



Real-time implementation of battery management system designed with improved passive balancing technique for electric vehicles

Remzi İnan^{1*}, Muhammed Güçkıran¹, Yunus Emre Altınışık², Salih Enes Tek³, Mesut Potuk²

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Isparta University of Applied Sciences, 32260, Isparta, Türkiye

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Niğde Ömer Halisdemir University, 51240, Niğde, Türkiye

³Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, 06560, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Construction of braiding type battery package
- Battery management system with improved high efficiency passive balancing
- Performance test of the proposed battery management system on an electric vehicle in real-time

Keywords:

- Lithium ion battery
- Battery management system
- Passive balancing
- Electric vehicle
- STM microcontrollers

Article Info:

Research Article

Received: 18.05.2021

Accepted: 19.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.938914

Acknowledgement:

The authors thank TÜBİTAK and the organizing committee of the TEKNOFEST Aviation, Space and Technology Festival.

Correspondence:

Author: Remzi İnan

e-mail:

remziinan@isparta.edu.tr

phone: +90 246 211 6862

Graphical/Tabular Abstract



Figure A. Braiding battery package and the proposed passive balancing-based battery management system (BMS)

Purpose:

In this study, a passive balancing based BMS structure and design is proposed to control a battery pack that will source a real-time electric vehicle.

Theory and Methods:

In the proposed BMS, a braiding type cell construction is used in the battery package to simplify the control structure. Thus, cell structures connected in parallel could be balanced with a single balancing resistance. Moreover, in the proposed BMS, in addition to the central control unit, a secondary controller together with digital temperature sensors are used and communicated with the central control unit. So the cell temperature measurements can be carried out in isolation. Thus, magnetic distortions that occur in real-time high power applications are prevented. With this aspect, the proposed study is the first in the literature.

Results:






The proposed BMS applied on an electric vehicle informs the driver by transferring all the data measured from the battery to the real-time HMI Nextion screen. Thus, the driver can observe any problem in the general operation of the vehicle and all energy conditions from here.

Conclusion:

With the proposed BMS design, a safety and efficiency study is carried out, which reads voltage, current and temperature information at high resolution and intervenes in the system to take the control when necessary and success is achieved in real-time. With the real-time tests, the reliability, accuracy and efficiency of the proposed BMS is demonstrated, and it is aimed to develop a system that is based on active balancing method and whose parameter values can be defined by the user in future studies.



Elektrikli araçlar için iyileştirilmiş pasif dengeleme yöntemi ile tasarlanan batarya yönetim sisteminin gerçek-zamanlı uygulaması

Remzi İnan^{1*}, Muhammed Güçkiran¹, Yunus Emre Altınışik², Salih Enes Tek³, Mesut Potuk²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06560, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Merkezi BYS algoritması ve batarya paketi tasarımı
- İyileştirilmiş pasif dengeleme tekniği
- Kullanıcı dostu HMI ekranın arayüz tasarımı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 18.05.2021

Kabul: 19.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.938914

Anahtar Kelimeler:

Lityum-iyon pil,
batarya yönetim sistemi,
pasif dengeleme,
elektrikli araç,
STM mikrodenetleyiciler

ÖZ

Bu çalışma kapsamında, silindirik lityum-iyon hücrelerin birleşiminden oluşan batarya paketi tasarımı ile birlikte iyileştirilmiş pasif dengeleme tekniği kullanılarak hücrelerin daha verimli bir şekilde şarj-deşarj işlemini gerçekleştirebilmesine izin veren bir batarya yönetim sistemi (BYS) önerilmiştir. Yanlış bağlantı, harici müdahale ile oluşan istenmeyen kısa devre durumu, olumsuz çevre şartları, imalattan kaynaklı ve tamamen homojen yapıda olmayan bataryaların kullanımı batarya paketi için risk oluşturmaktadır. Bu durumlardan dolayı oluşabilecek olan aşırı sıcaklık, şarj-deşarj ve kısa devre kaynaklı aşırı akım ve aşırı gerilim gibi olumsuzluklar anında, BYS sisteme müdahale edebilmeli ve görüntülü/sesli uyarı verebilmelidir. Verimlilik açısından ise hücre gerilim değerlerinin birbirine yakın, hatta aynı düzeyde kullanılması önemlidir. Önerilen BYS’de merkezi ve ikincil mikrodenetleyici olarak ARM tabanlı STM32F103 tercih edilmiştir ve pasif dengeleme yöntemi kullanılmıştır. Proje kapsamında olabildiğince yüzey montajlı malzemelerin kullanılması ile çift katman yapılı olarak gerçekleştirilen elektronik kart tasarımları, genel olarak batarya paketinin içerdiği enerji yoğunluğu ve sistem özellikleri de düşünüldüğünde oldukça ergonomik bir gerçek-zamanlı batarya yönetim sistemi elde edilmiştir. Ayrıca batarya paketinin tasarımı, kullanılmak istenen sistemin durumuna göre paralel modül sayılarının eklenip çıkarılabilmesi sayesinde de önerilen batarya yönetim sisteminin özellikle akım kapasitesi anlamında uyarlanabilir bir yapı sergilemesine olanak sağlamaktadır. Önerilen sistemin başarısı, gerçek-zamanlı bir elektrikli araç ile test edilmiştir.

Real-time implementation of battery management system designed with improved passive balancing technique for electric vehicles

H I G H L I G H T S

- Central BMS algorithm and battery pack design
- Improved passive balancing technique
- Interface design of User-friendly HMI screen

Article Info

Research Article

Received: 18.05.2021

Accepted: 19.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.938914

Keywords:

Lithium-ion battery,
battery management system,
passive balancing,
electric vehicle,
STM microcontrollers

ABSTRACT

In this study, a battery management system (BMS) that allows charge and discharge of the cells more efficiently by using improved passive balancing technique with the battery package’s design composed of the combination of cylindrical li-ion cells is proposed. Incorrect connection, unwanted short circuit condition composed by external intervention, adverse environmental conditions, use of batteries that are not absolutely homogeneous and arising from manufacturing pose a risk for the battery package. During the problems such as excessive temperature, failed charge-discharge and overcurrent-overvoltage due to short circuit which may occur owing to these situations, BMS must be able intervene to the system and give visual / audible warnings. In terms of efficiency, using as close to each other of cell voltage values and even at the same level is important. ARM based STM32F103 as the central and secondary microcontroller in the proposed BMS is preferred and passive balancing method is used. Within the context of project, when one thinks the electronic card designs that are realized in double layer structure by using surface-mounted materials as much as possible, the energy density and system features of the battery package generally, a pretty utilitarian real-time battery management system is acquired. Furthermore, the design of the battery package allows that the proposed battery management system exhibit an adaptable structure in particular in terms of current capacity thanks to the addition and removal of parallel modules according to the state of the system that intended be used. The achievement of the proposed system is tested with a real-time electric vehicle.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *remziinan@isparta.edu.tr, muhammed.guckiran@gmail.com, altinisikyunusemre42@gmail.com, senes.tek@gazi.edu.tr, mesutpotuk42@gmail.com / Tel: +90 542 667 7032

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte hem taşınabilir elektronik cihazların hem de elektrikli taşıtların kullanımı yoğun bir şekilde artmaya devam etmektedir [1]. Bu durum ise pil hücrelerine diğer bir adıyla bataryalara duyulan ihtiyacı artırmakta ve dolayısıyla batarya üretim teknolojisinde birçok gelişme yaşanmaktadır. Batarya, elektrikli araçların enerji verimliliğini ve dinamik performansını etkileyen en önemli bileşenlerden biridir. Elektrikli araçlarda enerji kaynağı olarak sıklıkla kullanılan batarya türleri ise, valf ayarlı kurşun asit batarya, nikel metal hibrit (Ni-MH) batarya, Lityum iyon (Li-iyon) batarya ve lityum polimer (LiPO4) bataryalardır [2, 3]. Li-iyon bataryalar, yüksek maliyetlerle kurulum gerektirmesine rağmen enerji verimliliklerinin yüksek olması, kendiliğinden boşalma oranının düşük olması ve hacimsel enerji ve güç yoğunluklarının yüksek olması nedeniyle literatürde yaygın olarak kullanılan bir batarya türüdür [3-7]. Elektrikli araçların ve taşınabilir elektronik cihazların ihtiyaç duydukları enerjinin karşılanması için her tasarımın farklı enerji seviye koşullarının gerektirdiği gerilim ve akım kapasitelerine bağlı olarak birçok hücre kullanılması durumu oluşmaktadır. Hücrelerin seri ve/veya paralel bağlanması ile ihtiyaç duyulan farklı gerilim ve akım kapasiteleri sağlanabilmektedir. Birden çok hücrenin bir araya getirilmesi ile de batarya paketleri oluşturulmaktadır. Batarya paketlerinin şarj ve uyku (yüksüz deşarj durumu) esnasında oluşabilecek gerilim dengesizliklerine karşı kararlı ve gürbüz bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir [4-6, 8]. Oluşabilecek gerilim dengesizlikleri, bataryaların enerji kapasitelerinin düşmesine ve kullanım çevrimlerinin veya ömürlerinin kısalmasına neden olmaktadır [9]. Batarya paketlerinde bu olumsuzlukların önüne geçilmesi ve şarj ve uyku esnasında kontrollerinin sağlanması amacıyla batarya yönetim sistemleri/battery management systems (BYS/BMS) kullanılmaktadır [8]. Bunun yanında bir BYS'nin tek amacı hücreler arasında oluşabilecek gerilim dengesizliklerinin önüne geçmek değildir ve sahip olabileceği özellikler aşağıda belirtilmiştir.

