



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**BATARYA YÖNETİMİ İÇİN PASİF
DENGELEME YÖNTEMİNDE FARKLI
YARIİLETKEN ELEMANLARIN
PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI**

Nurdan ŞEKERCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Nurdan Şekerci tarafından hazırlanan “Batarya Yönetimi İçin Pasif Dengeleme Yönteminde Farklı Yarıiletken Elemanların Performans Karşılaştırması” adlı tez çalışması 22/04/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

.....

Danışman

Doç. Dr. Abdülsamed TABAK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Okan UYAR

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Nurdan ŞEKERCİ

22.04.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BATARYA YÖNETİMİ İÇİN PASİF Dengeleme Yönteminde Farklı Yarıiletken Elemanların Performans Karşılaştırması

Nurdan ŞEKERCİ

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Abdülsamed TABAK

2025, 81 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Abdülsamed TABAK

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

Dr. Öğr. Üyesi Okan UYAR

Günümüzde elektrikli araçlar (EA), taşınabilir elektronik cihazlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve enerji depolama sistemleri gibi birçok alanda batarya tabanlı sistemler kullanılmaktadır. Batarya tabanlı sistemlerde bataryanın verimini, ömrünü ve güvenliğini arttırmak amacı ile batarya yönetim sistemleri (BYS) kullanılmaktadır. Batarya Yönetim Sistemleri, bataryaların şarj ve deşarj süreçlerini izleyerek, hücre dengeleme, sıcaklık yönetimi ve enerji optimizasyonu gibi kritik görevleri yerine getirir. Bu sebeple elektrikli araçlarda ve diğer batarya tabanlı uygulamalarda batarya yönetim sistemleri oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasında batarya yönetim sistemlerinde (BYS) hücre dengeleme yöntemi olarak kullanılan pasif dengeleme işleminin geliştirilmesi, farklı yarı iletkenlerin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Lityum iyon pillerin seri bağlanması ile batarya paketi oluşturulmuştur. Batarya paketindeki hücrelerin, sıcaklık ve gerilim değerleri anlık olarak izlenmektedir. Şarj esnasında batarya hücrelerindeki farklı gerilimleri dengelemek için pasif dengeleme yöntemi kullanılmıştır. Pasif dengeleme işlemi her bir batarya hücresine bağlı yarıiletken anahtarlama elemanları sayesinde dirençler üzerinden fazla enerjinin ısıya dönüştürülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Pasif dengeleme işleminde anahtarlama elemanı olarak MOSFET, JFET ve BJT yarıiletkenleri ayrı ayrı kullanılmıştır. Her bir anahtarlama elemanın pasif dengeleme işlemindeki performansını gözlemlemek ve avantaj-dezavantajlarını ortaya koymak hedeflenmiştir. Pasif dengeleme işleminde anahtarlama elemanı olarak kullanılan yarıiletkenler anahtarlama hızı, anahtarlama kayıpları ve maliyetleri açısından karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Batarya Yönetim Sistemi, BJT, JFET, MOSFET, Pasif Dengeleme, Yarıiletken Anahtarlama

ABSTRACT

MS THESIS

PERFORMANCE COMPARISON OF DIFFERENT SEMICONDUCTOR COMPONENTS IN PASSIVE BALANCING METHOD FOR BATTERY MANAGEMENT

Nurdan ŞEKERCİ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECAHATRONICS ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdülsamed TABAK

2025, 81 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Abdülsamed TABAK

Assoc. Prof. Dr. Barış GÖKÇE

Assist. Prof. Dr. Okan UYAR

Today, battery-based systems are used in many areas such as electric vehicles (EV), portable electronic devices, renewable energy systems and energy storage systems. Battery management systems (BMS) are used in battery-based systems to increase the efficiency, life and safety of the battery. Battery Management Systems monitor the charging and discharging processes of batteries and perform critical tasks such as cell balancing, temperature management and energy optimization. For this reason, battery management systems play a very important role in electric vehicles and other battery-based applications.

In this thesis, the development of passive balancing process used as cell balancing method in battery management systems (BMS) was carried out by using different semiconductors. Battery pack was formed by connecting lithium-ion batteries in series. Temperature and voltage values of cells in battery pack are monitored instantly. Passive balancing method was used to balance different voltages in battery cells during charging. Passive balancing process was carried out by converting excess energy into heat through resistors by means of semiconductor switching elements connected to each battery cell. MOSFET, JFET and BJT semiconductors were used separately as switching elements in passive balancing process. It was aimed to observe the performance of each switching element in passive balancing process and to reveal their advantages and disadvantages. Semiconductors used as switching elements in passive balancing process were compared in terms of switching speed, switching losses and costs.

Keywords: Battery Management System, BJT, JFET, MOSFET, Passive Balancing, Semiconductor Switching

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışmanım Doç. Dr. Abdülsamed TABAK hocama teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışması sürecinde bana maddi, manevi destekleri ve inançları için başta eşim, oğlum ve tüm aileme teşekkür ederim.

Nurdan ŞEKERCİ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| ÖNSÖZ | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | ix |
| ŞEKİLLER ve ÇİZELGELER..... | xi |
| 1.GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Tezin Amacı..... | 2 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI | 3 |
| 3.ELEKTRİKLİ ARAÇLAR ve BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ..... | 6 |
| 3.1.Elektrikli Araçlara Genel Bakış | 6 |
| 3.1.1.Elektrikli araçların gelişimi | 6 |
| 3.1.2.Elektrikli araçların Türkiye'deki gelişimi..... | 7 |
| 3.2.Elektrikli Araçların Türleri | 8 |
| 3.2.1.Bataryalı elektrikli araçlar (BEV)..... | 8 |
| 3.2.2.Hibrit elektrikli araçlar (HEV)..... | 9 |
| 3.2.3.Hafif hibrit elektrikli araçlar (MHEV)..... | 9 |
| 3.2.4. Plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV)..... | 9 |
| 3.2.5.Yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV) | 9 |
| 3.3.Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları | 10 |
| 3.3.1. Elektrikli araçların avantajları | 10 |
| 3.3.2. Elektrikli araçların dezavantajları | 11 |
| 3.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri..... | 12 |
| 3.4.1. Kurşun asit bataryalar | 12 |
| 3.4.2. Nikel metal hidrit bataryalar | 13 |
| 3.4.3. Nikel kadmiyum bataryalar | 14 |
| 3.4.4. Lityum iyon bataryalar..... | 14 |
| 3.4.5. Lityum polimer bataryalar | 15 |
| 3.5.Batarya Yönetim Sistemleri..... | 16 |
| 3.5.1. Batarya yönetim sistemi görevleri | 16 |
| 3.5.2. Batarya dengeleme yöntemleri | 22 |
| 3.5.3. Batarya yönetim sistemi topolojileri..... | 34 |
| 4.MATERYAL VE YÖNTEM..... | 39 |
| 4.1.Batarya Yönetim Sisteminin Tasarımı..... | 39 |
| 4.1.1.Lityum iyon pil | 39 |
| 4.1.2.Mikrodenetleyici kart..... | 40 |
| 4.1.3.Gerilim ölçümü | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.4.Sıcaklık ölçümü | 43 |
| 4.1.5.Fan devresi | 45 |
| 4.1.6. Şarj işlemi | 46 |
| 4.1.7. Hücre dengeleme | 48 |
| 5.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... | 54 |
| 5.1.Pasif Dengeleme Devresinde MOSFET Kullanılması..... | 55 |
| 5.2.Pasif Dengeleme Devresinde JFET Kullanılması..... | 59 |
| 5.3.Pasif Dengeleme Devresinde BJT Kullanılması..... | 63 |
| 5.4.Pasif Dengeleme Devresinde Kullanılan Anahtarlama Elemanlarının Maliyetleri | 67 |
| 5.5.Pillerin Deşarj Durumu | 68 |
| 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 70 |
| 7. KAYNAKLAR | 73 |
| EKLER | 77 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|--------------------------------|------------------------------|
| A | Amper |
| Ah | Amper-saat |
| C | Kapasite |
| Cd | Kadmiyum |
| Cd(OH) ₂ | Kadmiyum hidroksit |
| C _M | Batarya mevcut kapasite |
| C _N | Batarya başlangıç kapasitesi |
| C _{GS} | Gate kapasitesi |
| F | Farad |
| <i>f</i> | Anahtarlama frekans |
| H ₂ SO ₄ | Hidrojen sülfür |
| Hz | Hertz |
| I _D | Drain akımı |
| I _C | Collektör akımı |
| KOH | Potasyum hidroksit |
| KB | Kilobyte |
| Li-ion | Lityum iyon |
| Li-Po | Lityum polimer |
| mA | Miliamper |
| mAh | Miliamper-saat |
| MHz | Megahertz |
| Mm | Milimetre |
| mV | Milivolt |
| mW | Miliwatt |
| μW | Mikrowatt |
| NiCd | Nikel kadmiyum |
| NiMH | Nikel metal hidrit |
| nW | Nanowatt |
| P _{capp} | Kapasite kaybı |
| P _{conduction} | İletim kaybı |
| P _{sw} | Anahtarlama kaybı |
| Pb-acid | Kurşun asit |
| PbO ₂ | Kurşun dioksit |
| pF | Pikofarad |
| R | Direnç |
| R _{DS} | Drain-source direnç |
| t _{off} | Yarıiletkenin kapanma süresi |
| t _{on} | Yarıiletkenin açılma süresi |
| V | Volt |
| V _{CE} | Collektör-emiter voltajı |
| V _{DS} | Drain-source voltajı |
| V _{GS} | Gate-source voltajı |
| W | Watt |
| Wh | Watt/Saat |
| °C | Santigrat derece |
| # | Çevrim ömrü |

Kısaltmalar

| | |
|--------|---|
| AC | Alternating Current |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| BJT | Bipolar Junction Transistor |
| BYS | Batarya Yönetim Sistemi |
| CC | Constant Current |
| CV | Constant Voltage |
| DC | Direct Current |
| ESS | Energy Storage System |
| EV | Electric Vehicle |
| FCEV | Fuel Cell Electric Vehicle |
| HEV | Hybrid Electric Vehicle |
| LED | Light Emitting Diode |
| MHEV | Mild Hybrid Electric Vehicle |
| MOSFET | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| PHEV | Plug-in Hybrid Electric Vehicle |
| JFET | Junction Field-Effect Transistor |
| SOC | State of Charge |
| SOH | State of Health |

ŞEKİLLER ve ÇİZELGELER

Şekiller

| | | |
|------------|--|----|
| Şekil 3.1 | Kurşun asit batarya gösterimi | 13 |
| Şekil 3.2 | Nikel metal hidrit batarya | 13 |
| Şekil 3.3 | Nikel kadmiyum batarya | 14 |
| Şekil 3.4 | Lityum iyon batarya | 15 |
| Şekil 3.5 | Lityum polimer batarya | 16 |
| Şekil 3.6 | BYS'nin görevleri | 17 |
| Şekil 3.7 | Batarya dengeleme sistemleri türleri | 23 |
| Şekil 3.8 | Sabit direnç dengeleme yöntemi devre şeması | 24 |
| Şekil 3.9 | Anahtarlamalı direnç dengeleme yöntemi devre şeması | 25 |
| Şekil 3.10 | Aktif dengeleme yöntemi türleri | 26 |
| Şekil 3.11 | Anahtarlamalı kondansatör yöntemi devre şeması | 27 |
| Şekil 3.12 | Çift katmanlı anahtarlamalı kondansatör yöntemi devre şeması | 27 |
| Şekil 3.13 | Hücreden hücreye dengeleme yöntemi devre şeması | 28 |
| Şekil 3.14 | Batarya paketinden hücreye dengeleme yöntemi devre şeması | 29 |
| Şekil 3.15 | Çok katmanlı endüktans yöntemi devre şeması | 29 |
| Şekil 3.16 | Zincir yapıda endüktans yöntemi devre şeması | 30 |
| Şekil 3.17 | CUK dönüştürücü yöntemi devre şeması | 31 |
| Şekil 3.18 | Buck-Boost dönüştürücü yöntemi devre şeması | 31 |
| Şekil 3.19 | Tam köprü dönüştürücü yöntemi devre şeması | 32 |
| Şekil 3.20 | Yarı rezonans dönüştürücü yöntemi devre şeması | 32 |
| Şekil 3.21 | Flayback dönüştürücü yöntemi devre şeması | 33 |
| Şekil 3.22 | Merkezi batarya yöntemi sistemi | 35 |
| Şekil 3.23 | Modüler batarya yönetim sistemi | 36 |
| Şekil 3.24 | Dağıtık batarya yönetim sistemi | 37 |
| Şekil 3.25 | Ana kart – yardımcı kart yönetim sistemi | 38 |
| Şekil 4.1 | BYS algoritma şeması | 40 |
| Şekil 4.2 | Arduino Leonardo | 42 |
| Şekil 4.3 | 4 adet gerilim bölücünün Arduino Leonardo ile bağlantı devresi | 43 |
| Şekil 4.4 | DS18B20 sıcaklık sensörü pin bağlantıları | 44 |
| Şekil 4.5 | 4 adet sıcaklık sensörünün Arduino Leonardo ile bağlantı devresi | 45 |
| Şekil 4.6 | Fan devresinin Arduino Leonardo ile bağlantı devresi | 46 |
| Şekil 4.7 | UPX K3005F DC güç kaynağı | 47 |
| Şekil 4.8 | IRFZ48N N-kanal MOSFET | 49 |
| Şekil 4.9 | IRFZ48N N-kanal MOSFET ile pasif dengeleme devresi | 50 |
| Şekil 4.10 | BF246A N-kanal JFET | 51 |
| Şekil 4.11 | BF246A N-kanal JFET ile pasif dengeleme devresi | 51 |
| Şekil 4.12 | BC237B NPN tipi BJT | 52 |
| Şekil 4.13 | BC237B NPN tipi BJT ile pasif dengeleme devresi | 53 |
| Şekil 5.1 | Pasif dengeleme devresinde MOSFET kullanıldığında sıcaklık değerleri | 56 |
| Şekil 5.2 | Pasif dengeleme devresinde MOSFET kullanıldığında gerilim değerleri | 56 |
| Şekil 5.3 | Pasif dengeleme devresinde JFET kullanıldığında sıcaklık değerleri | 60 |
| Şekil 5.4 | Pasif dengeleme devresinde JFET kullanıldığında gerilim değerleri | 60 |
| Şekil 5.5 | Pasif dengeleme devresinde BJT kullanıldığında sıcaklık değerleri | 64 |
| Şekil 5.6 | Pasif dengeleme devresinde BJT kullanıldığında gerilim değerleri | 65 |
| Şekil 5.7 | Deşarj durumunda sıcaklık değerleri | 68 |

Şekil 5.8 Deşarj durumunda gerilim değerleri 69

Çizelgeler Dizini

| | | |
|---------------------|--|----|
| Çizelge 3.1 | Elektrikli araçlarda kullanılan batarya çeşitleri..... | 12 |
| Çizelge 3.2 | Batarya dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması | 33 |
| Çizelge 5.1 | Anahtarlama kaybı denklemindeki terimlerin anlamları..... | 57 |
| Çizelge 5.2 | MOSFET için ölçülen ve kullanılan değerler | 57 |
| Çizelge 5.3 | Kapasite kaybı denklemindeki terimlerin anlamları | 58 |
| Çizelge 5.4 | MOSFET için ölçülen ve kullanılan değerler | 58 |
| Çizelge 5.5 | İletim kaybı denklemindeki terimlerin anlamları..... | 59 |
| Çizelge 5.6 | MOSFET için ölçülen ve kullanılan değerler | 59 |
| Çizelge 5.7 | Anahtarlama kaybı denklemindeki terimlerin anlamları..... | 61 |
| Çizelge 5.8 | JFET için ölçülen ve kullanılan değerler | 61 |
| Çizelge 5.9 | Kapasite kaybı denklemindeki terimlerin anlamları | 62 |
| Çizelge 5.10 | JFET için ölçülen ve kullanılan değerler | 62 |
| Çizelge 5.11 | İletim kaybı denklemindeki terimlerin anlamları..... | 63 |
| Çizelge 5.12 | JFET için ölçülen ve kullanılan değerler | 63 |
| Çizelge 5.13 | Anahtarlama kaybı denklemindeki terimlerin anlamları..... | 65 |
| Çizelge 5.14 | BJT için ölçülen ve kullanılan değerler | 66 |
| Çizelge 5.15 | İletim kaybı denklemindeki terimlerin anlamları..... | 66 |
| Çizelge 5.16 | BJT için ölçülen ve kullanılan değerler | 67 |
| Çizelge 5.17 | Anahtarlama elemanlarının maliyetleri..... | 68 |
| Çizelge 6.1 | Anahtarlama elemanlarının özellikleri ve çalışmada elde edilen veriler | 71 |

1.GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıtlı araçların kullanımında açığa çıkan sera gazları çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra fosil yakıt kaynaklarının tükenmesinin kaçınılmaz olması otomotiv sektöründe büyük değişikliklere sebep olmaktadır. Yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlı araçların alternatifi olarak elektrikli araçların gelişimi başlamıştır. Elektrikli araçların tarihi 1900'lü yılların başlarına uzanmaktadır. Elektrikli araçlar altın çağını 1900'lü yılların sonunda yaşamıştır. Günümüzde dünyada ve ülkemizde tercih edilme oranı oldukça artmaktadır. Elektrikli araçlar elektrik motoru ile çalışmaktadır. Elektrikli motor çalışması için ihtiyaç duyduğu enerjiyi bataryalardan elde etmektedir. Bataryaların sınırlı enerji kapasitesinden dolayı elektrikli araçların menzilleri sınırlıdır (KARABACAK, 2020). Bunun yanı sıra bataryaların şarj süresi fosil yakıtlı araçların depolarının dolum süresine göre daha uzundur. Ayrıca elektrikli araçların bataryalarının ömrü fosil yakıtlı araçların ömrüne göre daha kısıtlıdır. Geçmişte bu dezavantajlar elektrikli araçların tercih edilmesinde bir engeldi ancak son yıllarda elektrikli araç ve batarya teknolojileri bu engeli kaldırmaya çalışmaktadır. Yapılan çalışmalar ve gelişen teknoloji ile birlikte bu dezavantajlar minimize edilmektedir.

Elektrikli araçlardaki bataryaların verimini arttırmak için batarya yönetim sistemleri kullanılmaktadır. Batarya yönetim sistemleri; elektrikli araçlar (EV), enerji depolama sistemleri (ESS) ve diğer batarya tabanlı uygulamalarda kullanılan bataryaların verimli, sağlıklı çalışmasını sağlayan sistemlerdir. Batarya yönetim sistemleri elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların gerilim, sıcaklık ve akım parametrelerini anlık olarak izlemektedir (KARABACAK, OZKAN ve SARİTAS, 2020b). Bu parametreler sayesinde batarya şarj durumu (SOC) ve batarya sağlık durumu (SOH) gibi değerleri elde ederek kullanıcıya aktarmaktadır. Bataryalar kullanılırken bu parametrelerin izlenmesi ve referans aralıkta olması bataryanın enerji verimini önemli derecede artırır (LI, LI, ZHAO ve GUO, 2018).

Bataryaların verimi, performansı ve güvenliği açısından batarya yönetim sistemi oldukça önemlidir. Batarya teknolojilerinin gelişimi ile birlikte batarya yönetim sistemleri de gelişmektedir. Bu gelişmelerle birlikte elektrikli araçların dezavantajları minimize edilmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında da batarya yönetim sistemlerinin gelişimine katkı sağlanması hedeflenmiştir. Tezin ilk bölümünde genel bilgi verilmiştir. İkinci bölümde kaynak araştırmaları hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümünde elektrikli araçlar,

bataryalar ve batarya yönetim sistemleri hakkında geniş bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümünde batarya yönetim sistemindeki pasif dengeleme yönteminin geliştirilmesi için anahtarlama elemanı olarak farklı yarıiletkenlerin kullanılması ile yapılan bu çalışmada kullanılan malzemeler, kullanım şekilleri, kullanım amaçları açıklanmıştır. Beşinci bölümde pasif dengeleme yöntemi için kullanılan farklı anahtarlama elemanlarının pasif dengeleme işlemindeki performansları ortaya konmuştur. Altıncı bölümde ise bu tez çalışmasının sonuçları ve gelecekte yapılan çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

1.1. Tezin Amacı

Yapılan bu tez çalışmasında batarya yönetim sistemlerinde kullanılan pasif dengeleme yönteminde, anahtarlama elemanı olarak farklı yarıiletkenler kullanılarak performanslarının karşılaştırılması hedeflenmiştir. Batarya verimliliğini arttırmak için gerilim ve sıcaklık değerlerini anlık olarak takip ederek referans aralıkta çalışması hedeflenmiştir. Batarya şarj esnasında oluşan hücreler arasındaki dengesizlikleri gidermek adına pasif dengeleme yöntemi kullanılmıştır. Bunların yanı sıra tezin en önemli amacı pasif dengeleme işleminde kullanılan anahtarlama elemanlarının performanslarını ortaya koymaktır. Pasif dengeleme işlemi MOSFET, JFET ve BJT yarıiletkenler ile ayrı ayrı yapılmıştır. Anahtarlama elemanı olarak kullanılan yarıiletkenlerin pasif dengeleme devresindeki anahtarlama hızı, performansı ve enerji verimi elde edilerek birbirleri ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. Farklı anahtarlama elemanlarının avantaj ve dezavantajları gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Pasif dengelemenin geliştirilmesi ile gelecekte yapılacak olan çalışmalara ışık tutması amaçlanmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Batarya yönetim sistemleri, batarya tabanlı uygulamalarda bataryanın verimini arttırmak, batarya güvenliğini sağlamak ve bataryanın ömrünü uzatmak için kullanılır. Batarya yönetim sistemleri elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri ve taşınabilir elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. En yaygın kullanıldıkları alan elektrikli araçlardır. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların kapasitesi doğrudan menzillerini etkilemektedir. Bu sebeple bataryalardaki depolanan enerji en verimli şekilde kullanılmalıdır. Günümüzde elektrikli araç teknolojisinin hız kazanması ile birlikte batarya yönetim sistemleri üzerine yapılan çalışmalar da artmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde batarya yönetim sistemine yönelik çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Batarya yönetim sistemlerinin batarya izleme, batarya koruma, şarj-deşarj yönetimi gibi geniş bir görev tanımı vardır. (LI ve diğeri, 2018) yapmış oldukları çalışmada batarya yönetim sistemi için ana ölçüm parametreleri, durum tahmini ve hücre dengeleme gibi batarya yönetim sisteminin görevlerini incelemiştir. (MENAK, KARADAĞ, ALTUĞ ve TAN, 2021) yapmış oldukları bu çalışmada ise batarya yönetim sistemlerinin görevlerini nitel açıdan inceleyerek gelecekteki çalışmalara yön gösterici olmayı hedeflemiştir. (ALTUN, 2012) ise batarya yönetim sistemi algoritmasını gerçekleştirmiş olduğu çalışmada SOH, SOC ve DOD hesaplamalarını yaparak batarya kestirim görevi üzerine çalışmıştır.

Batarya yönetim sistemleri hem donanım hem de yazılım bileşenleriyle entegre bir şekilde tasarlanan kontrol sistemleridir. (ŞAHİN, 2022) yapmış olduğu çalışmada batarya yönetim sisteminin tasarımını donanımsal olarak gerçekleştirmiştir. Batarya paketinin oluşturduğu risklere karşı emniyet ve elektriksel güvenlik konusunda çalışmıştır. (GÜL, 2018) ise batarya yönetim sisteminin donanım tasarımını gerçekleştirmiştir. Ayrıca bu çalışmada maliyet analizi yapılmıştır. Aynı şekilde batarya yönetim sisteminin donanım tasarımı üzerine yapılan bir diğer çalışma ise (ALDOĞAN, 2012)'in yapmış olduğu çalışmadır.

Batarya tabanlı uygulamalarda farklı kimyasal yapıya sahip pil hücreleri kullanılabilir. (DİKMEN, 2022), akıllı batarya yönetim sistemi üzerine yaptığı çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan farklı bataryaların tespitini sağlamıştır. Deney çalışmalarında batarya tespiti noktasında %100 doğruluk sonucuna ulaşmıştır.

(KARADAĞ ve DİKMEN, 2021) yaptıkları çalışmada ise farklı kimyadaki bataryalarda kullanılacak batarya yönetim sistemi tasarımı gerçekleştirmişlerdir.

(ÖZBALCI ve KILIÇ, 2019), batarya yönetim sistemlerinin modellenmesi açısından bir çalışma yapmışlardır. Batarya paketi MATLAB Simulink ortamında modellenmiştir. Batarya yönetim sistemi tasarımında batarya paketinin benzetim yolu ile yapılmasında yön gösterici nitelikte bir çalışma olmuştur.

(ORBİYİ, 2022), PLC kontrollü batarya yönetim sistemi gerçekleştirerek geleneksel yöntemlerin dışına çıkmıştır. Bu çalışmada kontrol edilebilir hücre sayısı geleneksel yönteme göre daha fazladır.

Batarya yönetim sistemlerinin en önemli görevlerinden biri bataryaların şarj ve deşarj durumunda gerilim farklılıklarını minimize etmek amacı ile hücre dengeleme işlemi yapmaktır. Hücre dengeleme enerji verimliliği açısından oldukça önemlidir. Hücre dengeleme pasif dengeleme ve aktif dengeleme olmak üzere iki temel yöntem ile gerçekleştirilir. (RİGAN, 2020), çalışmasında lityum iyon bataryaların performanslarını maksimum seviyeye getirmek için batarya yönetim sistemi tasarımı gerçekleştirmiştir. Hücre dengeleme yöntemi olarak pasif dengeleme metodunu kullanmıştır. Pasif dengelem işlemi için anahtarlama elemanı olarak MOSFET yarıiletkenini kullanmıştır. (KIVRAK, ÖZER ve OĞUZ, 2020) çalışmalarında P kanallı MOSFET kullanarak bu yarıiletkenin anahtarlama performansını gözlemlemişlerdir. (ÇAMUR, 2025) ise pasif dengeleme yönteminde kontrolü NPN transistör ile sağlamıştır. Batarya yönetim sisteminde pasif dengeleme yöntemini (BAYGÜNEŞ, 2019) de çalışmasında kullanmıştır. Aynı şekilde (INAN, GÜÇKIRAN, ALTINIŞIK, TEK ve POTUK, 2023) da lityum iyon pil kullandıkları batarya yönetim sistemi tasarımında pasif dengeleme metodunu kullanmışlardır. Gerçek zamanlı testler yaparak pasif dengeleme yöntemini kararlılık ve verimlilik açısından değerlendirmişlerdir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalar için aktif dengeleme yönteminin kullanılmasını önermişlerdir.

(TÜRGUT, 2018) hücre dengeleme yöntemini pasif dengeleme ile yaptığı batarya yönetim sisteminde bulanık mantık denetleyici kullanarak literatüre farklı bir çalışma sunmuştur. (HİSAR, 2023) ise düşük maliyet ile tasarladığı batarya yönetim sisteminde pasif dengeleme yöntemini kullanmıştır.

Batarya dengeleme yöntemi olarak aktif dengeleme karmaşık yapısı ve yüksek maliyeti sebebi ile çok tercih edilmemektedir. Ancak enerji verimliliği açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Enerji veriminin yüksek olması istenen çalışmalarda kullanılmaktadır. (SARIKURT ve BALI, 2017) tam elektrikli araçlar için enerji yönetim sistemi tasarımını yapmış oldukları çalışmada, hücre dengeleme yöntemi olarak aktif dengeleme kullanmışlardır. Çalışma sonucunda batarya çalışma süresinin yaklaşık iki kat

uzadığı gözlemlenmiştir. (KILINÇ, 2022) da çalışmasında lityum iyon pillerin bulanık mantık kontrolü ile aktif dengeleme işlemini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda bataryanın kullanılabilir kapasitesi ve ömrünün artırılması sağlanmıştır.

