

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK GERİLİMLİ BATARYA SİSTEMİ VE YÖNETİM  
ALGORİTMASI

Fırat YARAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Programı

Danışman

Doç.Dr. Umut Engin AYTEN

Şubat, 2024

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK GERİLİMLİ BATARYA SİSTEMİ VE YÖNETİM  
ALGORİTMASI

Fırat YARAT tarafından hazırlanan tez çalışması 09.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik ve Haberleşme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Umut Engin AYTEN  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nihan KAHRAMAN, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gürkan SOYKAN, Üye

Bahçeşehir Üniversitesi

---

---

---

Danışmanım Doç. Dr. Umut Engin AYTEN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Yüksek Gerilimli Batarya Sistemi ve Yönetim Algoritması Başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Fırat YARAT



*Aileme  
ve  
eşime*

## TEŞEKKÜR

---

Çalıőmalarım boyunca tecrübesi ve bilgi birikimiyle bana her zaman yol gösteren, çalıőmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Umut Engin AYTEN' e çok teşekkür ederim.

Her zaman maddi manevi destek vererek beni bugünlere getiren aileme, hiçbir konuda manevi desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma sevgilerimi sunarım.

Fırat YARAT



# İÇİNDEKİLER

<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>v</b>
<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xv</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti.....	2
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Hipotez.....	4
<b>2 BATARYA TEKNOLOJİSİ</b>	<b>5</b>
2.1 Batarya Sistemi.....	5
2.2 Batarya Yönetim Sistemi.....	7
<b>3 SİSTEM TASARIMI</b>	<b>10</b>
3.1 Sistem Giriş Parametreleri ve Değişkenleri.....	11
3.2 Batarya Sistemi Topolojisi.....	13
3.3 Tasarımın Gerçekleştirilmesi.....	16
3.3.1 Sistem Tesis Modeli (mdl_Plant).....	16
3.3.1.1 Batarya Paketi.....	16
3.3.1.2 DC/DC Dönüştürücü.....	24
3.3.1.3 Anahtarlama Kutusu.....	26
3.3.1.4 Ölçüm ve Koruma Elemanları.....	28
3.3.2 Sistem Kontroller Modeli (mdl_Ctrl).....	29
<b>4 SİSTEM ENTEGRESİ VE ANALİZLERİ SONUÇLARI</b>	<b>34</b>
4.1 Batarya Sistem Entegrasyonu.....	34
4.2 Batarya Sistem Analizi ve Sonuçları.....	35
4.2.1 Farklı C-rate Değerlerinde Batarya Performansı.....	35
4.2.1.1 5C-rate Deşarj Durumunda Batarya Performansı.....	35
4.2.1.2 1C-rate Deşarj Durumunda Batarya Performansı.....	40

4.2.2 Çıkış Kısa Devre Durumunda Batarya Performansı.....	44
4.2.3 Şarj Durumu Batarya Performansı.....	45
4.2.4 Elektrikli Araç Güç Tüketiminde Batarya Performansı.....	48
4.2.4.1 Eşit Şarj Doluluk Oranında Batarya Performansı.....	49
4.2.4.2 Farklı Şarj Doluluk Oranında Batarya Performansı.....	52
<b>5 SONUÇLAR</b>	<b>55</b>
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>56</b>
<b>EK-A</b>	<b>59</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>60</b>



## SİMGE LİSTESİ

---

I	Akım
V	Gerilim
$R_{b\_in}$	Batarya Hücresi İç Direnci
Ah	Amper Saat
SOC(t)	t Zamanındaki Bataryanın Doluluk Oranı
$\Delta t$	Zaman Artışı
$^{\circ}\text{C}$	Celsius Degree
$\Omega$	Ohm
Wh	Watt-saat

## KISALTMA LİSTESİ

---

ADG	Açık Devre Gerilimi
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
BP	Batarya Paketi
BPs	Batarya Paketleri
C-rate	Batarya Şarj/Deşarj Oranı
DC	Doğru Akım
EA	Elektrikli Araçlar
HV	High Voltage
HT	High Temperature
I/O	Input / Output (Giriş/Çıkış)
LIB	Lityum-İyon Batarya
Li-ion	Lityum İyon
LiFePO4	Lityum Demir Fosfat
LiPo	Lityum Polimer
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LMO	Lityum Mangenez Oksit
LT	Low Temperature
LV	Low Voltage
MATLAB	Matrix Laboratory
NiCd	Nikel-Kadmiyum
NiMH	Nikel Metal Hidrit
PHEV	Şarj edilebilir Hibrit EA
Pb-Acid	Kurşun Asit
SOC	State of Charge
SOH	State of Health veya Sağlık Durumu
SOA	Safe Operating Area

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Batarya Hücresi Güvenli Çalışma Bölgesi (SOA) .....	8
Şekil 2. 2 Batarya Dengeleme Sistemi Çeşitleri.....	8
Şekil 3.1 Batarya Paketi Mimarisi.....	13
Şekil 3.2 Önerilen Batarya Sistem Mimarisi .....	14
Şekil 3.3 Tasarım BYS Topolojisi.....	15
Şekil 3.4 Simulink® Simscape Batarya Hücre Modeli ve Tasarım Parametreleri.....	17
Şekil 3.5 Batarya Paketi Hücre Gerilimleri .....	18
Şekil 3.6 Batarya Paketi Pasif Dengeleme Akış Şeması .....	19
Şekil 3.7 SOC Değerlendirme Modeli.....	19
Şekil 3.8 BP1 Modeli .....	20
Şekil 3.9 Batarya Hücresi Gerilim Değişimi ve Uygulanan Pasif Dengeleme Sinyali ..	21
Şekil 3.10 BP1, Modül-1 ve Modül-2 Benzetim Sonuçları.....	23
Şekil 3.11 DC/DC Dönüştürücü .....	24
Şekil 3.12 DC/DC Dönüştürücü Benzetim Modeli ve Sonuçları .....	25
Şekil 3.13 Anahtarlama Kutusu.....	26
Şekil 3.14 Anahtarlama Kutusu Benzetim Modeli ve Sonuçları.....	27
Şekil 3.15 Akım/Gerilim Okuma Sensorları .....	28
Şekil 3.16 Koruma Fonksiyonları; Ön Şarj, Deşarj, Şarj Devresi ve Sigorta (Fuse) .....	29
Şekil 3.17 Sistem Kontroller Modeli (mdl_Ctrl).....	30
Şekil 3.18 Pasif Dengeleme Aktif Akış Şeması .....	32
Şekil 3.19 Aktif Dengeleme Algoritması Akış Şeması .....	33
Şekil 4.1 Batarya Sistemi Entegrasyonu .....	34
Şekil 4.2 Dış Ortam, Araç Modeli.....	35
Şekil 4.3 5C-rate Yükleme Çıkış Profilleri ve Batarya Paketleri SOC Değişimi.....	36
Şekil 4.4 5C-rate Yüklemede Aktif Dengeleme Anahtarlama BPs Çıkış Profilleri.....	37
Şekil 4.5 5C-rate Deşarj Durumunda DC/DC Dönüştürücü Giriş/Çıkış Profilleri.....	37
Şekil 4. 6 Hücre Gerilim Değişimi .....	38
Şekil 4.7 5C-rate Deşarj 'da BP1-Modül-2 Hücre Gerilim Değişimleri .....	39
Şekil 4.8 5C-rate Deşarj 'da BP3-Modül-1 Hücre Gerilim Değişimleri .....	39
Şekil 4.9 1C-rate Yükleme Çıkış Profilleri ve Batarya Paketleri SOC Değişimi.....	40
Şekil 4.10 1C-rate Yüklemede Aktif Dengeleme Anahtarlama BPs Çıkış Profilleri.....	40
Şekil 4.11 1C-rate Deşarj Durumunda DC/DC Dönüştürücü Giriş/Çıkış Profilleri.....	41

<b>Şekil 4.12</b>	1C-rate Deşarj 'da BP2-Modül-2 Pasif Anahtarlama ve Hücre Gerilimleri .	<b>42</b>
<b>Şekil 4.13</b>	1C-rate Deşarj 'da BP2-Modül-1 Hücre-1 Pasif Anahtarlama ve Gerilimi ..	<b>43</b>
<b>Şekil 4.14</b>	Mekanik Kısa Devre Koruması, FUSE Etkin .....	<b>44</b>
<b>Şekil 4.15</b>	Yazılımsal Kısa Devre Koruması, BYS Etkin .....	<b>45</b>
<b>Şekil 4.16</b>	Şarj Durumu Batarya Profilleri .....	<b>46</b>
<b>Şekil 4.17</b>	Şarj Durumunda Aktif Dengeleme Anahtarlama BPs Çıkış Profilleri.....	<b>46</b>
<b>Şekil 4.18</b>	Şarj Durumunda DC/DC Dönüştürücü Giriş/Çıkış Profilleri .....	<b>47</b>
<b>Şekil 4.19</b>	BP3-Modül-1 Pasif Dengeleme Anahtarlama sinyalleri ve Hücre Gerilimleri .....	<b>48</b>
<b>Şekil 4.20</b>	EA Sürüş ve Güç Profili.....	<b>49</b>
<b>Şekil 4.21</b>	EA Profilinde Batarya Sistemi Profilleri, SOC Aynı .....	<b>49</b>
<b>Şekil 4.22</b>	EA Sürüş Profilinde Batarya Sistemi Çıkış Profilleri, SOC Aynı .....	<b>50</b>
<b>Şekil 4.23</b>	EA Sürüş Profilinde DC/DC Dönüştürücü V&I Profilleri, SOC Aynı .....	<b>50</b>
<b>Şekil 4.24</b>	BP3-Module2 Pasif Dengeleme Anahtarlaması ve Hücre Gerilimleri .....	<b>51</b>
<b>Şekil 4.25</b>	EA Profilinde Batarya Sistemi Profilleri, SOC Farklı .....	<b>52</b>
<b>Şekil 4.26</b>	EA Sürüş Profilinde Batarya Sistemi Çıkış Profilleri, SOC Farklı.....	<b>52</b>
<b>Şekil 4.27</b>	EA Sürüş Profilinde DC/DC Dönüştürücü V&I Profilleri, SOC Farklı .....	<b>53</b>
<b>Şekil 4.28</b>	BP3-Module1 Pasif Dengeleme Sinyalleri ve Hücre Gerilimleri .....	<b>54</b>

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 2.1</b> BYS Kontrol Topolojileri Karşılaştırması.....	<b>9</b>
<b>Tablo 3.1</b> Yüksek Gerilimli Seviyeli Batarya Kullanımın Avantajları.....	<b>10</b>
<b>Tablo 4.1</b> Aktif ve Pasif Dengelemenin Batarya Sistem Performans Etkisi.....	<b>43</b>



## Yüksek Gerilimli Batarya Sistemi ve Yönetim Algoritması

Fırat YARAT

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Umut Engin AYTEN

Elektrikli araçların popülaritesinin artmasıyla birlikte, kullanıcıların beklentilerini karşılayacak fonksiyonelliklere yönelik talepler de artmaktadır. Bu durum, artan elektriksel güç ihtiyacını karşılamak amacıyla düşük gerilimli batarya sistemlerinin yerini daha yüksek gerilimli batarya sistemlerinin almasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, uzun menzil ve üstün sürüş performansı için enerji yoğunluğu yüksek batarya teknolojilerine duyulan ihtiyaç artmaktadır. Günümüz teknolojisinde lityum iyon (Li-ion) bataryalar en önemli seçenek olarak öne çıkmaktadır. Li-ion bataryaların verimli kullanımı, hücre seviyesinde belirlenen güvenlik sınırları içinde çalıştırılmasını gerektirmektedir. Bu sınırların dışında çalıştırılması, batarya hücresinin aşırı yıpranmasına (yaşlanma) yol açabilmektedir. Bu nedenle, batarya hücre gerilimi sürekli olarak kontrol altında tutulmaktadır. İstenilen gerilim seviyesine ulaşabilmek için batarya hücreleri seri olarak bağlanmakta, sistem güç ihtiyacına göre batarya kapasitesi belirlenmekte ve bu kapasiteye ulaşmak için batarya hücreleri paralel olarak bağlanmaktadır. Batarya sisteminde kullanılan hücre sayısı arttıkça, sistem karmaşıklığı artmakta ve kontrolü zorlaşmaktadır. Bu tasarımda, pasif hücre dengeleme algoritmasını içeren batarya paketleri tasarlanmıştır. Bu batarya paketleri, seri bağlanarak istenilen gerilim ve kapasite değerlerine ulaşmıştır. Sistemin daha güvenli ve verimli işleyebilmesi için koruma elemanları entegre edilmiştir. Ayrıca, batarya paketleri seviyesinde dengelenmenin sağlanması amacıyla DC/DC Dönüştürücü tabanlı aktif dengeleme sistemi geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Batarya Sistemi, Pasif Dengeleme, DC/DC Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme Sistemi, Batarya Yönetim Sistemi, Modelleme ve Simülasyon



## **High Voltage Battery System and Management Algorithm**

Firat YARAT

Department of Electronics and Communication Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Umut Engin AYTEN

With the rise in popularity of electric vehicles, there is an increasing demand for functionalities that meet users' expectations. This situation necessitates the transition from low-voltage battery systems to higher-voltage battery systems to satisfy the growing electrical power requirements. Furthermore, there is an increasing need for high energy density battery technologies to achieve long range and superior driving performance. In today's technology, lithium-ion (Li-ion) batteries emerge as the most significant option. Efficient use of Li-ion batteries requires operation within the safety limits determined at the cell level. Operating outside these limits can lead to excessive wear (aging) of the battery cell. Therefore, the battery cell voltage is continuously monitored. To reach the desired voltage level, battery cells are connected in series, the battery capacity is determined based on the system's power needs, and to achieve this capacity, battery cells are connected in parallel. As the number of cells used in the battery system increases, the complexity of the system increases, making control more challenging. In this design, battery packs incorporating a passive cell balancing algorithm have been devised. These battery packs have achieved the desired voltage and capacity values by being connected in series. For a safer and more efficient operation of the system, protection components have been integrated. In addition, a DC/DC Converter-based active balancing system has been developed to achieve balancing at the battery pack level.

**Keywords:** Battery System, Passive Balancing, DC/DC Converter Based Active Balancing System, Battery Management System, Modeling and Simulation



---

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING**

Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli depolanma ihtiyacı, elektrikli araç (EA) teknolojisinin gelişmesi ve yaygınlaşması enerji depolama sistemlerine olan talebi önemli derecede arttırmıştır. Enerjinin daha verimli depolanması için batarya teknolojisine olan yatırımlar artmış ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya hücreleri tasarımı yapılmaktadır [1]. Batarya teknolojisinin gelişmesiyle depolanan enerji miktarı ve kullanımı daha da artacaktır. Bu çerçevede batarya hücresinin üretiminden elden çıkarmaya kadar olan işlemler için bir dizi standart tanımlanmıştır (IEC 62133, IEC 62660, SAE (Society of Automotive Engineers) standartları vb.). Bu standartlar çerçevesinde depolanan enerjinin verimli, emniyetli ve güvenilirlik ile kullanılması kapsamında ek önlemler ve kontrol devrelerine ihtiyaç olmuştur. Bu ek önlemler ve kontrol devreleri ile batarya sisteminin verimliliği arttırılmakta ve depolama alanında sürdürülebilir ve maliyetli bir çözüm getirilmektedir.

EA teknolojisinde temel ve/veya yardımcı güç kaynağı batarya olacağı için talep edilen gücün batarya sistemi tarafından karşılanması gerekmektedir. Uzun menzil, performans gibi kriterler düşünüldüğünde ise yüksek gerilim seviyeli ve yüksek kapasiteli batarya sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapasitelerde yüksek sayıda batarya hücresi kullanımı gerekeceğinden, sistem karmaşıklığı artacaktır. Ayrıca, batarya sistemin verimli ve güvenilir çalışabilmesi için pasif/aktif dengeleme sistemlerine, güç ve/veya batarya yönetim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektrikli araçlarda güvenilir, verimli ve az yer kaplayan batarya sistemi tasarımı EA performansı için önem taşımaktadır. Bu nedenle batarya sistemi için olası tasarımlardan en optimal çözüm izlenmelidir. Yüksek gerilimli batarya sistemi; araç sistem entegresinin kolay olması, araç içerisinde kullanılan kablo çapının düşük olması (ağırlık etkisi), hızlı şarj süresi sağlaması gibi avantajlardan dolayı tercih edilmektedir. Yüksek gerilimli sistemler için ek koruma ve kontrol ihtiyacının olması ise dezavantaj olarak (ek maliyet) görülmektedir. Batarya sisteminde kullanılacak hücreler zamanla uyumsuzluk gösterebileceğinden (farklı cevap süreleri, gerilim seviyeleri ve kapasite değeri) koruma ve dengeleme sistemleri optimal olarak tasarlanmalıdır [2].

Li-ion batarya kullanımlarında şarj/deşarj işlemlerinde bu uyumsuzluklara bağlı olarak hücrelerde ısıl sürüklenme (thermal runaway) oluşabilmektedir. Benzer şekilde kontrol, hücre dengelemesi ve koruma önlemlerinin yetersiz kalmasından batarya sisteminde ömür kısalmasına neden olacaktır. Bu gibi durumları önlemek için batarya yönetim sistemi (BYS) ile tüm hücre gerilimleri takip edilmekte ve olası bir hata durumunda (akım/gerilim, sıcaklık) sistem korumaktadır [3]. Ayrıca, batarya sistemi (ve/veya modülleri) için şarj doluluk durumu (SOC) sürekli olarak hesaplanmakta ve buna bağlı olarak sistem koruması yapılmaktadır. Batarya kapasitesinde iç sızıntı kayıplarından hücre dengesizlikleri olacağından sağlık durumu (SOH) takip edilmektedir [4]. Ayrıca, batarya hücreleri şarj/deşarj oranına (C-rate) bağlı olarak hücre ömrü değişmektedir.

Not: 1C-rate (1C); bir bataryanın nominal kapasitesi olarak tanımlanır ve bir saat içinde tamamen şarj edilebilir veyadeşarj edilebilir olduğu anlamına gelmektedir.

## 1.1 Literatür Özeti

Elektrikli araçlarda (EA), PHEV (Şarj edilebilir Hibrit EA) vb. kullanılan batarya paketleri çok sayıda batarya hücresinin seri (yüksek gerilim seviyesi için) ve paralel (kapasite için) bağlanmasıyla oluşmaktadır. Bu batarya hücrelerinde kullanıma bağlı olarak zamanla kapasite, iç direnç ve SOC özelliklerinde farklılaşmalar oluşmaktadır. Bu nedenle hücreler arasındaki dengeyi sağlamak ve hücre bilgilerinin izlemek için BYS gerekmektedir [5].

Lityum-iyon (Li-ion) batarya hücre dengelemesinde en yaygın ve ekonomik yöntem olan pasif dengeleme sistemleri kullanılmaktadır [6]. Bu yöntem maliyet açısından verimli olduğu için elektrikli araçlarda tercih edilmektedir. Ancak, yüksek gerilimli büyük batarya sistemleri, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu için pasif dengelemenin etkinliği sınırlı olabilmektedir. Ayrıca, en düşük batarya hücresi kapasitesine göre batarya sistemi performansı belirlendiği için zamanla hücreler arasındaki kapasite bozuklukları artmakta ve batarya ömrü azaltmaktadır [7], [8]. Batarya sisteminde, en düşük kapasiteli batarya hücresinin etkisini azaltmak için aktif dengeleme veya hibrit dengeleme sistemleri kullanılmaktadır [9].

Aktif dengeleme sistemlerinde enerji yüksek verimlikle bir hücreden (veya hücre grubun) diğer hücreye (veya hücre grubu) transfer edilmektedir. Böylelikle sürekli olarak kapasite dengesi sağlanmaktadır. Aktif dengeleme sistemlerinde kapasite elemanları veya güç dönüştürücüleri kullanılarak yapılmaktadır.

Kapasite bazlı batarya hücre dengelemesi bir kapasite veya kapasite grubunun batarya hücresi bağlantısının farklı metotlarla ile yapılıp kontrol edilmesiyle gerçekleşmektedir [10], [11], [12], [13]. Burada kapasitede biriken enerji ile daha düşük gerilim seviyesindeki hücrelere enerji aktarılmaktadır.

Farklı topoloji ve tipteki güç dönüştürücüleri ile enerji transferi hızlı ve verimli olarak yapılabilmektedir [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20]. Uygulamaya bağlı olarak batarya hücresi/modülü ile güç dönüştürücü bağlantı yapısı değişmektedir. DC /DC Dönüştürücü tabanlı aktif dengeleme sistemi kullanılan dönüştürücü topolojine bağlı olarak performans ölçütleri ile değerlendirilmelidir [21], [22].

Kullanılacak aktif ve/veya pasif dengeleme sistemi topolojisine bağlı olarak BYB' nin kapsamı belirlenmelidir. Batarya Sistemi dengeleme algoritması kontrol değişkeni gerilim, kapasite veya şarj doluluk oranı olabilir.

Dengeleme algoritması kontrol değişkeninin batarya gerilimi (terminal voltaj) seçilmesi durumunda, önceden batarya karakteristiğine bağlı olarak belirlenmiş güvenli çalışma alanında oluşabilecek gerilim farkı değişkeni eşik değeri olarak belirlenmektedir. Bu eşik değerine bağlı olarak okunan hücre gerilimleri bu eşik değerinden büyük ise anahtarlama sinyali gönderilir [23], [24].

SOC tabanlı dengeleme algoritmasıyla yüksek şarj dolduğundaki bataryadan düşük olana anahtarlama yaparak enerji transferi yapmaktadır. Gerilim tabanlı dengeleme algoritmasına göre doğruluğu daha yüksektir. Ancak, doğrudan ölçümü mümkün olmadığından batarya açık devre gerilimi (ADG) referans verilerek kontrolcü tarafından sürekli hesaplama yapılarak izlenilmektedir [25], [26].

Kapasite (C) tabanlı dengeleme batarya hücrelerinin şarj edilebilir, deşarj edilebilir ve toplam kapasite bilgilerine bağlı olarak yapılmaktadır. Batarya kullanımına bağlı olarak iç-direnç değişimi olacağından zamanla kullanılabilir kapasite azalacaktır. Dengeleme akımı kapasiteye bağlı olarak kontrol edilerek maksimum enerji kullanılabilirliği sağlamaktadır [27], [28].

## 1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmasının amacı, elektrikli araçlarda kullanılan yüksek gerilim seviyelerine yönelik modüler bir batarya sistemi tasarımının gerçekleştirilmesidir. Bu amaç doğrultusunda, batarya sistemi için sistem mimarisinin oluşturulması, bu sistem dahilinde optimize edilmiş pasif dengeleme (batarya paketi seviyesinde), aktif dengeleme (DC/DC Dönüştürücü tabanlı) ve güç yönetimi algoritmalarının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Ayrıca, oluşturulan sistem mimarisinin tesis ve kontrol modelleri detaylı olarak MATLAB/Simulink® platformu üzerinde modellenip, benzetimleri gerçekleştirilecektir. Tasarım benzetim sonuçlarına dayanarak elde edilen bulgular ışığında geliştirilen sistemin avantajları detaylı bir şekilde sunulması planlanmaktadır. Benzetimler sayesinde, tasarlanan yüksek gerilimli modüler batarya sisteminin fonksiyonelliği, verimliliği değerlendirilecek ve endüstriyel uygulamalardaki kullanılabilirliğinin anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

## 1.3 Hipotez

Yüksek gerilim seviyeli elektrikli araç batarya sisteminde modüler bir topolojinin kullanılması ve optimize edilmiş pasif dengeleme, aktif dengeleme (DC/DC tabanlı güç dönüştürücü ile) ve batarya yönetim algoritmalarının kullanımı önerilmektedir. Bu modüler yapı ve kontrol algoritmalar ile elektrikli araç batarya sistemlerinin verimliliği, ömrü ve güvenilirliği önemli ölçüde artırılabilir olduğu gösterilecektir. Bu kapsamda, batarya sisteminin tüm alt bileşenlerinin fonksiyonel ve/veya davranışsal tasarımları özgün olarak gerçekleştirilecek ve benzetimlerle değerlendirilecektir. Bu benzetim sonuçlarına dayanarak oluşturulan pasif dengeleme, aktif dengeleme ve batarya yönetim algoritmasının sistem performansı üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Ayrıca, sistem verimliliğini arttırmak için batarya paketleri seviyesinde DC/DC dönüştürücü tabanlı aktif dengeleme yapılacaktır. Batarya sisteminin tüm alt bileşenleri modellenerek oluşturulan batarya topolojisinin ve yönetim algoritmasının endüstriyel alanda uygulanabilir olması hedeflenmiştir.

Batarya, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve ihtiyaç duyulduğunda depolanan enerjiyi elektrik enerjisine çeviren bir sistemdir. Batarya sistemi ise seri ve/veya paralel bağlı hücre / hücre gruplarından oluşmakta olup yazılımsal ve donanımsal koruma fonksiyonları içeren (BYS) sistem bütünüdür. Batarya sisteminin temel amacı, belirli standartlar doğrultusunda enerjinin depolanması/ kullanılması (şarj/deşarj) sağlamak ve sistemin verimliliğini, güvenliğini ve güvenilirliğini artırmak olarak tanımlanmaktadır [29].

### **2.1 Batarya Sistemi**

Batarya sistemi ve bileşenlerini anlaşılır kılmak için temel kavramların bilinmesi gerekmektedir. Bu kavramlar, batarya sistemlerinin temel işleyişini ve bileşenlerini anlamak için kullanılır ve batarya yönetimi, tasarımı ve bakımı süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Batarya hücresi (enerji depolama birimi), anot (pozitif elektrot) ve katot (negatif elektrot) ile elektrolitten oluşur. Elektrolit, anot ve katot arasında bulunan iletken bir madde olarak görev yapar. Bir veya birden fazla batarya hücresinin bir araya gelmesiyle batarya modülleri ve/veya batarya paketleri (BPs) oluşturulur. Batarya hücresinin veya paketinin maksimum enerji depolama kapasitesi, genellikle amper-saat (Ah) veya Watt-saat (Wh) cinsinden kapasite olarak tanımlanır.

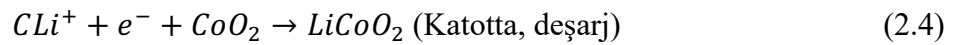
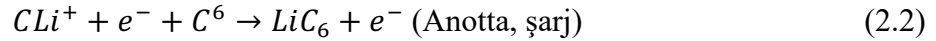
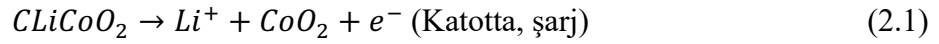
Bataryanın güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak (kullanılan yazılım ve/veya donanım kontrolleri), şarj vedeşarj süreçlerini kontrol etmek ve farklı hücreler arasındaki enerji eşitsizliğini gidermek (dengeleme işlemi; Balancing) için batarya yönetim sistemi (BYS) gerekmektedir. YYS, bataryanın mevcut enerji seviyesini, SOC (State of Charge), ve bataryanın sağlık durumunu, SOH (State of Health), hesaplayıp izlemektedir.

BYS koruma fonksiyonları, batarya kimyasına bağlı olarak, batarya gerilim seviyesi, çekilen akımı ve sıcaklık değerine belirlenmektedir. Ayrıca, YYS korumasına mekanik koruma için sigorta (FUSE) kullanılmaktadır. Hücre dengelemesi için farklı metotlar (pasif, aktif dengeleme) izlenilmektedir.

Batarya çeşitleri, kimyasal bileşimlerine, kullanım amaçlarına ve özelliklerine göre farklılık gösterir. Yaygın kullanılan batarya çeşitleri aşağıda verilmiştir:

- Lityum İyon (Li-ion) Bataryalar

Taşınabilir elektronik cihazlarda, elektrikli araçlarda ve daha birçok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip, hafif ve uzun ömre sahiptir.

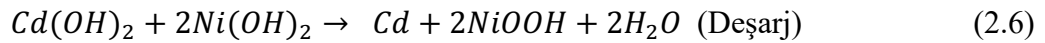
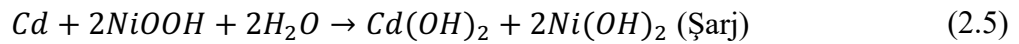


- Lityum Polimer (LiPo) Bataryalar

Hafif yapıdadır ve yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Özellikle insansız hava araçları (drone vb.) gibi uygulamalarda tercih edilmektedir. Kimyasal reaksiyonu Li-ion ile aynıdır.

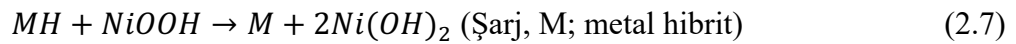
- Nikel-Kadmiyum (NiCd) Bataryalar

Düşük maliyetleri ve dayanıklılıkları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.



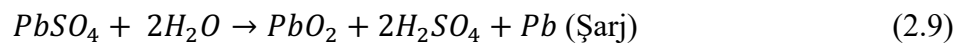
- Nikel-Metal Hidrit (NiMH) Bataryalar

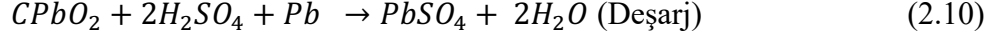
Daha yüksek enerji yoğunluğu sunarlar ve taşınabilir elektroniklerde kullanılırlar.



