

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN AKTİF
DENGELEME YÖNTEMLERİ**

**Hazırlayan
Sevgi Nur ŞAHBAZ**

**Danışman
Prof. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2025
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN AKTİF
DENGELEME YÖNTEMLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Sevgi Nur ŞAHBAZ**

**Danışman
Prof. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR**

**Ağustos 2025
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Sevgi Nur ŞAHBAZ

İmza

“Batarya Yönetim Sistemleri İçin Aktif Dengeleme Yöntemleri” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Sevgi Nur ŞAHBAZ

İmza

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR

İmza

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Enis GÜNAY

İmza

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda akademik bilgi birikimi, rehberliği ve yapıcı eleştirileriyle katkı sunan değerli danışmanım Prof. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Akademik ve sosyal olarak beni teşvik eden fikir alışverişinde bulunduğum başta Dr. Öğr.Üyesi Erhan Kavuncuoğlu'na, tüm akademisyenlere ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Araştırma sürecim boyunca ve hayatımın her anında gerek akademik gerekse manevi anlamda desteklerini hissettiren annem Nalan şahbaz, babam Mustafa şahbaz, kardeşlerim Yaşar şahbaz ve Yusuf şahbaz'a sabır ve anlayışları için şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın gerçekleştirilmesine maddi destek sağlayan TÜBİTAK 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı'na teşekkür ederim. TÜBİTAK'ın sağlamış olduğu bu destek, araştırma sürecimi daha verimli bir şekilde yürütmemi sağlamıştır.

Sevgi Nur şAHBAZ

Ağustos 2025, KAYSERİ

BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN AKTİF Dengeleme YÖNTEMLERİ

Sevgi Nur ŞAHBAZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2025
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR

ÖZET

Lityum-iyon batarya paketlerinde hücreler arası voltaj ve şarj durumu (SOC) dengesizlikleri, kapasite kaybına ve sistem verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır. Bu sorunun çözümünde, batarya yönetim sistemleri (BMS) bünyesinde yer alan dengeleme sistemleri kritik bir rol üstlenmektedir. Bu tezde, hücreler arası dengesizliği azaltmak ve batarya sisteminin güvenli çalışmasını sağlamak amacıyla aktif hücre dengeleme yöntemleri ele alınmıştır. Çalışmada, tek indüktör tabanlı ve Buck-Boost dönüştürücü tabanlı olmak üzere iki farklı aktif dengeleme topolojisi, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve SOC tabanlı kontrol yöntemi uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları Buck-Boost tabanlı yapının daha kısa sürede dengeleme sağladığını ve enerji aktarımında daha yüksek verimlilik sunduğunu göstermiştir. Her hücreye özel dönüştürücü alt devrelerinin kullanılması doğrudan enerji transferine olanak tanıyarak dengeleme sürecini hızlandırmıştır. Ayrıca literatürde sunulan yöntemler detaylı biçimde incelenmiş ve önerilen model ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen kontrol stratejisi, batarya sistemlerinde güvenliği artırmak, kullanım ömrünü uzatmak ve enerji kayıplarını azaltmak açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yönüyle önerilen yapı yüksek dengeleme performansı gerektiren elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi uygulamalar için potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: BMS, Lityum-İyon Pil, Aktif Hücre Dengeleme, Dengeleme Kontrol Yöntemi, Buck-Boost Dönüştürücü, MATLAB/Simulink Modelleme, Verimlilik.

ACTIVE BALANCING METHODS FOR BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS

Sevgi Nur ŞAHBAZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, August 2025
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR

ABSTRACT

Voltage and state of charge (SOC) imbalances between cells in lithium-ion battery packs lead to capacity loss and decreased system efficiency. Balancing systems integrated within battery management systems (BMS) play a critical role in addressing these issues. This thesis focuses on active cell balancing methods aimed at reducing cell-level imbalances and ensuring the safe operation of battery systems. Two different active balancing topologies single-inductor-based and Buck-Boost converter-based were modeled in MATLAB/Simulink, and an SOC-based control strategy was implemented.

Simulation results show that the Buck-Boost-based topology provides faster balancing and higher energy transfer efficiency. The use of dedicated converter subcircuits for each cell enables direct energy transfer, significantly accelerating the balancing process. Additionally, methods from the literature were examined in detail and compared with the proposed model. The developed control strategy offers notable advantages in enhancing battery system safety, extending operational life, and reducing energy losses. Therefore, the proposed structure is considered a potential solution for applications requiring high balancing performance, such as electric vehicles and renewable energy systems.

Keywords: BMS, Lithium-Ion Battery, Active Cell Balancing, Balancing Control Method, Buck-Boost Converter, MATLAB/Simulink Modeling, Efficiency.

İÇİNDEKİLER

BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN AKTİF DENGELEME YÖNTEMLERİ

YÖNERGE VE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xii
TABLolar LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Problem Durumu	3
1.2. Araştırmanın Amacı	4
1.3. Araştırmanın Önemi.....	5
1.4. Araştırmanın Özgün Katkısı.....	5
1.5. Araştırmanın Sınırlılıkları	6

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Batarya Teknolojileri.....	7
2.2. Hücrelerin ve Pillerin Sınıflandırılması	7
2.3. Hücrenin Elektriksel Özellikleri.....	9

2.4. Pil Terminolojisi	9
2.4.1. Nominal Gerilim	9
2.4.2. Kapasite	9
2.4.3. Depolama Kapasitesi	9
2.4.4. Nominal Kapasite.....	10
2.4.5. Deşarj Derinliği (DOD)	10
2.4.6. Batarya Ömrü Başlangıcı (Begin Of Life - BOL) ve Batarya Ömrü Sonu (End Of Life – EOL).....	10
2.4.7. State of charge (SOC).....	10
2.4.8. State of health (SOH).....	11
2.4.9. State of function (SOF).....	12
2.4.10. Enerji Kapasitesi (Wh).....	12
2.4.11. Enerji Yoğunluğu (Wh/L).....	12
2.4.12. Spesifik Enerji ve Spesifik Güç.....	12
2.4.13. Batarya Çalışma Sıcaklığı	12
2.4.14. Batarya Çevrim Ömrü	13
2.5.1. Kurşun asit pili.....	14
2.5.2. Nikel-Kadyum Bataryalar (Ni-Cd)	15
2.5.3. Nikel metal hidrit pil (Ni-MH).....	16
2.5.4. Lityum piller.....	17
2.7. Lityum İyon Bataryalar İçin Eşdeğer Devre Modelleri	20
2.7.1. Eşdeğer Devre Modeli	20
2.8. Batarya Yönetim Sistemi (BMS-BYS)	21
2.9. Dengeleme Sistemleri	23
2.9.1. Pasif Dengeleme	26
2.9.2. Aktif Dengeleme	27
2.9.2.1. Kapasitör Tabanlı Aktif Dengeleme.....	29
2.9.2.2. İndüktör Tabanlı Aktif Dengeleme	30

2.9.2.1.1. Tek İndüktör Dengeleme	30
2.9.2.1.2. Çoklu İndüktör Dengeleme	31
2.9.2.3. Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme	32
2.9.2.3.1. Buck-Boost Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme	33
2.9.2.3.2. Cuk Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme	34
2.9.2.3.3. Yarı rezonans dönüştürücü dengelemesi	35
2.9.2.3.4. Tek Flyback Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme	36
2.9.3. Enerji Taşıma/Aktarım Yolları/Yönleri	36
2.9.4. Kontrol Yöntemleri	37
2.9.4.1. Hücre Voltajına Dayalı Kontrol Yöntemi	38
2.9.4.2. Kapasiteye Dayalı Kontrol Yöntemi	39
2.9.4.3. SOC'ye Dayalı Kontrol Yöntemi	40

