

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GERÇEK ZAMANLI BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ
TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAKAN ÇAMUR

DENİZLİ, OCAK - 2025

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**GERÇEK ZAMANLI BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAKAN ÇAMUR

DENİZLİ, OCAK - 2025

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

HAKAN ÇAMUR

ÖZET

GERÇEK ZAMANLI BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HAKAN ÇAMUR
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ZAFER ORTATEPE)

DENİZLİ, OCAK - 2025

Son yıllarda elektrikli araçların artışıyla birlikte önemi daha da artan batarya yönetim sistemleri üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Elektronik sistemlerin enerji ihtiyacını şehir şebekelerinden bağımsız olarak sağlayabilmesi için kullanılan şarj edilebilir bataryalar; günümüzde mobil araçlar, elektronik cihazlar ve harici güç kaynakları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Batarya ömrünün korunması, hücre sağlığı ve batarya güvenliğinin sağlanması için şarj ve deşarj esnasında batarya hücrelerinin takip edilmesi gerekmektedir. Bunun için geliştirilen batarya yönetim sistemi bataryaların izlenmesi, yönetilmesi ve güvenli bir şekilde çalışması için gerekli tüm bileşenlerin, yazılım ve donanım düzeyinde entegrasyonunu içerir. Bu tür bir sistemin tasarımı, bataryaların enerji verimliliğini artırmaya, ömrünü uzatmaya ve güvenliğini sağlamaya yönelik kritik bir işlevi yerine getirir.

Batarya yönetim sistemi tasarımı için ise bataryanın doğru şarj ve deşarj yönetimi, sıcaklık izleme, aşırı şarj veya aşırı deşarjı önleme, batarya ömrünü artırma gibi hedefler netleştirilmelidir. Gerçek zamanlı olabilmesi için, bataryanın durumunun sürekli olarak izlenmesi gerektiği için, sistemin hızlı tepki vermesi ve düşük gecikmeli çalışması gereklidir. Bu bilgiler ışığında ihtiyaç duyulan donanım tasarımı bileşenleri ve yazılım tasarımı ile gerçek zamanlı batarya yönetim sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Li-ion batarya, batarya yönetim sistemi, hücre dengeleme yöntemi, batarya sağlık ve doluluk oranı, batarya koruma devresi.

ABSTRACT

**REAL-TIME BATTERY MANGEMENT SYSTEM DESIGN
MSC THESIS
HAKAN ÇAMUR
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
AUTOMOTIVE ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ZAFER ORTATEPE)**

DENİZLİ, JANUARY 2025

In recent years, with the increase in electric vehicles, studies on battery management systems have accelerated. Rechargeable batteries, which are used to independently supply energy to electronic systems without relying on the city grid, are now widely used in various fields such as mobile vehicles, electronic devices, and external power sources.

To maintain battery life, ensure cell health, and guarantee battery safety, it is essential to monitor the battery cells during charging and discharging. The developed battery management system includes all the necessary components, software, and hardware integration for monitoring, managing, and ensuring the safe operation of the batteries. The design of such a system plays a critical role in enhancing energy efficiency, extending battery life, and ensuring safety.

For the battery management system design, objectives such as correct charging and discharging management, temperature monitoring, preventing overcharging or deep discharge, and extending battery life must be clearly defined. To be real-time, the battery's status must be continuously monitored, and the system should respond quickly and operate with low latency. Based on this information, the hardware design components and software design were carried out to create a real-time battery management system.

KEYWORDS: Li-ion battery, battery management system, cell balance method, battery health and charge rate, battery protection circuit.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Elektrikli Araçlar Teknolojisi Tarihi	4
1.2 Elektrikli Araç Türleri	6
1.2.1 Tam Elektrikli Araçlar (BEV – Battery Electric Vehicle).....	7
1.2.2 Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV - Hybrid Electric Vehicle)	8
1.2.3 Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	8
1.2.4 Elektrikli ve İçten Yanmalı Motor Kombinasyonu (Mild Hibrid)	9
1.2.5 Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle)	10
1.3 Lityum Bataryalar.....	10
1.3.1 Lityum Batarya Çeşitleri.....	11
1.3.2 Lityum Bataryalarda Enerji Kapasitesi	13
1.3.3 Açık Devre Gerilimi (OCV – Open Circuit Voltage).....	14
1.3.4 Lityum Bataryalarda Şarj ve Deşarj.....	15
1.3.4.1 Şarj Süreci	15
1.3.4.2 Deşarj Süreci	17
1.3.5 Lityum Bataryalarda Güvenli Çalışma Bölgesi	18
1.4 Batarya Yönetim Sisteminde Önemli Parametreler	20
1.4.1 Pil Doluluk Oranı (SoC - State of Charge).....	21
1.4.2 Batarya Sağlık Durumu (SoH - State of Health)	22
1.5 Hücre Dengeleme Yöntemi	22
1.5.1 Pasif Dengeleme Yöntemi	24
1.5.2 Aktif Dengeleme Yöntemi	26
1.6 Batarya Koruma Üniteleri (BPU - Battery Protection Units).....	26
1.6.1 Bataryaya Koruma Devresi (BPC - Battery Protection Units)	27
1.6.2 Batarya Koruma Devresi Örnekleri ve Şemaları	28
1.6.2.1 Tek Hücreli Li-Ion Pil Koruma Devresi	28
1.6.2.2 Çok Hücreli Li-Ion Pil Koruma Devresi	29
1.6.2.3 Devre Tasarım Bileşenleri.....	30
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	31
2.1 Başlıca Yapılan Çalışmalar	31
3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI.....	34
3.1 Hücre Dengeleme Yöntemi	34
3.2 Şarj Durumu Kestirimi Yöntemleri	36
3.2.1 Açık Devre Gerilimi	36
3.2.2 Yük Sayma (Coulomb) Yöntemi	37

3.2.3	Kalman Filtresi	37
3.3	Güvenlik ve Koruma Yöntemleri	39
3.3.1	Yüksek ve Düşük Gerilim Koruması.....	39
3.3.2	Yüksek Akım Koruması	40
3.3.3	Yüksek Sıcaklık Koruması	40
3.3.4	Gerilimi Dengeleme İşlemi.....	41
4.	MATERYAL VE METOD	43
4.1	Bataryada Kullanılan Li-Ion Pil	43
4.2	Kullanılan Mikrodenetleyici.....	44
4.3	LMV324M Op-Amp Entegresi	47
4.4	LTV-217 Optokuplör	50
4.5	Giriş Akımı Algılama Sensörü	51
4.5.1	ACS712 Akım Sensörünün Özellikleri.....	51
4.5.2	ACS712 Akım Sensörünün Devreye Bağlanması	52
4.6	Giriş Gerilimi Algılama Sensörü.....	53
4.6.1	ACPL-C87B Gerilim Sensörünün Özellikleri	53
4.7	Sıcaklık Sensörü	54
4.8	BYS Baskı Devre Şeması, Katmanları ve 3D Görüntüsü	56
5.	BULGULAR	61
5.1	Batarya Şarj Deneyi.....	61
5.1.1	Şarj Akış Diyagramı	64
5.2	Batarya Deşarj Deneyi.....	64
5.2.1	Deşarj Akış Diyagramı	66
6.	TARTIŞMA VE SONUÇ	67
7.	KAYNAKLAR.....	68
8.	EKLER.....	74
	EK A.....	74
	EK B	75
	EK C	76
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: İki kişilik elektrikli araç	4
Şekil 1.2: Tam elektrikli aracın yapısı	7
Şekil 1.3: Hibrit elektrikli otomobilin yapısı	8
Şekil 1.4: Plug-in hibrit otomobilin yapısı	9
Şekil 1.5: Li-ion pil CC-CV şarj eğrisi	16
Şekil 1.6: Li-ion bataryanın akımı ve kapasite eğrisi	18
Şekil 1.7: Hücre gerilimi güvenli çalışma bölgesi	19
Şekil 1.8: Hücre akımı güvenli çalışma bölgesi	19
Şekil 1.9: Li-ion hücrelerde sıcaklığın çevrim sayısına etkisi	20
Şekil 1.10: Pasif ve aktif dengeleme yöntemleri	23
Şekil 1.11: Pasif dengeleme yönetimi	24
Şekil 1.12: Pasif dengelemede dengesiz hücfelerin dengelenmesi	25
Şekil 1.13: Pasif dengeleme hücfre gerilimleri zaman grafiği	25
Şekil 1.14: Aktif dengeleme yöntemleri a)Anahtarlama sığaç, b)Tek sargılı transformatör, c)Düşürücü-yükseltici dönüştürücü	26
Şekil 1.15: Pil koruma IC'si	28
Şekil 1.16: Pil koruma devreli şarj modülü devresi	29
Şekil 3.1: Direnç ile pasif dengeleme	35
Şekil 3.2: Direnç ile pasif dengeleme yöntemi algoritması.	35
Şekil 3.3: Pillerin farklı C oranlarında ve sıcaklıklarda çevrim ömürleri	40
Şekil 3.4: Batarya hücresi eş değer devresi	41
Şekil 3.5: Pasif gerilim dengeleme metodu	42
Şekil 4.1: Orion 18650 3.7V 2600mAh şarj edilebilir li-ion pil	43
Şekil 4.2: Batarya paketi	44
Şekil 4.3: STM32F407VGT6 LQFP100 paketi	45
Şekil 4.4: Batarya yönetim sistemi kartı	46
Şekil 4.5: STM32F40x LQFP100 pin çıkışları	47
Şekil 4.6: Op-Amp ve pin çıkışları	47
Şekil 4.7: Fark alma devresi	48
Şekil 4.8: Gerilim bölücü devresi	49
Şekil 4.9: Optokuplör ve pin yapısı	50
Şekil 4.10: Optokuplör ile transistör tetikleme	50
Şekil 4.11: Hall etkisi	51
Şekil 4.12: Akım sensörü ve pin yapısı	52
Şekil 4.13: Akım sensörü devre şeması	52
Şekil 4.14: Gerilim sensörü ve pin yapısı	53
Şekil 4.15: Gerilim sensörü devre şeması	54
Şekil 4.16: LM35 DZ sıcaklık sensörü	55
Şekil 4.17: Sıcaklık ölçüm devre şeması	55
Şekil 4.18: Batarya yönetim sistemi baskı devre şeması	57
Şekil 4.19: Batarya yönetim sistemi kartı ara katmanları	58
Şekil 4.20: Batarya yönetim sistemi kartı üstten ve alttan 3d görüntüsü.	59
Şekil 5.1: Maksimum ve minimum pil gerilimleri zaman grafiği	61
Şekil 5.2: Maksimum ve minimum pil gerilimleri farkı zaman grafiği	62
Şekil 5.3: Batarya paketi sıcaklığı zaman grafiği	63

Şekil 5.4: Toplam batarya gerilimi zaman grafiği	63
Şekil 5.5: Batarya şarj akış diyagramı.....	64
Şekil 5.6: Toplam batarya gerilimi zaman grafiği	65
Şekil 5.7: Batarya paketi sıcaklığı zaman grafiği.....	65
Şekil 5.8: Batarya deşarj akış diyagramı.....	66
Şekil A.1: STM32F407 Mikrodenetleyici pin diyagramı	73
Şekil B.1: STM32F407 Mikrodenetleyici clock konfigürasyonu	74

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Li-ion batarya çeşitleri ve özellikleri.....	11
Tablo 1.2: Batarya tipleri ve nominal hücre gerilimleri.....	14
Tablo 3.1: Pasif ve aktif dengeleme yöntemi.....	34
Tablo 4.1: Batarya hücresi ve batarya paketinin teknik özellikleri.....	44

SEMBOL LİSTESİ

BYS	:	Batarya yönetim sistemi
SoC	:	Hücre doluluk oranı
SoH	:	Hücre sağlık durumu
Ni-MH	:	Nikel metal hibrit
Li-ion	:	Lityum iyon
LiPO4	:	Lityum polimer
BEV	:	Tam elektrikli araçlar
HEV	:	Hibrit elektrikli araç
PHEV	:	Şarj edilebilir hibrit elektrikli araç
FCEV	:	Yakıt hücreli elektrikli araç
Wh/lt	:	Hacim başına enerji yoğunluğu
LCO	:	Lityum kobalt
LFP	:	Lityum demir fosfat
LiPo	:	Lityum iyon polimer
SoT	:	Pil sıcaklık durumu
°C	:	Santigrat derece
V	:	Volt
t	:	Zaman
Ah	:	Amper-saat
mA	:	Mili amper
CC	:	Sabit akım
CV	:	Sabit voltaj
CO2	:	Karbondioksit
Wh/kg	:	Kütle başına düşen enerji yoğunluğu
OCV	:	Açık devre gerilimi
Q(t)	:	Anlık kapasite değeri
Q(n)	:	Nominal kapasite değeri
Voc	:	Açık devre gerilimi
MOSFET	:	Metal yarı iletken alan etkili transistör
FET	:	Alan etkili transistör
DSP	:	Digital signal processing
FPU	:	Floating point unit
Vout	:	Çıkış voltajı
mV	:	Mili volt
MCU	:	Mikrodenetleyici
ADC	:	Analog dijital çevirici
DAC	:	Dijital analog çevirici
Opamp	:	İşlemsel yükselteç
G	:	Kazanç katsayısı
BPU	:	Batarya koruma ünitesi
BPC	:	Batarya koruma devresi
IC	:	Entegre
C	:	Pil kapasitesi ölçüsü
AC	:	Alternatif akım
DC	:	Doğru akım

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve uygulamaya geçirilmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, fikirleri ile her konuda bana yol gösteren sayın danışman hocam Doç. Dr. Zafer ORTATEPE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu yola girmemde beni yönlendiren bana benden çok güvenen eşim Münevver ÇAMUR ve manevi yönden bana destek olan kızım Arya ÇAMUR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda her zaman bana destek olan Otomotiv Mühendisi Umut Can ERSOY'a çok teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

İçten yanmalı araçların egzozundan çıkan zararlı gazlar, çevreye verdikleri gürültü ve sıcaklık gibi birçok etken insanlığı, bulunduğumuz çevreyi ve dünyamızı olumsuz etkilemektedir. Elektrikli araçların varlığı gelecek nesillere daha çevreci ve sessiz bir gelecek sunacaktır. Günümüzde elektrikli otomobile direkt geçiş için gerekli alt yapı ve kullanıcıların kafasındaki soru işaretlerinin giderilmesi için öncelikle içten yanmalı motorlarla birlikte kullanılan elektrik motorlarından oluşan hibrit sistemler devreye girmiş; alt yapı çalışmalarının hızlanması ile hızlı şarj istasyonları, şarj cihazları, batarya üretim ve yönetim sistemlerindeki teknolojinin gelişimiyle bu soru işaretleri ortadan kaldırılmıştır (Bora Y. 2017).

Elektrikli araçların yaygın olarak kullanılmamasının sebeplerinden birisi batarya üretim maliyetleri ve batarya performansıdır. Bu yüzden batarya teknolojileri ve yönetim sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Elektrikli araçların şarj olma süreleri, gidebilecekleri maksimum mesafe ve bataryanın son kullanma tarihi kullanıcıların önem verdiği kriterlerdir. Bataryanın performansı elektrikli araçların performansını doğrudan etkileyen en önemli bileşendir. Batarya performansının zaman içerisinde kaybolması, ısınma, yanma, patlama gibi meydana gelebilecek olumsuzlukları batarya yönetim sistemleri (BYS) olarak adlandırılan kontrol sistemleri ile yönetilmektedir. Bataryaların güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak için kullanılan BYS'nin temel birimleri; mikrodenetleyici, sensörler, koruma devreleri, dengeleme devreleri ve iletişim modülüdür. Mikroişlemci, bataryanın şarj algoritmasını içerir ve şarj durumunu kontrol eder. Sensörler, batarya akımı, gerilimi ve sıcaklığı gibi parametreleri ölçer. Koruma devreleri, bataryayı yüksek sıcaklık, yüksek gerilim, yüksek akım, düşük akım ve kısa devre gibi durumlardan korur. İletişim modülü, BYS'nin diğer sistemlerle veri alışverişini sağlar.

Verimli ve güvenli bir BYS'nin en önemli alt parametrelerinden olan pil doluluk oranının (State of Charge – SoC) doğru yöntemlerle hesaplanması ile elektrikli araçların performansının artırılması günümüzde en önemli problemlerden biri olup akademik çalışmaların konusu olmuştur (A. Khaligh ve diğ. 2010).

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya türleri kurşun asit batarya, nikel-metal-hibrit (Ni-MH) batarya, lityum-iyon (Li-ion) batarya ve lityum-polimer (LiPO4) bataryalardır. Li-ion bataryaların üretim maliyetleri yüksek olmasına rağmen, enerji verimliliğinin yüksek olması ve yüksüz deşarj oranının düşük olması gibi avantajlarından dolayı literatürde yaygın olarak kullanılan bataryalardır (Daud ve diğ. 2020). Günümüzde kullanım alanı artan lityum bataryalar üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır. Pil hücrelerinde kullanılan farklı katot ve anot materyalleri kullanılarak kullanım ömürleri, enerji yoğunluğu, kapasite ve güç gibi parametreler üzerinde iyileştirilmeler yapılmaktadır.

Elektrikli araçların enerji depolama aygıtları olan bataryalar pillerin seri ve paralel bağlanmasıyla oluşan bir yapıdadır. Her pil hücresi şarj için kaynağa bağlandığında kimyasal reaksiyona maruz kalır ve bu tekrar ettikçe pilin doğal yapısı bozulur. Batarya paketlerinin dolmuş veya kullanılmadıkları durumda yani yüksüz durumdayken boşalması sırasında oluşabilecek gerilim dengesizlikleri, batarya şarj tutma kapasitelerinin düşmesine, şarj çevrimlerinin ve ömürlerinin kısa olmasına neden olmaktadır (Asus Z. diğ. 2020). Bu olumsuzlukları BYS ile kontrol altına alarak hücreler arasındaki oluşabilecek dengesizliklerin önüne geçilebilir. Bunun yanı sıra BYS ile gerilim koruması ve takibi, akım koruma ve takibi, sıcaklık koruması ve takibi, hücre sağlık durumu kontrolü, hücre doluluk durumu kontrolü, gerilim dengeleme işlemi ve yüksek verimli ve uzun ömürlü hücre kullanımı gibi özelliklere de sahiptir.

Hücre iyileştirme ve gerilim dengeleyicileri üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Genel olarak dengeleyiciler aktif ve pasif hücre dengeleyicileri olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Aktif dengeleme sistemi var olan enerjiyi depolama elemanlarında depolayarak sisteme geri verirken, pasif dengeleme sisteminde var olan enerji dirençler üzerinden harcanarak tüketilir. Aktif dengeleme yönteminin donanım karmaşıklığı ve maliyet yüksekliği, daha basit kontrol edebilme ve düşük maliyet oranlarıyla pasif dengeleme yöntemlerinin tercih edilmesine neden olmaktadır (Shrivastava ve diğ. 2020).

Ayrıca, güvenli ve verimli çalışma için pil sıcaklığı önemli bir etkidir. Özellikle iç sıcaklık ölçümü oldukça karmaşık ve zordur. İç sıcaklık ölçümü zorluğu nedeniyle genellikle dış yüzey sıcaklığı ölçümü önem arz eden konular arasındadır.

Bunun yanı sıra pilin gerçek ömrü, pilin kimyasal özelliklerinden ve alt-üst sıcaklık sınırlarında geçirilen süreden de etkilenir. Bu sebeple, hücre gerilimi, hücre akımı ve pil sıcaklıklarının gözlemlenmesinin yanında hücre doluluk oranının (SoC) ve hücre sağlık durumunun (SoH) gözlemlenmesi gerektiği literatürde vurgulanmaktadır (Lipu ve diğ. 2018). Hücre sağlık durumu (SoH) gözlemlenmesi ne yönelik önerilen yöntemler literatürde ayrıntılı bir şekilde açıklanmış ve aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

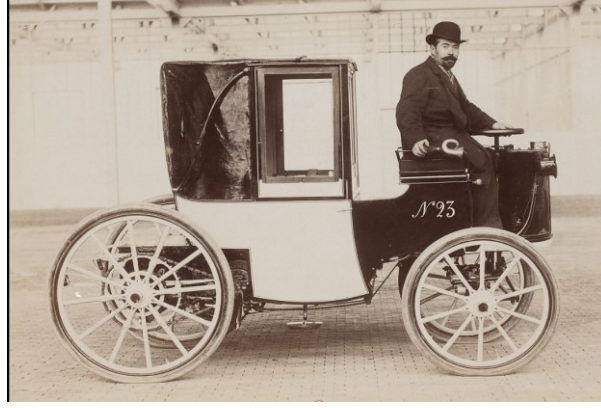
- **Doğrudan Ölçüm Yöntemleri:** Bu yöntemler, hücre veya bataryanın fiziksel özelliklerini doğrudan ölçerek SoH hakkında bilgi sağlar. Bunlar; kapasite değerlendirme, iç direnç ölçümü ve elektrokimyasal ölçümlerdir.
- **Model Tabanlı Yöntemler:** Hücre davranışlarını açıklamak için oluşturulan modellerden faydalanılır. Bunlar; eşdeğer devre modelleri, elektrokimyasal modeller ve yaşlanma modelleridir.
- **Veri Tabanlı Yöntemler:** Bu yöntemler, bataryadan toplanan verilerden faydalanarak makine öğrenimi ve yapay zekâ teknikleriyle SoH tahmini yapar. Bunlar; makine öğrenimi algoritması, derin öğrenme yöntemleri ve veri analitiğidir.
- **İndirekt Tahmin Yöntemleri:** Bataryanın doğrudan ölçülemeyen parametrelerinden yola çıkarak SoH tahmini yapılır. Bunlar; kalman filtresi, parçacık filtresi ve fiziksel sensör verileridir.
- **Hibrit Yöntemler:** Birden fazla yöntemin bir araya getirilmesiyle daha hassas ve doğru tahminler sağlanır. Bunlar; model tabanlı yöntemlerle veri tabanlı yöntemlerin birleştirilmesi ve doğrudan ölçüm sonuçlarının veri tabanlı analizlere entegre edilmesidir.

Hücre sağlık durumu gözlemlenmesi batarya verimliği ve güvenliği açısından önem arz etmesine rağmen SoH'nin sürekli gözlemlenmesi BYS açısından ağır bir hesaplama yükünün altına girmesine neden olmaktadır. Hesaplama işleminin artması ise yüksek kapasiteli işlemcilerin kullanılması ihtiyacını doğurmakta ve bu da BYS maliyetini arttırmaktadır (Stuart ve diğ. 2002).

1.1 Elektrikli Araçlar Teknolojisi Tarihi

Elektrikli araçlar üzerine yapılan araştırmaların petrol rezervlerinin tükenmesi ve sera gazı salınımı gibi sorunlardan dolayı günümüzde hız kazandığı düşünülse de ilk olarak 18.yy'da geliştirilmeye başlanmıştır (Ching Chuen Chan 2013).

İngiliz bilim adamı Michael Faraday (1791-1867) elektrikli araçların temellerini atan ilk kişi oldu. Michael Faraday'a göre bir manyetik kutup izole edilebiliyorsa, akım taşıyan bir kablonun etrafında sürekli bir daire halinde hareket etmeliydi. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bu cihaz, elektrik motorunun kendisiydi.



Şekil 1.1: İki kişilik elektrikli araç. Jeantaud Milord, 1898 (wikipedia.org 2024)

Elektrikli arabalar, ilk kez 19. yüzyılda ortaya çıkmış ve zamanla teknolojinin ilerlemesiyle birlikte gelişim göstermiştir. Elektrikli araçlar, özellikle son yıllarda çevre dostu olmaları ve fosil yakıtların azalması nedeniyle daha fazla ilgi görmeye başlamıştır.

Elektrikli araçların tarihi, elektrikli motorların keşfi ile başlamıştır. İlk elektrikli araçlar 1830'larda ortaya çıkmasına rağmen bugün kullanılmakta olan ticari araçlardan çok uzak ve deneysel araçlardı. Elektrikli araçlar ile ilgili erken dönemde yaşanan bazı önemli gelişmeler şunlardır:

- **1828:** Macar mühendis Ányos Jedlik, bir elektrikli motorun ilk örneğini yapmıştır. Ancak bu, tam anlamıyla bir elektrikli araç değil, sadece bir deneysel motordu.

- **1832-1839:** İskoçyalı mühendis Robert Anderson, elektrikle çalışan ilk aracı icat etti. Bu araç, ilk kez batarya kullanarak hareket etti, ancak hala pratikten uzak bir modeldi.
- **1879-1881:** İngiliz mühendis Thomas Parker, ilk işlevsel elektrikli aracı yaptı. Bu araç, şehir içi ulaşımda kullanılmak üzere tasarlanmıştı. Thomas Parker, ayrıca London Underground'un elektrikli demir yolu sisteminin altyapısını da inşa etti.
- **1890'lar:** Elektrikli araçlar, ABD ve Avrupa'da şehir içi ulaşımda daha yaygın hale geldi. Bu dönemde, elektrikli araçlar özellikle zengin sınıfın tercihi oldu. Elektrikli arabaların, içten yanmalı motorlu araçlardan daha güvenilir olduğu düşünülüyordu.
- **1900:** Detroit Electric Car Company ve Columbia Automobile Company, elektrikli araç üretimi yapan önemli şirketlerden bazılarıydı. Elektrikli araçlar, özellikle şehirli insanlar tarafından tercih edilmekteydi, çünkü yakıt ikmali gereksiz ve araçlar daha sessizdi.
- **1912:** Elektrikli araçların popülerliği zirveye ulaşmıştı. Ancak içten yanmalı motorların gelişimi ve benzin istasyonlarının yaygınlaşması ile elektrikli araçların kullanımı azalmaya başladı.
- **1920'ler - 1950'ler:** Elektrikli araçlar, içten yanmalı araçların gerisinde kaldı ve çoğunlukla lüks birer "niş" araç olarak kaldılar. Elektriksel altyapının gelişmemesi ve batarya teknolojisinin yetersizliği bu gerilemeyi tetikledi.
- **1960'lar - 1980'ler:** Elektrikli araçlarla ilgili araştırmalar sınırlıydı. Ancak çevre kirliliği ve enerji krizleri, elektrikli araçlara olan ilgiyi yeniden artırmaya başladı. Elektrikli araçlar, çoğunlukla deneysel projeler olarak üretildi.
- **1990'lar:** Kaliforniya Eyaleti, "Zero Emission Vehicle" (Sıfır Emisyonlu Araç) programını başlatarak, otomobil üreticilerinin çevre dostu araçlar üretmesini teşvik etti. Bu dönemde, General Motors'un *EVI* adlı elektrikli aracı piyasaya sürdü, ancak bu araç daha sonra üretimden kaldırıldı.
- **2000'ler:** Elektrikli araç teknolojisi, özellikle batarya teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde yeniden yükselmeye başladı.

Toyota Prius gibi hibrit araçlar piyasada yer almaya başladı. Elektrikli araçlar daha uzun menzillere ulaşabilir ve daha uygun fiyatlarla sunulur hale geldi.