- Yüksek-düşük gerilim koruması ve gerilim takibi
- Yüksek akım koruması ve akım takibi
- Yüksek-düşük sıcaklık koruması ve sıcaklık takibi
- Hücre sağlık durumlarının/state of health (HSD'nin/SOH) ve hücre doluluk durumlarının/state of the charge (HDD'nin/SOC) kontrol edilmesi
- Gerilim dengeleme işlemi
- Yüksek verimli ve uzun ömürlü hücre kullanımı

Bu noktada, hücre gerilim dengeleyicileri geliştirmek ve iyileştirmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır [4, 5]. Bu dengeleyiciler genel olarak pasif ve aktif hücre dengeleyicileri olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Pasif ve aktif hücre dengeleyicileri, sırasıyla enerji tüketen ve tüketmeyen hücre dengeleyicileri olarak da bilinmektedir [4]. Pasif dengeleme yönteminde fazla gerilim ya da HDD'ye ve dolayısıyla enerjiye sahip hücre bir direnç yardımı ile ısı olarak harcanarak diğer hücre enerji seviyelerine ulaşmaya kadar deşarj edilmektedir [9, 10]. Aktif dengeleme sisteminde ise, yüksek enerji seviyesine sahip hücrenin enerjisi diğer düşük enerji seviyesindeki hücrelerin şarj edilmesi amacı ile kullanılarak gerilim ve HDD dengelemesi sağlanmaktadır [10]. Ancak aktif dengeleme yönteminin içerdiği donanım karmaşıklığı, kontrolündeki zorluk ve sistem maliyeti endüstriyel amaçla üretilen BYS'lerde, daha basit bit kontrol yapısına sahip olması, uygulamadaki kolaylığı ve düşük maliyetli olması sebebi ile pasif dengeleme yöntemlerinin tercih edilmelerine neden olmaktadır [10].

Ayrıca, pil çalışma sıcaklığı, güvenli ve verimli çalışma için dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Özellikle iç sıcaklığın ölçülmesi genellikle karmaşık bir yapı gerektirmektedir [11]. İç

sıcaklık ölçümünün getirdiği zorluk nedeni ile genellikle dış yüzey sıcaklığının ölçülmesi BYS yapıları için önem arz eden konuların başında gelmektedir. Bunun yanı sıra gerçek pil ömrü, pilin kimyasal özelliklerinden ve alt - üst sıcaklık sınırlarında geçirilen süreden etkilenir [12]. Bu sebeple, batarya hücre gerilim, akım ve sıcaklıklarının gözlemlenmesinin yanında bataryaların HSD'nin ve HDD'nin de gözlemlenmesi gerekliliği literatürde vurgulanmaktadır [12-14]. HSD pilin yaşlanma derecesini tanımlamakta olup, bunun kapasite kaybı veya direnç artışı ile yansıtılabilir olduğu [13]'da belirtilmiştir. [12]'de HSD'nin gözlemlenebilmesine yönelik olarak literatürde önerilen yöntemler ayrıntılı bir şekilde açıklanmış olup bu yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

- Coulomb sayma tekniği ile HSD'nin gözlemlenmesi.
- Çevrim-içi ve çevrim-dışı olarak açık devre gerilim temelli olarak HSD'nin gözlemlenmesi.
- Geniş frekans spektrumunun kullanıldığı empedans spektroskopisi ile HSD'nin gözlemlenmesi.
- Kalman filtresi, çift (Dual) Kalman filtresi ve kokusuz (Unscented) Kalman filtresi ile HSD'nin gözlemlenmesi.
- Doğrusal olmayan sistemlerin modellerinin tanımlanmasında kullanılan destek vektör makinesi (Support vector machine) ile HSD'nin gözlemlenmesi.

HSD'nin gözlemlenmesinin batarya kullanım verimliliği açısından önem arz etmesine rağmen HSD'nin sürekli olarak gözlemlenmesi BYS'nin ağır bir hesaplama yüküne sahip olmasına neden olmaktadır. Hesap yükünün artması ise yüksek kapasiteli işlemcilerin kullanılmasını ihtiyacı doğurmakta olup BYS maliyetini artırmaktadır. Ticari anlamda üretilen BYS'lerde ise hem sistem karmaşıklığını gidermek hem de maliyetin düşürülmesi için HSD'nin gözlemlenmesi tercih edilmemekte olup, batarya ömürleri periyodik bakımlar esnasında belirli testlerle kontrol edilmektedir. Ayrıca, özellikle elektrikli taşıtlarda kullanılan yüksek güç kapasiteli BYS'lerde yüksek güvenliğin sağlanabilmesi maçı ile hücre gerilim, HDD, HSD ve sıcaklıkların sürekli olarak izlenebilir olması gerekmektedir ve bu izlenebilirlik özelliği BYS ile araç kontrol ünitesi arasında gerçek-zamanlı yüksek iletişim hızına (Baud rate) ve seri iletişim kabiliyetine sahip olan CAN (Controller Area Network)-BUS ile sağlanmaktadır [15].

Literatürde, ticarileştirilebilirlik boyutu ön planda tutularak gerçekleştirilmiş olan yüksek enerji kontrol kapasitesine sahip BYS'ler ile ilgili olarak birçok çalışma mevcuttur [16-20]. [16]'da, yirmi iki adede kadar batarya hücrelerini kontrol edebilen, CAN-BUS haberleşme protokolü tabanlı BYS tasarlanmıştır. Konumlandırıldığı hücre grubunun akımını, gerilimini ve sıcaklığını ölçerek bu verileri ileten modüller ve bu ölçümler ile batarya şarj durum kestirimi yapan akıllı ana birim tasarımı yapılmıştır [16]. [17, 18]'de tümleşik devre (Integrated circuit) teknolojisi kullanılarak oluşturulmuş olan amaca odaklı kullanıma sahip entegreler ile BYS tasarımları önerilmiş olup, [18]'de on iki adet hücrenin gerilimlerinin eş-zamanlı olarak gözlemlenebilmesine olanak sağlayan devre tasarımına sahip BYS kartından üç adet kullanılarak otuz altı hücrenin gerilim görüntüleme işlemi yapılmıştır. [19]'da önerilen BYS'de, gerilimi fazla olan batarya hücrelerinin enerjisi, yükselten tip doğru akım (DA) dönüştürücülerle (Boost converter) süper kapasitöre, oradan da batarya paketine gönderilmektedir. Süper kapasitörler kullanılarak aktif hücre gerilimi dengeleme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Literatürde mevcut bulunan aktif ve pasif dengeleme tabanlı tamamen endüstriyel amaçlı olarak tasarlanmış BYS'ler incelendiğinde, genellikle düşük sayıda hücre ile ve tek bir seri dizi hücre paketi ile BYS tasarımlarının test edildiği ve önerilen BYS'lerin yüksek sayıda hücre kontrolüne izin vermediği görülmektedir. Ayrıca yüksek sayıda

hücreden oluşan batarya paketlerin kontrolünü sağlamak için önerilmiş BYs'lerde hücresele seviyede gerçekleştirilen kontrolün sistem tasarımı zorlaştırdığı ve maliyeti önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, gerçek-zamanlı bir elektrikli araca kaynaklık edecek olan bir batarya paketinin kontrolünün sağlanması için pasif dengeleme temelli bir BYs yapısı ve tasarımı önerilmiştir. Önerilen BYs'de kontrol yapısının basitleştirilmesi için batarya paketinde örgülü dizilim kullanılmıştır. Örgülü dizilimde seri bağlı hücrelerle oluşturulan kollara akım kapasitesini artırmak için doğrudan farklı bir seri dizilimli kol bağlanmak yerine, her hücre birbiri ile paralel bağlı şekilde matrisel bir dizilim oluşturulmuştur. Böylelikle tek bir dengeleme (balancing) direnci ile paralel bağlı hücre yapıları dengelenebilmiştir. Bu çalışmanın temel katkısı ise; paralel grup sayısı kadar pasif dengeleme direnci kullanılarak oluşturulan BYs ile paralel bağlı hücreler arasında hem kendileri arasında dengeleme sağlanmış hem de deşarj direnci ile diğer gruplara kıyasla eşik gerilimi fazla olan gruplar alt gerilim seviyesindeki grupların gerilim seviyelerine dengelenebilmiştir. Önerilen BYs ile yüksek sayıda hücre kullanımının gerekli olduğu yüksek güçlü batarya paketlerinin kontrolü basitleştirilerek düşük maliyetle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dengeleme akımının en iyi (optimum) değeri Li-iyon hücrelerin şarj dengeleme akımları dikkate alınarak gerekli deneysel ölçüm ve testlerle belirlenmiştir. Böylelikle yalnızca benzetim ortamında testleri gerçekleştirilen sistemlerden ayrılarak, gerçek-zamanlı olarak gürbüz bir çalışma performansı sunan bir BYs önerilmiştir.

