

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

LİTYUM İYON BATARYALAR İÇİN WI-FI BLE MODÜLÜNE
DAYALI KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ
TASARIMI

BAHADIR KÜÇÜKCIPRACI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

ŞUBAT 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

LİTYUM İYON BATARYALAR İÇİN WI-FI BLE
MODÜLÜNE DAYALI KABLOSUZ BATARYA
YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

BAHADIR KÜÇÜKCIPRACI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

ŞUBAT 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**DESIGN OF A WIRELESS BATTERY MANAGEMENT
SYSTEM BASED ON A WI-FI BLE MODULE FOR
LITHIUM-ION BATTERIES**

BAHADIR KÜÇÜKCIPRACI

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING**

ADVISOR: PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

FEBRUARY 2025

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 20/01/2025 tarih ve 2025/06 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 14/02/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Bahadır KÜÇÜKCİPRACI'nın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof.Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE

: Doç. Dr. Tuba GÖZEL

ÜYE

: Doç. Dr. Uğur HASIRCI

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Değerli Aileme

Sevgilerimle

ÖZET

Bu tez çalışmasında, lityum-iyon bataryaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü bir şekilde yönetilmesini sağlamak amacıyla geliştirilen kablosuz bir batarya yönetim sistemi (BYS) tasarımı sunulmaktadır. Sistemin temel bileşenleri, Texas Instruments'ın BQ76930 batarya yönetim entegresi ve Espressif'in ESP32 Wroom 32D Wi-Fi modülü olarak belirlenmiştir.

BQ76930 entegresi, 10'a kadar lityum-iyon hücrelerini izleyebilen ve dengeleyebilen gelişmiş bir batarya yönetim çözümüdür. Bu entegre; hücre voltajlarını ve sıcaklıklarını ölçme, hücreler arasındaki voltaj dengesizliklerini giderme ve batarya paketi genelinde akım izleme gibi kritik fonksiyonları yerine getirmektedir.

ESP32 modülü ise BYS'in kablosuz olarak izlenmesini ve kontrol edilmesini sağlamaktadır. Wi-Fi bağlantısı sayesinde batarya durumu, sıcaklıklar ve diğer önemli veriler gerçek zamanlı olarak izlenebilirken, sistemin uzaktan güncellenmesi ve kontrol edilmesi için gerekli yazılım altyapısı da ESP32 modülü üzerinde geliştirilmiştir.

Kablosuz batarya yönetim sistemleri, kablolu gereksinimini ortadan kaldırarak kurulum ve bakım maliyetlerini azaltır, sistem esnekliğini artırır ve geniş alanlarda etkin veri izleme imkanı sunar. Bu avantajlar, özellikle endüstriyel enerji depolama sistemleri, taşınabilir cihazlar ve elektrikli araçlar gibi uygulamalarda kablosuz BYS'i tercih edilen bir çözüm haline getirmektedir.

Bu tezde, kablosuz batarya yönetim sisteminin yazılım ve donanım tasarım süreçleri ayrıntılı olarak ele alınmış; bileşen seçimi, karşılaşılan teknik zorluklar ve bu zorluklara getirilen çözümler açıklanmıştır. Ayrıca, sistem performansı test edilerek analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, kablosuz BYS'in lityum-iyon batarya yönetiminde sunduğu güvenlik, verimlilik ve esneklik avantajlarını ortaya koymakta ve sistemin tasarım detaylarıyla bu alana katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi, BQ76930, ESP32 Wroom 32D, Lityum-İyon Batarya, Hücre Dengeleme, Wi-Fi Modülü

ABSTRACT

This thesis presents a detailed design of a wireless battery management system (BMS) developed to ensure the safe, efficient, and long-lasting management of lithium-ion batteries. The design utilizes the main components of the BQ76930 battery management integrated circuit from Texas Instruments and the ESP32 Wroom 32D Wi-Fi module from Espressif.

The BQ76930 IC is an advanced battery management solution capable of monitoring the voltage and temperature of up to 10 lithium-ion cells, providing cell balancing, and performing current monitoring functions. The ESP32 module enables wireless monitoring and control of the system, allowing real-time tracking of battery status, temperatures, and other critical data through Wi-Fi connectivity, while also supporting remote updates and control operations.

Wireless battery management systems offer numerous advantages over wired systems, including reduced installation and maintenance costs by eliminating wiring requirements, enhanced system flexibility, and effective data monitoring over large areas. These benefits make wireless BMS a preferred solution, especially for industrial energy storage systems, portable devices, and electric vehicles.

This thesis thoroughly examines the wireless battery management system's software and hardware design processes, detailing component selection, technical challenges encountered, and the solutions implemented. Additionally, the system's performance was tested, analyzed, and evaluated.

In conclusion, this study highlights the advantages of wireless BMS in lithium-ion battery management, emphasizing its importance in applications such as energy storage systems, portable devices, and electric vehicles through its secure, efficient, and flexible design.

Keywords: Wireless Battery Management System, BQ76930, ESP32 Wroom 32D, Lithium-Ion Battery, Cell Balancing, Wi-Fi Module

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezimde, öncelikle beni her zaman destekleyen, yol gösteren ve akademik gelişimime büyük katkı sağlayan değerli danışmanım Prof. Dr. Abdulkadir Balıkcı'ya en içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Ayrıca, bilgi ve deneyimlerini cömertçe paylaşarak bana rehberlik eden ve bu süreçte önemli katkılarda bulunan Dr. Murat Ceylan'a da minnettarım.

Tezim boyunca bana her zaman koşulsuz sevgi ve destek sunan, zor zamanlarımda yanımda olan ve beni bu noktaya getiren aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Onların varlığı ve desteği olmasaydı, bu tezi tamamlamak mümkün olmazdı. Ayrıca, her adımında yanımda olan, beni her zaman cesaretlendiren ve değerli katkılarıyla sürecimi kolaylaştıran çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti, Tezin Amacı Katkısı ve İçeriği	3
2. LİTYUM İYON BATARYALARIN: ÖZELLİKLERİ, PERFORMANS, KRİTERLERİ VE GELECEK YÖNELİMLER	5
2.1. Lityum-İyon Bataryaların Genel Özellikleri	5
2.2. Lityum İyon Batarya-Terminolojileri	9
2.3. Lityum-İyon Bataryaların Performans Kriterleri	11
3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ: TOPOLOJİLER, TEMEL FONKSİYONLAR, UYGULAMALAR VE TRENDLER	14
3.1. Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri	16
3.2. Batarya Yönetim Sistemi Temel Fonksiyonları	17
3.2.1. Hücre İzleme ve Koruma	20
3.2.2. Şarj Durumu (SOC) ve Sağlık Durumu (SOH) Tahmini	22
3.3. Batarya Yönetim Sistemi Dengeleme Teknikleri	24
3.4. Batarya Yönetim Sistemlerinde Haberleşme Protokolleri	28
3.4.1. Batarya Yönetim Sistemi Kablolü Haberleşme Yöntemleri	28
3.4.2. Batarya Yönetim Sistemi Kablosuz Haberleşme Yöntemleri	32
4. KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI	37
4.1. Sistemin Blok Diyagramı	38
4.2. Sistemin Gereklilikleri	39
4.3. Komponentlerin Tanımı	41
4.3.1. Bq76930 Batarya Yönetim Entegresi	41
4.3.2. Esp32- Wroom 32D-Wi-Fi BLE Modülü	48
4.3.3. AP63356DV-7 Voltaj Regülatör Entegresi	49
4.3.4. MF52A1-103F3950 NTC Termistör	52
4.3.5. IPD50N10S3L ve UPA1918 Mosfetleri	54
4.3.6. NCV317 Voltaj Regülatörü	57
5. DONANIM TASARIMI ve TEST	60
5.1. Şematik Devresi	61
5.1.1. Batarya İzleme ve Dengeleme Devresi	61
5.1.2. Voltaj Regülatör Devresi	62
5.1.3. Kablosuz Haberleşme Devresi	75
5.1.4. Güç Anahtarlama Devresi	77

5.2. PCB Yerleşimi	79
5.2.1. Çocuk PCB Kart Yerleşimi	79
5.2.2. Ana PCB Kart Yerleşimi	82
5.2.3. Güç Anahtarlama PCB Kart Yerleşimi	84
5.3. Sistem Donanım Testi	86
5.3.1. Sistem Prototip Üretimi	87
5.3.2. Batarya Gerilim Ölçüm Testi	89
5.3.3. Batarya Sıcaklık Ölçüm Testi	90
5.3.4. Sistem Şarj Testi	92
5.3.5. Sistem Deşarj Testi	93
5.3.6. Sistem Kablosuz Haberleşme Testi	95
6. YAZILIM TASARIMI ve TEST	98
6.1. Fonksiyon Özeti	98
6.2. Sistem Yazılım Özellikleri	100
6.3. Sistem Yazılım Testi	104
6.3.1. Sistemin Diagnostik Kontrol Testi	104
6.3.2. Batarya Voltaj Ölçüm Testi	106
6.3.3. Batarya Dengeleme Testi	108
6.3.4. Sıcaklık Ölçüm Testi	111
6.3.5. Şarj ve Deşarj Kontrol Testi	113
6.3.6. Çocuktan Ana Karta Kablosuz Haberleşme Testi	115
6.3.7. Anadan Çocuk Karta Kablosuz Haberleşme Testi	117
7. TEST SONUÇLARI VE YORUMLAR	119
7.1. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	119
7.2. Sistem Performansı ve Güvenirlilik	119
7.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	119
KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	124
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR VE SUNUMLAR	125

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper (Current)
C	: Kapasitans (Capacitance)
$C_{maksimum}$	: Maksimum Kapasite (Maximum Capacity)
$C_{minimum}$	: Minimum Kapasite (Minimum Capacity)
ΔI_L	: Inductor Current Ripple (İndüktör Akım Dalgalanması)
ΔT	: Temperature Difference (Sıcaklık Farkı)
f_c	: Cutoff Frequency (Kesim Frekansı)
f_{sw}	: Switching Frequency (Anahtarlama Frekansı)
I_{gate}	: Gate Drive Current (Kapı Sürme Akımı)
I_{peak}	: Peak Current (Tepe Akımı)
kg	: Kilogram
L	: Endüktans (Inductance)
P_{con}	: Conduction Loss Power (İletim Kayıp Gücü)
P_{sw}	: Switching Loss Power (Anahtarlama Kayıp Gücü)
P_{total}	: Total Power Dissipation (Toplam Güç Dağılımı)
Q_g	: Gate Charge (Kapı Yüğü)
Q_{kalan}	: Kalan Yüğü (Remaining Charge)
$Q_{maksimum}$	: Maksimum Yüğü (Maximum Charge)
R	: Direnç (Resistance)
$R_{\theta JA}$	: Thermal Resistance Junction to Ambient (Bağlantıdan Ortama Termal Direnç)
t_{switch}	: Switching Time (Anahtarlama Süresi)
V	: Voltaj (Voltage)
V_{diyot}	: Diyot Üzerine Düşen Gerilim
$V_{giriş}$	: Giriş Gerilimi
$V_{çıkış}$	: Çıkış Gerilimi
W	: Watt (Güç)
AEC-Q100	: Automotive Electronics Council Quality Standard (Otomotiv Elektronik Konseyi Kalite Standardı)
AES	: Advanced Encryption Standard (Gelişmiş Şifreleme Standardı)
ADC	: Analog-to-Digital Converter (Analog-Dijital Çevirici)
BLE	: Bluetooth Low Energy (Düşük Enerjili Bluetooth)
BYS	: Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System- BMS)
CAN	: Controller Area Network (Kontrol Alanı Ağı)
CCM	: Continuous Conduction Mode (Sürekli İletim Modu)
CHG	: Charge (Şarj)
CRC	: Cyclic Redundancy Check (Çevrimsel Artıklık Denetimi)
DCM	: Discontinuous Conduction Mode (Kesikli İletim Modu)
DSG	: Discharge (Deşarj)
EMC	: Elektromanyetik Uyumluluk
EMI	: Elektromanyetik Girişim
Hz	: Hertz (Frekans)
I2C	: Inter-Integrated Circuit (Entegreler Arası İletişim)
IEC 61508	: İşlevsel Güvenlik Standardı
ISO 21434	: Yol Taşıtları Siber Güvenlik Mühendisliği Avrupa Standardı
ISO 26262	: Yol Taşıtları İçin İşlevsel Güvenlik Standardı

KBYS	: Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi
kHz	: Kilohertz
LDO	: Low Dropout Regulator (Düşük Gerilim Düzenleyici)
Mbps	: Megabit per Second (Saniyede Megabit)
NACK	: Negative Acknowledgement (Olumsuz Onay)
NFC	: Near Field Communication (Yakın Alan İletişimi)
NTC	: Negative Temperature Coefficient (Negatif Sıcaklık Katsayısı)
OCD	: Overcurrent Detection (Aşırı Akım Algılama)
OV	: Over Voltage (Aşırı Voltaj)
PCB	: Baskılı Devre Kartı (Printed Circuit Board)
RS-485	: Seri İletişim Standardı
RTD	: Resistance Temperature Detector (Dirençli Isı Algılayıcı)
RXD	: Receive Data (Veri Alma)
SAE 21434	: Yol Taşıtları Siber Güvenlik Mühendisliği Amerika Standardı
SCD	: Short Circuit Detection (Kısa Devre Algılama)
SCL	: Serial Clock Line (Seri Saat Hattı)
SDA	: Serial Data Line (Seri Veri Hattı)
SIL	: Safety Integrity Level (Güvenlik Bütünlük Seviyesi)
SMBus	: System Management Bus (Sistem Yönetim Veri Yolu)
SOC	: Şarj Durumu
SOH	: Sağlık Durumu
SPI	: Serial Peripheral Interface (Seri Çevresel Arayüz)
SSID	: Service Set Identifier (Ağ Tanımlayıcısı)
TCP/IP	: Transmission Control Protocol (İletim Kontrol Protokolü) /Internet Protocol (İnternet Protokolü)
TLS	: Transport Layer Security (Taşıma Katmanı Güvenliği)
TS	: Temperature Sense (Sıcaklık Sensörü)
TVS	: Transient Voltage Suppression (Geçici Voltaj Bastırma)
TXD	: Transmit Data (Veri Gönderme)
UART	: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Evrensel Asenkron Alıcı/Gönderici)
UV	: Under Voltage (Düşük Voltaj)
UVLO	: Under Voltage Lockout (Düşük Voltaj Kilitleme)
Wi-Fi	: Kablosuz İletişim Teknolojisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Lityum iyon bataryanın iç yapısı.	6
Şekil 2.2: Lityum iyon batarya paketleme tipleri.	9
Şekil 2.3: Lityum iyon bataryaların performans türüne göre karşılaştırılması.	13
Şekil 3.1: Tesla ModelS.	14
Şekil 3.2: Togg T10x.	15
Şekil 3.3: Elektrikli scooter.	15
Şekil 3.4: Otomatik yönlendirilmeli araç (AGV).	16
Şekil 3.5: Batarya yönetim sistemi topolojileri.	17
Şekil 3.6: Batarya yönetim sistemi temel fonksiyonları.	19
Şekil 3.7: Seri bağlı bir batarya hücre gerilimlerinin dağılımı.	20
Şekil 3.8: Aktif ve pasif dengeleme sistemleri.	25
Şekil 3.9: Aktif dengeleme türleri.	26
Şekil 3.10: Pasif dengeleme tekniğinin karşılaştırılması.	27
Şekil 3.11: Aktif dengeleme tekniklerinin karşılaştırılması.	27
Şekil 3.12: Batarya haberleşme protokollerinin sınıflandırılması.	28
Şekil 3.13: Kablolü batarya yönetim sisteminin bağlantı şekli.	29
Şekil 3.14: Kablolü BYS'nin batarya paketi içerisindeki yerleşimi.	31
Şekil 3.15: Kablosuz batarya yönetim sisteminin bağlantı şekli.	33
Şekil 3.16: Kablosuz BYS'nin araç içerisindeki yerleşimi.	34
Şekil 4.1: Tasarımı yapılmış sistemin blok diyagramı.	38
Şekil 4.2: Tasarımı yapılmış sistemin gereklilikleri.	40
Şekil 4.3: Bq7630 entegresinin 3D kılıf görünümü.	42
Şekil 4.4: Bq76930 pin dağılımı.	43
Şekil 4.5: Bq76930 için hücre sayısına göre bağlantıları şekli.	44
Şekil 4.6: Bq76930 batarya yönetim sistemi entegresinin iç yapısı.	45
Şekil 4.7: ESP32 WROOM 32D modülünün pinlerine bağlantı ataması.	49
Şekil 4.8: AP63356 entegresinin kılıfının 3D görüntüsü.	50
Şekil 4.9: AP63356x serisine ait entegrelerin şematik bağlantı yapısı.	50
Şekil 4.10: AP63356 entegresinin iç yapısı.	52
Şekil 4.11: NTC termistörün beta değeri.	53
Şekil 4.12: NTC sıcaklık sensörü.	53
Şekil 4.13: DPAK (TO-252-3) kılıf mosfet 3D görüntüsü.	54
Şekil 4.14: TSSOP-8 kılıf uPA1918 3D görüntüsü.	55
Şekil 4.15: SOIC-8 kılıf NCV/LM317 3D görüntüsü.	58
Şekil 4.16: NVC/LM317 voltaj regülatörü iç yapısı.	58
Şekil 5.1: Kablosuz batarya yönetim sistemi blok diyagramı.	60
Şekil 5.2: Batarya izleme ve dengeleme devresi şematigi.	61
Şekil 5.3: Batarya yönetim sistemi entegresinin bağlantı şematigi.	62
Şekil 5.4: AP6335x entegresinin bağlantı şeması.	63
Şekil 5.5: AP63356 entegresinin devre şematigi.	65
Şekil 5.6: AP63356 entegresinin devredeki verimlilik ve yük ilişkisi.	66
Şekil 5.7: NVC317 voltaj regülatörün devre şematigi.	67
Şekil 5.8: Ana PCB güç girişi koruması.	68
Şekil 5.9: NCV/LM 317 entegresinin LTspice şematigi.	69
Şekil 5.10: Ana PCB voltaj girişi LTspice simülasyonu.	70

Şekil 5.11: Diyot üzerindeki gerilim değerinin LTspice simülasyonu.	71
Şekil 5.12: ESP32 voltaj girişinin LTspice simülasyonu.	72
Şekil 5.13: NCV/LM 317 entegresinin sinyal girişli LTspice şematığı	73
Şekil 5.14: Sinyal girişi uygulanan devrenin LTspice simülasyonu.	74
Şekil 5.15: LM/NCV 317 entegresinin güç tüketimi LTspice simülasyonu.	75
Şekil 5.16: ESP32 modülünün bağlantı şematığı.	76
Şekil 5.17: Şarj/Deşarj mosfetlerinin bağlantı şematığı.	78
Şekil 5.18: Çocuk PCB 3D görüntüsü.	80
Şekil 5.19: Çocuk PCB alt-üst bağlantı şekli.	81
Şekil 5.20: Ana PCB 3D görüntüsü.	82
Şekil 5.21: Anahtarlama PCB 3D görüntüsü.	85
Şekil 5.22: Prototip kablosuz batarya yönetim sistemi.	86
Şekil 5.23: Batarya yönetim sistemi prototip çalışması.	88
Şekil 5.24: Çocuk PCB prototipi.	88
Şekil 5.25: Batarya hücrelerinin voltaj ve SOC değerlerinin seri monitör çıktısı.	89
Şekil 5.26: Batarya hücrelerinin gerilim ölçüm testi.	90
Şekil 5.27: Sıcaklık okuma testi.	91
Şekil 5.28: Sistem şarj testi.	92
Şekil 5.29: Sistem deşarj testi.	94
Şekil 5.30: Kablosuz haberleşme testi.	95
Şekil 5.31: Kablosuz haberleşme testinin programlanması.	96
Şekil 5.32: Seri monitörde slave seçimi ve paket gönderim testi.	97
Şekil 6.1: Sistemin I2C/CRC yazılım akış şeması.	101
Şekil 6.2: Sistemin fonksiyon yazılım akış şeması.	103
Şekil 6.3: Sistemin diagnostik kontrol akış şeması.	105
Şekil 6.4: Sistemin diagnostik kontrol seri monitör görüntüsü.	106
Şekil 6.5: Sistemin batarya voltaj ölçüm akış şeması.	107
Şekil 6.6: Sistemin batarya voltaj ölçüm testi seri monitör görüntüsü.	108
Şekil 6.7: Sistemin batarya dengeleme akış şeması.	109
Şekil 6.8: Sistemin dengeleme testi seri monitör görüntüsü.	110
Şekil 6.9: Sistemin sıcaklık ölçüm akış şeması.	111
Şekil 6.10: Sistemin sıcaklık ölçüm testi seri monitör görüntüsü.	112
Şekil 6.11: Sistemin şarj ve deşarj kontrol akış şeması.	113
Şekil 6.12: Sistemin şarj ve deşarj testi seri monitör görüntüsü.	114
Şekil 6.13: Çocuk karttan ana kartta haberleşme akış şeması.	115
Şekil 6.14: Çocuk karttan ana kartta haberleşme seri monitör görüntüsü.	116
Şekil 6.15: Ana karttan çocuk kartta haberleşme akış şeması.	117
Şekil 6.16: Ana karttan çocuk kartta haberleşme seri monitör görüntüsü.	118

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Lityum iyon bataryaların karşılaştırılması.	8
Tablo 3.1: Kablolı haberleşme yöntemlerinin karşılaştırılması.	30
Tablo 3.2: Kablolı haberleşme türlerinin etkinliklerinin değerlendirilmesi.	32
Tablo 3.3: Kablosuz haberleşme türlerinin etkinliklerinin değerlendirilmesi.	35
Tablo 5.1: AP63356 entegresinin değerlerinin seçilmesi.	64

1. GİRİŞ

Batarya yönetim sistemleri (BYS), modern enerji depolama çözümlerinde kritik bir rol oynayan temel bileşenlerdir. Bir bataryanın güvenli, verimli ve uzun ömürlü bir şekilde çalışabilmesi için BYS'in sağladığı izleme ve kontrol fonksiyonları hayati öneme sahiptir. Özellikle lityum-iyon türevli bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları ve karmaşık kimyasal yapıları nedeniyle BYS'ye olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bataryaların güvenli ve etkili bir şekilde kullanılabilmesi için voltaj, sıcaklık ve akım gibi parametrelerin sürekli izlenmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir [1], [2].

Bir batarya yönetim sistemi, şarj edilebilir bataryaları yöneten, onların güvenli çalışmasını ve uzun ömürlü olmasını sağlayan elektronik bir sistemdir. BYS, bataryanın durumunu izlemek, hasardan korumak ve bireysel hücreler arasındaki şarjı dengelemek gibi birkaç kritik fonksiyonu yerine getirir. BYS, sürekli olarak toplam voltajı, bireysel hücre voltajlarını, sıcaklığı ve akımı izlerken, aynı zamanda Şarj Durumu (State of Charge- SoC) ve bataryanın Genel Sağlık Durumu (State of Health- SoH) değerlendirmesini yapar. Ayrıca, bataryayı aşırı şarj, aşırı deşarj, aşırı akım ve aşırı voltaj gibi durumlardan korur [1], [3]. BYS, bataryayı dengeleyerek kapasitesini ve ömrünü maksimize etmeyi hedefler. Bu, tüm hücrelerin benzer voltajlara sahip olmasını sağlayarak, şarjın hücreler arasında yeniden dağıtılmasını içerebilir [1], [4]. Ayrıca, BYS genellikle bataryanın durumu hakkında bilgileri dış sistemlere iletmek için iletişim protokolleri içerir. Bu, elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri gibi cihazlarla daha iyi entegrasyon sağlar [2], [3].

Batarya yönetim sistemlerinin bir türü olan kablosuz batarya yönetim sistemlerinin (kBYS) geliştirilmesi, batarya paket tasarımlarını basitleştirerek kablolama gereksinimlerini ortadan kaldırmayı hedefleyen yükselen bir trenddir. Bu yenilik, ağırlığı azaltabilir, montaj verimliliğini artırabilir ve daha kolay teşhis ve bakım imkânı sağlayabilir [5], [6]. Batarya teknolojisi geliştikçe, BYS'in enerji depolama çözümlerinin performansını ve güvenliğini en üst düzeye çıkarmadaki rolü giderek daha önemli hale gelecektir.

Kablosuz batarya yönetim sistemleri, geleneksel kablolu sistemlere kıyasla birçok avantaj sunmaktadır. Kablolama gereksinimlerini ortadan kaldırarak hem maliyetleri

düşürmekte hem de sistem esnekliğini artırmaktadır. Bu esneklik, geniş alanlarda bile verilerin etkili bir şekilde izlenmesini mümkün kılmakta ve sistem tasarımında daha fazla özgürlük sağlamaktadır. Özellikle elektrikli araçlar (EV'ler) için kBYS, batarya teknolojisinde önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Bu sistemler, geleneksel kablolu BYS'lerin karmaşıklığını ortadan kaldırarak batarya performansını artırır. Kablosuz batarya yönetim sistemlerinde kurulum daha basit ve hızlı olabilirken, kablosuz vericiler gibi ek donanım gereksinimleri başlangıç maliyetlerini artırabilir. Ancak, esneklik ve azalan işçilik maliyetleri, bazı senaryolarda bu başlangıç giderlerini dengeleyebilir [7], [8].

Kurulum karmaşıklığı açısından, kablolu batarya yönetim sistemleri geniş kablolama gereksinimi nedeniyle iş gücü açısından yoğun ve maliyetli olabilir. Kabloların batarya paketinin çerçevesi, modüllerin etrafı veya paket içinde yer alan diğer engeller üzerinden geçirilmesi, kurulum sürecini karmaşıklştırabilir ve zaman alıcı hale getirebilir [9]. Buna karşın, kablosuz batarya yönetim sistemleri, sensörlerin fiziksel kablolama gerektirmeden yerleştirilebilmesi sayesinde kurulumda daha fazla esneklik sunar. Bu durum, kurulum süresini ve karmaşıklığını azaltarak, değişen düzenlere veya gereksinimlere daha kolay uyum sağlanmasına olanak tanır [10].

Basitleştirilmiş tasarımıyla kBYS, her batarya modülü için bir kablosuz hücre izleme kontrolcüsü entegre eder ve merkezi bir yönetim birimiyle doğrudan kablosuz iletişim sağlar. Bu, kapsamlı kablolama gereksinimini ortadan kaldırarak batarya paketlerinin tasarımında ağırlığı ve karmaşıklığı azaltır [10], [11].

Kablosuz sistemler, batarya paketleme konusunda daha fazla esneklik sunar. Fiziksel bağlantıları ortadan kaldırarak, üreticiler montaj süreçlerini basitleştirebilir ve batarya sistemlerinin genel üretilebilirliğini artırabilir. Bu durum, manuel işçilik ve buna bağlı güvenlik risklerini en aza indirerek otomatik üretimi kolaylaştırır [12].

Kablosuz sistemler, aracılığıyla batarya paketlerinin durumu fiziksel erişim olmadan uzaktan değerlendirilebilir [13]. Bu, arızalı modüllerin daha hızlı tespit edilmesine ve daha verimli bir şekilde servis edilmesine yol açabilir [12]. Ayrıca, bileşen sayısını en aza indirerek ve montaj sürecini basitleştirerek, kBYS üretim maliyetlerini düşürebilir. Kablolanmanın azaltılması, bataryanın kullanım ömrü boyunca bakım sorunları olasılığını da azaltır [11].

Kablosuz batarya yönetim sistemlerinin avantajları açık olsa da dikkate alınması gereken zorluklar da vardır. Bunlar arasında çeşitli çevresel koşullarda sağlam iletişimi sağlamak ve farklı üreticiler arasında birlikte çalışabilirlik için standartlar geliştirmek yer almaktadır. Devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, otomotiv endüstrisi ve ötesinde kablosuz batarya yönetim sistemlerinin işlevselliğini ve güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir [14], [15].

Sonuç olarak, kablosuz batarya yönetim sistemleri, tasarım, maliyet ve operasyonel verimlilik açısından önemli faydalar sunarken, sürdürülebilir ve güvenilir batarya teknolojilerine yönelik artan talebi karşılayarak elektrikli araçların geleceğinde kritik bir rol oynamaya hazırlanmaktadır [13]. Geleneksel sistemlere kıyasla sunduğu avantajlar, bu teknolojinin yaygınlaşmasını hızlandırmakta ve gelecekteki enerji yönetimi uygulamalarında kilit bir rol oynamasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, kablosuz BYS'in bir türeği olan ESP32 ile batarya yönetim sistemi entegrasyonu kullanılmış ve çıktıları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

1.1. Literatür Özeti, Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Kablosuz batarya yönetim sistemleri(kBYS) batarya performansını artırma, sistem karmaşıklığını azaltma ve ölçeklenebilirliğini geliştirme potansiyeli nedeniyle akademik araştırmalarda ve endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla ilgi görmektedir.

- ***“Wireless Battery Management Systems: Innovations, Challenges, and Future Perspectives”*** İlgili Akademik çalışmada, kBYS alanındaki en son teknolojileri ele almakta, çeşitli akademik ve ticari çözümleri karşılaştırmaktadır. Yenilikler, zorluklar ve gelecekteki yönelimleri vurgulayarak, mevcut araştırmalar ve uygulamalar hakkında detaylı bir genel bakış sunmaktadır [16].
- ***“A Survey of Wireless Battery Management System: Topology, Emerging Trends, and Challenges”*** İlgili Akademik çalışmada, kBYS topolojileri üzerine derinlemesine bir literatür taraması sunmakta, batarya yönetiminde kablosuz sistemlerin gelecekteki potansiyeline vurgu yapmaktadır. Çeşitli mimarileri kategorize etmekte ve kBYS 'in karşılaştığı ortaya çıkan eğilimler ve zorlukları tartışmaktadır [17].

- ***“Towards a Smarter Battery Management System for Electric Vehicle Applications”*** İlgili Akademik çalışmada, batarya durumu tahmini ve yönetimi alanındaki gelişmeleri incelemekte ve elektrikli araçlarda performansı artırmak için kablosuz teknolojinin entegrasyonunun önemini vurgulamaktadır [18].
- ***“Battery Technologies and Functionality of Battery Management System for EVs: Current Status, Key Challenges, and Future Prospectives”*** İlgili Akademik çalışmada, elektrikli araçlardaki çeşitli batarya teknolojilerini ve batarya yönetim sistemlerinin işlevselliklerini tartışmaktadır. Kablosuz teknolojilerin entegrasyonu da dahil olmak üzere, batarya yönetimini geliştirme konusunda mevcut zorluklara ve gelecekteki beklentilere değinmektedir [19].
- ***“Wireless Battery Management System for Safe, High-Capacity Energy Storage for Electric Vehicles and the Grid”*** İlgili Akademik çalışmada, elektrikli araçlar ve şebeke sistemlerinde yüksek kapasiteli enerji depolama uygulamaları için tasarlanmış bir kablosuz batarya yönetim sistemi üzerine yapılan araştırmayı sunmaktadır. Batarya yönetiminde kablosuz teknolojinin kullanımının güvenlik ve verimlilik avantajlarını tartışmaktadır [20].
- ***“Development of Wireless Battery Monitoring for Electric Vehicle”*** İlgili Akademik çalışmada, elektrikli araçlar için bir kablosuz batarya izleme sisteminin geliştirilmesi ve uygulanmasına odaklanmaktadır. Sistemin mimarisi, iletişim protokolleri ve performans ölçütlerini incelemektedir [21].

Bu tezin amacı, lityum-iyon bataryaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü yönetimini sağlamak için kablosuz bir batarya yönetim sistemi tasarlamak ve geliştirmektir. Tez hem donanım hem de yazılım tasarımıyla kablosuz BYS'in avantajlarını ortaya koyarak enerji depolama sistemleri, elektrikli araçlar ve taşınabilir cihazlar gibi uygulamalara katkı sağlamaktadır. İçerğinde, kullanılan bileşenler, sistemin tasarım süreci, karşılaşılan teknik zorluklar ve bunlara getirilen çözümler detaylı bir şekilde açıklanmış; sistemin performansı test edilerek analiz edilmiştir.

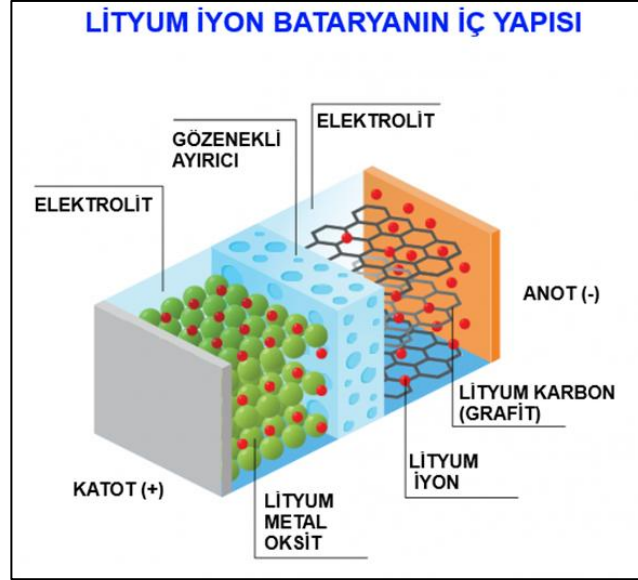
2. LİTYUM İYON BATARYALARIN ÖZELLİKLERİ, PERFORMANSLARI, KRİTERLERİ VE GELECEK YÖNELİMLERİ

2.1. Lityum-İyon Bataryaların Genel Özellikleri

Lityum iyon bataryalar, verimli enerji depolama yetenekleri ve çok yönlü oluşları sayesinde birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir lityum iyon bataryanın iç yapısını inceleyecek olursak temelde beş bölümde inceleyebiliriz. Bunlar:

- **Anot:** Genellikle, şarj sırasında lityum iyonlarını depolayabilen kısımdır ve grafitten yapılmıştır. Daha yüksek kapasite için silikon bazlı anotları da araştıran yeni teknolojiler mevcuttur [22]. Şarj sırasında lityum iyonları katottan anoda hareket eder ve burada depolanır. Deşarj sırasında ise iyonlar tekrardan katoda akar ve bu süreçte elektrik enerjisi üretilir.
- **Katot:** Katot için yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında lityum bileşikli olan lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum demir fosfat (LiFePO_4), lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA), lityum titanat (LTO), lityum mangan oksit spinal (LMO) ve lityum nikel mangan kobalt oksit (NMC) bulunur [22].
- **Elektrolit:** Elektrolit, genellikle lityum tuzunun organik bir çözücü içinde çözülmesiyle elde edilir ve lityum iyonlarının anot ile katot arasında hareket etmesini sağlar. Lityum iyonlarının taşınmasını kolaylaştırırken, elektron akışını engelleyerek bataryanın elektrokimyasal reaksiyonlarını sürdürmek için gereklidir [23].
- **Ayırıcı:** Ayırıcı, polietilen (PE) veya polipropilenden (PP) yapılmış gözenekli bir zar olup, anodu ve katodu fiziksel olarak ayırır. Lityum iyonlarının geçmesine izin verirken, anot ile katot arasındaki doğrudan teması önleyerek kısa devre oluşumunu engeller. Ayrıca, batarya aşırı ısındığında iyon taşınmasını durdurarak güvenlik sağlar [22].

- **Akım Toplayıcı:** Anot için tipik olarak bakır, katot için ise alüminyum kullanılır. Bu iletkenler, bataryanın şarj ve deşarj döngüleri sırasında üretilen elektrik akımını toplar ve iletir. Anot ve katot birer akım toplayıcıdır [24].



Şekil 2.1: Lityum iyon bataryanın iç yapısı[25].

Lityum iyon bataryalar, kimyasal bileşimlerine ve yapılarına göre çeşitli tiplere ayrılır. Her bir batarya türü, performans, güvenlik, enerji yoğunluğu ve ömür gibi farklı kriterlerde kendine özgü avantajlar ve dezavantajlar sunar. Bu nedenle, her tip batarya, belirli uygulamalara uygun hale getiren özelliklere sahiptir. Lityum iyon bataryalar, elektrikli araçlardan tüketici elektroniğine kadar geniş bir yelpazede kullanılır. Lityum iyon bataryalarla batarya paketi tasarımı yapılırken, maksimum, minimum ve nominal gerilim değerleri ile kapasite değerleri dikkate alınmaktadır. Günümüzde en çok tercih edilen lityum iyon batarya bileşikleri şunlardır:

- **Lityum Kobalt Oksit (LiCoO₂):** Bu bileşimdeki bataryalar, katot malzemesi olarak kobalt oksit (CoO₂) içermektedir. Bu batarya tipinin avantajları arasında yüksek enerji yoğunluğu ve iyi termal stabilite yer alır. Ancak dezavantajları, diğer batarya türlerine göre daha kısa ömürlü olması ve termal stabilitenin biraz daha düşük kalması ile birlikte kobaltın yüksek maliyeti ve sınırlı bulunabilirliği nedeniyle sürdürülebilirlik sorunlarıdır. LCO tip bataryaların nominal gerilim değeri 3.7V, maksimum gerilim değeri 4.2V, minimum gerilim değeri ise 2.5V ile 3V aralığındadır [24], [26], [27].

- **Lityum Demir Fosfat (LiFePO₄ veya LFP):** Bu bileşimdeki bataryalar, katot malzemesi olarak demir fosfat (LiFePO₄) kullanılmaktadır. Bu tür bataryalar, mükemmel termal stabilite ve güvenlik özelliklerine sahiptir ve uzun çevrim ömrü sunar. Diğer lityum bataryalara göre daha çevre dostu olan bu bataryalar, kobalt bazlı bataryalara kıyasla daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri için idealdir ve özellikle güvenliğin kritik önem taşıdığı durumlarda tercih edilir. LFP tip bataryaların nominal gerilim değeri 3.2V, maksimum gerilim değeri 3.6V ile 3.65V arasında, minimum gerilim değeri ise 2.5V ile 2.8V aralığındadır [24], [26], [27].
- **Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit (LiNiMnCoO₂ veya NMC):** Bu bileşimdeki bataryalar, katot malzemesi olarak nikel, mangan ve kobalt oksit karışımını (NiMnCoO₂) içermektedir. Bu tip bataryalar yüksek enerji yoğunluğu ile bilinir. NMC bataryalar, nikelin artırılması yoluyla daha yüksek kapasite veya daha iyi termal stabilite sağlayacak şekilde ayarlanabilir. Özellikle NMC 811 gibi formülasyonlar, elektrikli araçlar için ideal özellikler sunar. NMC bataryalar diğerlerine oranla daha karmaşık bir üretim süreci vardır ve yüksek nikel içeriği, potansiyel stabilite sorunlarına yol açabilir. Elektrikli araçlar ve taşınabilir cihazlar yaygın olarak kullanılır. NMC, enerji yoğunluğu ve güvenlik arasında bir denge sunduğundan, çok yönlü bir seçimdir. NMC tip bataryaların nominal gerilim değeri 3.7V, maksimum gerilim değeri 4.2V arasında, minimum gerilim değeri ise 2.5V ile 3V aralığındadır [24], [26], [27].
- **Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (LiNiCoAlO₂ veya NCA):** Bu bileşimdeki bataryalar, katot malzemesi olarak nikel, kobalt ve alüminyum oksit (NiCoAlO₂) içermektedir. Bu tip bataryalar yüksek enerji yoğunluğu ile termal stabilite sunar. Fakat diğer lityum iyon türlerine kıyasla daha yüksek maliyete ve nispeten daha düşük güvenliğe sahiptir. NCA tip bataryaların nominal gerilim değeri 3.6V veya 3.7V, maksimum gerilim değeri 4.2V, minimum gerilim değeri ise 2.5V ile 3V aralığındadır [24], [26], [27].
- **Lityum Mangan Oksit (LiMn₂O₄ veya LMO):** Bu bileşimdeki bataryalar, katot malzemesi olarak mangan oksit (Mn₂O₄) içermektedir. Bu tip bataryalar iyi termal stabilite, güvenlik ve hızlı şarj olma yetenekleri vardır. Fakat LMO

bataryalar, kobalt bazlı bataryalara kıyasla daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. LMO tip bataryaların nominal gerilim değeri 3.7V, maksimum gerilim değeri 4.2V, minimum gerilim değeri ise 2.5V ile 3V aralığındadır [24], [26], [27].

- **Lityum Titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ veya LTO):** Bu bileşimdeki bataryalar, anot malzemesi olarak lityum titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) kullanır. Bu malzeme, LTO bataryalarının hızlı şarj kapasitesi, uzun çevrim ömrü ve yüksek güvenlik sunmasını sağlar. Lityum titanat, düşük bir gerilim seviyesinde çalışır ve termal stabilitesi yüksektir. Genellikle elektrikli otobüslerde ve şebek enerji depolama uygulamalarında kullanılır. LTO bataryaların nominal gerilim değeri genellikle 2.4V'dur. Maksimum gerilim değeri yaklaşık 2.8V'ye kadar çıkarken, minimum gerilim değeri ise 1.8V civarındadır [24], [26], [27].

Tablo 2.1: Lityum İyon bataryaların karşılaştırılması.

Batarya Tipleri	Ömür	Özgöl Enerji	Özgöl Güç	Termal Kararlılık	Maliyet
LFP	Çok uzun	Orta	Yüksek	Olağanüstü	Düşük
LCO	Orta	Yüksek	Düşük	Çok kötü	Düşük
LMO	Çok kısa	Düşük	Orta	Çok iyi	Düşük
NMC	Uzun	Yüksek	Orta	İyi	Düşük
LTO	Çok uzun	Çok Düşük	Orta	Orta	Yüksek
NCA	Kısa	Çok Yüksek	Orta	Çok kötü	Orta

Lityum-iyon bataryalar kimyasal bileşimlerinin yanı sıra fiziksel yapılarıyla da sınıflandırılırlar.

- **Silindirik Hücreler:** Bu hücreler, silindir şeklindedir ve genellikle standart boyutlarda üretilirler (örneğin, 18650, 21700). Genellikle tüketici elektroniği ve elektrikli araçlarda kullanılır. Metal bir kutu içinde kapatılırlar. İyi mekanik stabilite ve termal performans sağlarlar. Avantajları ise yüksek mekanik stabilite ve güvenlik, şekilleri sayesinde iyi termal yönetim, maliyet etkin üretim sürecidir. Dizüstü bilgisayarlar, elektrikli el aletleri ve elektrikli araçlarda bulunur. Örneğin, Tesla araçlarında silindirik tip hücreler kullanılmaktadır [24], [28].
- **Prizmatik Hücreler:** Prizmatik hücreler, dikdörtgen şekle sahiptir ve batarya paketlerinde alanın verimli kullanılması için sert bir kasa içinde bulunurlar.

Düz dikdörtgen şekilli hücrelerdir ve genellikle sert bir plastik muhafaza içinde yer alırlar. Daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve belirli şekillerde tasarlanabilirler. Avantajları ise silindirik hücelere kıyasla daha iyi hacim kullanımı, daha yüksek enerji yoğunluğu ve kompakt tasarımlara daha kolay entegre edilebilirliktir. Bu tip pillerin dezavantajları, üretim maliyeti daha yüksek ve şişme potansiyeli ve termal yönetim etkinliği daha düşüktür. Akıllı telefonlar, tabletler ve elektrikli araçlarda kullanılır [24], [28].

- **Poşet Hücreler:** Poşet hücreler, esnek yapıya sahip olup yumuşak, folyo benzeri bir poşet içinde mühürlenmiştir. Çeşitli şekil ve boyutlarda üretilebilirler. Çeşitli şekil ve boyutlarda üretilebilir, bu da alan verimliliğini maksimize eder. Avantajları ise, hafif esnek tasarımı, özel şekiller için uygunluğu ve sert bir dış yapıya sahip olmaması nedeniyle daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Dezavantajları, şişmeye karşı hassastır ve dikkatli kullanılmalıdır, silindirik ve prizmatik hücelere göre daha az dayanıklıdır. Genellikle dronlar, elektrikli araçlar ve taşınabilir elektroniklerde kullanılır [24], [28].



Şekil 2.2: Lityum iyon batarya paketlenme tipleri.

2.2. Lityum İyon Batarya Terminolojileri

Lityum-iyon bataryalar, enerji depolama teknolojilerinde kritik bir öneme sahiptir. Bu bataryaların performansını, ömrünü ve güvenliğini doğru bir şekilde değerlendirebilmek için temel terminoloji ve kavramların anlaşılması gereklidir. Bu

bölümde, bataryaların özelliklerini tanımlamak ve performanslarını değerlendirmek için lityum-iyon bataryalarla ilgili temel terimler ve kavramlar ele alınacaktır. Bir bataryayı doğru bir şekilde değerlendirebilmek için aşağıdaki kavramların bilinmesi önemlidir. Bu kavramlar şunlardır:

- **Kapasite:** Bataryanın depolayabileceği toplam enerji miktarıdır, genellikle amper-saat “Ah” cinsinden ölçülür.
- **Enerji:** Bataryanın depoladığı toplam enerjiyi ifade eder, genellikle watt-saat (Wh) cinsinden ölçülür.
- **Açık Devre Voltajı:** Bataryanın herhangi bir yüke bağlı olmadığı durumdaki gerilim değeridir. Birimi volt “V” olarak ifade edilmektedir.
- **Çalışma Voltajı:** Bataryanın normal çalışma koşullarındaki voltaj değeridir. Birimi volt “V” olarak ifade edilmektedir.
- **Boşalma Oranı:** Bataryanın belirli bir sürede ne kadar enerji boşaltabileceğini ifade eder. Örneğin, 1C oranı, bataryanın kapasitesini bir saat içinde boşaltabileceği anlamına gelir.
- **Boşalma Derinliği:** Bataryanın mevcut kapasitesinin ne kadarının kullanıldığını gösterir.
- **Şarj Durumu:** Bataryanın mevcut kapasitesinin toplam kapasitesine oranıdır. Yüzde olarak ifade edilir.
- **Sağlık Durumu:** Bataryanın performans ve kapasitesinin zaman içindeki durumunu gösterir. Yeni batarya kapasitesine kıyasla yüzdesel olarak ifade edilir.
- **Kendi Kendine Boşalma:** Bataryanın kullanılmadığı durumlarda bile enerjisini kaybetme oranıdır.
- **Nominal Voltaj:** Bataryanın tipik veya ortalama çalışma voltajıdır.
- **Kesilme Voltajı:** Bataryanın güvenli bir şekilde deşarj edilebileceği minimum voltaj değeridir.
- **Deşarj Eğrisi:** Bataryanın boşalma süreci boyunca voltaj değişimini gösteren bir grafiktir.
- **Çevrim Ömrü:** Bataryanın tam şarj ve deşarj döngülerinin sayısını ifade eder. Batarya kapasitesinin %80’inin altına düştüğü noktaya kadar sayılır.
- **Nominal Kapasite:** Bataryanın belirli bir boşalma oranı (C-rate) için nominal kapasitesidir.

- **Maksimum Sürekli Deşarj Akımı:** Bataryanın sürekli olarak sağlayabileceği maksimum akım miktarıdır.

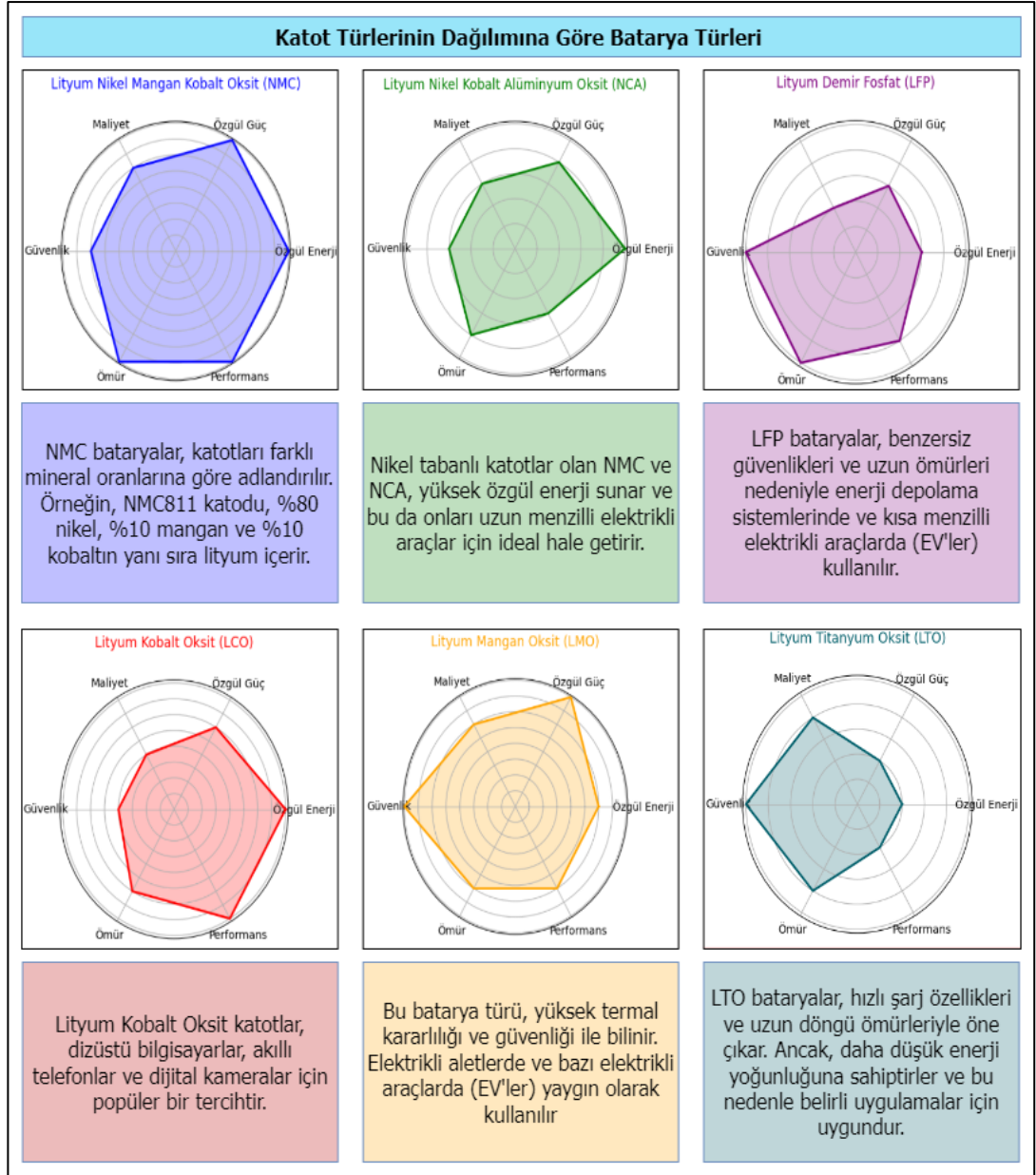
2.3. Lityum-İyon Bataryaların Performans Kriterleri

Lityum-iyon bataryaların performansı, enerji yoğunluğu, güç kapasitesi, çevrim ömrü, şarj/deşarj verimliliği ve iç direnç gibi temel kriterlere bağlıdır. Bu kriterlerin doğru anlaşılması, bataryaların farklı kullanım senaryolarındaki verimliliğini ve güvenilirliğini değerlendirmek için kritiktir. Bu bölümde, bu performans kriterleri ve batarya seçimindeki önemi ele alınacaktır.

