. Fakat Tesla Motors'un bu silindirik bataryaları kullanmaya devam etmesi aşırı arza neden olmaktadır. Şekil 2.24 üzerinde yıllara göre 18650 serisi silindirik batarya arz-talebi görülmektedir [46].



Şekil 2.24: 18650 Serisi Silindirik Bataryaların Arz-Talebi [46]

- **Prizmatik Batarya Hücresi**

Prizmatik bataryalar 1990'lı yılların başlarında ortaya çıkmıştır. Daha ince boyutlara sahip sistemlerin enerji talebini karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle alüminyum ya da çelikle kaplanmış folyolar kullanılarak paketlenmektedir. Üreticiler tarafından belirlenmiş belirli bir standart boyutu yoktur. Bu nedenle sistemlere özel olarak üreticiler tarafından tasarlanabilmektedir [45, 46]. Şekil 2.25 üzerinde prizmatik hücre örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.25: Prizmatik Hücre Yapısı [46]

Silindirik bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Fakat deşarj gücü olarak geride kalmaktadır. Termal açıdan da çok verimli olmadıkları söylenebilir. Prizmatik bataryalarda gaz sıkışması meydana gelebilmektedir. Bu nedenle bataryaların bir miktar şişmesine izin verilmelidir. Bu batarya türü özellikle lityum-demir-fosfat ($LiFePO_4$) kimyası için çok kullanışlıdır. Bu nedenle kullanım potansiyeli giderek artış göstermektedir. Günümüzde Fiat, BMW gibi otomobil üreticileri bu tarz bataryaları kullanmaktadır [48].

- **Kese Batarya Hücresi**

Kese tipi bataryalar ilk olarak 1995 yılında piyasaya sürülmüştür. Bu tarz bataryaların sert bir dış muhafazası bulunmamaktadır. Alüminyumdan oluşan filmlere sarılmış esnek

elektrolit ceplerden meydana gelmektedir. Bu özelliğinden dolayı diğer batarya hücre tipleri olan silindirik ve prizmatik bataryalara göre oldukça hafiftir [46]. Şekil 2.26 üzerinde kese tipi batarya örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.26: Kese Tipi Batarya [46]

Kese hücreleri bütünlük açısından sert bir yapıya sahip olmadığı için yüksek mekanik dayanıma sahip değildir. Dayanım olarak dezavantajlı olmalarından kaynaklı bataryalar üzerinde bir miktar şişme payı bırakılmalıdır. Kese türü bataryalar, alanlarını en verimli kullanan bataryalardır. Bu nedenle paketleme verimliliği %90-95 civarlarındadır. Aynı zamanda yüksek yük akımlarını sağlayabilmektedirler. Yüksek akım ve hafif ağırlık avantajlarından kaynaklı olarak otomotiv ve askeri uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler. Prizmatik bataryalar gibi kese türü bataryalar da standart bir boyuta sahip değildir. Bu nedenle sistemlere özel olarak tasarlanmaktadırlar. Kese türü bataryalar, genel olarak lityum-polimer (Li-Po) içeriğe sahiptir. Lityum-polimer kaynaklı yüksek deşarj akımları sayesinde hobi elektroniği sistemlerinde de sıklıkla kullanılmaktadır [49].

Kese türü bataryaları paketleme esnasında uyulması gereken bazı detaylar bulunmaktadır. Bu bataryaların şişme özelliklerinden kaynaklı üst üste değil, yan yana ve arada bir miktar boşluk bırakacak şekilde birleştirilmesi gerekmektedir. Her ne kadar bataryaların şişme durumuna izin verilmiş olsa da aşırı miktarda meydana gelebilecek şişme, gazın dış alüminyum kaplamayı delerek dışarı çıkmasına ve gazın tutuşmasına neden olabilmektedir. Bu durum kese türü bataryalardaki en tehlikeli durumlardan birisi olarak görülmektedir [46]. Şekil 2.27 üzerinde şişmiş bir kese türü batarya gösterilmektedir.



Şekil 2.27: Şişmiş Kese Batarya [46]

2.2. BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ

Günümüzde batarya teknolojileri, en basit elektronik cihazlardan, daha karmaşık yapıdaki elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji depolama sistemleri gibi teknolojilere kadar birçok alanda kullanılmaktadır [50]. Yüksek güç isterlerine sahip sistemlerde batarya bağlantıları farklılık göstermektedir. Seri veya paralel batarya sayıları bu farklılıkların en başında gelmektedir. Batarya sistemleri sadece seri veya paralel bataryalardan oluşmamaktadır. Sistemin güvenliğini ve kontrolünü sağlayacak olan harici sistemlerde kullanılmaktadır. Tüm bu sistemlerin kontrolü batarya yönetim sistemi tarafından yapılmaktadır.

Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, uzun hizmet ömrü ve çevre dostu olmaları nedeniyle şu anda piyasadaki mevcut bataryalar arasında en çok kullanılan teknolojidir. Sürekli olarak büyüyen elektrikli ve hibrit araç pazarı, otomotiv bataryalarının optimizasyonuna yönelik yeni teknolojiler araştırılmasına yol açmıştır. Tüm araştırma sürecinin asıl amacı, maliyet, ağırlık, boyut ve üretim karmaşıklığının azaltılması yanı sıra güvenilirlik ve performansın arttırılmasıdır [51]. Lityum iyon bataryaların, çalışma sıcaklığı, çalışma gerilimi, şarj dengesi vb. gibi hususlarla ilgili kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle lityum tabanlı bataryalar için batarya yönetim sistemleri gerekmektedir. Batarya yönetim sistemlerinin bazı temel işlevleri vardır [52]. Bunlar; batarya gerilim izleme, şarj durumu kontrolü, sağlık durumunun ölçümü, kontrolü ve optimizasyonu, bataryalar arası yük dengesi ve arıza tespiti, batarya gerilim dengelemesi, batarya sistemi termal kontrolü vb.

Tipik bir otomotiv bataryası Şekil 2.28 üzerinde gösterilmektedir. Bir otomotiv batarya sisteminin temel bileşeni bataryalardır. Ticari batarya sistemlerindeki hücre sayısı yüzden birkaç bine kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle çok yüksek adetlerdeki bu batarya hücrelerini kontrol edebilmek amacıyla batarya paketlerinde sensörler kullanılmaktadır. Her batarya

hücresi için sıcaklık, gerilim gibi kritik bilgilerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Ayrıca batarya paketinin sisteme sağladığı tüm bilgilerin de analiz edilmesi gerekmektedir. Bu gibi tüm kontrol işlemleri batarya yönetim sistemi tarafından işletilmektedir [51].



Şekil 2.28: Otomotiv Batarya Yapısı [51]

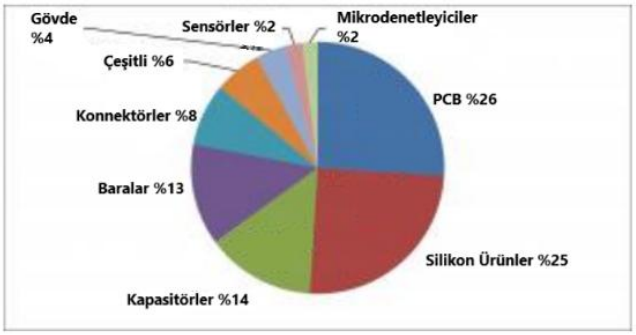
Batarya yönetim sistemleri genellikle bir uygulamanın özel ihtiyaçları için oluşturulmaktadır. Bazı sistemler düşük güç seviyesine sahip olduğu için pasif dengeleme tabanlı bir batarya yönetim sistemi kullanırken, bazı sistemler çok daha yüksek güç seviyelerine sahip olduğundan aktif dengelem tabanlı batarya yönetim sistemi kullanabilmektedir. Bu nedenle sistemlerin isterlerine göre batarya yönetim sistemleri kullanılmaktadır.

Batarya yönetim sisteminin iki farklı çalışma modu vardır. Bunlardan ilki uyku modudur. Bu mod araç kapalıyken kullanılan düşük güç modudur. Diğeri ise aktif moddur. Aktif modda iken sistem çalışır haldedir [53]. Aktif modda batarya yönetim sisteminin çalışma algoritması Şekil 2.29 üzerinde gösterildiği gibidir.



Şekil 2.29: Batarya Yönetim Sisteminin Çalışma Algoritması [53, 54]

Geleneksel batarya yönetim sistemlerini çevreleyen bazı önemli problemler üzerine geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Bu problemlerin başında maliyet gelmektedir. Kablo demetini oluşturan konnektörler, batarya yönetim sistemi maliyetinin %8'ini kapsamaktadır. Ek olarak, bu konnektörler, batarya sisteminde arızaya neden olmaya çok yatkındır. Bu gibi problemler, batarya yönetim sistemlerinde kablosuz tasarımların alternatif bir çözüm olabileceği konusunda öngörülere sebebiyet vermiştir [55]. Elektrikli araçlardaki güç sistemi maliyet dağılımı Şekil 2.30 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2.30: Elektrikli Araçlarda Güç Sistemi Maliyet Dağılımı [55]

Günümüzde kablosuz batarya yönetim sistemleri üzerine birçok çalışma yürütülmektedir. Bu çalışmaların en temel amaçları, bataryalar arasındaki kablo demetlerini ortadan kaldırarak arıza riskini azaltmak ve buna bağlı olarak bakım sürelerini kısaltmak, kablolu tip haberleşme protokollerini ortadan kaldırarak seri olarak gruplanan batarya paketleri arasında serbestliği sağlamak ve buna bağlı olarak kontrol devrelerinde kullanılan izolasyon ekipmanlarını devre dışı bırakılarak maliyet etkin bir çözüm sunmaktır.

2.2.1. Geleneksel Batarya Yönetim Sistemleri

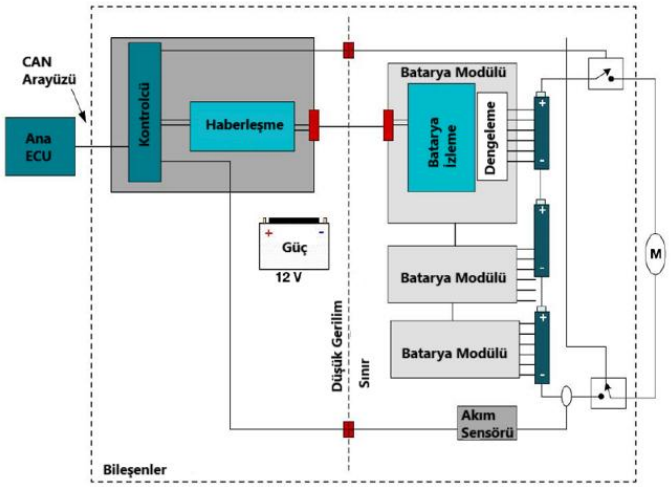
Bataryalar kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren bir depolama aracıdır. Bu depolama araçları birincil ve ikincil olmak üzere iki farklı türde kategorize edilmektedir. Birincil bataryalar tekrar tekrar kullanılamayan yani tek kullanımlık olarak ifade edilen bataryalardır. İkincil bataryalar ise birden fazla kez şarj edilip kullanılabilmektedir. Başlangıçta taşınabilir sistemlerde birincil türdeki bataryalar kullanılmıştır. Fakat zamanla ikincil bataryaların geliştirilmesi ile tercih sebebi olmaktan çıkmışlardır. İkincil batarya türünde ilk olarak kurşun-asit bataryalar tercih edilmiştir. Fakat çok ağır ve verimsiz oldukları için zamanla yerini diğer türdeki bataryalara bırakmıştır [56].

1970'li yıllarda lityum tabanlı bataryaların gelişimi ile batarya sistemlerinde yeni bir dönem başlamıştır. Özellikle elektrikli araçlarda, lityum bataryalar, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, maliyet etkin olması, şarj ve deşarj verimliliğinin yüksek olması, kendi kendine deşarj olma işleminin düşük olması ve hafıza etkisi gibi dezavantaja sahip olmaması gibi avantajları nedeniyle tercih sebebi olmuştur. Yüksek gerilim ve kapasite istenilen sistemlerde bataryalar seri ve paralel konfigürasyonlarda yapılandırılmaktadır. Bu yapılandırmada, seri hücreler ile gerilim seviyesi artırılırken, paralel hücreler ile kapasite arttırılmaktadır. Oluşturulan bu yüksek adetli batarya paketleri karmaşık bir kapıya sebebiyet vermekte ve sistemler güvenlik problemleri oluşturabilmektedir [56]. Yüksek güç kapasiteli batarya

sistemlerinin kontrolü için tüm hücrelerin gerilim, akım ve sıcaklık değerlerinin belirli aralıkta tutulması gerekmektedir. Bu aralıkların kontrol edilebilmesi ve güvenlik anlamında sistemin tutarlı çalışabilmesi amacıyla batarya yönetim sistemlerinin kullanımı zorunlu hale gelmiştir.

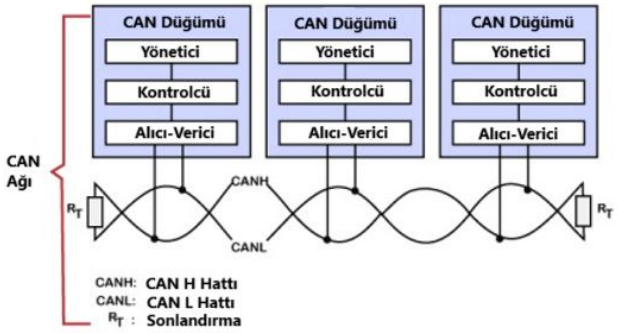
Özellikle lityum tabanlı batarya paketlerinde batarya yönetim sistemi kullanımı büyük bir önem taşımaktadır. Çünkü kontrolsüz gerçekleşen şarj-deşarj süreci, lityum bataryaları olması gereken aralığın dışına çıkartarak, yanma veya patlama gibi sorunlara yol açabilmektedir. Genel anlamda sisteme entegre edilmiş bir batarya yönetim sistemi yapısını incelediğimizde temel fonksiyonları şu şekilde özetleyebiliriz.

1. Batarya paketinde yer alan tüm hücrelerin gerilimlerini izlemek,
2. Batarya paketinin akım ve sıcaklık parametrelerini kontrol etmek,
3. Bataryaları düşük gerilim, yüksek gerilim gibi istenmeyen bölgelerden uzak tutmak,
4. Şarj ve deşarj esnasında batarya paketinin uygun sıcaklık değeri aralığında çalışmasını sağlamak,
5. Şarj ve deşarj esnasında batarya paketini yüksek akım seviyelerine karşı korumak,
6. Lityum tabanlı bataryaların kimyasından kaynaklı olarak şarj ve deşarj esnasında oluşabilecek gerilim dengesizliklerini ortadan kaldırmak,
7. Sistemdeki batarya paketinin sağlığını (SOH) ve şarj durumunu (SOC) kestirmek,
8. Batarya paketine dair verileri haberleşme protokolleri üzerinden ana sistem kontrolcüsüne iletmek,
9. Uygunsuz kullanım durumlarını tespit ederek sistemin güvenliğini sağlayacak şekilde ana kontak anahtarlarını kontrol etmek.



Şekil 2.31: Örnek Batarya Paketi Mimarisi [57]

Şekil 2.31 üzerinde örnek bir batarya paketi mimarisi gösterilmektedir. Batarya sistemlerinin günümüzde en sık kullanıldığı alan elektrikli araçlardır. Bu nedenle birçok farklı ve karmaşık batarya yönetim sistemi mimarisi söz konusudur. Otomotiv sektöründe en sık kullanılan haberleşme türü CAN-Bus protokolü olduğu için elektrikli araç batarya yönetim sistemlerinin çoğu da bu protokol özelinde geliştirilmiştir. Elektrikli araçlarda motor kontrol ünitesi (ECU) usta (master) görevi üslenirken, batarya yönetim sistemleri köle (slave) görevini üstlenmektedir. Bu sayede motor kontrolcüsü ile batarya yönetim sistemleri arasında papatya zinciri yapısı oluşturulmaktadır. CAN-Bus haberleşme protokolünün elektrikli araçlarda tercih edilmesinin en temel nedenleri, iyi bir gürültü bağışıklığına sahip olması ve sinyal yansımasını önleyen sonlandırma yapılarına sahip olmasıdır [58]. Şekil 2.32 üzerinde örnek bir CAN-Bus haberleşme protokolüne sahip elektrik araç topolojisi gösterilmiştir.



Şekil 2.32: CAN-Bus Haberleşmesi Örnek Mimari [58]

2.2.1.1. Hücre İzleme

Yüksek enerji seviyelerine sahip batarya sistemlerinde seri ve paralel elektriksel bağlantıların fazla olması sebebiyle sistem karmaşık hale gelmektedir. Bu karmaşık yapının yanı sıra batarya sistemindeki hücreler, değişen ortam koşullarına göre farklı gerilim, akım ve sıcaklık değerlerine sahip olmaktadır. Dolayısıyla batarya yönetim sistemi kullanımı kontrol ve güvenlik için zorunlu hale gelmektedir. Batarya yönetim sistemi farklı tiplerde sensörler kullanarak batarya hücrelerinin akım, gerilim ve sıcaklık değerleri sürekli olarak ölçmekte ve ölçüm sonucuna göre kararlar vermektedir. Batarya hücrelerinin olağan dışı çalışma koşullarında büyük tehlikeleri olduğu için sistemdeki algılayıcıların çok hassas ölçüm kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Batarya paketlerindeki ölçümler genel olarak aşağıdaki yöntemler kullanılarak yapılmaktadır [56].

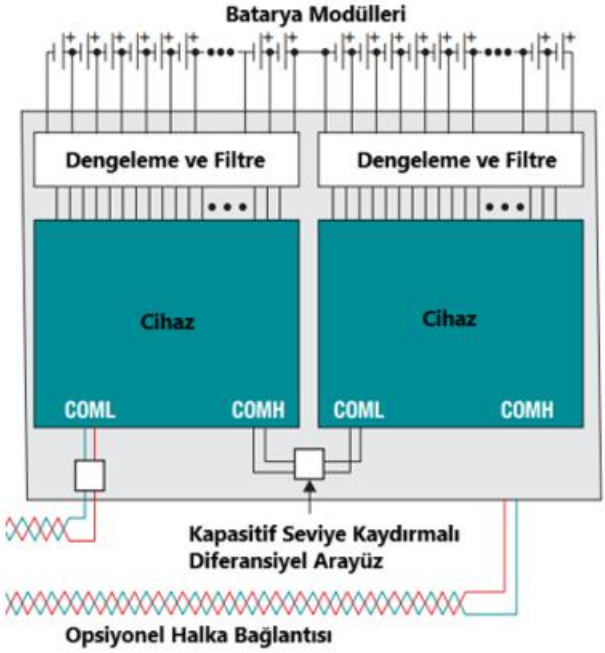
- Paralel yapıdaki tüm batarya hücrelerinin gerilim seviyeleri aynı olacağından, batarya paketindeki batarya hücresi ölçümleri, seri batarya blokları üzerinden yapılmaktadır. Bu

gerilim değerleri ADC (Analog Dijital Konvertör) veya çoklayıcı devre (Multiplexer) tabanlı elektronik bileşenler ile yapılmaktadır. Gerilim değerleri batarya dengeleme sisteminin en temel parametresi olduğu için kullanılan mimarilerdeki yapıların doğruluk oranlarının çok yüksek olması gerekmektedir.

- Batarya paketinde, hücreleri yüksek akım değerlerine ya da kısa devre gibi problemlere karşı korumak amacıyla akım sensörleri kullanılmaktadır. Bu akım sensörleri genel olarak batarya paketinin ana güç hattına bağlanmakta ve batarya yönetim sistemi tarafından sürekli olarak izlenmektedir. Akım ölçümünde alan etkili sensörler (Hall Effect) ya da şönt (Shunt) dirençler kullanılabilmektedir.

- Bataryaların sağlıklı bir şekilde kullanılabilmesi için uygun ortam koşullarında çalıştırılması gerekmektedir. Bu nedenle uygun ortam koşullarını tespit edebilmek amacıyla batarya paketlerinde sıcaklık sensörleri kullanılmaktadır. Bu sensörler batarya çalışma koşullarını sürekli olarak batarya yönetim sistemine raporlamaktadır. Sıcaklık sensörü olarak termistör ya da termokupl tercih edilebilmektedir.

Şekil 2.33 üzerinde örnek bir batarya paketinin hücre izleme ve iletişim yapılandırma mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 2.33: Örnek Batarya Paketi Hücre İzleme ve İletişim Mimarisi [59]

2.2.1.2. Batarya Sağlığı Tahmini (State of Health - SOH)

Lityum bataryaların performansları çalışma koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu değişiklikler, bataryaların kullanım koşulları ve kullanım zamanı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bataryaların yaşlanmasının en temel nedeni kimyasal yapılarıdır. Bu yaşlanma büyük ölçüde batarya malzemelerinden kaynaklanmaktadır. Yapılan birçok literatür çalışmasında, bataryalar, takvim yaşlanması ve döngü yaşlanması üzerine iki ana başlıkta incelenmektedir [53, 60]. Takvim yaşlanması bataryaların depolama sırasındaki kesin kayıplarını ifade etmektedir. Bataryaların bozulması büyük ölçüde saklama koşullarına bağlıdır. Örneğin, olması gerekenden yüksek sıcaklık değerleri, kapasite kaybına neden olan korozyon ve lityum kaybı gibi ikincil reaksiyonları kolaylaştırmaktadır [60]. Düşük sıcaklıklar bu sorunu engellemektedir ancak bu sefer de malzemeler difüzyon kaybına uğramakta ve batarya kimyasında değişikliğe neden olmaktadır [61]. Saklama koşullarında bataryaların şarj seviyesi de büyük bir öneme sahiptir. Yapılan çalışmalar, yüksek şarj oranına sahip bataryaların depolandığında daha yüksek bozulmalara maruz kaldığını göstermektedir [53]. Çok uzun süre değiştirilmeyen ve kullanılmayan bataryaların değiştirilmesi gerektiği, aksi durumda sistemlerde yanma/patlama gibi sorunlara yol açabileceği sonucuna varılmıştır. Örneğin, Nisan 2019 yılında Tesla Model S marka bir elektrikli araç yer altı otoparkında aniden alev alarak yanmaya başlamıştır. Daha sonra yapılan incelemelerde sorunun batarya yaşlanması ile ilgili olduğu anlaşılmıştır [56]. Bir diğer yaşlanma tipi olan döngü ya da çevrim yaşlanması ise bataryaların şarj ve deşarj esnasındaki davranışlarına bağlıdır. Bu duruma etki eden çevresel faktörler de kritik öneme sahiptir. Yüksek akım talepleri, olması gereken değerler dışındaki çevresel sıcaklıklar çevrim yaşlanmasına doğrudan etki etmektedir. Yüksek sıcaklıklarda kullanılan bataryaların, daha hızlı bozulmalara neden olan ekzotermik reaksiyonlara maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Batarya hücrelerinin yaşlanmasını değerlendirmek için birçok algoritma geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olanı batarya yönetim sistemleri tarafından kullanılan sağlık durumu (SOH)'dur. En yaygın sağlık durumu denklemi Denklem 2.1 üzerinde verilmiştir.

$$Batarya\ Sağlığı\ Tahmini = SOH\ (t) = \frac{\text{Nominal Kapasite (t)}}{\text{Başlangıç Kapasitesi}}(\%) \tag{2.1}$$

Batarya sağlık durumu (SOH), t anındaki nominal kapasite ile başlangıç kapasitesi arasındaki oranı temsil etmektedir. Batarya sağlık durumu (SOH) için bir diğer faydalı kavram bataryaların sahip oldukları iç dirençlerdir. Batarya paketinden sağlayabileceğimiz maksimum gücü sağlayabilmek için batarya sağlık oranının yüksek oranda doğru tespit edilmesi

gerekmektedir. İç direnç her batarya hücresi için farklılık göstermektedir. Buna ek olarak çok küçük değerlerde (mOhm) olduğu için ölçüm imkanı da zor olmaktadır. Bu dezavantajı en aza indirgemek için batarya hücresi kullanıcıları, batarya sistemini tasarlamadan önce her batarya hücresini ayrı ayrı test ederek gruplamaktadır. Bu durum her batarya hücresinin aynı oranda bozulmasını ve sistemin daha stabil olmasını sağlamaktadır. Batarya hücrelerindeki iç direnç ölçümü DC akım darbeleri kullanılarak kabaca tespit edilebilmektedir [62]. Ancak daha düzgün sonuçlar almak için Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem farklı frekanslarda AC enjeksiyon temeline dayanmaktadır [63]. İç direnç ölçümünün ticari batarya yönetim sistemlerine maliyet odaklı entegrasyonu için literatür çalışmaları hala devam etmektedir.

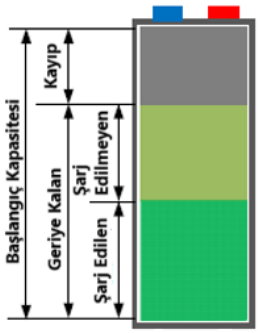
2.2.1.3. Hücre Dengeleme

Batarya Yönetim Sistemleri'nin batarya paketlerindeki en önemli görevlerinden birisi de hücre dengeleme işlemidir. Temel anlamda değerlendirildiğinde bataryaların gerilimlerindeki dengesizlikler iki ana başlık altında toplanabilir. Bu başlıklardan biri üretim kaynaklı etkenler, diğeri ise kullanım kaynaklı etkenlerdir. Bataryalar, üretim aşamasında tümüyle aynı proseslerden geçse dahi kimyasal yapılarından dolayı ufak seviyede de olsa farklı iç direnç ve kapasiteye sahip olurlar. Bu ufak farklılıklar da bataryaların şarj ve deşarj esnasında dengesiz bir duruş sergilemesine sebebiyet vermektedir. Kullanım kaynaklı etkenler ise bataryaların seri ve paralel gruplandırılması, farklı ortam sıcaklıklarında kullanım durumu ve hassas kontrol devreleri olarak ifade edilebilir. Kullanım etkenlerine bağlı olarak da bataryalar arasında dengesizlik gözlemlenebilmektedir. Dengesizliğe ek olarak lityum tabanlı bataryalar üretildikleri andan itibaren kimyasal yapıları gereği kapasite kaybına maruz kalmaktadırlar. Bu kapasite kaybı ortam sıcaklığı, uzun süre rafta bekletilme gibi unsulara bağlı olarak değişebilmektedir [56, 64].

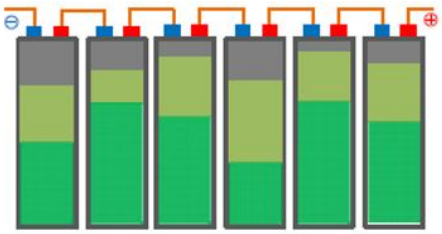
Bataryalarda dengelemenin temel amacı batarya grubunun kapasitesini en yüksek seviyede kullanarak güvenlik sağlamaktır. Batarya gruplarında seri ve paralel bağlantılı olarak yüzlerce veya binlerce batarya yer almaktadır. Bu batarya grubunun en optimum seviyede kullanımı sağlamak için grup içerisinde yer alan bataryaların kapasite değerlerinin aynı olması gerekmektedir. Birden fazla seri bataryaya sahip bir batarya grubunda Batarya Dengeleme Sistemi kullanılması gerekmektedir. Paralel batarya gruplamasında ise pozitif ve negatif uçlar elektriksel olarak birbirine doğrudan bağlandığı için dengeleme ihtiyacı bulunmamaktadır [56].

Yüksek gerilim seviyesine sahip batarya gruplarında seri batarya paketlerinin önemi oldukça yüksektir. Çünkü batarya gruplarının kapasitesini seri paketler belirlemektedir. Bu nedenle seri hücrede herhangi bir dengesizlik olması durumunda diğer batarya paketleri tam dolu olsa dahi batarya grubunun kapasitesi, kapasitesi düşük olan batarya paketinden dolayı düşük olmaktadır [64].

Şekil 2.34 üzerinde örnek bir batarya görseli verilmiştir. Şekil 2.35 üzerinde ise kapasite kaybı ve dengesizliği olan birden fazla seri bağlı bir batarya grubunun görseli verilmiştir. Bu görselde üretim ya da kullanım kaynaklı kapasite farklılıklarını daha net ifade edebilmek amacıyla tüm bataryalar farklı şarj, deşarj ve kapasite kaybı değerlerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.34: Batarya Terimleri Bilgi Görseli [65]



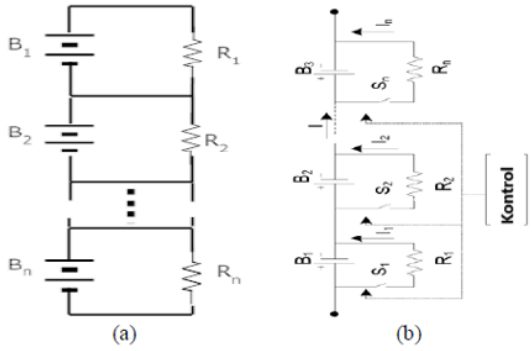
Şekil 2.35: Seri Bağlı Batarya Grubu [65]

Şekil 2.35 üzerinden anlaşılacağı üzere, dengeleme sistemi olmayan bir batarya paketinde şarj esnasında kapasitesi az olan bataryalar şarj olmaya devam ederken, dolu seviyeye yakın hücreler aşırı şarja maruz kalacaklardır. Bu aşırı şarj durumu da hücrelerin aşırı ısınmasına ve bir süre sonra parlayarak patlayıp gaz açığa çıkarmasına neden olmaktadır. Deşarj durumunda ise dolu olan hücreler deşarj olmaya devam ederken, boş seviyeye yakın hücreler aşırı deşarja maruz kalacak ve bataryada erken yaşlanmaya (kapasite kaybı) neden olacaktır. Şarj ve deşarj esnasında yaşanabilecek tüm bu olumsuz koşullara önlem olacak şekilde güvenliği arttırmayı amaçlayan çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda da batarya dengeleme sistemleri özelinde iki ana başlık ortaya çıkmıştır. Bu başlıklardan bir tanesi pasif dengeleme diğeri ise

aktif dengelemedir. Pasif dengelemenin temeli enerjiyi ısı yoluyla harcamaya dayanırken, aktif dengelemenin temeli enerjiyi dönüştürerek geri kazanmaya dayanmaktadır [65].

A. Pasif Hücre Dengeleme

Batarya dengeleme sistemleri arasında en basit ve sorunsuz olan şüphesiz pasif dengeleme metodudur. Bu metot şu şekilde işletilmektedir. Batarya grubu içerisindeki en yüksek ve en düşük gerilim seviyeli seri batarya paketi bulunur. Sonrasında ise paralel direnç vasıtasıyla en yüksek gerilimli seri batarya paketi, en düşük gerilimli seri batarya paketine eşit olana kadar deşarj edilir. Gerilim seviyeleri eşitlendiğinde dengeleme işlemi durdurulmaktadır. Genel anlamda pasif hücre dengelemesi iki ana başlık altında incelenmektedir. Bunlardan ilki sabit şönt dirençli diğeri ise kontrollü şönt dirençli dengelemedir. Şekil 2.36 (a)'da sabit şönt dirençli dengeleme yapısı, (b)'de ise kontrollü şönt dirençli dengeleme yapısı gösterilmektedir [56, 65].



Şekil 2.36: Sabit ve Kontrollü Şönt Dirençli Dengeleme Mimarisi [64]

- **Sabit Şönt Dirençli Dengeleme**

Pasif hücre dengeleme metotlarından ilki sabit şönt dirençli dengelemedir. Bu yöntem tüm hücreler için akımı sürekli olarak atlatmakta ve hücre gerilimlerini sınırlamaktadır. Genelde kurşun-asit ve nikel bazlı batarya hücrelerinde kullanılmaktadırlar. En önemli özellikleri basit ve ucuz maliyetli olmalıdır. Fakat bataryaya bağlı oldukları için sürekli olarak ısı yaymaktadırlar [51].

- **Kontrollü Şönt Dirençli Dengeleme**

Pasif hücre dengeleme metotlarından ikincisi ise kontrollü şönt dirençli dengelemedir. Bu yöntemde dirençler sürekli olarak bataryalara bağlı değildir. Kontrolcü tarafından açılıp

kapanabilen elektronik yapılara sahiptirler. Bu elektronik yapılar röleler ya da yarı iletken malzemeler olabilmektedir. Dengeleme işlemine ihtiyaç duyulduğunda, kontrolcü tarafından ilgili seri paketin dengeleme anahtarı/rölesi açılarak dengeleme işlemi başlatılmaktadır. Bu yöntem sabit şönt dirençli metoda göre daha verimlidir. Aynı zamanda basit ve güvenilir oldukları için lityum tabanlı batarya paketlerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar [51].

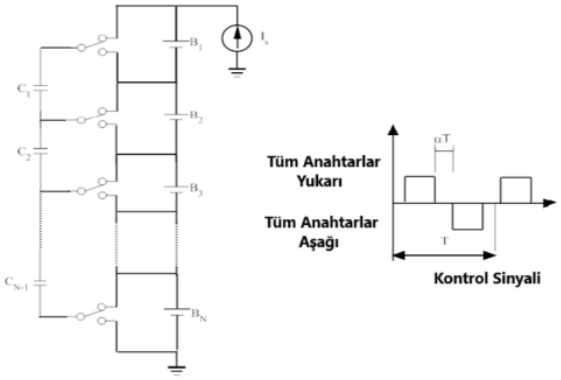
Pasif hücre dengelemede yer alan her iki metodun da temel dezavantajı fazla enerjinin ısı yoluyla ortama yayılmasıdır. Bu durum bazı sistemlerde aşırı ısınmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle bu yöntemlerin kullanıldığı batarya gruplarında dengeleme akım limitleri ve termal yapılara oldukça önemlidir.

B. Aktif Hücre Dengeleme

Aktif dengeleme metodunun temeli enerjinin geri kazanımı üzerinedir. Bu metotta yüksek enerjiye sahip hücre direnç üzerinden deşarj edilmemektedir. Bunun aksine, yüksek enerjiye sahip batarya hücresindeki fazla enerji, batarya paketi içerisinde en düşük enerjiye sahip batarya hücresine aktarılmaktadır. Dolayısıyla fazla enerji ısı ile ortama yayılmayıp tekrar kullanılabilmektedir. Aktif hücre dengeleme metodu genel anlamda üç başlık altında incelenmektedir. Bunlar; kapasitör tabanlı aktif dengeleme, indüktör/transformatör tabanlı aktif dengeleme ve dönüştürücü tabanlı aktif dengelemedir [53, 56].

- **Kapasitör Tabanlı Aktif Dengeleme**

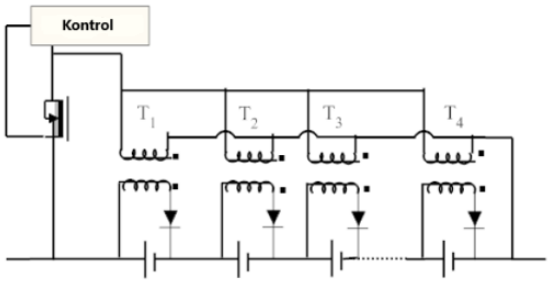
Kapasitör tabanlı hücre dengelemesi, şarj taşıma olarak da bilinmektedir. Fazla enerjiyi bir batarya paketinden diğer batarya paketine kapasitör aracılığıyla taşıma temeline dayanmaktadır. Şekil 2.37 üzerinde anahtarlamalı tip kapasitör tabanlı aktif dengeleme yapısı gösterilmektedir. Şekil üzerinden de anlaşılacağı üzere n adet batarya hücresine sahip bir batarya paketi için n-1 adet kapasiteye ve 2n adet anahtara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı, kapasitörlerin kapasite limiti kaynaklı uzun dengeleme süreleridir [64].



Şekil 2.37: Kapasitör Tabanlı Aktif Dengeleme Mimarisi [64]

- **İndüktör/Transformatör Tabanlı Aktif Dengeleme**

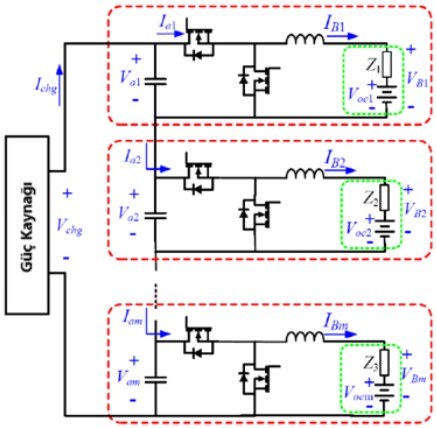
Aktif dengeleme metodu altında yer alan bu sistem batarya hücreleri arasındaki enerji transferini indüktör veya transformatör yardımı ile yapmaktadır. Kapasitör tabanlı sistemlere göre oldukça hızlıdırlar fakat maliyetleri yüksektir. Aynı zamanda anahtarlama frekansları yüksek olduğu için tasarlanan sisteme filtreleme amacıyla filtre kapasitörleri eklenmelidir. Aktif dengeleme metodunda en sık kullanılan topoloji çoktu transformatör topolojisidir. Her hücre için bir transformatör kullanılmaktadır. Çoklu batarya gruplarında oldukça avantajlı olmasına rağmen maliyeti yüksektir [51]. Şekil 2.38 üzerinde çoklu transformatör aktif dengeleme topolojisi gösterilmiştir.



Şekil 2.38: Transformatör Tabanlı Aktif Dengeleme Mimarisi [64]

- **Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme**

Batarya hücre dengelemesi için kullanılan enerji dönüştürücüler; boost, buck, flyback gibi birçok başlıkta kategorize edilebilmektedir. Dengeleme sürecini doğrudan kontrol edebilme avantajları ile ön plana çıkmaktadırlar. Fakat sistemlerin çok karmaşık ve yüksek maliyetli olması kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Şekil 2.39 üzerinde buck-boost topolojisine sahip bir aktif dengeleme sistemi yapısı gösterilmektedir [64].



Şekil 2.39: Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme Mimarisi [64]

Genel anlamda hem pasif hem de aktif dengeleme topolojilerine baktığımızda birçok avantaj ve dezavantaj göze çarpmaktadır. Tablo 2.8 üzerinde farklı topolojiler ile ilgili avantaj ve dezavantaj tablosu gösterilmektedir.

