

## Design and Experimental Implementation of Passive Battery Management Systems Using ARM-Based Microprocessors

 Kübra KAYSAL<sup>1</sup> , Fatih Onur HOCAOĞLU<sup>1</sup> , Ahmet KAYSAL<sup>1,\*</sup> 
<sup>1</sup>Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, 03200, Erenler, AFYONKARAHİSAR

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info

Research article  
 Received:15/10/2020  
 Revision:27/11/2020  
 Accepted:26/01/2021

#### Highlights

- ARM Microprocessors.
- Passive BMS.
- UART Communication.

#### Keywords

Lithium Ion Battery Pack  
 Passive Balancing  
 Microcontroller  
 Battery Management System

In this study, a battery management system that allows the batteries to be charged in a balanced way using ARM-based microcontrollers has been proposed. Li-ion batteries have higher energy and power density than other battery types. However, it is dangerous due to risks such as explosion and ignition. With the help of the designed passive balancing circuit and battery management algorithm, the voltage value of each battery cell is measured, compared with other battery cells in the system, and in case the specified limits are exceeded, the charge current of the battery cell is controlled with the help of the MOSFET.

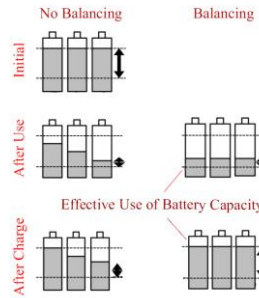


Figure A. General topology of the battery balancing system

**Purpose:** It is aimed to design a passive battery management system that can protect li-ion battery packs from overcharging and balance the amount of energy in the battery cells. Thus, the voltage and temperature values of the battery cells will be measured, and this will prevent them from being exposed to negative situations such as overcharging and high temperatures

**Theory and Methods:** In the BMS, the MOSFET is operated in the linear zone in order to keep the heat released on the bypass resistor under control and to minimize the energy loss. Battery balancing current is controlled by using the internal resistance of the MOSFET as the balancing resistance. In order for the MOSFET to operate in linear mode, a signal with a switching frequency of 1 kHz was produced using the PWM technique. In the study, analog data were transferred to the microcontroller using an analog to digital converter unit and a multiplexer. Thus, a balanced charge and discharge process of the cells was realized with passive balancing current.

**Results:** In this study, during the charging process of a li-ion battery pack with a capacity of 20s11p x 32 Ah, the MOSFETs of the cells whose cell voltage were higher than the balancing voltage determined in the algorithm were triggered. Thus, the balancing process was realized by completing the circuit through the balancing current, MOSFET internal resistance and bypass resistor. It has been observed that the balancing current of the battery groups reaches a maximum of 1,077 A and the temperature change between the cells is between 22 °C and 35 °C.

**Conclusion:** It has been observed that if BMS is not used during the charging process of the battery pack, the cell with a high SOC level reaches the maximum voltage level earlier, and therefore, if the charging process is continued, a higher temperature increase is experienced compared to the other battery cells. By using the PWM and the reducing converter topology, the MOSFET was operated in the linear region and the balancing current was controlled depending on the battery cell voltages. The designed BMS has shown that it balances the cell voltages depending on the reference voltage by using the balancing resistor and the internal resistance of the MOSFET, and that the battery pack is used within the safe operating area.



## Design and Experimental Implementation of Passive Battery Management Systems Using ARM-Based Microprocessors

Kübra KAYSAL<sup>1</sup> , Fatih Onur HOCAOĞLU<sup>1</sup> , Ahmet KAYSAL<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 03200, Erenler, AFYONKARAHİSAR

### Abstract

In this study, a battery management system using passive balancing technique is proposed in order to enable the batteries in the lithium-ion battery pack to be charged in a balanced way. Lithium-ion batteries have higher energy and power density than other battery types. Besides these advantages, it is dangerous due to risks such as explosion and ignition. Considering these effects, lithium-ion batteries need to be protected by specially designed circuits during the charging process. In this context, a passive battery management system that can protect battery groups from overcharging and balances the amount of energy in the battery cells has been introduced. The passive balancing circuit measures the voltage value of each battery cell, compares it with other battery cells in the system, and in case the specified limits are exceeded, the charge current of the battery cell is controlled by operating the switching element in the resistance area. In the designed battery management system, ARM based microcontrollers are used as master and slave. Thanks to the developed system, it is aimed to measure the voltage and temperature values of the batteries and prevent them from being exposed to negative situations such as overcharging and high temperature. Lithium-ion battery group with a capacity of 32 Ah, 20 series and 11 parallel, is used in the battery pack. In the study, analog data have been transferred to the microcontroller using an analog to digital converter unit and multiplexer. Thus, a balanced charge and discharge process of the cells has been realized with passive balancing current. It has been proven with the experimental results that the designed system works successfully.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 15/10/2020  
Düzeltilme: 27/11/2020  
Kabul: 26/01/2021

### Keywords

Lithium Ion Battery Pack  
Passive Balancing  
Microcontroller  
Battery Management System

### Anahtar Kelimeler

Lityum İyon Batarya  
Pasif Dengeleme  
Mikrodenetleyici  
Batarya Yönetim Sistemi

### Pasif Batarya Yönetim Sisteminin ARM Tabanlı Mikroişlemciler Kullanılarak Tasarımı ve Deneysel Uygulaması

#### Öz

Bu çalışmada, lityum-iyon batarya paketinde yer alan bataryaların dengeli bir şekilde şarj edilebilmesine olanak sağlamak amacıyla pasif dengeleme tekniği kullanan bir batarya yönetim sistemi önerilmiştir. Lityum-iyon bataryalar diğer batarya türlerine göre daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahiptir. Bu avantajlarının yanında patlama ve tutuşma gibi riskler nedeniyle tehlikelidir. Bu etkiler göz önüne alındığında lityum-iyon bataryaların şarj işlemi sırasında özel olarak tasarlanmış devrelerle korunmaları gerekmektedir. Bu kapsamda batarya gruplarını aşırı şarjdan koruyabilen ve batarya hücrelerindeki enerji miktarını dengeleyen bir pasif batarya yönetim sistemi sunulmuştur. Pasif dengeleme devresi her bir batarya hücresinin gerilim değerini ölçer, sistemdeki diğer batarya hücreleri ile karşılaştırır ve belirlenen limitlerin aşılması durumunda batarya hücresinin şarj akımı, anahtarlama elemanın direnç bölgesinde çalıştırılmasıyla kontrol edilir. Tasarlanan batarya yönetim sisteminde ana ve uydu olmak üzere ARM tabanlı mikrodenetleyiciler kullanılmıştır. Geliştirilen sistem sayesinde bataryaların gerilim ve sıcaklık değerleri ölçülerek, aşırı şarj ve yüksek sıcaklık gibi olumsuz durumlara maruz kalmasının önlenmesi hedeflenmiştir. Batarya paketinde, 20 seri ve 11 paralel olmak üzere 32 Ah kapasiteye sahip lityum-iyon batarya grubu kullanılmıştır. Yapılan çalışmada analog veriler, analog dijital dönüştürücü birimi ve çoklayıcı kullanılarak mikrodenetleyiciye aktarılmıştır. Böylece pasif dengeleme akımı ile hücrelerin dengeli bir şekilde şarj ve deşarj işlemi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin başarılı bir şekilde çalıştığı elde edilen deneysel sonuçlar ile kanıtlanmıştır.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde çevre kirliliği ve nüfus yoğunluğunun artması ile birlikte fosil yakıtlara olan talep her geçen gün artmakta ve bu yakıtların olumsuz etkileri endişe verici bir hal almaktadır. Bu olumsuz etkilerin nedenleri arasında büyük bir etkiye sahip olan içten yanmalı motorlar yerine daha çevre dostu elektrikli araçların geliştirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte şarj edilebilir batarya teknolojileri ve batarya yönetim sistemleri üzerinde çalışılan önemli bir konu haline gelmiştir. Elektrikli araçlarda kurşun asit, nikel kadmiyum, nikel metal hidrit, sodyum kükürt ve lityum iyon gibi çeşitli batarya teknolojileri kullanılmaktadır. Bu batarya çeşitleri arasından lityum iyon (li-ion) bataryalar diğer batarya türlerine kıyasla daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip depolama teknolojisidir [1]. Ayrıca hafıza etkilerinin olmaması, uzun ömür döngüleri ve kurşun kadmiyum gibi çevreyi etkileyecek zararlı maddeler içermemesi bu batarya türünün avantajları arasında gösterilebilir.