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Pil Tasarımı	43
3.2. Enerji Transfer Modu	44
3.3. İndüktör Tabanlı Aktif Dengeleme Modelleme Çalışmaları	45
3.3.1. Devre Tasarımı	45
3.3.2. Dengeleme İlkesi	47
3.3.2.1. İndüktör Akımının Modellenmesi	47
3.3.2.2. Dengeleme Kontrol Yöntemi	48
3.3.3. Simülasyon Çıktıları	51
3.3.4. Sonuç-Tartışma	56
3.4. Buck-Boost Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme Çalışmaları	56
3.4.1. Devre Tasarımı	58
3.4.2. Dengeleme İlkesi	60
3.4.2.1. İndüktör Akımının Modellenmesi	60

3.4.2.2. Endüktans, Anahtarlama Frekansı ve Eşitleme Süresi	62
3.4.2.3. Dengeleme Kontrol Yöntemi.....	63
3.4.3. Simülasyon Çıktıları	68
3.4.4. Sonuç-Tartışma.....	73

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma	78
4.2. Sonuç ve Öneriler.....	80
KAYNAKÇA	83
EKLER.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
EK 1.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZGEÇMİŞ.....	88

KISALTMALAR

BMS: Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System)

Li-ion : Lityum-iyon

ESS: Enerji Depolama Sistemleri (Energy Storage Systems)

OCV: Açık Devre Gerilimi (Open Circuit Voltage)

SOC: Şarj Durumu (State of Charge)

SOH: Sağlık Durumu (State of Health)

SOF: Fonksiyonellik Durumu (State of Function)

DOD: Deşarj Derinliği (Depth of Discharge)

BOL: Batarya Ömrü Başlangıcı (Beginning of Life)

EOL: Batarya Ömrü Sonu (End of Life)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Voltaj – SOC Eşleştirme Tablosu [16].	11
Tablo 2.2. Kurşun-Asit, Nikel Metal Hidrit ve Lityum-iyon piller arasında bir karşılaştırma. [24]	18
Tablo 2.3. Yük dengeleme topolojilerinin karşılaştırılması [32] [8]	25
Tablo 2.4. Aktif hücre dengeleme topolojilerinin karşılaştırılması [34].	28
Tablo 2.5. SOC tabanlı BMS'lerin DC-DC dönüştürücü tabanlı aktif hücre dengeleme sistemleri için yürütülen çalışmalar [31].	32
Tablo 2.6. Buck Boost dönüştürücü tabanlı devreler	34
Tablo 2.7. Hücre dengeleme topolojilerinin dengeleme süreleri üzerine çalışmaların karşılaştırması [41].	38
Tablo 2.8. SOC tahmin yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları [31].	42
Tablo 3.1. MATLAB Pil hücresine ait parametreler.	44
Tablo 3.2. Tek indüktör tabanlı dengeleme yöntemi için SOC durumlarına göre anahtarlama davranışları.	49
Tablo 3.3. Simülasyon parametreleri.	52
Tablo 3.4. Simülasyon sonuçları analizi.	56
Tablo 3.5. Literatürdeki çalışmaların simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	57
Tablo 3.6. Literatürdeki çalışmaların simülasyon sonuçlarının grafiksel karşılaştırılması.	57
Tablo 3.7. Buck-Boost tabanlı aktif hücre dengeleme için durum tablosu.	66
Tablo 3.8. Simülasyon Parametreleri	69
Tablo 3.9. Simülasyon Sonuçları Analizi	73
Tablo 3.10. Literatürdeki ve tezdeki çalışmaların simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	75
Tablo 3.11. Literatürdeki çalışmaların simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	76

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Şarj edilebilir (ikincil) pilin şematik gösterimi.	8
Şekil 2.2. Elektrokimyasal enerji depolama kaynaklarının sınıflandırılması [19].	13
Şekil 2.3. Kurşun-asit bataryanın yapısı ve çalışması.	15
Şekil 2.4. Nikel-kadyum (Ni-Cd) batarya yapısı.	15
Şekil 2.5. Bir NiMH pilin elektrokimyasal reaksiyon süreçlerinin şematik diyagramı. .	16
Şekil 2.6. Çeşitli şarj edilebilir pil teknolojilerinin spesifik enerji ve güç yoğunluklarına göre grafiksel gösterimi.	17
Şekil 2.7. Hücre yapım türleri. (a) silindirik hücre (b) prizmatik hücre (c) kese hücresi [9].	19
Şekil 2.8. LIB'lerin (Lityum-iyon Bataryaların) mekanik yapısı (a) düğme hücre b) poşet hücre c) silindirik hücre d) prizmatik hücre [12].	19
Şekil 2.9. LIB'ler için elektriksel eşdeğer devre şemaları. [12].	21
Şekil 2.10. BMS fonksiyonları [19].	23
Şekil 2.11. Li-ion pilin şarj durumuna dayalı hücre dengeleme tekniği [3].	24
Şekil 2.12. (a) N hücreli batarya paketinde hücre dengesizlikleri. (b) N hücreli batarya paketinde dengelenmiş hücreler [31].	24
Şekil 2.13. a) Sabit direnç ile dengeleme b) Anahtarlama direnç ile dengeleme [30]. .	27
Şekil 2.14. Kondansatör tabanlı aktif dengeleme topolojisi (a) tekli anahtarlama kondansatör (b) çoklu anahtarlama kondansatör (c) çift katmanlı anahtarlama kondansatör [31].	30
Şekil 2.15. Tek indüktörlü dengeleme (a) hücreden hücreye (b) bataryadan hücreye [30].	31
Şekil 2.16. Çoklu indüktörlü dengeleme [30].	31
Şekil 2.17. Buck-boost dönüştürücü ile dengeleme [30].	33
Şekil 2.18. Geleneksel Buck-Boost dönüştürücü tabanlı dengeleme devresi [38].	34
Şekil 2.19. İndüktör tabanlı katmanlı çift yönlü ekolayzır (IBLBE) [33].	34
Şekil 2.20. Çuk dönüştürücü ile dengeleme [30].	35
Şekil 2.21. Yarı rezonanslı dönüştürücü ile dengeleme [30].	35
Şekil 2.22. Tekli flyback dönüştürücü ile dengeleme [30].	36
Şekil 2.23. Hücre dengeleme topolojisi [8].	37

<i>Şekil 3.1.</i> Lityum -iyon pilin Thevenin eşdeğer devre modeli.	43
<i>Şekil 3.2.</i> Enerji transfer modu (a) CCM (b) DCM [33].	45
<i>Şekil 3.3.</i> Tek indüktör tabanlı aktif dengeleme devresi.	46
<i>Şekil 3.4.</i> Hücre4 ve Hücre3 arasındaki enerji transferlerini gösteren eşdeğer devre.	48
<i>Şekil 3.5.</i> Tek indüktör tabanlı dengeleme devresinin MATLAB/Simulink modeli.	49
<i>Şekil 3.6.</i> Şarj deşarj durumlarına göre enerji transferler yönleri.	50
<i>Şekil 3.7.</i> Tek indüktörlü aktif dengeleme akış şeması.	51
<i>Şekil 3.8.</i> Statik Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi.	53
<i>Şekil 3.9.</i> Şarj Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi.	54
<i>Şekil 3.10.</i> Deşarj Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi.	55
<i>Şekil 3.11.</i> SOC dengeleme eğrisi (a) Statik mod (b) Şarj modu (c) Deşarj modu.	58
<i>Şekil 3.12.</i> SOC dengeleme eğrisi (a) Statik mod (b) Şarj modu (c) Deşarj modu.	58
<i>Şekil 3.13.</i> 4 hücreli buck boost dönüştürücü devre şeması ve hücre dönüştürücü yapısı.	60
<i>Şekil 3.14.</i> Buck Boost Dönüştürücü Dengeleme Devresinin MATLAB/Simulink modeli.	64
<i>Şekil 3.15.</i> Buck-Boost tabanlı aktif hücre dengeleme için durumların devre döngüleri.	65
<i>Şekil 3.16.</i> Model devrenin dengeleme akış şeması.	67
<i>Şekil 3.17.</i> Buck Boost Dönüştürücü Dengeleme Devre Modelinin Stateflow yapısı.	68
<i>Şekil 3.18.</i> Statik Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi.	70
<i>Şekil 3.19.</i> Şarj Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi.	71
<i>Şekil 3.20.</i> Deşarj Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi.	72
<i>Şekil 3.21.</i> Statik modda 5 farklı modüle ait 4 adet seri hücrelerin gerilim yöntemi ile gerilim dalga formu.	76
<i>Şekil 3.22.</i> Statik modda 2 farklı modüle ait hücrelerin gerilim yöntemi ile şarj ve deşarj akım dalga formu.	76
<i>Şekil 3.23.</i> Statik mod SOC-Gerilim yöntemine göre (a) SOC dengeleme eğrisi (b) Gerilim dalga formu.	76