Tablo 2.8: Farklı Dengeleme Mimarilerinin Avantaj ve Dezavantajları [64]

Dengeleme Yöntemleri	**Avantajlar**	**Dezavantajlar**
Sabit Şönt Dirençli	Ucuz. Küçük boyutu sayesinde uygulaması kolay.	Efektif değil. Yüksek enerji kaybı nedeniyle verimsiz.
Kontrollü Şönt Dirençli	Ucuz. Uygulaması kolay. Hızlı eşitleme oranına sahip. Şarj ve Deşarj esnasında uygulanabilir fakat deşarj esnasında tavsiye edilmez.	Efektif değil. Nispeten yüksek enerji kaybı. Yüksek güçlü direnç kullanımı gerekli. Termal yönetim gerekli.
Kapasitör Tabanlı	Düşük gerilim ve akım stresi. Şarj ve deşarj modlarında kullanım.	Karmaşık kontrol yapısı. Tatmin edici eşitleme hızı. Yüksek anahtar sayısı.
Transformatör Tabanlı	Hızlı eşitleme imkanı. Modüle edilebilir kolay yapı.	Yüksek maliyet. Karmaşık kontrol yapısı. Harici manyetik kayıplar.
Dönüştürücü Tabanlı	İyi eşitleme imkanı. Modüle edilebilir kolay yapı.	Yüksek maliyet. Akılcı kontrol yapısı ihtiyacı.

2.2.1.4. Termal Kontrol

Lityum tabanlı bataryalar, günümüzün enerji depolama çözümlerinde kilit bir rol oynamaktadır. Ayrıca elektrikli araçlardan taşınabilir elektronik cihazlara, yenilenebilir enerji sistemlerinden endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu bataryaların diğer enerji depolama teknolojilerinden ayrışan en temel özellikleri yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür sunma yeteneğidir. Ancak bu avantajlar lityum tabanlı bataryaların çalışma sırasında ürettiği ısının etkin bir şekilde yönetilmesi gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Bataryaların ürettiği ısı, yönetilmediği takdirde performans düşüşüne, ömrün kısalmasına ve güvenlik risklerinin artmasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda, batarya termal yönetimi, güvenli, verimli ve uzun ömürlü batarya operasyonları için kritik bir role sahiptir [56].

Batarya sistemlerinde yüksek enerji ve kapasite değerleri elde etmek için batarya hücreleri seri-paralel olarak konfigüre edilmektedir. Hücrelerin bir araya getirilmesi ile batarya modülleri, modüllerin bir araya getirilmesi ile de batarya grubu oluşturulmaktadır. Bu sayede batarya gruplarının enerji kapasitesi artırılmaktadır. Oluşturulan bu batarya grubu çalışma koşullarına ve çevre şartlarına göre sıcaklık artışına/azalışına maruz kalmaktadır. Bu sıcaklık değişimleri lityum tabanlı elektrokimyasal batarya hücrelerinde farklı etkiler meydana getirmektedir. Örneğin uygun olmayan sıcaklık değerlerinde çalışma, batarya grubunun enerji kapasitesini azaltabilmekte ya da daha ileri boyutta batarya hücrelerinde patlamalara yol açabilmektedir [66].

Lityum tabanlı bataryalar için en uygun çalışma sıcaklık değerleri 20-25 °C aralığındadır. Bu sınırların dışındaki kullanımlarda hızlı yaşlanma, batarya hücrelerinde zamanla dengesizlik, şarj/deşarj dengesizliği gibi istenmeyen durumlar meydana gelebilmektedir. En temel yaşanan problemler arasında, şarj süresinin bitmesine yakın batarya hücrelerinde aşırı ısınma, düşük sıcaklık ortamlarında ise batarya şarj derinliğinin düşmesi (kapasite kaybı) örnek gösterilebilir. Termal yönetim, bataryalarda üretilen ısının güvenli ve etkili bir şekilde dağıtılmasını ve kontrol edilmesini sağlamaktadır. Bu yönetim ise genel olarak iki temel ana başlıkta incelenmektedir [67, 68, 69].

A. Pasif Termal Yönetim

Pasif termal yönetim, bataryaların kendi kendine soğumasını veya ısının doğal yollarla yayılmasını sağlayarak ısının kontrol edilmesini amaçlamaktadır. Pasif yöntemler genellikle

hareketli parça veya enerji tüketimi gerektirdiği için karmaşık değildirler. Pasif termal yönetim iki alt başlık altında incelenebilir.

- **Isı Yayılımı ve Malzeme Seçimi:** Bataryaların ısısını yaymak için yüksek termal iletkenliğe sahip malzemeler kullanılmaktadır. Örneğin, batarya hücreleri arasında yer alan termal pedler veya ısı emiciler (head sink) bu amaçla kullanılmaktadır [70]. Şekil 2.40 üzerinde termal ped ve Şekil 2.41 üzerinde ise ısı emici gösterilmektedir.



Şekil 2.40: Termal Ped



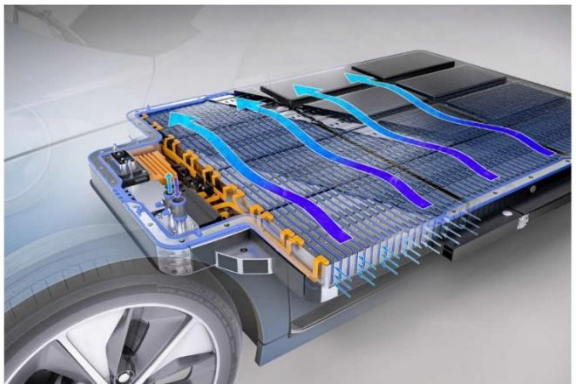
Şekil 2.41: Isı Emici (Head Sink)

- **Termal Dolgu Malzemeleri (TIMs):** Termal arayüz malzemeleri, batarya hücreleri arasında ısı transferini optimize etmek için kullanılmaktadır. Bu malzemeler, ısının batarya hücrelerinden daha soğuk bölgelere aktarılmasına yardımcı olur.

B. Aktif Termal Yönetim

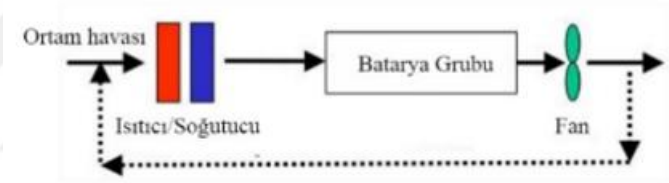
Aktif termal yönetim sistemleri, ısıyı doğrudan kontrol etmek ve dağıtmak için dışarıdan enerji kullanmaktadır. Bu sistemler, özellikle yüksek ısı yönetimi performansı istenen yerlerde tercih edilmektedir. Aktif termal yönetim dört alt başlık altında incelenebilir.

- **Sıvı Soğutma Sistemleri:** Bataryaların çevresine yerleştirilen sıvı soğutma devreleri, ısının etkin bir şekilde taşınmasını sağlamaktadır. Sıvı, genellikle bataryaların etrafında dolaşan bir ısı değiştirici ile soğutulur. Şekil 2.42 üzerinde elektrikli araç batarya paketi sıvı soğutma örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.42: Elektrikli Araçlarda Sıvı Soğutmalı Batarya Sistemi

- **Hava Soğutma Sistemleri:** Bataryalardaki hava soğutma sistemlerinde, bataryaların etrafındaki havanın sirkülasyonunu sağlayarak ısıyı dağıtmak için fanlar kullanılmaktadır. Hava soğutmalı sistemler, sıvı soğutmalı sistemlere göre daha az karmaşıktır ve ucuzdur. Fakat etki anlamında daha zayıftırlar [70]. Şekil 2.43 üzerinde örnek bir hava soğutma sistemi düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 2.43: Hava Soğutma Sistemleri Çeşitleri [56]

- **Faz Değiştiren Malzemeler (PCM):** Bu malzemeler, belirli bir sıcaklıkta katıdan sıvıya geçmekte ve bu şekilde ısıyı emmektedir. Böylece sıcaklık stabilize edilerek denge sağlanmaktadır.

- **Termoelektrik Soğutucular (TEC):** Peltier etkisi ile çalışan termoelektrik soğutucular, batarya hücrelerinden ısıyı çekmek için elektrik enerjisi kullanmaktadır. Bu sistemler, ısının hassas bir şekilde kontrol edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Batarya termal yönetim sistemleri, bataryaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlamak için bir dizi önemli şartın yerine getirilmesini sağlamaktadır. Batarya termal yönetiminin rolleri temel seviyede aşağıdaki gibi açıklanabilir [71].

a) Sıcaklık aralığının kontrolü,
b) Isı dağıtımının etkili sağlanması,
c) Termal yönetim sisteminin uyumluluğu,

d) Malzeme seçimi,
e) Çalışma koşullarının izlenmesi
f) Güvenlik protokolleri
g) Uygun şarj ve deşarj yönetimi.

Bataryalarda termal yönetim, lityum tabanlı bataryaların güvenliği, performansı ve ömrü açısından kritik bir süreçtir. Bu yüzden sistem uygun termal yönetim tasarımı ciddi bir iş yükü gerektirmektedir.

2.2.1.5. Şarj ve Deşarj Kontrol

Batarya Yönetim Sistemleri (BYS), bataryaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü kullanımını sağlamak amacıyla tasarlanmış elektronik sistemlerdir. Şarj ve deşarj kontrolü, bu sistemlerin en önemli fonksiyonlarından biridir. Bu kontrol süreci, bataryaların sağlığını korumak, güvenliğini sağlamak ve performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir [55, 72].

Bataryaların şarj ve deşarj oranları uygulamalara göre belirlenmektedir. Ancak batarya kimyası da bataryaların güvenli şarj oranlarını etkilemektedir. Bu şarj oranlarının aşılması durumunda bataryalarda ciddi kapasite bozulmaları meydana gelebilmektedir. Lityum tabanlı sistemlerde en yaygın kullanılan şarj kontrol stratejisi sabit akım sabit gerilim yani CC-CV'dir. Bu strateji bataryaların şarj kapasitesini en üst seviyede çıkarmada basit ve etkilidir. Sabit akım, güvenli ve istenen bir şarj oranını koruyarak, şarj sürecini başlatır. Ardından tüm batarya grubu güvenli operasyon bölgesine ulaştığında batarya gerilimlerini arttırmadan ek şarj için sabit gerilim sürecine geçilir. Sabit gerilim süreci devam ederken şarj akım değeri azalmakta ve sıfır değerine yaklaştıktan sonra tam şarj süreci bitirilmektedir.

1. **Şarj Kontrolü:** Şarj kontrolü, bataryanın şarj edilmesi sırasında yapılan denetim ve yönetim işlemlerini kapsamaktadır. Bu kontrol, bataryanın aşırı şarj olmasını engellemek için gereklidir. Aksi durumda, bataryalar zarar görebilmekte ve buna bağlı olarak kapasite kayıpları yaşanabilmektedir. Bu kontrol için genel olarak üç başlık altında inceleme yapılabilir [73].

    - **Gerilim İzleme:** Her bir hücre için izlenen gerilim V_i, hücrenin nominal gerilim değeri $V_{nominal}$ ve maksimum izin verilen gerilim V_{max} ile karşılaştırılır. Bu durumda şarj işlemi sırasında her bir hücre için; $V_{nominal}<V_i<V_{maks}$ olarak ifade edilir. Eğer $V_i \geq V_{maks}$ ise, şarj işlemi durdurulur veya azaltılır.

- **Akım İzleme:** Şarj akımı $I_{şarj}$, genellikle bataryanın nominal kapasitesine $C_{batarya}$ bağlı olarak belirlenir. Şarj işlemi sırasında, akım aşağıdaki eşitliklere göre kontrol edilir. $I_{şarj}=C_{batarya}/k$.

  Burada k genellikle 1 saat (1C) veya daha küçük (0.5C, 0.2C) gibi bir süreyi temsil etmektedir. Örneğin, 2C oranında şarj edilen bir bataryada, şarj akımı Cbatarya değerinin iki katı olur. Ancak akım aşırı yüksek olursa, bataryada aşırı ısınma veya hasar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden BMS akımı sınırlayarak bu süreci kontrol etmektedir.

- **Sıcaklık İzleme:** Sıcaklık T, bataryanın güvenli çalışma sıcaklığı aralığında tutulmalıdır. $T_{min}<T<T_{maks}$.

  Şarj sırasında sıcaklık T_{maks} seviyesine ulaştığında, BMS şarj akımını düşürebilmekte veya şarjı tamamen durdurabilmektedir.

2. **Deşarj Kontrolü:** Deşarj kontrolü, bataryanın enerji tüketim sürecinde gerçekleştirilir. Bu kontrol, bataryanın aşırı deşarj edilmesini engelleyerek, batarya ömrünü uzatmakta ve güvenliği sağlamaktadır. Deşarj sürecinde de şarj sürecine benzer matematiksel denklemler kullanılmaktadır [74, 75].

   - **Gerilim İzleme:** Deşarj sırasında her hücrenin gerilimi V_i, belirli bir minimum değerin altına V_{min} düşmemelidir. $V_i>V_{min}$ ifadesi sürekli olarak gözetilmelidir. Eğer $V_i\leq V_{min}$ olursa, BMS deşarj işlemini durdurmaktadır [75].

   - **Akım İzleme:** Deşarj akımı $I_{deşarj}$, bataryanın nominal kapasitesine göre ayarlanmalı ve genellikle belirli bir maksimum değeri aşmamalıdır. $I_{deşarj}<I_{maksdeşarj}$ ifadesi sürekli olarak gözetilmelidir. Aşırı yüksek deşarj akımları bataryanın iç direncinden dolayı ısınmasına neden olabilmektedir. Bu durumda BMS akımı sınırlayarak güvenli sıcaklık bölgesinde çalışmayı sağlamalıdır.
   - **Sıcaklık İzleme:** Deşarj sırasında batarya sıcaklığı T de izlenir. Yine, sıcaklık güvenli çalışma aralığında olmalıdır. $T_{min}<T<T_{maks}$ ifadesi sürekli olarak gözetilmelidir. Eğer sıcaklık T_{maks} değerini aşarsa, BMS deşarj akımını düşürmekte veya deşarjı durdurmaktadır.

BYS, genel olarak yukarıda ifade edilen verileri izlerken PID (Proportional-Integral-Derivate) kontrol algoritmaları veya daha gelişmiş algoritmaları kullanmaktadır. Şarj akımı denklemi Denklem 2.2 ile ifade edilebilir.

$$Işarj(t) = Kp.e(t) + Ki.\int_0^t e(t)dt + Kd.\frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Burada; e(t), hedef değer ile gerçek değer ölçümü arasındaki farktır. K_p, K_i ve K_d ise PID kontrolünün parametreleridir.

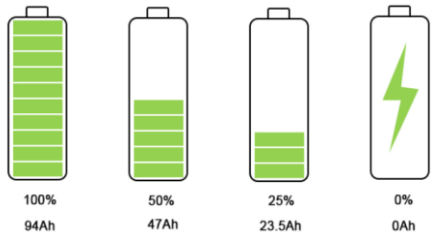
2.2.1.6. Batarya Şarj Durumu (State of Charge – SOC)

Batarya durum göstergesi yani State of Charge, bataryaların şarj durumları hakkında kritik bilgi sağlamakta ve bataryanın mevcut enerji kapasitesini ifade etmektedir. Batarya durum göstergesi, enerji yönetim sistemlerinde, bataryaların güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kullanılan en temel göstergedir. Bu değerin düzgün hesaplanıyor olması bataryaların kullanım ömrünü optizime etmektedir. Buna bağlı olarak performans artışı sağlamakta ve güvenlik risklerini azaltmaktadır. Genellikle yüzde (%) cinsinden ifade edilmektedir. Mevcut şarj durumunu ifade ettiği için geriye kalan enerji miktarı doğrudan tespit edilebilmektedir. En temel seviyedeki batarya durum göstergesi formülü Denklem 2.3 ile ifade edilmektedir [55, 76].

$$SOC(\%) = \left(\frac{Qt}{Qnom}\right).100 \quad (2.3)$$

Q_t: Mevcut zaman içerisindeki bataryada bulunan şarj miktarıdır.

Q_{nom}: Bataryanın nominal kapasitesidir. Tam şarj durumundaki kapasite değeridir [77].



Şekil 2.44: Batarya Şarj Durumu Gösterimi [77]

Şekil 2.44 üzerinde batarya şarj durumu gösterilmektedir. State of Charge (SOC), batarya yönetim sistemleri için en önemli parametrelerden biridir. SOC değeri birçok farklı başlık için bilgi kaynağı oluşturmaktadır. Bu başlıklar temel seviyede aşağıdaki gibi açıklanabilir [78, 79].

- **Enerji Verimliliği:** SOC, batarya sistemlerinin mevcut enerji seviyesini göstermektedir. Bu da enerji yönetim stratejisi için oldukça önemli bir veri kaynağı olmaktadır. Özellikle elektrikli araçlarda enerji verimliliğinin artırılması için SOC değerinin doğru bil şekilde izleniyor olması gerekmektedir.

- **Performans:** Batarya şarj ve deşarj durumlarında, mevcut enerji miktarının da kestiriminin yapılarak performans izleniminin yapılabilmesi için SOC değeri tahmini oldukça önem arz etmektedir.

- **Güvenlik:** Batarya sistemleri aşırı şarj ya da aşırı deşarj durumlarında zarar görebilmektedir. Bu nedenle SOC değerinin doğru saptanarak şarj ve deşarj süreçlerinin yönetilmesi gerekmektedir.

- **Batarya Raf ömrü:** SOC verilerine göre batarya ömür hesaplamaları için oldukça önemlidir. Bataryanın en uygun SOC değeri arasında kullanımı batarya sağlığını üst seviyede tutmaktadır.

- **Kullanım Tahmini:** SOC değeri mevcut enerji verisini ifade ettiği için kullanılan sistemdeki anlık enerji tüketimine göre kullanım süresi tahmini yapılabilmektedir. Yanlış SOC değeri ölçümleri kullanım sürelerinde kararsızlığa yol açmaktadır.

SOC hesaplaması için birçok algoritma kullanılmaktadır. Bunlar temel olarak üç başlıkta ifade edilebilir [79, 80].

1. **Akım Sayım Yöntemi (Coulomb Counting):** Bu yöntem özelinde, bataryanın şarj ve deşarj esnasında akım sayımı yapılmakta ve toplam kapasite değerine göre şarj miktarı hesaplanmaktadır. Matematiksel formülü Denklem 2.4 ile gösterilmektedir.

$$SOC(t) = SOC(t0) + \frac{1}{Qnom}\int_{t0}^{t}(\tau)d\tau \tag{2.4}$$

I(t), akımın zamana bağlı değişimini ifade etmektedir. SOC(t0), başlangıçtaki SOC değerini ifade etmektedir. T, içinde bulunan zamanı ifade etmektedir.

Akım sayma yöntemi basit ve doğrudan hesaplanabilir bir algoritmaya sahiptir. Sistem üzerinde oluşabilecek gerçek zamanlı değişimleri saptayabilmektedir. Fakat sistem içerisinde akım sayma için kullanılan sensör hataları nedeniyle zamanla hata birikmesi

meydana gelebilmektedir. Buna ek olarak batarya iç dirençlerinde meydana gelen değişimler doğrudan bu sistem ile tespit edilememektedir.

2. **Gerilim Yöntemi:** Batarya ana gerilim değeri ile SOC arasındaki ilişki kullanılarak yapılan ölçüm yöntemidir. Batarya gerilimi ile SOC arasındaki ilişkiyi belirlemek için gerilim eğrisinin oluşturulması gerekmektedir. Aksi durumda her batarya karakteristiği aynı olmayacağı için yanlış SOC değerleri elde edilebilmektedir. Bu sistemin uygulanması kolay ve düşük maliyetlidir. Sistem içerisine bu ölçüm için harici bir sensör eklemeye gerek duyulmamaktadır. Fakat batarya yaşlanması, sıcaklık ve yük akımı gibi faktörlerde doğrudan değişiklik göstermektedir. Örneğin çok yüksek akım taleplerinde iç dirençte harcanan gerilim yüksek olacağı için SOC değeri anlık olarak daha az görünecektir.

3. **Model Tabanlı Yöntemler**: Model tabanlı yöntemler, bataryalar hakkında elektriksel ve kimyasal parametrelerin özellikleri ile kurulan matematiksel modellerdir. Başlangıç aşamasında kullanılacak bataryaya göre tüm elektriksel ve kimyasal verilerin belirlenmiş olması gerekmektedir. Aksi durumda her batarya kimyası aynı değerlere sahip olmadığı için yanlış sonuçlar gözlemlenebilmektedir. Bu tür modeller oldukça yüksek doğruluğa sahiptir. Fakat model kurma ve parametre tespitleri oldukça karmaşıktır. Verilerin çeşitliklerine göre model hesaplama yükü artış gösterebilmektedir.

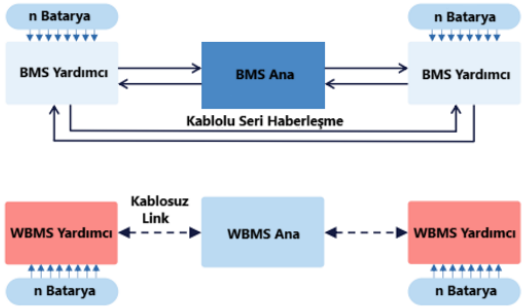
   Makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanım alanlarının artış göstermesi ile birlikte SOC tahmininde de bu tarz yaklaşımlar yapılmaktadır. Sistem içerisinde veri setleri oluşturularak makine öğrenmesi yöntemlerine girdi olarak sunulmaktadır. Bu durum sistem SOC tahminin de oldukça yüksek doğruluk sağlamaktadır. Fakat veri setlerinin kapasitesi bu yöntemin hesaplama yükünü artırmaktadır.

2.2.2. Kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri

Günümüzde yollarda kullanılan tüm elektrikli araçlar lityum tabanlı bataryalar kullanmaktadır. Lityum bataryaların güç yoğunluğu oldukça avantaj sağlasa da çalışma koşulları limitlidir. Limit dışına çıkıldığı durumlarda bataryalar istenilen performansı vermemekte hatta ciddi zararlara yol açabilmektedir. Bataryaların gerek uygun şartlarda kullanımı gerekse uygun elektriksel değerlerde kullanımı konusunda batarya yönetim sistemleri

tercih edilmektedir. Bu batarya yönetim sistemi, bataryaların güvenli aralık arasında kalabilmesi için birçok sensör ile kontrol sağlamaktadır [53, 81, 82].

Şekil 2.45 ile üst kısımda basitleştirilmiş geleneksel Batarya Yönetim Sistemi mimarisi gösterilmektedir. Alt kısımda ise günümüzde çalışmaları devam eden Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi mimarisi yer almaktadır.



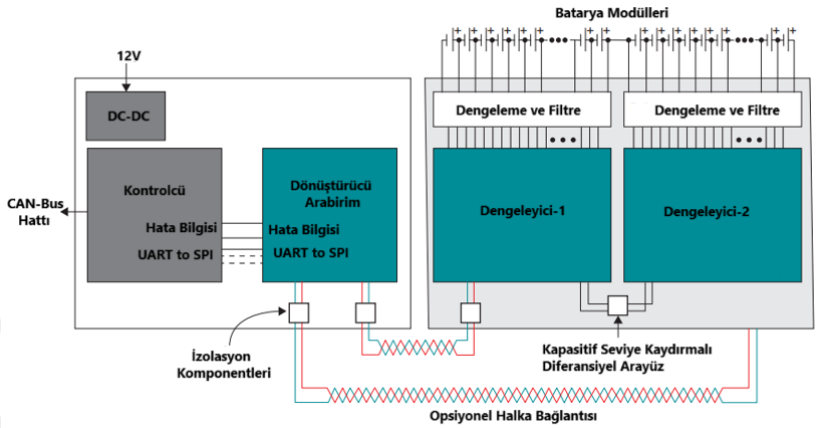
Şekil 2.45: Kablolu ve Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarileri [53]

Özellikle elektrikli araç pazarındaki yüksek talep endüstri ortamında ciddi bir rekabete yol açmaktadır. Bu doğrultuda üreticiler, güvenli, sorunsuz işleyen ve aynı zamanda uzun süreler enerji sağlayabilen sistem tasarımları üzerine yönelmektedir.

Son yapılan çalışmalarda, batarya yönetim sisteminde kablolu veri yolunun kaldırılmasına yönelik öneriler görülmektedir. Çünkü kablo demetleri batarya sistemi içerisinde oldukça ağırlık ve yer kaplamaktadır. Aynı zamanda kablolu sistemler tasarım esnekliğini azaltmakta ve karmaşıklığı artırmaktadır. Kablolu sistemler çalışabilirlik anlamında sağlam olsa da diğer sistemlere konnektör vasıtasıyla bağlanmaktadır. Bu bağlantı sonrasında titreşim kaynaklı arızalar batarya sisteminde güvensizliğe yol açmaktadır. Oldukça karmaşık yapıya sahip kablolu batarya sistemlerinde değişim ve modernizasyon aşamasında da zorluklarla karşılaşılmaktadır. Batarya modülü içerisindeki bir batarya grubunu değiştirmek ara kablolu bağlantılarda dolayı oldukça zordur. Bu durum tüm batarya modülünün açılması ve bu şekilde işlem yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu zorluk, kullanıcılar tarafında ciddi bir maliyet ve zaman dezavantajı oluşturmaktadır [53].

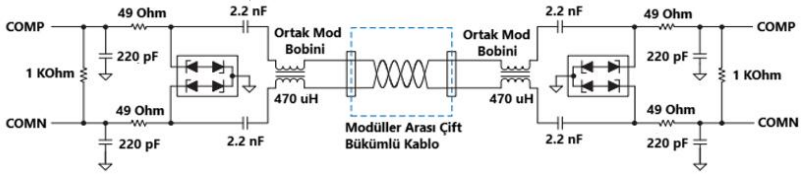
Kablolu tip batarya yönetim sistemleri sadece mimari bazlı dezavantajlar oluşturmamaktadır. Bu dezavantajlara ek olarak izolasyon ekipmanları da eklenmektedir. Modüller arasındaki iletişim ve sensör arayüzleri için elektriksel bağlantı kullanılması sistemlerin birbirinden doğrudan etkilenmesine yol açmaktadır. Bu nedenle her sistem

geçişinde izolasyon ekipmanları kullanılmaktadır. Bu izolasyon ekipmanları da elektronik devrelerde hem yer hem de maliyet anlamında zorluklara sebebiyet vermektedir. Şekil 2.46 ile izoleli ekipmanların gösterildiği kablolu tip bir Batarya Yönetim Sistemi mimarisi gösterilmektedir [83].



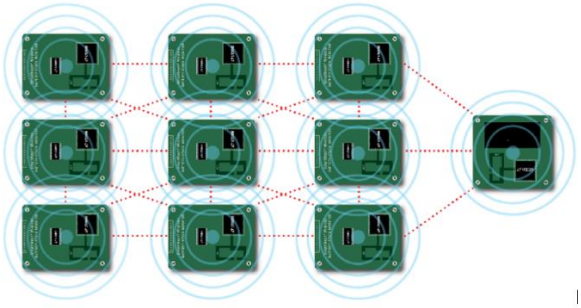
Şekil 2.46: İzole Ekipmanlar ile Kablolu Tip Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [59]

Modüller arasındaki devrelerde kullanılan izoleli bir haberleşme arayüzü örneği Şekil 2.47 ile gösterilmektedir. Kablolu bir Batarya Yönetim Sistemi için bu veya buna benzer yapıların tüm devrelerde izolasyon amacıyla kullanılması gerekmektedir.



Şekil 2.47: İzoleli Haberleşme Arayüzü Örneği [83]

Sistem tasarım aşamasında görülen tüm bu problemler yeni bir çalışma konusu oluşmasına sebep olmuştur. Bu sorunların çözümüne yönelik olarak kablosuz sistemler üzerine çalışılmaya başlanmıştır. Kablosuz batarya yönetim sistemlerinde batarya hücre grupları üzerinde kablosuz elektronik ekipmanlar yer almaktadır. Bu sayede kablo ve konnektör ile ilgili tüm dezavantajlar ortadan kalkmaktadır. Kablo kaynaklı ağırlık ve hacim olarak azalma olduğu için daha fazla batarya grubu sistemlere dahil edilebilmektedir. Yine aynı şekilde kablo üzerinden veri akışı sağlanmadığı için izolasyon ekipmanları için oluşan dezavantajlarda ortadan kalmaktadır. Bu durum ciddi bir maliyet ve devre boyutunda azalma avantajları sağlamaktadır. Şekil 2.48 ile batarya grubunda oluşturulan örnek bir kablosuz sistem mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 2.48: Örnek Bir Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [84]

Kablosuz sistemler, kablolu sistemlere göre oldukça avantajlı konumda olsa da bazı dezavantajları bulunmaktadır. Kablosuz iletişim kararsız ortam kullanmaktadır ve bu nedenle dış müdahalelere açıktır. Bu nedenle kullanılan sistem, yüksek güvenilirlik, düşük iletişim gecikmesi ve düşük güç tüketimine sahip olmalıdır.

Genel olarak her iki batarya yönetim sistemi de ele alındığında, Tablo 2.9 ile belirtilen sonuçlara ulaşılmaktadır.

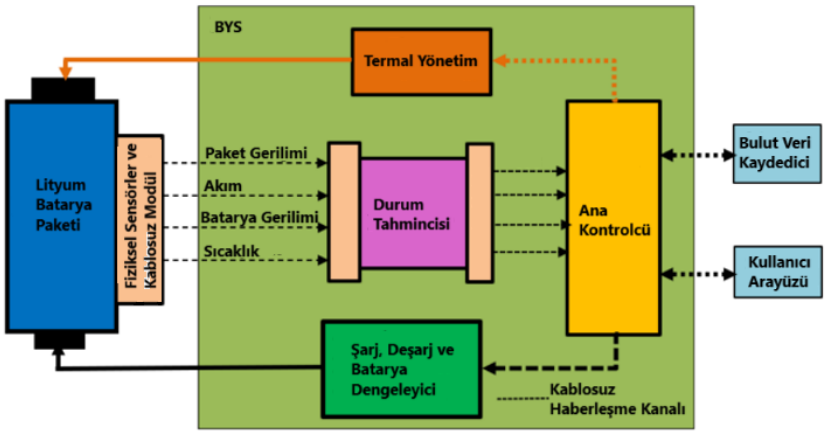
Tablo 2.9: Kablolu ve Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Karşılaştırması [83]

Hususlar	**Kablolu BYS**	**Kablosuz BYS**
Ağırlık	Mevcut güvenilirlik standardı araç ağırlığını ve karmaşıklığını artırır.	Araç ağırlığını ve karmaşıklığını azaltır.
Tasarım Esnekliği ve Kullanışlılık	Kablolu modüller olduğu için esneklik oldukça düşüktür. Servis işlemi zordur.	Tasarım esnekliğine ve araç içinde daha esnek yerleştirmeye olanak sağlar. Servis kolaylığı sağlar.
Ölçüm	Gerilim ve akım okumalarında gecikme yaşanabilir.	Kablosuz özellik daha senkron ölçümlere olanak sağlar.
Güvenilirlik	Kablo güvenilirdir ve işlevsel güvenlik standartlarını karşılar. Fakat zamanla deforme olabilir. Halka mimarisinde her iki yönde de yedekli kablolara sahiptir.	Bakım gereken kablo yoktur. Tasarım, zorlu otomotiv radyo frekansı ortamlarının ve görüş hattı dışındaki zorlukların üstesinden gelebilmelidir.
Güvenlik	Kapsamlı ve tamamen güvenilir sistem iletişimi sunar.	İyi tasarlanmamış sistemler ihlal edilebilir.

2.2.2.1. Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi

Genel anlamda kablolu ve kablosuz Batarya Yönetim Sistemi mimarileri incelendiğinde birçok benzerlik gözlenmektedir. Her iki mimaride de sistemde kullanılan sensörler, ölçüm metodları gibi parametreler ortaktır. Asıl farkı oluşturan kısım, kablolu sistemde yer alan ara bağlantı kaynaklı dezavantajların kablosuz sistemde alternatif bir çözümle sunulmasıdır [85].

Tüm Batarya Yönetim Sistemleri, batarya hücrelerinden gelen gerilim, akım, sıcaklık, basınç (eğer mümkünse) gibi parametreleri doğrudan kontrol etmekte ve bu verilere uygun şekilde durum tahminleri yapmaktadır. Kablolu Batarya Yönetim Sistemleri'nde bu veriler, kablo vasıtasıyla birimlere aktarılırken, kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri'nde farklı kablosuz donanım yapıları ile birimlere aktarılmaktadır. Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri adlı başlık altında kablosuz yapılar detaylıca ele alınmaktadır. Temel anlamda kablosuz bir Batarya Yönetim Sistemi mimarisi Şekil 2.49 ile gösterilmektedir. Kesikli olarak belirtilen tüm ok işaretleri kablosuz yapıyı ifade etmektedir. Düşük seviyelerdeki güç kapasiteli batarya paketlerinde birçok seri batarya aynı kablosuz yapıyı kullanmaktadır. Fakat yüksek güç kapasiteli bazı uygulamalarda her seri batarya paketi için ayrı bir kablosuz yapı da tercih edilebilmektedir. Bu yapı farklılıkları sistem mimarisindeki isterlere göre değişiklik gösterebilmektedir [86].



Şekil 2.49: Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [85]

2.2.2.2. Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri

Geleneksel kablolu tip Batarya Yönetim Sistemleri'nde yaşanan olumsuzluklardan dolayı alternatif araştırma çalışmaları yürütülmüştür. Alternatif çalışmalara yönelimdeki en önemli problemler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Batarya sistemlerinde kablo ve konnektör temelli yaşanan problemler.
- Batarya gruplarında arasında oluşturulması gereken izolasyon yapıları ve bu yapılar

nedeniyle meydana gelen maliyet artışı.

- Üretim ve değişim esnasında yaşanan uzun onarım/değişim süreleri.
- Modüller arası haberleşme ara bağlantıları kaynaklı sistemde oluşan veri gecikmeleri.
- Papatya zinciri temelli batarya sistemlerinde devre dışı kalan grubun tüm sistemi etkilemesi.

Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi topolojileri, bataryaların izlenmesi ve yönetilmesi amacıyla kullanılan sensörlerin ve kontrol ünitelerinin nasıl organize edildiğini belirlemektedir. Bu topolojiler, sistemin güvenilirliğini, enerji verimliliğini ve veri aktarım hızını doğrudan etkiler. Yapılan literatür çalışmalarındaki kablosuz Batarya Yönetim Sistemi topolojileri, araştırmacıların kullandığı kablosuz iletişim kanalı türlerine göre gruplandırılmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmalar ele alındığında genel olarak beş farklı topolojiden bahsetmek mümkündür. Bunlar; Bluetooth tabanlı BYS, Zigbee tabanlı BYS, Wi-Fi tabanlı BYS, Nesnelerin İnterneti tabanlı BYS ve Bulut tabanlı Batarya Yönetim Sistemi'dir [87].

Temel olarak tüm kablosuz Batarya Yönetim Sistemi topolojileri benzer mantığa sahiptir. Ana ve yardımcı modül arasında kablosuz iletişimi sağlayacak bir iletişim protokolü kullanılır. Bu modüller üzerinde yer alan sensör çeşitleri ise sistemlerin avantaj ve dezavantajlarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Kablosuz olarak oluşturulan bu veri ağı yapısı modüller arasındaki izolasyonu sağlamaktadır.

Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi özelinde yapılan çalışmaların %74'ü Bluetooth, Zigbee ve Wi-Fi tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle daha çok bu üç farklı kablosuz topoloji üzerinde durulmuştur. Bluetooth ve Zigbee tabanlı kablosuz BYS'ler, düşük güç tüketimi ve düşük uygulama maliyetleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Fakat veri aktarım hızları ve bağlantı güvenliği konusunda dezavantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle yüksek güvenilirlik için Wi-Fi tabanlı çalışmalar yürütülmektedir [85].

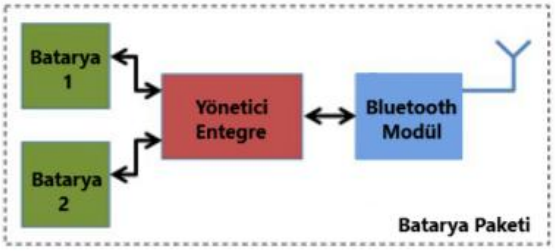
A. Bluetooth Tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi

Lityum tabanlı bataryalar kontrolsüz kullanımlarında çalışmış oldukları sistemlerde ciddi hasarlar oluşturabilmektedir. Bu hasarların önüne geçmek amacıyla bataryaların, akım, gerilim ve sıcaklık gibi parametrelerinin sürekli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan kablolu Batarya Yönetim Sistemleri, bu kontrolleri her hücreye yerleştirilen kablolu sensörlerden sağlamaktadır. Elektrikli araçlar gibi yüksek enerji

kapasitesine sahip yüzlerce lityum tabanlı bataryadan oluşan sistemlerde, bu kablolu sensörlerden yüzlerce kullanılması gerekmektedir. Çok sayıda kablolu sensörün meydana getirdiği bu bağlantı karmaşası, kablolu Batarya Yönetim Sistemleri'nin fiziksel bağlantı hatalarına karşı hassas olmasına sebebiyet vermektedir. Buna ek olarak, birden fazla Batarya Yönetim Sistemi arasında kurulan kablolu haberleşme yapısı da harici kablolama yüküne yol açmaktadır. Tüm bu kablo karmaşası içerisinde, batarya paketini yapılandırmak, değiştirmek ya da onarmak oldukça zor olmaktadır. Bu zorluk karşısında genel olarak uygulanan çözüm ise batarya paketinin doğrudan değiştirilmesi ile sonuçlanmaktadır [3, 85].