- **2010:** Tesla Model S, uzun menzil ve yüksek performansı ile elektrikli araç pazarını devrim niteliğinde dönüştürdü. Tesla, elektrikli araçların sadece çevre dostu değil, aynı zamanda prestijli ve yüksek performanslı olabileceğini kanıtladı.
- **2020 ve Sonrası:** Birçok otomobil üreticisi, tamamen elektrikli araçlarını piyasaya sürmeye başladı. Audi, BMW, Volkswagen, Ford, Mercedes-Benz gibi büyük markalar, tamamen elektrikli modeller üretmeye başladı. Çevre dostu politikalara olan ilgi arttıkça, hükümetler de elektrikli araçlar için teşvikler ve altyapı yatırımları yapmaya başladı.

Bugün, elektrikli araçlar yalnızca çevre dostu olmakla kalmayıp aynı zamanda geleceğin ulaşım teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşması, batarya teknolojileri, şarj altyapısı ve sürdürülebilir enerji üretimi gibi alanlarda devam eden yeniliklerle hızlanmaya devam etmektedir.

1.2 Elektrikli Araç Türleri

Sadece elektrikli motoru kullanan araç türlerine elektrikli araç denir. Bataryadan alınan elektrik enerjisi elektrik motorunu tahrik eder. Elektrik motoru dönme hareketini kontrol ünitesinden gelen akımın büyüklüğüne göre diferansiyel kutusuna iletir. Bu sayede tekerlerin dönüş hareketi sağlanmış olur. Elektrikli motorlar içten yanmalı motorlar ile birlikte kullanılırsa buna hibrit araç denir. Bahsedilen iki araç türünde de batarya paketleri kullanılmaktadır. Bu araçlarda, motor hareketini bataryalardaki elektrik enerjisiyle sağlamaktadır (Muratoğlu ve diğ. 2016).

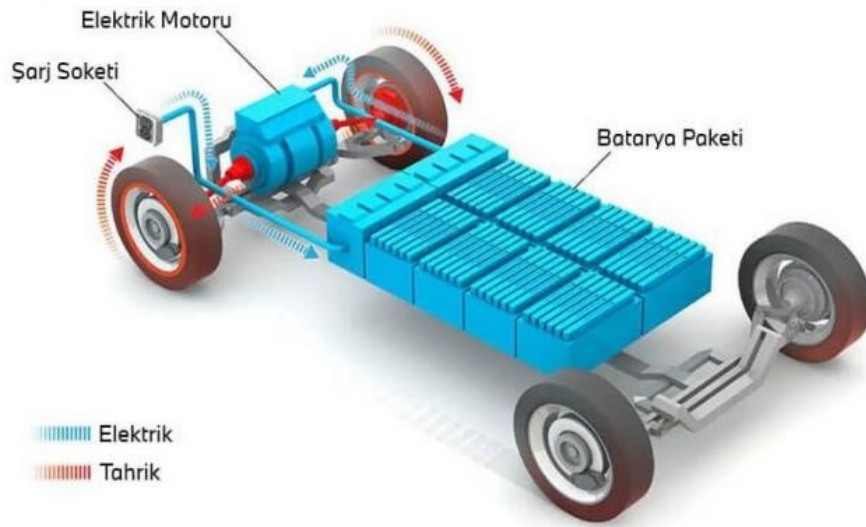
Batarya maliyetlerinin pahalılığından ve menzil düşüklüğü gibi geri plana atılan elektrikli araçlar, fosil yakıtların azalması, petrolün bir küresel krize dönüşüyor olması, küresel ısınma ve petrolün çevreye verdiği zararlardan dolayı günümüzde tekrar popüler hale gelmiştir. Özellikle küresel ısınmadan dolayı çevresel düşünce ve

benzin fiyatlarındaki pahalılıktan dolayı yoğunlaşan çalışmalar sonucu elektrikli araç üretimi ve kullanımını gittikçe yaygınlaştırmaktadır.

Elektrikli otomobiller, motor teknolojilerine, batarya türlerine ve enerji tüketim şekillerine göre farklı kategorilere ayrılabilir. Elektrikli araçlar, çevre dostu olmaları, enerji verimlilikleri ve sürdürülebilirlikleri ile dikkat çekmektedir. Elektrikli otomobil türleri, genellikle şu başlıklar altında sınıflandırılabilir:

1.2.1 Tam Elektrikli Araçlar (BEV - Battery Electric Vehicle)

Tam elektrikli araçlar (BEV - Battery Electric Vehicle), tamamen elektrikle çalışır ve içten yanmalı motorları yoktur. Tüm enerji bataryadan sağlanır ve bu araçlar yalnızca elektrik motorları ile hareket eder. BEV'lerin bataryaları her ortamda şarj edilebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Günümüzde birçok yerde (alışveriş merkezi, benzin istasyonları, otoyollarda vb.) şarj istasyonlarının sayısı artması bu araç türlerinin daha çok yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Şekil 1.2'de tamamen elektrikli otomobilin yapısı görülmektedir.

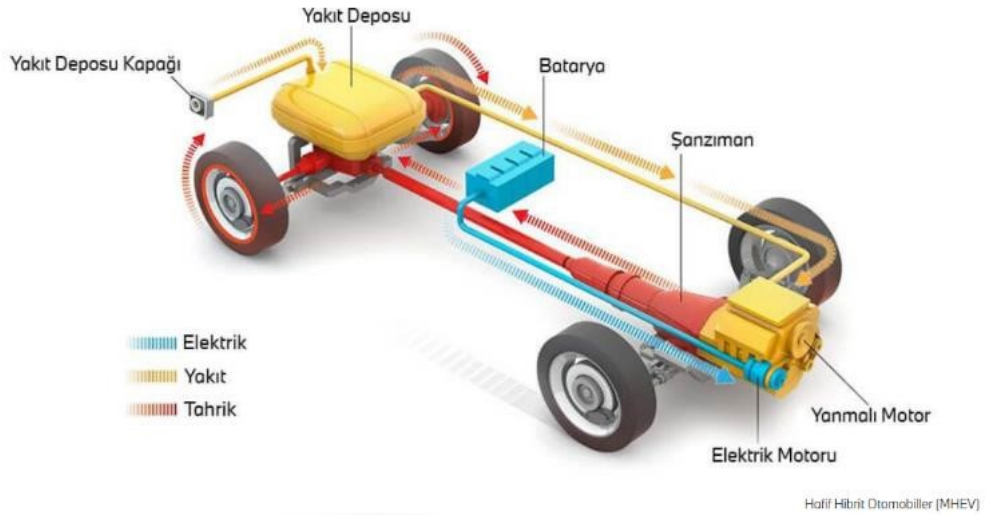


Şekil 1.2: Tam elektrikli aracın yapısı (Yuca ve diğ. 2022)

Tam elektrikli araçlarda batarya, bir elektrik kaynağına bağlanarak şarj edilir. Hiçbir şekilde egzoz emisyonu üretmezler. Yeni nesil bataryalar sayesinde, tam elektrikli araçların menzilleri oldukça uzamıştır (300-500 km ve üzerinde).

1.2.2 Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV - Hybrid Electric Vehicle)

Hibrit elektrikli araçlar, hem içten yanmalı motor (benzinli ya da dizel) hem de elektrikli motor kullanarak çalışır. Bu tür araçlar, batarya kapasitesine göre elektrikli motoru ile kısa mesafeleri elektrikle, uzun mesafeleri ise içten yanmalı motorla gidebilir.

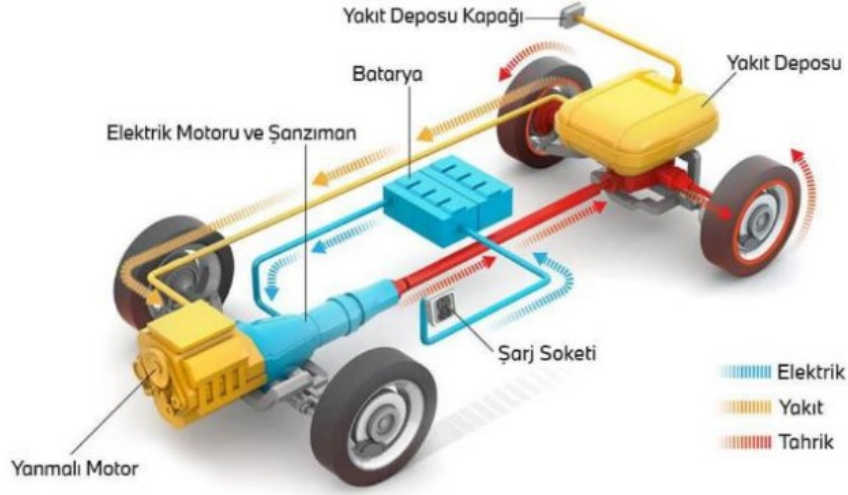


Şekil 1.3: Hibrit elektrikli otomobilin yapısı (Yuca ve diğ. 2022)

Hibrit elektrikli araçlarda iki motor birlikte çalışır, içten yanmalı motor sadece gerektiğinde devreye girer. Batarya, sürüş sırasında içten yanmalı motor ve frenleme ile şarj edilir. İçten yanmalı motorun kullanımı sınırlıdır, bu da emisyonları azaltır.

1.2.3 Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

Plug-in hibrit elektrikli araçlar, hibrit araçların bir adım ötesine geçer. Bu araçlar hem elektrikle hem de içten yanmalı motorla çalışabilir, ancak batarya dışarıdan şarj edilebilir.



Plug-in hibrit otomobiller (PHEV)

Şekil 1.4: Plug-in hibrit otomobilin yapısı (Yuca ve diğ. 2022)

Plug-in otomobillerde hibrit teknolojisi kullanılır ancak batarya, AC prizlerinden veya şarj istasyonlarından şarj edilebilir. Tam elektrikli sürüş için daha uzun menzil sunar (40-80 km civarı). Elektrikli bitse bile içten yanmalı motor devreye girer ve aracın menziline uzatır.

1.2.4 Elektrikli ve İçten Yanmalı Motor Kombinasyonu (Mild Hybrid)

Mild hibrit araçlar, elektrik motoru ve batarya kullanır, ancak elektrik motoru yalnızca içten yanmalı motoru desteklemek için çalışır. Bu tür araçlar, batarya ile elektrikli sürüş sağlamaz, fakat yakıt verimliliğini arttırmak için elektrik motorundan faydalanır.

Mild hibrit araçların elektrik motoru, içten yanmalı motoru destekler ancak tek başına aracı hareket ettiremez. Daha küçük bataryalar kullanılır ve batarya şarjı frenleme sırasında yapılır. Sadece düşük hızlarda veya kalkışta elektrik motoru devreye girer.

1.2.5 Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle)

Yakıt hücreli elektrikli araçlar, batarya yerine hidrojen gazı kullanarak elektrik üretir. Hidrojen, yakıt hücresinde oksijen ile reaksiyona girerek elektrik üretir ve bu elektrik, aracın elektrik motorunu çalıştırır.

FCEV araçlarda elektrik üretimi için yakıt olarak hidrojen gazı kullanılır. Çalışırken tek emisyon su buharıdır. Batarya şarj süresine göre hidrojen dolumu daha hızlıdır (yaklaşık 3-5 dakika).

1.3 Lityum Bataryalar

Li-ion bataryalar nikel tabanlı batarya gruplarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek anma gerilimine ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Li-ion bataryalar başta elektrikli araç bataryalarında kullanılan kimyasal madde olmak üzere, birçok elektronik cihazlarda tercih edilen batarya türüdür. Birim hücre başına en yüksek enerji yoğunluğuna ve gerilimine sahiptir. Hafıza etkisinin olmaması, kendi kendilerine deşarj olmalarının çok düşük oranda olması bakımından diğer batarya türlerinden üstündür. Ayrıca li-ion bataryaların fiziksel dayanıklılıkları ve ortalama ömürleri daha uzundur. Diğer batarya türleri ile kıyaslandığında en yüksek şarj verimine sahip ve en az bakım gerektiren bataryalardır. Li-ion bataryalar taşınabilir elektrokimyasal enerji depolamada öne çıkan kaynaklar arasındadır (Yuca 2022).

Li-ion bataryalar, diğer batarya türlerine göre daha fazla enerji depolama kapasitesine sahiptir. Bu, elektrikli araçların daha uzun menzil sunmasına yardımcı olur. Ortalama olarak, li-ion bataryalar 1.000 ila 1.500 şarj döngüsü sağlayabilir. Bu bataryalar, diğer enerji depolama birimlerine kıyasla daha hafiftir, bu da elektrikli araçların ağırlığını azaltır. Li-ion bataryalar, diğer türlere kıyasla daha hızlı şarj olabilmektedir.

Avantajları: Yüksek enerji yoğunluğu sayesinde daha uzun menzil, daha hızlı şarj imkânı, uzun ömür, düşük bakım maliyetleri.

Dezavantajları: Uzun ömür, düşük bakım maliyetleri, aşırı sıcaklıklara duyarlılık.

Diğer bataryalar ile li-ion bataryalar karşılaştırıldığında, hacim başına enerji yoğunluğu (Wh/lt) ve kütle başına düşen enerji yoğunluğu (Wh/kg) li-ion pillerde daha fazla olmasına rağmen daha az metal içerirler (Sayılğan 2009).

1.3.1 Lityum Batarya Çeşitleri

Lityum batarya, lityum iyonlarının hareketiyle enerji depolayıp, depolanan enerjiyi serbest bırakan, kimyasal enerjiye dayalı bir şarj edilebilir batarya türüdür. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip bu bataryalar diğer bataryalara göre daha fazla enerji depolayabilir.

Tablo 1.1: Li-ion batarya çeşitleri ve özellikleri (Karadeniz 2017)

Li-ion Batarya	ICR – LCO (LiCoO ₂)	IFR – LFP (LiFePO ₄)	LMO (LiMn ₂ O ₄)	INR- NMC (LiNiMnCoO ₂)	NCA (LiNiCoAlO ₂)	LTO (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)
Çalışma Gerilim Aralığı	3.0-4.2 V/Cell	2.5-3.65 V/Cell	3.0-4.2 V/Cell	2.5-4.2 V/Cell	2.7-4.2 V/Cell	1.8-2.85 V/Cell
Nominal Gerilim	3.6V	3.2V-3.3V	3.7V-3.8V	3.6V-3.7V	3.6V	2.4V
Kapasite (Wh/kg)	150-200	90-120	100-150	150-240	200-260	70-80
Şarj Oranı	0.7-1C	1C	3C	0.5-1C	0.7C	1-5C
Deşarj Oranı	10C	40C	30C	1-2C	1C	30C
Ömür (Cycle)	500 - 1000	1000 - 2000	300 - 700	1000 - 2000	500	3000 - 10000
Uygulama	Telefon, Tablet, Laptop, Kamera	UPS, E-Araç (Renault, Fisker, GE, Toyota)	Elektrikli el aletleri, Medikal	E-Bisiklet, Medikal, E-Araç, (Chevy Volt, BMW i3)	Medikal, E-Araçlar (Tesla)	UPS, E-Araç (Mitsubishi i-MIEV, Honda FitEV)
Güvenlik	3	5	4	4	3	5
Enerji Yoğunluğu	4	3	4	5	5	3
Güç Yoğunluğu	5	5	4	4	4	4
Fiyat	3	4	4	4	3	2
Ömür	3	5	3	4	4	5
Performans	4	4	3	4	4	5

Lityum bataryalar, kimyasal yapıları ve kullanım alanlarına göre farklı çeşitlere ayrılır. En yaygın kullanılan başlıca lityum batarya türleri ve özellikleri şunlardır:

- **Lityum-Kobalt Oksit (ICR-LCO) Bataryalar:** Yüksek enerji yoğunluğu ve düşük ağırlığıyla bilinen bir lityum batarya türüdür. Küçük cihazlar için idealdir. Hafif yapısıyla taşınabilir cihazlarda tercih edilir. Ancak güvenlik riskleri ve döngü ömrünün sınırlı olması uygulamalarda sınırlı kullanılmasına neden olabilir.
- **Lityum-Demir Fosfat (IFR-LFP) Bataryalar:** Yüksek güvenlik ve termal karalılık gösteren bu bataryalar 3000-5000 çevrim ömrü ile daha uzun ömürlüdür. Fakat enerji yoğunluğu düşüktür.
- **Lityum-Mangan Oksit (LMO) Bataryalar:** Güvenlik ve hızın ön planda olduğunda tercih edilen bir li-ion pil türüdür. Enerji aktarımı gerektiren uygulamalar için ideal bir seçenektir. Genellikle yüksek enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyulmayan alanlarda kullanılır ve bazen diğer batarya türleriyle kombine edilerek hibrit çözümler oluşturulur.
- **Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt Oksit (INR-NMC) Bataryalar:** Yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve güvenlik özelliklerini bir araya getiren dengeli bir li-ion pil türüdür. Elektrikli araçlardan depolama sistemlerine kadar geniş bir kullanım alanı sunar. Termal yönetim gereksinimleri nedeniyle hassas bir tasarım ve kullanım gerektirir.
- **Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum Oksit (NCA) Bataryalar:** Katot malzemesi olarak nikel, kobalt ve alüminyum oksit kullanılan bir li-ion batarya çeşididir. Elektrikli araçlar ve yüksek enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalar için ideal bir seçenektir. Uzun menzil, düşük ağırlık ve uzun ömür gibi avantajları vardır. Ancak, termal yönetim zorlukları ve yüksek maliyet gibi dezavantajları vardır.
- **Lityum-Titanat (Li-Titanate, LTO):** Anot malzemesi olarak lityum-titanyum kullanılan bir li-ion batarya türüdür. Bu bataryalar yüksek güvenlik, hızlı şarj/deşarj kapasitesine sahiptir. Çok uzun ömürlü, düşük enerji yoğunluğuna sahiptir.

1.3.2 Lityum Bataryalarda Enerji Kapasitesi

Lityum bataryalarda enerji kapasitesi, genellikle bataryanın depolayabileceği enerji miktarını belirleyen bir özelliktir. Bu kapasite, amper-saat (Ah) veya watt-saat (Wh) cinsinden ifade edilir. Enerji kapasitesini etkileyen faktörler arasında bataryanın kimyasal yapısı, hücre sayısı, hücre tipi, gerilim ve batarya tasarımı yer alır.

- **Amper-Saat (Ah):** Bu birim, bataryanın sağlayabileceği toplam akımın, ne kadar süreyle verilebileceğini gösterir. Örneğin, 1 Ah 'lık bir batarya, 1 saat boyunca 1 amper akım sağlayabilir.
- **Watt-Saat (Wh):** Enerji kapasitesinin bir diğer ölçü birimi olan watt-saat, bir bataryanın sağladığı gücün ne kadar süreyle kullanılabilirliğini gösterir. Watt-saat, voltaj (V) ve amper-saat (Ah) birimlerinin çarpımıyla hesaplanır:

$$Wh = Ah \times V \quad (1.1)$$

- **C-Rate:** Bir bataryanın şarj veya deşarj olma hızını belirlemek için kullanılan bir terimdir. Bu terim, bataryanın kapasitesinin ne kadar hızlı bir şekilde şarj edilebileceği veya deşarj olabileceğini gösterir. "C" harfi, bataryanın kapasitesinin birim olarak alındığını belirtir. C-Rate, bataryanın kapasitesiyle doğru orantılıdır. Bir bataryanın şarj veya deşarj akımını hesaplamak için şu formül kullanılabilir:

$$I = C \times K \quad (1.2)$$

Burada; **I:** Akım (amper), **C:** C-Rate (örneğin, 1C, 0.5C, 2C vb.) ve **K:** Bataryanın kapasitesi (Ah). Örneğin batarya kapasitesi 1C=2600mAh olan Orion18650 şarj edilebilir pil 1 saat içinde 2600mA akım sağlamaktadır. Teknik verilerinde anlık deşarj akımı 5C (13A) ve sürekli deşarj akımı 3C (7.8A) olarak verilmiştir.

1.3.3 Açık Devre Gerilimi (OCV – Open Circuit Voltage)

Açık devre gerilimi (OCV - Open Circuit Voltage), bir elektrik devresinde yük bağlı olmadığı, yani devre açık olduğu durumda, bir bataryanın veya elektriksel bileşenin uçlarındaki gerilimi ifade eder. Bu, bataryanın şarj durumunun ve kimyasal bileşiminin bir göstergesi olup, bataryanın gerçek kapasitesini, durumunu ve sağlığını anlamak için önemli bir parametredir. Batarya hiçbir elektriksel yük sağlamadığında, gerilim genellikle nominal gerilim veya bataryanın tam şarj durumunu yansıtır. Bu değer, bataryanın türüne ve kimyasal yapısına bağlı olarak değişir.

Açık devre gerilimi ve batarya durumunu incelendiğinde:

- **Tam Şarj Durumu:** Batarya tamamen şarj olduğunda, açık devre gerilimi, bataryanın maksimum gerilimine yakın olacaktır. Bu, bataryanın şarj seviyesinin yüksek olduğunu gösterir.
- **Boş (Deşarj) Durumu:** Batarya tamamen deşarj olduğunda, açık devre gerilimi çok daha düşük olur. Bu durum, bataryanın şarj seviyesinin düşük olduğunu gösterir.
- **Şarj Durumu (SoC):** Bataryanın şarj seviyesiyle doğrudan ilişkilidir. Batarya şarj oldukça açık devre gerilimi artar. Şarj oranı düştükçe, bu gerilim azalır.

Genellikle li-ion bataryaların nominal hücre gerilimleri 3.6V-3.7V arasında, deşarj kesme gerilimi ise 2.5V-2.75V arasındadır. Batarya hücresinin deşarj edebileceği en düşük voltaja deşarj kesme gerilimi denir. Hücre geriliminin bu değerin altına düştüğü durumlarda hücrelerin elektrokimyasal yapısında bozulmalara sebebiyet verebilir ve batarya zarar görebilir.

Tablo 1.2: Batarya tipleri ve nominal hücre gerilimleri

Batarya Türleri	Nominal Hücre Gerilimi (V)
Lityum-İyon	3.7
Kurşun Asit	2.0
NiMH	1.2
NiCd	1.2

Tablo 1.2'ye bakıldığında li-ion bataryalar kurşun asit bataryanın yaklaşık 1,5 katı, NiMH ve NiCd bataryaların ise 3 katı daha yüksek nominal hücre gerilimine sahiptir. Li-ion bataryalar daha az seri hücreler ile yüksek gerilim sağlayabilmektedir.

Tipik bir li-ion bataryanın açık devre gerilimi 3.7 V civarındadır. Tam şarj olduğunda bu değer yaklaşık 4.2 V'a çıkar, tamamen boşaldığında ise yaklaşık 2.5V civarına düşer. Tam şarjlı bir 12 V'luk kurşun-asit bataryanın açık devre gerilimi 12.6 V civarındadır. Tamamen deşarj olduğunda bu değer 10.5 V'a kadar düşebilir. Genellikle 1.5 V olan bir alkalın pilin açık devre gerilimi, tamamen boşalmadan önce 1.6 V civarına ulaşabilir.

Kapalı devre içerisinde bataryalarda dinamik gerilim değeri ölçülür. Batarya iç direncinin değerine bağlı olarak batarya deşarj ediliyorsa ölçülen gerilim açık devre geriliminden daha küçük; şarj ediliyor ise daha büyük bir gerilim değeri ölçülür.

Sonuç olarak, açık devre gerilimi, bataryaların şarj durumu hakkında bilgi veren önemli bir parametredir ve bataryanın ne kadar enerji depoladığı veya sağlayabileceği hakkında bir fikir verir. Bu değer, batarya türüne ve kullanım koşullarına göre değişkenlik gösterebilir.

1.3.4 Lityum Bataryalarda Şarj ve Deşarj

Lityum bataryalarda şarj ve deşarj süreçleri, bataryanın verimli ve güvenli çalışabilmesi için çok önemlidir. Şarjda dikkat edilmesi gereken gerilim sınırları, deşarjda ise bataryanın tamamen boşalmaması gereken bir limit vardır. Uygun şarj ve deşarj yönetimi, bataryanın ömrünü uzatırken, cihazın performansını da artırırken yanlış şarj ve deşarj yöntemleri pillere zarar verebilmektedir.

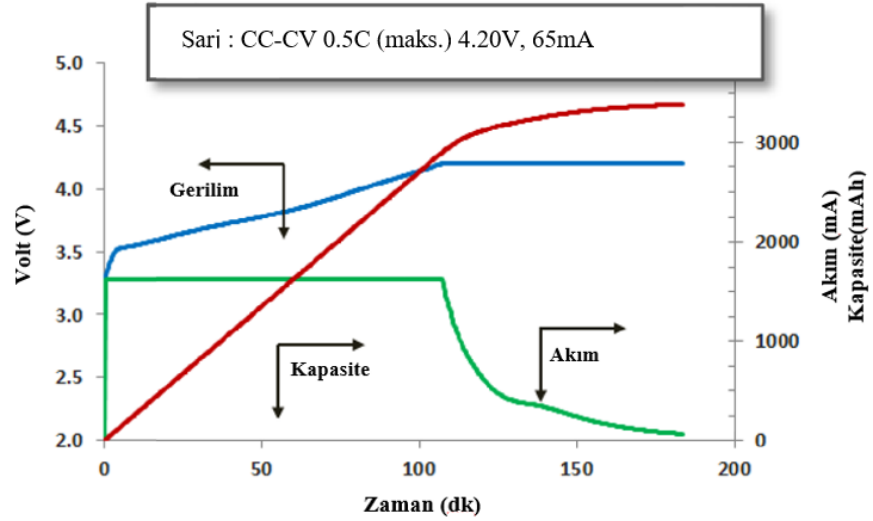
1.3.4.1 Şarj Süreci

Lityum bataryaların şarj süreci, genellikle belirli bir voltaj ve akım aralığında yapılır. Bataryaların şarj edilmesi sırasında dikkat edilmesi gereken birkaç önemli faktör vardır:

Lityum bataryalar CC-CV (Constant Current - Constant Voltage) şarj yöntemiyle şarj edilir. Bu yöntem iki aşamadan oluşur:

- **Sabit Akım (CC - Constant Current):** Batarya belirli bir akımla şarj edilir. Bu fazda bataryanın gerilimi artar.
- **Sabit Voltaj (CV - Constant Voltage):** Batarya tam şarj seviyesine yaklaştığında, gerilim belirli bir seviyeye (genellikle hücre başına 4.2V) ulaştığında, bataryaya uygulanan akım azaltılır. Bu fazda batarya gerilimi sabit tutulur, ancak akım azalır.

Li-ion bataryalar için genellikle hücre başına maksimum şarj gerilimi 4.2 V civarındadır. Lityum bataryaların şarj akımı, bataryanın kapasitesine göre değişir. Tipik olarak, batarya kapasitesinin %0.5C ila %1C hızında şarj edilmesi önerilir. Yani, 2000 mAh kapasiteli bir batarya için 1C şarj akımı 2000 mA olacaktır.