2. Batarya Paketi Tasarımı (Design of Battery Package)

Bilindiği üzere elektrikli araçlar, enerjisini batarya hücreleri üzerinden sağlamaktadır. Şarj edilebilir hücrelerin üretim materyalleri cinsinden birçok çeşidi vardır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan batarya paketinde kullanılmak üzere silindirik Li-iyon piller tercih edildi. Tercih sebebi ise bu pillerin yüksek enerji verimliliğine ve uzun kullanım ömürlerine sahip olmaları ve hafıza etkisine sahip olmamalarıdır. Ayrıca geleneksel pillere göre de daha hızlı şarj olabilmektedir. Kullanılan her bir hücre voltaj sınırı 2,5 ve 4,12'dir. Anma gerilimi 3,6 V ve anma akımı 2,85 Ah'dir. Şarj sıcaklık aralığı 0/50°C, deşarj sıcaklık aralığı -20/+60°C ve maksimum şarj akımı 13 Ah'dir. Tasarlanan elektrikli araç için hedeflenen batarya değerleri yaklaşık olarak 56V - 120Ah'dir. Bu durumda oluşturulan batarya paketinin anma enerjisi 6048 J'dür. Batarya paketi oluşturulurken her bir hücre alev almaz mühendislik plastiği ile kaplanmış olup 14 tanesi birbirine paralel bağlı alt modülü tanımlanmaktadır.

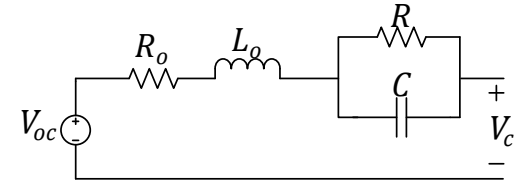
Computer Numerical Control (CNC) çift darbeli punto robotu ile imal edilmiş olan alt modüllerin 3 tanesi de birbirine baralar ve vidalar yardımı ile paralel bağlanarak 120 Ah kapasiteli modül oluşturulmuştur. 3,6 V anma gerilim kapasiteli modüllerden 14 adedi birbirine seri olarak bağlanarak 50,4 V'luk anma gerilimli batarya paketi oluşturulmuştur. Batarya grubu oluşturulurken baraların vidalanması yöntemi uygulanarak dikkatli bir şekilde 588 adet hücrenin paralel ve seri olarak bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Batarya paketlenmesi aşamasında batarya grubunun oluşumuna ilaveten paket içerisindeki havanın tek noktada toplanarak toplandığı bölümün tam ters konumundan çıkışına izin veren ve aynı zamanda dış ortamın havasının paket içerisine girişine olanak sağlayan çift fanlı bir sistem oluşturulmuştur. Bu sistem üzerinde 8x8 boyutunda iki adet fan kullanılmıştır. Fanların batarya grubunu oluşturan hücrelere temasının önlenmesi ve olası olumsuzlukların önüne geçilmesi için tüm hücreler paket içerisine yanmaz alüminyum bantla sarılmış, profil kesitler ile sabitlenmiştir. Yüksek hassasiyet ve dikkatle yapılması gereken bağlantı işleminden sonra istenilen batarya değerlerine ulaşıldığı ölçü aletleri ile de teyit edilmelidir. Elde edilen değerler oldukça yüksek olduğundan dolayı birleşim işlemi tamamlandıktan sonra istenmeyen bir hadise ile karşılaşmamak için herhangi bir

iletken maddenin batarya üzerine temas etmemesi oldukça kritik ve göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur.

3. Önerilen Batarya Yönetim Sisteminin Matlab-Simulink Benzetim Ortamında Gerçekleştirilmesi (The Simulation Implementation of the Proposed Battery Management System on Matlab-SimSpace)

Önerilen pasif dengeleme yöntemi tabanlı BYs, MATLAB-SIMULINK benzetim ortamında kurgulanmış ve gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda öncelikle, gerilim alt sınırı 2,5 V ve üst sınırı 4,12 V, anma gerilimi 3,6 V, anma akımı 2,85 Ah, şarj sıcaklık aralığı 0/50°C, deşarj sıcaklık aralığı -20/+60°C ve maksimum şarj akımı 13 Ah olan Li-iyon hücreler kullanılarak batarya paketi oluşturulmuştur. Şarj esnasında paket içerisindeki tüm hücrelerin 0,5C ile sabit akım altında şarj olmalarını sağlamak için D.A akım kaynağı kullanılmıştır. Hücrelerden herhangi birisi 4 V gerilim seviyesine ulaşana kadar pasif dengeleme sistemi devreye alınmamakta ve herhangi bir hücrenin gerilim seviyesi bu değere ulaştığı anda eğer gerekli ise pasif dengeleme sistemi devreye girmektedir. Hücreler arası dengelemenin gerçekleştirilmesi için hücreler arası gerilim seviyesi farkı 50 mV olarak belirlenmiş olup, minimum gerilim seviyesine sahip hücre ile arasındaki gerilim seviyesi 50 mV eşik değerinden fazla olan hücre için pasif dengeleme süreci başlatılmaktadır. Herhangi bir hücrenin dengelenmesi esnasında tüm batarya paketinin şarj akımı kesilmektedir. Tüm seri bağlı hücre grup gerilimleri sürekli okunarak dengeleme işleminin sonlandırılması kontrol edilmektedir. Dengeleme işlemi sonlandırıldıktan sonra tüm batarya paketinin tekrar 0,5C ile şarj olması sağlanmaktadır. Bu kontrol işlemi, hücreler 4,1 V'a ulaşana kadar devam etmekte ve tüm seri bağlı hücre grup gerilimleri eşik gerilim değerine ulaştığında batarya paketinin şarj işlemi sonlandırılmaktadır.

Benzetim çalışmalarında MATLAB-SIMULINK ortamında bulunan hücre modeli kullanılmıştır ve bu hücreye ait Thevenin eşdeğer devre modeli [20]'de belirtildiği gibi Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil 1'de görülen Thevenin eşdeğer devre modeli direnç, endüktans ve RC paralel devresinden oluşmaktadır.



Şekil 1. Li-iyon hücrenin Thevenin eşdeğer devre modeli (Thevenin equivalent circuit model of a Li-ion cell)

Bu eşdeğer devre modeline ait akım-gerilim ilişkisi aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$V_c = V_{oc} - R_o i - V_{L_o} - V_{RC} \quad (1)$$

burada, V_c hücrenin yük altındaki gerilimi, i hücre akımı, V_{oc} hücrenin açık devre durumundaki gerilimi ya da elektromotor kuvveti, R_o hücre iç direnci, V_{L_o} hücre iç endüktansı olan L_o 'nun üzerinde indüklenen gerilim, V_{RC} ise RC paralel eşdeğer devresi üzerinde indüklenen gerilimdir.

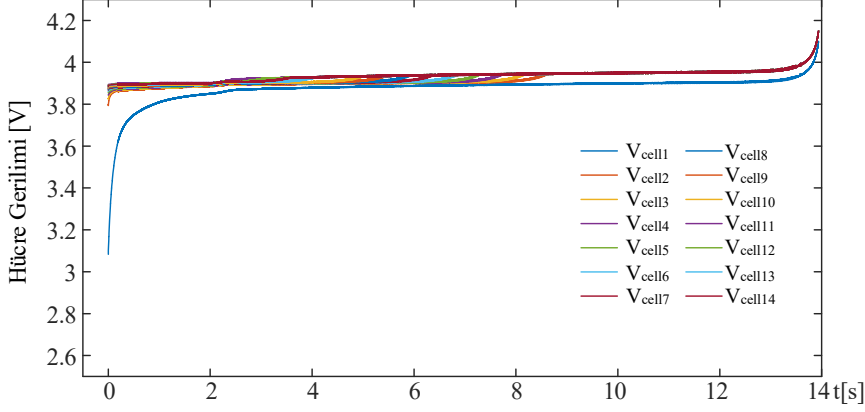
(1)'de verilen genel akım-gerilim ilişkisine ait Laplace ilişkisi aşağıdaki gibidir:

$$V_c(s) = V_{oc}(s) - R_o i(s) - sL_o i(s) - s \left(\frac{1}{1/R_1 + sC} \right) \quad (2)$$

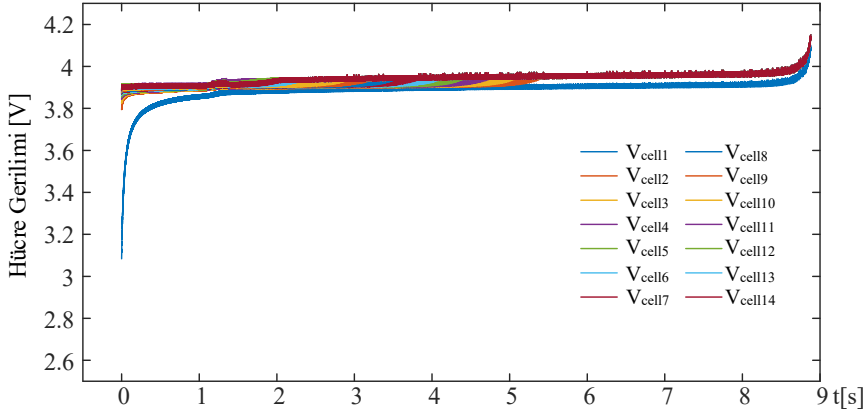
MATLAB-SIMULINK ortamında oluşturulan benzetim çalışmasında farklı şarj-akım değerlerinde gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına ait sonuçlar Şekil 2-4'te sunulmuştur.