Elektrikli araç uygulamalarında tek bir li-ion bataryanın sağladığı 4,2 V gerilim seviyesinden çok daha yüksek gerilim seviyelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle elektrikli araçların enerji ihtiyacının tam olarak karşılanabilmesi için bataryaların seri olarak bağlanmaları gerekmektedir. Ancak hücre sayısındaki artış beraberinde bazı sorunlara neden olmaktadır. Bunların başında hücrelerin üretim ve montajındaki kusurlardan kaynaklı iç direnç farklılığı, kapasite, elektrik yük miktarı verimliliği (CE), şarj durumu (SOC), deşarj oranı (SD-rate) gibi başlangıç koşullarında değişikliklere neden olan faktörlerdir [2]. Elektrikli araç teknolojileri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde yaşanan sorunların büyük bir kısmının bataryalarla ilgili olduğu görülmektedir. Bataryaların en önemli problemleri sınırlı ömürleri ve kontrol edilmediklerinde patlama risklerinin bulunmasıdır. Bu problemler çözülmesi gereken başlıca unsurlardır. Bu nedenle bataryaların uzun ömürlü olmaları ve daha verimli çalışmaları etkili bir batarya yönetim sistemine bağlıdır [3,4].

Batarya gruplarındaki gerilim dengesizliği sorununu çözmek için çeşitli batarya dengeleme topolojileri ve kontrol algoritmaları geliştirilmiştir [5-10]. Ekici ve Tan [11] tarafından yapılan çalışmada, dört farklı kimyasal yapıya sahip batarya türünün şarj ve deşarj karakteristikleri incelenmiştir. Bu batarya paketlerinin kontrolü aynı batarya yönetim sistemi (BMS) ile farklı şekillerde kontrol edilmiştir. Gerçekleştirilen batarya paketinin şarj işlemi DC/DC dönüştürücü kullanılarak gerçekleştirilmiş ve şarj sırasında sıcaklık ve şarj durumu (SOC) kontrolü yapılmıştır. BMS, hibrit elektrikli araç modeli üzerinde test edilmiştir. Muratoğlu ve Alkaya [12] tarafından yapılan çalışmada, li-ion bataryaların SOC kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla kokusuz kalman filtresi ve genişletilmiş kalman filtresi algoritmaları kullanılmıştır. Bu iki modelin SOC kestirim sonuçları doğruluk ve performans açısından kıyaslanmış ve kokusuz kalman filtresinde daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Zhu ve arkadaşları [13] çalışmalarında, lityum kobalt oksit bataryalardan oluşan bir BMS oluşturmuş ve bataryalar için kombine şarj durumu tahmin yöntemi ve pasif denge kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Donanımsal ve yazılımsal bir deney platformu oluşturularak 3,4 Ah'lık lityum kobalt oksit bataryanın 80 dakikalık şarj işleminden sonra kümülatif hatada azalma gözlenmiştir. Benzer şekilde, deneysel sonuçlar incelendiğinde pasif dengeleme kontrolünün uzun kullanım sürecinde batarya paketinin kararlılığını etkili bir şekilde iyileştirmiştir. Duan ve arkadaşları [14] çalışmalarında elektrikli araçlar için güneş enerjisi destekli BMS gerçekleştirmişler ve batarya dengeleme için aktif/pasif kontrol tekniklerini incelemişlerdir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre önerilen sistemin her 13,2 km'de 50 Ah batarya paketinin toplam kapasitesini %2,1 ile %3,3 oranında iyileştirdiğini göstermişlerdir.

Kontrol algoritmalarının yanı sıra batarya dengeleme topolojilerinden biri olan pasif dengeleme yöntemi basit, uygulaması kolay ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Kılıç ve arkadaşları [15] çalışmalarında, ana ve uydu denetleyiciler arasında CAN haberleşme protokolü kullanan ve pasif dengeleme metodu içeren BMS tasarlamışlardır. Elektrikli araç uygulamaları için tasarlanan BMS, aşırı şarj, derin deşarj, yüksek akım ve yüksek sıcaklık gibi olumsuz koşullarda batarya paketini koruduğunu göstermiştir. Daowd ve arkadaşları [16] çalışmalarında, aktif ve pasif batarya dengeleme metodlarını Matlab/Simulink ortamında modelleyerek karşılaştırmasını yapmışlardır. Her bir dengeleme metodunu maliyet, boyut ve kontrol bakımından incelemişler ve kendi içerisinde avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır. Amin ve arkadaşları [17] çalışmalarında, LiFePO<sub>4</sub> batarya hücreleri ve pasif dengeleme tekniği kullanan bir BMS tasarlamışlardır. Dengeleme direnci olarak metal oksit alan etkili transistörün (MOSFET) iç direncini kullanmışlardır. Tasarlanan BMS'in, referans dengeleme

gerilimine bağlı olarak hücre gerilimlerinin dengeli bir şekilde şarj olduklarını ve MOSFET iç direncinin kullanılmasıyla BMS donanımında yer tasarrufu sağlandığını göstermişlerdir. Kokila ve arkadaşları [18] çalışmalarında, hibrit çok seviyeli dönüştürücü kullanarak batarya yönetim sistemi geliştirmişlerdir. Deşarj sırasında sabit çıkış voltajı elde etmek için hibrit çok seviyeli dönüştürücü, yardımcı batarya ile birlikte kullanılmıştır. Önerilen yöntem ile hücrelerin gerilim seviyeleri ve SOC dengelenmiş, aşırı şarj ve derin deşarjdan kaçınılmıştır. Frost ve Howey [19] tarafından yapılan çalışmada, dağıtılmış denetleyici ile modüler çok düzeyli bir dönüştürücü topolojisine dayalı iletişim gereksinimi olmayan bir BMS tasarlanmıştır. Önerilen yöntem ile çıkış gerilim dalgalanmaları en aza indirilerek SOC doğru bir şekilde senkronize edilmiştir.

Bu çalışmada li-ion batarya paketinde yer alan bataryaların dengeli bir şekilde şarj edilebilmesini sağlamak amacıyla pasif dengeleme tekniği kullanan bir BMS tasarlanmış ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. BMS'in kontrol ve güç katı arasında optik izolatörler kullanılarak yalıtımı sağlanmıştır. Batarya paketinin sıcaklık, akım ve gerilim verileri, mikrodenetleyicinin analog dijital dönüştürücü (ADC) kanalı kullanılarak 12 bit çözünürlükte okunmaktadır. Zhu [13] ve Kılıç [15] tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan farklı olarak, BMS şarj işlemi sırasında, güç direncinin yanı sıra MOSFET'in iç direnci kullanılmıştır. Bu sayede gerilim seviyesi yüksek olan batarya hücrelerinin şarj akımları kontrol edilmiştir. Ayrıca uygulanan enerjinin hiçbir aktif rolü olmayan direnç üzerinde tüketilerek yok edilmesinin önüne geçilmiştir. Benzer şekilde Kıvrak [3] ve Amin [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmalara ek olarak batarya hücrelerinin gerilim ve sıcaklık verileri evrensel asenkron alıcı-verici (UART) ve seri çevre arayüzü (SPI) haberleşme protokolleri kullanılarak 7-inç TFT monitörde izlenmesi sağlanmış ve kablosuz ağ modülü kullanılarak eş zamanlı kayıtlar bilgisayar ortamında saklanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Batarya Paketi Tasarımı (Battery Pack Design)

Bataryalar, elektrikli araç uygulamaları için temel enerji kaynağıdır ve batarya seçimi araç performansını etkileyen önemli bir faktördür. Batarya seçiminde dikkat edilmesi gereken faktörler arasında hızlı şarj işlemine müsaade etmesi, hafıza etkisinin olmaması, bataryanın düşük iç dirence sahip olması, yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olması, yüksek şarj-deşarj döngüsü, düşük maliyet ve yüksek güvenilirlik bulunmaktadır. Bu avantajları nedeniyle çalışmamızda li-ion bataryalar tercih edilmiştir. Tablo 1'de tek bir batarya hücresinin ve tüm batarya paketinin teknik özellikleri verilmiştir.