- **Özgül Enerji Yoğunluğu:** Bataryanın birim kütle başına depoladığı enerji miktarı, genellikle watt-saat/kilogram (Wh/kg) cinsinden ölçülür. Bu, bataryanın ne kadar enerji depolayabildiğini gösterir. Günümüz batarya teknolojisinde enerji yoğunluğunun tipik aralığı 100 ile 250 Wh/kg'dır. Yüksek spesifik enerji yoğunluğu, daha hafif ve kompakt batarya tasarımlarına olanak tanır, bu da onları taşınabilir elektronikler ve elektrikli araçlar (EV'ler) için ideal hale getirir [24].
- **Hacimsel Enerji Yoğunluğu:** Bataryanın birim hacim başına depoladığı enerji miktarı, watt-saat/litre (Wh/L) cinsinden ölçülür. Günümüz batarya teknolojisinde hacimsel enerji yoğunluğunun tipik aralığı 250 ile 680 Wh/L'dir. Bu metrik bilgi, elektrikli araçlar ve kompakt elektronik cihazlar gibi alanın sınırlı olduğu uygulamalar için önemlidir [24].
- **Özgül Güç Yoğunluğu:** Bataryanın birim kütle başına ürettiği güç miktarı, genellikle watt/kilogram (W/kg) cinsinden ölçülür. Günümüz batarya teknolojisinde güç yoğunluğunun tipik aralığı 300 ile 1500 W/kg. Yüksek spesifik güç yoğunluğu, güç araçları ve performans odaklı elektrikli araçlar gibi hızlı deşarj oranlarına ihtiyaç duyulan uygulamalar için önemlidir [24].
- **Çevrim Dayanıklılığı:** Bataryanın kapasitesi önemli ölçüde azalınca kadar kaç kez şarj ve deşarj döngüsüne girebileceğini gösterir. Günümüz batarya teknolojisinde çevrim dayanıklılığı bataryanın kimyasına ve kullanım koşullarına bağlı olarak 400 ile 1.200 döngü arasında değişir. Daha uzun çevrim dayanıklılığı, bataryanın ömrünü uzatarak zamanla değiştirme maliyetlerini azaltır [24], [29].

- **Şarj/Deşarj Verimliliği:** Bataryanın şarj sırasında girdi enerjisini dönüştürme ve deşarj sırasında enerjiyi serbest bırakma verimliliğidir. Günümüz batarya teknolojisi ile şarj/deşarj verimliliğinin tipik aralığı %80 ile %90 kabul edilmektedir. Yüksek verimlilik, depolanan enerjinin büyük kısmının etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar ve enerji kaybını en aza indirir [24].
- **Kendiliğinden Deşarj Oranı:** Bataryanın kullanılmadığında kaybettiği şarj oranıdır. Günümüz batarya teknolojisi ile kendiliğinden deşarj oranı için kabul edilebilir tipik aralık şarj durumu ve batarya tasarımına bağlı olarak ayda %0,35 ile %2,5 arasında değişir. Düşük kendiliğinden deşarj oranları, bataryaların uzun süre depolandığı uygulamalar için tercih edilir [24].
- **İç Direnç:** Bataryanın içindeki elektrik akımının geçişine karşı gösterdiği direnç, yüksek deşarj oranları sırasında bataryanın performansını ve verimliliğini doğrudan etkiler. İç direnç, bataryanın kendi iç yapısının yanı sıra, sistemin diğer bileşenlerinin direncinden de kaynaklanır. Genellikle, bataryanın iç direnci ile sistem bileşenlerinin iç dirençlerinin toplamı mili-ohm “mΩ” seviyesindedir. Düşük iç direnç, yüksek güç gerektiren uygulamalar için önemlidir, çünkü daha iyi verimlilik ve çalışma sırasında azaltılmış ısı üretimi sağlar [30].
- **Nominal Hücre Gerilimi:** Bataryanın deşarj sırasında çalıştığı ortalama gerilimdir. Günümüz batarya teknolojisi ile nominal hücre gerilim değeri Lityum titanatta 2.3 V'den çoğu lityum-iyon kimyasal bileşikler için 3.6-3.85 V'ye kadar değişir. Nominal gerilim, toplam enerji çıkışını ve cihazlarla uyumluluğu etkiler [24].

Sonuç olarak, lityum-iyon bataryaların performans kriterleri, farklı uygulamalar için uygunluk ve verimliliği belirler. Bu kriterlerin doğru analizi, uygun batarya seçimi ve etkin kullanım için kritik öneme sahiptir. Şekil 2.3'te, altı farklı lityum-iyon bataryanın performans, güç, enerji, ömür, maliyet ve güvenlik açısından karşılaştırması sunulmaktadır.



Şekil 2.3: Lityum iyon bataryaların performans türüne göre karşılaştırılması [31].

Lityum-iyon bataryaların performans kriterleri, bataryaların farklı kullanım alanlarındaki uygunluğunu belirlemede kritik bir rol oynar. Bu kriterlerin doğru anlaşılması, batarya seçimi ve tasarımında verimlilik ve güvenliği artırmak için esastır. Lityum-iyon bataryalar, farklı kimyasal bileşimleri ve yapıları sayesinde çeşitli uygulamalara uygun hale gelir ve farklı enerji yoğunluğu, güvenlik, maliyet ve performans özellikleri sunar. Bu nedenle, bataryanın türü ve özellikleri, kullanılacağı uygulamanın gereksinimlerine göre dikkatlice seçilmelidir.

3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ:

TOPOLOJİLER, TEMEL FONSKİYONLAR, UYGULAMALAR VE TRENDLER

Bu bölümde, lityum-iyon bataryaların performansını ve güvenliğini artırmada kritik bir öneme sahip olan Batarya Yönetim Sistemleri (BYS) ele alınmaktadır. BYS; bataryaların voltaj, sıcaklık ve şarj durumu gibi temel parametrelerini sürekli olarak izleyerek güvenli ve verimli çalışmasını sağlayan sistemlerdir. Elektrikli araçlardan yenilenebilir enerji depolama çözümlerine kadar geniş bir uygulama alanında kullanılan BYS, batarya sağlığını izleme, performansı optimize etme ve güvenliği sağlama işlevleriyle modern teknolojinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu bölümde ayrıca, merkezi, dağıtılmış ve modüler BYS türleri ile kablosuz iletişim yöntemleri incelenecek ve BYS'nin başlıca uygulama alanlarına değinilecektir.

- **Elektrikli Araçlar (EV'ler):** Elektrikli araçlarda BYS, bataryanın şarj ve deşarjını yönetir, şarj durumu (SoC) ve sağlık durumu (SoH) izler ve aşırı şarj, aşırı ısınma ve kısa devre gibi durumları önleyerek güvenliği sağlar. Elektrikli araçlar mimari türlerine ve araç tasarımına bağlı olarak merkezi, dağıtılmış, modüler ve hibrit mimariler kullanılır. Örneğin, Tesla merkezi bir BYS kullanırken, Togg T10X daha güvenli ve verimli bir dağıtılmış yaklaşım benimser [32], [33].



Şekil 3.1: Tesla ModelS [33].



Şekil 3.2: Togg T10x [34].

- **Yenilenebilir Enerji Depolama Sistemleri:** Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre olan batarya sistemlerinde BYS, bataryaların şarj ve deşarj döngülerini optimize ederek maksimum verimlilik ve uzun ömür sağlar. BYS, ev enerji depolama çözümlerinden geniş çaplı şebeke depolama sistemlerine kadar arz-talep dengesini sağlamak için kullanılır.
- **Taşınabilir Elektronik Cihazlar:** Akıllı telefonlar, dizüstü bilgisayarlar ve tabletlerde kullanılan BYS, batarya performansını yönetir, batarya ömrünü uzatır ve güvenliği sağlar. Cihazlarda aşırı şarj ve aşırı ısınma gibi durumları önleyerek olası arızaları ve güvenlik risklerini engeller.
- **Elektrikli Bisikletler (E-bikes) ve Scooterlar:** Elektrikli bisikletler ve scooterlarda BYS, bataryaların güvenli sınırlar içinde yönetilmesini ve performansın optimize edilmesini sağlar. Örneğin, birçok e-scooter, 48V NMC bataryalarını yönetmek için BYS kullanarak batarya ömrünü uzatır ve güvenliği artırır.



Şekil 3.3: Elektrikli scooter [35].

- **Endüstriyel Uygulamalar:** Endüstriyel ortamlarda forkliftler ve otomatik yönlendirmeli araçlar (AGV'ler) gibi ekipmanlardaki batarya paketlerini verimli bir şekilde yöneten BYS, zorlu koşullarda operasyonel güvenilirliği ve güvenliği sağlar.



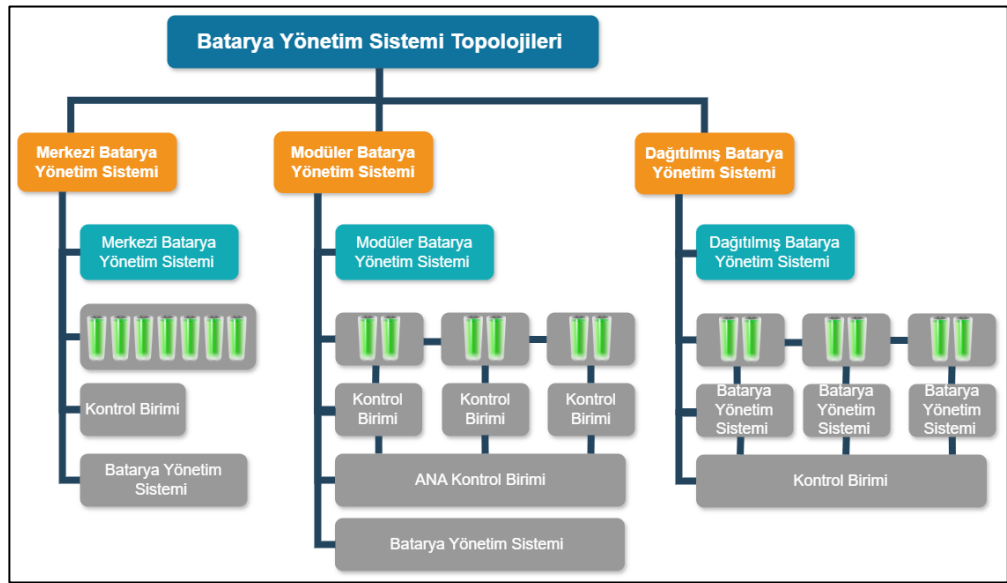
Şekil 3.4: Otomatik yönlendirilmeli araç (AGV) [36].

- **Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS):** BYS, elektrik kesintileri sırasında güç sağlamak için bataryaların sağlığını ve performansını yönetir. Kritik anlarda yedek güç sistemlerinin güvenilir enerji sağlamasını temin eder.
- **Havacılık ve Savunma:** Havacılık sektöründe BYS, uçaklar, dronlar ve diğer savunma ekipmanlarındaki batarya sistemlerini izler, böylece güvenlik ve performansı en üst düzeyde tutar.
- **Tıbbi Cihazlar:** BYS, şarj edilebilir bataryalara dayanan tıbbi ekipmanlarda güvenli ve verimli çalışmayı sağlar. Özellikle taşınabilir teşhis araçları ve yaşam destek sistemleri gibi cihazlarda güvenilirlik kritik öneme sahiptir.

3.1. Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri

BYS'ler bataryaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü bir şekilde çalışmasını sağlamak için kullanılan teknolojik çözümlerdir. Farklı uygulamalar ve ihtiyaçlar doğrultusunda BYS, merkezi, dağıtılmış ve modüler olmak üzere üç ana türe ayrılır. Her bir tür, kendi avantajları ve dezavantajları ile belirli kullanım alanlarına hizmet eder.

- **Merkezi Batarya Yönetim Sistemi:** Tüm hücreleri tek bir kontrolör yönetir, düşük maliyetli ve basittir, ancak büyük batarya paketlerine uyum sağlamakta zorlanır ve kontrolör arızası tüm sistemi etkiler.
- **Dağıtılmış Batarya Yönetim Sistemi:** Her hücre veya modül kendi yönetim birimine sahiptir ve merkezi kontrolörle iletişim kurar. Büyük batarya paketlerinde ölçeklenebilir ve uyumlu, ancak karmaşık ve maliyetlidir.
- **Modüler Batarya Yönetim Sistemi:** Merkezi ve dağıtılmış sistemlerin hibritidir, genişletilebilir ve farklı uygulamalara uyarlanabilir. Ancak, karmaşık yapısı nedeniyle daha fazla uzmanlık gerektirir.



Şekil 3.5: Batarya yönetim sistemi topolojileri.

3.2. Batarya Yönetim Sistemi Temel Fonksiyonları

Batarya yönetim sistemleri, bataryaların güvenliğini, performansını ve ömrünü artıran temel işlevler sunar. Bu sistemler, bataryaların optimum koşullarda çalışmasını sağlayarak enerji depolama sistemlerinin verimliliğini ve güvenliğini artırır. Başlıca temel fonksiyonlar şunlardır:

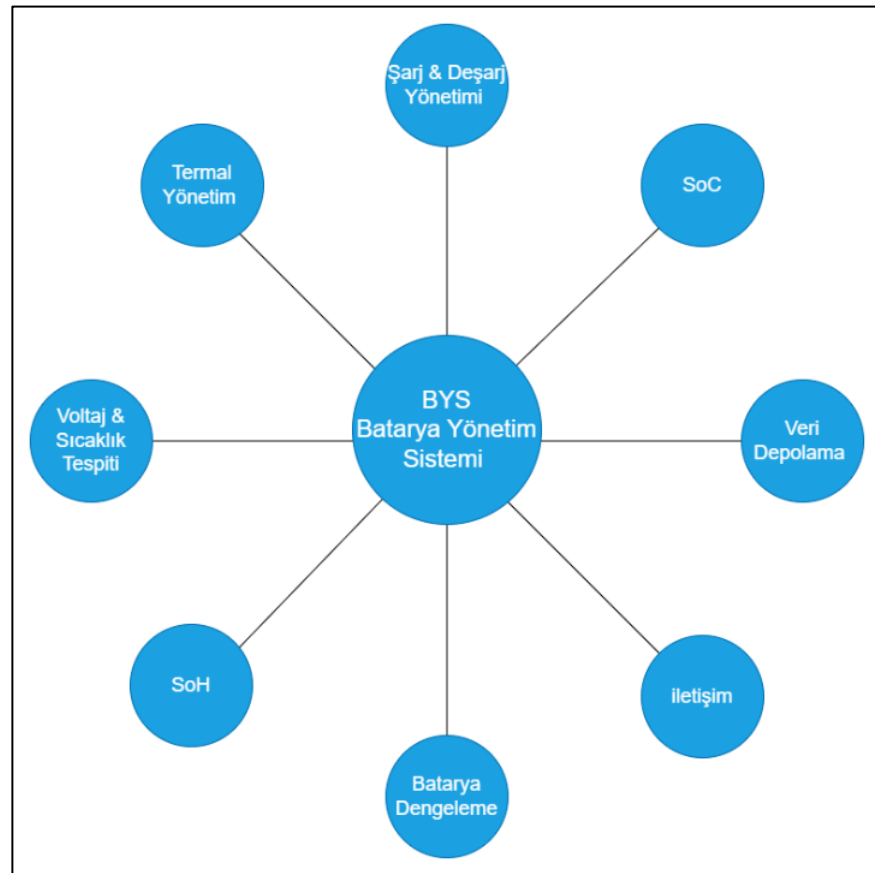
- **İzleme:** BYS'lerin en önemli işlevlerinden biri, bataryaların voltaj, sıcaklık, akım ve şarj durumu (SoC) gibi kritik parametrelerini sürekli olarak izlemektir. Bu fonksiyon, bataryanın her bir hücresinin durumu hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlayarak, olası sorunları erken tespit etme ve önleme imkânı tanır.

İzleme sistemi sayesinde, bataryanın genel sağlığı ve performansı hakkında kapsamlı bir değerlendirme yapılabilir. Gerilim, sıcaklık, akım, sağlık durumu (SoH) ve Denge durumu batarya yönetim sistemi tarafından izlenir [37], [38].

- **Dengeleme:** Dengeleme, BYS'nin bataryanın tüm hücrelerinin eşit şekilde şarj ve deşarj olmasını sağlama işlevini ifade eder. Hücreler arasında gerilim farklılıklarının oluşması, bataryanın genel performansını ve ömrünü olumsuz etkileyebilir. BYS, bu farklılıkları gidererek hücrelerin dengeli çalışmasını sağlar ve böylece bataryanın kullanım ömrünü uzatır ve güvenliğini artırır. Tüm hücrelerin eşit şekilde şarj ve deşarj olmasını sağlar [37], [38].
- **Koruma:** BYS, bataryayı aşırı şarj, aşırı deşarj, yüksek sıcaklık ve termal kaçak gibi potansiyel tehlikelerden korur. Bu koruma fonksiyonu, bataryanın güvenliğini sağlamak için hayati önem taşır. BYS, belirlenen güvenlik sınırları aşıldığında devreye girerek bataryanın zarar görmesini önler ve yangın ya da patlama gibi ciddi riskleri minimize eder [37], [38].
- **İletişim:** BYS, bataryanın durumu hakkında veri toplar ve bu verileri dahili ve harici iletişim protokolleri aracılığıyla iletir. İletişim fonksiyonu, batarya yönetim sistemi ve diğer araçlar veya kontrol merkezleri arasında bilgi alışverişi yapılmasını sağlar. Örneğin, elektrikli araçlarda BYS, aracın merkezi kontrol birimiyle iletişim kurarak batarya durumu hakkında güncel bilgileri aktarır ve gerekli ayarlamaların yapılmasına olanak tanır [37], [38].
- **Şarj Durumu (SoC) Tahmini:** Şarj Durumu (SoC), bir bataryanın mevcut şarj seviyesini belirten bir parametredir ve genellikle yüzde (%) cinsinden ifade edilir. SoC, bataryanın mevcut kapasitesinin tam dolu kapasitesine oranını gösterir, bu da bataryanın ne kadar enerji depolayabileceği ve mevcut enerji miktarının ne kadar olduğu hakkında bilgi verir. SoC hesaplaması, Voltaj Tabanlı Tahmin, Amper-Saat (Coulomb Sayımı), Model Tabanlı Tahmin ve SoC Hata Düzeltme yöntemleri kullanılarak yapılabilir [37], [38].
- **Sağlık Durumu (SoH) Tahmini:** Bir bataryanın genel sağlık durumunu ve performansını belirten bir parametredir. SoH, genellikle yüzde(%) olarak ifade edilir ve bataryanın orijinal kapasitesi ile mevcut kapasitesi arasındaki ilişkiyi gösterir. SoH, bir bataryanın ne kadar süredir kullanıldığını ne kadar kapasitesinin kaldığını ve bataryanın performansını etkileyen faktörleri anlamak için kullanılır. SoH tahmini yapılırken genellikle şarj/deşarj döngü

sayısı, kapasite kaybı, iç direnç değışiklikleri ve batarya sıcaklığı gibi veriler dikkate alınır. SoH'nin doğru tahmini, bataryanın ömrünü uzatmak ve kullanım güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir [37], [38].

- **Veri Depolama:** Veri depolama, batarya yönetim sistemlerinde (BYS) bataryanın durumu ve performansı ile ilgili verilerin toplanması, saklanması ve analiz edilmesi sürecidir. Bu veriler, bataryanın voltajı, sıcaklığı, akımı, şarj durumu (SoC), sağlık durumu (SoH) ve hücre dengeleme bilgilerini içerebilir. Veri depolama, performans izleme, durum analizi, tahmin ve bakım ile verimlilik ve güvenlik gibi alanlarda kritik bir öneme sahiptir [37], [38].
- **Şarj/Deşarj Yönetimi:** Bu fonksiyon, bataryanın ömrünü uzatmak ve performansını en üst düzeye çıkarmak için şarj ve deşarj sırasında uygun voltaj ve akım seviyelerinin korunmasını sağlar. Şarj/deşarj yönetimi, bataryanın aşırı şarj veya aşırı deşarj olmasını engelleyerek güvenliğini artırır ve enerji verimliliğini optimize eder. Ayrıca, bataryanın belirlenen çalışma aralığında kalmasını sağlamak için sıcaklık ve akım değerlerini sürekli izler ve gerektiğinde müdahale eder [37], [38].

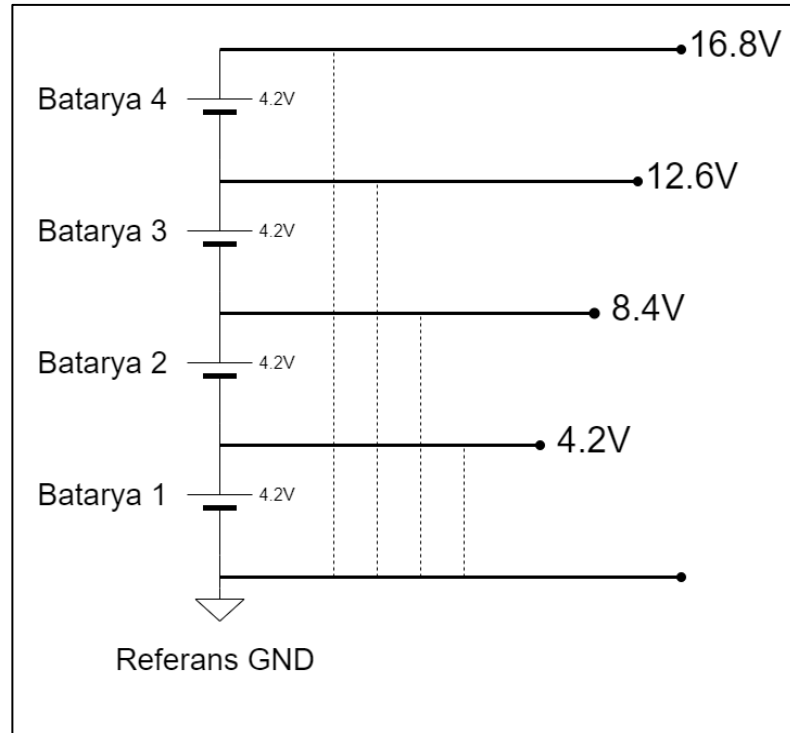


Şekil 3.6: Batarya yönetim sistemi temel fonksiyonları.

3.2.1. Hücre İzleme ve Koruma

Batarya Yönetim Sistemleri (BYS), özellikle lityum-iyon bataryaların güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak için hayati öneme sahiptir. BYS'nin iki kritik işlevi hücre izleme ve korumadır. Hücre İzlemeyi voltaj izleme, sıcaklık izleme ve akım izleme olarak sınıflandırabiliriz.

- **Voltaj İzleme:** Batarya Yönetim Sistemi (BYS), hem batarya paketinin toplam voltajını hem de bireysel hücre voltajlarını izler. BYS, toplam voltajı ölçerek batarya sisteminin genel şarj durumu ve sağlığını değerlendirmeye yardımcı olur ve bu sayede güvenli bir çalışma için minimum ve maksimum voltaj sınırlarının korunmasını sağlar [39]. Ayrıca, BYS her bir hücrenin voltajını sürekli izleyerek, her hücrenin şarj durumunun hassas bir şekilde yönetilmesini ve düşük performans gösteren veya arızalı hücrelerin tespit edilmesini mümkün kılar [38], [40]



Şekil 3.7: Seri bağlı bir batarya hücre gerilimlerinin dağılımı.

BYS, her hücrenin voltajını gerçek zamanlı olarak izlemek için çeşitli sensörler ve algoritmalar kullanır. Bu izleme, voltaj anormalliklerini tespit eder ve tüm hücrelerin güvenli voltaj aralıklarında çalışmasını garanti altına alır [38]. Ayrıca, BYS hücreler

arasındaki voltaj dengesini koruyarak bataryanın performansını artırır ve ömrünü uzatır. Eğer bazı hücrelerin voltajları diğerlerine göre önemli ölçüde yüksek veya düşükse, BYS bu voltajları eşitlemek için dengeleme işlemlerini başlatabilir [38]. BYS, ayrıca bağlantı kopuklukları, gevşek bağlantılar, kalibrasyon kaymaları ve kablolama sorunlarından kaynaklanan voltaj problemlerini teşhis eder. Yüksek direnç veya gevşek bağlantılar, yanlış voltaj okumalarına neden olabilir. Eğer bir hücre bağlantı teli koparsa, bu durum o hücre için tanımlanamayan voltaj okumalarına ve potansiyel olarak komşu hücreleri de etkileyen hatalara yol açabilir [41]. Zamanla, toplam batarya paketinin voltaj sensöründe kalibrasyon kaymaları meydana gelebilir ve bu, ölçülen toplam voltaj ile bireysel hücre voltajlarının toplamı arasında tutarsızlıklara neden olabilir. Böyle bir durum, sorunun çözülene kadar BYS'nin çalışmasını durduran bir güvenli modun tetiklenmesine yol açabilir [39]. Yanlış kablolama veya hasarlı bileşenler, genellikle tek bir hatalı bağlantıdan kaynaklanarak birden fazla voltaj okumasının hatalı olmasına sebep olabilir [41].

- **Doğrudan Voltaj Ölçümü:** Her hücre için hassas voltaj ölçümü sağlar, ancak BYS'yi karmaşık ve maliyetli hale getirir.
- **Çoklayıcı Voltaj Ölçümü:** Voltaj algılama hattı ve ADC sayısını azaltır, ancak daha yavaş ölçüm yapar.
- **Direnç Bölücü Voltaj Ölçümü:** Bir grup hücrenin voltajını ölçmek için direnç bölücü kullanır, ancak hassasiyeti düşüktür.
- **Diferansiyel Voltaj Ölçümü:** Bireysel hücre voltaj farklarını doğru ölçer, ancak ek devreler gerektirir.
- **İzole Voltaj Ölçümü:** Yüksek ve düşük voltajlı devreler arasında izolasyon sağlar, ancak karmaşıktır ve maliyetlidir.
- **Sıcaklık İzleme:** Batarya Yönetim Sistemleri (BYS) için sıcaklık izleme, bataryaların güvenli ve verimli çalışmasını sağlar. BYS, termistörler, RTD'ler, termokupllar ve entegre devre sensörleri kullanarak batarya sıcaklıklarını izler, termal kaçakları önler ve batarya performansını optimize eder. İzleme yöntemi, doğruluk, maliyet ve uygulama gereksinimlerine göre seçilir.
 - **Termokupllar:** Geniş sıcaklık aralığı ve hızlı tepki süresi sunar. Kalibrasyon gerektirir ve elektriksel gürültüye duyarlıdır.
 - **Termistörler:** Yüksek hassasiyetli ve maliyet-etkin, ancak sınırlı sıcaklık aralığına sahiptir.

- **Direnç Sıcaklık Dedektörleri (RTD):** Yüksek doğruluk, geniş aralık ve doğrusallık sağlar, ancak maliyeti yüksektir.
- **Kızılötesi (IR) Termometreler ve Kameralar:** Temassız ölçüm yapar, sıcak noktaları tespit eder. Yüzey emisyonu doğruluğu etkileyebilir.
- **Entegre Devre (IC) Sıcaklık Sensörleri:** Dijital sistemlerle kolay entegrasyon sağlar, ancak hassasiyeti sınırlıdır ve gürültüye duyarlıdır.
- **Fiber Optik Sıcaklık Sensörleri:** Elektromanyetik girişimden etkilenmez, tehlikeli ortamlarda kullanılabilir, ancak maliyeti yüksektir ve kırılmalıdır.
- **Akım İzleme:** Batarya Yönetim Sistemleri (BYS), elektrikli araçlar (EV'ler) ve enerji depolama sistemlerinde batarya performansını izleme ve yönetmede kritik bir rol oynar. BYS, bataryaya giren ve çıkan akımı izleyerek Şarj Durumu (SoC) tahmini yapar, güvenli sınırlar içinde şarj-deşarj işlemlerini sağlar ve aşırı akım koşullarını önler.
 - **Şönt Direnç Ölçümü:** Basit ve uygun maliyetli olup, doğru ölçümler sağlar. Ancak ısı üretir ve güç kaybına yol açabilir. Düşük dirençli bir şönt ile akım belirlenir.
 - **Hall Etkisi Sensörleri:** Batarya ve ölçüm devresi arasında izolasyon sağlar, güvenli çalışma sunar. Şöntlere göre daha pahalıdır ve akımı, manyetik alan üzerinden ölçer.
 - **Akım Transformatörleri (Current Transformers):** Yüksek akım uygulamaları için uygundur, izolasyon sağlar. Ancak diğer yöntemlere göre karmaşıktır ve daha hacimlidir. Genelde AC akım ölçümü için kullanılsa da DC için de uyarlanabilir.

3.2.2. Şarj Durumu (SoC) ve Sağlık Durumu (SoH) Tahmini

Şarj Durumu (SoC) ve Sağlık Durumu (SoH), batarya yönetim sistemlerinde, özellikle elektrikli araçlar (EV'ler) ve enerji depolama sistemleri gibi uygulamalarda, bataryaların performansını ve ömrünü değerlendirmek için kritik öneme sahip parametrelerdir. Doğru bir SoC tahmini, batarya performansını optimize etmek, güvenliği sağlamak ve batarya ömrünü uzatmak için gereklidir. Bu tahmin, şarj döngülerinin yönetilmesini kolaylaştırır ve bir sonraki şarja kadar kalan kullanım süresini belirlemeye yardımcı olur. SoH tahmini ise, bataryanın ne zaman bakım veya

değiştirme gerektirdiğini belirleyerek, batarya kaynaklarının etkin yönetilmesini ve uygulamalarda güvenilirliğin sağlanmasını mümkün kılar [42].

- **Şarj Durumu (SoC):** SoC, bir bataryada mevcut olan enerjiyi, bataryanın toplam kapasitesine göre yüzde olarak ifade eder. Bataryada ne kadar şarj kaldığını gösterir ve batarya kullanımının etkili bir şekilde yönetilmesi için önemlidir. SoC hesaplama yöntemleri şunlardır:
 - **Coulomb Sayımı:** Bu yöntem, bataryaya giren ve çıkan elektrik yükünü zaman içinde entegre ederek izler. Bataryaya eklenen veya bataryadan çıkarılan şarjın doğrudan ölçümünü sağlar [43]. Denklem (3.1) de şarj durumu hesaplanması gösterilmiştir.

$$\text{SoC}(t) = \frac{Q_{kalan}(t)}{Q_{maksimum}(t)} \times 100\% \quad (3.1)$$

Ölçüm yöntemleri şunlardır:

- **Açık Devre Gerilimi (OCV) Yöntemi:** Bataryanın açık devre gerilimi ile şarj durumu arasındaki ilişkiye dayanarak SoC'yi tahmin eder. Bu yöntem, doğru ölçümler için bataryanın dinlenme durumunda olmasını gerektirir.
- **Kalman Filtresi:** SoC'yi daha dinamik koşullarda daha doğru tahmin etmek için çeşitli ölçümleri (akım, voltaj, sıcaklık) birleştiren matematiksel bir algoritmadır.
- **Ah Metodolojisi:** Bataryaya eklenen veya bataryadan çıkarılan amper-saatleri (Ah) ölçerek kalan şarjı tahmin eder.
- **Hibrit Yöntemler:** Coloumb sayımı ve OCV gibi teknikleri birleştirerek, şarj/deşarj verimliliği ve yaşlanma gibi faktörler için düzeltme yaparak doğruluğu artırır.
- **Sağlık Durumu (SoH):** SoH, bir bataryanın ideal veya "yeni" durumuna kıyasla genel durumunu ölçer. Bataryanın elektrik enerjisini etkili bir şekilde depolama ve iletme yeteneğini yansıtır [43]. Denklem (3.2) de batarya sağlık durumu hesaplanması gösterilmiştir.

$$\text{SoH}(t) = \frac{C_{maksimum}(t)}{C_{ortalama}(t)} \times 100\% \quad (3.2)$$

Sağlık Durumu (SoH) ölçüm yöntemleri şunlardır:

- **Kapasite Ölçümü:** Bataryanın mevcut kapasitesini, nominal kapasitesiyle karşılaştırarak SoH'yi tahmin eder.
- **İç Direnç Ölçümü:** İç dirençteki değişiklikleri izlemek, bozulmayı gösterebilir. Bataryalar yaşlandıkça, genellikle iç dirençleri artar, bu da performansı etkiler.
- **Çevrim Ömrü Analiz:** Bir bataryanın geçirdiği şarj/deşarj çevrimlerinin sayısını, beklenen çevrim ömrü ile karşılaştırarak SoH'yi değerlendirir.
- **Gelişmiş Algoritmalar:** SoC tahmini için kullanılanlara benzer algoritmalar kullanarak (örneğin, Kalman filtreleri), SoH'yi tahmin etmek için geçmiş performans verilerine ve mevcut ölçümlere dayanır.

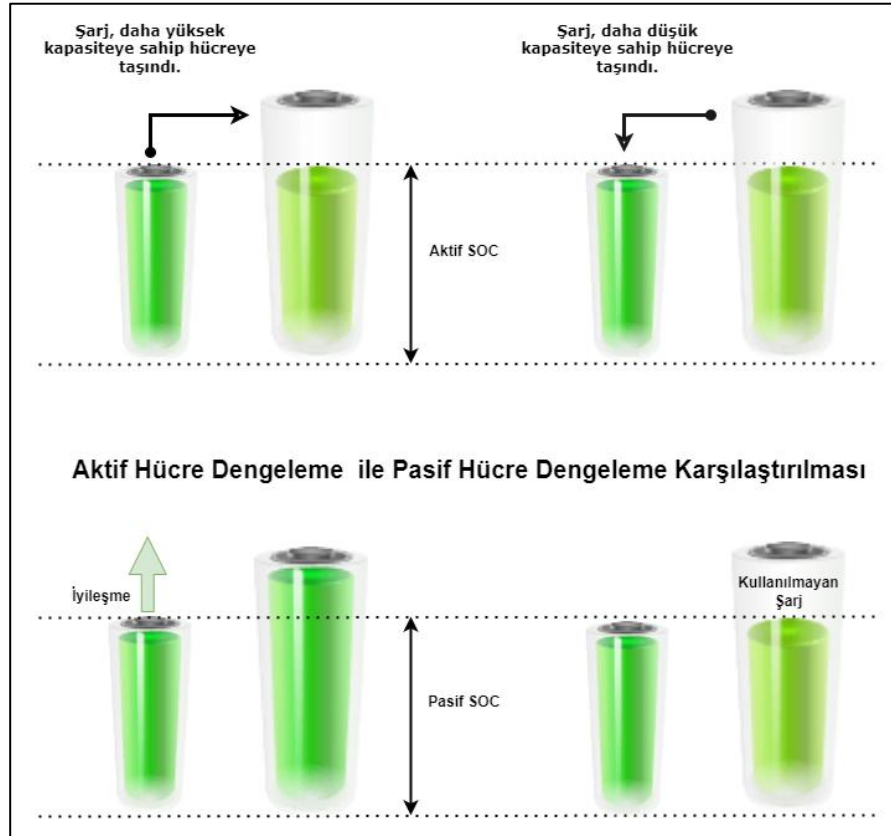
3.3. Batarya Yönetim Sistemi Dengeleme Teknikleri

Batarya paketlerinin sağlığını, performansını ve ömrünü korumak için kritik öneme sahiptir. Özellikle elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji depolama ve tüketici elektroniği gibi uygulamalarda kullanılır. Dengeleme, batarya paketindeki tüm hücrelerin aynı şarj durumu (SoC) ve voltaj seviyelerine sahip olmasını sağlar, böylece zayıf hücrelerin diğerlerinden daha hızlı bozulmasını önler ve batarya paketinin genel kapasitesini maksimize eder. Batarya dengeleme tekniklerini şu şekilde inceleyebiliriz:

- **Pasif Dengeleme:** Yüksek voltajlı hücrelerden gelen fazla enerji dirençler aracılığıyla ısı olarak dağıtılır. BMS, her hücrenin voltajını izler ve bir hücre önceden belirlenmiş bir eşik değeri aştığında, o hücrenin üzerindeki bir direnç devreye girerek fazla enerjiyi boşaltır. Bu sistemin avantajı, basit tasarım ve düşük maliyet ve minimal ek bileşen gerektirir. Sistemin dezavantajı ise, Enerji ısı olarak boşa harcanır, bu da verimsizdir. Özellikle büyük batarya paketlerinde termal yönetim zorlukları yaratabilir. Dengeleme süreci yavaşır ve yüksek güçlü uygulamalar için uygun olmayabilir. Küçük batarya paketleri

veya maliyetin kritik olduğu ve enerji verimliliğinin daha az önemli olduğu bazı tüketici elektroniği ürünlerinde kullanılır.

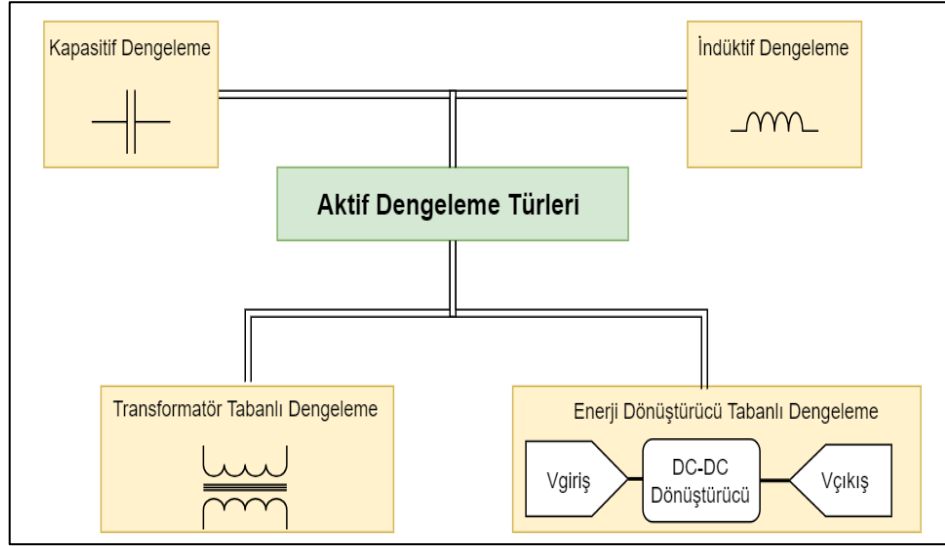
- **Aktif Dengeleme:** Yüksek voltajlı hücrelerden düşük voltajlı hücrelere enerji aktarır. Bu yöntem, enerji kaybı olmadan hücreler arasında yük transferi yapmak için indüktörler, kapasitörler veya transformatörler kullanır. Sistemin avantajı ise, daha az enerji kaybı olduğundan daha verimlidir. Hücreleri daha hızlı dengeler, bu da elektrikli araçlar gibi yüksek güçlü uygulamalar için idealdir. Daha az ısı üretildiğinden ek soğutma mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaz. Dezavantajı ise, daha karmaşık tasarım ve indüktörler veya kapasitörler gibi ek bileşenler nedeniyle daha yüksek maliyet ve gelişmiş kontrol algoritmaları ve güç elektroniği gerektirir. Elektrikli araçlar, şebeke enerji depolama sistemleri ve enerji verimliliği ve hızlı dengelemenin kritik olduğu uygulamalar için idealdir.



Şekil 3.8: Aktif ve pasif dengeleme sistemleri [44].

Aktif dengeleme yöntemleri, bataryaların performansını, güvenliğini ve ömrünü optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Uygulama gereksinimlerine, batarya

paketinin boyutuna, maliyet ve karmaşıklığa göre en uygun yöntem seçilmelidir. Aktif dengeleme yöntemleri şunlardır:

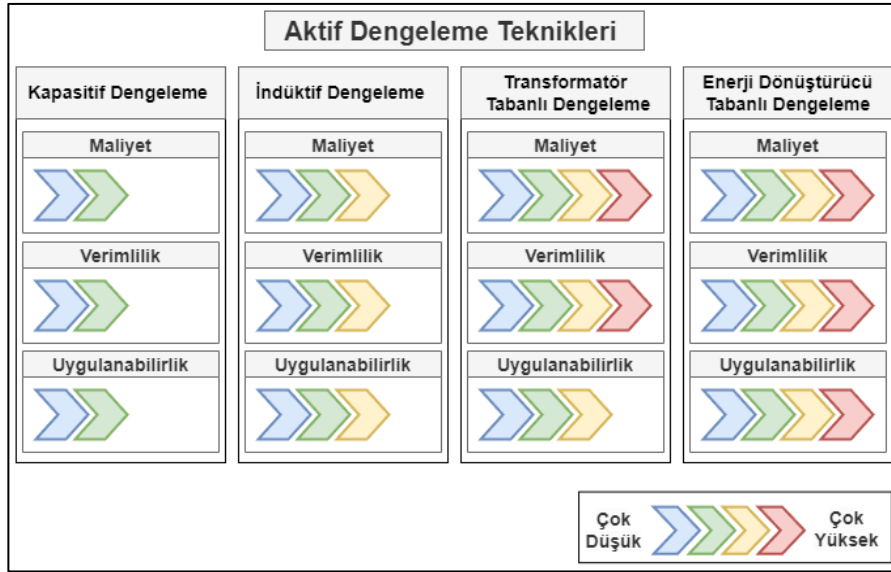


Şekil 3.9: Aktif dengeleme türleri.

- **Kapasitif Dengeleme:** Kapasitörler kullanarak hücreler arası voltaj dengesi sağlar. Basit ve düşük maliyetlidir, ancak büyük batarya paketleri için uygun değildir.
- **İndüktif Dengeleme:** İndüktörler ile enerji transferi yapar, yüksek verimlilikle çalışır ve büyük paketler için uygundur. Ancak karmaşık ve maliyetlidir, gelişmiş algoritmalar gerektirir.
- **Transformatör Tabanlı Dengeleme:** Transformatörler ile birden fazla hücre arasında eşzamanlı enerji dağıtımını sağlar. Büyük paketlerde verimli, hızlı, ancak yüksek maliyetli ve karmaşıktır.
- **Enerji Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme:** DC-DC dönüştürücüler kullanarak kontrollü enerji transferi yapar, enerji kayıpları düşüktür ve farklı batarya yapılarına uygundur, ancak maliyetli ve karmaşıktır.



Şekil 3.10: Pasif dengeleme tekniğinin karşılaştırılması.

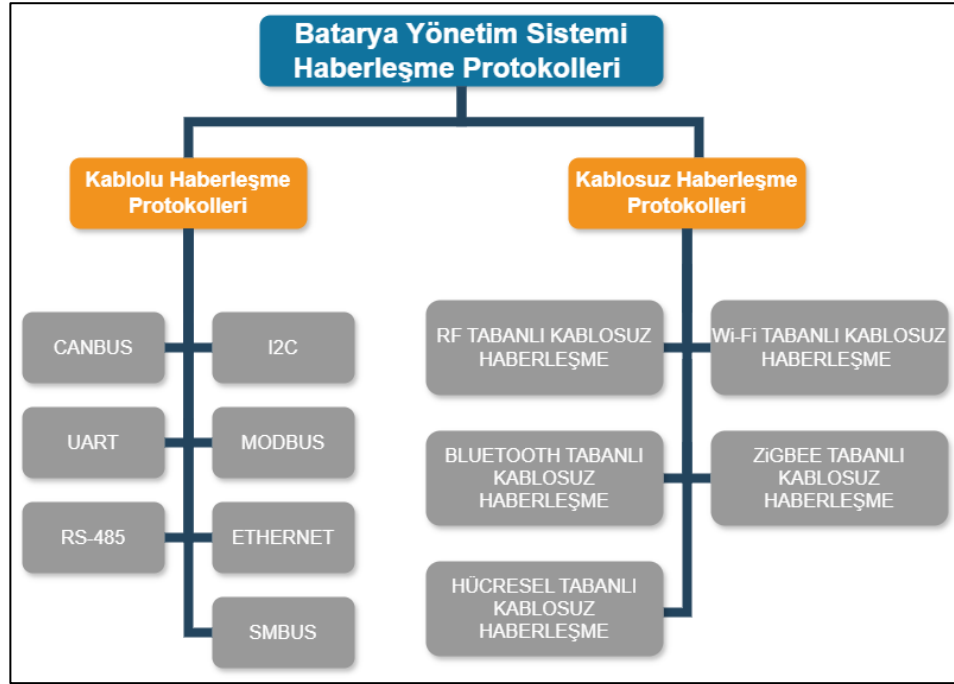


Şekil 3.11: Aktif dengeleme tekniklerinin karşılaştırılması.

- Hibrit Dengeleme:** Hem pasif hem de aktif dengeleme yöntemlerini birleştirerek optimum performans sağlar. BMS, küçük düzeltmeler gerektiğinde pasif dengelemeyi ve hücre voltajlarındaki daha büyük farklılıklar için aktif dengelemeyi kullanabilir. Avantajı, Verimlilik ve maliyet arasında denge sağlar. Farklı senaryolara ve gereksinimlere uyum sağlar. Dezavantajı ise, Orta derecede karmaşıklık ve maliyet hem pasif hem de aktif dengeleme devrelerini gerektirir. Hem maliyet etkinliği hem de verimliliğin önemli olduğu hibrit elektrikli araçlar gibi uygulamalarda kullanılır.

3.4. Batarya Yönetim Sistemi Haberleşme Protokolleri

BYS'ler, batarya performansının izlenmesi ve yönetilmesi için bileşenler arasında veri alışverişini sağlamak amacıyla çeşitli iletişim protokollerini kullanır. Bu protokoller, haberleşme yöntemlerine göre kablolu ve kablosuz olmak üzere ikiye ayrılır. Kablolu protokoller, fiziksel bağlantılar aracılığıyla yüksek hızda ve güvenilir veri iletimi sunarken, kablosuz protokoller kablo karmaşasını ortadan kaldırarak esneklik ve kolay kurulum avantajları sağlar. Her iki yöntem de bataryanın verimli, güvenli ve uzun ömürlü çalışmasını desteklemek için kritik öneme sahiptir. Aşağıdaki bölümlerde, bu haberleşme protokollerinin özellikleri, avantajları ve uygulama alanları detaylı bir şekilde incelenecektir.

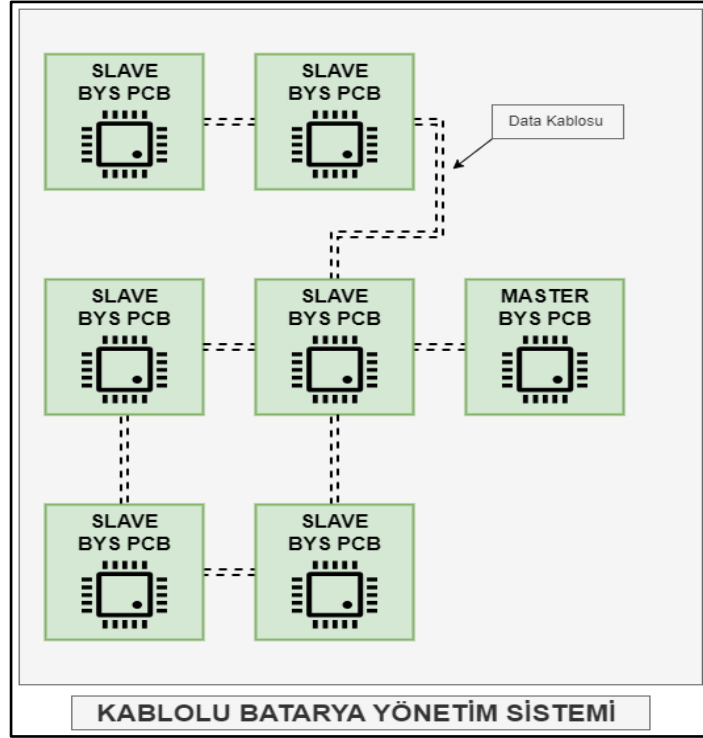


Şekil 3.12: Batarya haberleşme protokollerinin sınıflandırılması.