Benzetim çalışmasında 14 adet Li-iyon hücre seri bağlanmıştır. Ayrıca gerçek-zamanlı sistem üzerinde 42 adet hücrenin paralel

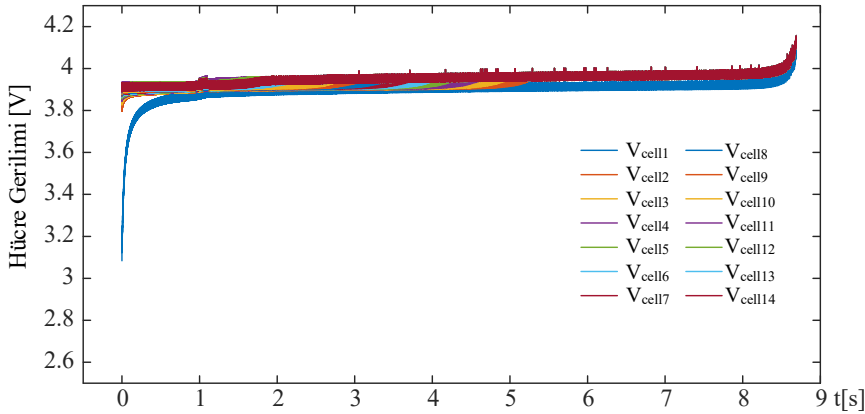
bağlanması ile elde edilen örgülü yapı benzetim çalışmasında 2 adet hücrenin paralel bağlanması ile elde edilen örgülü yapı ile temsil edilmiştir. Benzetim ortamında hücre sayısının yüksek tutulması sistemi oldukça yavaşlatmaktadır. Bu sebeple 2'li paralel yapı kullanılmıştır. Şekil 2-4'te farklı şarj akımı değerlerinde batarya paketinin şarj edilmesi durumunda önerilen BYS yapısının kontrol



Şekil 2. Benzetim ortamında oluşturulan batarya paketinin önerilen BYS kontrol algoritması ile 1C şarj akımı ile şarj edilmesi durumunda hücre gerilim değişimleri (Cell voltage changes when the battery pack implemented in the simulation is controlled by the proposed BMS while the battery pack is being charged with 1C charge current)



Şekil 3. Benzetim ortamında oluşturulan batarya paketinin önerilen BYS kontrol algoritması ile 0,5C şarj akımı ile şarj edilmesi durumunda hücre gerilim değişimleri (Cell voltage changes when the battery pack implemented in the simulation is controlled by the proposed BMS while the battery pack is being charged with 0.5C charge current)



Şekil 4. Benzetim ortamında oluşturulan batarya paketinin önerilen BYS kontrol algoritması ile 0,082C şarj akımı ile şarj edilmesi durumunda hücre gerilim değişimleri (Cell voltage changes when the battery pack implemented in the simulation is controlled by the proposed BMS while the battery pack is being charged with 0.082C charge current).

başarımı ve her seri hücrenin şarj esnasında gerilim seviyesinin değişimi verilmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmasında, paralel bağlı grupların başlangıç şarj durumları, önerilen örgülü bağlantı yapısında paralel bağlı hücrelerin gerilim değerlerinin doğal komütasyonla dengelenebildiğini göstermek amacı ile birbirinden farklı olarak atanmıştır ve sistem devreye alındığı anda hücrelerin gerilimlerinin dengelendiği görülmüştür. Sunulan grafikler incelendiğinde önerilen BYS kontrol algoritmasının ve örgülü yapının kararlı bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Bu sonuçlar dikkate alındığında dengeleme işleminin bu seviyede güçlü bir batarya paketinde etkin bir şekilde başarıya sahip olduğu, belirlenen gerilim sınırlamaları aralığında kontrol algoritmasının iyi bir performansa sahip olduğu ancak tüm pasif dengeleme sistemlerinde olduğu gibi şarj esnasında güç kaybına neden olduğu görülmektedir.

4. ÖNERİLEN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİNİN GERÇEK-ZAMANLI OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL SONUÇLAR

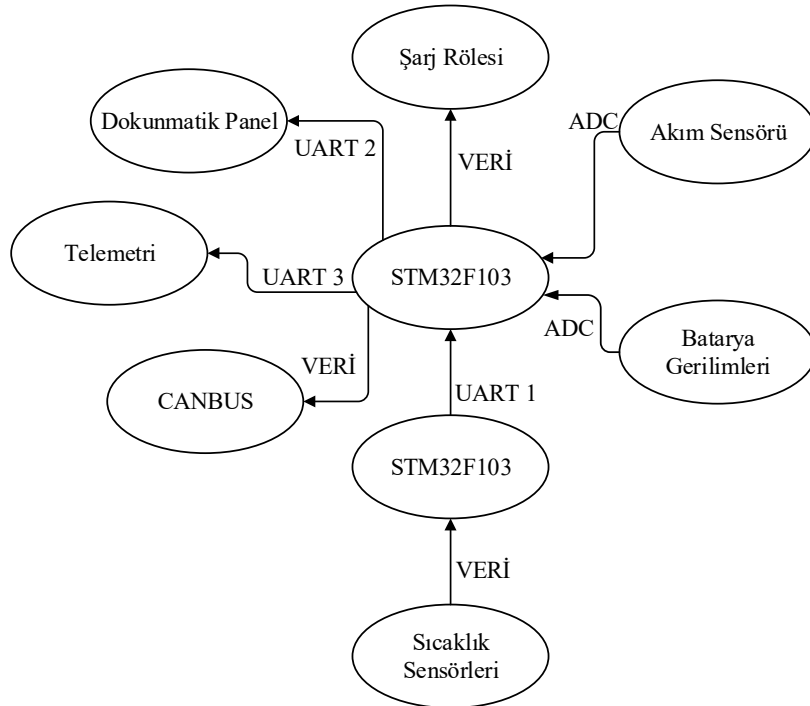
(The Real-Time Implementation of the Proposed Battery Management System and Experimental Results)

BYS'ler; merkezi BYS, modüler BYS, ana kart-yardımcı kart BYS, dağıtılmış BYS gibi yazılım ve donanım bakımından birçok çeşitliliğe sahiptir. Önerilen BYS, modül sayısının artırılabilir ve farklı sistemlere entegre edilebilir olmasından dolayı uyarlanabilir özellik kazandırılabilir niteliktedir. Buna ek olarak iki adet denetleyici kullanımının sistem için yeterli olması ve tüm hücrelerin batarya grupları aracılığı ile başka hiçbir denetleyici karta uğramadan doğrudan tek bir BYS kartına bağlı olması nedeni ile merkezi BYS sistemi olarak kabul edilmektedir. Merkezi BYS, tüm hücre modüllerinin doğrudan kendisine bağlı olduğu bir sistemdir. Şekil 5'te BYS'nin ilgili bileşenleri ve temel blok diyagramı sunulmuştur. Burada gösterildiği üzere merkezi ve sıcaklık ölçümünü izoleli gerçekleştiren ikincil mikrodnetleyicinin iletişimi Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) protokolü ile sağlanmıştır. İkincil mikrodnetleyici; sıcaklık bilgilerini okuyup merkezi mikrodnetleyiciye göndererek bilgi aktarımını gerçekleştirmektedir ve herhangi bir hücre gerilim ölçümü

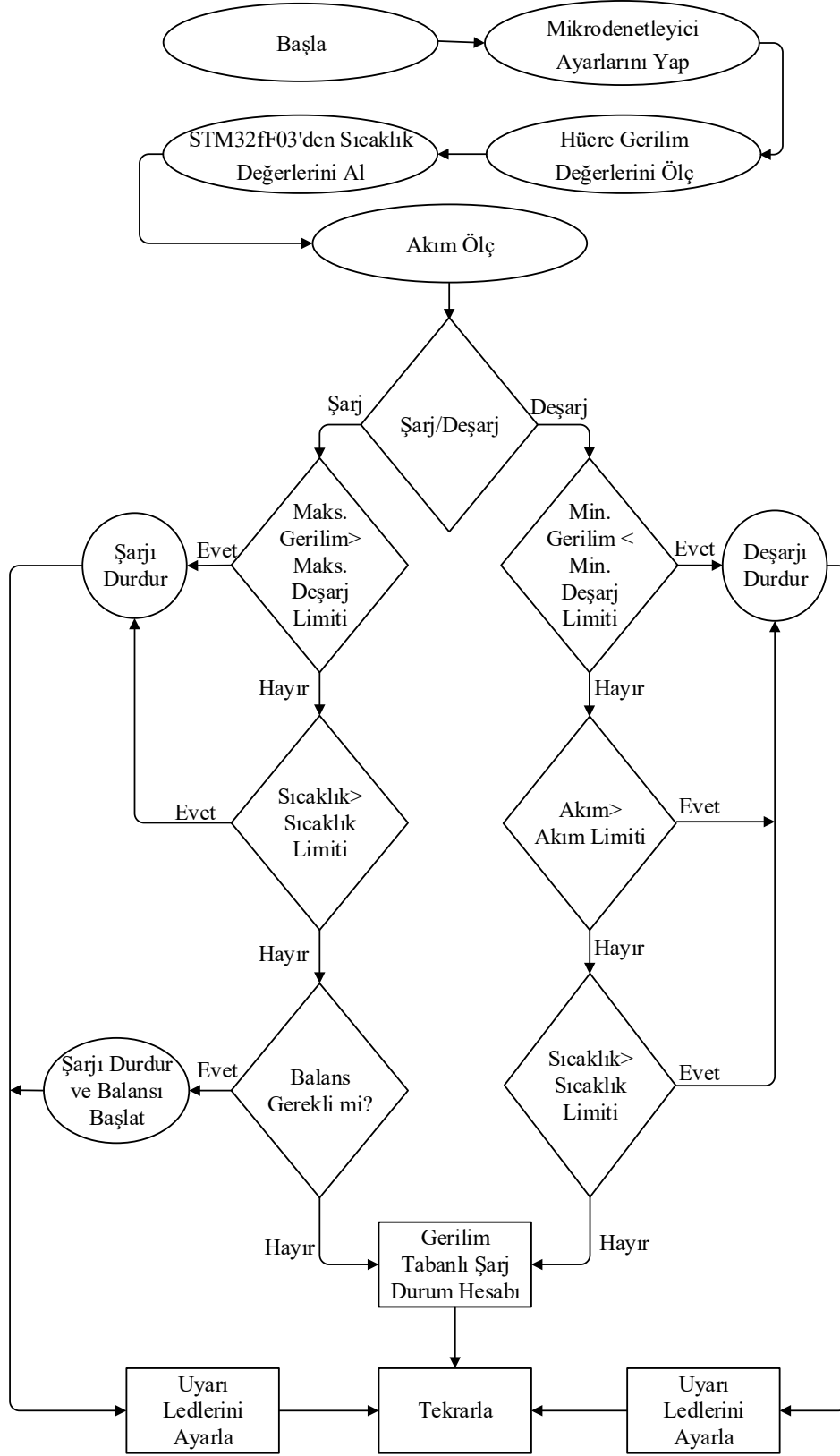
yapmamaktadır. Merkezi mikrodnetleyici ise her bir seri hücre gerilimlerini, batarya toplam akımını ve yardımcı mikrodnetleyiciden kendisine gelen sıcaklık bilgilerini değerlendirip gerilim dengelemesi yapma, şarj işlemini devre dışı bırakabilme, olağanüstü durumlarda enerjiyi tamamen kesebilme gibi özelliklere sahiptir.