(YİĞİTER, 2022) ise kurşun asit bataryalar için hem aktif dengeleme hem pasif dengeleme metodunu kullanarak batarya yönetim sistemi tasarımı gerçekleştirmiştir. Böylece dengeleme yöntemlerinin aynı anda kullanılması ile literatüre farklı bir bakış açısı kazandırmıştır.

Kaynak araştırması doğrultusunda bu tez çalışmasında lityum iyon piller kullanarak batarya paketi oluşturulacaktır. Batarya paketinin şarj ve deşarj işlemleri sırasında gerilim ve sıcaklık ölçümleri gerçek zamanlı olarak izlenecektir. Batarya şarj edilirken gerilim farklılıklarını minimize etmek amacı ile pasif dengeleme yöntemi kullanılacaktır. Pasif dengeleme işleminde anahtarlama elemanı olarak MOSFET, JFET ve BJT yarıiletkenleri kullanılarak pasif dengeleme devresindeki performansları anahtarlama hızı, tepki süresi, güç kayıpları ve maliyetleri açısından karşılaştırılması hedeflenmiştir.

3.ELEKTRİKLİ ARAÇLAR ve BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ

3.1.Elektrikli Araçlara Genel Bakış

Günümüzde yakıt maliyetlerindeki artış, fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar ve bakım açısından sağladığı kolaylıklardan dolayı elektrikli araçlara olan ilgi artmıştır. Geçmişten günümüze kadar elektrikli araçlar üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Son yıllarda gelişmiş ülkelerin çevre politikaları bu çalışmalara hız kazandırmıştır (LI ve diğerleri, 2018).

Elektrikli araçlar içten yanmalı motor yerine elektrik motoru ile çalışan araçlardır. Elektrik motoru çalışması için ihtiyaç duyduğu enerjiyi bataryalardan elde eder. Elektrikli araçlar çevre dostu olması, düşük emisyonları ve enerji verimlilikleri ile içten yanmalı motorlara göre birçok avantaja sahiptir.

3.1.1.Elektrikli araçların gelişimi

Elektrikli araçların gelişimi günümüzde büyük bir ivme kazanmış olsa da bu teknolojinin kökeni 19. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır. Tarihte bilinen ilk elektrik motoru ile çalışan araç, 1835 yılında Amerika'nın Vermont eyaletinde Thomas Davenport tarafından geliştirilmiştir. Bu araç, iki elektromıknatis, bir pivot ve bir batarya ile çalışan küçük bir lokomotif niteliğindedir ve elektrikli araçlar tarihinde önemli bir adım olarak kabul edilmektedir (EFE ve GÜNGÖR, 2022). Yaklaşık aynı dönemde, 1832-1839 yılları arasında İskoçya'nın Aberdeen şehrinde mucit Robert Anderson da elektrikli bir araç prototipi geliştirmiştir. Ancak bu araç şarj edilemediğinden dolayı sürdürülebilir bir kullanım sunamamıştır. Daha sonra, 1894 yılında Pedro Salom ve Henry G. Morris'in çalışmaları sonucunda ilk pratik elektrikli araç üretilmiş ve bu gelişme elektrikli taşıtların yaygınlaşmasında önemli bir rol oynamıştır. Bu çalışmaları takiben, 1897 yılında New York sokaklarında ilk elektrikli taksiler hizmet vermeye başlamış; aynı yıl Pope Manufacturing Company, Amerikan elektrikli otomobil üreticisi olarak tarih sahnesinde yerini almıştır.

1900'lü yılların başlarında elektrikli araçlar altın çağını yaşamaya başlamıştır. Amerika'da üretilen araçların %28 elektrik motoru ile çalışan araçlardı. Bu dönemde üretilen benzinli araçların titreme, gürültü gibi dezavantajlarından dolayı çok tercih edilmeyip bunun yerine elektrikli araçlar tercih ediliyordu. 1908 yıllarına kadar elektrikli

araçlar daha çok tercih edildi. 1908 yılında Ford firmasının benzinli araçları seri üretime alması ile birlikte otomobil sektörü tamamen değişime uğradı. Seri üretim sebebi ile fiyat avantajı ve menzil genişliği sebebi ile elektrikli araçlar yerini benzinli araçlara bıraktı. 1920'li yıllarda elektrikli araçlar artık tercih edilmiyordu. 1960'lı yıllarda otomobil sayısının artması, fabrikalardaki yoğun üretim sebebi ile hava kirliliği çok artmıştı. Bu durumla birlikte 1973'teki petrol krizi ile benzinli araçlara alternatif olarak elektrikli araçlara olan ilgi yeniden canlandı. 1972 yılında BMW ve 1974 yılında Vanguard-Sebring yeni elektrikli araçlarını tanıtarak elektrikli araçlara olan ilgiyi arttırdılar. 1990 yıllarında çevre politikaları ve gelişen teknoloji ile elektrikli araçlar oldukça önem kazandı. Bu alanda yapılan çalışmalara da destek verildi. 2000'li yıllarda Tesla ve 2010 yılında Nissan firmasının piyasaya sunduğu elektrikli araçlarla birlikte elektrikli araçların yeniden yükselişi başlamış oldu. Bu araçların performansı ve yüksek menzilleri ile sadece çevre kirliliği açısından benzinli araçlara alternatif olmak yerine elektrikli araçların her açıdan benzinli araçlara rekabetçi olacağını ortaya koydu (ÖZBAY, KÖZKURT, DALCALI ve TEKTAŞ, 2020). Günümüze bakıldığında hem menzil hem performans açısından elektrikli araç teknolojisinde oldukça ilerleme kaydedilmiştir. Batarya teknolojisinin de ilerlemesi ile birlikte oldukça yüksek menzil sunulan elektrikli araçlar mevcuttur. Bununla birlikte hızlı şarj sayesinde bataryalar çok hızlı bir şekilde şarj edilip kullanıcılara kolaylık sağlamaktadır (RIMPAS ve diğerleri, 2022). Çevresel faktörler ve enerji sürdürülebilirliği de düşünüldüğünde elektrikli araçların avantajları gün geçtikçe artmaktadır. Dünya çapında elektrikli araçlara verilen destekle birlikte elektrikli araçlara olan ilgi büyük bir ivme ile artmaktadır.

3.1.2. Elektrikli araçların Türkiye'deki gelişimi

Dünyada olduğu gibi Türkiye'de de elektrikli araç teknolojisine son yıllarda ilgi artmaktadır. Bunun temel sebebi konvansiyonel enerji kaynaklarına olan bağımsızlığı arttırmak ve enerjiyi daha verimli kullanmaktır. Bu konu hakkında ülkemiz teşvikler uygulamaktadır.

2023 yılının sayısal rakamlarına göre Türkiye'deki elektrikli araç sayısı 80,000 civarındadır. Avrupa ülkeleri ile kıyaslandığında bu sayılar oldukça azdır ancak ülkemizin yaptığı teşvikler ve çalışmalar sayesinde önümüzdeki yıllarda bu sayının artması beklenmektedir. Öngörülere göre 2025 yılında Türkiye'deki elektrikli araçların sayısının 250,000 geçmesi beklenmektedir.

Türkiye elektrikli araçlara olan ilgiyi arttırmak için bazı teşviklerde bulunmaktadır. Bunlar; vergi indirimi, şarj alt yapısının geliştirilmesi ve yerli üretim destekleri olarak sıralanabilir.

Türkiye'deki teşviklerin yanı sıra yerli üretim konusunda da son yıllarda çok önemli gelişmeler sağlanmıştır. Türkiye'nin ilk yerli elektrikli otomobili TOGG'dur. TOGG 2022 yılında üretime başlamıştır. Büyük bir ivme ile üretim ve satışlarını gerçekleştirmiştir. TOGG'un hedefi 2030 yılına kadar 1 milyon elektrikli araç üretmektir. TOGG'un gelişimi ile birlikte Türkiye'de elektrikli araç teknolojisinin geleceği oldukça parlaktır. Yapılan araştırmalara göre 2030 yılında Türkiye'deki yeni satılan araçların %30'u elektrikli araçlar olması beklenmektedir.

3.2.Elektrikli Araçların Türleri

Elektrikli araçlara olan ilginin son yıllarda oldukça artması ve elektrikli araç teknolojinin büyük bir ivme ile gelişmesi elektrikli araç kavramını da kapsamlı hale getirmiştir (KARABACAK ve diğerleri, 2020b). Elektrikli araç denildiğinde motor, çalışma prensibi, batarya paketleri açısından farklı araç türlerini anlaşılmaktadır. Elektrikli araç türleri başlıca şu şekilde sıralanabilir:

3.2.1.Bataryalı elektrikli araçlar (BEV)

Tamamen elektrikli otomobiller piyasada bataryalı elektrikli otomobiller olarak ta bilinmektedir. Sadece elektrik enerjisi kullanarak çalışmaktadır. Sadece elektrik enerjisi ile çalışması sıfır emisyon imkanı tanımaktadır. Bunun yanı sıra yakıt maliyeti diğer elektrikli araçlarla kıyaslandığından oldukça düşük kalmaktadır. Sadece elektrik enerjisine ihtiyaç duyduğundan dolayı araçta bir yakıt deposu bulunmamaktadır (DİKMEN, 2022). Şarj edilebilir bir bataryaya sahiptir elektrik motoru elektrik enerjisini ihtiyacını bu bataryadan elde etmektedir. BEV'ler ev tipi prizler veya hızlı şarj istasyonlarında şarj edilebilirler. Sadece elektrik enerjisi kullanarak çalıştıklarından dolayı bataryaları çok yüksek kapasiteye sahiptir. Bu durum ekstra batarya teknolojisi ile doğrudan ilgilidir. Ayrıca diğer elektrikli araçlara göre daha maliyetli olmasının sebebi de bu durumdur. Geleneksel otomobiller ile kıyaslandığında BEV'lerde daha az araç parçası bulunmaktadır. Bu durumda daha az bakıma ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

3.2.2.Hibrit elektrikli araçlar (HEV)

Hibrit elektrikli araçlarda hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru bulunmaktadır. İçten yanmalı motorun kullanılması için yakıt deposu, elektrik motorunun kullanılması için batarya paketi bulunmaktadır. Motorların kullanımı ihtiyaca göre otomatik olarak belirlenir ve bu durum verimliliği artırır (RİGAN, 2020). Benzinli ve dizel araçlara göre HEV'lerin fosil yakıt tüketimi daha az olduğu için çevreye daha duyarlıdır.

3.2.3.Hafif hibrit elektrikli araçlar (MHEV)

Hafif hibrit otomobillerde içten yanmalı motor, elektrik motoru ve şarj edilebilir lityum iyon pil sistemi kullanılmaktadır. Bu batarya sistemi 48 voltluk bir sistemdir. Hibrit elektrikli araçlardan farkı elektrik motorunun sadece fosil yakıtlı motora destek olmak için kullanılmasıdır. Diğer elektrikli araç çeşitlerine göre daha az elektrikli sürüş sağlamaktadır. Bu durumdan dolayı hafif elektrikli otomobillerin elektrikli araçlar grubunda yer alıp alamayacağı hala bir tartışma konusudur.

3.2.4. Plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV)

Plug-in Hibrit elektrikli otomobillerde de içten yanmalı bir motor, elektrik motoru ve şarj edilebilir lityum iyon pil sistemi bulunmaktadır. Bataryadaki enerji bittiğinde içten yanmalı motor devreye girer. Lityum iyon pil sistemi dışarıdan şarj edilebilir. Rejeneratif frenleme sistemi sayesinde araç her frenleme anında kendi kendini şarj edebilir.

3.2.5.Yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV)

Yalnızca elektrik enerjisi ile çalışmaktadırlar. Tamamen elektrikli otomobillere göre en büyük farkları enerji depolama şekilleridir (ALTUN, 2012). Bu tür elektrikli otomobiller hidrojen yakıtını kullanarak elektrik üretmektedir. Sıkıştırılmış hidrojenden sağlanan enerji yakıt hücresi tarafından elektriğe dönüştürülür. Böylece aracın ihtiyaç duyduğu enerjiyi kendi kendine üretmiş olur. Emisyonuz bir çalışma prensibi vardır atık olarak yalnızca su buharı üretir. Bu özelliklerinin yanı sıra içten yanmalı motorlu araçlar gibi yakıt depolara çok kısa bir süre içerisinde doldurulmaktadır.

3.3.Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları

Elektrikli araçlar otomotiv sektöründe son yıllarda ivmeli bir çıkış sağlamıştır. Elektrikli araçların genel çerçevede avantaj ve dezavantajları bu bölümde irdelenmiştir.

3.3.1. Elektrikli araçların avantajları

- Elektrikli araçların en belirgin avantajı çevre dostu olmasıdır. Kullandığı motor elektrik motoru olup bu motor enerjisini şarj edilebilir pil paketlerinden sağladığı için çevreye zarar veren gaz salınımı yapmaz (GÜL, 2018). Türlerine göre farklılık gösterse de egzoz emisyonu en az seviyededir. Günümüz dünyasının hava kirliliğine bakıldığında elektrikli araçların bu özelliği büyük avantaj sağlamaktadır.
- Elektrikli araçların çalışması esnasında elektrik motorunun minimum ses seviyesi ses kirliliğini de büyük oranda azaltabilmektedir (BAYGÜNEŞ, 2019).
- İçten yanmalı motorlarda benzin veya dizel yakıtlarının yanma sürecindeki enerji kayıpları olmadığı için elektrikli araçlar enerji açısından yüksek verimlilik sağlamaktadır.
- Kullanım maliyeti oldukça azdır. Benzin veya dizel yakıtları elektrik enerjisine göre oldukça maliyetlidir. Bu maliyet her geçen gün petrole gelen zam ile artmaktadır. Bireysel açıdan tasarrufun yanı sıra ülkelerin dışa bağımlılıklarını azaltabilecek bir faktördür.
- 2000'li yılların başlarına nazaran elektrikli araçları şarj etme olanakları oldukça gelişmiştir. Günümüzde şarj istasyonları Türkiye dahil olmak üzere birçok ülkede oldukça artmıştır. Kullanıcılar şarj istasyonlarında araçlarını hızlı şarj etme imkanına sahiptir. Bunun yanı sıra kullanıcılar evlerinde de araçlarını şarj ederek maliyeti daha da düşürme imkanına sahiptirler (ŞAHİN, 2022).
- Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motoru doğrudan bataryadan güç aldığı için arada başka parçaların kullanıldığı karmaşık bir sistemi yoktur. İçten yanmalı motora sahip araçlara göre daha basit bir sistemi vardır. Bu durumda düşük bakım masrafı avantajını ortaya koymaktadır.

- Elektrikli araçlara son yıllarda ilgi arttığı için otomobil firmaları da çalışmalarını bu yönde geliştirmektedir. Böylelikle elektrikli araçlar en yeni teknolojiler ile tasarlanmaktadır. Otonom sürüş, teknolojik iç tasarım ve yüksek performanslı batarya teknolojileri bu yenilikler arasında sıralanabilir.

3.3.2. Elektrikli araçların dezavantajları

- Elektrikli araçların menzilleri benzin ve dizel arabalara göre daha kısıtlıdır. Bu durum uzun yolculuk yapacak kullanıcılar için bir engel niteliğindedir. Ancak yüksek performanslı batarya teknolojileri üzerine çalışmalar devam etmektedir (İNAN et al., 2022). İleriki yıllarda elektrikli araçların menzillerinin bu çalışmalarla birlikte artması öngörülmektedir.
- Elektrikli araçlar benzinli ya da dizel araçlara göre daha pahalıdır. Bu durumun temel sebebi önceki yıllarda otomotiv sektörünün benzinli veya dizel araçların üretimine daha çok yer vermesidir. Son yıllarda elektrikli araçlara olan ilgi arttığı için elektrikli araç teknolojisi de oldukça ivme kazanmıştır. Bu gelişmelerle birlikte üretim maliyeti, batarya maliyeti ve şarj istasyonları maliyetlerinin azalması öngörülmektedir.
- Elektrikli araçların şarj süresi en büyük dezavantajlarından birisidir. Şarj istasyonlarının AC ve DC olması büyük farklılıklar göstermektedir. AC şarj istasyonları 6-8 saatte bataryayı tam kapasite ile şarj edebilmektedir. DC şarj istasyonları ise 40 dakika gibi bir sürede bataryayı tam kapasite şarj etmektedir. Buna karşılık benzinli veya dizel araçlar depolarını birkaç dakika içinde doldurabilmeleri elektrikli araçların bu konudaki dezavantajını net bir şekilde ortaya koymaktadır (BAYGÜNEŞ, 2019).
- Elektrikli araçların batarya ömrü benzinli veya dizel araçların motorlarının ömrüne göre çok daha kısadır. Batarya değişimi büyük bir maliyettir bu da uzun vadede elektrikli araçların tercih edilmemesine sebep olabilir.
- Şarj istasyonları dünya ve ülkemiz çapında oldukça yaygınlaşsa dahi daha küçük illerde henüz yaygınlaşma hızı oldukça azdır. Bu durum elektrikli araçları kullanıcıların tercih etmesini azaltmaktadır.

3.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri

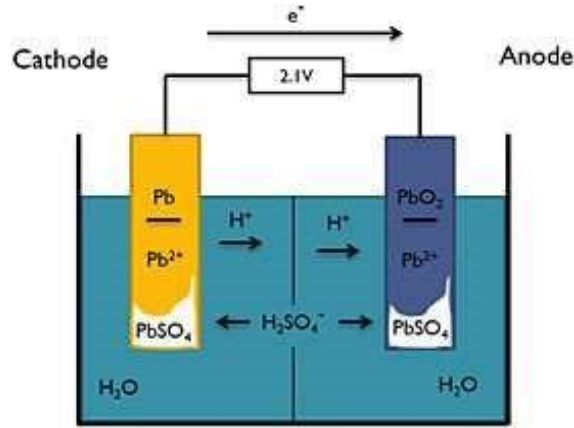
Elektrikli araçların bataryaları maliyet, kapasite ve performans açısından beklentilere göre farklı şekillerde üretilmektedir. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya türleri ve özellikleri aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (YONG, RAMACHANDARAMURTHY, TAN ve MITHULANANTHAN, 2015).

Çizelge 3.1 Elektrikli araçlarda kullanılan batarya çeşitleri

| Batarya Çeşitleri | Nominal Gerilim (V) | Enerji Yoğunluğu (Wh/kg) | Çevrim Ömrü (#) | Hafıza Etkisi | Çalışma Sıcaklığı (C) |
|-------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|---------------|-----------------------|
| Pb-acid | 2 | 35 | 1000 | Yok | -15, +50 |
| NiCd | 1,2 | 50-80 | 2000 | Var | -20, +50 |
| NiMH | 1,2 | 70-95 | <3000 | Nadir | -20, +60 |
| Zebra | 2,6 | 90-120 | >1200 | Yok | +245, +350 |
| Li-ion | 3.6 | 118-250 | <1500 | Yok | -20, +60 |
| Li-Po | 3,7 | 130-225 | >1200 | Yok | -20, +60 |
| LiFePO4 | 3,2 | 120 | >2000 | Yok | -45, +70 |
| Zn-air | 1,65 | 460 | 200 | Yok | -10, +55 |
| Li-S | 2,5 | 350-650 | 300 | Yok | -60, +60 |

3.4.1. Kurşun asit bataryalar

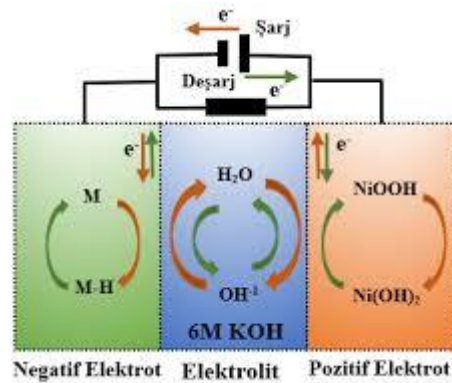
Kurşun-asit bataryalar şarj edilebilir pillerin en eski türlerindedir. Düşük maliyeti sebebi ile önceki yıllarda tercih sebebi olmuştur (EFE ve GÜNGÖR, 2022). Ömürleri Li-ion pillere göre daha kısadır. Ayrıca Li-ion pillere göre daha ağır yapıdadırlar. Günümüz teknolojisinde ağır olmaları elektrikli otomobil teknolojisine uyum açısından dezavantaj sağlamaktadır. Bu tür bataryalar aktif kullanımda olmadıklarında kullanım ömürleri azalmaktadır. Ayrıca kurşun çevreye zarar verebilecek bir madde olduğundan geri dönüşümleri doğru yapılmadığında bu tür bataryalar çevre kirliliğine sebep olabilirler (BAYGÜNEŞ, 2019). Bu tür dezavantajlarından dolayı günümüzde tercih edilmemektedir.



Şekil 3.1 Kurşun asit batarya gösterimi

3.4.2. Nikel metal hidrit bataryalar

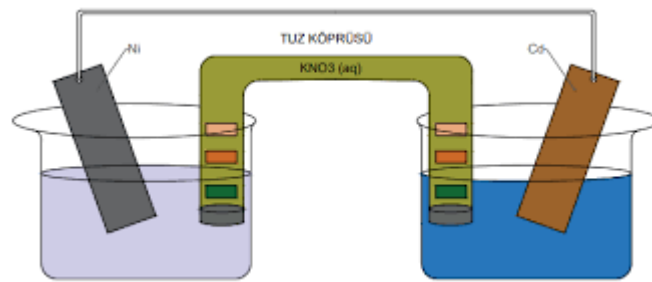
NiMH bataryalar kurşun-asit bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. NiMH bataryalar kurşun ve sülfür içermedikleri için kurşun-asit bataryalara göre çevre dostudur. Geri dönüşümleri daha kolaydır. Şarj-deşarj döngüleri daha fazla olduğundan ömürleri daha uzundur. Kullanılmadıkları süre zarfında kendilerini deşarj etme özelliğine sahip olmaları bir dezavantajdır. Kurşun asit bataryalara göre daha hafif olmaların karşılık Li-ion bataryalara göre daha ağır yapıdadırlar. Bu durum NiMH bataryaları günümüz teknolojisinde daha az tercih edilir hale getirmiştir. Nominal voltajları 1.2 V - 2 V arasındadır. Hızlı şarj ve aşırı şarj durumlarında çevrim ömürleri azalmaktadır. Kullanım alanları taşınabilir elektronik aletler, elektrikli araçlar ve yedek güç kaynağı olarak sıralanabilir (KÜÇÜKDEVECİ, 2018). Dezavantajları sebebi ile günümüzde kullanılmamaktadır.



Şekil 3.2 Nikel metal hidrit batarya

3.4.3. Nikel kadmiyum bataryalar

NiCd bataryalar yüksek güç yoğunlukları, dayanıklılıkları ve uzun ömürlü olma özellikleri ile öne çıkmaktadırlar. Yüksek güç tüketen cihazlarda ani güç ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılırlar. Ortam sıcaklık değişimlerine oldukça dayanıklıdırlar sıcaklık değişimlerinde performansları azalmaz (YONG ve diğerleri, 2015). Gerekli bakımları yapıldığında şarj-deşarj çevrimi oldukça fazladır bu da uzun ömürlü olduklarını göstermektedir. Şarj edilebilir bataryaların geneline bakıldığında daha uygun fiyatlıdır. Kadmiyum toksik bir madde olduğundan çevreye zarar verebilme ihtimali oldukça yüksektir. Bu sebeple geri dönüşümleri doğru bir şekilde yapılmalıdır. NiCd bataryaların enerji yoğunluğu modern batarya teknolojilerine göre daha düşüktür. Son yıllarda lityum-iyon ve lityum-polimer bataryaların gelişmesi ile NiCd bataryalar daha az tercih edilmektedir.



Şekil 3.3 Nikel kadmiyum batarya

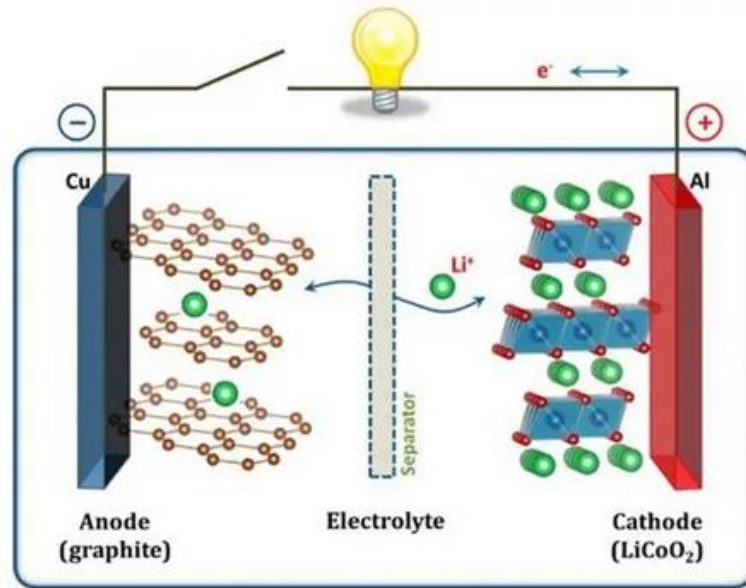
3.4.4. Lityum iyon bataryalar

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan şarj edilebilir batarya türüdür. Günlük hayatımızda kullandığımız birçok elektronik alette lityum iyon bataryalar kullanılmaktadır. Cep telefonu, dizüstü bilgisayar, kablosuz kulaklık, akıllı saatler gibi taşınabilir elektronik cihazlarda, elektrikli araba, elektrikli bisiklet gibi elektrikli araçlarda, güneş panelleri, rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji depolama amacı ile, kalp pilleri gibi medikal cihazlar gibi hayatımızın her alanında kullanılmaktadırlar.

Lityum iyon piller lityum bazlı bileşiklerin kimyasal reaksiyonları sonucunda enerji depolama işlemini yaparlar. Lityum iyonlarının katot ve anot arasındaki hareketleri sayesinde çalışmaktadırlar (POLAT ve KELEŞ, 2012). Lityum iyon bataryalar birçok

avantajı ile günümüzde en çok tercih edilen şarj edilebilir bataryalar arasındadır. Bu avantajları şöyle sıralayabiliriz: Boyutları küçük olmasına karşılık yüksek enerji kapasitesine sahiptir ve bu durum daha uzun süre enerji verebilmeleri anlamına gelir. Diğer şarj edilebilir bataryalara göre oldukça hafiftir bu durum daha çok tercih edilmelerini sağlar. 500-1500 arasında şarj döngüsüne sahiptir bu durum uzun ömürlü olduklarını göstermektedir. NiCd bataryalar gibi hafıza etkisi yoktur (ŞAHİN, 2022). Şarj edilmedikleri sürece enerji kaybına uğramazlar. Dezavantajları ise üretim maliyetlerinin yüksek olması, şarj işleminde bataryaların aşırı ısınması olarak sıralanabilir. Bu sebeple güvenli bir şekilde şarj edilmeleri gerekir.

Li-ion bataryaların şarj işlemi kolaydır (KEREM ve GÜRBAK, 2020). Ancak şarj esnasında aşırı voltaj bataryaya zarar vereceğinden batarya şarj edilirken izlenmesi gerekmektedir. Bakımı işlemi basittir. Çalışma sıcaklık aralığı aşılmaması gerekir (LIU, NEALA ve CAO, 2016).