Kablolu Batarya Yönetim Sistemi'nde bu ve buna benzer sorunları giderebilmek adına alternatif kablosuz sistemli çözümler üzerine çalışılmıştır. Düşük enerji tüketimi konusunda iyi bir alternatif olduğu için bluetooth tabanlı kablosuz Batarya Yönetim Sistemi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Şekil 2.50 ile temel seviyede bir Bluetooth tabanlı kablosuz Batarya Yönetim Sistemi mimarisi gösterilmektedir. Burada bataryalar gruplanarak bluetooth haberleşmesine sahip bir kablosuz batarya grubu oluşturulmaktadır. Ardından birden fazla kablosuz batarya grubu ise birbirleri ile haberleşerek dengeleme, kontrol gibi süreçleri yönetmektedir. Paralel yapıda tek bir batarya grubunun çok yüksek kapasiteye sahip olması durumunda ise batarya hücresi başına kablosuz sistemler kullanılabilmektedir [3, 87, 88].



Şekil 2.50: Bluetooth Tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [3]

Bluetooth teknolojisi 2.4 GHz ISM (Industrial, Scientific, Medical) frekans bandına sahiptir. Bu bant dünya çapında lisanssız olarak kullanılabilmektedir. Bluetooth haberleşmesinin menzili kullanılan versiyona ve güç sınıfına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Genellik olarak 10-100 metre arasında ölçeklenebilir. Tablo 2.10 ile Bluetooth teknolojisinin veri hız değerleri verilmiştir [4].

Tablo 2.10: Bluetooth Teknolojisi Özellikleri

Teknoloji	Özellik
Bluetooth 2.0 + EDR	3 Mbps'ye kadar hız
Bluetooth 3.0 + HS	24 Mbps'ye kadar hız
Bluetooth 4.0 (LE)	1 Mbps'ye kadar hız (düşük güç tüketimi ile)
Bluetooth 5.0	2 Mbps'ye kadar (LE modu)
Bluetooth 5.1 ve 5.2	Daha yüksek hızlar ve gelişmiş mesafe özelliği

Bluetooth Low Energy (LE) teknolojisi, özellikle düşük güç tüketimi olan sistemler için büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, Bluetooth tabanlı kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri'nin düşük kapasiteli lityum batarya paketlerinde uygun maliyetli çözümler sunduğu görülmüştür. Düşük güç tüketimi sayesinde de kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri'nde tercih sebebi olmuştur. Fakat çok yüksek kapasiteli lityum batarya paketlerinde menzil ve veri hızı kısıtından ötürü dezavantajlı konumdadır.

B. Zigbee Tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi

Kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri için kullanılan bir diğer protokol Zigbee tabanlı sistemlerdir. Bluetooth tabanlı sistemlere benzer şekilde batarya sistemlerine entegre edilmektedirler. Temel mantık, gerilim ve sıcaklık bilgilerini ölçmek için her hücreye bir Zigbee modülü bağlanması üzerinedir. Literatürde Zigbee tabanlı sistemler, CAN-Bus gibi kablolu haberleşme protokolünden kurtulmak ve kablolama ile yaşanan veri kayıplarının önüne geçmek için geliştirilmiştir [85, 89].

Zigbee, IEEE 802.15.4 standardına dayanan, düşük güç tüketimi, düşük veri hızı ve düşük maliyet gereksinimlerine uygun bir kablosuz haberleşme protokolüdür. Bu protokol, özellikle endüstriyel ve yerleşik sistemlerde, güvenilir ve geniş alan kapsama özellikleri ile bilinmektedir. Zigbee haberleşme protokolü ile ilgili genel bilgiler Tablo 2.11 ile verilmiştir [89].

Tablo 2.11: Zigbee Haberleşme Protokolü Genel Bilgiler

Özellik	Açıklama
Frekans Bandı	2.4 GHz ISM bandı
Veri Hızı	20-250 Kbps
Kapsama Alanı	10-100 metre, örgü ağ topolojisi ile genişletilebilir
Ağ Topolojileri	Yıldız, ağaç ve örgü topolojileri

Kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri'ndeki en önemli konu enerji tüketimidir. Kablo bağlantısı olmadığı için kablosuz sistem tüm enerjisini bağlı olduğu modülden almaktadır. Kablosuz sistemlerin çok enerji harcaması, bağlı olduğu modülün enerji kapasitesi azaltmaktadır. Bu nedenle, Zigbee tabanlı sistemler için enerji tüketim modelleri hazırlanmaktadır. Ek olarak kablosuz sistem kaynaklı olarak veri gecikmelerinin de analizleri yapılmaktadır [89].

- **Enerji Tüketim Modeli:** Bir Zigbee sisteminin enerji tüketimi, iletişim sırasında harcanan güç P_{tx}, alıcı modunda harcanan güç P_{rx} ve bekleme modunda harcanan güç $P_{boşta}$ ile hesaplanmaktadır.

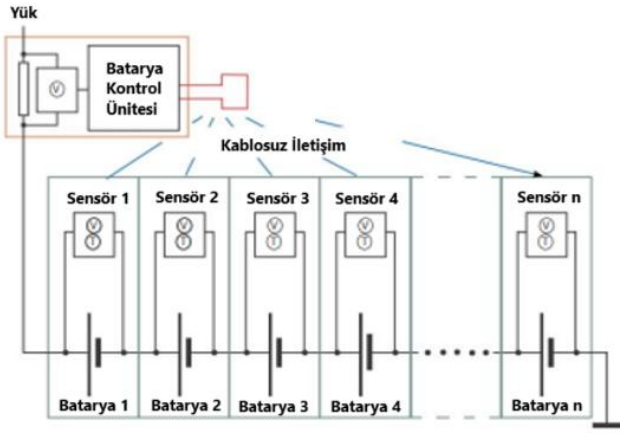
$$Etoplam = Ptx.ttx + Prx.trx + Pboşta.tboşta \quad (2.5)$$

Burada t_{tx}, t_{rx} ve $t_{boşta}$ ilgili modlarda geçen süreleri ifade etmektedir.

- **Veri İletim Gecikmesi:** Zigbee ağında veri iletimi sırasında oluşabilecek gecikme, ağın topolojisi, paket boyutu ve kanal koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Bu gecikme aşağıdaki şekilde modellenebilir.

$$Dtoplam = Dişlem + Dkuyruk + Diletim + Dyayılma \quad (2.6)$$

Burada $D_{işlem}$ işlem gecikmesi, D_{kuyruk} kuyruk gecikmesi, D_{iletim} iletim gecikmesi ve $D_{yayılma}$ yayılma gecikmesidir. Şekil 2.51 ile genel bir Zigbee tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi mimarisi verilmiştir.



Şekil 2.51: Örnek Zigbee Tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Mimarisi [90]

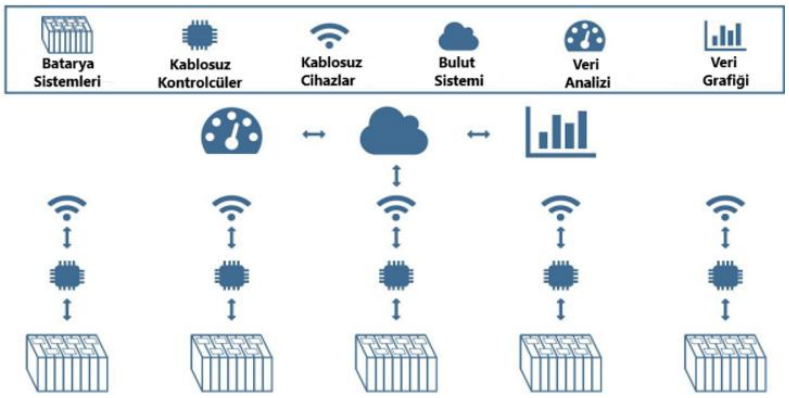
Zigbee tabanlı kablosuz Batarya Yönetim Sistemi'nde, veri güvenliği ve ağ güvenliği kritik öneme sahiptir. Zigbee protokolü, AES-128 şifreleme ve ağ anahtarı yönetimi gibi güvenlik özellikleri sunmaktadır. Zigbee tabanlı kablosuz Batarya Yönetim Sistemi, batarya gruplarının izlenmesi ve yönetilmesi için esnek, düşük maliyetli ve verimli bir çözümdür. Bu tür bir sistemin başarılı bir şekilde uygulanması hem donanım hem de yazılım seviyesinde derinlemesine bir anlayış ve optimize edilmiş bir iletişim protokolü gerektirmektedir. Literatür çalışmalarında, karmaşık ve büyük kapasitelere sahip lityum batarya sistemlerinde bu protokolün sınırlı olacağı değerlendirilmektedir.

C. Wi-Fi Tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Sistem

Özellikle yüksek kapasiteye sahip geleneksel batarya sistemi mimarileri, dengeleme, izleme ve şarj gibi işlemler için ayrı ayrı modüller kullanmaktadır. Bu durum da sistem içerisinde donanım karmaşıklığına ve sonucunda da yüksek uygulama maliyetlerine yol açmaktadır. Ayrık sistemler arasındaki donanım karmaşıklığını azaltmak ve izolasyon sistemleri gibi maliyeti yüksek bileşenlerden kurtulmak amacıyla kablosuz sistem tasarımları üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Kablosuz sistemler bluetooth, Zigbee gibi protokoller olabileceği gibi Wi-Fi tabanlı protokoller de olabilmektedir. Bu tür kablosuz sistemlerde modüller arasında Wi-Fi tabanlı yapılar kullanılmaktadır [85, 92, 93].

Wi-Fi tabanlı kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri'nin, enerji depolama sistemleri ve elektrikli araçlar gibi büyük ölçekli batarya uygulamalarında önemli bir rol oynayabileceği değerlendirilmektedir. Bu sistemler, batarya hücrelerinin durumu hakkında gerçek zamanlı veri toplayarak, bu verileri kablosuz olarak merkezi bir kontrol ünitesine iletmektedir. Wi-Fi tabanlı sistemlerin, geniş bant genişliği, uzun menzil ve yüksek veri iletim hızı gibi özellikleri kablosuz

Batarya Yönetim Sistemi çalışmalarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Örnek bir Wi-Fi tabanlı kablosuz Batarya Yönetim Sistemi mimarisi Şekil 2.52 ile gösterilmektedir [92, 93].



Şekil 2.52: Wi-Fi Tabanlı Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Mimarisi [94]

Wi-Fi tabanlı kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri'nde kullanılan iletişim teknolojisi, sistemin performansı ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri için genellikle IEEE 802.11 b/g/n protokolleri kullanılmaktadır [92, 94]. Bu protokoller, veri iletim hızlarını ve ağın genel performansını belirlemektedir. Örneğin, 802.11n standardı hem yüksek veri hızları hem de uzun menzil sunarak Batarya Yönetim Sistemleri için ideal bir çözüm sağlamaktadır. Aynı zamanda Wi-Fi tabanlı Batarya Yönetim Sistemleri'nde, batarya kontrol modülleri arasında bir mesh ağ yapısı kullanılabilmektedir [93, 94]. Bu yapı, iletişim ağının kapsamını genişletmekte ve herhangi bir modülün arızalanması durumunda alternatif veri iletim yolları sunmaktadır. Wi-Fi sistemler genel olarak 2.4 GHz ve 5 GHz frekans bantlarında çalışmaktadırlar. 5 GHz bant daha kısa menzile sahiptir ve engelleri aşma kapasitesi daha düşüktür.

D. Ticari Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi

Kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri'nin bileşenlerini oluşturan elektronik sistemler sadece araştırma konularında yer almamaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe yer alan birçok firma kablosuz sistemlerin kullanımı ile ilgili olarak ticari çalışmalar yürütmektedir. Yürütülen bu çalışmaların asıl amacı, batarya montajının ve tasarım karmaşıklığının önüne geçebilmektir.

Renesas firması, Dünya'nın en küçük ve en düşük güçlü BLE SoC'si olduğunu belirttikleri BLE tabanlı bir çözüm sunmaktadır. Analog Devices firması, General Motors ile yaptığı iş birliğinde Hummer EV araçlarda kablosuz bir Batarya Yönetim Sistemi çözümü sunmaktadır. Texas Instruments firması, ASIL-D güvenlik standartlarını sağlayan bir kablosuz

Batarya Yönetim Sistemi çözümü sunmaktadır. Ticari anlamda piyasaya sürülen bu çözümlerden en yaygın olan iki adedi için aşağıdaki ayrıntılar verilebilir [53].

- **Texas Instruments:** Texas Instruments firması tarafından yapılan analizlerde, batarya gruplarındaki kablo arızalarının maliyetli olduğu ve başlıca arızaların konnektör ve kablo demetlerinden kaynaklandığı ifade edilmektedir. Bu problemlere çözüm olarak, kablosuz sistemlerin ağırlığı azaltacağı ve maliyetlerde düşüş sağlayacağı belirtilmektedir [95]. Buna ek olarak kablosuz bağlantının aynı zamanda izolasyon sağlayacağı ifade edilmektedir. Bu öngörüler neticesinde TI firması tarafından kablosuz bir Batarya Yönetim Sistemi çözümü oluşturulmuştur. Frekans atlama tekniğine sahip ve 2.4 GHz frekans bandını kullanan tescilli bir protokol geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemin güvenilirlik seviyesinin %99,999 olduğu ifade edilmektedir. ASIL-D güvenlik koşullarını sağlayan ilk ticari üründür [96, 97]. Şekil 2.53 ile Texas Instruments firmasının kablosuz olarak geliştirdiği Batarya Yönetim Sistemi geliştirme kartı gösterilmektedir.



Şekil 2.53: Texas Instruments WBMS Geliştirme Kartı Görseli [96]

- **Analog Devices:** Analog Devices firması tarafından, SmartMesh IP isimli, %99,999 uçtan uca güvenilirlik sağlayan bir çözüm sunulmaktadır. Bu çözümde düşük güç tüketimine sahip bir mikrodenetleyici yer almaktadır. Bu düşük güçlü mikrodenetleyiciler vasıtasıyla batarya grubu içerisinde kablosuz bir ağ sistemi oluşturulmaktadır. Tasarlanan bu sistem, ilk olarak BMW i3 otomobilinde kullanıldı. Kullanımın asıl amacı, sistem güvenilirliğini artırmak, kablo maliyetini ve kablolama karmaşıklığını azaltmaktır. ADI tarafından geliştirilen bu sistem daha sonra General Motors'un Hummer EV isimli aracında kullanılmıştır. Kullanım sırasında, modüllerdeki arızaların hızlı teşhis edildiği ve ikincil entegrasyonların hızlandırıldığı sonucuna varılmıştır. Kablosuz sistem ISO/SAE 21434 sertifikasına sahiptir [98, 99]. Şekil 2.54 ile Analog Devices (Linear Technology) firmasının kablosuz temelli olarak önerdiği entegresi gösterilmektedir.



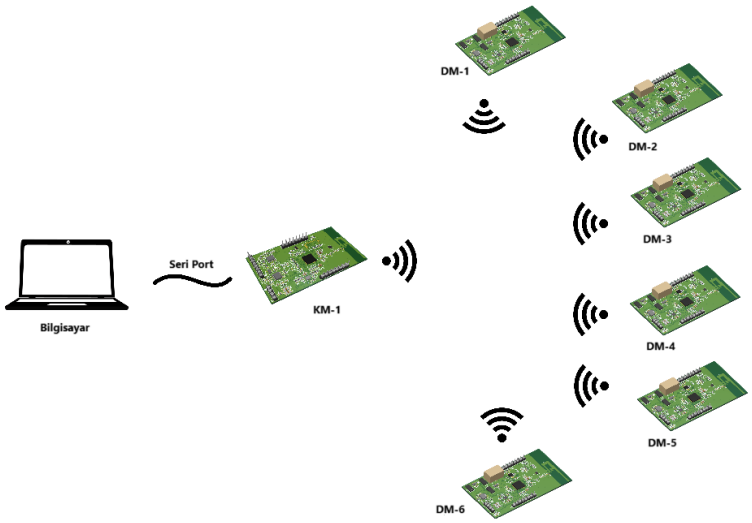
Şekil 2.54: Analog Devices Firması Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Entegresi [84]

3. YÖNTEM

Bu başlık altında Lityum Tabanlı Bataryalar İçin Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı projesi ile ilgili detaylara yer verilmiştir.

3.1. KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ MODÜL BİLGİLERİ

Tez projesi kapsamında 2 farklı devre tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Devrelerden bir tanesi Kontrol Modülü olarak diğeri ise Dengeleyici Modül olarak isimlendirilmiştir. Kontrol Modülü, Dengeleyici Modüller aracılığıyla aldığı batarya bilgilerini işleyerek kullanıcı arayüzüne aktarmaktadır. Bu aktarım işlemi seri haberleşme üzerinden olabileceği gibi kablosuz haberleşme üzerinden de olabilmektedir. Aynı zamanda modül üzerinde batarya paketi güvenliği için kullanılan şarj ve deşarj röleleri sürme kabiliyeti de bulunmaktadır. Dengeleyici Modül, bağlı olduğu batarya paketinden akım, gerilim, sıcaklık ve şişme durumu gibi bilgileri alarak Kontrol Modülü'ne iletmektedir. Şekil 3.1 ile Kontrol Modülü ve Dengeleyici Modül'ün mimarisi gösterilmektedir.



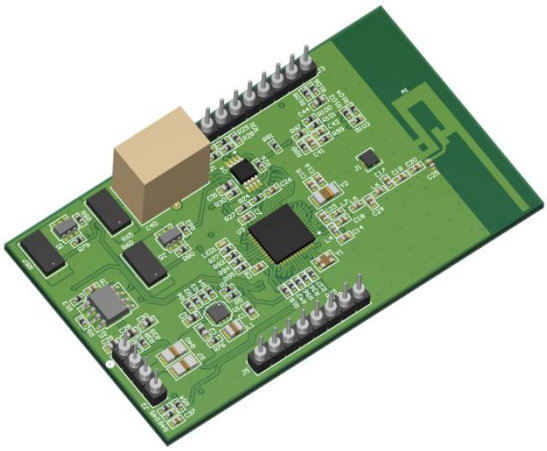
Şekil 3.1: Kontrol Modülü ve Dengeleyici Modül Mimarisi

Şekil 3.1 üzerinde DM olarak ifade edilen modüller Dengeleyici Modül, KM olarak ifade edilen modül ise Kontrol Modülü'dür. Dengeleyici Modüller batarya paketleri içerisinde yer almaktadır ve dış sistemler ile kablo bağlantısı bulunmamaktadır. Kontrol Modülü'nde ise opsiyonel olarak seri port haberleşme arayüzleri bulunmaktadır. Bu arayüzler üzerinden

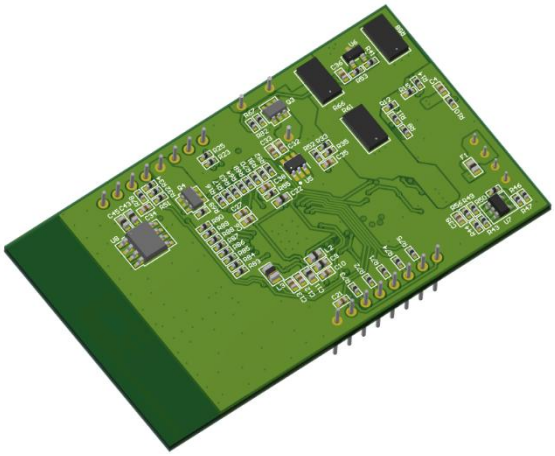
bilgisayar bağlantısı sağlanarak verilerin kontrolü sağlanabilmektedir. Kontrol Modülü ve Dengeleyici Modül üzerinde farklı donanım yapıları bulunabileceği gibi benzer donanım yapıları da bulunmaktadır.

3.1.1. Dengeleyici Modül

Dengeleyici Modül, bağlı olduğu batarya grubunun akım, gerilim, sıcaklık ve şişme durumu gibi bilgilerini kontrol etmektedir. Sadece bulunduğu batarya grubu ile kablo bağlantısı vardır. Harici olarak diğer modüller ile arasında herhangi bir kablolu iletim bulunmamaktadır. Kontrol ettiği tüm batarya verilerini kablosuz olarak Kontrol Modülü'ne iletmektedir. Farklı ortam koşullarındaki bataryayı uygun çalışma sıcaklıklarında tutabilmek için ısıtıcı ped kontrolü de içeriğinde yer almaktadır. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 ile devrenin tasarım programı üzerindeki 3 boyutlu görseli verilmektedir.



Şekil 3.2: Dengeleyici Modül 3 Boyutlu Üst Görünüm



Şekil 3.3: Dengeleyici Modül 3 Boyutlu Alt Görünüm

Dengeleyici Modül devre tasarımı ile ilgili teknik bilgiler Tablo 3.1 ile verilmiştir.

Tablo 3.1: Dengeleyici Modül Devre Tasarımı Teknik Bilgileri

Özellik	Açıklama
Devre Boyutları	4,0 x 6,8 cm
Toplam Komponent Sayısı	179 Adet
Katman Sayısı	4 Katman
Katman Kalınlıkları	1 oz (35 um)
Baskı Devre Malzemesi	FR-4

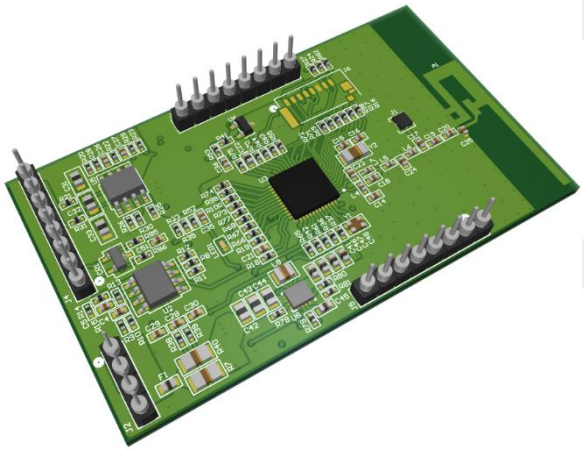
Devre tasarımında iç katmanlar toprak ve güç hatları için kullanılmıştır. Alt ve Üst katmanlar ise sinyal hatları için kullanılmıştır. Tüm katman kalınlıkları 1 oz (35 um) olacak şekilde ayarlanmıştır.

Dengeleyici Modül üzerindeki bazı donanım blokları yedekli olması amacıyla, bazı donanım blokları ise ilerleyen çalışmalara destek sağlaması amacıyla bulunmaktadır. Dengeleyici Modül'ün sahip olduğu kabiliyetler aşağıda belirtilmektedir.

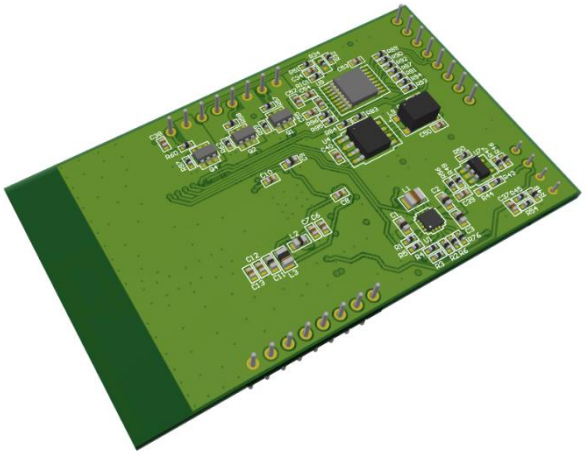
- Şönt direnci üzerinden devre akım ölçümü.
- 3V – 4.2V arasındaki değişken batarya gerilimleri için sabit 3.3V gerilim çıkışlı regülatör donanım yapısı.
- Batarya bloğundaki ana kol akımını ölçebilen şönt dirençli harici akım ölçümü.
- 2.4 GHz kablosuz mikrodenetleyici alt yapısı.
- Negatif sıcaklık katsayılı termistör ile devre üzeri sıcaklık ölçümü.
- Negatif sıcaklık katsayılı termistör ile batarya sıcaklık ölçümü.
- Sıcaklık sensörü ile analog sıcaklık ölçümü.
- Gerilim bölücü dirençler üzerinden batarya gerilim ölçümü.
- Wheatstone köprüsü yöntemi ile batarya şişme tespiti.
- Fark alıcı yükselteç ile batarya gerilim ölçümü.
- Isıtıcı ped özelliği için 1 adet güç anahtarlama.
- Pasif hücre dengelemesi için 2 adet güç anahtarlama.

3.1.2. Kontrol Modülü

Kontrol Modülü, bir arada çalışmış olduğu tüm dengeleyici modüllerdeki batarya verilerinin (akım, gerilim, sıcaklık, şişme durumu vb.) kontrolünü ve bu verilerin anlamlandırılmasını sağlamaktadır. Batarya sağlık durumu, batarya şarj durumu vb. gibi birçok parametre bu modül tarafından hesaplanmaktadır. Modül, dengeleyici modüller ile sadece kablosuz olarak haberleşebilirken, kullanıcı arayüzü ile hem kablolu (RS-232 veya CAN-Bus) hem de kablosuz olarak haberleşebilmektedir. Şekil 3.1 üzerinde Kontrol Modülü'nün detaylı mimarisi gösterilmektedir. Batarya paketi içerisinde yer alan şarj ve deşarj ana rölelerin kontrolü de bu modül ile yapılmaktadır. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 ile devrenin tasarım programı üzerindeki 3 boyutlu görseli verilmektedir.



Şekil 3.4: Kontrol Modülü 3 Boyutlu Üst Görünüm



Şekil 3.5: Kontrol Modülü 3 Boyutlu Alt Görünüm

Kontrol Modülü devre tasarımı ile ilgili teknik bilgiler Tablo 3.2 ile verilmiştir.

Tablo 3.2. Kontrol Modülü Devre Tasarımı Teknik Bilgileri

Özellik	Açıklama
Devre Boyutları	4,0 x 6,8 cm
Toplam Komponent Sayısı	189 Adet
Katman Sayısı	4 Katman
Katman Kalınlıkları	1 oz (35 um)
Baskı Devre Malzemesi	FR-4

Devre tasarımında iç katmanlar toprak ve güç hatları için kullanılmıştır. Alt ve Üst katmanlar ise sinyal hatları için kullanılmıştır. Tüm katman kalınlıkları 1 oz (35 um) olacak şekilde ayarlanmıştır.

Kontrol Modülü üzerindeki bazı donanım blokları yedekli olması amacıyla, bazı donanım blokları ise ilerleyen çalışmalara destek sağlaması amacıyla bulunmaktadır. Kontrol Modülü'nün sahip olduğu kabiliyetler aşağıda belirtilmektedir.

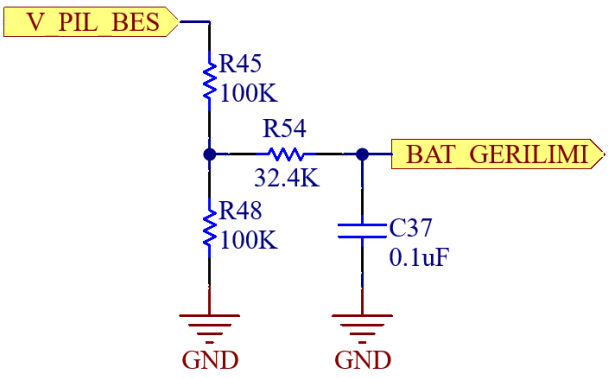
- Şönt direnci üzerinden devre akım ölçümü.
- 3V – 4.2V arasındaki değişken batarya gerilimleri için sabit 3.3V gerilim çıkışlı regülatör donanım yapısı. Bu özellik opsiyonel olarak devre üzerinde yer almaktadır.
- 12V gerilim seviyesine sahip sistemler için sabit 3.3V gerilim çıkışlı regülatör donanım yapısı.
- Ana kol akımını ölçebilen şönt dirençli harici akım ölçümü.
- 2.4 GHz kablosuz mikrodenetleyici alt yapısı.
- Negatif sıcaklık katsayılı termistör ile devre üzeri sıcaklık ölçümü.
- Negatif sıcaklık katsayılı termistör ile batarya sıcaklık ölçümü.
- Sıcaklık sensörü ile analog sıcaklık ölçümü.
- Gerilim bölücü dirençler üzerinden batarya gerilim ölçümü.
- Fark alıcı yükselteç ile batarya gerilim ölçümü.
- 1 adet yedek güç anahtarlama.
- 2 adet şarj ve deşarj işlemleri için röle/kontaktör anahtarlama yapısı.
- RS-232 haberleşme arayüzü.
- CAN-Bus haberleşme arayüzü.

3.2. BATARYA DENGELEME VE GÖRÜNTÜLEME

Geleneksel Batarya Dengeleme Sistemleri, birden çok seri hücre bilgilerinin tek bir entegre özelinde toplanarak kontrol modülüne iletilmesi ilkesine dayanmaktadır. Fakat bu projede her bir seri batarya için ayrı bir dengeleme modülü bulunmaktadır. Her batarya için ayrı bir dengeleme modülü kullanmak birçok konuda avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- İzoleli devre komponentleri kullanımının ortadan kaldırılması.
- Kontrol Modülünden bağımsız olarak belirli periyotlarda sürekli olarak batarya durumunun izlenebilmesi.
- Kontrol Modülü tarafından hesaplanan batarya sağlığı, batarya şarj durumu gibi hesaplamaların Dengeleyici Modülü'ne yayılarak işlem gücünün azaltılması.
- Batarya paketi içerisinde meydana gelebilecek olası arızalardan diğer batarya gruplarının etkilenmemesinin sağlanması.
- Batarya paketi onarımı ya da üretimi esnasında doğrudan modül değişikliği ile daha esnek bir yapı kurulabilmesi.

Batarya dengelemesi için kullanılan donanımsal bileşenler sadece Dengeleyici Modül içerisinde yer almaktadır. Kontrol Modülü üzerinde bu sistemler için donanım yapısı bulunmamaktadır. Dengeleyici Modül üzerinde batarya geriliminin ölçülmesi için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki gerilim bölücü yapısı, diğeri ise opamp fark alıcı yapısıdır. Şekil 3.6 üzerinde gerilim bölücü yapısı, Şekil 3.7 üzerinde ise opamp fark alıcı yapısı gösterilmektedir.



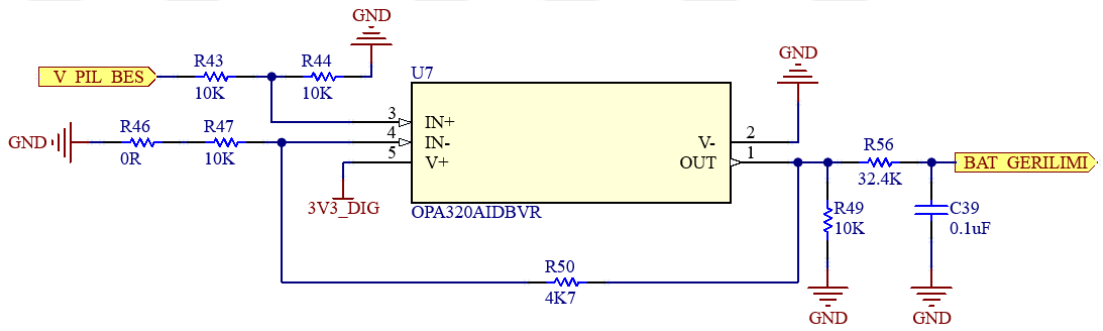
Şekil 3.6: Gerilim Bölücü Devre Yapısı

V_PIL_BES isimli port batarya girişini ifade etmektedir. Burada gerilim bölücü yapısı kullanılarak batarya gerilimi ½ oranında düşürülmektedir. Hemen ardından ise alçak geçiren filtre yardımı ile kablosuz mikrodenetleyicinin analog kanalına iletilmektedir. Gerilim bölücü formülü Denklem 3.1 ile, alçak geçiren filtre formülü ise Denklem 3.2 ile gösterilmektedir.

$$Batarya\ Gerilimi = \frac{V_PIL_BES * (R48)}{(R45+R48)} \tag{3.1}$$

$$Fkesim = \frac{1}{2.\pi.R54.C37} \tag{3.2}$$

Her iki denklem de değerlendirildiğinde; maksimum batarya gerilimi 2.1V, alçak geçiren filtre kesim frekansı ise 49.1 Hz olmaktadır.



Şekil 3.7: Opamp Fark Alıcı Devre Yapısı

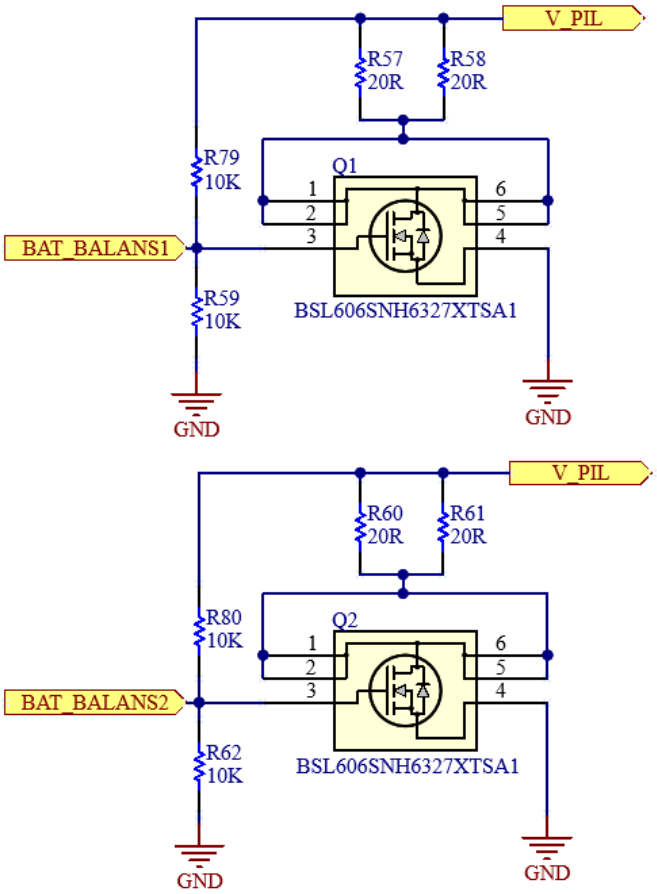
V_PIL_BES isimli port batarya girişini ifade etmektedir. Burada batarya gerilimi opamplarda fark alıcı metodu kullanılarak yapılmaktadır. Bu metot için formül Denklem 3.3 ile ifade edilmektedir.

$$Batarya\ Gerilimi = \frac{(R50+R47)*R44}{(R44+R43)*R47} * V_{PIL_{BES}} - \frac{R50}{R47} * GND \tag{3.3}$$

Şekil 3.7 üzerinde opamp çıkışında yer alan R49 kodlu direnç opsiyonel olarak yer almaktadır. Ek olarak çıkış gerilimi 49.1 Hz alçak geçiren filtre ile mikrodenetleyiciye iletilmektedir.

Gerilim ölçmek dengeleme işlemleri için oldukça önemlidir. Bu nedenle yapılan ölçümlerin mümkün olduğunca hassas olarak yapılması gerekmektedir. Dengeleme Modülü üzerinde iki adet NMOS MOSFET kullanılmaktadır. Normal çalışma şartlarında batarya gerilim seviyeleri arasında çok yüksek bir fark olmadığında bu donanım yapılarından sadece bir tanesi aktif olmaktadır. Bataryalar arasındaki dengesizliğin çok fazla olduğu koşulda ise

ikinci donanım yapısı devreye girerek dengeleme akımını artırmaktadır. Tüm dengeleme işlemleri pasif olarak dirençler vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Her iki dengeleme için de kullanılan donanım yapısı Şekil 3.8 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Pasif Batarya Dengeleme Donanım Yapısı

R58 ve R61 kodlu komponentler opsiyonel olarak devre üzerinde yer almaktadır. Aynı zamanda R79 ve R80 kodlu komponentlerin kullanımı da opsiyoneldir. BAT_BALANS1 ve BAT_BALANS2 adlı portlar mikrodenetleyici tarafından kontrol edilmektedir. V_PIL portu ise batarya güç girişlerini ifade etmektedir. Her iki devre yapısı da birebir aynıdır. Denklem 3.4 üzerinde devre yapısının dengeleme akım formülü gösterilmektedir.

$$Dengeleme\ Akımı\ (A) = \frac{Batarya\ Gerilimi\ (V)}{R57\ veya\ R60\ (Ohm)} \tag{3.4}$$

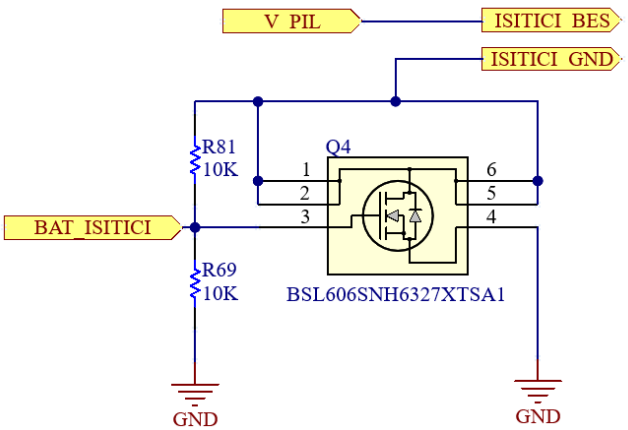
Her iki devre yapısı da aktif durumda olduğunda dengeleme akımı iki katına çıkmaktadır. Her bir batarya üzerinde yer alan Dengeleyici Modül yardımıyla batarya gerilimleri anlık olarak ölçülmekte ve Kontrol Modül kararı doğrultusunda ilgili işlemler yürütülmektedir.

3.3. TERMAL KONTROL

Bataryalar için çalışma sıcaklığı çok büyük önem taşımaktadır. Özellikle düşük sıcaklıklarda lityum bataryaların kimyasındaki iyon hareketliliği azaldığı için kapasite kaybı yaşanmaktadır. İyon hareketliliğinin azalması sonrasında iç direnç artmakta ve bu durumda da gerilim düşümü meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda bataryalar problemlere yol açmaktadır. Yüksek sıcaklık elektrolitin bozunmasına ve sonucunda da batarya ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Daha da artan sıcaklık koşullarında lityum bataryaların termal kararlılıkları bozulmakta ve sonucunda yanma veya patlama durumları yaşanabilmektedir.

Hem düşük hem de yüksek sıcaklık koşullarında farklı tepkiler veren lityum bataryaların uygun çalışma sıcaklıklarında kullanılması gerekmektedir. Lityum batarya türlerine göre çalışma sıcaklıkları değişiklik gösterse de genel olarak uygun çalışma sıcaklık aralığı 15 ile 35 °C olarak ifade edilmektedir.