**Tablo 1.** NCR18650B Li-ion batarya ve batarya paketinin teknik karakteristiği

<i>Parametre</i>	<i>Hücre</i>	<i>Paket</i>
Minimum kapasite (25 °C)	2.9Ah	32Ah
Nominal gerilim	3.6V	72V
Şarj gerilimi	4.2V	84V
Hücre ağırlığı (maks.)	47.5g	< 10 Kg
Gravimetrik enerji yoğunluğu	243Wh/Kg	243Wh/Kg
Deşarj sıcaklığı	-20 ~ +60 °C	-20 ~ +60 °C
İç direnç	< 2mΩ	< 24.8mΩ

Li-ion bataryaların termal kararlılığı diğer batarya gruplarına göre daha iyi olmasına rağmen şarj ve deşarj kesintileri kontrol altında tutulmalıdır. Aksi takdirde aşırı şarj elektrolit oksidasyonuna neden olurken, aşırı deşarj katot yapısal değişiklikler meydana getirir [20]. Şekil 1'de görülen batarya kümesinde 20 batarya paketi seri ve her seri pakette 11 batarya hücresi birbiri ile paralel olarak bağlanmıştır.



Şekil 1. Batarya hücrelerinin hiyerarşik yapısı

## 2.2. Li-ion Batarya için SOC Tahmin Yöntemi (SOC Estimation Method for Li-ion Battery)

BMS, bataryaların akım, sıcaklık ve gerilim durumlarına göre bataryalarda ne kadar enerji kaldığını hesaplayan, bataryaların kontrol ve takibini sağlayan bir sistemdir. BMS sayesinde bataryalar korunmakta ve performansı iyileştirilmektedir. Bir bataryanın kalan enerjisini doğru tahmin etmek bataryaların aşırı şarj edilmesini önleyip ömrünün uzatılmasını sağlar. Bir batarya tamamen şarj edildiğinde kapasitesi %100, tamamen deşarj edildiğinde ise %0 olarak kabul edilir. SOC tahmin bilgileri bir elektrikli aracın şarj dengeleme ve batarya yönetimi için oldukça önemlidir. BMS, hücre gerilimi, akımı ve sıcaklık verilerine bağlı olarak batarya paketinin kalan enerjisi hesaplanabilir. Böylece sisteme kaç saat daha enerji sağlayabileceği tahmin edilmiş olur. Batarya paketinin SOC tahmini yük sayma metoduna göre Eşitlik 1'de verilmiştir.

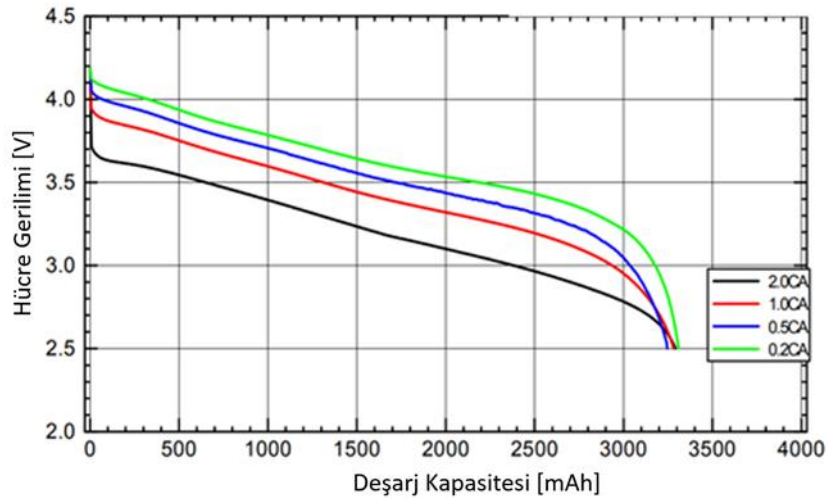
$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \int_0^t \frac{I_{batt}}{C_{batt}} dt \quad 1$$

Burada  $SOC(t - 1)$ ,  $I_{batt}$  batarya akımı uygulanmadan önceki SOC (%) başlangıç değeridir.  $C_{batt}$  bataryanın nominal kapasitesi (Ah) ve  $t$ , zamanı (h) ifade etmektedir. Batarya hücrelerinin güvenliği ve verimliliği açısından kontrol algoritması belirlenen limitlere göre işletilmelidir. Algoritmada belirlenen limitler Eşitlik 2 ile ifade edilir.  $SOC_{min}$  ve  $SOC_{max}$ , bataryanın izin verilen minimum ve maksimum şarj durumlarıdır.

$$SOC_{min} < SOC < SOC_{max} \quad 2$$

## 2.3. Gerilim, Akım ve Sıcaklık Koruma (Voltage, Current and Temperature Protection)

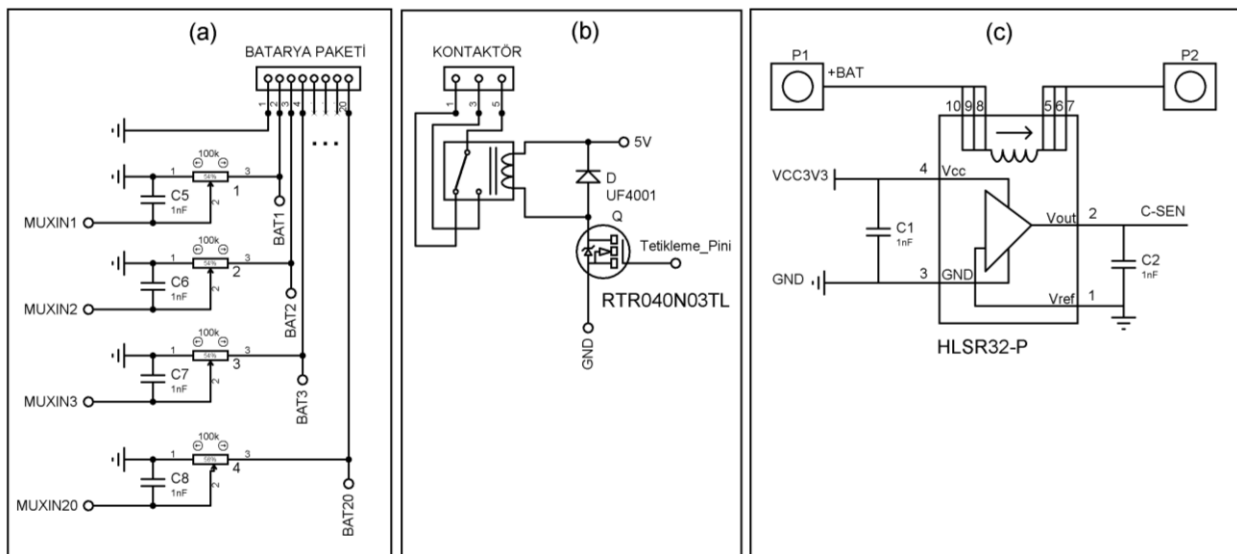
Batarya paketinin güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için gerilim, akım ve sıcaklık bilgileri sürekli kontrol edilmelidir. Bu değerlerin belirlenen limitler dışına çıkması durumunda batarya hücreleri zarar görebilir. Batarya paketinde kullanılan Panasonic firmasının üretmiş olduğu NCR18650PF li-ion batarya hücrelerinin deşarj karakteristiği Şekil 2'de verilmiştir. Deşarj karakteristiği incelendiğinde batarya hücrelerinin şarj gerilimi seviyesi 2.5V ile 4.2V aralığında tutulması gerektiği görülmektedir.