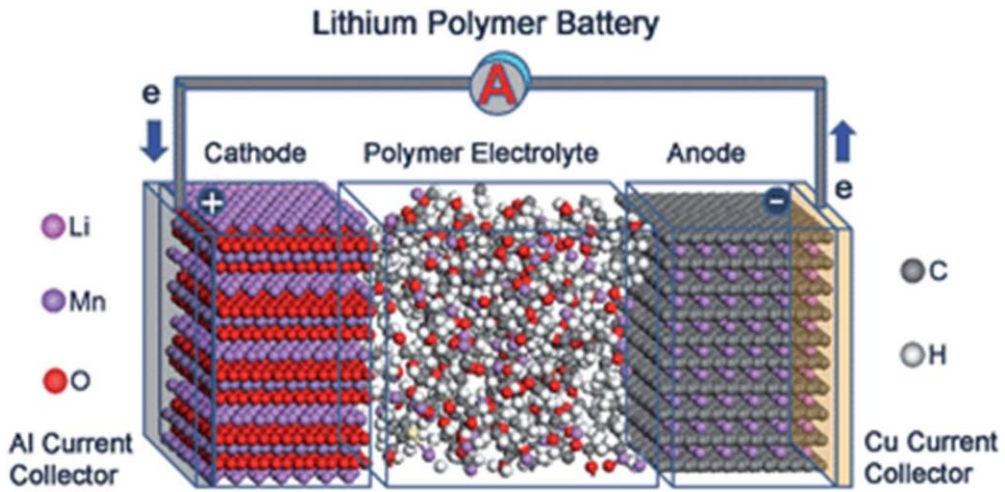


Şekil 3.4 Lityum iyon batarya (C. LIU ve diğerleri, 2016)

3.4.5. Lityum polimer bataryalar

Li-Po bataryalar Li-ion bataryaların geliştirilmiş bir türüdür. Li-Po pillerin çalışmaları Li-ion pillerde olduğu gibi İyon bileşenlerinin anot ve katot arasındaki hareketleri ile sağlanır. Li-Po piller geleneksel Li-ion pillere göre daha ince ve esnek yapıya sahiptirler. Bu durum taşınabilir cihazlarda daha çok tercih edilmelerini sağlar.

Esnek olmaları istenilen şekillerde üretilmesine olanak sağlar. Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Yapılarındaki polimer elektrolit malzemesi sıvı elektrolite göre daha az patlatıcıdır. Dışarıdan alınan darbelerde sıvı sızması görülmez (GÜL, 2018). Li-Po bataryalar pahalıdır. Aşırı şarj ve deşarj durumu bataryanın ömrünü kısaltır bu sebeple şarj ve deşarj yönetimi iyi bir şekilde yapılmalıdır. Darbelere karşı hassastır darbeler sonucunda şişme ve patlama görülebilir. Li-ion bataryaların kullanıldığı alanda kullanılmalarının yanı sıra giyilebilir teknolojide de tercih edilmektedir. Geri dönüşümleri mümkün olsa da karmaşık ve pahalı bir işlemdir (LIU ve diğerleri, 2016).



Şekil 3.5 Lityum polimer batarya

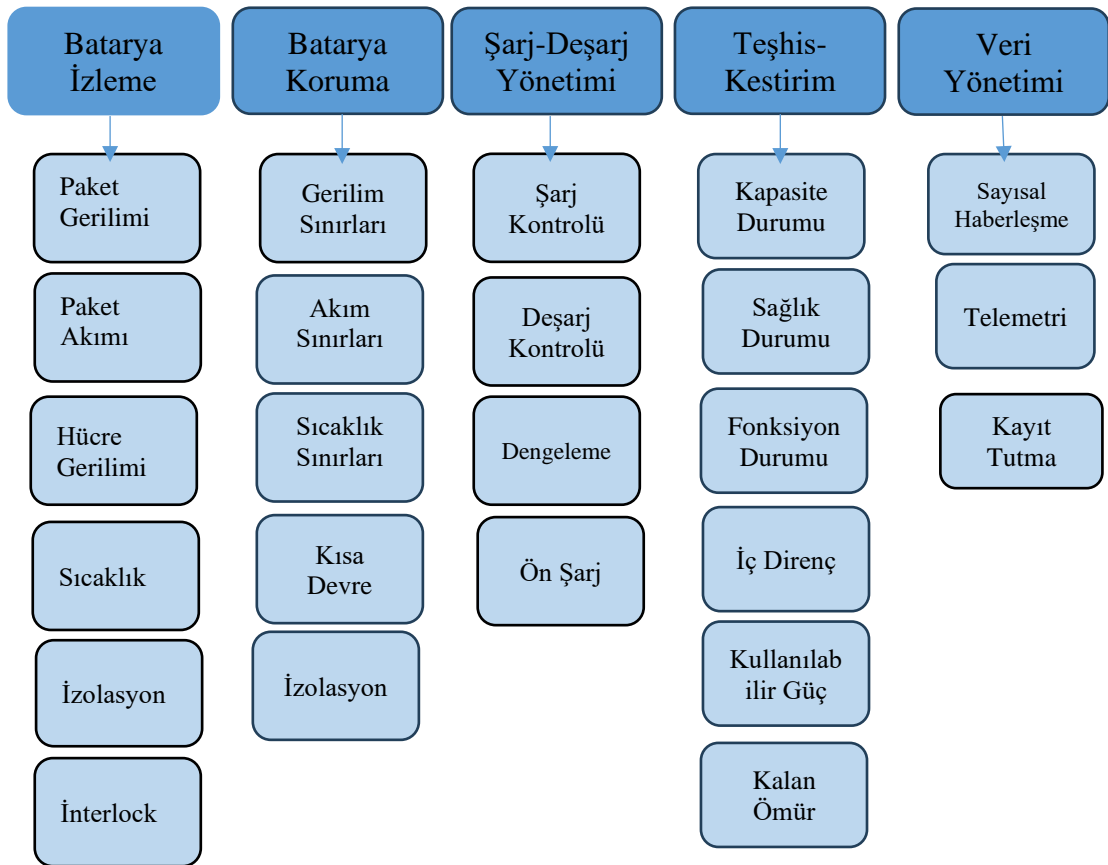
3.5. Batarya Yönetim Sistemleri

Batarya yönetim sistemleri; batarya tabanlı uygulamalarda bataryaların verimini arttırmak, ömrünü uzatmak ve güvenli kullanım ortamı sağlamak için kullanılan sistemlerdir. Bataryalardaki bazı parametreleri izler, bu parametrelerin çalışma sınırında kalmasını sağlar. Şarj durumu, sağlık durumu gibi kritik bilgileri kullanıcıya aktarır (TÜRGUT, 2018).

3.5.1. Batarya yönetim sistemi görevleri

Bataryaların şarj-deşarj durumlarında parametrelerini izlemek ve referans aralıkta çalışmalarını sağlamak; bataryaların ömrü, güvenli çalışması ve verimini doğrudan etkilemektedir. BYS'leri bataryalardaki önemli parametreleri izlemek ve referans aralıkta

çalışmasını sağlamak amacı ile kullanılmaktadır. Batarya yönetim sistemleri kullanılan batarya hücresinin sayısına ve kullanıldığı alana göre farklı görevlere sahiptir. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların hücre sayıları oldukça fazladır ve bu bataryalar elektrikli araçların çalışmasını sağlayan tüm sistemin temel enerji kaynağıdır. Bu sebeple elektrikli araçlardaki bataryaların genel kontrolünü sağlamak amacı ile kullanılan batarya sistemleri oldukça kapsamlıdır. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya yönetim sistemlerinin görevleri batarya izleme, batarya koruma, şarj-deşarj yönetimi, teşhis ve kestirim ve veri yönetimi olarak sıralanabilir (DİKMEN, 2022).



Şekil 3.6 BYS'nin görevleri

3.5.1.1. Batarya izleme işlemi

BYS'lerin temel görevi batarya izleme işlemidir. Bataryalardaki parametreler izlenerek referans aralıkta çalışması sağlanır. Yaptığı ölçümler sayesinde diğer görevlerin yürütülmesi sağlanır. BYS'lerinin bataryalar üzerinden yaptığı ölçümler aşağıda sıralanmıştır.

- Bataryalardaki hücrelerin ayrı ayrı gerilimlerinin ölçülmesi.
- Hücrelerden elde edilen paketlerin geriliminin ölçülmesi.
- Seri bağlanarak oluşturulan batarya paketlerinin akım değerinin ölçülmesi
- Hücrelerin ayrı ayrı sıcaklıklarının ölçülmesi
- Ortam sıcaklığının ölçülmesi
- Çalışma ortamına bağlı olarak ortamın nem değerinin ölçülmesi
- Bataryanın izolasyon direnç değerinin ölçülmesi
- Soğutma sıcaklığı ve gaz sıvısının ölçülmesi
- Konnektörlerin ve kapakların konumunun ölçülmesi
- Anahtarlama elemanlarının konumunun ölçülmesi

BYS'lerinin diğer tüm görevlerinin sağlıklı ve doğru bir şekilde yerine getirilmesin için ilk ve en önemli görevi izleme görevidir. Bataryanın korunması ve en verimli şekilde çalışması için bu ölçümler hatasız bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Doğru ölçümler sayesinde bataryanın şarj ve deşarj durumunda hücreler güvenli çalışma aralığında tutulmalıdır.

Bataryadaki hücrelerin gerilim değerleri batarya kapasite durumu ve sağlık durumunun doğru hesaplanması açısından oldukça önemlidir. Bataryanın şarj durumunda aşırı şarjı engellemek için doğru ölçüm yapılarak referans değerinin üzerine çıktığında şarj işlemi durdurulmalıdır. Bunun yanı sıra deşarj durumunda bataryadaki hücrelerin aşırı deşarj olması bataryanın ömrünü doğrudan etkilediği için aşırı deşarj engellenmelidir. Bataryaların kapasite hesabını gerçekleştirmek için akım değerinin ölçülmesi gerekir. Lityum iyon pillerin çalışma sıcaklığı güvenlik açısından önemli bir parametredir. Aşırı sıcaklık ve nem durumunu engellemek için bataryaların ve ortamın sıcaklığı en doğru şekilde ölçülmelidir. Sıcaklık maksimum değerinin üzerine çıktığında sistem soğutulmalı veya durdurulmalıdır. Elektrikli araçlarda güvenlik açısından yüksek gerilim sistemleri ve düşük gerilim sistemleri birbirinden izole edilmiştir. Bataryadaki izolasyon direnci anlık olarak takip edilmelidir. Tüm bu ölçümler sayesinde BYB'ler bataryaların verimli, güvenli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlamaktadır.

3.5.1.2. Batarya koruma işlemi

Bataryaların güvenli bir şekilde çalışması için bataryaların gerilim, akım ve sıcaklık değerleri anlık olarak izlenmektedir. Bu değerlerin verimli ve güvenli oldukları

aralıklar referans değer olarak belirlenir ve referans değerlerin dışına çıktığında gerekli önlemler alınmalıdır.

Bataryalardaki hücrelerin gerilim değerleri hücre gerilim değerini güvenli aralıkta tutmak, kapasitenin hesaplamasını yapmak ve hücreler arası gerilim dengesizliklerini minimize etmek için dengeleme işlemini gerçekleştirilmek için anlık olarak takip edilmelidir. Şarj işlemi sırasında bataryaların gerilim değerleri anlık olarak takip edilir ve hücre gerilimleri nominal değere ulaştığında şarj işlemi sonlandırılır. Şarj işlemi esnasında bataryalardaki hücrelerin iç dirençleri sebebi ile farklı gerilim değerleri oluşabilmektedir. Yüksek gerilim değerine sahip batarya hücresi diğer batarya hücrelerinin şarj olmasını engelleyerek batarya verimini düşürür bu sebeple bataryadaki hücrelerin gerilim değerlerindeki farklılıkları minimize etmek için batarya dengeleme işlemi gerçekleştirilir. Deşarj işlemi sırasında bataryadaki hücrelerin gerilim değerleri minimum seviyeye geldiğinde yük, bataryalardan ayrılır böylece batarya aşırı deşarjdan korunur. Aşırı şarj ve deşarj durumu bataryanın ömrünü doğrudan etkilemektedir. Bu işlemler bataryanın verimli ve güvenli bir şekilde çalışması açısından oldukça önemlidir.

Bataryadan çekilen akım batarya üzerinde sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Bataryadan çekilen akımın şarj ve deşarj sırasında anlık olarak takip edilmesi gerekir. Aşırı akım durumunda şarj durumun veya deşarj durumunun bitirilmesi BYS'nin görevidir.

Bataryalardaki hücre sıcaklıkları ve ortam sıcaklık değerleri BYS tarafından anlık olarak takip edilmektedir. Herhangi bir sıcaklık değeri BYS tasarımında belirlenen maksimum sıcaklık değerinin üzerine çıktığında bataryadaki soğutma sistemi devreye girerek ortam ve hücrelerin sıcaklığı düşürmelidir. Sıcaklığın düşürülmesinde soğutma sistemi etkili olmaz ise acil durum sinyali ile şarj veya deşarj işlemi durdurulmalıdır.

3.5.1.3. Şarj/Deşarj yönetimi

Elektrikli araçlar ihtiyaç duydukları enerjiyi bataryalardan elde etmektedir. Elektrikli araçların çalışması sırasında bataryalar deşarj olur. Bataryaların şarj işlemi ise araç dışında yer alan bir şarj cihazı ile gerçekleştirilmektedir. Şarj ve deşarj işlemleri BYS kontrolü altında olmaktadır. Bataryalar deşarj durumundayken batarya bağlı olan yükün çektiği akım ve hücrelerin gerilim değerleri anlık olarak takip edilir. Olumsuz bir durumda bataryaların yükten ayrılması sağlanır ve kullanıcı ara yüzü sayesinde kullanıcıya bataryanın durumu bildirilir. Aynı şekilde bataryaların şarj durumunda

batarya hücrelerinin çektiği akım ve gerilim değerleri anlık olarak takip edilir ve kullanıcı arayüzü sayesinde araç kullanıcısına bildirilir. Batarya gerilimleri istenilen seviyeye ulaştığında şarj işlemi bitirilir.

Bataryaları oluşturan pil hücreleri özdeş değildir. İç dirençleri ve çalışma sıcaklıkları sebebi ile hücreler arası kapasite farklılıkları oluşmaktadır. Bu kapasite farklılıkları bataryaların şarj edilirken dolun sürelerinde farklılıklar oluşturmaktadır. Kapasitesi en az olan hücre henüz diğer hücrelerin şarj işlemi tamamlanmadan şarj bitirme gerilimine ulaşmaktadır. Böylece diğer hücrelerin kapasitesi tam olarak dolmadan şarj işlemi bitmektedir. Bu durum enerji kayıplarına sebep olmaktadır. Bu bataryalarda kesinlikle istenmeyen bir durumdur. Bataryalardaki gerilim dengesizliklerin önüne geçmek için bataryalarda hücre dengeleme yöntemleri kullanılmaktadır. Hücre dengeleme işlemi sayesinde bataryalar şarj durumundayken belirlenen eşik değere ulaşan batarya hücresi dengeleme devresi ile fazla enerjisini harcayarak diğer batarya hücrelerinin tam şarj olması sağlanır. Bataryadaki tüm hücreler maksimum şarj gerilimine ulaştığında şarj işlemi sonlandırılır. Böylece bataryadaki tüm hücrelerin tam kapasite ile dolun işlemi gerçekleştirilmiş olur. Dengeleme yöntemleri pasif dengeleme ve aktif dengeleme olmak üzere ikiye ayrılır. Pasif dengeleme yönteminde bataryadaki fazla enerji ısı enerjisinde dönüştürülerek dışarıya atılır. Aktif dengeleme yönteminde ise hücrelerdeki fazla enerji diğer hücrelerin kullanması amacıyla ile dönüştürülür ve bataryalara tekrar kazandırılır.

3.5.1.4. Teşhis ve kestirim işlemi

Bataryaların sağlık durumu ve kapasite durumu doğrudan batarya hücrelerinden ölçülmektedir. BYS batarya hücrelerinden ölçülen gerilim, akım ve sıcaklık değerleri sayesinde bataryanın sağlık durumunu ve kapasite durumunu tahmin etmemizi sağlar.

➤ Kapasite Durumu (SOC)

SOC, batarya paketindeki kalan enerjiyi ifade eden bir parametredir. SOC batarya hücrelerindeki kutuplardan doğrudan ölçülemez. Çünkü SOC değeri batarya hücrelerinin kimyasal özellikleri, kurulan devre şartları ve ortam parametrelerine göre değişen bir değerdir. Bu sebeple SOC parametresini tahmin etmek için bazı yöntemler geliştirilmiştir.

En basit hali ile mevcut dolun durumunun, pil kapasitesine oranı olarak tanımlanabilir (ALDOĞAN, 2012).

$$SOC(\%) = [Dolum Miktarı(Ah) / Pilin Kapasitesi(Ah)] \times 100 \quad (3.1)$$

SOC parametresini tahmin etmek için geliştirilen yöntemlerden bir tanesi sayma yöntemidir. Sayma yöntemi SOC tahmini için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde önemli olan başlangıç anında SOC değerinin doğru hesaplanmasıdır. Sayma yöntemi ile SOC tahmini Denklem (3.2)'deki gibi ifade edilir (TÜRGUT, 2018).

$$SOC = SOC_{t0} - \frac{1}{C_N} \int_{t0}^t \eta I \cdot dt \quad (3.2)$$

SOC : Şarj Durumu

SOC_{t0} : Başlangıç Zamanındaki Şarj Durumu

C_N : Başlangıç Kapasite

I : Coulombik Verim (Deşarj sırasında $\eta=1$, şarj sırasında $\eta <1$)

➤ Sağlık Durumu (SOH)

Batarya sağlık durumu kestirimi batarya kapasite durumu gibi bataryaların kutuplarından ölçülemeyen bir parametredir. Bu sebeple BYS sayesinde elde edilen veriler sayesinde tahmin yöntemleri geliştirilmiştir. Batarya sağlık durumu bir bataryanın üretim sonrası ilk halindeki depolama kapasitesi, şarj tutma durumu, akım taşıma kapasitesi, izolasyon direnci ve sıcaklık dayanımı gibi özellikleri koruyabilme yeteneği olarak tanımlanır.(ORBEYİ, 2022). Üretimden hemen sonra kapasite değeri fazla olan bir pilin zamanla kapasite değeri azalabilir. Bu durumu pil sağlığının kötüleşmesine örnek gösterebiliriz. Bu sebeple bataryanın SOH bilgisi kullanıcı ile paylaşılarak takip edilmesi gerekir. SOH kestiriminin matematiksel ifadesi Denklem (3.3)'de gösterilmiştir (BAYGÜNEŞ, 2019).

$$SOH(\%) = \left(\frac{C_M}{C_N} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

SOH : Sağlık Durumu

C_M : Batarya Mevcut Kapasite

C_N : Başlangıç Kapasitesi

SOH değeri tek başına BYS görevlerini veya işlevini etkilemez. Bu sebeple BYS'lerinde SOH değerlendirilmesi isteğe bağlıdır. Ancak batarya sağlık durumunun azalması ile daha büyük arızalar tahmin edilip önlenebilir. Bu sebeple otomotiv sektöründe kullanılan BYS'lerinde SOH kestirimi yapılmaktadır.

3.5.1.5. Veri yönetme işlemi

BYS'ler yapılarında birden çok elektronik kart bulundurmaktadır. Bunun dışında verilerin kaydedilip kullanıcıya iletilmesini sağlayan sistemlerden oluşmaktadır. Bu işlemler sayısal haberleşme ile gerçekleşir. Sayısal haberleşme sistemleri gerilim, akım ve sıcaklık gibi verilerin istenilen karta iletilmesini sağlar. Ayrıca BYS'nin merkezi kontrol birimi kritik verileri kaydetme ve gerekli durumlarda dış dünyaya aktarmalıdır. Dışarıdaki kontrol birimleri ile haberleşerek ihtiyaç durumunda gerekli komutu almalıdır. Haberleşme işlemini gerçekleştirmek için CAN Bus haberleşme protokolü otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

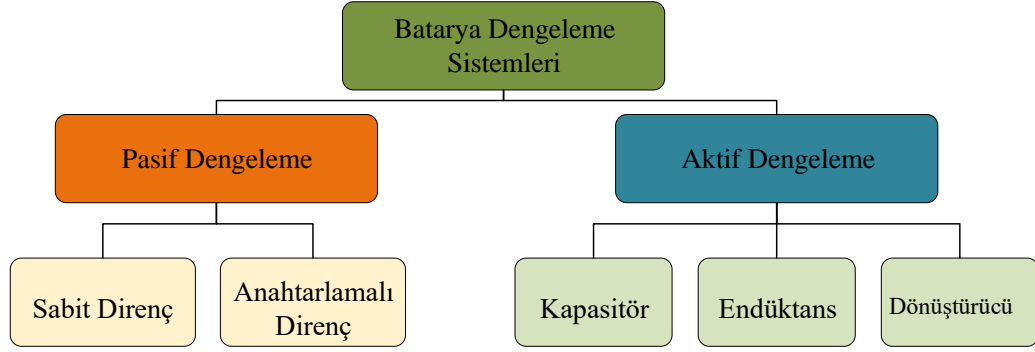
BYS'ler kritik verilerin dış dünyaya iletilmesinin yanı sıra bazı verilerin kaydedilmesini sağlamaktadır. Bu veriler bataryanın bakımı gibi durumlarda kullanılır. Verilerin kaydedilmesi için SD Kart, E2PROM ve USB bellek gibi hafıza birimleri kullanılmaktadır.

3.5.2. Batarya dengeleme yöntemleri

Batarya dengeleme yöntemleri, batarya hücrelerinin eşit şekilde şarj olmasını sağlamak amacı ile kullanılan tekniktir. Bu, bataryaların verimli çalışmasını, daha uzun ömürlü olmalarını ve güvenli bir şekilde işlev görmelerini sağlar. Çünkü bataryalar zamanla farklı şarj seviyelerine sahip hücreler geliştirebilir, bu da bataryanın genel performansını etkileyebilir. Bu nedenle, dengeleme işlemi çok önemlidir (KAYMAZ ve HANÇAR, 2021).

Batarya paketleri özdeş pillerin seri veya paralel bağlanması ile elde edilir. Piller özdeş olmasına rağmen üretim esnasındaki tolerans ve çalışma koşullarından kaynaklanan farklılıklar söz konusu olabilir. Bu farklılıklar bataryanın şarj ve deşarj

kullanımını doğrudan etkilemektedir. Şarj esnasında yüksek gerilime sahip olan batarya hücresi düşük gerilime sahip olan batarya hücresinin tam dolmasını engeller ve böylelikle bataryadaki denge durumu bozulabilir. Batarya hücrelerindeki bu dengesizlik sistemin performansını düşürür ve ömrünü azaltır. Batarya dengeleme sistemi bataryadaki dengesiz durumları gidermek için her bir hücrenin gerilim seviyesini birbirlerine en yakın noktada tutar. Bu noktada dengeleme işlemi batarya yönetim sistemleri için oldukça önemlidir. Batarya dengeleme, pasif dengeleme ve aktif dengeleme olmak üzere iki ana yöntemle gerçekleştirilir. Şekilde batarya yönetim sistemi türleri gösterilmiştir. Kullanılacak batarya dengeleme yönteminin türü batarya yönetim sisteminin genel yapısını, tasarım maliyetini göz önünde bulundurarak karar verilmelidir (DURMUŞ ve KAYMAZ, 2020).



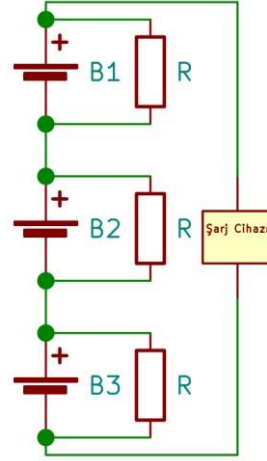
Şekil 3.7 Batarya dengeleme sistemleri türleri (KILIÇ, 2022)

3.5.2.1. Pasif dengeleme yöntemi

En yaygın ve basit batarya dengeleme yöntemidir. Şarj esnasında her bir hücrenin gerilim değerleri anlık olarak izlenir. Gerilim değeri fazla olan hücredeki fazla enerji dirençler yardımı ile ısı enerjisine dönüştürülerek harcanır. Fazla enerji bataryanın diğer hücrelerine aktarılmaz. Bu yöntemde enerji ısıya dönüştürüldüğü için sistemin sıcaklığı artar. Hücrelerdeki enerji eşitlenen kadar işlem devam eder (KIVRAK ve diğerleri, 2020). Pasif dengelemenin avantajları basit yapısı, düşük maliyetli olması ve hızlı dengeleme işlemi olarak sıralanabilir. Düşük maliyetli, enerji verimliliği çok kritik olmayan uygulamalarda kullanılabilir.

➤ Sabit Direnç Dengeleme Yöntemi

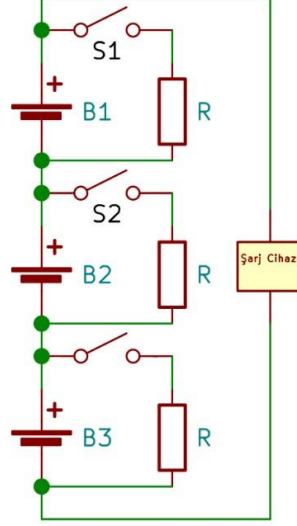
Sabit direnç ile dengeleme yönteminin basit bir yapısı vardır. Her batarya hücrelerine bağlı dirençler üzerinden yardımı ile fazla enerji ısıya dönüştürülür. Herhangi bir kontrol sistemi olmadan dengeleme işlemini gerçekleştirir. Uygulaması oldukça basit ve maliyeti düşüktür. Enerji verimliliği düşüktür. Fazla enerji ısıya dönüştürüldüğü için fazla ısınma bataryaların ömrünü kısaltabilir.



Şekil 3.8 Sabit direnç dengeleme yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

➤ Anahtarlama Direnç Dengeleme Yöntemi

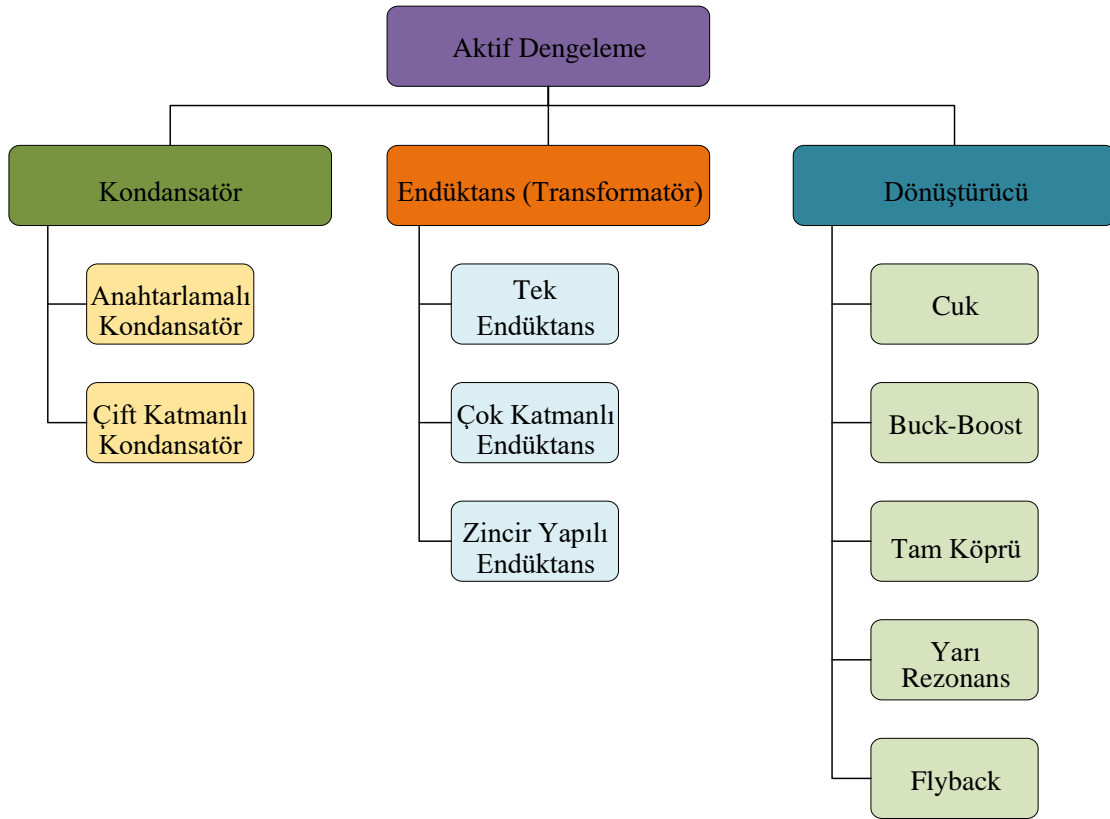
Anahtarlama direnç ile dengeleme yönteminde her batarya hücrelerine bağlı bir direnç ve bir anahtar bulunur. Bataryaların şarj işlemi sırasında fazla enerjiye sahip olan hücrenin anahtar elemanı aktif hale gelerek fazla enerji direnç üzerinden ısıya dönüştürülür. Böylece sistem fazla ısınmaya karşı korunmuş olur. Sabit direnç ile dengeleme yöntemine göre enerji verimliliği daha fazladır.