4.1. Batarya Yönetim Sistemi Algoritması (Algorithm of Battery Management System)

Şekil 6'da bu çalışmada önerilen BYS algoritması görülmektedir. Algoritmada ilk olarak mikrodnetleyici başlangıç ayarları yapılmaktadır. BYS işlemleri için gerekli olan sıcaklık bilgilerini ikincil mikrodnetleyici (STM32F103) ölçerek merkezi mikrodnetleyiciye (STM32F103) göndermektedir. Ayrıca merkezi mikrodnetleyici tarafından hücre gerilim bilgileri okunmaktadır. Okunan gerilim ve sıcaklık değerlerinden sonra merkezi mikrodnetleyici tarafından toplam batarya akımı, transducer vasıtasıyla ölçülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre merkezi mikrodnetleyici şarj ve deşarj işlemi komutlarına karar vermektedir. Şarj işlemi sırasında, batarya birimlerinin maksimum şarj ve sıcaklık limiti ($4,2 V$ ve $60^{\circ}C$) kontrol edilir. Eğer batarya grubu en üst limit değerlerine ulaşmış ise şarj işlemi BYS tarafından durdurulmaktadır. En üst limitin altında ise dengeleme (balans) işlemi için kontrol döngüsü aktif edilmektedir. Hücreler arası gerilim dengesizliği belirlenen gerilim, fark limitleri dışında ise şarj işlemi durdurularak gerilim dengelemesi yapılmaktadır. Deşarj işlemi sırasında ise hücrelerin en alt gerilim limitine ($2,75 V$) ulaşma durumu kontrol edilmektedir. Eğer seri bağlı koldaki hücrelerden herhangi birinin gerilim değeri en alt limit değerine ulaşmış ise deşarj işlemi durdurulmakta ve tüm batarya paketi korumaya alınarak kapatılmaktadır. Gerilim seviyesi en alt limit değerine ulaşmadı ise toplam akım, hücresel gerilimler ve sıcaklık değerleri ölçülerek batarya birimlerinin kapasitesi hesaplanmaktadır. Hesaplanan kapasite verileri, proje kapsamında kullanıcı arayüzü ve izleme istasyonu olarak tasarlanan Human Machine Interface (HMI) panel ve telemetri sistemine gönderilmektedir. Sistem açık kaldığı sürece işlemler periyodik olarak tekrarlanmaktadır.



Şekil 5. BYS-blok diyagramı (BMS-block diagram)



Şekil 6. Önerilen BYS algoritması (The proposed BMS algorithm)

4.2. Mikrodenetleyicinin Seçilmesi (Selection of Microcontroller)

Önerilen BY5'de, merkezi mikrodenetleyici ve ikincil mikrodenetleyici olmak üzere iki adet işlem birimi bulunmaktadır. Merkezi mikrodenetleyici için, STM firmasının 32 bitlik ARM Cortex M4 serisi olarak bilinen STM32F103 mikrodenetleyicisi seçilmiştir. Bu seçim yapılırken düşük güç tüketimi, yüksek hızlı sinyal işleme vb. özellikleri belirleyici olmuştur.

Şarj ve deşarj işlemleri sırasında hücre gerilimlerinin aralarındaki farkların kesin doğrulukla ve kararlı bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, hücrelerin gerilimlerini ölçmek için yüksek çözünürlüklü bir analog sayısal dönüştürücü/analog to digital converter (ASD/ADC) kullanılmaktadır. STM32F103 mikrodenetleyici, dâhili üç kanal 12 bit ASD'ye sahiptir. Böylelikle hücre gerilimi okumada 0,809 mV hassasiyete sahiptir. Önerilen BY5'de ikincil mikrodenetleyici olarak STM32F103 seçilmiştir. STM32F103 mikrodenetleyicileri, piyasada sıkça bulunabilmeleri ve performans değerlerinin oldukça yüksek olması kart tasarımında tercih edilmelerini sağlamaktadır.

4.3. Elektronik Kart Tasarımı (Electronic Board Design)

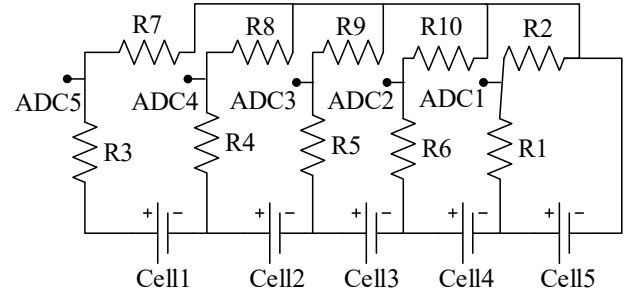
Önerilen BY5 genel olarak düşünüldüğünde; BY5 kartı (Şekil 7), gerilim dengeleme kartı ve koruma kartı olmak üzere üç yapıdan oluşmaktadır.

Batarya biriminden alınan bilgiler BY5 kartı üzerindeki sök-tak bağlantılar ile iletilmektedir. Bilgilerin iletim işlemi ve tüm bağlantılar için baskı devre kartı/printed circuit board (BDK/PCB) çizim programı (KiCAD) kullanılmıştır. Ayrıca, BY5 ve diğer kartların baskı devre işlemi de 10x10cm boyutlarında PcbWay aracılığıyla KiCAD çizim programından yararlanarak çift taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de, çalışma kapsamında tasarlanan BY5 kartının tüm bileşenleri detaylı şekilde görülmektedir.

4.3.1. Gerilim ölçme ve dengeleme işlemi (Voltage measurement and balancing)

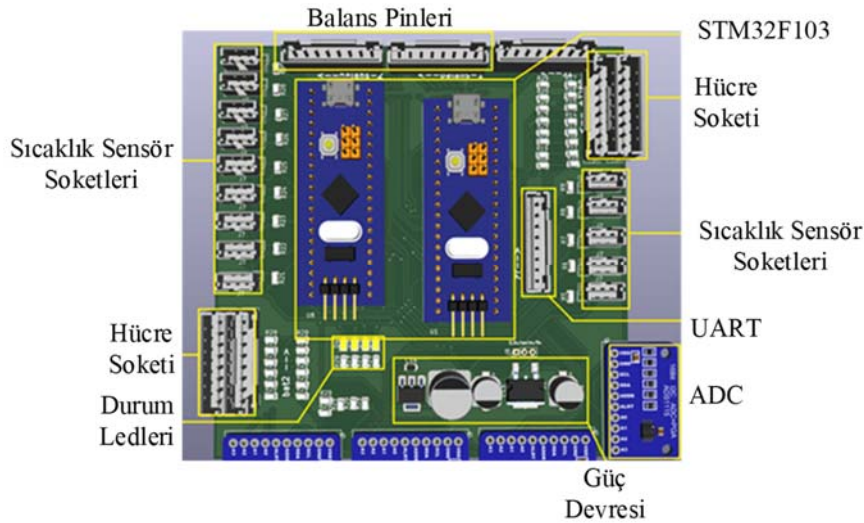
En yaygın ve bilinen yöntem gerilim bölücü devresidir. Bu yöntem ile ölçüm hassasiyeti iyi hesaplandığı takdirde kararlı sonuçlar alınabilir. Şekil 8'de gerilim bölücü devresi verilmiştir. Burada her 4 modül için bir ASD kullanılmıştır. Her bir hücreden alınan ölçümler seçici

mantığı ile ASD girişine yönlendirilmektedir. Uygulama devresinde, anahtarlama elemanı olarak AQY2825X yarı iletken röle/solid state relay (YİR/SSR) kullanılmıştır. Gerilim okuma işleminde kullanılan donanımlar, iç direncinin küçük ve tepki süresinin çok düşük olması nedeni ile yüzey montajlı malzeme/surface-mounted device (YMM/SMD) olarak seçilmiştir. Bu sayede okuma işlemindeki hatalar asgari düzeye indirilmiştir. Sistemdeki batarya hücrelerinin sağlıklı bir şekilde ömrünü devam ettirebilmesi için gerilim değer aralığı her pil hücrelerinde kullanılan Li-iyon hücrelerin kapasite özellikleri nedeni ile 2,75 V-4 V aralığında tutulması gerekmektedir. Okuma işlemi yapılırken bu sınır değerler daimi olarak kontrol edilmektedir. Bu aşamada sınır değerlere yaklaştıkça belirlenen ideal zaman aralıkları ile gerilim dengeleme işlemleri yapılması gerekmektedir.