Şekil 2. Batarya hücresinin deşarj karakteristiği (Sıcaklık: 25 °C)

Hücre gerilimlerinin STM32F446 mikrodenetleyicisine aktarılması Şekil 3 (a)'da verilen gerilim bölücü devresi ile gerçekleştirilmiştir. Bu devre üzerinde güç tüketiminin azaltılması ve batarya gerilimlerinin doğru bir şekilde okunması amacıyla yüksek direnç ve düşük tolerans değerine sahip dirençler kullanılmıştır. Çoklayıcıdan mikrodenetleyiciye aktarılan analog hücre gerilimleri ADC kanalı tarafından 12 bit çözünürlükte okunmuştur. Analog sinyalin, çevre koşullarından ve elektromanyetik girişimden etkilenmemesi amacıyla alçak geçiren RC filtre kullanılmıştır.

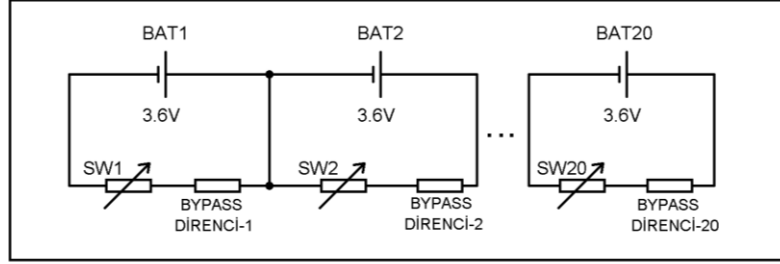
Batarya paketindeki hücre gerilimleri ve sıcaklıklarının limit değerlerin dışına çıkılması durumunda Şekil 3 (b)'de devre yapısı görülen devre kesici tetiklenerek şarj işlemi sonlandırmakta ve yükü batarya paketinden ayırmaktadır. Her bir seri hücre paketine yerleştirilmiş olan LM35 sıcaklık sensöründen elde edilen sıcaklık/volt sinyali ADC kanalı tarafından okunmaktadır. Sıcaklığa bağlı limit değerler batarya hücresinin teknik özellikleri esas alınarak  $-20 \sim +60$  °C aralığında sınırlandırılmıştır. BMS, batarya paketlerinin sıcaklık değerlerine bağlı olarak 50 °C'ye ulaşması durumunda alarm, 60 °C'de ise açtırma komutu göndermektedir. Benzer şekilde batarya grubundan çekilecek akım, Şekil 3(c)'de bağlantı şeması görülen nominal 32 A ölçüm değerine sahip HLSR32-P akım sensörü vasıtasıyla mikrodenetleyici tarafından anlık olarak takip edilmektedir.



Şekil 3. (a) Gerilim algılama devresi, (b) alarm/trip devre yapısı ve (c) akım sensörü bağlantı şeması

## 2.4. Pasif Dengeleme Tekniği (Passive Balancing Technique)

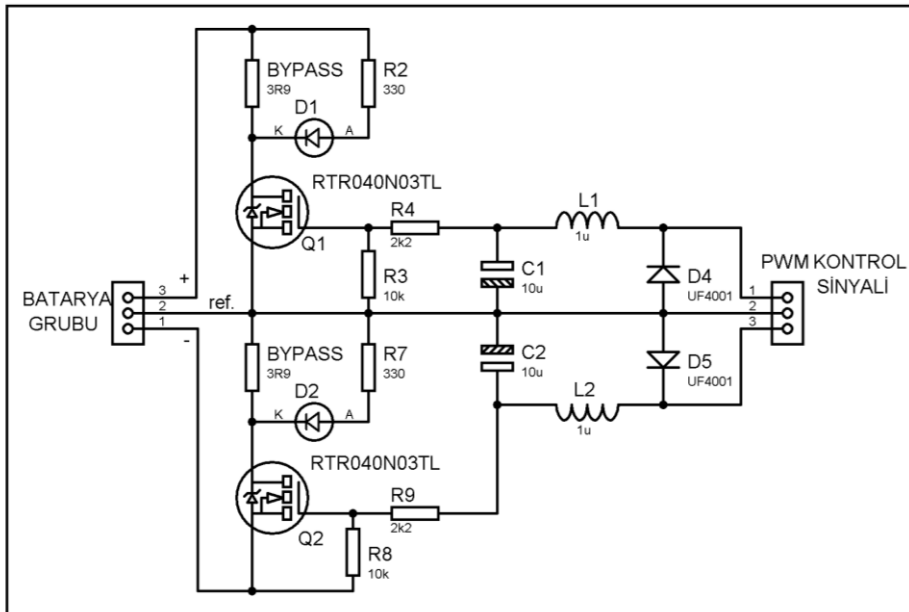
Batarya paketinin şarj ve deşarj edilmesi sırasında özen gösterilmesi gereken husus hücre gerilimlerinin dengelenmesi işlemidir. Batarya paketindeki seri hücrelerin şarj işlemi sırasında depoladığı enerji her bir hücre için farklılık gösterecektir. Bu durum batarya hücrelerinde gerilim farklılıklarına neden olacaktır. Şekil 4'te verilen devre şemasında görüldüğü üzere gerilim seviyesi fazla olan hücre, pasif dengeleme tekniği ile bypass direnci üzerinde deşarj edilerek diğer hücreler ile eşitlenmektedir. Bu işlem tüm batarya hücrelerinin gerilim seviyeleri eşitlenene kadar devam ettirilir [21].



Şekil 4. Pasif dengeleme tekniğinin bağlantı diyagramı

Bypass direnci üzerinde açığa çıkan ısının kontrol altında tutulabilmesi ve enerji kaybının en aza indirilmesi amacıyla MOSFET lineer bölgede çalıştırılarak bu sorunların üstesinden gelinir [17]. Batarya dengeleme akımı, MOSFET'in iç direncinin dengeleme direnci olarak kullanılmasıyla kontrol edilebilir. MOSFET'in lineer modda çalışabilmesi için darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği kullanılarak, 1 kHz anahtarlama frekansına sahip bir sinyal üretilmiştir. Azaltan dönüştürücü topolojisine uygulanan PWM sinyalinin doluluk oranının değiştirilmesiyle değişken gerilim seviyelerine sahip bir sinyal elde edilmiştir. Böylelikle MOSFET'in tetikleme terminaline uygulanan gerilimin değiştirilmesiyle birlikte iç direncinin de istenilen ölçüde değiştirilmesi sağlanmıştır.