<i>Şekil 3.24.</i> Statik mod SOC yöntemine göre (a) SOC dengeleme eğrisi (b) Gerilim dalga formu.....	76
<i>Şekil 3.25.</i> Statik mod (a) SOC dengeleme eğrisi (b) Gerilim dalga formu (c) Akım dalga formu.....	77
<i>Şekil 3.26.</i> Şarj modu (a) SOC dengeleme eğrisi (b) Gerilim dalga formu (c) Akım dalga formu.....	77
<i>Şekil 3.27.</i> Deşarj modu (a) SOC dengeleme eğrisi(b) Gerilim dalga formu (c) Akım dalga formu	77
<i>Şekil 3.28.</i> Statik mod (a) SOC dengeleme eğrisi (b) Gerilim dalga formu (c) Akım dalga formu.....	77
<i>Şekil 3.29.</i> Şarj modu (a) SOC dengeleme eğrisi (b) Gerilim dalga formu (c) Akım dalga formu.....	77
<i>Şekil 3.30.</i> Deşarj modu (a) SOC dengeleme eğrisi (b) Gerilim dalga formu (c) Akım dalga formu	77

GİRİŞ

Artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların yoğun şekilde kullanılmasına neden olmakta ve bu durum çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Sürdürülebilir ve temiz enerji arayışları doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim giderek artarken bu kaynakların üretim sürekliliği, öngörülebilirliği ve lokasyon bağımlılığı gibi bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Bu tür sorunların önüne geçebilmek ve enerji akışını dengede tutabilmek adına enerji depolama sistemleri önemli bir rol üstlenmektedir.

Bu sistemlerin temel bileşenlerinden biri olan lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve yüksek verimlilik gibi özellikleri sayesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, bu pillerin içerisinde yer alan hücreler zamanla birbirinden farklı davranışlar sergileyebilir. Üretim farklılıkları, iç direnç değişimleri ya da kendi kendine deşarj oranlarındaki eşitsizlikler, hücreler arasında voltaj ve şarj durumu (SOC) dengesizliklerine yol açar. Bu tür dengesizlikler, zaman içinde pilin genel kapasitesinin azalmasına, performans kaybına ve ömrünün kısalmasına neden olabilir.

Bu sorunların üstesinden gelmek için uygulanan yöntemlerden biri hücreler arası dengelemedir. Dengeleme işlemiyle hücrelerin enerji seviyeleri birbirine yaklaştırılarak sistemin daha dengeli ve verimli çalışması sağlanır. Bu noktada kullanılan yöntemler genel olarak ikiye ayrılır. Pasif dengeleme teknikleri, fazla enerjiyi dirençler aracılığıyla ısı olarak dağıtarak basit ama enerji kayıplı bir çözüm sunarken aktif dengeleme teknikleri, yüksek enerjili hücrelerden düşük enerjili hücrelere enerji aktarımı yaparak sistemdeki enerjiyi korur ve genel verimliliği artırır.

Bu tez çalışmasında, aktif hücre dengeleme tekniklerinin farklı topolojileri ve kontrol stratejileri detaylı olarak incelenmiştir ve bu yöntemlerin hücreler arası SOC farklılıklarını azaltmadaki etkinliği, dengeleme süreleri, verimlilik, uygulama zorluğu gibi unsurlar değerlendirilmiştir. Özellikle tek indüktör tabanlı ve Buck-Boost dönüştürücü tabanlı aktif dengeleme topolojilerine odaklanılmıştır ve bu yapıların sistem

verimliliği, dengeleme süresi ve uygulamaya uygunluk kriterleri açısından karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen dengeleme modelleri MATLAB/Simulink ortamında simüle edilerek elde edilen veriler analiz edilmiş ve bu doğrultuda literatüre katkı sağlayabilecek bulgular ortaya konulmuştur. Yapılan analizlerin Li-ion batarya paketlerinde hücre dengeleme yönetiminin daha güvenli, etkili ve uzun ömürlü hale getirilmesine yönelik yeni tekniklerin geliştirilmesine katkı sunacağı öngörülmektedir.

Tezin birinci bölümünde, çalışmanın amacı, kapsamı, özgün katkısı, sınırlılıkları, konuya ilişkin literatür özeti sunulmuştur. İkinci bölümde, önerilen yeni yaklaşımlarda kullanılan kontrol algoritmalarının işleyişi açıklanmış bu algoritmalar ilgili literatürle karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, aktif dengeleme yöntemlerinin uygulanabilirliği detaylandırılmıştır. Üçüncü bölümde ise Buck-Boost dönüştürücü tabanlı dengeleme yönteminin hem tek indüktörlü yapıdaki uygulaması hem de daha önce yapılmış Buck Boost tabanlı çalışmalarla karşılaştırmaya olanak tanıyan devre modeli, simülasyon parametreleri ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Son bölümde ise, elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve çalışmanın genel sonuçlarına yer verilmiştir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Problem Durumu

Yüzyılın ortalarına kadar fosil yakıtları etkili bir şekilde atlatmak ve dünya çapında karbon nötrlüğünü teşvik etmek için önemli bir teknoloji olan piller, birçok yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Geleneksel enerji depolama yöntemleriyle karşılaştırıldığında lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, modülerliği, enerji dönüşüm verimliliği, hızlı yanıt süreleri ve enerji tasarrufu nedeniyle pil enerji depolama sistemleri içinde tercih edilen seçeneklerden biri haline gelmiştir [2].

Lityum-iyon (Li-ion) pil hücrelerinin ve paket seviyesindeki kontrol değişkenlerinin güvenli bir şekilde çalışabilmesi için doğru şekilde izlenmesi ve korunması gerekmektedir. Bu kontrol değişkenleri, batarya yönetim sistemi (BMS) tarafından sürekli olarak izlenip korunmaktadır.

BMS, pil takımının beyni gibi çalışarak çıkışı denetleyen ve pili kritik hasarlardan koruyan bir elektronik cihazdır. Bu sistem sıcaklık, voltaj ve akım izleme, arıza tahmini veya arıza önlemesi ile batarya parametre analizine yönelik veri toplama işlemlerini bir iletişim protokolü aracılığıyla gerçekleştirmektedir [3].

Batarya grubundaki hücreler arasında oluşan voltaj seviyesindeki dengesizlik hücre bozulması, pilin yetersiz şarj edilmesi ve depolanan enerjisinin etkin kullanılmaması gibi çeşitli sorunlara yol açmaktadır. Bu tür sorunların önüne geçmek amacıyla uygulanan yöntemlere hücre dengeleme adı verilmektedir [4]. Hücre dengeleme, aynı zamanda BMS için temel işlevlerden biri olarak kabul edilmektedir [3]. Li-ion pillerde kullanılan dengeleme yöntemleri, elektrokimyasal hücrenin şarj durumu (SOC) üzerinden

hesaplanmakta olup pasif ve aktif hücre dengeleme olmak üzere iki temel yaklaşıma ayrılmaktadır [4].