- Kurşun Asit (Pb-Acid) Bataryalar

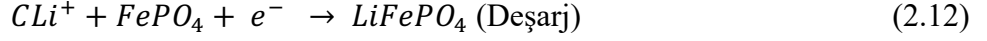
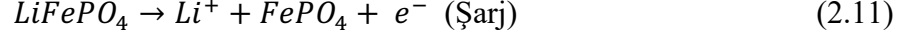
Araba akülerinde, güç yedekleme sistemlerinde ve taşınabilir jeneratörlerde yaygın olarak kullanılır. Uzun ömürleri ve düşük maliyetlidir.





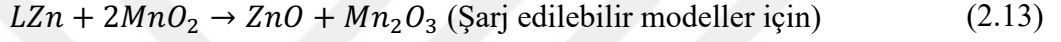
- Lityum Demir Fosfat (LiFePO<sub>4</sub>) Bataryalar

Elektrikli araçlarda güvenlik ve dayanıklılık nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca, uzun ömürleri ve yüksek deşarj oranlarına sahiptir.



- Alkalin (Çinko-Karbon) Bataryalar

Alkalin bataryalar, taşınabilir radyolar, uzaktan kumandalar ve basit elektronik cihazlarda kullanılmaktadır Uzun raf ömrüne sahip ve geniş bir kullanım yelpazesi sunarlar.



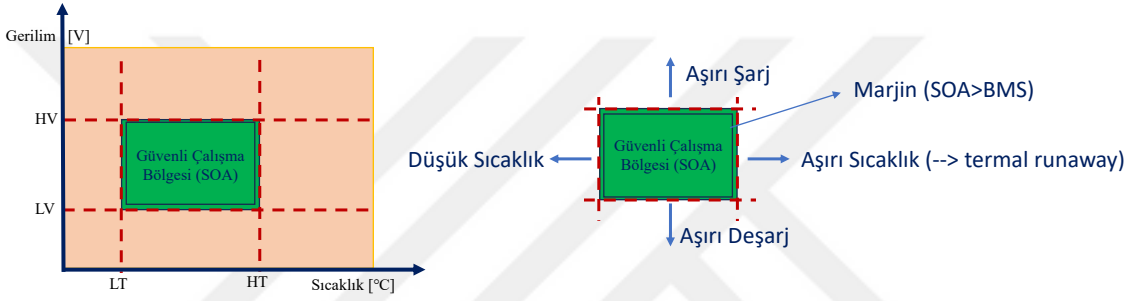
Her bir batarya türü, belirli avantajlar ve dezavantajlar sunmakta ve kullanım amaçlarına göre seçilmektedir.

## 2.2 Batarya Yönetim Sistemi

Kimyasal yapıları gereği bataryaların şarj, deşarj işlemlerinin güvenilir ve verimli gerçekleşmesi bir yönetim sistemi kontrolünde (BYS) yapılmaktadır. Bu yönetim sistemiyle, bataryaların ömürleri uzamakta, olası yanma-erime-patlama gibi durumlara karşı sistem korunması gerçekleşmektedir. Ayrıca, sistem performansı iyileştirilmekte ve her bir alt bileşenin sağlık durumu takip edilmektedir. Sistem yönetimin temel fonksiyonları aşağıdaki verilmiştir;

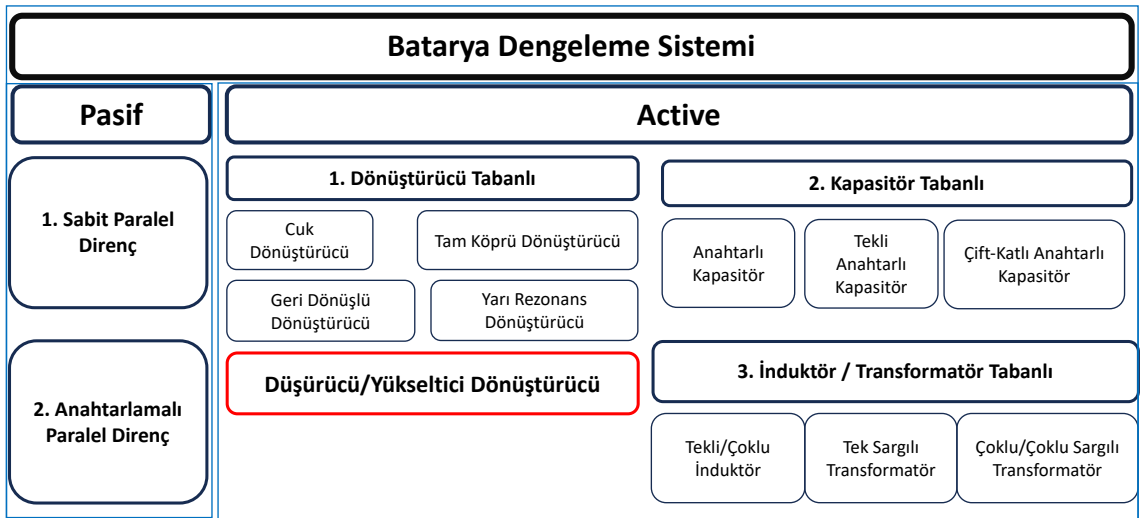
- Şarj-Deşarj Kontrol: Batarya şarj/deşarj sürecini yönetir. Yüksek gerilim altında batarya şarj durumu ve aşırı akım çekilmesi durumunda batarya deşarj durumu kontrol edilerek bataryanın belirlenen güvenli çalışma aralığında (SOA) yönetilmesi gerçekleştirilir [30]. Batarya hücresi için SOA bölgesi Şekil 2. 1' de gösterilmiştir.
- Ölçüm ve İzlenim: Batarya sisteminin gerilim, çekilen akım ve sıcaklık değerlerini sürekli olarak ölçer yönetim merkezine ve yönetim merkezinden kullanıcı ara yüzü ile raporlanır [30].

- Dengeleme (Balancing): Hücreler arasındaki voltaj farklarını dengeleyerek batarya paketinin genel performansını ve ömrünü artırmaktadır. Şekil 2. 2 'de pasif ve aktif dengeleme yöntemleri verilmiştir.
- Durum İzleme (SOC ve SOH): Bataryanın şarj durumunu (SOC) ve sağlık durumunu (SOH) hesaplar ve izler.
- Güvenlik Mekanizmaları: Aşırı şarj, aşırı deşarj, kısa devre ve aşırı ısınma gibi durumlar için koruma sağlamaktadır. Potansiyel arızaları tespit eder ve önleyici önlemler alır.
- Haberleşme ve Gösterim: Hem iletişim ara yüzü ile hem de batarya üzerindeki göstergeler ile Batarya hata durumu kullanıcı raporlanır.



Şekil 2. 1 Batarya Hücresi Güvenli Çalışma Bölgesi (SOA)

Burada, HV: High Voltage (Yüksek Gerilim), LV: Low Voltage (Düşük Gerilim), LT: Low Temperature (Düşük Sıcaklık), HT: High Temperature (Yüksek Sıcaklık) ifade etmektedir.



Şekil 2. 2 Batarya Dengeleme Sistemi Çeşitleri

BYS kontrol topolojileri, batarya paketlerinin güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için çeşitli yöntemler ve yapılandırılmasında kullanılmaktadır. BYS topolojilerin karşılaştırması Tablo 2.1’ de verilmiştir [31].

**Tablo 2.1** BYS Kontrol Topolojileri Karşılaştırması

<b>Kriter</b>	<b>MERKEZİ</b>	<b>DAĞITIK</b>	<b>MODÜLER</b>	<b>HİBRİT</b>
<b>Ölçeklenebilirlik</b>	Sınırlı	Yüksek	Yüksek	Yüksek
<b>Esneklik</b>	Sınırlı	Yüksek	Yüksek	Yüksek
<b>Hata Toleransı</b>	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek
<b>Yedeklilik</b>	Az	Yüksek	Orta	Yüksek
<b>İletişim Karmaşıklığı</b>	Düşük	Yüksek	Orta	Orta
<b>Entegrasyon Basitliği</b>	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta
<b>Maliyet</b>	Düşük	Orta	Orta	Değişken

Elektrikli araçların popülaritesinin artmasıyla birlikte, kullanıcıların beklentilerini karşılayacak fonksiyonelliklere yönelik talepler de artmaktadır. Bu durum, artan güç ihtiyacını karşılamak için daha düşük gerilimli batarya sistemlerinin yerini daha yüksek gerilimli batarya sistemlerinin almasını kaçınılmaz kılmaktadır. Tablo 3.1’ de sıralanan avantajlar, bu geçişin zorunluluğunu açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle, elektrikli araçların genişleyen işlevsellikleri ve performans beklentileri, enerji yoğunluğu daha yüksek ve enerji transferi daha verimli olan yüksek gerilimli batarya sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu sistemler hem şarj sürelerinin optimize edilmesini hem de uzun menzil gereksinimlerinin karşılanmasını mümkün kılarak elektrikli araçların kullanım alanlarını genişletmektedir.

**Tablo 3.1** Yüksek Gerilimli Seviyeli Batarya Kullanımının Avantajları

Avantaj	Detay
Yüksek Verimlilik	Düşük akımdan kaynaklı ısı kaybı azalır ve daha uzun batarya ömrü sağlar.
Yüksek Güç Yoğunluğu	Daha hafif batarya kullanımı uzun menzil ve daha iyi performans sağlar.
Hızlı Şarj	Batarya $I^2 * R$ kayıpları azalacağından daha hızlı şarj olur.
Yüksek Motor Verimliliği (EA için)	Düşük enerji tüketimini ile araç performansı artar.
Kablo Kalınlığını Azaltma (EA için)	Ağırlık ve maliyet azalır.
Sistem Entegrasyonu (EA için)	Ağırlık, kablo karmaşıklığı azalttığından araç tasarımının ve üretim süreçlerini kolaylaştırır.

Avantajların yanı sıra, yüksek gerilim seviyesine sahip batarya sistemlerinin entegrasyonu, sistem karmaşıklığını önemli ölçüde artırırken, maliyet ve güvenlik konularında da ek zorluklar doğurmaktadır. Bu artan karmaşıklık hem donanımsal hem de yazılımsal koruma mekanizmalarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu tür

koruma mekanizmaları, hata durumlarında sistem güvenliğinin korunması ve risklerin asgariye indirilmesi için kritik öneme sahiptir.

Bu bağlamda BYS; hücre voltajları, akım ve sıcaklık gibi kritik parametrelerin sürekli izlenmekte ve aynı zamanda hücreler arası dengelemeyi ve acil durum (hata) yönetimini de yapmaktadır.

Bu bölümde, tasarım sürecinde kritik öneme sahip olan çeşitli giriş parametreleri ve değişkenler tanımlanmış, sistem gereksinimleri dikkate alınarak sistem mimarisi oluşturulmuştur. Bu mimari dahilindeki tasarlanan her bir alt bileşen detaylı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca, şarj durumunun hesaplanması gerçekleştirilmiş ve sistemde kullanılan pasif ve aktif dengeleme algoritmaları ile kontrol algoritmaları sunulmuştur. Tüm çalışma MATLAB/Simulink® platformunda tasarlanmış ve benzetim sonuçları tez amacına uygun olarak değerlendirilmiştir.

### 3.1 Sistem Giriş Parametreleri ve Değişkenleri

Sistem giriş parametreleri ve değişkenleri, hem tesis modelindeki (plant model) bileşenlerde (alt modeller, ekipmanlar) hem de kontrol modelindeki kontrol algoritmalarında, sistem dinamiklerinin ve işlevselliğinin tanımlanması için kullanılmıştır. Bu parametreler, elektriksel özelliklerin saptanmasında ve sistem performansının ölçülmesinde kilit bir rol oynamaktadır. Ayrıca, belirlenen tasarım parametreleri ile sistem mimarisi iteratif bir süreçle sistem gereksinimlerinin netleşmesini sağlamıştır. Sistem tasarımı için kullanılan giriş parametreleri ve değişkenleri EK-A 'da sunulmuştur. Kullanılan tüm giriş parametreleri ve değişkenlerin MATLAB kodu EK-A' da sunulmuştur.

EK-A' da verilen sistem değişkenleri aşağıda verildiği üzere düşünülmüştür;

Batarya hücresi karakteristiği belirlenmesinde hücre iç direnci ( $R_{in}$ ), nominal gerilimi ( $V_{cell\_nom}$ ), kesme gerilimi ( $UV_{cell}$ , minimum hücre gerilimi), tam şarj gerilimi ( $OV_{cell}$ , maksimum hücre gerilimi) ve kapasitesi ( $Ah_i$ ) değişken olarak kullanılmıştır. Sistemde bulunan her bir hücre kullanıma bağlı olarak ve /veya üretim kaynaklı farklılık gösterecektir. Bundan dolayı her bir hücre kapasitesi, gerilimi ve SOC değeri Bozulma Faktörlü ( $df$ ) fonksiyonu olarak üretilmiştir. “ $df$ ” değeri rastgele fonksiyonu olup EK-A' da belirtildiği üzere tanımlanmıştır.

$$BP_xV = V_{cell_{nom}} * (1.01 - 0.02 * df) \quad (3.1)$$

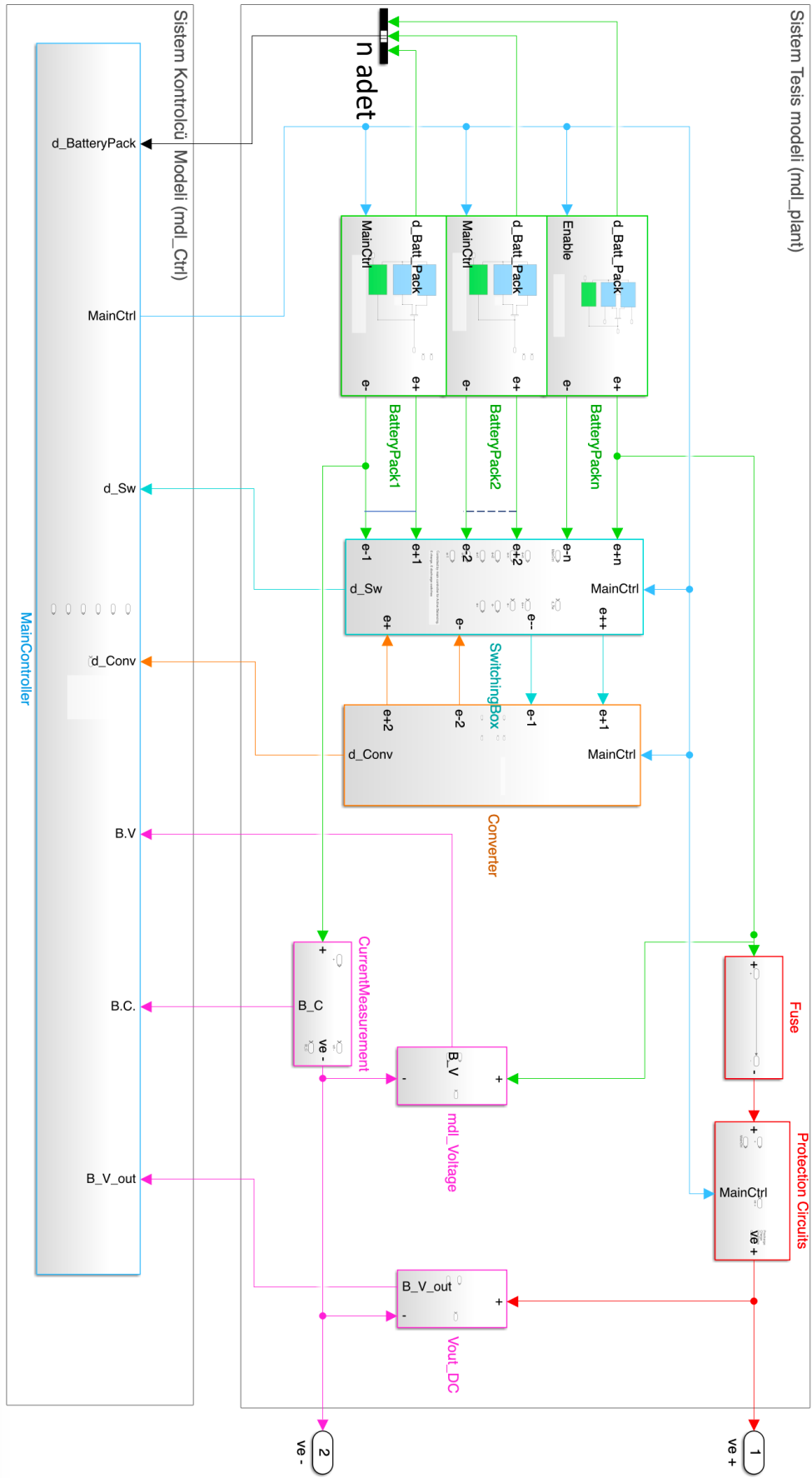
$$BP_xC = Ah_i * (1.01 - 0.02 * df) \quad (3.2)$$

$$BP_xSOC = BP_xSOC_i * (1.01 - 0.03 * df) \quad (3.3)$$

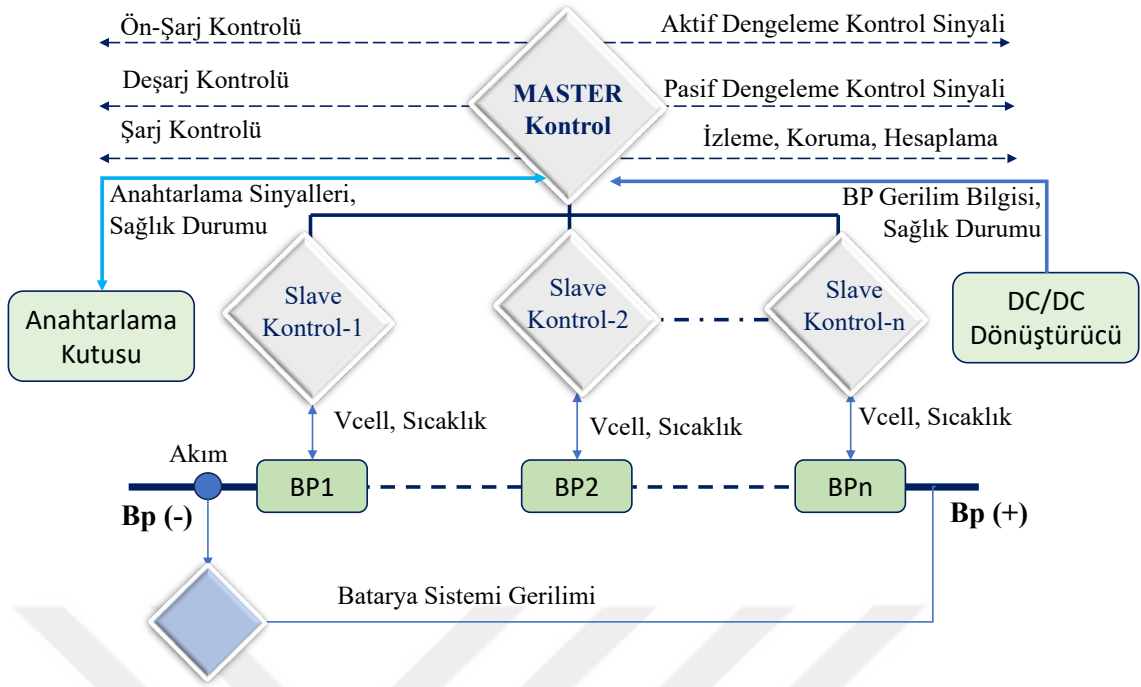
Burada,  $V_{cell_{nom}} = 3.55$  V,  $Ah_i = 2.5$  Ah,  $BP_xSOC_i = 0$  ile 100 (Batarya paketi ilk şarj doluluk oranı) arasında bir değer olarak alınmış ve “x” batarya paketi numarasını belirtmektedir.

BYS algoritması, belirlenen batarya hücrelerinin karakteristiklerini göz önünde bulundurarak oluşturulmuştur. Bu karakteristikler çeşitli türdeki Li-ion batarya hücrelerinin teknik bilgi formlarına dayanmaktadır. Ayrıca, yukarıda belirtilen tanımlamalarla birlikte, batarya paketi direnci ( $Rb_{in}$ ), pasif dengeleme direnci ( $Rb_{lcn\_passive}$ ), yüksek ve düşük sıcaklık limitleri (HT ve LT), akım limitleri gibi değişkenler Ek-A'da tanımlanmıştır.





Şekil 3.2 Önerilen Batarya Sistem Mimarisi



**Şekil 3.3** Tasarım BYS Topolojisi

Batarya kontrol topolojisi Şekil 3.3' de görüldüğü üzere tasarlanmıştır. Her bir batarya paketine, batarya hücre gerilimleri ve modül sıcaklıkları iletilmektedir. Master kontrolör BP'leri, Anahtarlama Kutusu ve DC/DC Dönüştürücü ile iletişim halindedir. Batarya sistemi ön şarj, deşarj ve şarj fonksiyonlarını yönetmektedir. Ayrıca aktif dengeleme (SOC tabanlı) yönetimi, pasif dengelemenin etkinliğini (sıcaklık ve akıma bağlı) belirlemektedir. Son olarak tüm sistem bilgisini takip etmekte ve sistem çıkışını BYS ile korumaktadır. Bölüm 3.1' de belirtilen tasarım parametrelerine göre tasarım fonksiyonelleri belirlenecektir.

Bu tasarımın, Tablo 2.1' de belirtilen kriterlere göre ölçeklenebilir olduğu, esneklik sağladığı, hata toleransının düşük olduğu, entegrasyonunun kolay olduğu ve modüler yapı ile maliyet kazancı sağlayacağı düşünülmüştür.

### 3.3 Tasarımın Gerçekleştirilmesi

Bölüm 3.2’ de önerilen sistem mimarisi bu bölümde tasarlanmış ve detaylı olarak açıklanmıştır. Tasarımın analizinde 3 adet Li-ion BP kullanılmış ve  $n_p=2$  alınmıştır.

#### 3.3.1 Sistem Tesis Modeli (mdl\_Plant)

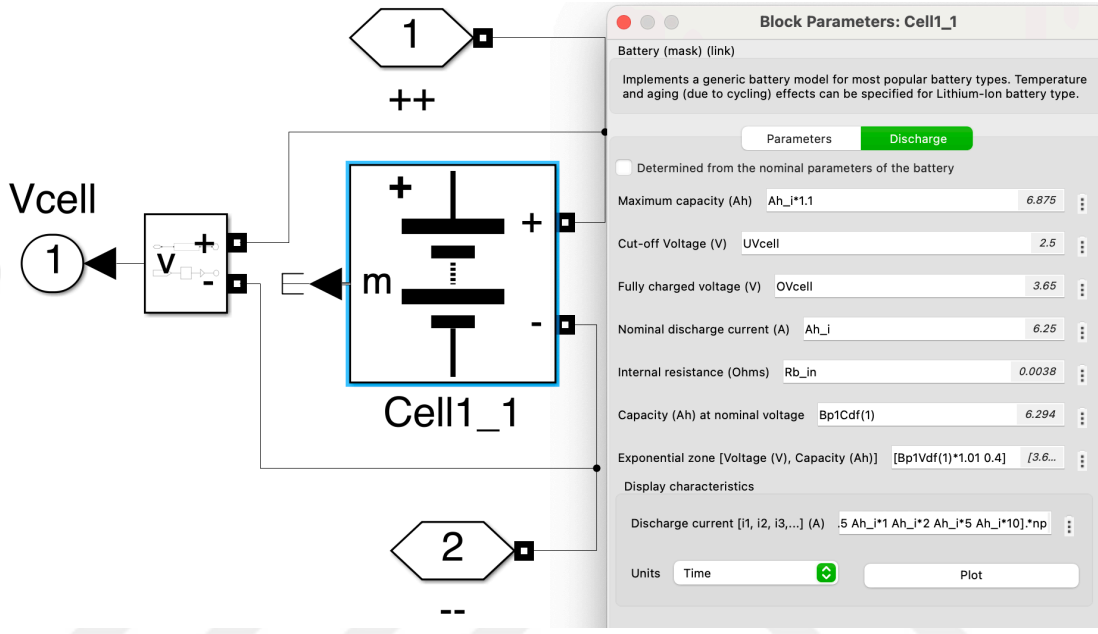
##### 3.3.1.1 Batarya Paketi

Batarya paketi, batarya tesis modeli (2 modül, plant model) ve kontrolcü olmak üzere 2 alt sistemden oluşmaktadır. Bölüm 3.1 ’de belirtilen giriş parametreleri ve değişkenleri kullanılarak batarya hücre karakteristiği belirlenmiştir. Batarya hücre modeli için MATLAB/Simulink® Simscape Specialized Power Tool içindeki fiziksel eleman kullanılmıştır, Şekil 3.4’ de verilmiştir. Bu fiziksel elemanın tasarımındaki kritik değişkenler, rastgele fonksiyonun parametresi olarak üretilmiştir (Bölüm 3.1, bakınız). Bu yaklaşımla, benzer karakteristiklere sahip farklı gerilim ve kapasite değerlerine sahip batarya hücreleri oluşturulmuştur.

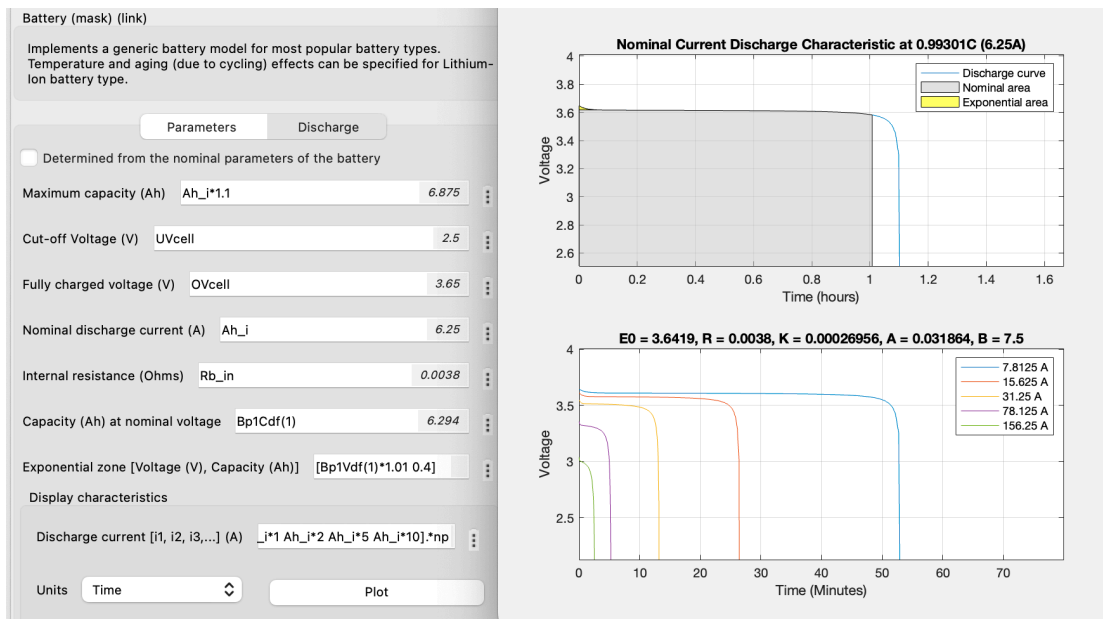
Şekil 3.5 ’te BP1 modüllerin entegrasyonu sonrasında modül-1 ve modüle-2’de kullanılan batarya hücrelerin, 1C (5Amp) yüklemdeki hücre gerilimlerin zamana bağlı değişimleri verilmiştir. Her bir hücre geriliminin değişim oranı Ek-A’da verilen sistem parametrelerine göre belirlenmektedir. Sistem parametreleri (SOC, çıkış voltajı, hücre kapasitesi vb.) rastgele fonksiyonu ile belirlendiğinden tüm batarya hücreleri birbirinden belirlenen oranlarda farklı olacaktır. Bu farklılığın gerçekte üretimden ve /veya zamanla kullanımdan oluşabileceği düşünülmüştür.

BYS pasif dengeleme algoritmasının akış şeması Şekil 3.6’ te sunulmuştur. Pasif dengeleme işlemi, ana kontrolcü tarafından gönderilen pasif dengeleme aktif sinyali ile batarya paketi sıcaklığı (modül içinde 4 adet sensör) ve her bir hücrenin gerilim bilgilerini değerlendirerek gerçekleştirilmektedir (Güvenli çalışma bölgesine göre değerlendirilmektedir.). Batarya sıcaklığı belirlenen sıcaklık aralığında ( $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ) ise modülde kullanılan hücrelerin gerilimlerine göre dengeleme işlemi uygulanmaktadır (Gerilim farkı eşik değeri  $0.05\text{V}$  belirlenmiştir.). Pasif dengeleme işlemi, batarya hücrelerine paralel olarak bağlı anahtarlamalı direnç aracılığıyla gerçekleştirilmekte ve bu süreç sırasında ısı kaybı oluşmaktadır. Bu direnç li-ion bataryalarda uygulama bağlı olarak  $1\Omega$  ile  $5\Omega$  arasında olmaktadır. Direnç değeri düşük seçilirse hücre dengeleme hızı artmaktadır fakat ısı kaybı da paralelde artacaktır. Bu tasarımda direnç değeri  $5\Omega$  olarak seçilmiştir.