3.4.1. Batarya Yönetim Sistemi Kablolu Haberleşme Yöntemleri

Kablolu haberleşme yöntemleri, Batarya Yönetim Sistemlerinde geleneksel ve güvenilir bir iletişim şekli olarak uzun süredir kullanılmaktadır. Fiziksel kablolar aracılığıyla veri aktarımı sağlayan bu yöntemler, yüksek hızda ve düşük gecikme süreli iletişim imkanı sunar. Ayrıca, elektromanyetik girişime karşı daha dayanıklı olmaları ve yüksek veri bütünlüğü sağlamaları nedeniyle endüstriyel ve otomotiv

uygulamalarında sıkça tercih edilirler. Kablolu bağlantılar, güvenlik açısından da avantajlı olup, yetkisiz erişim riskini azaltır.



Şekil 3.13: Kablolu batarya yönetim sisteminin bağlantı şekli.

- **CAN bus:** Otomotiv ve endüstride yaygın, çoklu master destekli seri protokol. Hata düzeltme mekanizmalarıyla 1 Mbps'ye kadar hızlı veri aktarır; yaklaşık 40 metreye kadar etkilidir.
- **UART:** Asenkron seri iletişim protokolü, kolay uygulamalı ve düşük maliyetlidir. 300 bps- 1 Mbps arası hızları destekler; mikrodenetleyici ve sensör iletişiminde kullanılır.
- **RS-485:** Gürültülü ortamlarda 1200 metreye kadar mesafede, 32 cihaza kadar güvenilir iletişim sağlar; elektromanyetik gürültüye dayanıklıdır.
- **I2C:** Kısa mesafede, düşük hızlı cihazlar arasında iletişim sağlayan bir seri protokoldür. SDA (Veri Hattı) ve SCL (Saat Hattı) kullanarak tek bir veri yolunda birden fazla master ve slave cihazın bağlantı kurmasını sağlar.
- **Modbus:** BMS ve diğer sistemler arasında yaygın, basit ve esnek bir protokol; seri (RTU) veya Ethernet (TCP) üzerinden çalışır.
- **Ethernet:** Veri merkezleri ve enerji sistemleri gibi daha büyük kurulumlarda sıklıkla kullanılan, yüksek hızlı veri aktarım yeteneklerine sahip bir

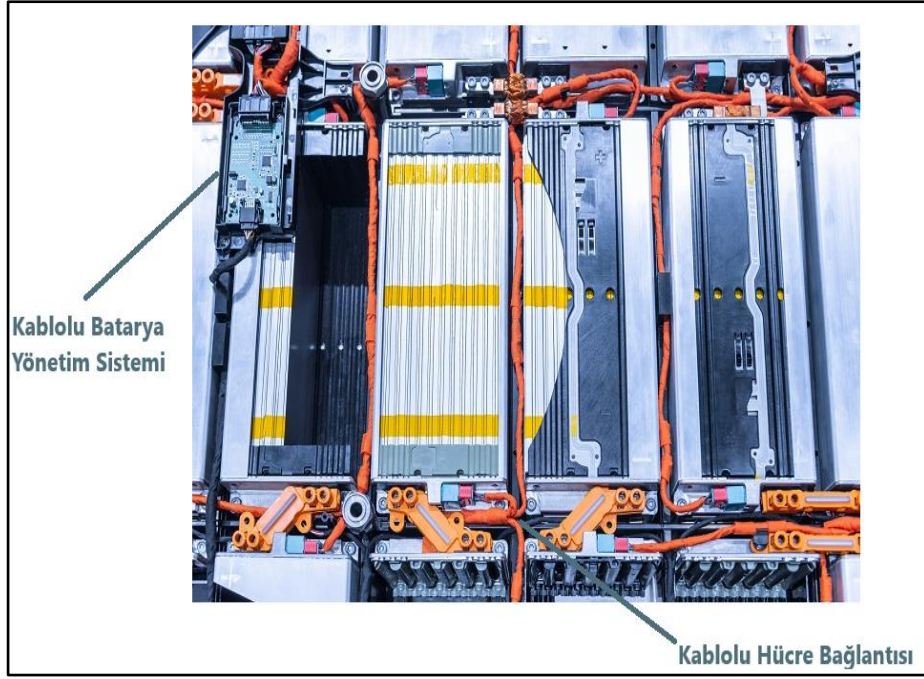
protokoldür. Büyük miktarda veri için yüksek hızlı iletişim sağlar; uzun kablo uzunluklarını ve aynı ağda birden fazla cihazı destekler.

- **SMBus:** Özellikle sistem yönetim uygulamaları için tasarlanmış, I2C türevi bir protokoldür. Düşük güç tüketimi ve kolay uygulanabilirlik sunar, BMS ile sistemdeki diğer cihazlar arasında verimli iletişim sağlar.

Tablo 3.1: Kablolu haberleşme yöntemlerinin karşılaştırılması.

Özellik	1 (Düşük)	2 (Orta- Düşük)	3 (Orta- Yüksek)	4 (Yüksek)
Veri İletim Hızı	1 Mbps ‘den düşük.	1 Mbps civarında	1-10 Mbps arası	10 Mbps ‘den yüksek
EMI Bağışıklığı	Elektromanyetik gürültüye karşı hassas	Bazı EMI koruması mevcut.	EMI'ye karşı iyi düzeyde dayanıklı	EMI'ye karşı mükemmel dayanıklılık.
Maliyet Etkinliği	Yüksek maliyetli	Orta seviyede maliyetli	Az Maliyetli.	Çok az maliyetli
Çoklu Cihaz Bağlantı	Sadece iki cihazı destekler (noktadan noktaya).	Sınırlı sayıda cihazı destekler	Birden fazla cihazı destekler.	Çok sayıda cihazı sorunsuz destekler.
Güvenilirlik	Hata tespit ve düzeltme mekanizmaları sınırlı.	Temel düzeyde güvenilirlik	İyi düzeyde güvenilirlik ve hata yönetimi	Yüksek güvenilirlik ve gelişmiş hata yönetimi.

Kablolu batarya yönetim sisteminin bağlantı biçimi, aşağıdaki görselde gösterildiği gibi, hücreler ve merkezi kontrol ünitesi arasında karmaşık bir kablo ağı içerir. Bu kablolama yapısı, veri iletiminde yüksek hız ve güvenilirlik sağlarken, elektromanyetik girişimlere karşı da direnç gösterir. Ancak, bu kabloların varlığı sistemin toplam ağırlığını ve karmaşıklığını artırabilir, bu da özellikle elektrikli araçlar ve taşınabilir cihazlar gibi uygulamalarda tasarım ve bakım zorluklarına neden olabilir.



Şekil 3.14: Kablolu BYS'nin batarya paketi içerisindeki yerleşimi [45].

Kablolu batarya yönetim sistemlerinde, hücre izleme ve ağ kontrolü yukarıda bahsedilen iletişim protokolleri ve sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu sistemlerde, her bir batarya hücresinin voltaj, akım ve sıcaklık gibi önemli parametreleri sensörler tarafından sürekli olarak izlenir. Toplanan veriler, kablolu iletişim hatları üzerinden merkezi bir batarya yönetim kontrol ünitesine iletilir.

Kablolu batarya yönetim sistemlerinde, veriler analiz edilir ve bataryanın güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için gerekli kontrol işlemleri gerçekleştirilir.

- **Veri İletim Hızı:** Ethernet en yüksek hızı sağlar, ardından CAN Bus ve Modbus gelir. SMBus en düşük hıza sahiptir.
- **EMI Bağışıklığı:** RS-485 ve CAN Bus, yüksek EMI bağışıklığına sahiptir, Ethernet ve Modbus ise orta düzeyde EMI bağışıklığı sağlar. SMBus ve I2C daha az dirençlidir.
- **Maliyet Etkinliği:** UART, I2C ve SMBus en maliyet etkin protokollerdir, Ethernet ise en maliyetli olarak sıralanabilir.
- **Çoklu Cihaz Bağlantı:** CAN Bus, RS-485, Modbus ve Ethernet, birden fazla cihazı etkin bir şekilde bağlama yeteneğine sahiptir.

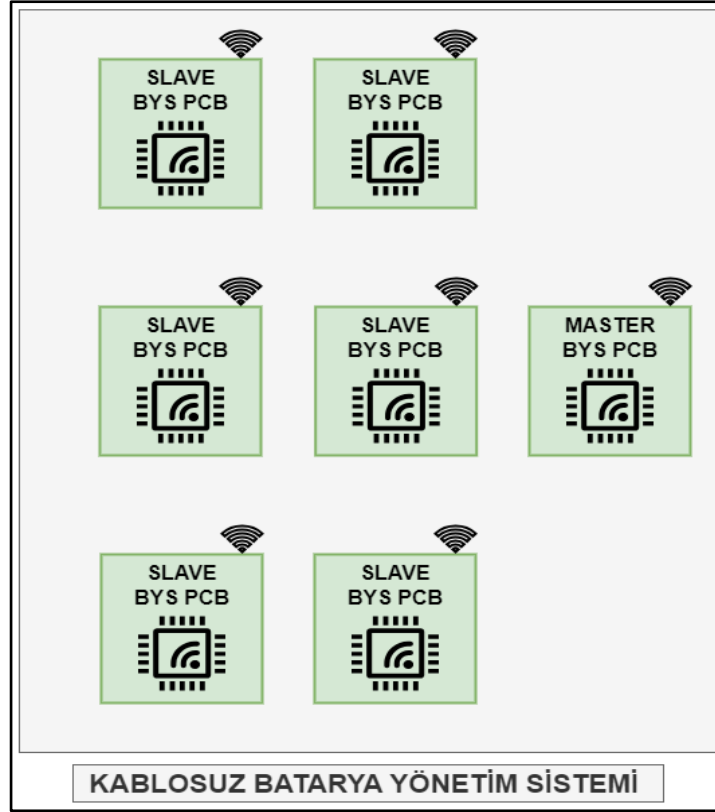
- **Güvenilirlik:** CAN Bus ve Ethernet, yüksek güvenilirlik sunar; RS-485 ve Modbus ise orta düzeyde güvenilirlik sağlar. UART, I2C ve SMBus nispeten daha az güvenilirdir.

Tablo 3.2: Kablolu haberleşme türlerinin etkinliklerinin değerlendirilmesi.

Protokol	Veri iletim Hızı	EMI Bağışıklığı	Maliyet Etkinliği	Çoklu Cihaz Bağlantı	Güvenilirlik
CAN Bus	3	4	3	4	4
UART	2	2	4	2	2
RS-485	2	4	3	4	3
I2C	2	2	4	3	2
Modbus	3	3	3	4	3
Ethernet	4	3	2	4	4
SMBus	1	1	4	2	2

3.4.2. Batarya Yönetim Sistemi Kablosuz Haberleşme Yöntemleri

Kablosuz haberleşme yöntemleri, kablosuz BYS esneklik, maliyet tasarrufu ve operasyonel verimlilik sağlama ihtiyacına yanıt olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir. Kablolama ihtiyacını ortadan kaldırarak kurulum ve bakım süreçlerini basitleştiren bu yöntemler, aynı zamanda sistemin modülerliğini ve ölçeklenebilirliğini artırır. Kablosuz iletişim, özellikle hareketli parçaların bulunduğu, karmaşık kablolama gerektiren veya fiziksel bağlantıların zor olduğu uygulamalarda büyük avantaj sağlar. Bununla birlikte, kablosuz sistemler aynı zamanda uzaktan izleme ve kontrol imkânı sunarak, kullanıcıların batarya sistemlerini daha etkin bir şekilde yönetmelerine olanak tanır. Ayrıca, bu sistemler daha hafif ve daha kompakt tasarımlar sunarak, özellikle elektrikli araçlar gibi taşınabilir ve mobil uygulamalarda enerji verimliliğini artırır. Ancak, kablosuz haberleşmede güvenlik ve parazit gibi konuların dikkatle yönetilmesi gerekmektedir; bu nedenle, sağlam güvenlik önlemleri ve sinyal girişimlerine karşı dirençli tasarımlar kritik önem taşır. Kablosuz batarya yönetim sistemlerinde kullanılan başlıca kablosuz haberleşme teknolojileri şunlardır:

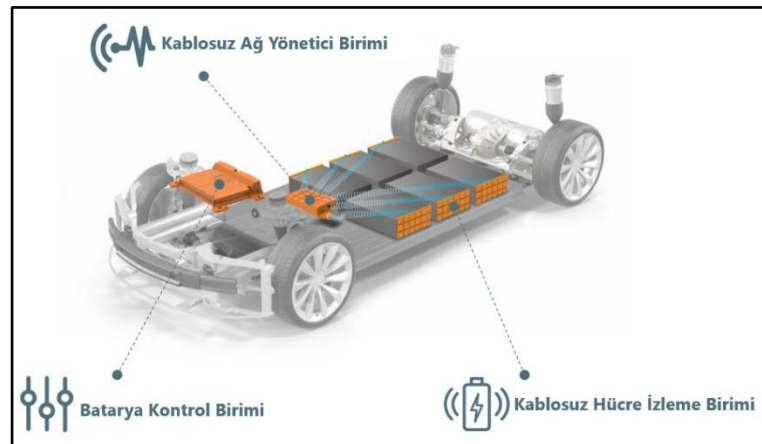


Şekil 3.15: Kablosuz batarya yönetim sisteminin bağlantı şekli.

- **Bluetooth Low Energy (BLE) Tabanlı Kablosuz Haberleşme:** BLE, düşük enerji tüketimi ile bilinen, kısa mesafeli kablosuz bir haberleşme teknolojisidir. Genellikle 100 metreye kadar mesafelerde kullanılır ve veri iletim hızları 1-2 Mbps arasındadır. Avantajları ise, enerji verimliliği yüksektir ve küçük-orta ölçekli batarya sistemleri için idealdir. BLE, mesh ağ yapısını destekler ve bu sayede ağdaki cihazlar arasında güçlü bir bağlantı sağlar.
- **Zigbee Tabanlı Kablosuz Haberleşme:** Zigbee, düşük güç tüketimi ve düşük veri hızı (250 kbps'ye kadar) ile bilinen, kısa mesafeli bir kablosuz iletişim protokolüdür. 100 metreye kadar veri iletimi sağlayabilir. Avantajları ise, düşük enerji tüketimi ile uzun pil ömrü sağlar ve geniş çaplı mesh ağ yapıları oluşturabilir, bu da büyük ölçekli batarya yönetim sistemleri için idealdir.
- **Wi-Fi Tabanlı Kablosuz Haberleşme:** Wi-Fi, yüksek veri aktarım hızları (600 Mbps'ye kadar) sunan, geniş alanlarda kullanılabilen bir kablosuz iletişim teknolojisidir. Genellikle 150 metreye kadar mesafelerde etkilidir. Avantajları ise, Yüksek veri aktarım hızı ve doğrudan internet bağlantısı sağlar. Bulut tabanlı sistemlerle veri alışverişini kolaylaştırır.

- **Hücresel Tabanlı Kablosuz Haberleşme:** Hücresel ağlar, geniş alan kapsama sağlayan, mobil ses ve veri hizmetleri sunan kablosuz iletişim teknolojileridir. Kilometrelerce mesafe kapsama alanına sahiptir ve veri hızları birkaç yüz Mbps'ye kadar çıkabilir. Avantajları ise farklı bölgelerde kesintisiz bağlantı gerektiren uygulamalar için idealdir. Geniş kapsama alanı sağlar ve mobil cihazlarla kolayca entegre edilebilir.
- **NFC (Yakın Alan İletişimi) Tabanlı Kablosuz Haberleşme:** NFC, çok kısa mesafelerde (10 cm'ye kadar) çalışan, düşük veri hızı (424 kbps'ye kadar) sunan kablosuz bir iletişim teknolojisidir. Avantajları ise, çok düşük enerji tüketimi sağlar ve kısa mesafeli güvenli veri alışverişi için idealdir. Özellikle güvenlik gereksinimlerinin yüksek olduğu uygulamalarda tercih edilir.

Kablosuz batarya yönetim sisteminin bağlantı yapısı, aşağıdaki Şekil 3.16'da gösterildiği gibi, hücreler ve merkezi kontrol ünitesi arasında kablosuz bir iletişim ağı oluşturur. Bu yapı, sistemin toplam ağırlığını azaltırken, kurulum ve bakım süreçlerini de kolaylaştırır. Özellikle elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri gibi uygulamalarda, kablosuz iletişim teknolojileri tasarım ve entegrasyon açısından önemli bir esneklik sağlar.



Şekil 3.16: Kablosuz BYS'nin araç içerisindeki yerleşimi [46].

Kablosuz batarya yönetim sistemlerinde, hücre izleme ve ağ kontrolü kablosuz iletişim protokolleri ile gerçekleştirilir. Bu sistemlerde, her bir batarya hücresinin voltaj, akım ve sıcaklık gibi kritik parametreleri sensörler tarafından sürekli izlenir. Toplanan veriler, Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, Zigbee veya NFC gibi kablosuz haberleşme teknolojileri aracılığıyla merkezi BYS kontrol ünitesine iletilir. Böylece

fiziksel kablolama gereksinimi ortadan kalkar, sistem daha esnek, modüler ve kolay uygulanabilir hale gelir.

- **Veri İletim Hızı:** BLE ve Zigbee düşük veri hızına sahipken, Wi-Fi en yüksek veri hızını sunar. Hücresel haberleşme Wi-Fi 'den daha yavaş olabilir, ancak Zigbee ve BLE'den daha hızlıdır. NFC, en düşük veri hızına sahiptir.
- **EMI Bağışıklığı:** Zigbee ve NFC, EMI'ye karşı yüksek dayanıklılığa sahipken, Wi-Fi ve BLE biraz daha düşük performans gösterir. Hücresel sistemler EMI'ye karşı orta düzeyde bağışıklık sunar.
- **Maliyet Etkinliği:** BLE ve Zigbee, düşük maliyetli çözümler sunar, bu da onları çok maliyet etkin yapar. Wi-Fi ve Hücresel haberleşme, daha yüksek maliyetlerle gelir. NFC, orta maliyetli bir çözüm olarak değerlendirilir.
- **Çoklu Cihaz Bağlantı:** Zigbee ve Hücresel haberleşme, birçok cihazın bağlanabilmesi açısından en yüksek puanları alır. Wi-Fi, bu alanda da yüksek bir puan alırken, BLE biraz daha sınırlıdır. NFC, sadece tek cihazlar arası kısa mesafeli bağlantılarda kullanılır.
- **Güvenilirlik:** Zigbee ve Hücresel sistemler, yüksek güvenilirlik sunar. NFC de yüksek güvenilirlik sunarken, BLE ve Wi-Fi biraz daha düşük güvenilirlik seviyelerine sahiptir.

Tablo 3.3: Kablosuz haberleşme türlerinin etkinliklerinin değerlendirilmesi.

Protokol	Veri iletim Hızı	EMI Bağışıklığı	Maliyet Etkinliği	Çoklu Cihaz Bağlantı	Güvenilirlik
Bluetooth Low Energy (BLE)	2	3	4	3	3
Zigbee	1	4	4	4	4
Wi-Fi	4	2	2	4	3
Hücresel	3	3	2	4	4
NFC (Yakın Alan İletişimi)	1	4	3	1	4

Sonuç olarak, Tablo 3.3'te belirtildiği üzere kablosuz haberleşme protokolleri; veri iletim hızı, EMI bağışıklığı, maliyet etkinliği, çoklu cihaz bağlantı desteği ve güvenilirlik açısından değerlendirilmiştir. Zigbee ve hücresel haberleşme, çoklu cihaz

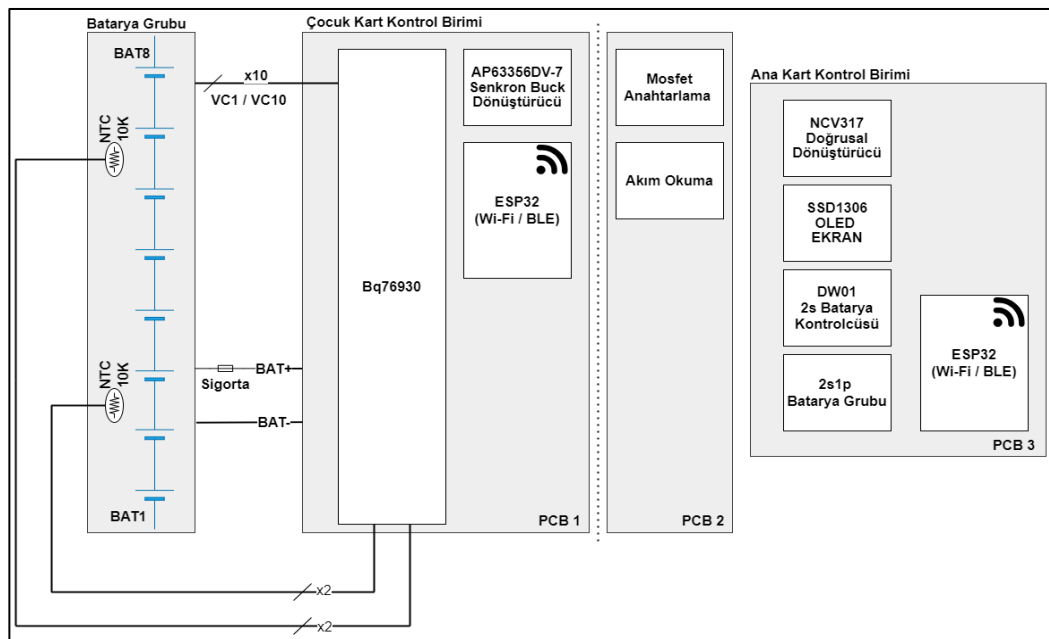
desteği ve güvenilirlikte ne çıkarken, Wi-Fi en yüksek veri iletim hızını sunmaktadır. BLE ve Zigbee düşük maliyetli çözümler olarak öne çıkarken, EMI bağışıklığı açısından Zigbee ve NFC daha avantajlıdır. Bu değerlendirmeler, kablosuz batarya yönetim sistemlerinde protokol seçimi için önemli bir yol gösterici olmaktadır.

4. KABLOSUZ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Bu çalışmada, geleneksel kablolu batarya yönetim sistemlerinin (BYS) sınırlamalarını aşan, kablosuz bir batarya yönetim sistemi tasarımı sunulmuştur. Geleneksel kablolu sistemlerde kullanılan zincirleme bağlantı (daisy chain) veri kabloları bu tasarımda tamamen ortadan kaldırılmış ve bu sayede sistemin esnekliği ve kullanılabilirliği önemli ölçüde artırılmıştır. Kablosuz iletişim altyapısı, sistemin kurulumu ve bakımını kolaylaştırırken, karmaşık kablolama gereksinimlerini ortadan kaldırarak maliyetleri düşürür ve sistemin daha hızlı devreye alınmasını sağlar. Tasarımın merkezinde, ESP32 mikrodenetleyicisi ve BQ76930 batarya yönetim sistemi entegresi yer almaktadır. ESP32, yüksek performanslı bir mikrodenetleyici olup, Wi-Fi ve Bluetooth gibi kablosuz iletişim protokollerini destekleyerek veri iletimi sağlar. BQ76930 entegresi ise 10 hücreye kadar batarya kontrolü yapabilen bir entegre olup, batarya hücrelerinin voltaj ve sıcaklık ölçümlerini hassas bir şekilde gerçekleştirir. BQ76930 entegresi, pasif dengeleme yöntemi ile hücre gerilimlerini dengeler. Bu sistemde, ana birim (master) ve alt birim (slave) mimarisi kullanılmakta olup, ana birimden gönderilen komutlar kablosuz olarak alt birimlere iletilir. Alt birimler, kendilerine bağlı bataryaların voltaj ve sıcaklık değerlerini izleyerek bataryaların güvenli ve verimli çalışmasını sağlar. Gerekğinde, her bir alt birimden alınan veriler doğrultusunda, tüm sistemin genel gerilimi belirlenir ve gerekli aksiyonlar alınır. Her bir alt birim kartı iki katmandan oluşmaktadır. İlk katmanda batarya hücrelerinin izlenmesi ve dengeleme işlevleri bulunurken, ikinci katmanda ise güç anahtarlama devreleri yer almaktadır. Bu yapı, her bir bataryanın doğru şekilde kontrol edilmesini ve gerektiğinde sistemin toplam geriliminden ayrılmasını sağlar. Kablosuz BYS tasarımının en büyük avantajı, kablolu sistemlerde karşılaşılan karmaşık kablolama sorunlarını ortadan kaldırması ve daha esnek bir yapı sunmasıdır. Özellikle büyük ölçekli batarya sistemlerinde, kablolama maliyetlerini düşürürken, kurulum süresini de önemli ölçüde kısaltır. Sistemde kullanılan kablosuz yazılım ve kütüphaneler özel olarak geliştirilmiş olup, tasarlanan kart iki katmanlı bir PCB yapısına sahiptir. Bu sayede sistemin güvenilir ve verimli bir şekilde çalışması için gerekli olan tüm bileşenler, optimize edilmiş bir şekilde entegre edilmiştir.

4.1. Sistemin Blok Diyagramı

Bu çalışmada, ESP32-WROOM-32D mikrodenetleyicisi, AP63356DV-7 Senkron alçaltıcı dönüştürücü ve Bq76930 batarya yönetim entegresi kullanılarak kablosuz bir Batarya Yönetim Sistemi (BYS) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sistem, 10 hücreye kadar batarya kontrolü sağlayarak kablolu sistemlerin karmaşıklığını ortadan kaldırmayı, böylece esnek, düşük maliyetli ve güvenilir bir çözüm sunmayı hedeflemektedir. Sistemin kontrol merkezi olan ESP32-WROOM-32D, Wi-Fi ve Bluetooth modülleri aracılığıyla kablosuz iletişim sağlayarak veri iletimini ve sistem yönetimini merkezileştirir. Bq76930 entegresi, batarya hücrelerinin voltaj ve sıcaklık izlemelerini gerçekleştiren kapsamlı bir batarya yönetim çözümüdür ve güvenlik fonksiyonlarını da barındırır. AP63356DV-7, yüksek verimli bir senkron alçaltıcı dönüştürücü olarak sistemin voltaj regülasyonunu sağlar ve enerji tüketiminin düşük olmasına katkıda bulunur. Sistem, ana-çocuk (master-slave) mimarisi üzerine inşa edilmiştir. Ana cihaz, sistemin beyni olarak görev yapar; çocuk cihazlardan gelen verileri toplayıp işler ve gerekli komutları iletir. Çocuk cihazlar, bağlı oldukları bataryaların gerilim ve sıcaklık ölçümlerini yapar ve bu verileri kablosuz olarak ana cihaza gönderir. Böylelikle, her bir slave cihazı kendi batarya hücrelerini bağımsız olarak izleyebilir ve gerektiğinde dengeleme işlemini gerçekleştirebilir. Aşağıda, Şekil 4.1’de sistemin blok diyagramındaki bileşenler detaylı olarak açıklanmıştır:



Şekil 4.1: Tasarımı yapılmış sistemin blok diyagramı.

Çocuk kart PCB1 ve PCB2 den oluşmaktadır. Ana kart ise 1 adet PCB den oluşmaktadır.

4.2. Sistemin Gereklilikleri

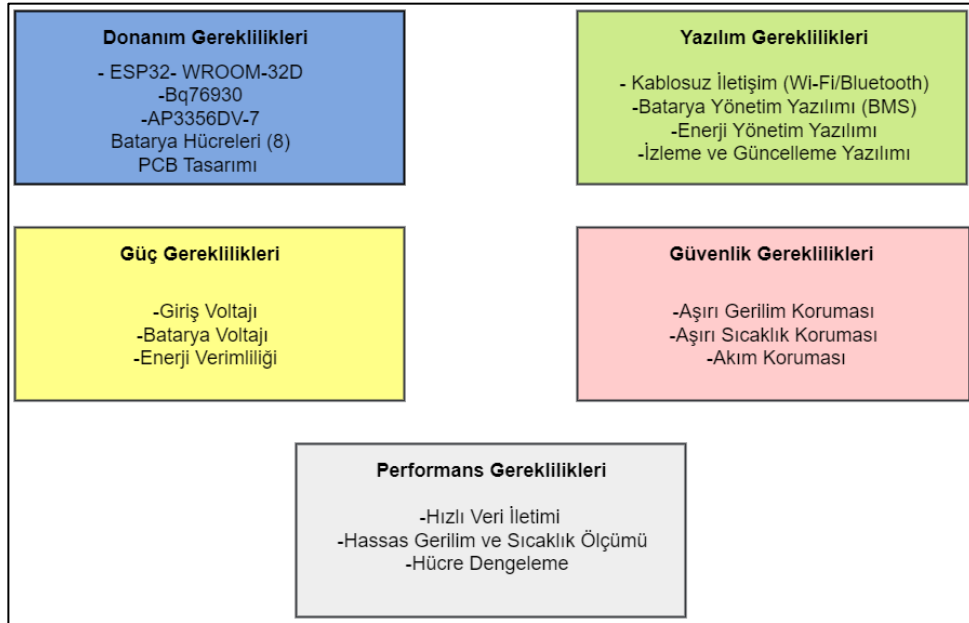
Sistemin gerekliliklerini 5 ana başlıkta inceleyebiliriz. Bunlar donanım gereklilikleri, yazılım gereklilikleri, güç gereklilikleri, güvenlik gereklilikleri, performans gereklilikleridir.

- **Donanım Gereklilikleri:** ESP32-WROOM-32D mikrodenetleyici, kablosuz iletişim (Wi-Fi/Bluetooth) sağlayan ve sistemin merkezi kontrolünü üstlenen bir birimdir. Bq76930 Batarya Yönetim Entegresi, 10 hücreye kadar bataryaların gerilim ve sıcaklık ölçümünü yapan ve bataryaların güvenli çalışmasını sağlayan bir entegredir. AP63356DV-7 senkron alçaltıcı dönüştürücü, giriş voltajını sistem için uygun seviyelere düşürerek enerji verimliliğini artıran bir güç yönetim entegresidir. Batarya hücreleri, Bq76930 entegresi tarafından kontrol edilen 10 hücreli bir batarya paketinden oluşmaktadır. PCB tasarımı, bileşenlerin güvenli ve optimize bir şekilde yerleştirildiği iki katmanlı bir baskı devre kartıdır. Sıcaklık sensörleri, her bir batarya hücresinin sıcaklık kontrolünü sağlamak için kullanılmaktadır.
- **Yazılım Gereklilikleri:** Kablosuz İletişim Protokolleri (Wi-Fi/Bluetooth), ESP32-WROOM-32D tarafından desteklenen ve master ile slave cihazlar arasında veri iletimini sağlamak için kullanılan protokollerdir. Batarya Yönetim Yazılımı (BYS), batarya hücrelerinin gerilim ve sıcaklıklarının izlenmesi, hücre dengeleme, hata tespiti ve güvenlik önlemleri (örneğin, aşırı gerilim ve aşırı ısı koruması) amacıyla özel olarak geliştirilmiştir. Enerji Yönetim Yazılımı, AP63356DV-7 entegresi ile güç yönetimi için gerekli algoritmaların uygulanmasını sağlar. Bu yazılım, güç tüketimini en aza indirirken sistemin enerji verimliliğini artırır. Güncelleme ve İzleme Yazılımı ise bataryaların ve sistemin uzaktan izlenmesi, hata tespiti, veri güncellemeleri ve raporlama işlemleri için bir kullanıcı arayüzü sunar.
- **Güç Gereklilikleri:** Giriş Voltajı: AP63356DV-7 tarafından yönetilen güç dönüştürücüsü, 3.8V ila 32V arasında giriş voltajı sağlar. Batarya Gerilimi: 10 hücreli batarya paketinin gerilimi, Bq76930 tarafından izlenir ve hücre başına

4.2V (maksimum) olmalıdır. Enerji Verimliliği: Sistem, düşük enerji tüketimiyle çalışmalı ve güç kayıplarını en aza indirmek için optimize edilmelidir.

- **Güvenlik Gereklilikleri** Aşırı Gerilim Koruması, batarya hücrelerinin aşırı gerilime karşı korunmasını sağlayan bir sistemdir. Aşırı Sıcaklık Koruması, her bir hücrenin sıcaklığını izleyen ve gerektiğinde bataryaların güvenliğini sağlayan bir mekanizmadır. Akım Koruması ise AP63356DV-7 entegresi tarafından sağlanan aşırı akım koruma devresidir.
- **Performans Gereklilikleri** Hızlı Veri İletimi: ESP32-WROOM-32D ile hızlı ve güvenilir kablosuz veri iletimi. Hassas Gerilim ve Sıcaklık Ölçümleri: Bq76930 entegresi ile her hücrenin voltajını ve sıcaklığını yüksek hassasiyetle ölçme kapasitesi. Hücre Dengeleme: Bataryalar arasındaki gerilim farklarını dengeleyen bir yazılım ve donanım çözümü. Bu gereklilikler, sistemin düzgün çalışmasını sağlamak için gerekli temel bileşenleri ve yazılım fonksiyonlarını içermektedir.

Aşağıdaki Şekil (4.2)'de sistemin gereksinimleri ve işleyişi ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Tasarımı yapılmış sistemin gereklilikleri.

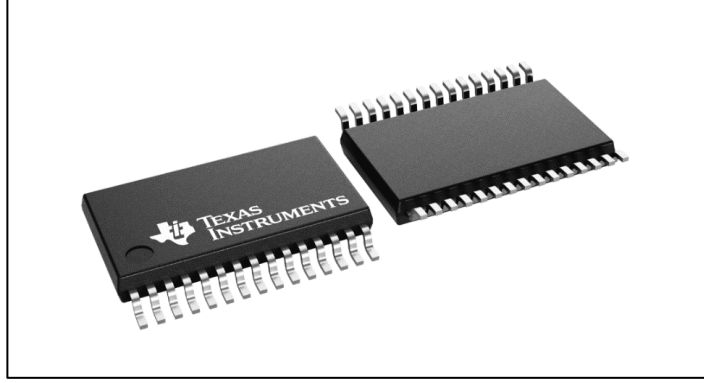
4.3. Komponentlerin Tanımı

Bu bölümde, kablosuz batarya yönetim sistemi tasarımında kullanılan beş ana komponentin özellikleri ve görevleri ele alınacaktır: AP63356DV-7 ve NC317 Voltaj Regülatör Entegresi, ESP32-WROOM-32D Wi-Fi/BLE Modülü, BQ76930 Batarya Yönetim Entegresi, MF52A1-103F3950 NTC Termistör, IPD50N10S3L ve UPA1918 Mosfetleri. AP63356DV-7, sistemin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için gereken doğru voltaj regülasyonunu sağlarken, ESP32-WROOM-32D modülü, kablosuz iletişimin yönetiminde önemli bir rol oynar. BQ76930 ise batarya hücrelerinin izlenmesi ve yönetilmesinde kritik işlevleri üstlenir. MF52A1-103F3950 NTC Termistör, bataryaların sıcaklık ölçümlerini yaparak sıcaklık kontrolünde kullanılırken, IPD50N10S3L ve UPA1918 Mosfetleri, batarya devrelerinde şarj ve deşarj süreçlerinin güvenli bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu beş komponentin uyumlu bir şekilde bir araya gelmesi, sistemin güvenli, verimli ve kullanıcı dostu bir batarya yönetim çözümü sunmasını sağlar.

4.3.1. Bq76930 Batarya Yönetim Entegresi

BQ769x0 Batarya Yönetim Entegresi, Texas Instruments tarafından lityum iyon bataryaların güvenli ve verimli yönetimi için geliştirilmiş kapsamlı bir çözüm sunar. Bu entegre ailesi, BQ76920, BQ76930 ve BQ76940 olmak üzere üç modelden oluşmaktadır. BQ76920, 5 hücreli seri bataryalar veya tipik olarak 18V batarya paketlerini desteklerken, BQ76930, 10 hücreli seri bataryalar veya 36V batarya paketlerini yönetmek için tasarlanmıştır. BQ76940 ise, 15 hücreli seri bataryalar ya da 48V batarya paketlerinin yönetimi için idealdir. Bu analog ön uçlar (AFE'ler) ile Li-ion, Li-demir fosfat gibi çeşitli batarya kimyaları etkin bir şekilde yönetilebilmektedir. Akımının ve sıcaklıklarının izlenmesi, şarj/deşarj FET'lerinin kontrolü ve hücre dengeleme işlemleri yer almaktadır. I2C arayüzü üzerinden bir ana denetleyici, BQ769x0'ı kullanarak batarya paket yönetimiyle ilgili birçok fonksiyonu yerine getirebilir. Bu fonksiyonlar arasında hücre voltajlarının, batarya akımının ve sıcaklıkların izlenmesi, şarj/deşarj FET'lerinin kontrolü ve hücre dengeleme işlemleri yer alır. BQ769x0 ailesi, hafif elektrikli araçlar, güç aletleri ve kesintisiz güç kaynakları gibi yeni nesil yüksek güçlü sistemler için ideal bir izleme ve koruma çözümü sunan sağlam analog ön uç (AFE) cihazlarıdır. Düşük güç tüketimi dikkate

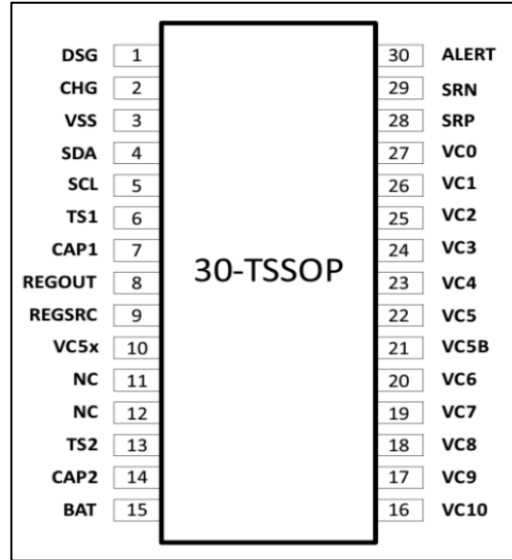
alınarak tasarlanan BQ769x0, IC içindeki alt blokların etkinleştirilip devre dışı bırakılmasıyla çipin genel akım tüketimini kontrol edebilir. Ayrıca, SHIP modu sayesinde batarya paketi ultra düşük güç tüketimi moduna alınabilir, böylece enerji tasarrufu sağlanır. Bu özellikler, BQ769x0'ı, güvenilirlik ve verimlilik arayan uygulamalar için ideal bir batarya yönetim çözümü haline getirir. [47]



Şekil 4.3: Bq7630 entegresinin 3D kılıf görünümü [47].

Sistemimizde kullanılan batarya izleme entegresi, Texas Instruments'ın 30-TSSop kılıfında 7.8 mm x 4.4 mm x 1.2 mm boyutlarında BQ76930 modelidir. Bu yüksek gerilimli batarya yönetim entegresi, hibrit ve elektrikli araçlar gibi uygulamalar için tasarlanmıştır. Hassas hücre voltaj ölçümleri için 14-bit ADC, dahili sıcaklık izleme ve harici termistör desteği gibi önemli özelliklere sahiptir. BQ76930, toplamda 10 seri bağlı batarya hücresini izleyebilir ve düşük ölçüm hatası sağlar. 0V ile 5V arasındaki hücre voltajı ölçüm aralığı, Li-ion ve LiFePO₄ gibi çeşitli batarya kimyalarına uygun hale getirir. Birden fazla BQ76930 entegresi, uzun batarya dizilerinin izlenmesi sırasında senkronizasyonu koruyarak seri olarak bağlanabilir. I²C arayüzü üzerinden, ESP32 gibi bir ana kontrol ünitesi aracılığıyla verilere erişim sağlanır ve sistem kontrol edilir. Her bir entegre, paralel iletişimde ayrı ayrı adreslenebilir, bu da host cihazla verimli iletişim sağlar. BQ76930, aşırı gerilim (OV), düşük gerilim (UV), deşarj sırasında aşırı akım (OCD) ve kısa devre algılama (SCD) gibi donanım koruma özelliklerini içerir. Bu korumalar, anormal durumlarda batarya paketinin zarar görmesini önlemeye yardımcı olur. Ayrıca, her hücre için bağımsız olarak dengeleme akımını yöneterek, batarya paketindeki şarj dağılımını eşit hale getiren pasif hücre dengeleme özelliğine sahiptir. Diğer dikkat çeken özellikler arasında dahili bir voltaj regülatörü (2.5V veya 3.3V), host mikrodenetleyiciye anlık durum güncellemeleri sağlayan bir uyarı pini ve sistem aktif kullanılmadığında enerji tüketimini minimize

etmek için düşük güçlü SHIP modu bulunur. Entegre, -40°C ile 85°C arasındaki geniş bir sıcaklık aralığında çalışacak şekilde tasarlanmıştır ve bu da onu çeşitli ortam koşullarında kullanıma uygun hale getirir. BQ76930'un öne çıkan özelliklerinden biri de düşük akım tüketimidir. Uyku Modu Akım Tüketimi tipik olarak 9 μ A iken, Normal Çalışma Modu Akım Tüketimi ise tipik olarak 100 μ A'dır. Bu düşük güç tüketimi, batarya ömrünü uzatarak enerji verimliliği sağlar ve sistemin uzun süre çalışmasına katkıda bulunur. Ancak, BQ76930 entegresi, ISO 26262 ASIL (Automotive Safety Integrity Level) uyumluluğu gerektiren kritik otomotiv uygulamaları için özel olarak tasarlanmamıştır. Bu nedenle, ASIL sertifikasyonu gerektiren projelerde uygun bir seçenek olmayabilir. Yine de enerji verimliliği, hücre dengeleme ve çeşitli koruma özellikleri sayesinde batarya yönetim sistemleri için güvenilir ve kullanışlı bir çözüm sunar.



Şekil 4.4: Bq76930 pin dağılımı [47].

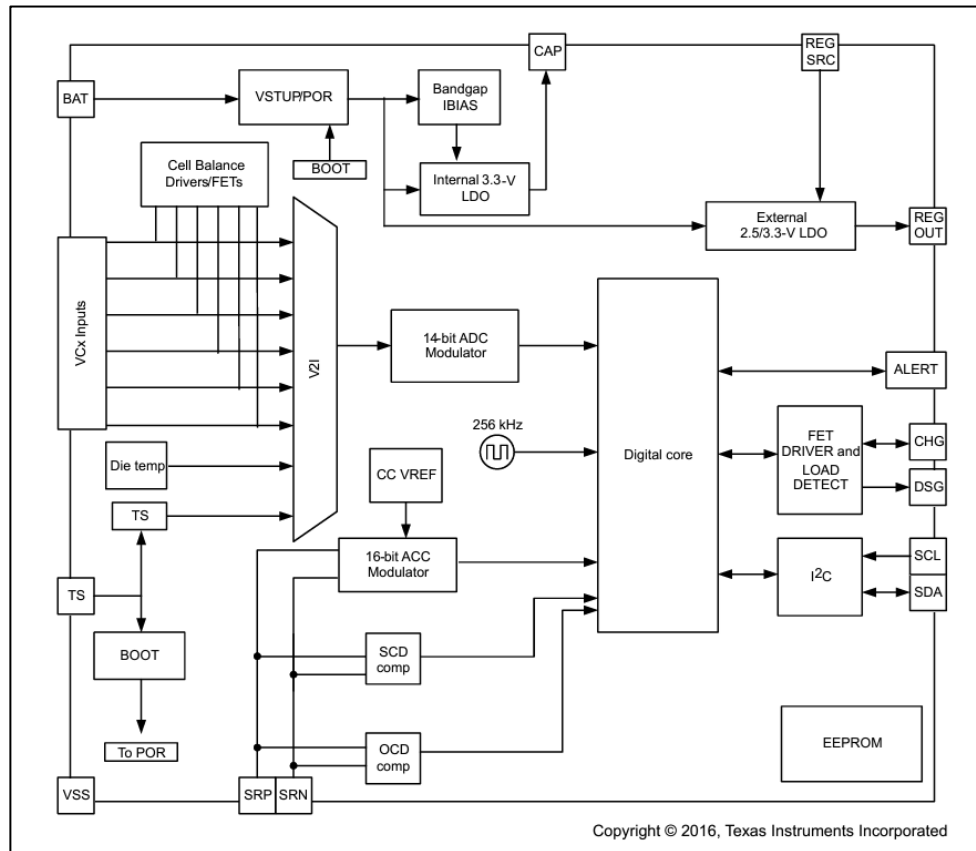
- **Hücre Yapılandırması:** Bq76930, 6 ila 10 hücreli batarya yapılandırmalarını destekler. Tasarladığımız sistemde 8 hücreli bir yapılandırma kullanıldığından, entegre, VC9 ile VC8 ve VC4 ile VC3 kısa devre edilir. Bu bağlantı biçim yazılım arayüzünde tanımlanır.

Table 9-3. Cell Connections for BQ76930					
Cell Input	6 Cells	7 Cells	8 Cells	9 Cells	10 Cells
VC10-VC9	CELL 6	CELL 7	CELL 8	CELL 9	CELL 10
VC9-VC8	short	short	short	short	CELL 9
VC8-VC7	short	short	CELL 7	CELL 8	CELL 8
VC7-VC6	CELL 5	CELL 6	CELL 6	CELL 7	CELL 7
VC6-VC5b	CELL 4	CELL 5	CELL 5	CELL 6	CELL 6
VC5-VC4	CELL 3	CELL 4	CELL 4	CELL 5	CELL 5
VC4-VC3	short	short	short	CELL 4	CELL 4
VC3-VC2	short	CELL 3	CELL 3	CELL 3	CELL 3
VC2-VC1	CELL 2	CELL 2	CELL 2	CELL 2	CELL 2
VC1-VC0	CELL 1	CELL 1	CELL 1	CELL 1	CELL 1

Şekil 4.5: Bq76930 için hücre sayısına göre bağlantıları şekli [47].

- **BQ76930 Batarya Yönetim Entegresi Pin Tanımları ve Fonksiyonları:** Her bir pinin batarya hücre izleme, dengeleme, sıcaklık ölçümü, akım algılama ve iletişim gibi kritik görevler üstlenir. Bu pinler şunlardır:
 - **DSG (Pin 1):** Deşarj FET Sürücüsü. Bu pin, batarya deşarj işlemlerini kontrol etmek için kullanılır. Deşarj sırasında akım kontrolünü sağlar ve güvenli bir şekilde batarya kullanımını denetler.
 - **CHG (Pin 2):** Şarj FET Sürücüsü. Bu pin, batarya şarj işlemlerini yönetmek için kullanılır. Şarj sürecinde akımı kontrol ederek bataryaların aşırı yüklenmesini engeller.
 - **VSS (Pin 3):** Entegre VSS, yani topraklama bağlantısıdır. Devrenin referans noktası olarak kullanılır.
 - **SDA (Pin 4) ve SCL (Pin 5):** I²C İletişim Pinleri. SDA veri hattını, SCL ise saat sinyali hattını ifade eder. Bu pinler, ESP32 gibi mikrodenetleyicilerle veri alışverişini sağlamak için kullanılır.
 - **TS1 (Pin 6) ve TS2 (Pin 13):** Termistör Pozitif Terminalleri. Harici NTC termistörler aracılığıyla batarya sıcaklıklarını izler ve sıcaklık koruması sağlar.
 - **CAP1 (Pin 7) ve CAP2 (Pin 14):** Kapasitör Bağlantı Pinleri. Entegre içinde stabilite sağlamak için kullanılır.
 - **REGOUT (Pin 8):** LDO Çıkışı. 2.5V veya 3.3V çıkış sağlayarak harici devreler için düşük gerilimli bir güç kaynağı sunar.
 - **REGSRC (Pin 9):** LDO kaynağı olarak kullanılır ve entegrenin güç girişini yönetir.

- **VC5x ve VC5B (Pin 10 ve 21):** Termistör negatif terminalleri ve gerilim algılama pinleri. Batarya hücrelerinin gerilimlerini dengelemek ve izlemek için kullanılır.
- **VC0- VC10 (Pin 27-16):** Batarya hücrelerinin pozitif ve negatif terminallerine bağlanan voltaj algılama pinleri. Her bir pin, belirli bir batarya hücresinin voltajını izler. Örneğin, VC1 1. hücreyi, VC2 2. hücreyi izler ve bu şekilde devam eder.
- **SRN (Pin 29) ve SRP (Pin 28):** Pozitif ve Negatif Akım Algılama Pinleri. Batarya akımının ölçümünü yapar ve akım değerlerini izleyerek bataryanın sağlıklı bir şekilde çalışmasını sağlar.
- **BAT (Pin 15):** Pilin en üstteki terminaline bağlanan pin. Bu pin, pil grubu ile bağlantıyı sağlar ve batarya paketinin genel voltajını izlemek için kullanılır.
- **ALERT (Pin 30):** Uyarı Çıkışı. Batarya sistemi bir hata durumu tespit ettiğinde (örneğin, aşırı sıcaklık, aşırı voltaj) bu pin, host mikrodenetleyiciyi uyarır.