Bataryalarda ısıtma veya soğutma amacıyla birçok yöntem kullanılmaktadır. Özellikle elektrikli araçlarda termal yönetim olarak ısı pompaları kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak termal pedler de bazı batarya sistemlerinde tercih edilebilmektedir. Şekil 3.9 üzerinde bu tez kapsamındaki bataryalar için kullanılan ısıtıcı pedler için kontrol yapısı yer almaktadır. Isıtıcı pedler sadece Dengeleyici Modül üzerinde yer almaktadır.

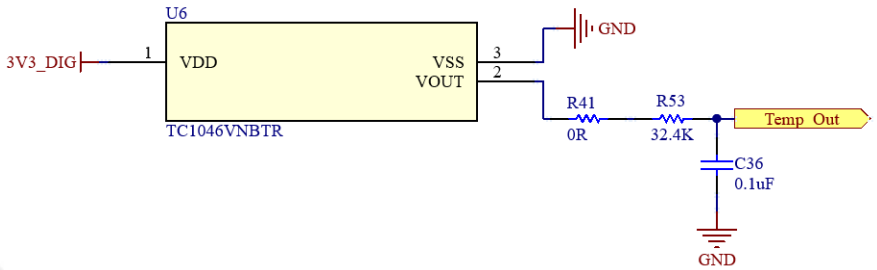


Şekil 3.9: Termal Ped Kontrolü Donanım Yapısı

Tez kapsamında tasarlanan Dengeleme ve Kontrol Modülleri'nde benzer termal donanım yapıları kullanılmaktadır. Devre üzerinde 1 adet analog sıcaklık sensörü ve 1 adet 10K direnç değerine sahip NTC yer almaktadır. Harici olarak, sistemin ya da batarya hücrelerinin sıcaklıklarının ölçülebilmesi amacıyla ikinci bir NTC okuması devre üzerine eklenmiştir.

3.3.1. Dahili Termal Kontrol

Sürekli çalışma durumunda devre sıcaklığının kontrol edilebilmesi ve pasif dengeleme esnasında yüksek akım nedeniyle açığa çıkabilecek direnç sıcaklıklarının ölçülebilmesi amacıyla devre üzerinde hem analog sıcaklık sensörü hem de NTC termistör kullanılmaktadır. Bu sensörler hem Dengeleyici Modül hem de Kontrol Modülü'nde yer almaktadır. Şekil 3.10 üzerinde devre üzeri sıcaklık sensörü donanım yapısı gösterilmektedir.

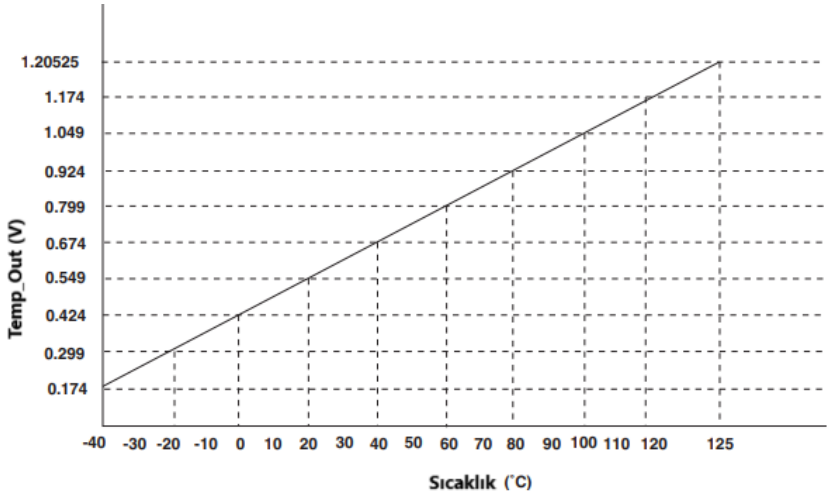


Şekil 3.10: Devre Üzeri Analog Sıcaklık Sensörü Donanım Yapısı

Devre üzerinde yer alan analog sıcaklık sensörü ile -40 ve +125 °C arasındaki tüm sıcaklık değerleri ölçülebilmektedir. Analog sıcaklık sensörü için mikrodenetleyici yazılımında kullanılması gereken formül Denklem 3.5 ile verilmektedir.

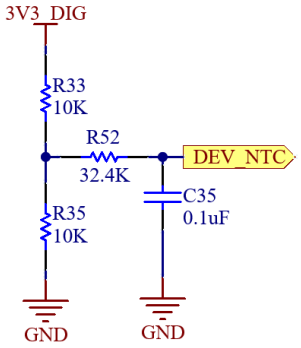
$$Temp_{out} = (6.25mV/(℃)\,.Sıcaklık(℃)) + 424mV \tag{3.5}$$

Sıcaklık sensörü çıkışındaki gerilim okuması için 49.1 Hz frekansında alçak geçiren filtre kullanılmaktadır. Şekil 3.11 üzerinde sıcaklık sensörü Gerilim-Sıcaklık grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.11: Analog Sıcaklık Sensörü Gerilim-Sıcaklık Grafiği

Analog sıcaklık sensörüne yedek olması amacıyla devre üzerinde NTC termistör yapısı da yer almaktadır. Şekil 3.12 üzerinde NTC termistör donanım yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.12: Devre Üzeri NTC Termistör Donanım Yapısı

R35 kodlu NTC termistör oda sıcaklığında (25 ℃) 10K ohm direnç değerine sahiptir. Ortam sıcaklığı arttıkça direnç değeri düşmekte ve buna bağlı olarak DEV_NTC portuna gelen gerilim azalmaktadır. Ortam sıcaklığı azaldıkça direnç değeri artmakta ve buna bağlı olarak DEV_NTC portuna gelen gerilim artmaktadır. DEV_NTC portuna gelen gerilim değerine mikrodenetleyici öncesinde 49.1 Hz frekansında alçak geçiren filtre eklenmiştir. Denklem 3.6 üzerinde DEV_NTC portuna gelmesi gereken gerilim değeri formülü gösterilmektedir.

$$DEV\ NTC = \frac{3V3\ DIG * (R35\ NTC)}{(R33 + R35\ NTC)} \tag{3.6}$$

NTC termistör donanım yapısı kullanılan devrelerde sıcaklık-gerilim arasındaki ilişkiyi kurabilmek için Beta değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Projede kullanılan NTC termistörün B25/50 değerleri Tablo 3.3 üzerinde verilmektedir. B25/50 değeri bilinen NTC termistör için kullanılan formül Denklem 3.7 ile verilmiştir.

$$Rt = R0.e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T0})} \tag{3.7}$$

Burada; Rt sembolü T sıcaklığındaki direnci (Ω), R0 sembolü referans sıcaklıktaki direnci (25 ℃'de verilen değer), B sembolü Beta sabitini (K), T sembolü hesaplanacak sıcaklığı (Kelvin cinsinden) ve T0 sembolü referans sıcaklığı (genellikle 25 ℃'de 298.15K) ifade etmektedir. Projede kullanılan NTC termistörün B25/50 değeri 3900K, R0'daki direnç değeri ise 10KΩ'dur.

Tablo 3.3. NTC Termistör Sıcaklık-Direnç Değerleri Tablosu

Sıcaklık Değeri (℃)	Direnç Değeri (1/10 KΩ)
-30	17.08
-25	12.65
-20	9.465
-15	7.147
-10	5.444
-5	4.181
0	3.237
5	2.524
10	1.981
15	1.567
20	1.247
25	1
30	0.8072
35	0.6556
40	0.5356
45	0.4401
50	0.3635
55	0.3018
60	0.2518
65	0.2111
70	0.1777
75	0.1504
80	0.1278
85	0.1090
90	0.09310
95	0.07980
100	0.06871
105	0.05947
110	0.05170
120	0.03951

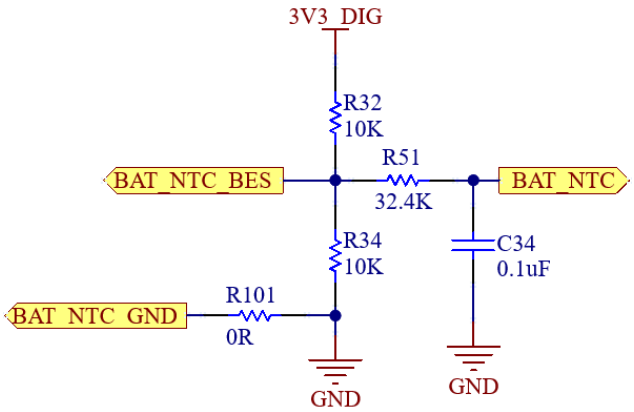
3.3.2. Harici Termal Kontrol

Proje içeriğinde yer alan Dengeleyici Modüller bataryalarla aynı yerde yer almaktadır. Fakat bataryaların kapasitelerinden kaynaklı çok büyük hacimde olmaları veya birden fazla paralel yapıda paketlenmiş olmaları devrenin batarya özelinde ölçebileceği sıcaklığın sağlıksız olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bataryaların aralarına ya da en uzak noktalarına yerleştirilmek üzere harici NTC termistör okuması projede yer almaktadır. Ancak bu termistör yüzey temaslı komponent değil, kablo tipi komponenttir. Şekil 3.13 üzerinde bataryalar üzerine yerleştirilen NTC termistör görseli verilmiştir. Kontrol Modülü üzerinde de 1 adet kablolu tip NTC termistör okuma yapısı yer almaktadır. Bu termistör sistem tasarımında sıcaklık limitlerinin takip edilmesi gereken uygun bir nokta için kullanılabilmektedir.



Şekil 3.13: Kablolu Tip NTC Termistör Görseli

Şekil 3.14 üzerinde kablolu tip NTC termistör donanım yapısı gösterilmektedir. R34 kodlu direnç opsiyonel olarak devrede yer almaktadır.



Şekil 3.14: Kablolu Tip NTC Termistör Donanım Yapısı

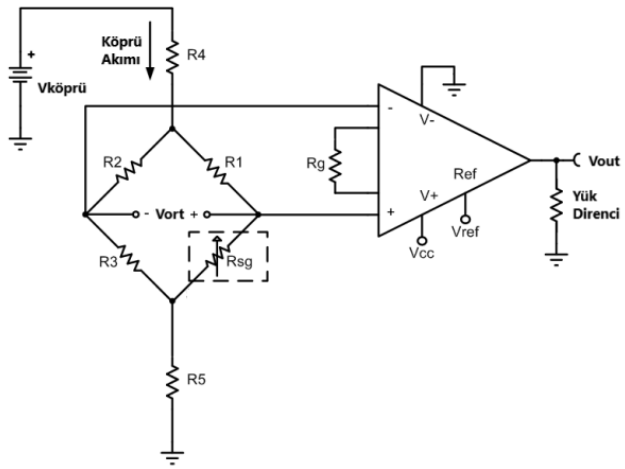
BAT_NTC_BES ve BAT_NTC_GND portlarına kablolu tip NTC termistörün bağlantısı yapılmaktadır. NTC termistör çıkışına 49.1 Hz frekansa sahip alçak geçiren filtre yerleştirilmiştir. Projede kullanılan kablolu tip NTC termistörün B25/50 değeri 3380K, R0'daki direnç değeri ise 10KΩ'dur. Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 ile gösterilen formüller yardımıyla

sıcaklık-direnç hesaplamaları yapılabilmektedir. Kablolu tip NTC termistör ölçüm aralığı -40 ile +125 ℃'dir.

3.4. BATARYA ŞİŞME TESPİTİ

Özellikle kese tipi bataryalarda şarj ve deşarj süreçleri boyunca bir miktar şişme meydana gelmektedir. Bu şişme durumu belirli sınırlar dahilinde kabul edilebilirdir. Fakat batarya kimyası ya da yanlış kullanım kaynaklı sorun meydana geldiğinde şişme seviyesi giderek artmaktadır. Sonucunda da bataryalarda parlama meydana gelebilmektedir. Güvenlik önlemlerinin artırılmak istenmesi nedeniyle bataryalarda şişme durumları kontrol edilmektedir. Eğer şişme belirli bir seviyeye gelirse batarya yönetim sistemi tarafından kullanıcıya bilgi verilmektedir.

Bataryalar paketlenmeden önce normal koşullardaki şişme durumu tespit edilmektedir. Dolayısıyla sonraki çalışma koşullarında meydana gelebilecek test edilmiş şişme durumları normal olarak kabul edilmektedir. Belirlenen seviyenin üzerine çıkıldığı durumda batarya yönetim sistemi uyarı vererek güvenlik amacıyla sistemde önlem almaktadır. Bu tez kapsamında her Dengeleyici Modül üzerinde şişme tespiti donanım yapısı bulunmaktadır. Bu sayede sürekli olarak batarya şişme durumları kontrol edilebilmektedir. Şekil 3.15 üzerinde tipik bir gerinim ölçer ölçüm metodu gösterilmektedir.



Şekil 3.15: Tipik Bir Gerinim Ölçer Ölçüm Metodu

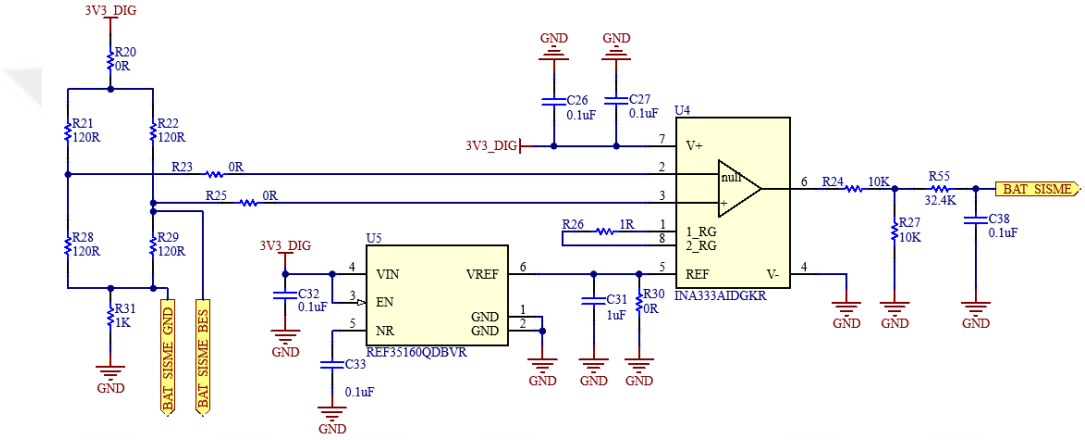
Denklem 3.8 ile Şekil 3.15 ile gösterilen devrenin transfer fonksiyon formülü gösterilmektedir.

$$Vout = (Vort * G) + Vref \tag{3.8}$$

Burada; G ifadesi enstrümantasyon yükseltecinin kazancını, Vref ifadesi sisteme eklenen referans gerilim değerini, Vort ifadesi Wheatstone köprüsü gerilim değerini ifade etmektedir. R1, R2 ve R3 değerleri eşit seçildiği durumda köprü üzerinde oluşan gerilim değeri Denklem 3.9 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Vort = \frac{R1.R1 - Rsg.R1}{-2.R1.R1 - 3.R5.R1 - 3.R4.R1 - 2.Rsg.R1 - Rsg.R4 - Rsg.R5}.Vköprü \quad (3.9)$$

Dengeleyici Modül üzerinde kullanılan Wheatstone köprüsü donanım yapısı Şekil 3.16 ile gösterilmektedir.



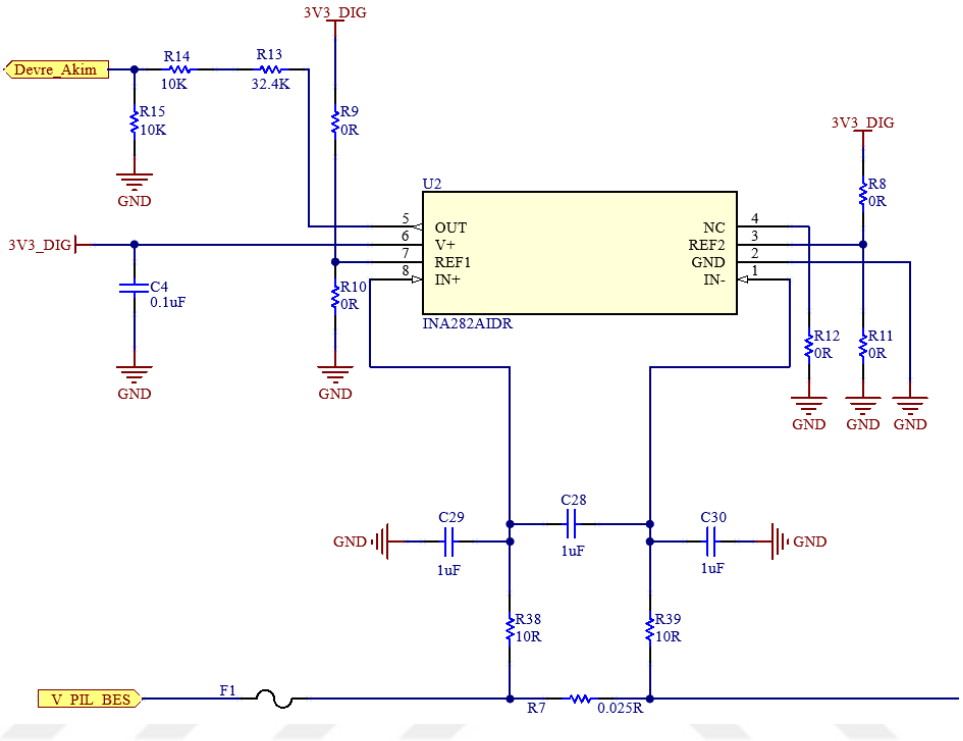
Şekil 3.16: Batarya Gerinim Ölçer Donanım Yapısı

R29 direnci opsiyonel olarak devre üzerinde yer almaktadır. BAT_SISME_GND ve BAT_SISME_BES isimli portlar batarya üzerindeki gerinim ölçere bağlıdır. R26 direnci ile enstrümantasyon yükseltecinin kazanç değeri ayarlanmaktadır. BAT_SISME isimli port mikrodenetleyici analog ölçüm pinine bağlıdır. Aynı zamanda bu hat üzerinde 49.1 Hz frekans değerine sahip alçak geçiren filtre yer almaktadır. U5 isimli komponent enstrümantasyon yükselteci için referans gerilim değerini oluşturmaktadır. Kontrol Modülü üzerinde bu donanım yapısı bulunmamaktadır.

3.5. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ GÜÇ TÜKETİMİ

Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi özelinde tasarımları yapılan Dengeleyici Modül ve Kontrol Modülü'nde farklı donanım yapıları bulunmaktadır. Bu yapıların güç tüketimleri yüksek olmasa da modüller doğrudan batarya üzerinden besleneceği için sistemin güç dengesi çok önemlidir. Hem Dengeleyici Modül hem de Kontrol Modülü üzerinde yer alan kablosuz mikrodenetleyici sadece veri alma ve veri gönderme esnasında yüksek seviyelerde güç tüketmektedir. Diğer sistem gereksinimleri için uyku modunda çok düşük güç harcamalarına

sahiptir. Devre üzerinde yer alan elektronik ekipmanların güç tüketim değerleri sürekli olarak Şekil 3.17 üzerinde gösterilen donanım yapısı ile kontrol edilmektedir. Bu yapı her iki modül üzerinde de yer almaktadır.



Şekil 3.17: Güç Girişi Akım Ölçümü Yapısı

R7 direnç değerinde değişiklikler yapılarak sistemin okuyabileceği akım seviyeleri ayarlanabilmektedir. R8, R10 ve R12 numaralı dirençler devre üzerinde opsiyonel olarak yer almaktadır. Farklı aralıklarda ölçeklemeler istendiği durumda bu dirençler üzerinden ayarlama yapılabilmektedir. Burada temel mantık direnç üzerindeki gerilimin yükseltilerek mikrodenetleyicinin okuyabileceği seviyeye getirilmesidir. U2 numaralı entegre çıkışında oluşacak gerilim değeri Denklem 3.10 ile ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Vout = \big((R7\ \text{Üzerindeki Akım Değeri} * R7\ \text{Direnci}) * 50\ \big) + 1.65 \tag{3.10}$$

Denklem 16 üzerinde elde edilen gerilim değeri mikrodenetleyiciden önce gerilim bölücü bloğundan geçmektedir. Mikrodenetleyici üzerinde oluşacak gerilim değeri Denklem 3.11 ile ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Devre\ Akim = \frac{(Vout * R15)}{R13+R14+R15} \tag{3.11}$$

Tablo 3.4 ve Tablo 3.5 üzerinde Dengeleyici Modül ve Kontrol Modülü tasarımlarında yer alan elektronik komponentlerin ürün kataloglarında belirtilen güç tüketim değerleri verilmiştir.

Tablo 3.4: Dengeleyici Modül Güç Tüketim Tablosu

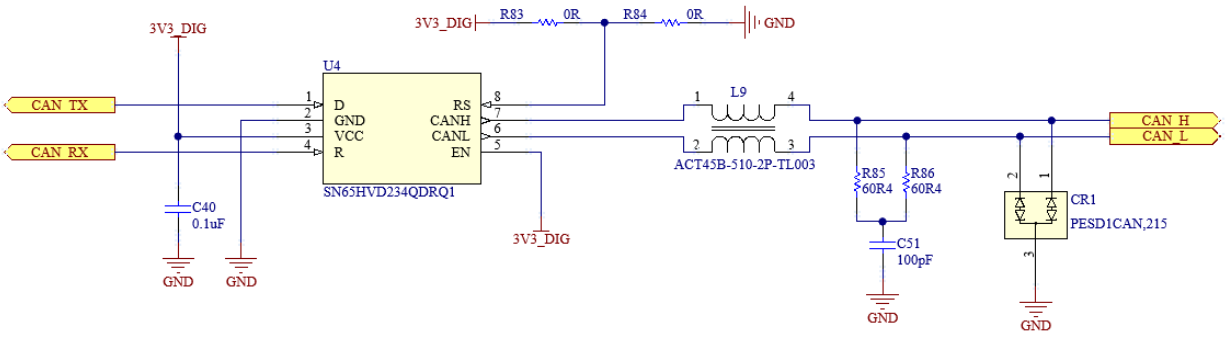
Adet Bilgisi	**Malzeme Kodu**	**Minimum Güç Tüketimi**	**Ortalama Güç Tüketimi**	**Maksimum Güç Tüketimi**
2	INA282AIDR	-	6 mW (2 Adet)	10 mW (2 Adet)
1	MAX77827DEFD+T	0.02 mW	7.6 mW	22.8 mW
1	TC1046VNBTR	-	0.11 mW	0.2 mW
1	OPA320AIDBVR	-	7.97 mW	9.35 mW
1	REF35160QDBVR	-	0.002 mW	0.009 mW
1	INA333AIDGKR	-	0.16 mW	0.26 mW
1	CC2662R1FTWRGZRQ1	0.12 mW (MCU)	34.8 mW (MCU+RF)	41.4 mW (MCU+RF)

Tablo 3.5: Kontrol Modülü Güç Tüketim Tablosu

Adet Bilgisi	**Malzeme Kodu**	**Minimum Güç Tüketimi**	**Ortalama Güç Tüketimi**	**Maksimum Güç Tüketimi**
2	INA282AIDR	-	6 mW (2 Adet)	10 mW (2 Adet)
1	TPS630702RNMR	-	0.3 mW	0.8 mW
1	TC1046VNBTR	-	0.11 mW	0.2 mW
1	OPA320AIDBVR	-	7.97 mW	9.35 mW
1	SN65HVD234QDRQ1	1.98 mW	33 mW	56.1 mW
1	MAX3232CPWR	-	1.5 mW	5 mW
1	CC2662R1FTWRGZRQ1	0.12 mW (MCU)	34.8 mW (MCU+RF)	41.4 mW (MCU+RF)

3.6. KONTROL MODÜLÜ HABERLEŞME ARAYÜZLERİ

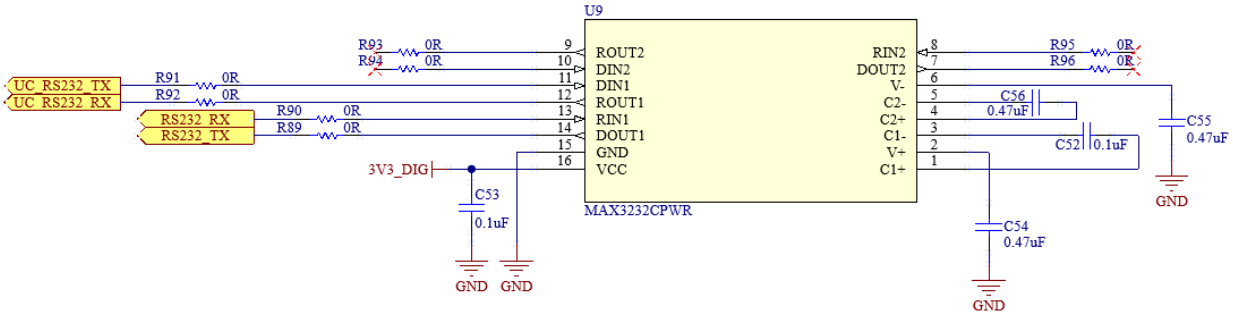
Bilgisayar arayüzü veya farklı arayüz sistemleri ile Kontrol Modülü doğrudan iletişim kurmaktadır. Fakat Dengeleyici Modül üzerinde kablosuz haberleşme haricinde herhangi bir haberleşme protokolü yer almamaktadır. Kontrol Modülü üzerinde 1 adet RS-232 ve 1 adet de CAN-Bus haberleşme arayüzü bulunmaktadır. Bu arayüzler üzerinde kablolu şekilde iletişim kurulabilmektedir. Fakat bu protokollerin kullanımı zorunlu değildir. Çünkü Kontrol Modülü üzerinden de kablosuz olarak veri aktarımı mümkündür. Bu arayüzlerin eklenmesinin sebebi otomotiv uygulamalarında bu arayüzlerin aktif olarak kullanılıyor olmasıdır. Şekil 3.18 üzerinde CAN-Bus haberleşme protokolü donanım yapısı verilmektedir.



Şekil 3.18: CAN-Bus Haberleşme Protokolü Donanım Yapısı

R83 ve R84 nolu dirençler ile CAN-Bus haberleşme entegresinin modları ayarlanmaktadır. Buna ek olarak R85 ve R86 nolu dirençler CAN-Bus hattının empedans ayarlamalarında kullanılmaktadır.

Şekil 3.19 üzerinde Kontrol Modülü'nde yer alan RS-232 haberleşme protokolünün donanım yapısı verilmektedir. Bu entegre özelinde 2 ayrık haberleşme portu yer almaktadır. Fakat projede sadece 1 port aktif olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.19: RS-232 Haberleşme Protokolü Donanım Yapısı

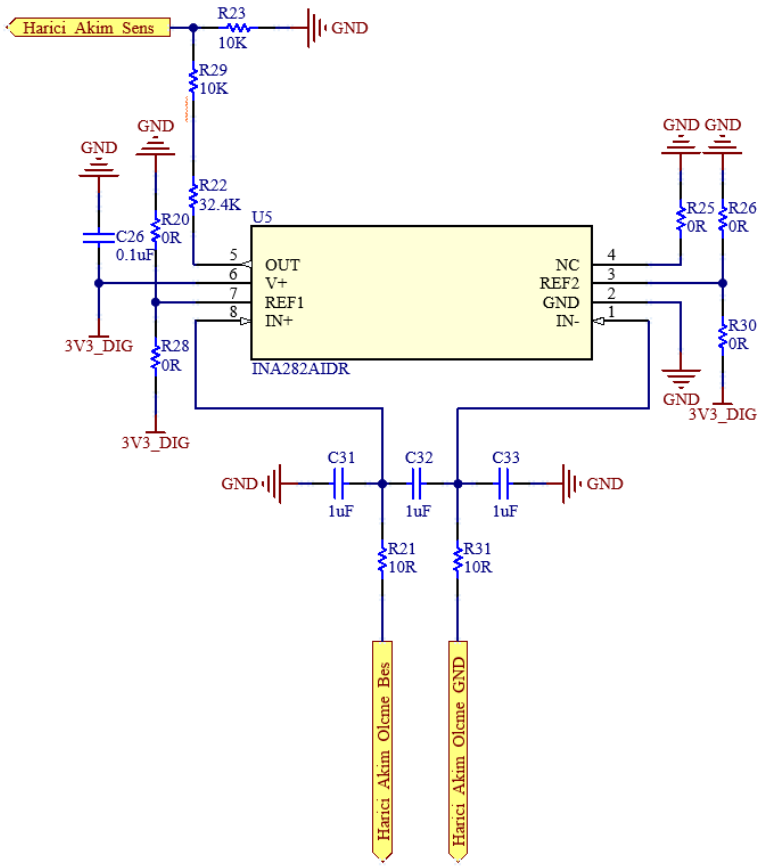
3.7. AKIM SAYMA METODU

Akım sayma metodu batarya paketleri için en kritik parametreler arasındadır. Batarya şarj durumu, batarya deşarj durumu, acil durumda alınması gereken önlemler gibi birçok teşhis bu metottan elde edilen verilerden sağlanmaktadır. Proje içeriğinde akım sayma metodu Kontrol Modülü aracılığıyla yürütülmektedir. Akım sayma işlemi için Kontrol Modülü üzerinde şönt direnç üzerinden batarya ana akımını ölçebilen donanım yapıları yer almaktadır. Aynı zamanda batarya grubunun şarj ve deşarj süreçlerini kontrol eden kontaktör anahtarlama donanım yapıları da bu modül üzerinde yer almaktadır. Şekil 3.20 üzerinde batarya sistemlerinde yüksek akımların okunabilmesi amacıyla sıklıkla kullanılan şönt direnç örneği gösterilmektedir.



Şekil 3.20: Şönt Direnç Örneği

Kontrol Modülü şönt direnç üzerinden sürekli olarak batarya sistemindeki ana kol akımını ölçmektedir. Bu akım değeri batarya paketinin sahip olduğu kapasite ile karşılaştırılarak batarya şarj durumu gibi birçok parametre hesaplanmaktadır. Aynı zamanda olası bir kısa devre durumunda sistem olması gerekenden fazla akım çektiği durumda bu yapı üzerinden tespit yapılarak şarj ve deşarj kontaktörleri kapatılabilmektedir. Şekil 3.21 üzerinde şönt direnci üzerinden akım okuma donanım yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.21: Şönt Direnç Üzerinden Akım Okuma Donanım Yapısı

R25, R30 ve R20 numaralı dirençler devre üzerinde opsiyonel olarak yer almaktadır. Farklı aralıklarda ölçeklemeler istendiği durumda bu dirençler üzerinden ayarlama yapılabilmektedir. Şönt direnci üzerinde oluşan gerilim değeri U5 entegresinin çeşidine göre belirli bir katsayı ile çarpılarak çıkışa aktarılmaktadır. U5 entegresi çıkışında oluşacak gerilim değeri Denklem 3.12 ile hesaplanmaktadır.

$$Vout = \big((\text{Şönt Üzerindeki Akım Değeri} * \text{Şönt Direnci}) * 50\big) + 1.65 \qquad (3.12)$$

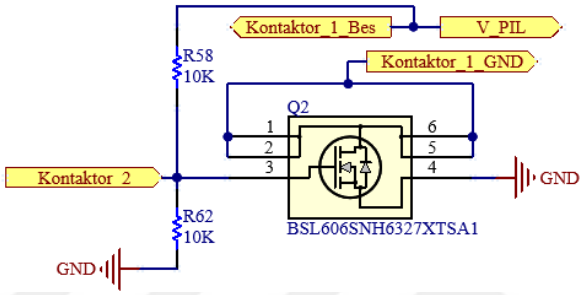
Mikrodenetleyici üzerinde oluşacak akım değeri ise Denklem 3.13 ile hesaplanmaktadır.

$$Harici\ Akim\ Sens = \frac{(Vout * R23)}{R22+R23+R29} \qquad (3.13)$$

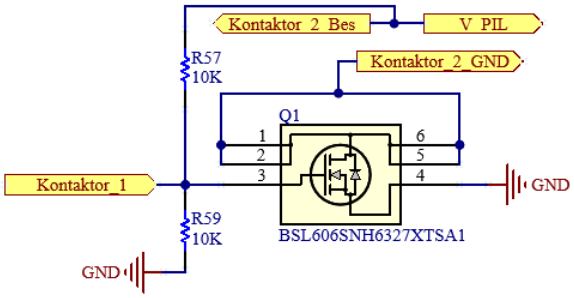
Şönt direncin farklılığına göre U5 entegresi katsayısı değiştirilerek farklı akım aralıklarının okuması yapılabilmektedir.

3.8. ŞARJ VE DEŞARJ KONTROLÜ

Batarya paketleri hareket kabiliyeti için motor sürücü ve motor sistemlerine yüksek güç kontaktörleri ile bağlanmaktadır. Sistem üzerindeki bu yüksek akım kontaktörleri için Kontrol Modülü üzerinde 2 adet güç anahtarlama hattı bulunmaktadır. Bu anahtarlamalar ile batarya paketinin güvenliği için şarj, deşarj ve ön-şarj gibi süreçler yönetilmektedir. Şekil 3.22 ve Şekil 3.23 üzerinde kontaktör anahtarlama donanım blokları gösterilmektedir. R57 ve R58 numaralı komponentler opsiyonel olarak devre üzerinde yer almaktadır.



Şekil 3.22: Kontaktör Anahtarlama-1 Donanım Bloğu



Şekil 3.23: Kontaktör Anahtarlama-2 Donanım Bloğu

Bazı uygulamalarda bu kontrol hatları ön şarj ve negatif kutup anahtarlaması olarak da kullanılabilmektedir. Fakat burada asıl kullanım amacı şarj ve deşarj işlemleridir. Kontrol Modülü 12V batarya sisteminden beslendiği durumda yüksek güç kontaktörlerinin kontrol uçları bu gerilim seviyesi ile kontrol edilebilmektedir. Kontaktor_1 ve Kontaktor_2 portları Batarya Yönetim Sistemi çalışma algoritmasına göre doğrudan mikrodenetleyici üzerinden kontrol edilmektedir.

3.9. BATARYA SAĞLIĞI VE BATARYA ŞARJ DURUMLARI (SOC VE SOH)

Batarya Şarj Durumu (SOC) ve Batarya Sağlık Durumu (SOH) kavramları batarya sistemleri için en kritik veriler olarak değerlendirilmektedir. Çünkü bu veriler, bataryaya ait doluluk oranı ve kapasite sağlığı gibi önemli çıktıları sunmaktadır. Hassas ve gerçekçi

değerlendirmeler yapabilmek için Batarya Şarj Durumu ve Batarya Sağlık Durumu tespiti amacıyla kullanılan tüm sensör ve ölçüm metotları isterlere uygun şekilde seçilmiş olmalıdır. Uygun seçilmeyen elektronik bileşenler bu verilerin düzgün hesaplanamamasına sebep olabilmektedir.

3.9.1. Batarya Şarj Durumu (SOC)

Batarya Şarj Durumu (SOC), bir bataryanın mevcut haldeki doluluk seviyesini gösteren parametredir. Genel olarak % cinsinden ifade edilmektedir. Bu değer, yüzde cinsinden bataryada ne kadar enerji depolandığını anlamlandırmak için kullanılmaktadır. Batarya Şarj Durumu (SOC) en basit anlamıyla Denklem 3.14 üzerinde gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$Batarya\ Şarj\ Durumu\ (SOC) = \frac{(Mevcut\ Kapasite-Ah)}{(Tam\ Dolu\ Kapasite-Ah)} * 100 \quad (3.14)$$

Batarya Şarj Durumu birçok farklı yöntem ile hesaplanabilmektedir. Fakat bataryaların sıcaklık ve deşarj akım profilleri değişiklik gösterdiği için tam anlamıyla hesaplamak zor olabilmektedir. Bu projede Batarya Şarj Durumu hesaplaması için hem akım sayma hem de açık devre gerilimi yöntemleri kullanılmıştır.

Akım sayma işlemi şönt direnci üzerinden yapılmaktadır ve Denklem 3.15 üzerindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$SOC(t) = SOC(t0) + \frac{1}{Cbat}\int_{t0}^{t} I(\tau)d\tau \quad (3.15)$$

Burada; Cbat ifadesi nominal kapasiteyi (Ah), I(τ) ifadesi akım değerini ve t0 ise başlangıç zamanını belirtmektedir.

Açık devre gerilimi yöntemi için bataryanın yük altında olmaması gerekmektedir. Uyku halinde olan bataryanın gerilim değeri ölçülmekte ve üretici tarafından belirtilen şarj durumu grafiği ile bu değer ilişkilendirilmektedir. Her iki yönteminde kullanılarak batarya şarj durumunun tespit edilmesindeki asıl amaç olası ölçüm hatalarının önüne geçilerek daha hassas tahmin yapılabilmesini sağlamaktır.