Şekil 3.9 Anahtarlamalı direnç dengeleme yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

3.5.2.2. Aktif dengeleme yönetimi

Aktif dengeleme yöntemi batarya hücrelerindeki enerji verimliliği açısından en iyi yöntemdir. Aktif dengeleme yöntemi, enerjisi daha fazla olan batarya hücrelerindeki fazla enerjiyi düşük enerjili batarya hücrelerine kapasitör ve bobin yardımı ile transfer eder. Bu yöntem şarj süresinin azalmasına yardımcı olur. Aktif dengeleme yönteminde fazla enerji diğer hücelere aktarıldığı için enerji kaybını minimum seviyeye indirir. Bataryanın ömrünü uzatır (DİKMEN, 2022). Aktif dengeleme yöntemi karmaşık kurulum ve tasarıma sahiptir. Daha fazla devre elemanı kullanılır bu sebeple maliyeti fazladır. Aktif dengeleme yöntemi daha kapsamlı enerji sistemlerinde, elektrikli araçlarda ve enerji depolama sistemlerinde kullanılır. Aktif dengeleme sistemi kondansatör, endüktans (transformatör) ve dönüştürücü olmak üzere üç şekilde yapılmaktadır.



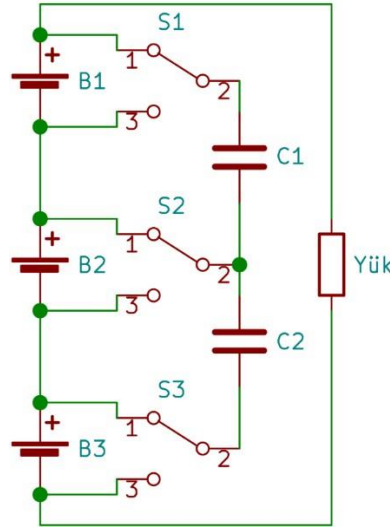
Şekil 3.10 Aktif dengeleme yöntemi türleri (KILINÇ, 2022)

➤ Kondansatör Temelli Dengeleme Yöntemi

Kondansatör temelli aktif dengeleme yönteminde hücrelerdeki fazla enerjiyi düşük enerjili hücrelere aktarmak için hücrelere paralel bağlı kondansatörler kullanılır. Batarya hücrelerindeki fazla enerji önce kondansatörlere depolanır daha sonra düşük enerjili hücrelere aktarılır. Farklı sayılarda kondansatörler kullanarak farklı tasarıma sahip dengeleme devreleri kurulmasına olanak sağlar. Bu yöntemin kuruluşu, kullanımı ve kontrolü diğer aktif dengeleme yöntemlerine göre daha basittir. Ancak dengeleme hızı düşüktür (PASCUAL ve KREIN, 1997).

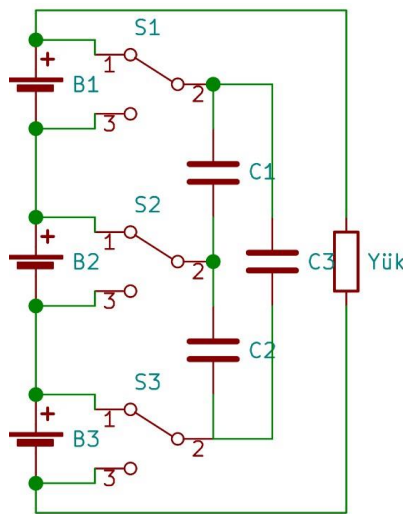
- Anahtarlamalı kondansatör ile dengeleme yönteminde n sayıdaki hücreyi dengelemek için $n-1$ adet kondansatör ve $2n$ sayıda anahtarlama elemanı kullanılır. Bu dengeleme sisteminde kullanılan devre elemanlarının fazla olmasından kaynaklı maliyeti yüksektir. Hem şarj hem deşarj esnasında kullanılabilir (KAYMAZ & HANÇAR, 2021). Dengeleme işleminin süresi önce

depolanma sonra aktarma şeklinde yapıldığı için uzundur. Dengeleme işlemi yapılırken hücrelerin SoC bilgisine ihtiyaç duymaz.



Şekil 3.11 Anahtarlamalı kondansatör yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

- Çift katmanlı anahtarlamalı kondansatör yönteminde iki katlı kondansatör katmanına sahiptir. Şekil 3.12’de gösterildiği üzere C1 ve C2 ilk kondansatör katmanını, C3 ise ikinci kondansatör katmanını ifade eder. Anahtarlamalı kondansatör ile dengeleme yöntemine göre daha fazla kondansatör kullanıldığı için devre boyutu ve maliyet artar.

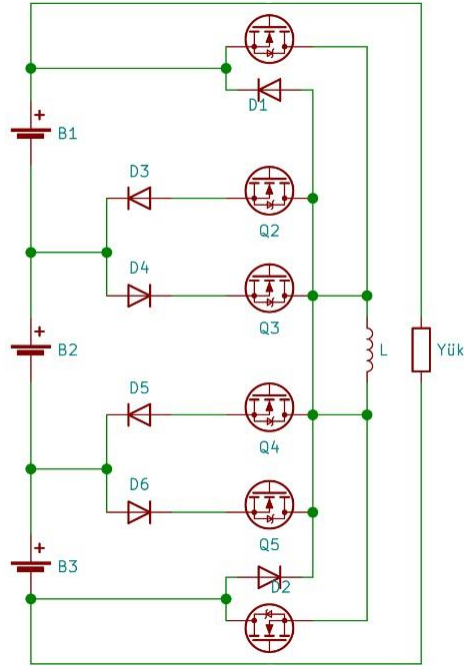


Şekil 3.12 Çift katmanlı anahtarlamalı kondansatör yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

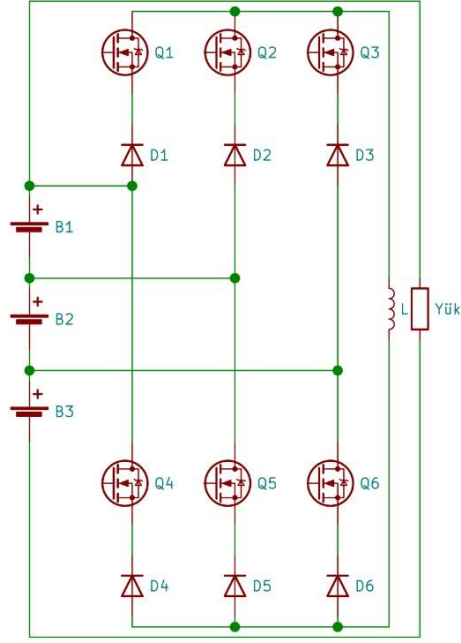
➤ Endüktans (Transformatör) Temelli Aktif Dengeleme

Endüktans temelli aktif dengeleme yönteminde hücreler arasındaki fazla enerjiyi dengelemek için bobin temelli elemanlar kullanılır. Enerji verimliliği yüksektir. Fiziksel olarak daha az enerji kaybı yaşanır çünkü enerji doğrudan diğer hücrelere aktarılır. Tasarım ve uygulama açısından oldukça karmaşıktır.

- Tek endüktans dengeleme yönteminde anahtarlama elemanı ile kontrol edilerek fazla enerjiye sahip hücrelerdeki enerji endüktans üzerinden düşük enerjili hücreye aktarılır. Enerjinin aktarım yönüne göre iki farklı şekilde dengeleme işlemi yapılabilir. Bunlar hücreden hücreye ve batarya paketinden hücreye'dir. Dengeleme hızı orta düzeydedir(LIU ve XIA, 2013).

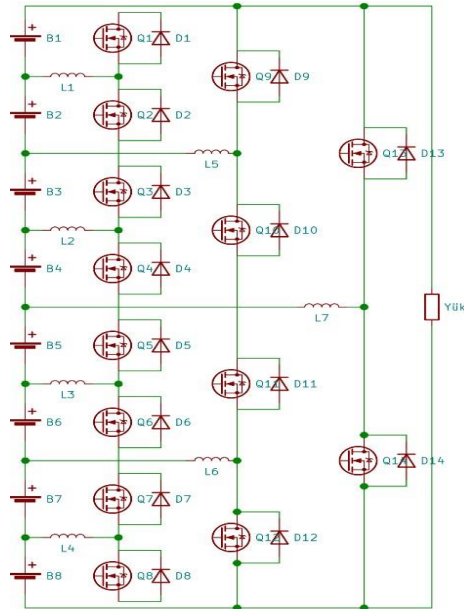


Şekil 3.13 Hücreden hücreye dengeleme yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)



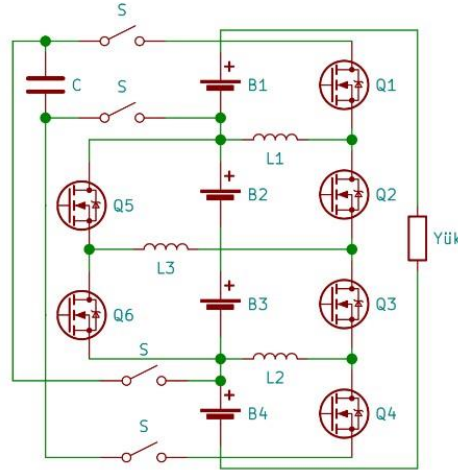
Şekil 3.14 Batarya paketinden hücreye dengeleme yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

- Çok katmanlı endüktans dengeleme yönteminde fazla enerjili hücrelerin düşük enerjili hücrelere enerji aktarımı için daha fazla yol kullanılmaktadır. Bu sayede enerji aktarım süresi kısaltılmaktadır. Daha fazla yol elde etmek için daha fazla devre elemanı kullanılmaktadır. Bu sebeple maliyeti fazladır. Devre uzun ve daha karmaşık yapıdadır.



Şekil 3.15 Çok katmanlı endüktans yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

- Zincir yapıda endüktans dengeleme yönteminde dengeleme hızını arttırmak için ek olarak kondansatör kullanılmaktadır. Yüksek enerjiye sahip hücrelerdeki fazla enerji düşük enerjiye sahip hücrelere aktarılması için anahtarlama elemanı kontrol edilerek endüktans aracılığı ile enerji aktarılma işlemi gerçekleştirilir. Devre uzunluğu çok katmanlı endüktans yöntemine kıyasla daha kısadır.

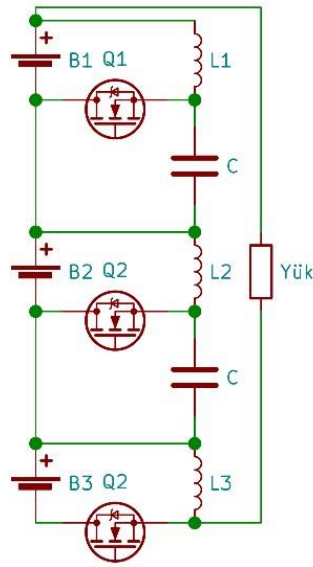


Şekil 3.16 Zincir yapıda endüktans yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

➤ Dönüştürücü Temelli Dengeleme Yöntemi

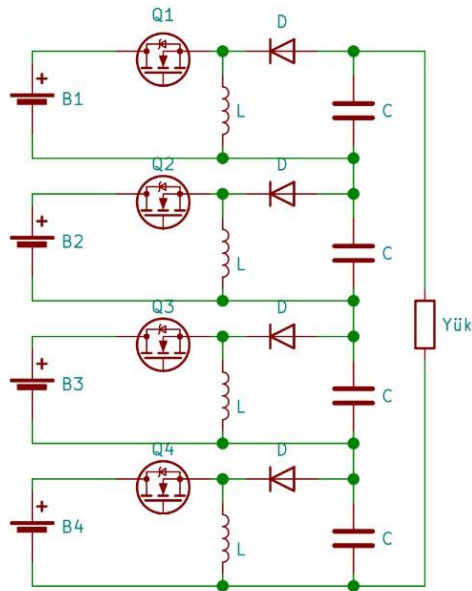
Dönüştürücü temelli aktif dengeleme yönteminde her bir pil hücresine birer dönüştürücü bağlanarak dengeleme işlemini gerçekleştirir. Bu yöntem dengeleme süresini kontrol etme imkanı tanır. Ancak sistem oldukça karmaşık yapıdadır. Kullanılan elemanlar sebebi ile pahalıdır.

- CUK dönüştürücü dengeleme yöntemi komşu hücreler arasındaki enerjiyi dengelemek için kullanılır. Bu dengeleme yönteminde n sayıdaki hücre için $n-1$ sayıda dönüştürücü kullanılmaktadır. Çok hücreye sahip batarya sistemlerinde dengeleme yavaştır.



Şekil 3.17 CUK dönüştürücü yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

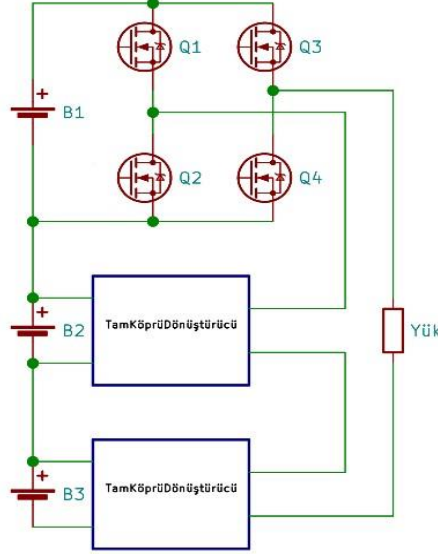
- Buck-boost dönüştürücü yönteminde enerji aktarımı için her bir hücreye ait dönüştürücü bloğu eklenir. Modüler bir tasarımdır. Her bir hücre için farklı dönüştürücü bloğu olduğu için ekleme ve çıkarma yapılabilir. Pahalı bir yöntemdir.



Şekil 3.18 Buck-Boost dönüştürücü yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

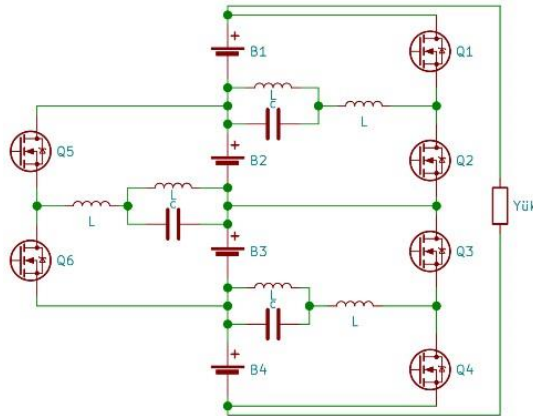
- Tam köprü dönüştürücü yönteminde enerji aktarımı çift yönlü yapılabilir. Tam kontrollü enerji aktarımı sağlamaktadır. Karmaşık ve maliyetli bir yapısı vardır.

Dengeleme hızı oldukça yüksektir. Yüksek güç aktarımı gerektiren batarya sistemlerinde kullanıma uygundur.



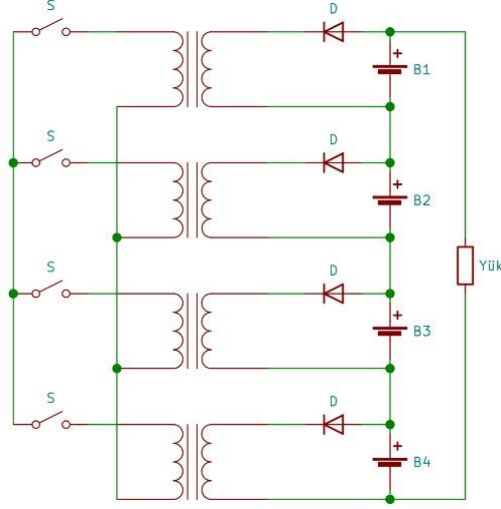
Şekil 3.19 Tam köprü dönüştürücü yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

- Yarı rezonans dönüştürücü yönteminde komşu hücreler arasında yarı rezonans dönüştürücü bağlanarak hücreler arası enerji aktarımı gerçekleştirilmektedir. Anahtarlama elemanı ile kontrol edilmektedir. Anahtarlama elemanı sıfır akım ve sıfır voltaj ile anahtarlama işlemini yapar. Bu sayede anahtarlama kayıpları minimize edilmiştir. Aynı zamanda dengeleme verimi de artırılmıştır. Oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve maliyeti yüksektir. Dengeleme hızı ve verimi yüksektir.



Şekil 3.20 Yarı rezonans dönüştürücü yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

- Flayback dönüştürücü yönteminde her bir hücreye bağlı falyback dönüştürücü vardır. Flayback dönüştürücüler izoleli bir yapıya sahiptir. Bu sebeple kullanımları yaygındır.



Şekil 3.21 Flayback dönüştürücü yöntemi devre şeması (KILINÇ, 2022)

Batarya yönetim sistemlerinin verimliliğın arttırmak, batarya hücrelerinin ömrünü arttırmak açısından bataryalarda dengeleme işlemleri kritik önem taşımaktadır. Bu sebeple kullanılan batarya yönetim yapısına, hücre sayısına, enerji verimliliğine, hassasiyetine, maliyetine göre avantaj ve dezavantajlar incelenerek batarya yönetim sisteminde dengeleme yöntemlerinden uygun olan seçilmelidir. Aşağıdaki çizelgede bahsi geçen dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. (1 en düşük 4 en yüksek değeri ifade etmektedir)

Çizelge 3.2 Batarya dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması (KILINÇ, 2022), (KAYMAZ ve HANÇAR, 2021)

| Batarya Dengeleme Yöntemleri | Dengeleme Hızı | Kontrol Zorluğu | Boyut | Maliyet | Verim |
|------------------------------|----------------|-----------------|-------|---------|-------|
| Sabit Direnç | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Anahtarlamalı Direnç | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Anahtarlamalı Kondansatör | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Çift Katmanlı Anahtarlamalı Kondansatör | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Tek Sarımlı Endüktans | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Çok Sarımlı Endüktans | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Zincir Yapılı Endüktans | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Çuk Dönüştürücü | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Buck-Boost Yükseltici | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Tam Köprü | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Yarı Rezonans | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Flyback | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

3.5.3. Batarya yönetim sistemi topolojileri

Batarya yönetim sistemleri topolojisi bataryaların elektrik bağlantısını, kontrol bağlantısını ve iletişim mimarisini kapsayan yapılardır. Batarya yönetim sisteminin maliyeti, kurulum kolaylığı, bakımı gibi parametreleri doğrudan etkilemektedir (AKTAŞ, BAYGÜNEŞ, KIVRAK, ÇAVUŞ ve SÖZEN, 2020). Batarya yönetim sistemleri temel olarak dört farklı şekilde tasarlanabilir.

- Merkezi batarya yönetim sistemi
- Modüler batarya yönetim sistemi
- Ana kart-yardımcı kart batarya yönetim sistemi
- Dağıtılmış batarya yönetim sistemi

3.5.3.1. Merkezi batarya yönetim sistemi

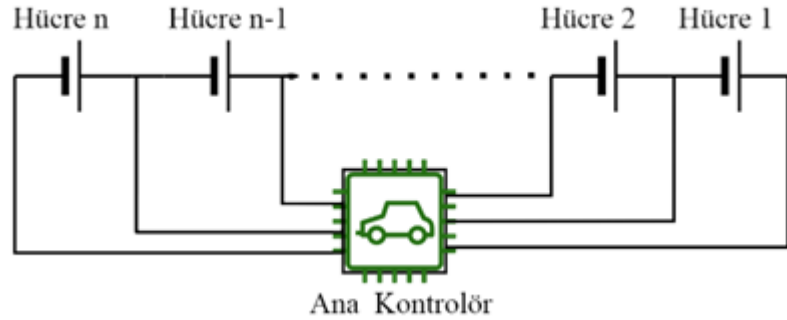
Tüm batarya hücrelerinin tek bir ana kontrol biriminden yönetildiği yapıdır. Batarya hücrelerinin her biri ayrı ayrı izlenebilmektedir (DİKMEN, 2022). Ancak veriler ve kontroller tek merkezden yapılmaktadır. Büyük ölçekli batarya yönetim sistemleri için sınırlı olabilir.

Avantajlar

- Sistemin kurulumu basittir.
- Tüm işlemler tek bir merkezden kontrol edildiği için kontrol sistemi kolaydır.
- Topolojiler arasında maliyeti en uygun türdür.
- Tek merkez olduğu içi ekstra bir haberleşme gereksinimi duymaz.

Dezavantajlar

- Merkezi bir sorun tüm sistemi etkileyebilir.
- Veri elde etme ve yönetim tek merkezden gerçekleşeceği için kullanılan mikroişlemcinin çok sayıda giriş-çıkış birimin olması gerekir.
- Ölçeklenme açısından sınırlıdır.
- Kapsamlı batarya yönetim sistemleri için yetersiz kalabilir.



Şekil 3.22 Merkezi batarya yöntemi sistemi (MENAK ve diğerleri, 2021)

3.5.3.2. Modüler batarya yönetim sistemi

Modüler batarya yönetim sistemi, bataryaların modüller halinde ayrıldığı ve her modülün kendi yönetim sistemine sahip olduğu bir yapıdır. Bu tür batarya yönetim sistemi büyük enerji depolama sistemlerinde kullanılmak için uygundur (ALDOĞAN,

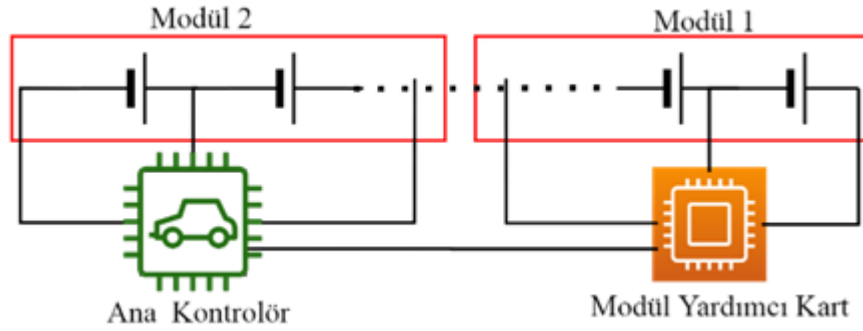
2012).Sistem genişletilmek istenirse modüller ve modüllerin yönetim sistemi eklenerek bu işlem rahatlıkla yapılabilir.

Avantajlar

- Arızalı modüllerin tespiti ve onarımı kolaylıkla gerçekleştirilebilir.
- Hücrelere bağlantı daha kolay gerçekleştirilir.
- Her modülün bağımsız şekilde izlenme ve yönetilme imkanı vardır.

Dezavantajlar

- Modüller arası uyumsuzluk yaşanabilir.
- Her bir modülün ayrı yönetim sistemi olduğu için merkezi batarya yönetim sistemine göre daha maliyetlidir.
- Modüller arası haberleşme gereksinimi olduğu için daha fazla kablo bağlantısına ihtiyaç duyar.
- Kurulumu daha zordur.



Şekil 3.23 Modüler batarya yönetim sistemi (MENAK, 2021)

3.5.3.3. Dağıtık batarya yönetim sistemi

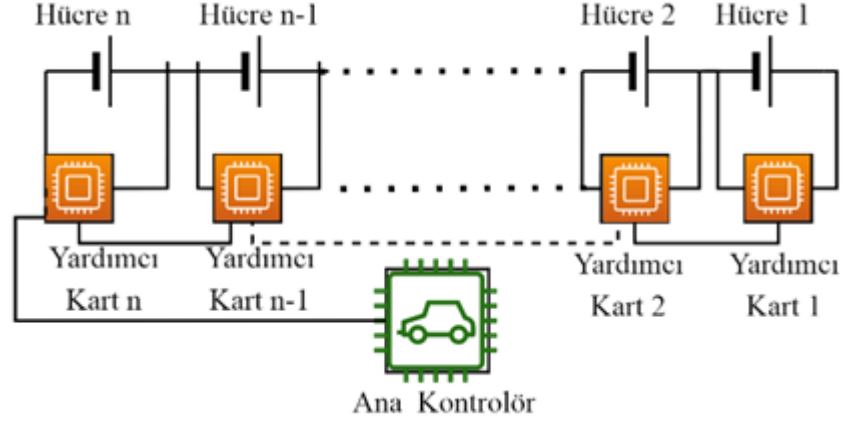
Her batarya hücresinin kendi batarya yönetim sistemine sahip olduğu batarya yönetim sistemi türüdür. Bu tür sistemde her bir batarya hücresi kendi durumunu izler ve gerekli olan verileri merkezdeki sisteme iletir.

Avantajlar

- Veri iletimi sadece gerektiğinde yapıldığından sistemin verimliliği artar.
- Her bir hücre birbirinden bağımsız olarak izlenebilir ve yönetilebilir.
- Merkezde olan sisteme bağımlılık azalır.
- Daha fazla esnek ve dayanıklıdır.

Dezavantajlar

- Sistem karmaşıktır.
- Her hücre için ayrı ayrı yönetim sistemi kullanıldığından maliyeti oldukça fazladır.



Şekil 3.24 Dağıtık batarya yönetim sistemi (MENAK, 2021)

3.5.3.4. Ana kart- yardımcı kart yönetim sistemi

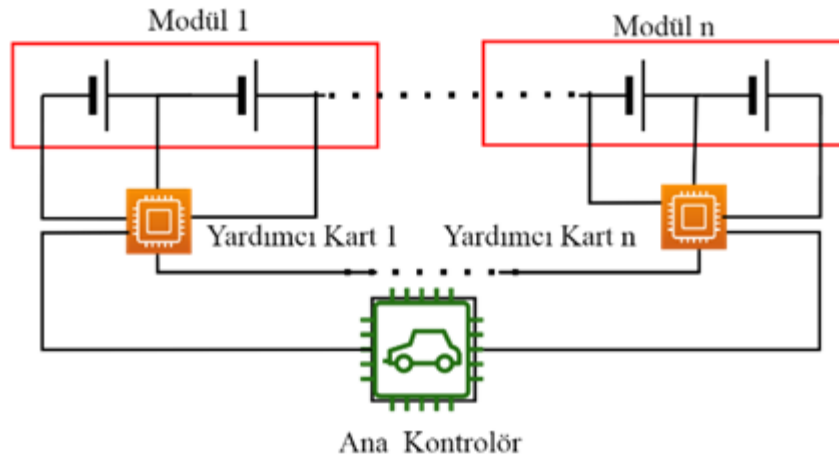
Batarya hücreleri modüller halinde bölünerek her modüldeki gerekli veriler yardımcı kart sayesinde elde edilir (TÜRGUT, 2018). Elde edilen veriler ana karta iletilir ve gerekli yönetim işlemleri ana kart tarafından gerçekleştirilir.