Şekil 1.5: Li-ion pil CC-CV şarj eğrisi (batteryspace.com 2024)

Şekil 1.5'te görüldüğü üzere bu metoda göre pil önce sabit bir akım ile şarj edilmektedir. Pilin gerilim değeri sabit akım bölgesindeyken, ulaşılabilinecek en üst noktaya kadar dik bir eğimle artmaktadır. Şarj cihazı gerilim maksimum değerine ulaştığında şarj gerilimini sabitlemektedir. Çıkış akım değeri sürekli azaltılarak gerilim değerinin sabit olması sağlanmaktadır. Kapalı ve açık devre gerilimleri birbirlerine eşit olduğu anda şarj tamamen kesilir ve şarj işlemi tamamlanmış olur. Şarj kesme akımı li-ion hücreler için genellikle 0.02C'dir.

Şekil 1.5'te ki grafiğe bakıldığında bir li-ion bataryanın standart şarj yöntemiyle dolun yapılması için sabit akım değeri 0.5C (1625mA) ve sabit gerilim değeri 4.2V olmalıdır. Dolun işlemi bittiğinde son kapatma durumu için kesme akımı ise 0.02C (65mA)'dir. Genel şarj yönteminde batarya 1C'luk bir akım değeriyle maksimum gerilim değerine hızlı bir şekilde ulaşmakta fakat batarya tam olarak dolmamaktadır. Yani maksimum gerilim değeri ile bataryayı şarj etmek bataryayı maksimum kapasiteye ulaştırmak anlamına gelmemektedir (Karadeniz 2017).

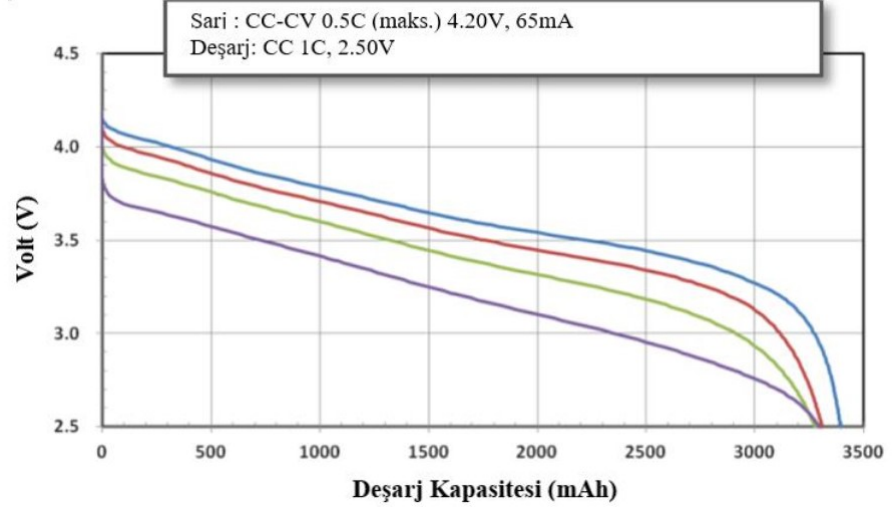
1.3.4.2 Deşarj Süreci

Lityum bataryaların deşarj süreci de şarj kadar kritik olup, bataryanın verimliliğini ve ömrünü etkiler. Üretici firmanın belirlediği maksimum deşarj akımının üzerine çıkıldığında bataryalar termal hasar alabilmekte ve hücrelerin elektrokimyasal yapıları bozulabilmektedir. Termal enerji, bataryanın akım değerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Li-ion bataryalar için minimum deşarj gerilimi 2.5 V veya 2.7 V civarındadır. Batarya gerilimi bu seviyenin altına düştüğünde, batarya aşırı deşarj olmuş olur ve bu durum bataryanın ömrünü kısaltabilir.

Bataryanın deşarj akımı, cihazın enerji taleplerine bağlıdır. Elektrikli araçlar ve taşınabilir cihazlar gibi yüksek güç gereksinimi olan uygulamalarda, bataryalar hızlı deşarj akımlarına dayanabilecek şekilde tasarlanır. Bataryaların deşarj hızları genellikle bataryanın C-rate değeri ile ilişkilidir. Örneğin, 1C'lik bir batarya, kapasitesinin tamamını 1 saatte sağlayabilir.

Deşarj derinliği, bataryanın ne kadarının kullanıldığını gösterir. Daha yüksek deşarj derinlikleri bataryanın ömrünü kısaltabilir. Bu nedenle, lityum bataryaların genellikle %20-80 arası bir şarj seviyesinde tutulması önerilir. Yüksek deşarj seviyeleri (tamamen boşaltmak) bataryanın kapasitesini ve sağlığını olumsuz etkileyebilir.

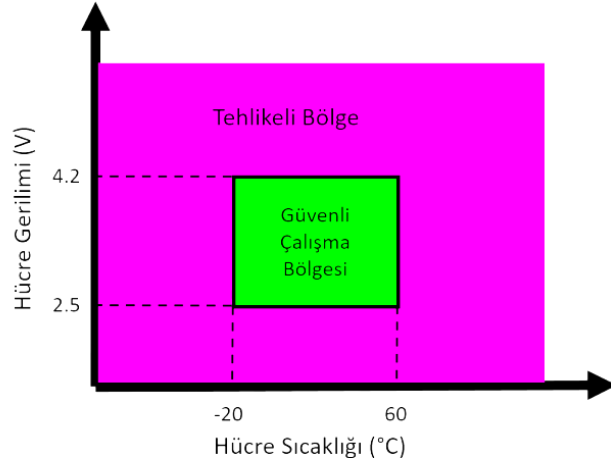


Şekil 1.6: Li-ion bataryanın deşarj akımı ve kapasite eğrisi (na.industrial.panasonic.com 2023)

Bataryaların aşırı şarj ve hızlı deşarj olması hücrelerine zarar vermektedir. Bir batarya hücresinin kimyasal yapısında bulunan iyonlar tamamen doyuma ulaştığında, şarj işlemine devam ederse doymuş iyonlar uyarılmaya devam edecektir. Bu durum batarya hücrelerinin aşırı ısınmasına patlama, yangın gibi olumsuz durumlara neden olabilmektedir. Örnek bir li-ion bataryanın deşarj akımı ve kapasite eğrisi şekil 1.6'da verilmiştir.

1.3.5 Lityum Bataryalarda Güvenli Çalışma Bölgesi

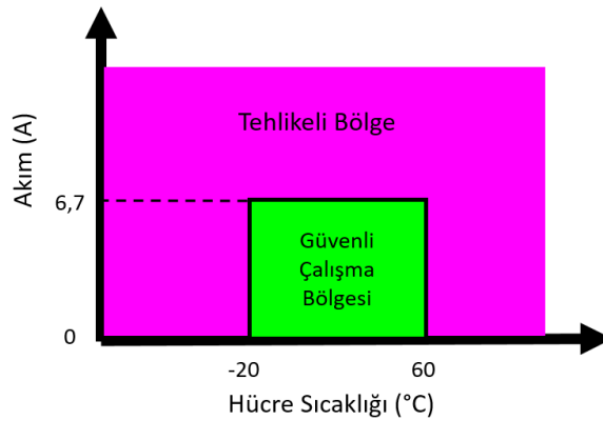
Bilindiği üzere batarya hücrelerinin performansını etkileyen en önemli parametreler sıcaklık, akım ve gerilimdir. Şekil 1.7 ve şekil 1.8'de görüldüğü üzere batarya hücrelerinin "Güvenli Çalışma Bölgesi" yazan alan içinde kullanılması gerekmektedir. Bu bölge dışına çıktığında batarya hücreleri kalıcı zararlar görebilmektedir.



Şekil 1.7: Hücre gerilimi ve sıcaklığı güvenli çalışma bölgesi (Karadeniz 2017)

Aşırı gerilime (over voltage) maruz kalan lityum hücrenin anodu üzerinde metalik lityum kaplamalar meydana gelir ve aynı zamanda katot malzemesi üzerinde de oksidasyon başlar, stabilizasyon azalır ve karbondioksit (CO₂) üretimi başlar. Bu durum hücre içi basıncın artmasına neden olabilmektedir.

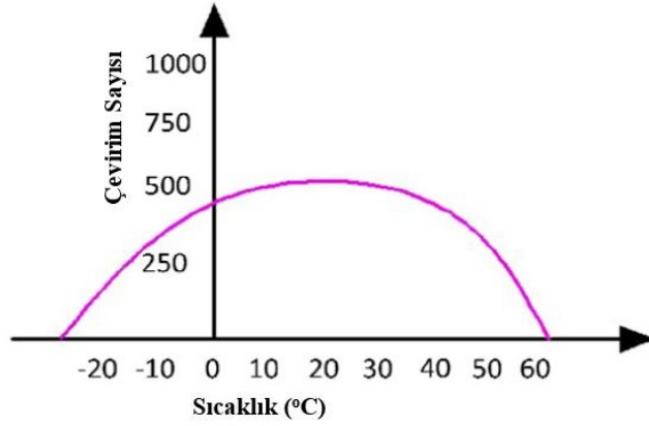
Lityum hücreleri aşırı şarja ya da düşük gerilime maruz kaldıklarında akım toplayıcılar anot bakırına elektrolit biriktirir. Böyle bir durumda pil hücresi kendi üzerinden deşarj olmaya başlar. Aşırı deşarja maruz kalmış hücreler tekrar şarj edilirse elektrolit içerisindeki iyice dağılmış bakır iyonları çöker, elektrotların kısa devre olmasına neden olarak tehlikeli durumlara yol açabilmektedir.



Şekil 1.8: Hücre akımı ve sıcaklığı güvenli çalışma bölgesi (Karadeniz 2017)

Şekil 1.8'de görüldüğü üzere li-ion bataryaların düşük veya yüksek sıcaklıklarda kullanılmaları kapasitelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sınırlar

dışında kullanılan bataryaların kullanım kapasiteleri hızla düşecek ve standart ömrü beklenenin altına düşecektir. Bu nedenle bataryaların kullanım ömürlerini arttırmak ve beklenen performansı sağlamak için sıcaklık değerleri sürekli kontrol altına alınmalıdır.



Şekil 1.9: Li-ion hücrelerde sıcaklığın çevrim sayısına etkisi (Karadeniz 2017)

Gerili ve sıcaklığın batarya hücreleri üzerindeki etkisi hemen görülürken, hücrelerin yaşam döngüsü etkileri açıkça görülmemektedir. Kümülatif olarak toplanan bunun gibi hasarlar hücre ömrünü doğrudan etkilemektedir. Şekil 1.9'da sıcaklık 10°C'nin altına düştüğünde ve 40°C'nin üstüne çıktığında yaşam döngüsünün azaldığı görülmektedir.

1.4 Batarya Yönetim Sisteminde Önemli Parametreler

Batarya yönetim sisteminde bulunan pillerin bazı kritik kontrolleri doğrudan pil üzerinden ölçmek zordur. Bundan dolayı bir modeli geliştirilip bu model baz alınarak gerekli ölçümlerin yapılması gerekmektedir. Literatürde çeşitli pil modelleme metotlarıyla ilgili çeşitli teknikler mevcuttur. Bu modeller arasında deneysel (analitik), istatistiksel ve elektriksel devre modelleri bulunmaktadır. Pil yönetim sistemi için kritik olan parametreler SoC (State Of Charge – Pil Doluluk Oranı), SoH (State Of Health – Pil Sağlık Durumu) ve SoT (State Of Temperature – Pil Sıcaklık Durumu).

1.4.1 Pil Doluluk Oranı (SoC - State of Charge)

Özellikle lityum tabanlı bataryalarda SoC değerini doğrudan ölçme imkânı yoktur. Bu nedenle batarya modellerinden elde edilen parametrelere göre bu değerler bulunur. Bulunan bu değerler gerçek değerleri vermez. Burada amaç gerçeğe en yakın değeri elde etmeye çalışmaktır (Andre 2010).

SoC kestirimi için kullanılan en basit yöntemlerden biri açık devre gerilimi (OCV) yöntemidir. Bu yöntemde bataryanın enerji bağlantıları kesilerek birkaç saat bataryanın kimyasal yapısının tekrar dengeye gelmesi beklenir daha sonra yapılan ölçümler ile SoC değeri kestirilir. Ancak bu işlem li-ion bataryalar için güvenli sonuç vermez. Çünkü li-ion bataryalarda SoC ile OCV ilişkisi hem lineer değildir hem de SoC ölçümü için devreden kesme ve uzun süre bekleme gerektiğinden zaman kaybına neden olur (Chen ve diğ. 2008).

SoC kestiriminde kullanılan bir diğer yöntem ise terminal gerilimi yöntemidir. Bu yöntemde batarya devreden ayrılmadan terminal uçlarından ölçülen gerilim değerleri ile kestirim yapılır. Li-ion bataryalarda SoC değeri düşük ise terminal gerilimi de anide düştüğünden kestirim hatası çok yüksektir (Sato ve diğ. 2002).

En verimli yöntem Coulomb sayma yönteminde ise bataryaya giren ve çıkan akımlar hesaplanarak SoC kestirimi yapılır. Bataryanın yüksüz deşarjı, boşa bekleme süresi gibi faktörler SoC değerine etki edebilir (Moo ve diğ. 2009).

Günümüzde yapay zekanın gelişmesiyle birlikte kendi kendine öğrenebilen algoritmalar SoC kestirimi için kullanılmaya başlandı. Bulanık mantık, yapay sinir ağları, destek vektör algoritmaları ve kalman filtreleri gibi uygulamalar kullanılmaya başlandı. Bu uygulamalar ile öz boşalım, ortam sıcaklığı ve çevrim sayısı gibi faktörlerin etkisi algoritmalara öğretilerek en yakın SoC değeri kestirilir.

SoC anlık kapasite değerinin ($Q(t)$) nominal kapasite değerine ($Q(n)$) oranı olarak tanımlanır. Nominal kapasite değeri üretici tarafından verilen, bataryada depolanabilen maksimum şarj miktarını gösterir (Chang 2013). Şarj durumu şöyle tanımlanır:

$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{Q(n)} \quad (1.3)$$

1.4.2 Batarya Sağlık Durumu (SoH - State of Health)

Batarya sağlık durumu bataryanın son kullanma tarihini bildiren bir ölçüdür. Bataryalar sürekli kullanıldıkları için şarj ve deşarj olur, bu sayı arttıkça nominal kapasitelerinde zamanla kademe kademe düşüş yaşanmaktadır. Bu düşüş bataryanın kapasitesinin artık kullanılmayacak kadar düşmesi ile bataryanın değiştirilmesi kaçınılmaz olur. Aynı zamanda batarya iç direnci de sık kullanıma bağlı olarak zamanla artar. İşte bu değişkenler SoH değerini belirler (Xing L., Luo W. ve ark. 2023). SoH kestirimi SoC tahminine göre daha zordur, çünkü SoH hesabı yapılırken depolama sıcaklığı ve süresi, şarj-deşarj sıcaklığı, aşırı şarj-deşarj gibi etkenler vardır (Watrin ve diğ. 2012).

SoH kestirimini yapabilmek için genelde bataryanın iç direncinin hesaplanması gerekir. Kullanılan bataryanın iç direnci artar, bu iç direnç yeni bir bataryanın iç direnci ile karşılaştırıldığında SoH değeri kestirilebilir. Batarya iç direnci ile SoH değerinin ilişkisel formülü aşağıdaki Eşitlik 2’de verilmiştir.

$$SoH = \frac{R_{EOL} - R_{now}}{R_{EOL} - R_{new}} \times 100 \quad (1.4)$$

Yukarıdaki formülde R_{now} bataryanın anlık direnci, R_{new} fabrika çıkışındaki iç direnci ve R_{EOL} bataryanın ömrünün tükendiğinde ölçülecek iç direncini göstermektedir. Yapılan deneyler sonucunda R_{now} ile R_{EOL} arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi bulunmuştur (Wang ve diğ. 2023).

$$R_{EOL} = 1,6 \times R_{new} \quad (1.5)$$

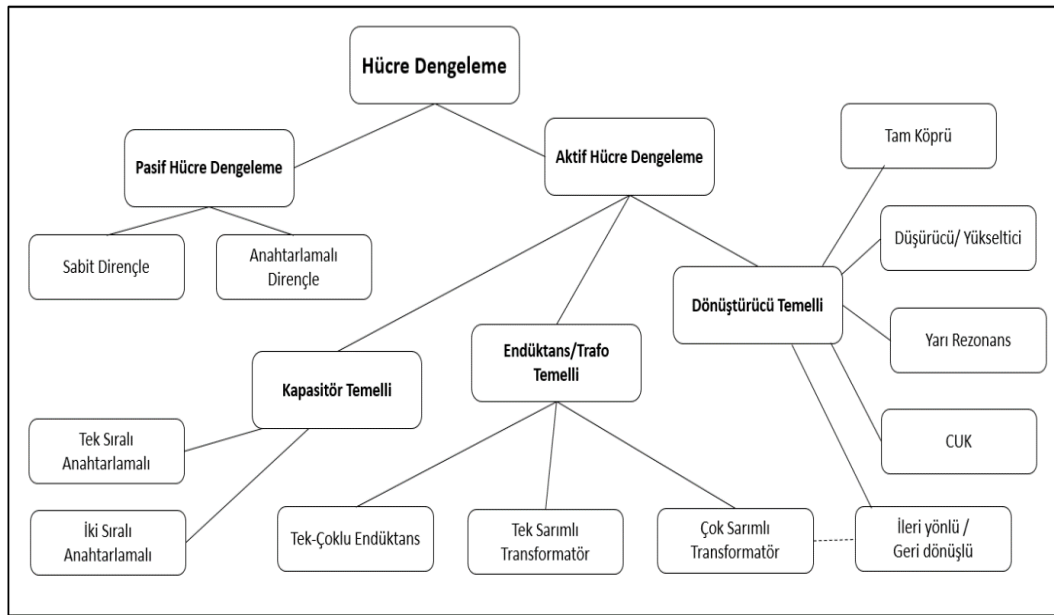
1.5 Hücre Dengeleme Yöntemleri

Bataryanın uzun süre kullanılabilmesi için hücre grup gerilimlerinin eşit olması gerekmektedir. Çünkü deşarj durumunu seri bağlı gruptaki en düşük gerilime sahip pil hücresi belirlemekte ve o grubun ömrünü azaltmaktadır. Aynı şekilde şarj durumunda

ise yüksek gerilime sahip hücre denge kaybına neden olur ve düşük gerilime sahip hücrenin tam dolmasına izin vermez (Delrossi 2002).

Batarya hücrelerinde meydana gelen dengesizliklerin nedenleri üretimden kaynaklı farklılıklar, hücre empedansındaki farklılıklar, termal dengesizlik ve araç üzerindeki titreşimlerdir (Bruen ve diğ. 2016, Zhang ve diğ. 2017). Bu dengesizlikler piller arasındaki kapasite farklılıklarının oluşmasına neden olur ve performansı düşürür. Batarya dengeleme sistemleri ile her bir hücrenin gerilim seviyesini birbirine en yakın noktada tutmaya çalışılarak batarya ömrünün uzaması sağlanmaktadır.

Aşağıda şekil 1.10'da görüldüğü üzere hücre dengeleme yöntemleri pasif ve aktif olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Kullanılacak sistemin yapısı ve maliyeti göz önünde bulundurularak uygun yöntem seçilir (Balıkcı ve diğ. 2012).



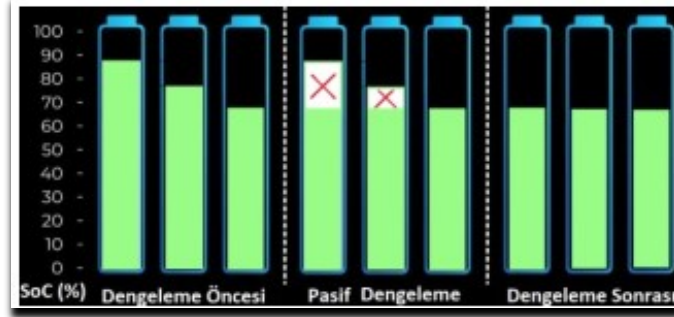
Şekil 1.10: Pasif ve aktif dengeleme yöntemleri (Hançar ve diğ. 2021)

Pasif hücre dengeleme yönteminde yüksek enerjili pil hücresindeki fazla enerji bir direnç üzerinden geçirilerek ısı enerjisi olarak atılırken aktif hücre dengeleme yönteminde hücrelerde depolanan fazla enerji düşük gerilimli hücrelere transferiyle gerçekleşmektedir.

1.5.1 Pasif Dengeleme Yöntemi

Pasif dengelemeli batarya yönetim sistemlerinde referans bir eşik değeri belirlenir ve herhangi iki hücre arasındaki fark bu eşik değerinin üzerine çıkarsa bypass dirençleri ile fazla enerji harcanır. Bu yöntem ile bataryanın şarj durumunu belirli bir noktadan ya en üst seviyesinde ya da en alt seviyesinde eşitler.

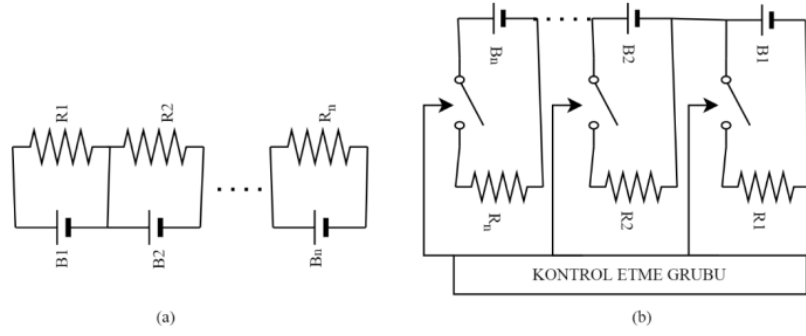
Şekil 1.11’de görülen bu pasif dengeleme yöntemin en büyük dezavantajı enerjinin ısı olarak harcanmasıdır. Bu ısı miktarı toplam batarya paketi düşünüldüğünde göz ardı edilemeyecek büyüklüktedir.



Şekil 1.11: Pasif dengeleme yöntemi (Hançar ve diğ. 2021)

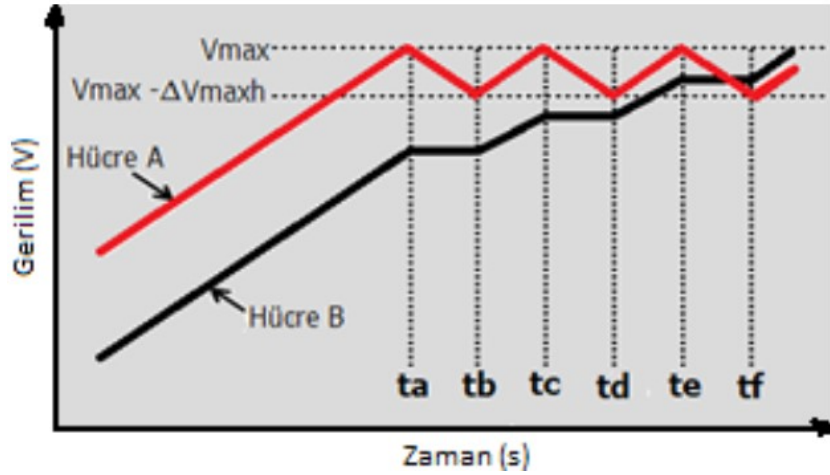
Pasif dengeleme yöntemi sabit veya anahtarlamalı dirençle yapılır. Sabit dirençle dengeleme yönteminde sürekli akım çekildiği için verim düşmektedir. Batarya paketinde seri bağlı hücrelerin gerilim seviyeleri ayrı ayrı ölçülmelidir. Bu sistem anahtar, direnç ve bir de gerilim seviyelerini ölçen bir kontrolörden oluşmaktadır. En çok tercih edilen dengeleme yöntemidir.

Dengeleme için en ideal anahtarlama elemanı metal yarı iletken alan etkili transistör (MOSFET) kullanmaktır. Kapasitesi dolan hücrenin kol direnci artırılarak daha az akım çekmesi ve bu esnada diğer hücrelerin daha hızlı dolarak bu hücreyi yakalaması sağlanır. Bu yöntemde ana seçim dengeleme entegresinin içinde bulunan ve düşük seviyede bypass akımlarına izin veren FET’leri kullanmak veya özel uygulamalar için serbestçe uyarılma imkânı veren harici FET’ler kullanmaktır.



Şekil 1.12: Pasif dengelemede dengesiz hücrelerin dengelenmesi (Balıkçı ve diğ. 2012)

Şekil 1.13'te dolun esnasında farklı gerilim seviyelerinde olan seri bağlanmış iki hücrenin (Hücre-A ve Hücre-B) dolun zaman grafiği gösterilmektedir. Gerilim seviyesi daha yüksek olan Hücre-A şarj işleminin sonlanacağı üst noktaya (V_{max}) Hücre-B'den daha önce ulaşmaktadır. " t_a " anında Hücre-A ile Hücre-B arasındaki enerji farkı fazla olduğundan şarj işlemi sonlanarak Hücre-A üzerindeki enerjinin bir kısmı direnç üzerinden boşalır ve " t_b " anında şarj işlemi tekrar başlar. Hücre-A üzerindeki enerjinin direnç üzerinden atılması işlemi " t_c-t_d " ve " t_e-t_f " arasında tekrar etmektedir. Enerji farkı istenen seviyeye gelene kadar dolun işlemi devam etmektedir.



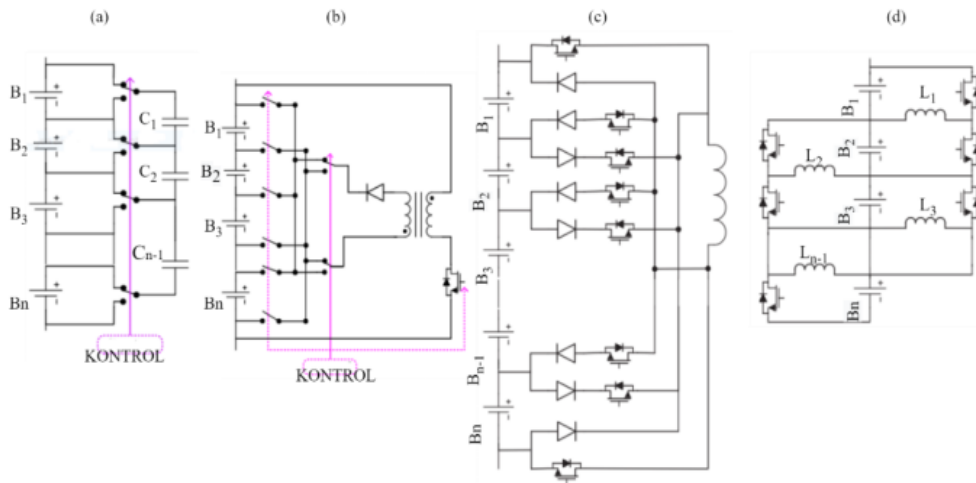
Şekil 1.13: Pasif dengeleme hücre gerilimleri zaman grafiği (Haçar 2021)

Pasif dengeleme yöntemi elektrikli ve hibrit araçlar için uygulanabilirliği kolay olmasıyla birlikte maliyet olarak da avantaj sağlamaktadır. Enerji kayıpları ve hücre dengelemesinin uzun sürmesi ise dezavantajdır.