3.9.2. Batarya Sağlık Durumu (SOH)

Batarya Sağlık Durumu (SOH), bir bataryanın başlangıç durumuna kıyasla ne kadar sağlıklı olduğunu gösteren parametredir. Genellikle % cinsinden ifade edilmektedir. Bataryanın

ömrünü ve kapasite kaybını ifade etmektedir. Batarya Sağlık Durumu (SOH), en basit anlamıyla Denklem 3.16 üzerinde gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Batarya\ Şarj\ Durumu\ (SOH) = \frac{(Mevcut\ Kapasite - Ah)}{(Başlangıç\ Kapasitesi - Ah)} * 100 \quad (3.16)$$

Batarya Sağlık Durumu (SOH) tespiti için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlardan en sık tercih edilen yöntemler şu şekilde sıralanmaktadır. Kapasite bazlı SOH, İç direnç bazlı SOH, Güç tabanlı SOH ve Model tabanlı SOH. Bu projede kapasite ve iç direnç bazlı metotlar kullanılmaktadır. Kapasite verileri hem batarya üzeri (devre) hem de batarya paketi hatlarında yer alan şönt dirençler üzerinden sağlanmaktadır. İç direnç ölçümü ise DC modda dengeleme dirençleri aç-kapa yapılarak oluşan gerilim düşümlerindeki ölçümlerden elde edilmektedir. Batarya Sağlık Durumu hakkında hassas ve düzgün değerlendirmeler yapabilmek için gerilim, akım, sıcaklık, iç direnç, şarj/deşarj döngü sayısı ve şarj/deşarj süresi gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

3.10. KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ KONTROLÜ

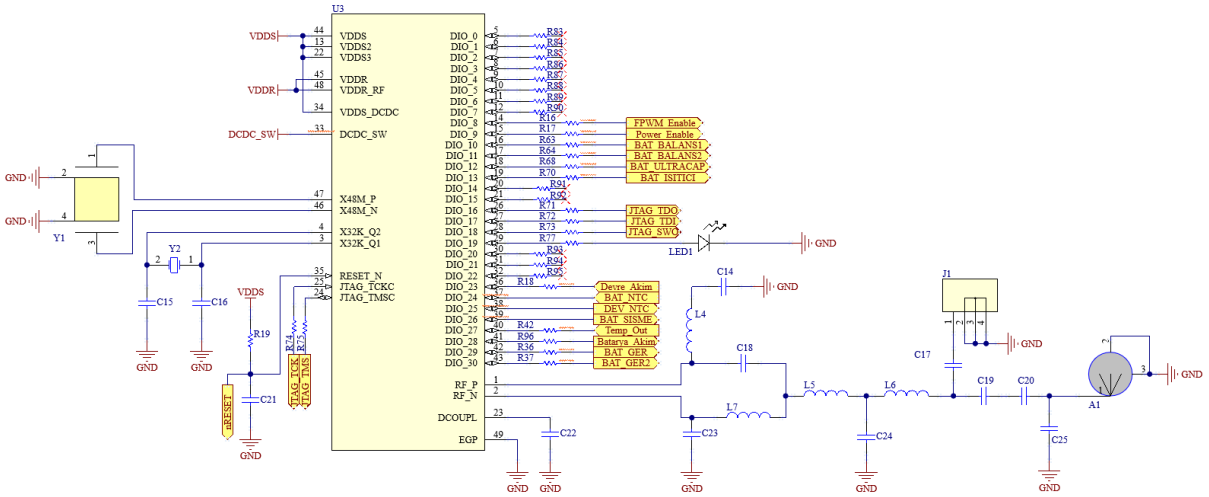
Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi projesi özelinde 2 farklı modül (Dengeleyici Modül ve Kontrol Modülü) bulunmaktadır. Bu modüllerin her ikisinde de Texas Instruments firmasına ait CC2662R-Q1 SimpleLink kablosuz mikrodenetleyici kullanılmaktadır. Bu kablosuz mikrodenetleyici, özellikle batarya yönetim sistemleri ve kablolu iletişimin yerine geçecek uygulamalarda düşük güçlü kablosuz iletişim için tasarlanmıştır. Kablosuz mikrodenetleyici, Texas Instruments'ın SimpleLink kablosuz BYS protokolü desteği sayesinde güvenilir, düşük gecikmeli ve yüksek veri aktarım hızlı iletişim sağlamaktadır. Aynı zamanda ürün, Otomotiv Elektroniği Konseyi tarafından AEC-Q100 (Automotive Electronics Council) standardına uygunluk onayı almıştır. Doğrudan Otomotiv Güvenlik Bütünlüğü Seviyesi (Automotive Safety Integrity Level - ASIL) şartlarına uygun olmasa da yardımcı ekipman olarak bu sistemlerde kullanılabilmektedir.

Proje içeriğinde yer alan kablosuz mikrodenetleyicinin teknik verileri Tablo 3.6 ile gösterilmektedir.

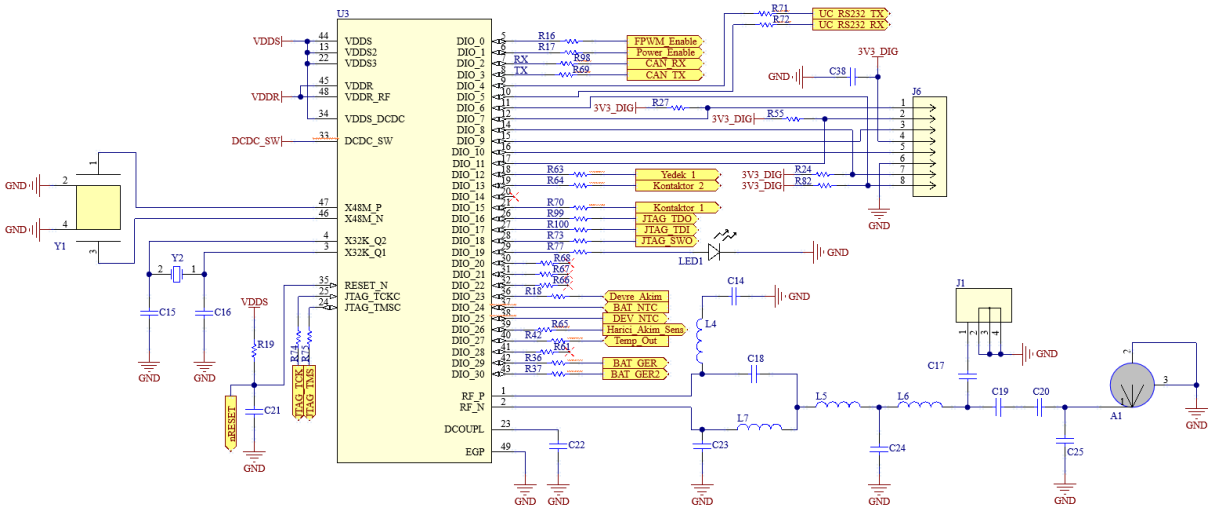
Tablo 3.6. Kablosuz Mikrodenetleyici Teknik Özellikleri

Özellik	Açıklama
Kablosuz Mikrodenetleyici	48 MHz Arm Cortex-M4F
Programlama Arayüzü	JTAG
ROM	256KB
Flash	352KB
SRAM	8KB
Radyo Frekans	Dahili RF Modül 2.4GHz
GPIO	31 Adet
ADC	8 Adet, 12-bit
UART Arayüzü	2 Adet
SSI Arayüzü	2 Adet
I2C Arayüzü	1 Adet
Çalışma Sıcaklığı	-40 ile +105 °C
Kılıf	7x7 mm, RGZ VQFN48

Dengeleyici Modül'ün kablosuz mikrodenetleyici donanım yapısı Şekil 3.24, Kontrol Modülü'nün kablosuz mikrodenetleyici donanım yapısı Şekil 3.25 ile gösterilmektedir. Kontrol Modülü donanım yapısında opsiyonel olarak SD Card bulunmaktadır.



Şekil 3.24: Dengeleyici Modül Kablosuz Mikrodenetleyici Donanım Yapısı



Şekil 3.25: Kontrol Modülü Kablosuz Mikrodenetleyici Donanım Yapısı

Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi için tasarlanan modüllerde PCB anten yer almaktadır. Fakat mesafe anlamında esneklik sağlamak amacıyla normal anten konnektörü çıkışı da devrede opsiyonel olarak bulunmaktadır. Tez projesi kapsamında tasarımı yapılan sistemin sahip olduğu koruma ve kontrol fonksiyonları alt başlıklar halinde aşağıda açıklanmıştır.

- **Aşırı Gerilim Koruması:** Her batarya grubunun ulaşabileceği maksimum gerilim değeri 4.2V'tur. Bu değerin aşılması durumunda, Kontrol Modülü tarafından şarj kontaktörü kapatılmakta ve şarj işlemi durdurulmaktadır. Aynı zamanda gerilimi ölçen Dengeleyici Modül tarafından Kontrol Modülü'ne "Aşırı Gerilim" uyarısı iletilmektedir.

- **Düşük Gerilim Koruması:** Her batarya grubunun ulaşabileceği minimum gerilim değeri genellikle 3V'tur. Bu değerin altına düşülmesi durumunda, Kontrol Modülü tarafından deşarj kontaktörü kapatılmakta ve deşarj işlemi durdurulmaktadır. Aynı zamanda gerilimi ölçen Dengeleyici Modül tarafından Kontrol Modülü'ne "Düşük Gerilim" uyarısı iletilmektedir.

- **Batarya Paketi Yüksek Akım Koruması:** Batarya paketi oluşturulurken sistemin destekleyebileceği maksimum şarj ve maksimum deşarj akımları belirlenmektedir. Bu akım değerleri Kontrol Modülü içerisinde yer alan algoritmaya aktarılmaktadır. Olası bir kısa devre ya da sistem tarafından fazla akım talebi olması durumunda Kontrol Modülü tarafından şarj ve deşarj kontaktörleri kapatılmaktadır. Bu sayede batarya sisteminin zarar görmesi engellenmektedir.

- **Devre Yüksek Akım Koruması:** Her batarya grubunun üzerinde yer alan Dengeleyici Modül'ün giriş akımı sürekli olarak ölçülmektedir. Ölçülen akım değeri belirlenen maksimum akım değerine ulaştığında Dengeleyici Modül tarafından Kontrol Modülü'ne "Devre Yüksek Akım" uyarısı iletilmektedir. Devre akım değeri için belirlenen maksimum değer 1A'dir. Bu değere pasif batarya dengeleme yapıları da dahildir.

- **Hızlı ve Yavaş Batarya Hücre Dengeleme:** Dengeleyici Modül üzerinde 2 adet pasif hücre dengeleme yapısı yer almaktadır. Batarya hücreleri arasındaki gerilim farkı 10mV'tan düşükse dengeleme modu aktif olmamaktadır. Eğer 10mV ile 50mV arasında bir gerilim farkı varsa yavaş dengeleme modu aktif olmaktadır. Eğer 50mV ile 100mV arasında bir gerilim farkı varsa hızlı dengeleme modu aktif olmaktadır. 100mV ve üzerindeki gerilim farklarında şarj ve deşarj işlemleri doğrudan kapanmakta ve Kontrol Modülü'ne "Batarya Gerilim Dengesizliği" uyarısı iletilmektedir. Belirtilen bu değerler batarya paketi tasarımı yapılırken yazılımsal olarak değiştirilebilmektedir.

- **Devre Sıcaklık Uyarısı:** Dengeleyici Modül tarafından sürekli olarak devre sıcaklığı ölçülmektedir. Ölçülen değer 60 ℃ ve üzeri sıcaklığa ulaştığında (Hızlı dengeleme modu aktif) Kontrol Modülü'ne "Devre Yüksek Sıcaklık" uyarısı iletilmektedir. Bu uyarı ile devre fonksiyonları kısıtlanmakta (dengeleme fonksiyonlarının kapatılması vb.) ve sıcaklığın düşmesi beklenmektedir. Yine bu sıcaklık değeri de batarya sistemi özelinde yazılımsal olarak ayarlanabilmektedir.

- **Batarya Sıcaklık Uyarısı ve Kontrolü:** Dengeleyici Modül bağlı olduğu batarya grubunun sıcaklığını sürekli olarak ölçmektedir. Batarya grubu için minimum ve maksimum sıcaklık aralığı 0 ℃ ile 40 ℃ olarak belirlenmiştir. Bu aralık içerisinde batarya grubunun tüm çalışması normal olarak kabul edilmektedir. Eğer sıcaklık değeri 40 ℃'yi aşarsa Kontrol Modülü'ne "Batarya Aşırı Sıcaklık" uyarısı iletilmektedir. Eğer 0 ℃ ve altına düşerse de Kontrol Modülü'ne "Batarya Düşük Sıcaklık" uyarısı iletilmektedir. Bu korumaya ek olarak lityum bataryalar soğuk koşullarda kapasite kaybı yaşadığı için 0 ℃ ile 15 ℃ arasında Dengeleyici Modül tarafından ısıtıcı ped açılarak batarya sıcaklığının yükseltilmesi sağlanmaktadır.

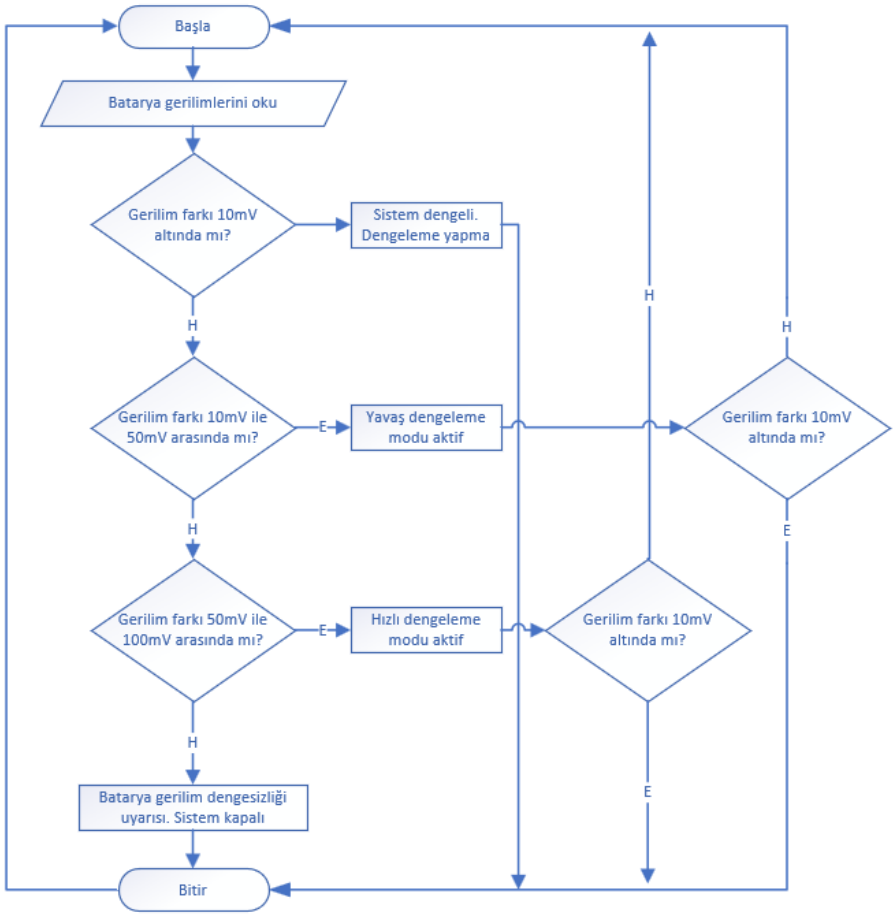
- **Batarya Şişme Tespiti:** Özellikle kese tipi lityum bataryalar için Dengeleyici Modül üzerinde gerinim ölçer kontrol yapısı bulunmaktadır. Başlangıçta batarya üzerine

sabitlenen gerinim ölçer, şarj-deşarj döngüleri sonucunda şişme kaynaklı farklı bir değer üretirse Kontrol Modülü'ne "Batarya Şişme" uyarısı iletilmektedir. Bu durumda sistemin güvenliği için şişen hücrelerin değiştirilmesi yani sistemden çıkarılması gerekmektedir.

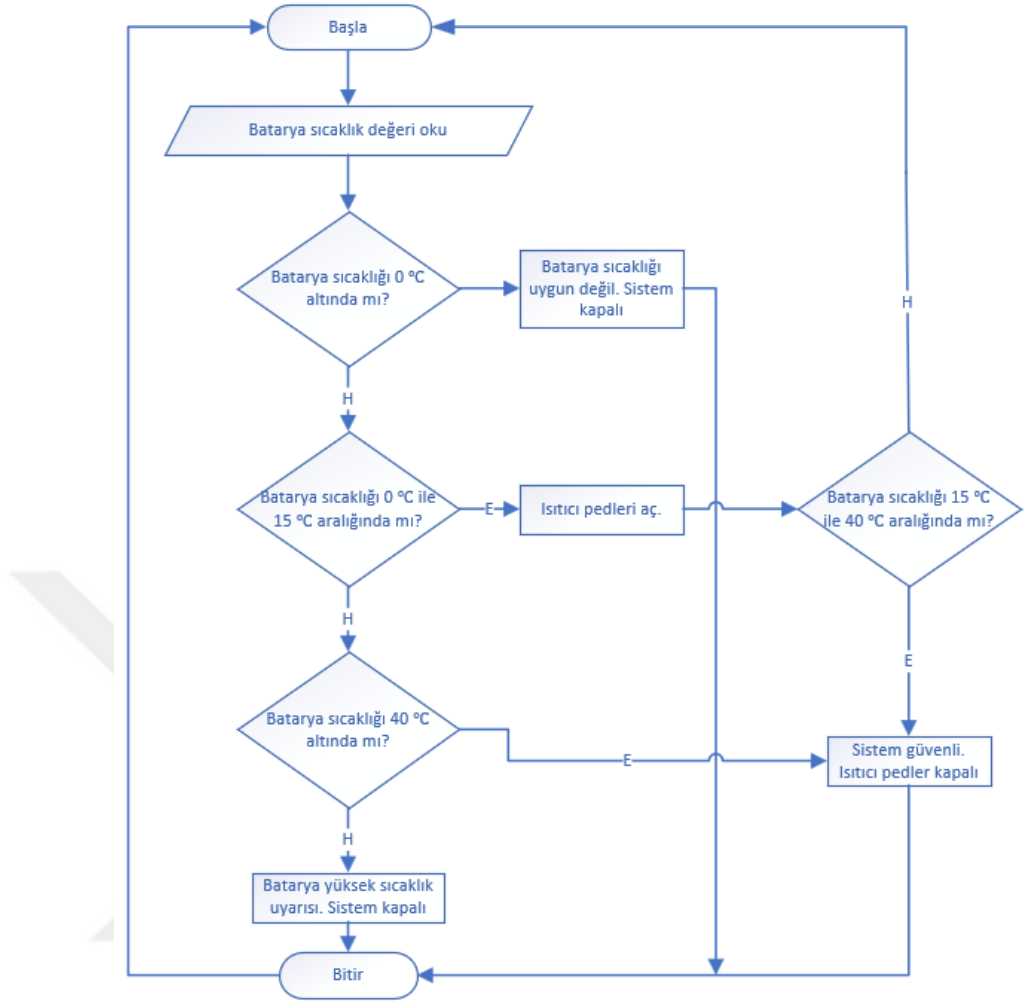
- **Haberleşme Hata Uyarısı:** Batarya paketleri üzerinde yer alan Dengeleyici Modüller ile Kontrol Modülü arasında kablosuz haberleşme bulunmaktadır. Herhangi bir Dengeleyici Modül üzerinden veri alınamaması durumunda (haberleşme kesilmesi) işletilmesi gereken tüm kontrol algoritması aksamaktadır. Bu nedenle olası bir haberleşme arızası durumunda Kontrol Modülü'ne hangi Dengeleyici Modül'den veri gelmediği bilgisi iletilmektedir. Bu durumda Kontrol Modülü tüm işlemleri (şarj-deşarj) askıya almaktadır. Kontrol Modülü üzerinden Dengeleyici Modüllere veri aktarımı olmaması durumunda ise Dengeleyici Modüller tüm dengeleme süreçlerini askıya almaktadır. Kontrol Modülü tarafından tekrar aktif komutu gelene kadar Dengeleyici Modüller beklemede kalmaktadır.

- **Gerçek Zaman İşletim Sistemleri Enerji Verimliliği:** Proje kapsamında geliştirilen modüllerde FreeRTOS gerçek zamanlı işletim sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem, farklı işlevlerin birbirinden bağımsız ve zamanlanmış şekilde yürütülmesini sağlayarak hem kararlılık hem de verimlilik sağlamaktadır. Dengeleyici Modüller için 2 ana görev belirlenmiştir. Bu görevlerden ilki haberleşmedir. Kontrol Modülü üzerinden istek geldiğinde haberleşme görevi devreye girmektedir. Dengeleyici Modül istek karşısında verileri hazırlayıp iletmekte ve ardından tekrar pasif duruma geçmektedir. Bu yapı modül özelinde enerji verimliliği sağlamaktadır. Diğer görev ise veri toplama ve işlemedir. Bu görev haberleşme görevinden bağımsız olarak sürekli işletilmektedir. Bu sayede modül üzerindeki sensör verileri aralıksız kontrol edilmektedir.

- **Algoritma Akış Diyagramı:** Proje kapsamında sistemin güvenliği için birden fazla kontrol mekanizması işletilmektedir. Bu kontrol mekanizmaları sistem kurulumu aşamasında kullanıcı talepleri kapsamında düzenlenebilmektedir. Şekil 3.26 üzerinde yavaş ve hızlı dengeleme modu algoritma akış diyagramı gösterilmektedir. Şekil 3.27 üzerinde termal kontrol algoritma akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.26: Yavaş ve Hızlı Dengeleme Modu Algoritma Akış Diyagramı



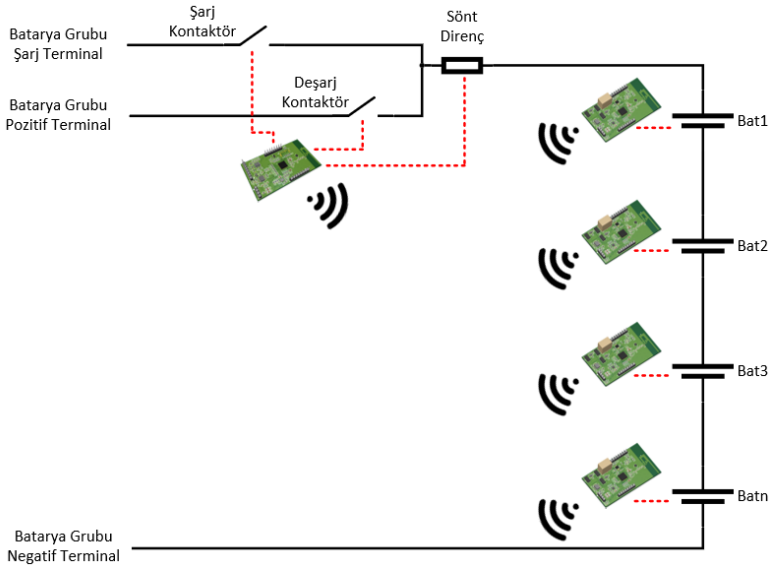
Şekil 3.27: Termal Kontrol Algoritma Akış Diyagramı

Proje kapsamında tasarlanan kablosuz batarya yönetim sisteminin çalışma algoritması Şekil 3.28 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.28: Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Çalışma Algoritması

Dengeleyici Modül ve Kontrol Modülü üzerinden sistemin kullanması gereken batarya parametreleri ölçülmektedir. Bu ölçüm sonuçları Kontrol Modülü üzerinde işlenmekte ve sistem ile ilgili detaylar kullanıcıya aktarılmaktadır.



Şekil 3.29: Proje Sistem Mimarisi

Proje kapsamında tasarlanan sistemin genel mimarisi Şekil 3.29 üzerinde gösterilmektedir. Dengeleyici Modüller paralel bağlı ve tek seri batarya grubunu kontrol ederken, Kontrol Modülü hem tüm batarya sistemini hem de Dengeleyici Modüller üzerindeki verileri kontrol etmektedir. Sisteme sonradan bir batarya grubu eklemek oldukça kolaydır. Güç bağlantıları yapılan batarya grubuna 1 adet Dengeleyici Modül takılmakta ve Kontrol Modülü ile iletişim kurulmaktadır. Bu nedenle hem entegrasyon hem de onarım gibi süreçlerde iyileşme öngörülmektedir.

4. BULGULAR

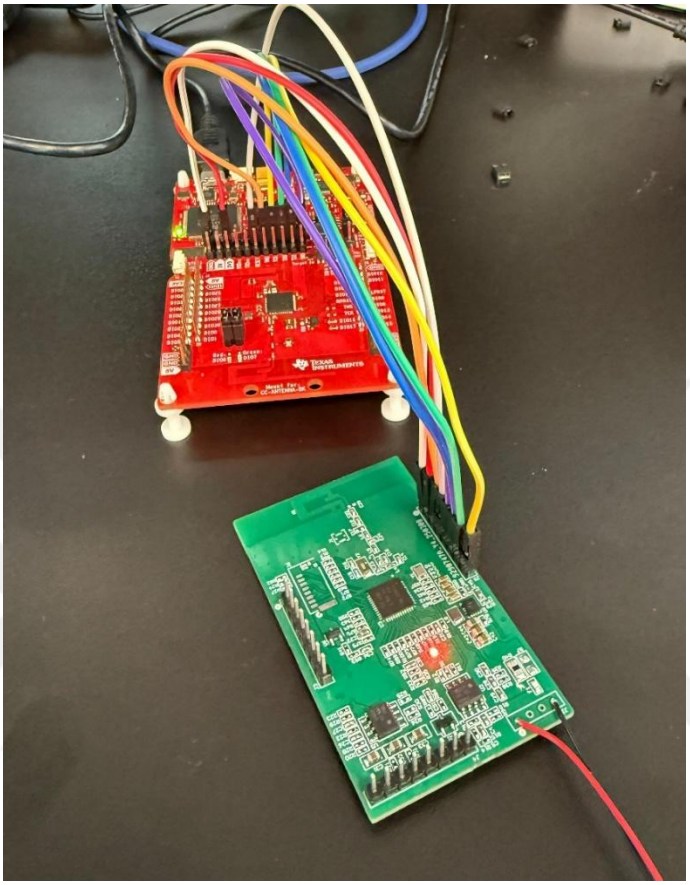
Kontrol Modülü ve Dengeleyici Modül üzerinde kablosuz mikrodenetleyici altyapısı bulunmaktadır. Bu altyapı sayesinde her modül kendi üzerindeki verileri anlamlandırarak diğer modüle kablosuz olarak aktarabilmektedir. Bu kablosuz aktarım işlemi modüller arasında izolasyon problemlerinin önüne geçmektedir. Buna ek olarak, kablosuz sistem tasarımı sayesinde Geleneksel Batarya Yönetim Sistemleri üzerinde yer alan izolasyon ekipmanlarının maliyeti ortadan kaldırılmaktadır.

Her modül kendi içerisinde sensör arabirimleri kullanmaktadır. Dolayısıyla sensörler için kullanılan kablolamanın karmaşıklığı azaltılmaktadır. Ayrıca modüllerin bağlı olduğu batarya grupları, kendi içerisinde sensör değerlendirmeleri yapabildiği için harici bir sisteme bağlı olmak zorunda değildir. Bu durum, sistem içerisine harici modül ekleme veya modül çıkarma işlemlerinde kolaylık sağlamaktadır.

Geleneksel Batarya Yönetim Sistemleri'nde tüm alt birimler ve sensörler ana kontrolcüye bağlıdır. Bu durum ana kontrolcünün işlem yükünü artırmakta ve sistem tasarım aşamasında yüksek işlem gücüne sahip kontrolcü kullanılmasına sebebiyet vermektedir. Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi mimarisinde, her batarya grubu kendi kontrolcüsü üzerinden yönetildiği için yüksek işlem kapasitesine sahip kontrolcü kullanım zorunluluğu bulunmamaktadır. İşlem yükü anlamında kablosuz tasarımlar geleneksel tasarımlara göre avantaj sağlamaktadır.

Lityum tabanlı bataryaların endüstride birçok kullanım alanı vardır. Kullanım alanlarına göre prizmatik, kese veya silindirik yapılar tercih edilebilmektedir. Silindirik tipli bataryalarda dış materyal ağır olduğu için hafif olması gereken uygulamalarda hem prizmatik hem de kese tipi batarya hücreleri tercih edilmektedir. Bu tip bataryalar şarj-deşarj esnasında şişebilmektedir. Geleneksel birçok Batarya Yönetim Sistemi bataryalardaki şişkinliği tespit etme yapısına sahip değildir. Sensör ekleme aşamaları daha kolay olan kablosuz sistemler, şişme algılama vb. gibi birçok sensörün sisteme dahil edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

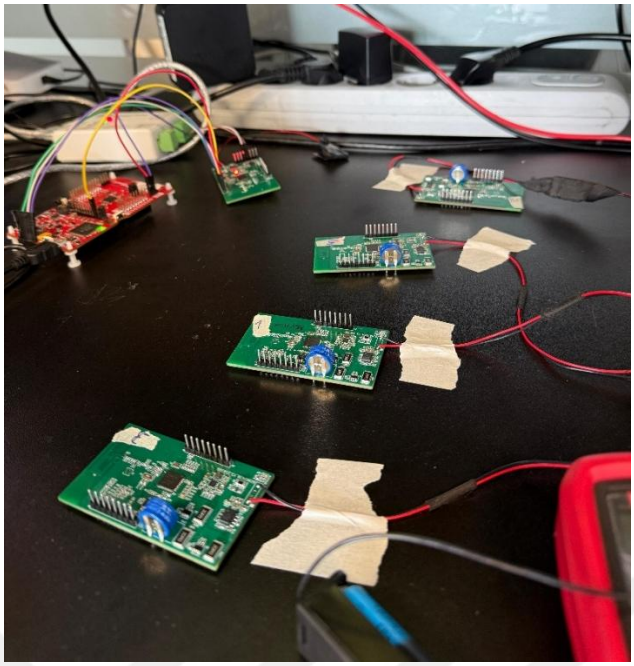
Tasarımı yapılan sistemdeki ana kontrolcü AEC-Q100 (Automotive Electronics Council) kalifikasyonuna sahip olduğu için doğrudan otomotiv uygulamalarında kullanılabilme imkanına sahiptir.



Şekil 4.1: Modül Programlama Görseli

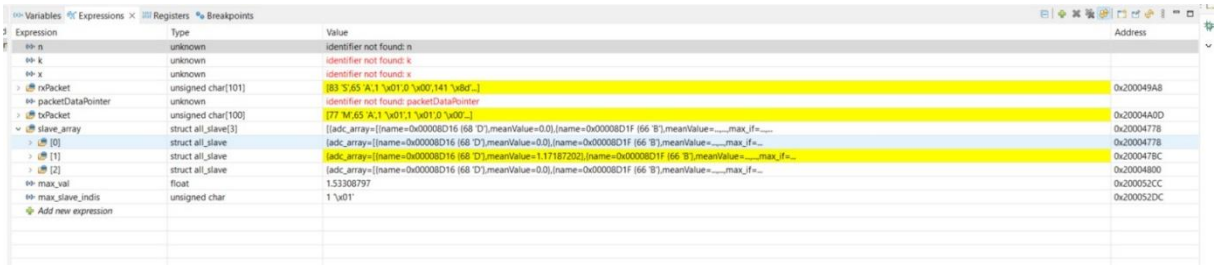
Hem Kontrol Modülü hem de Dengeleyici Modül Texas Instruments firmasının geliştirme kartı üzerinden programlanmıştır. Şekil 4.1 üzerinde programlama aşamasına ait görsel verilmiştir. Kontrol Modülü sistem içeriğinde bir adet olduğu için tek bir yazılıma sahiptir. Fakat Dengeleyici Modül sayısı tasarımı yapılan sisteme göre farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle bu modüllerin adres bilgileri yazılım atma esnasında belirlenmektedir.

Şekil 4.2 üzerinde Kontrol Modülü ile Dengeleyici Modüllerin bir arada yer aldığı test kurulumu gösterilmektedir. Dengeleyici Modüllere farklı gerilimlerde bataryalar bağlanmıştır. Kontrol Modülü ise harici olarak güç kaynağı üzerinden beslenmiştir. Aynı zamanda geliştirme kartı ile arayüze kayıt alma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu bağlantılar dışında modüller arasında harici bir bağlantı bulunmamaktadır.

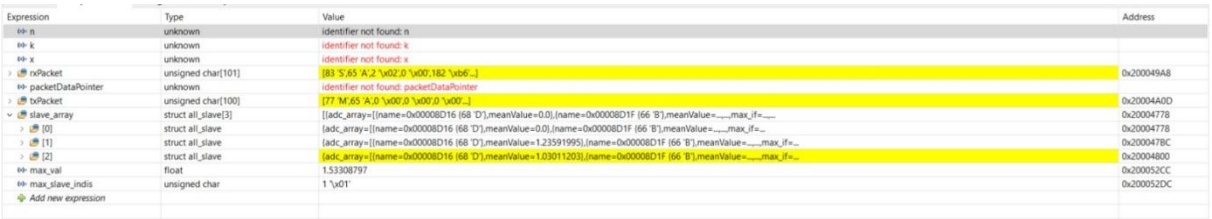


Şekil 4.2: Kontrol Modülü ve Dengeleyici Modül Haberleşme Kurulumu

Dengeleyici Modüllere adres bilgilerinin tanımlandığı yazılımlar ayrı ayrı yüklenmiştir. Ardından tüm modüllere güç verilerek veri aktarım durumları gözlemlenmiştir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 üzerinde Dengeleyici Modül-1 ve Dengeleyici Modül-2'nin Kontrol Modülü arayüzünde yer alan veri paketleri gösterilmiştir.



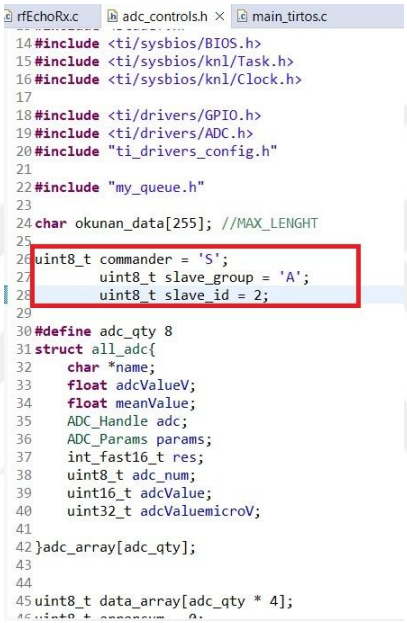
Şekil 4.3: Dengeleyici Modül-1 Veri Akışı Görseli



Şekil 4.4: Dengeleyici Modül-2 Veri Akışı Görseli

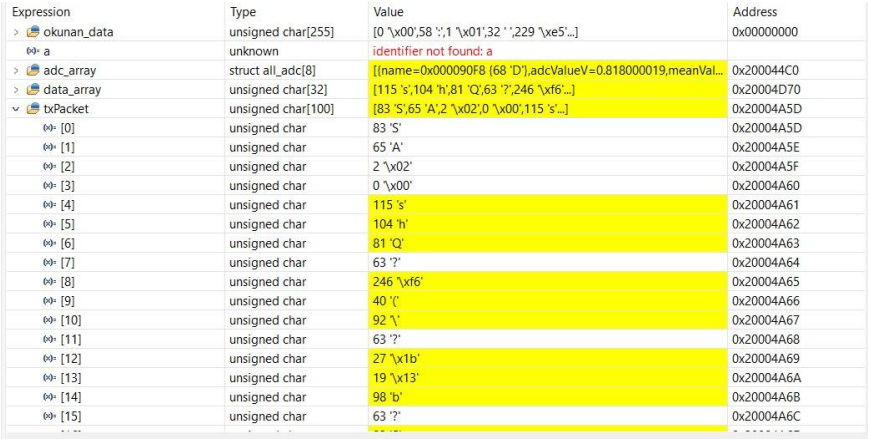
Şekil 4.3 üzerinde Slave_array içeriğindeki 1 nolu dizi Dengeleyici Modül-1 veri akışını, Şekil 4.4 üzerinde Slave_array içeriğindeki 2 nolu dizi ise Dengeleyici Modül-2 veri akışını ifade etmektedir.

Dengeleyici Modüllere adres bilgilerinin girilmesi için gerekli olan yazılım arayüzü Şekil 4.5 üzerinde gösterilmiştir. Kırmızı kutucuk ile işaretli olan alanda, uint8_t commander isimli alana yazılan “S” değeri bu modülün slave yani Dengeleyici Modül olduğunu göstermektedir. Uint8_t slave_group yazılan kısım örgü tipi haberleşme yapısındaki gruplama numarasını ifade etmektedir. Şu anda sistem içeriğinde sadece bir adet grup yer almaktadır. Bu nedenle grup isimleri “A” olarak ifade edilmektedir. Uint8_t slave_id yazılan kısım ise Dengeleyici Modüllerin adreslerini ifade etmektedir. Buradaki 2 değeri bu modülün 2 nolu Dengeleyici Modül olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.5: Dengeleyici Modül Adres Belirleme

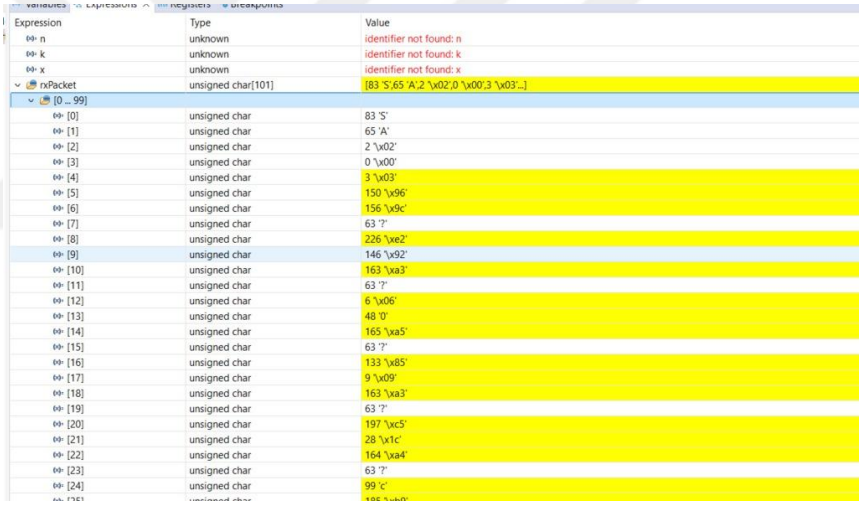
Şekil 4.6 üzerinde Dengeleyici Modül üzerinden Kontrol Modülü’ne gönderilen verilerin içeriği gösterilmektedir. Kontrol Modülü’ne iletilen tüm veriler txPacket içeriğinde yer almaktadır. “0” nolu bayt modülün slave (Dengeleyici Modül) ya da master (Kontrol Modülü) olduğunu ifade etmektedir. “1” nolu bayt modüller arasındaki örgü tipi haberleşme ağının bilgisini vermektedir. Bu proje özelinde tek bir ağ yapısı olduğu için isimlendirme “A” olarak yapılmıştır. “2” nolu bayt Dengeleyici Modül’ün adres bilgisini vermektedir. 2 ifadesi bu modülün 2 nolu Dengeleyici Modül olduğunu göstermektedir. “3” nolu bayt modülün dengeleme yapıp yapmadığı bilgisini ifade etmektedir. Eğer bu veri “1” ise modül dengeleme işlemi gerçekleştirmekte, “0” ise modül dengeleme işlemi gerçekleştirmemektedir. “3” nolu bayt sonrasındaki her 4 baytlık veri seti modül içeriğindeki sensör değerlerini ifade etmektedir.