Şekil 4.6: Bq76930 batarya yönetim sistemi entegresinin iç yapısı [47].

- **BQ76930 Batarya Yönetim Entegrasi Çalışma Modları:** BQ76930, farklı güç tüketim seviyelerini optimize etmek ve batarya paketinin doğru bir şekilde izlenmesini ve korunmasını sağlamak amacıyla çeşitli işlevsel modlara sahiptir. Bu modlar, sistemin ihtiyaç duyduğu enerji verimliliğini ve güvenliğini sağlamak için tasarlanmıştır.
 - **SHUTDOWN modu (KAPALI):** Cihazın tamamen kapalı olduğu ve iç devrelerin çoğunun devre dışı bırakıldığı bir durumdur. Bu mod, enerji tüketimini minimum seviyeye indirir ve yalnızca kaçak akımlar mevcuttur. Genellikle, bataryanın tamamen bağlantısının kesilmesi gerektiğinde veya cihazın uzun süre kullanılmayacağı durumlarda tercih edilir. SHUTDOWN modundan çıkmak için SHUTDOWN pinine yükselen bir sinyal uygulanması veya yazılım komutu gönderilmesi gerekir.
 - **SLEEP modu (UYKU):** BQ76930'un düşük güç modunda temel izlemeyi sürdürdüğü bir durumdur. Bu modda, hücre dengeleme devreleri devre dışı bırakılır ve iç bileşenlerin çalışma frekansı düşürülerek enerji tüketimi minimize edilir. Batarya paketinin düşük aktivite seviyesinde olduğu zamanlarda enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılır. Hücre voltajları sabit olduğunda ve aktif izleme veya dengeleme gerekmeyen durumlarda otomatik olarak devreye girer. Ancak, hücre voltajlarında veya akım akışında önemli değişiklikler tespit edilirse cihaz SLEEP modundan çıkar.
 - **NORMAL modu:** BQ76930'un hücre voltajlarını, sıcaklıkları ve akımı sürekli olarak izlediği aktif izleme modudur. Bu mod, batarya parametrelerinin doğru ve sık izlenmesinin gerektiği normal çalışma koşullarında kullanılır. Tüm izleme işlevlerinin aktif olduğu bu modda enerji tüketimi SLEEP moduna göre daha yüksektir. Cihaz, I²C veri yolunda aktif iletişim gerçekleştiğinde veya batarya paketinin şarj ya da deşarj durumunda olduğu durumlarda bu moda geçer.
 - **CELL BALANCING modu (HÜCRE Dengeleme):** BQ76930'un batarya paketindeki hücrelerin voltaj seviyelerini eşitlemek için pasif olarak dengeleme yaptığı bir moddur. Hücre voltajlarındaki farklılıkları azaltarak batarya paketinin performansını ve ömrünü optimize eder. Bu modda, hücre dengeleme işlemi sırasında enerji tüketimi NORMAL moddan daha yüksektir. Ana kontrol birimi tarafından gönderilen bir

komutla veya otomatik dengeleme özelliği etkinleştirildiğinde devreye girer.

Modlar arasında geçişler de belirli koşullara göre gerçekleşir. SHUTDOWN modundan SLEEP veya NORMAL moda geçiş yapmak için bir komut veya SHUTDOWN pinine fiziksel bir müdahale gereklidir. SLEEP modundan NORMAL moda geçiş, cihaz aktif koşullar tespit ettiğinde otomatik olarak gerçekleşir. Örneğin, voltaj veya sıcaklık değişiklikleri bu geçişi tetikleyebilir. NORMAL moddan SLEEP moduna geçiş ise belirli bir süre boyunca aktivite veya batarya koşullarında değişiklik tespit edilmediğinde gerçekleşir. NORMAL moddan CELL BALANCING moduna geçiş, I²C arayüzü üzerinden gönderilen bir komutla başlatılır.

Bu işlevsel modlar, BQ76930'un batarya paketini yönetirken esneklik sunmasını sağlar. Aynı zamanda, bataryaların ömrünü uzatarak ve enerji tasarrufu sağlayarak farklı çalışma koşullarında güvenli bir şekilde çalışmasını destekler.

- **BQ76930 Batarya Yönetim Entegresinde ADC:** BQ76930 entegresi, hücre voltajlarını, sıcaklıkları ve diğer batarya parametrelerini izlemek için dahili bir ADC (Analog-Dijital Çevirici) kullanır. Bu ADC, batarya hücrelerinin voltajlarını ve harici NTC termistörler aracılığıyla sıcaklık ölçümlerini gerçekleştirir ve ölçüm verilerini cihazın belleğinde saklar. Hücre voltajlarının ayrı ayrı ölçülmesi, batarya hücreleri arasındaki dengeyi sağlamak ve aşırı/düşük gerilim durumlarını tespit etmek için kritik bir rol oynar. Aynı şekilde, sıcaklık ölçümleri de aşırı sıcaklık durumlarında bataryaları korumak amacıyla kullanılır. BQ76930'un farklı çalışma modları bulunur. Normal çalışma modunda, bataryaların durumunu doğru ve hızlı bir şekilde izlemek için hücre voltajlarını ve sıcaklıkları sürekli olarak takip eder. Daha hassas ölçüm gerektiren durumlarda ise, aşırı örnekleme oranını artıran filtreli mod devreye girer. Bu mod, özellikle küçük gerilim değişikliklerini tespit etmek için uygundur. Ölçümler sırasında hücre voltajları, BQ76930'un belleğinde saklanan aşırı gerilim (overvoltage) ve düşük gerilim (undervoltage) eşik değerleri ile karşılaştırılır. Eğer bir hücrenin voltajı bu sınırların dışına çıkarsa, cihaz bu durumu algılayarak bir bayrak oluşturur ve kontrol birimine ileterek gerekli koruma önlemlerinin alınmasını sağlar. Bunun yanı sıra, BQ76930 batarya hücreleri arasındaki voltaj farklarını dengelemek için pasif dengeleme işlevine sahiptir. Bu dengeleme, her bir hücre için dahili MOSFET'ler

aracılığıyla gerçekleştirilir ve bataryaların eşit şekilde şarj edilmesini sağlar. BQ76930, hücre voltajlarını ve sıcaklıkları eşzamanlı olarak ölçebilir ve bu verileri belleğinde saklayarak, batarya paketinin her bir hücresinin durumu hakkında güncel ve tutarlı bilgi sunar. Tüm bu veriler, I²C arayüzü üzerinden ESP32 gibi bir mikrodenetleyiciye iletilir. Mikrodenetleyici, bu verilerden yararlanarak bataryaların genel durumu hakkında kararlar alabilir ve gerektiğinde dengeleme veya koruma işlemleri uygulayabilir.

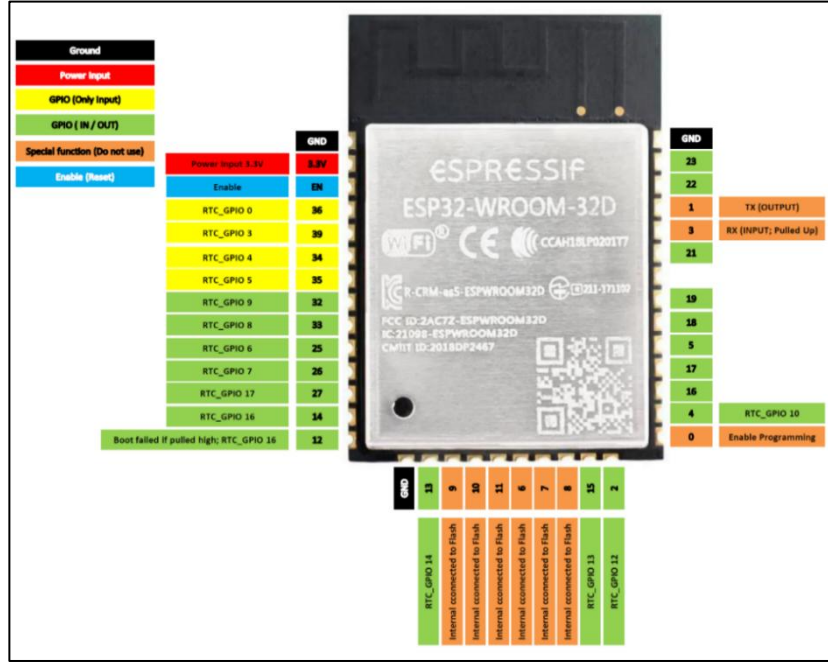
- **BQ76930 Batarya Yönetim Entegresinde Hücre Dengeleme:** Bq76930 entegresi, batarya hücreleri arasında voltaj dengesini sağlamak için pasif dengeleme (cell balancing) yöntemini kullanır. Bu süreçte, hücreler arasında oluşan voltaj farklılıklarını dengelemek amacıyla, belirli bir hücrenin fazla enerjisini harici bir direnç üzerinden deşarj eder. Bu sayede, her bir hücrenin voltaj seviyesi eşitlenir ve bataryanın genel performansı ile ömrü artırılır. Sistemde, dengeleme işlemi için seçilen direnç değeri 30Ω olarak belirlenmiştir. Bu direnç, 2010 kılıf tipinde, %1 toleranslı ve 1W gücündedir. Bu direnç, Bq76930'un dahili N-kanal MOSFET'leri aracılığıyla kontrol edilir. Dengeleme sürecinde, belirli bir hücre aşırı şarj olduğunda veya voltaj seviyesi diğer hücrelerden daha yüksek olduğunda, bu hücre, Bq76930'un dengeleme devresi tarafından belirli bir süre boyunca 30Ω'luk bu direnç üzerinden deşarj edilir.

4.3.2. Esp32-Wroom 32D-Wi-Fi BLE Modülü

ESP32-WROOM-32D, Espressif Systems tarafından üretilmiş, yüksek performanslı bir Wi-Fi ve Bluetooth modülüdür. Bu modül, güçlü bir mikrodenetleyici (MCU) ile birlikte Wi-Fi ve Bluetooth (BLE) iletişim yeteneklerini sunarak, IoT (Nesnelerin İnterneti) uygulamaları, kablosuz haberleşme sistemleri, akıllı ev otomasyonu ve endüstriyel çözümler gibi çeşitli alanlarda kullanım kolaylığı sağlar.

Tasarlanan sistemde, ESP32-WROOM-32D, kablosuz iletişim (Wi-Fi/Bluetooth) sayesinde bataryaları izleyen ve yönetim işlevlerini yerine getiren slave cihazlarla bağlantı kurar. Aynı zamanda, sistemin genel çalışma süreçlerini denetleyerek veri işleme görevini üstlenir. Bu modül, sistemin Ana Kontrol Ünitesi olarak görev yapar ve aşağıdaki önemli işlevleri yerine getirir. Sistemin görevleri şunlardır:

- **Kablosuz İletişim:** Wi-Fi ve Bluetooth protokolleri aracılığıyla bataryaları izleyen ve yönetim işlevlerini yürüten slave cihazlarla veri alışverişi sağlar.
- **Veri İşleme:** Toplanan verilerin analizini yaparak, sistemin sağlıklı ve güvenli bir şekilde çalışmasını garanti eder.
- **Sistem Denetimi:** Batarya yönetimi ve enerji verimliliği açısından sistemin genel çalışmasını kontrol eder



Şekil 4.7: ESP32 WROOM 32D modülünün pinlerine bağlantı ataması [48].

ESP32-WROOM-32D'nin temel özellikleri şunlardır:

- Wi-Fi ve Bluetooth LE desteği
- Çift çekirdekli işlemci (240 MHz'e kadar)
- Yüksek enerji verimliliği modlarıyla düşük güç tüketimi

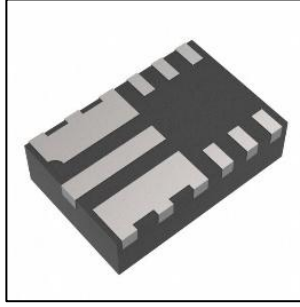
4.3.3. AP63356DV-7 Voltaj Regülatör Entegresi

AP63356, 3.8V ila 32V giriş voltaj aralığında yüksek verimlilikli step-down (düşürücü) DC-DC dönüştürme için tasarlanmış, 3.5A çıkış sağlayabilen senkron buck dönüştürücüdür. Hem yüksek taraf hem de düşük taraf MOSFET'leri entegre edilmiştir, bu da çeşitli uygulamalarda verimli güç yönetimini sağlar. Entegre, elektromanyetik girişimi (EMI) azaltmak için optimize edilmiştir ve anahtarlama gürültüsünü en aza indirmek için özel bir kapı sürücü şeması ve frekans yayma spektrumu (FSS) özelliği içerir.

AP63356'nın temel özellikleri şunlardır:

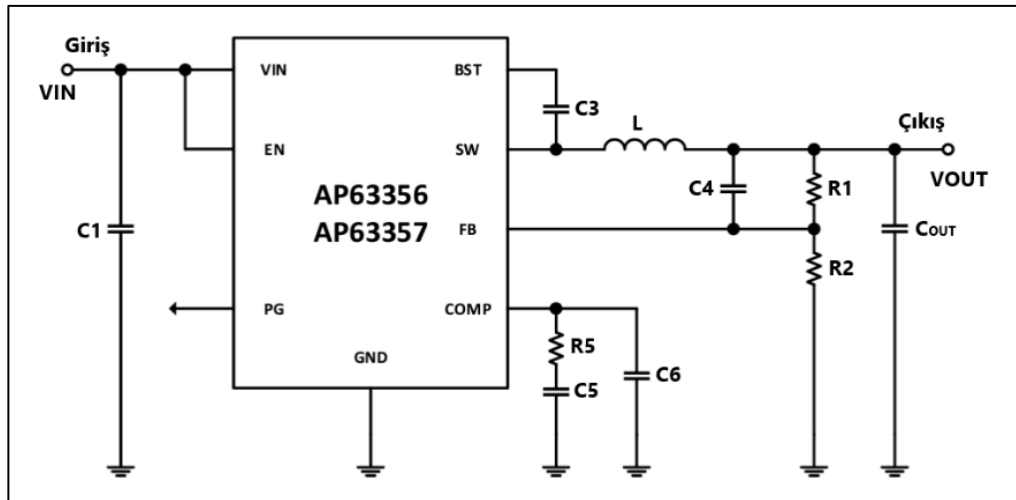
- 3.5A sürekli çıkış akımı
- 450kHz anahtarlama frekansı
- Hafif yüklerde verimli çalışmak için düşük dinlenme akımı (22 μ A)
- Alçak gerilim kilitleme (UVLO), döngü başına akım sınırlama ve termal kapatma gibi koruma devreleri
- Dağıtılmış güç kaynakları, tüketici elektroniği ve yük noktası güç sistemleri gibi uygulamalar için tasarlanmıştır.

Bu voltaj regülatörü, 3mm $\times$ 2mm boyutlarında kompakt bir V-DFN3020-13 paketinde sunulmaktadır, bu da alan açısından kısıtlı tasarımlar için uygundur ve aynı zamanda mükemmel termal performans sağlar.



Şekil 4.8: AP63356 entegresinin 3D kılıf görünümü [49].

Sistemin devre şeması aşağıda gösterilmiştir. Sistemde kullanılan bileşenlerin seçimi ve hesaplamalarına ilişkin detaylar da ayrıca sunulmuştur.



Şekil 4.9: AP63356x serisine ait entegrelerin şematik bağlantı yapısı [49].

Hesaplamalar ve kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

R1 ve R2 aşağıdaki denklem (4.1) aracılığıyla bulunur.

$$R_1 = R_2 \left(\frac{V_{out}}{0.8V} - 1 \right) \quad (4.1)$$

R5 aşağıdaki denklem (4.2) ve (4.3) aracılığıyla bulunur.

$$R_5 = \frac{2\pi f_c V_{out} C_{out} R_T}{g_m V_{FB}} \quad (4.2)$$

$$R_5 = 5.2 \times 10^3 \left[\frac{\Omega}{A} \right] f_c V_{out} C_{out} \quad (4.3)$$

C5 ve C6 kompanzasyon kapasitörleri aşağıdaki denklem (4.4) ve (4.5) aracılığıyla bulunur.

$$C_5 = \frac{V_{out} C_{out}}{I_{out} R_5} \quad (4.4)$$

$$C_6 = \max\left(\frac{R_c C_{out}}{R_5}, \frac{1}{\pi f_{sw} R_5}\right) \quad (4.5)$$

İndüktör değerinin hesaplanması, bir dönüştürücünün tasarlanmasında kritik bir faktördür. Aşağıdaki denklem (4.6) aracılığıyla L değeri bulunur.

$$L = \frac{V_{out} (V_{in} - V_{out})}{V_{in} \Delta I_L f_{sw}} \quad (4.6)$$

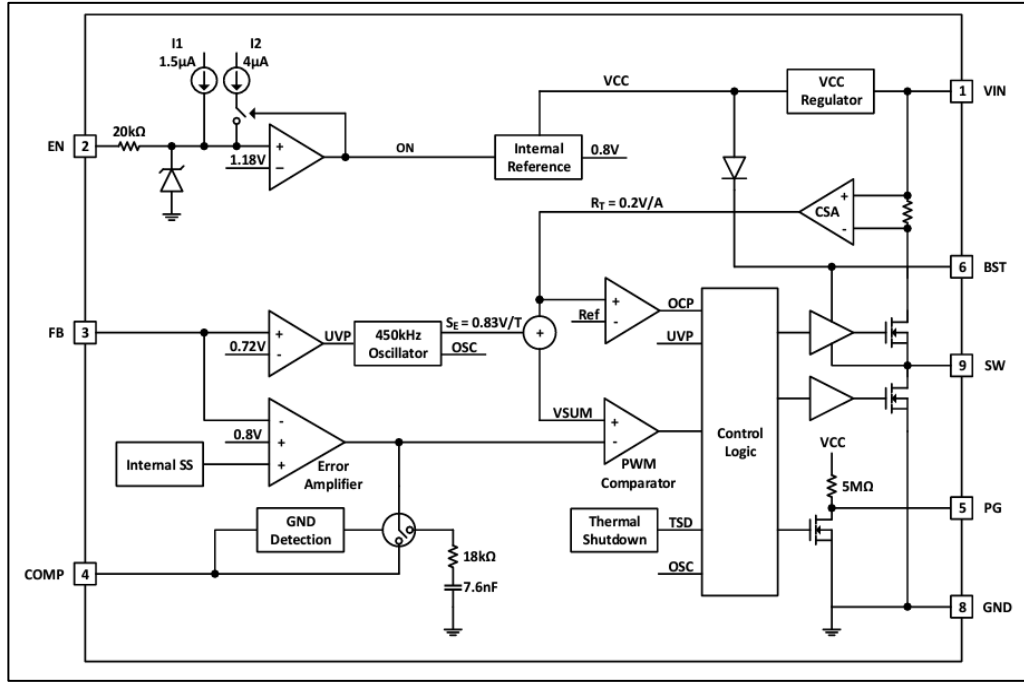
İndüktörde oluşan zirve akımı aşağıdaki denklem (4.7) aracılığıyla bulunabilir.

$$I_{peak} = I_{load} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (4.7)$$

C4 aşağıdaki denklem (4.8) aracılığıyla bulunur. C4'ün değeri bu aralıkta olması gerekmektedir.

$$C_4 = \left[\frac{1}{10\pi f_c R_1}, \frac{1}{4\pi f_c R_1} \right] \quad (4.8)$$

Sistemde kullanılan AP63356 entegresinin blok diyagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.10: AP63356 entegresinin iç yapısı [49].

4.3.4. MF52A1-103F3950 NTC Termistör

MF52A1-103F3950, NTC (Negative Temperature Coefficient) tipi bir sıcaklık sensörüdür ve direnci sıcaklık arttıkça azalır. "MF52A1-103F3950" kodundaki "103", 10 kΩ'luk nominal oda sıcaklığı direncini, "F3950" ise termistörün B (beta) değerini, yani sıcaklık değişimine bağlı olarak direncin ne kadar hızlı değiştiğini ifade eder. Bu termistörün beta değeri 3950K'dir. NTC'nin teknik özelliklerinde paylaşılan değerler aşağıda verilmiştir. Tasarlanan sistemde kullanılan NTC serisi, Şekil 4.11'de gösterilen teknik özellikler tablosunda işaretlenmiştir.

Part No.	Rated Resistance R ₂₅ (KΩ)	B Value (25/50°C) (K)	Rated Power(mw)	Dissi. Coef. (mW/°C)	Thermal time Constant(S)	Operating Temp.(°C)
MF520003100	0.1-20	3100	≤ 50	≥ 2.0 In Still Air	≤ 7 In Still Air	-55° - +125°C
MF520003270	0.2-20	3270				
MF520003380	0.5-50	3380				
MF520003470	0.5-50	3470				
MF520003600	1-100	3600				
MF520003950	5-100	3950				
MF520004000	5-100	4000				
MF520004050	5-200	4050				
MF520004150	10-250	4150				
MF520004300	20-1000	4300				
MF520004500	20-1000	4500				

Şekil 4.11: NTC termistörün beta değeri [50].

Bu termistör genellikle hassas sıcaklık ölçümleri için kullanılır ve genellikle batarya yönetim sistemlerinde, elektronik devrelerde ve diğer hassas sıcaklık izleme uygulamalarında tercih edilir. Termistörün doğru çalışabilmesi için bir referans sıcaklık (genellikle 25°C) ve buna karşılık gelen direnç değeri (10 kΩ) ile kalibre edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.12: NTC sıcaklık sensörü [50].

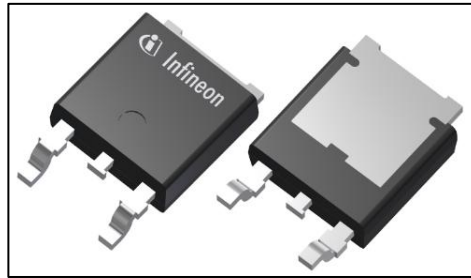
NTC sensörünün sıcaklıkla değişen direnç değeri aşağıdaki denklem (4.9) aracılığıyla bulunur.

$$R(T) = R_0 e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (4.9)$$

- $R(T)$: Sıcaklık TTT (Kelvin cinsinden) için termistörün direnci.
- R_0 : Referans sıcaklık T_0 (genellikle 25°C veya 298.15 K) için termistörün direnci.
- β : Termistörün beta katsayısı.
- T : Hedef sıcaklık (Kelvin cinsinden).
- T_0 : Referans sıcaklık (Kelvin cinsinden).

4.3.5. IPD50N10S3L ve UPA1918 Mosfetleri

Sistemde şarj ve deşarj kontrolü için uPA1918 ve IPD50N10S3L olmak üzere iki farklı mosfet kullanılmaktadır. Bu mosfetler, batarya yönetim sisteminin güvenli ve verimli çalışmasını sağlarken, enerji akışını düzenleyerek bataryaların doğru bir şekilde şarj edilip deşarj edilmesini kontrol eder. Bu mosfetlerden biri olan IPD50N10S3L, Infineon Technologies tarafından geliştirilen bir N-kanal OptiMOS™ Güç Transistörüdür ve TO-252-3 (DPAK) paketinde sunulmaktadır. Bu paketleme, yüzey montaj teknolojisi (SMT) için yaygın olarak tercih edilmekte olup, kompakt yapısı sayesinde iyi bir ısı dağılımı sağlar.



Şekil 4.13: DPAK (TO-252-3) kılıf mosfet 3D görüntüsü [51].

- Kompakt boyutlar, sınırlı alanlarda kullanılabilir.
- İyi termal performans sunar.
- Yüzeye monte edilebilme özelliği.

Öne çıkan bazı özellikleri şunlardır:

- 50A sürekli drenaj akımını 25°C'de ve 38A akımı 100°C'de, 10V gate-source voltajında taşıyabilir.
- Maksimum drenaj-kaynak voltajı (VDS) 100V olup, VGS = 10V ve 50A'de 12,5 mΩ gibi düşük bir RDS (on) değeri vardır.
- 175°C'ye kadar çalışma sıcaklıklarını destekler ve RoHS uyumludur.
- Ayrıca cihaz 100% avalanche testi ile sağlamlaştırılmıştır ve otomotiv uygulamaları için uygundur (AEC Q101 sertifikalıdır).



Şekil 4.14: TSSOP-8 kılıf uPA1918 3D görüntüsü [52].

uPA1918 ise Renesas tarafından geliştirilen bir P-kanal MOSFET'tir ve düşük voltajlı uygulamalar, özellikle taşınabilir cihazlarda güç anahtarlama için uygundur.

Ana özellikleri şunlardır:

- Maksimum drenaj-kaynak voltajı -60V olup, 3,5A sürekli drenaj akımını destekler.
- Düşük açma-direnç değerleri (RDS (on)) bulunmaktadır. Örneğin, VGS = -10V ve 2A akımında 143 mΩ'luk bir değer sunar, bu da enerji verimliliği sağlar.
- 4.0V gate voltajı ile doğrudan sürülebilir ve anahtarlama işlemleri için uygundur.

Bu mosfet, TSSOP-8 (Thin Shrink Small Outline Package- İnce Küçültülmüş Küçük Çizgili Kılıf) formunda gelir. TSSOP-8 paketleme, küçük ve ince yapısıyla düşük güç tüketen uygulamalar için uygundur. TSSOP-8 kılıfı şu özelliklere sahiptir:

- Küçük ve ince tasarımı sayesinde taşınabilir ve kompakt cihazlar için idealdir.
- SMT (Surface Mount Technology- Yüzey Montaj Teknolojisi) uygulamaları için uygundur.

- Düşük profil sayesinde sınırlı alanlarda kullanılabilir.

Mosfet’lerde iki ana güç kaybı vardır:

- Anahtarlama Güç Kaybı (Switching Loss): mosfet açılıp kapanma sırasında oluşan kayıplardır.
- İletim Güç Kaybı (Conduction Loss): MOSFET açık olduğunda (düşük dirençli) üzerinden geçen akımın neden olduğu kayıptır.

İletim Kaybı (Conduction Loss) aşağıda bulunan (4.10) denklemiyle hesaplanır.

$$P_{con} = I_{DS}^2 \times R_{DS(on)} \quad (4.10)$$

- I_{DS} = Drain – Source akımı (MOSFET üzerinden geçen akım),
 $R_{DS(on)}$ = MOSFET’in açıkken (ON durumunda) Drain – Source direnci.

Anahtarlama Kaybı (Switching Loss) aşağıda bulunan (4.11) denklemiyle hesaplanır.

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{DS} \times f_{sw} \times (t_r + t_f) \quad (4.11)$$

- V_{DS} = Drain–Source gerilimi.
- I_{DS} = Drain – Source akımı.
- f_{sw} = Anahtarlama frekansı
- t_r = Mosfetin açılma süresi (Rise time).
- t_f = Mosfetin kapanma süresi (Fall time).

Mosfetin soğutma gereksinimi veya sıcaklık artışı ve gerekli termal hesaplamalar aşağıda bulunan (4.12) ve (4.13) denklemleriyle hesaplanabilir. MOSFET ‘in Termal Direnci $R_{\theta JA}$: MOSFET ‘in ısısının dışarı atılma yeteneğini belirler.

$$\Delta T = P_{total} \times R_{\theta JA} \quad (4.12)$$

- ΔT = Sıcaklık artışı.

$$P_{total} = \text{Toplam güç kaybı } (P_{con} + P_{sw}) \quad (4.13)$$

- $R_{\theta JA}$: MOSFET'in junction – to – ambient termal direnci.

Eğer MOSFET 'in aşırı ısınmasını önlemek gerekiyorsa, ek bir soğutucu (heatsink) kullanılabilir ve bu durumda termal direnç hesaplaması yeniden yapılmalıdır. Gate Yüğü (Gate Charge, Q_g) MOSFET 'in açılması ve kapanması sırasında sürülmesi gereken yük miktarıdır. Bu yük, sürücü devresinin MOSFET 'i hızlı bir şekilde anahtarlayabilmesi için önemlidir. Bu akım (4.14) denklemiyle bulunabilir.

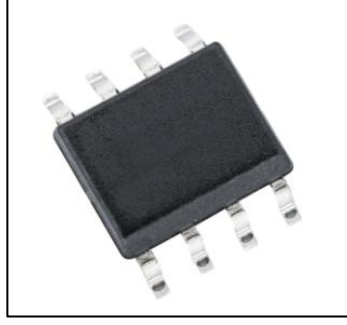
$$I_{gate} = \frac{Q_g}{t_{switch}} \quad (4.14)$$

- I_{gate} : Mosfetin gate sürücü akımı.
- Q_g : Mosfetin gate yükü.
- t_{switch} : Anahtarlama süresi (Mosfetin açılıp kapanma süresi).

4.3.6. NCV317 Voltaj Regülatörü

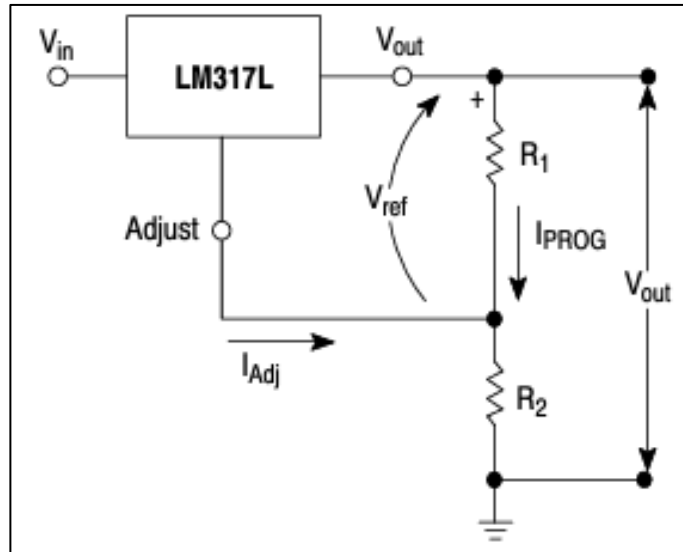
NCV317, Onsemi tarafından üretilen ayarlanabilir pozitif voltaj regülatörüdür. Giriş voltajı ile çıkış voltajı arasındaki farkı dengelemek için kullanılır ve 1.2V ile 37V arasında çıkış voltajı sağlayabilir. Maksimum 100 mA akım çıkışı ile düşük güç tüketimli uygulamalara uygundur. NCV317, iç akım sınırlaması, termal aşırı yük koruması ve güvenli alan telafisi gibi koruma özelliklerine sahiptir. Bu özellikler, devrenin güvenli bir şekilde çalışmasını ve aşırı yüklenme veya aşırı sıcaklık

durumlarında cihazın zarar görmesini önler. Otomotiv uygulamaları için uygundur ve AEC-Q100 standardına göre sertifikalandırılmıştır. Ayrıca, NCV317'nin kullanımı oldukça basittir; çıkış voltajını ayarlamak için sadece iki harici direnç gerektirir. Bu regülatör, yerel kart regülasyonu, programlanabilir çıkış regülatörü ve hassas akım regülatörü gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.



Şekil 4.15: SOIC-8 kılıf NCV/LM317 3D görüntüsü [53].

NCV317 / LM317L entegresinin iç yapısı aşağıdaki diyagramda gösterilmektedir. Bu entgre, ayarlanabilir bir lineer voltaj regülatörü olup, çıkış voltajını geniş bir aralıkta ayarlama kolaylığı sunar. Dahili yapısı, referans voltaj kaynağı, hata amplifikatörü, akım sınırlama devresi ve termal koruma gibi temel bileşenlerden oluşur. Bu sayede hem güvenilir hem de kararlı bir voltaj regülasyonu sağlanırken, aşırı akım ve sıcaklık koşullarına karşı entgreyi koruma altına alır. NCV317 / LM317L entegresi, düşük maliyetli ve verimli bir çözüm sunarak çeşitli güç yönetimi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.16: NVC/LM317 voltaj regülatörü iç yapısı [54].

NCV317 / LM317L entegresinin hesaplamaları aşağıdaki gibidir: Bu entegreyi kullanarak istenilen çıkış voltajını ayarlamak için aşağıda yer alan (4.15) ve (4.16) kullanılır:

$$V_{\text{çıkış}} = 1.25V\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{\text{adj}}R_2 \quad (4.15)$$

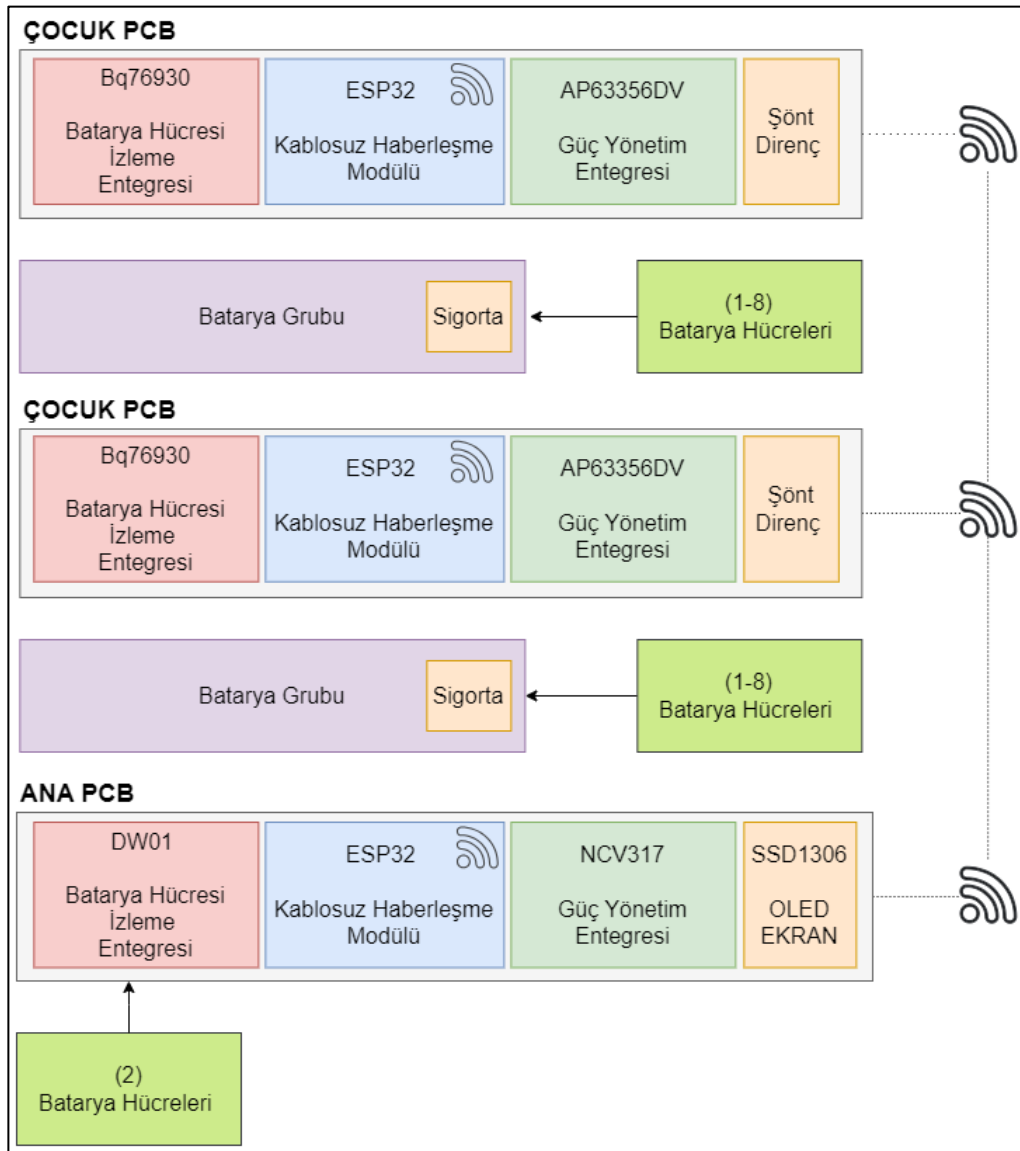
$$V_{\text{çıkış}} = 1.25V\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (4.16)$$

* I_{adj} 100 μA 'dan daha düşük bir değerde kontrol edildiğinden, bu terimle ilgili hata çoğu uygulamada ihmal edilebilir düzeydedir.

5. DONANIM TASARIMI VE TEST

Bu bölümde, sistemde kullanılan devre kartlarının bileşenleri ve tasarımı ele alınmaktadır. Sistemde bir ana kart (master-ana) ve iki alt birim kartı (slave-çocuk) bulunmaktadır. Alt birim kartları, bataryaların izlenmesi ve kontrol edilmesi işlemlerini gerçekleştirmekte; mosfetler aracılığıyla şarj ve deşarj durumlarını yönetmektedir.

Ayrıca, bu kartlar üzerinde bulunan şönt dirençleri batarya akımını izlemek için kullanılmaktadır. Bu bölümde, tasarlanan sistemin donanım tasarımı detaylı bir şekilde incelenecektir. Şekil 5.1’de sistemin blok diyagramı gösterilmektedir.



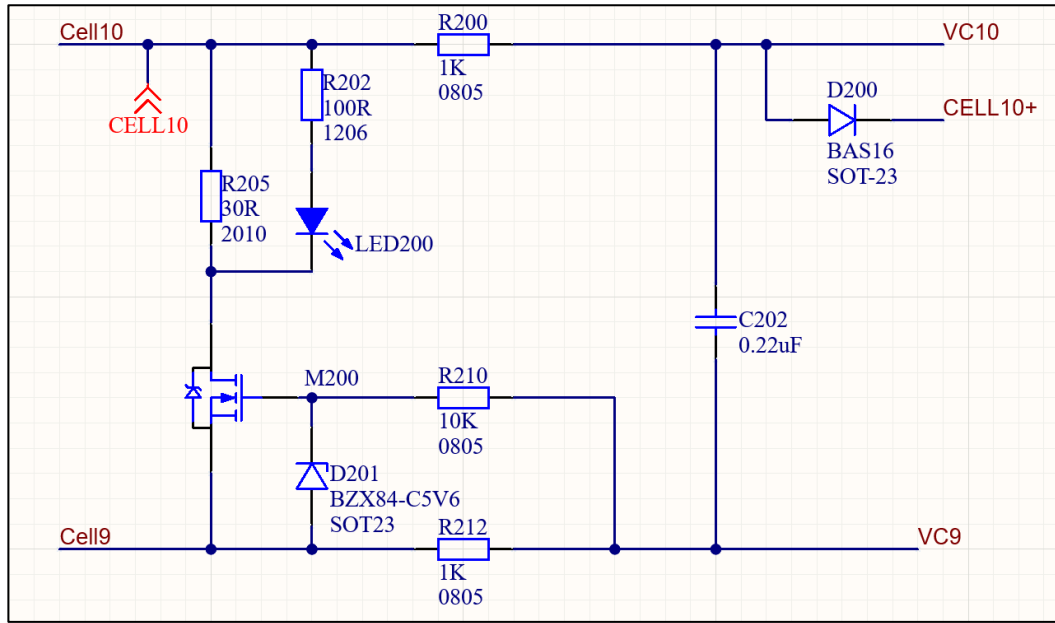
Şekil 5.1: Kablosuz batarya yönetim sistemi blok diyagramı.

5.1. Şematik Devresi

Bu sistemin şematik ve PCB tasarımı, Altium Designer® programı aracılığıyla yapılmıştır. Tasarım sırasında, sistemin tüm devre bileşenleri dikkatle seçilmiş ve doğru bağlantılar yapılmıştır. Aşağıda, sistemin tasarımına dahil olan devrelerin açıklamaları yer almaktadır:

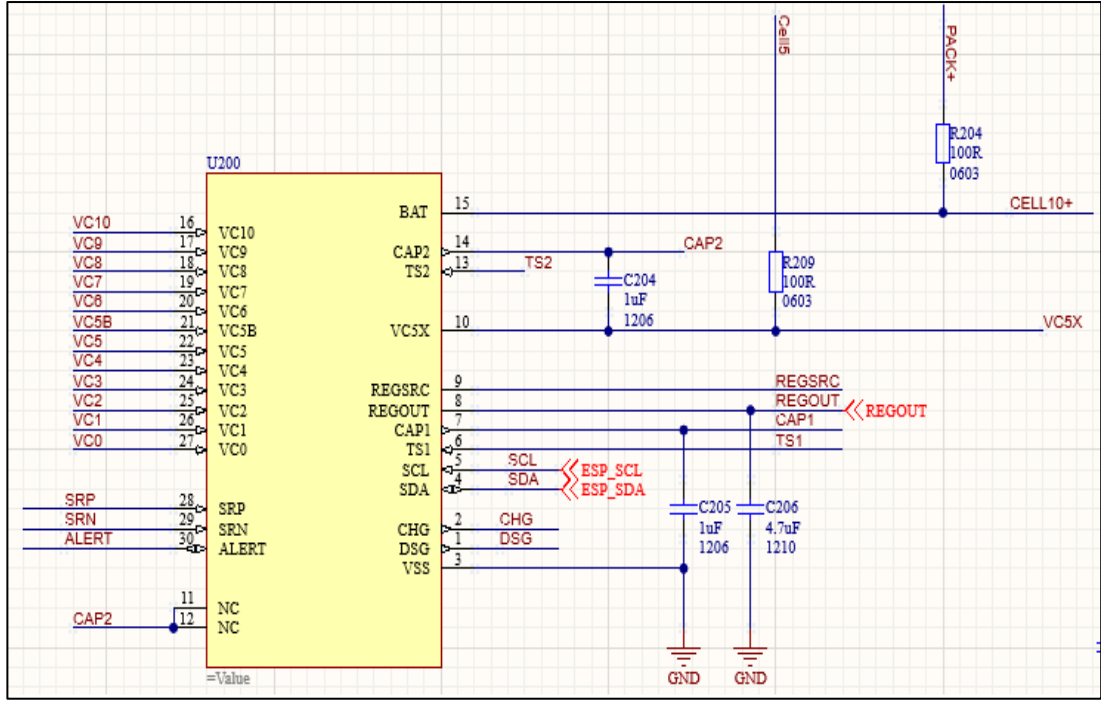
5.1.1. Batarya İzleme ve Dengeleme Devresi

Bataryalar J200 konektörü üzerinden sisteme bağlıdır, J201 konektörü ise NTC bağlantısı için kullanılır ve sıcaklık sensörleri bataryalara bağlıdır. Her bir voltaj algılama hattına, bir RC filtre ve LED yerleştirilmiştir. Dengelenme devresinin aktif olduğunu görsel olarak doğrulamak için, dengeleme dirençleri (R205-R252) ile paralel olarak LED göstergeleri (LED200-LED209) yerleştirilmiştir.



Şekil 5.2: Batarya izleme ve dengeleme devresi şematiği.

Bq76930 entegresi ile ilgili olarak, entegrenin 4. ve 5. pinleri SCL ve SDA hatları üzerinden ESP modülüne bağlanmıştır. R204 Feedback direncidir. 11. ve 12. pinler ise kısa devre edilip CAP2 ye bağlanmıştır İç voltaj regülatörünün çıkışlarına önerilen baypas kapasitörleri yerleştirilmiş olup, üretici tarafından tavsiye edildiği üzere I²C veri çıkış pinlerine pull-up dirençleri eklenmiştir. Bu sayede veri iletimi güvenli bir şekilde sağlanmaktadır.



Şekil 5.3: Batarya yönetim sistemi entegresinin bağlantı şematığı.

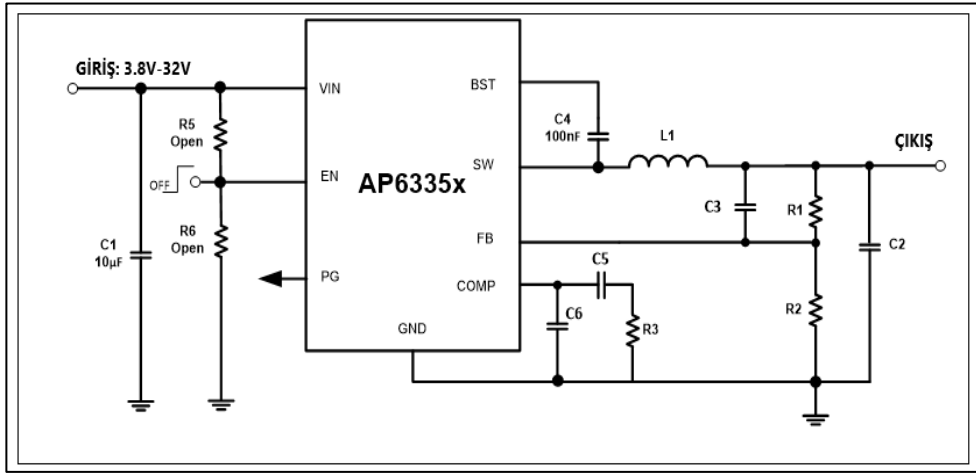
Bq76930 entegresi, 10 kanala kadar ölçüm yapabilme kapasitesine sahiptir. Tasarımda kullanılan bu entegre, 8 kanala kadar ölçüm yapılacak şekilde ayarlanmıştır. SCL ve SDA hatları 10K'lık dirençlerle pull-up yapılmıştır. ALERT pini, bir hata olayı yaşanabileceğini veya bir coulomb sayacı örneğinin okunmaya hazır olduğunu gösterebilir. Ayrıca, mevcut ALERT pini harici bir ikincil koruyucu tarafından da kullanılabilir. Bu sayede, CHG ve DSG sinyallerinin devre dışı bırakılması için yedek bir yöntem sağlanmış olur ve sistemin izlenebilirliği artırılır. R204, geribildirim (feedback) direnci olarak görev yapmaktadır. TS1 ve TS2 pinleri, harici NTC'lerin bağlantıları için kullanılmıştır. SRN ve SRP pinleri ise, şönt direnç üzerinden düşen gerilim aracılığıyla akım ölçümü işlemini gerçekleştirir.

5.1.2. Voltaj Regülatör Devresi

Voltaj regülatör devreleri, sistemin güvenli ve kararlı bir enerji kaynağı sağlaması için kritik öneme sahiptir. AP63356 entegresi, batarya paketinden aldığı yüksek voltajı daha düşük, sabit bir voltaja düşürerek ESP32'nin çalışması için gerekli olan 3.3V seviyesine indirir. Bu gerilim düşürücü, ESP32'nin güvenli ve stabil bir şekilde çalışması için gereken enerjiyi sağlar. Benzer şekilde, master kart üzerinde yer alan NCV317 voltaj regülatörü de bataryadan aldığı gerilimi ESP32'nin ihtiyaç duyduğu

seviyeye düşürür. Her iki regülatör de batarya sisteminden gelen yüksek voltajı güvenli bir seviyeye indirerek ESP32'nin verimli ve güvenli çalışmasını destekler.

Ana kartta bulunan ESP cihazı, NCV317 seri doğrusal voltaj regülatörü ile beslenir. Aynı şekilde, çocuk kartlarda yer alan ESP modülleri ise AP63356 entegresi ile beslenir. Bu iki regülatörden NCV317, doğrusal bir regülatör olarak çalışırken, AP63356 indüktans anahtarlama yöntemiyle gerilim düşürme işlemini gerçekleştirir. Aşağıda, çocuk kartlarda kullanılan AP63356 entegresinin devrede nasıl kullanıldığı ve değerlerinin nasıl seçildiği gösterilmiştir. Çocuk kartta bulunan AP63356 entegresinde kullanılan direnç, kapasitör ve indüktans değerleri, daha önce paylaşılan formüllere uygun bir şekilde hesaplanmış ve elde edilen değerler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.



Şekil 5.4: AP6335x entegresinin bağlantı şeması [49].

AP63356 entegresinin anahtarlama frekansı 450 kHz'dir. Sistem giriş voltajı, bağlı olan pil sayısına göre değişeceği için maksimum pil sayısı 8 olup, maksimum giriş gerilimi 32V seviyesindedir. Tüm bu parametreler göz önünde bulundurularak, çıkış veriminin maksimum olacağı şekilde indüktans (L), kapasitans (C) ve direnç (R) değerleri seçilmiştir.

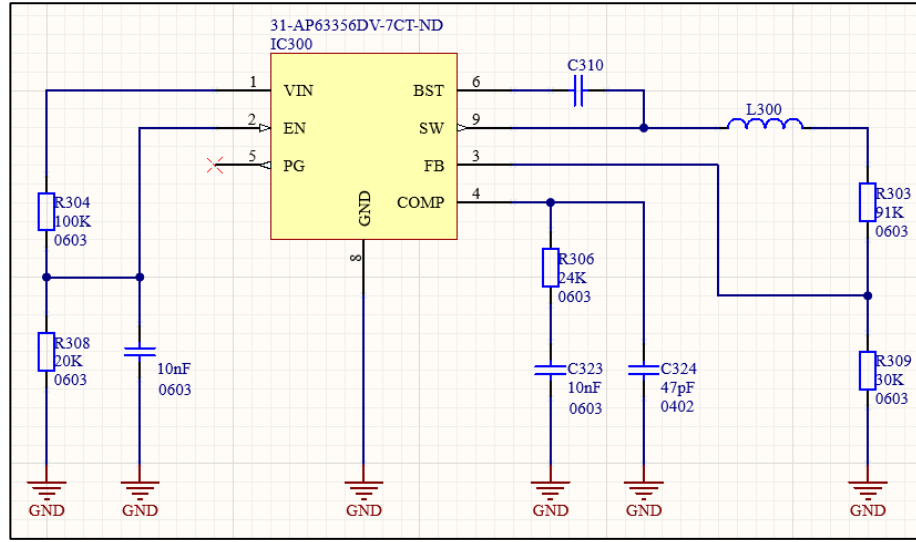
Tablo 5.1: AP63356 entegresinin değerlerinin seçilmesi.