Avantajlar

- İhtiyaç doğrultusunda yardımcı kart ekleme imkanı sağlar.
- Arıza durumunda kolay tespit ve onarım sağlanabilir.
- Yüksek performans sağlar.

Dezavantajlar

- Modül yapısı sebebi ile maliyeti yüksektir.
- Daha fazla kart ve bağlantı ihtiyacı olduğu için tasarımı karmaşıktır.
- Veri iletişim sorunları olabilir.
- Yardımcı kartların her biri enerji tüketimi yapacağı için enerji tüketimi sorunu oluşabilir.
- Enerji tüketimi arttığı için ısınma istenmeyen seviyelerde olabilir.



Şekil 3.25 Ana kart – yardımcı kart yönetim sistemi (MENAK ve diğerleri, 2021)

4.MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan tüm malzemelerin özellikleri, ne amaçla ve nasıl kullanıldığı ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.

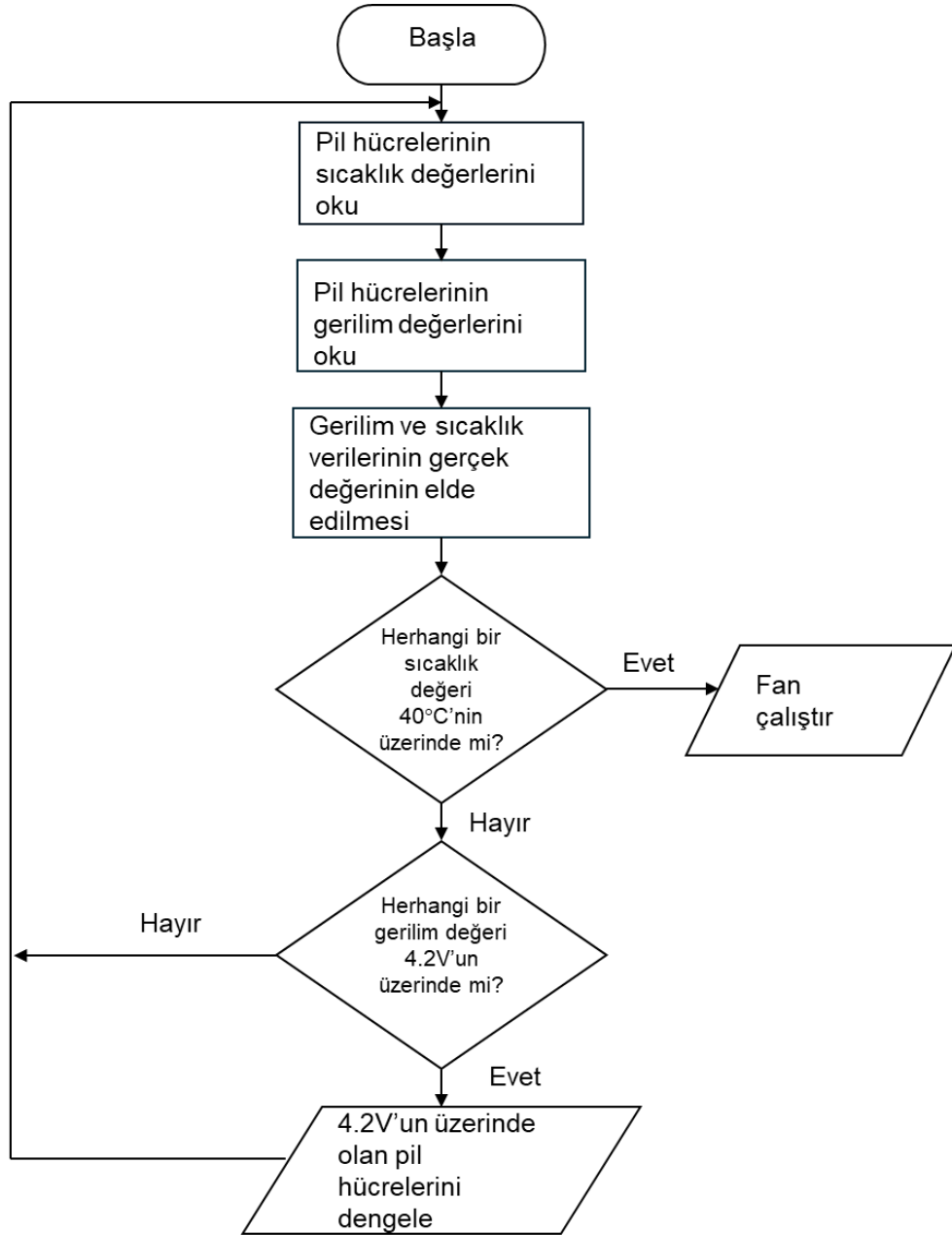
4.1.Batarya Yönetim Sisteminin Tasarımı

Batarya yönetim sistemi tasarımında temel olarak çalışma algoritması oluşturulmuştur. Bu algoritmaya uygun olarak pil hücrelerinin gerilim ve sıcaklık değerleri izlenmiştir. İzlenen değerlerin referans aralıkta olması sağlanmıştır. Şekil 4.1’de BYS’nin akış şeması gösterilmiştir.

4.1.1.Lityum iyon pil

Lityum iyon piller elektrikli araçlarda en çok tercih edilen pil türüdür. Lityum iyon bataryalar lityum bazlı bileşiklerin kimyasal reaksiyonları sonucunda enerji depolama işlemi yapmaktadır. Lityum iyonları katot ve anot arasında hareket ederek şarj ve deşarj olmaktadır (LIU et al., 2016).Yüksek enerji kapasitesine sahiptir. Hafif yapıları sayesinde birçok alanda kullanıma olanak sağlamaktadır. Yüksek şarj döngüsüne sahiptir bu durum uzun ömürlü olduklarını ifade eder. Hafıza etkisi sorunu olmadığı için tam dolmuş kullanım ihtiyacı yoktur. Şarj işlemi oldukça hızlıdır. Bu gibi avantajları sebebi ile yapılan bu çalışmada lityum iyon bataryalar kullanılmıştır. Çalışmada SUPLEX markasının SP18650-1200F isimli lityum iyon pil kullanılmıştır. 4.2 V maksimum gerilim ve 1200 mAh kapasitesine sahiptir. Lityum iyon pillerin isimlerini boyutlarından alırlar. Kullanılan pil 18mm çapında ve 65mm yüksekliğine sahiptir.

Batarya hücreleri bataryaların bağlanması ile oluşturulmaktadır. İstenilen kapasite ve istenilen voltaja göre bağlantı şekilleri tercih edilebilir. Piller seri bağlandığında voltaj, paralel bağlandığında kapasite artmaktadır (ÖZBALCI ve KILIÇ, 2019). Bu çalışmada 4 adet pil seri bağlanarak bir pil paketi oluşturulmuştur. Yapılan gerilim ölçümü, sıcaklık ölçümü ve pasif dengeleme işlemi bu pil paketi ile gerçekleştirilmiştir.



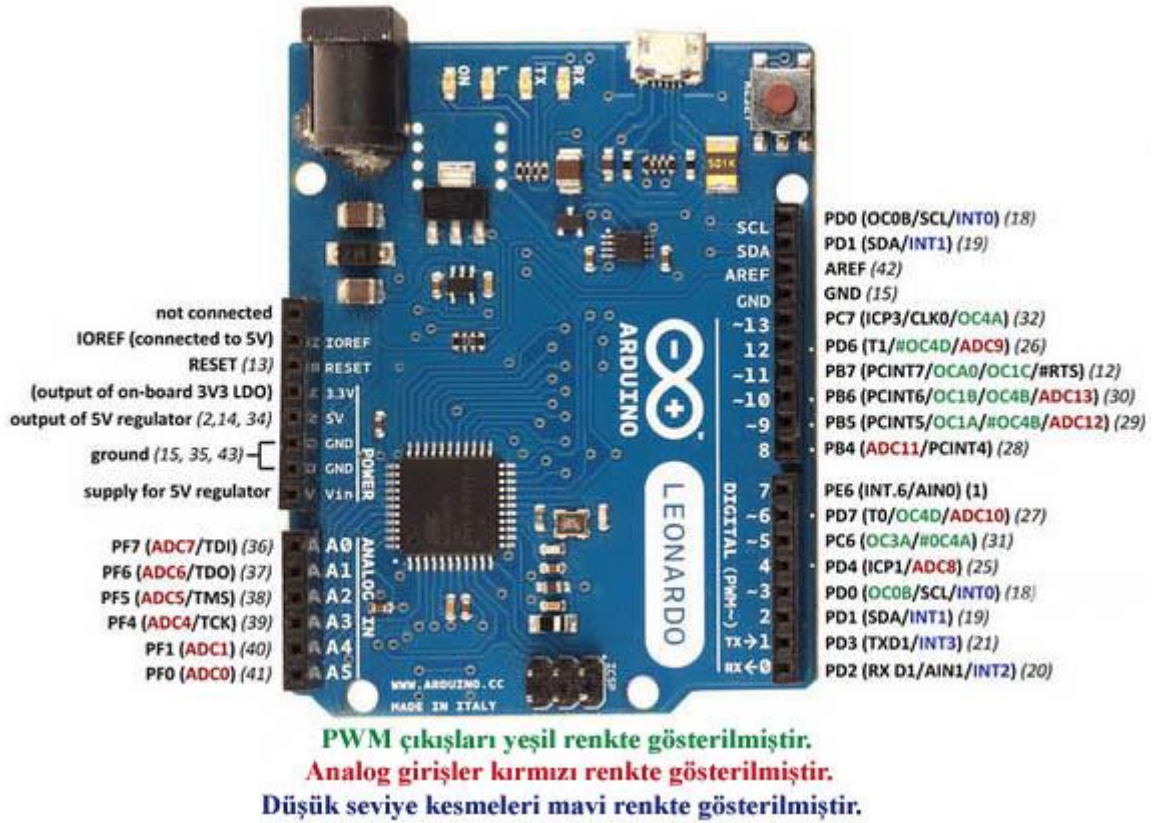
Şekil 4.1 BYS algoritma şeması

4.1.2. Mikrodenetleyici kart

Yapılan bu çalışmada pil hücrelerinin gerilim verilerinin elde edilmesinde, sıcaklık verilerinin elde edilmesinde, gerilim değerlerine göre pasif dengeleme işleminin yapılmasında Şekil 4.2'de gösterilen Arduino Leonardo mikrodenetleyici kartı kullanılmıştır. Bu kartın kullanılmasındaki sebep Arduino firmasının kullanıcılara sunduğu Arduino IDE yazılım geliştirme ortamının kullanımının kolaylığı, karta ulaşılabilme imkanının oldukça kolay olması, kart maliyetinin düşük olması, kartın

sunduğu analog ve dijital pinlerin yeterli olması olarak sıralanabilir. Batarya yönetim sistemi türü olarak merkezi yönetim sistemi topoloji kullanılmıştır. Merkezi yönetim sistemi topolojisi kolay kontrol edilebilirdir. Tek bir işlemci kullanıldığı için ek bir haberleşme elemanına ihtiyaç duymaz. Bu nedenlerle yapılan bu çalışmada merkezi yönetim sistemi topolojisi tercih edilmiştir. Kullanılan mikrodenetleyicinin özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Mikrodenetleyici: ATmega32u4
- Çalışma gerilimi: +5 V DC
- Tavsiye edilen besleme gerilimi: 7 - 12 V DC
- Besleme gerilimi limitleri: 6 - 20 V
- Dijital giriş / çıkış pinleri: 20 adet
- PWM çıkışları: 7 adet
- Analog giriş pinleri: 12 adet
- Giriş / çıkış pini başına düşen DC akım: 40 mA
- 3,3 V pini için akım: 50 mA
- Flash hafıza: 32 KB (4 KB bootloader için kullanılır)
- SRAM: 2.5 KB
- EEPROM: 1 KB
- Saat frekansı: 16 MHz
- Ağırlık: 20g
- Genişlik: 53.3 mm
- Uzunluk: 68.6 mm

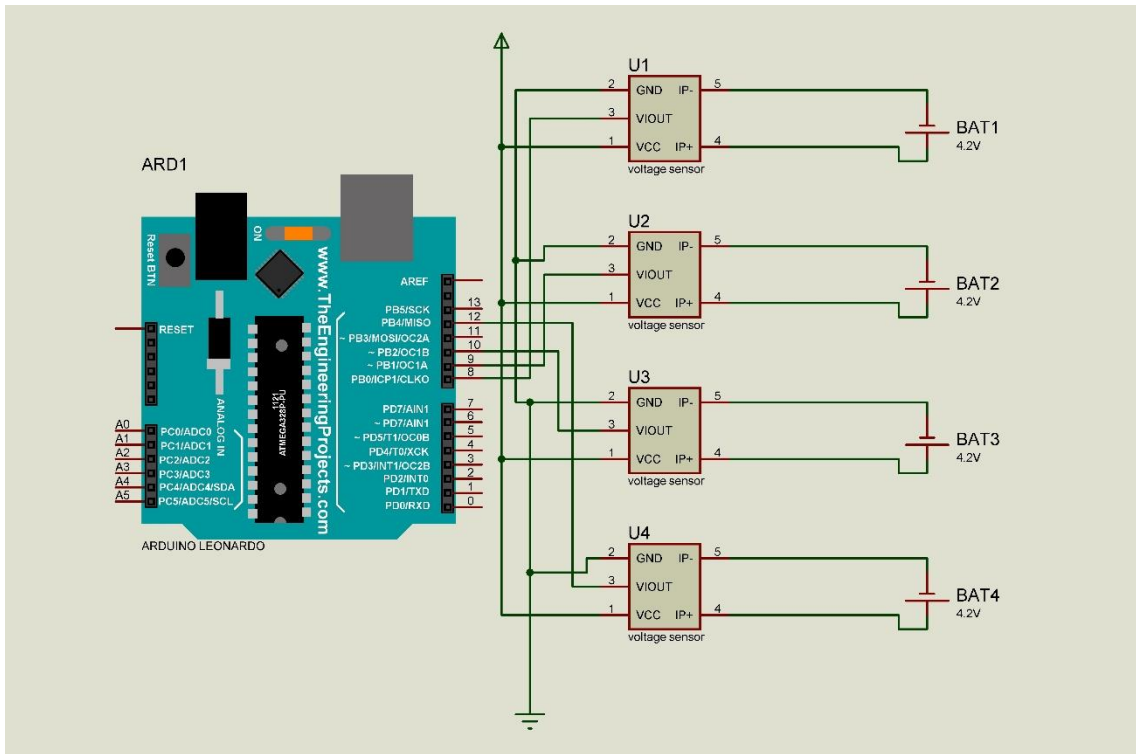


Şekil 4.2 Arduino Leonardo

4.1.3. Gerilim ölçümü

Bu çalışmada pil hücrelerinin gerilimlerini ölçmek için voltaj/gerilim sensörü modülü kullanılmıştır. Mikrodenetleyicinin dijital pinleri kullanılarak gelen dijital sinyaller sayesinde pillerin voltaj değerinin elde edilmesi sağlanmaktadır. Bu çalışmada 4 adet gerilim bölücü kullanılmıştır. Her bir gerilim bölücü her bir pil hücresinin gerilim değerini ölçmektedir. Gerilim bölücünün genel özellikleri ve pin bağlantıları aşağıda gösterilmiştir.

- Giriş voltajı: DC0 ~ 25 V
- Test aralığı: DC0.02445 V ~ 25 V
- Analog çözünürlük: 0.00489 V
- GND: Pil hücresinin “-“ kutbuna bağlanmaktadır
- VCC: Pil hücresinin “+” kutbuna bağlanmaktadır
- S: Arduino’nun analog girişine bağlanmaktadır
- - : Arduino’nun toprak hattına bağlanır
- + : Bağlantı yapılmaz



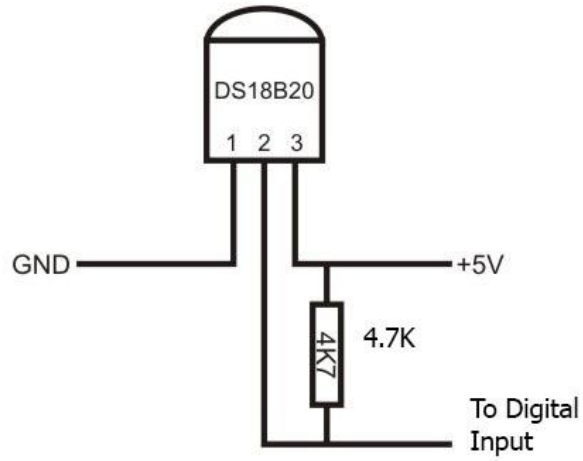
Şekil 4.3 4 adet gerilim bölücünün Arduino Leonardo ile bağlantı devresi

4.1.4.Sıcaklık ölçümü

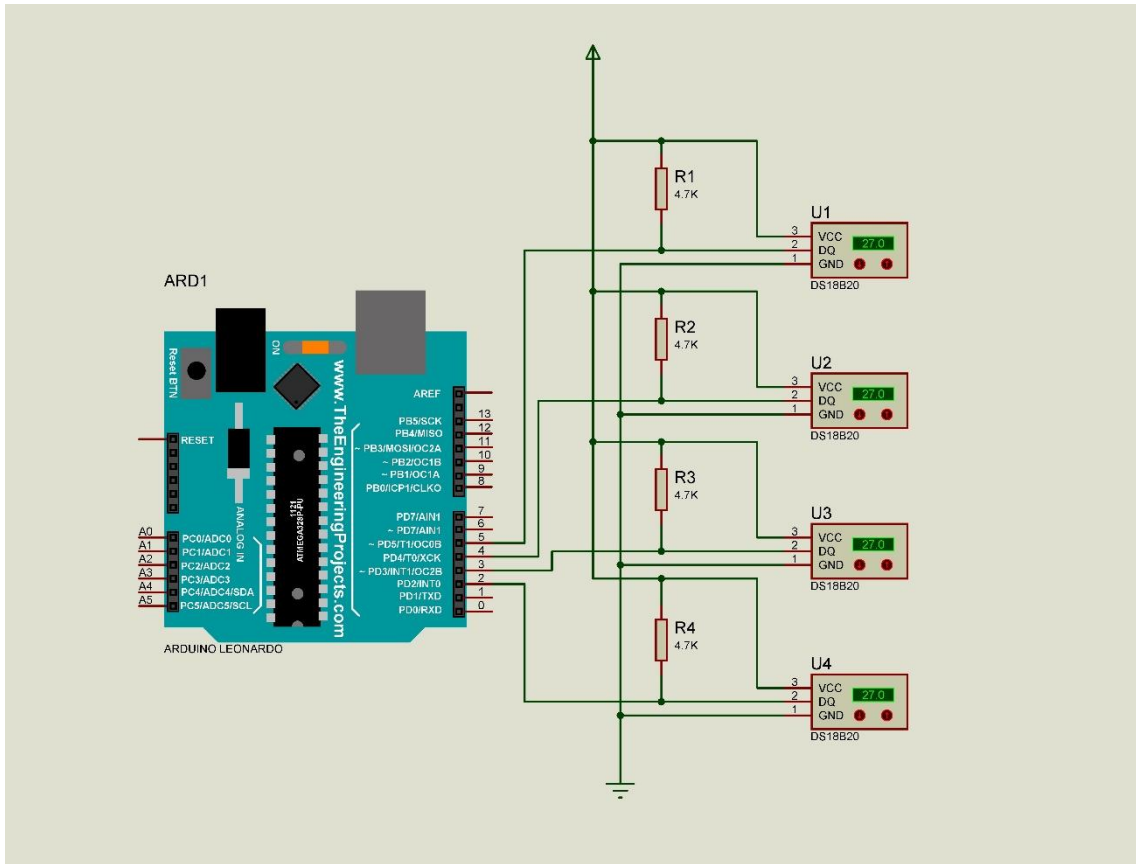
Batarya yönetim sistemlerinde pil hücrelerinin şarj veya deşarj esnasında sıcaklıkları güvenlik açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple batarya yönetim sistemlerinde sıcaklık ölçümü hassas bir şekilde yapılması gerekir. Lityum iyon pillerin çalışma sıcaklık aralığına göre güvenli çalışma sıcaklığı aralığı oluşturulmalıdır. Bu çalışma sıcaklığının üstüne çıktığında fan çalıştırma veya şarj-deşarj işlemi durdurma gibi önlemler alınabilir.

Bu çalışmada batarya hücrelerinin sıcaklıklarını ölçmek için Dallas DS18B20 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Her bir pil hücresinin sıcaklığını ölçmek amacı ile 4 adet DS18B20 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Sıcaklık sensöründen gelen verilerle Arduino üzerinden okunmuştur. Sıcaklık verileri şarj esnasında kaydedilip sıcaklık değişimi grafiksel olarak izlenmiştir. Piyasada birçok sıcaklık sensörü bulunmaktadır. DS18B20 sıcaklık sensörü oldukça hassas bir sensördür. Tek bir dijital pin kullanarak birden fazla sıcaklık sensörünün haberleşmesi sağlanabilir. Kullanım yerine göre farklı kılıflarda üretilmiştir. Bu gibi özelliklerinden dolayı bu çalışmada DS18B20 sıcaklık sensörü tercih edilmiştir. DS18B20 sıcaklık sensörünün özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Çalışma voltajı: 3.0-5.5 V
- Sıcaklık ölçüm aralığı: -55 C / 125 C
- OneWire protokolü sayesinde tek bir dijital pin kullanarak haberleşme yapar
- 9 -12 bit arası seçilebilir hassasiyete sahiptir
- 64 bit benzersiz seri numarasına sahiptir
- 750ms altında tepki süresine sahiptir
- Birden fazla sensör tek hat üzerine bağlanabilir
- Hassasiyet: ± 0.5 C (-10°C ile +85°C arasında)



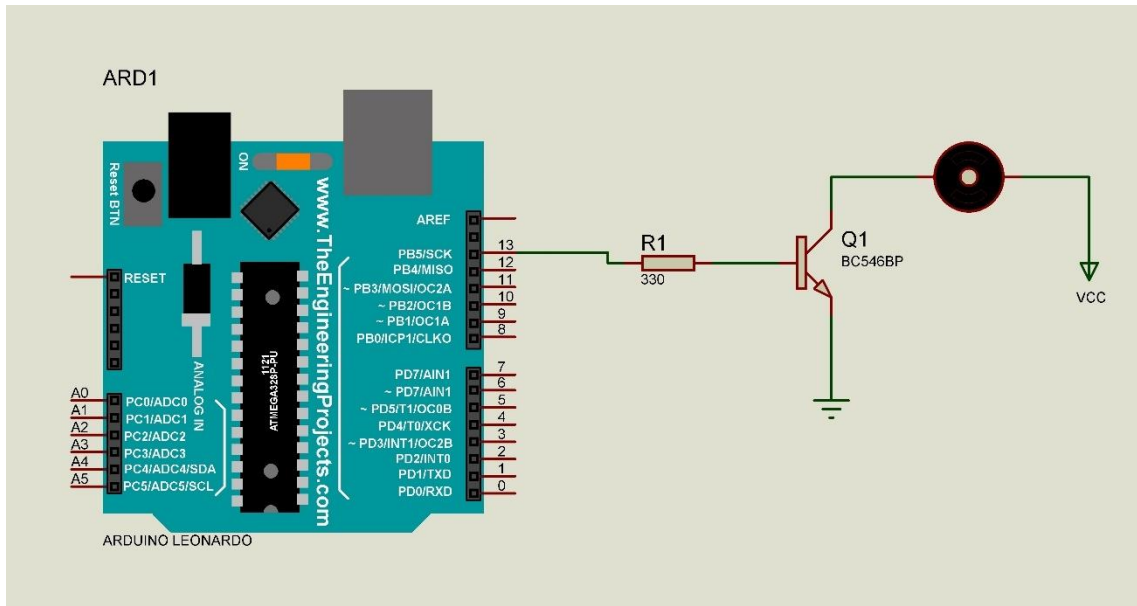
Şekil 4.4 DS18B20 sıcaklık sensörü pin bağlantıları



Şekil 4.5 4 adet sıcaklık sensörünün Arduino Leonardo ile bağlantı devresi

4.1.5.Fan devresi

Bataryaların şarj veya deşarj durumunda iç dirençleri ve yapısal nedenler ile sıcaklıkları artabilir. Bu durum bataryalar için kritiktir. Batarya yönetim sistemleri bataryaların sıcaklık değerlerini anlık olarak izlemektedirler. Sıcaklık değeri referans olarak belirlenen değerin üzerine çıktığında şarj işlemi durdurma veya soğutucu fan devresi kullanılarak sıcaklığın azaltılması gerekmektedir. Bu çalışmada sıcaklık değeri referans değerin üzerine çıktığında fan devresi yardımı ile sıcaklığın düşürülmesi sağlanmıştır. Maksimum sıcaklık değeri 40°C olarak belirlenmiştir. DS18B20 sıcaklık sensörü ile Arduino üzerinden pil hücrelerinin sıcaklık değerleri anlık olarak izlenmektedir. Herhangi bir pil hücresinin sıcaklık değeri 40°C değerinin üzerine çıktığında fan devresi çalıştırılmaktadır. Ve soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Fan devresi tüm pil hücrelerinin sıcaklık değerleri 40°C'nin altına düşene kadar çalışmaya devam etmektedir. Fan devresi bir adet DC motor ve DC motorun anahtarlama işlemini gerçekleştirmek için bir adet transistör ile oluşturulmuştur. Şekil 4.6'da fan devresinin Arduino ile bağlantı devresi gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Fan devresinin Arduino Leonardo ile bağlantı devresi

4.1.6. Şarj işlemi

Lityum iyon piller, şarj esnasında elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştüren ve lityum iyonlarının elektrotlar arasında hareket etmesiyle güç depolayan bir yapıya sahiptir. Pillerdeki lityum iyonları, pozitif elektrottan (katottan) negatif elektrota (anoda) hareket eder. Bu iyonlar, şarj sırasında elektrikleri taşır ve pilin kimyasal enerji depolamasına yardımcı olur (SEZER ve BASMACI, 2022). Lityum iyon pillerin doğru bir şekilde şarj edilmesi, pilin ömrünü uzatmak ve pilin güvenliğini sağlamak açısından oldukça önemlidir.

Lityum iyon pillerin nominal voltajı 3.6 V, maksimum voltajı ise 4.2 V değerindedir. Lityum iyon piller maksimum şarj voltajı olan 4.2 V ile şarj edilmesi güvenlidir. Ayrıca pil kapasitesine göre doğru şarj akımını ayarlamak oldukça önemlidir. Şarj akımı pil kapasitesinin %0.5 ile %1'i arasında olmalıdır. Lityum iyon pillerin doğru bir şekilde şarj edilmesi için CC/CV (Constant Current / Constant Voltage) şarj yöntemi kullanılır. CC (Constant Current) aşamasında pilin sabit bir akımla şarj edilmesi sağlanır. CV (Constant Voltage) aşaması ise, pilin gerilimi 4.2 V değerine ulaştığında akım değeri yavaşça azalır çünkü pilin kapasitesi dolmaya başlar. Pil tamamen şarj olduğunda akım değeri çok düşüktür. Bu durumda şarj işlemi sonlandırılır.