Expression	Type	Value	Address
okunan_data	unsigned char[255]	[0 '\x00',58 ':',1 '\x01',32 ' ',229 '\xe5'...]	0x00000000
a	unknown	identifier not found: a	
adc_array	struct all_adc[8]	[{name=0x000090F8 {68 'D'},adcValueV=0.818000019,meanVal...	0x200044C0
data_array	unsigned char[32]	[115 's',104 'h',81 'Q',63 '?',246 '\xf6'...]	0x20004D70
txPacket	unsigned char[100]	[83 'S',65 'A',2 '\x02',0 '\x00',115 's'...]	0x20004A5D
[0]	unsigned char	83 'S'	0x20004A5D
[1]	unsigned char	65 'A'	0x20004A5E
[2]	unsigned char	2 '\x02'	0x20004A5F
[3]	unsigned char	0 '\x00'	0x20004A60
[4]	unsigned char	115 's'	0x20004A61
[5]	unsigned char	104 'h'	0x20004A62
[6]	unsigned char	81 'Q'	0x20004A63
[7]	unsigned char	63 '?'	0x20004A64
[8]	unsigned char	246 '\xf6'	0x20004A65
[9]	unsigned char	40 '('	0x20004A66
[10]	unsigned char	92 '\'	0x20004A67
[11]	unsigned char	63 '?'	0x20004A68
[12]	unsigned char	27 '\x1b'	0x20004A69
[13]	unsigned char	19 '\x13'	0x20004A6A
[14]	unsigned char	98 'b'	0x20004A6B
[15]	unsigned char	63 '?'	0x20004A6C

Şekil 4.6: Dengeleyici Modül İletilen Veri Seti

Şekil 4.7 üzerinde Kontrol Modülü'ne gelen verilerin içeriği gösterilmektedir. Dengeleyici Modül içeriğine benzer şekilde rxPacket içeriğindeki veriler Kontrol Modülü'ne gelen verileri ifade etmektedir.



Expression	Type	Value
n	unknown	identifier not found: n
k	unknown	identifier not found: k
x	unknown	identifier not found: x
rxPacket	unsigned char[101]	[83 'S',65 'A',2 '\x02',0 '\x00',3 '\x03'...]
[0 ... 99]		
[0]	unsigned char	83 'S'
[1]	unsigned char	65 'A'
[2]	unsigned char	2 '\x02'
[3]	unsigned char	0 '\x00'
[4]	unsigned char	3 '\x03'
[5]	unsigned char	150 '\x96'
[6]	unsigned char	156 '\x9c'
[7]	unsigned char	63 '?'
[8]	unsigned char	226 '\xe2'
[9]	unsigned char	146 '\x92'
[10]	unsigned char	163 '\xa3'
[11]	unsigned char	63 '?'
[12]	unsigned char	6 '\x06'
[13]	unsigned char	48 '0'
[14]	unsigned char	165 '\xa5'
[15]	unsigned char	63 '?'
[16]	unsigned char	133 '\x85'
[17]	unsigned char	9 '\x09'
[18]	unsigned char	163 '\xa3'
[19]	unsigned char	63 '?'
[20]	unsigned char	197 '\xc5'
[21]	unsigned char	28 '\x1c'
[22]	unsigned char	164 '\xa4'
[23]	unsigned char	63 '?'
[24]	unsigned char	99 'c'

Şekil 4.7: Kontrol Modülü Gelen Veri Seti

"0", "1", "2" ve "3" nolu bayt verilerine bakıldığında; bu verinin "A" grubundaki 2 numaralı Dengeleyici Modül'den geldiği görülmektedir. Aynı zamanda modülün şu anda dengeleme işlemi yapmadığı bilgisine de ulaşılabilmektedir.

Şekil 4.8 üzerinde bayt içeriğinde yer alan verilerin sınıflandırılması gösterilmektedir. İlk 4 bayt modülün adres bilgilerini ifade etmektedir. İkinci 4 bayt devre akım değerini (adc_array[0]), üçüncü 4 bayt batarya sıcaklık verisini (adc_array[1]), dördüncü 4 bayt devre sıcaklık verisini (adc_array[2]), beşinci 4 bayt batarya şişme bilgisini (adc_array[3]), altıncı 4 bayt devre üzeri analog sıcaklık sensörü verisini (adc_array[4]), yedinci 4 bayt batarya akım verisini (adc_array[5]), sekizinci 4 bayt fark alıcı yapısına sahip batarya gerilim verisini

(adc_array[6]), dokuzuncu 4 bayt gerilim bölücü yapısına sahip batarya gerilim verisini (adc_array[7]) ifade etmektedir.

```
#define slave_qty 3
#define adc_qty 8
struct all_slave{
    struct all_adc{
        char *name;
        float meanValue;
    }adc_array[adc_qty];

    bool max_if;
}slave_array[slave_qty];

void readers_start(){
    for(uint8_t i=0; i<slave_qty;i++){
        slave_array[i].adc_array[0].name = "DC";          //DEVRE_AKIM
        slave_array[i].adc_array[1].name = "BT";          //BAT_NTC
        slave_array[i].adc_array[2].name = "DT";          //DEV_NTC
        slave_array[i].adc_array[3].name = "BS";          //BAT_SISME
        slave_array[i].adc_array[4].name = "TO";          //TEMP_OUT
        slave_array[i].adc_array[5].name = "BC";          //BAT_AKIM
        slave_array[i].adc_array[6].name = "BV";          //BAT_GERILIM_1
        slave_array[i].adc_array[7].name = "BV2";          //BAT_GERILIM_2
    }
    for(uint8_t i=0; i<slave_qty;i++){
        for(uint8_t t=0; t<adc_qty;t++){
            slave_array[i].adc_array[t].meanValue = 0.0f;
            slave_array[i].max_if = false;
        }
    }
}

void parameter_reader(uint8_t slv_id){
    for(int t=0; t<adc_qty; t++){
        memcpy(&slave_array[slv_id].adc_array[t].meanValue, &rxPacket[t*4 + 4], 4);
    }
}

void *mainThread_1(void *arg0)
{
    readers_start();
```

Şekil 4.8: Sınıflandırılmış Verilerin Yazılım Arayüzü

Şekil 4.9 üzerinde Dengeleyici Modül üzerindeki sensör verilerinin yazılım arayüzündeki formülleri gösterilmektedir. “DC” isimli dizide devre akımı, “TO” isimli dizide devre üzeri sıcaklık değeri, “BV” isimli dizide fark alıcı opamp üzerinden batarya gerilimi ve “BV2” isimli dizide gerilim bölücü dirençlerden batarya gerilimi hesaplanmaktadır.

```
if(adc_array[i].res == ADC_STATUS_SUCCESS){

    //adcValuemicroV = (adcValue * 3.3 / 4096)*1000;
    adc_array[i].adcValuemicroV = (ADC_convertRawToMicroVolts(adc_array[i].adc, okunan_val));
    adc_array[i].adcValueV = (float)adc_array[i].adcValuemicroV / 1000000.0f;

    if(strcmp(adc_array[i].name,"DC")==0)
    {
        float ina282gain=50.0f; float shunt_res=0.025f;
        float voltage_diff = (adc_array[i].adcValueV * 5.24f) - 1.65f;
        adc_array[i].meanValue = (voltage_diff / (ina282gain*shunt_res))*1000.0f;
    }

    else if(strcmp(adc_array[i].name,"TO")==0)
    {
        adc_array[i].meanValue = (adc_array[i].adcValueV-0.424f) / 0.00625f;
    }

    else if(strcmp(adc_array[i].name,"BV")==0)
    {
        adc_array[i].meanValue = adc_array[i].adcValueV*1.3605442176f;
    }  //1.3605f = 2 / 1.47  'den geliyor. || 4.7/10 + 1 =  1.47


    else if(strcmp(adc_array[i].name,"BV2")==0)
    {
        adc_array[i].meanValue = (adc_array[i].adcValueV)*2.0f;
    }
    else{}
```

Şekil 4.9: Dengeleyici Modül Sensör Verileri Hesaplama

Şekil 4.10 üzerinde Dengeleyici Modül üzerindeki sensör verilerinin yazılım arayüzündeki formülleri gösterilmektedir. “DC” isimli dizide devre akımı, “TO” isimli dizide

devre üzeri sıcaklık değeri, “BV” isimli dizide fark alıcı opamp üzerinden batarya gerilimi ve “BV2” isimli dizide gerilim bölücü dirençlerden batarya gerilimi hesaplanmaktadır.

```
if(adc_array[i].res == ADC_STATUS_SUCCESS){

    //adcValuemicroV = (adcValue * 3.3 / 4096)*1000;
    adc_array[i].adcValuemicroV = (ADC_convertRawToMicroVolts(adc_array[i].adc, okunan_val));
    adc_array[i].adcValueV = (float)adc_array[i].adcValuemicroV / 1000000.0f;

    if(strcmp(adc_array[i].name,"DC")==0)
    {
        float ina282gain=50.0f; float shunt_res=0.025f;
        float voltage_diff = (adc_array[i].adcValueV * 5.24f) - 1.65f;
        adc_array[i].meanValue = (voltage_diff / (ina282gain*shunt_res))*1000.0f;
    }

    else if(strcmp(adc_array[i].name,"TO")==0)
    {
        adc_array[i].meanValue = (adc_array[i].adcValueV-0.424f) / 0.00625f;
    }

    else if(strcmp(adc_array[i].name,"BV")==0)
    {
        adc_array[i].meanValue = adc_array[i].adcValueV*4.1272f;
    } //->  1.01 / 32400 * 13     4700/470000 + 1 = 1,01

    else if(strcmp(adc_array[i].name,"BV2")==0)
    {
        adc_array[i].meanValue = (adc_array[i].adcValueV)*5.7f;
    }    //-> 570K / 100K = 5.7

    else{}
```

Şekil 4.10: Kontrol Modülü Sensör Verileri Hesaplama

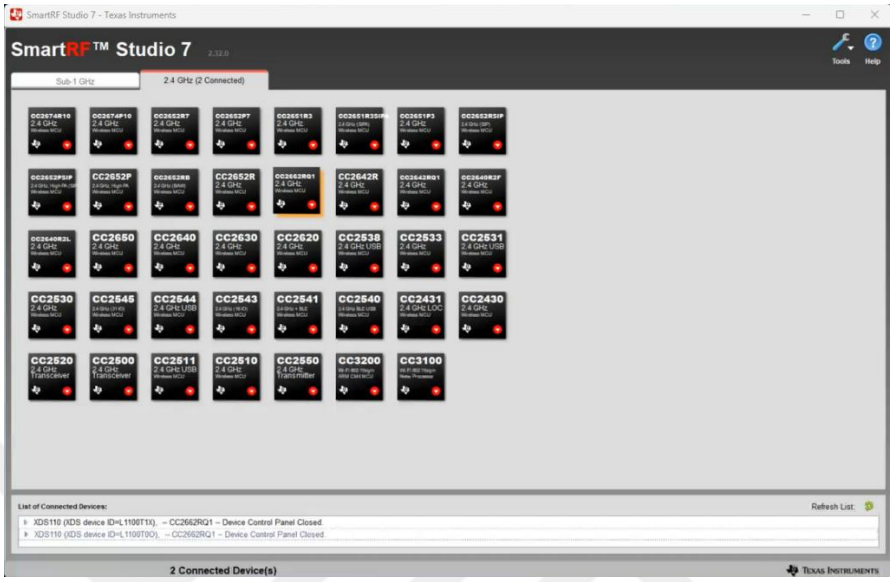
4.1. GELİŞTİRME KARTI TESTLERİ

Proje içeriğindeki kablosuz mikrodenetleyicinin kablosuz veri aktarım testleri, Texas Instruments firmasına ait geliştirme kartı ile yapılmıştır. Yazılım arayüzü olarak da Code Composer Studio kullanılmıştır. Şekil 4.11 üzerinde geliştirme kartının görseli verilmiştir.



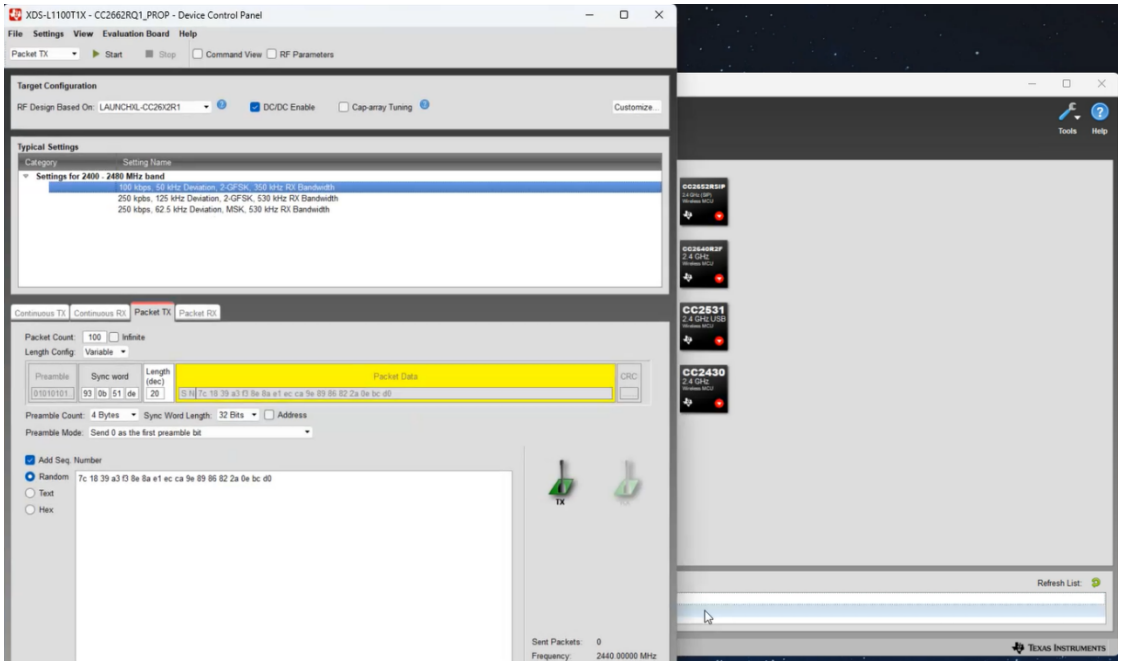
Şekil 4.11: Texas Instruments CC2662 Serisi Mikrodenetleyici Geliştirme Kartı Görseli

Geliştirme kartı üzerinde ilk olarak kablosuz veri aktarım süreçleri test edilmiştir. Bu test esnasında Texas Instruments firmasına ait Smart RF Studio programı kullanılmıştır. Şekil 4.12 üzerinde geliştirme kartları için kullanılan kablosuz haberleşme arayüzü gösterilmektedir.



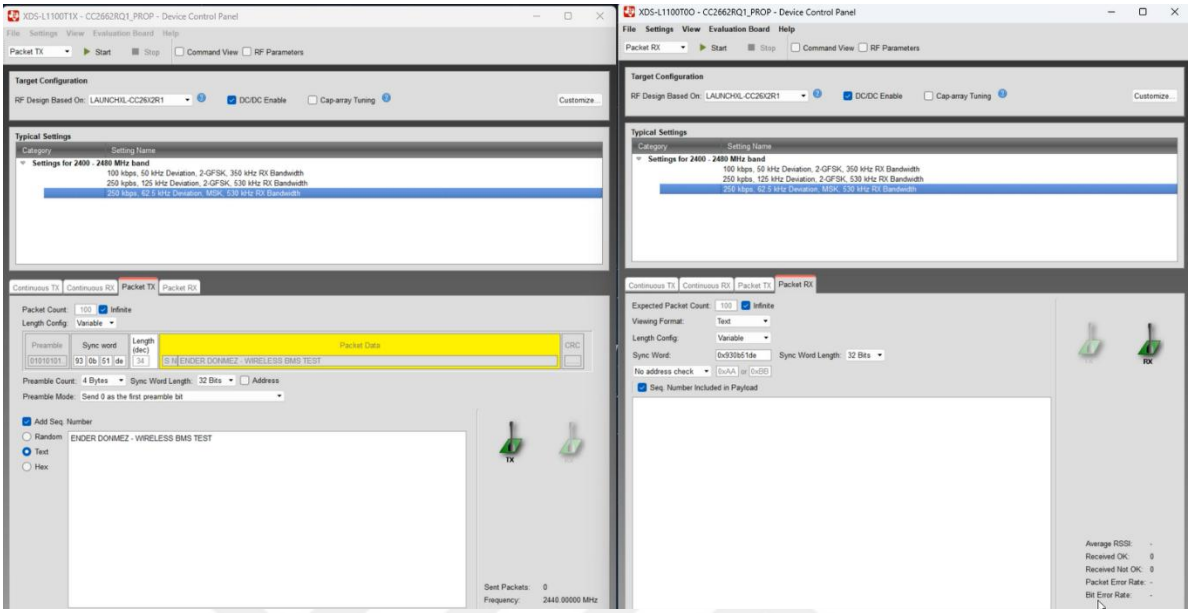
Şekil 4.12: SmartRF Studio 7 Kullanıcı Arayüzü Görseli

Şekil 4.12 üzerinde görüldüğü gibi bilgisayarın 2 farklı portuna 2 ayrı geliştirme kartı bağlanmıştır. Alttaki bağlı olan cihazlara ayrı ayrı tıklanarak geliştirme kartlarının kablosuz arayüzlerine geçiş sağlanmıştır. Şekil 4.13 üzerinde ayar arayüzü gösterilmiştir.



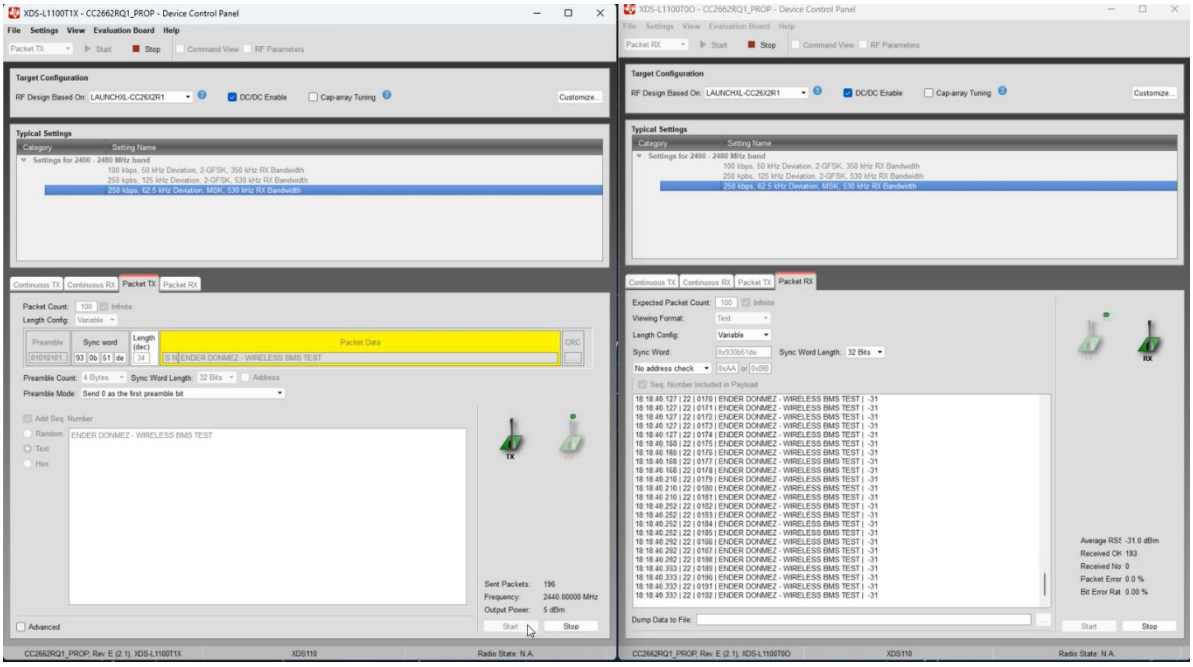
Şekil 4.13: Kablosuz Haberleşme Ayar Arayüzü

Ayar arayüzleri üzerinden geliştirme kartlarından birisi TX, diğeri ise RX olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayar ekranındaki değişiklikler Şekil 4.14 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Ayar Ekranı Değişiklikleri Görseli

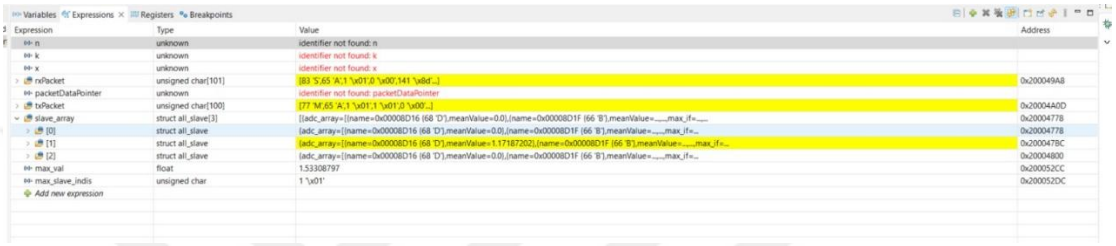
TX olarak ayarlanan geliştirme kartına gönderilmesi gereken veri text olarak girilmiştir. RX ekranında ise alıcı mesaj formatı yine text olarak ayarlanmıştır. Her iki ayar ekranında sağ altta bulunan start butonuna bastıktan sonra iki cihazın kablosuz olarak veri aktarımına başladığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.15 üzerinde veri aktarımı gösterilmiştir.



Şekil 4.15: Kablosuz Veri Aktarım Ekranı

Bu ayar ekranları yardımı ile geliştirme kartları üzerinde kablosuz olarak Dengeleyici Modül ve Kontrol Modülü yazılım geliştirmeleri yapılmıştır.

Yazılım geliştirme testleri aşamasında geliştirme kartlarından biri Dengeleyici Modül-2 (Slave-2) diğeri ise Kontrol Modülü (Master) olarak ayarlanmıştır. Kontrol Modülü her veri talep ettiğinde, Dengeleyici Modül-2 karşılık olarak istenen parametreleri kablosuz haberleşme ile iletmiştir. Şekil 4.16 üzerinde Kontrol Modülü yazılım arayüzüne Dengeleyici Modül-2'den gelen veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.16: Kontrol Modülü Yazılım Arayüzünde Dengeleyici Modül-2 Verileri

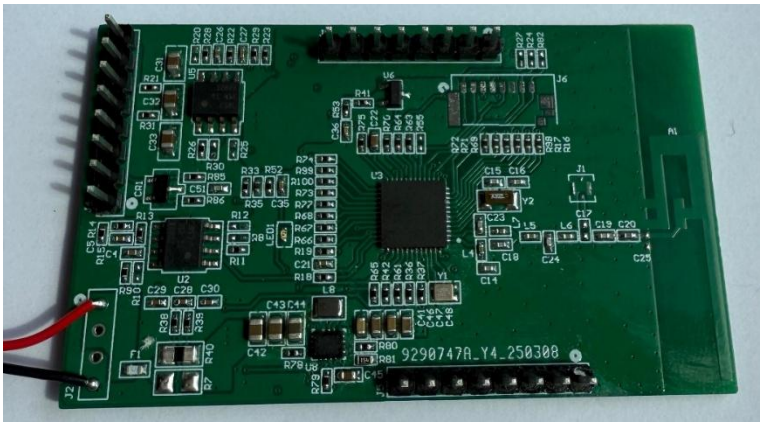
Slave_array paketi içerisinde 3 adet Dengeleyici Modül tanımlanmıştır. 1 nolu paket içerisindeki veriler Dengeleyici Modül-2'den gelen verileri ifade etmektedir. Fakat geliştirme kartı üzerinde tasarımı yapılan donanım yapıları bulunmadığı için rastgele veriler gösterilmiştir. Benzer şekilde Dengeleyici Modül isimlendirmeleri değiştirilerek kablosuz haberleşme yazılım testleri ilerletilmiştir.

4.2. KONTROL VE DENGELEYİCİ MODÜL TESTLERİ

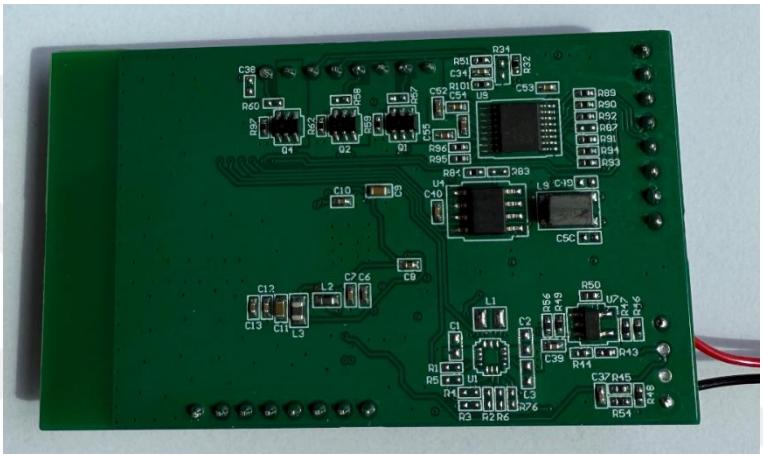
Geliştirme kartları üzerinde sadece proje içeriğindeki yazılımsal fonksiyonların testleri yapılmıştır. Dolayısıyla donanım yapılarının testleri için Kontrol Modülü ve Dengeleyici Modül üzerinde harici testler yapılmıştır. Yapılan testler ile tasarım aşamasında oluşturulan matematiksel ifadeler karşılaştırılmıştır.

Hem Kontrol Modülü'ne hem de Dengeleyici Modül'e yazılım yüklemeden önce güç testleri yapılmıştır. Yapılan güç testlerinde tüm donanım yapılarının uygun referans gerilim ile çalıştığı doğrulanmıştır. Ardından her modül için farklılık gösteren donanım yapıları üzerinden multimetre ile ölçümler yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir.

Şekil 4.17 üzerinde Kontrol Modülü'nün üst görünümü, Şekil 4.18 üzerinde Kontrol Modülü'nün alt görünümü, Şekil 4.19 üzerinde Dengeleyici Modül'ün üst görünümü ve Şekil 4.20 üzerinde Dengeleyici Modül'ün alt görünümü gösterilmiştir.



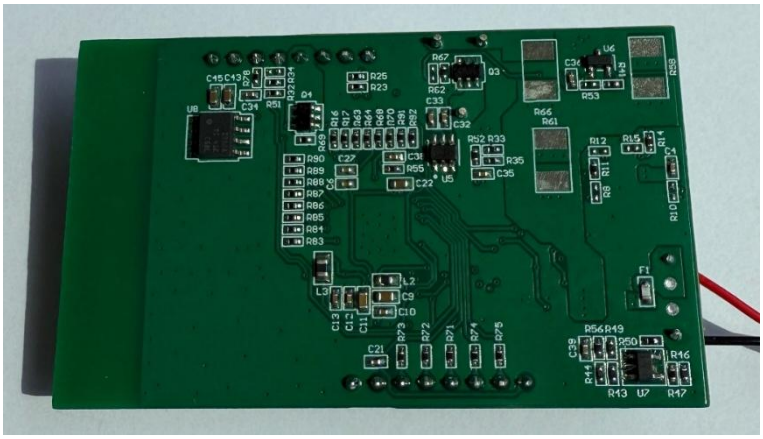
Şekil 4.17: Kontrol Modülü Üst Görünümü



Şekil 4.18: Kontrol Modülü Alt Görünüm



Şekil 4.19: Dengeleyici Modül Üst Görünümü



Şekil 4.20: Dengeleyici Modül Alt Görünüm

4.2.1. Kontrol Modülü Testleri

Kontrol Modülü geniş bir besleme gerilim aralığına sahiptir. Fakat proje içeriğinde gerilim seviyesi 12V olarak kullanılmıştır. Bu gerilim seviyesi özelinde donanım yapıları yazılım olmadan test edilmiştir.

Denklem 3.10 ve Denklem 3.11 eşitlikleri ile Kontrol Modülü'nün devre akım değeri hesaplanmıştır. Multimetre yardımı ile devrenin mikrodenetleyiciye giden portundan 0.319V gerilim ölçülmüştür. Bu değer Denklem 3.11 üzerinde yerine koyulduğunda, Vout gerilimi 1.671V olarak elde edilmektedir. Vout gerilimi ise Denklem 3.10 üzerinde yerine koyulduğunda, devre akım değeri 42mA olarak elde edilmektedir.

Kontrol Modülü 12V gerilim değeri ile beslenmiş olsa da devre üzerindeki diğer tüm entegreler 3.3V gerilim değeri ile beslenmektedir. Bu nedenle devre üzerinde regülatör çıkışı kontrol edilmiştir. Kontrol sonrası gerilim regülatör çıkışının 3.34V olduğu görülmüştür.

Giriş gerilim değerinin ölçülmesi amacıyla modül üzerinde hem gerilim bölücü hem de opamp fark alıcı yapıları kullanılmaktadır. Denklem 3.1 üzerindeki formülasyon ile gerilim bölücü yapısından ölçümler alınmıştır. Ölçüm sonucunda 2.08V gerilim değeri gözlemlenmiştir. Denklem 3.3 üzerindeki formülasyon ile opamp fark alıcı yapısından ölçümler alınmıştır. Ölçüm sonucunda 2.99V gerilim değeri gözlemlenmiştir.

Devre üzerinde yer alan analog sıcaklık sensörü, Denklem 3.5 ile gösterilen formülasyon metoduyla çıktı üretmektedir. Test esnasında sıcaklık sensörü çıkışında ölçülen gerilim değeri 0.585V olarak gözlemlenmiştir.

Şönt direnç üzerinden harici akım ölçümü için kullanılan donanım yapısı çıkışında 0.314V gerilim değeri gözlemlenmiştir. Bu değer 1.65V olan 0A akım değerini ifade etmektedir.

Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 üzerinde belirtilen formülasyonlar ile devre üzerindeki NTC sıcaklık sensörü hesaplanmaktadır. Multimetre ile yapılan ölçümlerde bu değerin 1.586V olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 4.1 üzerinde tasarım sonrası üretimi tamamlanmış devrelerden multimetre ile ölçülen veriler gösterilmektedir. Ölçümler mikrodenetleyici programlanmadan yapılmıştır.

Tablo 4.1: Kontrol Modülü Test Sonuçları

Özellik	**Multimetre ile Ölçüm Sonuçları**	**Açıklama**
12V Güç Girişi	12.01V	0.01V değerinde sapma gözlemlenmiştir.
3.3V Entegre Gerilimi	3.34V	0.04V değerinde regülatör sapması gözlemlenmiştir.
Devre Giriş Akımı	0.319V	Bu gerilim değeri devrenin 42mA akım çektiğini ifade etmektedir.
Devre Giriş Gerilim Okuması (Gerilim Bölücü ile)	2.089V	Hesaplamalarda 2.1V olması gerekmektedir. Bu nedenle 0.011V gerilim hatası tespit edilmiştir.
Devre Üzeri Analog Sıcaklık Sensörü	0.585V	Bu gerilim değeri devre üzeri sıcaklığın 25.7 ℃ olduğunu ifade etmektedir.
Devre Giriş Gerilim Okuması (Opamp Fark Alıcı ile)	2.99V	Hesaplamalarda 2.97V olması gerekmektedir. Bu nedenle 0.02V gerilim hatası tespit edilmiştir.
Harici Akım Ölçme	0.314V	Bu değer 0A akım değerine karşılık gelmektedir. Bu blok devre üzerinde akım kaynağına bağlı değildir.
Devre Üzeri NTC Sıcaklık Sensörü	1.586V	Bu gerilim değeri NTC sıcaklık sensörü ile ölçülen sıcaklığın 26 ℃ olduğunu göstermektedir. Diğer sensör ile 0.3 ℃ sapma gözlemlenmiştir.

4.2.2. Dengeleyici Modül Testleri

Dengeleyici Modüller, her seri batarya paketi üzerinde birer adet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu nedenle 3V ile 4.2V aralığında sabit olmayan bir giriş gerilim aralığına sahiptir. Devre üzerindeki testler yazılım olmadan yapılmıştır.

Denklem 3.10 ve Denklem 3.11 eşitlikleri ile Dengeleyici Modül'ün devre akım değeri hesaplanmıştır. Multimetre yardımı ile devrenin mikrodenetleyiciye giden portundan 0.324V gerilim ölçülmüştür. Bu değer Denklem 3.11 üzerinde yerine koyulduğunda, Vout gerilimi 1.697V olarak elde edilmektedir. Vout gerilimi ise Denklem 3.10 üzerinde yerine koyulduğunda, devre akım değeri 37.6mA olarak elde edilmektedir.

Dengeleyici Modül 3 farklı gerilim değeri (3V, 3.7V ve 4.2V) ile beslenmiş olsa da devre üzerindeki diğer tüm entegreler sabit 3.3V gerilim değeri ile beslenmektedir. Bu nedenle devre üzerinde regülatör çıkışı kontrol edilmiştir. Kontrol sonrası gerilim regülatörü çıkışının ortalama 3.35V olduğu görülmüştür.

Giriş gerilim değerinin ölçülmesi amacıyla modül üzerinde hem gerilim bölücü hem de opamp fark alıcı yapıları kullanılmaktadır. Denklem 3.1 üzerindeki formülasyon ile gerilim bölücü yapısından ölçümler alınmıştır. Ölçüm sonucunda 1.494V, 1.841V ve 2.09V gerilim değerleri gözlemlenmiştir. Denklem 3.3 üzerindeki formülasyon ile opamp fark alıcı yapısından ölçümler alınmıştır. Ölçüm sonucunda 2.212V, 2.725V ve 3.093V gerilim değerleri gözlemlenmiştir.

Devre üzerinde yer alan analog sıcaklık sensörü, Denklem 3.5 ile gösterilen formülasyon metoduyla çıktı üretmektedir. Test esnasında sıcaklık sensörü çıkışında ölçülen gerilim değeri yaklaşık 0.59V olarak gözlemlenmiştir.

Tüm süreç boyunca batarya üzerinde gerinim ölçer bulunmaktadır. Şarj ve deşarj döngüleri sonrasında eğer bataryada şişme meydana geldi ise bu değer değişmekte ve kullanıcıya batarya durumuyla ilgili bilgi verilmektedir.

Tablo 4.2 üzerinde tasarım sonrası üretimi tamamlanmış devrelerden multimetre ile ölçülen veriler gösterilmektedir. Ölçümler mikrodenetleyici programlanmadan yapılmıştır.

Tablo 4.2: Dengeleyici Modül Test Sonuçları

Özellik	Multimetre ile Ölçüm Sonuçları	Açıklama
Devre Giriş Gerilimi	3.011V (3V İken) 3.711V (3.7V İken) 4.213V (4.2V İken)	3 farklı batarya gerilim seviyesi için devre üzerinden ölçümler alınmıştır. Batarya gerilimi için güç kaynağı kullanılmıştır.
Devre Giriş Akımı	0.324V (3V, 3.7V ve 4.2V İken)	Devre akım değeri tüm batarya gerilim seviyeleri için 37.6mA olarak ölçülmüştür.
3.3V Entegre Gerilimi	3.343V (3V İken) 3.35V (3.7V İken) 3.357V (4.2V İken)	Maksimum batarya gerilim değerinde 0.057V regülatör gerilim sapması gözlemlenmiştir.
Devre Giriş Gerilim Okuması (Gerilim Bölücü ile)	1.494V (3V İken) 1.841V (3.7V İken) 2.09V (4.2V İken)	Hesaplamalar sonucunda değerlerin sırasıyla 1.5V, 1.85V ve 2.1V olması gerekmekteydi. Ölçüm sonucunda sırasıyla 0.006V, 0.009V ve 0.01V gerilim hataları gözlemlenmiştir.
Devre Giriş Gerilim Okuması (Opamp Fark Alıcı ile)	2.212V (3V İken) 2.725V (3.7V İken) 3.093V (4.2V İken)	Hesaplamalar sonucunda değerlerin sırasıyla 2.205V, 2.719V ve 3.087V olması gerekmekteydi.
Devre Üzeri Analog Sıcaklık Sensörü	0.584V (3V İken) 0.59V (3.7V İken) 0.59V (4.2V İken)	Bu gerilim değeri devre üzeri sıcaklığın 26.5 ℃ olduğunu ifade etmektedir.
Devre Üzeri NTC Sıcaklık Sensörü	1.584V (3V İken) 1.586V (3.7V İken) 1.589V (4.2V İken)	Bu gerilim değeri NTC sıcaklık sensörü ile ölçülen sıcaklığın 26 ℃ olduğunu göstermektedir.
Batarya Üzeri NTC Sıcaklık Sensörü	1.628V (3V İken) 1.63V (3.7V İken) 1.632V (4.2V İken)	Bu gerilim değeri batarya üzerindeki NTC sıcaklık sensörü ile ölçülen sıcaklığın 25.1 ℃ olduğunu göstermektedir.
Batarya Gerinim Ölçer Değeri	0.958V (3V, 3.7V ve 4.2V İken)	Tüm gerilim seviyeleri için aynı gerilim çıktısı ölçülmüştür.

Dengeleyici Modül testleri için toplam 3 farklı devre kullanılmıştır. Tüm devrelerde yaklaşık olarak aynı sonuçlar elde edilmiştir.