Her bir batarya modülü için modül SOC değerlendirme modeli Şekil 3.7’ da gösterilmiştir. SOC değerlendirmesi yapılırken, modül içinde kullanılan batarya hücrelerinin minimum kapasitesine sahip hücre kapasitesi temel alınmıştır. Benzer şekilde, batarya paketi SOC değeri de minimum modül SOC değeri olarak alınmıştır. Bununla birlikte, sıcaklığa bağlı olarak kapasite değişimi (SOC(Temp), 1D look-up-table block) model içerisine dahil edilmiştir [32]

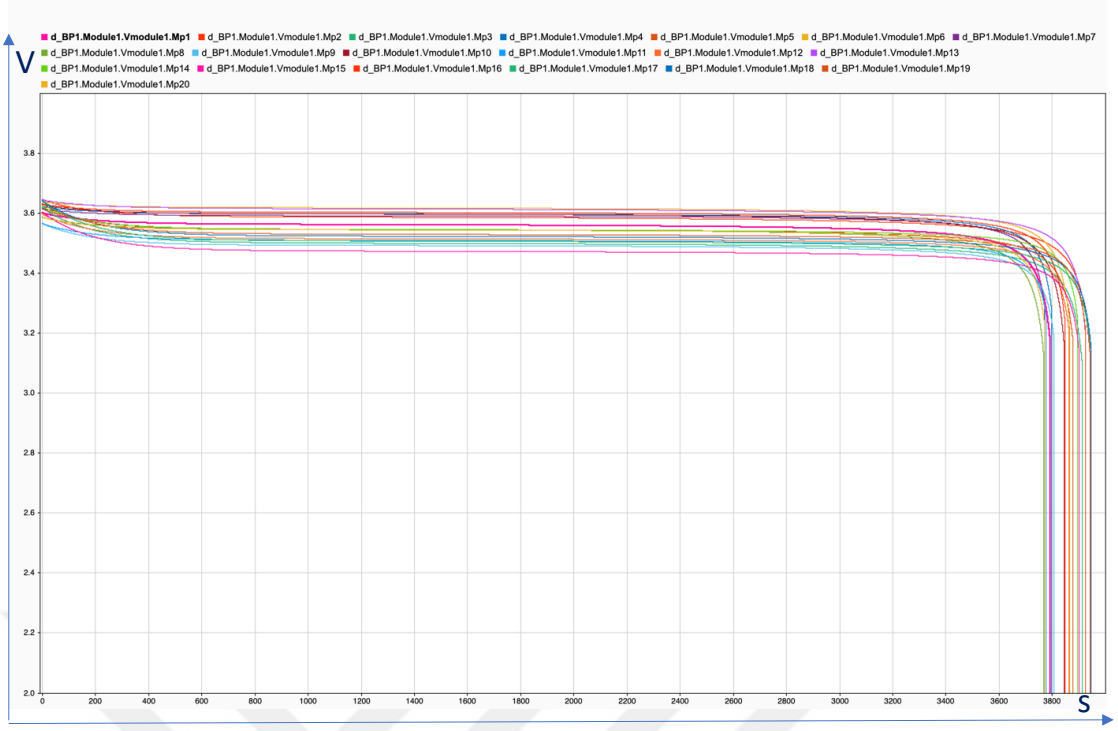


a Batarya Hücresi ve Giriş Parametreleri

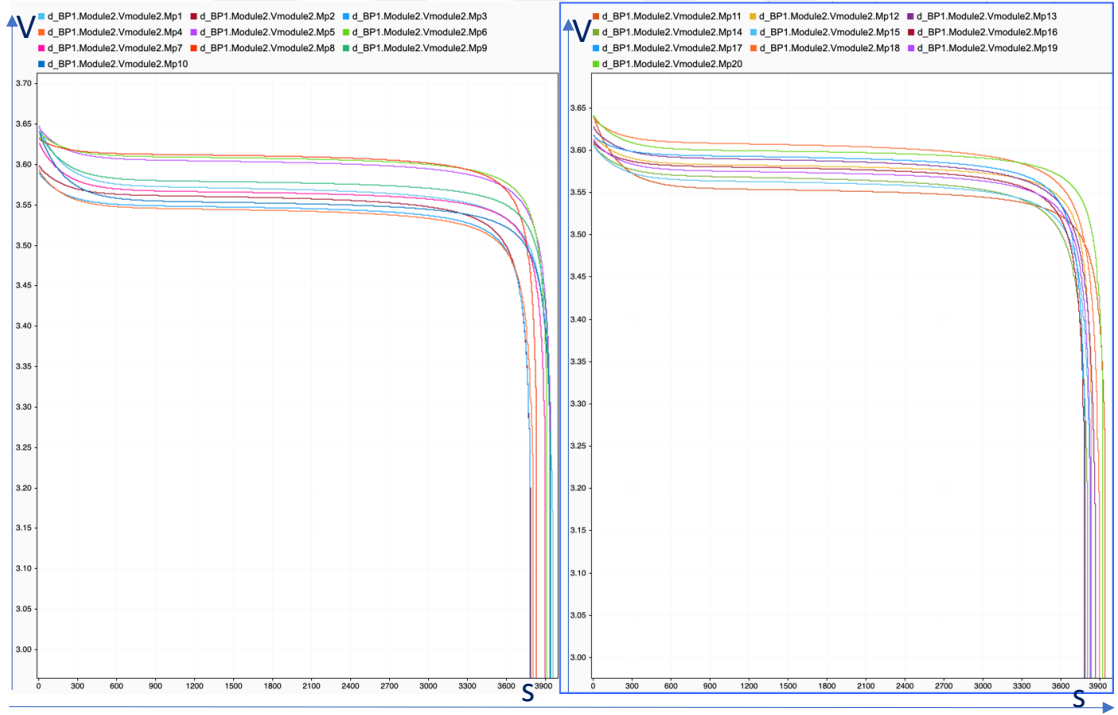


b Batarya Hücresi ve Giril Parametreleri

Şekil 3.4 Simulink® Simscape Batarya Hücre Modeli ve Tasarım Parametreleri



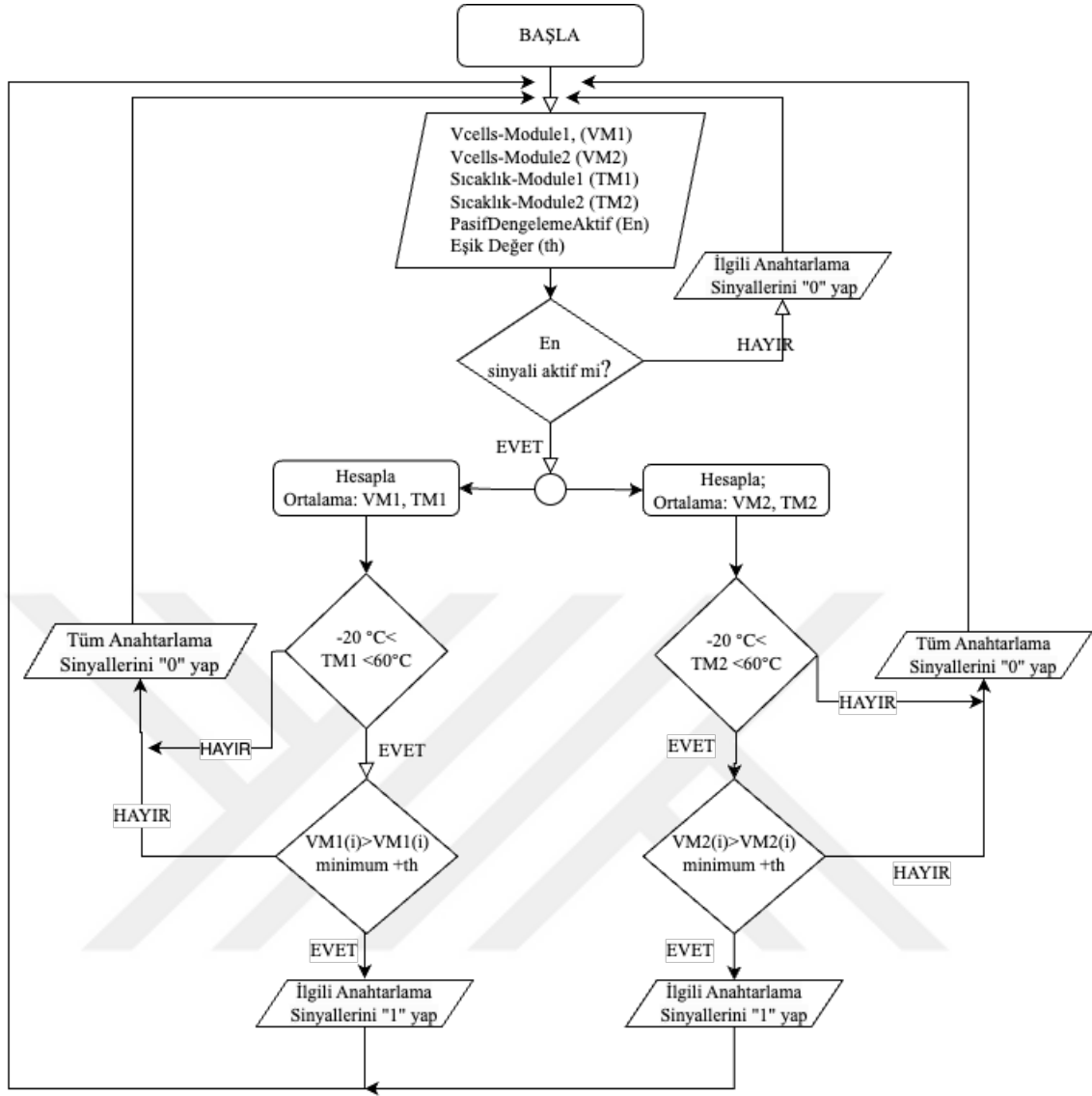
*a Modül-1 Hücre Gerilimleri*



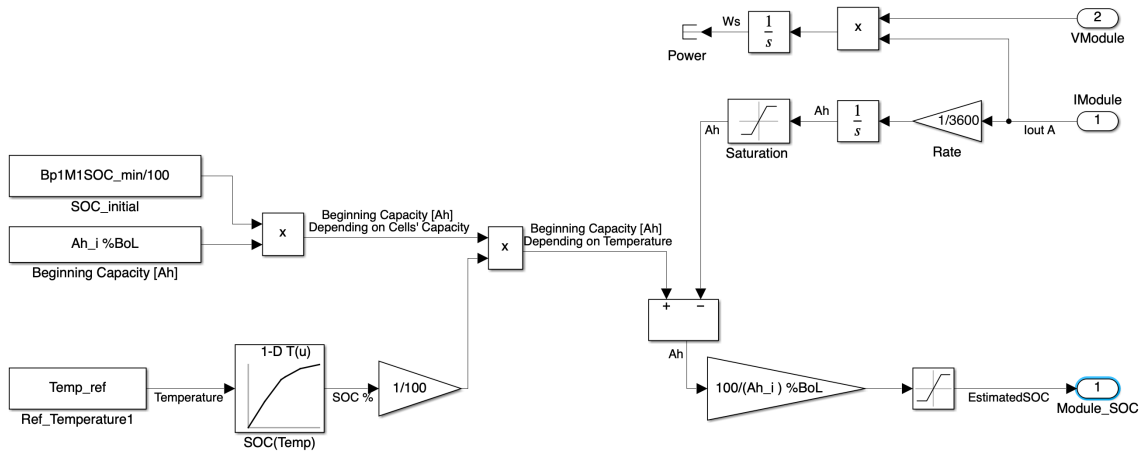
*b Modül-2 Hücre Gerilimleri*

**Şekil 3.5** Batarya Paketi Hücre Gerilimleri

Burada, MpX ifadesinde Mp hücre gerilimi, X hücre numarası (1,2,3, ...20), Cmd\_gX ifadesinde X anahtarlama numarası (1,2,3, ...20) ve ilgili numaralı hücre için gönderilen komutu ifade etmektedir.

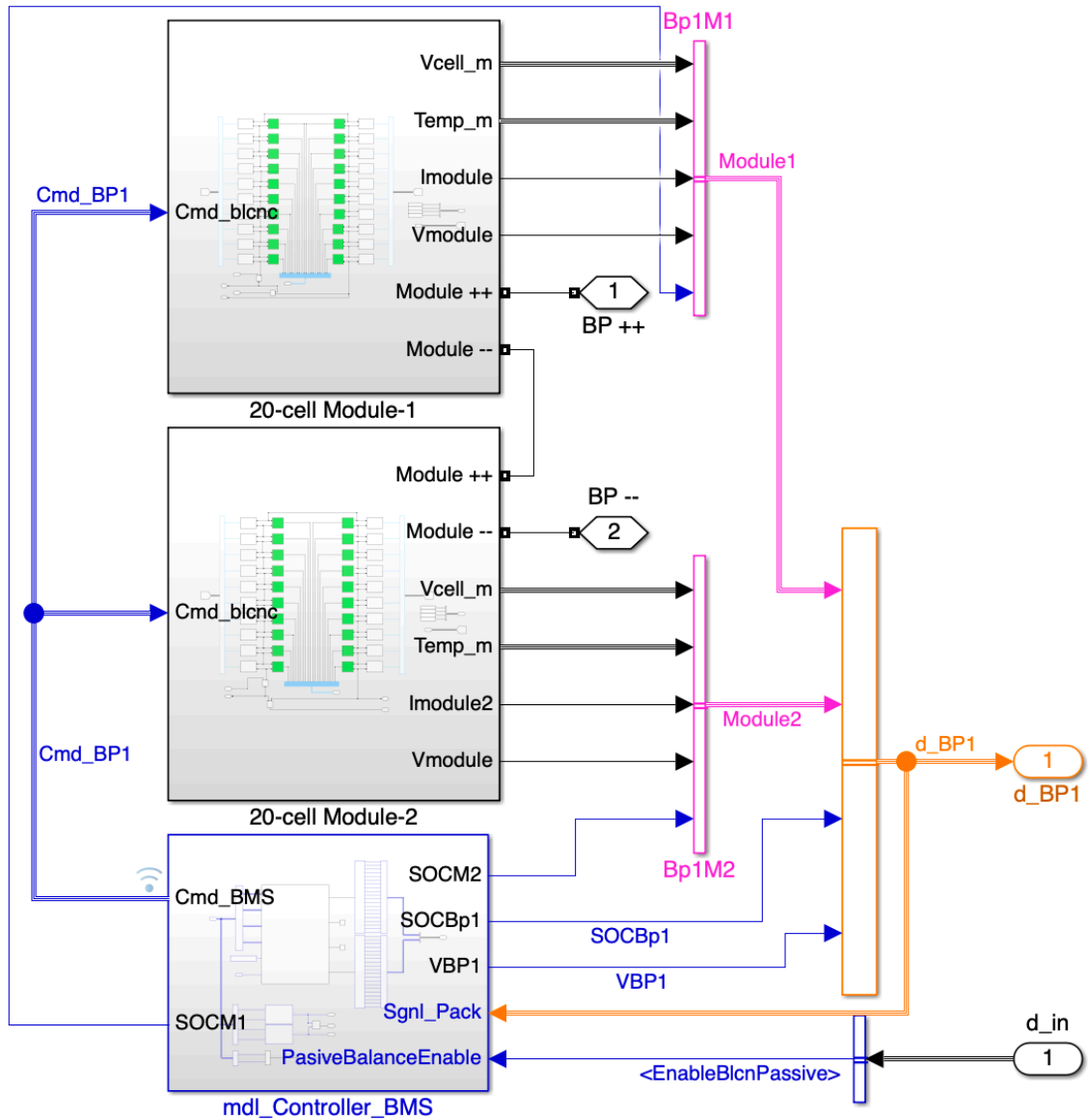


Şekil 3.6 Batarya Paketi Pasif Dengeleme Akış Şeması



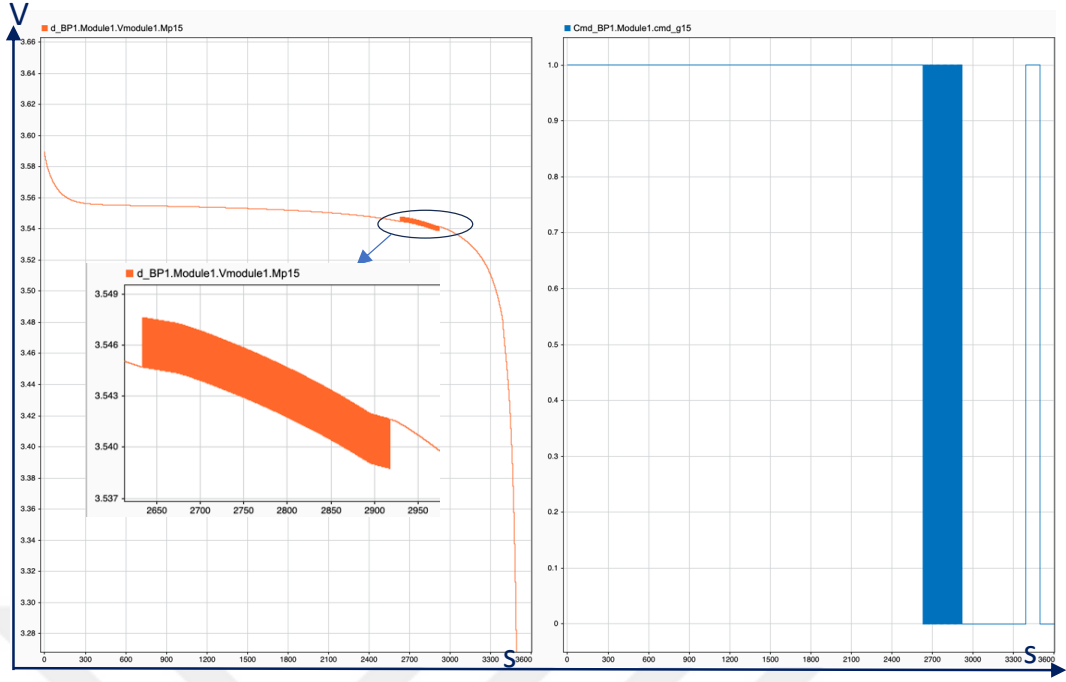
Şekil 3.7 SOC Değerlendirme Modeli

Ek-A' da verilen tasarım parametreleri kullanılarak modellenen batarya paketi (sadece BP1) MATLAB/Simulink® modeli Şekil 3.8' de sunulmuştur. "d\_in" ile ana kontrolcüden gelen komuta bağlı olarak pasif dengeleme aktif edilmektedir (Lojik 0/1 ).



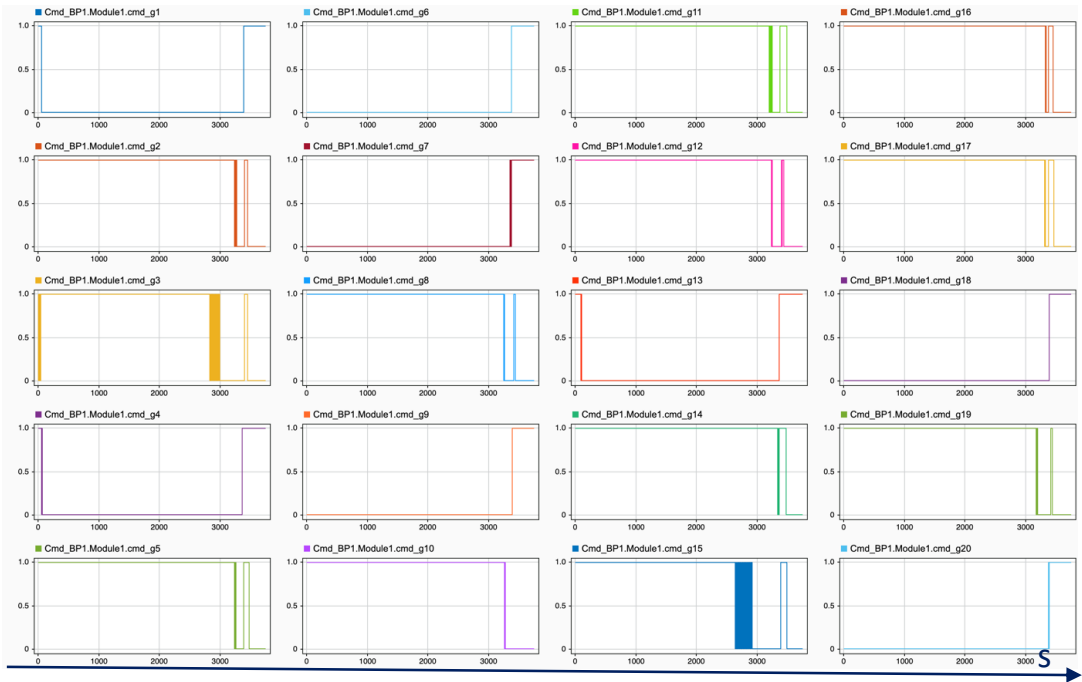
Şekil 3.8 BP1 Modeli

Modellenen batarya paketi karakteristiğinin anlaşılması için 1C (5 A) deşarj yük benzetimi yapılmıştır. Şekil 3.9' da batarya paketindeki tek bir hücreye uygulanan pasif dengeleme anahtarlama sinyali ve bu hücrenin gerilimindeki değişim gösterilmiştir (Modül-1, Hücre-15). Burada, şarj ve deşarj işlemleri esnasında modül içinde yer alan batarya hücrelerinin voltajları arasındaki fark, önceden belirlenmiş olan limitin üzerine çıkarsa (0.05 V), yüksek gerilime sahip hücrede pasif dengeleme işlemi kullanılarak gerilim seviyeleri dengelemeye çalışılır.

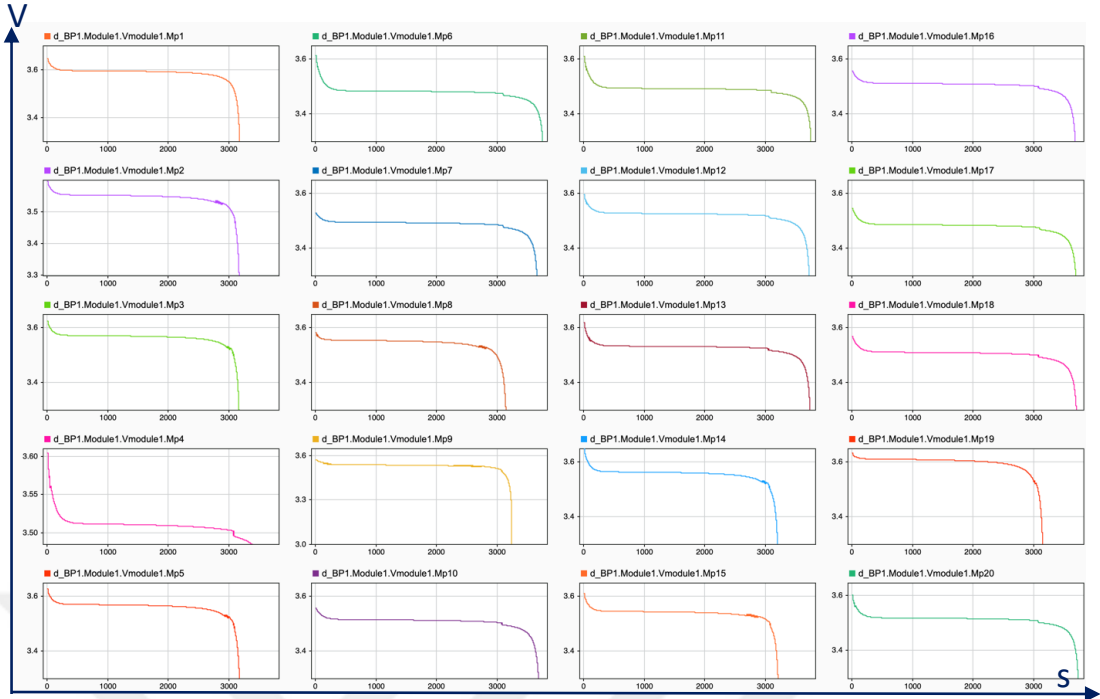


Şekil 3.9 Batarya Hücresi Gerilim Değişimi ve Uygulanan Pasif Dengeleme Sinyali

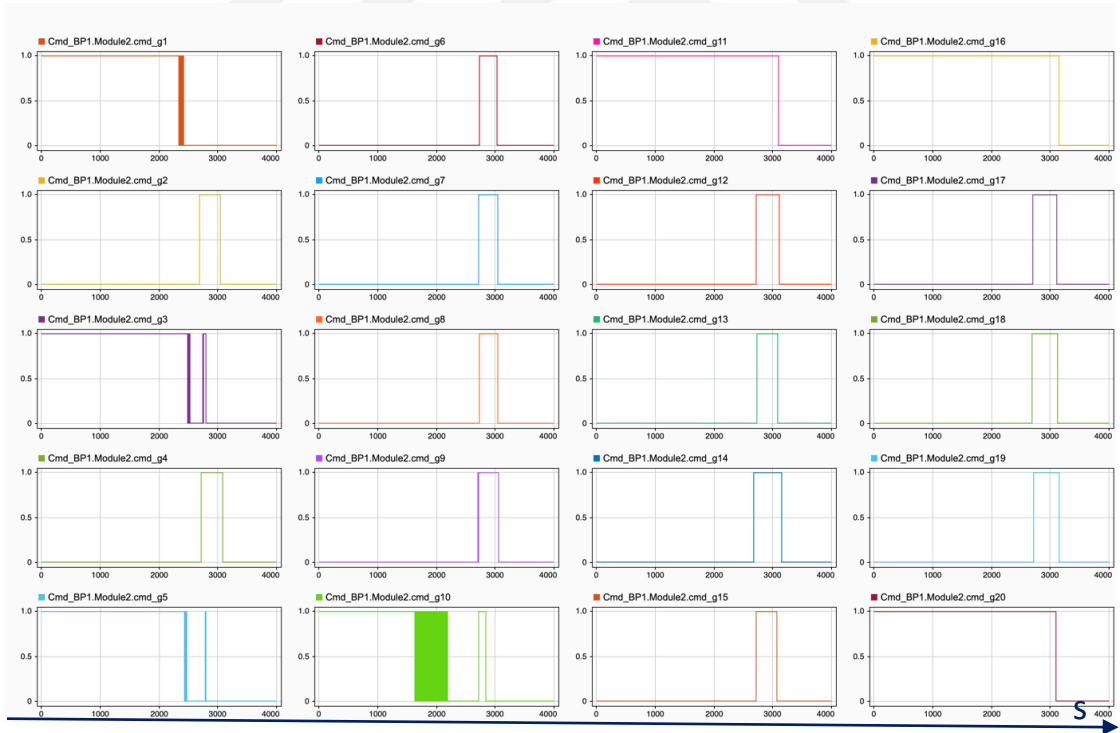
Şekil 3.9’ da görüldüğü üzere uygulanan anahtarlama sinyali ile hücre gerilim seviyesi düşmektedir. Buradaki gerilim düşümü kullanılan dengeleme direnciyle ters orantılıdır. Benzer şekilde batarya paketine uygulanan pasif dengeleme anahtarlama sinyalleri Şekil 3.10-a ve Şekil 3.10-c’ de ve her bir hücrenin gerilim değişimi ise Şekil 3.10-c ve Şekil 3.10-d’ de gösterilmiştir.



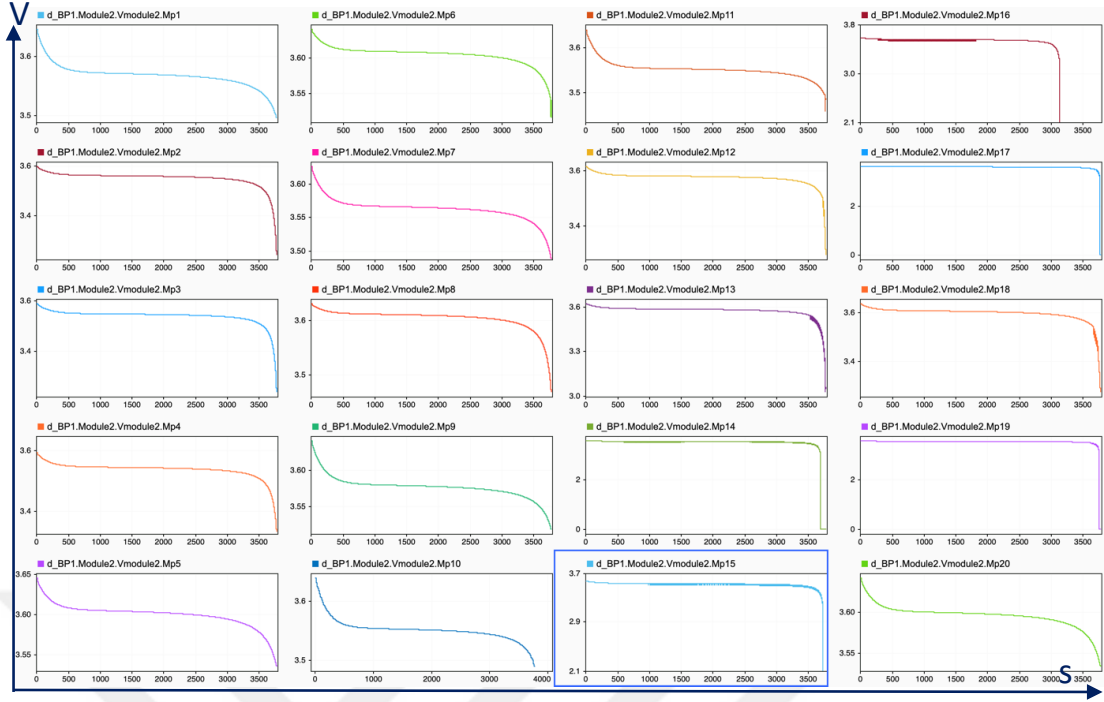
a Modül-1 Anahtarlama Sinyalleri



*b* Modül-1 Hücre Gerilimleri



*c* Modül-2 Anahtarlama Sinyalleri



*d Modül-2 Hücre Gerilimleri*

**Şekil 3.10** BP1, Modül-1 ve Modül-2 Benzetim Sonuçları

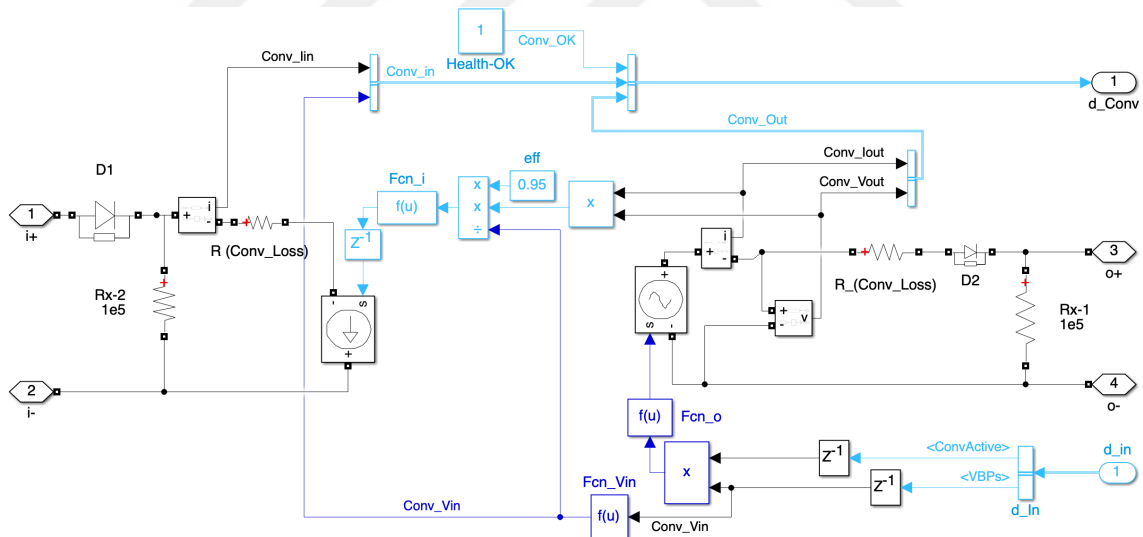
Şekil 3.10’ de görüleceği üzere hücre gerilimi yüksek olan batarya hücrelerine anahtarlama sinyalleri gönderilerek batarya operasyonu boyunca ısı kaybı yoluyla hücre dengelenmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Batarya hücre dengeleme algoritması voltaj bazlı olduğunda (eşik değeri 0.05Volt fark) batarya kapasitesine bağlı olarak ayrı bir dengeleme yapmamaktadır. Uygulama bazlı seçilecek olan pasif dengeleme direncine bağlı olarak batarya ısı kaybı ve dengeleme hızı belirlenmektedir. Pasif dengeleme anahtarlama frekansı ana kontrolcü tarafından pasif dengeleme aktif sinyaline bağlı olarak belirlenmektedir (500Hz, 80% doluluk oranında). Yukarıdaki benzetimde simülasyon frekansına eşit olup 1000Hz’ tir (her bir adım).