Bu tez çalışmasında pillerin şarj edilmesi için ayarlanabilir DC güç kaynağı kullanılmıştır. Farklı pil bağlantıları ile gerilim ve sıcaklık değerleri değişen pil paketleri oluşturulabilir. Bu sebeple şarj gerilimi ve şarj akımı değişeceği için şarj işleminde ayarlanabilir güç kaynağı tercih edilmiştir. Yapılan bu çalışmada 4 adet lityum iyon pil seri bağlanarak pil paketi elde edilmiştir. Ayarlanabilir güç kaynağı ile şarj işleminde pillerin maksimum gerilim değeri ile şarj etme işlemi gerçekleştirilmiştir. Lityum iyon pillerin şarj akımı 0.5 C ve 1 C arasında ideal değerdedir. Pilin ömrünü korumak ve güvenliği arttırmak için 0.5 C değeri en uygundur. 4 adet pilin seri bağlanması ile 1200mAh kapasitesinde pil paketi elde edilmiştir. Bu kapasite değerine en uygun şarj akımı $1200\text{mAh} \times 0.5\text{C} = 600\text{mA}$ (0.6A) olarak hesaplanabilir. Bu işlemler için kullanılan ayarlanabilir DC güç kaynağı olarak UPX markasının K3010F modeli tercih edilmiştir. Bu modelin teknik özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Çıkış Gerilimi Aralığı: 0-30 V DC
- Çıkış Akımı Aralığı: 0-10 A
- Güç: Maksimum 300 W
- Güç Kaynağı: AC 110 V / 220 V (50/60Hz)
- Ekran: Dijital LED Ekran
- Kontrol: Hassas Ayar Düğmeleri
- Soğutma: Dahili Fan Soğutma
- Kısa Devre Koruması: Var
- Aşırı Akım Koruması: Var
- Aşırı Gerilim Koruması: Var



Şekil 4.7 UPX K3005F DC güç kaynağı

4.1.7. Hücre dengeleme

Hücre dengeleme batarya yönetim sistemi için oldukça önemlidir. Batarya hücreleri şarj ve deşarj çevrimleri esnasında kendi iç dirençleri, sıcaklıkları sebepleri ile farklı gerilim değerlerinde olabilirler. Ancak bu durum bataryanın ömrünü doğrudan etkilemektedir. Bunun yanı sıra batarya şarj esnasında yüksek gerilimdeki hücre sebebi ile düşük gerilimdeki hücrenin tam şarj olması engellenir. Bu durum enerji kaybına sebep olur. Bu gerilim farklılıkları bataryada istenmeyen bir durumdur. Gerilim farklarını en aza indirmek için bataryalarda dengeleme yöntemleri kullanılmaktadır. Batarya hücrelerinin gerilimleri anlık olarak takip edilir şarj sırasından en yüksek batarya gerilimine sahip olan batarya hücresi direnç yardımı ile fazla enerjiyi ısıya dönüştürerek tüm hücreler eşitlenene kadar şarj işlemi devam eder. Pasif dengelemenin maliyeti az ve uygulanması kolaydır. Basit devre elemanları ile pasif dengeleme gerçekleştirilebilir. Bu sebeple bu çalışmada batarya hücre dengeleme yöntemi olarak pasif dengeleme yöntemi kullanılmıştır.

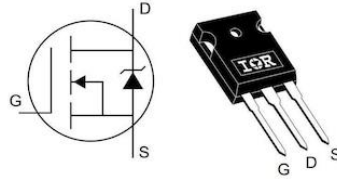
4.1.7.1.MOSFET

Batarya yönetim sistemi tasarımında yüksek gerilimli batarya hücrelerindeki fazla enerjiyi dirençler yardımı ile azaltmak için ilk olarak IRFZ48N N-kanal MOSFET kullanılmıştır. MOSFET pasif dengeleme işleminde anahtarlama elemanı olarak kullanılmıştır. Pil hücrelerinin her birinin gerilimi anlık olarak Arduino Leonardo üzerinden izlenmektedir. Batarya hücrelerinin en yüksek gerilimi olan 4.2 V değerine geldiğinde Arduino Leonardo üzerinden MOSFET'in gate bacağı tetiklenerek pasif dengeleme işlemi başlatılarak pasif dengeleme devresi üzerinden fazla enerji açığa çıkartılır. Bu enerji dirençler üzerinden sıcaklık olarak ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık DS18B20 sıcaklık sensörü sayesinde izlenerek istenmeyen seviyenin üzerinde olduğunda şarj işlemi durdurulmalıdır. 4 adet pil hücresinin dengeleme işlemi her bir hücre için ayrı ayrı yapılmıştır. Bu çalışmada 4 adet pasif dengeleme devresi kullanıldığı için 4 adet IRZ48N N-kanal MOSFET kullanılmıştır.

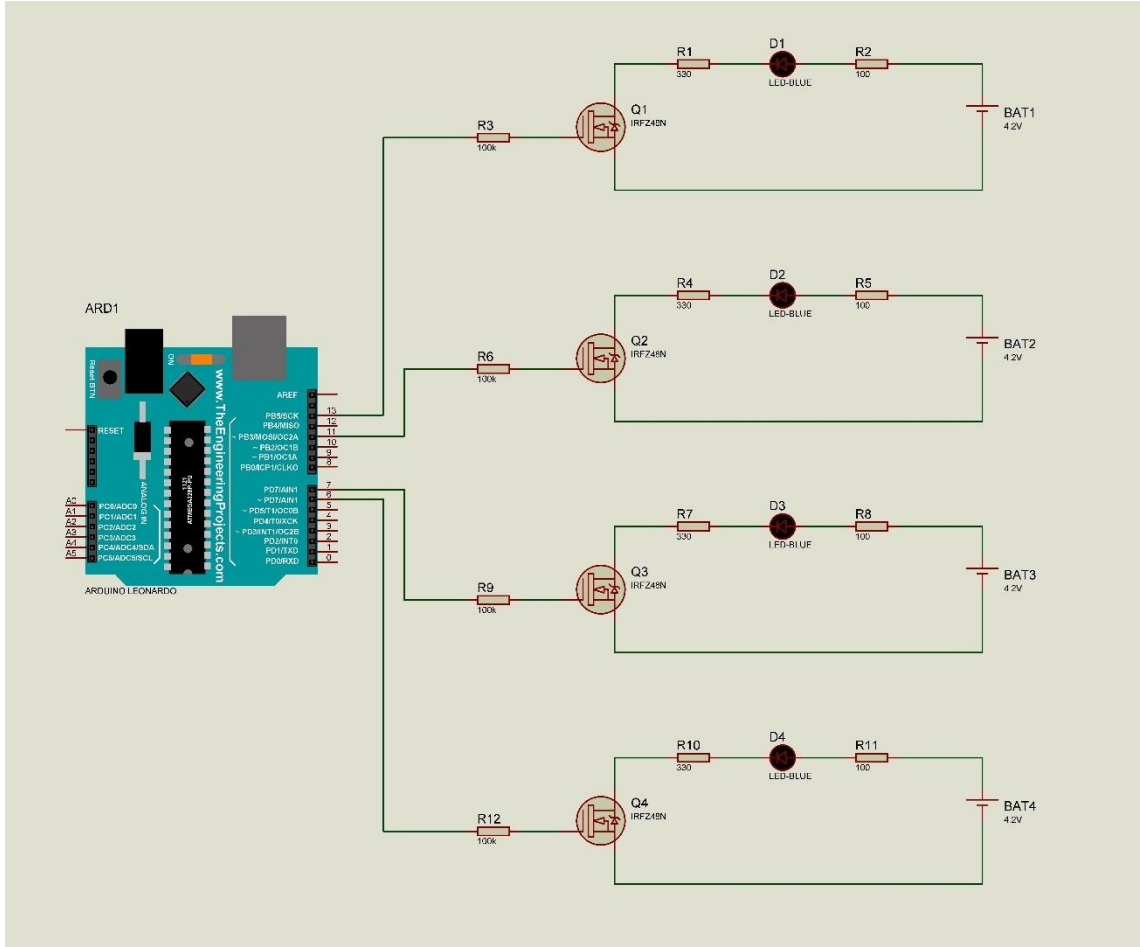
MOSFET'ler küçük elektrik sinyallerini yükseltmek veya anahtarlamak için kullanılan yarı-iletken devre elemanlarıdır. Üç veya daha fazla bacağı bulunmaktadır. Bacakların birine uygulanan elektrik sinyali ile diğer bacaklar arasındaki elektrik akımı kontrol edilir. MOSFET metal oksit yarı iletkenli alan etki transistörüdür. Alan etkili

transistörlerin geliştirilmiş bir türüdür. 3 adet bacakları vardır. Bu bacaklar gate (kapı), drain (dren) ve source (kaynak) olarak adlandırılır. Kapı bacağı, MOSFET'in açılıp kapanmasını kontrol eden baktır. MOSFET ler N-kanal ve P-kanal olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılır. N-kanal MOSFET'ler kullanım kolaylığı açısından daha çok tercih edilmektedir. Yapılan bu çalışmada da N-kanal MOSFET kullanılmıştır. N-kanal MOSFET'ler gate bacağına uygulanan sinyal sayesinde drain-source arasındaki akım kontrol edilerek çalışmaktadır. IRFZ48N MOSFET gate bacağına uygulana gerilim sayesinde iletken hale gelir. Gate bacağına sıfır veya negatif bir gerilim uygulandığında MOSFET yalıtkan duruma geçer. Kısaca gate bacağına uygulanan gerilim değerine göre açık veya kapalı olması kontrol edilerek anahtarlama elemanı olarak kullanılır. IRFZ48N N-kanal MOSFET R_{DS} değerinin düşük olması ve yüksek akım taşıma kapasitesi ile öne çıkan bir MOSFET modelidir. Anahtarlama kayıplarını en aza indirmek ve hızlı bir anahtarlama sağlamak için bu MOSFET modeli tercih edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan IRFZ48N N-kanal MOSFET'in özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Gerilim: 60 V
- Akım: 49 A
- Direnç: 0.27 mOhm
- Paket Tipi: TO-220
- Güç: 280 W



Şekil 4.8 IRFZ48N N-kanal MOSFET



Şekil 4.9 IRFZ48N N-kanal MOSFET ile pasif dengeleme devresi

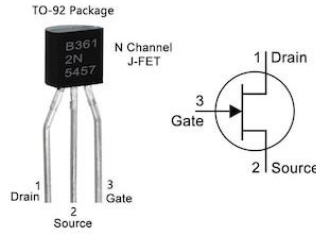
4.1.7.2.JFET

Bu çalışmada pasif dengeleme işlemi için bir diğer anahtarlama elemanı olarak JFET kullanılmıştır. JFET birleşim yüzeyli alan etkili bir transistör. JFET gate, source ve drain olmak üzere üç bacağı sahiptir. JFET'leri BJT'lerden ayıran en önemli özellik gate bacağından gerilim ile kontrol edilmesidir. JFET'ler gate bacağından bir akım çekmez. Gate bacağına uygulanan gerilime göre drain-source arasındaki akım kontrol edilebilmektedir. Bu özellik ısınma ve akım açısından büyük avantaj sağlar. N-kanallı ve P-kanallı olmak üzere iki tipte üretilir. N-kanal JFET kullanım kolaylığı açısından daha çok tercih edilmektedir. JFET transistörlerin avantajları sıcaklıktan daha ez etkilenmesi, uzun ömürlü olması, anahtarlama hızının yüksek olması olarak sıralanabilir. Buna karşılık maliyetleri daha yüksektir.

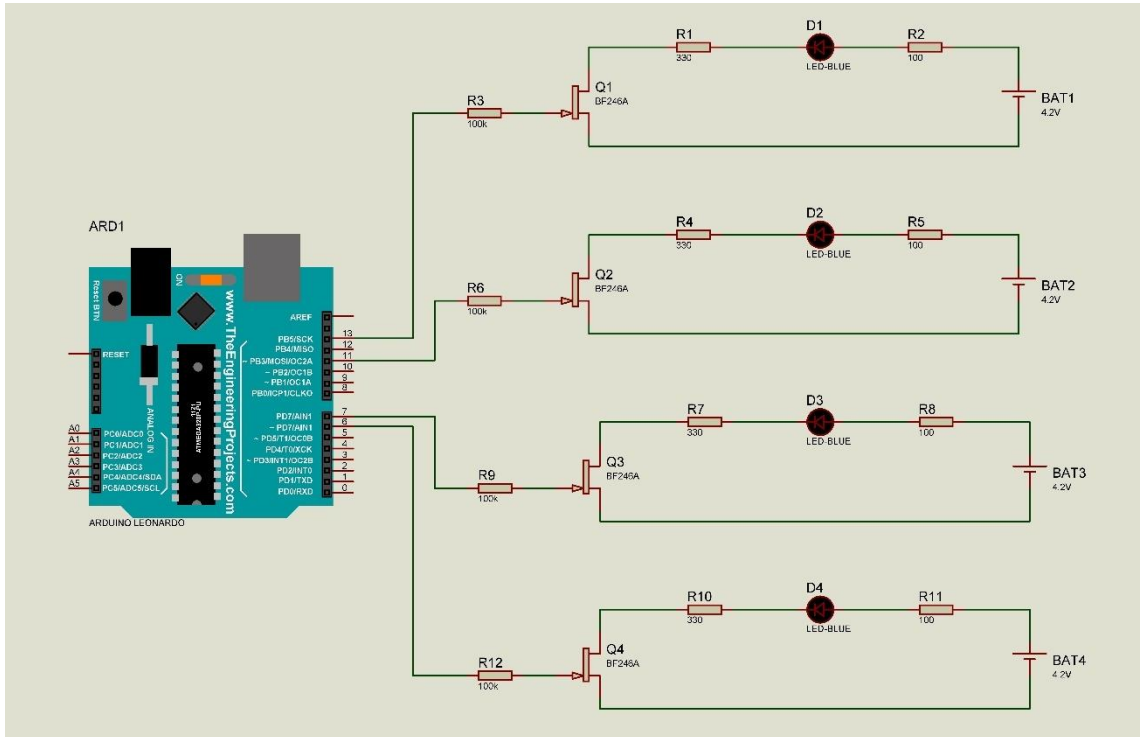
Yapılan bu çalışmada kullanım anahtarlama işleminin daha kolay olması sebebi ile N-kanal JFET tercih edilmiştir. Bu JFET gate bacağına uygulana gerilim sayesinde

anahtarlama işlemini gerçekleştirir. Gate akımı çok küçüktür bu durum düşük güç tüketimi avantajı sağlar. Kısaca BF246A N-kanal JFET gerilim ile kontrol edilen bir elemandır. Bu JFET modeli düşük gürültü ve yüksek empedans özelliklerine sahiptir bu sebeple oldukça hassas bir cihazdır. Bu nedenler ile yapılan bu çalışmada JFET olarak BF246A modeli tercih edilmiştir. Bu JFET'in özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Paket Tipi: TO-92
- Transistör Tipi: N Kanal JFET
- Breakdown Gerilimi V_{br} : 39 V
- DC Kollektör Akımı: 10 mA
- Çalışma Sıcaklığı: $-55^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$



Şekil 4.10 BF246A N-kanal JFET



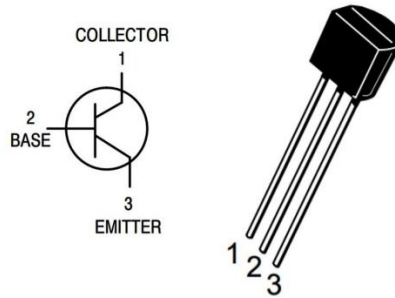
Şekil 4.11 BF246A N-kanal JFET ile pasif dengeleme devresi

4.1.7.3.BJT

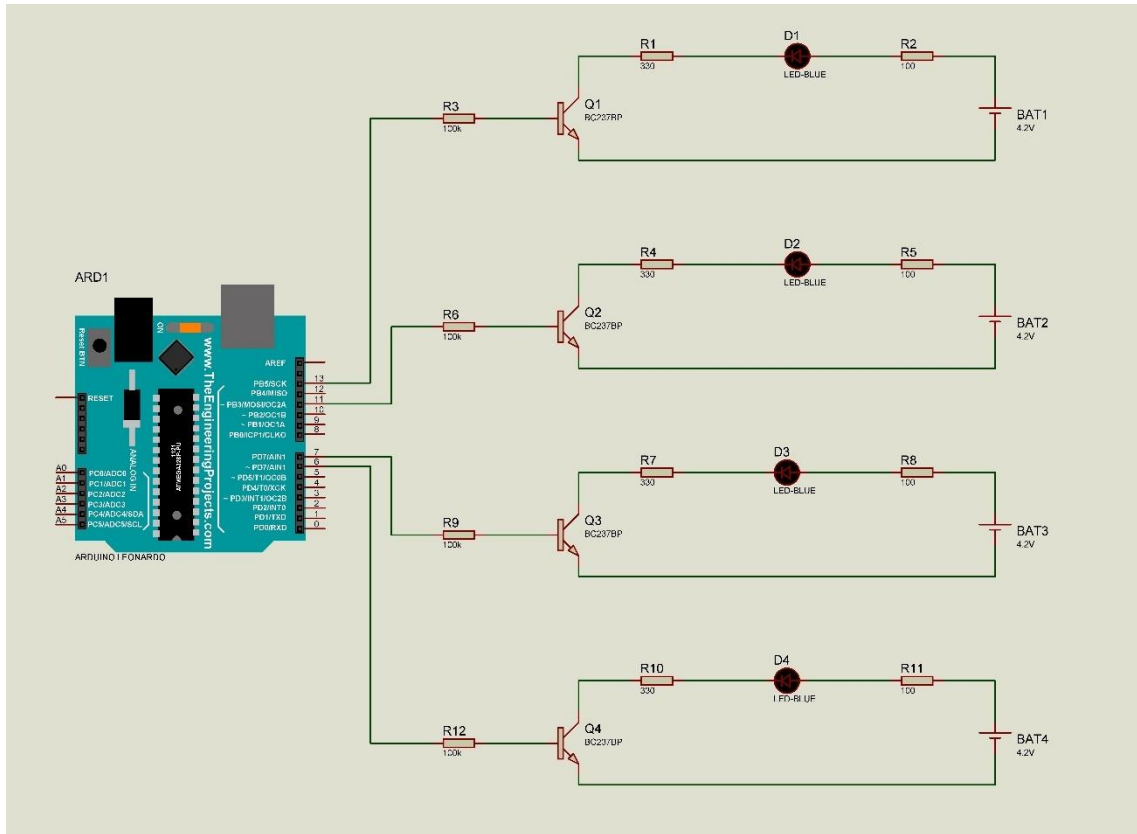
Bu çalışmada kullanılan bir diğer anahtarlama elemanı ise BJT'dir. BJT'ler akım kontrollü elemanlardır. Akımın bir bölgeden diğer bölgeye taşınmasını sağlayan bir transistör türüdür. NPN ve PNP tipi olmak üzere iki türü vardır. NPN tipi BJT'ler kullanım kolaylığı açısından daha çok tercih edilmektedir. BJT'ler emiter (emitter), baz (base) ve kolektör (collector) olmak üzere üç ana bölgeden oluşmaktadır. Emiter, elektronların çoğunluk taşıyıcıları olarak hareket ettiği bölgedir. Base, küçük bir akımı kontrol eden bölgedir. Emiter ile kolektör arasındaki akımı kontrol eder. Kolektör, akımın ana çıkışı olan bölgedir. BJT'nin temel çalışma prensibi base bacağına uygulanan küçük bir akım ile kolektör-emiter arasındaki büyük akımı kontrol etmeye dayalıdır. BJT, bir akım kontrollü cihaz olduğu için, genellikle daha yüksek güç tüketimine sahiptir bu durum dezavantaj oluşturmaktadır. Hızlı anahtarlama yaptıkları için yüksek hızlı uygulamalar için uygundur.

Bu çalışmada BC237B NPN tipi BJT kullanılmıştır. Bu eleman düşük gürültü seviyeleri ile yüksek hassasiyet avantajı sağlar. Ayrıca çok küçük base akımı ile büyük kolektör-emiter akımı kontrol edilmesine olanak sağladığı için BJT olarak bu model tercih edilmiştir.

- Paket Tipi: TO-92
- Transistör Tipi: NPN
- Kolektör-Verici Gerilimi (VCEO): 45 V
- Kolektör-Baz Gerilimi (VCES): 50 V
- Verici-Baz Gerilimi (VEBO): 6 V
- DC Kolektör Akımı: 100 mA



Şekil 4.12 BC237B NPN tipi BJT



Şekil 4.13 BC237B NPN tipi BJT ile pasif dengeleme devresi

5.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında elektrikli araçların ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşıladığı bataryalar için batarya yönetim sistemi tasarlanmıştır. 4 adet lityum iyon pil kullanılmıştır. Bu piller seri bağlanarak pil paketi oluşturulmuştur. Pillerin şarj esnasında sıcaklıklarını ölçmek için 4 adet DS18B20 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Sıcaklık değerleri Arduino Leonardo mikroişlemci kartı üzerinden elde edilmiştir. Elde edilen değerler Arduino seri port üzerinden anlık olarak takip edilebilmektedir. Bu değerlerin sonuçlandırılıp grafik haline getirilmesi için MATLAB programı kullanılmıştır. Gerekli yazılımlar yapılarak sıcaklık değerleri istenilen süre boyunca kaydedilebilmektedir. Kaydedilen sıcaklık değerleri yine MATLAB programı üzerinden grafik halinde izlenmektedir. Batarya güvenliğini sağlamak amacı ile pillerin sıcaklık değeri referans değer olarak belirlenen 40°C'nin üzerine çıktığında fan devresi çalışmaktadır. Böylece pillerin sıcaklık değerlerinin referans aralıkta olması sağlanmıştır. Bu durum pillerin güvenli bir şekilde şarj olmasını sağlamaktadır.

Pil hücrelerinin şarj esnasında gerilim değerlerini ölçmek için 4 adet gerilim sensörü kullanılmaktadır. Gerilim değerleri Arduino Leonardo mikroişlemci kartı üzerinden elde edilmiştir. Aynı şekilde elde edilen gerilim değerleri Arduino seri port üzerinden anlık olarak takip edilebilmektedir. Bu değerlerin sonuçlandırılıp grafik haline getirilmesi için MATLAB uygulaması kullanılmıştır. Gerilim değerleri istenilen süre boyunca kaydedilebilmektedir. Kaydedilen gerilim değerleri MATLAB programı üzerinden grafik halinde izlenmektedir.

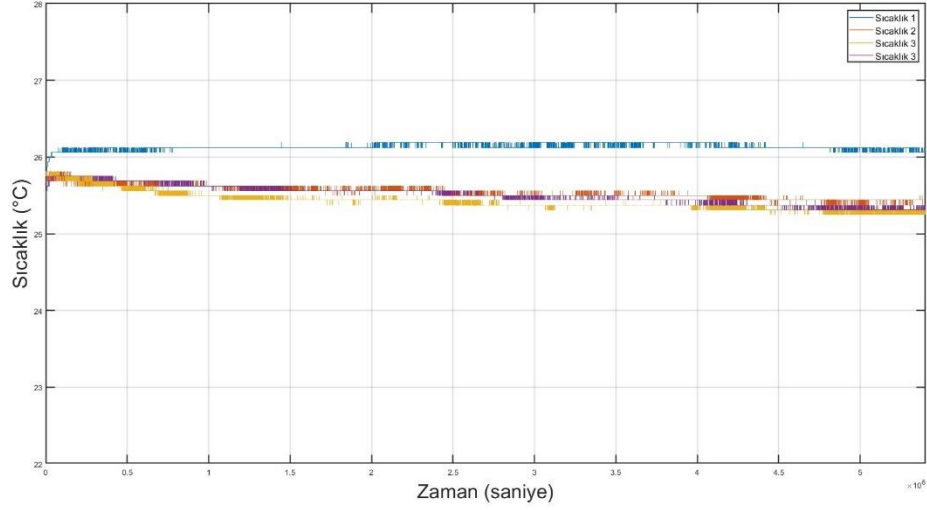
Batarya hücrelerinin şarj esnasındaki gerilim değerlerindeki farklılıklar pasif dengeleme yöntemi ile eşitlenmektedir. Pasif dengeleme işleminin maliyeti daha uygun olduğu için ve kullanımı daha kolay olduğu için tercih edilmiştir. Gerilim değerleri anlık olarak izlenen batarya hücreleri için bir eşik değeri belirlenmiştir. Bu eşik değeri bataryaları maksimum gerilim değeri olan 4.2V dur. Batarya hücreleri şarj sırasında 4.2V değerine ulaştığında pasif dengeleme devresi aktif hale gelmektedir. Anlık olarak takip edilen batarya hücresi eşik değerine geldiğinde ilgili batarya dengeleme devresi Arduino Leonardo dijital pinleri kullanılarak tetiklenir ve pasif dengeleme devresi aktif hale gelir. Pasif dengeleme devresi üzerindeki dirençler yardımı ile fazla enerji ısıya dönüştürülür. Aynı zamanda ledler sayesinde hangi batarya hücresinin dengelemde olduğu anlık olarak gözlemlenir. Bu tez çalışmasında pasif dengeleme işlemi farklı anahtarlama elemanları ile gerçekleştirilmiştir. MOSFET, JFET ve BJT anahtarlama elemanları kullanılmıştır.

Farklı elemanların kullanım amacı anahtarlama elemanlarının performansını gözlemlemektir. Aynı koşullarda batarya şarj durumunda iken farklı anahtarlama elemanları ile pasif dengeleme devresi aktif hale gelmektedir. Böylece anahtarlama elemanlarının pasif dengeleme işlemindeki performansları gözlemlenmiştir. MOSFET, JFET ve BJT anahtarlama elemanlarının hücre dengeleme işleminde enerji verimi, dengeleme hızı ve anahtarlama esnasındaki kayıpları gözlemlenerek avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur.

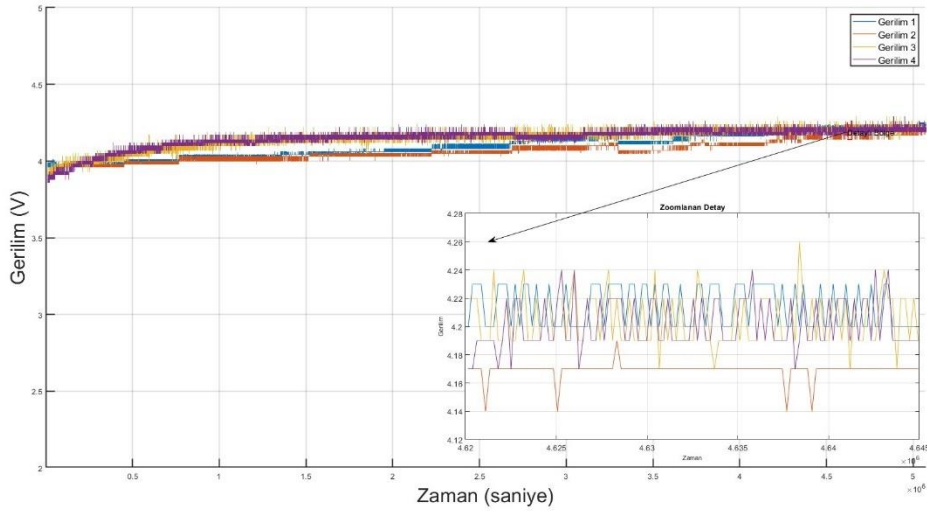
5.1.Pasif Dengeleme Devresinde MOSFET Kullanılması

Pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak IRFZ48N N-kanal MOSFET kullanılmıştır. Pillerin gerilim değerleri gerilim sensörü ile Arduino üzerinden izlenmiştir. Arduino'nun seri portu aracılığı ile MATLAB haberleşme sağlanarak pillerin gerilim değerleri kaydedilmiştir. Kaydedilen değerler MATLAB ile grafik haline getirilmiştir.