Şekil 8. Gerilim bölücü devresi (Voltage divider circuit)

Bu proje ve çalışma kapsamında, fazla enerjinin ısıya dönüştürülerek harcanması prensibine dayanarak şarj aşamasında uygulanan pasif dengeleme yöntemi gerçekleştirilmiştir. Batarya şarj esnasındayken, her bir pil hücrelerinin iç direncinin farklılık göstermesinden dolayı pil hücreleri üzerinde çekeceği akım farklılık gösterecektir ve pil hücrelerindeki gerilim değerleri de değişecektir. Bu durumda her şarj veya deşarj işlemi sonrası dengeleme yapılmadıkça modüller arası gerilim farklılıkları artacak ve deşarj aşamasında batarya enerji kullanım kapasitesinin azalmasına sebep olacaktır. Şarj esnasında ise batarya tam doldurulmadan işlem bitirilmelidir. Aksi takdirde depolanabilecek enerji miktarı azalmakta, ya da başlangıçta gerilim seviyesi en yüksek olan modül diğer modüllerden daha önce şarj olacağından dolayı, gerilim seviyesi başlangıçta düşük olan hücreler doluncaya kadar gerilim seviyesi yüksek olan hücrelerin şarj olmaya



Şekil 7. BY5 kartı (BMS board)

devam etmeye çalışması kullanılabilirlik süresini kısıltacaktır. Dengesiz bir batarya paketinde, şarj sırasında seri bağlı hücrelerden bir veya daha fazlası diğerlerinden önce maksimum şarj düzeyine ulaşacaktır. Bataryanın şarj olmadığı durumda, tam şarj edilmemiş hücreler serideki diğer hücrelerden daha önce tükenecektir. Bu ve benzeri kararsızlıklar batarya paketlerinin en kötü senaryolarıdır. Güvenli ve verimli bir şarj-deşarj işlemi için hücre gerilim seviyelerinin olabildiğince dengeli olması gerekmektedir. Gerilim dengeleme kartı sayesinde bu kararsızlıklar giderilebilir. Basit şekliyle şarj esnasında, sistemde yüksek doluluk durumuna erken ulaşan hücrelerin daha fazla şarj olması engellenir ve diğer hücreler eşitleninceye kadar bekletilir. Deşarj durumunda ise her şarj aşamasında yapılan dengeleme sayesinde zayıf doluluk oranına sahip hücrenin hızlı deşarj olması da engellenmiş olacaktır. Dengeleme işlemi sırasında mikrodenetleyici ile transistör arasında elektriksel yalıtım sağlamak amacıyla transistör anahtarlama işleminde optik yalıtıcı (Opto izolator) tümleşik devresi PC817 kullanılmıştır.

Pasif dengeleme yöntemi ile her bir modüle bağlanan paralel yüksek güçlü dirençler vasıtasıyla en yüksek gerilime sahip hücre enerjisi, sistemdeki en düşük gerilim değerine sahip hücreye eşitleninceye kadar deşarj edilir. Bu işlem, her hücre gerilim seviyesi 3,9 V seviyesine çıktıktan sonra devreye girer ve 4,1 V değerine kadar işlem ara ara tekrarlanır. Bu iki eşik değer aralığında eşitsizlik görüldüğü takdirde dengeleme dirençleri olarak isimlendirilen taş dirençler otomatik olarak devreye alınıp, devreden çıkartılarak modüllerin gerilim dengeleme işlemleri gerçekleştirilmektedir.

4.3.2. Sıcaklık ölçme (Temperature measurement)

Bataryanın sağlık durumları için sıcaklık değerleri oldukça önemlidir. Sıcaklık algılayıcıları (Sensor), bataryanın güvenliği ve şarj-deşarj durumlarının kontrolü için BYS'nin en önemli parçalarındandır. Analog sıcaklık algılayıcıları ise çalışma ortamındaki manyetik alandan etkilenebilmekte olup bu sebeple çalışma kapsamında sayısal sıcaklık algılayıcılarının kullanılması tercih edilmiştir. Uygulama devresinde dijital sıcaklık algılayıcıları olarak DS18B20, 14 ayrı modül için de kullanılmıştır.

Gerilim dengeleme kartı üzerinde BYS'nin kararlı sıcaklık kontrolü için 14 modül için ayrı ayrı sıcaklık algılayıcısı kullanılmış olup bu sıcaklık algılayıcıların kart ile irtibatı Şekil 7'de görüldüğü gibi giriş soketleri ile sağlanmaktadır. Bu algılayıcı soketleri STM32F103 mikrodenetleyicisinin sayısal giriş terminallerine bağlanmıştır. Sıcaklık değerleri BYS ekranından takip edilebilmekte ve ani ısı artışları kolaylıkla gözlemlenebilmektedir. Modüller için belirlenen olağanüstü sıcaklık değeri olan 60°C'de sistemin flaşör şeklinde görüntülü uyarı vermesine ek olarak sesli uyarı olarak da alarm (araç kornası vb.) aktif edilerek eş zamanlı çalıştırılmaktadır. Bu durum beş saniye devam etmesi halinde sistemin ve aracın tüm enerjisi otomatik olarak yüksek güç kapasiteli ana kontaktör yardımı ile kesilebilmektedir.

4.3.3. Akım ölçümü (Current measurement)

Bataryanın şarj ve deşarj işlemleri sırasında çekilen akımı ölçmek ve aşırı akım koruması gerektiğinde şarj işlemi kesme işlemleri için akım kontrolü gereklidir. Alan etkili akım algılayıcıları (current transducer) yüksek akım uygulamalarında montaj kolaylığı ve elektriksel yalıtım sağlamaktadır. Akım algılayıcıları alan etkili özelliği ile yüksek akım değerlerini düşük gerilim seviyelerine dönüştürerek çıkış vermektedir.

Uygulama devresinde Şekil 9'da görüldüğü gibi $\pm 150 A$ arasında akım ölçebilen LEM LA100P alan etkili akım algılayıcısı kullanılmıştır. Ölçülen akım saydırma işlemi ile bataryanın HDD

değeri hesaplanmaktadır. LA100P akım algılayıcısı bataryaya giren ve çıkan akım değerlerini ölçmek için iki adet kullanılmıştır. Akım algılayıcıları, kesintisiz güç kaynaklarında (KGGK), batarya kaynaklı uygulamalardaki kararlılığı sebebiyle sıkça kullanılmaktadır. Bundan dolayı da önerilen uygulama devresinde de batarya bilgilerinin sağlıklı alınmasında başarılı olmuştur. Akım algılayıcısı, manyetik alan etkisi prensibi ile enerji kablosunun akımını ölçerek istenilen kritik verilerin elde edilmesinde etkin rol üstlenmektedir.

4.3.4. Durum LED'leri (Event LEDs)

BYS kartı üzerinde 4 adedi merkezi mikrodenetleyiciye, 1 adedi de ikincil mikrodenetleyiciye ait olmak üzere 5 adet durum LED'i bulunmaktadır. Şekil 7'de merkezi BYS durum ledlerinin konumu görülmektedir. STM32F103'e ait LED, ölçülen sıcaklık değerlerini merkezi denetleyiciye gönderirken yanmaktadır. Sarı LED, batarya gerilimleri ölçümü sırasında yanmaktadır. Mavi LED, şarj durum LED'i olarak kullanılmıştır. Batarya, 10 A'den düşük şarj olurken 5 Hz olarak yanıp sönmektedir. 10 A'den yüksek değerde şarj edilirken ise 1 Hz olarak yanıp sönmektedir. Kırmızı LED, hata bildirimidir. Üç farklı anlam ifade etmektedir. Batarya birimlerinden herhangi biri ölçüm yapmıyorsa 1 Hz olarak yanıp sönmektedir. Sıcaklık algılayıcılarından biri çıkmış veya bozulmuş ise 5 Hz olarak sinyal vermektedir. Batarya gerilimleri tehlikeli seviyede ise 10 Hz olarak uyarı sinyali verir. Yeşil LED, telemetri sisteminin durum bilgisini sunmaktadır. Herhangi bir arıza yok ise sürekli olarak yanmaktadır. Bağlantı hatası var ise 1 Hz olarak yanıp sönmektedir. Telemetri sistemi bağlı değil ise LED yanmamaktadır.