1.5.2 Aktif Dengeleme Yöntemi

Bu yöntemde kapasitesi yüksek olan hücre mevcut enerjisini daha düşük kapasiteye sahip hücelere göndererek mevcut enerjinin boşa harcanmasını önlemiş olur. Bu işlem için şarj sırasında kapasitesi dolan hücre BYS tarafından enerjisi kapasitesi daha az olan hücelere transferini gerçekleştirir. Deşarj sırasında ise kapasitesi düşük olan hücre diğer hücelerden daha önce deşarj olur. Aktif dengeleme sistemi, azalan kapasiteyi arttırmak için diğer hücelerden enerji transferi yapar. Bu işlem diğer tüm hücelere aynı seviyeye gelene kadar devam eder. Li-ion bataryaların çalışma sıcaklığı büyük bir hassasiyetle korunması gerektiği için aktif dengeleme yöntemi bu tür bataryalar için daha uygundur.

Şekil 1.14'te gösterildiği üzere aktif dengeleme yönteminde kondansatör, bobin, trafo ve güç dönüştürücüleri ile yapılmış harici devreler kullanılır (Hoque M.M., Hannan M. ve ark. 2017).



Şekil 1.14: Aktif dengeleme yöntemleri a) Anahtarlama yöntemi, b) Tek sargılı transformator, c) Tekli indüktör, d) Düşürücü-yükseltici dönüştürücü (Hançar ve diğ. 2021)

1.6 Batarya Koruma Üniteleri (BPU - Battery Protection Units)

Batarya koruma ve yönetim sistemi, özellikle şarj edilebilir pillerde güvenlik, performans ve ömrü optimize etmek için kullanılan devrelerden oluşur. Batarya

yönetim ve koruma devreleri genelde ayrı devreler olarak tasarlanır. Ancak son yıllarda entegre çözümler daha yaygın hale gelmiştir.

1.6.1 Batarya Koruma Devresi (BPC - Battery Protection Circuit)

Batarya koruma devresi, pilin fiziksel ve elektriksel güvenliğini sağlamak için tasarlanan elektronik bir devredir.

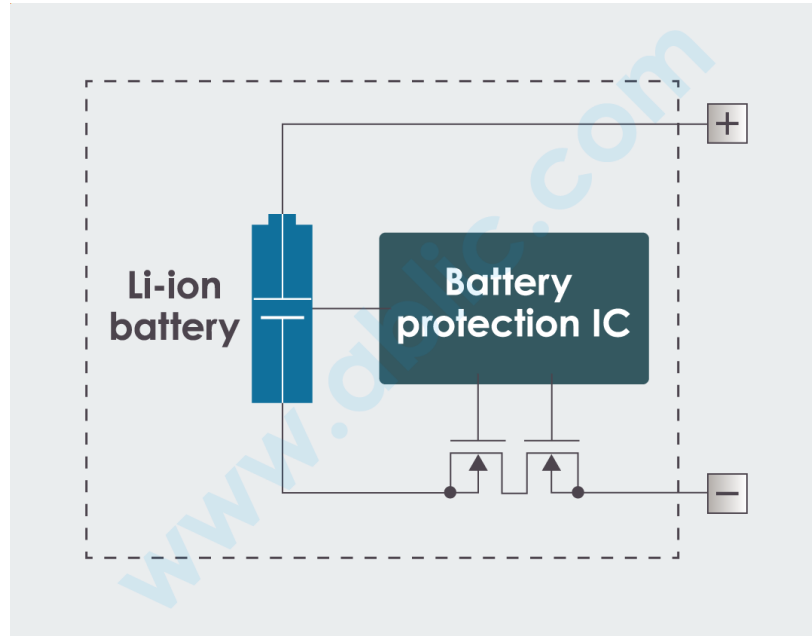
Devrenin başlıca görevleri aşağıdaki gibidir.

- **Yüksek Gerilim Koruması (Over Voltage Protection):** Pilin hücre başına izin verilen maksimum gerilimi aşmasını engeller. Örneğin, li-ion hücreler için genelde hücre başına 4.2V sınırlandırması yapılır. Yüksek gerilim durumunda şarj kesilir.
- **Aşırı Akım Koruması (Over Current Protection):** Şarj ve deşarj sırasında pilin izin verilen maksimum akım değerini aşması durumunda devreyi keser. Tipik olarak FET'ler (Field Effect Transistor) kullanılarak uygulanır. Akım limiti genelde pilin kapasitesine ve kimyasal yapısına bağlıdır.
- **Aşırı Sıcaklık Koruması (Over Temperature Protection):** Pilin sıcaklığı belirlenen sınırları (örneğin 0°C-60°C) aştığında şarj veya deşarjı durdurur. Sıcaklık izleme için genelde NTC/PTC termistörler kullanılır.
- **Kısa Devre Koruması (Short Circuit Protection):** Pilde kısa devre algılandığında devreyi hızlıca kapatarak zarar görmesini önler. Kısa devre genellikle yüksek akım akışına ve pillerin fiziksel hasar görmesine neden olur.
- **Düşük Gerilim Koruması (Undervoltage Protection):** Pilin aşırı deşarj olmasını önler. Örneğini, li-ion pil hücreleri için alt sınır genelde 2.5V'dur.

Koruma devresi bu durumları tespit ettiğinde lityum pilin şarj veya deşarjını otomatik olarak durdurur.

Li-ion pil koruma entegresi pillerden, şarj cihazlarından ve şarj/deşarj akımlarından alınan voltaj bilgilerine dayanarak, şarj/deşarj akımını kontrol eder ve gerektiğinde ana sisteme sinyaller gönderir. Li-ion pil koruma devreleri

güvenliği sağlamayı amaçlar, bu nedenle yüksek güvenilirlik ve doğruluğa sahip olmalıdırlar.



Şekil 1.15: Pil koruma entegresi (ablic.com 2024)

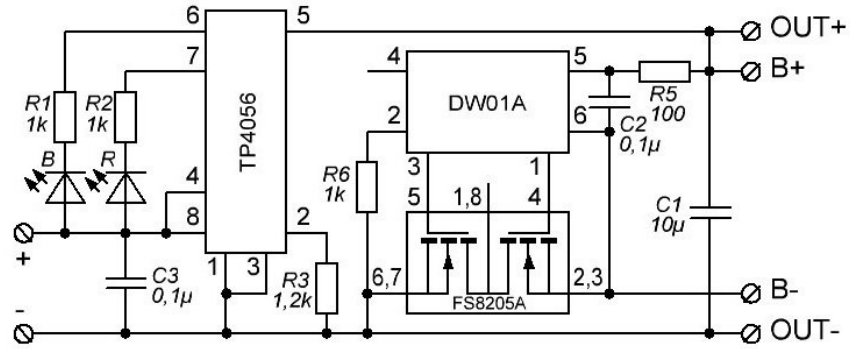
Şekil 1.15’de örnek bir tek hücre pil koruma entegresi verilmiştir. Bir pil koruma entegresi aşırı şarj koruması, aşırı deşarj koruması ve aşırı akım koruması gibi temel işlevleri vardır. Harici FET’leri açıp kapatarak şarj/deşarj akımını kontrol edebilir. Bu entegre FET’ler gibi birkaç bileşenle birleştirdiğinde li-ion piller için koruma devreleri oluşturulabilir ve bu da çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasını sağlar.

1.6.2 Batarya Koruma Devresi Örnekleri ve Şemaları

1.6.2.1 Tek Hücreli Li-Ion Pil Koruma Devresi

Bu tip devreler, özellikle tek hücreli bataryalar için tasarlanır. Bu tür devreler genellikle pilin şarj, deşarj ve aşırı akım koşullarını kontrol ederek, pilin ömrünü uzatır ve güvenli kullanım sağlar. Mobil cihazlarda kullanılan bu batarya koruma devresi şu bileşenleri içerir (Benzo enerji 2021):

- MOSFET'ler şarj ve deşarj akımlarını kontrol etmek için kullanılır. Genellikle çift MOSFET yapısı tercih edilir.
- Gerilim ve akım algılama devreleri, hücrenin voltaj ve akım değerlerini sürekli izler.
- Termistör, sıcaklık koruması sağlar.
- Kondansatörler, gürültü filtreleme ve voltaj dalgalanmalarını azaltma amaçlıdır.



Şekil 1.16: Pil koruma devreli şarj modülü devresi (artofcircuits.com 2024)

Şekil 1.16'da verilen bir li-ion pil koruma devresinin çalışma prensibi şöyledir: Hücre voltajı 2,5 V ile 4,2 V arasında olduğunda, DW01'in birinci ve üçüncü pinleri yüksek seviye (besleme voltajına eşit) çıkış verir ve ikinci pin voltajı 0 V'tur. Bu sırada, DW01'in 1 ve 3 numaralı pinlerinin voltajı sırasıyla 8205A'nın 5 ve 4 numaralı pinlerine uygulanacaktır. 8205A'daki iki MOSFET, gate terminali DW01'den gelen voltaja bağlı olduğundan bu MOSFET'ler iletken durumdadır, yani her iki anahtar da açık durumdadır. Bu sırada, pilin negatif kutbu doğrudan koruma kartının B terminaline bağlanır ve koruma kartının bir voltaj çıkışı vardır.

1.6.2.2 Çok Hücreli Li-Ion Pil Koruma Devresi

Çok hücreli li-ion pil koruma devresi (Battery Protection Circuit), birden fazla hücreyi güvenli ve verimli bir şekilde yönetmek için tasarlanmış bir elektronik devredir. Bu sistem, genellikle enerji depolama sistemlerinde, elektrikli araçlarda ve taşınabilir cihazlarda kullanılır.

Çok hücreli pil koruma devresinin temel işlevleri:

- **Aşırı Şarj Koruması:** Her hücrenin voltajını izler. İzin verilen maksimum gerilimi (örneğin, 4.2V) aştığında şarj devresini keser.
- **Aşırı Deşarj Koruması:** Hücre voltajı minimum güvenli seviyenin (örneğin, 2.5V) altına düştüğünde devreyi keser.
- **Aşırı Akım ve Kısa Devre Koruması:** Pil grubunu yüksek akım ve kısa devreye karşı korur.
- **Hücre Dengeleme:** Hücreler arasındaki voltaj farkını dengeleyerek ömrü uzatır.
- **Sıcaklık Koruması:** Termistörler veya sıcaklık sensörleri ile pilin aşırı ısınmasını önler.

1.6.2.3 Devre Tasarım Bileşenleri:

- Koruma Entegre Devresi (BMS IC):** Örnekler: BQ76930, BQ76940 (Texas Instruments), LTC6804 (Analog Devices). Çok hücreli koruma, dengeleme ve izleme işlevlerini sağlar.
- MOSFET:** Şarj ve deşarj akımını kontrol etmek için kullanılır.
- Hassas Direnç (Shunt Resistor):** Akımı ölçmek için kullanılır.
- Dengeleme Dirençleri:** Hücreler arasındaki voltaj farklarını gidermek için kullanılır.
- Kondansatörler ve Diyotlar:** Gürültü filtreleme ve koruma amaçlı kullanılır.
- Termistör:** Sıcaklık izleme amacıyla kullanılır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Başlıca Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde gerçek zamanlı batarya yönetim sistemleriyle ilgili yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu kapsamda, tez çalışmasının ana konusu olan gerçek zamanlı batarya yönetim sistemlerini içeren çalışmalar ayrı ayrı incelenmiştir.

(Baykal, 2013)'de BYS'nin sahip olması gereken parametreler araştırılmış ve lityum polimer bataryaların batarya yönetim sistemi tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada hücre gerilimleri ve sıcaklık değerleri bilgisayar yazılımı ile gözlemlenmiştir.

(Andrea, 2010)'da BYS'ler detaylı bir şekilde incelenmiştir. BYS'nin yapısından tasarımına kadar olan geçen bütün süreç ele alınmış ve önemli teknik konular hakkında bilgiler verilmiştir. Uygulamalar için hangi yöntemlerin daha kesin sonuçlar vereceği üzerine incelemeler yapılmıştır.

(Soydaş, 2015)'te BYS sistemlerinde kullanılan dengeleme yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemler kullanılarak aktif ve pasif dengeleme ile ilgili farklı tasarımlar sunulmuştur.

(Turgut, 2018)'de li-ion batarya hücreleri için BYS geliştirilmiştir. Bu sistemde her batarya paketinin sıcaklık ve gerilim değerleri CAN haberleşme protokolü üzerinden ana karta gönderilmiştir. Ana kart üzerinden elde edilen bilgilerle gerçek zamanlı SoC değeri hesaplanmıştır.

(Gül, 2018)'de 12 adet batarya hücresinden oluşan modüler bir BYS tasarlanmıştır. Tasarlanan anakart ve uydu kart ile haberleşmeyi SPI haberleşme yöntemi ile sağlamıştır.

(Liu, 2019)'da batarya paketleme yöntemleri hakkında araştırma yapılmıştır. Elektrikli araçlarda kullanılan en son batarya türleri ve bunları hangi yazılım teknolojileri ve batarya yönetim sistemleri ile kullanıldıklarının araştırması yapılmıştır.

(Serinbaş, 2023)'te elektrikli araçlar için yüksek doğruluklu şarj kestirimi sunan bir yönetim sistemi tasarlanmıştır. Batarya yönetim sisteminin en önemli parametrelerinden biri olan şarj durumu kestirimi üzerine derinlemesine araştırma yapılmıştır. Genişletilmiş kalman filtresi kullanarak SoC kestirimi simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.

(Turgüt, 2018)'de batarya hücrelerine modül bağlayarak hücre gerilimleri, sıcaklık gibi parametreler gerçek zamanlı olarak takip edilmiş ve hücre dengeleme sağlanmıştır. Ölçülen veriler CAN haberleşme protokolü ile ana modüle gönderilmiştir. Dengeleme işleminde ise dengeleme akımını ayarlamak için PWM doluluk oranının bulanık mantık yöntemi ile hassas bir şekilde ayarlandığı bir sistem tasarlanmıştır.

(Soydaş, 2015)'te lityum tabanlı batarya yönetim sisteminde kullanılan hücre dengeleme yöntemlerinden karşılaştırmalı olarak bahsedilmiştir. Tasarımda seri bağlı batarya hücrelerinin pasif dengeleme yöntemiyle dengelemesi sağlanmıştır. Mikrodenetleyici kullanarak elde edilen verileri Can-Bus haberleşme protokolü ile sağlamıştır.

(Kılıç, 2016)'da CAN protokolü haberleşmeli kurduğu BMS tasarımında LiFePO₄ bataryaları kullanılmıştır. Ana denetleyici olarak STM32F407VGT6 mikrodenetleyici kartı kullanmış ve ana kart / diğer çevre birimleri ile haberleşmenin nasıl sağlanacağından bahsedilmiştir.

(Karadeniz, 2017)'de li-ion pillerin teknik ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Batarya dengeleme sistemleri hakkında bilgi verilmiş ve batarya yönetim sistemi topolojileri karşılaştırılmıştır. Sıcaklık, akım, gerilim sensörleri ile alınan veriler slave modüller ile ana mikrodenetleyiciye göndermiştir.

(Baygüneş, 2019)'da yapılan çalışmada li-ion bataryalar için kullanılacak bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Pasif dengeleme sistemi kullanılarak 20 adet seri batarya hücrelerinin aşırı gerilim, düşük gerilim ve sıcaklık koruması olan bir tasarım yapılmıştır. Pasif dengeleme sisteminin aktif dengeleme sistemine göre verimsiz olduğu, maliyet ve basitlik açısından ideal olabileceği vurgulanmıştır.

(İçöz, 2022)'de günümüzde kullanılan enerji depolama sistemleri ile ilgili çalışma yapılmış ve lityum temelli pillerin kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Şarj, deşarj, nominal çalışma ve batarya koruma modu gibi farklı çalışma modları ile pillerin güvenli çalışması sağlanmış ve bu parametrelerin değerleri görsel arayüz kullanılarak izlenmiştir. Bu çalışmada SoC tahmini için Coulomb sayma yöntemi ve Kalman filtresi ayrı ayrı kullanılmış ve sonuçları sunulmuştur.

(Arslan, 2024)'te elektrikli araçlarda kablolu ve kablosuz şarj yöntemleri hakkında derinlemesine araştırma yapılmıştır. İki yöntemin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları, kablosuz şarj teknikleri ve kablolu şarj teknikleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Elektrikli araçlarda kullanılan şarj modları hakkında detaylı bilgiler vermiş ve şarj işleminin başlaması için araç ile şarj istasyonu arasında haberleşmeyi sağlayan yöntemlerden CAN-Bus ve PLC protokolleri hakkında bilgiler sunulmuştur.

3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

3.1 Hücre Dengeleme Yöntemi

Batarya yönetim sistemi tasarlanırken hücre dengeleme için aktif veya pasif dengeleme yöntemlerinden biri kullanılır. Daha önceki bölümlerde dengeleme sistemlerinden bahsedilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında pasif dengeleme yöntemi kullanılmıştır. Bunun yanı sıra batarya yönetim sistemi ile entegre edilmiş batarya koruma devresi tasarlanmıştır; yüksek gerilim kontrolü, düşük gerilim kontrolü, yüksek akım koruması ve yüksek sıcaklık koruması gibi önlemler ile hem koruma hem de yönetim görevleri tek bir kontrol kartı üzerinde toplanmıştır.

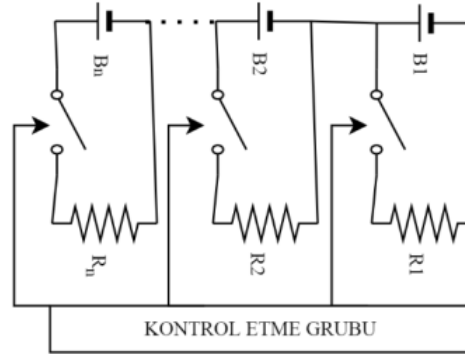
Tablo 3.1’de pasif dengeleme sisteminin aktif dengeleme sistemine göre olan avantaj ve dezavantajları yer almaktadır.

Tablo 3.1: Pasif ve aktif dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması (Aldoğan 2012)

Pasif Dengeleme yöntemi	Aktif Dengeleme Yöntemi
Az sayıda elektronik devre elemanı ile basit tasarıma sahiptir.	Çok sayıda kontrol ve anahtarlama devre elemanı ile karmaşık yapıya sahiptir.
Enerji fazlasını ısıya dönüştürür sistemin ısınmasına ve enerji kaybına neden olur.	Enerji fazlasını diğer bataryalarda depolayarak enerji kaybını önler.
Maliyet açısından avantajlıdır.	Maliyeti pasif dengeleme yöntemine göre fazladır.
Uyku modunda harcadığı enerji 0 mW kadardır.	Uyku modunda 50mW kadar daha fazla enerji harcar.
Düşük akım transferi gerçekleştiğinden dengeleme işlemi süresi daha uzundur.	Yüksek akım transferi gerçekleştiğinden dengeleme işlemi süresi daha kısadır.

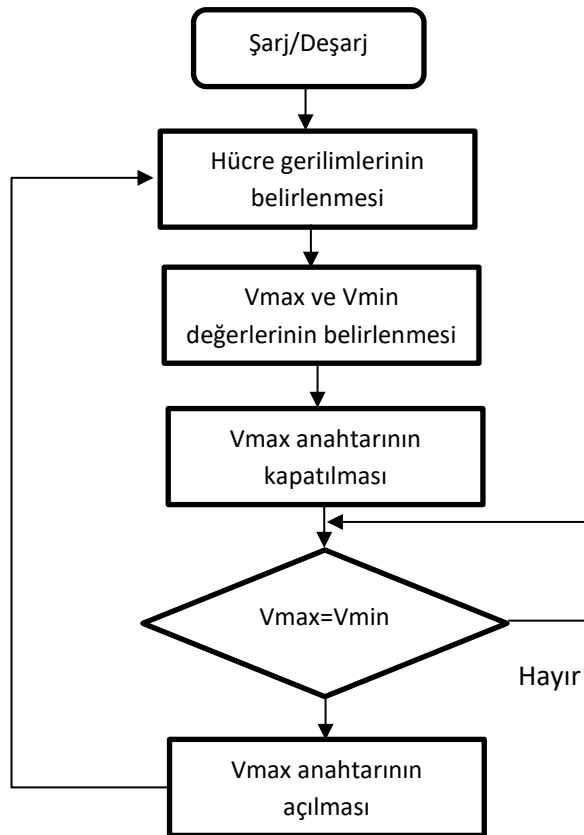
Tasarlanan batarya yönetim sisteminde pasif dengeleme sisteminin kullanılmasının nedeni hem tasarım kolaylığı hem de maliyet açısından daha avantajlı olmasıdır.

Pasif dengeleme sisteminde şarj sırasında kapasitesi dolan pil hücrelerinde oluşan fazla enerji dengeleme dirençleri üstünde harcanır. Bu sistem hem ucuz hem de basittir.



Şekil 3.1. Direnç ile pasif dengeleme (Balıkcı ve diğ. 2012)

Anahtarlama elemanları ile dirençler sürekli devreye girip çıkarak dengeleme sağlanır. İyi bir algoritma ile sistemin verimliliği üst düzeye çıkartılabilir. Şekil 3.2’de pasif dengeleme sisteminin algoritmik şeması verilmiştir.



Şekil 3.2. Direnç ile pasif dengeleme yöntemi algoritması

3.2 Şarj Durumu Kestirimi Yöntemleri

Li-ion bataryaların kimyasal yapısı çevrim sayısı arttıkça bozulur bu da kapasite kayıplarına neden olur. Ayrıca gerilim, akım ve sıcaklık gibi doğrusal olmayan parametreler li-ion bataryaların ölçümlerinde tam doğru sonuçlar vermemektedir. Kapasitenin doğru hesaplanabilmesi için bu tür zorlukların aşılması gerekir.

$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{Q(n)} \quad (3.1)$$

Şarj durumu kestirim yöntemlerinden bazıları açık devre gerilim yöntemi, yük sayma (Coulomb) yöntemi ve Kalman filtresi olarak sıralanır (Zhang 2020).

3.2.1 Açık Devre Gerilimi

Bu yöntemde pil hücrelerinin gerilimlerinin sürekli ölçülmesi gerekmektedir. Açık devre geriliminin değerinin ne olduğunun bulunması için bataryanın şarj ve deşarj sonrasında yüksüz bir şekilde bir süre beklenilmesi gerekmektedir. Buda dinamik sistemlerde zaman kaybına yol açmaktadır. Açık devre gerilimi yöntemi akım ve gerilim sensörlerinin neden olduğu gürültülerden dolayı da doğru sonuçlar vermediğinden dinamik sistemlerin tercihi değildir (Xiong ve diğ. 2017).

Bu yöntemde batarya nominal akım değerinde belli bir süre şarj veya deşarj olur. Daha sonra batarya şarj devresi ve yükten ayrılarak bir süre beklenir. Daha sonra batarya uçlarında gerilim değeri ölçülür. Bu ölçülen gerilim değerine OCV (açık devre gerilimi) denir. Eşitlik 7'de şarj durumu SoC, açık devre gerilimi V_{oc} , örnekleme zamanı ise t ile gösterilmiştir.

$$SoC = \alpha_4 V_{oc}^2 + \alpha_3 t^2 + \alpha_2 V_{oc} + \alpha_1 t + \alpha_0 \quad (3.2)$$

Bu yöntem laboratuvar uygulamalarında kullanılsa da uygulamalarda tercih edilmemektedir. Bunun nedeni bataryayı yükten ve şarj devresinden ayırmak ve bir süre beklemenin zaman kaybına yol açmasıdır.

3.2.2 Yük Sayma (Coulomb) Yöntemi

Yük sayma yöntemi ile batarya kapasitesi belirlenir. Kapasite, bataryaya giren ve çıkan akımlar ölçülerek belirlenir. SoC değeri bu akımlar toplanarak kestirimde bulunulur. Bu yöntem şöyle tanımlanır:

$$SoC_{(t)} = SoC_{(t-1)} - \frac{1}{C_n} \int_0^t \eta I_b dt \quad (3.3)$$

Burada t anındaki bataryanın şarj durumu $SoC_{(t)}$ ile tanımlanmıştır. $SoC_{(t-1)}$ ise başlangıçtaki şarj durumudur. C_n Bataryanın maksimum depolama alanı, I_b ise bataryaya giren ve çıkan akım değeri iken η ise coulomb katsayısı olarak belirlenmiştir (Topan 2016). Bu yöntemin en önemli dezavantajı ise sistemin başlangıçtaki şarj durumunun bilinmesi gerekmektedir.

3.2.3 Kalman Filtresi

Kalman filtresi, bir sistemin durumunu (örneğin, bataryanın şarj durumu) tahmin etmek ve bu tahminleri gözlemlerle (ölçümlerle) birleştirerek daha doğru bir tahmin yapmak için kullanılan matematiksel bir algoritmadır. Bu algoritma, özellikle gürültülü ve hatalı verilere dayanarak doğru tahminler yapabilmesiyle ünlüdür.

Kalman filtresi, zaman içinde sistemin dinamiklerini modelleyerek önceki verilerle güncellenmiş tahminler yapar. Bu sayede sistemin gerçek durumu, hatalı veya eksik ölçümlerden etkilenmeden izlenebilir. Kalman filtresi, geçmiş verilere ve ölçüm sonuçlarına bağlı olarak bir sistemin anlık ve gelecekteki durumunun bilinmesi istenen sistemlerde kullanılır.

Uyarlanabilir sistemler, yapay zekâ yardımıyla bataryalardaki değişimleri algılayarak doğrusal olmayan SoC değerleri kestirebilmek için kendi kendilerini değişen durumlara göre tekrar düzenleyip tasarlayabilir (Fu ve diğ. 2023)

Destek vektör makinesi yönteminde bataryanın t anındaki SoC değeri ile akım-gerilim değerleri kıyaslanarak bazı parametreler bulunur. Bulunan bu parametreler bataryanın SoC değerini kestirmek için kullanılır (Hansen T., Wang C.J. 2005).

Bulanık mantık yönteminde batarya üzerinde yapılan deneyler sonucu ön işleme parametresi toplanır. Minimum ve maksimum gerilim değerleri dikkate alınarak bazı kurallar belirlenerek SoC kestirimi yapılır (Singh ve diğ. 2005). Yapay sinir ağları yönteminde diğer yöntemlerde olduğu gibi akım, gerilim, sıcaklık ve SoC değerleri laboratuvar ortamında ölçülür ve aralarındaki ilişki belirlenir ve bu parametreler ile SoC değeri kestirilir (Linda ve diğ. 2009).