4.3. KABLOSUZ HABERLEŞME MENZİL TESTLERİ

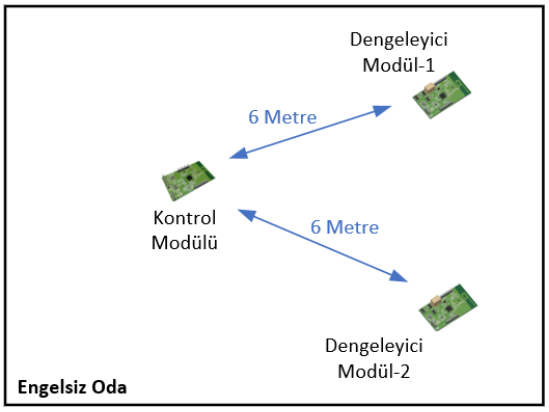
Kontrol Modülü ve Dengeleyici Modüller üzerinde yer alan Texas Instruments firmasına ait CC2662R kodlu kablosuz mikrodenetleyici 2.4 GHz radyo frekansına sahiptir. Bu mikrodenetleyici serisi düşük güç tüketimi ve düşük veri gecikmesi istenen uygulamalar için özel olarak geliştirilmiştir. Birçok farklı çevre birimlerini desteklediği için de geniş bir kullanım alanına yayılmıştır. Sistem tasarım aşamasında modüllerin üzerine hem PCB anten hem de kablo tipi anten arayüzü eklenmiştir. Fakat batarya sistemi içerisinde uzun menzil isteri olmadığı için PCB anten opsiyonu tercih edilmiştir.

Modüller üzerindeki mikrodenetleyici standart çıkış gücü referans alınarak kullanılmıştır. Bu çıkış gücü değeri 0 dBm'dir. Daha uzun menzil isterleri olan uygulamalar için mikrodenetleyici radyo frekans çıkı gücü 5 dBm'e kadar ayarlanabilmektedir.

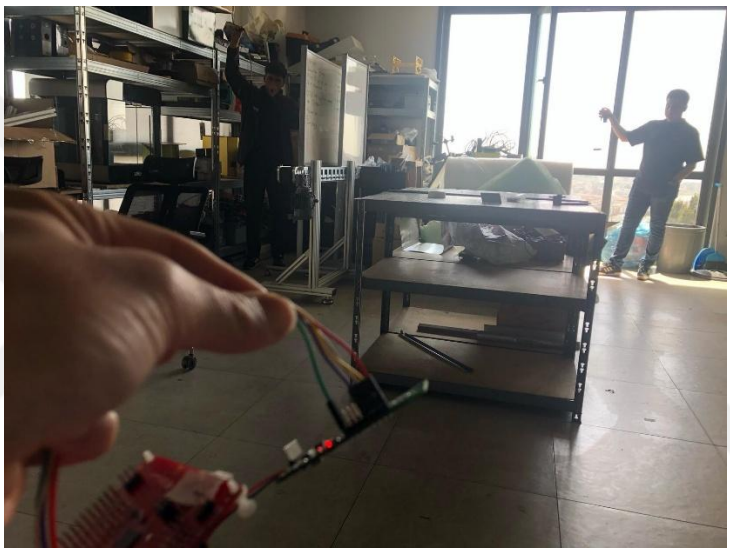
Kontrol Modülü belirli periyotlarda Dengeleyici Modüllerden veri talep etmektedir. Bu veri talebi karşılığında, sistem içerisinde yer alan tüm Dengeleyici Modüller, bağlı oldukları batarya gruplarındaki sensör bilgilerini iletmektedir. Bu algoritma kapsamında modüller arasında 2 farklı menzil testi yapılmıştır. Testlerden ilki engelsiz odada, ikincisi ise cam bölmeli odada gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Engelsiz Oda Menzil Testi

Kontrol Modülü ile Dengeleyici Modüller arasına herhangi bir engel konulmamıştır. Bu sayede tüm modüller birbirlerini doğrudan görebilmektedir. Bu test, en uzun menzilin saptandığı testtir. Şekil 4.21 üzerinde test ortamının mimarisi gösterilmektedir. Şekil 4.22 üzerinde ise test ortamına ait görsel verilmiştir.



Şekil 4.21: Engelsiz Oda Test Ortamı Mimarisi

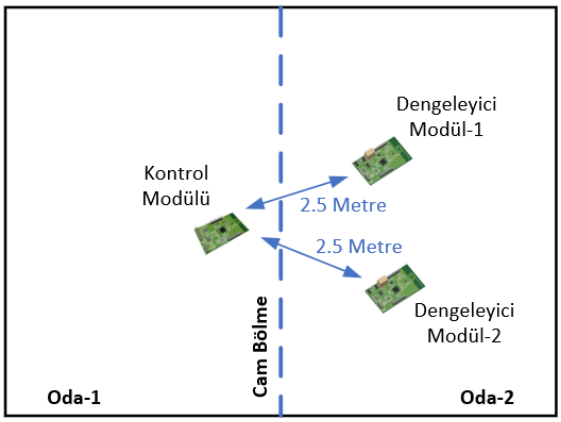


Şekil 4.22: Engelsiz Oda Test Ortamı Görseli

Engelsiz oda içerisinde yapılan testlerde, Kontrol Modülü ile Dengeleyici Modüller arasındaki en uzun haberleşme mesafesi yaklaşık 6 metre olarak ölçülmüştür.

4.3.2. Cam Bölmeli Oda Menzil Testi

Kontrol Modülü ile Dengeleyici Modüller, aynı ofis içerisinde cam bölme ile ayrılmış iki farklı odaya yerleştirilmiştir. Cam bölme haricinde modüller arasında herhangi bir engel bulunmamaktadır. Şekil 4.23 üzerinde cam bölmeli test ortamı mimarisi gösterilmektedir.

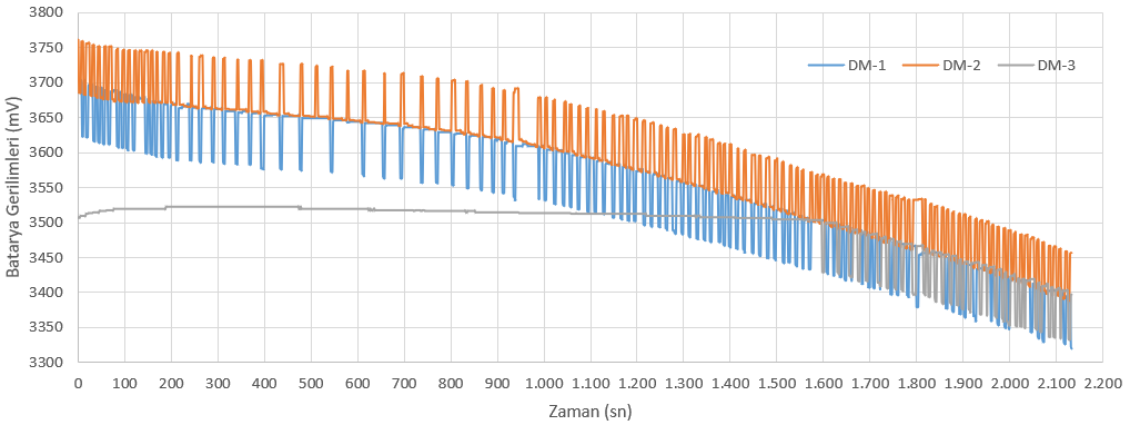


Şekil 4.23: Cam Bölmeli Oda Test Ortamı Mimarisi

Cam bölmeli oda içerisinde yapılan testlerde, Kontrol Modülü ile Dengeleyici Modüller arasındaki en uzun haberleşme mesafesi yaklaşık 2,5 metre olarak ölçülmüştür.

4.4. 3 ADET LİTYUM BATARYA İLE DENGELEME TESTİ

Dengeleyici Modül ve Kontrol Modülü üzerindeki yazılım geliştirmeleri tamamlandıktan sonra Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi'nin fonksiyonlarının testlerine başlanmıştır. Bu testler kapsamında ilk olarak 3 adet Dengeleyici Modül ve 1 adet Kontrol Modülü ile gerilim dengeleme testi yapılmıştır. Bu dengeleme testleri esnasında kullanılan lityum bataryalar 1500 mAh kapasiteye sahiptir. Dengeleme aşamasında hem yavaş hem de hızlı deşarj akım blokları aktif edilmiştir. Bu nedenle toplam dengeleme akımı 3.7V için yaklaşık olarak 370 mA'dir. Şekil 4.24 üzerindeki grafikte elde edilen test sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.24: 3 Adet Lityum Batarya ile Dengeleme Testi Grafiği

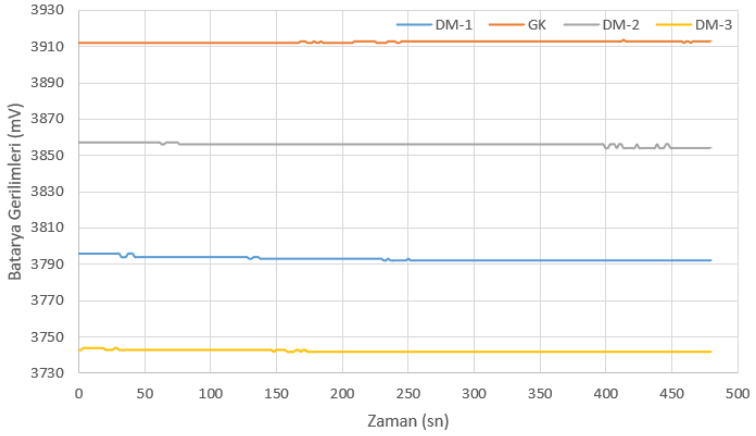
Batarya gerilimleri Dengeleyici Modüller üzerinden okunmaktadır. Okunan gerilim değerleri kablosuz olarak Kontrol Modülü'ne iletilmektedir. Kontrol Modülü tarafından değerlendirilen bu gerilim değerlerinden en büyük ve en küçük batarya gerilimi saptanmaktadır.

Sonrasında en büyük gerilim değerine sahip olan Dengeleyici Modül'e dengeleme komutu gönderilmekte ve deşarj işlemi başlatılmaktadır.

Grafik üzerinde DM-1 isimli değerler Dengeleyici Modül-1'e bağlı olan lityum bataryayı, DM-2 isimli değerler Dengeleyici Modül-2'ye bağlı olan lityum bataryayı ve DM-3 isimli değerler ise Dengeleyici Modül-3'e bağlı olan lityum bataryayı ifade etmektedir. Başlangıç anında DM-3 isimli modülün gerilim değeri en düşük olduğu için uzun bir süre dengeleme işlemi gerçekleştirmemiştir. İlk dengeleme işlemine başlayan modül gerilim değeri en yüksek olan DM-2'dir. Grafik üzerinde dengeleme işlemine başlayan modülden yaklaşık olarak 370 mA akım çekildiği için gerilim seviyelerinde değişimler gözlemlenmektedir. Batarya kapasitelerinin yüksek olması gerilim dengesizliklerinin daha az olmasına olanak sağlamaktadır. Yaklaşık olarak 1600 saniye boyunca DM-3 üzerinde dengeleme işlemi gerçekleşmemiştir. Fakat bu zaman diliminden sonra her 3 modül üzerinde de dengeleme işlemleri gözlemlenmiş ve ortak bir gerilim üzerinden dengeleme süreçleri devam etmiştir.

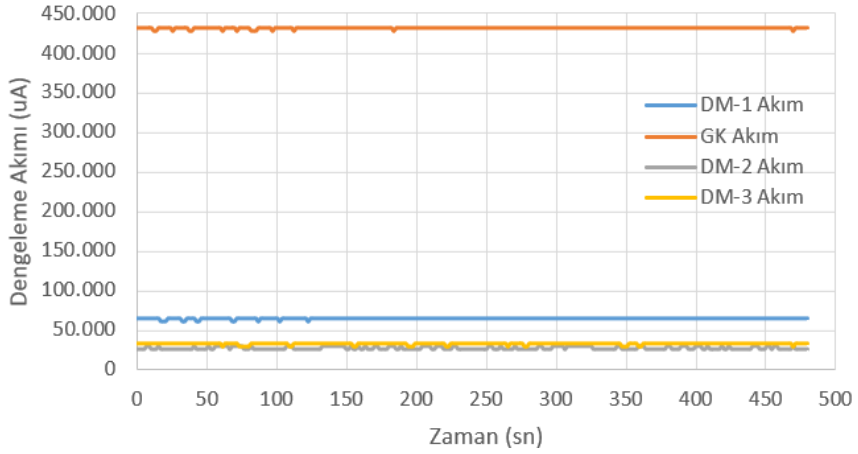
4.5. 3 ADET LİTYUM BATARYA VE 1 ADET GÜÇ KAYNAĞI İLE DENGELEME TESTİ

Lityum bataryalara ek olarak dengeleme algoritmasının testleri için sisteme 1 adet güç kaynağı eklenmiştir. Bu testteki asıl amaç, gerilimi en yüksek olan batarya veya güç kaynağı üzerinden dengeleme yapıldığını kontrol etmektir. Bir diğer gözlemlenecek olan veri ise dengeleme akım değerleridir. Hangi modülden ne kadar akım çekildiği bilgisi de bu test kapsamında değerlendirilmiştir. Testlerde kullanılan lityum bataryaların kapasitesi 1500 mAh'dir. Dengeleme akımı ise 3.9V için 390 mA'dir. Şekil 4.25 üzerinde 3 adet lityum batarya ve 1 adet güç kaynağı gerilim seviyeleri grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.25: 3 Adet Lityum Batarya ve 1 Adet Güç Kaynağı Gerilim Seviyeleri Grafiği

Grafik üzerinde DM-1 isimli değerler Dengeleyici Modül-1'e bağlı olan lityum bataryayı, DM-2 isimli değerler Dengeleyici Modül-2'ye bağlı olan lityum bataryayı, DM-3 isimli değerler Dengeleyici Modül-3'e bağlı olan lityum bataryayı ve GK isimli değerler güç kaynağı gerilim seviyesini ifade etmektedir. Grafik üzerinden de anlaşılacağı üzere, en yüksek gerilim değeri güç kaynağındadır. Dengeleme algoritması en yüksek gerilimli bataryayı algılayıp düşük gerilimli bataryaya deşarj etmesi prensibi üzerine tasarlandığı için tüm dengeleme işlemi güç kaynağı üzerinde işletilmiştir. Diğer batarya gerilimlerinde değişiklik olmaması bu modüllerde dengeleme işlemi yapılmadığını ifade etmektedir. Şekil 4.26 üzerinde modüller üzerindeki akım değerleri gösterilmektedir.

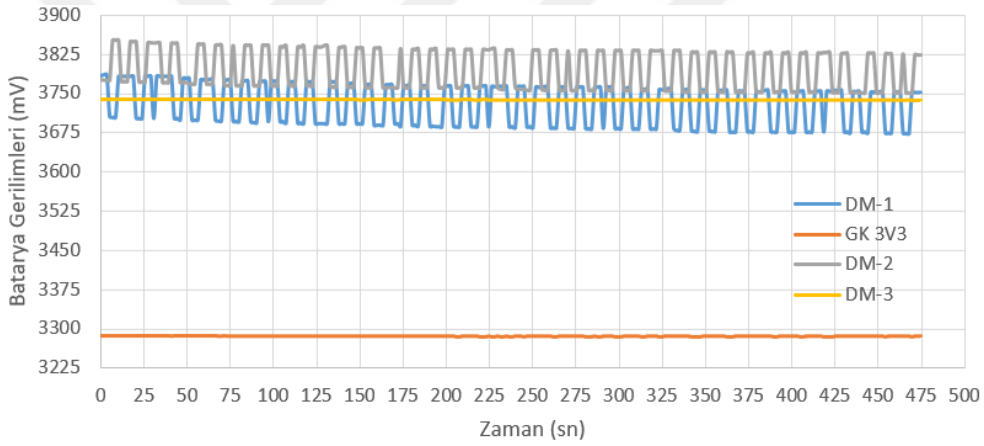


Şekil 4.26: Lityum Batarya ve Güç Kaynağı Akım Değerleri Grafiği

Grafik üzerinde DM-1 Akım isimli değerler Dengeleyici Modül-1'in çektiği akımı, DM-2 Akım isimli değerler Dengeleyici Modül-2'nin çektiği akımı, DM-3 Akım isimli değerler Dengeleyici Modül-3'ün çektiği akımı ve GK Akım isimli değerler ise güç kaynağının çektiği akımı ifade etmektedir. Gerilim değeri en yüksek olan modülde dengeleme işlemi gerçekleştiği için sadece güç kaynağının bağlı olduğu modül üzerinde yüksek akım değerleri gözlemlenmiştir. Güç kaynağından sürekli olarak yaklaşık 440 mA akım çekilmiştir. Bu değer içerisinde hem dengeleme akımı hem de modülün çektiği akım yer almaktadır. Dengeleme akımı 390 mA olduğu için geriye kalan 50 mA akım değeri modülün kendi çektiği akım değerini ifade etmektedir. Güç kaynağı yüksek akım değerlerini sağlayabildiği için dengeleme anında gerilim değerlerinde herhangi bir düşme gözlemlenmemiştir.

4.6. 3 ADET LİTYUM BATARYA VE 1 ADET GÜÇ KAYNAĞI İLE DENGELEME TESTİ-2

Başlık 5.3 adlı kısımda güç kaynağı gerilim değeri en yüksek gerilim olarak ayarlanmıştı. Bu testte güç kaynağı gerilimi en düşük gerilim seçilerek dengeleme yapmaması istenmiştir. Bu durumda diğer modüllere bağlı olan batarya gerilimlerine göre dengeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. En yüksek batarya gerilim değeri 3.8V olduğu için dengeleme akımı 380 mA'dir. Testte kullanılan batarya kapasiteleri 1500 mA'dir. Şekil 4.27 üzerinde 3 adet lityum batarya ve 1 adet güç kaynağı ile yapılan testin verileri gösterilmektedir. Grafik üzerinde DM-1 isimli değerler Dengeleyici Modül-1'e bağlı olan lityum bataryayı, DM-2 isimli değerler Dengeleyici Modül-2'ye bağlı olan lityum bataryayı, DM-3 isimli değerler Dengeleyici Modül-3'e bağlı olan lityum bataryayı ve GK isimli değerler güç kaynağı gerilim seviyesini ifade etmektedir.

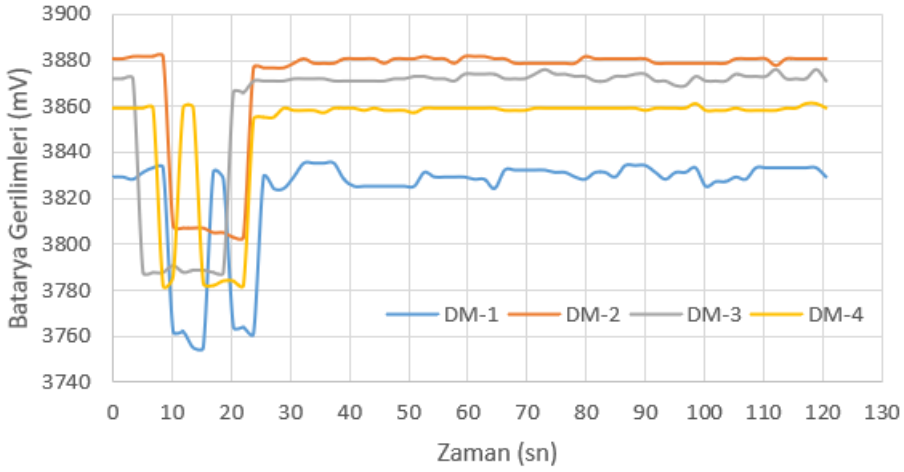


Şekil 4.27: 3 Adet Lityum Batarya ve 1 Adet Güç Kaynağı Gerilim Seviyeleri Grafiği-2

Testte güç kaynağı gerilimi 3.3V'a ayarlanmıştır. Bu nedenle test boyuna güç kaynağı üzerinde dengeleme işlemi gerçekleşmemiştir. Çünkü en düşük gerilime sahip modül güç kaynağıdır. Sistem üzerinde en düşük 2. gerilime sahip batarya Dengeleyici Modül-3'tedir. Bu nedenle test boyunca bu modülde de dengeleme işlemi gerçekleşmemiştir. İlk anda en yüksek gerilime sahip batarya Dengeleyici Modül-1 olduğu için bu modül dengeleme işlemine başlamıştır. Daha sonra Dengeleyici Modül-2 ile aralarında çok yakın gerilim değerleri gözlemlendiği için birlikte dengeleme işlemine devam etmişlerdir. Bu test sonucunda da yine sistemin dengeleme algoritması doğrulanmıştır.

4.7. YÜKSEK SICAKLIK İLE DENGELEME DURDURMA TESTİ

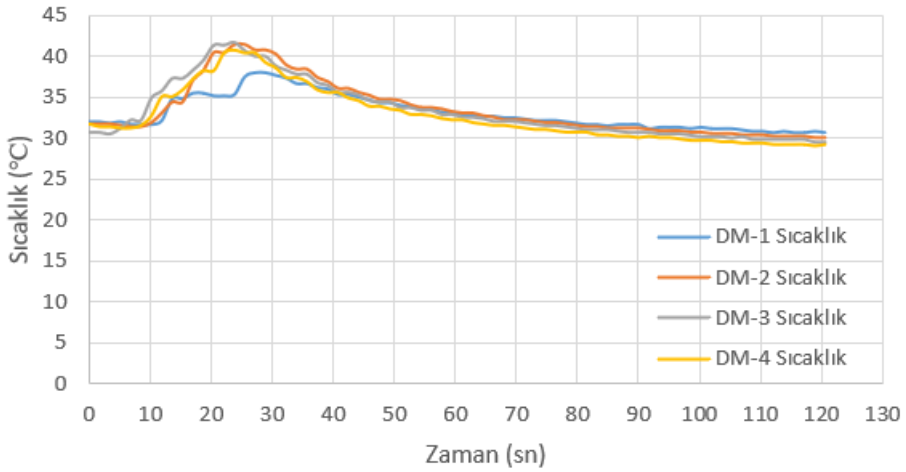
Bu testte yüksek sıcaklık sonucunda dengeleme işlemlerinin askıya alındığı algoritma test edilmiştir. Sisteme toplam 4 adet Dengeleyici Modül bağlanmıştır. Bu modüllerden herhangi birindeki batarya sıcaklığı 40 °C'ye çıktığında tüm dengeleme işlemleri askıya alınmaktadır. Algoritma gereği batarya sıcaklığı tekrar bu sıcaklık değeri altına indiğinde dengeleme devam etmektedir. Fakat genel algoritmada herhangi bir sorun olup olmadığını tespit edebilmek amacıyla tek sefer için algılama yapılmış ve dengeleme askıya alınmıştır. Testte kullanılan bataryalar 1500 mAh kapasiteye sahiptir. Dengeleme akımı ise 380 mA'dir. Şekil 4.28 üzerinde Dengeleyici Modüllere bağlı 4 adet lityum bataryanın gerilim seviyesi grafiği gösterilmektedir. Grafik üzerinde DM-1 isimli değerler Dengeleyici Modül-1'e bağlı olan lityum bataryayı, DM-2 isimli değerler Dengeleyici Modül-2'ye bağlı olan lityum bataryayı, DM-3 isimli değerler Dengeleyici Modül-3'e bağlı olan lityum bataryayı ve DM-4 isimli değerler Dengeleyici Modül-4'e bağlı olan lityum bataryayı ifade etmektedir.



Şekil 4.28: 4 Adet Lityum Bataryanın Gerilim Seviyeleri Grafiği

Test ilk başladığında en yüksek gerilim seviyesi Dengeleyici Modül-2'dedir. Bu nedenle ilk dengeleme işlemi bu modülden başlamıştır. Ardından yüksek dengeleme akımı nedeniyle Dengeleme Modül-2 üzerindeki bataryada gerilim düşümü olmuş ve diğer modüldeki batarya gerilimleri bu düşüş anındaki değerden yukarıda kalmıştır. Bu nedenle bir sonraki zaman diliminde diğer modüller üzerindeki bataryalarda dengeleme sürecine dahil olmuştur. İlk 20 sn'lik periyoda bakıldığında tüm modüllerin dengeleme sürecine dahil olduğu görülmektedir. 20. saniye sonrasında batarya sıcaklık değerleri 40 °C'nin üzerine çıktığı için dengeleme süreçleri askıya alınmıştır. Bu nedenle kalan test zamanı diliminde harici dengeleme işlemi

yapılmamıştır. Şekil 4.29 üzerinde Dengeleyici Modüllerde yer alan lityum bataryaların sıcaklık değerleri verilmiştir.



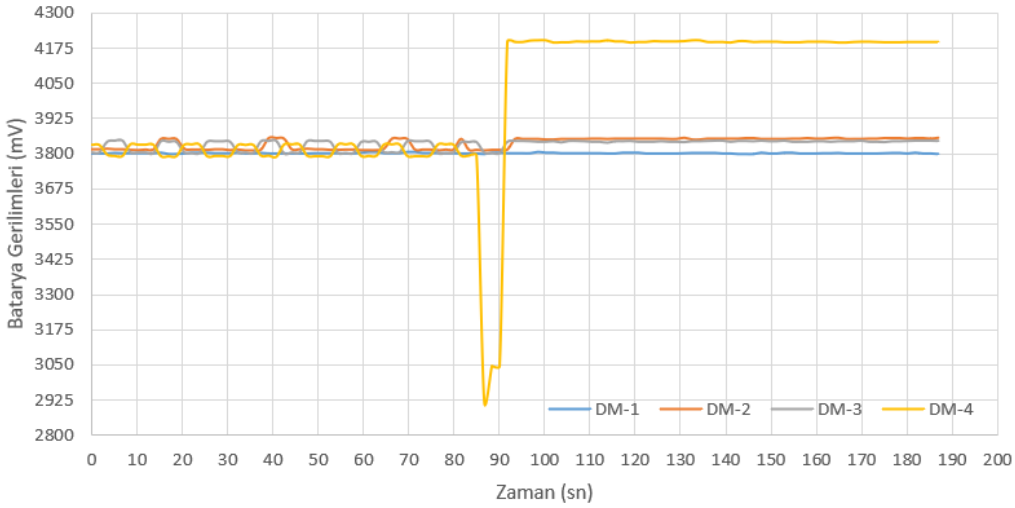
Şekil 4.29: 4 Adet Lityum Bataryanın Sıcaklık Değerleri Grafiği

Grafik üzerinde DM-1 Sıcaklık isimli değerler Dengeleyici Modül-1'e bağlı olan lityum batarya sıcaklığını, DM-2 Sıcaklık isimli değerler Dengeleyici Modül-2'ye bağlı olan lityum batarya sıcaklığını, DM-3 Sıcaklık isimli değerler Dengeleyici Modül-3'e bağlı olan lityum batarya sıcaklığını ve DM-4 Sıcaklık isimli değerler Dengeleyici Modül-4'e bağlı olan lityum batarya sıcaklığını ifade etmektedir. Şekil 4.29 üzerinde görüleceği üzere başlangıç anında sıcaklık değerleri 30-33 ℃ aralığındadır. Test başladığı anda modüller arasında dengeleme işlemi başladığı için sıcaklık değerleri yükselmeye başlamıştır. 20 saniye sonunda ise sıcaklık değerleri 40 ℃ üzerine çıkmış ve dengeleme işlemi askıya alınmıştır. Sonrasında dengeleme olmadığı için sıcaklık değerleri azalmaya başlamış ve test sonuna kadar azalarak başlangıç sıcaklık değerlerine dönülmüştür.

4.8. GERİLİM DENGESİZLİĞİ İLE DENGELEME DURDURMA TESTİ

Sistem tasarımı gereği modüller arasındaki gerilim dengesizliği belirli bir seviyeyi geçtiğinde dengeleme işleminin durması gerekmektedir. Bu nedenle bu test içeriğinde sistem çalışması devam ederken gerilim seviyeleri değiştirilmiş ve dengeleme durumları gözlemlenmiştir. Testlerde kullanılan bataryaların kapasitesi 3300 mAh'tir. Dengeleme akımı ise yaklaşık olarak 200 mA olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.30 üzerinde 4 adet Dengeleyici Modül'e bağlı batarya gerilim değerleri gösterilmiştir. Grafik üzerinde DM-1 isimli değerler Dengeleyici Modül-1'e bağlı olan lityum bataryayı, DM-2 isimli değerler Dengeleyici Modül-2'ye bağlı olan lityum bataryayı, DM-3 isimli değerler Dengeleyici Modül-3'e bağlı olan lityum

bataryayı ve DM-4 isimli değerler Dengeleyici Modül-4'e bağlı olan lityum bataryayı ifade etmektedir.

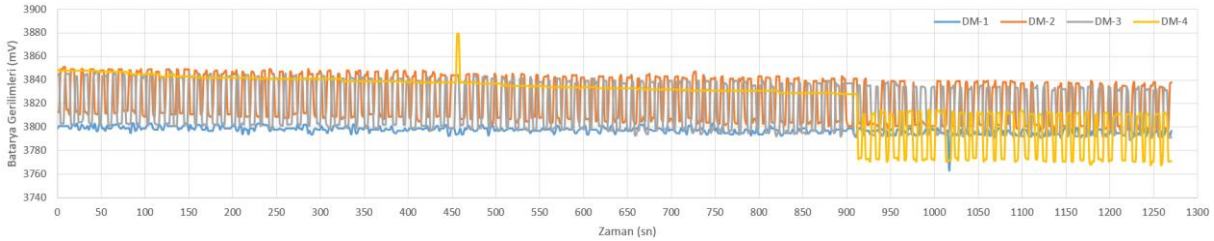


Şekil 4.30: 4 Adet Lityum Bataryanın Gerilim Dengesizliği Test Grafiği

Test başlandığında bataryalar arasındaki gerilim farklarına göre dengeleme işlemi de başlamıştır. 85 saniye boyunca gerilim farklarına göre farklı Dengeleyici Modüller üzerinde dengeleme süreçleri ilerlemiştir. Bu süre sonunda Dengeleyici Modül-4'e bağlı olan lityum batarya tam dolu batarya ile değiştirilmiştir. Değişim sonrasında modüllere bağlı olan bataryaların gerilim dengesizliği seviyesi 100 mV'u geçtiği için dengeleme işlemi askıya alınmıştır. Askıya alınma işlemi sonrasında test boyunca dengeleme işlemi gerçekleştirilmemiştir. Gerçekleştirilen test işlemi ile sistem tasarımı aşamasında kullanılan algoritma doğrulanmıştır.

4.9. LİTYUM BATARYALAR İLE DENGELEME TESTİ

Önceki yapılan testlerde 1500 mAh kapasiteye sahip lityum bataryalar kullanılmıştır. Bu testte 3300 mAh kapasiteye sahip lityum bataryalar kullanılmıştır. Dengeleme algoritması bir önceki testlerdeki ile aynıdır. Lityum bataryaların kapasitesi ve dengeleme akım değeri bu testte değişiklik göstermiştir. Dengeleme akım değeri yaklaşık olarak 190 mA'dir. Şekil 4.31 üzerinde modüller üzerindeki lityum bataryaların gerilim değerleri gösterilmektedir.

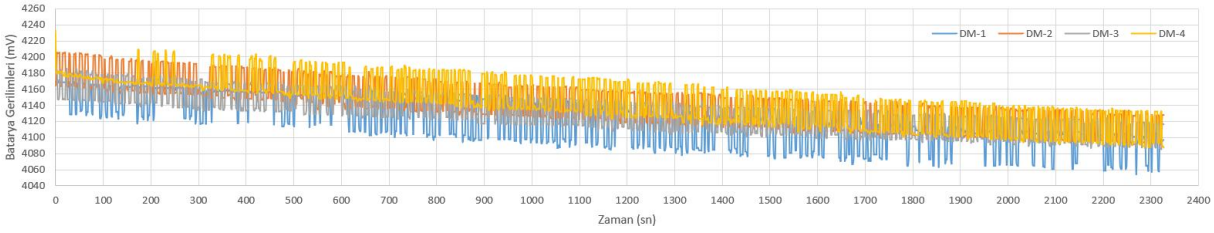


Şekil 4.31: Yüksek Kapasiteli Lityum Bataryalar ile Dengeleme Testi

Grafik üzerinde DM-1 isimli değerler Dengeleyici Modül-1'e bağlı olan lityum bataryayı, DM-2 isimli değerler Dengeleyici Modül-2'ye bağlı olan lityum bataryayı, DM-3 isimli değerler Dengeleyici Modül-3'e bağlı olan lityum bataryayı ve DM-4 isimli değerler Dengeleyici Modül-4'e bağlı olan lityum bataryayı ifade etmektedir. Test başladığı anda en düşük gerilime sahip batarya Dengeleyici Modül-1' e ait olduğu için test boyunca bu modülde dengeleme işlemi gerçekleştirilmemiştir. Dengeleme işlemi ilk olarak Dengeleyici Modül-2 ve Dengeleyici Modül-3 üzerinde gerçekleşmiştir. Testin sonlarına doğru gerilim değerlerinde benzerlikler görüldüğü için Dengeleyici Modül-4'te dengeleme sürecine dahil olmuştur. Test anında 450. saniyede Dengeleyici Modül-4 üzerinde anlık olarak yüksek gerilim okunmuştur fakat herhangi bir sorun görülmemiştir. Dengeleme algoritması sağlıklı bir şekilde çalışmıştır. Gerilim farkı 10 mV altına inmediği için dengeleme süreçleri durmamıştır. Yine benzer şekilde batarya sıcaklık değerleri 40 °C ve üzerine çıkmadığı için dengeleme işlemleri durmamıştır. 1300 saniye boyunca veri aktarımı kablosuz olarak kesintisiz şekilde devam etmiştir.

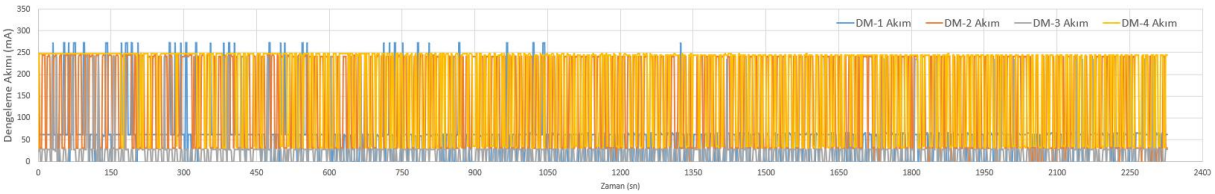
4.10. LİTYUM BATARYALAR İLE DENGELEME TESTİ-2

Başlık 5.7 içeriğindeki teste benzer şekilde fakat bu kez lityum bataryalar dolu haldeyken bir test daha yapılmıştır. Burada da lityum batarya kapasitesi 3300 mAh'tir. Dengeleme akımı 190 mA olarak ayarlanmıştır. 2300 saniye boyunca tüm modüllerden elde edilen veriler kayıt altına alınmış ve sistem tasarım aşamasında kurgulanan algoritmaların çalışması test edilmiştir. Şekil 4.32 üzerinde 4 adet lityum bataryanın test boyunca kayıt altına alınan gerilim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.32: Yüksek Kapasiteli Lityum Bataryalar ile Dengeleme Testi-2

Grafik üzerinde DM-1 isimli değerler Dengeleyici Modül-1'e bağlı olan lityum bataryayı, DM-2 isimli değerler Dengeleyici Modül-2'ye bağlı olan lityum bataryayı, DM-3 isimli değerler Dengeleyici Modül-3'e bağlı olan lityum bataryayı ve DM-4 isimli değerler Dengeleyici Modül-4'e bağlı olan lityum bataryayı ifade etmektedir. Başlangıç anında en yüksek gerilime sahip olan batarya Dengeleyici Modül-4'e bağlı olduğu için dengeleme işlemi bu modül üzerinde başlamıştır. Hemen ardından modüllerin gerilim değerleri benzer aralıklarda olduğu için diğer modüller de dengeleme işlemine dahil olmuştur. Yaklaşık olarak 2300 sn boyunca tüm modüllerin birlikte hareket ettiği gerilim dengeleme süreci işletilmiştir. Şekil 4.33 üzerinde Dengeleyici Modüller üzerindeki dengeleme akım değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.33: Dengeleyici Modüllerin Dengeleme Akımı Grafiği

Grafik üzerinde DM-1 Akım isimli değerler Dengeleyici Modül-1'in çektiği akımı, DM-2 Akım isimli değerler Dengeleyici Modül-2'nin çektiği akımı, DM-3 Akım isimli değerler Dengeleyici Modül-3'ün çektiği akımı ve DM-4 isimli değerler Dengeleyici Modül-4'ün çektiği akımı ifade etmektedir. Burada belirtilen dengeleme akım değerlerine modüllerin kendi harcamış oldukları akımlar da dahildir.

5. TARTIŞMA

Taşınabilir sistemlerdeki enerji ihtiyaçlarının artması ile birlikte yüksek enerjili bataryaların kullanımı da artış göstermiştir. Bu durum hem batarya kullanım miktarının artmasına hem de daha yüksek enerjili batarya araştırma süreçlerine yönelmeye sebep olmuştur. Günümüzde geliştirilmiş olan batarya türleri incelendiğinde, enerji yoğunlukları en yüksek olan bataryaların lityum tabanlı bataryalar olduğu görülmektedir. Enerji yoğunluğu anlamında her ne kadar büyük bir avantaj sağlamış gibi görünse de lityum tabanlı bataryaların elektrik gücü ile beslenen sistemlerde doğrudan kullanımı mümkün değildir. Çünkü lityum bataryaların belirlenmiş bir çalışma gerilim aralığı ve çalışma sıcaklığı bulunmaktadır. Belirlenen bu çalışma koşullarında kullanılmayan lityum bataryalar, kapasite kaybına, daha düşük kullanım ömrüne, parlama veya şişmeye maruz kalabilmektedir.

Shell ve diğ. [3] çalışmalarında, Oklahoma Üniversitesi Sooner Electric Racing (SER) ekibinin yarış için tasarlamış olduğu elektrikli go-kart aracındaki güvenilirlik sorununa çözüm üretmek amacıyla, modüler değişimli bir batarya paketi tasarımı ve Bluetooth tabanlı bir kablosuz Batarya Yönetim Sistemi mimarisi sunmuştur. Çalışmanın odak noktası kablolu sistemlerdeki veri kesilmesinin önüne geçmektir. Bataryalardan alınan veriler Bluetooth modülü aracılığıyla sistemin değerlendirici birimine aktarılmıştır. Bu sayede hem üretim/onarım anlamında avantaj sağlanmış hem de batarya paketi ağırlığında düşüş gözlemlenmiştir.