Uygun bir dengeleme sistemi bulunmadığında zamanla hücreler arasındaki voltaj farkları artmakta ve bu durum batarya kapasitesinin hızlı bir şekilde düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, özellikle Li-ion bataryaların yaygın olarak kullanıldığı elektrikli araçlarda menzil kısılmasına ve batarya ömrünün azalmasına yol açmaktadır [3]. Batarya sistemleri, doğrudan aracın menzilin belirlenmesini yanı sıra aracın toplam maliyetine de etki etmektedir [5].

Aktif dengeleme yöntemleri, hücreler arasında doğrudan enerji transferi gerçekleştirerek enerji israfını azaltır ve batarya ömrünü uzatır. Her ne kadar bu yöntem pasif dengelemeye göre daha karmaşık ve maliyetli olsa da daha yüksek verimlilik sağlamaktadır [3].

Pil durumlarını belirlemek veya pil yaşlanma dinamiklerini tahmin etmek amacıyla çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar genellikle model tabanlı, veri odaklı ve hibrit yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Model tabanlı yöntemler, pilin iç elektrokimyasal reaksiyonlarını fiziksel veya matematiksel modeller kullanarak simüle etmeye çalışır. Bu süreçte, pil durumu tahmini ve yaşlanma analizi için gerekli parametreleri belirlemek amacıyla çeşitli sistem tanımlama algoritmaları uygulanmaktadır. [6] Deneysel yöntemler, güvenilir sonuçlara ulaşmak için kapsamlı testler gerektirirken model tabanlı yöntemler daha az zaman alıcıdır ve sonuçların daha kısa sürede elde edilmesini sağlamaktadır [7].

1.2. Araştırmanın Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, aktif batarya dengeleme topolojilerini ve kontrol algoritmalarını inceleyerek karşılaştırmak ve model tabanlı uygulamalarla simülasyon gerçekleştirerek literatüre katkı sağlamaktır. Li-ion batarya paketlerindeki hücreler arasındaki voltaj ve SOC dengesizlikleri, sistem verimliliğini ve ömrünü olumsuz etkileyen önemli bir problemdir [8].

Bu çalışmada, özellikle tek indüktör tabanlı dengeleme ve Buck-Boost tabanlı dengeleme yöntemleri incelenerek hücreler arasındaki SOC farklarının en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

Çalışmada, aktif dengeleme yöntemlerinin etkinliği değerlendirilerek hücre dengeleme tekniklerinin Li-ion batarya paketlerinin güvenli ve verimli çalışmasındaki rolü üzerinde durulmuştur. Ayrıca, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen modeller ile farklı dengeleme yöntemlerinin performans analizleri gerçekleştirilip karşılaştırılmıştır. Tek indüktör tabanlı ve Buck-Boost tabanlı hücre dengeleme topolojilerinin etkinliği üzerine yoğunlaşmıştır. Karşılaştırma sürecinde sistem verimliliği, dengeleme süresi uygulanabilirlik gibi temel parametreler değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda yapılan çalışmaların sonucunda, aktif dengeleme sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çıktılar sunulması ve batarya yönetim sistemlerinin daha güvenli, verimli ve uzun ömürlü hale getirilmesine katkı sağlanması beklenmektedir.

1.3. Araştırmanın Önemi

Hücre dengeleme teknikleri batarya sistemlerinin daha güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak için büyük bir öneme sahiptir.-Bu çalışmada ele alınan Buck-Boost tabanlı aktif dengeleme yöntemi, hücreler arasındaki SOC farklarını minimize ederek batarya sistemlerinin daha verimli ve uzun ömürlü olmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışmanın, enerji depolama sistemleri ve batarya yönetim sistemleri üzerine yapılan araştırmalara önemli katkılar sunacağı ve özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde batarya performansının iyileştirilmesine yönelik yeni yaklaşımlar geliştirilmesine yardımcı olacağı öngörülmektedir.

1.4. Araştırmanın Özgün Katkısı

Bu tez çalışması, Buck-Boost tabanlı hücre dengeleme topolojisi ile tek indüktör tabanlı yapıların performansını sistemli biçimde karşılaştırarak literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Her hücreye özel dönüştürücü içeren Buck-Boost tabanlı devre modeli, hücreler arası çift yönlü enerji transferine olanak tanıyarak dengeleme süresini ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Literatürdeki çalışmalarla simülasyon parametreleri, verimlilik ve dengeleme süresi bakımından yapılan karşılaştırmalar, önerilen modelin iyileştirilmiş performansını ortaya koymuştur. Bu yönüyle tez, aktif dengeleme sistemlerinde hem yapısal hem de kontrol algoritması düzeyinde özgün katkılar sunmakta ve uygulama alanına göre topoloji seçiminde teknik bir referans oluşturmaktadır.

1.5. Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu tezde kullanılan simülasyon modellerinde, hesaplama süresini azaltmak amacıyla hücreler arası SOC farkı, batarya kapasitesi ve indüktör şarj akımı gibi bazı parametreler sınırlı aralıklarda ve ideal koşullarda belirlenmektedir. Bu parametre seçimleri, özellikle yüksek indüktör akımı gibi pratikte karşılığı bulunan ancak sistemde ısı artışı, donanımsal stres ve güvenlik riskleri oluşturabilecek durumları içermektedir. Bu nedenle, önerilen yapının gerçek zamanlı uygulamalara entegrasyonunda uygun akım sınırlarının belirlenmesi ve termal kontrol önlemlerinin alınması gerekmektedir. Dolayısıyla çalışmada elde edilen dengeleme süresi ve verimlilik sonuçları tüm gerçek sistemlere doğrudan genellenememektedir. Ayrıca, sıcaklık, yaşlanma ve iç direnç değişimi gibi çevresel etkiler simülasyona dahil edilmediğinden, bu sınırlılıklar da çalışmanın genellenebilirliğini etkilemektedir. Bu bağlamda, çalışmanın bulguları belirli sınırlılıklar çerçevesinde değerlendirilmelidir.

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Batarya Teknolojileri

Elektrik pili, harici cihazlara güç sağlamak için bir veya daha fazla elektrik hücresinden oluşmaktadır. Genellikle batarya terimi elektrokimyasal birim hücreyi ifade etmektedir. Bir batarya istenen voltaj ve kapasiteye bağlı olarak hücrelerin seri, paralel veya her iki şekilde birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır.

Bir pil hücresi; elektronları dış devreye veren anot (negatif elektrot), dış devreden elektronları kabul eden katot (pozitif elektrot) ve iyon transferini sağlayan elektrolitten oluşmaktadır. Anot malzemesi yüksek verimlilik, iletkenlik, kararlılık ve düşük maliyet gibi kriterlere göre belirlenmekte olup, çinko ve lityum en yaygın örnekler arasındadır. Katot ise etkili bir oksitleyici olmalı, uygun çalışma voltajına sahip olmalı ve elektrolitle temas ettiğinde stabil kalmalıdır. Yaygın katot malzemeleri metalik oksitlerden oluşmaktadır. Elektrolitler ise iyonik iletkenliği yüksek, elektriksel iletkenliği düşük, elektrotlarla uyumlu ve düşük maliyetli bileşikler olarak seçilmektedir [9].