### 3.3.1.2 DC/DC Dönüştürücü

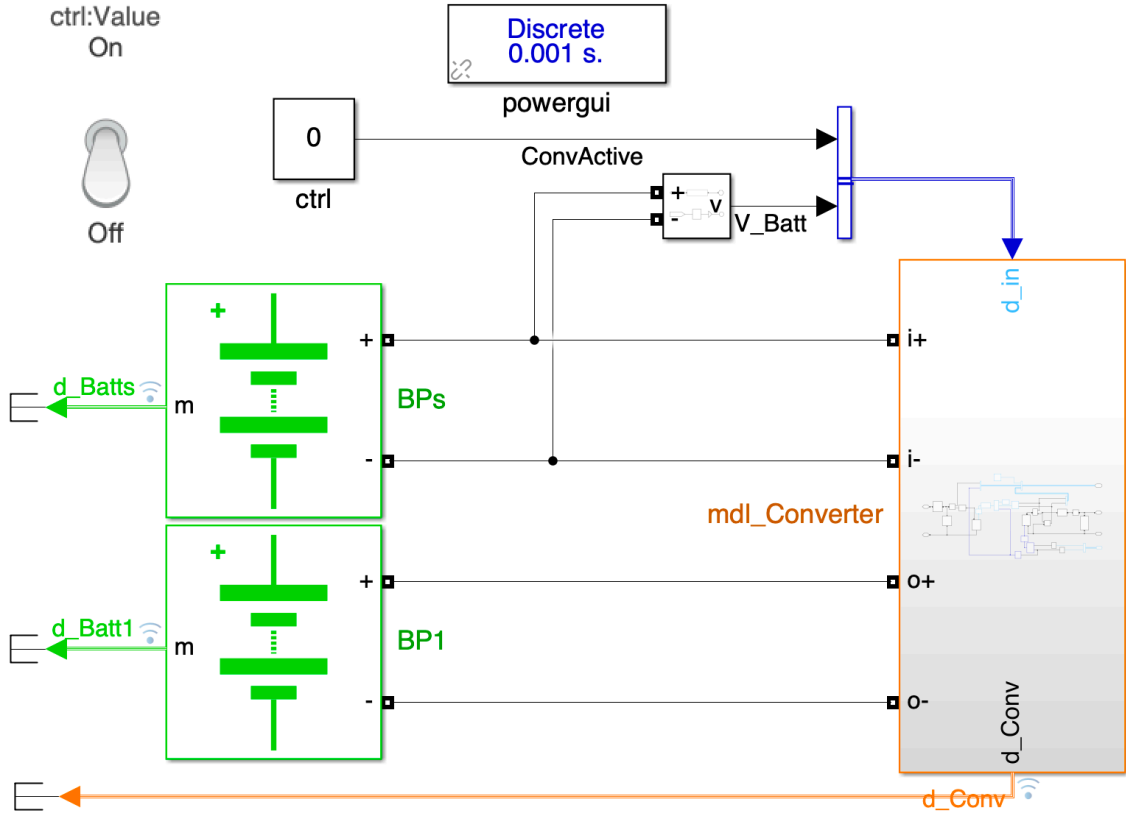
Bu çalışmada DC/DC dönüştürücü modelinin tasarımı, düşürücü lineer eşdeğer devre model referans alınarak gerçekleştirilmiştir [33]. Böylelikle MATLAB/Simulink® modelin karmaşıklığı azaltılmış ve istenilen fonksiyonelleri sağlayacak dönüştürücü tasarımı yapılmıştır.

DC/DC Dönüştürücü tasarımı, giriş tarafı beslenen sisteme çıkış taraflı bağımlı akım kaynağı olarak düşünülmüştür. Benzer yaklaşımla, çıkış tarafı gelen dönüştürücü aktif (ConvActive) sinyali ile sabit gerilim kaynağı (aktif durumda batarya paketi maksimum şarj gerilimi, in-aktif durumda “0” Volt) olarak tasarlanmıştır. Giriş tarafındaki gerilim seviyesi bilgisi sistem kontrolcüsü tarafından batarya sistemi çıkış gerilimi olarak dönüştürücüye verilmektedir. Ayrıca, dönüştürücü sağlık bilgisi (lojik “1”) ve dönüştürücü giriş/çıkış akım/gerilim bilgileri sisteme bilgi olarak verilmektedir.

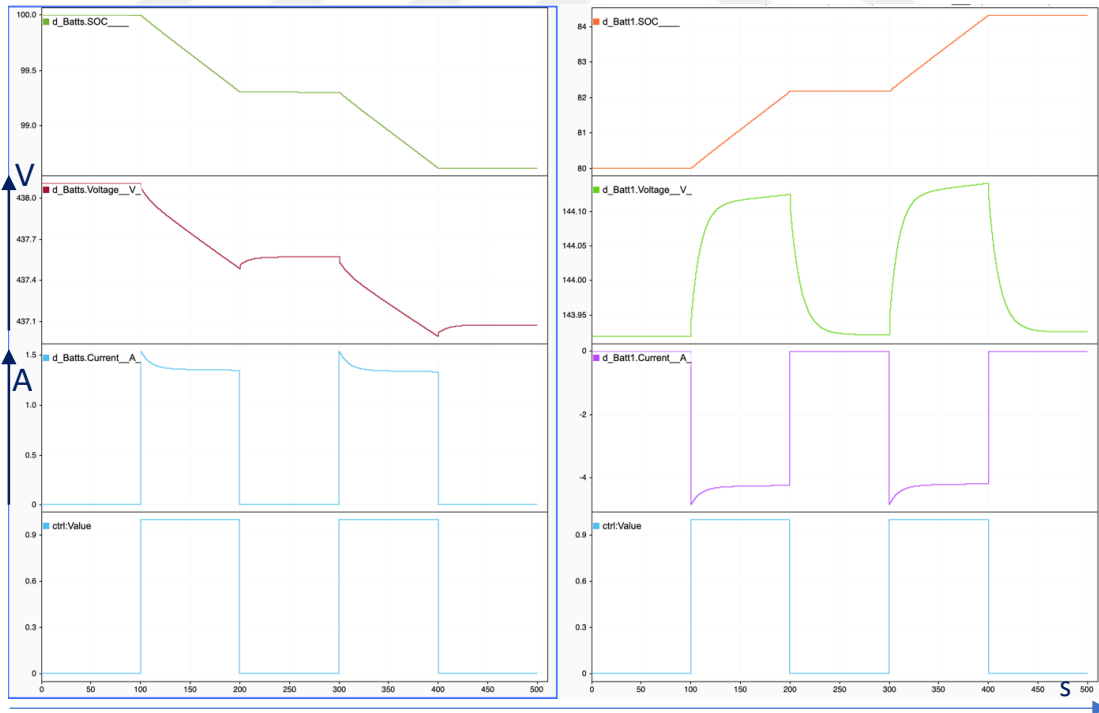
DC/DC dönüştürücü tasarımı Şekil 3.11’ da sunulmuştur. Dönüştürücü verimliliği 95% olarak kabul edilmiş ve ters akım koruması için diyot blokları modelde kullanılmıştır. Ayrıca, gerilim ve akım değerlendirmeleri sisteme Fcn (f(u)) blokları ile eklenmiştir.



Şekil 3.11 DC/DC Dönüştürücü



*a Benzetim Modeli*



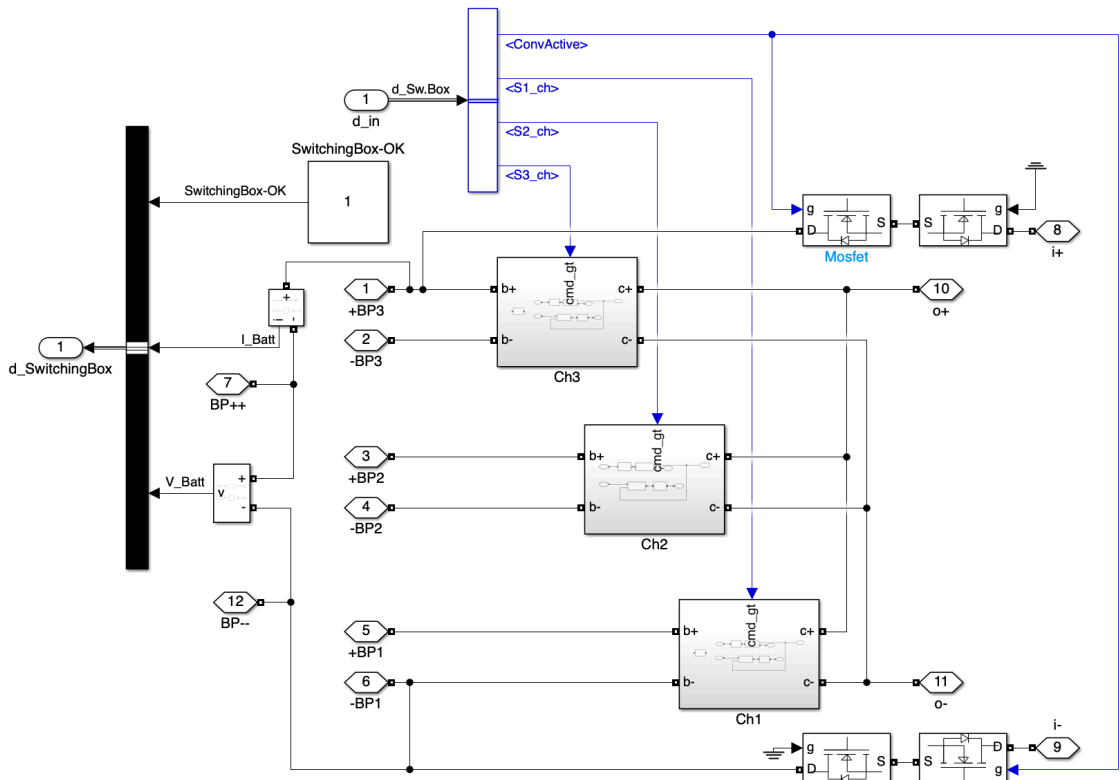
*b Benzetim Sonuçları*

**Şekil 3.12** DC/DC Dönüştürücü Benzetim Modeli ve Sonuçları

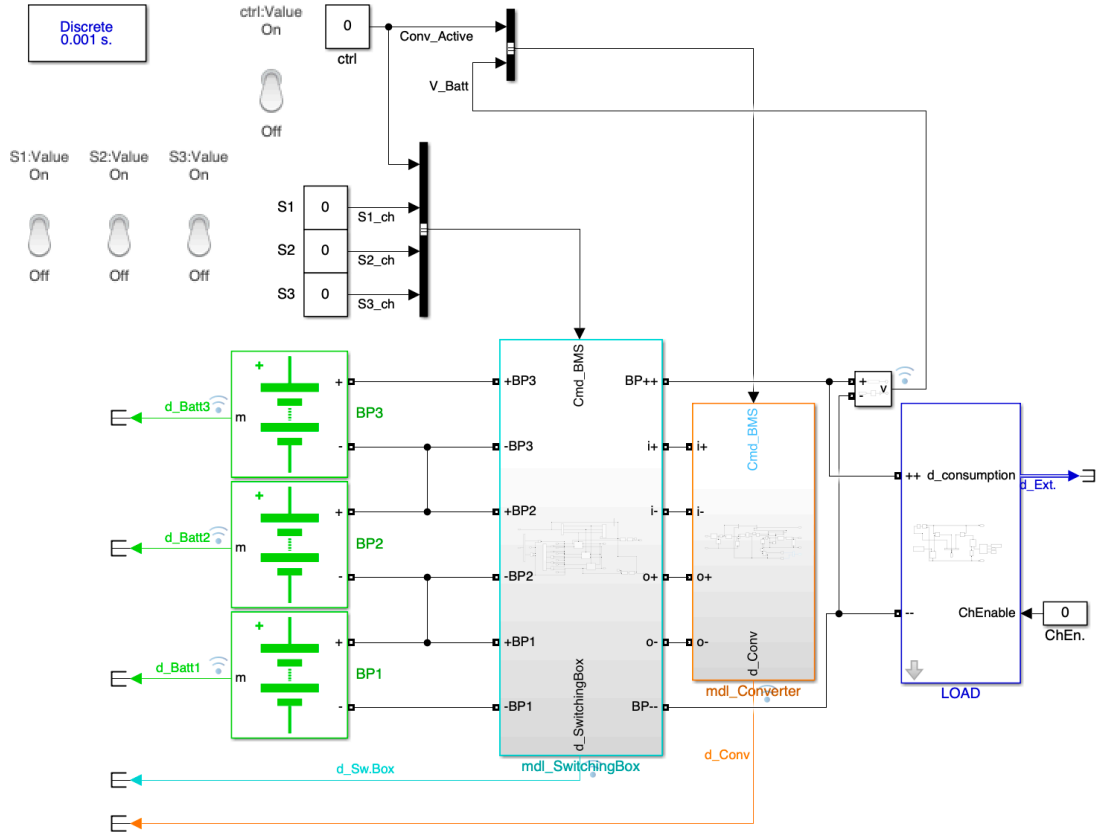
Şekil 3.12 -a' da DC/DC dönüştürücü model analizi için oluşturulan test modeli gösterilmektedir. DC/DC dönüştürücü beslenmesine batarya paketinin karakteristiğini yansıtan MATLAB/Simulink® Simscape Specialized Power Sistem Tool fiziksel batarya modeli güncellenmiş ve kullanılmıştır. Aynı şekilde, dönüştürücü çıkışına da Batarya Paketi-1 (BP1, hücre-1 referans alınmıştır) karakteristiğindeki fiziksel batarya elmanı bağlanmıştır. Şekil 3.12 -b' de görüldüğü üzere dönüştürücü aktif (ConvActive) sinyalini verildiğinde batarya paketlerinden (BPs) BP1' e enerji transferi yapılmaktadır. Burada kontrol için sinyali "1" olduğunda BPs' den BP' e enerji aktarımı gerilim akım ve SOC değişiminden görülmektedir. Bu yaklaşım, ana kontrolcüden gelen komutlara bağlı olarak batarya paketlerine enerji transferini anahtarlama kutusu kullanarak gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır.

### 3.3.1.3 Anahtarlama Kutusu

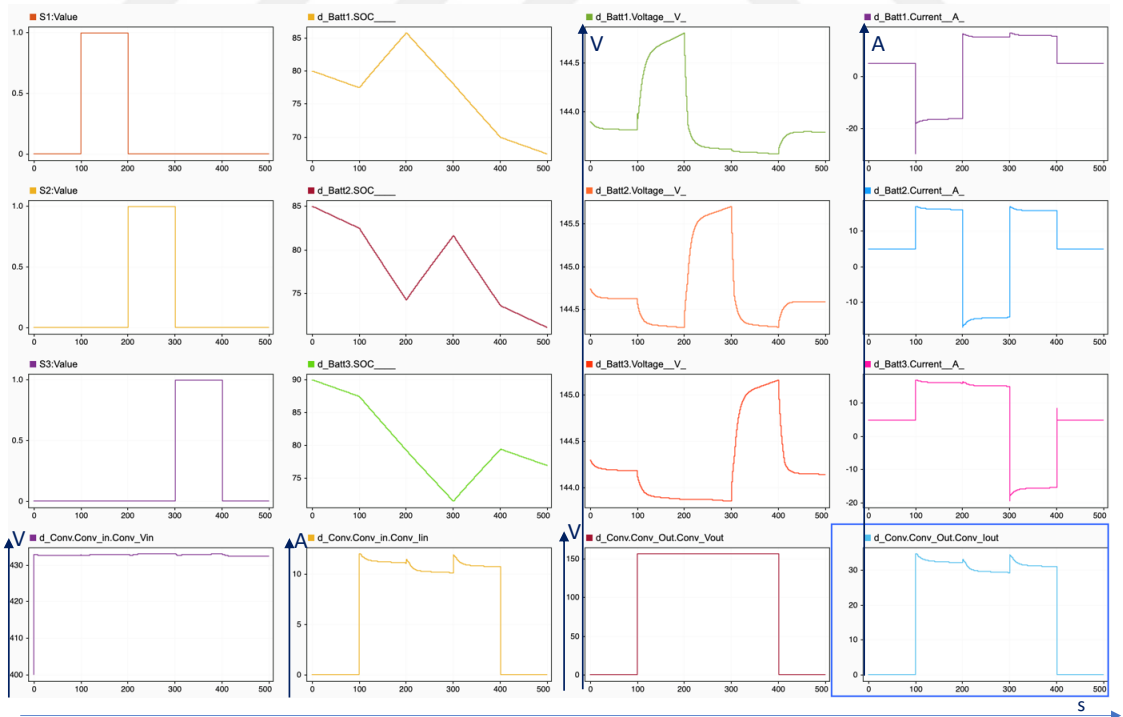
Optimal bir verimlilik sağlamak ve kısa devre gibi hatalardan arınmış bir işlevsellik elde etmek amacıyla, anahtarlama kutusundaki her bir bağlantının hatasız bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Her bir batarya için pozitif (+) ve negatif (-) bağlantılar anahtarlar aracılığıyla kontrol edilmektedir [34]. Şekil 3.13' de tasarlanan anahtarlama kutusu modeli sunulmuştur.



Şekil 3.13 Anahtarlama Kutusu



*a Benzetim Modeli*



*b Benzetim Sonuçları*

**Şekil 3.14** Anahtarlama Kutusu Benzetim Modeli ve Sonuçları

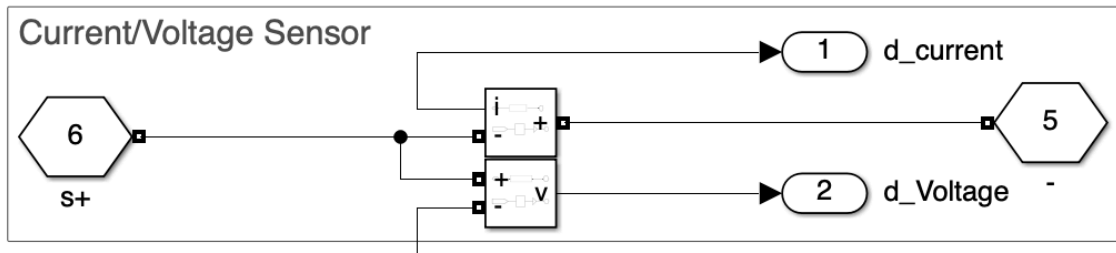
Anahtarlama kutusu, DC/DC dönüştürücü ve batarya paketleri ile bütünleşmiş model Şekil 3.14-a' da gösterilmiştir. Bu çerçevede Bölüm 3.2' de belirtilen tasarım mimarisisiyle batarya paketleri güncelleştirilmiş ve sistem bütünleşmesi yapılmıştır. Şekil 3.14-b' de bütünleşmiş sistemin benzetim sonuçları verilmiştir. Benzetim sonuçlarında görüldüğü üzere, anahtarlama kutusuna gönderilen sinyallere bağlı olarak batarya sisteminden DC/DC dönüştürücü aracılığıyla batarya paketlerine enerji transferi gerçekleştirilmektedir.

Benzetimde görüldüğü üzere 5A sabit akım operasyon süresince devrededir. Kontrolcü tarafından gelecek anahtarlama sinyali ile batarya sisteminde batarya paketlerine aktif dengeleme ile enerji transferi yapılacaktır. SOC ve gerilim değişimleri ve anahtarlama sinyalleri ile enerji akışı gözlemlenebilmektedir.

### 3.3.1.4 Ölçüm ve Koruma Elemanları

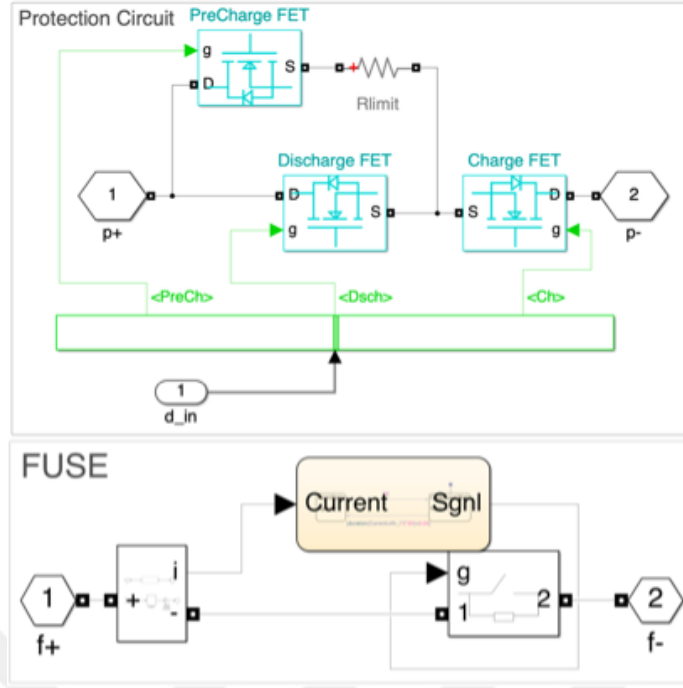
Yüksek gerilim seviyesindeki batarya sistemleri için ek koruma ve kontrol devrelerine ihtiyacın olduğu açıklanmıştır. Bu bağlamda, gerilim ve akım ölçümleri yapılmakta ve bu ölçüm verilerine dayalı olarak ön şarj, şarj ve deşarj işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Ayrıca, potansiyel bir kısa devre hatasında, olası yazılımsal veya donanımsal arızalardan sistem korumasının yapılamaması durumunda karşın, batarya sistemine mekanik koruma fonksiyonu (sigorta, eriyen telli) eklenmiştir.



Şekil 3.15 Akım/Gerilim Okuma Sensorları

Şekil 3.15' te MATLAB/Simulink® Specialized Power Tool içerisinde yer alan akım ve gerilim ölçüm sensörleri verilmiştir. Sensör ölçüm hataları sisteme dahil edilmeyip ideal ölçüm alındığı kabul edilmiştir.

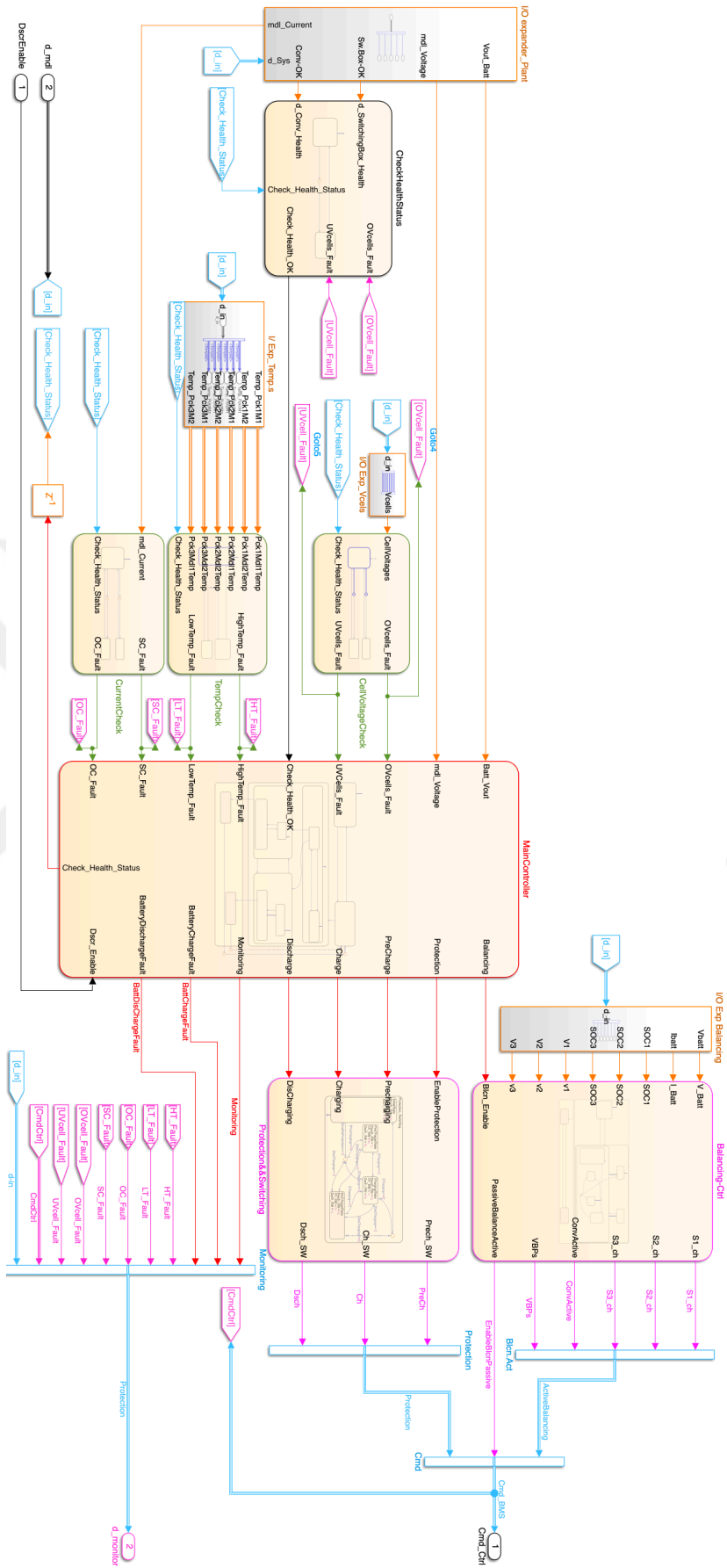


**Şekil 3.16** Koruma Fonksiyonları; Ön Şarj, Deşarj, Şarj Devresi ve Sigorta (Fuse)

Batarya sisteminin elektrikli araçlar ile entegrasyonu ve koruma fonksiyonları Şekil 3.16’te verilmiştir. Sigorta (Fuse), belirlenen akım profiline göre devreyi açık duruma getirerek koruma sağlamaktadır. Koruma devresinde bulunan ön şarj (preCharge), şarj (Charge) ve deşarj (DisCharge) durumları, ana kontrolcü komutları ile işlevlerini gerçekleştirmektedir.

### 3.3.2 Sistem Kontroller Modeli (mdl\_Ctrl)

Sistem kontrolcüsü, sistem giriş parametreleri ve değişkenleri ile tesis modeli tüm alt bileşenlerinden gelen veriyi değerlendirir, yorumlar ve çıktılar üretir. Bu bölümde sistem kontroller (Batarya yönetim algoritması, aktif ve pasif dengeleme algoritmaları) detaylı olarak incelenecektir. Batarya yönetim sistemi algoritması Şekil 3.17’te sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere, sistemden gelen tüm veriler değerlendirilerek ana kontrolcüye (Main Controller) aktarılmakta ve ana kontrolcü tarafından işletilmektedir.