4.3.5. Yalıtımlı haberleşme devresi (Isolated communication circuit)

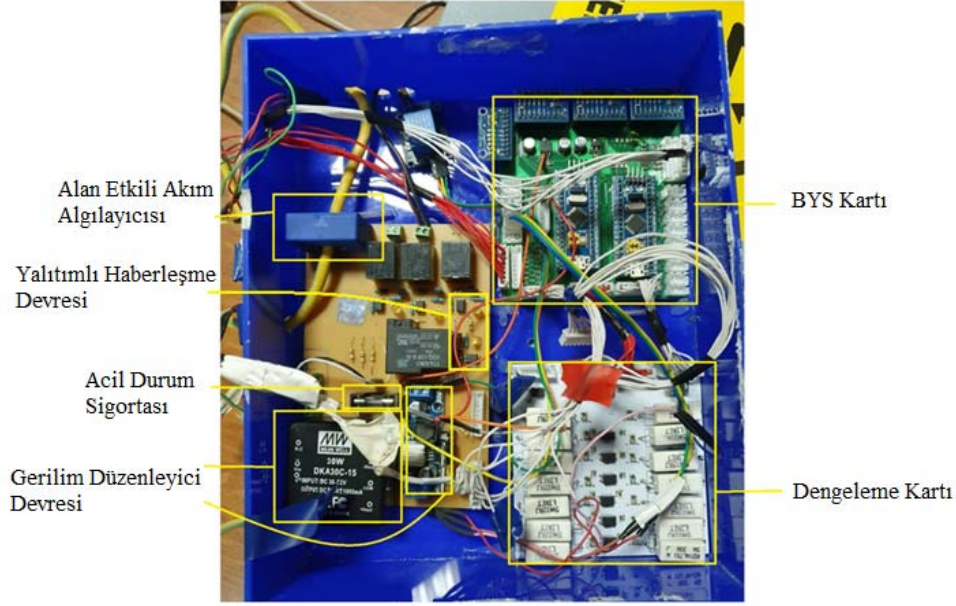
İzoleli haberleşme devresi farklı kaynaklardan beslenen, referans noktası farklı olan cihazlar arasında haberleşme yapmaktadır. Merkezi mikrodenetleyici ile diğer birimler, elektriksel olarak yalıtılmış UART protokolü ile haberleşmektedir. Bağlı oldukları batarya hücresine ait sıcaklık ve gerilim bilgilerini okuyan haberleşme devresi bu bilgileri STM32F103 ana mikrodenetleyicinin UART3 çıkışıyla kullanılarak BYS kartına göndermektedir. Şekil 9'da görülmekte olan haberleşme devresi PC817 optik yalıtıcı tümleşik devresi ile UART-TX sinyali elektriksel olarak yalıtılmaktadır.

4.3.6. Şarj koruma devresi (Charge protection circuit)

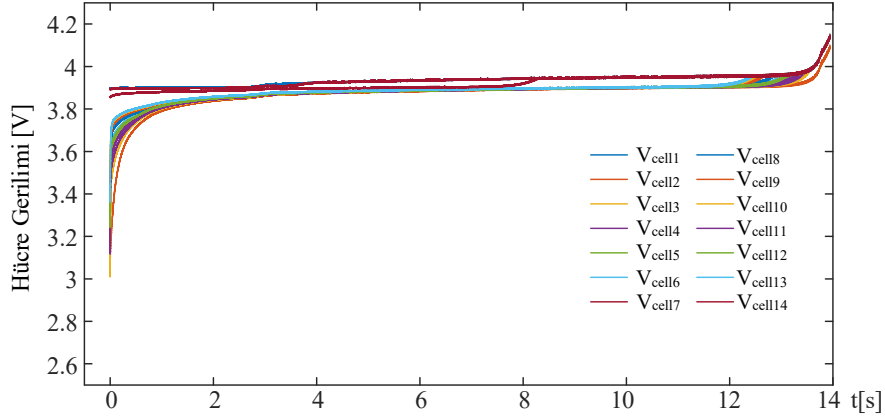
Batarya şarj edilirken oluşabilecek ani durumların önüne geçmek amacıyla batarya şarj işlemi kesilebilir. Batarya şarj durum kontrolü, şarj sırasında tam dolum anında, gerilim dengeleme işlemine girme durumunda, deşarj olma sırasında ise, yüksek akım ve gerilim dengesizliği gibi durumlarda enerji iletişimini kesmektedir. Batarya ile şarj durum kontrolünü sağlamak için devrede 30 A koruma rölesi, PC817 optik yalıtıcı tümleşik devresi ve transistör yardımıyla sürülmektedir. İlgili alan Şekil 9'da (Acil durum sigortası) sunulmuştur.

4.3.7. Gerilim düzenleyici devresi (Voltage regulator circuit)

Akım koruma kartı üzerindeki algılayıcılar ve HMI ekran için gerilim düzenleyici devresi gerekmektedir. Akım algılayıcıları için gerekli olan $\pm 15 V$ gerilimler Mean Well DKA30C-15 gerilim düzenleyicisi ile sağlanmaktadır. Bu düzenleyici ile batarya gerilimi 48 V, $\pm 15 V$ gerilim seviyesine dönüştürülerek sabitlenmektedir. Merkezi mikrodenetleyici için gerekli olan 9 V gerilim, DKA30C-15 çıkışından alınan +15 V gerilimin, LM 7809 düzenleyici tümleşik devresine uygulanması ile sağlanmaktadır. Diğer algılayıcılar ve HMI ekran için gerekli olan 5 V gerilim ise, LM2596 düzenleyici tümleşik devresiyle sağlanmaktadır. Gerilim düzenleyici devresi üstten görünüşü Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Önerilen BYS tabanlı batarya paketinin görünümü (View of the proposed BMS-based battery package)



Şekil 10. Oluşturulan batarya paketinin bu çalışmada önerilen BYS ile 0,082C şarj akımında şarj edilmesi durumunda elde edilen sonuçlar (The results obtained when the generated battery pack is charged at 0.082C charging current with the BMS proposed in this study.)

4.3.8. Besleme gerilimi düzenleyici devresi (Supply voltage regulator circuit)

BYS kartının çalışması için gerekli olan besleme gerilimi, diğer BYS bileşeni olan akım kontrol kartından 9 V olarak alınmaktadır. BYS kartı üzerinde bulunan STM32F103 merkezi mikrodenetleyici için 3,3 V, yardımcı mikrodenetleyici (STM32F103) ve sıcaklık algılayıcılarının çalışması için ise 5 V gerilime ihtiyaç duyulmaktadır. Akım kontrol kartından alınan 9 V'luk gerilim, diğer birimlerin çalışması için gerekli olan 3,3 V ve 5 V gerilim seviyelerine dönüştürülerek sabitlenmektedir. Düzenleyici devresinde YMM kılıflı AMS1117 (3,3 V) ve LM7805 (5 V) gerilim düzenleyici tümleşik devreleri kullanılmaktadır. Şekil 9'da BYS kartı üzerindeki AMS1117 gerilim düzenleyici tümleşik devresinin konumu gösterilmektedir.

4.4. Yazılım Geliştirme (Development of Software of The Proposed BMS)

Önerilen BYS kartında Arm Cortex mikrodenetleyici bulunmaktadır. Mikrodenetleyiciyi programlamak üzere telif hakkı bulunmayan ve

açık kaynaklar içeren Keil μ Vision5 programı tercih edilmiştir. Hücrelerin gerilim ve akım değerlerinin ölçülmesi için kullanılan harici ASD'ler ile I2C haberleşme protokolü için, her bir hücreden alınan gerilim değerlerinin ortalamasının hesaplanması için, ASD'ler ile akım-gerilim ortalamasının alınması işlemlerinden elde edilen değerlerin HMI dokunmatik ekrana yazdırılması için detaylı kodlama yapılmıştır.

4.5. Gerçek-Zamanlı Deneysel Sonuçlar (Real-Time Experimental Results)

Tasarımı ve benzetimi gerçekleştirilen batarya paketi ve BYS'nin şarj anında gerçek-zamanlı olarak testinin gerçekleştirilmesi amacı ile önerilen batarya paketinin her bir paralel hücre grubunun 0,082C şarj akımı ile beslenmesi amaçlanarak 10 A ve 56 V'luk bir anahtarlama güç kaynağı kullanılmıştır. Böylelikle 42 adet paralel ve 14 adet seri hücre grubuna sahip olarak tasarlanan örgütlü batarya paketinin her bir paralel kolu yaklaşık olarak 0,235 A'lık sürekli bir akımla beslenmiştir. Yapılan gerçek-zamanlı test esnasında bazı hücrelerin gerilim değeri daha önceden bir miktar şarj edilerek batarya paketine

konumlandırılmıştır. Bu durumda tüm hücrelerin doluluk durumlarının ve gerilimlerinin başlangıç koşulları eşit ve minimum eşik seviyesinde değildir. Böylelikle hem seri hem de paralel olarak ilintili olan hücrelerin arasında gerilim dengesizliği oluşturularak önerilen BYB kontrol algoritmasının başarımı test edilmiştir. Paralel hücre grupları arasındaki gerilim dengesizliği, benzetim ortamında da doğrulandığı gibi doğal komütasyon ve deşarj yoluyla dengelenmektedir. Seri bağlı hücreler arasında şarj anında meydana gelen gerilim dengesizlikleri ise belirlenen eşik seviyeleri ve sınırları dahilinde önerilen BYB kontrol algoritması ile giderilmiş ve tüm hücre grupları en üst seviye gerilim değerlerine kadar şarj edilmiştir.