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Anahtarlama Frekansı	450 kHz	Toplam Güç Kaybı	1,873 W
Giriş Voltajı	32,0 V	Verimlilik	%84,092
ıkış Voltajı	3,3 V	Endüktör Akım Dalgalanması	1,40 A-p-p
ıkış Akımı	3,0 A	ıkış Voltaj Dalgalanması	16,46 mVp-p
Endüktör Akım Dalgalanma Oranı	%40	On-Time (Açık Zaman)	250 ns
Önerilen Endüktans	5,1 μ H	Duty Cycle (Görev Döngüsü)	0,11
Kapasitör Kapasitansı	15 μ F	Termal Direnç	85 $^{\circ}$ C/W
Kapasitör ESR	5 mOhm	Bağlantı Sıcaklığı (Tj)	120,7 $^{\circ}$ C
st Mosfet Rds(on)	103 mOhm	IC'deki G Tüketimi	1,428 W
Alt Mosfet Rds(on)	69 mOhm		

Aşağıda şematik tasarımı paylaşılan AP63356 alçaltıcı (buck) regülatörü, voltaj düşürme işlemi için kullanılmıştır. Bu tür devreler, yüksek voltajı daha düşük ve sabit bir voltaja dönüştürmek amacıyla tasarlanmıştır. Devrede yer alan dirençlerin işlevleri şu şekildedir:

- **R304 (100k Ω):** Enable (EN) pinine bağlıdır. Bu direnç, AP63356 entegresinin etkinleştirilip devreye girmesini sağlar. Genelde, regülatörün çalışmasını kontrol etmek için kullanılır.
- **R308 (20k Ω):** Enable pinine bağlı diğer bir dirençtir. AP63356 entegresinin açılmasını ve kapatılmasını sağlar.
- **R303 (1k Ω):** İndüktör L300 ile bağlantılıdır ve devrenin geri beslemesini sağlar. Geri besleme (FB) pinine bağlı bu direnç, çıkış voltajını ayarlamak ve sabit tutmak için kullanılır.
- **R306 (24k Ω):** Geri besleme devresiyle bağlantılı olup çıkış voltajının hassas ayarlanmasına katkıda bulunur.

- **R309 (10k Ω):** Çıkış voltajının ayarlanması ve stabilitesinin sağlanmasında görev alır.



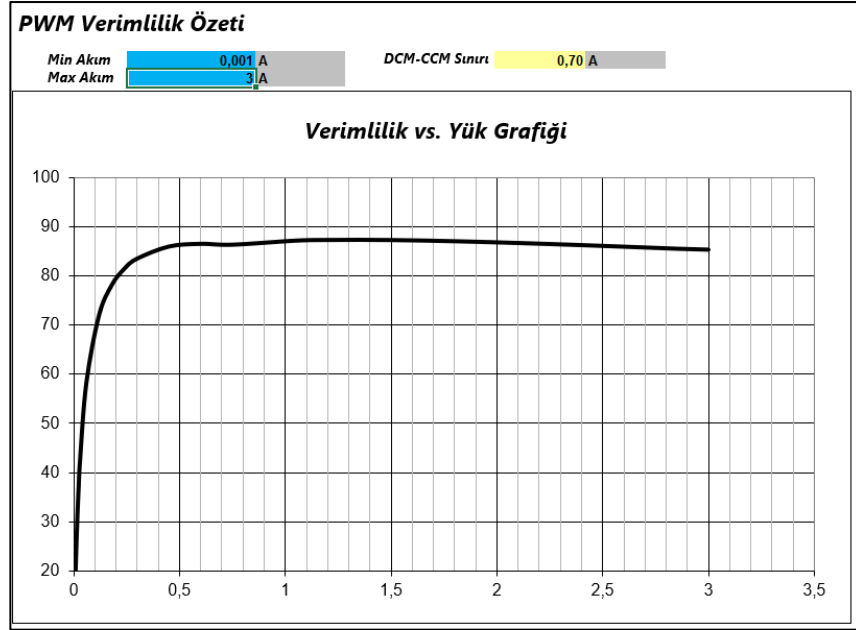
Şekil 5.5: AP63356 entegresinin devre şematığı.

Sistemde yer alan kapasitörlerin (C310, C323, C324) işlevleri şu şekildedir:

- **C310 (10nF):** Bu kapasitör, AP63356'nın anahtarlama devresinde "Boost" pinine bağlıdır. Anahtarlama frekansını stabilize etmek ve çıkış voltajının kararlılığını sağlamak amacıyla kullanılır.
- **C323 (10nF):** Geri besleme (FB) devresinde yer alan bir filtre kapasitörüdür. Çıkış voltajını stabilize ederek düzgün bir çıkış sağlanmasına yardımcı olur.
- **C324 (47pF):** Geri besleme hattında yer alarak çıkış voltajının stabilitesini artırır ve voltajın düzenli bir şekilde çıkışını sağlar.

Bu kapasitörler, devredeki gürültüyü azaltmak, anahtarlama frekansını düzenlemek ve çıkış voltajını stabilize etmek için kritik görevler üstlenir.

Sistemde yer alan indüktör (L300), alçaltıcı (buck) regülatör devresinin önemli bir bileşenidir. Bu indüktör, yüksek giriş voltajını istenilen daha düşük çıkış voltajına dönüştürürken aynı zamanda enerji depolama görevi görür. Anahtarlama sırasında oluşan akım değişimlerini yumuşatarak, çıkışın daha stabil olmasını sağlar ve voltaj dalgalanmalarını en aza indirir. Böylece, devrede daha güvenilir ve verimli bir enerji dönüşümü elde edilir.

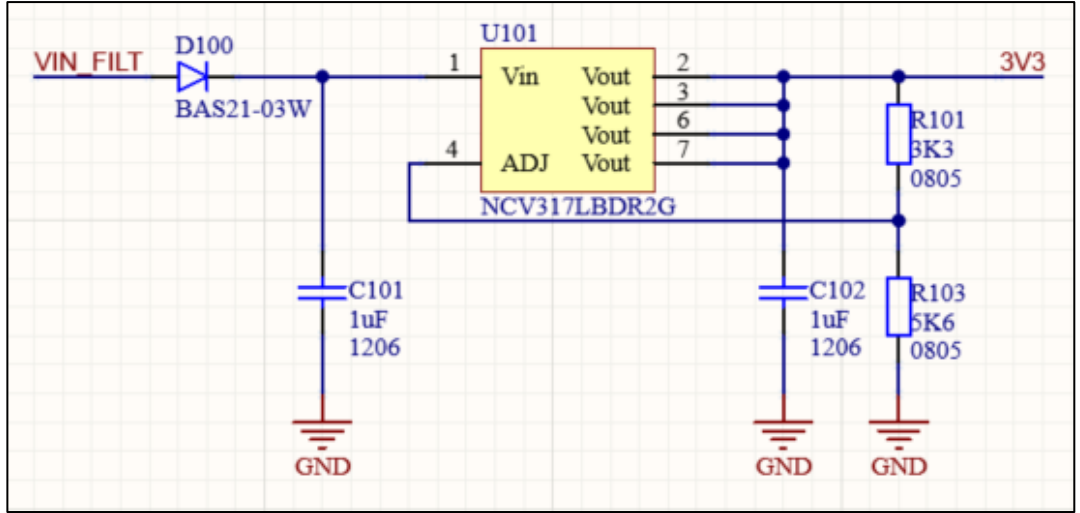


Şekil 5.6: AP63356 entegresinin devredeki verimlilik ve yük ilişkisi [49].

Yukarıda yer alan, Şekil 5.6'da gösterilen grafikte, PWM modülasyonunun verimliliği ile yük arasındaki ilişki gösterilmektedir. Grafikte yatay eksen yük akımını (amper cinsinden), dikey eksen ise verimlilik yüzdesini ifade etmektedir. Verimlilik grafiği, 0,001 A minimum akımdan başlayarak 3 A maksimum akıma kadar olan yükler için çizilmiştir.

- **Min Akım (0,001 A) ve Max Akım (3 A):** Grafikteki verimlilik, yük akımı arttıkça yükselmekte ve belirli bir noktada maksimum seviyeye ulaşmaktadır.
- **DCM-CCM Sınırı (0,70 A):** Bu, verimlilik açısından anahtar bir geçiş noktasıdır. Bu sınır, düşük akımda anahtarlama kayıplarının daha düşük olduğu kesikli iletkenlik modu (DCM) ile sürekli iletkenlik modu (CCM) arasında geçişi ifade eder.
- **Verimlilik vs. Yük Grafiği:** Grafikte görüldüğü gibi, yük arttıkça verimlilik de artmakta, ardından belirli bir noktada stabil hale gelmektedir. 2,5 A seviyesinden sonra verimlilikte hafif bir düşüş gözlemlenmektedir, ancak genel olarak verimlilik %80-90 arasında kalmaktadır.

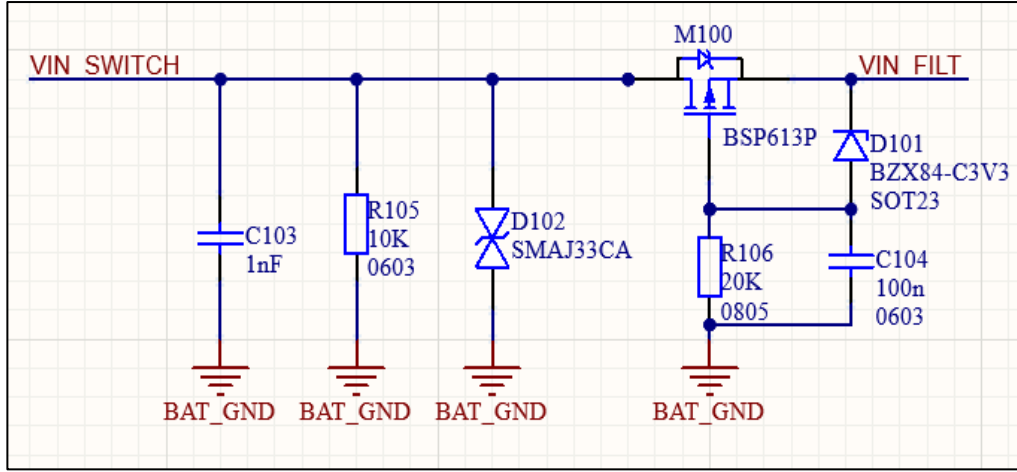
Şekil 5.7'de gösterilen devrede, AP63356 entegresinin giriş beslemesinde D300 ters polarite koruma diyotu bulunurken, NCV317 voltaj regülatörüne sahip kartta D100 diyotu ile sistem ters polariteye karşı korunmaktadır. Ayrıca, olası ters polarite durumlarına karşı M100 P-kanal mosfet kullanılarak sistemin güvenliği sağlanmaktadır



Şekil 5.7: NVC317 voltaj regülatörün devre şematiği.

- **D100 (BAS21-03W Schottky Diyot):** Schottky diyot, ters polarite koruması sağlar. Yani, devreye yanlış bağlantı yapıldığında, devre elemanlarının zarar görmesini önler. Giriş voltajı yanlış bağlanırsa, bu diyot ters polariteyi engelleyerek devreyi korur.
- **C101 (1µF Kapasitör):** C101, giriş voltajındaki dalgalanmaları filtrelemek için kullanılır. Vin hattında bulunan ani voltaj değişimlerini yumuşatır ve devrenin stabilitesini artırır.
- **U01 (NCV317LBDR2G Regülatör):** Bu entegre, giriş voltajını düzenleyerek 3.3V seviyesine düşürür. NCV317, ayarlanabilir bir lineer voltaj regülatörüdür ve çıkış voltajını belirli bir sabit değerde tutmak için kullanılır.
- **C102 (1µF Kapasitör):** C102, regülatörün çıkışındaki voltaj dalgalanmalarını yumuşatır ve çıkış voltajının stabil olmasını sağlar. Regülatör çıkışındaki ani voltaj değişimlerini ve gürültüleri engeller.
- **R101 (3k3 Direnç) ve R103 (5k6 Direnç):** Bu dirençler, regülatörün çıkış voltajını ayarlamak için kullanılan bir gerilim bölücü ağı parçasıdır. NCV317'nin çıkış voltajı, ADJ (adjust) pinine bağlı olan bu dirençler aracılığıyla ayarlanır. Direnç değerleri, çıkış voltajının tam olarak 3.3V olmasını sağlar.

Şekil 5.8'de gösterilen, tasarımı yapılmış devre; giriş voltajının filtrelenmesi, ters polarite koruması ve stabilizasyonu amacıyla oluşturulmuş bir güç yönetim devresidir. Şematik diyagramda yer alan devre elemanları incelendiğinde:

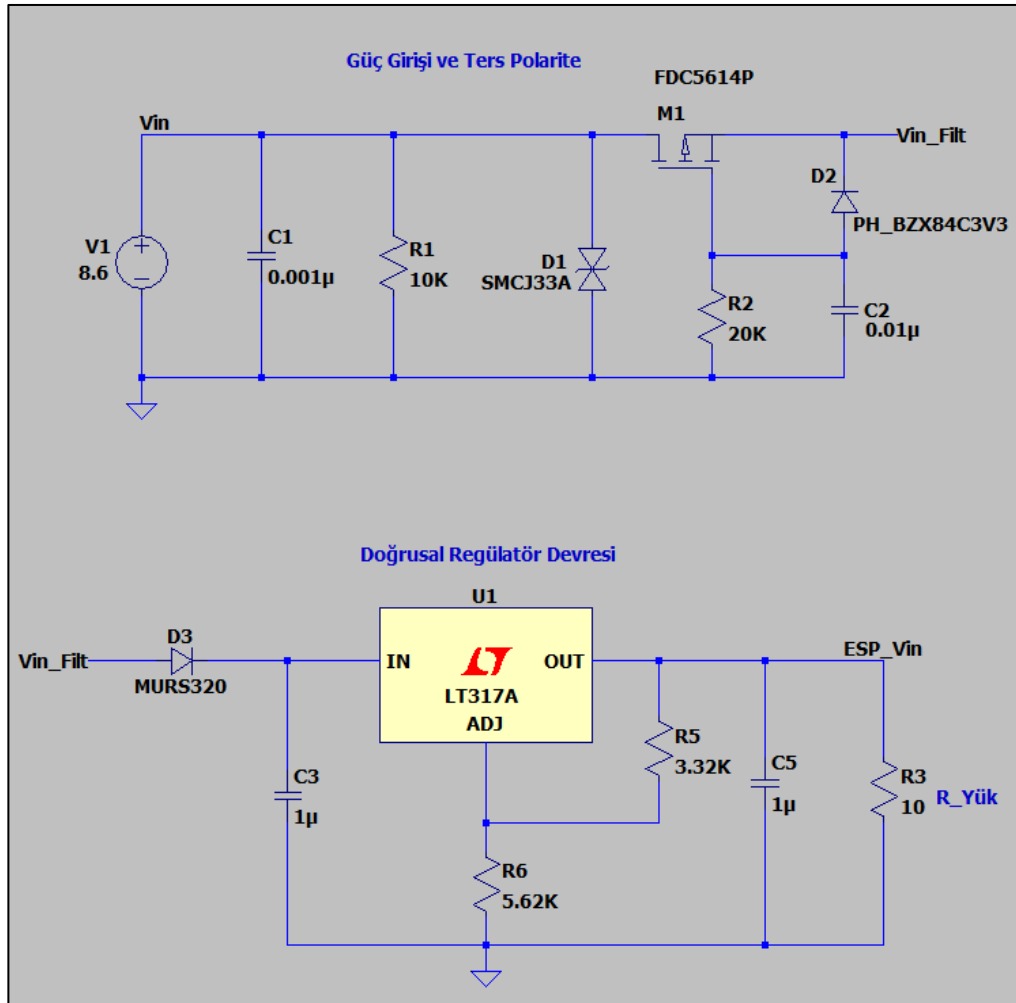


Şekil 5.8: Ana PCB güç girişi koruması.

- **C103 (1nF Kapasitör):** Giriş voltajındaki yüksek frekanslı gürültüleri filtreler. Genellikle güç hatlarındaki parazitleri ortadan kaldırmak için kullanılır ve VIN SWITCH hattındaki ani voltaj değişimlerine karşı koruma sağlar.
- **R105 (10KΩ Direnç):** Giriş sinyalini sınırlandırma amacıyla kullanılır. Sistemin stabil çalışmasına katkıda bulunarak, devrenin toprak hattına (BAT_GND) bağlanarak giriş voltajını sınırlar.
- **D102 (SMAJ33CA TVS Diyot):** Transient Voltage Suppression (TVS) diyotu, ani voltaj yükselmelerini engeller ve devreyi yüksek voltaj dalgalanmalarına karşı korur.
- **M100 (MOSFET):** P-kanal mosfet olup, ters polarite koruması sağlar. Giriş voltajı ters bağlandığında, mosfet devreyi keser ve devre elemanlarının zarar görmesini engeller. Gate pinine bağlı devre elemanlarıyla tetiklenir ve uygun şartlarda çalışmaya başlar.
- **BSP613P (P-kanal MOSFET):** Bu mosfet, anahtarlama işlevini yerine getirir ve VIN FILT hattına uygun voltajı sağlar. Doğru polaritede giriş voltajı olduğunda, MOSFET aracılığıyla VIN FILT hattına voltaj aktarılır.
- **D101 (BZX84-C3V3 Zener Diyot):** Bu zener diyot, mosfetin gate pinine sabit bir referans voltajı sağlar ve aşırı voltajı önlemek için kullanılır. Devrenin stabilitesini koruyarak mosfetin doğru voltajla çalışmasını sağlar.
- **R106 (20KΩ Direnç):** P-kanal mosfetin gate pinine bağlı olan bu aşağı -çekme (pull-down) direnci, mosfetin tetiklenmesini sağlar ve mosfetin açık veya kapalı kalmasını kontrol eder.

- **C104 (100nF Kapasitör):** Giriş hattındaki gerilim dalgalanmalarını filtreler. Bu kapasitör, girişteki parazitleri süzerek devrenin stabil çalışmasını destekler.

Şekil 5.9'daki LTspice simülasyonu, giriş voltajının filtrelenmesi, ters polarite koruması ve voltaj regülasyonu için tasarlanmış bir güç yönetim devresinin analizini yapmak amacıyla oluşturulmuştur. Bu simülasyonda, batarya sistemlerinde kullanılan giriş geriliminin güvenli bir şekilde düşürülmesi ve sabit voltaj seviyesinin sağlanması hedeflenmiştir.



Şekil 5.9: NCV/LM 317 entegresinin LTspice şematığı.

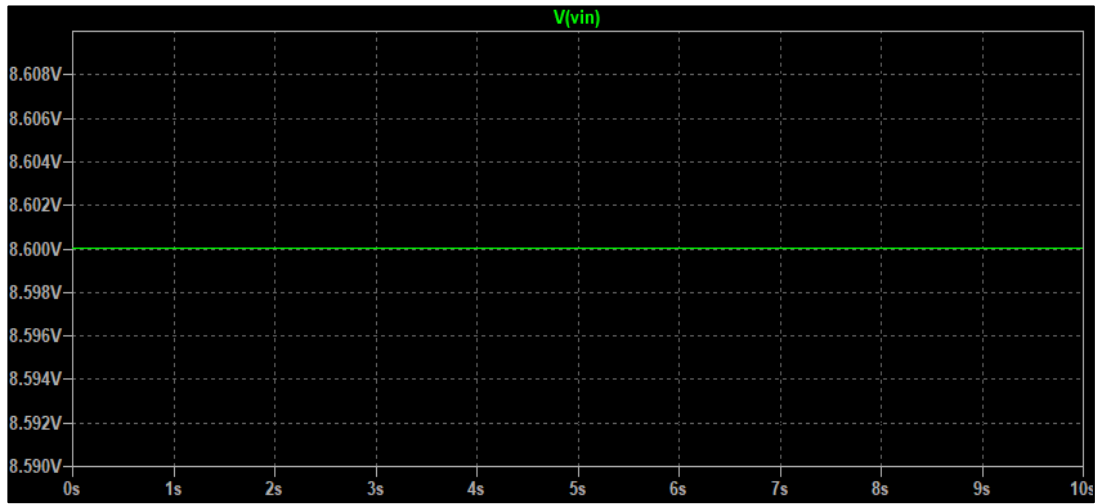
Şekil 5.9'da yer alan LTspice simülasyonu iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde ters polarite koruması sağlayan devre, ikinci bölümde ise doğrusal regülatör devresi analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, bataryadan gelen voltajın güvenli bir şekilde sabit bir seviyeye indirildiği ve böylece ESP modülü gibi bileşenlerin güvenli çalışmasının sağlandığı görülmüştür. Simülasyonda kullanılan devre elemanları,

tasarımda kullanılan bileşenlerle büyük ölçüde benzerlik göstermekte olup pratik uygulamalarda da doğrulanabilir niteliktedir. Bu simülasyonda, hücre girişi bataryadaki maksimum hücre gerilimine sahip iki seri bataryadan beslenmiş ve giriş gerilimi maksimum 8.6V olarak kabul edilmiştir. Giriş gerilimi, güç kaynağı tarafından pulse sinyali ile değiştirilmiş; PMOS devresinin koruyucu işlevini göstermek amacıyla negatif bir gerilim uygulanmış ve bu gerilim PMOS devresi tarafından devrenin geri kalanına iletilmeden engellenmiştir. Böylece, PMOS devresinin koruyucu işlevi doğrulanmıştır.

Aşağıdaki grafiklerde şu veriler incelenmiştir:

- İlk grafikte sistemin güç girişi,
- İkinci grafikte diyottan sonraki gerilim düşümü,
- Üçüncü grafikte ESP'nin giriş gerilimi,
- Dördüncü grafikte V_{in} , filtrelenmiş giriş gerilimi ve ESP'nin giriş gerilimi,
- Beşinci grafikte ise LDO üzerindeki güç kaybı gösterilmiştir.

Aşağıdaki Şekil (5.10)'da yer alan simülasyon grafiğinde giriş gerilimi 8.6V olarak görülmektedir.



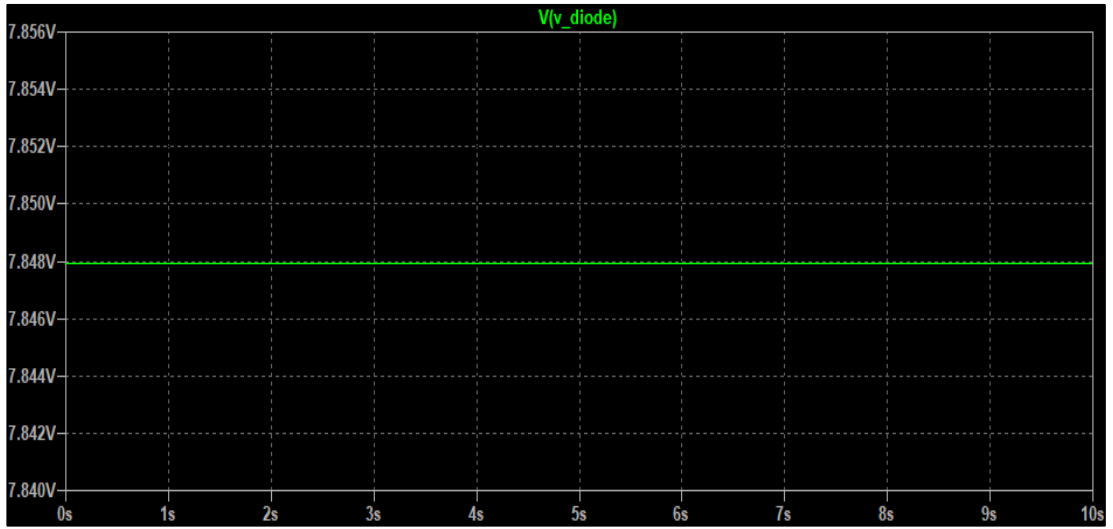
Şekil 5.10: Ana PCB voltaj girişi simülasyonu.

Şekil 5.11'deki simülasyon grafiğinde, filtrelenmiş gerilim diyot üzerinde bir düşüşe uğrayarak (5.1) numaralı denklemden 7.848V olarak hesaplanmıştır. Diyot üzerindeki gerilim düşümü ise (5.3) numaralı denklemden 0.752V olarak tespit edilmiştir.

- Bilindiği üzere giriş gerilim değeri: $V_{giriş} = 8.60 \text{ V}$ (5.1)

- Diyot üzerine düşen gerilim değeri: $V_{diyot} = 7.848 \text{ V}$ (5.2)

- Kayıp gerilim değeri: $V_{kayıp} = V_{giriş} - V_{diyot} = 0,752 \text{ V}$ (5.3)



Şekil 5.11: Diyot üzerindeki gerilim değerinin LTspice simülasyonu.

Aşağıda yer alan Şekil 5.12'de, ESP giriş gerilim değeri gösterilmektedir. Okunan değer, yaklaşık 3.6V olarak gözlemlenmiştir. ESP'nin giriş gerilim değeri, LDO (Low Dropout Regulator – Düşük Düşümlü Regülatör) ve gerilim bölücü dirençler kullanılarak 3.3V seviyesine ayarlanmış olmasına rağmen, ölçümlerde bu değer 3.6V olduğu tespit edilmiştir. Bu 0.3V'luk fark, aşağıdaki denklem (5.4) ile açıklanmaktadır.

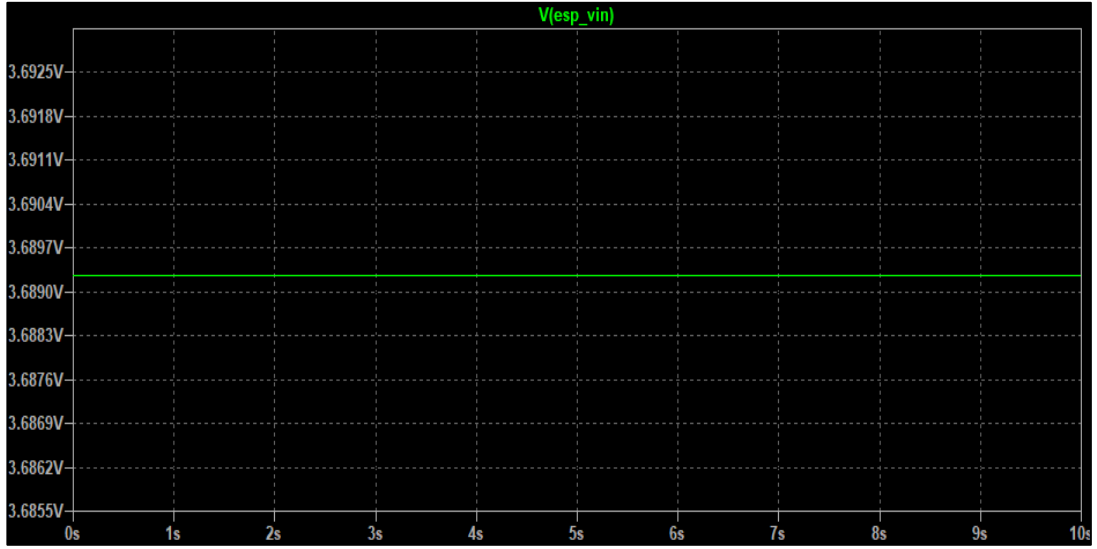
Çıkış gerilimi formülü:
$$V_{çıkış} = 1.25 \text{ V} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} \times R_2 \quad (5.4)$$

Bu formülde yerine koyularak:
$$V_{çıkış} = 1.25 \text{ V} \times \left(1 + \frac{3.3K}{5.6K}\right) + 50\mu A \times 5.6K \quad (5.5)$$

Elde edilen sonuç:
$$V_{\text{çıkış}} = 3.371V + 0.28V \quad (5.6)$$

Sonuç olarak:
$$V_{\text{çıkış}} = 3.651V \quad (5.7)$$

Şekil 5.12’de gösterilen grafikte, ESP’nin giriş gerilimi ($V_{\text{esp_vin}}$) izlenmektedir. Görüldüğü gibi, giriş gerilimi stabil bir şekilde yaklaşık 3.689V seviyesinde sabit kalmaktadır. Bu durum, ESP modülünün giriş geriliminin kararlı olduğunu ve herhangi bir dalgalanma veya düşüş yaşanmadığını göstermektedir.



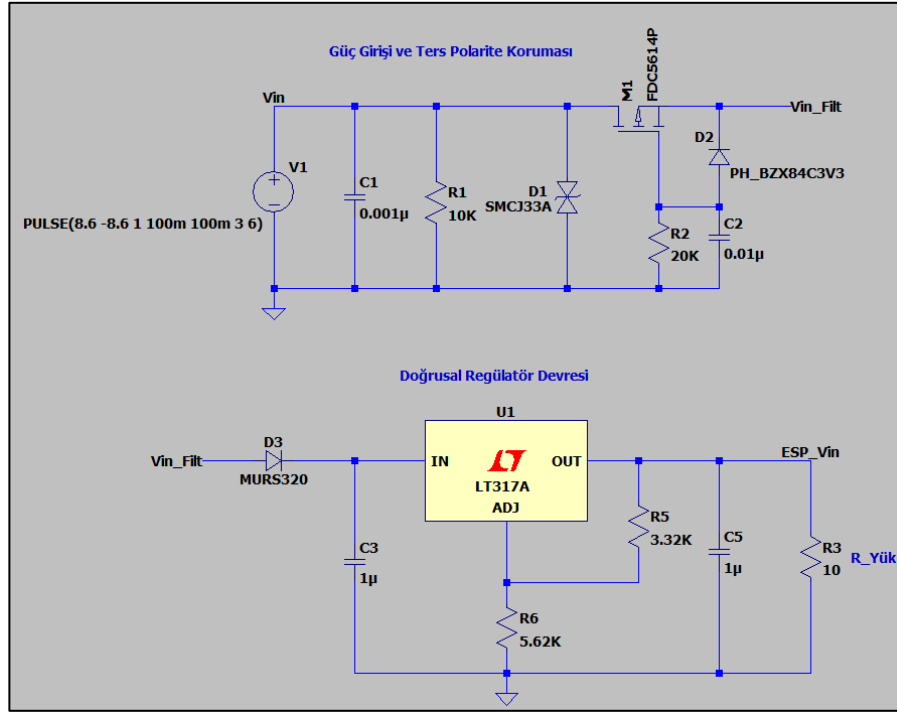
Şekil 5.12: ESP32 voltaj girişinin LTspice simülasyonu.

Şekil 5.13’teki LTspice simülasyonunda, sabit giriş gerilimi bir pulse kaynağı ile değiştirilmiştir. Bu kaynak, belirli periyotlarda negatif gerilim üreterek PMOS’un koruma görevini yerine getirip getirmediğini test etmek amacıyla kullanılmıştır. Simülasyon sonucunda, PMOS’un negatif bir gerilimle karşılaştığında çıkışını kapatarak sistemi başarılı bir şekilde koruduğu gözlemlenmiştir.

Grafikteki veriler şu şekildedir:

- PULSE sinyalli gerilim kaynağı negatif iletme geçtiğinde sistemin güç girişi (V_{in}), filtrelenmiş V_{in} ve ESP giriş gerilimi ile diğer ilgili voltaj değerleri gösterilmiştir.

- PMOS devresinin koruma işlevi, özellikle ters polarite koşullarında, ESP modülü ve diğer hassas bileşenlerin zarar görmesini önlemek amacıyla etkin bir şekilde çalışmıştır
- LDO üzerindeki güç kaybı, simülasyon grafiğinde ayrıntılı olarak incelenmiş ve regülatörün çıkış gerilimini sabit tutma kapasitesinin yanı sıra, sistem üzerindeki yükün değişimine bağlı olarak güç kaybındaki dalgalanmalar değerlendirilmiştir.

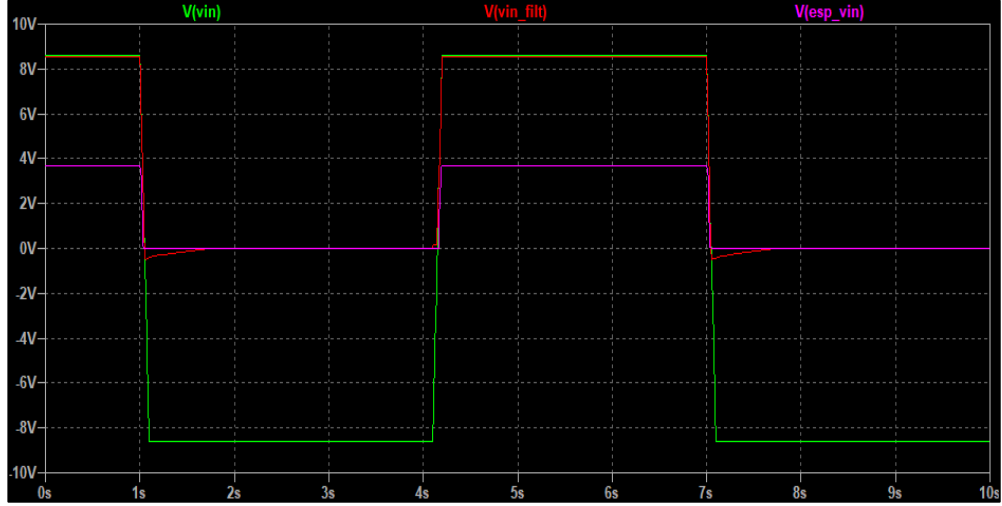


Şekil 5.13: NCV/LM 317 entegresinin sinyal giriqli LTspice şematığı.

Vin hattı pozitif gerilimde olduğu sürece, P-kanal MOSFET (PMOS) iletimde kalarak devre üzerinden enerji akışını sağlar ve sistemin tüm bileşenlerinin, özellikle ESP modülünün, ihtiyaç duyduğu voltajı almasına imkân tanır. Ancak gerilim kaynağının negatif bir gerilim üretmesi durumunda, PMOS devresi koruma mekanizmasını devreye alarak iletim hattını keser. Bu durum, devrenin korunması açısından kritik bir öneme sahiptir; çünkü negatif gerilim uygulandığında PMOS, devreyi otomatik olarak açarak yük ile olan bağlantıyı keser.

Böyle bir durumda, sistemin besleme kaynağı kesilir ve ESP modülü de dâhil olmak üzere devredeki hiçbir bileşen enerji almaz. PMOS'un bu koruma işlevi, ters polarite veya aşırı gerilim gibi olumsuz koşullarda sistemin zarar görmesini önleyerek,

özellikle hassas elektronik bileşenler içeren devrelerde uzun vadeli güvenilirlik ve stabiliteyi sağlamaktadır. Yapılan simülasyonlarda, bu koruma işlevinin başarıyla çalıştığı, PMOS'un negatif gerilimle karşılaştığında çıkışı kapatarak sistemi koruduğu gözlemlenmiştir.



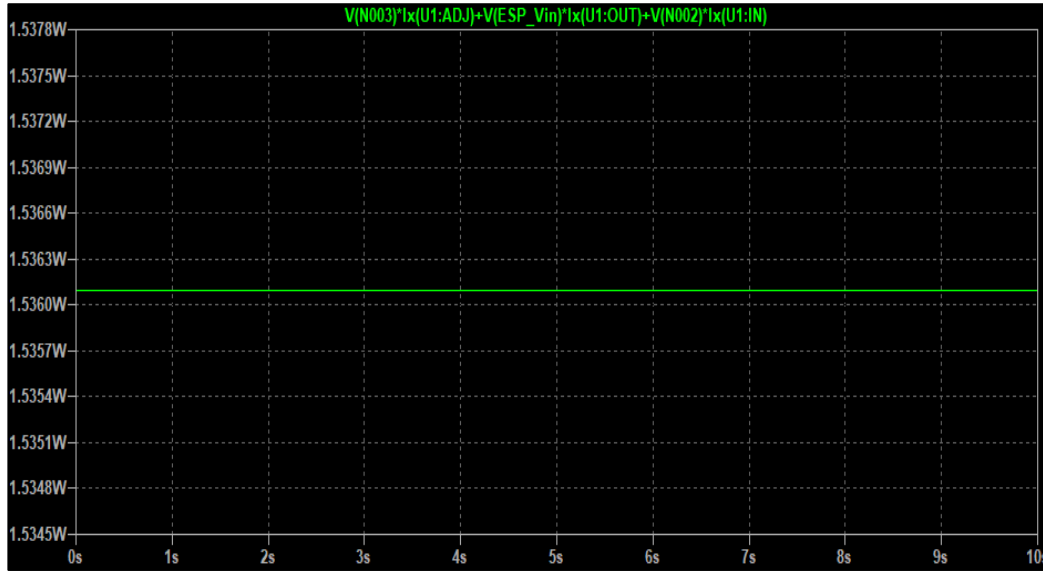
Şekil 5.14: Sinyal girişi uygulanan devrenin LTspice simülasyonu.

Şekil 5.14'te verilen bu grafik, LTspice simülasyonu sonucunda elde edilen gerilim değerlerini göstermekte ve sistemin çalışma prensibini anlamamıza yardımcı olmaktadır. Grafikte, üç farklı gerilim değeri izlenmektedir.

- **Vin (Yeşil)- Giriş Gerilimi:** Giriş gerilimi, pozitif ve negatif olarak periyodik bir şekilde değişmektedir. 0-3 saniye arası pozitif bir giriş gerilimi olan 8.6V gösterilmektedir. Daha sonra giriş gerilimi negatif bir değere düşerek -8.6V'a ulaşmaktadır. Bu simülasyon, sistemin ters polariteye karşı nasıl tepki verdiğini gözlemlemek amacıyla yapılmıştır.
- **Vin_filt (Kırmızı)- Filtrelenmiş Giriş Gerilimi:** Vin_filt hattı, giriş geriliminden farklı olarak, devrede yer alan bileşenler tarafından filtrelenmiş ve stabilize edilmiştir. Pozitif gerilimde Vin_filt, Vin'e yakın bir değer alırken (yaklaşık 8.6V), negatif gerilim uygulandığında bu gerilim sifıra yaklaşır. Bu, filtreleme devresinin negatif gerilimi sistemden uzaklaştırdığını ve filtreleyerek devreyi koruduğunu göstermektedir.
- **Vesp_vin (Mor)- ESP Giriş Gerilimi:** ESP'nin giriş gerilimi, yalnızca pozitif giriş gerilimlerinde sabit kalır ve stabil bir 3.3V seviyesinde görülmektedir. Negatif bir gerilim uygulandığında ise ESP32'ye ulaşan gerilim sifıra düşer,

bu da PMOS'un koruma devresinin çalıştığını ve ESP'yi negatif gerilimden koruduğunu gösterir.

Şekil 5.14'te gösterilen bu grafik, sistemin giriş gerilimi pozitif olduğunda ESP'nin düzenli bir şekilde çalıştığını, ancak negatif gerilim uygulandığında koruma devresinin devreye girerek ESP'nin güvenliğini sağladığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. PMOS'un bu koruma işlevi sayesinde, ESP ve diğer bileşenlerin zarar görmesi önlenmiştir.

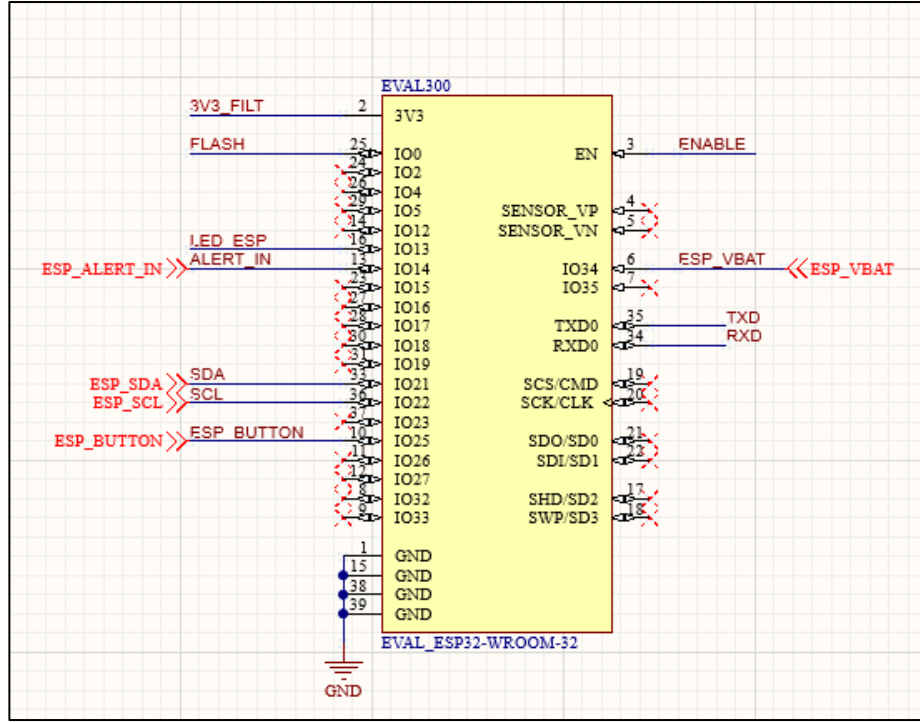


Şekil 5.15: LM/NCV 317 entegresinin güç tüketimi LTSpice simülasyonu.

Şekil 5.15'teki grafikte, sistemdeki güç kaybı veya güç harcaması izlenmektedir. Grafik, voltaj (V) ve akım (I) çarpımıyla elde edilen gücü (W) göstermekte olup, bu değer doğrusal regülatör devresi üzerinde harcanan toplam gücü temsil etmektedir. Grafik boyunca güç değeri, sabit bir şekilde 1.536W seviyesinde kalmaktadır.

5.1.3. Kablosuz Haberleşme Devresi

ESP32'nin kullanıldığı kablosuz haberleşme devresi şeması, Şekil 5.16'da verilmiştir. Bu şemada, sistemin bağlantıları detaylı bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 5.16: ESP32 modülünün bağlantı şematiği.

Şekil 5.16'da verilen bu şematik, ESP32-WROOM-32 modülünün bağlantılarını göstermektedir. Şemada, ESP32 mikrodenetleyicisinin giriş/çıkış pinlerine ve diğer modüllere bağlantı noktaları detaylı bir şekilde belirtilmiştir. Bu bağlantılar şunlardır:

- **3V3:** ESP32'nin 3.3V giriş gerilimi hattıdır. Bu, ESP32'nin ana besleme voltajıdır.
- **FLASH:** ESP32'deki Flash belleğe erişimi sağlayan pinlerden biridir.
- **LED_ESP:** ESP32'ye bağlı bir LED gösterge için ayrılmış bağlantıdır. Bu pin, LED'in yanıp sönmelerini veya belirli durumları göstermek için kullanılır.
- **ESP_ALERT_IN (ALERT_IN):** Batarya yönetim sistemi ya da diğer dış modüllerden gelen bir uyarı sinyali girişi olarak tanımlanmış bir pini temsil eder.
- **ESP_SDA ve ESP_SCL:** I2C veri iletişim protokolü için kullanılan pinlerdir. SDA (Serial Data) ve SCL (Serial Clock) hatları, ESP32'yi diğer I2C cihazlarıyla haberleştirmek için kullanılır.
- **ESP_BUTTON:** ESP32'ye bağlı bir düğme (button) girişi için kullanılır. Bu buton ile çeşitli kullanıcı girdileri veya sıfırlama işlemleri gerçekleştirilebilir.

- **ENABLE:** ESP32'nin etkinleştirilmesi veya devre dışı bırakılması için kullanılan kontrol sinyalidir.
- **ESP_VBAT:** Bu pin, ESP32'nin bataryadan gelen gerilimi izleyebilmesi için ayrılmıştır. ESP32'nin batarya voltajını izlemesi bu pin üzerinden yapılır.
- **TXD ve RXD:** Seri haberleşme (UART) pinleridir. TXD (Transmit Data) veri gönderirken, RXD (Receive Data) veri alır.
- **GND:** Toprak (Ground) bağlantısıdır ve devrenin referans noktasıdır. ESP32'nin stabil çalışması için gereklidir.

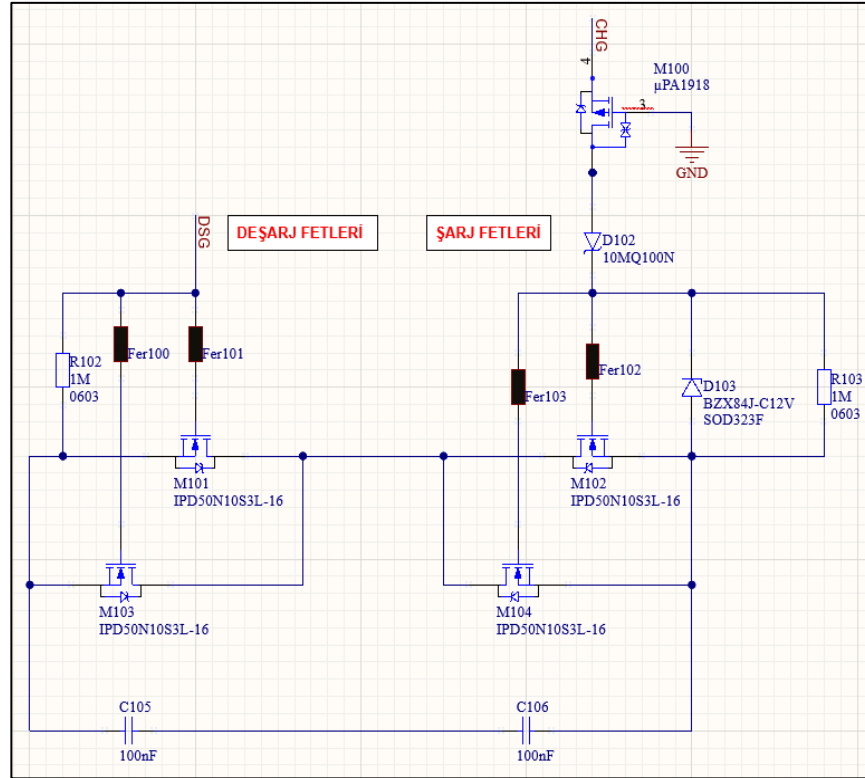
Bu devre şemalarında, ESP32'nin çevresel cihazlar (I2C cihazları, düğmeler, LED'ler vb.) ile nasıl bağlantı kurduğunu ve giriş/çıkış sinyallerini nasıl işlediği açıkça gösterilmektedir. ESP32'nin güç ve sinyal bağlantıları; batarya voltajı izleme, uyarı sinyalleri ve kullanıcı girdileri gibi temel işlevlerle entegre edilmiştir.

5.1.4. Güç Anahtarlama Devresi

Bu devre şeması, batarya şarj ve deşarj işlemlerinin güvenli ve etkili bir şekilde yönetilmesi için tasarlanmış bir güç yönetim devresini göstermektedir. Mosfetler, enerji akışını düzenlemek ve batarya yönetimini sağlamak için kullanılırken, ferrit boncuklar ve kapasitörler gürültüyü filtreleyerek sistemin kararlı çalışmasına katkıda bulunur. Schottky ve Zener diyotlar ise, sistemin korunması ve aşırı gerilim durumlarının önlenmesi açısından kritik roller üstlenmektedir. Bu devre şeması, şarj ve deşarj olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Deşarj kısmında yer alan bileşenler şunlardır:

- **M101 ve M103 (IPD50N10S3L-16 N-kanal Mosfetler):** Bu mosfetler, sistemin deşarj işlemlerini kontrol etmek ve bataryanın güvenli bir şekilde boşaltılmasını sağlamak amacıyla kullanılır. Deşarj işlemi sırasında bu mosfetler iletimde kalarak akımın sistemden akmasına ve enerji akışının düzenlenmesine olanak tanır.
- **Fer100 ve Fer101:** Ferrit boncuklardır ve yüksek frekanslı gürültüyü filtrelemek için kullanılır. Bu elemanlar, gürültüyü azaltarak devrenin daha stabil çalışmasına katkı sağlar.

- **R102 (1MΩ Direnç):** Bu direnç, deşarj fetlerinin doğru bir şekilde çalışmasını sağlamak için kullanılmış olabilir. Mosfetin gate pinine bağlı olan bu direnç, gate'in doğru tetiklenmesine ve mosfetin açılma/kapama işlemlerinin düzgün yapılmasına yardımcı olur.
- **C105 (100nF Kapasitör):** Kapasitör, mosfetin gate pinine bağlıdır ve ani voltaj değişimlerini yumuşatır. Bu, mosfetin daha stabil bir şekilde anahtarlama yapmasına yardımcı olur.



Şekil 5.17: Şarj/Deşarj mosfetlerinin bağlantı şematifi.

Şarj kısmında yer alan bileşenler şunlardır:

- **M102 ve M104 (IPD50N10S3L-16 N-kanal Mosfetler):** Bu mosfetler, sistemin şarj işlemlerini kontrol etmek için kullanılır. Şarj işlemi sırasında iletme geçerek bataryaya enerji girişini sağlar ve bataryanın güvenli bir şekilde şarj edilmesinde kritik bir rol oynar.
- **M100 (μPA1918 P-kanal Mosfet):** Şarj ve deşarj işlemleri sırasında koruma ve anahtarlama işlevlerini yerine getiren önemli bir bileşendir. Şarj devresinde ters akıma karşı koruma sağlayarak sistem güvenliğini artırır.