Şekil 3.17 Sistem Kontroler Modeli (mdl\_Ctrl)

Sistem kontrolcüsünü daha iyi anlamak için sistemin sözde kodu oluşturulmuştur;

## **Başla**

**Verileri Al:** Batarya Paketlerin Hücre Gerilimleri, Çekilen Akım Bilgisi, Sıcaklık Sensor Bilgileri ve Hesaplanmış SOC değerleri, Anahtarlama Kutusu ve DC/DC Dönüştürücü Sağlık Durumu ve Batarya Discrete Sinyal Bilgisi

**Eğer** Batarya Discrete Sinyal == 1 **ise**

OFF\_State'ten Initialize State geç (Check\_Health\_Status ve Monitoring "1" yap)

\\Aşağıdaki işlemleri yap

Sıcaklık kontrolü ve uygunluk durumu ilet (HTFault, LTFault)

Batarya hücre gerilim kontrolü ve uygunluk durumu ilet (UVFault, OVFault)

Anahtarlama ve Dönüştürücü sağlık durumu uygunluğunu ilet (Check\_Health\_OK)

Çekilen akım değerinin kontrolü ve uygunluk durumu ilet (OC\_Fault, SC\_Fault)

**Eğer** yukarıda yapılan işlemlerde uygunluk var **ise**

Initial State'ten Normal Operation State Geç

Pre\_Ch, Ch ve DisCh uygun olduğunda Protection "1" yap

**Eğer** Batt\_Vout < Vpackmax (25ms boyunca) **ise** Pre\_Ch == 1,

\\Precharge State Değerlendirmesi yap

**Değilse** Pre\_Ch == 0;

**Eğer** Batt\_Vout > mdl\_Voltage **ise** Charge State geç

\\Charge State Değerlendirmesi yap

**Eğer** Batt\_Vout < Vpackmax (25ms boyunca) ve HT\_Fault, OV\_Fault durumu uygun **ise** Ch == 1,

**Değilse** Ch == 0,

**Eğer** Batt\_Vout > Vpackmax **ise** FaultState geç

**Değilse** Discharge geçiş durumuna bak

**Değilse** Discharge State geç

\\DisCharge State Değerlendirmesi yap

**Eğer** SC\_Fault, OC\_Fault, UV\_Fault durumu uygun **ise** DisCh == 1

**Değilse** DisCh == 0

**Eğer** SC\_Fault var **ise** Faultstate geç

**Değilse** Charge geçiş durumuna bak

**Eğer** Charge ve/veya Discharge State üzerinden FaultState geçilmiş **ise**

İlgili Fault durumunu bildir ve döngüyü Initalize State götür

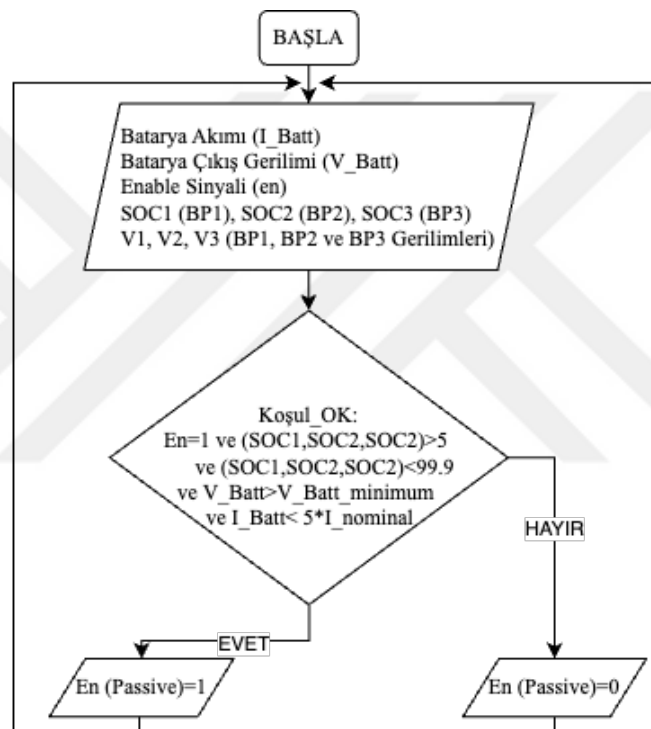
**Değilse** Initial State kal

**Değilse** OFF\_State kal

**Bitir**

Akım, gerilim ve sıcaklık değerlendirme süreleri uygulamaya bağlı olarak kullanılan hücre karakteristiğine bağlıdır. I/O Expander (Giriş/Çıkış Genişletici) ile gelen sinyaller ilgili alt-sistem bloklarına genişletilmiş ve iletilmiştir.

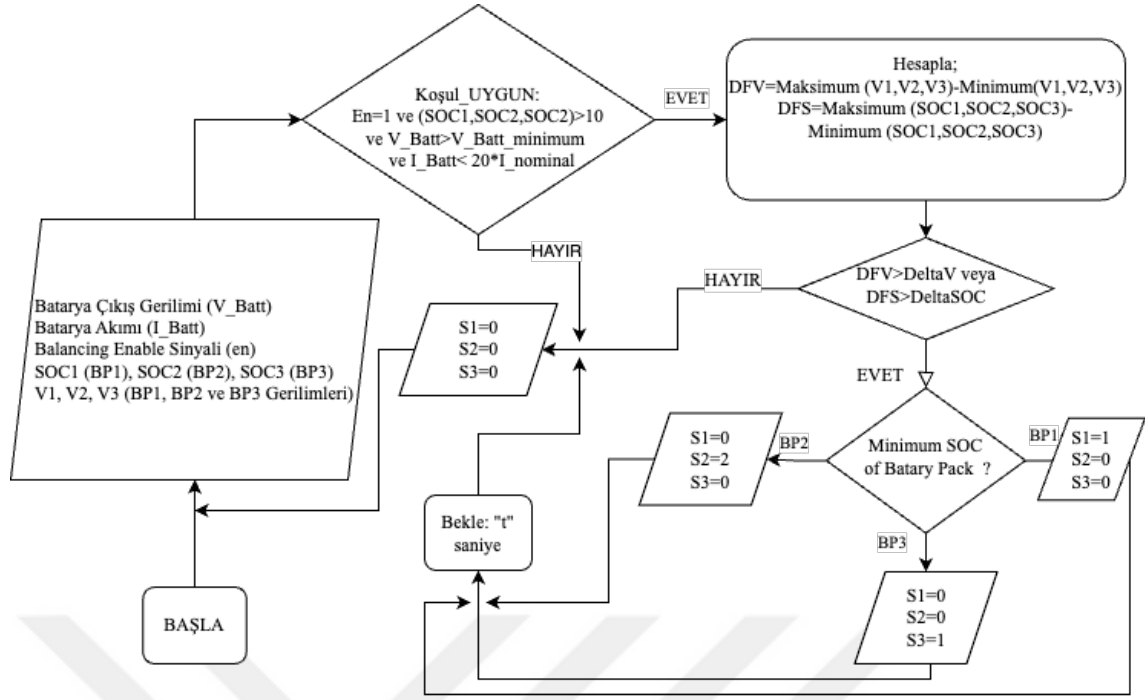
Bölüm 3.3.1’de belirtildiği üzere tesis modeli alt bileşeni olan batarya paketlerinde pasif dengeleme ve şarj durumu hesaplama algoritmaları bulunmaktadır. Pasif dengeleme için pasif dengeleme başlat komutu ana kontrolcü tarafından karar verilmektedir. Pasif dengeleme başlat değerlendirmesi Şekil 3.18 akış diyagramında gösterilmiştir. Akış şemasında görüleceği üzere batarya SOC durumu, çekilen akımın genliği ve batarya çıkış gerilimine göre değerlendirme yapılmaktadır.



Şekil 3.18 Pasif Dengeleme Aktif Akış Şeması

Aktif dengeleme sinyali pasif dengeleme sisteminde olduğu gibi birçok parametreye bağlı olarak değerlendirilmektedir. Main Controller tarafından gelen dengeleme (balancing) sinyali ile sistem giriş parametreleri kontrol edilerek sürekli bir döngü içerisinde değerlendirilmektedir.

Tasarımında, aktif dengeleme anahtarlama frekansı simülasyon frekansına eşit olup ConvActive sinyali üretimi ile “t” saniye aktif kaldıktan sonra tekrar giriş değişkenlerin değerlendirilmesi yapmakta (50 ms boyunca giriş değerlendirmesi geçerliyse) ve döngü devam etmektedir. Aktif dengeleme algoritması akış şeması Şekil 3.19’ de sunulmuştur.



**Şekil 3.19** Aktif Dengeleme Algoritması Akış Şeması

Batarya sistemi kontrolcüsü, tüm muhtemel giriş parametreleri ile hata ayıklama işlemlerinden geçirilmiş ve sistem entegrasyonu ile doğrulama faaliyetleri tamamlanmıştır.

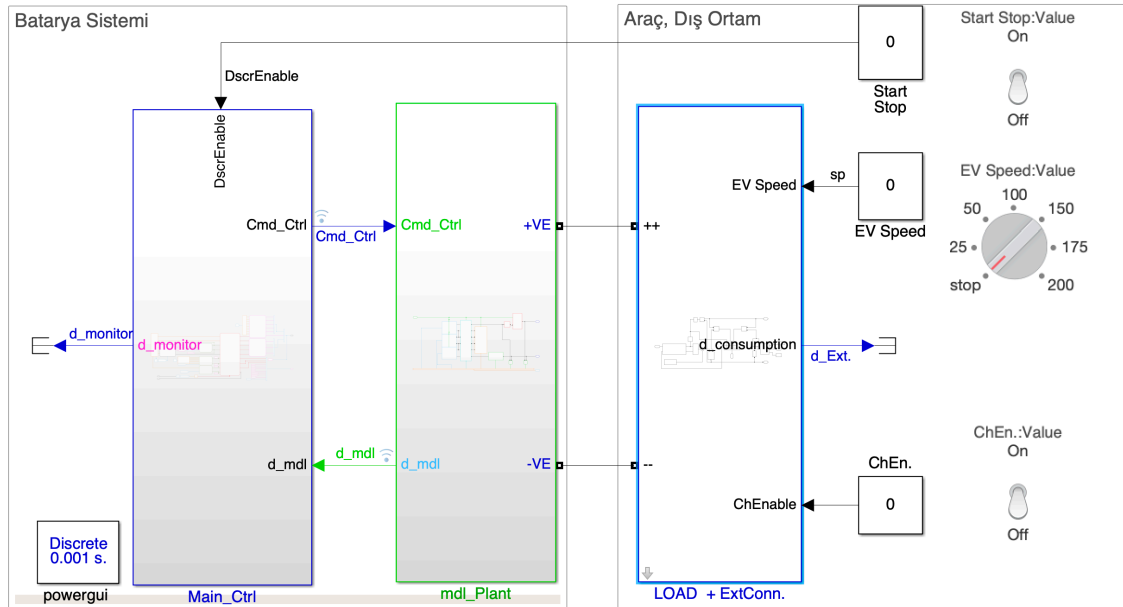
## SİSTEM ENTEGRESİ VE ANALİZLERİ SONUÇLARI

### 4.1 Batarya Sistem Entegrasyonu

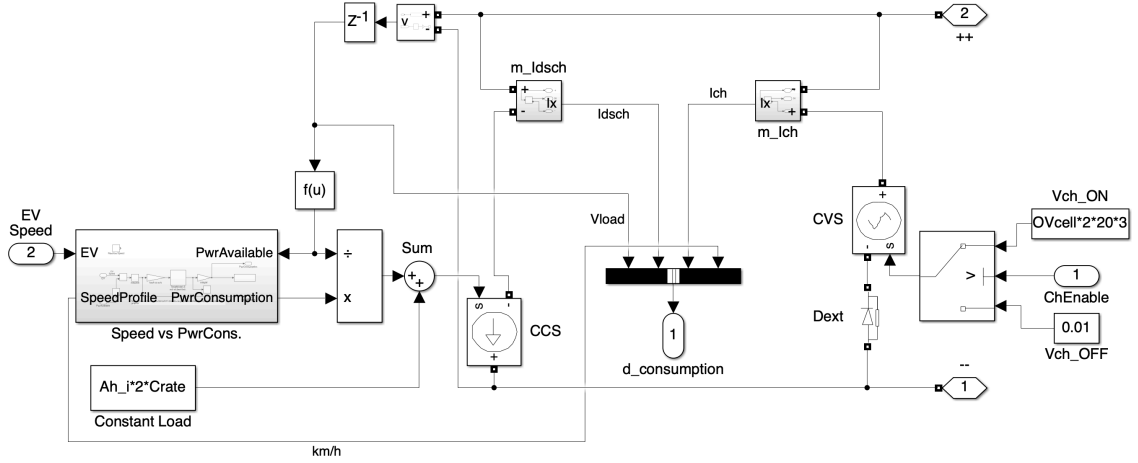
Bu bölümde, batarya sistemi (tesis modeli (Plant model) ve kontrolör (Main\_Ctrl)) entegrasyonu yapılarak dış ortam ile sistem bağlantısı diyagramı verilmiştir, Şekil 4.1' de sunulmuştur.

Tasarlanan batarya yönetim sistemini anlaşılır bir şekilde göstermek için, öncelikle farklı C-rate (şarj/deşarj oranı) seviyelerinde sistem benzetim sonuçları verilecektir. Ardından, batarya çıkışı kısa devre edilerek koruma fonksiyonlarının işlevselliği verilecektir. Sistem dinamikleri benzetim sonuçları ile elde edildikten sonra, 75 kW batarya kurulu güce sahip bir araç için batarya paketi kapasitesi artırılarak belirlenen sürüş profiline bağlı olarak batarya sisteminin tepkisi incelenecektir.

Not: Sistem sıcaklık değerlendirmesi BYS algoritmasına eklenmiş, fakat tesis modeli kapsamında batarya profilleri fonksiyonu olarak işlenmediğinden test sonuçlarına eklenmemiştir. Güncel tasarımda giriş parametreleri ve değişkenlerinde görüleceği üzere rastgele fonksiyon olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1 Batarya Sistemi Entegrasyonu



Şekil 4.2 Dış Ortam, Araç Modeli

Sistem analizi ve doğrulamasında kullanılacak Dış Ortam, Araç modeli Şekil 4.2’ de gösterilmiştir. Şarj aktif (ChEnable) sinyali ile sabit gerilim kaynağı (CVS), hem araç beslemesini sağlamakta hem de batarya sistemi şarj işlemini başlatmaktadır. Deşarj işlemi sabit akım kaynağı (CCS) olarak sisteme eklenmiştir. 75kW kurulu güç sistemi benzetiminde kullanılacak aracı yük profili Speed vs PwrCons alt sisteminde modellenmiştir [35].

## 4.2 Batarya Sistem Analizi ve Sonuçları

Bu bölümde batarya sistemin şarj ve deşarj durumu performansı incelenmiş ve örnek araç profili ile batarya sistemi tepkisinin benzetimi sunulmuştur. Pasif dengeleme durumu için örneklem yapılacak ve tüm batarya paketleri ve modüllerin anahtarlama, hücre gerilimleri verilmeyecektir.

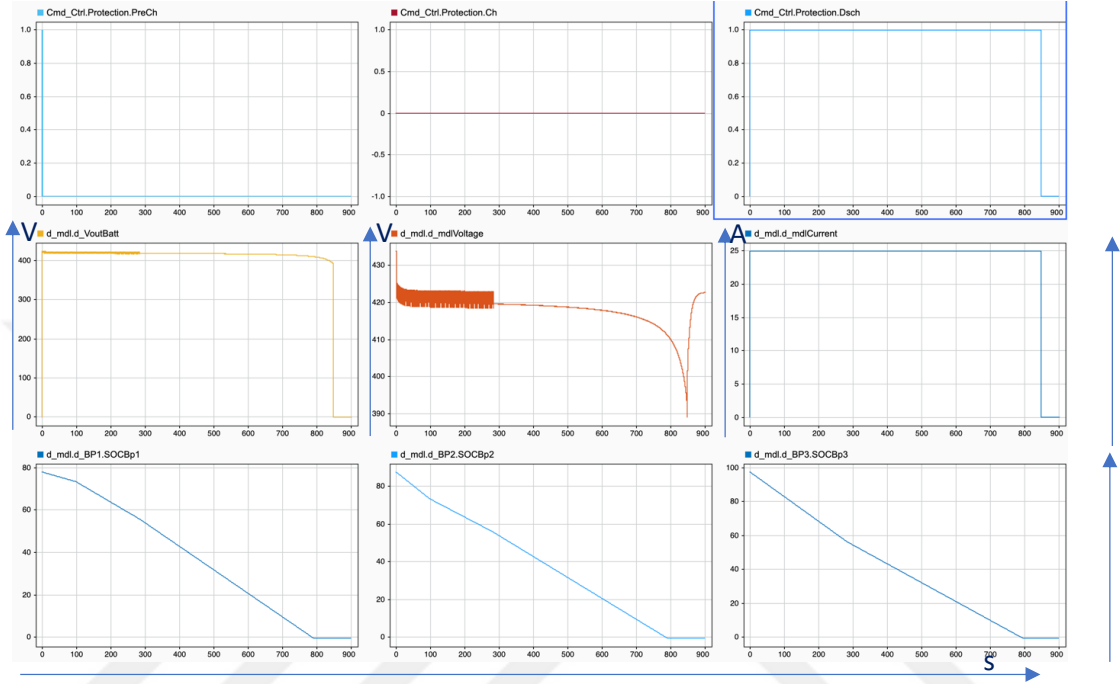
### 4.2.1 Farklı C-rate Değerlerinde Batarya Performansı

Batarya sisteminin deşarj performansının değerlendirilmesi için yüksek akım (5C-rate) ve düşük akım (1C-rate) yüklemesindeki profilleri sunulacaktır.

#### 4.2.1.1 5C-rate Deşarj Durumunda Batarya Performansı

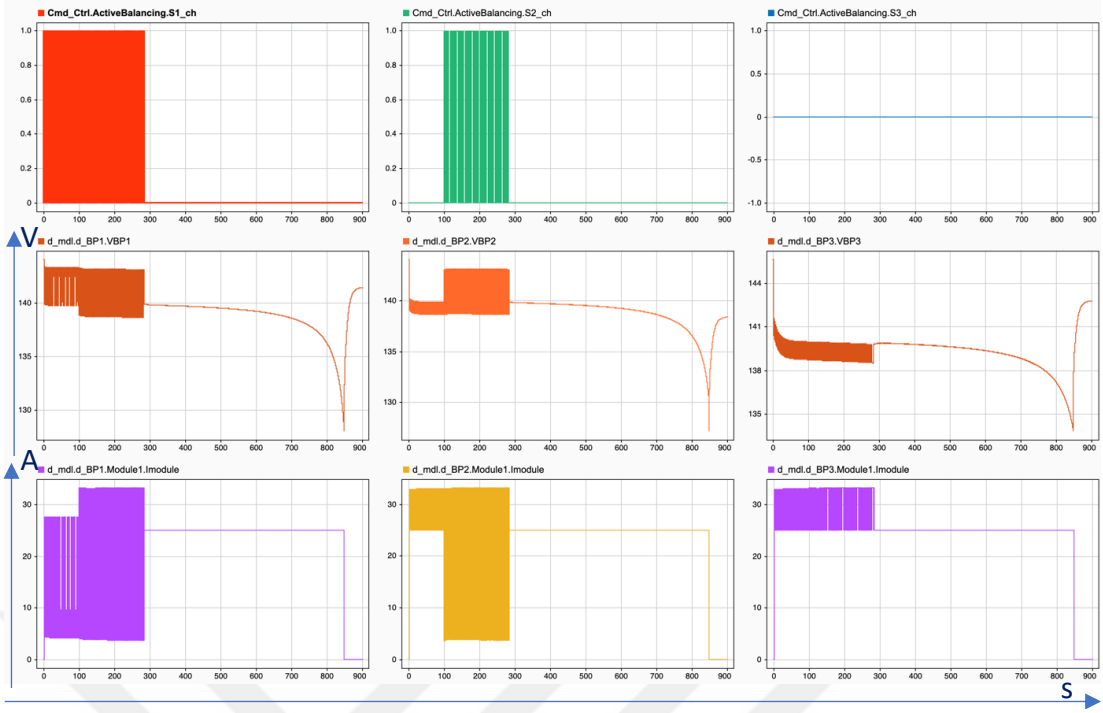
Batarya sistemi ön şarj (Cmd\_Ctrl.Protection.PreCh), şarj (Cmd\_Ctrl.Protection.Ch), ve deşarj (Cmd\_Ctrl.Protection.Dsch) durumu, Batarya çıkış gerilimi (d\_mdl.d\_VoutBatt), batarya açık devre gerilimi (d\_mdl.d\_mdlVoltage), batarya çekilen akım (d\_mdl.d\_mdlCurrent) ve batarya paketleri SOC değişimleri (d\_mdl.d\_BP1.SOCBp1, d\_mdl.d\_BP1.SOCBp2 ve d\_mdl.d\_BP1.SOCBp3) Şekil 4.3’ te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere başlangıçta farklı SOC değerlerinde (BP1 80%, BP2 90% ve BP3 100%)

5Ah bir batarya için 25Amp (5C) yük çekilmiştir (Bölüm 3 verilen tasarım değerlendirmesinden SOC ve Kapasite (Ah) değerlerinde sapmalar görülebilir.). SOC değişimlerinde görüldüğü üzere, batarya paketlerinin şarj durumu hesabın “0” değerine düşmesiyle Cmd\_Ctrl.Protection.Dsch sinyali “0” olmakta ve batarya sistemi ile çıkışı açık devre durumuna getirilmektedir.

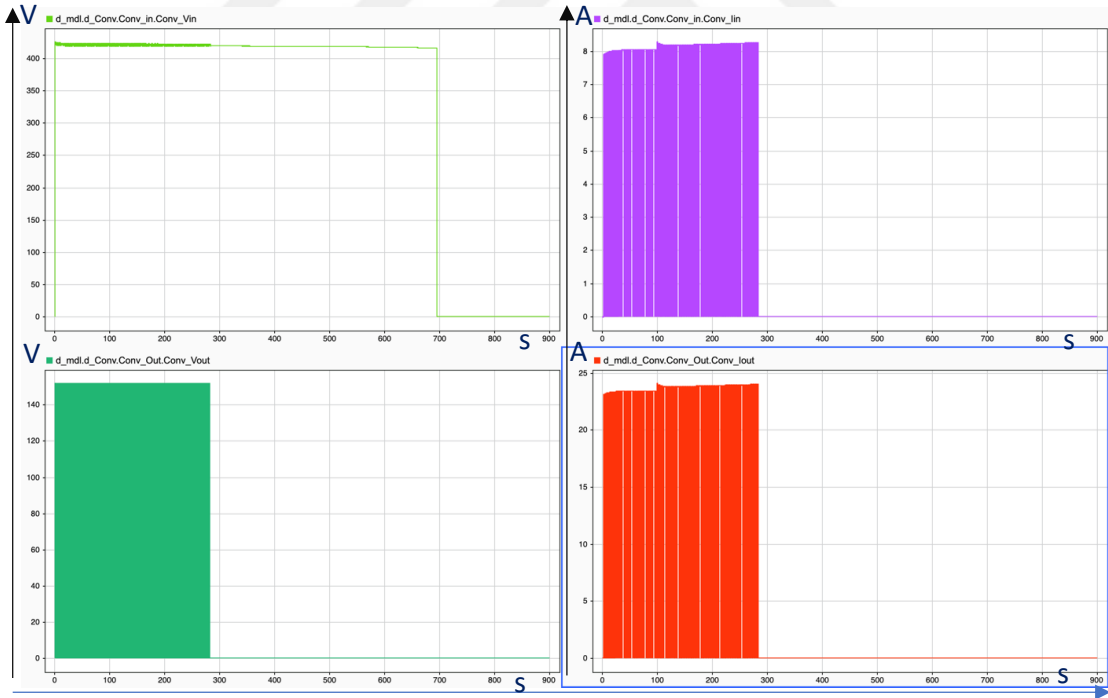


**Şekil 4.3** 5C-rate Yükleme Çıkış Profilleri ve Batarya Paketleri SOC Değişimi

Şekil 4.4’ de her bir batarya paketinin 5C yüklemede çıkış gerilim/akım profilleri ve aktif anahtarlama sinyalleri sunulmuştur. Aktif anahtarlama sinyalleri (Cmd\_Ctrl.ActiveBalancing.S1\_ch, Cmd\_Ctrl.ActiveBalancing.S1\_ch ve Cmd\_Ctrl.ActiveBalancing.S1\_ch) “1” olduğu durumda aktif enerji transferi gerçekleşmektedir. Bu değişimleri batarya paketlerinin gerilim/akım profillerinde görülmektedir.



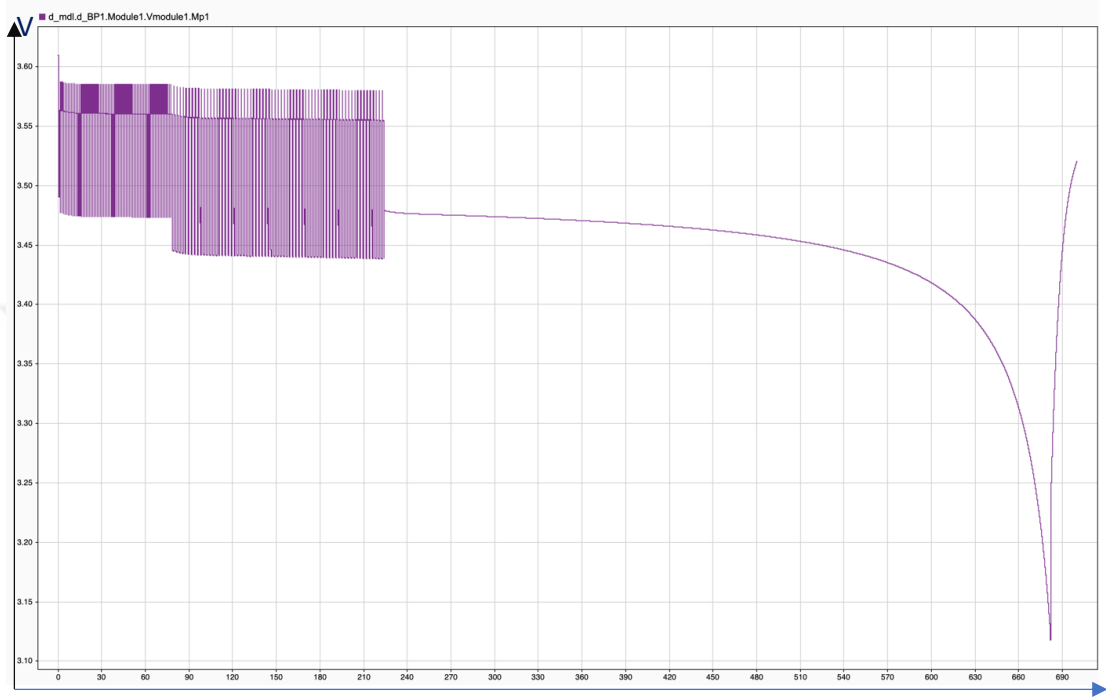
Şekil 4.4 5C-rate Yüklemede Aktif Dengeleme Anahtarlama BPs Çıkış Profilleri



Şekil 4.5 5C-rate Deşarj Durumunda DC/DC Dönüştürücü Giriş/Çıkış Profilleri

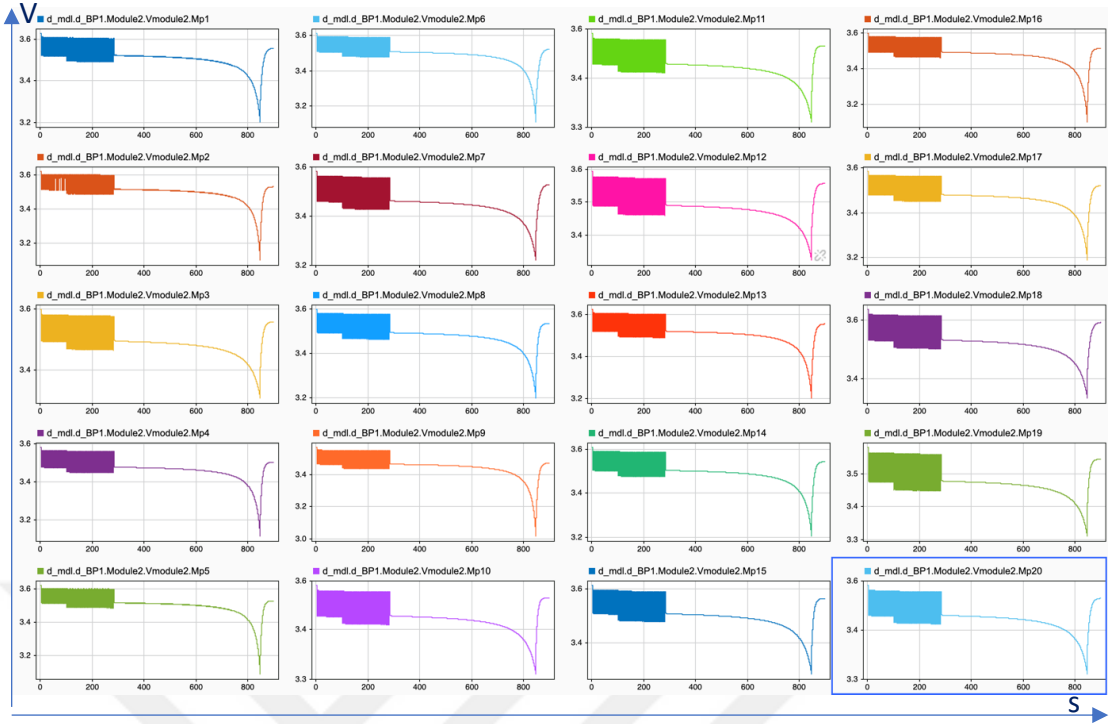
Aktif enerji transferi DC/DC dönüştürücü üzerinden gerçekleşmektedir. Zamana bağlı Dönüştürücü akım/gerilim profilleri Şekil 4.5' te verilmiştir. Şekil 4.4' te verilen anahtarlama sinyallerine bağlı olarak DC/DC Dönüştürücü çıkışının aktif olduğu görülmektedir.