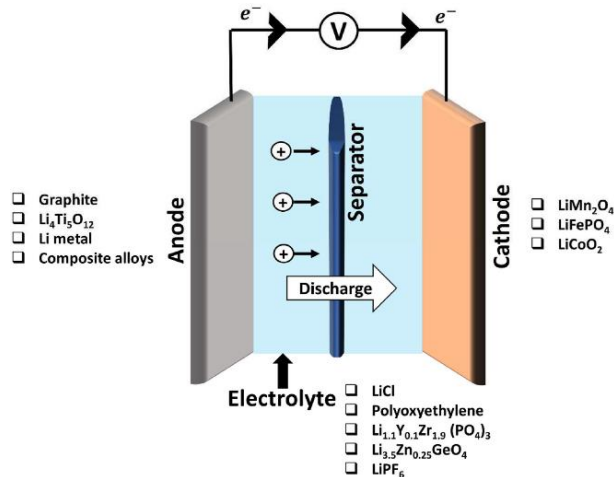
Anot ve katot, dahili kısa devreyi önlemek amacıyla fiziksel olarak izole edilmekte ve elektrolitle çevrelenmektedir. Hücrelerde, elektrotları mekanik olarak ayıran ancak iyonik iletkenliği koruyan ayırıcılar kullanılmaktadır. Hücreler silindirik, prizmatik veya kese gibi çeşitli şekillerde tasarlanmakta ve sızıntıyı önlemek için özel yöntemlerle kapatılmaktadır [9].

2.2. Hücrelerin ve Pillerin Sınıflandırılması

Elektrokimyasal hücreler ve piller, yeniden şarj edilebilme kapasitelerine göre birincil (şarj edilemeyen) ve ikincil (şarj edilebilir) olarak sınıflandırılmaktadır. Bunun yanı sıra, belirli yapı ve tasarımları tanımlamak için ek sınıflandırmalar da yapılmaktadır. Birincil

piller, elektriksel olarak yeniden şarj edilemeyen ve deşarj sonrası atılan hücrelerden oluşmaktadır. Bu piller, düşük ila orta dereceli deşarj hızlarında yüksek enerji yoğunluğu sunmakta, hafif, ekonomik ve uzun raf ömrüne sahip olmalarıyla öne çıkmaktadır. İkincil piller ise deşarj sonrası ters akım uygulanarak tekrar şarj edilebilmekte olup, türüne bağlı olarak yüzlerce veya binlerce kez kullanılabilir. Bu piller, elektrik enerjisini depolama yeteneklerinden dolayı "akümülatör" veya "depolama pilleri" olarak da adlandırılmaktadır.

İkincil pillerin kullanım alanları iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Birincisinde, pil bir enerji depolama cihazı olarak ana enerji kaynağına bağlıdır ve şarj edildikten sonra talep üzerine enerjiyi yüke iletmektedir. Otomotiv ve havacılık sistemleri, yedek güç kaynakları (UPS) ve hibrit elektrikli araçlar bu gruba girmektedir. İkinci kategoride ise piller, birincil piller gibi kullanıldıktan sonra atılmak yerine yeniden şarj edilerek tekrar kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar taşınabilir tüketici elektroniği, elektrikli el aletleri ve elektrikli araçlarda yaygın olarak görülmektedir. İkincil piller yüksek güç yoğunluğu, yüksek deşarj oranı ve düz deşarj eğrileriyle karakterize edilmektedir [9]. Şarj edilebilir pillerin performansını, verimliliğini ve ömrünü artırmak için önemli çalışmalar yapılmaktadır. Şekil 2.1.'de gösterilen tipik bir şarj edilebilir pil yapısı, elektrolit ve ayırıcı membranla ayrılan bir katot ve anottan oluşmaktadır. Pil araştırmalarında elektrot ve elektrolit malzemelerinin seçimi kritik öneme sahip olup, bu malzeme kombinasyonları güç yoğunluğu, yaşam döngüsü ve diğer önemli performans parametrelerini belirlemektedir. Pil teknolojilerinin performans aralığı, çeşitli uygulamalara bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2.1. Şarj edilebilir (ikincil) pilin şematik gösterimi.

2.3. Hücresinin Elektriksel Özellikleri

Hücre, kimyasal enerjiyi depolayan ve elektrokimyasal reaksiyon yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren kapalı bir güç kaynağıdır. Elektrokimyasal hücreler, genellikle alüminyum veya bakırdan yapılmış pozitif ve negatif elektrotlar içermekte olup, elektrotlar ile elektrolit arasındaki redoks reaksiyonları sonucunda elektron hareketi sağlanmaktadır [10]. Elektrikli araçlarda farklı hücre kimyaları kullanılmakta olup, kurşun-asit, nikel-kadmiyum (NiCd), nikel-metal hidrit (NiMH) ve lityum-iyon (Li-ion) gibi çeşitli türler bulunmaktadır [11].

Lityum pillerde, katot bileşimine bağlı olarak lityum kobalt oksit (LiCoO₂), lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA), lityum demir fosfat (LFP) ve lityum manganez oksit (LiMnO₄) gibi farklı türler geliştirilmiştir. Katot malzemesindeki bu farklılıklar, çeşitli uygulamalar için alternatif pil özellikleri sunmaktadır [10].

2.4. Pil Terminolojisi

2.4.1. Nominal Gerilim

Nominal voltaj, hücre voltajı karakteristik eğrisinin doğrusal aralığındaki ortalama değer olarak tanımlanmaktadır. Karakteristik eğrinin başında ve sonunda meydana gelen büyük gerilim değişiklikleri dikkate alınmamaktadır.

2.4.2. Kapasite

Kapasite, önceden şarj edilmiş bir pilin serbest bırakabileceği maksimum yük (Q) miktarını ifade etmektedir. Yük miktarı SI birimi olarak Coulomb (C) ile ölçülmektedir. Ayrıca, akım ve zaman çarpımı olarak hesaplanan kapasite, amper-saat (Ah) veya miliamper-saat (mAh) birimleriyle de ifade edilmektedir [12].

$$C_{\text{kapasite}} = \int_0^{t_{\text{deşarj}}} i(t) dt = Q_{\text{deşarj}} \quad (2.1)$$

2.4.3. Depolama Kapasitesi

C-oranı, bir bataryanın belirli bir akımı ne kadar süreyle sağlayabileceğini ifade eden bir parametredir. $C_{\text{Ah}} = I \times t$ (Akım \times Zaman) formülüyle gösterilmekte olup, bir pilin maksimum kapasiteyle şarj vedeşarj hızının ölçüsünü belirtmektedir. Örneğin, 48 Ah

kapasiteli bir batarya, 1C oranında 1 saat boyunca 48 A, 0.5C oranında 2 saat boyunca 24 A ve 2C oranında 30 dakika boyunca 96 A sağlayabilmektedir. Bataryalar, 1C oranında şarj edildiğinde en verimli performansa ve en yüksek çevrim ömrüne sahip olmaktadır [13].

2.4.4. Nominal Kapasite

Nominal kapasite, üreticinin kılavuzlarında ve pilin isim plakasında belirtilen kapasite değeridir. Uygulamaya bağlı olarak, uluslararası standartlar tarafından belirlenen deşarj süresi boyunca ölçülerek ifade edilmektedir [12].

2.4.5. Deşarj Derinliği (DOD)

DOD, kapasiteye göre pilden alınmış olan şarj miktarının bir göstergesidir. Örneğin %90'lık bir DOD, teorik maksimum %100 olduğundan derin deşarja karşılık gelir [12].

2.4.6. Batarya Ömrü Başlangıcı (Begin Of Life - BOL) ve Batarya Ömrü Sonu (End Of Life – EOL)

Pilin üretimden hemen sonraki durumu BOL (Beginning of Life) olarak adlandırılır. Kullanım sırasında pilin eskimesi, kapasitesinin azalmasına ve iç direncinin artmasına yol açar. Bu parametreler belirli bir bozulma düzeyine ulaştığında, pil artık amaçlanan işlevini yerine getiremez. Hala işlevsel olsa bile bu duruma EOL (End of Life) denir [12].