Şekil 10'da sunulan gerçek-zamanlı test sonuçları Şekil 4'te sunulan benzetim sonuçları ile çok yakınsamaktadır. Böylelikle önerilen BYB ile yüksek güç altında hücre şarj kontrolü yüksek başarımla sağlanabilmektedir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, anma akımını $3,6V$ ve anma akımı $2,85Ah$ olan Li-iyon hücrelerin kullanılmasıyla oluşturulan bir batarya paketinin daha verimli bir performansla sahip olması amacıyla kısa devre, açık devre, yüksek sıcaklık, yüksek ve düşük gerilim ve aşırı yük akımlarına karşı tüm güç sisteminin korunduğu ve ayrıca şarj ve uyku durumunda bataryaların şarj gerilim dengelemelerinin kararlı bir şekilde yapıldığı iyileştirilmiş pasif dengeleme yöntemi ile yeni bir BYB gerçek-zamanlı olarak gerçekleştirilmiş ve test edilmiştir. BYB'de tüm ölçüm verileri ARM tabanlı STM32F103 işlemciler aracılığıyla HMI Nextion ekran üzerinden takip edilebilir hale getirilmiş olup bu durum oluşabilecek olumsuzlukların önceden tespit edilebilmesi imkanını sağlamaktadır. Ayrıca tasarlanan BYB ve batarya paketinin belirli akım ve gerilim sınırlamaları altında farklı gerilim ve akım değerlerinde bir enerji kaynağı elde etmek için uyarlanabilir bir yapıya da sahip olması endüstriyel odaklı bir ürün olarak tercih edilebilirlik olasılığını artırmaktadır.

Önerilen BYB, tek bir merkezi işlemci birimiyle yönetilebilir olması nedeni merkezi BYB sınıfına dahil olmaktadır. Sıcaklık bilgilerinin DS18B20 algılayıcısı ile 14 ayrı modül için de elde edilip merkezi işlem birimine gönderen ikincil denetleyici ise bu işlemi UART protokolü aracılığıyla gerçekleştirmiştir. Genel olarak bakıldığında ikincil denetleyici sadece sıcaklık verilerinin ölçülmesi ve merkezi işlem birimine gönderilmesinden sorumlu iken, merkezi işlem birimi; hücre gerilimlerini, batarya toplam akımını ve yardımcı mikrodenetleyiciden kendisine gelen sıcaklık bilgilerini kullanarak gerilim dengelemesi yapma, şarj işlemi devreye alma ve devre dışı bırakabilme, deşarjı başlatma-durdurma ve aşırı akım, yüksek sıcaklık, düşük gerilim ve yüksek gerilim gibi hataların oluşması durumunda enerjii tamamen kesebilme gibi işlemlerin yönetimini sorunsuzca gerçekleştirmektedir.

MATLAB-Simulink benzetim ortamında oluşturulan batarya paketinin önerilen BYB kontrol algoritması ile farklı şarj-akım değerlerinde sırasıyla 1C şarj akımı, 0,5C şarj akımı, 0,082C şarj akımı ile şarj edilmesi durumundaki hücre gerilim değişimindeki sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu sonuçlar kapsamında, farklı şarj akımı değerlerinde batarya paketinin şarj edilmesi durumunda önerilen BYB yapısının kontrol başarımı ve her seri hücrenin şarj esnasında gerilim seviyesinin değişimi verilmiştir. Bu doğrultuda, hücre gerilimlerinin başlangıç koşul değerleri, zorlayıcı bir benzetim senaryosu oluşturmak için birbirinden farklı olarak tanımlanmıştır. Şarj esnasında meydana gelen gerilim dengesizliklerinin önerilen pasif dengeleme yöntemi temelli BYB ile hızlı bir şekilde giderildiği ve tüm hücrelerin şarj süreçlerinin dengeli ve kararlı bir şekilde yüksek bir başarımla sağlandığı gösterilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarının gerçek-zamanlı test sonuçları ile

yüksek oranda tutarlılık içerisinde olması, önerilen BYB'nin özellikle elektrikli tüm araçlar için gerçek-zamanlı bir araştırma ve geliştirme ürünü olduğunu ve yerleşme ve millileşme kapsamında önemli bir adım niteliği taşıdığını sergilemektedir.

Önerilen BYB'nin gerçek-zamanlı şarj ve deşarj test performansı, güvenilirliği, kararlılığı ve verimliliği ortaya koyulmuş olup, ileriki çalışmalarda aktif dengeleme yöntemi tabanlı ve kullanıcı tarafından parametre değerleri tanımlanabilir bir sistem geliştirilmesi ve böylelikle güç, gerilim ve akım kapasitesi ayarlanabilir sistem uyarlamalı bir BYB'nin tasarlanması öngörülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Tasarlanan BYB, 2019 TÜBİTAK Efficiency Challenge Elektrikli Araç Yarışları kapsamında yerlilik onayı almış olup Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'ni yarışlarda temsil etmiştir. 2019 Elektrikli Araç Yarışları kapsamında tüm Türkiye üniversiteleri arasından, "Elektrikli Araç Ana Bileşeni Olarak Geçen Batarya Yönetim Sistemi Kullanıcı Dostu Olması ve Tasarım Özellikleri Bakımından En İyi Teknik Tasarım Ödülü"nü almaya hak kazanmıştır. Yazarlar, TÜBİTAK'a ve TEKNOFEST Havacılık, Uzay ve Teknoloji Festivali düzenleme komitesine teşekkür eder.

Kaynaklar (References)

1. Barlak C. And Özkazanç Y., Battery cappacity estimation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (1), 185-191, 2011.
2. Chan C. C. and Chau K. T., Modern electric vehicle technology, Oxford University Press, 2001.
3. Daud Z. H. C., Asus Z., Bakar S. A. A., Husain N. A., Mazali I. I., Chrenko D., Thermal characteristics of a lithium-ion battery used in a hybrid electric vehicle under various driving cycles, IET Electrical Systems in Transportation, 10 (3), 243-248, 2020.
4. Das U. K., Shrivastava P., Tey K. S., Idris M. Y. I. B., Mekhilef S., Jamei E., Seyedmahmoudian M., Stojcevski A., Advancement of lithium-ion battery cells voltage equalization techniques: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 1-29, 2020.
5. Hannan M. A., Hoque M., Yusof Y., Ker P. J., State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations, IEEE Access, 6, 19362-19378, 2018.
6. Lipu M. S. H., Hannan M. A., Hussain A., Ayob A., Saad M. H. M., Karim T. F., How D. N. T., Data-driven state of charge estimation of lithium-ion batteries: Algorithms, implementation factors, limitations and future trends, Journal of Cleaner Production, 277, 1-29, 2020.
7. Sarkurt T. and Balıkcı A., A novel energy management system for full electric vehicles, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2), 323-333, 2017.
8. Zau A. T. P., Cowdhury S. P. D., Olwal T. O., Review of Battery Management Strategy in Hybrid Lead-Acid-Lithium-Ion Energy Storage System for Transport Vehicles, IEEE Conference on PES/IAS PowerAfrica, Nairobi, Kenya, 1-5, 25-28 Ağustos, 2020.
9. Das. U. K., Shrivastava P., Tey K. S., Idris M. Y. I. B., Mekhilef S., Jamei E., Seyedmahmoudian M., Stojcevski A., Advancement of lithium-ion battery cells voltage equalization techniques: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 1-29, 2020.
10. Thiruvonasundari D. and Deepa K., Optimized Passive Cell Balancing for Fast Charging in Electric Vehicle, IETE Journal of Research, 1-9, 2021.
11. Liu C., Li K., Liu X., Wang Y., Distributed unknown input and state estimation for nonlinear multi-agent systems with applications to battery management, IEEE Transactions on CSEE Journal of Power and Energy Systems, Early Access, 1-14, 2020.
12. Lipu M. S. H., Hannan M. A., Hussain A., Hoque M. M., Ker P. J., Saad M. H. M., Ayob A., A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations, Journal of Cleaner Production, 205, 115-133, 2018.
13. Shen P., Ouyang M., Lu L., Li J., Feng X., The Co-estimation of State of Charge, State of Health, and State of Function for Lithium-Ion

- Batteries in Electric Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67 (1), 92-103, 2018.
14. Xiong R., Li L., Tian J., Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods, Journal of Power Sources, 405, 18-29, 2018.
 15. Stuart T., Fang F., Wang X., Ashtiani C., Pesaran A., A modular battery management system for HEVs, SAE Transactions on Journal of Passenger Cars: Electronic and Electrical Systems, 111 (7), 777-785, 2002.
 16. Zheng M., Qi B., Wu H., A Li-ion battery management system based on CAN-bus for electric vehicle, 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore, 1180-1184, 3-5 Haziran, 2008.
 17. Qaisar S. M., Dallet D., Desprez P., Benjamin S., An evaluation methodology for the Li-Ion battery multiplexed voltage measurement systems, IEEE Conference on Instrumentation & Measurement Technology, Austin, TX, ABD, 1-4, 3-6 Mayıs, 2010.
 18. Shi-qi A., An-ning Q., Yu-wei Z., Design and realization of SPI interface in lithiumion battery voltage measuring system, 6th International Conference on Computer Sciences & Education (ICCSE), Singapore, 83-87, 3-5 Ağustos, 2011.
 19. Baronti F., Fantechi G., Roncella R., Saletti R., High-efficiency digitally controlled cSharge equalizer for series-connected cells based on switching converter and super-capacitor, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 9 (2), 1139-1147, 2013.
 20. Thiruvonasundari D. and Deepa K., Optimized Passive Cell Balancing for Fast Charging in Electric Vehicle, IETE Journal of Research, Ahead-of-Print, 1-9, 2021.