Batarya hücre gerilim profilinde, Bölüm 3’ te tanımlanan pasif dengeleme ve Şekil 4.4’ te verilen aktif dengelemenin etkisiyle ek değişiklikler olacaktır. Aktif dengelemede aktif enerji transferi şarj/deşarj etkisi daha yüksek olduğundan gerilim değişimi daha yüksek olacaktır. Pasif dengelemede bu değişim daha düşüktür. 5C yüklemde (Sadece aktif dengeleme etkin) bir batarya hücresinin gerilim değişimi Şekil 4. 6’ da verilmiştir.

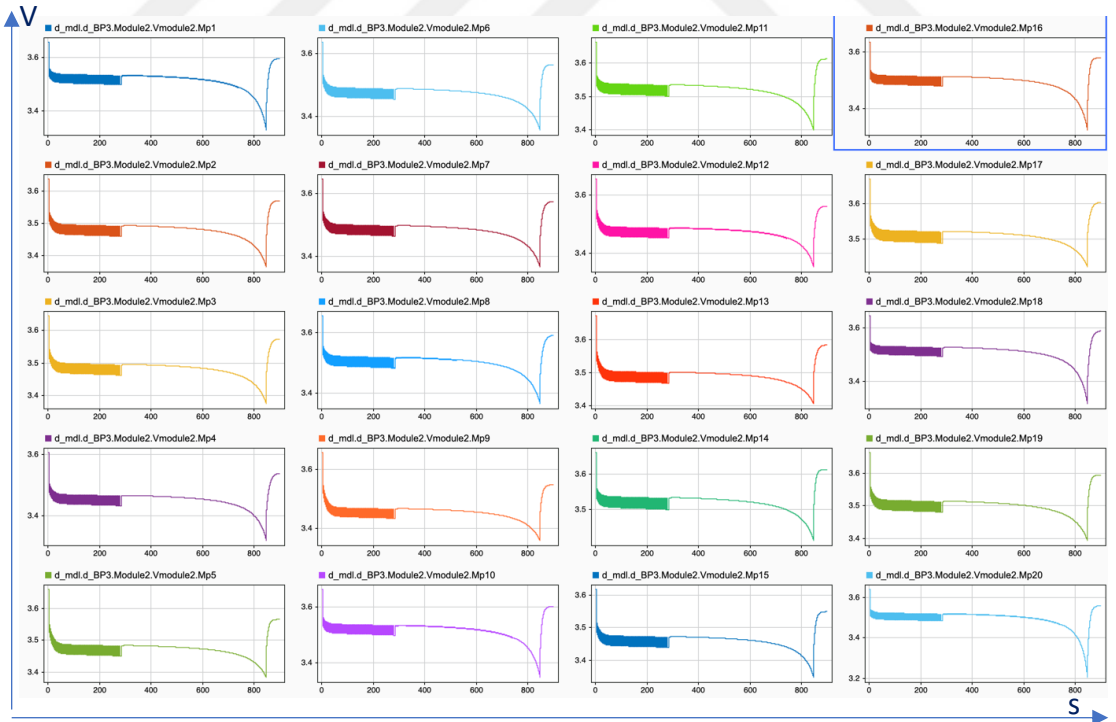


**Şekil 4. 6** Hücre Gerilim Değişimi

Benzer şekilde, Şekil 4.7’ de BP1-Modül-2 ve Şekil 4.8’de BP3-Modül-1 hücre gerilim değişimleri verilmiştir (Örnekleme yapılmıştır.). Pasif dengeleme aktif olmadığından anahtarlama sinyalleri değişmemi yoktur (lojik “0”).



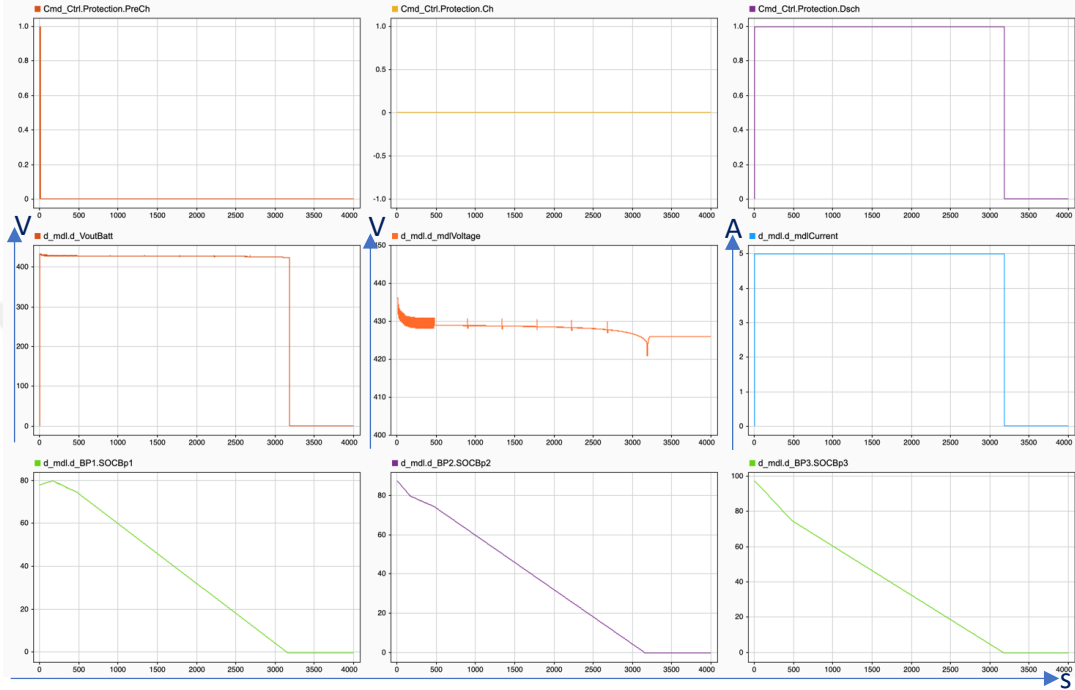
Şekil 4.7 5C-rate Deşarj 'da BP1-Modül-2 Hücre Gerilim Değişimleri



Şekil 4.8 5C-rate Deşarj 'da BP3-Modül-1 Hücre Gerilim Değişimleri

#### 4.2.1.2 1C-rate Deşarj Durumunda Batarya Performansı

Benzetim, farklı SOC değerlerinde (BP1 80%, BP2 90% ve BP3 100%) 5Ah bir batarya için 5Amp (1C) yük çekilmesi koşulunda gerçekleştirilmiştir. Batarya sistemi çıkış devre sinyalleri, akım/gerilim profilleri ve batarya paketleri SOC değişimleri Şekil 4.9’ de verilmiştir. Hesaplanan SOC değerine göre batarya çıkışı kesilmiştir.



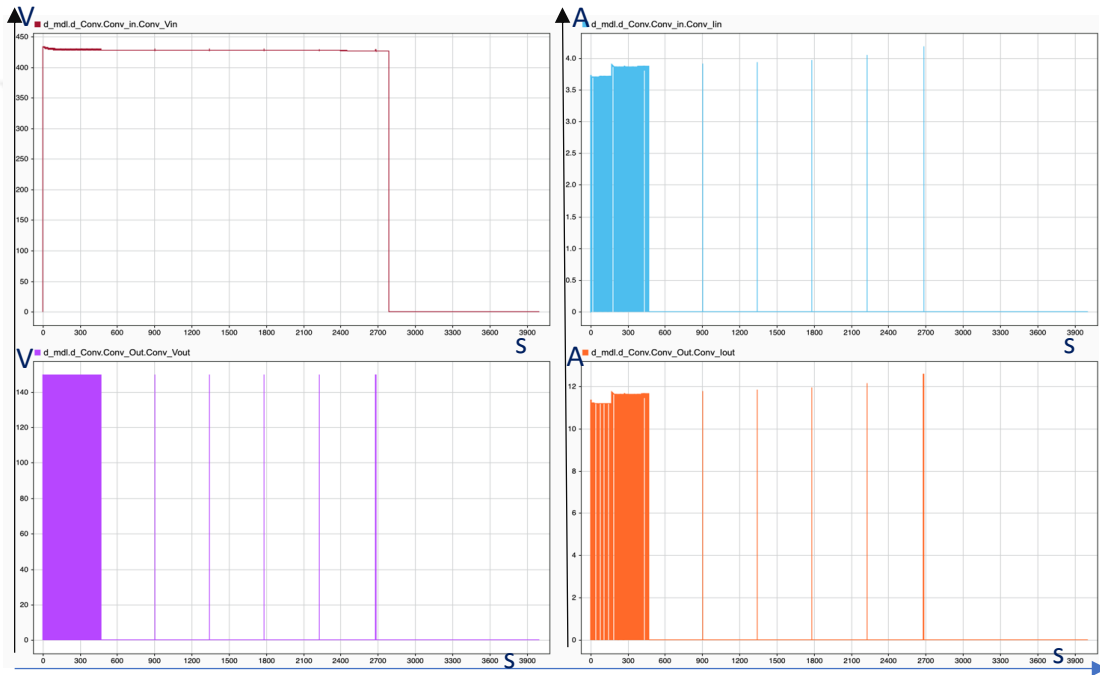
Şekil 4.9 1C-rate Yükleme Çıkış Profilleri ve Batarya Paketleri SOC Değişimi



Şekil 4.10 1C-rate Yüklemede Aktif Dengeleme Anahtarlama BPs Çıkış Profilleri

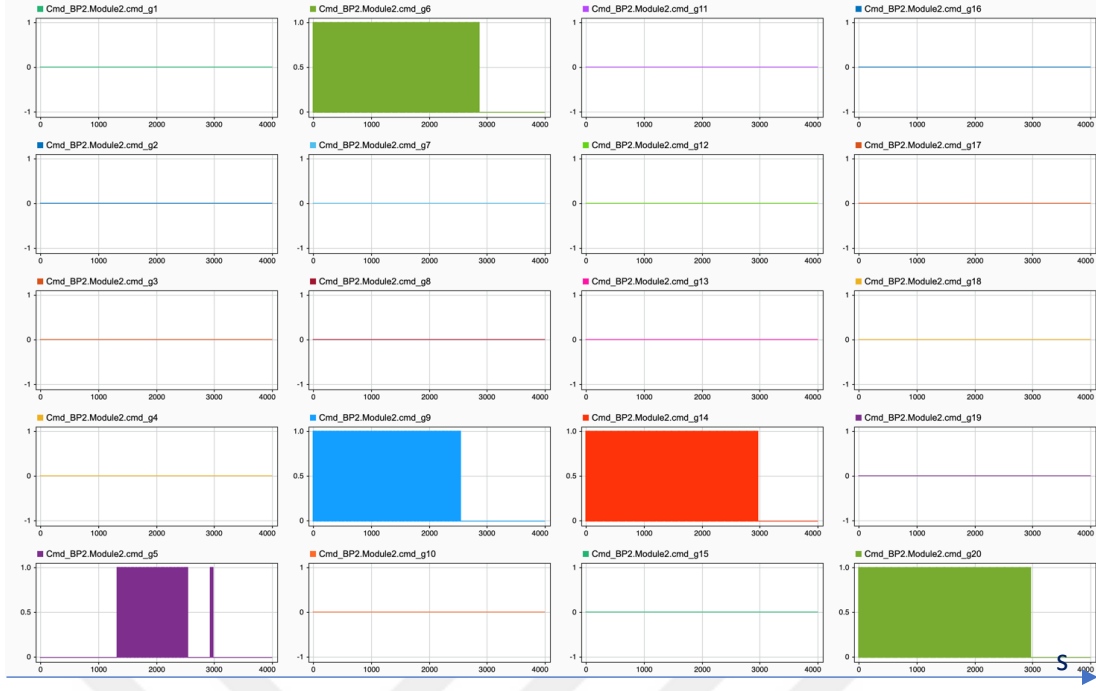
Şekil 4.9’ de SOC değişimlerinde görüldüğü üzere aktif dengeleme ile şarj doluluk oranları eşitlenmiştir. BYS tarafından öncelikli en düşük SOC değerindeki BP1’ e aktif enerji transferi yapılmış ve BP1’in BP2 SOC oranına eşitlendiği görülmektedir. Ardından düşük SOC değerlerine sahip BP1 ve BP2, 1 saniye aktif enerji transferi ve 50 ms değerlendirme olacak şekilde BP3 ile 0.5% SOC farkı olana kadar aktif enerji transferi devam etmiştir. Bu değişimler SOC değişim eğimlerinden gözlemlenmektedir.

Şekil 4.10’ da batarya paketleri gerilim/akım profilleri ve aktif anahtarlama sinyalleri sunulmuştur. Aktif enerji transferi DC/DC dönüştürücü üzerinden yapılmakta ve Şekil 4.11’ de verilmiştir.

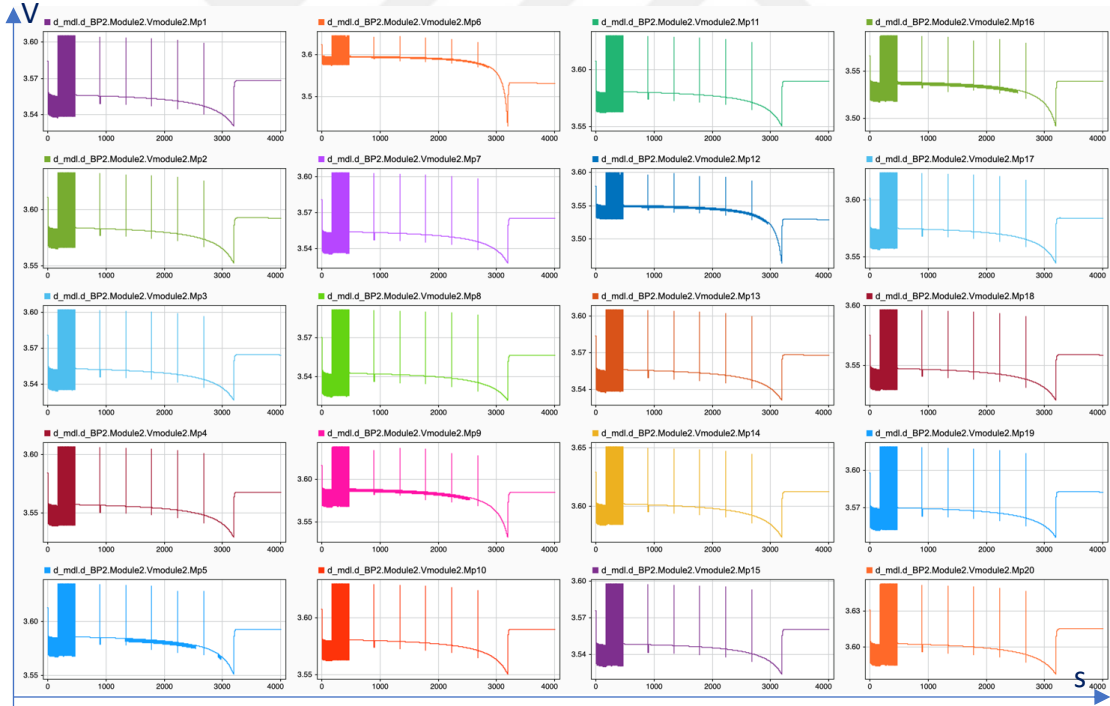


**Şekil 4.11** 1C-rate Deşarj Durumunda DC/DC Dönüştürücü Giriş/Çıkış Profilleri

Batarya sistemi deşarj süresince, aktif dengeleme ve pasif dengeleme uygulanmıştır. Her bir hücreye gönderilen pasif dengeleme aktif anahtarlama sinyali ve hücre gerilim değişimleri BYS tarafından rapor edilmekte ve BP2-Modül-2 değişimleri ise Şekil 4.12 sunulmuştur.



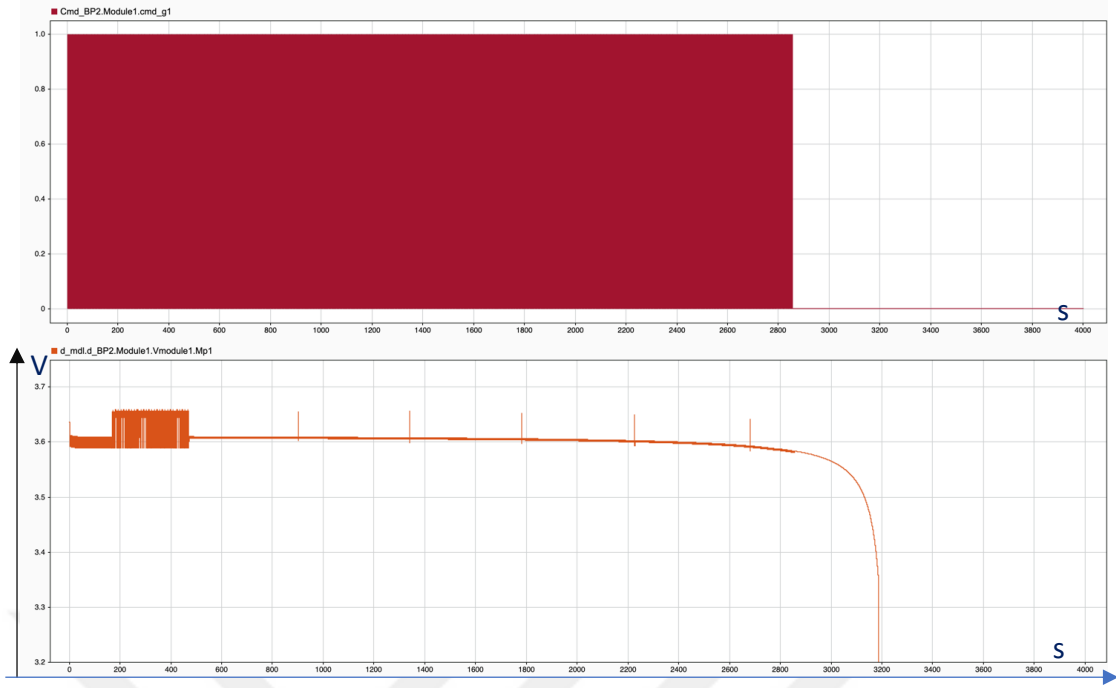
*a BP2-Modül-2 Pasif Dengeleme Anahtarlama Sinyalleri*



*b BP2-Modül-2 Hücre Gerilimleri*

**Şekil 4.12** 1C-rate Deşarj 'da BP2-Modül-2 Pasif Anahtarlama ve Hücre Gerilimleri

Batarya sisteminin çıkışı BYS kontrol algoritması tarafından düşük hücre gerilimi hatasından (UVcell\_Fault) kesilmiştir. Şekil 4.13' de en-düşük hücre gerilimine sahip olan, BP2-Modül-1 Hücre-1 gerilimi ve pasif anahtarlama sinyali verilmiştir.



**Şekil 4.13** 1C-rate Deşarj 'da BP2-Modül-1 Hücre-1 Pasif Anahtarlama ve Gerilimi

**Tablo 4.1** Aktif ve Pasif Dengelemenin Batarya Sistem Performans Etkisi

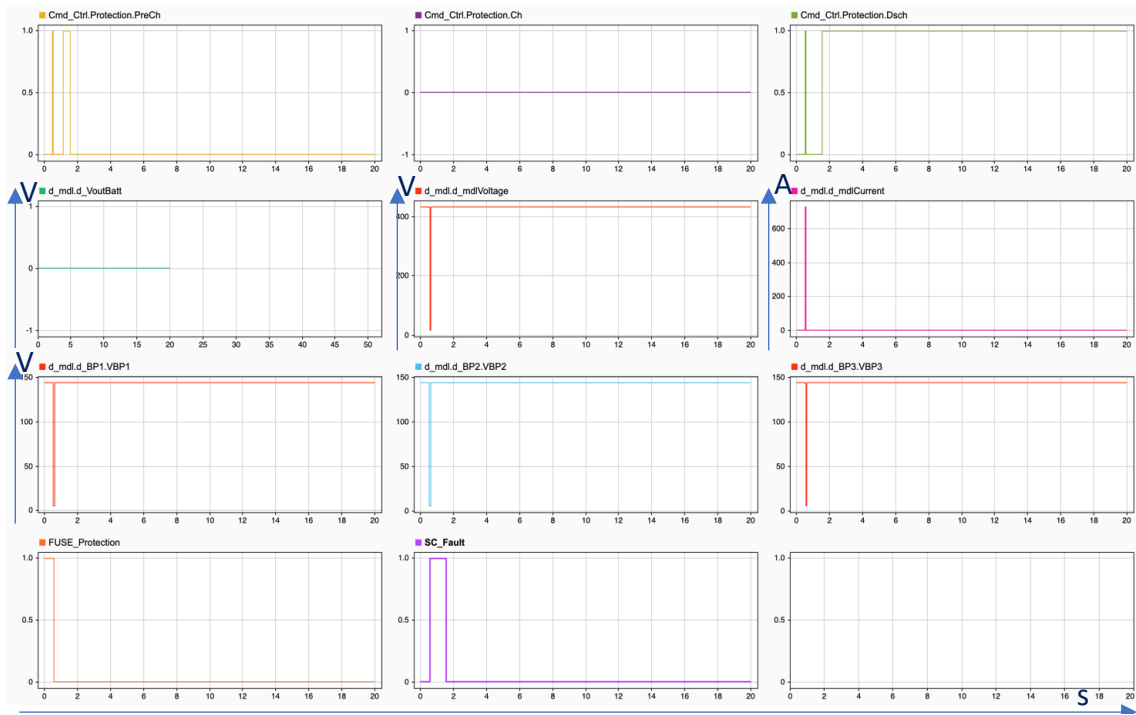
<b>Durum</b>	<b>1C Deşarj Süresi (s)</b>	<b>2C Deşarj Süresi (s)</b>	<b>3C Deşarj Süresi (s)</b>	<b>4C Deşarj Süresi (s)</b>	<b>5C Deşarj Süresi (s)</b>
Aktif ve Pasif Dengeleme Etkin	3153	1645	1112	840	682
Sadece Aktif Dengeleme Etkin	3412	1707	1137	853	682
Sadece Pasif Dengeleme Etkin	2839	1482	1002	758	615
Aktif ve Pasif Dengeleme Etkin Değil	3070	1536	1025	769	615

Benzetim sonuçlarına dayanarak tasarlanan sistemde aktif ve pasif dengeleme kombinasyonların etkin olma durumlarına bağlı olarak sistem benzetim süreleri Tablo 4.1 sunulmuştur. Tüm durumlar BP1 80%, BP2 90% ve BP3 100% şarj doluluk oranında test edilmiştir. Değerlendirmede, önerilen sistem aktif ve pasif dengelemenin etkin olduğu durum ve referans alınan sistem ise hiçbir dengelemenin etkin olmadığı durumdur.

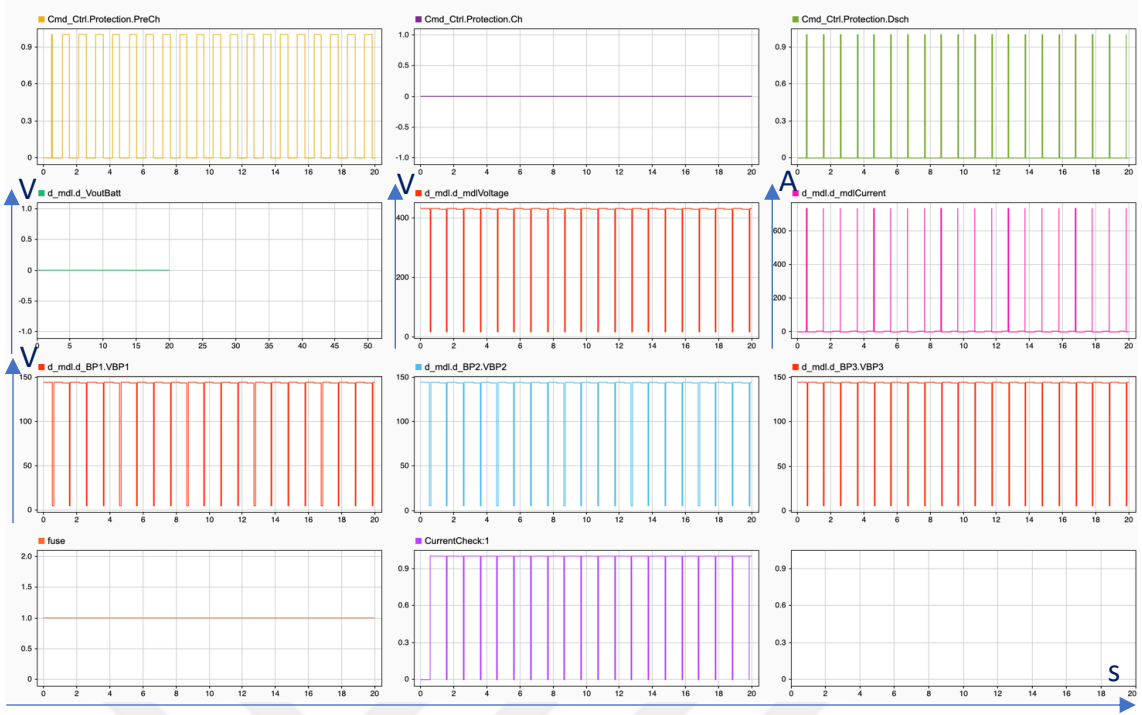
Görüldüğü üzere sadece pasif dengeleme etkin durumunda çalışma süresi arttıkça batarya performansında kayıp artmaktadır. Aktif dengelemeyle sistem performansının 11%' e kadar arttığı görülmektedir. Tasarımda pasif dengeleme etkin akım sınırı 5C olduğundan bu deşarj akımında sadece aktif dengelemenin etkisi görülmektedir.

#### 4.2.2 Çıkış Kısa Devre Durumunda Batarya Performansı

Batarya sistemi kısa devre olması durumu için iki farklı koruma yapılmıştır. Test senaryosu kapsamında çıkış + ve – hat kısa devre yapılmıştır.



Şekil 4.14 Mekanik Kısa Devre Koruması, FUSE Etkin



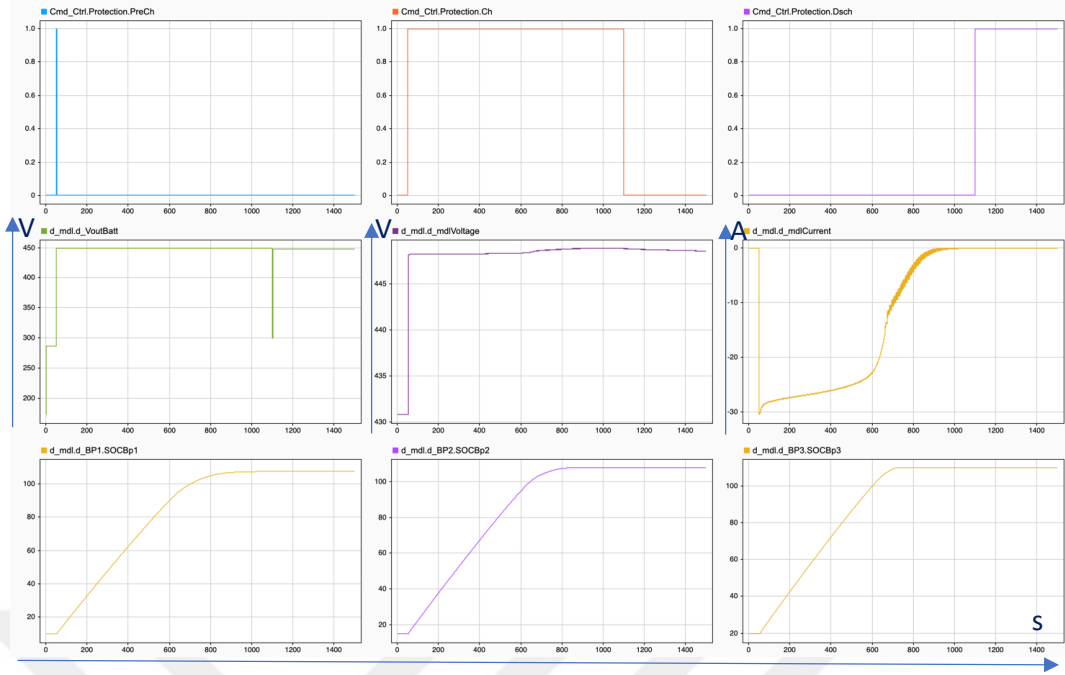
**Şekil 4.15** Yazılımsal Kısa Devre Koruması, BYS Etkin

Tasarımda FUSE (Sigorta) değeri 20C-rate olarak belirlenmiş ve 10ms üzeri kısa devre durumunda açık devre konumuna (Lojik “0”) geçmektedir. Eğer açık devre konumuna 10ms’den daha uzun süren FUSE seçimi yapılırsa, BYS (yazılım koruması) devreye girecektir. Şekil 4.14 (FUSE koruması, 10ms) ve Şekil 4.15’ da (BYS koruması, FUSE 50ms seçilmiş) kısa devre durumundaki profiller sunulmuştur.