2.4.7. State of charge (SOC)

SOC (Şarj Durumu), mevcut kapasite " $Q(t)$ "nin nominal kapasite " Q_n " ile oranı olarak tanımlanır ve bu oran Denklem 2.2'de gösterilmiştir.

Burada nominal kapasite, batarya üreticisi tarafından belirtilen, bataryanın depolayabileceği maksimum şarj miktarını temsil eder [14]. Değer genellikle yüzde (%) olarak verilir.

$$SOC = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (2.2)$$

Coulomb yöntemi, SOC'yi (şarj durumunu) hesaplamak için en yaygın şekilde uygulanan tekniklerden biridir. Bu yöntem hem batarya akımını I_{bat} hem de kayıp reaksiyonlar tarafından tüketilen batarya akımını $I_{kayıp}$ dikkate alır. Dolayısıyla, akım akışı entegre

edilerek başlangıç SOC değerine eklenir [14]. Denklem 2.3'te C_N nominal kapasiteyi temsil etmektedir [15].

$$SOC = SOC_{başlangıç} + \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t (I_{bat} - I_{kayıp}) dt \quad (2.3)$$

Şarj durumu, pilin güvenilirliğini tahmin eder ve kalan kullanılabilir enerji ile süre gibi bilgileri sağlar. Ayrıca, yaşlanma, bozulma ve üretim varyasyonlarındaki değişiklikler nedeniyle hücrelerde farklı kapasite değerlerinin ortaya çıkması gibi durumların söz konusu olduğu yüksek akım uygulamalarında, SOC şarj ve deşarj stratejilerinin tasarımına da rehberlik eder. SOC ve voltaj dizileri, elektrikli araçlarda sürüş menzilin tahmini için temel olan deşarj enerjisinin hesaplanmasında kullanılır [10]. Örneğin, tamamen şarj edilmiş bir bataryanın SOC değeri %100'dür; tamamen boşalmış bir bataryada bu değer %0 olur. Her bir hücrenin veya bataryanın açık devre voltajına (OCV) göre şarj durumu (SOC) değerinin tahmin edilebilmesi amacıyla Tablo 2.1. örnek olarak verilmiştir. Bu örnekte lityum iyon bataryaların 3.0 V altında boş kabul edilmiştir.

Tablo 2.1. Voltaj – SOC Eşleştirme Tablosu [16].

Hücre OCV (V)	SOC (%)	Hücre OCV (V)	SOC (%)
0 – 3.000	0	3.670 – 3.7405	50
3.000 – 3.140	5	3.7405 – 3.7755	55
3.140 – 3.240	10	3.7755 – 3.812	60
3.240 – 3.350	15	3.812 – 3.847	65
3.350 – 3.430	20	3.847 – 3.983	70
3.430 – 3.505	25	3.983 – 3.945	80
3.505 – 3.565	30	3.945 – 3.990	85
3.565 – 3.618	35	3.990 – 4.050	90
3.618 – 3.658	40	4.100 – 4.200	100
3.658 – 3.670	45		

2.4.8. State of health (SOH)

Sağlık durumu, lityum iyon pillerin ömrünü, sağlık prognozunu ve durumunu değerlendirmek için temeldir. SOH tahmini, yaşam sonuna kadar kalan izin verilen performans oranını yansıtır [17]. SOH, kapasite bozulması ve iç dirençteki artışla karakterize edilir [10]. Yaşamın başlangıcında %100, yaşam sonunda ise %0 olarak kabul edilir. Otomotiv uygulamalarında aracın aküsü SOH'nin %80'ine ulaştığında akü

ömrünün sona erdiği [17]ve güvenlik açısından elektrikli araçtan çıkarılması gerektiği varsayılmaktadır.

2.4.9. State of function (SOF)

SOF, pilin belirli bir işlevi yerine getirmek üzere uygulamayı mevcut durumunda desteklemek için yeterli güç kapasitesine sahip olup olmadığını belirler. Bu işlevsellik geçici bir davranıştan türetilmiştir. Çoğu durumda SOF, pilin gerçek koşullarını ve performansını tahmin etmek için SOC, SOH ve sıcaklık kullanılarak ölçülür [10]. SOF'un amacı, belirli şarj veya deşarj olaylarında mevcut voltajı tahmin etmektir. HEV uygulamasında, pilin hızlanma, yavaşlama ve durma süreleri gibi bir araç görevine yanıt verip veremeyeceğini belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Değerlerin BMS tarafından tahmini, gerçek enerji stratejisinin yeterli olup olmadığını veya güncellenmesi gerekip gerekmediğini tanımlar. Uygulama tüketimin yönetimi için faydalıdır çünkü SOF, ekonomik olarak uygun olduğunda hızlı şarj veya deşarj aşamasını tanımlayabilir [10].

2.4.10. Enerji Kapasitesi (Wh)

Bataryaların enerji kapasitesi, bataryada depolanan elektrik enerjisi miktarıdır. Batarya geriliminin şarj kapasitesi ile çarpılmasıyla elde edilmekte olup birimi Wh'dir. Örneğin 100 Ah kapasiteli 12 V'luk bir bataryanın enerji kapasitesi 1200 Wh'dir [18].

2.4.11. Enerji Yoğunluğu (Wh/L)

Bataryaların enerji yoğunluğu, birim hacimde depolanan enerji miktarı olarak ifade edilir. Birimi $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$ 'dir. Araç için gerekli olan batarya hacminin belirlenmesi için kullanılır [18].

2.4.12. Spesifik Enerji ve Spesifik Güç

Bataryaların önemli parametrelerden olan spesifik (özgül) enerji, birim kütlede depolanan enerji miktarıdır ve birimi $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 'dir. Spesifik (özgül) güç ise, maksimum gücün kütleyle oranıdır. Birimi $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ 'dir. Bataryanın spesifik güç miktarı bağlanan yük ile de ilişkilidir [18].

2.4.13. Batarya Çalışma Sıcaklığı

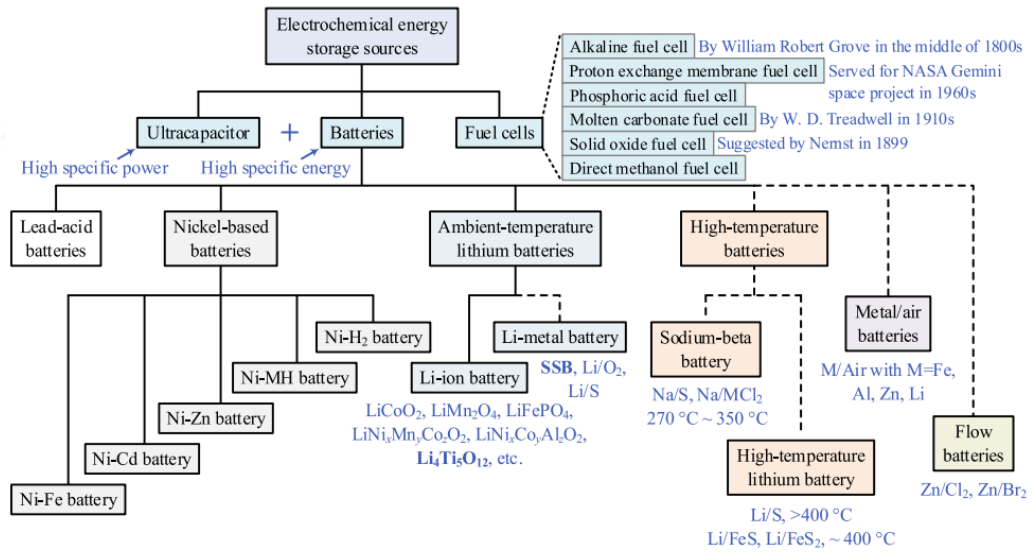
Yüksek performans elde edebilmek için bataryaların uygun çalışma sıcaklığında çalıştırılması gerekir.