Kalman filtresi yöntemi çeşitli matematiksel modeller kullanarak direk ölçülemeyen durumları giriş-çıkış parametrelerini kullanır. Kalman filtresinin en temel iki denklemi aşağıdaki Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'da verilmiştir.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (3.4)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + C \quad (3.5)$$

Eşitlik 9'daki denklemde x_k , bir önceki durum değerinin (x_{k-1}), u_k kontrol sinyali ile w_{k-1} işlem gürültüsü eklenerek bulunur. Eşitlik 10'daki y_k değeri ise ölçülebilen fakat doğruluğundan emin olunamayan bir değer olup x_k değeri ile v_k ölçüm gürültüsünün lineer bir kombinasyonu olduğundan denkleme eklenmiştir. Genellikle gürültü değeri yok sayılır ya da sabit bir katsayı alınır. Kalman filtresi aşağıdaki adımları takip eder:

Önceki durum tahmini:

$$x_k^- = Ax_{k-1}^- + Bu_k \quad (3.6)$$

Hata kovaryansının tahmini:

$$P_k^- = AP_{k-1} + A^T + Q \quad (3.7)$$

Kalman kazancının hesaplanması:

$$K_k = P_k^- C^T (CP_k^- C^T + R)^{-1} \quad (3.8)$$

Ölçülen değer ile kestirimin güncellenmesi:

$$x_k = x_k^- + K_k(y_k - Cx_k^- - Du_k) \quad (3.9)$$

Hata kovaryansının güncellenmesi:

$$P_k = (I - K_k C)P_k^- \quad (3.10)$$

Denklemlerdeki Q ve R değerleri bazı yöntemlerle elde edilen gürültü değerleridir (Çayıroğlu İ., 2012).

3.3 Güvenlik ve Koruma Yöntemleri

Batarya yönetim sistemlerinde dikkat edilmesi gereken en önemli şey bataryaların ısınıp alev alması ile sonuçlanan istenmeyen durumlardır. Bunu engellemek için bataryanın akım, gerilim ve sıcaklık değerlerinin sürekli kontrol edilmesi gerekir. Yüksek akım ve gerilim ısınmalara dolayısıyla bataryanın alev almasına neden olabilir.

3.3.1 Yüksek ve Düşük Gerilim Koruması

Li-ion pil hücrelerinin güvenli bölge aralığı 4.2 V ile 2.7 V arasındaki voltaj değerleridir. Şarj ve deşarj işlemleri esnasında batarya hücre gerilimlerinin sürekli ölçümü batarya hücrelerini güvenli bölgede kalmasını sağlamak, hücreler arası gerilim farklılıklarını tespit etmek ve kalan kapasiteyi tespit etmek için önemlidir.

Batarya şarj esnasında okunan gerilim değeri şarj gerilim limiti olan 4.2 V değerine ulaştığında şarj işlemi sonlandırılmaz. Çünkü batarya geriliminin maksimum değere ulaşması o bataryanın tamamen şarj olduğu anlamına gelmez. Dolayısıyla şarj akımı belirli bir limitin altına inene kadar şarj işlemine devam edilir. Deşarj işlemi sırasında ise herhangi bir hücreden okunan gerilim değeri deşarj sonlandırma gerilimi olan 2.7 V değerine geldiğinde yük bataryadan ayrılır. Eğer deşarj devam ederse hücrenin azami kapasite değeri azalır veya tamamen bitebilir.

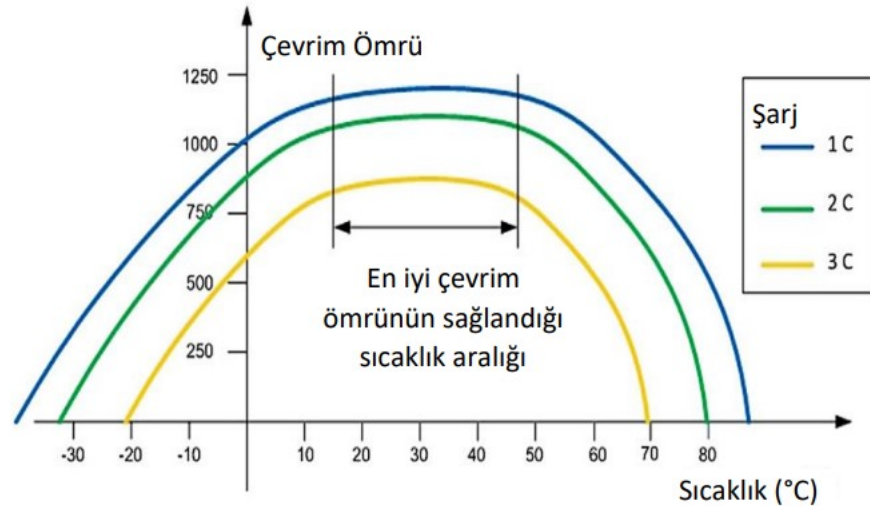
3.3.2 Yüksek Akım Koruması

Tez çalışmasında kullanılan bataryalar 13S-4P diziliminden oluşmuştur. $2.6A \times 4 = 10.4A$ akım ve $3.7V \times 13 = 48.1V$ gerilim değerlerine sahiptir. Orion 3.7V 2600mA 18650 pil hücresinin önerilen standart şarj akımı 0.2C (520mA) ve maksimum şarj akımı 1C (2600mA)'dir. Bu değerlerin dışına çıkılması durumunda bataryalar ısınabilir, patlayabilir veya kullanım ömürleri azalabilir.

Şarj ve deşarj işlemi sırasında sürekli ölçüm yapılarak akım değerleri güvenli bölgenin dışına çıktığında BYS devreye girerek şarj cihazını veya yükü batarya grubundan ayırmalıdır.

3.3.3 Yüksek Sıcaklık Koruması

Bataryaların aşırı ısınması hücre içi kimyasal bağların kopmasına neden olabilir. Böyle bir durum batarya ömrünün azalmasına, bozulmasına veya patlamasına neden olabilir. Orion 18650 piller için katalog değerlerine bakıldığında $-20^{\circ}C$ ile $60^{\circ}C$ arasındaki sıcaklık değerleri için şarj işlemi uygundur. Bu aralığın dışına çıkılırsa pilde termal kaçak oluşmaktadır.



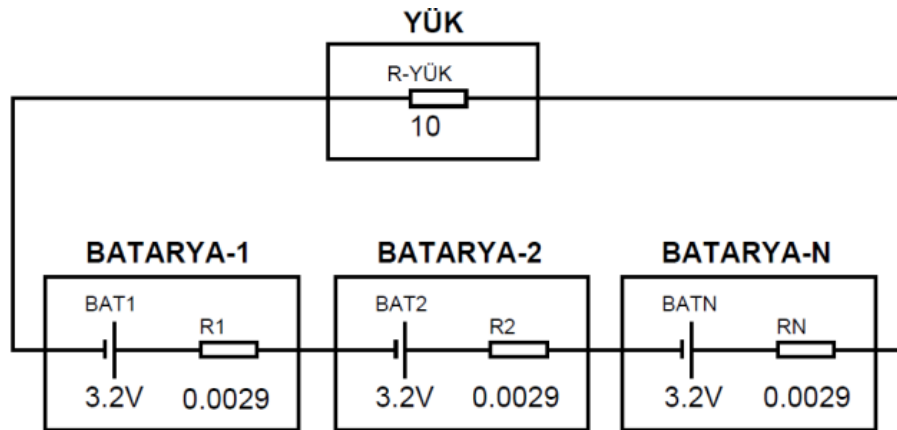
Şekil 3.3: Pillerin farklı C oranlarında ve sıcaklıklarda çevrim ömürleri (Rezvanizani 2014)

Şekil 3.3'te pillerin çevrim ömürlerinin en fazla olması için mavi ile işaretli olan 1C oranında şarj edilmeleri gerektiği grafikte görülmektedir. Pil çevrim ömrünün 2C ve 3C oranlarında ise azaldığı görülmektedir (Rezvanizani 2014).

Batarya sıcaklıkları sürekli okunmalı kritik sıcaklık değerlerine ulaşıldığında kullanıcı uyarılmalı ve şarj ünitesini veya yükü bataryada ayırmalı, soğutucu sistemler varsa onları devreye almalıdır.

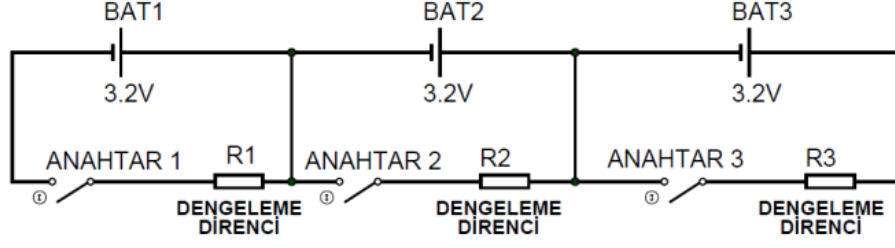
3.3.4 Gerilim Dengeleme İşlemi

Dikkat edilmesi gereken önemli konulardan biri de hücre gerilim dengeleme işlemidir. Seri bağlı bataryalarda zamanla gerilim seviyelerinde değişiklik olur. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere batarya iç direnci her bataryada farklılık gösterir. Bu durum şarj ve deşarj sırasında bataryalar arası gerilim farklılıklarına sebep olur.



Şekil 3.4: Batarya hücresi eş değer devresi

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi anahtarlama elemanları ile gerilimi fazla olan batarya hücresinin gerilimi direnç üzerinden harcanır. Örneğin Bat₁ hücresinin gerilimi diğer hücrelerden fazlaysa anahtar-1 kapatılarak fazla enerji R₁ direnci üzerinde harcanır. Bu işlem hücreler arası gerilim seviyeleri eşitleninceye kadar pasif dengeleme sistemi çalışmaya devam eder.



Şekil 3.5: Pasif gerilim dengeleme metodu

Batarya hücre gerilim değerleri sürekli okunmalı kritik gerilim değerlerine ulaşıldığında batarya yönetim sistemi anahtarlama elemanlarını devreye sokarak batarya gerilimleri dengelenmelidir.

4. MATERYAL VE METOD

4.1 Bataryada Kullanılan Li-Ion Pil

Bu tez çalışmasında Orion firmasının ürettiği Orion18650 li-ion pil kullanılmaktadır. Bu pil 3.7V nominal gerilime ve 2600mAh (0.5C Rate) kapasiteye sahiptir. C Rate, pil kapasitesinin bir ölçüsüdür. Boş bir pil 1C'de 1 saatte tam şarj ya da deşarj olur. 0.5C ise 2 saatte, 0.25C ise 4 saate tam şarj ya da deşarj olur. Bu pillerin ortalama döngü ömrü ise yaklaşık 500 çevrimdir. Batarya paketinde kullanılan pil hücrelerine ait resim şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1: Orion 18650 3.7V 2600mAh şarj edilebilir li-ion pil (pilsitesi.com 2024)

Batarya paketi 13S-4P bağlantı şekli olan 13 tane seri bağlanmış 4'lü paralel pil grubundan oluşmuştur. Toplam 52 adet pil kullanılmıştır. Bu batarya paketi 10.4A nominal akım ve 48.1V nominal gerilim değerlerine ve 500 Watt güce sahiptir. Bataryanın gruplandırılmış görseli ise şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2: Batarya paketi

Batarya hücresinin ve paketinin teknik verileri Tablo 4.1’deverilmektedir.

Tablo 4.1: Batarya hücresi ve batarya paketinin teknik özellikleri

Özellikleri	Tek Hücre	Batarya Paketi
Kapasite	2.6 Ah	10.4 Ah
Nominal gerilim	3.7 V	48.1 V
Şarj gerilimi	4.2 V	54.6 V
Deşarj Kesme gerilimi	3 V	39 V
Standart Şarj akımı	0.44 Ah	1.76 Ah
Enerji yoğunluğu	8.14 Wh	500.24 Wh
C oranı	5 C	5 C
Ağırlık	45.5 gr.	2366 gr.
Çalışma şarj sıcaklığı	-20 °C ile 60 °C arasında	
Depolama sıcaklığı	0 °C ile 35 °C arasında	
Çevrim ömrü	500	

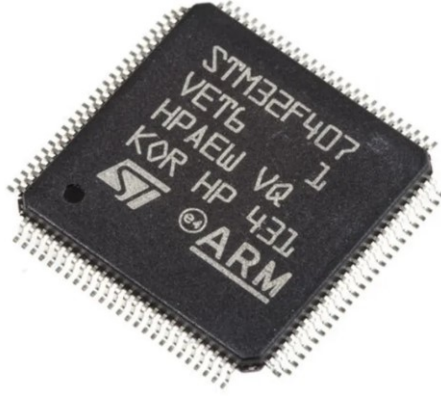
4.2 Kullanılan Mikrodenetleyici

Bu çalışmada, ARM tabanlı 32-bit Cortex-M4 CPU ve FPU’ya sahip olan STM32F407VGT6 serisi mikrodenetleyici tercih edilmiştir. Bu mikrodenetleyici,

düşük güç tüketimi ile birlikte yüksek performans sağlamayı hedeflemektedir. LQFP100 paket yapısına sahip olan bu mikrodnetleyicinin görünümü Şekil 4.3'te sunulmuştur. İşlemci 1 MB program hafızası ve 192 KB SRAM kapasitesine ek olarak, 168 MHz'e kadar çalışma frekansı sunmaktadır. Dahili olarak birçok modül barındıran STM32F407'nin bazı temel özellikleri ise aşağıda verilmiştir (STMicroelectronics 2024).

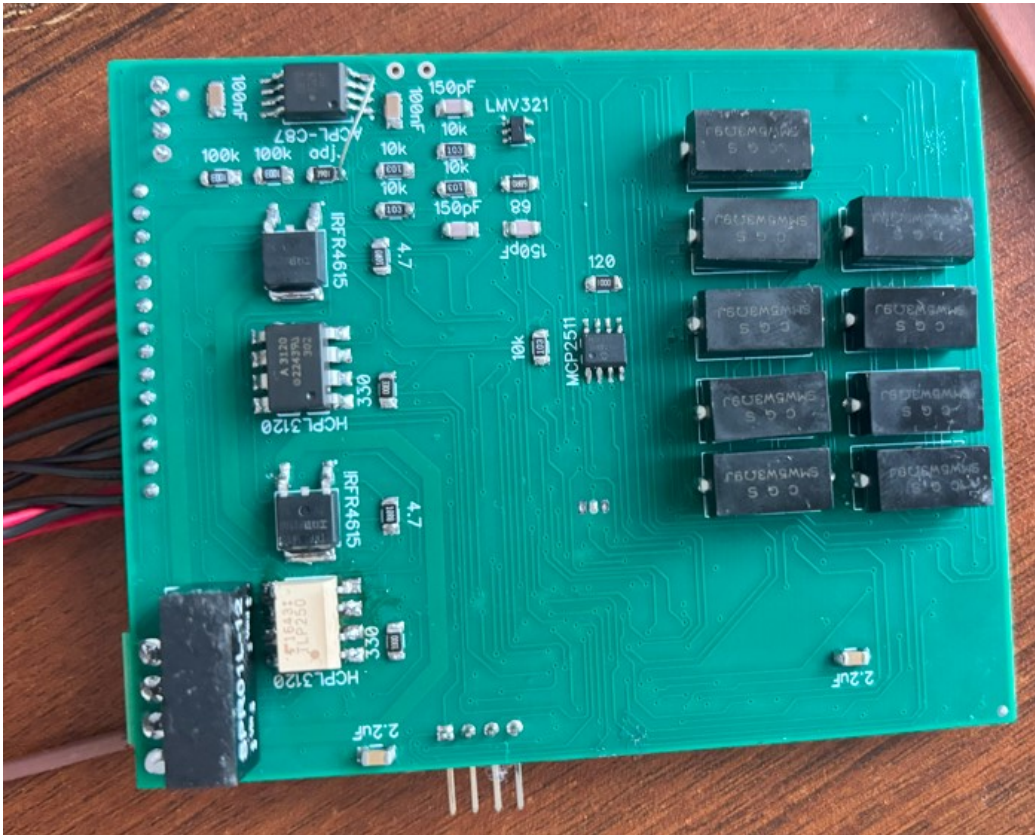
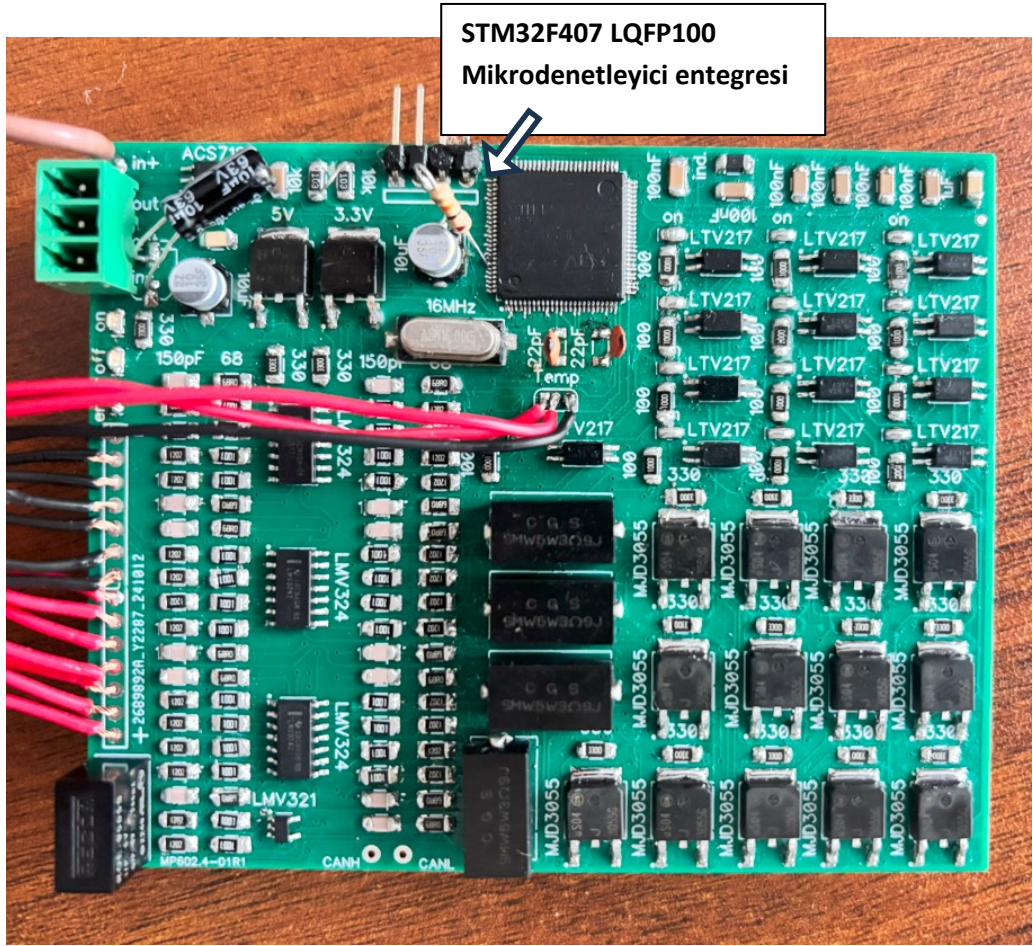
Temel Özellikleri:

- Çalışma frekansı, 168 MHz.
- Flash bellek, 512 KB – 1 MB.
- RAM, 192 KB.
- GPIO, 100'e kadar genel amaçlı giriş.
- Voltajı aralığı, 1.8 V – 3.6 V.
- Giriş/Çıkış portları, 5 V toleranslı bazı GPIO pinleri.
- İletişim arayüzleri, UART, SPI, I2C, CAN, USB OTG, ethernet.
- ADC, 3x12-bit ADC 16 kanala kadar.
- DAC, 2x12-bit DAC.
- Timer, 17 adet timer (16-32 bit).



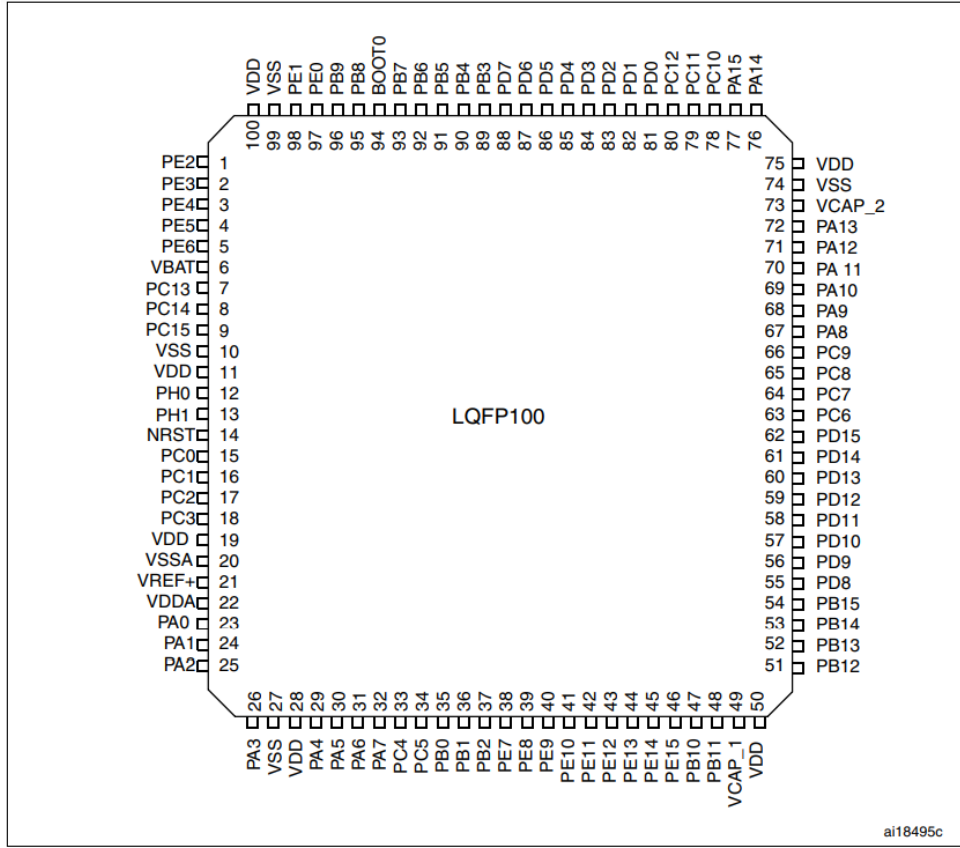
Şekil 4.3: STM32F407VGT6 LQFP100 paketi (STMicroelectronics 2024)

Bu tez çalışmasında STM32F407VGT6 mikrodnetleyicinin kullanıldığı şekil 4.4'teki 4 katmanlı BMS kartı tasarlanmıştır.



Şekil 4.4: Batarya yönetim sistemi kartı

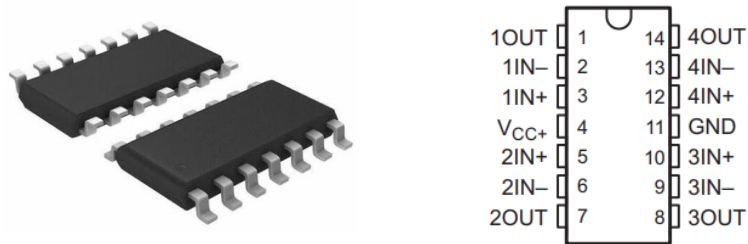
Şekil 4.5'te mikrodenetleyicinin pin çıkışları yer almaktadır.



Şekil 4.5: STM32F407 LQFP100 pin çıkışları (STMicroelectronics 2024)

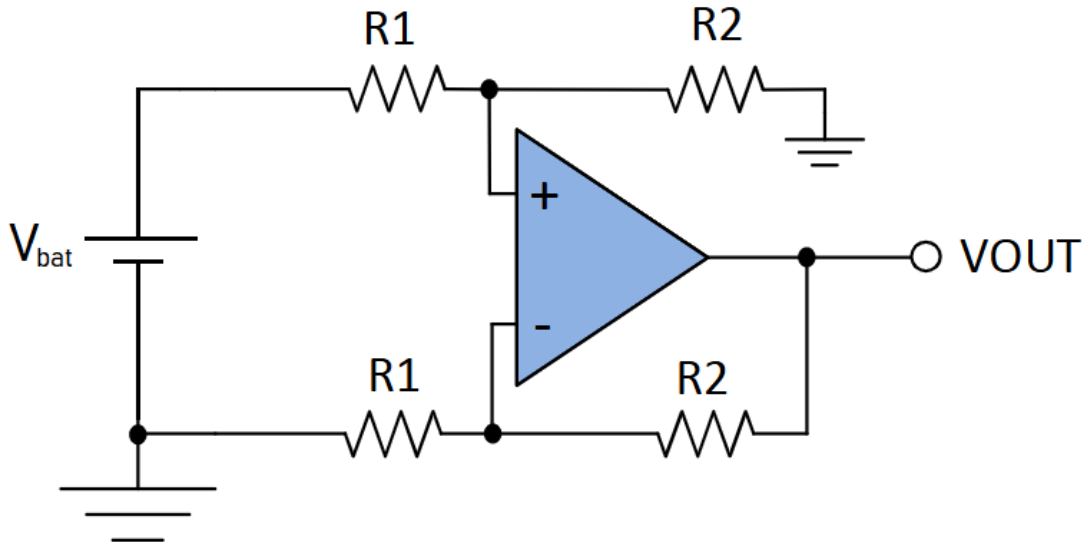
4.3 LMV324 Op-Amp Entegresi

Bu tasarımda şekil 4.6'da gösterilen LMV324 opamp entegresi kullanılmış olup, SMD SOIC-14 paketinde sunulmakta ve bünyesinde 4 adet amplifikatör birimi barındırmaktadır. $1V/\mu s$ voltaj tepki hızına sahip olan bu entegre, 1MHz bant genişliğiyle etkili bir şekilde çalışabilmektedir.