Pillerin şarj durumunda gerilim değerlerindeki farklılıklarını minimize etmek amacı ile anahtarlama pasif dengeleme metodu kullanılmıştır. Anahtarlama elemanı ile aktif hale gelen pasif dengeleme devresindeki dirençler yardımı ile pilin fazla enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmüştür. Ayrıca pasif dengeleme devresine seri olarak bağlanan led yardımı ile pasif dengeleme devresinin aktif olup olmadığı gözlemlenmiştir. Pasif dengeleme devresi için anahtarlama elemanı olarak kullanılan IRFZ48N N-kanal MOSFET'in kontrolü Arduino Leonardo üzerinden dijital sinyaller ile sağlanmıştır. Pil hücreleri eşik değeri olarak belirlenen 4.2 V değerinin üzerine çıktığında MOSFET'in gate bacağına dijital sinyal göndererek MOSFET iletken hale getirilmiştir. Böylece pasif dengeleme devresi aktif hale gelerek eşik değerinin üzerinde olan pilin fazla enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmüştür. Pillerin şarj durumunda sıcaklık ve gerilim değerleri kaydedilip grafik haline dönüştürülmüştür. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de sırası ile pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanıldığında sıcaklık ve gerilim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Pasif dengeleme devresinde MOSFET kullanıldığında sıcaklık değerleri



Şekil 5.2 Pasif dengeleme devresinde MOSFET kullanıldığında gerilim değerleri

MOSFET anahtarlama elemanı anahtarlama işlemini gerçekleştirirken yapısı gereği bazı güç kayıplarına sebep olmaktadır. Bu kayıplar genel olarak anahtarlama kayıpları olarak tanımlanır. Anahtarlama kayıpları MOSFET'in açılma (turn-on) ve kapanma (turn-off) süreçlerinde geçişler sırasındaki enerji kayıplarından kaynaklanır. MOSFET'in anahtarlama sırasındaki kayıpları Denklem (5.1)'deki gibi ifade edilir (PAULA, TAVARES, SOARES, ALMEIDA ve BRAGA, 2020).

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot V_{DS} \cdot I_D \cdot (t_{rise} + t_{fall}) \cdot f \quad (5.1)$$

Çizelge 5.1 Anahtarlama kaybı denklemindeki terimlerin anlamları

| Terim | Açıklama |
|------------|--------------------------------------|
| P_{sw} | Anahtarlama kaybı |
| V_{DS} | Drain-Source voltajı |
| I_D | Drain akımı |
| t_{rise} | Rise time (MOSFET'in açılma süresi) |
| t_{fall} | Fall time (MOSFET'in kapanma süresi) |
| f | Anahtarlama frekansı |

Pillerin şarj işlemi gerilim dengesizliklerini minimize etmek için pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak IRFZ48N N-kanal MOSFET kullanıldığında anahtarlama kayıplarını hesaplamak için gerekli veriler ölçülmüştür. Ölçülen veriler ile birlikte hesaplanan anahtarlama kayıpları aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 MOSFET için ölçülen ve kullanılan değerler

| Terim | Ölçülen Değer |
|------------|-----------------------|
| V_{DS} | 0.00038 V |
| I_D | 0.00463 A |
| t_{rise} | 15×10^{-9} s |
| t_{fall} | 30×10^{-9} s |
| f | 490 Hz |

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot V_{DS} \cdot I_D \cdot (t_{rise} + t_{fall}) \cdot f$$

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot (0.00038) \cdot (0.00463) \cdot (15 \times 10^{-9} + 30 \times 10^{-9}) \cdot 490$$

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot (0.00038) \cdot (0.00463) \cdot (45 \times 10^{-9}) \cdot 490$$

$$P_{sw} = (0.5) \cdot (0.00038) \cdot (102.09) \times 10^{-9}$$

$$P_{sw} = 0.01939 \times 10^{-9}$$

$$P_{sw} = 0.0194 \text{ nW}$$

Anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanıldığında diğer kayıplar da göz önünde bulundurulmalıdır. Gate kapasitansının her anahtarlama döngüsünde şarj ve deşarj edilmesi sırasında oluşan enerji kayıpları, kapasite kaybı olarak adlandırılır ve bu kayıplar MOSFET'in toplam anahtarlama kayıplarına önemli ölçüde katkı sağlar.

Kapasite kaybının formülü Denklem (5.2)'deki gibi ifade edilir (ÖZKAN ve HAVA, 2012).

$$P_{capp} = \frac{1}{2} \cdot C_{GS} \cdot V_{GS}^2 \cdot f \quad (5.2)$$

Çizelge 5.3 Kapasite kaybı denklemindeki terimlerin anlamları

| Terim | Açıklama |
|------------|------------------------|
| P_{capp} | Kapasite kaybı |
| C_{GS} | Gate-Source kapasitesi |
| V_{GS} | Gate-Source voltajı |
| f | Anahtarlama frekansı |

Pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak IRFZ48N N-kanal MOSFET kullanıldığında kapasite kaybını hesaplamak için gerekli veriler ölçülmüştür ve ölçülen veriler ile birlikte kapasite kaybı hesaplanarak aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 MOSFET için ölçülen ve kullanılan değerler

| Terim | Ölçülen Değer |
|----------|---------------|
| C_{GS} | 1350 pF |
| V_{GS} | 5 V |
| f | 490 Hz |

$$P_{capp} = \frac{1}{2} \cdot C_{GS} \cdot V_{GS}^2 \cdot f$$

$$P_{capp} = \frac{1}{2} \cdot (1350 \times 10^{-12}) \cdot (5^2) \cdot 490$$

$$P_{capp} = \frac{1}{2} \cdot (1350 \times 10^{-12}) \cdot 12250$$

$$P_{capp} = 8.268 \mu W$$

MOSFET'lerde drain akımının değişimi sırasında iletim kayıpları meydana gelmektedir. Özellikle yüksek drain akımları olan devrelerde bu kayıp önemlidir. İletim kaybı formülü Denklem (5.3)'deki gibi ifade edilir (RASHID, 2001).

$$P_{conduction} = I_D^2 \cdot R_{DS(on)} \quad (5.3)$$

Çizelge 5.5 İletim kaybı denklemindeki terimlerin anlamları

| Terim | Açıklama |
|------------------|--|
| $P_{conduction}$ | İletim kaybı |
| I_D | Drain akımı |
| $R_{DS(on)}$ | MOSFET iletimdeyken drain-source direnç değeri |

Anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanıldığında iletim kaybını hesaplamak için gerekli veriler elde edilmiştir. İletim kaybı hesaplanarak aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 MOSFET için ölçülen ve kullanılan değerler

| Terim | Ölçülen Değer |
|--------------|----------------|
| I_D | 0.00463 A |
| $R_{DS(on)}$ | 0.022 Ω |

$$P_{conduction} = I_D^2 \cdot R_{DS(on)}$$

$$P_{conduction} = (0.00463)^2 \cdot (0.022)$$

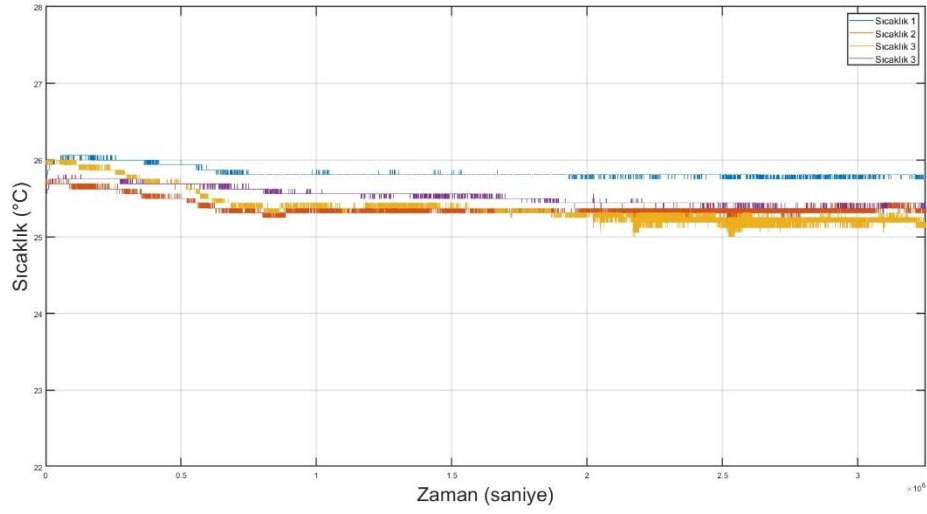
$$P_{conduction} = 0.471 \mu W$$

5.2.Pasif Dengeleme Devresinde JFET Kullanılması

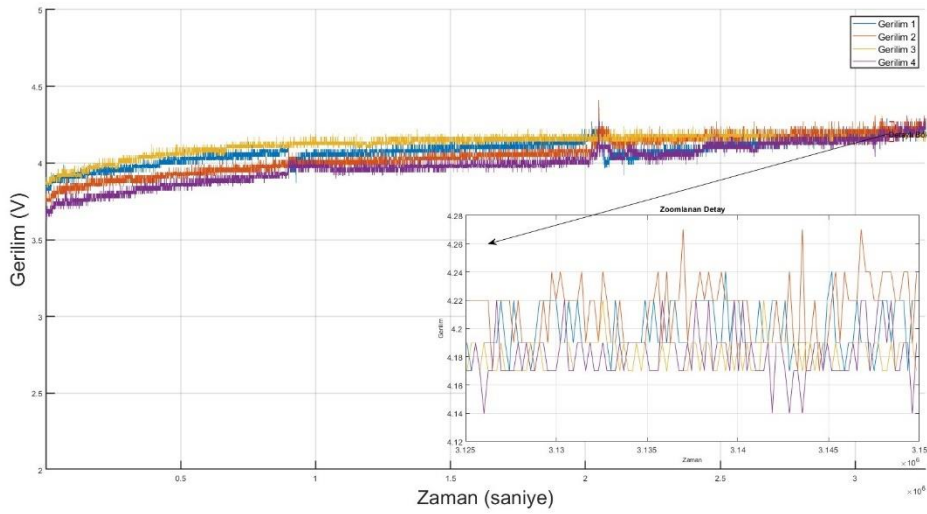
Pasif dengeleme devresinde karşılaştırılmak üzere kullanılan bir diğer anahtarlama elemanı ise BF246A N-kanal JFET'tir. Aynı şekilde pillerin gerilim değerleri gerilim sensörü ile Arduino üzerinden izlenmiştir. Arduino'nun seri portu aracılığı ile MATLAB haberleşme sağlanarak pillerin gerilim değerleri kaydedilmiştir. Kaydedilen değerler MATLAB ile grafik haline getirilmiştir.

Pasif dengeleme devresinde kullanılan anahtarlama elemanlarının karşılaştırılması amacı ile aynı şekilde deney düzeneği kurulmuştur. Pillerin şarj durumunda gerilim değerlerindeki farklılıklarını minimize etmek amacı ile anahtarlama pasif dengeleme metodu kullanılmıştır. Anahtarlama elemanı ile aktif hale gelen pasif dengeleme devresindeki dirençler yardımı ile pilin fazla enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmüştür. Ayrıca pasif dengeleme devresine seri olarak bağlanan led yardımı ile pasif dengeleme devresinin aktif olup olmadığı gözlemlenmiştir. Pasif dengeleme devresi için anahtarlama elemanı olarak kullanılan bir diğer yarı iletken olan BF246A N-kanal

JFET'in kontrolü Arduino Leonardo üzerinden dijital sinyaller ile sağlanmıştır. Pil hücreleri eşik değeri olarak belirlenen 4.2V değerinin üzerine çıktığında JFET'in gate bacağına dijital sinyal göndererek JFET iletken hale getirilmiştir. Böylece pasif dengeleme devresi aktif hale gelerek eşik değerinin üzerinde olan pilin fazla enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmüştür. Pillerin şarj durumunda sıcaklık ve gerilim değerleri kaydedilip grafik haline dönüştürülmüştür. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sırası ile pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak JFET kullanıldığında sıcaklık ve gerilim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Pasif dengeleme devresinde JFET kullanıldığında sıcaklık değerleri



Şekil 5.4 Pasif dengeleme devresinde JFET kullanıldığında gerilim değerleri

JFET anahtarlama elemanı aynı şekilde anahtarlama işlemini yaparken enerji kayıplarına sebep olmaktadır. Anahtarlama kayıpları JFET'in açık (iletim) ve kapalı (kesim) durumları arasında geçiş yaparken meydana gelen kayıplardır. Bu geçişler açılma süresi (t_{on}) ve kapanma süresi (t_{off}) olarak bilinir. Bu süreler ne kadar uzun olursa kayıplar o kadar büyük olur. Anahtarlama kayıpları özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda önemli bir rol oynar. JFET'in anahtarlama kaybı Denklem (5.4)'teki gibi ifade edilir (MANIKTALA, 2006).

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot V_{DS} \cdot I_D \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f \quad (5.4)$$

Çizelge 5.7 Anahtarlama kaybı denklemindeki terimlerin anlamları

| Terim | Açıklama |
|-----------|------------------------|
| P_{sw} | Anahtarlama kaybı |
| V_{DS} | Drain-Source voltajı |
| I_D | Drain akımı |
| t_{on} | JFET'in açılma süresi |
| t_{off} | JFET'in kapanma süresi |
| f | Anahtarlama frekansı |

Pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak BF246A N-kanal JFET kullanıldığında anahtarlama kayıplarını hesaplamak için gerekli veriler devre üzerinden ölçülmüştür. Ölçülen veriler ile birlikte anahtarlama kaybı hesaplanarak aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 JFET için ölçülen ve kullanılan değerler

| Terim | Ölçülen Değer |
|-----------|-----------------------|
| V_{DS} | 0.678 V |
| I_D | 0.00307 A |
| t_{on} | 10×10^{-9} s |
| t_{off} | 10×10^{-9} s |
| f | 490 Hz |

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot V_{DS} \cdot I_D \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f$$

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot (0.678) \cdot (0.00307) \cdot (10 \times 10^{-9} + 10 \times 10^{-9}) \cdot 490$$

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot (0.678) \cdot (0.00307) \cdot (20 \times 10^{-9}) \cdot 490$$

$$P_{sw} = (0.5) \cdot (0.678) \cdot (0.00307) \cdot (9800 \times 10^{-9})$$

$$P_{sw} = (10.199) \cdot (10^{-9})$$

$$P_{sw} = 10.199 \text{ nW}$$

Anahtarlama elemanı olarak JFET kullanıldığında kapasite kaybının da göz önünde bulundurulması gerekir. JFET'in drain-source kapasitesi (C_{DS}), kapasitif yüklerin şarj ve deşarj edilmesi ile ilgili kayıplara neden olabilir. Kapasite kaybı özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda önemlidir. JFET'in kapasite kaybı Denklem (5.5)'teki gibi ifade edilir (MANIKTALA, 2006).

$$P_{capp} = \frac{1}{2} \cdot C_{GS} \cdot V_{GS}^2 \cdot f \quad (5.5)$$

Çizelge 5.9 Kapasite kaybı denklemindeki terimlerin anlamları

| Terim | Açıklama |
|------------|------------------------|
| P_{capp} | Kapasite kaybı |
| C_{GS} | Gate-Source kapasitesi |
| V_{GS} | Gate-Source voltajı |
| f | Anahtarlama frekansı |

Pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak BF246A N-kanal JFET kullanıldığında kapasite kaybını hesaplamak için gerekli veriler devre üzerinden ölçülmüştür. Ölçülen veriler ile birlikte kapasite kaybı hesaplanarak aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.10 JFET için ölçülen ve kullanılan değerler

| Terim | Ölçülen Değer |
|----------|---------------|
| C_{GS} | 3.5 pF |
| V_{GS} | 0.693 V |
| f | 490 Hz |

$$P_{capp} = \frac{1}{2} \cdot C_{GS} \cdot V_{GS}^2 \cdot f$$

$$P_{capp} = \frac{1}{2} \cdot (3.5 \times 10^{-12}) \cdot (0.693)^2 \cdot (490)$$

$$P_{capp} = (0.5) \cdot (3.5 \times 10^{-12}) \cdot 0.480 \cdot (490)$$

$$P_{capp} = 411.6 \times 10^{-12}$$

$$P_{capp} = 0.0004 \mu W$$

Anahtarlama elemanı olarak JFET kullanıldığında drain akımının değişimi sırasında ortaya çıkan iletim kayıpları da hesaplanabilir. Özellikle yüksek drain akımları olan devrelerde bu kayıp önemlidir. İletim kaybı Denklem (5.6)'daki gibi ifade edilir (MANIKTALA, 2006).

$$P_{conduction} = I_D^2 \cdot R_{DS(on)} \quad (5.6)$$

Çizelge 5.11 İletim kaybı denklemindeki terimlerin anlamları

| Terim | Açıklama |
|------------------|--|
| $P_{conduction}$ | İletim kaybı |
| I_D | Drain akımı |
| $R_{DS(on)}$ | JFET iletimdeyken drain-source direnç değeri |

İletim kaybını hesaplamak için gerekli veriler elde edilmiştir. İletim kaybı hesaplanarak aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.12 JFET için ölçülen ve kullanılan değerler

| Terim | Ölçülen Değer |
|--------------|---------------|
| I_D | 0.00307 A |
| $R_{DS(on)}$ | 100 Ω |

$$P_{conduction} = I_D^2 \cdot R_{DS(on)}$$

$$P_{conduction} = (0.00307)^2 \cdot 100$$

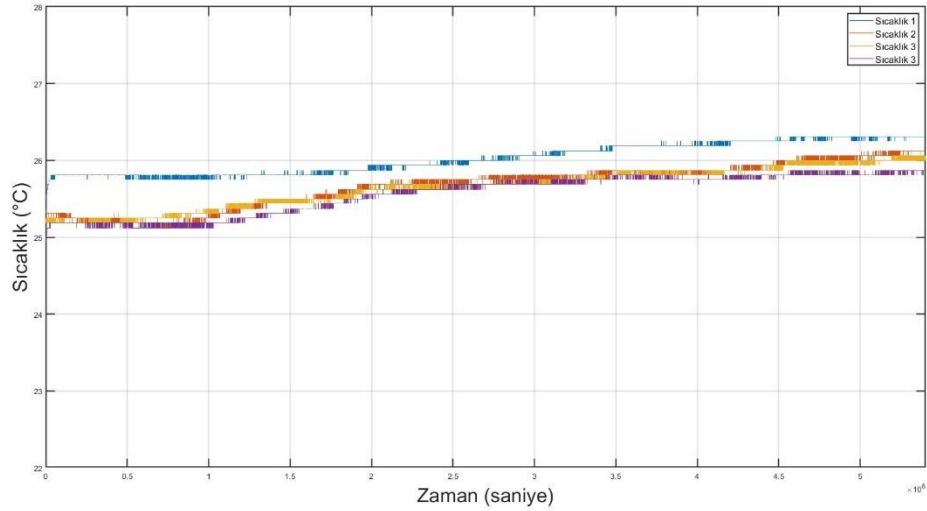
$$P_{conduction} = 942.49 \mu W$$

5.3.Pasif Dengeleme Devresinde BJT Kullanılması

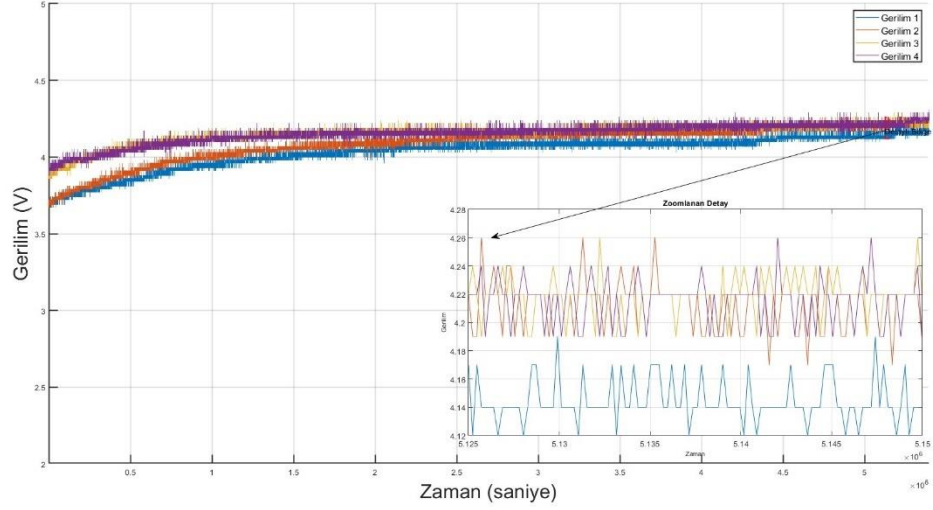
Pasif dengeleme devresinde karşılaştırılmak üzere kullanılan bir diğer anahtarlama elemanı BC237B NPN BJT'dir. Deney düzeneği aynı şekilde kullanılmıştır. Pillerin gerilim değerleri gerilim sensörü ile Arduino üzerinden izlenmiştir. Arduino seri portu sayesinde MATLAB ile haberleşme sağlanarak pillerin gerilim değerleri kaydedilip grafik haline getirilmiştir.

Daha önceki anahtarlama elemanlarındaki gibi pillerin şarj durumunda gerilim farklılıklarını en aza indirmek amacı ile anahtarlama pasif dengeleme metodu

kullanılmıştır. Anahtarlama elemanı ile aktif hale gelen pasif dengeleme devresindeki dirençler yardımı ile pilin fazla enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmüştür. Ayrıca pasif dengeleme devresine seri olarak bağlanan led yardımı ile pasif dengeleme devresinin aktif olup olmadığı gözlemlenmiştir. Pasif dengeleme devresi için anahtarlama elemanı olarak kullanılan bir diğer yarı iletken olan BC237B NPN BJT'nin kontrolü Arduino Leonardo üzerinden dijital sinyaller ile sağlanmıştır. Pil hücreleri eşik değeri olarak belirlenen 4.2V değerinin üzerine çıktığında BJT'nin base bacağına dijital sinyal göndererek BJT iletken hale getirilmiştir. Böylece pasif dengeleme devresi aktif hale gelerek eşik değerinin üzerinde olan pilin fazla enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmüştür. Pillerin şarj durumunda sıcaklık ve gerilim değerleri kaydedilip grafik haline dönüştürülmüştür. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sırası ile pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak BJT kullanıldığında sıcaklık ve gerilim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Pasif dengeleme devresinde BJT kullanıldığında sıcaklık değerleri



Şekil 5.6 Pasif dengeleme devresinde BJT kullanıldığında gerilim değerleri

Anahtarlama elemanı olarak BJT kullanıldığında da anahtarlama işlemi gerçekleşirken anahtarlama kayıpları meydana gelir. Anahtarlama kayıplarının büyük bir kısmı transistörün açık ve kapalı durumları arasında geçiş yaptığı sırada meydana gelir. Bu geçiş sırasında voltaj ve akım değerleri değişir ve bunlar kayıplara sebep olur. Her anahtarlama döngüsünde anahtarlama kaybı oluşmaktadır. Anahtarlama kaybını hesaplamak için geçiş süresi (t) ve voltaj-akım değişim aralıkları kullanılır. BJT'nin anahtarlama kaybı Denklem (5.7)'deki gibi ifade edilir (RASHID, 2001).

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot V_{CE} \cdot I_C \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f \quad (5.7)$$

Çizelge 5.13 Anahtarlama kaybı denklemindeki terimlerin anlamları

| Terim | Açıklama |
|-----------|--------------------------|
| P_{sw} | Anahtarlama kaybı |
| V_{CE} | Collector-Emiter voltajı |
| I_C | Collector akımı |
| t_{on} | BJT'nin açılma süresi |
| t_{off} | BJT'nin kapanma süresi |
| f | Anahtarlama frekansı |

Pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak BC237A NPN BJT kullanıldığında anahtarlama kayıplarını hesaplamak için gerekli veriler devre üzerinden

ölçülmüştür. Ölçülen veriler ile birlikte anahtarlama kaybı hesaplanarak aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.14 BJT için ölçülen ve kullanılan değerler

| Terim | Ölçülen Değer |
|-----------|-----------------------|
| V_{CE} | 0.23 V |
| I_C | 0.0041 A |
| t_{on} | 10×10^{-9} s |
| t_{off} | 10×10^{-9} s |
| f | 490 Hz |

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot V_{CE} \cdot I_C \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f$$

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot (0.23) \cdot (0.0041) \cdot (10 \times 10^{-9} + 10 \times 10^{-9}) \cdot 490$$

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \cdot (0.23) \cdot (0.0041) \cdot (20 \times 10^{-9}) \cdot 490$$

$$P_{sw} = (0.0004715) \cdot (9800 \times 10^{-9})$$

$$P_{sw} = 4.6207 \times 10^{-9}$$

$$P_{sw} = 4.62 \text{ nW}$$

Anahtarlama elemanı olarak BJT kullanıldığında anahtarlama kaybı dışında iletim kaybı da hesaplanabilir. İletim kaybı BJT'nin açık durumda olduğu zaman diliminde transistörün iletim bölgesindeki kayıpları ifade eder. BJT iletimdeyken kollektor-emiter arasındaki gerilim $V_{CE(sat)}$ değeri çok küçük olur ancak yine de belirli bir kayıp olur. İletim kaybı BJT yarı iletkenlerinde Denklem (5.8)'deki gibi ifade edilir (RASHID, 2001).

$$P_{conduction} = V_{CE(sat)} \cdot I_C \quad (5.8)$$

Çizelge 5.15 İletim kaybı denklemindeki terimlerin anlamları

| Terim | Açıklama |
|------------------|---------------------------------|
| $P_{conduction}$ | İletim kaybı |
| $V_{CE(sat)}$ | Doymuş collector-emiter voltajı |
| I_C | Collector akımı |

Pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak BC237A NPN BJT kullanıldığında iletim kaybını hesaplamak için gerekli veriler devre üzerinden ölçülmüş ve datasheet üzerinden elde edilmiştir. Elde edilen veriler ile birlikte iletim kaybı hesaplanarak aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.16 BJT için ölçülen ve kullanılan değerler

| Terim | Ölçülen Değer |
|---------------|---------------|
| $V_{CE(sat)}$ | 0.2 V |
| I_C | 0.0041 A |

$$P_{conduction} = V_{CE(sat)} \cdot I_C$$

$$P_{conduction} = (0.2) \cdot (0.0041)$$

$$P_{conduction} = 820 \mu W$$

5.4.Pasif Dengeleme Devresinde Kullanılan Anahtarlama Elemanlarının Maliyetleri

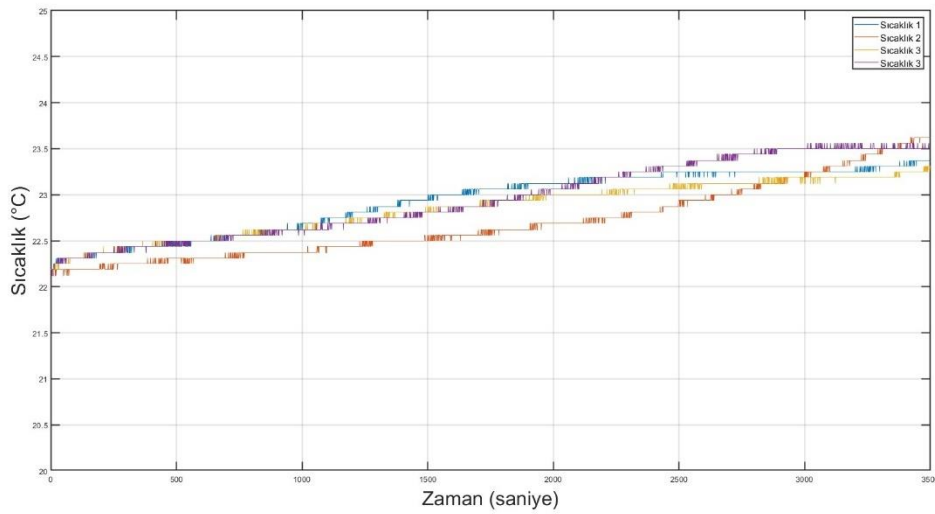
Yapılan bu çalışmada pasif dengeleme işlemi MOSFET, JFET ve BJT olmak üzere üç farklı anahtarlama elemanı ile gerçekleştirilmiştir. Farklı anahtarlama elemanlarının kullanım amacı pasif dengeleme işlemindeki performanslarının karşılaştırılmasıdır. Performanslarının yanı sıra bu anahtarlama elemanlarının maliyeti oldukça önemlidir. Elektrikli araçlardaki bataryalar, pillerin seri ve paralel bağlanarak pil paketlerinin oluşturulması ile elde edilmektedir. Bu bataryalar çok sayıda pilden oluşmaktadır. Silindirik pillerin kullanıldığı elektrikli araçlarda ortalama 6000 ile 8500 arasında pil hücresi kullanılmaktadır. Bu pillerin şarj esnasındaki pasif dengeleme işlemini gerçekleştirmek amacı ile kullanılan anahtarlama elemanlarının da çok sayıda olduğunu göstermektedir. Bu sebeple anahtarlama elemanları batarya yönetim sisteminin maliyetine doğrudan etkileyen elemanlardır. Yapılan bu çalışmada IRFZ48N MOSFET, BF246A JFET ve BC237B BJT kullanılmıştır. Bu anahtarlama elemanlarının maliyetleri Çizelge 5.17'de gösterilmiştir. Anahtarlama hızları, anahtarlama performansları ve anahtarlama kayıplarının yanı sıra maliyetlerinin de göz önünde bulundurulması oldukça önemlidir.