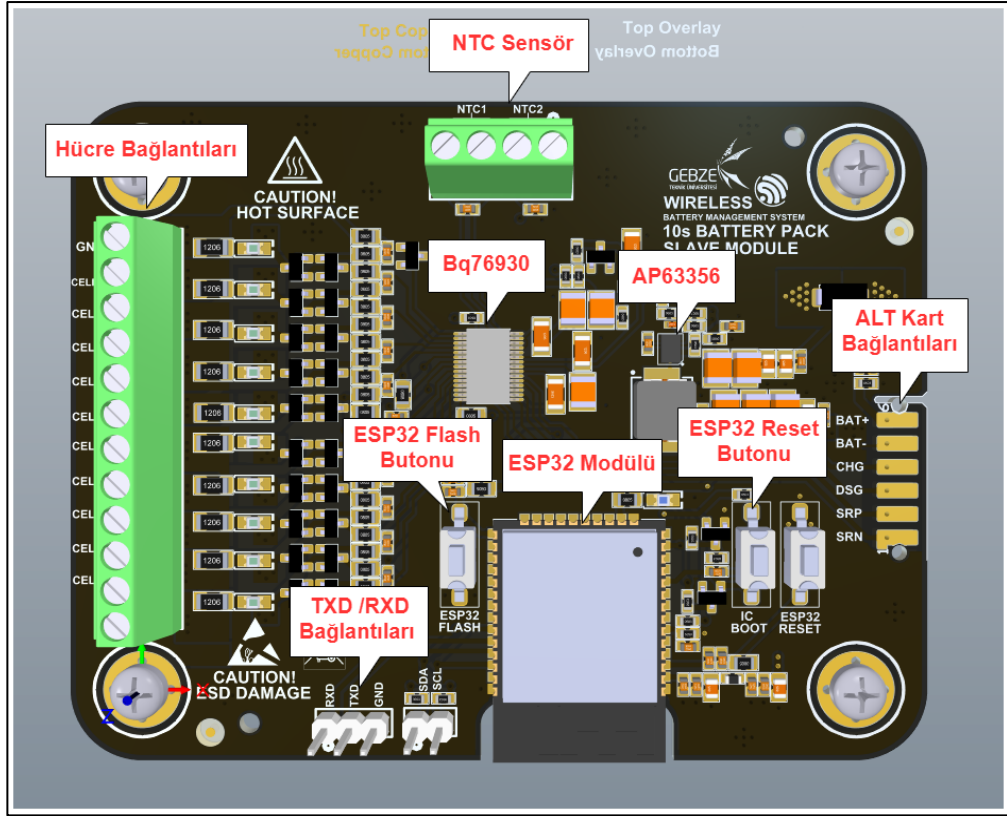
- **Fer102 ve Fer103:** Şarj devresinde kullanılan ferrit boncuklar olup, yüksek frekanslı gürültüyü filtreleyerek sistem performansının etkilenmesini önler.
- **R103 (1M Ω Direnç):** Şarj mosfetlerinin düzgün çalışmasını sağlamak için kullanılır ve devrede kararlılığı artırır.
- **C106 (100nF Kapasitör):** Mosfetlerin daha stabil anahtarlama yapabilmesi için ani voltaj değişimlerini filtreleyerek devrenin güvenilirliğini artırır.
- **D102 (10MQ100N Schottky Diyot):** Gerilim aşımını önlemek ve mosfetleri korumak için kullanılır; ters gerilimlere karşı koruma sağlayarak sistemin uzun ömürlü çalışmasına katkıda bulunur.
- **D103 (BZX84J-C12V Zener Diyot):** Bu Zener diyot, şarj devresinde mosfetlerin gate pinlerine uygulanan voltajı sınırlandırarak aşırı gerilimlere karşı koruma sağlar.

5.2. PCB Yerleşimi

Bu bölümde, sistemde kullanılan devre kartlarının fiziksel yerleşimleri ve tasarımları detaylandırılacaktır. Kartların yerleşimi, devrenin verimli çalışmasını sağlamak ve olası elektromanyetik girişimleri (EMI) azaltmak amacıyla dikkatlice planlanmıştır. Aşağıdaki bölümlerde, tasarımda kullanılan PCB kartlarına dair detaylar bulunmaktadır.

5.2.1. Çocuk PCB Kart Yerleşimi

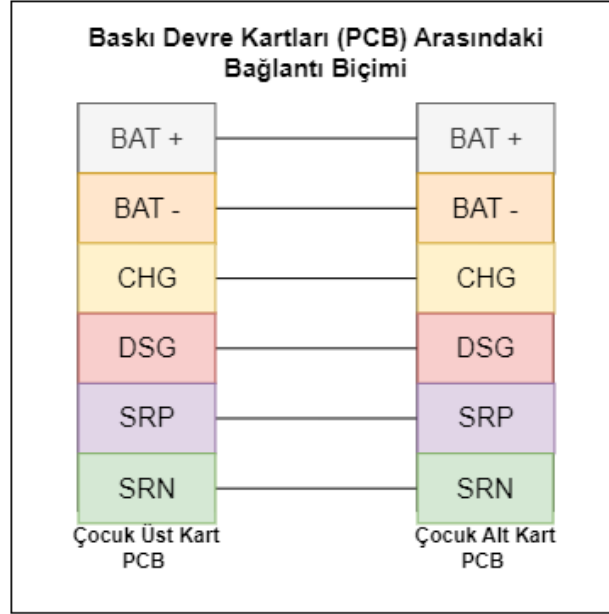
Çocuk PCB (Baskı Devre Kartı) kartı, batarya hücrelerinin izlenmesi ve yönetilmesi görevini üstlenir. Bu kart üzerinde yer alan bileşenler, batarya gerilim ve sıcaklık değerlerini ölçen sensörler, mosfetler ve çeşitli iletişim bileşenlerini içermektedir. Kart yerleşimi hem sinyal yollarının kısa tutulmasını hem de termal yönetimi optimize etmek amacıyla yapılmıştır. Karttaki kritik bileşenlerin konumu ve bağlantıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Şekil 5.18’de yer alan çizim, 10s Batarya Paketi için tasarlanmış bir Alt Birim Modülü (Çocuk Modül) PCB yerleşimini göstermektedir. Aşağıda detaylı bir açıklama verilmiştir:



Şekil 5.18: Çocuk PCB 3D görüntüsü.

- **NTC Sensör Bağlantıları (NTC1 ve NTC2):** Kartın üst kısmında yer alan iki bağlantı noktası, batarya sıcaklığını ölçen NTC (Negative Temperature Coefficient) termistör sensörleri için ayrılmıştır. Bu sensörler, sistemin güvenliğini sağlamak ve bataryaların aşırı ısınmasını önlemek için sıcaklık izleme görevini yerine getirir.
- **Hücre Bağlantıları (CEL1- CEL10):** Sol tarafta yer alan yeşil konnektör blokları, 10 seri bataryanın bağlantı noktalarını gösterir. Her batarya hücresi için voltaj izleme bu bağlantılar aracılığıyla yapılmaktadır.
- **ESP32 Modülü:** Kartın alt kısmında, ESP32 modülü için ayrılmış bir alan bulunmaktadır. Bu modül, kablosuz iletişim ve veri işleme işlevini yerine getirir. Kart üzerindeki veri yolları ile batarya yönetim sistemi arasındaki iletişim bu modül aracılığıyla sağlanır.
- **ESP32 Flash ve Reset Butonları:** ESP32'nin flashlanması (yazılım güncellemesi) ve resetlenmesi (yeniden başlatılması) için iki buton (ESP32 FLASH ve ESP32 RESET) yer almaktadır.

- **BYS İletişim ve Kontrol Çıkışları (BAT+, BAT-, CHG, DSG, SRP, SRN):** Şekil 5.19’da gösterilen, PCB’nin sağ tarafında yer alan altı pinli konektör, batarya yönetim sisteminin ana işlevlerini kontrol eden pinleri içermektedir.



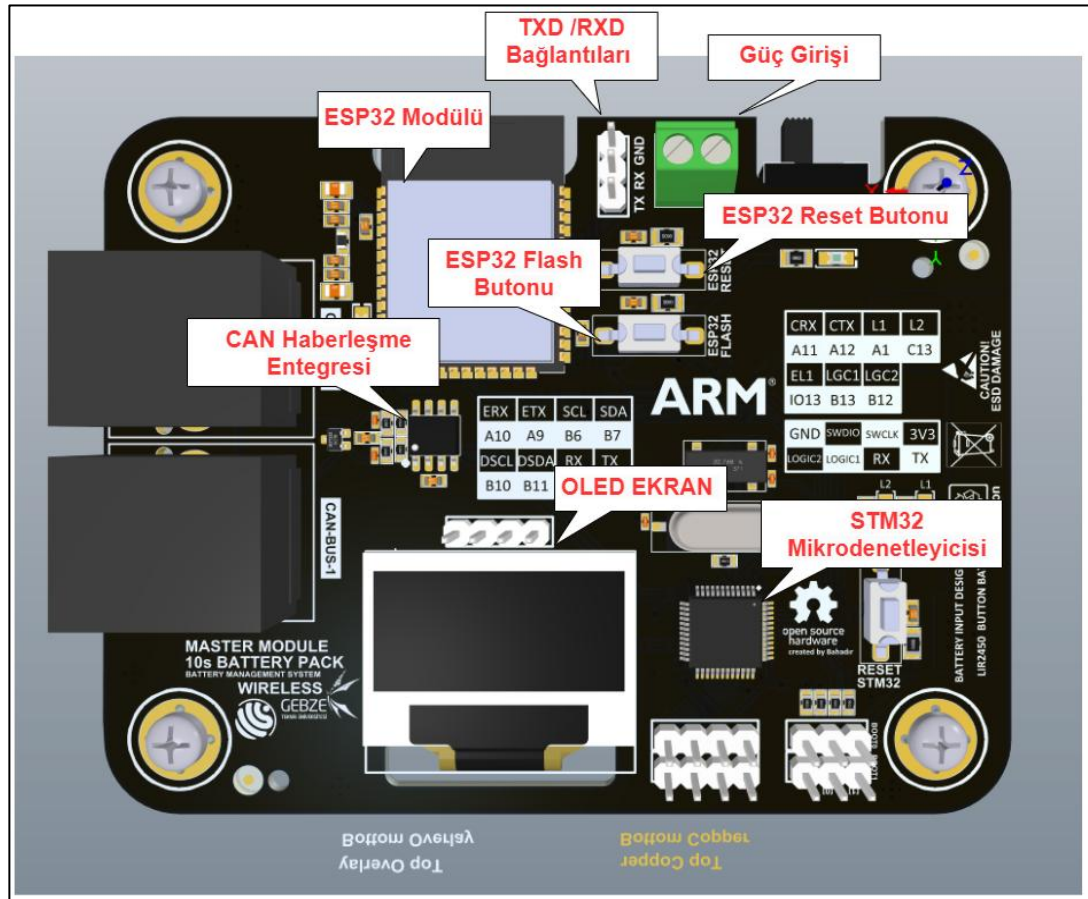
Şekil 5.19: Çocuk PCB alt-üst bağlantı şekli.

- **BAT+ ve BAT-:** Bu pinler, batarya grubunun pozitif (+) ve negatif (-) kutuplarını temsil eder. Her iki kart arasında batarya bağlantısının sağlanması için kullanılır.
- **CHG (Şarj):** Şarj işlemini kontrol eden bir pindir. Çocuk üst kart ile alt kart arasında şarj işleminin yönetilmesi için bağlantı yapılır.
- **DSG (Deşarj):** Deşarj işlemini kontrol eden bir pindir. Her iki kart arasında deşarj sürecini yönetmek için bağlantı yapılır.
- **SRP ve SRN (Akım Algılama Direnci Pozitif/Negatif- Sense Resistor Positive/Negative):** Bu pinler, akım algılama işlemi için kullanılır. Batarya akımı bu pinler üzerinden izlenir ve kartlar arasındaki bağlantı ile güvenilir ölçümler sağlanır.
- **IC ve Power MOSFET Alanları:** Kartın ortasında ve sağ üst kısmında, mosfetler ve IC'ler (entegre devreler) bulunmaktadır. Bunlar, batarya yönetim sistemi üzerinde voltaj ve akım dengeleme, şarj ve deşarj işlemlerini kontrol eden devre elemanlarıdır.

- **Konnektörler ve Veri İletişimi:** Kartın alt kısmında, ESP32 modülünün TXD ve RXD pinleri, veri aktarımı için ayrılmıştır. Bu bağlantılar, sistemin dış cihazlarla haberleşmesini sağlar.

5.2.2. Ana PCB Kart Yerleşimi

Ana PCB kartı, sistemin merkezi denetleyici kartı olup, ESP32 modülü ile donatılmıştır. Bu kart, tüm batarya yönetim sistemini kontrol eder ve verileri işler. Aynı zamanda, veri iletişimini sağlar ve kullanıcı arayüzü (örneğin, OLED ekran) ile bağlantıyı kurar. Kart yerleşimi, yüksek verimli bir çalışma ortamı sağlamak için güç ve sinyal yollarının dikkatlice ayrıldığı bir şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 5.20: Ana PCB 3D görüntüsü.

Şekil 5.20’de gösterilen görsel, 10 hücreli (10s) Batarya Paketi için tasarlanmış bir Ana Modül PCB yerleşimini göstermektedir. Aşağıda bu yerleşime ilişkin detaylı açıklamalar sunulmuştur. Ayrıca, sistem tasarımında alternatif olarak CAN haberleşmesi ve STM32 mikrodnetleyici kullanımı da düşünülmüştür. Ancak bu

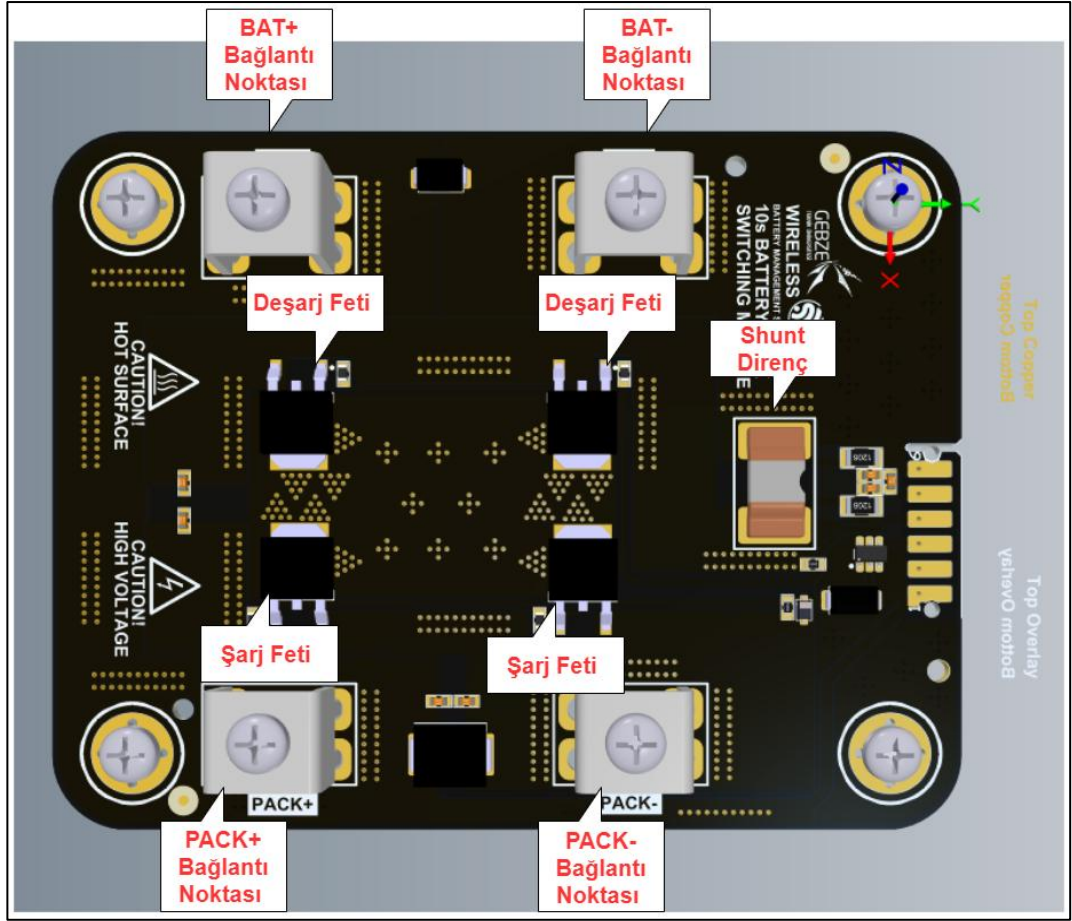
yetenekler mevcut tasarımda aktif olarak kullanılmamış olup, gelecekteki çalışmalar için devreye alınmak üzere planlanmıştır:

- **CAN-BUS Bağlantıları (CAN-BUS1 ve CAN-BUS2):** Kartın sol kısmında yer alan iki büyük konektör, CAN-BUS arayüzüne sahiptir. Bu arayüz, batarya yönetim sistemi ile diğer sistemler arasında veri iletimi sağlar. Özellikle otomotiv ve enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bu bağlantı, kartın başka modüllerle haberleşmesi için kritik önemdedir.
- **ESP32 Modülü:** Kartın üst orta kısmında yer alan mavi modül, Wi-Fi ve Bluetooth destekli bir ESP32 mikrodenetleyicidir. Bu modül, batarya yönetim sistemi ile kablosuz haberleşme ve veri yönetimini sağlar. Ayrıca kartın çeşitli sensör ve bileşenlerini yönetir.
- **OLED Ekran:** Kartın alt kısmında yer alan OLED ekran, sistem durumu ve veriler hakkında görsel bilgi sunar. Bu ekran, batarya durumu, şarj seviyesi ve diğer önemli bilgileri anlık olarak görüntüler.
- **STM32 İşlemcisi:** Kartın ortasında logosuyla gösterilen işlemci, sistemin ana işlemcisi olarak görev yapar. ARM tabanlı mikrodenetleyiciler, düşük enerji tüketimi ve yüksek performansı ile bu tür uygulamalarda sıkça tercih edilir.
- **ESP32 RESET ve FLASH Butonları:** Kartın sağ üst köşesinde bulunan butonlar, ESP32 modülünün yeniden başlatılması ve programlanması için kullanılır. RESET butonu modülü yeniden başlatırken, FLASH butonu yeni bir yazılım yüklenmesini sağlar.
- **Güç Yönetimi ve Anahtar:** Kartın sağ üst köşesindeki ON/OFF anahtarı, devrenin açılıp kapanmasını kontrol eder. Güç girişi ve diğer ilgili bileşenler, sistemin enerjisini yönetir.
- **TX/RX Pinleri:** Kartın sağ üstünde bulunan TX (transmit) ve RX (receive) pinleri, dış cihazlarla haberleşme sağlar. Veri gönderme ve alma işlemleri bu pinler üzerinden gerçekleştirilir.
- **Batarya Girişleri ve Güç Yönetimi:** Kartın sağ alt kısmında batarya bağlantısı için girişler bulunur. Bu bölge, sistemin enerji ihtiyacını karşılamak üzere bataryadan güç alır. Ayrıca, üzerinde çeşitli güç regülatörleri ve güvenlik elemanları bulunmaktadır.
- **RESET STM32 Butonu:** Sağ alt köşede yer alan RESET butonu, STM32 mikrodenetleyicisini sıfırlamak için kullanılır.

- **3V3 Güç Girişi:** 3V3 işareti, kartın düşük gerilimli bölümleri için 3.3V güç sağlayan hattı temsil eder. Bu hat, genellikle düşük güç gerektiren devre bileşenlerine enerji sağlar.

5.2.3. Güç Anahtarlama PCB Kart Yerleşimi

Güç anahtarlama kartı, bataryaların şarj ve deşarj işlemlerini yöneten mosfetlerin bulunduğu bir karttır. Kart üzerindeki güç mosfetleri, yüksek akım taşıma kapasitelerine sahip olup, sistemin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak amacıyla optimize edilmiştir. Kart yerleşimi, güç yollarının mümkün olduğunca kısa tutulması ve ısınmanın azaltılması için termal yönetim göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Mosfetler, yüksek akım anahtarlama görevini yerine getirir ve soğutma gereksinimleri dikkate alınarak dikkatlice konumlandırılmıştır. Ortada bulunan bileşenler, bu yüksek akım anahtarlama işlemlerini yöneten devre elemanlarıdır. Kartın üst kısmında, sinyal ve güç yolları izole edilerek yüksek verimlilikle çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kart, yüksek gerilimli batarya sistemlerinde güvenli anahtarlama sağlamak için tasarlanmış olup, batarya yönetim sisteminin güvenli ve verimli çalışmasına katkıda bulunmaktadır. Şekil 5.21’de gösterilen bu çizim, 10s batarya paketi için tasarlanmış bir anahtarlama modülünün kart yerleşimini göstermektedir. Bu modül, batarya yönetim sisteminde kritik bir rol oynamakta ve yüksek gerilimle çalışmaktadır. Kartın üst kısmında, batarya bağlantıları için ana bağlantı noktaları olan "PACK+" ve "PACK-" terminalleri yer almaktadır.



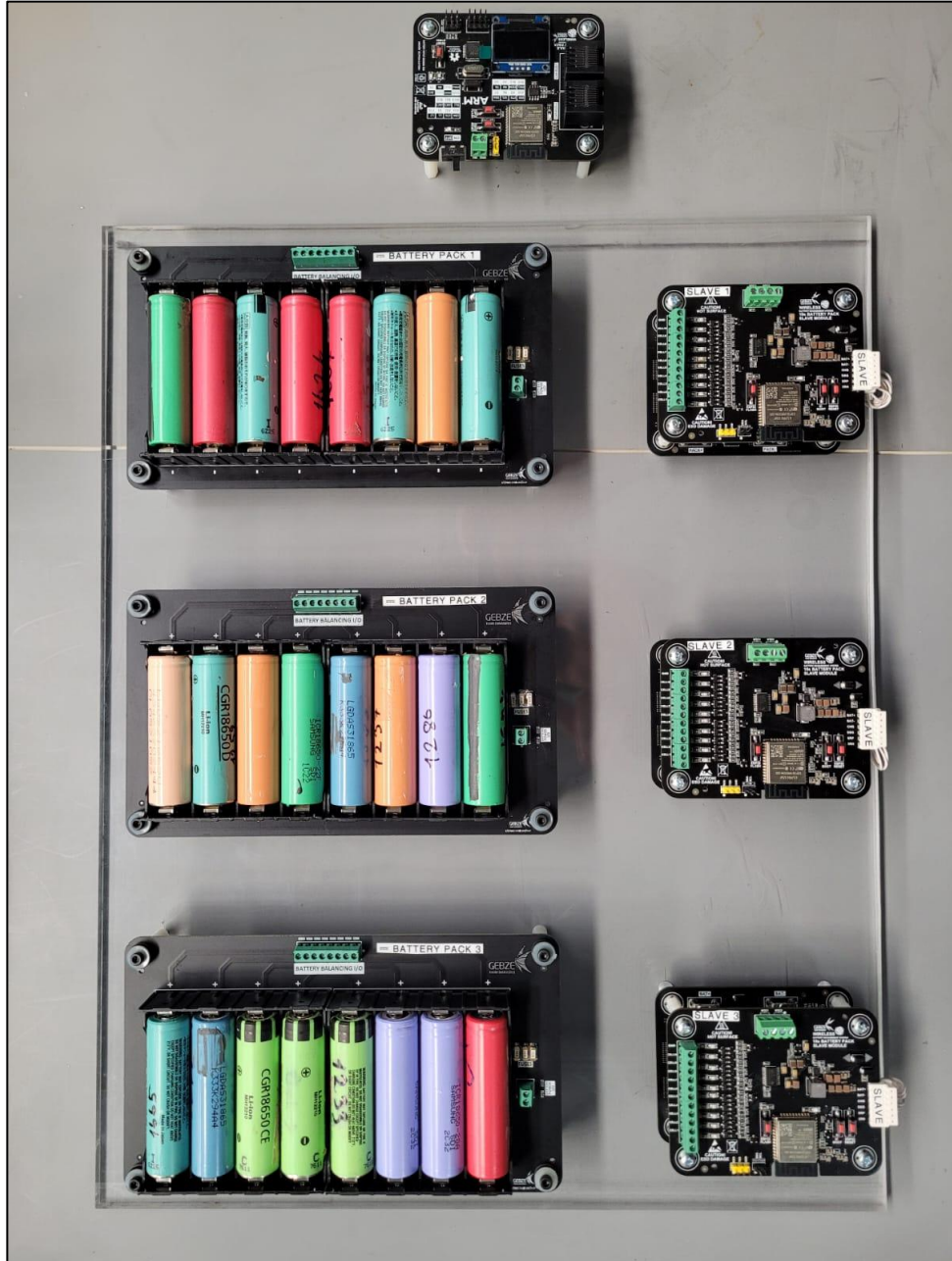
Şekil 5.21: Anahtarlama PCB 3D görüntüsü.

Şekil 5.21’de gösterilen yukarıdaki çizim, 10s bir batarya yönetim sisteminin anahtarlama modülünü göstermektedir. Çizimde, bazı önemli bileşenler ve bağlantı noktaları belirtilmiştir:

- **BAT+ ve BAT- Bağlantı Noktaları:** Bu noktalar, bataryanın pozitif (+) ve negatif (-) uçlarına bağlantı sağlar. Batarya sistemi bu terminaller üzerinden bağlanır.
- **Deşarj FET’i:** Bu mosfetlerde, batarya deşarj sürecini kontrol eder. Enerji akışını yönlendirir ve bataryanın güvenli bir şekilde boşaltılmasını sağlar.
- **Şarj FET’i:** Şarj sürecini yöneten mosfetlerdir. Bataryanın şarj edilmesini kontrol ederler ve güvenli şarj işlemi sağlarlar.
- **Şönt (Shunt) Direnç** Akım ölçümü için kullanılan dirençtir. Bataryadan geçen akımı izlemek ve kontrol etmek amacıyla kullanılır.
- **PACK+ ve PACK- Bağlantı Noktaları:** Bu noktalar, batarya grubunun sistemdeki diğer bileşenlere bağlantısını sağlar.

5.3. Sistem Donanım Testi

Şekil 5.22’de gösterilen sistem donanım testi, BYS donanımının tüm bileşenlerinin doğru çalışıp çalışmadığını doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu testin amacı, BQ76930 entegresi, mosfetler, sıcaklık sensörleri ve voltaj izleme devreleri gibi ana bileşenlerin işlevlerini eksiksiz yerine getirip getirmediğini kontrol etmektir. Test sırasında, sistemin çeşitli çalışma koşullarında verdiği tepkiler gözlemlenmiş ve donanım bileşenlerinin uygun şekilde çalıştığı doğrulanmıştır.



Şekil 5.22: Prototip kablosuz batarya yönetim sistemi.

Tasarımı yapılmış bu sistemde aşağıdaki test adımları izlenmiştir:

- **Bağlantı Kontrolü:** Tüm bileşenler ve kart üzerindeki bağlantılar kontrol edilmiştir. Her bir sensör, mosfet, direnç, kapasitör ve BYS devresine bağlı diğer bileşenlerin doğru şekilde monte edilip edilmediği doğrulanmıştır.
- **Güç Kaynağı Testi:** Sisteme doğru voltaj ve akım beslemesi sağlandığından emin olunmuş, güç kaynağının tüm devreyi besleyebilecek kapasitede olduğu ve voltaj regülasyonunun düzgün çalıştığı gözlemlenmiştir.
- **Hücre Voltaj İzleme Testi:** BYS devresinin, bağlı lityum-iyon hücrelerin voltajlarını doğru bir şekilde izleyip izlemediği test edilmiştir. Her bir hücre için voltaj ölçümleri alınmış ve bu değerler, referans değerlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.
- **Sıcaklık Sensörü Testi:** BYS'ye bağlı sıcaklık sensörlerinin, doğru sıcaklık değerlerini okuyup okumadığı kontrol edilmiştir. Batarya sıcaklık sensörleri ve kart üzerindeki sıcaklık sensörlerinin değerleri izlenmiş ve sınır değerler değerlendirilmiştir.
- **Hücre Dengeleme Testi:** Pasif hücre dengeleme devresi aktif edilerek hücreler arasındaki voltaj farklarının nasıl dengelendiği gözlemlenmiştir. Hücre voltaj farklarının minimize edilmesi, dengeleme devresinin düzgün çalıştığını göstermiştir.
- **Şarj ve Deşarj Devresi Testi:** Şarj ve deşarj sırasında mosfet'lerin düzgün çalışıp çalışmadığı, şarj ve deşarj işlemlerinin doğru şekilde kontrol edilip edilmediği gözlemlenmiştir. Sistemin, aşırı şarj veya aşırı deşarj koşullarına nasıl tepki verdiği değerlendirilmiştir.

Sistem donanım testlerinin başarıyla tamamlanması, BYS'nin güvenilir ve doğru bir şekilde çalıştığını ve olası donanım hatalarının tespit edilip giderildiğini göstermektedir.

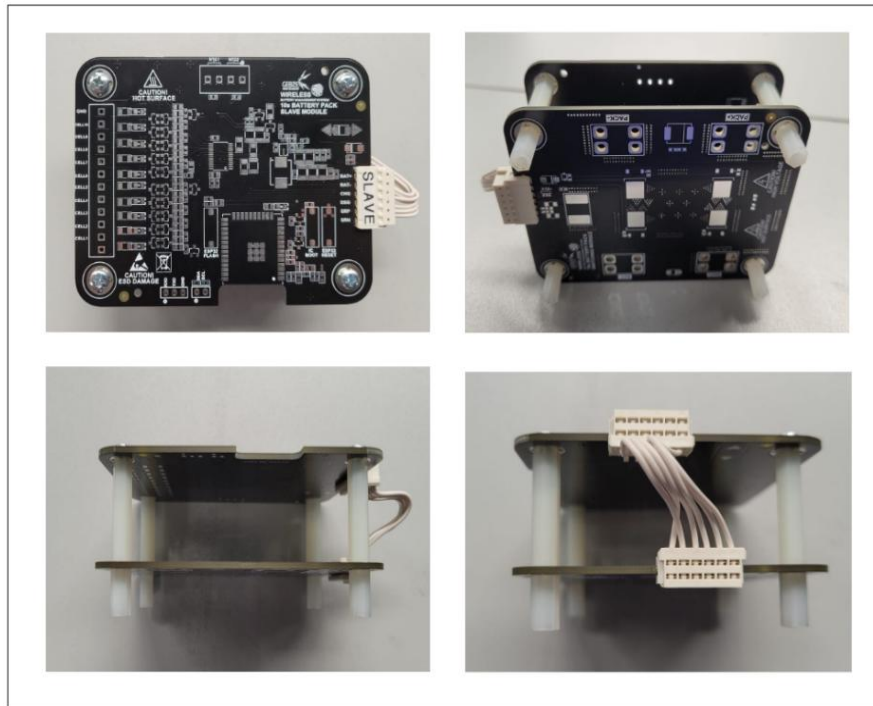
5.3.1. Sistem Prototip Üretimi

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te, BYS tasarımının prototip üretim aşamaları gösterilmiştir. Sistem prototip üretimi, BYS'nin gerçek donanım ortamında test edilip doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen kritik bir süreçtir. Bu aşama, teorik olarak geliştirilen

sistemin pratikte nasıl çalıştığını görmek ve olası hata veya iyileştirme gereksinimlerini tespit etmek için büyük önem taşımaktadır.



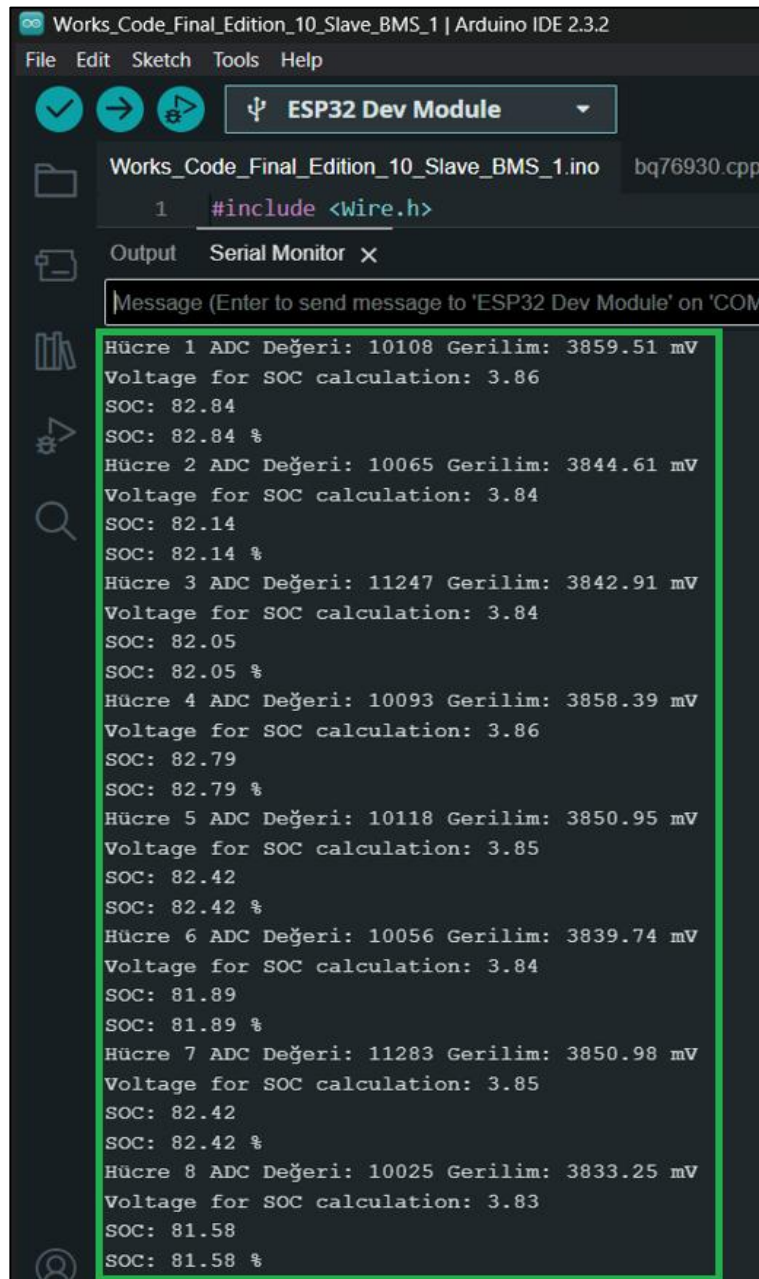
Şekil 5.23: Batarya yönetim sistemi prototip çalışması.



Şekil 5.24: Çocuk PCB prototipi.

5.3.2. Batarya Gerilim Ölçüm Testi

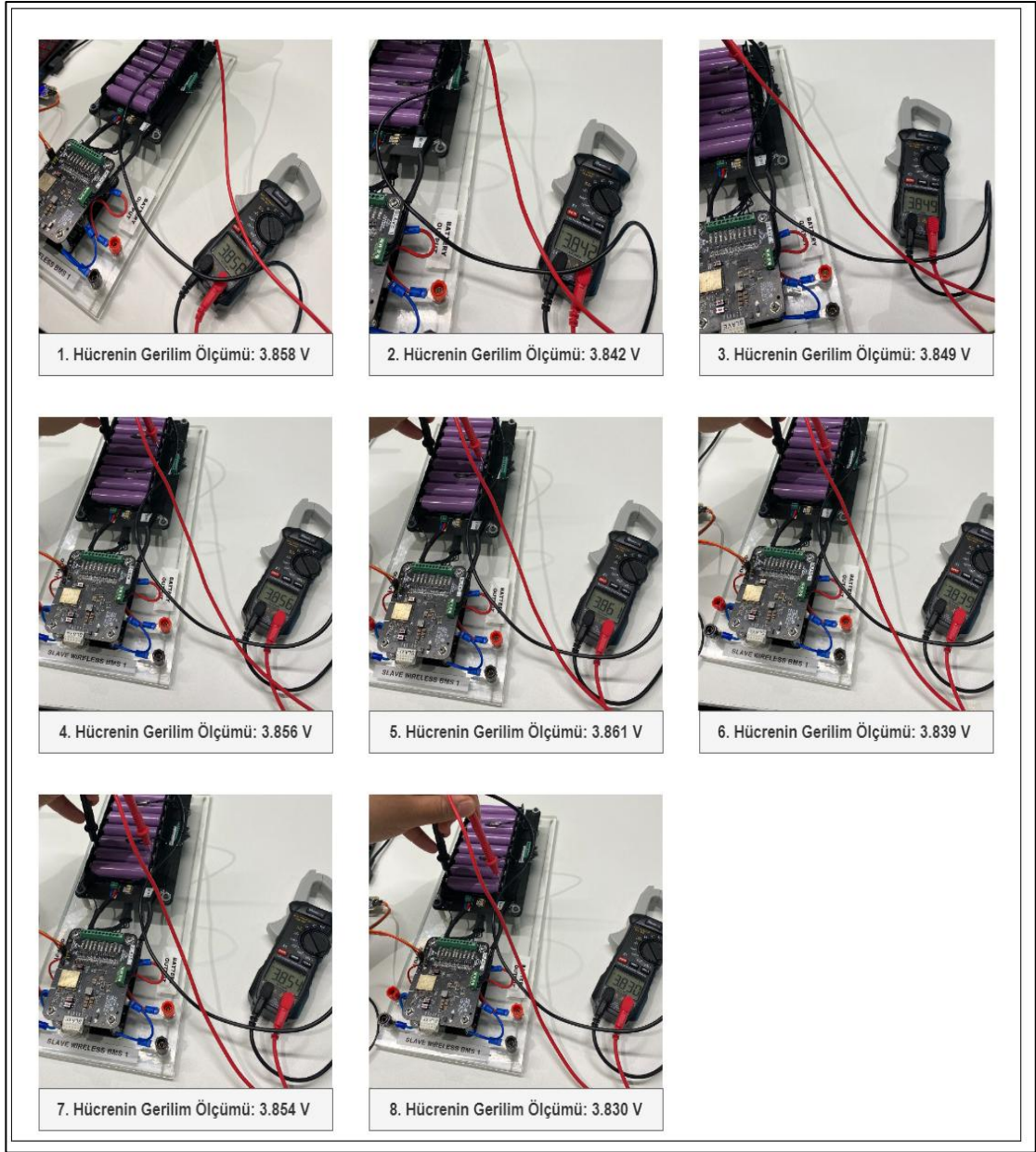
Sistem kurulumu tamamlandıktan sonra, batarya hücrelerinin gerilim ölçümleri multimetre kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçümler, sistemde okunan değerlerle karşılaştırılarak herhangi bir fark olup olmadığı kontrol edilmiştir. Aşağıdaki Şekil (5.25)'te, program tarafından okunan değerleri göstermektedir. Şekil (5.26)'te ise multimetre ile elde edilen ölçüm değerlerini sunmaktadır. Yapılan bu test sonucunda, programda okunan değerler ile multimetre ölçümleri arasında büyük bir fark olmadığı belirlenmiştir.



```
Works_Code_Final_Edition_10_Slave_BMS_1 | Arduino IDE 2.3.2
File Edit Sketch Tools Help
ESP32 Dev Module
Works_Code_Final_Edition_10_Slave_BMS_1.ino bq76930.cpp
1 #include <Wire.h>
Output Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM
Hücre 1 ADC Değeri: 10108 Gerilim: 3859.51 mV
Voltage for SOC calculation: 3.86
SOC: 82.84
SOC: 82.84 %
Hücre 2 ADC Değeri: 10065 Gerilim: 3844.61 mV
Voltage for SOC calculation: 3.84
SOC: 82.14
SOC: 82.14 %
Hücre 3 ADC Değeri: 11247 Gerilim: 3842.91 mV
Voltage for SOC calculation: 3.84
SOC: 82.05
SOC: 82.05 %
Hücre 4 ADC Değeri: 10093 Gerilim: 3858.39 mV
Voltage for SOC calculation: 3.86
SOC: 82.79
SOC: 82.79 %
Hücre 5 ADC Değeri: 10118 Gerilim: 3850.95 mV
Voltage for SOC calculation: 3.85
SOC: 82.42
SOC: 82.42 %
Hücre 6 ADC Değeri: 10056 Gerilim: 3839.74 mV
Voltage for SOC calculation: 3.84
SOC: 81.89
SOC: 81.89 %
Hücre 7 ADC Değeri: 11283 Gerilim: 3850.98 mV
Voltage for SOC calculation: 3.85
SOC: 82.42
SOC: 82.42 %
Hücre 8 ADC Değeri: 10025 Gerilim: 3833.25 mV
Voltage for SOC calculation: 3.83
SOC: 81.58
SOC: 81.58 %
```

Şekil 5.25: Batarya hücrelerinin voltaj ve SOC değerlerinin seri monitör çıktısı.

Multimetre ile yapılan hücre ölçüm değerleri aşağıdaki Şekil (5.26)'da gösterilmiştir.



Şekil 5.26: Batarya hücrelerinin gerilim ölçüm testi.

5.3.3. Batarya Sıcaklık Ölçüm Testi

Şekil 5.27’de, sistem oda sıcaklığında çalışırken yapılan ölçümler ve batarya paketine bağlı sıcaklık sensörlerinden alınan değerler karşılaştırılmıştır. Batarya yönetim sistemlerinde sıcaklık, bataryanın performansı, güvenliği ve ömrü üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bölümde, batarya sıcaklık ölçüm testlerinin gerçekleştirilme yöntemleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Test süreci, batarya paketine uygun

sıcaklık sensörlerinin entegrasyonu ile başlamış; sensörler, batarya paketinin her bölgesinden doğru sıcaklık bilgileri elde edilebilmesi için stratejik olarak konumlandırılmıştır.

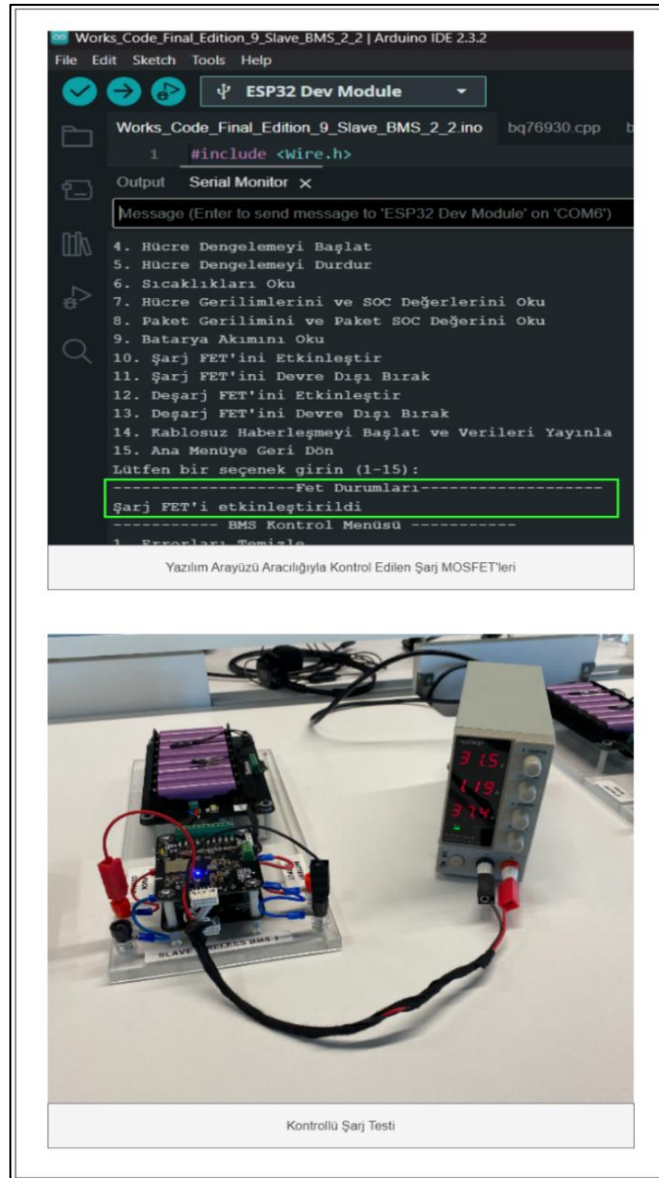


Şekil 5.27: Sıcaklık okuma testi.

Testin ilk aşamasında, sistem oda sıcaklığında çalıştırılarak başlangıç sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Ardından, batarya belirli bir süre boyunca yük altında çalıştırılmış ve bu süre boyunca bataryanın sıcaklık değerleri saniye bazında kaydedilmiştir. Test süreci, batarya sıcaklığının kararlı bir değere ulaşması veya güvenlik sınırına yaklaşmasıyla sonlandırılmıştır.

5.3.4. Sistem Şarj Testi

Bu bölümde, BYS'nin şarj işlevinin nasıl test edildiği detaylandırılmaktadır. Test süreci, bataryanın şarj süreçlerinin doğruluğunu ve verimliliğini değerlendirmek amacıyla tasarlanmıştır.



Şekil 5.28: Sistem şarj testi.

Şekil 5.28’de sistemin şarj testi gösterilmektedir. Şarj sırasında, batarya paketi test boyunca şarj edilmiş ve tüm şarj parametreleri, yazılım arayüzüyle kontrol edilen mosfetler üzerinden yönetilmiştir. Testin ileri aşamalarında, şarj tamamlandıktan sonra batarya paketinin performansı değerlendirilmiştir. Şarj sürecinin etkinliği; şarj süresi, hücre voltajları arasındaki denge ve genel batarya sağlığı gibi faktörler açısından analiz edilmiştir. Ayrıca, şarj sürecinin beklenen tüm koruma mekanizmalarını güvenlik açısından tetikleyip tetiklemediği kontrol edilmiştir. Şarj süreci, belirlenen bir şarj algoritmasına göre yürütülmüş ve bataryanın voltajı, akımı ve sıcaklığı gibi kritik parametreler sürekli izlenmiştir. Şarj işlemi sırasında, sistem güvenlik ve performans kriterlerine göre ayarlanmış şarj gerilimi ve akım sınırlarını uygulamış, her bir hücrenin voltajı eşitlenene kadar pasif dengeleme mekanizmaları devreye alınmıştır.

5.3.5. Sistemin Deşarj Testi

Bu bölümde, BYS’nin deşarj işlevinin nasıl test edildiği açıklanmaktadır. Deşarj testi, bataryanın enerji verimliliğini ve deşarj sırasında hücreler arasındaki dengeyi değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Batarya, belirlenen bir yük altında çalıştırılarak deşarj edilmiş ve bu süreçte hücre voltajları, akım ve sıcaklık gibi kritik parametreler kaydedilmiştir. Testin temel amacı, batarya paketinin deşarj sırasında performansını gözlemlemek ve enerji çıkışındaki tutarlılığı ölçmektir. Deşarj süreci, bataryanın minimum güvenlik voltajına ulaşana kadar devam etmiş; bu aşamada hücreler arası voltaj farklılıkları dikkatlice incelenmiş ve voltaj düşüşlerinin homojen olup olmadığı analiz edilmiştir.

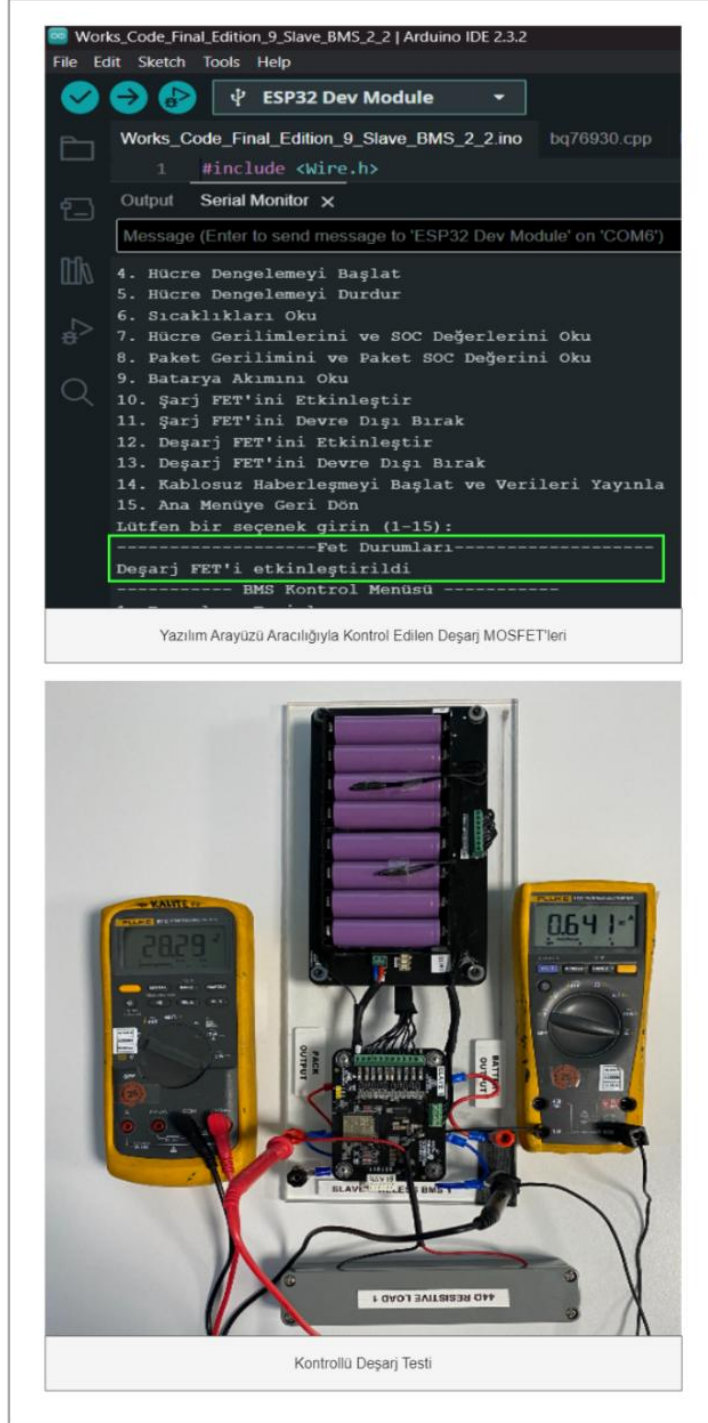
Aşağıdaki denklemlerde, batarya paketinin çıkışına bağlanan direnç üzerinden ölçülen akımın doğrulaması (5.10) denklem aracılığıyla yapılmıştır.

$$V_{Batarya} = 28.29 \text{ V} \quad (5.8)$$

$$V_{yük} = 44 \text{ } \Omega \quad (5.9)$$

$$I_{deşarj} = \frac{V_{Batarya}}{V_{yük}} = \frac{28.29}{44} = 0.642 \text{ A} \quad (5.10)$$

Şekil 5.29’da deşarj test işlemi gösterilmiştir. Deşarj sürecinin verimliliği; toplam deşarj süresi, enerji tüketimi ve hücreler arası dengeleme ihtiyacı gibi faktörler açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca, deşarj sürecinin batarya sağlığı üzerindeki etkileri göz önüne alınarak, BYS’nin koruma mekanizmalarının etkinliği test edilmiştir.