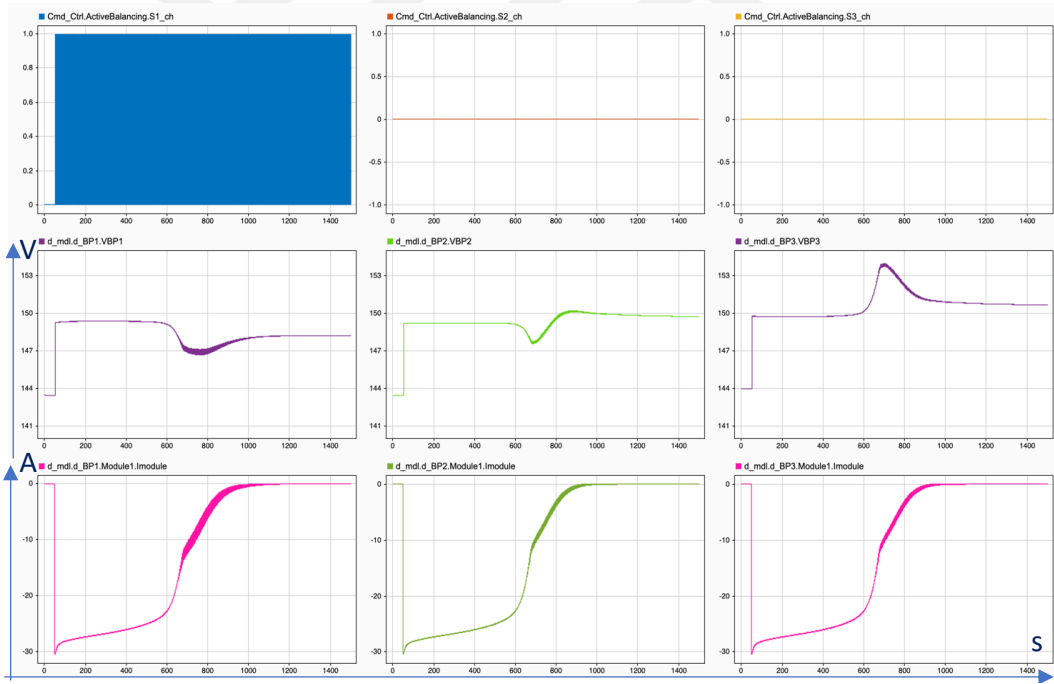
#### 4.2.3 Şarj Durumu Batarya Performansı

Batarya paketleri sırasıyla (BP1, BP2 ve BP3) 10%, 15% ve 20% şarj doluluğundayken sabit gerilimli 450VDC kaynak ile şarj işlemi 50. Saniyede başlatılmıştır. Batarya şarj akımı 0Amp düştükten sonra şarj kaynağı kapatılmıştır.

Benzetim süresince batarya sisteminin akım/gerilim profilleri ve şarj durumu değişimleri Şekil 4.16’ te sunulmuştur. Dikkat çeken nokta, aktif dengelemenin batarya paketlerinden bir veya daha fazlasının tam şarj durumuna gelmeden çok etkili olmadığıdır. Bu durumun ana sebebi, batarya paketlerine uygulanan şarj gerilim seviyesinin DC/DC dönüştürücü çıkış gerilimi ile yaklaşık olarak aynı seviyede olmasıdır.

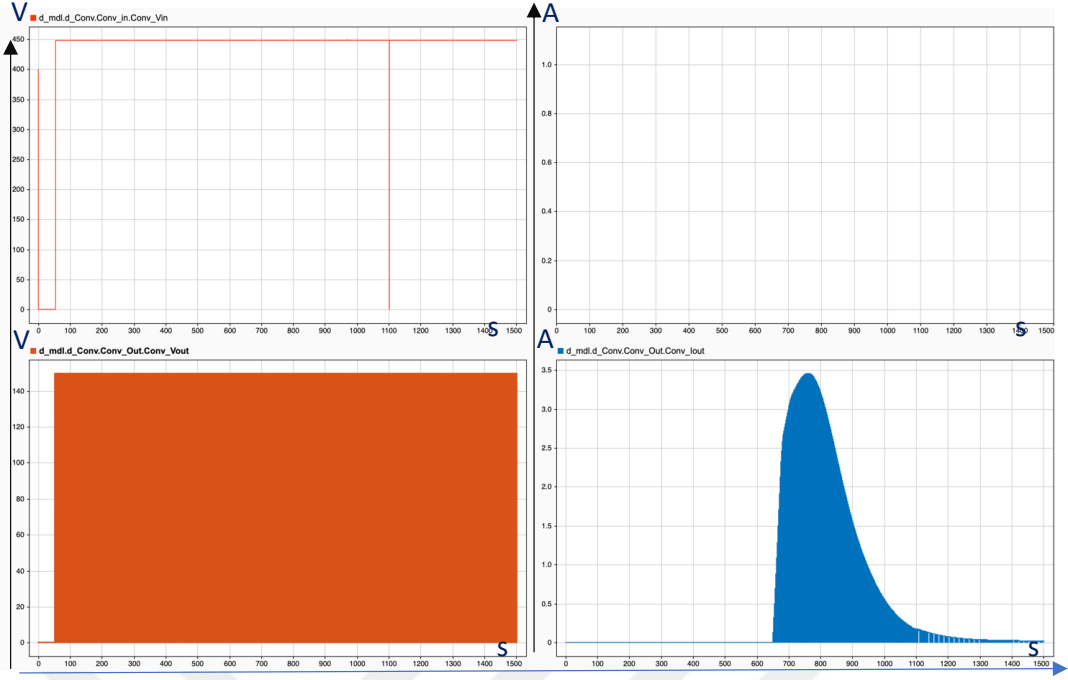


Şekil 4.16 Şarj Durumu Batarya Profilleri



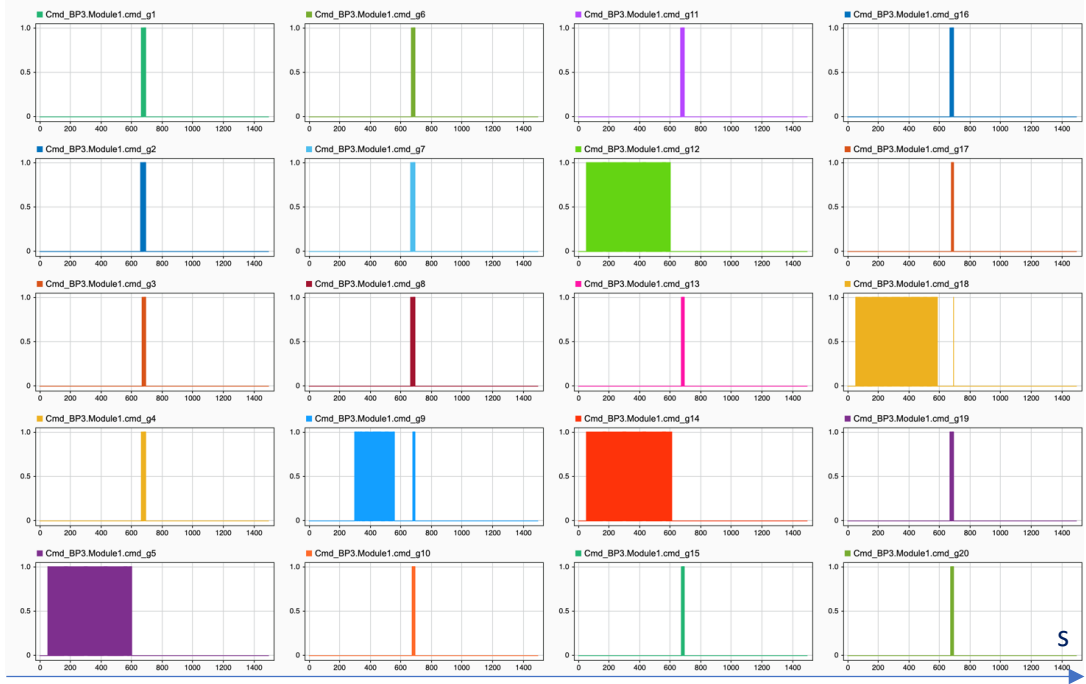
Şekil 4.17 Şarj Durumunda Aktif Dengeleme Anahtarlama BPs Çıkış Profilleri

Şekil 4.16 bataryaların yüksek doluluk oranına geldikten sonra çekilen akımın 0 A seviyesine geldiği ve sabit besleme kaynağının kapatılmasıyla BYS' in şarj durumundan deşarj durumuna geçiş yaptığı görülmektedir. Şekil 4.17' te her bir batarya paketinin gerilim/akım profilleri ve aktif dengeleme sinyallerinin değişimleri verilmiştir. Düşük doluluk oranındaki BP1'e sürekli aktif enerji transferi yapılmıştır.

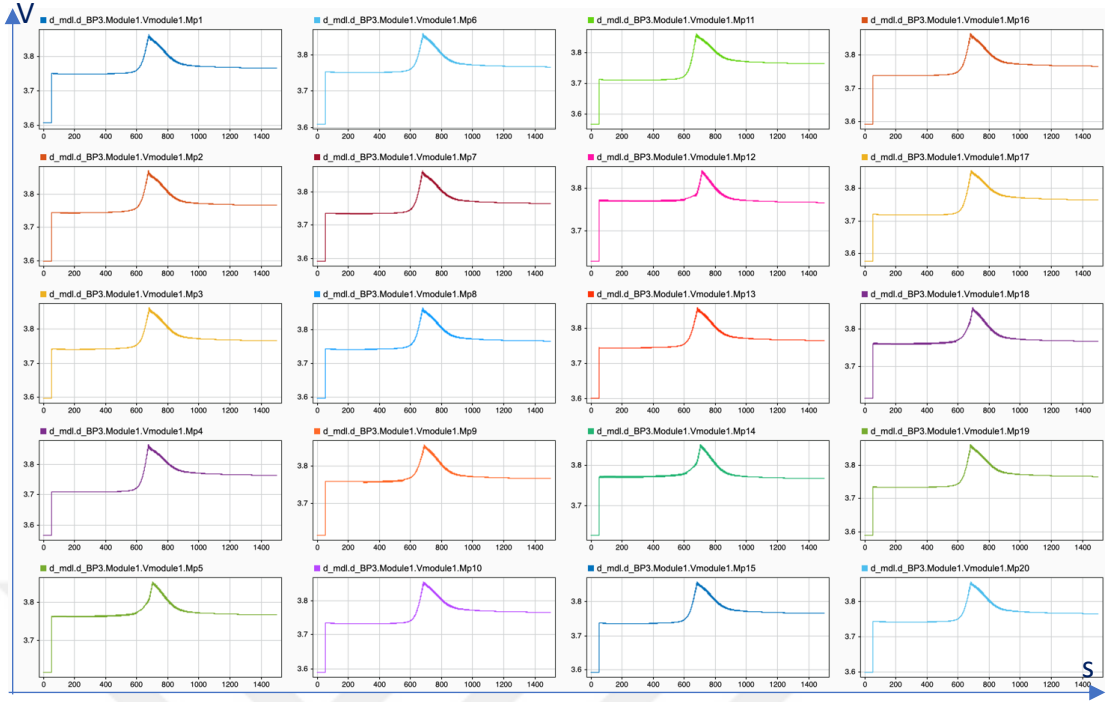


Şekil 4.18 Şarj Durumunda DC/DC Dönüştürücü Giriş/Çıkış Profilleri

Şekil 4.18’ de sunulduğu üzere, aktif enerji transferinin şarj işlemi için batarya doluluk oranların tam şarj durumuna gelmesine yakın daha etkili olduğu gözlemlenmektedir. Bu işlemin tasarım parametrelerine, şarj kaynağı gerilim seviyesine ve DC/DC dönüştürücü çıkış gerilimine bağlı olduğu unutulmamalıdır. Şekil 4.19’ de, BP3-Modül-3 hücre gerilim değişimlerinde bu etkiler gözlemlenebilmektedir.



*a BP3-Modül-3 Pasif Dengeleme Anahtarlama Sinyalleri*



*b BP3-Modül-1 Hücre Gerilimleri*

Şekil 4.19 BP3-Modül-1 Pasif Dengeleme Anahtarlama sinyalleri ve Hücre Gerilimleri

#### 4.2.4 Elektrikli Araç Güç Tüketiminde Batarya Performansı

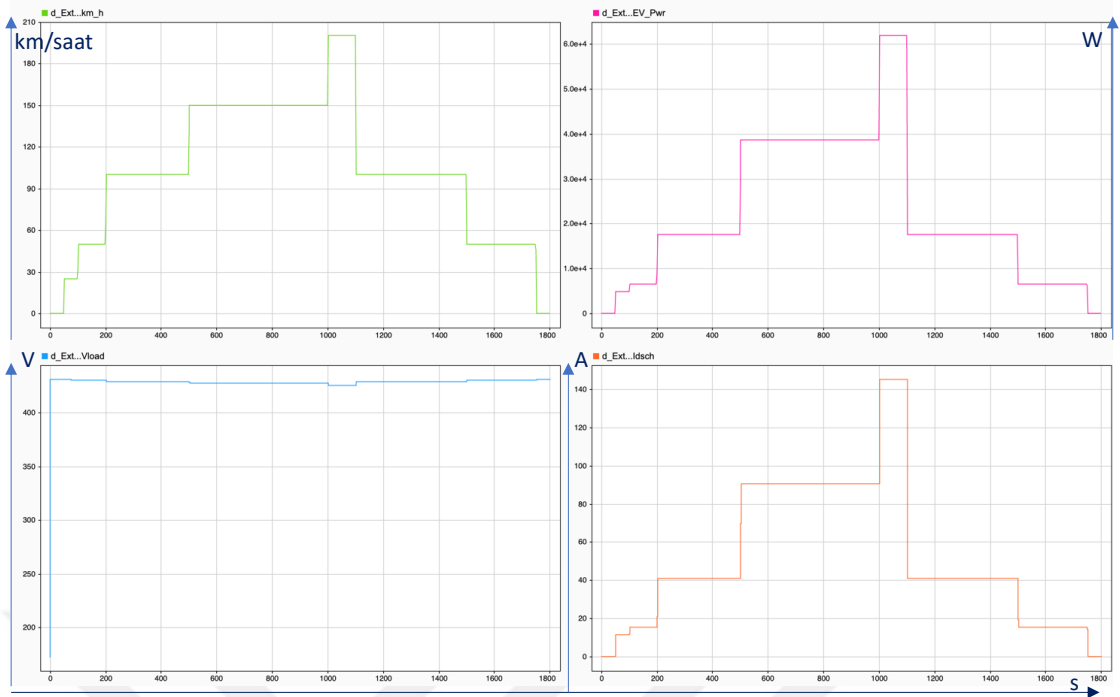
75kW güç değerindeki elektrikli araç benzetimi için batarya paketlerinde kullanılacak paralel hücre sayısı ( $n_p$ ) belirlemiştir;

$$P = V * I = (U_{cell_{nom}} * n_{module} * n_{mseri} * n_{SBP}) * I \quad (4.1)$$

Burada,  $U_{cell_{nom}}$ : Batarya hücre nominal gerilimi,  $n_{module}$ : BP içerisindeki modül sayısı,  $n_{mseri}$  modül içerisinde seri bağlı hücre sayısı,  $n_{SBP}$ : seri bağlı batarya paketi sayısı,  $I$ : talep edilen akım ifadelerine karşılık gelmektedir.

Bu hesaplamalar sonucunda yaklaşık olarak 175 Ah kapasiteye ihtiyaç duyulduğu bulunmuş ve hücre kapasitesine oranlanarak  $n_p$  (paralel bağlı hücre sayısı) değeri 70 olarak belirlenmiştir.

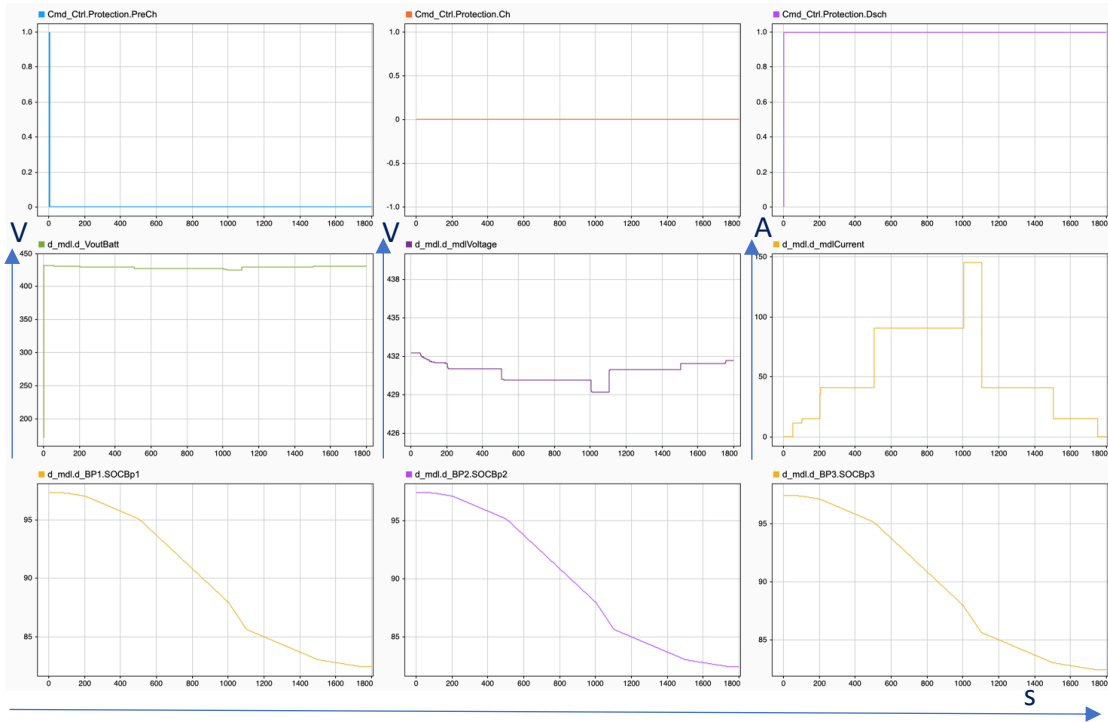
Şekil 4.20' de EA hız profili ( $d_{Ext.km\_h}$ ), EA talep edilen güç ( $d_{Ext.EV\_Pwr}$ ), EA gerilim profili ( $d_{Ext.Vload}$ ) ve akım profili ( $d_{Ext.Idsch}$ ) değişimleri verilmiştir. Yaklaşık olarak 30 dakikalık bir sürüş profili belirlenmiş ve iki farklı senaryo için simülasyon sonuçları sunulmuştur. EA hızlanma ve frenleme dönüş hızları 100 km/saat için sırasıyla 3.5 s ve 2 s olarak belirlenmiştir.



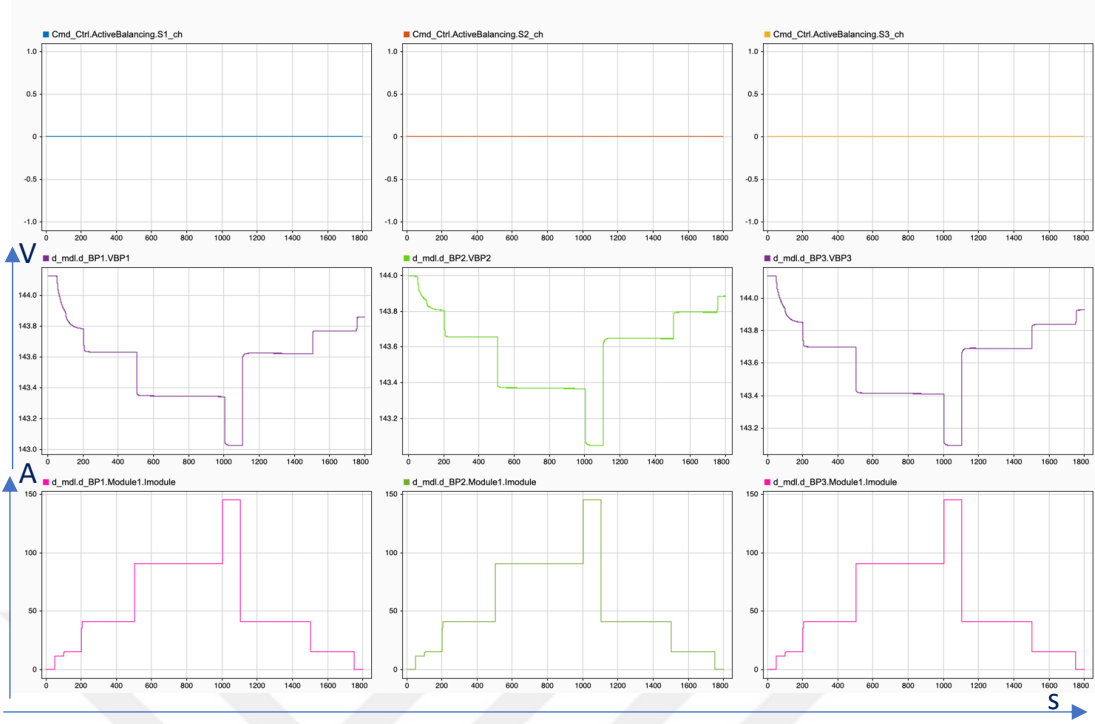
Şekil 4.20 EA Sürüş ve Güç Profili

#### 4.2.4.1 Eşit Şarj Doluluk Oranında Batarya Performansı

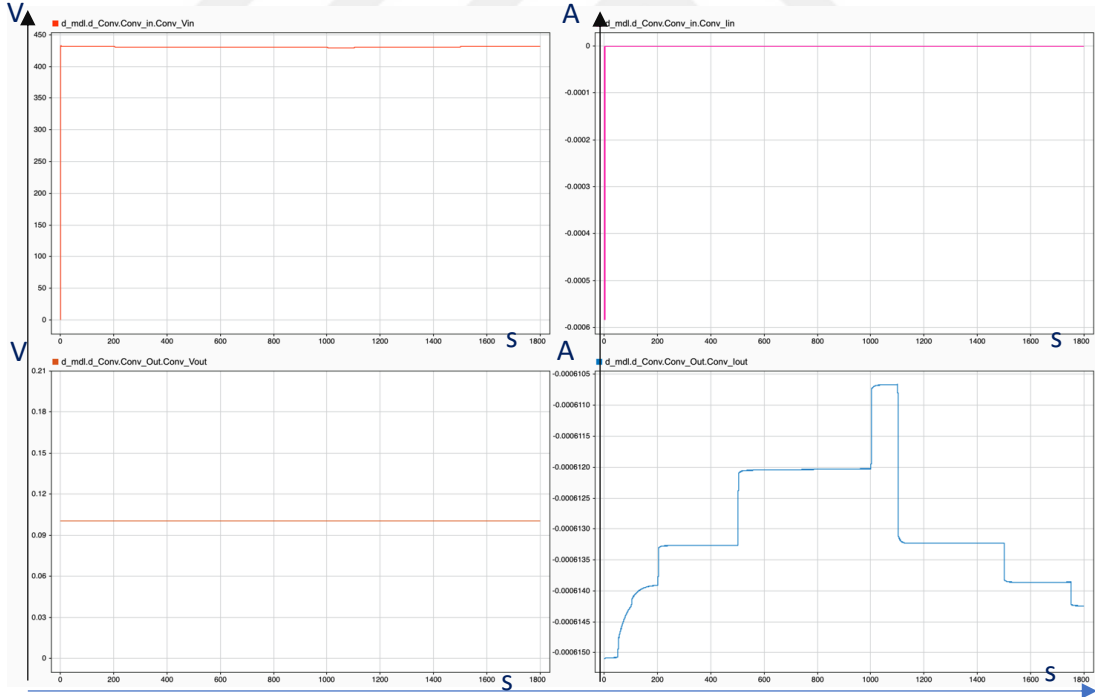
Batarya Paketleri şarj doluluk oranı 100% olarak belirlenmiş ve batarya performansı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.21 EA Profilinde Batarya Sistemi Profilleri, SOC Aynı



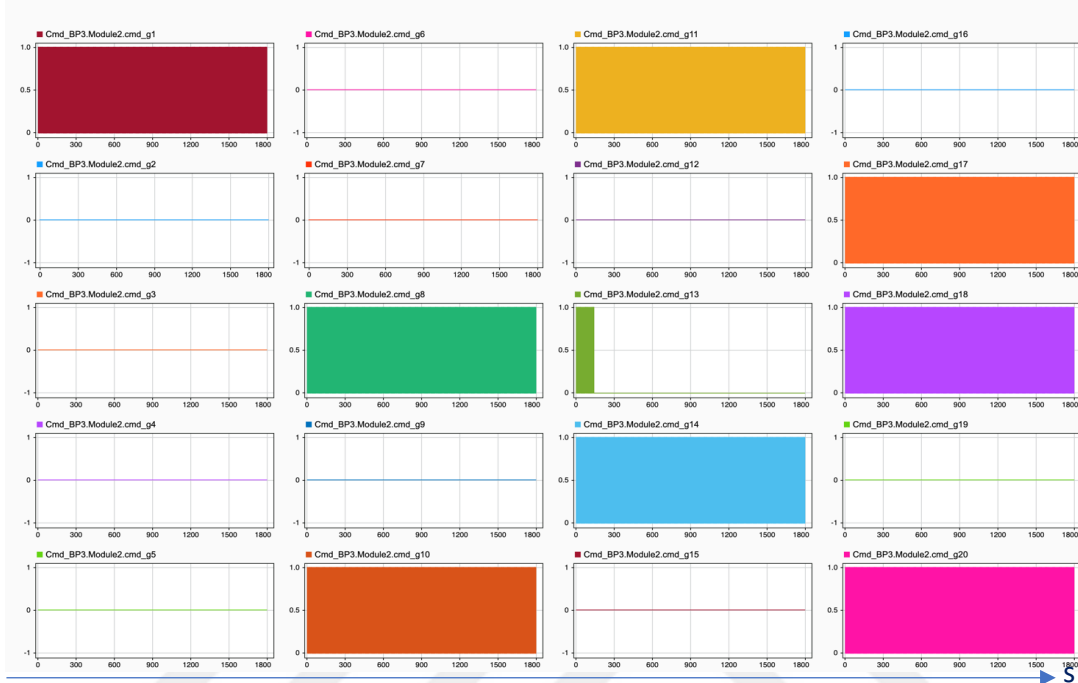
Şekil 4.22 EA Sürüş Profiline Batarya Sistemi Çıkış Profilleri, SOC Aynı



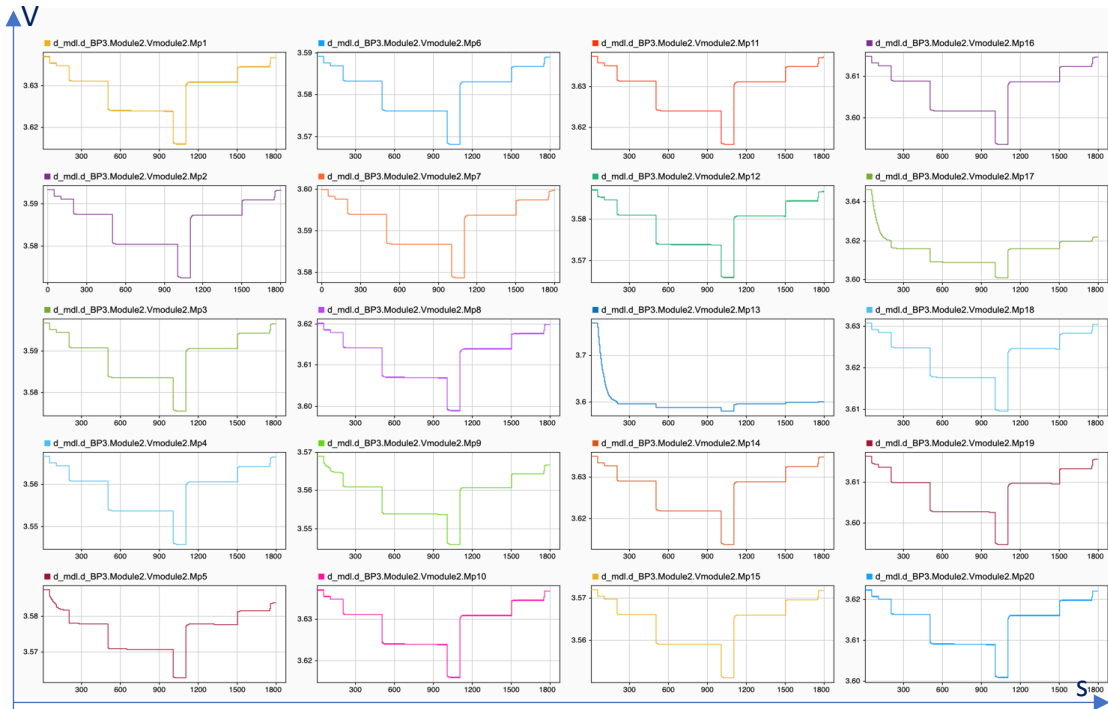
Şekil 4.23 EA Sürüş Profiline DC/DC Dönüştürücü V&I Profilleri, SOC Aynı

Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23' te görüldüğü üzere BP'leri şarj doluluk oranları 0.5% değerinden küçük olduğundan aktif şarj dengelemesi yapılmamıştır (Şekil 3.19, bakınız.). BPs benzer davranış sergilemişlerdir.