Şekil 4.6: Opamp ve pin çıkışları (direnç.net 2024)

Mikrodenetleyicinin algoritmayı çalıştırabilmesi için ADC girişlerinden okunacak gerilim değerlerine gereksinim duyulmaktadır. Mikrodenetleyicinin giriş voltajı en fazla 3.3 V olduğu için seri bağlı batarya gruplarının pil gerilimleri ADC girişine doğrudan uygulanamaz. Pil gerilimlerinin okunabilmesi için gerilim bölücü devreler ya da fark alıcı opamp devreleri kullanılabilir. Gerilim bölücü devreler verimsiz türlerdir ve genellikle fark alıcı opamp devreleri tercih edilmektedir. Örnek bir batarya hücrelerinin gerilim okunması için opamp devre tasarımı şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7: Opamp ile yapılmış batarya gerilimi ölçüm devresi

Bir bataryanın (V_{bat+} ve V_{bat-}) gerilimleri arasındaki farkı ($V_{diff} = V_{bat+} - V_{bat-}$) ölçmek için Şekil 4.7’deki diferansiyel amplifikatörün formülü:

$$V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot (V_{bat+} - V_{bat-}) \quad (4.1)$$

olarak tanımlanır. Burada:

R_2 : Geri besleme direnci

R_1 : Giriş direnci

Devrenin çalışma prensibi, LMV324 girişler (V_{bat+} ve V_{bat-}) arasındaki gerilim farkını algılar. Direnç oranları aynı ise ($\frac{R_2}{R_1} = 1$), çıkış gerilimi doğrudan

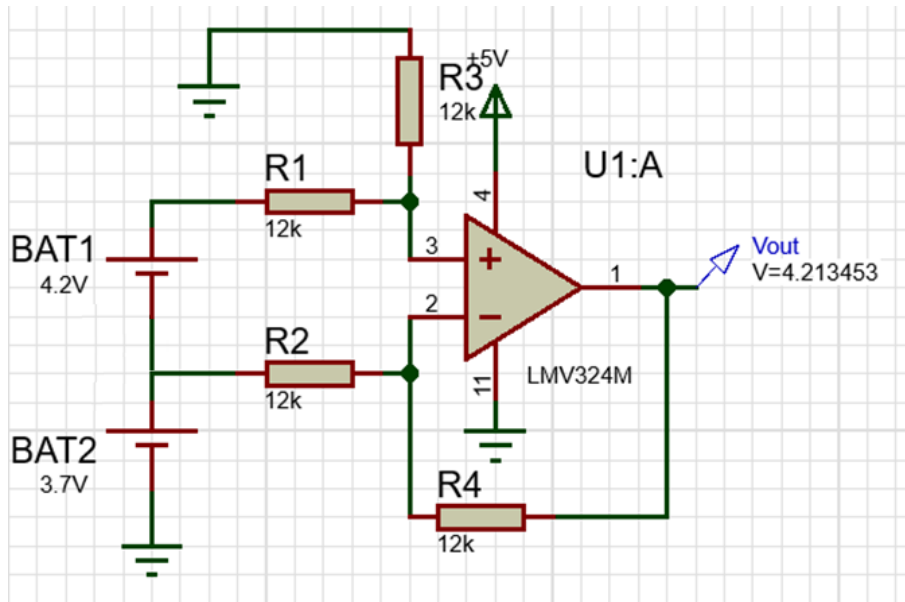
$V_{bat+} - V_{bat-}$ 'yi verir. Direnç değeri değışirse, kazanç $G = R_2/R_1$ ile hesaplanır ve çıkış şu şekilde olur:

$$V_{out} = G \cdot (V_{bat+} - V_{bat-}) \quad (4.2)$$

Ölçüm devresi tasarlanırken dikkat edilmesi gerekenler ise başlıca şu şekildedir:

- Bataryalardan alınan gerilimlerin LMV324'ün giriş voltaj aralığına uygun olacak şekilde ayarlanması gerekmektedir.
- Eğer direnç oranı $R_2/R_1=1$ olarak ayarlanırsa, çıkış gerilimi doğrudan pilin uçları arasındaki potansiyel farkı verir.
- Daha hassas ölçüm için kazanç ($G>1$) arttırılabilir.
- Dirençler yüksek doğrulukta seçilmelidir, aksi halde sonuçlar hatalı olabilir.

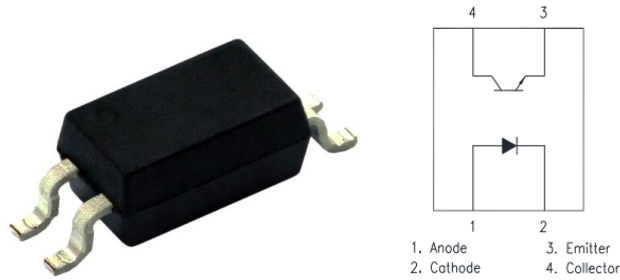
Proteus ortamında kurulmuş ve bir pilin gerilimini ölçen opamp devresi şekil 4.8'de verilmiştir. $R_2/R_1=1$ olduğu için pil gerilimi doğrudan opamp çıkış gerilimine eşit olmaktadır.



Şekil 4.8: Fark alma devresi

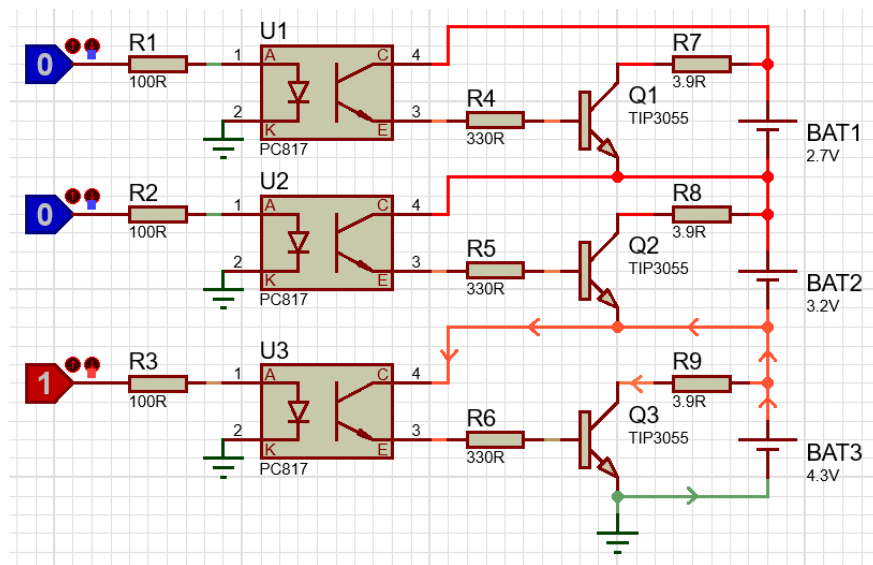
4.4 LTV-217 Optokuplör

Optokuplör (optik izolatör), bir devredeki iki farklı elektriksel kısmı birbirinden yalıtım için kullanılan bir elektronik bileşendir. Elektriksel sinyali optik bir sinyale dönüştürerek ve ardından bunu tekrar elektriksel bir sinyale çevirerek çalışır. Bu sayede iki devre arasında doğrudan elektriksel bağlantı olmadan veri iletimi sağlanır. Genel bir optokuplör görseli ve onun iç yapısı şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9: Optokuplör ve pin yapısı (direnc.net 2024)

Şekil 4.10’da optokuplöre gelen sinyal ile transistörler kontrol edilmektedir. Optokuplörün 1 numaralı bacağına mikrodenetleyiciden sinyal geldiğinde yani lojik 1 olduğunda optokuplör ilettime geçecektir. Bu durumda optokuplörün 3 ve 4 nolu bacağı kapalı bir anahtar gibi davranarak, bataryanın artı ucu transistörün base ucunu tetikleyecek ve ilettime geçirecektir. Bu durumda batarya direnç üzerinden deşarj olmaya başlayacaktır.

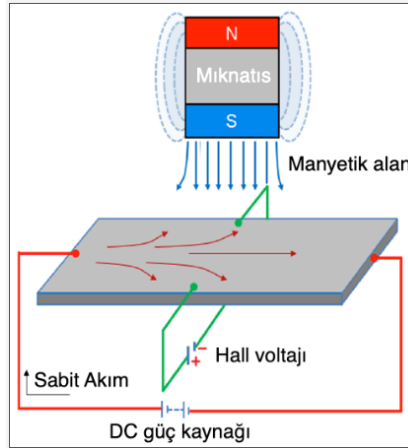


Şekil 4.10: Optokuplör ile transistör tetikleme devresi

Batarya yönetim sistemi tasarımında kullanılan transistörler BJT tipi akım kontrollü MJD3055 güç transistörleridir. NPN tipi bu transistörler base ucuna gelen pozitif sinyal ile ilettime geçmektedir.

4.5 Giriş Akımı Algılama Sensörü

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan ACS712 akım sensörü ile batarya girişindeki akım değerlerinin ölçümü yapılmıştır. Hem AC (alternatif akım) hem de DC (doğru akım) ölçümlerini yapabilme kapasitesine sahip olan bu sensör, genellikle mikrodenetleyici tabanlı sistemlerde kullanılır. ACS712, hassas bir Hall etkisi sensörü kullanarak akımın yönü ve büyüklüğü hakkında bilgi verir. Bir iletken üzerinden akım geçirildiğinde sağ el kuralına göre iletken cisme dik olarak bir manyetik alan uygulanırsa cismin diğer iki ucu arasında bir voltaj oluşur. Oluşan bu voltaja da Hall etkisi denir.



Şekil 4.11: Hall etkisi (electronics-tutorials.ws 2024)

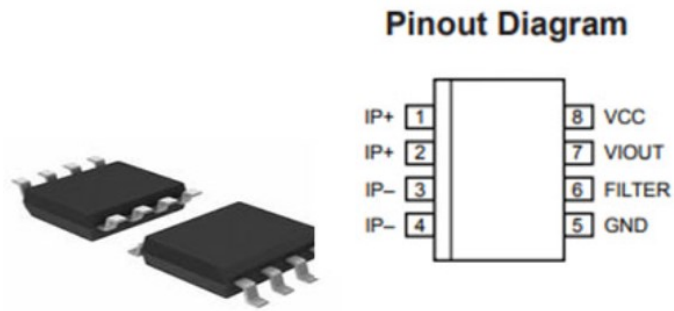
4.5.1 ACS712 Akım Sensörünün Özellikleri

- **Hassasiyet:** 100 mV/A, yani her bir amperlik akım için sensör çıkışında 100 mV'luk bir değişim olur.
- **Çalışma Gerilimi:** Genellikle 5V ile çalışır.
- **Çıkış Gerilimi:** ACS712'nin çıkış gerilimi, 0V ile çalışma gerilimi arasında değişen bir sinyaldir. Sensör 2.5V seviyesini 0 amperde sabit

bir çıkış gerilimi olarak verir ve bu gerilim, akımın yönüne göre artar veya azalır.

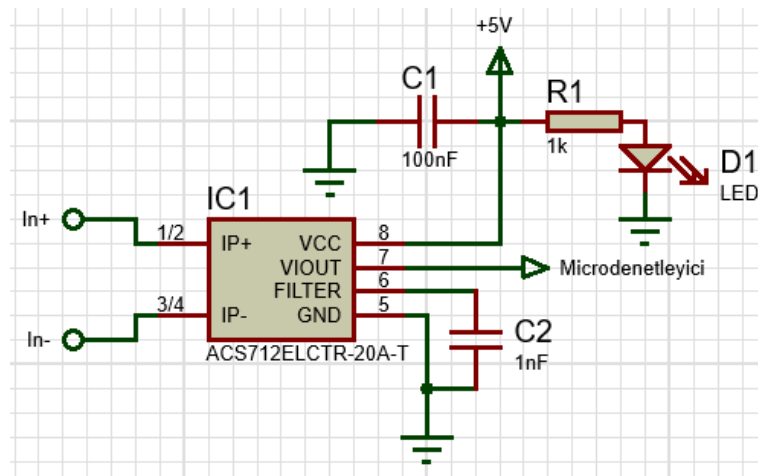
- **Akım Ölçüm Aralığı:** ACS712, $\pm 5A$, $\pm 20A$ veya $\pm 30A$ gibi farklı versiyonlara sahip olabilir. Bu, ölçebileceği maksimum akım miktarını belirler.

4.5.2 ACS712 Akım Sensörünün Devreye Bağlanması



Şekil 4.12. Akım sensörü ve pin yapısı (utmel.com 2024)

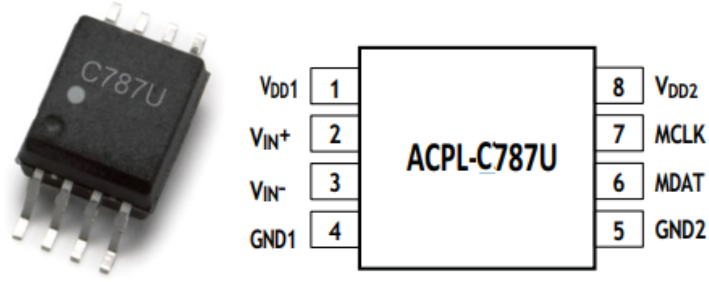
Genel bir ACS712 entegresi görseli ve pin diyagramı şekil 4.12’de verilmiştir. ACS712 ile akım hesabı yapılırken, datasheet verilerine bakıldığında her akım için farklı değer verdiği görülür. 5 Amperlik bir entegre için hassasiyet 185 mV/A, 20 amperlik için 100 mV/A ve 30 amperlik için 65 mV/A değerleri ürün katalogunda verilmiştir. Sensör üzerinden akım geçmediğinde 2.5 V çıkış vermektedir. Proteus ortamında akım sensörünün bağlantı şeması şekil 4.13’te verilmiştir.



Şekil 4.13: Akım sensörü devre şeması

4.6 Giriş Gerilimi Algılama Sensörü

Bu tez çalışmasında kullanılan ve şekil 4.14'te verilen ACPL-C87B entegresi bir gerilim algılama sensörüdür ve optik yalıtım (optokuplör) kullanarak yüksek gerilimli sistemleri mikrodenetleyiciler veya düşük gerilimli sistemlerle güvenli bir şekilde bağlamak için kullanılır. Bu sensör, genellikle gerilim izleme, koruma ve güç yönetimi uygulamalarında kullanılır.



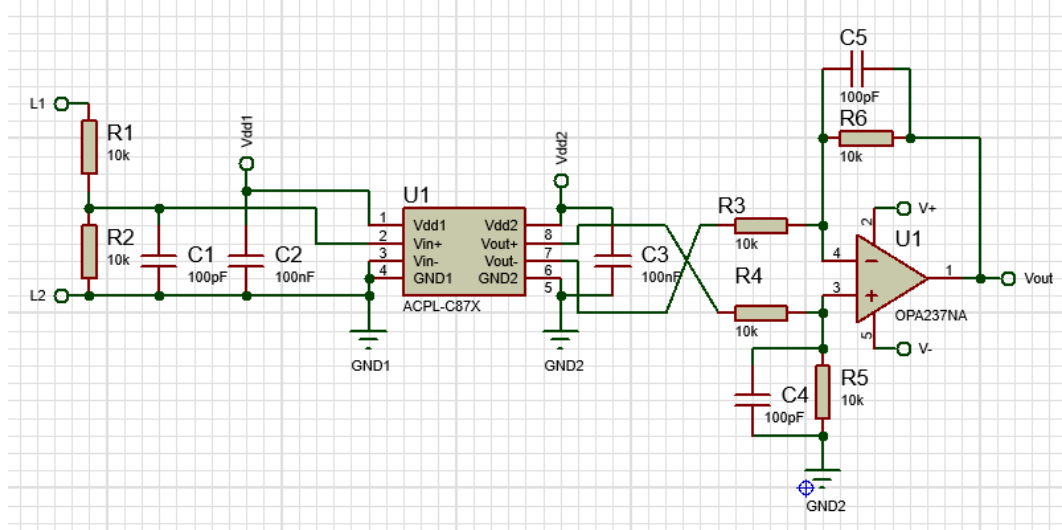
Şekil 4.14: Gerilim sensörü ve pin yapısı (broadcom.com2024)

4.6.1 ACPL-C87B Gerilim Sensörünün Özellikleri

- **Optik Yalıtım:** ACPL-C87B, düşük gerilimli devre ile yüksek gerilimli devre arasındaki elektriksel yalıtımı sağlar. Bu, mikrodenetleyiciler ve düşük voltajlı cihazlar için önemli bir güvenlik özelliğidir.
- **Çalışma Gerilimi:** 4V ile 5.5V arasında bir besleme gerilimi ile çalışır. Optokuplör, yüksek voltajdan düşük voltaja sinyal aktarımı sağlar.
- **Gerilim Algılama:** Genellikle 0V ile 250V arasındaki gerilimleri algılayabilir.
- **Hızlı Tepki:** Yüksek hızlı optik izleme yeteneğine sahiptir. Bu, gerilim değişimlerine hızlı tepki vermesini sağlar.
- **Çıkış Tipi:** Dijital çıkış verir. Yani, algıladığı gerilim seviyesini bir dijital sinyale dönüştürür ve genellikle bir mikrodenetleyicinin dijital girişine bağlanır.
- **Yalıtım Gücü:** Yüksek yalıtım kapasitesine sahip olup, sistemler arasında elektriksel güvenliği sağlar.

- **Hız ve Tepki Süresi:** Optokuplörün tepki süresi genellikle 100 μ s civarındadır, bu da gerilim değişikliklerine hızlı yanıt verebilmesini sağlar.

Proteus ortamında gerilim sensörünün bağlantı şeması şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15: Gerilim sensörü devre şeması

4.7 Sıcaklık Sensörü

Batarya paketinin sıcaklığını ölçmek için bu tez çalışmasında LM35 DZ sıcaklık sensörü olarak kullanılmıştır. Doğrudan sıcaklık ölçmek için kullanılabilen ve 25°C'de 0.5°C hassasiyete sahip bir devre elemanıdır. Bu sensör, ortam sıcaklığını bir analog voltaj çıkışı olarak sağlar ve her derece (°C) başına 10 mV (miliVolt) bir voltaj üretir. Çalışma voltajı 4 V – 30 V aralığındadır. Sıcaklık ölçüm aralığı -55°C ile +150°C'dir. Sadece analog çıkış verdiği için mikrodenetleyicinin ADC'sine ihtiyaç duyar.

4.8 BYS Baskı Devre Şeması, Katmanları ve 3D Görüntüsü

BYS kartının tüm bileşenleri (sıcaklık, akım, gerilim, batarya gerilimi okuma vb.) PCB kart çizilerek bir araya getirilmiştir. PCB çizimi için Diptrace programı kullanılmıştır. Türkçe dil desteği ve otomatik çok katmanlı PCB çizme özelliği sayesinde elektronik devre tasarımı hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez kapsamında PCB 4 katmanlı çizilmiş olup üst ve alt katmanlar sinyal katmanı olarak kullanılmaktadır. Ara katmanlardan ise birinci ara katman GND ve ikinci ara katman ise Vcc yani besleme katmanı olarak kullanılmıştır. Her bir katman bakır kalınlığı 1 oz seçilmiş olup ölçüleri 100mm x 100mm olarak tasarlanmıştır. Çizilen PCB'nin üst ve alt katmanlarına ait görseller şekil 4.18 (a) ve (b)'de sırası ile verilmiştir.

4 katmanlı PCB'nin avantajları, özellikle yüksek performanslı ve karmaşık devre tasarımlarında öne çıkar. 4 katmanlı PCB'nin 2 katmanlı PCB'ye göre önemli bazı avantajları şunlardır:

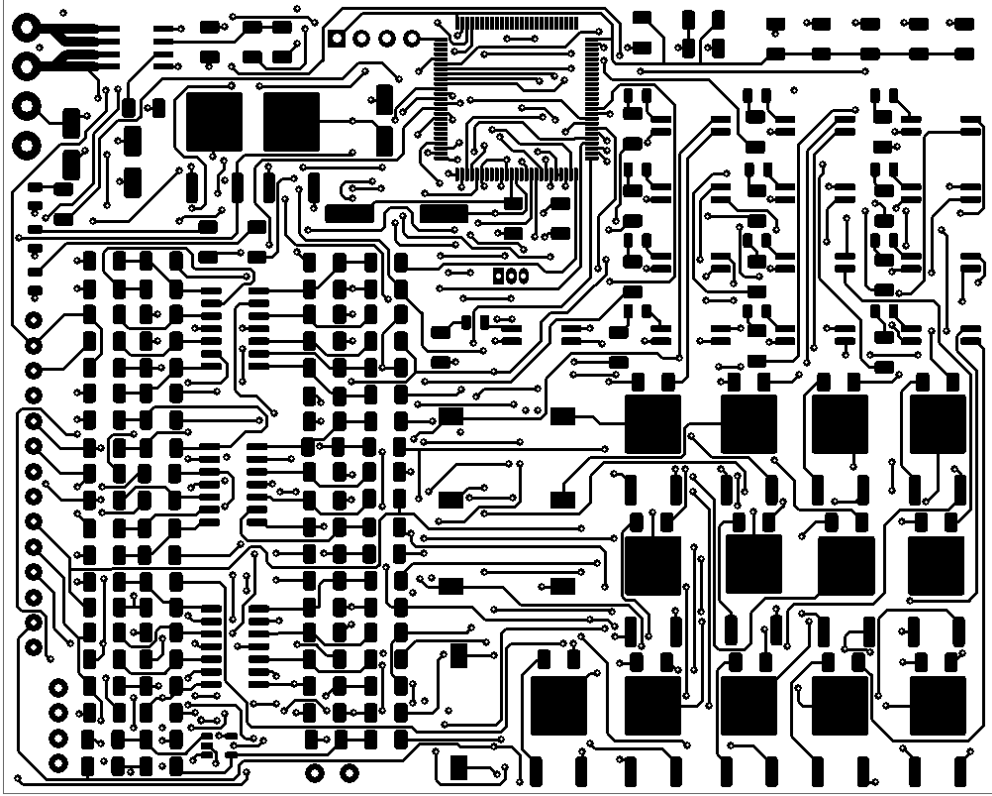
Daha İyi Elektromanyetik Uyumluluk (EMC): 4 katmanlı PCB'de güç ve toprak düzlemleri ayrı katmanlar olarak çizilir. Bu, sinyal gürültüsünü azaltır ve elektromanyetik girişim (EMI) sorunlarını en aza indirir.

Karmaşık Devreler İçin Daha Fazla Alan: 4 katmanlı PCB'de ek katmanlar, daha karmaşık devrelerin tasarımına olanak tanır. Daha fazla yönlendirme imkanı sunarak sinyal yollarının çakışmasını ve kısa devre olasılığını azaltır.

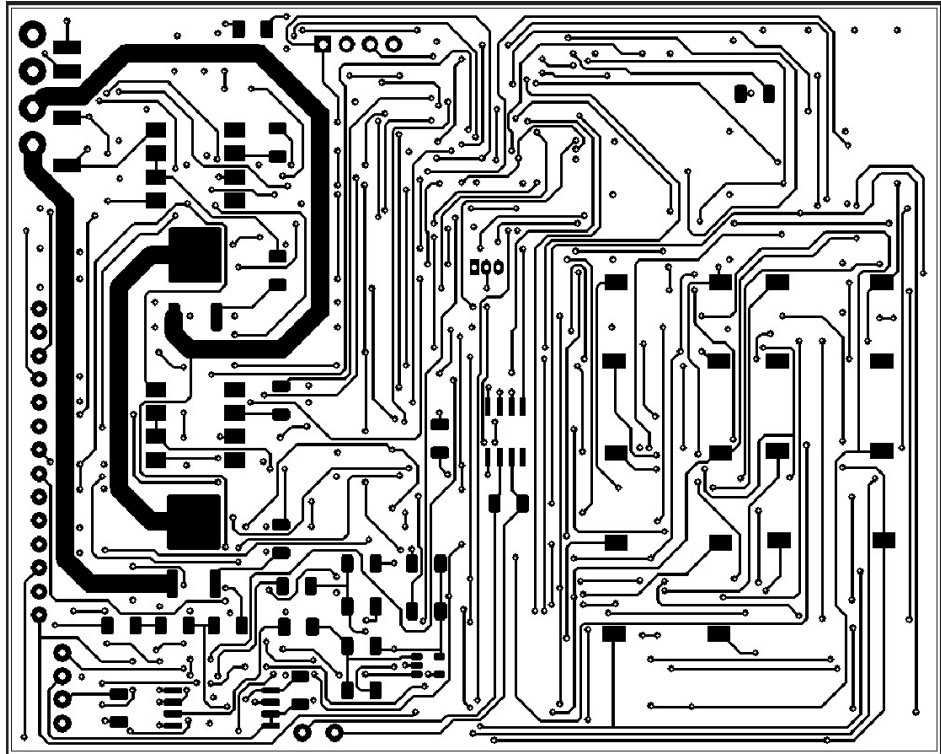
Daha Kompakt Tasarımlar: Ekstra katmanlar, bileşen yerleşimini ve sinyal yönlendirmesini optimize ederek PCB boyutunu küçültmeyi mümkün kılar. Özellikle cihazlarda yerden tasarruf sağlar.

Daha Az Parazit ve Gürültü: Ayrı toprak ve güç düzlemleri, paraziti ve gürültüyü önemli ölçüde azaltır.

Termal Yönetim: Ekstra katmanlar, termal dağılımı iyileştirir. Bu, yüksek güçlü devrelerde sıcaklık yönetimini kolaylaştırır.