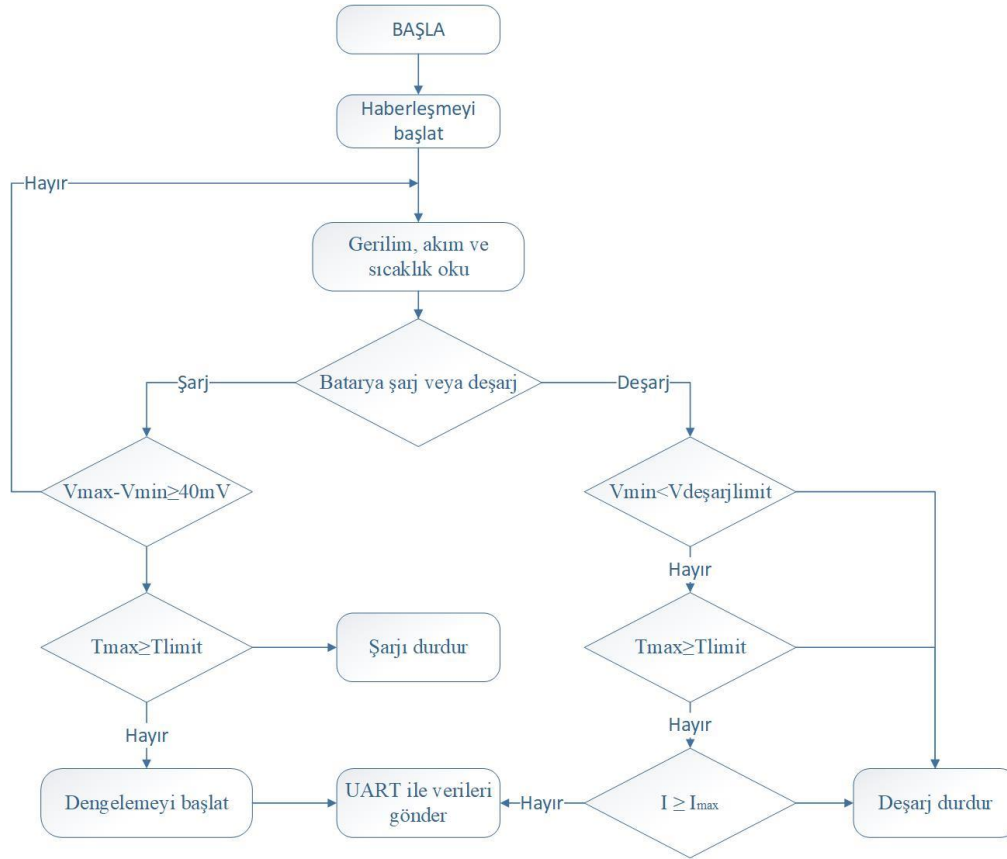
Şarj esnasında batarya hücrelerinin gerilim farkı 40 mV'luk gerilim seviyesini aşması halinde gerilimi daha yüksek olan hücre, devrede kullanılan RTR040N03TL N-kanal MOSFET üzerinden devreye alınır. Şekil 5'te pasif dengeleme devresi görülmektedir. Azaltan dönüştürücü topolojisine dayalı çıkış filtresini oluşturmak için L1 indüktansı, C1 kapasitansı ve D4 diyotu kullanılmıştır. Bu devrenin kullanılmasıyla batarya hücreleri şarj edilirken tüm batarya hücrelerinin gerilimleri dengelenmiş olacaktır.



Şekil 5. Çift batarya hücrelerinin kontrol edildiği pasif dengeleme devresi

## 2.5. Batarya Yönetim Sistemi Algoritması (Battery Management System Algorithm)

BMS'nin kontrol edilmesinde ana kontrolör olarak STM32F446 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Ana kontrolör, zamanlayıcı ve seri iletişim protokollerini barındırır. BMS çalıştırıldığında, batarya hücrelerinin gerilimleri ve sıcaklık verileri ana kontrolör tarafından işletilir. Bu algoritmanın akış diyagramı Şekil 6'da görülmektedir.

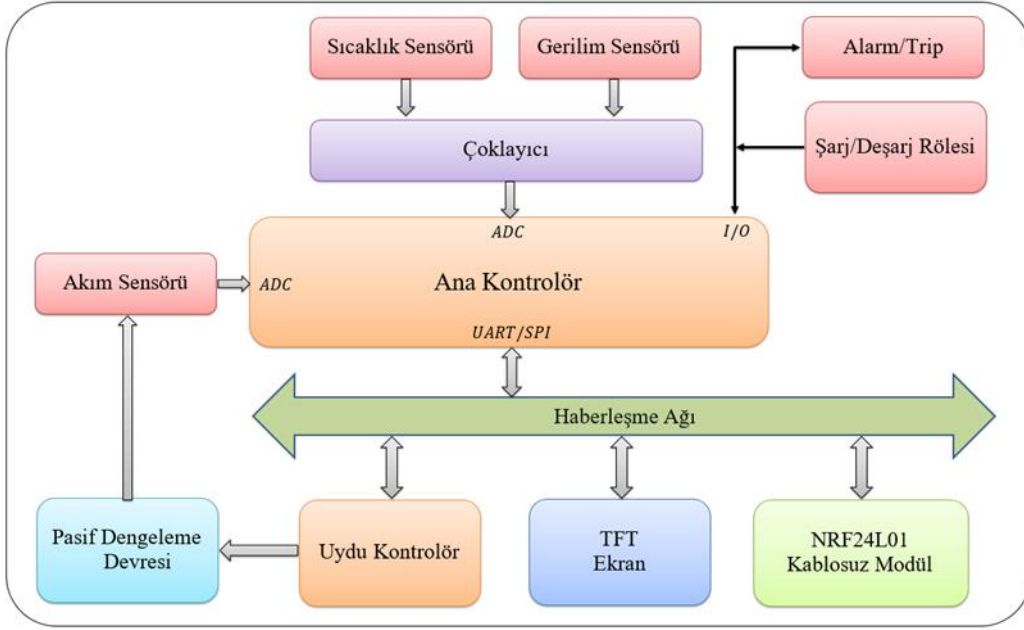


Şekil 6. Batarya yönetim sistemine ait akış diyagramı

Mikrodenetleyicilerde ADC modülünün pin sayısı sınırlı olmasından dolayı gerilim ve sıcaklık verileri CD4067 çoklayıcı entegresi kullanılarak mikrodenetleyiciye aktarılmıştır. Ayrıca ana kontrolör, BMS tarafından yürütülen işlemleri ve batarya hücrelerinin verilerini UART protokolü ile TFT ekrana göndermektedir. Ana kontrolörün gerçekleştirdiği diğer bir işlem, elde edilen verilerin eş zamanlı kayıtlarının bilgisayar ortamında saklanmasıdır. UART haberleşme protokolü üzerinden NRF24L01 kablosuz ağ modülü kullanılarak BMS'ye ait tüm veriler bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.

Batarya paketindeki hücreler arasında gerilim farkı 40 mV üzerinde olan hücreler belirlenir ve bu veriler dengeleme işleminin başlatılması için uydu mikrodenetleyiciye aktarılır. Aynı zamanda tüm hücre sıcaklıkları ana kontrolör tarafından işletilmektedir. Hücre sıcaklıklarından herhangi birisinin belirlenen limit değere ulaşması halinde koruma prosedürü işletilir. Benzer şekilde uydu kontrolör üzerinde bulunan akım sensörü, bataryaların deşarj akımının maksimum limitine ulaşması durumunda devre kesiciye açtırma komutu göndererek batarya paketi ile yükün birbirinden ayrılması sağlar. Şekil 7'de ana ve uydu denetleyiciye ait blok diyagram görülmektedir. Ayrıca uydu kontrolör olarak görev yapan STM32F070 mikrodenetleyicisi BMS'nin alt bileşenlerindedir. Batarya hücreleri üzerinde bulunan pasif dengeleme devreleri uydu kontrolör tarafından kontrol edilmektedir. SOC seviyesinin belirlenmesi ve aşırı akım takibinin yapılabilmesi için üzerinde bulunan akım sensörü, ana kontrolöre veri akışını sağlamaktadır.