Şekil 5.29: Sistem deşarj testi.

5.3.6. Sistemin Kablosuz Haberleşme Testi

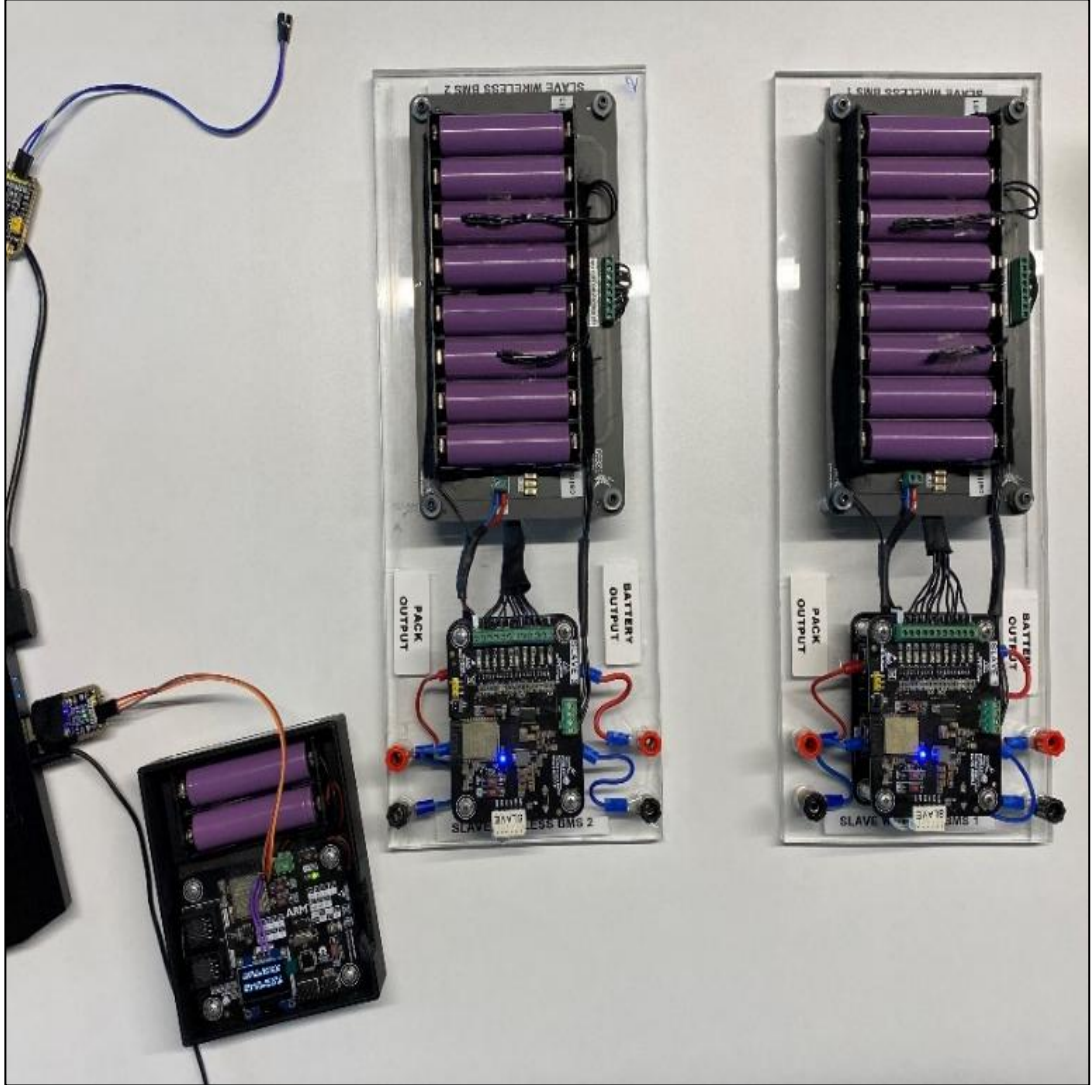
Bu bölümde, BYS'nin kablosuz haberleşme altyapısının test süreci incelenmiştir. Kablosuz haberleşme testi, sistemin iletişim güvenilirliğini ve veri aktarımını değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Bu test, BYS'nin farklı bileşenleri arasındaki veri iletişiminin doğruluğunu ve etkinliğini ölçmek için kapsamlı bir şekilde tasarlanmıştır. Şekil 5.30'da alt birim (çocuk) modüllerin kart ile haberleşmesi ve veri gönderimi gösterilmiştir.



Şekil 5.30: Kablosuz haberleşme testi.

Test süreci, ilk olarak sistem bileşenlerinin birbirleriyle başarılı bir şekilde eşleşip eşleşmediğinin kontrol edilmesiyle başlamıştır. Bu aşamada, tüm cihazlar arasındaki senkronizasyon ve bağlantı kalitesi incelenmiştir. Ardından, yazılım ile okunan değerlerin doğruluğu test edilmiştir. Bu test sırasında kartlar programlanmış, bağlantılar kontrol edilmiş ve ana karttan alt birim (çocuk) kartlara gönderilen

komutların doğru şekilde uygulanıp uygulanmadığı ile mesafe kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.31’de, alt birim kartlar ile ana kart arasındaki kablosuz haberleşme gösterilmektedir.



Şekil 5.31: Kablosuz haberleşme testinin programlanması.

Tasarlanan sistemde, haberleşme sınırları belirlenmiş ve bağlantının kesilip kesilmediği tespit edilmek istenmiştir. Haberleşme bağlantısı kesildiğinde sistemin verdiği tepki kontrol edilmiş ve yazılımda bu tür bir hatanın tespit edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 5.32’de, alt birim (çocuk) kartlar ile ana kart arasındaki haberleşme gösterilmektedir.

```

Works_Code_Final_Edition_10_Master | Arduino IDE 2.3.2
File Edit Sketch Tools Help

ESP32 Dev Module

Works_Code_Final_Edition_10_Master.ino
32 uint8_t* targetSlaveAddress = NULL; // Seçilen Slave'ın MAC adresi
33 int selectedSlave = 0; // Seçilen Slave'ın ID'si
34
35 // Slave MAC adreslerini tanımlayın
36 uint8_t slave1Address[] = {0x48, 0xE7, 0x29, 0x90, 0x1E, 0x90}; // Slave 1'in MAC adresi
37 uint8_t slave2Address[] = {0x78, 0x21, 0x84, 0x60, 0x48, 0xA0}; // Slave 2'nin MAC adresi
38
39 void onDataRecv(const esp_now_recv_info * info, const uint8_t *incomingData, int len) {
40     struct message receivedData;
41     memcpy(&receivedData, incomingData, sizeof(receivedData));
42     if (receivedData.id == 1) { // Slave 1'den gelen veri
43         memcpy(&slave1Data, &receivedData, sizeof(slave1Data));
44     } else if (receivedData.id == 2) { // Slave 2'den gelen veri

```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to "ESP32 Dev Module" on "COM6")

```

◆◆◆◆◆!5◆◆◆◆1◆
◆9B----- Slave Seçim Menüsü -----
1. Slave 1'i Seç
2. Slave 2'yi Seç
Lütfen bir seçim yapın (1-2):
Slave 1 seçildi.
----- BMS Kontrol Menüsü -----
1. Balanslamayı Bağlat/Durdur
2. Şarj FET'ini Etkinleştir
3. Deşarj FET'ini Devre Dışı Bırak
Lütfen bir seçenek girin (1-3):
Balanslama komutu gönderildi.
----- BMS Kontrol Menüsü -----
1. Balanslamayı Bağlat/Durdur
2. Şarj FET'ini Etkinleştir
3. Deşarj FET'ini Devre Dışı Bırak
Lütfen bir seçenek girin (1-3):
Son Paket Gönderim Durumu: Gönderim Hatası

```

Şekil 5.32: Seri monitörde slave seçimi ve paket gönderim testi.

6. YAZILIM TASARIMI VE TEST

Yazılım tasarımı, BQ76930 entegresine dayalı bir BYS için geliştirilmiş olup, 8 hücreli lityum-iyon bataryaların güvenli ve verimli bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır. Yazılım; hücre voltajlarını sürekli izleyerek, sıcaklık ölçümleri yaparak ve pasif hücre dengelemesini kontrol ederek sistemin güvenliğini ve performansını optimize etmektedir. Ayrıca, sistemin şarj ve deşarj işlemleri, aşırı akım ve kısa devre gibi güvenlik önlemleri ile korunmaktadır.

Yazılım, I2C arayüzü üzerinden entegre ile haberleşmekte ve C++ dilinde yazılmıştır. İleride CAN-bus gibi ek iletişim protokollerini destekleyecek şekilde yapılandırılmış olmasına rağmen, bu özellikler mevcut sürümde aktif değildir. Tasarım, modüler ve genişletilebilir bir yapı sunarak ileride yapılacak geliştirmelere açık bir altyapı sağlamaktadır.

6.1. Fonksiyon Özeti

Bu yazılım, BQ76930 entegresi ile tasarlanmış bir 8 hücreli lityum-iyon batarya modülünün yönetimi için geliştirilmiştir. Sistem, sürekli olarak 8 adede kadar lityum-iyon batarya hücresinin voltajlarını izler. Hücre voltaj ölçümleri, entegre edilmiş 14-bit ADC (Analog-Dijital Çevirici) modülatörü aracılığıyla gerçekleştirilirken, akım izleme işlemi 16-bit ACC (Analog Kontrol Devresi) modülatörü ile sağlanır. Bu sayede hücre dengeleme işlemleri sırasında güvenilir bir kontrol sağlanmış olur.

Sıcaklık izleme, batarya ve kart sıcaklıklarının ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Batarya sıcaklık ölçümleri için 2 adet harici sıcaklık sensörü girişi mevcuttur ve bu ölçümler BQ76930 entegresi tarafından yapılmaktadır. Ayrıca, kart sıcaklıkları doğrudan mikrodenetleyici (uC) tarafından izlenir. Bu izleme işlemi, sistemin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak adına kritik bir öneme sahiptir.

Sistem, her bir hücre terminaline paralel olarak bağlanan dirençler üzerinden pasif hücre dengelemesi yapılmasını sağlar. Bu dengeleme işlemi, entegrede bulunan Hücre Dengeleme Sürücüleri/Mosfetler ile kontrol edilir ve böylece hücreler arasındaki voltaj farkları minimize edilir. Bunun yanında, sistemde CAN-bus haberleşme desteği ve STM32 platformu da bulunmaktadır; ancak bu özellikler mevcut yazılım

sürümünde aktif olarak kullanılmamaktadır ve gelecekteki çalışmalarda değerlendirilmek üzere planlanmıştır.

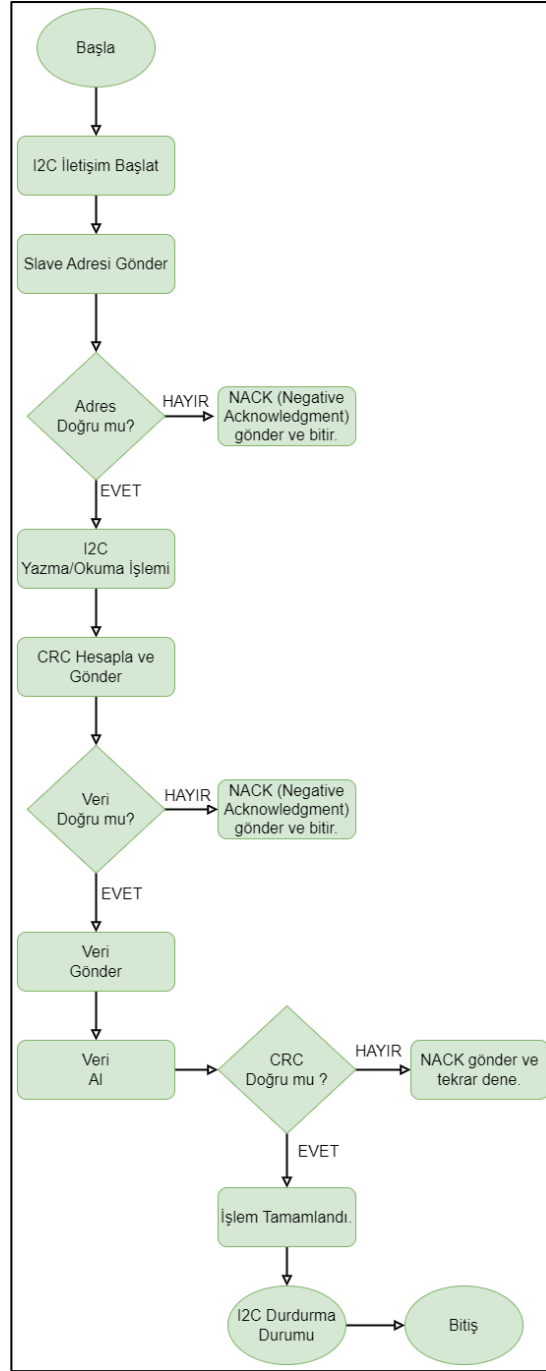
Güç kaynağı yönetimi, dahili (Internal) 3.3V LDO ve harici (external) 2.5/3.3V LDO kullanılarak gerçekleştirilir. Sistemin kararlılığı ve düşük voltaj kesilmelerinden korunması için VSTUPPOR ve bant aralığı (bantgap) IBIAS yapıları entegrede mevcuttur. FET Sürücü ve Yük Algılama bölümü ise CHG (şarj) ve DSG (deşarj) sinyalleriyle şarj vedeşarj işlemlerini yönetir. Güvenlik açısından, sistemde SCD (Short Circuit Detection) ve OCD (Overcurrent Detection) komparatörleri kullanılmıştır. Bu komparatörler, aşırı akım veya kısa devre gibi kritik durumları algılayarak devreye güvenlik önlemlerini alır ve ALERT pini üzerinden mikrodenetleyiciye bilgi gönderir. Bu şekilde sistemin güvenliği sürekli olarak sağlanır. İletişim, sistemin dış dünyayla bağlantısını sağlamak için I2C arayüzü üzerinden gerçekleştirilir ve bu arayüz, SCL ve SDA pinleri aracılığıyla veri alışverişini sağlar. Ayrıca, sistemde kritik parametrelerin saklanabilmesi için EEPROM desteği de mevcuttur. Yazılım tasarımı C++ tabanlıdır ve BQ76930 entegresi ile haberleşme I2C arayüzü üzerinden gerçekleştirilir. Mikrodenetleyici, sistemde kullanılan SPI/I2C protokolleri, ADC ve programlanabilir zamanlayıcı gibi çevre birimlerini yönetir. Bu sayede hücre voltajları, sıcaklık izleme, dengeleme ve şarj/deşarj gibi görevler belirli aralıklarla kontrol edilir ve yürütülür. Ek olarak, ESP32 modülü, CH340 entegresi kullanılarak programlanmakta olup, yazılımda BQ76930.h ve BQ76930.cpp kütüphaneleri bulunmaktadır.

BQ76930 entegresi, iki ana çalışma modu sunar bunlar:

- **NORMAL Modu:** Bu modda sistem tamamen operasyonel durumdadır. ADC ve CC mikrodenetleyici tarafından açılıp kapatılabilir. Aşırı voltaj (OV) ve düşük voltaj (UV) korumaları da ADC etkinse devrede olur. Aşırı akım (OCD) ve kısa devre (SCD) korumaları da bu modda aktiftir. Güç tüketimini azaltmak için ADC ve CC devre dışı bırakılabilir ve CC, "1-SHOT" modunda çalıştırılabilir.
- **SHIP Modu:** Bu, en düşük güç modudur ve batarya paketi montajı ya da uzun süreli depolama için tasarlanmıştır. Sistem, bu moddan NORMAL moda geçiş yapabilmesi için TS1 pininden bir BOOT sinyali almalıdır.

6.2. Sistem Yazılım Özellikleri

Sistem yazılımı, 8 hücreli bir yapı üzerine geliştirilmiştir. Bu tasarımda belirli donanım ve yazılım ayarları yapılmış olup, girişler 8 hücreli yapı için uygun olacak şekilde düzenlenmiştir. Yazılım, register haritasında belirtilen değerler doğrultusunda yapılandırılmış ve sistemde aktif hale getirilmiştir. Bu tasarımda kullanılan BQ7693006 serisi entegre, CRC (Cyclic Redundancy Check) desteğine uygun değildir. CRC, iletilecek ya da depolanacak veri üzerine bir polinom kullanarak matematiksel bir işlem uygulanır ve bu işlemde bir kontrol değeri (CRC kodu) üretilir. Bu kontrol değeri, veri ile birlikte gönderilir veya kaydedilir. Alıcı taraf, aynı polinomu kullanarak veriyi yeniden işler ve kendi CRC değerini hesaplar. Hesaplanan bu CRC değeri, gönderici tarafından gönderilen CRC değeriyle karşılaştırılır. Eğer bu iki değer uyuşuyorsa, verinin doğru olarak iletildiği ya da kaydedildiği anlaşılır. Aksi durumda bir hata olduğu ve verinin üzerinde değişiklik olduğu belirlenir. Tek baytlık yazma işlemi için CRC, köle adresi, kayıt adresi ve veri üzerinden hesaplanır. Blok yazma işlemi için ise ilk baytın CRC'si, köle adresi, kayıt adresi ve veri üzerinden hesaplanır; sonraki baytlar için CRC yalnızca veri üzerinden hesaplanır. CRC polinomu $x^8 + x^2 + x + 1$ şeklindedir ve başlangıç değeri 0'dır. Bu nedenle CRC fonksiyonu aktif edilmemiştir. Normalde, köle cihaz hatalı bir CRC tespit ettiğinde, veri alışverişi durur ve I2C hattı bekleme moduna geçer. Master cihaz, hatalı bir CRC aldığı anda köle cihaza NACK (Negative Acknowledgment- Olumsuz Bildirim) sinyali göndererek işlemi sonlandırır. I2C ve CRC mesajının çalışma prensibi aşağıdaki Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



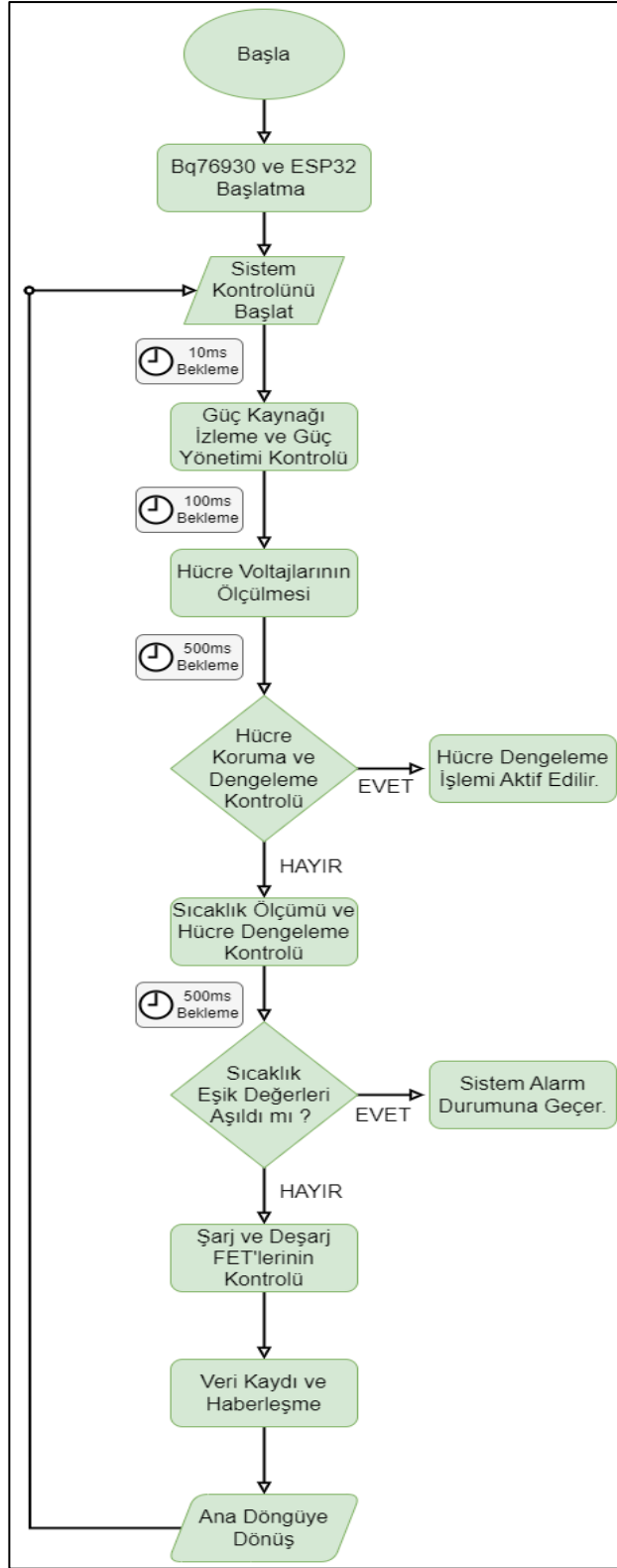
Şekil 6.1: Sistemin I2C/CRC yazılım akış şeması.

Register Haritasından yararlanarak oluşturulan, sistem yazılımı, aşağıdaki önemli kayıtları kullanarak işlevlerini yerine getirir:

- **SYS_STAT (0x00):** Sistem durumu ile ilgili bilgileri içerir. Bu register; düşük voltaj (UV), yüksek voltaj (OV), kısa devre (SCD) ve aşırı akım (OCD) gibi durumları izler. Bu bitler, entegrede meydana gelen hataları veya sistemdeki özel durumları bildirir.

- **CELLBAL1-CELLBAL2:** Hücre dengeleme işlemlerini kontrol eden kayıtlardır. Her bit, ilgili hücre için dengeleme fonksiyonunun aktif olup olmadığını gösterir.
- **SYS_CTRL1 ve SYS_CTRL2:** Sistem kontrol fonksiyonlarını sağlayan kayıtlardır. Bu kayıtlar aracılığıyla ADC'nin aktif edilip edilmediği ve dengeleyicinin (balancer) devrede olup olmadığı gibi temel fonksiyonlar yönetilir.
- **PROTECT1-PROTECT2:** Koruma fonksiyonlarına dair eşik değerleri ve ayarlar bu kayıtlarda bulunur. Örneğin, aşırı akım ve kısa devre eşikleri bu alanlardan ayarlanabilir.
- **OV_TRIP ve UV_TRIP:** Hücre voltajlarının üst (Overvoltage) ve alt (Undervoltage) sınırlarını belirleyen kayıtlardır.
- **VCELLX:** Her bir batarya hücresinin voltaj değerlerini okuyan kayıtlardır. VCELL1'den VCELL10'a kadar her hücre için ayrı bir voltaj değeri saklanır.
- **BAT_HI ve BAT_LO:** Sistemin toplam batarya voltajını gösterir. Batarya paketindeki hücrelerin toplam voltajını okur.
- **TS1 ve TS2:** Sıcaklık sensörlerinden gelen verileri içerir. Bu sensörler aracılığıyla batarya sıcaklıkları izlenir.
- **SYS_STAT (0x00):** Kayıtları, cihazın genel sistem durumu hakkında bilgi verir ve hata tespitinde kullanılır. Bu kayıtlarda bulunan önemli bitler şunlardır:
 - **READY:** Sistem hazır durumda mı, değil mi, bunu gösterir.
 - **UV/OV:** Düşük voltaj (UV) ve yüksek voltaj (OV) hatalarını işaret eder.
 - **SCD/OCD:** Kısa devre (SCD) ve aşırı akım (OCD) hatalarını gösterir.
 - **DEVICE_XREADY:** Cihazın kullanılabilir durumda olup olmadığını gösterir.

Şekil 6.2'de gösterildiği üzere, sistem yazılımı geliştirilmiş ve ölçüm ile kontrol adımları detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 6.2: Sistemin fonksiyon yazılım akış şeması.

Şekil 6.2’de gösterilen görsel, 8 hücreli bir BYS’nin kontrol akış şemasını sunmaktadır. Akış şeması, sistemin başlangıç aşamasından hücre voltajlarının

ölçümüne, hücre dengeleme kontrolüne, sıcaklık izlemeye ve şarj/deşarj mosfetlerinin kontrolüne kadar olan süreçleri kapsamaktadır. İlk olarak, BQ76930 ve ESP32 modüllerinin başlatılmasıyla sistem devreye alınır ve güç kaynağı izleme işlemi gerçekleştirilir. Ardından, hücre voltajlarının ölçülmesi ve pasif hücre dengeleme işleminin aktif hale getirilmesi sağlanır. Sıcaklık ölçümü yapılır ve sıcaklık eşik değerlerinin aşılması durumunda sistem alarm durumuna geçer. Şarj vedeşarj mosfetleri kontrol edilerek, veri kaydedilir ve kablosuz haberleşme sağlanır. Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra sistem ana döngüye geri döner ve sürekli izleme işlemi devam eder.

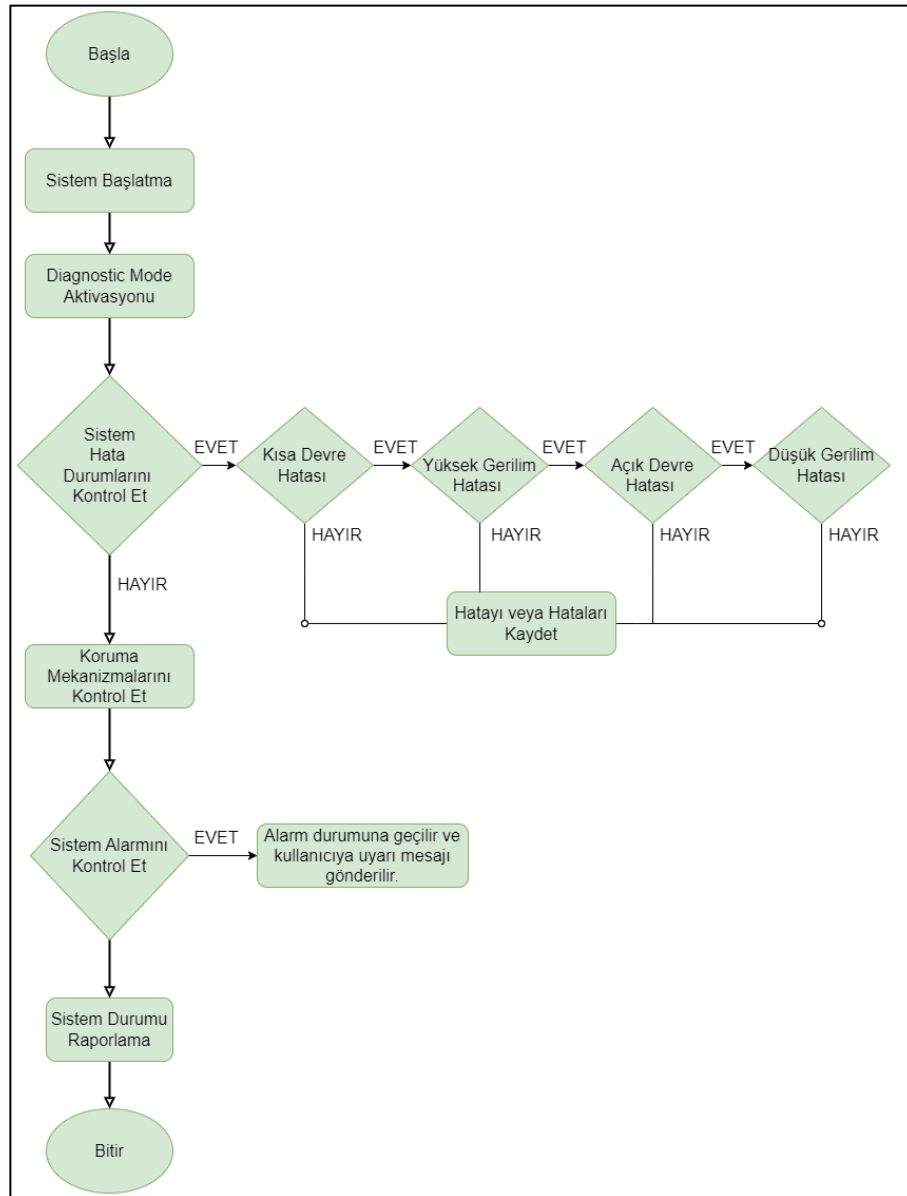
6.3. Sistem Yazılım Testi

Bu sistemde, yazılımın doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla çeşitli yazılım testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, sistemin farklı çalışma modlarının etkinliğini kontrol etmek için tasarlanmış olup, her bir modun işlevselliği ayrıntılı olarak incelenmiştir. Testler arasında diagnostik kontrol testi ile sistemdeki hata tespiti ve koruma mekanizmaları doğrulanmıştır. Batarya voltaj ölçüm testi ile hücre voltajlarının doğru bir şekilde okunup okunmadığı kontrol edilmiş, hücre dengeleme testi ile hücreler arasındaki voltaj farklarının dengeleme süreci değerlendirilmiştir. Sıcaklık ölçüm testi, batarya ve kart sıcaklık sensörlerinin doğruluğunu test ederken, şarj vedeşarj kontrol testi, sistemin şarj vedeşarj işlemlerini doğru bir şekilde yönetip yönetmediğini analiz etmiştir. Ayrıca, çocuk kart ile ana kart arasındaki kablosuz haberleşme testleri, verilerin güvenli ve hatasız bir şekilde iletilip iletilmediğini doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin her biri, sistemin stabilitesini ve performansını garanti altına almak için önemli bir rol oynamaktadır.

6.3.1. Sistemin Diagnostik Kontrol Testi

Bu test sırasında, sistemin genel sağlık durumu değerlendirilmiş; kritik hatalar ve koruma mekanizmalarının düzgün çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Diagnostik test, sistemin çeşitli bileşenlerini ve fonksiyonlarını adım adım kontrol etmiştir. İlk olarak, sistem başlatıldığında mikrodenetleyici (μC) ve BQ76930 entegresi aktive edilmiştir. Bu aşamada, sistemin sorunsuz bir şekilde başlatıldığından emin olunmuş ve diagnostik moda geçilmiştir. Diagnostik mod, sistemin çalışmasını izleyerek olası hataları tespit etmektedir. Bu test sırasında, SYS_STAT kaydı kullanılarak sistemdeki

hatalar incelenmiştir. Düşük voltaj (UV), yüksek voltaj (OV), aşırı akım (OCD) ve kısa devre (SCD) gibi hatalar bu kayıttan okunarak kontrol edilmiştir. Hata tespiti sırasında herhangi bir sistem alarmı aktifse, kullanıcıya bir hata mesajı gönderilmiş ve gerekli güvenlik önlemleri alınmıştır. Hata tespit edilmezse, koruma mekanizmalarının doğru çalıştığı doğrulanarak diagnostik test süreci devam etmiştir. Koruma mekanizmalarının düzgün çalıştığı doğrulandıktan sonra, sistem alarm durumları ve olası hata bildirimleri kontrol edilmiştir. Alarm durumu varsa, bu durum raporlanarak kullanıcıya bildirilmiştir. Alarm tespit edilmezse, diagnostik kontrol testi başarıyla tamamlanmıştır.



Şekil 6.3: Sistemin diagnostik kontrol akış şeması.

Şekil 6.3'te, sistemin diagnostik kontrol adımları gösterilmektedir. Son olarak, tüm diagnostik sonuçlar sistemde kaydedilir ve raporlanır. Bu sonuçlar, sistemin genel durumu ve olası hata durumlarını ortaya koyar. Diagnostik kontrol testi başarıyla tamamlandığında, sistem ana çalışma moduna geri dönerek batarya modülünün izleme ve kontrol işlemlerine devam eder. Şekil 6.4'te, diagnostik kontrol adımlarının uygulandığı yazılım gösterilmektedir.

```

Works_Code_Final_Edition_10_Slave_BMS_1 | Arduino IDE 2.3.2
File Edit Sketch Tools Help
ESP32 Dev Module
Works_Code_Final_Edition_10_Slave_BMS_1.ino bq76930.cpp bq76930.h registers.h
1 #include <Wire.h>
2 #include "bq76930.h"
Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM6')
7. Hücre Gerilimlerini ve SOC Değerlerini Oku
8. Paket Gerilimini ve Paket SOC Değerini Oku
9. Batarya Akımını Oku
10. Şarj FET'ini Etkinleştir
11. Şarj FET'ini Devre Dışı Bırak
12. Deşarj FET'ini Etkinleştir
13. Deşarj FET'ini Devre Dışı Bırak
14. Kablosuz Haberleşmeyi Başlat ve Verileri Yayınla
15. Ana Menüye Geri Dön
Lütfen bir seçenek girin (1-15):
CC_READY hatası temizlendi
OVRD_ALERT hatası temizlendi
OV hatası temizlendi
Tüm hatalar temizlendi. Sistem düzgün çalışıyor.
Errorlar temizlendi.
----- BMS Kontrol Menüsü -----
1. Errorları Temizle
2. Errorları Oku
3. Register değerlerini oku
4. Hücre Dengelemeyi Başlat
5. Hücre Dengelemeyi Durdur
6. Sıcaklıkları Oku
7. Hücre Gerilimlerini ve SOC Değerlerini Oku
8. Paket Gerilimini ve Paket SOC Değerini Oku
9. Batarya Akımını Oku
10. Şarj FET'ini Etkinleştir
11. Şarj FET'ini Devre Dışı Bırak
12. Deşarj FET'ini Etkinleştir
13. Deşarj FET'ini Devre Dışı Bırak
14. Kablosuz Haberleşmeyi Başlat ve Verileri Yayınla
15. Ana Menüye Geri Dön
Lütfen bir seçenek girin (1-15):

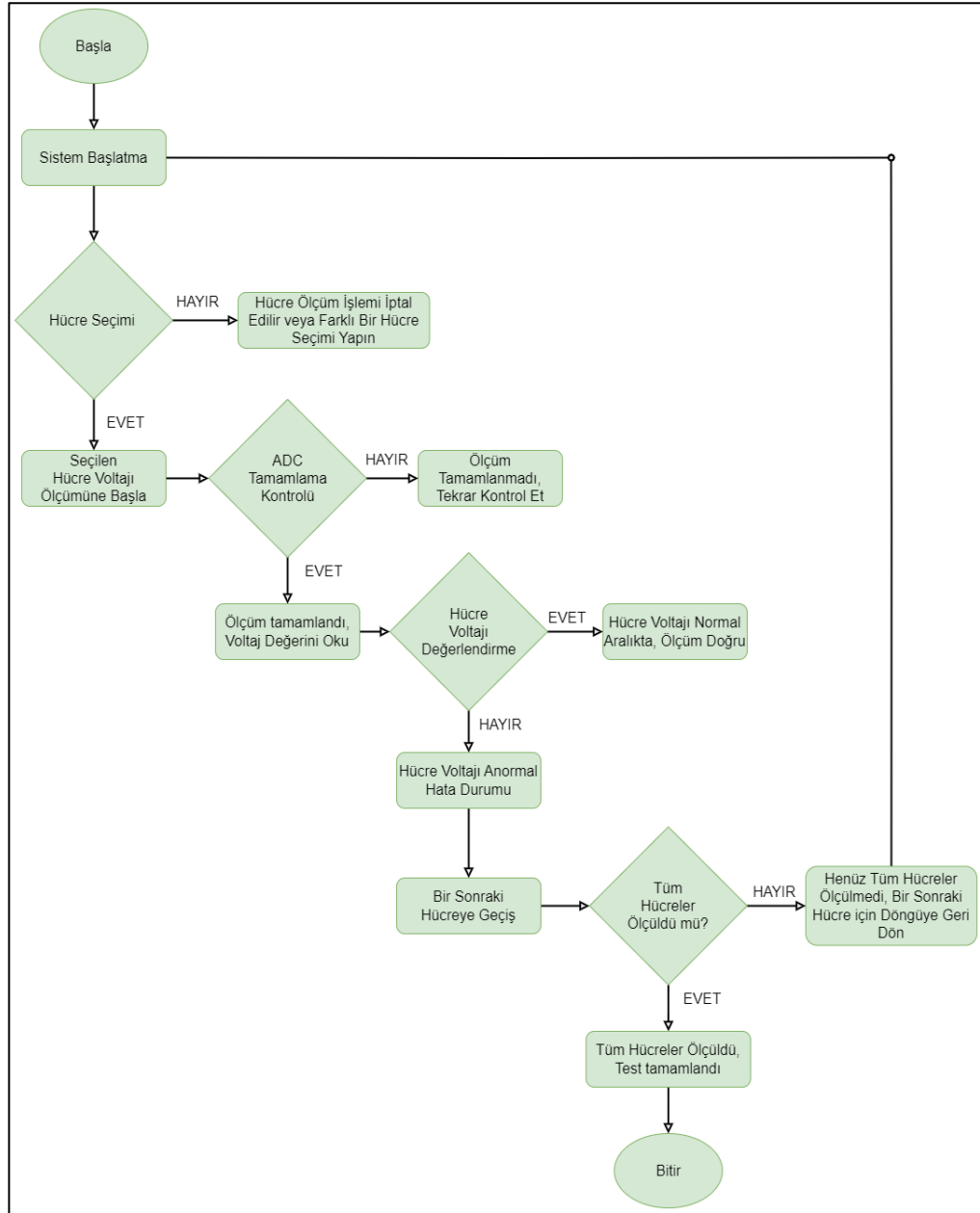
```

Şekil 6.4: Sistemin diagnostik kontrol seri monitör görüntüsü.

6.3.2. Batarya Voltaj Ölçüm Testi

Batarya voltaj ölçüm testi, batarya yönetim sisteminin her bir hücre voltajını doğru bir şekilde algılayıp ölçebilmesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Bu test, BQ76930

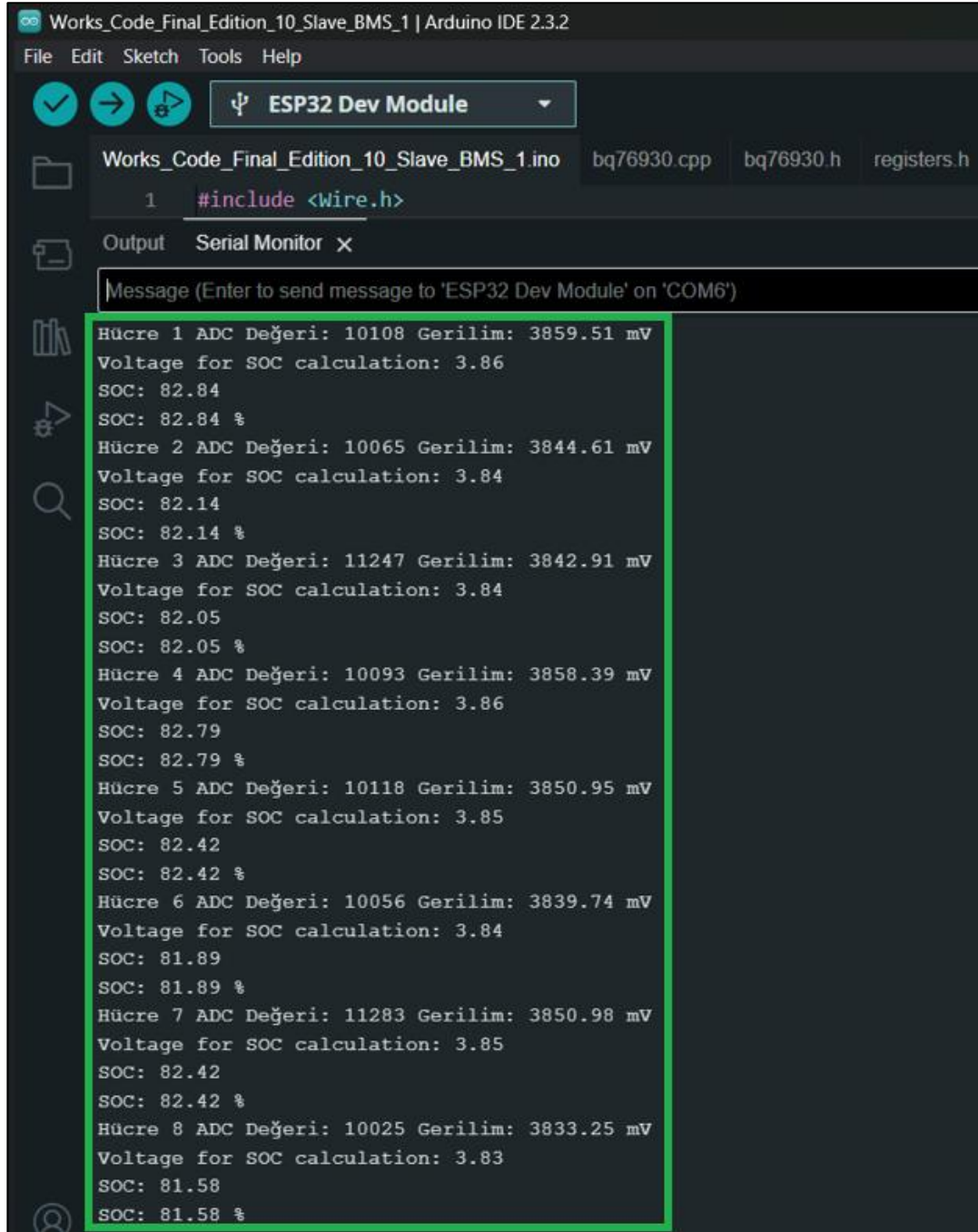
entegresi ve mikrodenetleyici tarafından yürütülen bir dizi kontrol ve değerlendirme adımını içerir.



Şekil 6.5: Sistemin batarya voltaj ölçüm akış şeması.

Şekil 6.5'te, sistemin batarya voltaj ölçüm kontrol adımları gösterilmektedir. Amaç, hücrelerin voltaj seviyelerinin izlenmesi, arıza durumlarının tespiti ve batarya paketi performansının güvence altına alınmasıdır. Batarya voltaj ölçüm testi sırasında, her bir hücrenin voltajı önceden tanımlanmış ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) çözünürlüğü kullanılarak ölçülür. Bu ölçümler, sistemin hücrelerin mevcut durumunu değerlendirmesine ve herhangi bir dengesizlik veya kritik voltaj durumunu tespit

etmesine olanak tanır. Şekil 6.6'da voltaj kontrol adımlarının uygulandığı yazılım gösterilmektedir.



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the 'Serial Monitor' window open. The monitor displays the output of a program that measures the voltage of 8 battery cells and calculates the State of Charge (SOC). The data is as follows:

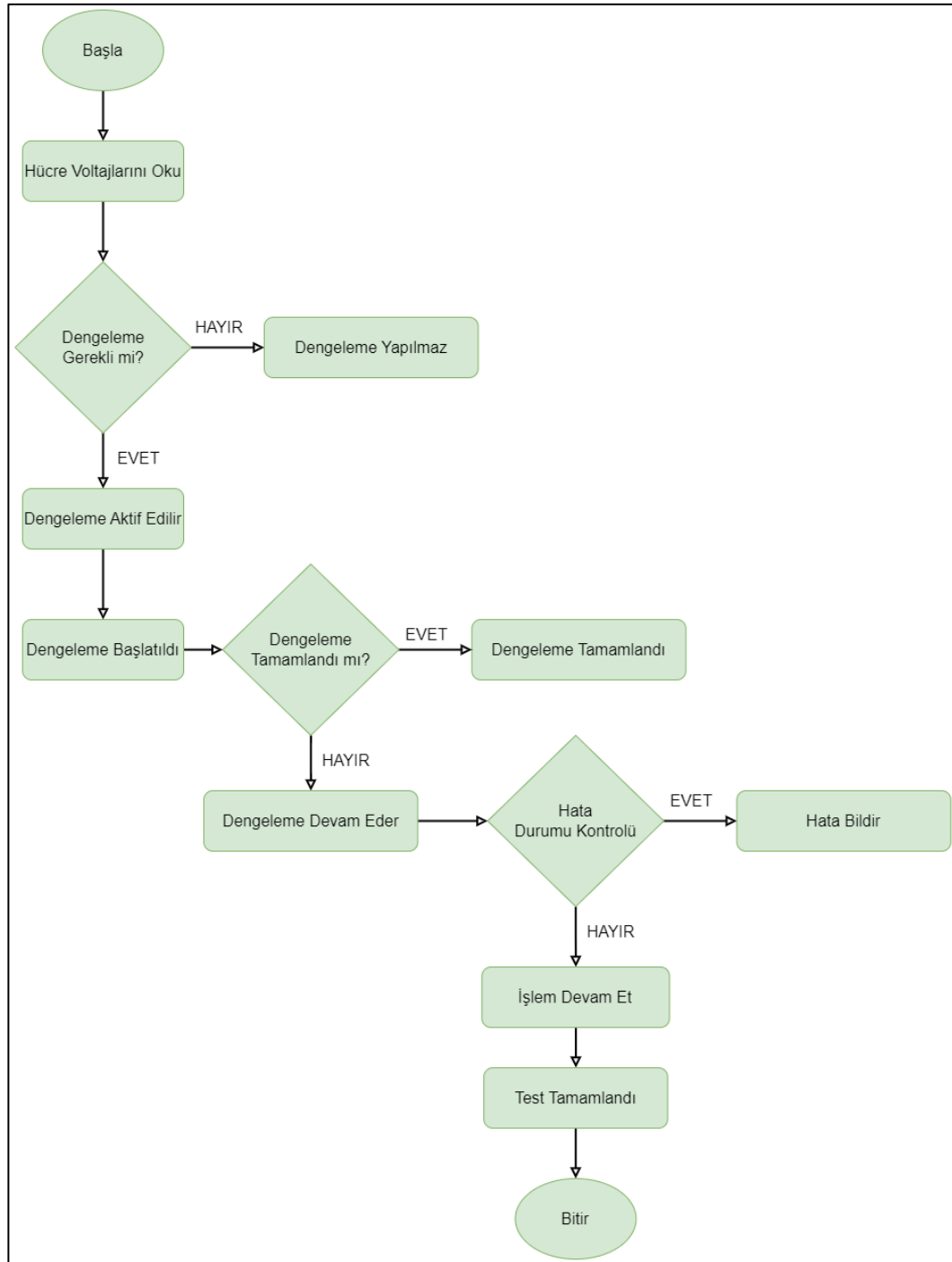
Hücre	ADC Değeri	Gerilim (mV)	Voltage for SOC calculation	SOC (%)
1	10108	3859.51	3.86	82.84
2	10065	3844.61	3.84	82.14
3	11247	3842.91	3.84	82.05
4	10093	3858.39	3.86	82.79
5	10118	3850.95	3.85	82.42
6	10056	3839.74	3.84	81.89
7	11283	3850.98	3.85	82.42
8	10025	3833.25	3.83	81.58

Şekil 6.6: Sistemin batarya voltaj ölçüm testi seri monitör görüntüsü.