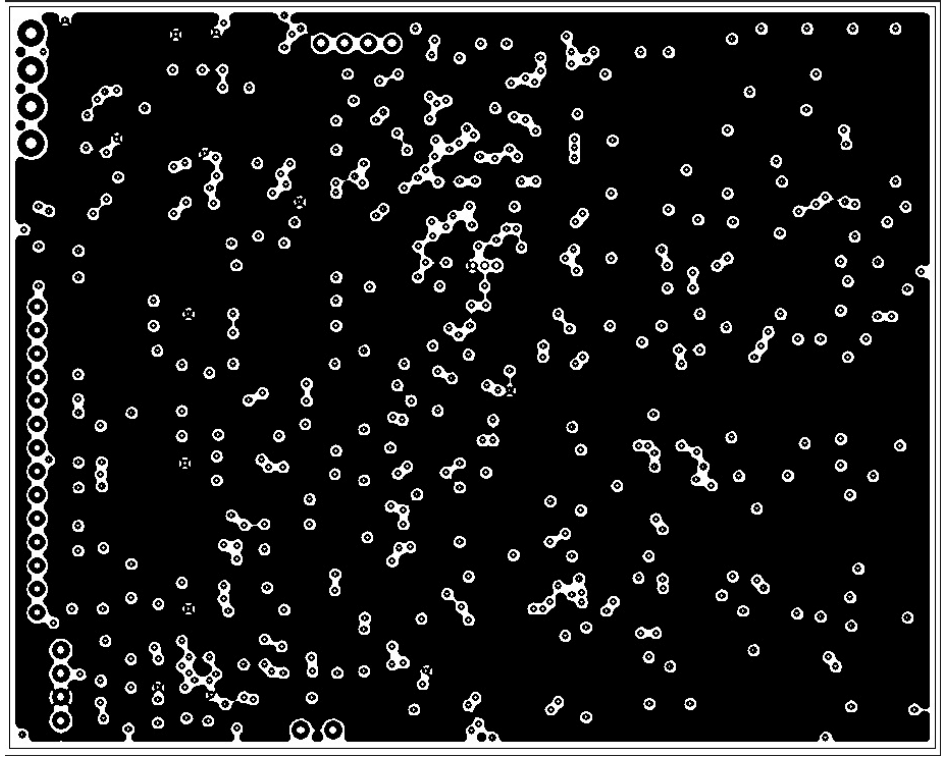


(a)

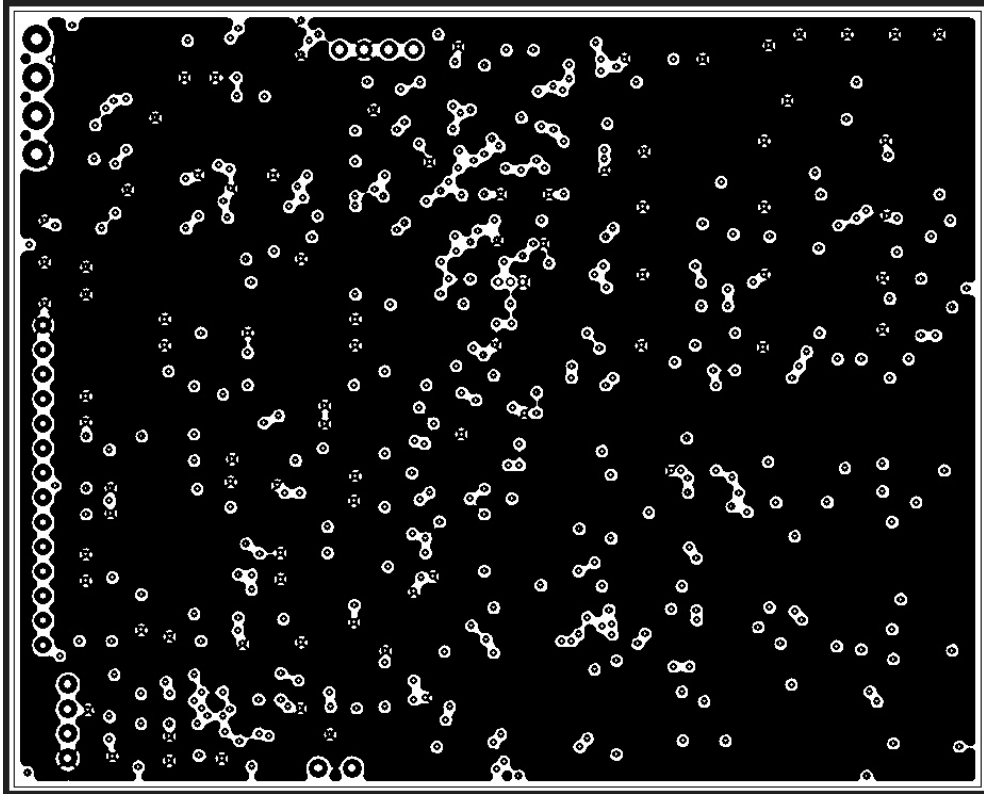


(b)

Şekil 4.18: Batarya yönetim sistemi baskı devre şeması (a) üst katman (b) alt katman

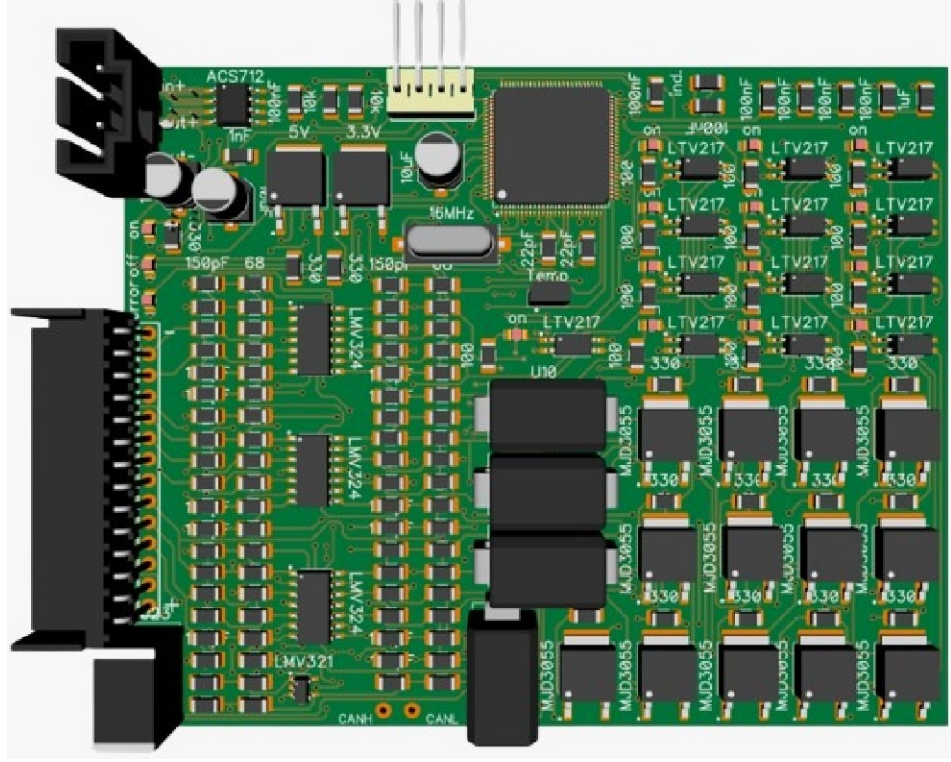


(a)

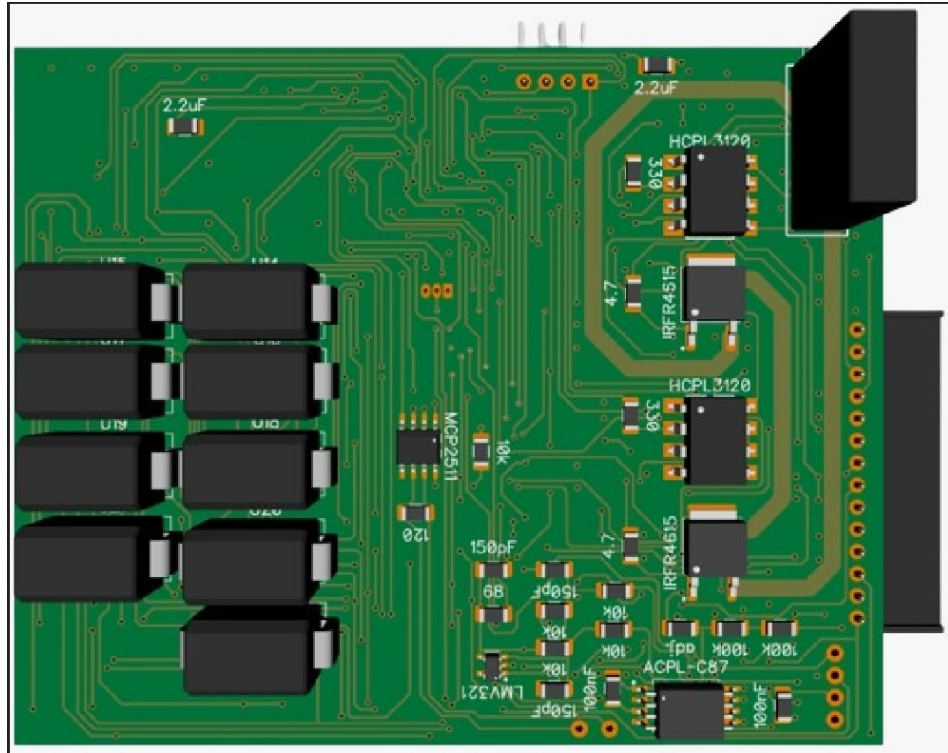


(b)

Şekil 4.19: Batarya yönetim sistemi kartı ara katmanları (a) ara katman 1 (b) ara katman 2



(a)



(b)

Şekil 4.20: Batarya yönetim sistemi kartı üstten ve alttan 3 boyutlu görüntüsü (a) üst katman (b) alt katman

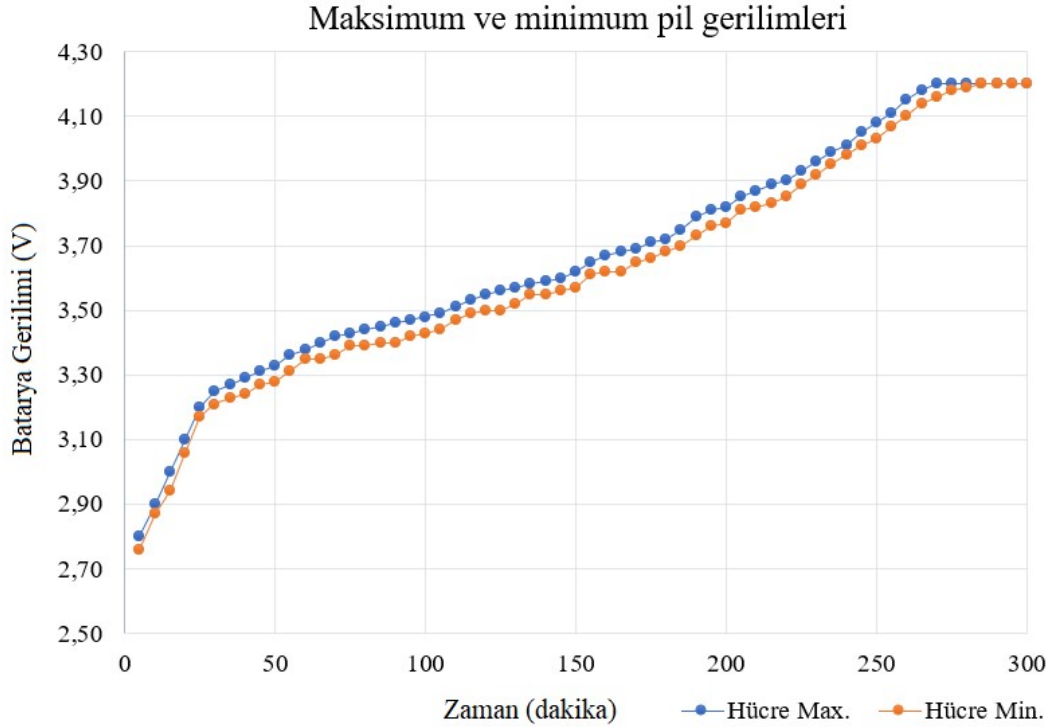
Çizilen PCB'nin ara katmanlarına ait görseller şekil 4.19 (a) ve (b)'de sırası ile verilmiştir. Ara katman 1 GND'ye ve ara katman 2 ise V_{CC} besleme hattına bağlanmaktadır. Çizim sonucu elde edilen PCB kartın üst ve alt katmanlarına ait üç boyutlu görseller şekil 4.20 (a) ve (b)'de sırası ile verilmiştir.

5. BULGULAR

Bu bölümde gerçek zamanlı batarya yönetim sisteminin şarj ve deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. Veriler her 5 dakika aralıklarla ölçülerek şarj ve deşarj deneylerine ait grafikler elde edilmiştir.

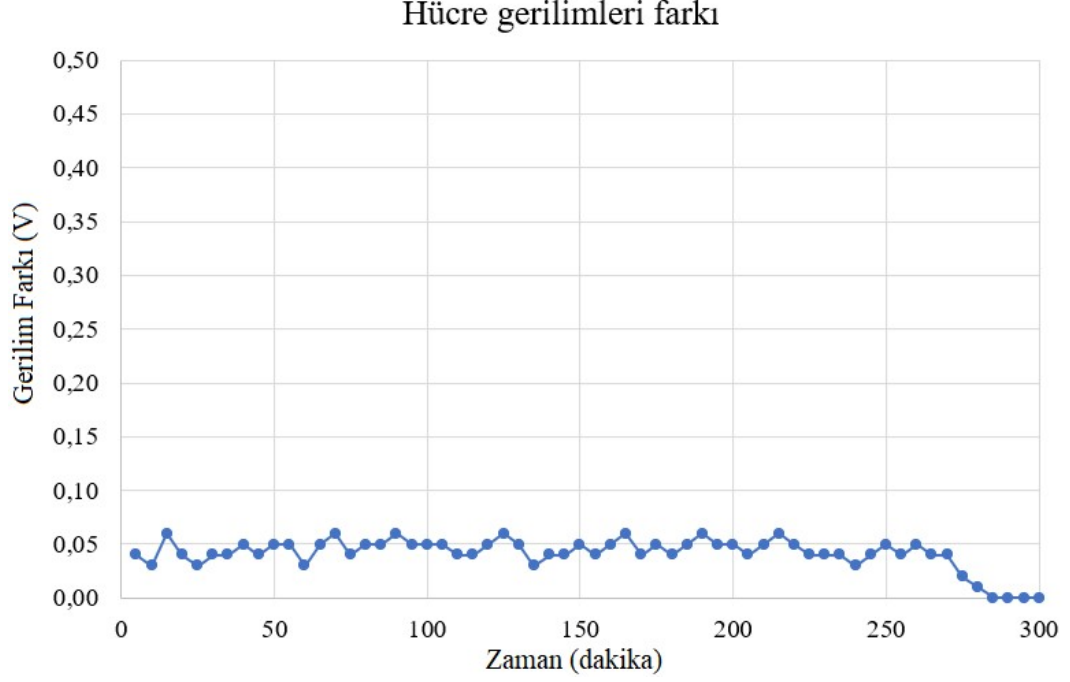
5.1 Batarya Şarj Deneyi

Batarya paketi şarj esnasında sabit akım-sabit gerilim yöntemiyle şarj edilmiştir. Bölüm 4'te tanıtımı yapılan Orion batarya için önerilen şarj akımı 0.2C'dir (520mA). Batarya paketi 13S-4P yapısından dolayı 2A sabit akım ile şarj edilmiştir. Şarj akımı 2A altına düştüğünde ise sabit gerilim moduna geçerek şarj işlemine devam edilmiştir. Batarya paketinin şarj olma süresi 300 dakikadır. Şarj süresince batarya hücrelerinin maksimum ve minimum hücre gerilimleri, batarya paketi sıcaklığı, hücre gerilimleri farkı ve toplam batarya gerilimi gibi bilgiler zamana bağlı olarak elde edilerek sonuçlar yorumlanmıştır. Şekil 5.1'de batarya paketinde bulunan maksimum ve minimum hücre gerilimlerinin zamana bağlı değişim grafiği verilmektedir.



Şekil 5.1: Batarya paketinde bulunan maksimum ve minimum pil gerilimleri

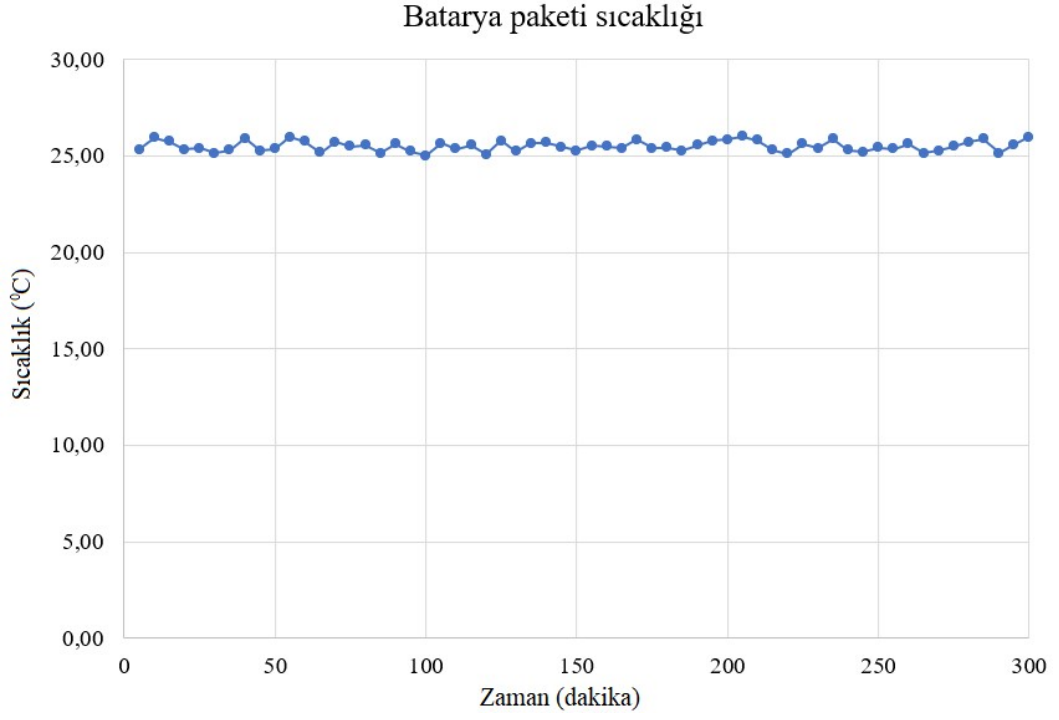
Maksimum ve minimum pil hücrelerinin gerilim değerleri şarj esnasında zamanla artış göstermiştir. Şarj akımı 100mA altına düştüğünde batarya koruma ünitesi devreye girerek şarj işlemini sonlandırmaktadır. Şarj esnasında maksimum ve minimum hücre gerilimleri arasındaki farkının zamana bağlı grafiği Şekil 5.2’de verilmektedir.



Şekil 5.2: Maksimum ve minimum pil gerilimleri farkı zaman grafiği

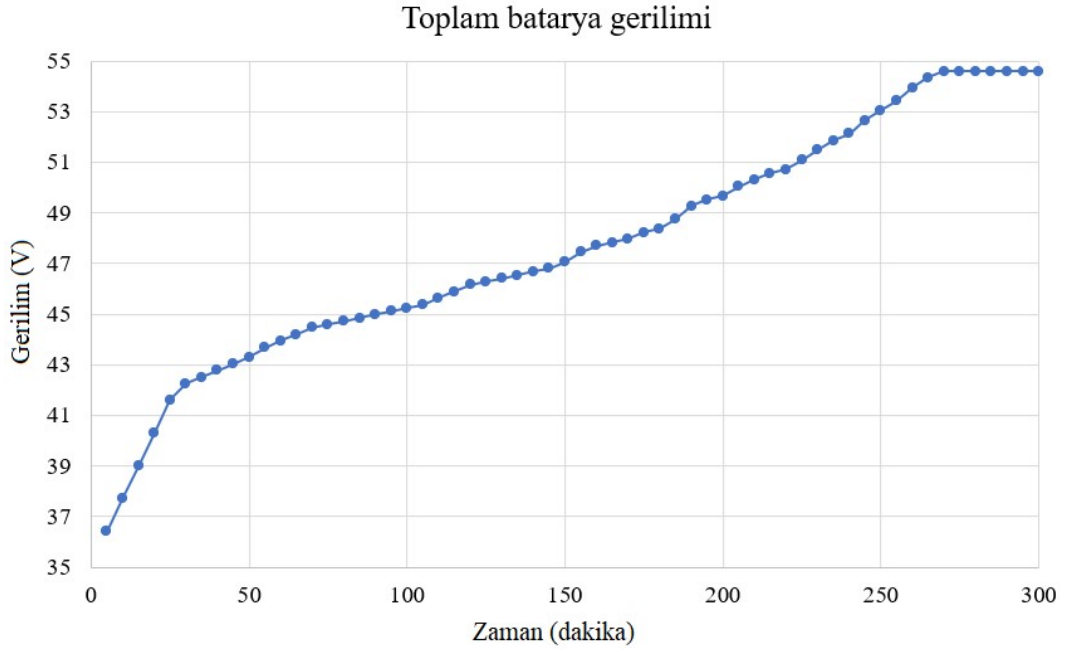
Hücreler arasındaki gerilim farkının şarj esnasında kabul edilen sınırlar arasında (50mV) kaldığı ve test sonunda batarya gerilimlerinin eşitlendiği gözlemlenmektedir. Bu durum hücreler arası dengeleme mekanizmasının düzgün çalıştığını göstermektedir. Sistemin şarj durumundaki batarya paketinin sıcaklığının zamana bağlı grafiği ise şekil 5.3’te verilmektedir.

Şarj durumunda batarya paketi sıcaklığı genel olarak oda sıcaklığının biraz üstünde ve 26°C civarında kalmıştır. Test süresince belirgin bir sıcaklık artışı veya dalgalanma gözlemlenmemiştir.



Şekil 5.3: Batarya paketi sıcaklığı zaman grafiği

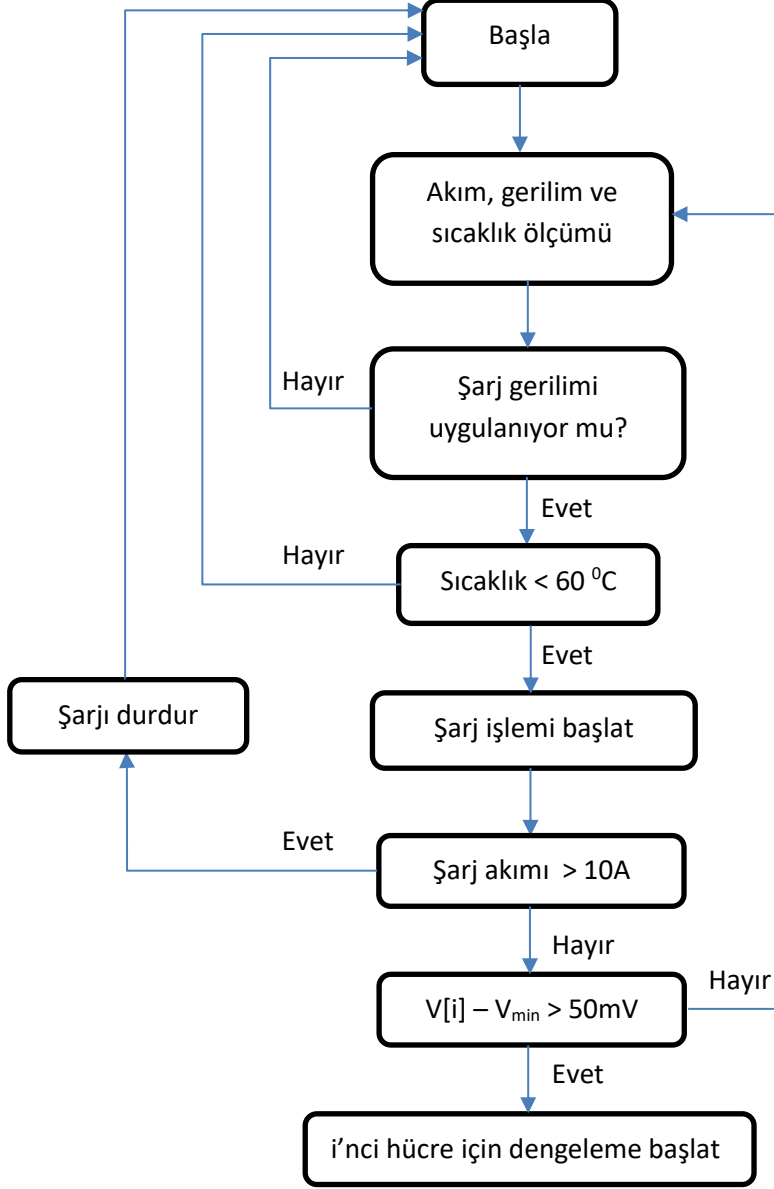
Şarj durumunda toplam batarya paketi geriliminin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 5.4'te verilmektedir. Batarya paketinin gerilimi yaklaşık 36V'dan başlayarak 300 dakikanın sonunda 54.6V'a ulaşmıştır.



Şekil 5.4: Toplam batarya gerilimi zaman grafiği

5.1.1 Şarj Akış Diyagramı

Şarj işlemi esnasında uygulanan algoritma şekil 5.5'te verilmiştir.

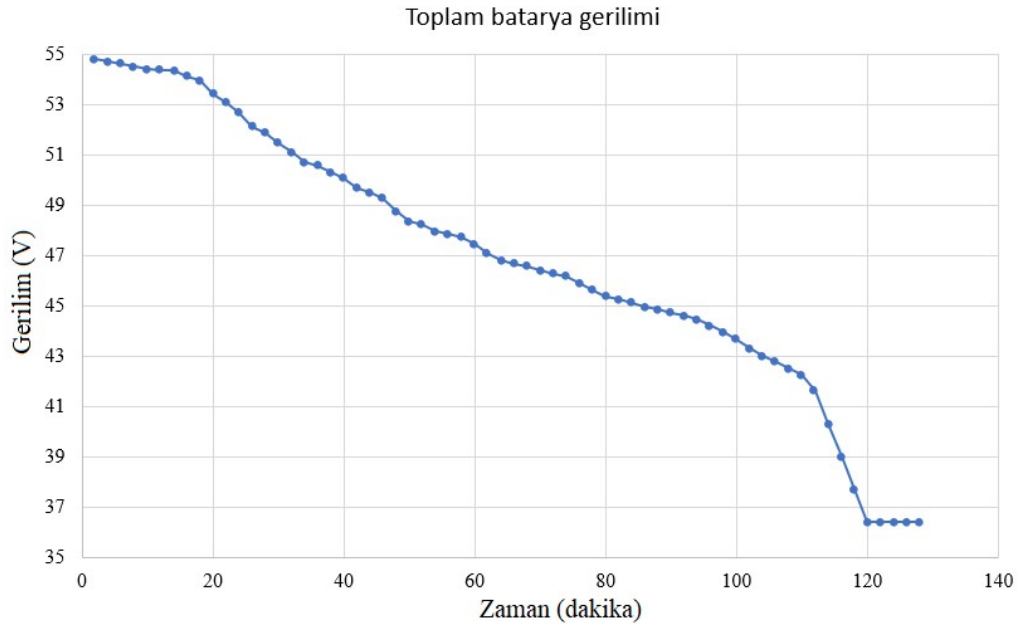


Şekil 5.5: Batarya şarj akış diyagramı

5.2 Batarya Deşarj Deneyi

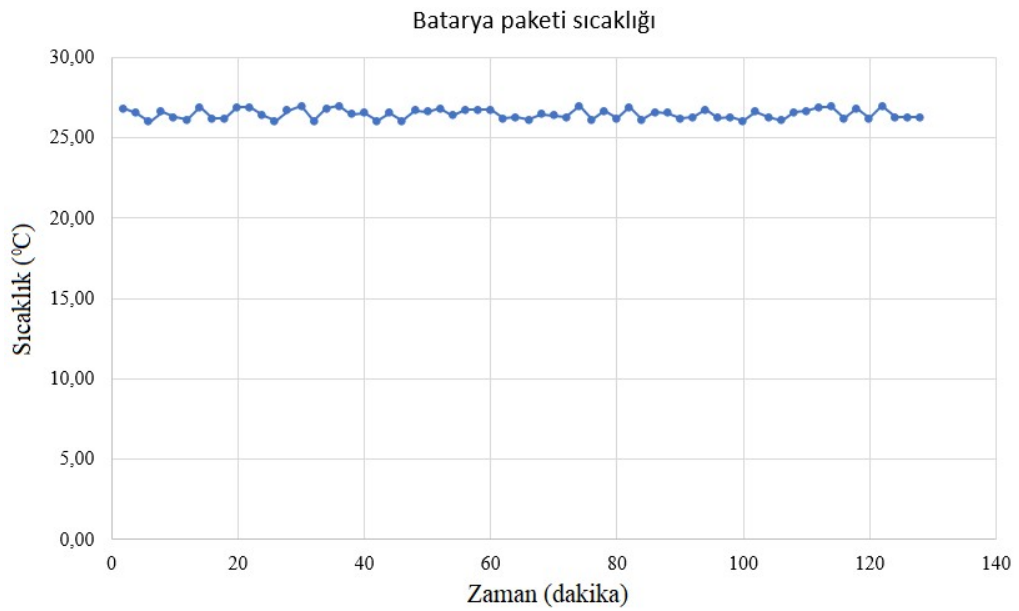
Deşarj deneyinde batarya paketine 5A sabit akımlı elektronik yük bağlanmış ve değerler her 5 dakikada bir ölçülmüştür. Batarya paketinin deşarjı yaklaşık 120

dakika sürmüştür. Toplam batarya geriliminin zamana bağlı grafiği şekil 5.6'da verilmektedir.



Şekil 5.6: Toplam batarya gerilimi zaman grafiği

Bataryanın gerilimi, zamanla sabit yük altında azalmaktadır. Deşarj işlemi esnasında dengeleme işlemi yapılmamıştır. Bu nedenle hücreler arası gerilim farkı göz ardı edilmiştir. Deşarj esnasında batarya paketi sıcaklığının zamana bağlı grafiği şekil 5.7'de verilmektedir.