Şekil 7. Önerilen batarya yönetim sisteminin genel topolojisi

## 2.6. Veri İzleme ve Haberleşme (Data Monitoring and Communication)

Şekil 7’de verilen blok diyagramdan görüleceği üzere, ana kontrolör 7-inch TFT ekran ve uydu kontrolör ile UART haberleşme protokolünü kullanırken, NRF24L01 kablosuz modül SPI haberleşme protokolünü kullanmaktadır. Hücre gerilimleri, sıcaklıkları, SOC durumu, batarya paketinden çekilen toplam akım, alarm ve açtırma gibi tüm BMS verileri kullanıcı arayüzünün ekranında görüntülenir. Ana ve uydu kontrolörler iletişim için birbirinden izole edilmelidir. Bu nedenle BMS devrelerinin haberleşme portları PC817 optik izolatör entegresi aracılığıyla birbirinden izole edilmiştir. Batarya paketindeki verilerin izlendiği TFT ekranın ilk satırlarında batarya kapasitesi, arıza durumu gibi bilgiler yer alırken, diğer kısımlar 2 ana sütuna bölünmüştür. İlk sütunda 20 seri hücre paketinin nominal gerilimleri, ikinci sütunda sıcaklık değerleri gözlenmektedir. TFT ekrana ait görüntüler Şekil 8 (b)’de görülmektedir.

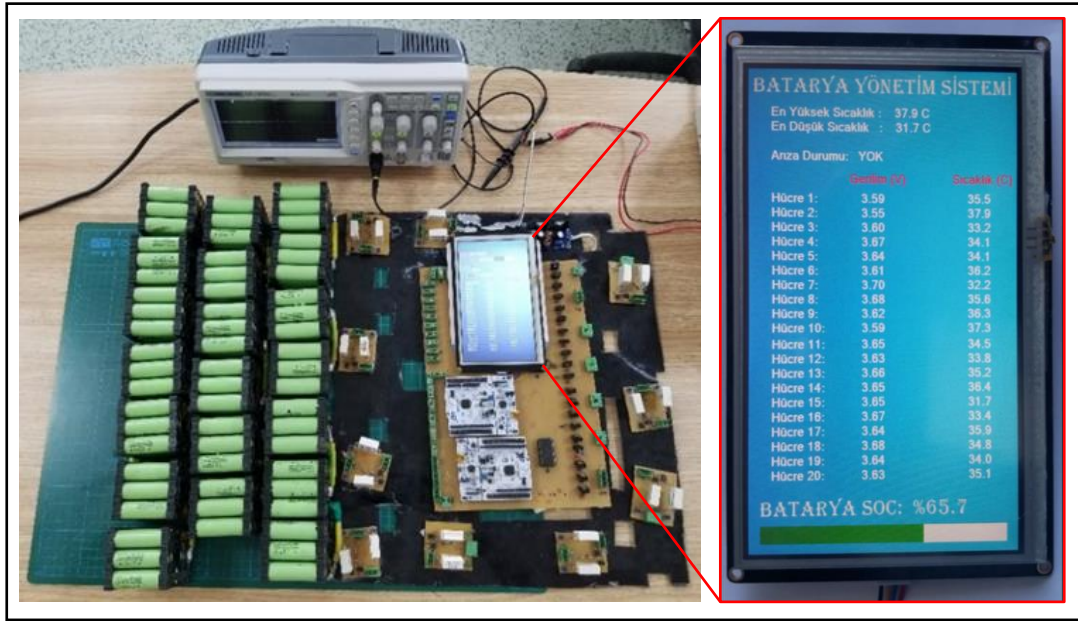
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tasarlanan batarya yönetim sisteminde ana ve uydu olmak üzere STM32F446 ve STM32F070 mikrodenetleyicileri kullanılmıştır. Test edilen batarya paketinde, 20 seri ve 11 paralel olmak üzere 32 Ah kapasiteye sahip li-ion batarya grubu kullanılmıştır. İlk olarak, paketlenen batarya grubu 700 W güce sahip yarım köprü DC/DC dönüştürücü kullanılarak şarj edilmiştir. Şarj akımı yaklaşık olarak 10 A seviyelerindedir. BMS çalıştırıldığında tasarlanan algoritmaya göre batarya hücreleri arasındaki en düşük gerilime sahip hücre belirlenerek diğer hücrelerle karşılaştırılmaktadır. Böylece belirlenen maksimum gerilim limitini aşan hücrenin dengeleme işlemi başlatılır. Dengeleme devresinde kullanılan RTR040N03 MOSFET, küçük yüzey montaj paketi ve 48 mΩ gibi düşük ileri yön ( $R_{DS_{on}}$ ) direnci nedeniyle tercih edilmiştir. Bir batarya hücresinin dengeleme akımı, MOSFET’in gate-source pinleri arasındaki gerilim ( $V_{GS}$ ) değişimlerine bağlı olarak  $R_{DS_{on}}$  direncindeki değişimler Tablo 2’de verilmiştir. Buna göre  $V_{GS}$  geriliminin artmasıyla  $R_{DS_{on}}$  direncinin azaldığı görülmektedir.  $V_{GS}$  gerilimi 1,5 V olarak uygulandığında MOSFET neredeyse kesimdedir.  $V_{GS}$  gerilimi 2,5 V olarak uygulandığında ise  $R_{DS_{on}}$  direnci 65 mΩ olarak ölçülmüş ve MOSFET iletim durumundadır.

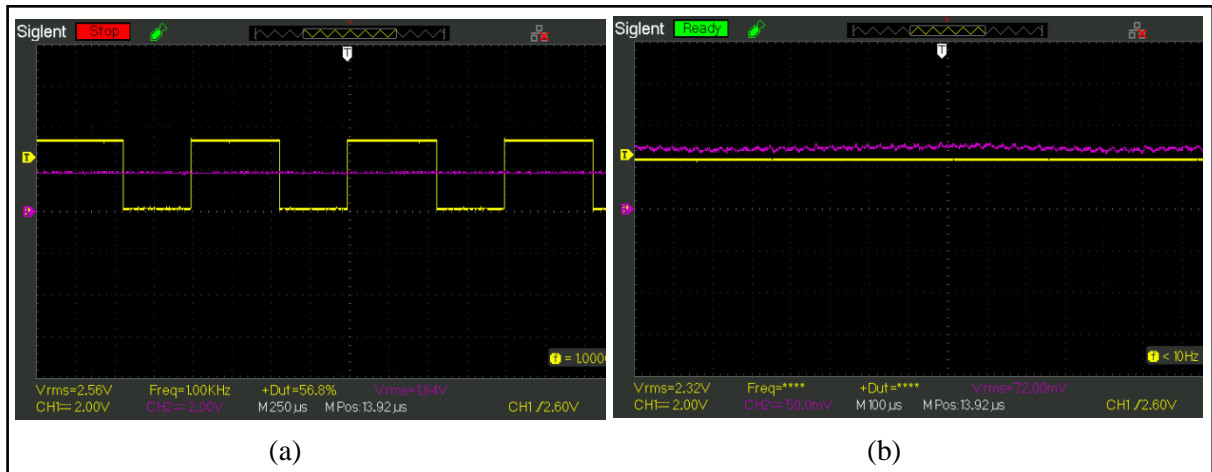
Batarya hücrelerinin şarj işlemi sırasında MOSFET’in iletim durumuna geçmesiyle birlikte  $V_{GS}$  gerilimine bağlı olarak ilgili hücrenin şarj akımının bir miktarı MOSFET ve bypass direnci üzerinde kontrollü bir şekilde harcanır. Böylece hücrenin SOC seviyesi, batarya paketinin diğer hücrelerinin SOC seviyesi ile eşitlenmesi sağlanır. Şekil 8’de önerilen batarya yönetim sisteminin deneysel uygulaması görülmektedir.

**Tablo 2.**  $V_{GS}$  gerilimindeki değişimlere bağlı olarak MOSFET'in  $R_{DSon}$  direnç değerleri

$V_{GS}$ (V)	$R_{DSon}$ ( $\Omega$ )
1,50	18,47 K
1,68	768
1,84	65
2,00	9,20
2,08	5,90
2,24	2,20
2,32	0,25
2,50	0,065

**Şekil 8.** (a) 20s11p x 32 Ah li-ion hücrelerden oluşan BMS deney düzeneği (b) BMS kullanıcı arayüzü

Şekil 9 (a)'da azaltan dönüştürücü girişine 1 kHz anahtarlama frekansına sahip %56.8 doluluk oranında PWM sinyali uygulanmıştır. Dönüştürücü çıkışından MOSFET'in tetikleme terminaline uygulanmak üzere 1,84 V gerilim sinyali elde edildiği görülmektedir.