BP-3 Modül-2'nin hücre gerilimleri ve pasif dengeleme için ilgili modülün anahtarlama sinyalleri Şekil 4.24' te sunulmuştur. Hücreler arasındaki gerilim farkının 0.05 V değerinden büyük olduğu durumda yüksek gerilim değerine sahip hücelere dengeleme için sinyal gönderilmiştir.



a BP3-Modül-2 Pasif Dengeleme Anahtarlama Sinyalleri

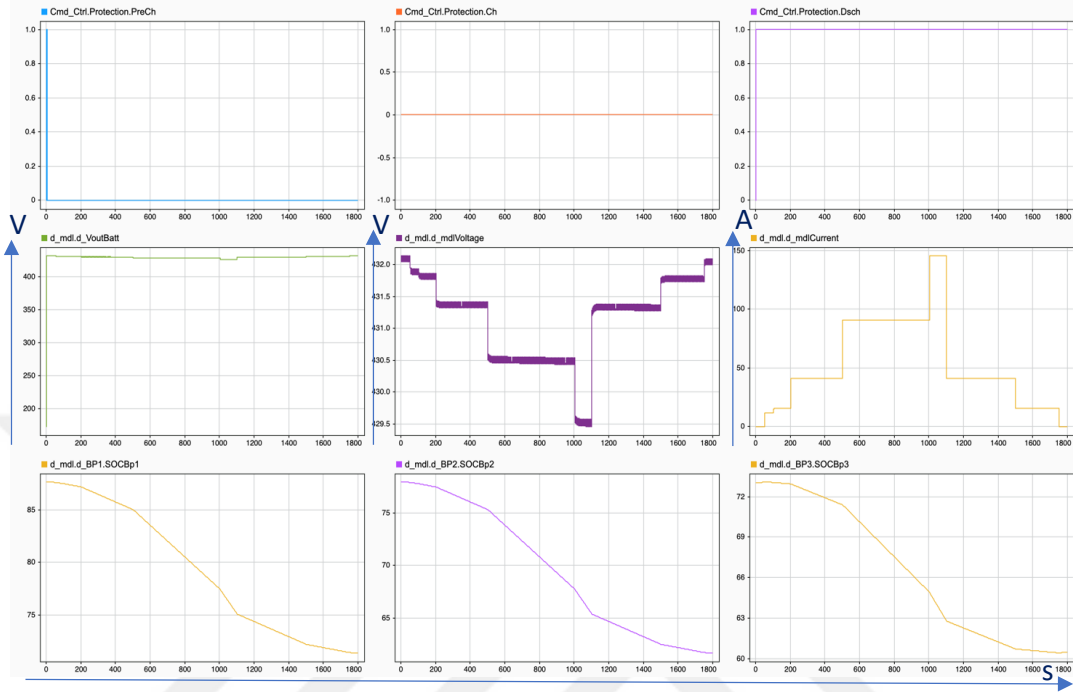


b BP3-Modül-2 Hücre Gerilimleri

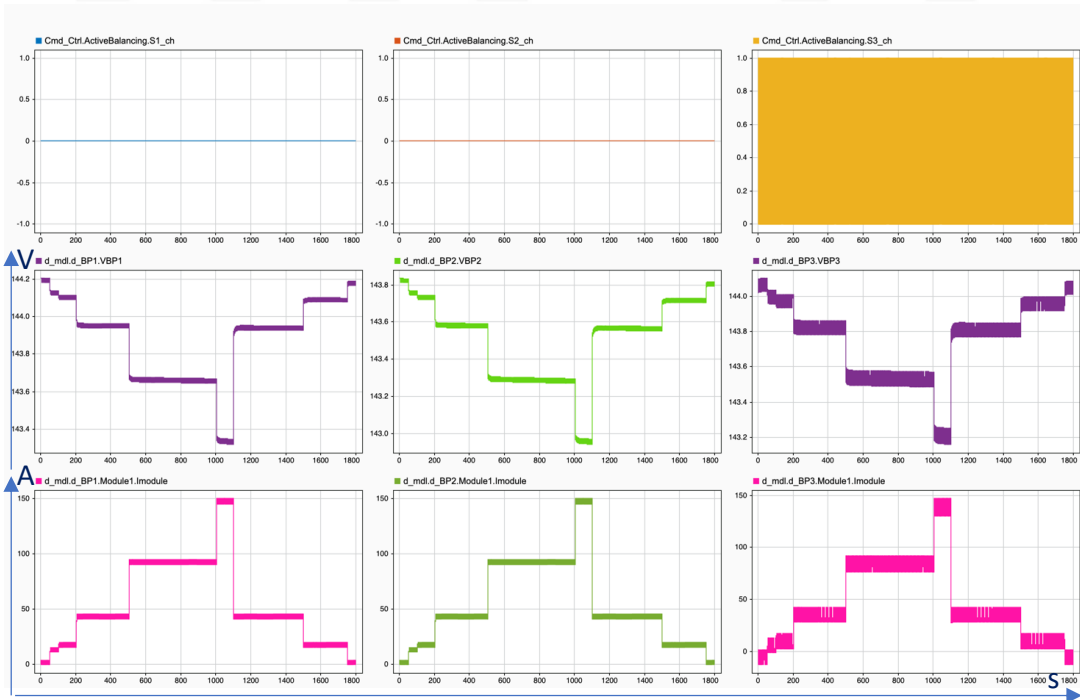
Şekil 4.24 BP3-Module2 Pasif Dengeleme Anahtarlaması ve Hücre Gerilimleri

#### 4.2.4.2 Farklı Şarj Doluluk Oranında Batarya Performansı

Batarya Paketleri şarj doluluk oranları sırasıyla BP1 90%, BP2 80% ve BP3 75% olarak belirlenmiş ve batarya performansı benzetim sonuçlarıyla gözlemlenmiştir.

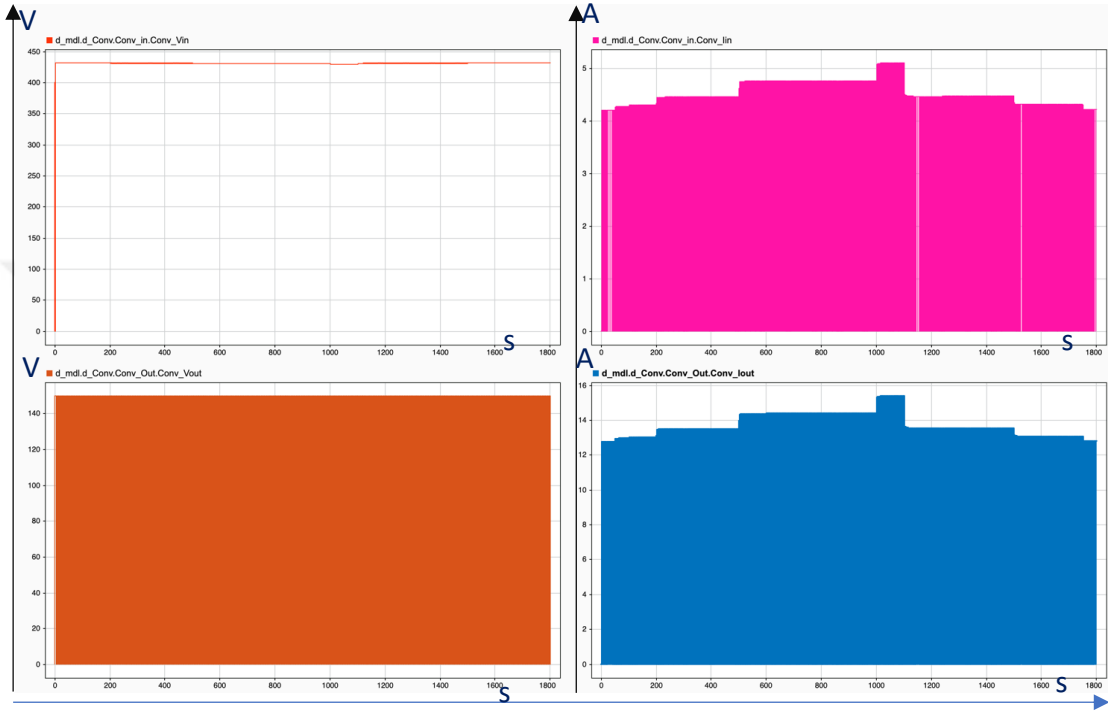


Şekil 4.25 EA Profilinde Batarya Sistemi Profilleri, SOC Farklı



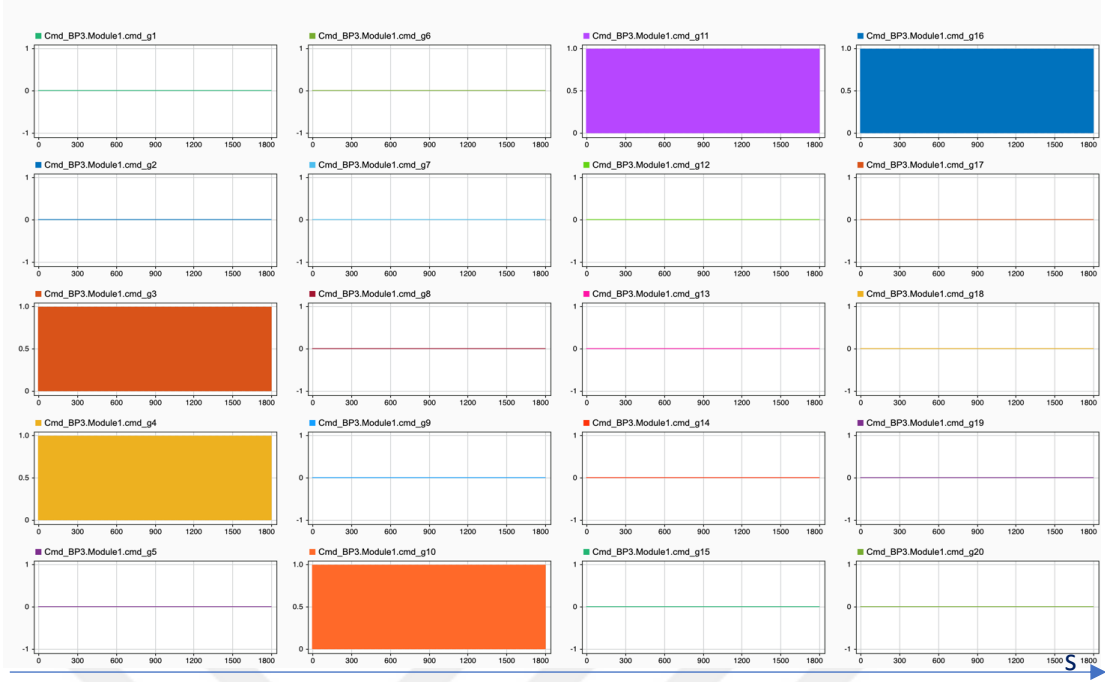
Şekil 4.26 EA Sürüş Profilinde Batarya Sistemi Çıkış Profilleri, SOC Farklı

30dk'lık EA sürüş profili boyunca batarya sistemi çıkış profilleri ve hesaplanan SOC değişimi Şekil 4.25' te gösterilmektedir. Benzer şekilde, aktif dengeleme anahtarlamaları ve her bir batarya paketinin akım/gerilim profilleri Şekil 4.26 verilmiştir. Aktif dengelemenin gerçekleşmesiyle aynı şarj doluluk oranı senaryoya kıyasla daha fazla gerilim salınımı gözlemlenmektedir. Bu değişikliği daha iyi anlayabilmek için, Şekil 4.27'de sunulan DC/DC dönüştürücü etkisine dikkat edilmelidir.

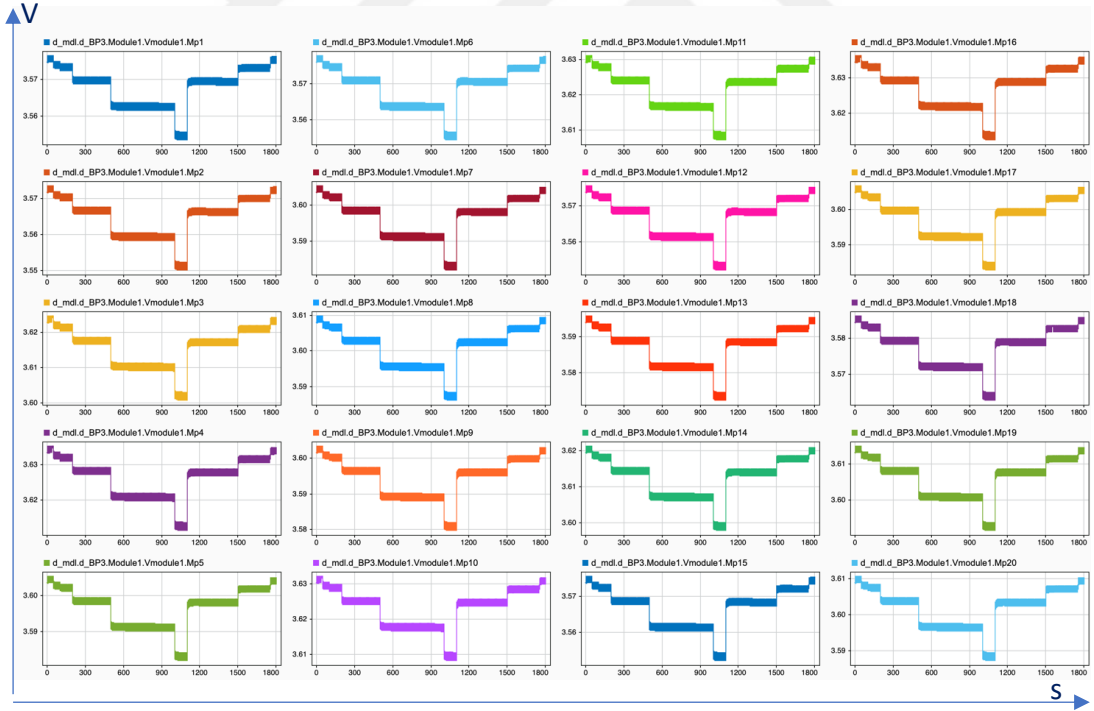


**Şekil 4.27** EA Sürüş Profiline DC/DC Dönüştürücü V&I Profilleri, SOC Farklı

Sürüş profilinde hücre gerilim seviyesi etkisi Şekil 4.28' de BP3, modül-1 için verilmiştir. Bu süreçte hücre gerilimlerinde aktif dengelemenin etkisi de gözlemlenmektedir



a BP3-Modül-1 Pasif Dengeleme Anahtarlama Sinyalleri



b BP3-Modül-1 Hücre Gerilimleri

Şekil 4.28 BP3-Module1 Pasif Dengeleme Sinyalleri ve Hücre Gerilimleri

# 5

## SONUÇLAR

---

Bu yüksek lisans tez çalışmasında batarya sistemi topolojisi önerilmiştir. Tasarımın detayı bölümünde her bir alt bileşenin (Batarya hücresi, batarya paketi, DC/DC Dönüştürücü, Anahtarlama kutusu, batarya yönetim algoritması, pasif dengeleme ve aktif dengeleme algoritmaları, koruma elemanları) tasarımı özgün şekilde gerçekleştirilmiştir ve benzetimlerle sistemlerin fonksiyonellikleri yansıtılmıştır. Bu bileşenlerin içerdiği sistem mimarisinin benzetimi (kontrol algoritmaları ile) gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerle, batarya sisteminin verimliliği, emniyeti ve güvenilirliği incelenmiştir.

Tasarlanan sistemde 430V nominal gerilimde çıkış vermektedir. Tasarlanan sistem seri bağlı modüler batarya paketleri eklenerek 800VDC ve üzeri yüksek gerilim seviyelerine çıkarılabilecek şekilde değişiklik yapılmaya uygundur.

Tezin literatüre katkısı aşağıda sıralanmıştır.

- Modüler yapılı ve tasarımda verilen alt bileşenlere sahip bir yüksek gerilimli batarya sistem mimarisi ve tasarımına literatürde rastlanmamıştır.
- Tüm alt bileşenlerin fonksiyonel tanımlamaları ve algoritmaları özgün olarak tasarlanmıştır. Modüler yapılı batarya paketlerinin topolojisi, indirgenmiş eşdeğer DC/DC dönüştürücü topolojisi ve anahtarlama kutusu mimarisi gerçekleştirilmiştir.
- Batarya paketi modül seviyesinde pasif dengeleme, batarya sistemi bazında DC/DC dönüştürücü tabanlı aktif dengeleme sistemi olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Farklı C-rate değerlerinde deşarj, kısa devre koruması, şarj durumu için benzetimler gerçekleştirilerek tasarlanan sistemin fonksiyonelliği gösterilmiştir. Aktif ve Pasif dengeleme kombinasyonlarına göre tasarlanan sistemin süre ve verimlilik açısından avantajları Bölüm 4'te verilmiştir.

- [1] F. M. Khan, M. G. Rasul, A. S. M. Sayem, and N. K. Mandal, "Design and optimization of lithium-ion battery as an efficient energy storage device for electric vehicles: A comprehensive review," *Journal of Energy Storage*, vol. 71, p. 108033, Nov. 2023. doi:10.1016/j.est.2023.108033
- [2] Y. Xing, E. W. Ma, K. L. Tsui, and M. Pecht, "Battery management systems in electric and hybrid vehicles," *Energies*, vol. 4, no. 11, pp. 1840–1857, Oct. 2011. doi:10.3390/en4111840
- [3] B. Pattipati et al., "Automotive Battery Management Systems," 2008 IEEE AUTOTESTCON, Sep. 2008. doi:10.1109/autest.2008.4662684
- [4] M. Brandl et al., "Batteries and battery management systems for Electric Vehicles," 2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Mar. 2012. doi:10.1109/date.2012.6176637
- [5] S. W. Moore and P. J. Schneider, "A review of cell equalization methods for lithium ion and Lithium Polymer Battery Systems," SAE Technical Paper Series, Mar. 2001. doi:10.4271/2001-01-0959
- [6] C. C. Chan and K. T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*, Oct. 2001. doi:10.1093/oso/9780198504160.001.0001
- [7] T. Baumhöfer, M. Brühl, S. Rothgang, and D. U. Sauer, "Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance," *Journal of Power Sources*, vol. 247, pp. 332–338, Feb. 2014. doi:10.1016/j.jpowsour.2013.08.108
- [8] K. Smith, Y. Shi, E. Wood, and A. Pesaran, "Optimizing battery usage and management for long life," *Optimizing Battery Usage and Management for Long Life (Conference)* | OSTI.GOV, <https://www.osti.gov/biblio/1301813> (accessed Feb. 20, 2024).
- [9] F. Zhang, M. M. Rehman, R. Zane, and D. Maksimovic, "Hybrid balancing in a modular battery management system for electric-drive vehicles," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Oct. 2017. doi:10.1109/ecce.2017.8095835
- [10] M. Einhorn et al., "A current equalization method for serially connected battery cells using a single power converter for each cell," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 9, pp. 4227–4237, Nov. 2011. doi:10.1109/tvt.2011.2168988
- [11] G. A. Kobzev, "Switched-capacitor systems for Battery Equalization," *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists. Modern Techniques and Technology. MTT'2000 (Cat. No.00EX369)*, pp. 57–59, Feb. 2000. doi:10.1109/spcmtt.2000.896044
- [12] A. Baughman and M. Ferdowsi, "Analysis of the double-tiered three-battery switched capacitor battery balancing system," 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-6, Sep. 2006. doi:10.1109/vppc.2006.364284

- [13] M. Daowd, N. Omar, P. Bossche, and J. Van Mierlo, "Capacitor based battery balancing system," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 385–393, Jun. 2012. doi:10.3390/wevj5020385
- [14] D. C. Hopkins, C. R. Mosling, and S. T. Hung, "The use of equalizing converters for serial charging of long battery strings," [Proceedings] *APEC '91: Sixth Annual Applied Power Electronics Conference and Exhibition*, pp. 493–498, Apr. 1991. doi:10.1109/apec.1991.146221
- [15] M. J. Isaacson et al., "Advanced Lithium Ion Battery Charger," *Fifteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances (Cat. No.00TH8490)*, pp. 193–198, Jan. 2000. doi:10.1109/bcaa.2000.838403
- [16] Y. C. Hsieh, C. S. Moo, and I. S. Tsai, "Balance charging circuit for charge equalization," *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No.02TH8579)*, vol. 3, pp. 1138–1143, Apr. 2002. doi:10.1109/pcc.2002.998132
- [17] C. S. Moo, Y. C. Hsieh, and I. S. Tsai, "Charge equalization for series-connected batteries," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 704–710, Apr. 2003. doi:10.1109/taes.2003.1207276
- [18] H. Shibata et al., "Management of serially-connected battery system using multiple switches," *4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001 - Indonesia. Proceedings (Cat. No.01TH8594)*, vol. 2, pp. 508–511, Nov. 2001. doi:10.1109/peds.2001.975369
- [19] S. T. Hung, D. C. Hopkins, and C. R. Mosling, "Extension of battery life via Charge Equalization Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 96–104, 1993. doi:10.1109/41.184826
- [20] T. Gottwald, Z. Ye, and T. Stuart, "Equalization of EV and HEV batteries with a ramp converter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 307–312, Jan. 1997. doi:10.1109/7.570791
- [21] M. Tang and T. Stuart, "Selective Buck-boost equalizer for series Battery packs," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36, no. 1, pp. 201–211, Jan. 2000. doi:10.1109/7.826322
- [22] Y.-S. Lee and G.-T. Cheng, "Quasi-resonant zero-current-switching bidirectional converter for Battery Equalization Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 5, pp. 1213–1224, Sep. 2006. doi:10.1109/tpel.2006.880349.
- [23] Y. Shang, C. Zhang, N. Cui, and J. M. Guerrero, "A cell-to-cell battery equalizer with zero-current switching and zero-voltage gap based on quasi-resonant LC converter and boost converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 7, pp. 3731–3747, Jul. 2015. doi:10.1109/tpel.2014.2345672
- [24] Z. Zou, J. Xu, C. Mi, B. Cao, and Z. Chen, "Evaluation of model based state of charge estimation methods for lithium-ion batteries," *Energies*, vol. 7, no. 8, pp. 5065–5082, Aug. 2014. doi:10.3390/en7085065
- [25] S. Lee, J. Kim, J. Lee, and B. H. Cho, "State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 2, pp. 1367–1373, Dec. 2008. doi:10.1016/j.jpowsour.2008.08.103
- [26] M. Einhorn, W. Roessler, and J. Fleig, "Improved performance of serially connected li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles," *IEEE Transactions on*

- Vehicular Technology, vol. 60, no. 6, pp. 2448–2457, Jul. 2011. doi:10.1109/tvt.2011.2153886
- [27] Y. Zheng et al., “On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages: Part 2. fuzzy logic equalization,” *Journal of Power Sources*, vol. 247, pp. 460–466, Feb. 2014. doi:10.1016/j.jpowsour.2013.09.012
- [28] W. Diao et al., “Active battery cell equalization based on residual available energy maximization,” *Applied Energy*, vol. 210, pp. 690–698, Jan. 2018. doi:10.1016/j.apenergy.2017.07.137
- [29] H. Gabbar, A. Othman, and M. Abdussami, “Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards,” *Technologies*, vol. 9, no. 2, Apr. 2021. doi:10.3390/technologies9020028
- [30] G. Pistoia, *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. Amsterdam: Elsevier, 2010. eBook ISBN: 9780444535665
- [31] J. Liu, “Compare 4 types of BMS topologies: Centralized vs distributed vs Modular vs Hybrid - MokoEnergy - your new energy solution provider,” MokoEnergy, <https://www.mokoenergy.com/types-of-bms-topologies/> (accessed 2024).
- [32] “What do you think of lifepo4 temperature range?,” *Battery Finds*, <https://batteryfinds.com/what-do-you-think-of-lifepo4-temperature-range/> (accessed 2024).
- [33] D. Czarkowski and M. K. Kazimierczuk, “Circuit models of PWM DC-DC Converters,” *Proceedings of the IEEE 1992 National Aerospace and Electronics Conference@m\_NAECON 1992*, May 1992. doi:10.1109/naecon.1992.220539
- [34] V. Monteiro, P. Alves, A. A. Nogueiras Melendez, C. Couto, and J. L. Afonso, “A novel modular voltage balancing topology for active Battery Management System,” *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Jun. 2016. doi:10.1109/isie.2016.7744991
- [35] B. Lincoln, “Tesla Model 3 performance vs RWD consumption - real driving data from 233 cars,” *Iternio*, <https://www.iternio.com/post/tesla-model-3-performance-vs-rwd-consumption-real-driving-data-from-233-cars/> (accessed 2024).

```

Rblcn_passive=5; % Passive Balancing Current Limitter [Ω],Li-ion: 1-5 [Ω]
np=2; % np number of parallel cell
Rin=0.0095; % Rin: battery cell internal Resistance
Rb_in=Rin/np; % Rb_in: Equivalent of Rin A number of parallel battery cells
Ah_i=2.5*np; % Paralel battery block total capacity [Ah]
SC=Ah_i*15; % Short_Circuit Level [Amp], 15C
OC=Ah_i*10; % Over_Current Level [Amp], 10C
OVcell=3.65; % Over Vcell @ max allowable [V]
UVcell=2.5; % Under Vcell@ min allowable [V]
VCell_nom=3.55;% Nominal Cell Voltage [V]
Vthreshold.BlcnPassive=0.05; % Vcell_max-Vcell_min [V]
Vpackmax=(OVcell*1.05)*20*2*3; % VCh @ max allowable [V]
Vpackmin=UVcell*20*2*3; % VDsCh @min allowable [V]
DeltaV=0.5; % Vpacks_max - Vpacks_min [V]
DeltaSOC=0.5; % SOCpacks_max - SOCpacks_min [%]
HT=60; % High Temp @ max allowable [Celcius Degree]
LT=-20; % Low Temp @ min allowable [Celcius Degree]
% BpVdf; Battery-cells Voltage with Distortion Factor (%2 difference)
Bp1Vdf=round((ones(40,1)*VCell_nom.*(1.01-0.02*rand(40,1))),3);
Bp2Vdf=round((ones(40,1)*VCell_nom.*(1.01-0.02*rand(40,1))),3);
Bp3Vdf=round((ones(40,1)*VCell_nom.*(1.01-0.02*rand(40,1))),3);
Bp1Vt=sum(Bp1Vdf,1);Bp2Vt=sum(Bp2Vdf,1);Bp3Vt=sum(Bp3Vdf,1);
Bp1VtM1=sum(Bp1Vdf(1:20));Bp1VtM2=sum(Bp1Vdf(21:end));
Bp2VtM1=sum(Bp2Vdf(1:20));Bp2VtM2=sum(Bp2Vdf(21:end));
Bp3VtM1=sum(Bp3Vdf(1:20));Bp3VtM2=sum(Bp3Vdf(21:end));
% BpCdf; Battery-cells Capacity Distortion Factor (%2 difference)
Bp1Cdf=round((ones(40,1)*Ah_i.*(1.02-0.02*rand(40,1))),3);
Bp2Cdf=round((ones(40,1)*Ah_i.*(1.02-0.02*rand(40,1))),3);
Bp3Cdf=round((ones(40,1)*Ah_i.*(1.02-0.02*rand(40,1))),3);
Bp1C_BOL= max(Bp1Cdf, [],1)*1 ;Bp1C_EOL=min(Bp1Cdf, [],1)*0.8;
Bp2C_BOL= max(Bp2Cdf, [],1)*1 ;Bp2C_EOL=min(Bp2Cdf, [],1)*0.8;
Bp3C_BOL= max(Bp3Cdf, [],1)*1 ;Bp3C_EOL=min(Bp3Cdf, [],1)*0.8;
%T0_SOC; Battery-cells Initial State of Charge Values (%3 difference)
SOCBP1_i=80; Bp1SOCdf=round((ones(40,1)*SOCBP1_i.*(1-0.03*rand(40,1))),3);
SOCBP2_i=90; Bp2SOCdf=round((ones(40,1)*SOCBP2_i.*(1-0.03*rand(40,1))),3);
SOCBP3_i=100;Bp3SOCdf=round((ones(40,1)*SOCBP3_i.*(1-0.03*rand(40,1))),3);
Bp1SOC_min=min(Bp1SOCdf, [],1); Bp1SOC_max=max(Bp1SOCdf, [],1);
Bp1M1SOC_min=min(Bp1SOCdf(1:20)); Bp1M2SOC_min=min(Bp1SOCdf(21:end));
Bp2SOC_min=min(Bp2SOCdf, [],1); Bp2SOC_max=max(Bp2SOCdf, [],1);
Bp2M1SOC_min=min(Bp2SOCdf(1:20)); Bp2M2SOC_min=min(Bp2SOCdf(21:end));
Bp3SOC_min=min(Bp3SOCdf, [],1); Bp3SOC_max=max(Bp3SOCdf, [],1);
Bp3M1SOC_min=min(Bp3SOCdf(1:20)); Bp3M2SOC_min=min(Bp3SOCdf(21:end));
% Battery response time Distortion Factor (%5 difference)
t_br=30; %Reference Battery Response Time [sec]
Bp1trdf=round((ones(40,1)*t_br.*(1.1-0.5*rand(40,1))),3);
Bp2trdf=round((ones(40,1)*t_br.*(1.1-0.5*rand(40,1))),3);
Bp3trdf=round((ones(40,1)*t_br.*(1.1-0.5*rand(40,1))),3);
% Battery Initial Temperature with Distortion Factor
Temp_ref=25; %Reference Temperature [Celcius Degree]
Bp1Temp=round((ones(8,1)*Temp_ref.*(1-1.1*rand(8,1))),3);
Bp1TempM1=mean(Bp1Temp(1:4));Bp1TempM2=mean(Bp1Temp(5:end));
Bp2Temp=round((ones(8,1)*Temp_ref.*(1-1.1*rand(8,1))),3);
Bp2TempM1=mean(Bp2Temp(1:4));Bp2TempM2=mean(Bp2Temp(5:end));
Bp3Temp=round((ones(8,1)*Temp_ref.*(1-1.1*rand(8,1))),3);
Bp3TempM1=mean(Bp3Temp(1:4));Bp3TempM2=mean(Bp3Temp(5:end));

```

# TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

## **Konferans Bildirisi**

1. F. Yarat, U.E. Ayten, “Design of a Converter Based Active Balancing System for Electric Vehicles” 18th International Scientific Research Congress, Science and Engineering, Makale ID: 72, pp 16-17, 2023. ISBN 978-625-6861-70-1