Çizelge 5.17 Anahtarlama elemanlarının maliyetleri

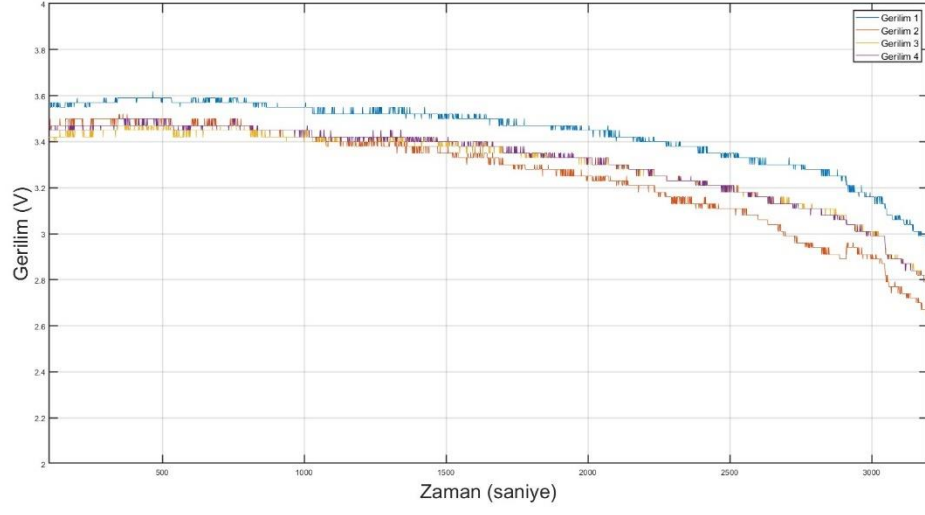
| ANAHTARLAMA ELEMANI | MALİYET |
|---------------------|------------------|
| IRFZ48N (MOSFET) | 15,61 ₺ (0,40\$) |
| BF246A (JFET) | 30,74 ₺ (0,80\$) |
| BC237B (BJT) | 1,04 ₺ (0,027\$) |

5.5.Pillerin Deşarj Durumu

Pillerin deşarj esnasında gerilim ve sıcaklık değerlerinin referans aralıkta olması pil ömrü ve pil sağlığı açısından oldukça önemlidir. 4 adet lityum iyon pil seri bağlanarak oluşturulan pil paketinin gerilim ve sıcaklık değerleri gerçek zamanlı olarak Arduino Leonardo üzerinden izlenen bu çalışmada pillerin deşarj esnasındaki gerilim ve sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir. Deşarj işlemi taş dirençlerin paralel bağlanması ile pillerdeki enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Deşarj esnasındaki pillerin gerilim ve sıcaklık değerleri Arduino Leonardo'nun seri portu üzerinden MATLAB ile haberleşmesi sağlanarak kaydedilip grafik haline dönüştürülmüştür. Deşarj işleminde pillerin gerilim değerlerinin farklı olmasının sebebi pil iç dirençlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Pillerde iç direnç farklı üretim toleransları, yaşlanma ve sıcaklık farklılıkları gibi durumlardan kaynaklanmaktadır. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'da sırası ile pillerin deşarj durumunda sıcaklık ve gerilim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Deşarj durumunda sıcaklık değerleri



Şekil 5.8 Deşarj durumunda gerilim değerleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında lityum iyon piller kullanılarak elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların ve batarya yönetim sisteminin prototipi tasarlanmıştır. Bataryaların gerilim değeri gerilim sensörü ve sıcaklık değeri DS18B20 Dallas sıcaklık sensörü ile gerçek zamanlı olarak izlenmiştir. Sensörlerdeki veriler Arduino Leonardo mikrodenetleyici kartı aracılığı ile izlenmiştir. Merkezi batarya yönetim sistemi kullanılarak sensörlerden veri elde edilmesi ve işlenmesi tek bir mikrodenetleyici kartı üzerinden yönetilmiştir. Lityum iyon pillerin güvenli bölgede çalışması için maksimum sıcaklık değeri olarak belirlenen 40°C'nin üzerine çıktığında fan çalıştırılarak ortamın ve pil hücrelerinin soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Pillerin gerilim değerleri ise şarj ve deşarj durumu için ayrı ayrı izlenmiştir. Şarj durumunda pillerdeki gerilim farklılıklarını minimize etmek amacı ile anahtarlamalı pasif dengeleme yöntemi kullanılmıştır. Pasif dengeleme işlemi maksimum şarj gerilimi olan 4.2 V eşik değerinin üzerine çıktığında pasif dengeleme devresi Arduino Leonardo'nun dijital pinleri yardımı ile aktif hale getirilmiştir. Pasif dengeleme devresinde kullanılan dirençler yardımı ile 4.2 V eşik değerinin üzerine çıkan pil hücrelerindeki fazla enerji ısı enerjisine dönüştürülmüştür. Pasif dengeleme devresinde kullanılan ledler yardımı ile hangi hücrenin pasif dengeleme işlemi gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak MOSFET, JFET ve BJT anahtarlama elemanları ayrı ayrı kullanılmıştır. Farklı anahtarlama elemanları kullanılırken pil hücrelerinin sıcaklık ve gerilim değerleri Arduino'nun seri portu aracılığı ile MATLAB ile haberleşmesi sağlanarak kaydedilmiş ve grafik haline getirilmiştir. Böylece pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak kullanılan yarıiletkenlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Elektrikli araçlardaki sıcaklık ölçümünün hassasiyeti batarya güvenliği ve verimliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. DS18B20 Dallas sıcaklık sensörü hassasiyeti yüksek bir sıcaklık sensörüdür. Ayrıca kullanım yerine göre farklı kılıflarda üretilmektedir. Elektrikli araçlara yönelik batarya yönetim sistemi tasarımı yapılan bu çalışmada DS18B20 sıcaklık sensöründen alınan verilerin doğruluğu test edilmiş ve bu sistem için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca fan devresinin belirlenen maksimum sıcaklığa göre etkin bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir.

Gerilim sensöründen alınan değerler multimetre ile eş zamanlı olarak ölçülerek doğruluğu tespit edilmiştir. Kullanılan gerilim sensörünün uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Pasif dengeleme devresinde kullanılan MOSFET, JFET ve BJT anahtarlama elemanlarının her biri pasif dengeleme işlemini belirlenen 4.2 V maksimum gerilim değerinde gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Farklı yarıiletkenlerin kullanılması ile pasif dengeleme işlemi gerçekleştirilerek çalışma hızı, anahtarlama kayıpları, pasif dengeleme işlemindeki performansı gibi bazı parametreler elde edilmiştir. Aşağıdaki çizelgede farklı yarı iletkenlerin pasif dengeleme işleminde kullanıldığındaki verileri göstermektedir.

Çizelge 6.1 Anahtarlama elemanlarının özellikleri ve çalışmada elde edilen veriler

| Özellikler | MOSFET(IRFZ48N) | JFET (BF246A) | BJT (BC237B) |
|---|--|---|----------------------------|
| Yapı Tipi | N-Kanal MOSFET | N-Kanal JFET | NPN BJT |
| Kontrol Türü | Gerilim Kontrollü | Gerilim Kontrollü | Akım Kontrollü |
| Maksimum Kaynak Gerilimi | 55 V | 30 V | - |
| Maksimum Kollektör-Emiter Gerilimi | - | - | 45 V |
| Kanal Açma Gerilimi | 2 V – 4 V | 0.3 V – 6 V | - |
| Tepki Süresi | 100 ns | 1 μ s | 1 μ s |
| Anahtarlama Hızı | 100 ns | 0.1 μ s - 1 μ s | 1 μ s – 10 μ s |
| Toplam Kapasitansı | 2200 pF | Düşük | Düşük |
| Çalışma Sıcaklığı | -55°C ile +175°C | -55°C ile +135°C | -65°C ile +150°C |
| Sürücü Gereksinimi | Evet (Tam iletim için) | Hayır | Hayır |
| Soğutucu Gereksinimi | Evet, soğutucu gerekebilir | Genellikle gerekmez | Genellikle gerekmez |
| Maliyet | 15,61 ₺ (0,40 \$) | 30,74 ₺ (0,80 \$) | 1,04 ₺ (0,027 \$) |
| Anahtarlama Kayıpları | 0.0194 nW | 10.19 nW | 4.62 nW |
| Diğer Kayıplar | 8.268 μ W(kapasite kaybı) 0.471 μ W(iletim kaybı) | 0.0004 μ W(kapasite kaybı) 942.49 μ W (iletim kaybı) | 820 μ W (iletim kaybı) |

Anahtarlama hızları veri sayfasından elde edilen bilgilere göre sırası ile 100 ns, 0.1 μ s-1 μ s ve 0.1 μ s-10 μ s'dir. Bu durumda anahtarlama hızı açısından avantajlı olan yarıiletkenin MOSFET olduğu belirlenmiştir.

Yarıiletkenleri anahtarlama kayıpları açısından karşılaştırdığımızda; yapılan hesaplamalara göre MOSFET, JFET ve BJT anahtarlama elemanlarının kayıpları sırası ile 0.0194 nW, 10.19 nW ve 4.62 nW olarak elde edilmiştir. Bu değerlere göre en fazla anahtarlama kaybı JFET anahtarlama elemanı kullanıldığında elde edilerek dezavantajlı bir durum oluşturmuştur. En az anahtarlama kaybı ise MOSFET anahtarlama elemanı kullanıldığında elde edilerek MOSFET'in anahtarlama kaybı açısından avantajlı olduğu gözlemlenmiştir.

Pasif dengeleme devresinde kullanılan MOSFET, JFET ve BJT anahtarlama elemanlarının maliyetleri sırası ile 15,61 ₺, 30,74 ₺ ve 1,04 ₺'dir. Maliyet açısından en uygun fiyatlı BJT anahtarlama elemanıdır. En yüksek fiyatlı ise JFET anahtarlama elemanıdır.

Pasif dengeleme devresinde kullanılan MOSFET, JFET ve BJT anahtarlama elemanları yapıları ile benzerdir. Her biri üç bacaklı kılıf şeklinde üretilmiştir. Devrede kullanım kolaylığı açısından farklılık gözlemlenmemiştir. Yapılan bu çalışmada kullanılan farklı yarıiletkenlerin pasif dengeleme devresinde anahtarlama elemanı olarak kullanıldığında her birinin anahtarlama işlemini etkin bir şekilde gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

Pasif dengeleme devresinde kullanılan MOSFET, JFET ve BJT yarıiletken elemanlarının hızları Datasheet verilerine göre karşılaştırıldığında en hızlı yarıiletken eleman MOSFET'tir. Ancak bu çalışmanın hızı kullanılan yarıiletkenlerin hızından daha düşüktür. Bu sebeple çalışmada kullanılan tüm yarıiletkenler bu çalışma için uygundur.

Bu çalışma, gelecekteki çalışmalarda pasif dengeleme işleminde kullanılacak olan yarıiletken seçimi konusunda yön gösterici olması hedeflenmiştir. Pasif dengeleme işleminde istenilen kriterlere göre avantaj sağlayan yarıiletken kullanılabilir.

7. KAYNAKLAR

- AKTAŞ, M., BAYGÜNEŞ, B., KIVRAK, S., ÇAVUŞ, B. ve SÖZEN, F. (2020). Elektrikli Araç İçin Düşük Maliyetli Bir Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. *European Journal of Science and Technology*, 227-238. doi:10.31590/ejosat.779720
- ALDOĞAN, E. (2012, 1 Mart). *Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi donanımı tasarımı. 2012.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Mühendislik ve Fen Bilimleri Fakültesi, Kocaeli.
- ALTUN, Ş. (2012, 1 Mart). *Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi algoritması tasarımı ve uygulaması.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- BAYGÜNEŞ, B. (2019, 11 Kasım). *Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- ÇAMUR, H. (2025). *Gerçek zamanlı batarya yönetim sistemi tasarımı.*
- DİKMEN, İ. C. (2022, 3 Şubat). *Elektrikli araçlar için akıllı batarya yönetim sisteminin tasarımı uygulanması.* (Yayımlanmamış doktora tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- DURMUŞ, F. S. ve KAYMAZ, H. (2020). Elektrikli araç şarj yöntemleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi*, 3(2), 123-139.
- EFE, Ş. ve GÜNGÖR, Z. A. (2022). Geçmişten günümüze batarya teknolojisi. *European Journal of Science and Technology*, 32, 947-955. doi:10.31590/ejosat.1048673
- GÜL, H. S. (2018, 8 Kasım). *Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- HİSAR, İ. M. (2023). *Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı.*
- İNAN, R., GÜÇKIRAN, M., ALTINIŞIK, Y. E., TEK, S. E. ve POTUK, M. (2023). Real-time implementation of battery management system designed with improved passive balancing technique for electric vehicles. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(3), 1757-1768. doi:10.17341/gazimmfd.938914
- İNAN, R., GÜÇKIRAN, M., ALTINIŞIK, Y. E., TEK, S. E. ve POTUK, M. (2022). Real-time implementation of battery management system designed with improved passive balancing technique for electric vehicles. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(3), 1757-1768. doi:10.17341/gazimmfd.938914
- KARABACAK, Y., OZKAN, İ. A. ve SARİTAS, İ. (2020a). Estimation of li-ion battery state of charge using adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS).

- International Journal of Energy Applications and Technologies*, 7(3), 88-94. doi:10.31593/ijeat.778689
- KARABACAK, Y., OZKAN, İ. A. ve SARİTAS, İ. (2020b). Estimation of li-ion battery state of charge using adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS). *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 7(3), 88-94. doi:10.31593/ijeat.778689
- KARADAĞ, T. ve DİKMEN, İ. C. (2021). Yeni nesil, modüler ve akıllı batarya yönetim sistemi. *European Journal of Science and Technology*, 1103-1112. doi:10.31590/ejosat.1045564
- KAYMAZ, H. ve HANÇAR, Y. (2021). Elektrikli araç batarya yönetim sistemleri için hücre eşitleme yöntemleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 60-73. doi:10.51513/jitsa.897126
- KEREM, A. ve GÜRBAK, H. (2020). Elektrikli Araçlar İçin Hızlı Şarj İstasyonu Teknolojileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. doi:10.29109/gujsc.713085
- KIVRAK, S., ÖZER, T. ve OĞUZ, Y. (2020). STM32f103C8 Mikroişlemcisi Kullanılarak Elektrikli Araçlar için Pasif Dengeleme Metodu Tabanlı Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Uygulaması. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 20(3), 426-433. doi:10.35414/akufemubid.691456
- KILINÇ, E. (2022). *Elektrikli araçlar için aktif batarya dengeleme sistemi tasarımı*.
- KÜÇÜKDEVECİ, N. (2018). Şarj edilebilir nikel-metal hidrür (Ni-MH) pillerinde kullanılan hidrojen depolama alaşımlarındaki son gelişmeler. *BEU Journal of Science*, 7(2), 454-472.
- LI, L., LI, Z., ZHAO, J. ve GUO, W. (2018). Lithium-Ion Battery Management System for Electric Vehicles. *International Journal of Performability Engineering*, 14(12), 3184-3194. doi:10.23940/ijpe.18.12.p28.31843194
- LIU, C., NEALA, Z. G. ve CAO, G. (2016, 1 Mart). Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. *Materials Today*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.mattod.2015.10.009
- LIU, H. ve XIA, C. (2013). *An efficient battery balancing scheme in electric vehicle*. Tianjin: IEEE Press.
- MANIKTALA, S. (2006). Switching power supplies A to Z. *Switching power supplies A to Z* içinde (ss. 210-215).
- MENAK, R., KARADAĞ, T., ALTUĞ, M. ve TAN, N. (2021). A Review Study on Battery Management Systems in Electric Vehicles. *Department of Electrical Electronics Engineering*, 234-275. <http://dergipark.gov.tr/gujisa> adresinden erişildi.
- ORBeyİ, O. (2022). *PLC kontrollü batarya yönetim sistemi tasarımı*.

- ÖZBALCI, Ü. ve KILIÇ, E. (2019). Elektrikli bir aracın batarya sisteminin modellenmesi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22, 65-69.
- ÖZBAY, H., KÖZKURT, C., DALCALI, A. ve TEKTAŞ, M. (2020). Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları*, 3(1), 35-50.
- ÖZKAN, Z. ve HAVA, A. M. (2012). Güç elektroniği dönüştürücülerinin yarıiletken veriyapraklarına dayalı verim hesaplama yöntemi. *Elektronik ve bilgisayar mühendisliği sempozyumu* içinde.
- PASCUAL, C. ve KREIN, P. T. (1997). *Switched capacitor system for automatic series battery equalization. Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois. Urbana.*
- PAULA, W. J. de, TAVARES, G. H. M., SOARES, G. M., ALMEIDA, P. S. ve BRAGA, H. A. C. (2020). Switching losses prediction methods oriented to power MOSFETs - a review. *IET Power Electronics*, 13(14), 2960-2970. doi:10.1049/iet-pel.2019.1003
- POLAT, B. D. ve KELEŞ, Ö. (2012). *Lityum iyon pil teknolojisi.*
- RASHID, M. H. (2001). Power electronics handbook. *Power electronics handbook* içinde (ss. 65-82). Academic Press.
- RİGAN, M. (2020, 2 Ocak). *Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi tasarımı.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- RIMPAS, D., KAMINARIS, S. D., ALDARRAJI, I., PORIMALIS, D., VOKAS, G., PAPAGEORGAS, P. G. ve TSARAMIRSIS, G. (2022). Energy management and storage systems on electric vehicles: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 61, 813-819. doi:10.1016/j.matpr.2021.08.352
- SARIKURT, T. ve BALI, A. (2017). Tam elektrikli araçlar için özgün bir enerji yönetim sistemi uygulaması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(2), 323-333. doi:10.17341/gazimmfd.322153
- SEZER, K. C. ve BASMACI, G. (2022). Şarj edilebilir pillere genel bakış. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 297-309. doi:10.21923/jesd.946769
- ŞAHİN, U. (2022, 4 Mayıs). *Otomotiv sektörüne yönelik batarya yönetim sistemi geliştirilmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TÜRGÜT, M. (2018, 1 Ocak). *Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı ve geliştirilmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- YİĞİTER, M. (2022). *Aktif ve pasif dengeleme yapabilen çoklu kurşun asit batarya yönetim sistemi tasarımı.*

YONG, J. Y., RAMACHANDARAMURTHY, V. K., TAN, K. M. ve
MITHULANANTHAN, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies
of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy
Reviews*, 49, 365-385. doi:10.1016/j.rser.2015.04.130

EKLER

EK-1 Arduino kodları

```

//gerilm sensörü için pin belirleme
const int voltageSensorPin1 = A8; //pin 8
float vIn1;
float vOut1;
float voltageSensorVal1;
const float factor1 = 4.800;
const float vCC1 = 5.095;

const int voltageSensorPin2 = A9; //pin 9
float vIn2;
float vOut2;
float voltageSensorVal2;
const float factor2 = 4.760;
const float vCC2 = 5.095;

const int voltageSensorPin3 = A10; //pin 10
float vIn3;
float vOut3;
float voltageSensorVal3;
const float factor3 = 4.760;
const float vCC3 = 5.095;

const int voltageSensorPin4 = A11; //pin 12
float vIn4;
float vOut4;
float voltageSensorVal4;
const float factor4 = 4.760;
const float vCC4 = 5.095;

//pasif dengeleme için pin belirleme
#define LED_1 6
#define LED_2 7
#define LED_3 11
#define LED_4 13
//fan için pin belirleme
#define FAN_PIN A3

#include <OneWire.h> // OneWire kütüphanesini ekliyoruz.

// 1. Sıcaklık sensörünü bağladığımız dijital pini 2 olarak belirliyoruz.
int DS18S20_1_Pin = 2;
// 2. Sıcaklık sensörünü bağladığımız dijital pini 3 olarak belirliyoruz.
int DS18S20_2_Pin = 3;
// 3. Sıcaklık sensörünü bağladığımız dijital pini 4 olarak belirliyoruz.
int DS18S20_3_Pin = 4;
// 4. Sıcaklık sensörünü bağladığımız dijital pini 4 olarak belirliyoruz.

```

```

int DS18S20_4_Pin = 5;

// Sıcaklık Sensörleri Giriş-Çıkışları
OneWire ds1(DS18S20_1_Pin); // 1. sensör 2. Dijital pinde.
OneWire ds2(DS18S20_2_Pin); // 2. sensör 3. Dijital pinde.
OneWire ds3(DS18S20_3_Pin); // 3. sensör 4. Dijital pinde.
OneWire ds4(DS18S20_4_Pin); // 4. sensör 5. Dijital pinde.

void setup(void) {
  pinMode(LED_1, OUTPUT);
  pinMode(LED_2, OUTPUT);
  pinMode(LED_3, OUTPUT);
  pinMode(LED_4, OUTPUT);
  pinMode(FAN_PIN, OUTPUT);

  Serial.begin(9600); // Seri iletişimi başlatıyoruz.
}

void loop(void) {
  // 4 sensör için 4 farklı sıcaklık değişkeni oluşturup fonksiyonla bağlıyoruz.
  float temperature1 = getTemp(ds1); // 1. sensörden gelen sıcaklık değeri
  float temperature2 = getTemp(ds2); // 2. sensörden gelen sıcaklık değeri
  float temperature3 = getTemp(ds3); // 3. sensörden gelen sıcaklık değeri
  float temperature4 = getTemp(ds4); // 3. sensörden gelen sıcaklık değeri
  // Sensörlerden gelen sıcaklık değerlerini serial monitörde yazdırıyoruz.
  Serial.print("1.Sensor:");
  Serial.print(temperature1);
  Serial.print(",");
  Serial.print("2.Sensor:");
  Serial.print(temperature2);
  Serial.print(",");
  Serial.print("3.Sensor:");
  Serial.print(temperature3);
  Serial.print(",");
  Serial.print("4.Sensor:");
  Serial.print(temperature4);
  Serial.print(",");

  //sıcaklık değerlerinden herhangi biri 40 derecenin üzerinde ise fan çalıştırma
  if (temperature1 > 40.0 || temperature2 > 40.0 || temperature3 > 40.0 ||
  temperature4 > 40.0 )
  {
    digitalWrite(FAN_PIN, HIGH); // Fanı çalıştır
  }
  else
  {
    digitalWrite(FAN_PIN, LOW); // Fanı durdur
  }

  //1.Pil için voltaj değeri hesaplama ve seri porta yazdırma

```

```

voltageSensorVal1 =analogRead(voltageSensorPin1);
vOut1 = (voltageSensorVal1 / 1024) * vCC1;
vIn1 = vOut1 * factor1;

Serial.print("voltage1 = ");
Serial.print(vIn1);
Serial.print("V");
Serial.print(",");

//2.Pil için voltaj değeri hesaplama ve seri porta yazdırma
voltageSensorVal2 =analogRead(voltageSensorPin2);
vOut2 = (voltageSensorVal2 / 1024) * vCC2;
vIn2 = vOut2 * factor2;

Serial.print("voltage2 = ");
Serial.print(vIn2);
Serial.print("V");
Serial.print(",");

//3.Pil için voltaj değeri hesaplama ve seri porta yazdırma
voltageSensorVal3 =analogRead(voltageSensorPin3);
vOut3 = (voltageSensorVal3 / 1024) * vCC3;
vIn3 = vOut3 * factor3;

Serial.print("voltage3 = ");
Serial.print(vIn3);
Serial.print("V");
Serial.print(",");

//4.Pil için voltaj değeri hesaplama ve seri porta yazdırma
voltageSensorVal4 =analogRead(voltageSensorPin4);
vOut4 = (voltageSensorVal4 / 1024) * vCC4;
vIn4 = vOut4 * factor4;

Serial.print("voltage4 = ");
Serial.println(vIn4);
Serial.println("V");

//1.pil 4.2V üzerinde ise pasif dengeleme aktif etme
if(vIn1>4.20)
{
    digitalWrite(LED_1, 1);
}
else
{
    digitalWrite(LED_1, 0);
}

//2.pil 4.2V üzerinde ise pasif dengeleme aktif etme
if(vIn2>4.20)

```

```

    {
        digitalWrite(LED_2, 1);
    }
    else
    {
        digitalWrite(LED_2, 0);
    }

//3.pil 4.2V üzerinde ise pasif dengeleme aktif etme
    if(vIn3>4.20)
    {
        digitalWrite(LED_3, 1);
    }
    else
    {
        digitalWrite(LED_3, 0);
    }

//4.pil 4.2V üzerinde ise pasif dengeleme aktif etme
    if(vIn4>4.20)
    {
        digitalWrite(LED_4, 1);
    }
    else
    {
        digitalWrite(LED_4, 0);
    }

// 100ms de bir değer alma
delay(100);
}

// DS18B20 sıcaklık sensöründen veri alma fonksiyonu

float getTemp(OneWire sensor){

byte data[12];
byte addr[8];

if ( !sensor.search(addr) ) {

    sensor.reset_search();
    return -1000;
}

if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7] ) {
    Serial.println("CRC is not valid!");
    return -1000;
}
}

```

```
if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
  Serial.print("Device is not recognized");
  return -1000;
}

sensor.reset();
sensor.select(addr);
sensor.write(0x44,1);

byte present = sensor.reset();
sensor.select(addr);
sensor.write(0xBE);

for (int i = 0; i < 9; i++) {
  data[i] = sensor.read();
}

sensor.reset_search();

byte MSB = data[1];
byte LSB = data[0];

float tempRead = ((MSB << 8) | LSB);
float TemperatureSum = tempRead / 16;

return TemperatureSum;
}
```