**Şekil 9.** (a) Azaltan dönüştürücü girişine uygulanan PWM sinyali (CH1), dönüştürücü çıkışından elde edilen  $V_{GS}$  gerilimi (CH2), (b) MOSFET'in tetikleme terminaline uygulanan  $V_{GS}$  gerilimi (CH1), MOSFET üzerinden geçen dengeleme akımı (CH2).

Şekil 9 (b)'de  $V_{GS}$  geriliminin 2,32 V olması durumunda  $0,25 \Omega$ 'luk iç dirence sahip olan MOSFET ve  $3,9 \Omega$  değerindeki bypass direnci üzerinden geçen dengeleme akımının  $0,72$  A seviyesinde olduğu görülmektedir. BMS'e ait tüm veriler UART haberleşme protokolü üzerinden kablosuz modül kullanılarak eş zamanlı kayıtlar bilgisayar ortamında saklanmakta ve kullanıcı arayüzü sayesinde anlık olarak gözlemlenmektedir. Bilgisayar ortamındaki kullanıcı arayüzü Şekil 10'da görülmektedir. Tasarlanan arayüz sayesinde her batarya hücrelerinin şarj dengeleme gerilimleri ve sıcaklıkları takip edilmektedir. Böylece batarya hücrelerinde meydana gelebilecek olası sorunlar önceden belirlenerek müdahale edilebilmektedir.

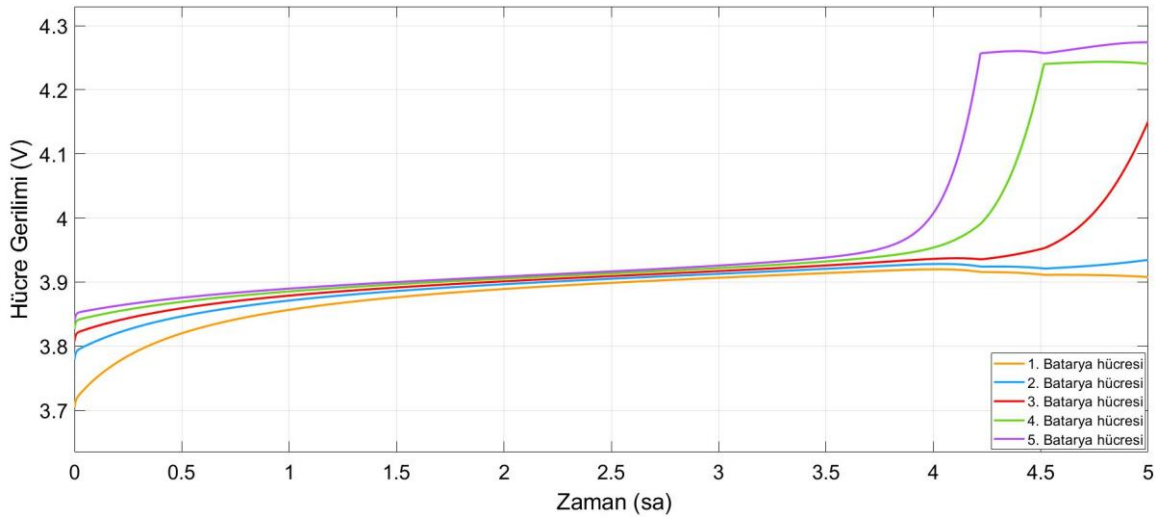


Şekil 10. Batarya yönetim sisteminin bilgisayar ortamındaki arayüz programı

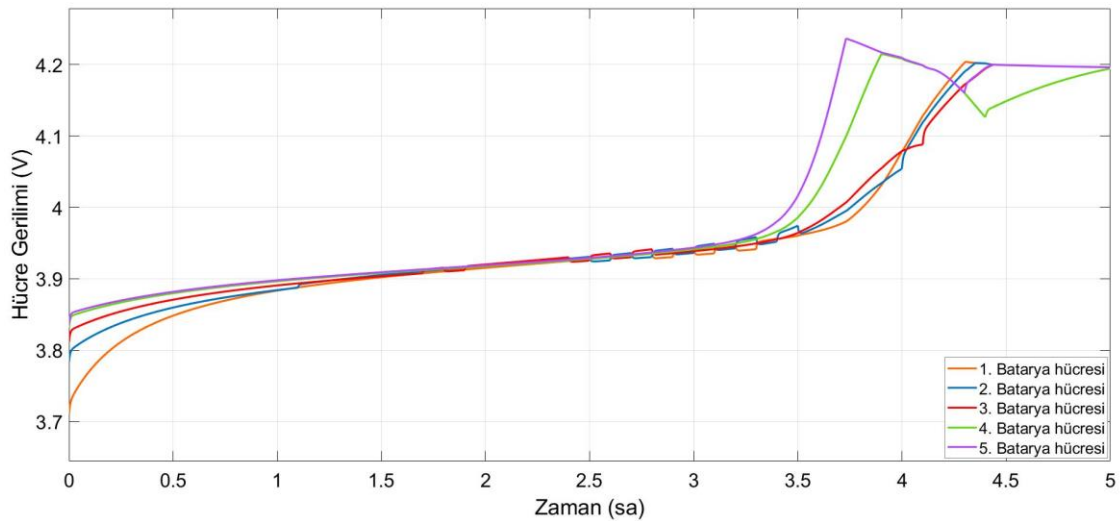
DeneySEL çalışma sırasında, batarya gerilimindeki dengesizliğin fazla olduğu yani SOC seviyeleri birbirinden farklı olan beş batarya hücresi seçilmiş ve şarj işlemi sırasında elde edilen hücre gerilimleri grafik üzerinde çizdirilmiştir. İlk olarak önerilen algoritma olmadan şarj işlemi yapıldığında hücre gerilimlerine ait grafik elde edilmiş ve zamana bağlı gerilim değerleri Şekil 11'de verilmiştir. Şarj başlamadan hemen önce hücre gerilimleri  $3,70$  V –  $3,78$  V –  $3,80$  V –  $3,83$  V –  $3,86$  V olarak ölçülmüş ve sırasıyla numaralandırılmıştır. Grafik incelendiğinde SOC seviyesi en yüksek olan 5 nolu batarya hücresi 4,22 saat ve 4 nolu batarya hücresi 4,5 saat süre sonunda %100 SOC seviyesine ulaşmıştır. Ancak şarj işleminin sonlandırıldığı 5. saat sonunda 1, 2 ve 3 nolu batarya hücrelerinin %100 SOC seviyesine ulaşamadığı, dolayısıyla tamamen şarj olmadıkları görülmüştür. Şarj süresi boyunca hücre sıcaklıkları değişimi  $21^{\circ}\text{C}$  ile  $40^{\circ}\text{C}$  aralığında olduğu gözlenmiştir.

Başlangıç koşulları aynı olacak şekilde önerilen algoritma kullanılarak gerçekleştirilen şarj işlemi sırasında elde edilen hücre gerilimlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 12'de verilmiştir. Şarj işlemi sırasında hücre gerilimi, algoritmada belirlenen dengeleme geriliminden daha yüksek olan hücrelerin MOSFET'leri tetiklenmiştir. Böylece dengeleme akımı, MOSFET iç direnci ve bypass direnci üzerinden devresini tamamlayarak dengeleme işlemini gerçekleştirmiştir. Batarya gruplarının dengeleme akımı maksimum  $1,077$  A'e kadar çıktığı ve hücreler arasındaki sıcaklık değişiminin  $22^{\circ}\text{C}$  ile  $35^{\circ}\text{C}$  aralığında olduğu gözlenmiştir.