Bansal ve Nagaraj [4] çalışmalarında, geleneksel batarya yönetim sistemlerinde kullanılan izole-SPI ve izole-CAN gibi kablolu tip haberleşme mimarilerinin dezavantajlarından yola çıkarak farklı kablosuz protokoller üzerine çözümler sunmuştur. Kablosuz olarak uygulanabilecek birçok farklı protokol özelinde karşılaştırma yapılarak en ideal sistem belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda, Wi-Fi tabanlı sistemlerin maliyet anlamında dezavantajlı olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışma, en ideal kablosuz sistemin ZigBee veya Bluetooth tabanlı protokoller olduğunu ifade etmektedir. Bu çalışma içeriğinde belirtilen bilgiler ışığında, tez projesinin gerçek test sonuçlarına dayanarak Tablo 5.1ile belirtilen çıkarımlar yapılmıştır.

Tablo 5.1: Kablosuz Protokollerin Karşılaştırılması

Özellik	ZigBee	BLE 5.0	Wi-Fi	NFC	CC2662-Q1
Maliyet	Düşük	Düşük	Orta-Yüksek	Çok Düşük	Düşük
Menzil	~10-100 m	~10-240 m	~50-100 m	~4-10 cm	~6m (0dBm/ Gerçek Test)
Enerji Verimliliği	Çok İyi	Mükemmel	Zayıf	Mükemmel	Çok İyi

Gherman ve diğ. [5] çalışmalarında, kablosuz batarya yönetim sistemini, pil şarj cihazıyla aynı işlemci üzerinde birleştirerek paralel çalışabilirliği kanıtlamaktadır. Bataryalara bağlı olan kablosuz Batarya Yönetim Sistemi, Wi-Fi protokolü üzerinden pil şarj cihazına veri aktarmaktadır. Bu aktarılan veriler FPGA üzerinde değerlendirilmekte ve sistemin sürekliliği sağlanmaktadır.

Özellikle elektrikli araçlarda, menzil ve batarya sağlığı durumlarını tahmin etmek büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, Huang ve diğ. [6] çalışmalarında kablosuz Batarya Yönetim Sistemi kullanarak, batarya seri gruplarındaki şarj durumuna (SOC) ve sağlık durumuna (SOH) dayanan denge algoritmaları öne sürmüştür. Farklı batarya gruplarındaki değerleri kablosuz batarya dengeleme sistemi ile kontrol ederek, iki adımlı hücre dengeleme algoritması üzerine önerilerde bulunmaktadır.

Kablosuz sistemler dışarıdan bir müdahaleye karşı güvenli olmak zorundadır. Bu kapsamda, Faika ve diğ. [7] çalışmalarında, IoT özellikli bir kablosuz Batarya Yönetim Sistemi'nin kötü niyetli siber saldırılara karşı, kablosuz sistemin iletişimini ve veri güvenliğini sağlamak için bir blockchain teknolojisi üzerine çalışmıştır. Çalışmanın asıl amacı, olabilecek bir siber saldırı altında batarya paketindeki pilleri kontrol eden elektronik blokların ele geçirilmesine karşı güvenli bir ortam yaratmaktır.

Lityum bataryalarda yaşanan gerilim dengesizliğini en aza indirmek ve güvenli kullanımı sağlamak amacıyla Batarya Yönetim Sistemleri'nde aktif veya pasif hücre dengeleme metodu kullanılmaktadır. Pasif dengeleme metodu direnç üzerinden fazla enerjinin harcanması prensibine dayanırken, Aktif dengeleme metodu yüksek enerjiyi dönüştürerek batarya paketine geri kazandırma prensibine dayanmaktadır. Bu bağlamda teknik yapıları değerlendirildiğinde pasif dengeleme ucuz ve basit bir çözüm sunarken, aktif dengeleme daha pahalı ve karmaşık

bir çözüm sunmaktadır. Maliyet ve sistem entegrasyon kolaylığı değerlendirildiğinde çoğu Batarya Yönetim Sistemi pasif dengeleme metodu kullanmaktadır. Gerilim dengesizliğini en aza indirerek pasif dengeleme aşamasında dirençler üzerinde daha az enerji harcamayı ön gören birçok batarya sistemi, üretim anında kimyasal yapıları neredeyse birbirine benzer batarya hücrelerini kullanmaktadır. Bu durum şarj ve deşarj esnasında gerilim dengesizliğinin minimumda tutulmasını sağlamaktadır. Bu proje kapsamında da pasif hücre dengelemesi tercih edilmiştir.

Batarya Yönetim Sistemleri, batarya hücre dengelemesine ek olarak birçok farklı fonksiyona daha sahiptir. Batarya paketinin çevresel şartlarını ve elektriksel özellikleri kontrol etmek için sensörlere, uzun ömürlü ve güvenli kullanım için de yazılım algoritmalarına sahiptir. Tüm bu süreçlerin sağlıklı bir şekilde sürdürülebilmesi amacıyla batarya paketleri içerisinde birçok analog ve dijital sensör kullanılmaktadır. Geleneksel Batarya Yönetim Sistemleri'ndeki bu sensörler genellikle kablolu yapıya sahiptir. Bu nedenle karmaşık yapılı batarya paketlerinde hem maliyet hem ağırlık hem de kablo karışıklığı anlamında dezavantaj oluşturmaktadır. Bu dezavantajların önüne geçebilmek amacıyla alternatif Batarya Yönetim Sistem mimarileri üzerine çalışılmaktadır. Günümüzde yapılan birçok çalışma Batarya Yönetim Sistemleri'nin kablosuz olması üzerine kurgulanmaktadır. Standart olarak kullanılan kablosuz ağların yanı sıra sektörde büyük pazara sahip üreticiler doğrudan farklı protokole sahip kablosuz ürünler de geliştirmektedir. Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi çalışmaları için Texas Instruments ve Analog Devices firmalarının özel geliştirmeleri bulunmaktadır. Bu projede de düşük güç tüketimi ve düşük veri gecikmesine sahip Texas Instruments firması tarafından piyasaya sürülen CC2662-Q1 SimpleLink kablosuz mikrodenetleyici kullanılmıştır.

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya sistemleri gerek sensör ekipmanları gerekse güvenlik ekipmanları kaynaklı oldukça karmaşıktır. Yüksek gerilim seviyelerinin vermiş olduğu ara kablo bağlantıları sistemi daha da karmaşık hale getirebilmektedir. Literatür çalışmalarında sunulan raporlarda batarya sistemlerinde kullanılan kablo ve konnektör oranı %10'lara kadar çıkabilmektedir. Bu bağlantı ekipmanlarının fazla kullanımı hem ağırlığın artmasına hem de sistemlerde arıza çıkma ihtimaline sebep olmaktadır. Ayrıca üretim, entegrasyon ve onarım süreçlerinde de bu ara bağlantı elemanları yüksek iş gücü oluşturmaktadır. Bu hususlar doğrultusunda yapılan çalışmalarda ara bağlantı elemanlarının azaltılması ele alınmıştır. Bazı çalışmalar mevcut kullanılan kablosuz sistemler ile tasarımlar yaparken bazı çalışmalar yeni piyasaya sürülen kablosuz batarya yönetim sistemi ekipmanları

ile çalışmalarını ilerletmiştir. Kablosuz sistemler yenilikçi bakış anlamında çok uygun gibi görünse de bazı güvenlik çelişkileri kaynaklı doğrudan seri üretime yansımamıştır. Yapılan birçok literatür çalışması kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri'ndeki güvenlik açıklarının giderilmesine yönelik konuları ele almaktadır. Fakat kapalı bir metal kutu tasarımına sahip batarya sistemlerinin doğrudan bir güvenlik açığı oluşturmayacağı da birçok çalışmada belirtilmiştir. Bu proje kapsamında yapılan çalışmada kablosuz ağ güvenliği başlangıç olarak ele alınmamıştır.

Güvenli ve uzun kullanım ömrü için batarya sistemindeki veriler büyük öneme sahiptir. Bu verilerde oluşabilecek yanlış bir değer ya da kesinti sistemin algoritmalarının düzgün işleyememesine neden olabilmektedir. Sadece kesinti ya da yanlış veri değil, gecikmeli veriler de sağlıklı çalışmaya engel olabilmektedir. Bu nedenle modüller arasındaki veri akışını sağlayan haberleşme kanalları kesintisiz ve sağlıklı olmalıdır. Kablo karmaşıklığını azaltmak için çoğu batarya sistemi papatya zinciri haberleşme ağı metodunu kullanmaktadır. Bu metotta veriler ardışık olarak batarya sistemindeki tüm modüller üzerinden geçerek ilerlemektedir. Bu durum herhangi bir modülde yaşanacak problem nedeniyle haberleşme hattında kesintiye neden olmaktadır. Sonucunda da sadece bir modül kaynaklı tüm modüllerin veri akışı kesilmektedir. Bazı batarya sistemleri bu haberleşme kanallarını çift yedekli olarak da kullanabilmektedir. Her ne kadar bu durum haberleşme yedekliliğine çözüm üretmiş gibi görünse de bir batarya yönetim sistemi birden fazla seri batarya hücresini kontrol ettiği için burada oluşacak bir arıza diğer seri batarya hücrelerinin de veri akışına engel olmaktadır. Bu durumda da her seri batarya grubunun harici olarak değerlendirilmesi büyük fayda sağlamaktadır. Fakat çok yüksek adetli seri bağlantı mimarisinde maliyeti artışı olacağı için enerji yoğunluğu yüksek batarya hücrelerinde her seri modülde değerlendirme yapısı daha uygun olmaktadır.

Yüksek gerilim ve karmaşık sistemlere sahip yapılarda en önemli konulardan birisi de izolasyondur. Batarya sisteminin sahip olduğu yüksek gerilim ve akım değerleri insan yaşam alanlarından uzak tutulmalıdır. Olası bir problem de ise sistemlerde güvenlik önlemleri yer almalıdır. Buna ek olarak onlarca seri bataryanın da birbirleriyle olan bağlantıların izole olması gerekmektedir. Aksi durumda herhangi bir modülde meydana gelen kısa devre diğer modülleri de devre dışında bırakabilmektedir. Potansiyel güvenlik problemleri göz önüne alındığında tüm birbirine bağlı modüller izole edilmektedir. İzolasyon da beraberinde kontrol devrelerinde izole ekipmanların kullanımını zorunlu kılmaktadır. Standart komponentlere göre izole komponentler daha pahalı olduğu için batarya sistemi maliyeti artmaktadır. Kablosuz

sistemlerin izolasyon anlamında da ciddi bir avantaj sağlayacağı öngörülmüştür. Çünkü modüller arasında doğrudan bir haberleşme kablosu ya da sensör ara birim kablosu bulunmamaktadır. Bu durum sistemlerin güvenliği için ciddi bir avantaj oluşturmuştur. Yapılan tez projesi kapsamında da kablosuz sistemin batarya hücreleri arasındaki izolasyona sağladığı etki gözlemlenmiştir.

Lityum batarya paketindeki sensör verilerini işlemek ve bunları kullanıcılara aktarmak ciddi işlem gücü gerektirmektedir. Sadece okunan veriyi aktarmak yeterli olmamaktadır. Bu veriler birbirinden zorlu algoritmalar ile birleştirilerek batarya paketine ait öngörüler ve hesaplamalar yapılmaktadır. Her hücre paketi için alınan birçok sensör verisi bağlı olduğu modül üzerinden hesaplanmaktadır. Modüle bağlı olan onlarca seri batarya hücresi için de bu veriler oldukça karmaşıklık oluşturmaktadır. Sonucunda da işlem gücü yüksek işlemcilerin modüllerde kullanılması gerekmektedir. Kablosuz olarak tasarlanan sistemlerde her batarya hücresinin sensör verisi kendi içerisinde yer alan işlemci üzerinden değerlendirilmektedir. Dolayısıyla kablosuz sistemlerdeki birçok algoritma hesaplaması işlem gücü düşük bir işlemci ile yapılabilmektedir. Yüksek veri hesaplamaları modüllere bölündüğü için işlemci performansı anlamında sistem daha efektif hale getirilmektedir. Tüm bu süreç işlemci kullanımındaki maliyete etki etmektedir.

Üretim, entegrasyon ve bakım/onarım süreçlerindeki esneklik batarya paketlerinin maliyetlerini azaltmaktadır. Bu kapsamda kablosuz olarak kurgulanan sistem mimarilerine harici sensör eklemek ya da harici seri/paralel modül eklemek daha kolaydır. Birçok literatür çalışmasında bu durum kablosuz batarya sistemlerinin en büyük avantajı olarak belirtilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Geleneksel Batarya Yönetim Sistemleri'nde gözlemlenen birçok dezavantaja alternatif olabilecek çalışmalar sunulmuştur. Bu kapsamda kablolu yapıya sahip sistemler detaylı bir şekilde incelenmiş ve kablosuz sistemler ile kullanılabilecek donanım yapıları tasarlanmıştır. Sistem tasarım çalışmalarında Batarya Yönetim Sistemleri'ndeki 5 temel problem üzerine yönelinmiştir. Bunlar; batarya hücre dengeleme topolojisi, izole komponent ve izolasyon problemleri, papatya zinciri mimarisine sahip kablolu haberleşme yöntemi, batarya şişme durumlarının tespiti ve üretim/entegrasyon/onarım süreçlerinde yaşanan zorluklar.

Lityum bataryalar, şarj ve deşarj süreçlerinde kimyasal yapıları gereği farklı gerilim seviyelerine sahip olabilmektedir. Bu nedenle çalışma koşullarında tüm batarya sistemindeki hücrelerin aynı gerilim değerinde tutulması gerekmektedir. Bu süreç Batarya Yönetim Sistemi tarafından hücre dengeleme metotları ile yapılmaktadır. Bu dengeleme metotları 2 ana başlık altında toplanmıştır. Bunlar; pasif hücre dengeleme ve aktif hücre dengeleme. Yapılan literatür araştırmalarında, aktif dengeleme sistemleri karmaşık yapıya sahip olduğu için pasif dengeleme sistemler daha sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tez projesi kapsamında da pasif hücre dengeleme metodu kullanılmıştır. Yavaş ve hızlı olmak üzere 2 farklı seçenek tasarım içeriğine eklenmiştir. Hem yavaş hem de hızlı dengeleme süreçlerinde sabit 20 ohm yüksek güçlü dirençler kullanılmaktadır. Maksimum batarya geriliminde bu direnç değeri ile 210 mA ve 420 mA dengeleme akımı elde edilebilmektedir. Bu akım değerleri normale göre oldukça yüksektir. Dolayısıyla düşük kapasiteye sahip lityum batarya hücrelerinde ciddi gerilim düşümlerine neden olabilmektedir. Bu çalışmada da bazı testlerde gerilim düşümleri gözlemlenmiştir. Devre üzerinde yapılacak olan donanımsal revizyonlar ile bu akım değerleri daha uygun seviyelere getirilebilmektedir.

Lityum bataryalar şarj ve deşarj süreçleri boyunca kimyasal yapıları gereği belirli bir oranda şişebilmektedir. Bu şişme oranı olması gerekenden fazla olduğu durumda hücrelerin koruma kılıfları yırtılabilmekte ve parlama riski kaynaklı ciddi problemler yaşanabilmektedir. 3 farklı tipte üretilen lityum bataryalarda özellikle prizmatik ve kese tipi hücrelerde bu durum yaşanmaktadır. Sektörde var olan birçok geleneksel Batarya Yönetim Sistemi ve literatürde

yapılan birçok çalışmada bu tip hücrelerin şişme tespitleri yapılmamaktadır. Bu projede gerinim ölçer sensörler ile tüm batarya hücreleri takip edilmekte, olası bir şişme yaşanması durumunda sistem tarafından harici güvenlik önlemleri devreye alınabilmektedir.

Geleneksel Batarya Yönetim Sistemleri'nde bir modül birden fazla seri batarya hücresini kontrol etmektedir. Bu durum, her batarya hücresi için harici dengeleme bağlantıları, sıcaklık sensörü bağlantıları veya harici opsiyonel sensör bağlantıları karmaşıklığına yol açmaktadır. Birden fazla sistemin bir arada kablolu olarak kullanıldığı bu mimaride en önemli problem izolasyon olmaktadır. Herhangi bir modülde meydana gelen bir problemin diğer modüllere ulaşmaması veya ulaşsa bile o modülü etkilememesi istenmektedir. Belirtilen problemlere çözüm olabileceği düşüncesiyle bu tez projesi kapsamında kablosuz sistem mimarisi kullanılmıştır. Mimaride kullanılan kablosuz altyapı Texas Instruments firması tarafından geliştirilen CC2662 SimpleLink mikrodenetleyici ile tasarlanmıştır. Yapılan testlerde bu kablosuz mimarinin açık alanda 6m'ye kadar veri aktarımı yapabildiği tespit edilmiştir. Test edilen menzil kablosuz mikrodenetleyicinin RF güç kazancı değiştirilerek daha da artırılabilmektedir.

Kablolu mimarilerde her modül arasında papatya zinciri metoduna sahip haberleşme altyapısı kullanılmaktadır. Papatya zinciri metodunda, ana modül tarafından atılan istek diğer tüm alt modüllere iletilerek zincirin sonunda ana modüle cevaplanarak gelmektedir. İstek ve cevap arasındaki süre bazı durumlarda ana kontrolcü modülde veri gecikmelerine neden olabilmektedir. Ek olarak, hat üzerinde herhangi bir noktada yaşanan problem tüm hatta etki ettiği için güvensiz bir altyapı meydana gelmektedir. Proje içeriğindeki kablosuz sistem mimarisi ile her modül kendi kablosuz mikrodenetleyicisi üzerinden verilerini ana modüle iletmektedir. Bu durum ana modülün istediği zamanda istediği veriyi alt modülden alabilmesine olanak sağlamaktadır. İlerleyen çalışmalarda bu kablosuz sistemin güvenliği üzerine araştırma faaliyetleri gerçekleştirilebilir.

Kablosuz sistem tasarımı yapılırken üretim/entegrasyon/onarım süreçlerindeki zaman ve maliyet özellikle ele alınmıştır. Çünkü kablolu sistemlerde karmaşık batarya paketlerini açmak ve ilgili modülü bularak onarmak çok zordur. Proje kapsamında batarya modülleri arasında sadece güç kablosu olduğu için doğrudan modüle erişim daha kolay hale gelmiştir. Buna ek olarak, batarya sistemine harici olarak eklenecek bir sensör doğrudan modül üzerine ekleneceği için kablosuz olarak yazılım fonksiyonlarına kolayca entegre edilebilmektedir.

Kablosuz Batarya Yönetim Sistemleri, doğrudan Otomotiv Güvenlik Bütünlüğü Seviyesi'ne (ASIL-D) uygun değildir. Fakat bu güvenlik protokollerine sahip olan sistemlere entegre edilebilecek yapıdadır. Özellikle Texas Instruments firması tarafından geliştirilen kablosuz mikrodenetleyici, Otomotiv Elektroniği Konseyi (AEC-Q100) tarafından AEC-Q100 test gereksinimlerini karşılamaktadır. Bu anlamda otomotiv sistemlerinde kullanım için ticari bir ürün haline gelmiş durumdadır.

Yapılan testlerde mevcut yazılım fonksiyonları ile modüllerin, mA mertebelerinde akım çektiği bu nedenle düşük kapasiteli bataryalarda yüksek verim sağlamadığı fakat yüksek kapasiteli bataryalarda verimli olabileceği değerlendirilmektedir. İlerleyen çalışmalarda modüllerdeki enerji tüketiminin azaltılması amacıyla yazılımsal optimizasyonlar yapılabilir. Özellikle kablosuz mikrodenetleyici ile RF veri gönderim süreçleri düzenlenerek yüksek enerji verimliliği sağlanabilir. Ek olarak bu proje kapsamında yedeklilik ve test amaçlı kullanılan benzer ölçüm donanım yapıları kaldırılarak hem boyut hem de maliyet anlamında avantaj sağlanabilir. Kablosuz bir sistemin güvenlik açığı oluşturmaması adına kriptolu veri aktarımı üzerine çalışmalar yürütülebilir. Tasarlanan sistemlerin verimli kullanımı için daha stabil batarya şarj durumu (State-Of-Charge – SOC) ve batarya sağlık durumu (State-Of-Health – SOH) hesaplamaları algoritmalara işlenebilir.

KAYNAKLAR

[1] Kozak, M., Kozak, Ş., 2012, Enerji Depolama Yöntemleri, *SDU International Technologic Science*, 17-29.

[2] Keleş, Ö., Polat, B. D., 2012, Lityum İyon Pil Teknolojisi, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, 42-48.

[3] Shell, C., Henderson, J., Verra, H., Dyer, J., 2015, Implementation of a wireless battery management system (WBMS), *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, Pisa, Italy, 2015, pp. 1954-1959.

[4] Bansal, P., Nagaraj, P. R., 2019, Wireless Battery Management System for Electric Vehicles, *2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, Bengaluru, India, 2019, pp. 1-5.

[5] Gherman, T., Ricco, M., Meng, J., Teodorescu, R., Petreus, D., 2018, Smart Integrated Charger with Wireless BMS for EVs, *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA, 2018, pp. 2151-2156.

[6] Huang, X., Acharya, A. B., Meng, J., Sui, X., Stroe D. I., Teodorescu, R., 2020, Wireless Smart Battery Management System for Electric Vehicles, *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA, 2020, pp. 5620-5625.

[7] Faika, T., Kim, T., Ochoa, J., Khan, M., Park S. W., Leung, C. S., 2019, A Blockchain-Based Internet of Things (IoT) Network for Security-Enhanced Wireless Battery Management Systems, *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 1-6.

[8] Schirn, A., 2024, *IEEE 1725-2021: Rechargeable Batteries For Mobile Phones*, https://blog.ansi.org/ieee-1725-2021-rechargeable-batteries-mobile-phones/, [Ziyaret Tarihi: 11 Haziran 2025].

[9] Panchal, S., 2014, *Impact of Vehicle Charge and Discharge Cycles on the Thermal Characteristics of Lithium-ion Batteries*, Canada.

[10] International Energy Agency, 2023, *Global EV Outlook 2023*.

[11] Thomas, R., David, L., 2001, *Handbook of Batteries*, 3rd edition.: McGraw-Hill, 2001.

[12] Nichols, D., 2022, *The Future of EV Batteries*, https://www.greencars.com/greencars-101/the-future-of-ev-batteries, [Ziyaret Tarihi: 11 Haziran 2025].

[13] Axmann, P., Wohlfahrt-Mehrens, M., 2009, Electrochemical energy storage systems for car applications, *Pres. HySA Systems Business Seminar*, November, 2009.

[14] Nolan, P., Lache, R., Galves, D., Toulemonde, G., Gehrke, J., Sanger, K., Ha, V., Rao, S., Crane, J., 2008, *Electric Cars: Plugged In. Batteries must be included*, June 2008.

[15] Mohammad, N., 2019, *Batteries and Charging Method*, Italy.

[16] Efe, Ş., Güngör, Z. A., 2021, *Geçmişten Günümüze Batarya Teknolojisi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi,* 947-955.

[17] Hellwig, C. A., 2013, *Modeling, simulation and experimental investigation of the thermal and electrochemical behavior of a LiFePO4-based lithium-ion battery*, Germany.

[18] Mühendis, V., 2019, *Li-ion Pillerin Farklı Kullanım Koşullarında Performanslarının Ölçülmesi*, Türkiye.

[19] Ros Bosch, P., Pla Aldabo, J., 2020, *Battery Technology: A review*, Finland.

[20] Thomas, R., 2010, *Linden's Handbook of Batteries*, 4th edition, McGraw-Hill, 2010.

[21] Panasonic Company, *Dry Batteries*, https://energy.panasonic.com/global/business/ i/eu/products/dry, [Ziyaret Tarihi: 03 Eylül 2024].

[22] Panasonic Company, *Lithium ion Batteries*, https://energy.panasonic.com/global/business/ i/eu/products/lithium-ion, [Ziyaret Tarihi: 03 Eylül 2024].

[23] University of Washington, *Classification of Cells or Batteries*, https://depts.washington.edu/matseed/batteries/MSE/classification.html, [Ziyaret Tarihi: 03 Eylül 2024].

[24] Darikas, G., 2018, *Design and Implementation of a Battery Management System for Lithium-Ion Batteries suitable for Automotive Applications*, Thessaloniki, Greece.

[25] Wu, Y., 2015, *Lithium-Ion Batteries: Fundamentals and Applications*, CRC Press.

[26] Nejad, S., 2017, *Monitoring of Battery Energy Storage Devices*, Sheffield, UK.

[27] Tahil, W., 2010, *How much lithium does a LiIon EV battery really need? Meridian International Research*.

[28] Viswanathan, V. V., Xu, W., Towne, S., Williford, R. E., Zhang, J. G., Liu, J., Yang, Z., 2010, Effect of entropy change of lithium intercalation in cathodes and anodes on Li-ion battery thermal management, *J. Power Sources*, vol. 195, no. 11, pp. 3720-3729.

[29] Battery University, *How do Lithium Batteries Work?*, https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work, [Ziyaret Tarihi: 03 Eylül 2024].

[30] Battery University, *Types of Battery Cells*, 2024, https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells, [Ziyaret Tarihi: 03 Eylül 2024].

[31] Rochliadi, A., Arcana, I. M., Bundjali, B., Multazam, 2013, Energy return factor analysis of lithium polymer battery during charge/discharge cycles, *2013 Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology (rICT & ICeV-T)*, Bandung, Indonesia, pp. 1-4.

[32] Heydecke, J., 2018, *Introduction to Lithium Polymer Battery Technology*, Villingen Schwenningen, Germany.

[33] Chanthevee, P., 2018, A Simplified Approach for Heat Generation Due to Entropy Change in Cylindrical LCO Battery, *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Bangkok, Thailand, pp. 1-5.

[34] Aghamohamadi, M., Abdar, A., 2020, Charging Management of Chemical Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO2) Batteries, Considering Battery Degradation Effects under Uncertain Operation in Multi-energy Systems, *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, pp. 1-6.

[35] Li, Y., 2019, Research on a Strategy of Consistency Management System for Lithium Iron Phosphate Battery, *2019 2nd International Conference on Safety Produce Informatization (IICSPI)*, Chongqing, China, pp. 40-45.

[36] Meghrajani, P. K., Gautam, P. V., 2018, Contemplating the Effect of Ambient Temperature Variation on SoC Estimation of Li-NMC Battery, *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA)*, Pune, India, pp. 1-6.

[37] Stroe, D. I., Schaltz, E., 2018, SOH Estimation of LMO/NMC-based Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries Using the Incremental Capacity Analysis Technique, *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, USA, pp. 2720-2725.

[38] Stroe, A. I., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Teodorescu, R., 2015, Performance model for high-power lithium titanate oxide batteries based on extended characterization tests, *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada, pp. 6191-6198.

[39] Tycorun, 2023, *Lithium Sulfur Battery vs Lithium Ion Battery-Comparison and how to choose*, https://www.tycorun.com/blogs/news/lithium-sulfur-battery-vs-lithium-ion-battery, [Ziyaret Tarihi: 04 Eylül 2024].

[40] Kim, M. S., 2020, *Lithium Metal Anode for Batteries*, http://large.stanford.edu/courses/2020/ph240/kim1/, [Ziyaret Tarihi: 04 Eylül 2024].

[41] Kampker, A., Valée, D., Schnettler, A., 2013, *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*, Springer Vieweg.

[42] Schröder, R., Aydemir, M., Seliger, G., 2016, Comparatively Assessing different Shapes of Lithium-ion Battery Cells, *14th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, GCSM 3-5 October 2016, Stellenbosch, South Africa.

[43] Schröder, R., 2015, *Process to Increase the Output of Z-Folded Separators for the Manufacturing of LIB*. In: AMM Vol. 794, pp. 19-26.

[44] Melançon, S., 2022, *Pouch Cell Assembly:New Methods to Improve Manufacturing*, https://www.laserax.com/blog/pouch-cell-assembly, [Ziyaret Tarihi: 11 Haziran 2025].

[45] Hummes, D. N., Hunt, J., Hervé, B. B., Schneider, P. S., Montanari, P. M., 2023, A comparative study of different battery geometries used in electric vehicles, *Latin American Journal of Energy Research*, 10(2), 94–114.

[46] Melançon, S., 2022, *Prismatic Cells vs Cylindrical Cells:What is the difference?*, https://www.laserax.com/blog/prismatic-vs-cylindrical-cells, [Ziyaret Tarihi: 11 Haziran 2025].

[47] Pradeep, V. S., 2013, *Study of Silicon Oxycarbide (SiOC) as Anode Materials for Li-ion Batteries*, Italy.

[48] Saw, L. H., Ye, Y., Tay, A. A. O., 2013, Electrochemical–thermal analysis of 18650 Lithium Iron Phosphate cell, *Energy Conversion and Management*, 75, pp.162–174.

[49] Jeon, D. H., Baek, S. M., 2011, Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle, *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), pp.2973–2981.

[50] Ekici, Y. E., 2019, *Batarya Yönetim Sistemleri*, Türkiye.

[51] Alonso, D. E., 2017, *Wireless Data Transmissions for the Battery Management System of Electric and Hybrid Vehicles*, Germany.

[52] Gnann, T., Ploetz, P., 2011, Status Quo und Perspektiven der Elektromobilitaet in Deutschland, *Working paper sustainability and innovations*, Fraunhofer ISI.

[53] Rincon Vija, F. A., Cregut, S., Papadopoulos, G. Z., Montavont, N., 2021, Enabling Robust Wireless Communication for BMS on Electric Vehicles, *2021 IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Edmonton, AB, Canada, 2021, pp. 423-426.

[54] Plett, G. L., 2004, Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1. Background, *Journal of Power sources,* 134.2 (2004), pp. 252–261.

[55] Vallo, N. J., 2016, *Design and analysis of a wireless battery management system for an advanced electrical storage system (2016)*, Graduate Theses and Dissertations, 1195.

[56] Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., Tan, N., 2021, Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir Derleme Çalışması, *GU J Sci*, Part A, 8(2), 234-275.

[57] Xhafa, A., 2021, *Texas Instruments, Improve Wireless Battery Management with the Industry's Best Network Availability*.

[58] Stefano, F., 2021, *Analysis and development of Battery Management System for electric vehicles*, Italy.

[59] Tatman, D., 2020, Texas Instruments, *Functional Safety Considerations in Battery Management for Vehicle Electrification*.

[60] Barré, A., 2013, A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications, *Journal of Power Sources,* 241 (2013), pp. 680–689.

[61] Hubble, D., 2022, Liquid electrolyte development for low-temperature lithium-ion batteries, *Energy & Environmental Science* (2022).

[62] Wang, D., Bao, Y., Shi, J., 2017, Online lithium-ion battery internal resistance measurement application in state-of-charge estimation using the extended kalman filter, *Energies 10.9* (2017), p. 1284.

[63] Mathew, M., 2018, Comparative analysis of lithium-ion battery resistance estimation techniques for battery management systems, *Energies 11.6* (2018), p. 1490.

[64] Daowd, M., Omar, N., Bossche, P. V. D., Mierlo, J. V., 2011, Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation, *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, IL, USA, pp. 1-7.

[65] Chen, F., Yuan, J., Zheng, C., Wang, C., Li, Z., Zhou, X., 2018, A State-of-Charge Based Active EV Battery Balancing Method, *2nd International Conference on Electrical Engineering and Automation (ICEEA 2018)*.

[66] Arora, S., 2018, Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies, *Journal of Power Sources*, Volume 400, Pages 621-640, ISSN 0378-7753.

[67] Ahmad, P., 2001, *Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions*. Battery Man. 43.

[68] Thakur, A. K., Prabakaran, R., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Arıcı, M., Wang, C., Zhao, W., Hwang, J. Y., Saidur, R., 2020, A state of art review and future viewpoint on

advance cooling techniques for Lithium–ion battery system of electric vehicles, *Journal of Energy Storage*, Volume 32, 101771, ISSN 2352-152X.

[69] Choudhari, V. G., Dhoble, A. S., Sathe, T. M., 2020, A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery used for electric vehicle, *Journal of Energy Storage*, Volume 32, 101729, ISSN 2352-152X.

[70] Bulut, E., 2022, *Elektrikli Araçlarda Batarya Termal Yönetim Sistemlerinin Optimum Tasarımı*, Bursa, Türkiye.

[71] Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J., Ouyang, M., 2019, A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle, *eTransportation*, Volume 1, 100005, ISSN 2590-1168.

[72] Philippe, P. G., 2014, Switched Capacitor Balancing Time Estimation and Dependency, *2014 IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference* (2014): 1-6.

[73] Gang, N., Haran, B., Popov, B. N., 2003, Capacity Fade Study of Lithium-Ion Batteries Cycled at High Discharge Rates, *Journal of Power Sources 117* (2003): 160-69.

[74] Lu, B., Song, Y., Zhang, J., 2016, Selection of Charge Methods for Lithium Ion Batteries by Considering Diffusion Induced Stress and Charge Time, *Journal of Power Sources*. 320 (2016): 104-110.

[75] Chiasserini, C. F., 2001, *Energy Efficient Battery Management IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 19 (2001): 1235-1244.

[76] Chen, H., Ammers, J. C. V., 2021, *Battery Management System for the Wireless Powerlizer*, Delft University of Technology, Netherlands.

[77] Etengoff, A., 2023, *What is an EV battery state of charge (SOC)?*, https://www.evengineeringonline.com/what-is-an-ev-battery-state-of-charge-soc/, [Ziyaret Tarihi: 06 Eylül 2024].

[78] Jiang, J., Sen, Li., 2014, A single lithium-ion battery protection circuit with high reliability and low power consumption, *Journal of Semiconductors 35.11* (201).

[79] Chang, W. Y., 2013, *The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review*, ISRN Applied Mathematics.

[80] Liu, C., 2016, A New Method of Modeling and State of Charge Estimation of the Battery, *Journal of Power Sources*, 320 (2016): 1 – 12.

[81] Bieler, N., Paul, H. D., 2022, *wBMS Technology: The New Competitive Edge for EV Manufacturers*, Analog Devices (2022).

[82] Ren, W., Du, D., Du, Y., 2019, Electrical contact resistance of connector response to mechanical vibration environment, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 10.2* (2019), pp. 212–219.

[83] Vogt, T., 2020, *Wired vs Wireless Communications in EV Battery Management*, Texas Instruments.

[84] Zimmer, G., 2017, *Wireless Battery Management Systems Highlight Industry's Drive for Higher Reliability*.

[85] Samanta, A., Williamson, S. S., 2021, A Survey of Wireless Battery Management System: Topology, Emerging Trends, and Challenges, *Electronics 2021*, 10, 2193.

[86] Ali, M. U., Zafar, A., Nengroo, S. H., Hussain, S., 2019, Junaid Alvi, M.; Kim, H.-J. Towards a Smarter Battery Management System for Electric Vehicle Applications: A Critical Review of Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation, *Energies 2019*, 12, 446.

[87] Chetan, M., Hiremath, M. S., 2021, *Validation of wireless battery management system (wBMS)—Gen2*, J. Univ. Shanghai Sci. Technol, 23, 816–825.

[88] Jamaluddin, A., Perdana, F. A., Supriyanto, A., Purwanto, A., Inayati, Nizam, M., 2014, Development of wireless battery monitoring for electric vehicle, *Proceedings of the 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science*, Denpasar, Indonesia, 24–25 November 2014; Volume 328, pp. 147–151.

[89] Wu, Y., Liao, X., Chen, W., Chen, D., 2011, A battery management system for electric vehicle based on Zigbee and CAN, *Proceedings of the 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing*, Shanghai, China, 15–17 October 2011; Volume 5, pp. 2517–2521.

[90] Schneider, M., Ilgin, S., Jegenhorst, N., Kube, R., Püttjer, S., Riemschneider, K. R., Vollmer, J., 2012, Automotive battery monitoring by wireless cell sensors, *Proceedings of the 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Graz, Austria, 13–16 May 2012; pp. 816–820.

[91] Rahman, A., Rahman, M., Rashid, M., 2017, Wireless battery management system of electric transport. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing*, Bristol, UK, 2017; Volume 260.

[92] Gherman, T., Teodorescu, R., Ricco, M., Petreus, D., Meng, J., 2018, Smart integrated charger with wireless BMS for EVs, *Proceedings of the IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA, 21–23 October 2018; Volume 1, pp. 2151–2156.

[93] Huang, X., Acharya, A. B., Meng, J., Sui, X., Stroe, D. I., Teodorescu, R., 2020, Wireless smart battery management system for electric vehicles, *Proceedings of the 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Vancouver, BC, Canada, 10–14 October 2020; pp. 5620–5625.

[94] Li, W., Rentemeister, M., Badeda, J., Jöst, D., Schulte, D., Sauer, D. U., 2020, Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation. *J. Energy Storage 2020*, 30, 101557.

[95] Fernandez, A., Wiechman, H., 2019, *Deep dive into the tools and development kits of the SimpleLink MCU platform*, https://www.ti.com/lit/wp/sway002b/sway002b.pdf, [Ziyaret Tarihi: 11 Haziran 2025].

[96] Lara D., Porter, D., 2022, *Cable replacement using wireless technologies in automotive*, https://www.ti.com/lit/ml/slyp670/slyp670.pdf, [Ziyaret Tarihi: 16 Şubat 2025].

[97] Urban, T., 2022, *Functional Safety-Relevant Wireless Communication in Automotive Battery Management Systems*, Technical White Paper (2022).

[98] Rincon, F., Tanaka, Y., Watteyne, T., 2018, On the impact of wifi on 2.4 ghz industrial IoT networks, *2018 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII)*, IEEE, pp. 33–39.

[99] Watteyne, T., 2013, Technical overview of SmartMesh IP, *2013 Seventh International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, IEEE, pp. 547–551.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Ender DÖNMEZ

ORİJİNALLİK RAPORU

%5	%4	%1	%2
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
2	www.amatorteknik.com İnternet Kaynağı	%1
3	tr.optimumnanorechargeableliionbatteries.com İnternet Kaynağı	<%1
4	tr.dsisolar.com İnternet Kaynağı	<%1
5	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
6	docs.wixstatic.com İnternet Kaynağı	<%1
7	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1
8	tr.benweilight.com İnternet Kaynağı	<%1
9	dspace.vutbr.cz İnternet Kaynağı	<%1
10	ikee.lib.auth.gr İnternet Kaynağı	<%1
11	Nurşah Öz. "Elektrikli araçlar Için seri paralel bağlantı kombinasyonunu destekleyen yeni	<%1

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Ender DÖNMEZ
(İmza)