2.4.14. Batarya Çevrim Ömrü

Yeniden şarj edilebilir (sekonder) bir pilin şarj kabul etme yeteneğini kaybetmeden çevirebileceği şarj-deşarj sayısıdır. Piller şarj-deşarj edildikçe kimyasal deformasyona uğrarlar. Çevrim ömrü belirli koşullarda tahmin edilmektedir. Pil tipine, kimyasal yapısına,deşarj derinliğine, sıcaklık ve nem gibi dış etmenlere de bağlıdır.

2.5. Geleneksel Pil ve Hücre Kimyaları

Elektrokimyasal enerji depolama kaynakları, Şekil 2.2’de ayrıntılı olarak sınıflandırılmıştır. Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinde bataryalar farklı kimyasal özelliklere ve kullanım alanlarına sahip olabilmektedir.



Şekil 2.2. Elektrokimyasal enerji depolama kaynaklarının sınıflandırılması [19].

Bataryalar, şarj edilebilir bataryalar ve şarj edilemeyen bataryalar olarak ikiye ayrılırlar. Şarj edilemeyen bataryalar “birincil bataryalar” olarak isimlendirilirken, şarj edilebilen bataryalar ise “ikincil bataryalar” olarak isimlendirilirler. Şarj edilebilir yani ikincil bataryalar,deşarj olduktan sonra tekrar tam şarj edilerek kullanılabilen batarya türleridir. Aynı zamanda depolama bataryaları ve akümülatörler olarak da adlandırılırlar. İkincil bataryalar, yüksek güç yoğunluğu, yüksekdeşarj oranı, düzdeşarj eğrileri ve uygun düşük sıcaklık performansı ile karakterize edilirler. Günümüze kadar gelen batarya

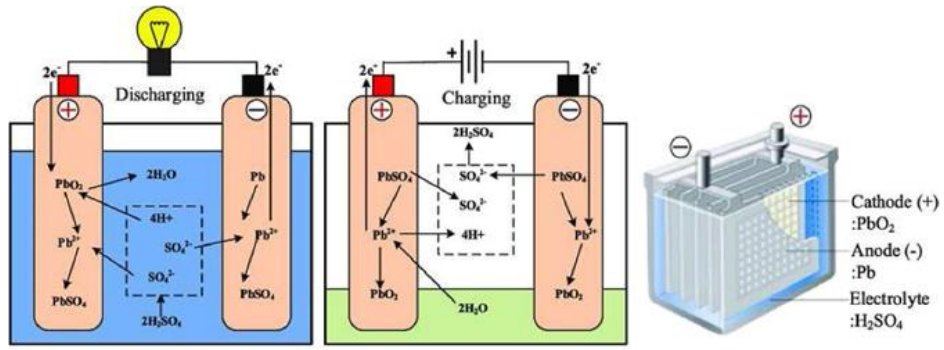
çalışmalarında, bataryalar kullanılan elektrot veya elektrolit çeşidine göre; kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel-metal hidrit, lityum-iyon ve lityum-sülfür bataryalar olarak sınıflandırılmaktadır [20].

2.5.1. Kurşun asit pili

Kurşun-asit aküler, otomobillerde yaygın olarak kullanılan en eski şarj edilebilir akü türlerindedir. Bu teknoloji, düşük maliyeti ve üretim ile geri dönüşümde kolay işlenebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Kurşun-asit akülerde kullanılan malzemelerin %98'i geri dönüştürülebilir. Özgül enerjisi 20–40 Wh/kg gibi düşük seviyelerde olsa da bu piller büyük tesisler için ekonomik olduklarından elektrikli araç şarj istasyonlarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Kurşunun yüksek atom ağırlığı, pilin özgül enerji ve gücünü düşürür.

Örneğin, 200 km'lik bir sürüş için elektrikli bir araçta 500 kg kurşun-asit akü hücresi gerekirken, aynı mesafede Li-ion için bu değer yaklaşık 150 kg'a düşebilir. Bu pillerde sülfürik asit elektrolit olarak görev yaparken, kurşun elektrot olarak kullanılır. Tipik bir kurşun-asit bataryanın şeması Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

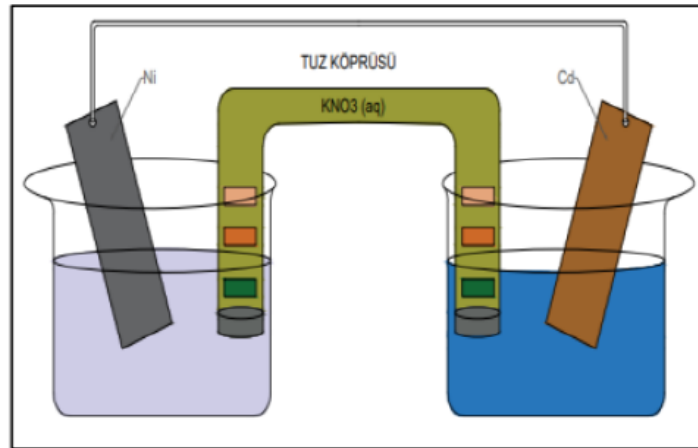
Kurşun-asit aküler, ucuz ve uygun fiyatlı oldukları için 7-14 kW ve 48V kullanan hibrit elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu pillerin temel avantajı, çok yüksek ve çok düşük sıcaklıklarda dahi sabit güç sağlayabilmesidir. Ancak kurşun-asit akülerin teorik özgül enerjisi, sınırlı kütle kullanımı, asit seyrelmesi, asit fazlası ve aktif olmayan bileşenler (şebekeler, terminaller, kaplar) nedeniyle düşük kalmaktadır. Bu akülerin özgül gücü ve çevrim ömrü de düşüktür; bu nedenle, çevrim ömrünü uzatmak amacıyla kurşun-asit akülerde negatif plakaya aktif karbon eklenir. Negatif plakada bulunan karbon, PbSO₄ birikimini azaltarak pilin ömrünü uzatır. Ayrıca, kurşun-asit bataryalarla karşılaştırıldığında, kurşun-karbon bataryalar daha yüksek özgül güce ve daha uzun yaşam döngüsüne sahiptir, ancak özgül enerji açısından fark göstermezler. Son gelişmeler, geleneksel monopolar yapıya kıyasla üstün güç çıkışı sağladığı bilinen bipolar kurşun-asit pillerde olmuştur. Bipolar kurşun-asit bataryaların elektrokimyası, hücrenin pozitif ve negatif plakalarındaki kurşun bileşiklerinin indirgeme-oksidasyon yük değişimi reaksiyonunda yer aldığı geleneksel bataryalarla aynıdır. Geleneksel prosesin aksine, bipolar pillerdeki elektronlar alt tabaka üzerinden sonraki hücrelere gider, böylece harici bir devreden gelen omik güç kayıpları azalır.



Şekil 2.3. Kurşun-asit bataryanın yapısı ve çalışması.