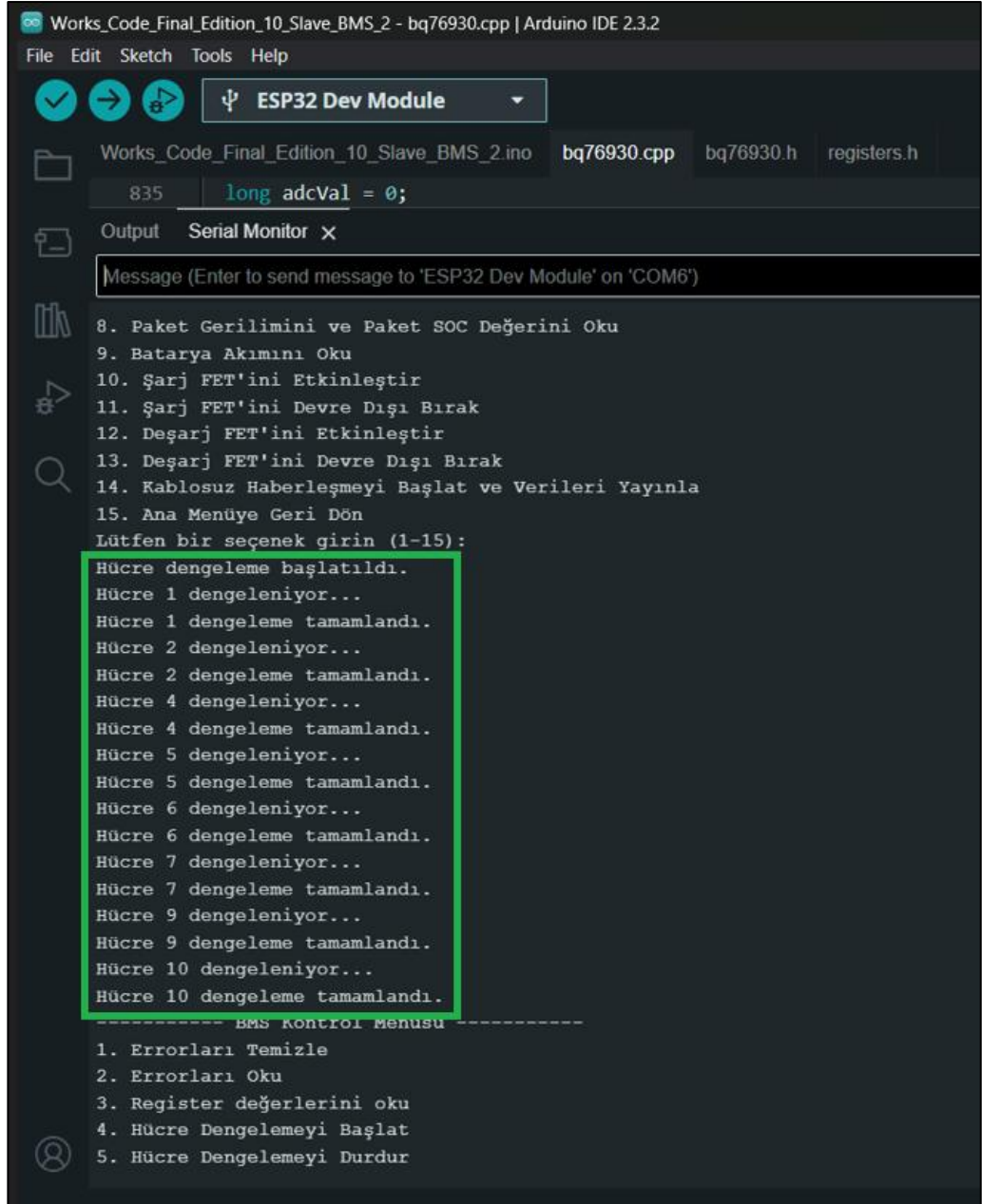
6.3.3. Batarya Dengeleme Testi

Batarya dengeleme testi, hücreler arasındaki voltaj farklarının giderilmesi ve tüm hücrelerin eşit seviyede çalışmasını sağlamak amacıyla uygulanmıştır. Bu test,

BYS'nin hücre voltajlarını izleyip dengeleme işlemini doğru şekilde gerçekleştirebildiğini doğrulamak için yapılmıştır. Sistem, her hücrenin voltajını ölçerek hücreler arasında belirli bir voltaj farkı oluştuğunda dengeleme işlemini devreye almıştır. Şekil 6.7'de, sistemin batarya voltaj ölçüm kontrol adımları gösterilmektedir.



Şekil 6.7: Sistemin batarya dengeleme akış şeması.



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the file 'Works_Code_Final_Edition_10_Slave_BMS_2 - bq76930.cpp' open. The 'Serial Monitor' window is active, displaying the following text:

```
8. Paket Gerilimini ve Paket SOC Değerini Oku
9. Batarya Akımını Oku
10. Şarj FET'ini Etkinleştir
11. Şarj FET'ini Devre Dışı Bırak
12. Deşarj FET'ini Etkinleştir
13. Deşarj FET'ini Devre Dışı Bırak
14. Kablosuz Haberleşmeyi Başlat ve Verileri Yayınla
15. Ana Menüye Geri Dön
Lütfen bir seçenek girin (1-15):
Hücre dengeleme başlatıldı.
Hücre 1 dengeleniyor...
Hücre 1 dengeleme tamamlandı.
Hücre 2 dengeleniyor...
Hücre 2 dengeleme tamamlandı.
Hücre 4 dengeleniyor...
Hücre 4 dengeleme tamamlandı.
Hücre 5 dengeleniyor...
Hücre 5 dengeleme tamamlandı.
Hücre 6 dengeleniyor...
Hücre 6 dengeleme tamamlandı.
Hücre 7 dengeleniyor...
Hücre 7 dengeleme tamamlandı.
Hücre 9 dengeleniyor...
Hücre 9 dengeleme tamamlandı.
Hücre 10 dengeleniyor...
Hücre 10 dengeleme tamamlandı.
----- BMS Kontrol Menüsü -----
1. Errorları Temizle
2. Errorları Oku
3. Register değerlerini oku
4. Hücre Dengelemeyi Başlat
5. Hücre Dengelemeyi Durdur
```

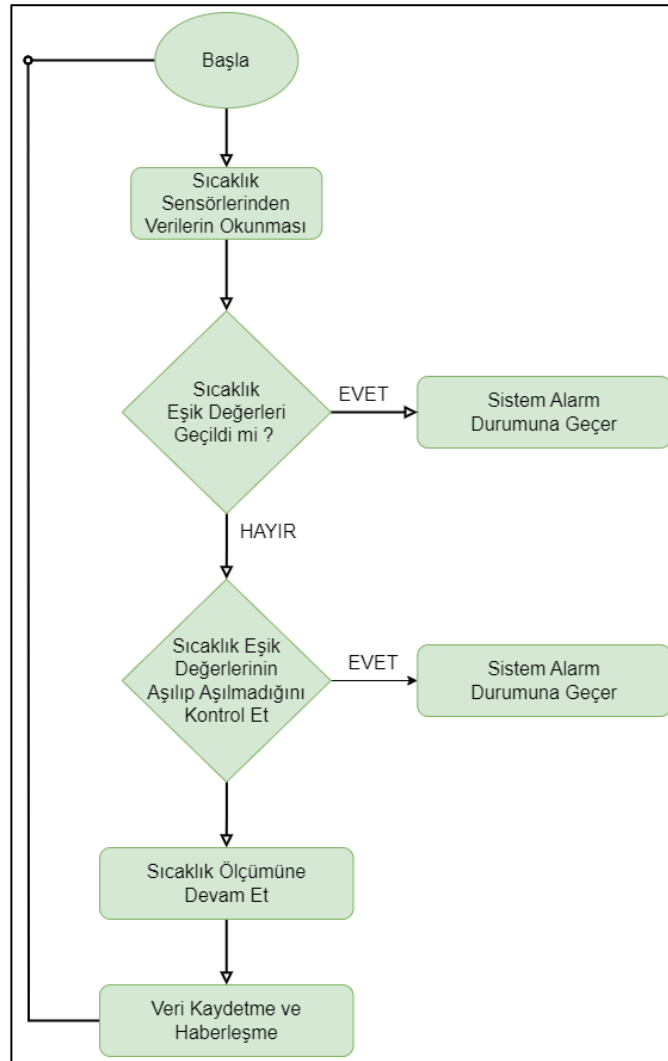
Şekil 6.8: Sistemin dengeleme testi seri monitör görüntüsü.

Batarya dengeleme adımlarının uygulandığı yazılım, yukarıdaki şekil (6.8)'de gösterilmektedir. Burada mikrodenetleyici, ADC modülünü başlatır ve gerekli konfigürasyonları yapar. Her bir batarya hücresinin voltajı teker teker ölçülür. Ölçüm sırasında, mikrodenetleyici BQ76930 entegresine bir ölçüm komutu gönderir ve entegre bu komutu aldıktan sonra hücre voltajını ADC aracılığıyla ölçer. Ölçüm tamamlandığında, sonuç SPI/I2C iletişimi ile mikrodenetleyiciye iletilir. Her bir hücre voltajı, önceden belirlenen alt ve üst sınırlarla karşılaştırılarak değerlendirilir. Eğer bir hücre voltajı belirlenen sınırların dışında ise, sistem bu durumu bir hata olarak tanımlar

ve gerekli aksiyonları alır (Örneğin: uyarı sinyali gönderme veya şarj/deşarj işlemini durdurma). Tüm hücrelerin voltajları ölçüldükten sonra, sistem bu değerleri kaydeder ve ilgili birimlere iletir. Bu veriler, hücre dengeleme ve sistem performans izleme gibi diğer işlemler için kullanılır.

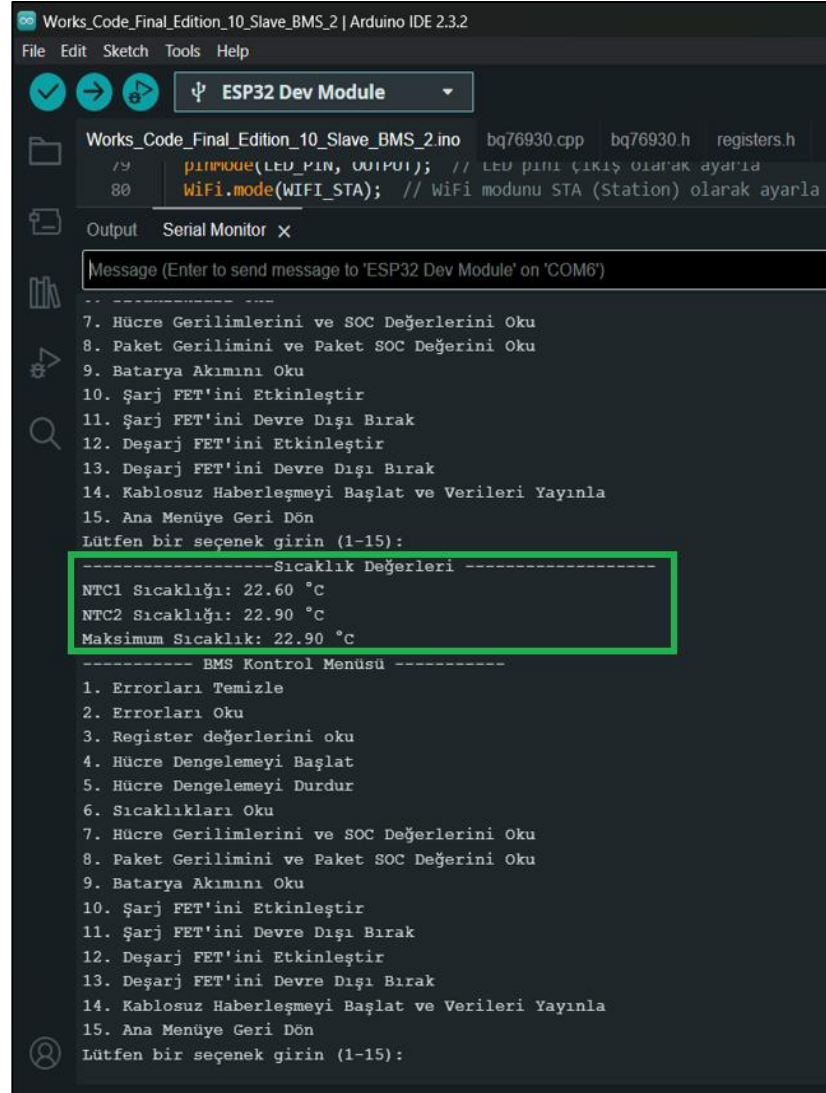
6.3.4. Batarya Sıcaklık Ölçüm Testi

Batarya yönetim sistemlerinde sıcaklık kontrolü, güvenli ve verimli bir şarj/deşarj süreci sağlamak açısından hayati öneme sahiptir. Bu test, batarya hücrelerinin ve kart üzerindeki sıcaklık sensörlerinin doğru çalışıp çalışmadığını doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri, BQ76930 entegresinin sıcaklık sensör girişleri (TS1 ve TS2) aracılığıyla yapılmıştır. Şekil 6.9’da sistemin batarya sıcaklığı ölçüm kontrol adımları gösterilmektedir.



Şekil 6.9: Sistemin sıcaklık ölçüm akış şeması.

Test sürecinde, sistem belirli aralıklarla bataryanın sıcaklık verilerini okumuş ve bu verileri önceden tanımlanmış eşik değerleriyle karşılaştırmıştır. Sıcaklık, eşik değerlerini aştığında sistem alarm durumuna geçerek olası hasar veya güvenlik risklerini önlemek amacıyla gerekli önlemleri devreye almıştır. Sıcaklık eşik değerlerinin altında olduğu durumlarda ise sistem normal çalışma moduna devam etmiştir.



The screenshot shows the Arduino IDE 2.3.2 interface with the 'Serial Monitor' window open. The code in the background is for an ESP32 Dev Module, specifically for a BMS (Battery Management System) project. The Serial Monitor displays a menu of options, and the user has selected option 7, 'Hücre Gerilimlerini ve SOC Değerlerini Oku'. The output shows the following temperature readings:

```
-----Sıcaklık Değerleri -----  
NTC1 Sıcaklığı: 22.60 °C  
NTC2 Sıcaklığı: 22.90 °C  
Maksimum Sıcaklık: 22.90 °C
```

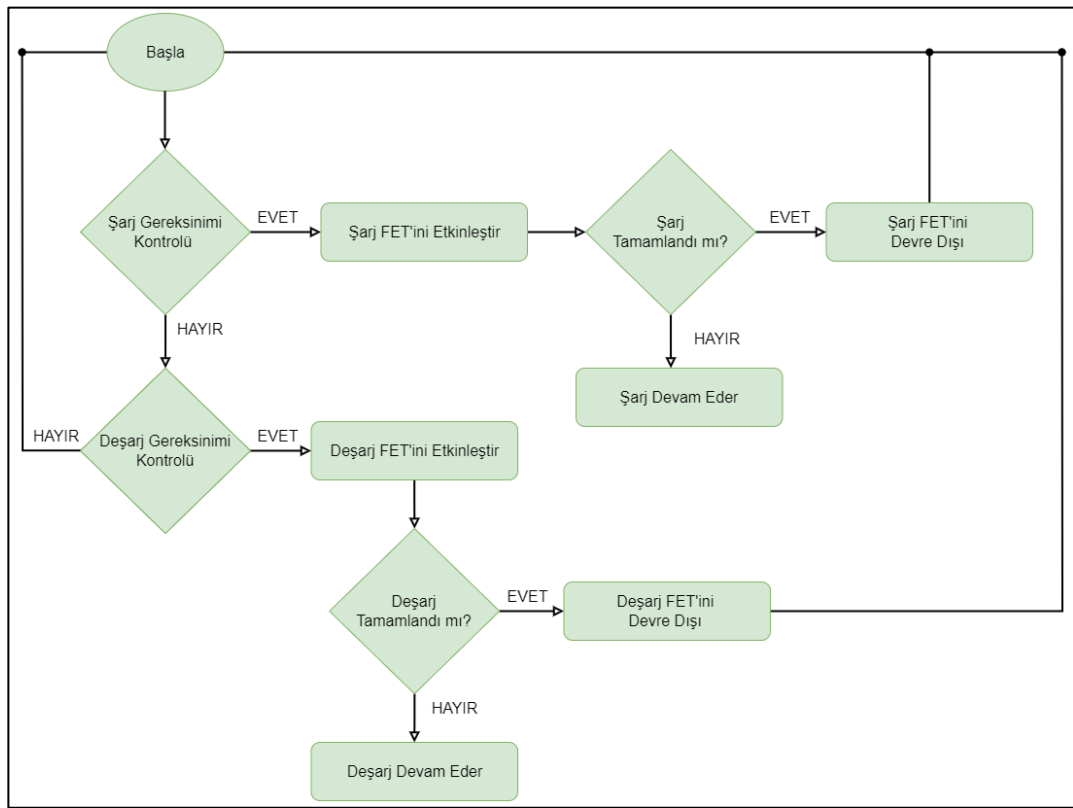
The Serial Monitor also shows a list of options for the BMS control menu, including 'Errorları Temizle', 'Errorları Oku', 'Register değerlerini oku', 'Hücre Dengelemeyi Başlat', 'Hücre Dengelemeyi Durdur', 'Sıcaklıkları Oku', 'Hücre Gerilimlerini ve SOC Değerlerini Oku', 'Paket Gerilimini ve Paket SOC Değerini Oku', 'Batarya Akımını Oku', 'Şarj FET'ini Etkinleştir', 'Şarj FET'ini Devre Dışı Bırak', 'Deşarj FET'ini Etkinleştir', 'Deşarj FET'ini Devre Dışı Bırak', 'Kablosuz Haberleşmeyi Başlat ve Verileri Yayınla', and 'Ana Menüye Geri Dön'.

Şekil 6.10: Sistemin sıcaklık ölçüm testi seri monitör görüntüsü.

Şekil 6.10'da batarya sıcaklık izleme adımlarının uygulandığı yazılım gösterilmektedir. Bu yazılım, bataryanın aşırı ısınmasını önlemek ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Batarya sıcaklık ölçümleri sürekli olarak izlenmiş ve sistemin güvenli sınırlar içinde çalıştığından emin olunmuştur.

6.3.5. Şarj ve Deşarj Kontrol Testi

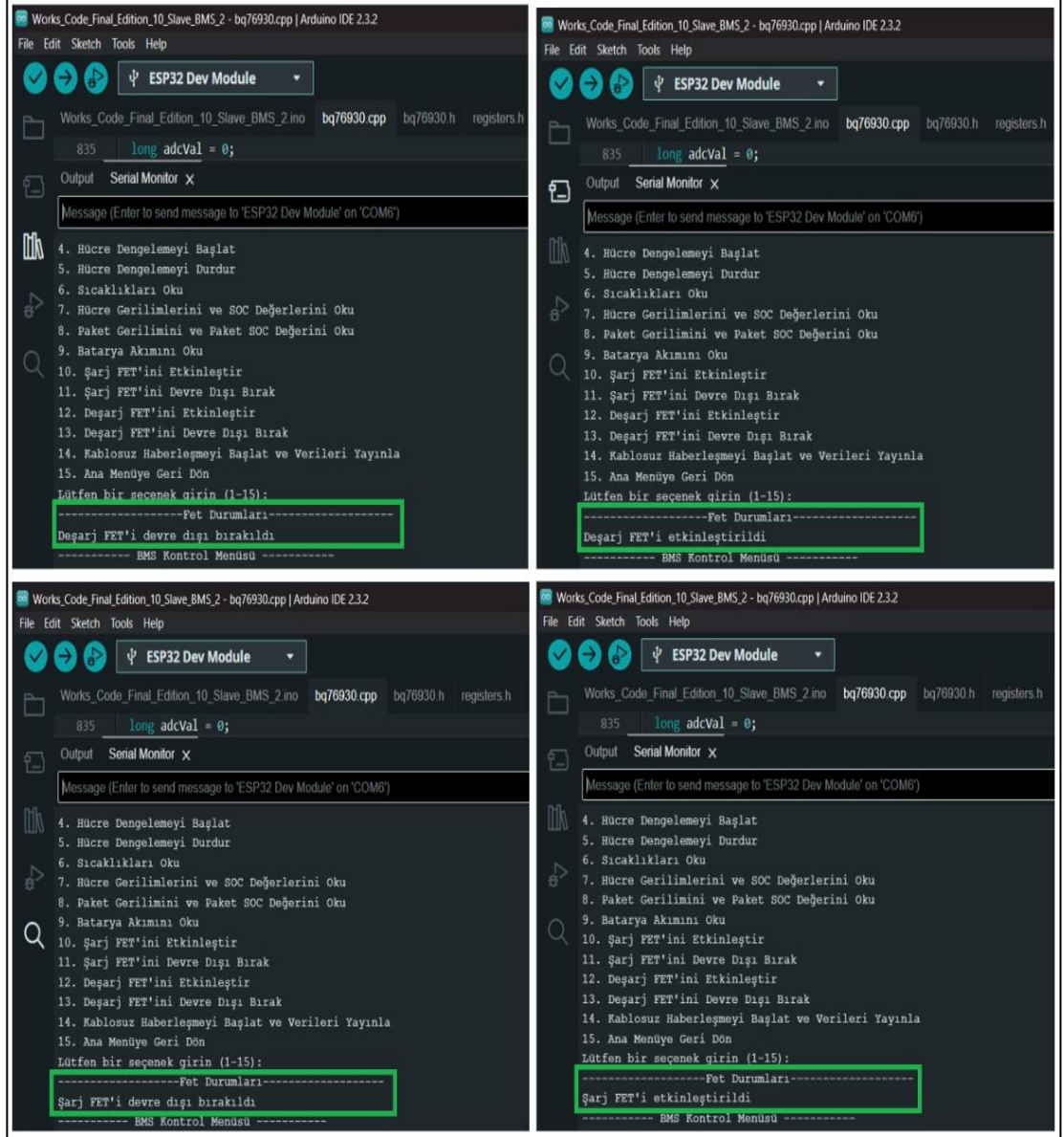
Şarj ve deşarj kontrol testi, BYS'nin şarj ve deşarj işlemlerini güvenli ve verimli bir şekilde gerçekleştirebildiğini doğrulamak amacıyla yapılmıştır. Bu testin temel amacı, BYS'nin bataryanın şarj akımını yönetebilmesi, aşırı şarj durumunda koruma sağlayabilmesi ve deşarj esnasında bataryanın alt voltaj limitlerine düşmesini önleyebilmesidir. Ayrıca, sistemin bağlı yükleri güvenli bir şekilde çalıştırabildiği, hücre dengesizliği durumlarını doğru bir şekilde algılayıp yönetebildiği ve akım sınırlamalarını uygulayabildiği kontrol edilmiştir.



Şekil 6.11: Sistemin şarj ve deşarj kontrol akış şeması.

Şekil 6.11'de, batarya şarj ve deşarj kontrol adımlarının uygulandığı yazılım gösterilmektedir. Şarj sırasında hücre voltajlarının eşit olup olmadığı ve hücreler arasında dengesizlik oluşup oluşmadığı gözlemlenmiştir. Hücreler arasında bir dengesizlik tespit edildiğinde, dengeleme işleminin doğru şekilde başlatıldığı doğrulanmıştır. BYS'nin, batarya voltajını izleyerek belirlenen minimum voltaj seviyesine ulaşıldığında deşarj işlemini durdurduğu kontrol edilmiştir. Deşarj sürecinde batarya sıcaklıkları ve akım değerleri izlenmiş ve aşırı akım veya sıcaklık durumunda BYS'nin koruma mekanizmalarını devreye sokup sokmadığı

değerlendirilmiştir. Ayrıca, aşırı şarj ve aşırı deşarj koşulları simüle edilerek, BYS'nin bu koşullara nasıl tepki verdiği gözlemlenmiş ve sistemin aşırı akım, aşırı voltaj ve aşırı sıcaklık durumlarında şarj ve deşarj akımlarını keserek güvenliği sağladığı doğrulanmıştır.

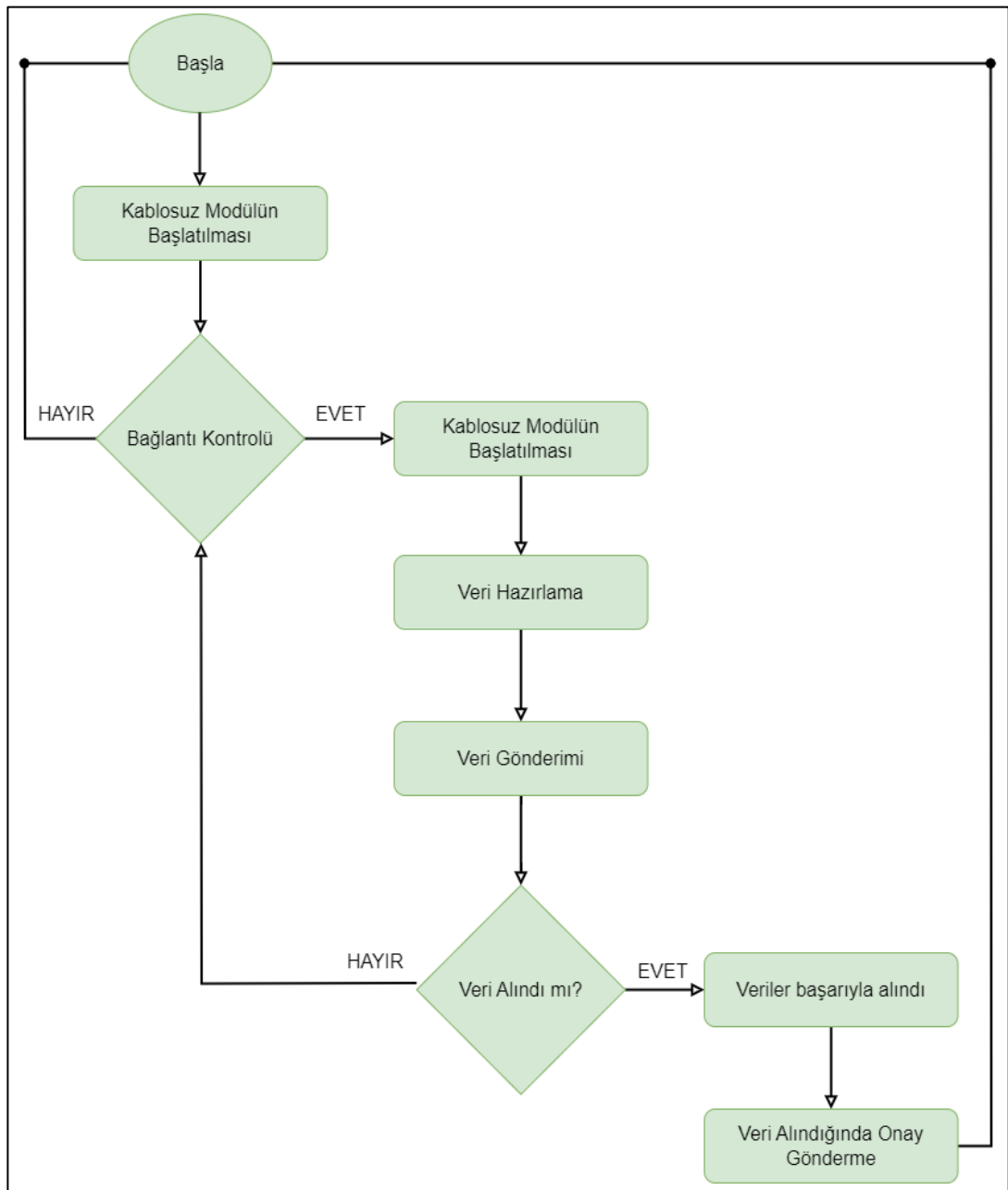


Şekil 6.12: Sistemin şarj ve deşarj testi seri monitör görüntüsü.

Şekil 6.12’de, yapılan testin çıktısı paylaşılmıştır. Bu test sonucunda, BYS’nin şarj ve deşarj süreçlerinde güvenli ve verimli bir şekilde çalışıp çalışmadığı net bir şekilde belirlenmiştir. Sistemin tüm koruma fonksiyonlarının başarılı bir şekilde çalışması, bataryanın ömrünü uzatmış ve güvenli bir kullanım sağlamıştır.

6.3.6. Çocuk Karttan Ana Karta Kablosuz Haberleşme Testi

Şekil 6.13'te, alt birim (çocuk) karttan ana karta yapılan kablosuz haberleşmeyi gösteren akış şeması yer almaktadır. Bu test, BYS'de kullanılan alt birim kartın ana kart ile kablosuz olarak haberleşme yeteneğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem, hücre voltajları, sıcaklık değerleri ve diğer kritik parametreleri ana karta iletme için kablosuz bir iletişim protokolü kullanmıştır. Testin amacı, bu veri aktarım sürecinin kesintisiz ve güvenilir bir şekilde gerçekleştiğinden emin olmaktır.

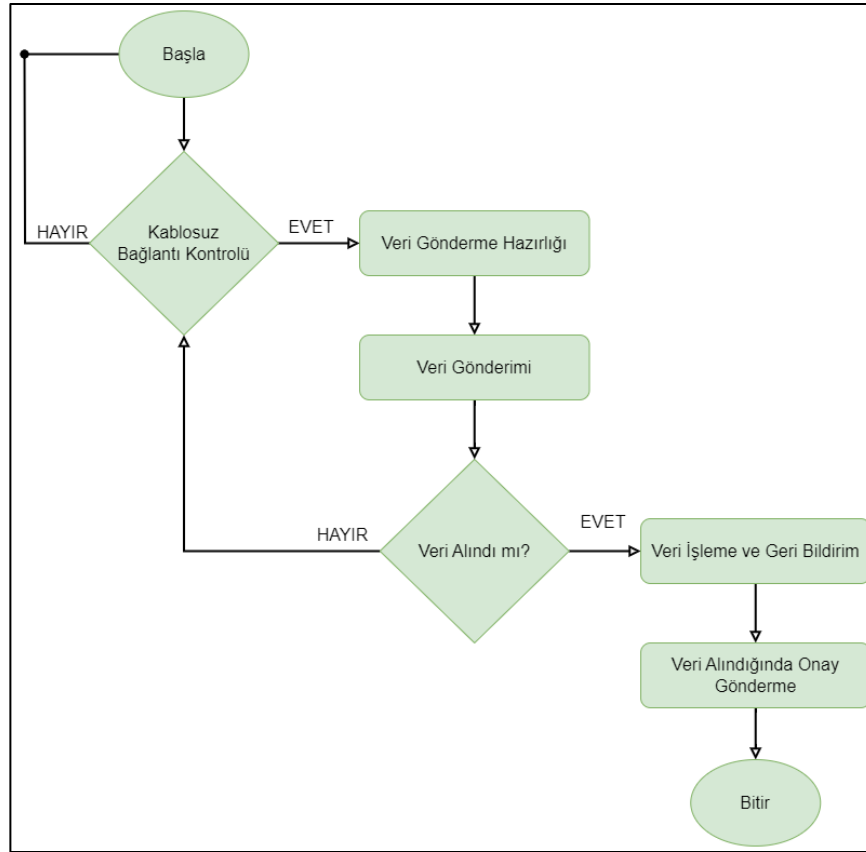


Şekil 6.13: Çocuk karttan ana kartta haberleşme akış şeması.

oluşursa, sistem veri gönderimini yeniden denemiş ve hataları minimuma indirmek için yeniden gönderim mekanizmasını devreye almıştır. Testin başarıyla tamamlanmasıyla, alt birim kart ile ana kart arasında kesintisiz bir veri iletiminin sağlandığı, bağlantı stabilitesinin, veri bütünlüğünün ve sistem genel performansının güvenilir olduğu doğrulanmıştır.

6.3.7. Ana Karttan Çocuk Karta Kablosuz Haberleşme Testi

Bu test, BYS'deki ana kartın alt birim (çocuk) kart ile kablosuz haberleşme yeteneğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem, ana kart üzerinden alt birim karta kontrol komutlarının, veri aktarım talimatlarının ve ayar bilgilerinin doğru ve kesintisiz bir şekilde iletilip iletilmediğini kontrol etmiştir.

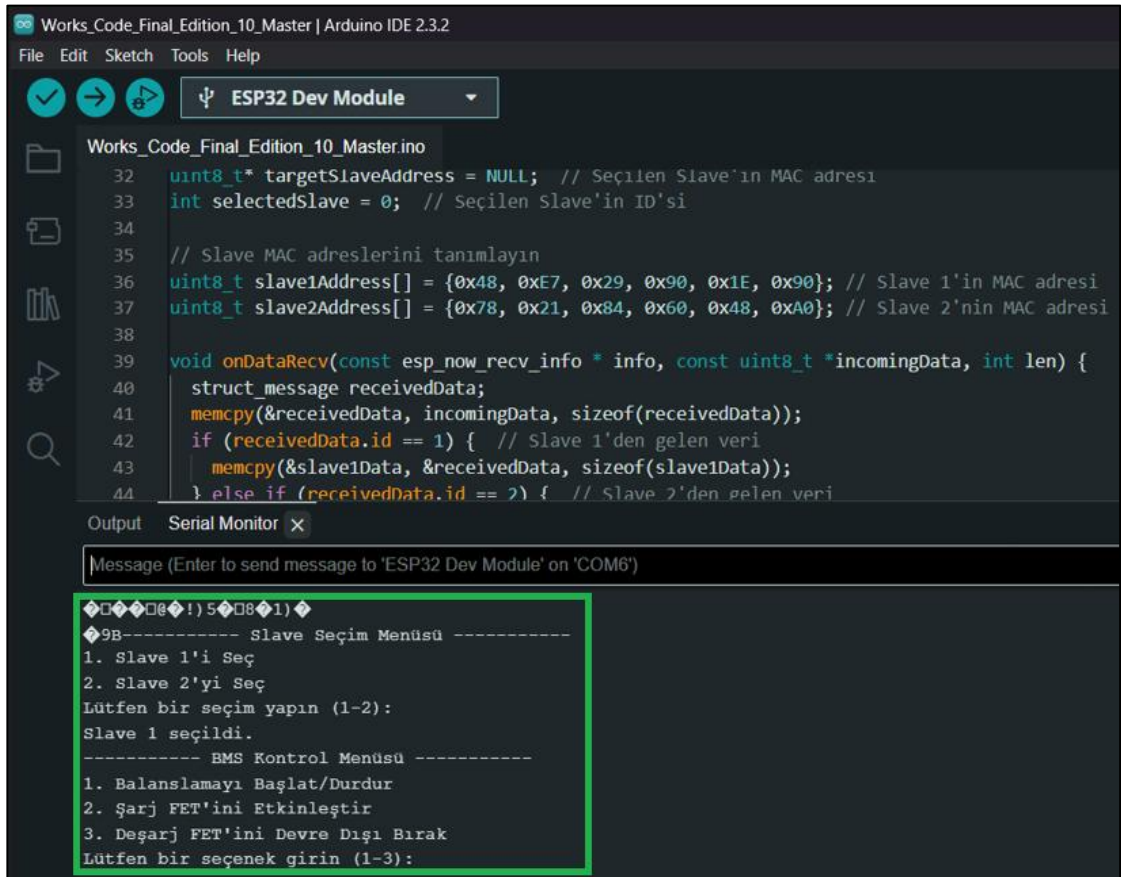


Şekil 6.15: Ana karttan çocuk kartta haberleşme akış şeması.

Şekil 6.15'te, ana karttan alt birim (çocuk) karta gerçekleştirilen kablosuz haberleşmenin kontrolünü gösteren akış şeması sunulmuştur. Bu süreçte, sistemin kablosuz haberleşme yetenekleri değerlendirilmiştir. Testin ilk aşamasında, ana kart ile alt birim kart arasında kablosuz bağlantının kurulup kurulmadığı kontrol edilmiştir.

Bağlantı başarılıysa, ana kart batarya izleme ve kontrol fonksiyonlarını içeren kritik verileri alt birim karta göndermeye başlamıştır.

Veri gönderimi sırasında, ana karttan gönderilen verinin doğru şekilde alınıp alınmadığı alt birim kart tarafından doğrulanmış; başarıyla alınan veri işlenerek ana karta bir onay mesajı gönderilmiştir. Bu onay mesajı, veri iletiminin sorunsuz tamamlandığını doğrulamıştır. Veri iletiminde bir sorun yaşanması durumunda (bağlantı kaybı veya veri bozulması gibi), sistem otomatik olarak yeniden veri gönderim sürecini başlatmış ve kablosuz bağlantının stabilitesini ile veri bütünlüğünü sağlamak için yeniden gönderim mekanizmasını devreye almıştır.



```
Works_Code_Final_Edition_10_Master.ino
32 uint8_t* targetSlaveAddress = NULL; // Seçilen Slave'in MAC adresi
33 int selectedSlave = 0; // Seçilen Slave'in ID'si
34
35 // Slave MAC adreslerini tanımlayın
36 uint8_t slave1Address[] = {0x48, 0xE7, 0x29, 0x90, 0x1E, 0x90}; // Slave 1'in MAC adresi
37 uint8_t slave2Address[] = {0x78, 0x21, 0x84, 0x60, 0x48, 0xA0}; // Slave 2'nin MAC adresi
38
39 void onDataRecv(const esp_now_recv_info * info, const uint8_t *incomingData, int len) {
40     struct_message receivedData;
41     memcpy(&receivedData, incomingData, sizeof(receivedData));
42     if (receivedData.id == 1) { // Slave 1'den gelen veri
43         memcpy(&slave1Data, &receivedData, sizeof(slave1Data));
44     } else if (receivedData.id == 2) { // Slave 2'den gelen veri
```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM6')

```

9B----- Slave Seçim Menüsü -----
1. Slave 1'i Seç
2. Slave 2'yi Seç
Lütfen bir seçim yapın (1-2):
Slave 1 seçildi.
----- BMS Kontrol Menüsü -----
1. Balanslamayı Başlat/Durdur
2. Şarj FET'ini Etkinleştir
3. Deşarj FET'ini Devre Dışı Bırak
Lütfen bir seçenek girin (1-3):
```

Şekil 6.16: Ana karttan çocuk kartta haberleşme seri monitör görüntüsü.

Şekil 6.16'da gösterilen testte, sistemin kablosuz haberleşme yetenekleri değerlendirilmiştir. Testin başarıyla tamamlanması, ana karttan alt birim (çocuk) karta veri iletiminin kesintisiz ve veri kaybı olmadan gerçekleştiğini, ayrıca sistemin güvenli bir şekilde çalıştığını doğrulamaktadır. Bu test, BYS'nin genel performansı açısından önemli bir kontrol aşaması olarak değerlendirilmiştir.

7. TEST SONUÇLARI VE YORUMLAR

Bu çalışmada geliştirilen kablosuz batarya yönetim sisteminin donanım ve yazılım bileşenleri kapsamlı testlere tabi tutulmuş; sistemin verimli çalıştığı, tasarlanan işlevleri başarıyla yerine getirdiği ve bileşenlerin uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir.

7.1. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kablosuz batarya yönetim sistemi, hücre voltajları, sıcaklık ölçümü, şarj-deşarj işlemleri, hücre dengesi ve kablosuz iletişim işlevleri açısından test edilmiştir. Test sonuçları, sistemin tasarım gereksinimlerini karşıladığını, doğruluğu ve güvenli işlevselliği sağladığını göstermiştir.

7.2. Sistem Performansı ve Güvenirlilik

Sistem, uzun süreli performans ve güvenilirlik testlerinde stabil çalışmıştır. ESP32 modülü ile şifreli Wi-Fi bağlantısı sağlanarak veri iletim güvenliği artırılmıştır. Ancak, BQ76930 entegresi CRC (Cyclic Redundancy Check- Çevrimsel Artıklık Kontrolü) desteklemediğinden bu güvenlik katmanı kullanılamamıştır. Çift katmanlı güvenlik, sistem verilerinin güvenli işlenmesi ve iletilmesine katkı sağlamaktadır.

7.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Projede elde edilen bulgular ışığında, sistem optimizasyonuna yönelik ek çalışmalar yapılabilir. İlerleyen süreçlerde, batarya yönetim algoritmalarının daha da geliştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve kablosuz haberleşme protokollerinin güvenliğinin daha da güçlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, sistem donanımının minyatürleştirilmesi ve tüketim gücünün daha da düşürülmesi, taşınabilir cihazlar için uygulanabilirliğini artırabilir. Bu bağlamda, CRC mesaj kontrolünü destekleyen bir işlemci seçilerek, sistem yazılımının bu özelliği aktif edilmesi, veri bütünlüğünü ve güvenliği artıracaktır. Bu tür bir güncelleme, sistemin genel güvenilirliğini önemli ölçüde artırabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2024), https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_management_system, (Erişim Tarihi: 14/08/2024)
- [2] Web 2, (2024), <https://www.sensata.com/products/battery-management-systems>, (Erişim Tarihi: 14/08/2024)
- [3] Web 3, (2024), <https://www.infineon.com/cms/en/applications/solutions/battery-management-system/> (Erişim Tarihi: 14/08/2024)
- [4] C.Lovern, <https://www.renesas.com/us/en/products/power-power-management/battery-management-system-tutorial>, Erişim Tarihi: 14.08.2024.
- [5] S. Pruffling <https://eepower.com/technical-articles/wireless-battery-management-systems/>. Erişim Tarihi: 14.08.2024
- [6] John A. ve Alex K. Lee, (2021), “Review on Battery Management System for Electric Vehicle Application”, Proceedings of the First International Conference on Combinatorial and Optimization (ICCAP 2021), 7-8 December, Chennai, India, EAI
- [7] Web 4, (2024) <https://www.analog.com/en/solutions/automotive/electrification-and-powertrain/battery-management-systems-bms.html>, (Erişim Tarihi: 14/08/2024)
- [8] J. Liu, <https://www.mokoenergy.com/wireless-bms-vs-wired-bms>. Erişim Tarihi: 14.08.2024
- [9] J. Muelaner, <https://www.evengineeringonline.com/how-does-a-wireless-bms-work/>. Erişim Tarihi: 14.08.2024
- [10] J. Liu, <https://www.mokoenergy.com/types-of-bms-topologies>. Erişim Tarihi: 14.08.2024
- [11] Web 5, (2024), <https://store.intrepidcs.com/product/rad-wbms-e>, (Erişim Tarihi: 14/08/2024)
- [12] A. Xhafa, (2024), <https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZT205>, (Erişim Tarihi: 14/08/2024)
- [13] G. Zimmer, (2024), https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/s65-wireless_bms_en.pdf, (Erişim Tarihi: 14/08/2024)
- [14] T. Tsuda, (2024), <https://www.renesas.com/en/blogs/battery-management-system-trends-issues-and-solutions>, (Erişim Tarihi: 14/08/2024).
- [15] M. Smoger, (2024), <https://intrepidcs.com/products/vehicle-network-adapters/rad-wbms-monitor-wireless-battery-management-system/>, (Erişim Tarihi: 14/08/2024)

- [16] Z. Cao, W. Gao, Y. Fu, C. Mi, (2024), "Wireless Battery Management Systems: Innovations, Challenges, and Future Perspectives," *Energies* (Basel), 17 (13), 3277
- [17] A. Samanta, S. S. Williamson, (2021), "A Survey of Wireless Battery Management System: Topology, Emerging Trends, and Challenges," *Electronics* (Basel), 10 (18), 2193.
- [18] M. U. Ali, A. Zafar, S. H. Nengroo, S. Hussain, M. Junaid Alvi, H.-J. Kim, (2019), "Towards a Smarter Battery Management System for Electric Vehicle Applications: A Critical Review of Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation," *Energies* (Basel), 12 (3), 446.
- [19] M. Waseem, M. Ahmad, A. Parveen, M. Suhaib, (2023), "Battery technologies and functionality of battery management system for EVs: Current status, key challenges, and future prospectives," *Journal of Power Sources*, 580, 233349.
- [20] J. Farmer vd., <https://www.osti.gov/servlets/purl/1132034>, Erişim Tarihi: 14/08/2024
- [21] A. Jamaluddin, F. A. Perdana, A. Supriyanto, A. Purwanto, Inayati, M. Nizam, (2014), "Development of Wireless Battery Monitoring for Electric Vehicle," 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), Kuta, Bali: IEEE, November 2014, ss. 147-151.
- [22] Battery LAB, (2024), <https://inside.lgensol.com/en/2022/07/lithium-ion-batterys-structure-and-how-it-works/>, (Erişim Tarihi: 14/08/2024)
- [23] Henry By, <https://www.ufinebattery.com/blog/lithium-ion-battery-structure-components-functionality-and-innovations/>, (Erişim Tarihi: 14/08/2024).
- [24] Web 6, (2024), https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium-ion_battery&oldid=1252441620, (Erişim Tarihi: 14/08/2024).
- [25] Web 7 (2024), <https://www.istockphoto.com/tr/vekt%C3%B6r/li-iyon-batarya>, (Erişim Tarihi: 14/08/2024).
- [26] G. Bhutada, C. Kostandi, C. Wadsworth, (2024), <https://elements.visualcapitalist.com/the-six-major-types-of-lithium-ion-batteries/>, Erişim Tarihi: (20/08/2024).
- [27] D. Murden, (2024), <https://ecotreelithium.co.uk/news/lithium-batteries-types/>, (Erişim Tarihi: 20/08/2024).
- [28] Web 8, (2024), <https://www.onecharge.biz/lithium-cell-format/>, (Erişim Tarihi: 20/08/2024).
- [29] R. Luo, (2024), <https://www.linkedin.com/pulse/performance-evaluation-parameters-lithium-ion-batteries-ricky-luo-7h9fc/>, (Erişim Tarihi: 20/08/2024).
- [30] B. Feng, (2024), <https://www.linkedin.com/pulse/what-main-characteristics-lithium-ion-batteries-bruce-feng/>, (Erişim Tarihi: 20/08/2024).

- [31] Y. Miao, P. Hynan, A. von Jouanne, A. Yokochi, (2019), “Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements,” *Energies* (Basel), 12 (6), 1074.
- [32] Web 9, (2024), <https://www.farasis-energy.com/en/>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [33] A. Etengoff, (2024), <https://www.evengineeringonline.com/what-ev-battery-management-system-bms-architectures-are-used-today/>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [34] Web 10, (2024), <https://www.togg.com.tr/>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [35] Web 11, (2024), <https://www.istockphoto.com/tr/portfolio/VectorHotShot?mediatype=illustration>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [36] Web 12, (2024), https://www.istockphoto.com/tr/portfolio/Vanit_Janthra?mediatype=photography, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [37] Web 13, (2024), <https://www.sphericalinsights.com/blogs/top-global-battery-management-system-industry-trends-and-competitive-analysis-in-2024>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [38] J. Liu, (2024), <https://www.mokoenergy.com/bms-voltage/>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [39] Web 14, (2024), <https://www.orionbms.com/troubleshooting/pack-voltage-reading-voltage-measured-voltmeter/>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [40] B. Rousseau, (2024), <https://www.powerelectronicsnews.com/test-challenges-and-trends-for-battery-management-systems/>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [41] Web 15, (2024), https://www.orionbms.com/manuals/pdf/diagnosing_incorrect_cell_voltage_reading.pdf, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [42] W.-Y. Chang, (2013), “The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review,” *ISRN Applied Mathematics*, 2013, ss. 1-7.
- [43] M. Murnane, A. Ghazel, (2024), <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/a-closer-look-at-state-of-charge-and-state-health-estimation-tech.html>, (Erişim Tarihi: 10/09/2024).
- [44] J. Liu, (2024), <https://www.mokoenergy.com/battery-balancing-methods/>, (Erişim Tarihi: 29/09/2024).
- [45] T. Kira, N. (Reno) Rossetti, (2024), <https://www.electronicproducts.com/streamline-your-ev-junction-box-design/>, (Erişim Tarihi: 29/09/2024).

- [46] Web 16, (2024), <https://roboticvehicletechnology.com/news/wireless-battery-management-system-for-evs/>, (Erişim Tarihi: 29/09/2024).
- [47] Web 17, (2024), <https://www.ti.com/product/BQ76930>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [48] Web 18, (2024), <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [49] Web 19, (2024), <https://www.diodes.com/part/view/AP63356Q#tab-press>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [50] Web 20, (2024), <https://ozdisan.com/devre-koruyucular/termistorler/ntc-termistorler/MF52A1-103F3950>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).
- [51] Web 21, (2024), <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/automotive-mosfet/ipd50n10s3l-16/>, (Erişim Tarihi: 30/08/2024).
- [52] Web 22, (2024), https://www.renesas.com/en/products/power-discretes/power-mosfets/upa1918te-power-mosfets-automotive#design_development, (Erişim Tarihi: 30/08/2024).
- [53] Web 23, (2024), <https://www.onsemi.com/products/power-management/linear-regulators-ldo/NCV317#overview>, (Erişim Tarihi: 30/08/2024).
- [54] Web 24, (2024), <https://www.ti.com/product/LM317#description>, (Erişim Tarihi: 31/08/2024).

ÖZGEÇMİŞ

Bahadır KÜÇÜKCIPRACI, lisans eğitimini 2017 yılında Okan Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamladı. Mesleki kariyerine 2018 yılında Mutlu Akü'de lityum iyon batarya yönetim sistemleri üzerine çalışarak başladı. Ardından, Farba Otomotiv'de elektronik donanım tasarım mühendisi olarak görev alarak, birçok otomotiv firmasının araçlarında kullanılan dış aydınlatma ürünlerinin elektronik kart tasarımlarını gerçekleştirdi. Şu anda, Türkiye'nin Otomobil Girişim Grubu (Togg) ve Farasis Enerji ortaklığında kurulan Siro Enerji'de batarya yönetim sistemi mühendisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir.

TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Küçükçıpracı, B., (2022), “ARM Tabanlı Mikrodenetleyiciler ile Lityum Temelli Piller İçin Kablosuz Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı”, Gebze Teknik Üniversitesi 6. Lisansüstü Araştırmaları Sempozyumu, 1-2 Haziran 2022

B. Küçükçıpracı, M. Ceylan and A. Balıkcı, "Design of a Wireless Battery Management System for Lithium-Ion Batteries Based on a Wi-Fi and BLE Module," 2024 15th National Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Türkiye, 2024, pp. 1-5,