Algoritmada belirlenen dengeleme gerilim değeri, etkili bir şarj işlemi için  $40$  mV olarak belirlenmiştir. Şekil 12 incelendiğinde birbirinden farklı SOC seviyelerine sahip batarya hücreleri, şarj işlemi başladıktan 4.5 saat sonra %100 SOC seviyesine ulaşmıştır. Şarj işlemi yaklaşık 5 saat sürmüş ve şarj süresi boyunca BMS, hücre gerilimlerinin dengelenmesi işlevini başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir.



**Şekil 11.** Önerilen algoritma olmadan şarj işlemi gerçekleştirildiğinde batarya hücre gerilimlerinin zamana bağlı değişimi



**Şekil 12.** Önerilen algoritma ve BMS kullanılarak şarj işlemi gerçekleştirildiğinde batarya hücre gerilimlerinin zamana bağlı değişimi

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Mikro şebeke yapıları ve elektrikli araçlar gibi önemli uygulama alanlarında kullanılan BMS, hücre dengeleme, batarya sisteminin güvenilirliği ve daha uzun batarya ömrü gibi katkılarından dolayı günümüzde yaygın olarak çalışılan bir konudur. Bu çalışmada, 20s11p x 32 Ah kapasiteye sahip li-ion batarya paketinin pasif dengeleme tekniği kullanılarak dengeli bir şekilde şarj edilebilmesi amacıyla BMS tasarlanmış ve deneysel uygulaması gerçek zamanlı sistem üzerinde test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, hücreler arasındaki gerilim farkı büyüdükçe dengeleme süresinin uzadığı gözlenmiştir. Batarya paketinin şarj işlemi sırasında BMS kullanılmadığı takdirde SOC seviyesi yüksek olan hücrenin daha erken maksimum gerilim seviyesine ulaştığı ve dolayısıyla şarj işlemine devam edildiği takdirde diğer batarya hücrelerine oranla daha fazla sıcaklık artışının yaşandığı gözlenmiştir. Aynı zamanda belirlenen şarj süresi boyunca sadece iki batarya hücrelerinin %100 SOC seviyesine ulaştığı, diğer batarya hücrelerinin tam şarj kapasitesine ulaşamadığı görülmüştür.

Darbe genişlik modülasyonu ve azaltan dönüştürücü topolojisinin kullanılmasıyla MOSFET lineer bölgede çalıştırılmıştır. Batarya hücre gerilimlerine bağlı olarak dengeleme akımının kontrolü sağlanmıştır. Tasarlanan kullanıcı ve bilgisayar arayüzü sayesinde hücre gerilimleri ve sıcaklıkları anlık olarak takip edilmekte ve eş zamanlı kayıtlar bilgisayar ortamında saklanmaktadır. Böylece batarya hücrelerinde meydana gelebilecek aşırı sıcaklık artışı veya hücrelerden herhangi birinin arızalanması gibi olası sorunlar belirlenerek müdahale edilebilmektedir. Benzer şekilde BMS üzerinde kullanılan çoklayıcı sayesinde pin sayısı bakımından daha küçük mikrodenetleyiciler kullanılarak daha fazla batarya hücresinin kontrol edilebileceği görülmüştür.

Tasarlanan BMS, dengeleme direnci ve MOSFET'in iç direncinin kullanılmasıyla referans gerilime bağlı olarak hücre gerilimlerini dengelediğini ve batarya paketinin güvenli çalışma bölgesi sınırları içerisinde kullanıldığını göstermiştir. BMS üzerinde yapılan tüm testler başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Turksoy, A., Teke A., and Alkaya A. A comprehensive overview of the dc-dc converter-based battery charge balancing methods in electric vehicles, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 133, 110274, (2020).
- [2] Baumhöfer, T., Brühl M., Rothgang, S. and Sauer, D.U. Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance, **Journal of Power Sources**, 247, 332-338, (2014).
- [3] Kıvrak, S. et al. Battery management system implementation with the passive control method using MOSFET as a load, **Measurement and Control**, 53(1-2), 205-213, (2020).
- [4] Conway, T. A Simple Robust Active BMS for Lithium Ion Battery Stack, **IEEE Transactions on Power Electronics**, doi: 10.1109/TPEL.2020.3024904, (2020).
- [5] Han, W., Zhang L., Han Y. Computationally efficient methods for state of charge approximation and performance measure calculation in series-connected battery equalization systems, **Journal of Power Sources**, 286, 145-158, (2015).
- [6] Morstyn, T. Momayyezhan, M. Hredza B.K. and Agelidis, V.G. Distributed Control for State-of-Charge Balancing Between the Modules of a Reconfigurable Battery Energy Storage System, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 31(11), 7986-7995, (2016).
- [7] Zhang, H., Wang Qi, Y.H. and Zhang, J., Active Battery Equalization Method Based on Redundant Battery for Electric Vehicles, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 68(8), 7531-7543, (2019).
- [8] Choudhury, S. et al., A Supervisory State of Charge and State of Power Management Control Strategy among Hybrid Energy Storage Systems through Thermal Exchange Optimization Technique, **IEEE Calcutta Conference (CALCON)**, Kolkata, India, pp. 323-327, (2020).
- [9] Vishakha V.V., Jadoun, V.K., Jayalaksmi N.S. and Agarwal, A. Various Methods Used for Battery Balancing in Electric Vehicles: A Comprehensive Review, **International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)**, Mathura, Uttar Pradesh, India, pp. 208-213, (2020).
- [10] Zhang, C., Cheng, G., Ju, Q., Zhang, W., Jiang, J. and Zhang L. Study on Battery Pack Consistency Evolutions during Electric Vehicle Operation with Statistical Method, **Energy Procedia**, 105, 3551-3556, (2017).
- [11] Ekici Y. and Tan N. Charge and discharge characteristics of different types of batteries on a hybrid electric vehicle model and selection of suitable battery type for electric vehicles, **International Journal of Automotive Science And Technology**, 3(4), 62-70, (2019).

- [12] Muratoglu Y., and Alkaya A. Unscented Kalman Filter based State of Charge Estimation for the Equalization of Lithium-ion Batteries on Electrical Vehicles. **Engineering Technology & Applied Science Research**, 9(6), 4876-4882, (2019).
- [13] Zhu, F., Liu, G., Tao, C., Wang K. and Jiang, K. Battery management system for Li-ion battery, in **The Journal of Engineering**, 13, 1437-1440, (2017).
- [14] Duan, C. et al. A Solar Power-Assisted Battery Balancing System for Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, 4(2), 432-443, (2018).
- [15] Kilic, A., et al. Design of Master and Slave Modules on Battery Management System for Electric Vehicles, **6th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'Riga)**, 1(1), 161-66, (2017).
- [16] Daowd, M., Omar N., Bossche, P.V.D. and Mierlo, J.V. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation, **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**, Chicago, IL, pp. 1-7, (2011).
- [17] Amin, K., Ismail, A., Nugroho and Kaleg, S. Passive balancing battery management system using MOSFET internal resistance as balancing resistor, **International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)**, Jakarta, 151-155, (2017).
- [18] Kokila M., Manimekalai P. and Indragandhi V. Design and development of battery management system (BMS) using hybrid multilevel converter. **International Journal of Ambient Energy** 41(7): 729-737, (2020).
- [19] Frost, D.F. and Howey, D.A. Completely Decentralized Active Balancing Battery Management System, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 33(1), 729-738, (2018).
- [20] Affanni, A., Bellini, A., Franceschini, G., Guglielmi, P. And Tassoni, C. Battery choice and management for new-generation electric vehicles, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 52(5), 1343-1349, (2005).
- [21] Das, U. K., Shrivastava, P., Tey, K. S., Idna, M. Y., Mekhilef, S., Jamei, E., Mehdi, Seyedmahmoudian, A. S., Advancement of lithium-ion battery cells voltage equalization techniques: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 134, 110227, (2020).