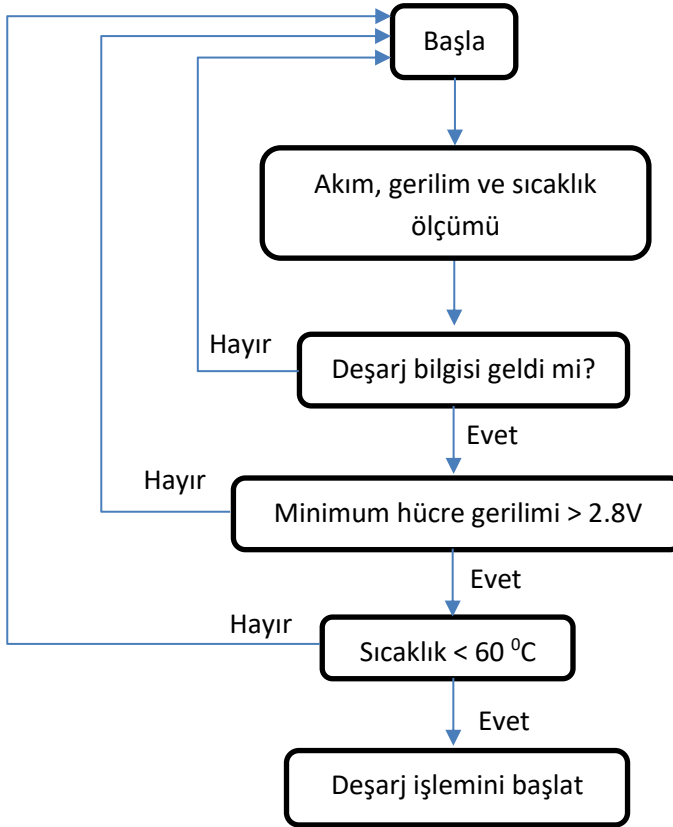


Şekil 5.7: Batarya paketi sıcaklığı zaman grafiği

Deşarj durumunda batarya paketi sıcaklığı genel olarak oda sıcaklığının biraz üstünde ve 27°C civarında kalmıştır. Test süresince belirgin bir sıcaklık artışı veya dalgalanma gözlemlenmemiştir.

5.2.1 Deşarj Akış Diyagramı

Deşarj işlemi esnasında uygulanan algoritma şekil 5.8’de verilmiştir. Algoritmaya göre öncelikle tüm ölçümler elde edilir. Ardından deşarj bilgisi gelmesi ile birlikte şartlar kontrol edilir. Bu şartlar minimum hücre gerilimi ve sıcaklık bilgisidir. Eğer minimum hücre gerilimi 2.8V’tan büyük ve sıcaklık 60°C’den küçük ise deşarj işlemi başlatılır. Bu koşullar sürdüğü ve deşarj bilgisi geldiği sürece deşarj işlemine devam edilir.



Şekil 5.8: Batarya deşarj akış diyagramı

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında, li-ion piller için gerçek zamanlı bir batarya yönetim sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, pasif hücre dengeleme yönteminin uygulanmasıyla pillerin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak hedeflenmiştir. Opamplar kullanılarak her bir hücrenin gerilim değerleri ölçülmüş ve LM35 sıcaklık sensörü ile pil paketinin termal durumu sürekli olarak izlenmiştir. Bu yaklaşım, sistem güvenilirliğini artırmış ve pillerin aşırı sıcaklığa maruz kalma riskini azaltmıştır.

STM32F407 mikrodenetleyicisi ile optokuplörler üzerinden NPN transistörlerin kontrol edilmesi, hücrelerin dirençler üzerinden dengeli bir şekilde deşarj edilmesine olanak tanımıştır. Ayrıca, sistemde yer alan batarya koruma ünitesi, aşırı gerilim, aşırı akım ve aşırı sıcaklık gibi durumlarda enerjiyi keserek pillerin ve çevre devre elemanlarının korunmasını sağlamıştır. Bu sayede hem sistem güvenliği hem de pillerin ömrü üzerinde olumlu etkiler elde edilmiştir.

Sonuç olarak, tasarlanan batarya yönetim sistemi, pasif hücre dengeleme, sıcaklık kontrolü ve koruma devreleri gibi kritik işlevleri başarıyla yerine getirmektedir. Çalışma, li-ion pil sistemlerinin güvenliğini ve performansını artırmaya yönelik pratik bir çözüm sunmaktadır. Gelecekte, aktif hücre dengeleme yöntemleri ve SoC tahmin algoritmalarının entegrasyonu ile sistemin daha yüksek kapasiteli batarya paketleri için optimize edilebileceği öngörülmektedir.

7. KAYNAKLAR

Aldoğan, E., “Elektrikli Araçlar İçin Batarya Yönetim Sistemi Donanımı Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 10-50, (2012).

Andrea, D., *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*, Artech house, (2010).

Baykal, T., “Lityum Polimer Bataryalar İçin Batarya Yönetim Sistemi Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2013).

Benzo enrgy, “How does the lithium battery protection circuit board work”, (3 April 2024), <https://www.protectionbenzoenergy.com/blog/post/how-does-the-lithium-battery-protection-circuit-board-work.html>, (2021).

Bora, Y., “Elektrikli Araç Sistemlerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2017).

Bruen ve diğ., “Analysis of a battery management system (BMS) control strategy for vibration aged Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) Lithium-Ion 18650 battery cells”, *Control of Energy Storage*, 9(4), 255, <https://doi.org/10.3390/en9040255>, (2016).

Chan, C. C., “The rise & fall of electric vehicles in 1828-930: Lessons Lerarned”, *Proc. IEEE*, 101(1), 206–212, doi:10.1109/JPROC.2012.2228370, (2013).

Chang, W.Y., “The state of charge estimating methods for battery: A review”, *ISRN Aplied Mathematics*, St John’s University, Vol.2013, 1-7, (2013).

Çayıroğlu, İ., “Kalman filtresi ve programlama”, (10 Temmuz 2024), [https://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/Makale_BilgiPaylasim/\(1-2012\)-Kalman_Filtresi_Ve_Bir_Programlama_Ornegi-Ibrahim_CAYIROGLU.pdf1](https://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/Makale_BilgiPaylasim/(1-2012)-Kalman_Filtresi_Ve_Bir_Programlama_Ornegi-Ibrahim_CAYIROGLU.pdf1), (2012).

Daud, Z. H. C., Asus, Z., Bakar, S. A. A., Husain, N. A., Mazali, I. I. and Chrenko, D., “Thermal haracteristics of a lithium-ion battery used in a hybrid

electric vehicle under various driving cycles”, *IET Electrical Systems in Transportation*, 10 (3), 243-248, (2020).

Duraisamy, T. and Kaliyaperumal, D. “Active cell balancing for electric vehicle battery management system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*”, 11(2), 571-579, doi:10.11591/ijpeds.v11.i2, (2020).

Fu, B., Wang, W., Li, Y. and Peng, Q., “An improved neural network model for battery smarter state-of-charge estimation of energy-transportation system”, *Green Energy and Intelligent Transportation*, <https://doi.org/10.1016/j.geits.2023.100067>, (2023).

Hançar, Y. and Kaymaz, H., “Elektrikli araç batarya yönetim sistemleri için hücre eşitleme yöntemleri”, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi (online)*, 4(1), 59-73, doi:10.51.513/jitsa.897126, (2021).

Hansen, T. and Wang C.J., “Support vector based battery state of charge estimator”, *Journal of Power Sources*, 141(2), 351-358, doi:10.1016/j.jpowsour.2004.09.020, (2005).

Karadeniz, O., “Lityum tabanlı enerji depolama üniteleri için batarya yönetim sistemi tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2017).

Khaligh, A. and Li, Z., “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles Technology”, *IEEE Transactions on Vehicula Technology*, Cilt 59, Sayı 6, 2806-2814, doi:10.1109/TVT.2010.2047877, (2010).

Kılıç, A., “Batarya Yönetim Sistemlerinde Ana Ve Uydu Denetleyici Modülü Tasarımı Ve Can Protokolü Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2016).

Kurşunoğlu, S., “Atık çinko-karbon ve alkali pillerden çinko ve mangan geri kazanılması” Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir, (2009).

Linda, O., William, E.J., Huff, M., Manic, M., Gupta, V., Nance, J. and Govar, J., “Intelligent neural network implementation for SOCI development of Li/CFx batteries”, *In 2009 2nd International Symposium on Resilient Control Systems*, 57-62, IEEE, (2009).

Lipu, M. S. H., Hannan, M. A., Hussain, A., Hoque, M. M., Ker, P. J., Saad, M. H. M. and Ayob, A., “A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations”, *Journal of Cleaner Production*, 205, 115-133, doi:10.1016/j.jclepro.2018.09.065, (2018).

Moo, C.S., Chen, Y.P. and Hsieh, Y.C., “ State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open-circuit voltage”, *In 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, Johar Bahru, 972-976, (2009).

Muratoğlu, Y. and Alkaya, A., “Elektrikli Araç Teknolojisi Ve Pil Yönetim Sistemi İnceleme”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 458, 10-14, (2016).

Ng, K.S., Moo, C.S., Chen, Y.P. and Hsieh, Y.C., “Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries”, *Applied Energy*, 86(9), 1506-1511, (2009).

pilsanelektronik.com, “Orion 18650/26 Lithium Ion Cell”, (15 Mart 2024), <https://static.ticimax.cloud/37661/uploads/dosyalar/orion186502600m.pdf00>, (2023).

Rezvanianiani, S. M., Liu, Z., Chen, Y. ve Lee, J., “Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (ev) safety and mobility”, *Journal of Power Sources*, 256, 110-124, (2014).

Rich, D., “Cell Balancing Design Guidelines”, (3 Mart 2024), <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00231a.pdf>, (2002).

Sato, S. and Kawamura, A., “A new estimation method of state of charge using terminal voltage and internal resistance for lead acid battery”, *In Proceedings of the Power Conversion Conference*, Osaka, 2, 565-570, (2002).

Sayılgan, E., “Kullanılmış pillerden çinko ve mangan metallerinin geri kazanımı ekonomik analiz ve matematik modelleme”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta, (2009).

Sayın, A.A. and Yüksel, İ., “ Elektrikli Renault Fluence Aracı, Lityum-İyon Bataryasının Modellenmesi Ve Batarya Yönetimi”, *Mühendis ve Makine*, 52(615), 75-82, (2011).

Serinbaş, M.M., “Elektrikli Araçlar İçin Yüksek Doğruluklu Şarj Kestirimi Sunan Yönetim Sistemi Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik*

Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2015).

Shrivastava, P., Tey, K. S., Idris, M. Y. I. B., Mekhilef, S., Jamei, E., Seyedmahmoudian M. and Stojcevski, A., “Advancement of lithium-ion battery cells voltage equilization techniques: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 1-29, doi:10.1016/j.rser.2020.110227, (2020).

Singh, P., Vinjamuri, R., Wang, X. and Reisner, D., “Design and implementation of a fuzzy logic-based state-of-charge meter for Li-ion batteries used in portable defibrillators”, *Journal of power sources*, 162(2), 829-836, (2006).

Soydaş, Ş., “Lityum Tabanlı Batarya Paketleri İçin Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, (2015).

Stuart, T., Fang, F., Wang, X., Ashtiani, C. and Pesaran, A., “ A modular battery management system for HEVs”, *SAE Transactions on Journal of Passenger Cars: Electronic and Electrical Systems*, 111(7), 777-785, doi:10.4271/2002-01-1918, (2002).

Thiruvonasundari, D. and Deepa, K., “Optimized Passive Cell Balancing for Fast Charging in Electric Vehicle”, *IETE Journal of Research*, 69(8), 1-9, doi:10.1080/03772063.2021.1886604, (2021).

Topan, P.A., Ramadan, M.N., Fathoni, G., Cahyadi, A.I. and Wahyunggoro O., “State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) estimation on lithium polymer battery via Kalman filter”, *In 2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST)*, 93-96, IEEE, (2016).

Turğut, M., “Elektrikli Araçlar İçin Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı Ve Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, (2018).

Wang, N., Xia, X. and Zeng X., “State of charge and state of health estimation strategies for lithium-ion batteries”, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 18, 443-448, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad032>, (2023).

Watrin, N., Blunier, B. and Miraoui, A., “Review of adaptive systems for lithium batteries state-of-charge and state-of-health estimation”, *In 2012 IEEE*

Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 1-6, IEEE, (2012).

Xing, L., Luo, W., Liu, X. and Xiang, B., “SOC Estimation for Lithium Batteries Based on Fractional Order Model and Robust Unscented Kalman Filter”, doi:10.20944/preprints202304.0181.v1, (2023).

Yong and Ying, Jia. “A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385, doi:10.1016/j.rser.2015.04.130, (2015).

Yuca, N., Kalafat, I., Guney, E., Cetin, B. and Taskin, O. S., “Self-Healing Systems in Silicon Anodes for Li-Ion Batteries”, *materials*, 15(7), article 2392, doi: 0.3390/ma15072392, (2022).

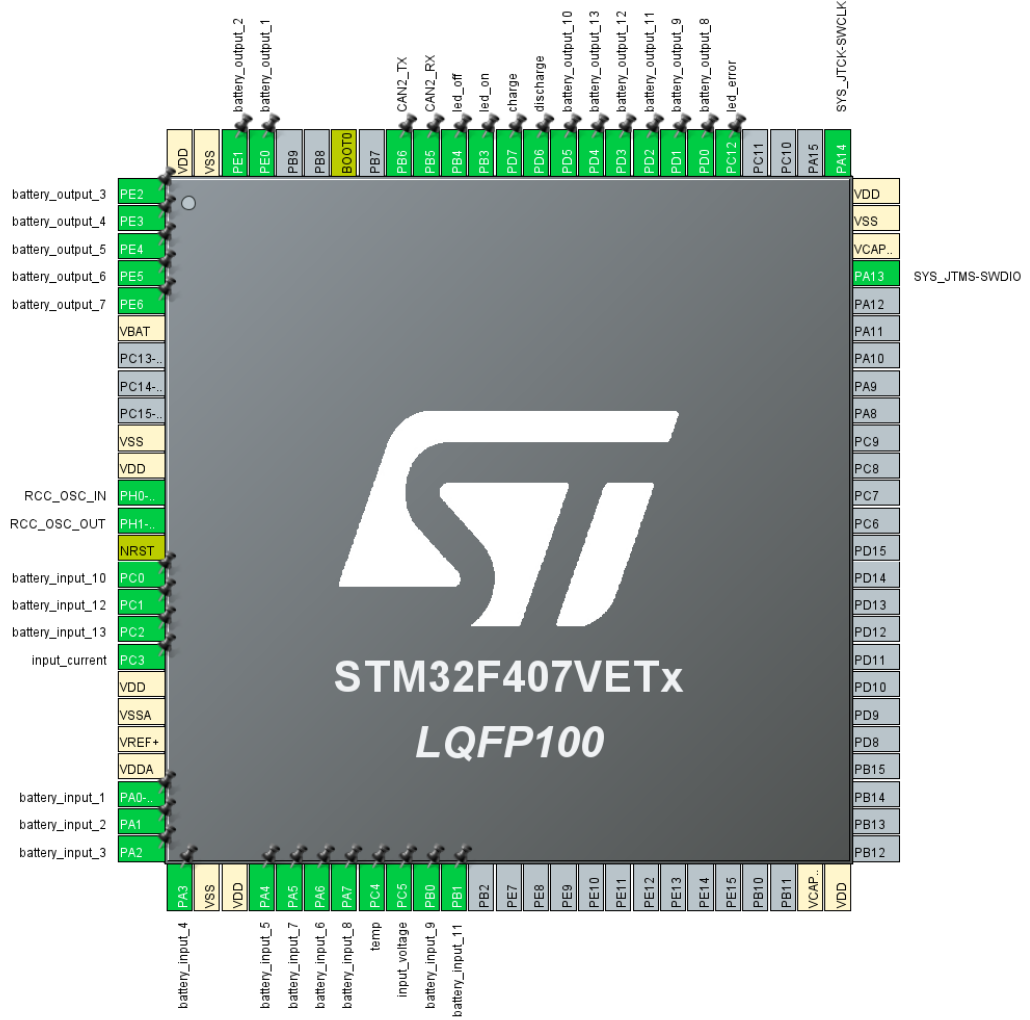
Zhang ve diğ., “Effects of Vibration on the Electrical Performance of Lithium-Ion Cells Based on Mathematical Statistics”, *Applied Sciences*, 7(8), 802, doi:10.3390/app7080802, (2017).

Zhang, M. and Fan, X., “Review on the state of charge estimation methods for electric vehicle battery”, *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), 23, (2020).

EKLER

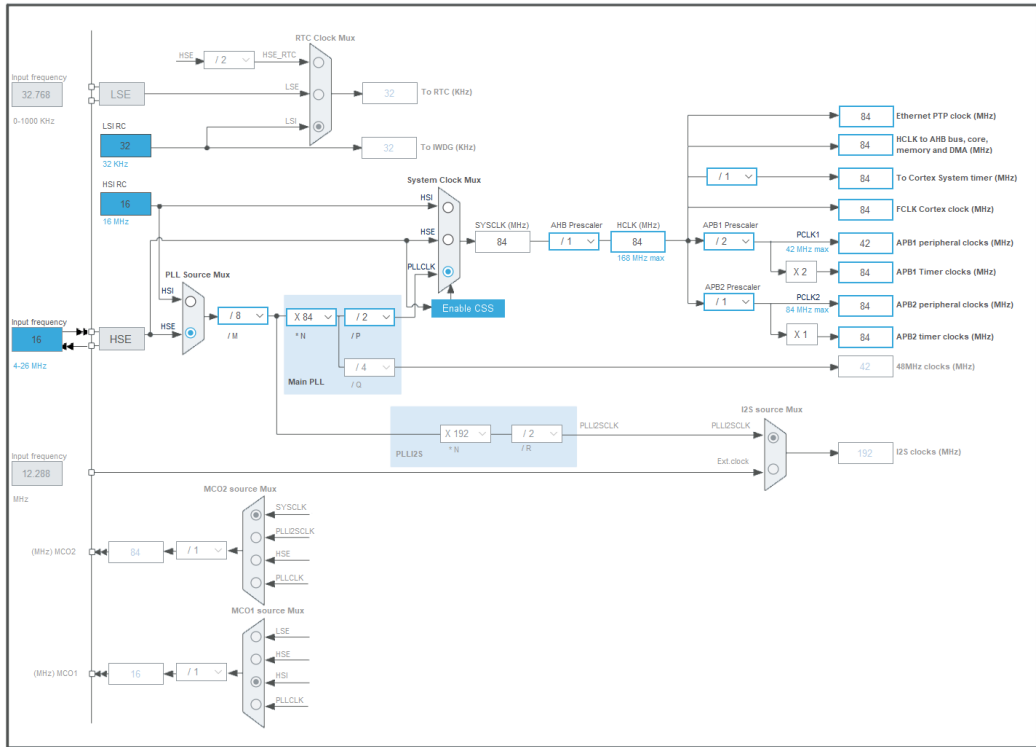
8. EKLER

EK A:



Şekil A.1: STM32F407 Mikrodenetleyici pin diyagramı

EK B:



Şekil B.1: STM32F407 Mikrodenetleyici clock konfigürasyonu

EK C:

```
#include "main.h"
#include "math.h"
uint8_t discharge_on = 0;
uint8_t i = 0;
uint8_t counter_1 = 0;
uint8_t index_low = 0;
float min_battery_voltage = 0.0f;
float battery_voltage_array[13];
uint32_t adcbuffer[16];
uint8_t cnt = 0;
uint8_t sayac = 0;
uint16_t input_current_data = 0;
uint16_t input_voltage_data = 0;
uint16_t temp = 0;
float battery_1 = 0.0f;
float battery_input_1 = 0.0f;
float battery_2 = 0.0f;
float battery_input_2 = 0.0f;
float battery_3 = 0.0f;
float battery_input_3 = 0.0f;
float battery_4 = 0.0f;
float battery_input_4 = 0.0f;
float battery_5 = 0.0f;
float battery_input_5 = 0.0f;
float battery_6 = 0.0f;
float battery_input_6 = 0.0f;
float battery_7 = 0.0f;
float battery_input_7 = 0.0f;
float battery_8 = 0.0f;
float battery_input_8 = 0.0f;
float battery_9 = 0.0f;
float battery_input_9 = 0.0f;
float battery_10 = 0.0f;
float battery_input_10 = 0.0f;
float battery_11 = 0.0f;
float battery_input_11 = 0.0f;
float battery_12 = 0.0f;
float battery_input_12 = 0.0f;
float battery_13 = 0.0f;
float battery_input_13 = 0.0f;
float sicaklik = 0.0f;
float input_current = 0.0f;
float input_voltage = 0.0f;
float total_battery_voltage = 0.0f;

uint8_t out_0 = 0;
uint8_t out_1 = 0;
uint8_t out_2 = 0;
uint8_t out_3 = 0;
uint8_t out_4 = 0;
uint8_t out_5 = 0;
uint8_t out_6 = 0;
uint8_t out_7 = 0;
uint8_t out_8 = 0;
uint8_t out_9 = 0;
uint8_t out_10 = 0;
```



```

uint8_t out_11 = 0;
uint8_t out_12 = 0;

ADC_HandleTypeDef hadc1;
DMA_HandleTypeDef hdma_adc1;

CAN_HandleTypeDef hcan2;

TIM_HandleTypeDef htim1;
TIM_HandleTypeDef htim3;

void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_DMA_Init(void);
static void MX_ADC1_Init(void);
static void MX_CAN2_Init(void);
static void MX_TIM1_Init(void);
static void MX_TIM3_Init(void);

void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc)
{
if(hadc->Instance == ADC1)
{
sayac++;
battery_1=battery_1+adcbuffer[0]*0.0295;
battery_2=battery_2+adcbuffer[1]*0.0295;
battery_3=battery_3+adcbuffer[2]*0.0295;
battery_4=battery_4+adcbuffer[3]*0.0295;
battery_5=battery_5+adcbuffer[4]*0.0295;
battery_6=battery_6+adcbuffer[6]*0.0295;
battery_7=battery_7+adcbuffer[5]*0.0295;
battery_8=battery_8+adcbuffer[7]*0.0295;
battery_9=battery_9+adcbuffer[8]*0.0295;
battery_10=battery_10+adcbuffer[10]*0.0295;
battery_11=battery_11+adcbuffer[9]*0.0295;
battery_12=battery_12+adcbuffer[11]*0.0295;
battery_13=battery_13+adcbuffer[12]*0.0295;
input_current_data=input_current_data + adcbuffer[13];
temp=temp + adcbuffer[14];
input_voltage_data=input_voltage_data + adcbuffer[15];
}
}

int main(void)
{
HalInIn();
SystemClock_Config();
MX_GPIO_Init();
MX_DMA_Init();
MX_ADC1_Init();
MX_CAN2_Init();
MX_TIM1_Init();
MX_TIM3_Init();
HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim1);
HAL_TIM_Base_Start(&htim3);
HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, adcbuffer, 16);

while (1)
{

```

```

if(sayac==50)
{
battery_input_1=battery_1*0.02;
battery_input_2=battery_2*0.02;
battery_input_3=battery_3*0.02;
battery_input_4=battery_4*0.02;
battery_input_5=battery_5*0.02;
battery_input_6=battery_6*0.02;
battery_input_7=battery_7*0.02;
battery_input_8=battery_8*0.02;
battery_input_9=battery_9*0.02;
battery_input_10=battery_10*0.02;
battery_input_11=battery_11*0.02;
battery_input_12=battery_12*0.02;
battery_input_13=battery_13*0.02;
battery_1=0;
battery_2=0;
battery_3=0;
battery_4=0;
battery_5=0;
battery_6=0;
battery_7=0;
battery_8=0;
battery_9=0;
battery_10=0;
battery_11=0;
battery_12=0;
battery_13=0;
input_current=((input_current_data*0.02)-453)*0.052;
sicaklik=((0.1*temp)+2)*0.02;
input_voltage=(input_voltage_data*0.02)*0.129;
temp=0;
input_current_data=0;
input_voltage_data=0;

total_battery_voltage=battery_input_1+battery_input_2+battery_input_3+batt
ery_input_4+battery_input_5+battery_input_6+battery_input_7+battery_input_
8+battery_input_9+battery_input_10+battery_input_11+battery_input_12+batte
ry_input_13;
sayac=0;
////////////////////////////////////
battery_voltage_array[0]=battery_input_1;
battery_voltage_array[1]=battery_input_2;
battery_voltage_array[2]=battery_input_3;
battery_voltage_array[3]=battery_input_4;
battery_voltage_array[4]=battery_input_5;
battery_voltage_array[5]=battery_input_6;
battery_voltage_array[6]=battery_input_7;
battery_voltage_array[7]=battery_input_8;
battery_voltage_array[8]=battery_input_9;
battery_voltage_array[9]=battery_input_10;
battery_voltage_array[10]=battery_input_11;
battery_voltage_array[11]=battery_input_12;
battery_voltage_array[12]=battery_input_13;
////////////////////////////////////
min_battery_voltage=battery_voltage_array[0];
for(i=0; i<13; i++)
{

```

```

if(battery_voltage_array[i]<min_battery_voltage)
{
min_battery_voltage=battery_voltage_array[i];
index_low=i;
}
}
//////////////////////////////////////////////////CHARGE PROCESS//////////////////////////////////////
if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOD, discharge_Pin) == 0 && input_voltage > 20 &&
sicaklik < 60 && input_current > -10)
{
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, charge_Pin, GPIO_PIN_SET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, led_off_Pin, GPIO_PIN_SET);

if((battery_voltage_array[0]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_1_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_1_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[1]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_2_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_2_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[2]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_3_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_3_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[3]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_4_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_4_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[4]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_5_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_5_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[5]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_6_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_6_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[6]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_7_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_7_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[7]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_8_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_8_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[8]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_9_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_9_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[9]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_10_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_10_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[10]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_11_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_11_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[11]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_12_Pin, GPIO_PIN_SET);

```

```

else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_12_Pin, GPIO_PIN_RESET);
if((battery_voltage_array[12]-battery_voltage_array[index_low]) > 0.05)
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_13_Pin, GPIO_PIN_SET);
else
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_13_Pin, GPIO_PIN_RESET);
}
else
{
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, charge_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, led_off_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_1_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_2_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_3_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_4_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_5_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_6_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_7_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, battery_output_8_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_9_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_10_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_11_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_12_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, battery_output_13_Pin, GPIO_PIN_RESET);
}
////////////////////////////////DISCHARGE PROCESS////////////////////////////////
if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOD, charge_Pin) == 0 && min_battery_voltage > 2.8
&& sicaklik < 60 && input_current < 10)
{
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, discharge_Pin, GPIO_PIN_SET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, led_on_Pin, GPIO_PIN_SET);
}
else
{
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, discharge_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, led_on_Pin, GPIO_PIN_RESET);
}
////////////////////////////////
}
}

```