2.5.2. Nikel-Kadyum Bataryalar (Ni-Cd)

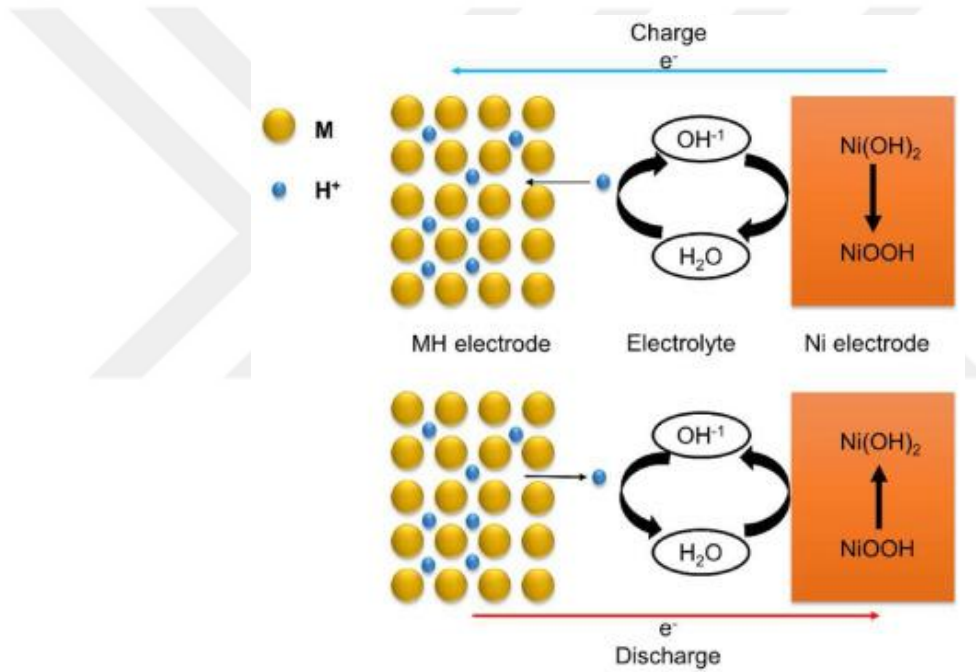
Nikel kadmiyum (NiCd) bataryaları, katot olarak nikel hidroksit, anot olarak kadmiyum ve elektrolit olarak alkalin potasyum hidroksit kullanır. Maliyet açısından uygun olmaları ve emniyetli olmaları nedeniyle uzay araştırmalarında uzay gemilerinde kullanılmıştır. Ayrıca taşınabilir elektrikli cihazlar, telekomünikasyon sistemleri, acil aydınlatma sistemleri ve güneş enerji istasyonları gibi birçok alanda tercih edilen batarya tipidir. Yüksek akımlarda şarj edilebilmeleri ve düşük ısınma özellikleri gibi avantajlar sunar. Ancak, düşük şarj-deşarj verimliliği, kendi kendinedeşarj olması, hafıza etkisi (yani kapasite kaybı) ve soğuk hava koşullarında performans kaybı gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Ayrıca, kadmiyum gibi ağır metallerin sağlık açısından zararlı olması, bu bataryaların kullanımını sınırlayan bir faktördür. Bu sorunlar nedeniyle, nikel metal hidrit (NiMH) bataryalar geliştirilmiştir. Nikel kadmiyum bataryanın yapısı Şekil 2.4'te gösterilmektedir [20].



Şekil 2.4. Nikel-kadyum (Ni-Cd) batarya yapısı.

2.5.3. Nikel metal hidrit pil (Ni-MH)

Nikel metal hidrit (NiMH) bataryalarında, katot olarak Ni(OH)_2 , anot olarak metal hidrür kullanılır ve elektrolit olarak potasyum çözeltisi tercih edilir. NiMH bataryalar, nikel-kadmiyum (NiCd) pillere göre %40 daha fazla enerji yoğunluğu, %30-40 daha fazla kapasite sunar ve çevre dostu olmalarıyla da öne çıkar; bu bataryalar çevreyi kirletmeyen bileşimlere sahiptir. Ayrıca, hafıza etkisine karşı nikel-kadmiyum pillerden daha az eğilimlidirler. Lityum iyon pil teknolojisi öncesinde, özellikle elektrikli araç sektörü başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmıştır. Nikel-metal hidrit (Ni-MH) pil yapısı Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

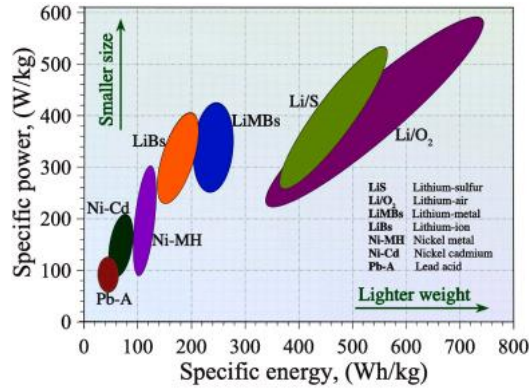


Şekil 2.5. Bir NiMH pilin elektrokimyasal reaksiyon süreçlerinin şematik diyagramı.

Yükleme işlemi için hidrojen atomu Ni(OH)_2 'den ayrışır ve MH alaşımı tarafından emilir. Boşaltma işlemi için hidrojen atomu MH alaşımından ayrışır ve NiOH ile birleşerek Ni(OH)_2 oluşturur [21].

Yükleme işlemi sırasında, hidrojen atomu Ni(OH)_2 'den ayrışarak MH alaşımı tarafından emilir. Boşaltma işlemi ise, hidrojen atomunun MH alaşımından ayrışıp NiOH ile birleşerek Ni(OH)_2 oluşturmasıyla gerçekleşir [21].

Şekil 2.6'da oklar, pil paketi boyutunu küçültmeye ve hücrenin toplam ağırlığını azaltmaya yönelik iyileştirme yönünü belirtir [22].



Şekil 2.6. Çeşitli şarj edilebilir pil teknolojilerinin spesifik enerji ve güç yoğunluklarına göre grafiksel gösterimi.

2.5.4. Lityum piller

Li-iyon piller (LIB'ler), aktif maddelerine göre çeşitli kimyasal bileşiklerle adlandırılır. Bu kimyalar arasında en yaygın olanlar şunlardır:

- **LCO (Lityum-kobalt-oksit - LiCoO_2)**: Yüksek özgül kapasite, düşük kendi kendine deşarj ve iyi çevrim performansına sahip olmasına karşın, yüksek maliyet ve düşük termal kararlılığı nedeniyle dezavantajları vardır. Genellikle cep telefonları ve dizüstü bilgisayarlar gibi taşınabilir cihazlarda kullanılır [12].
- **NMC (Lityum-nikel-manganez-kobalt-oksit - LiNiMnCoO_2)**: Daha yüksek termal stabilite ve kapasite sunan bu kimya, LCO'nun yerini almıştır. Kobalt içeriği daha az olduğundan, daha düşük maliyetle benzer performans sağlar.
- **NCA (Lityum-nikel-kobalt-alüminyum oksit - LiNiCoAlO_2)**: Yüksek spesifik enerji, uzun ömür ve iyi performans sunar, ancak yüksek maliyet ve güvenlik sorunları barındırır. Tesla gibi elektrikli araçlarda kullanılır.
- **LFP (Lityum-demir-fosfat - LiFePO_4)**: Termal olarak dayanıklı, yüksek çevrim stabilitesine sahip ve güvenlik avantajları sunan bu kimya, genellikle motorlu taşıtlarda kurşun-asit akülerin yerine kullanılır [12].

Li-iyon pillerin performansı, özgül enerji, özgül kapasite, çevrim ömrü, güvenlik, şarj-deşarj oranları gibi parametrelerle değerlendirilir. Spesifik enerji, birim kütle başına depolanan enerji miktarını ölçerken, çevrim ömrü düşük DOD ve SOC sınımları ile artırılabilir. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda şarjda lityum dendrit oluşumu gibi sorunlar meydana gelebilir ve bunlardan kaçınılmalıdır [23].

Tablo 2.2. Kurşun-Asit, Nikel Metal Hidrit ve Lityum-iyon piller arasında bir karşılaştırma. [24]

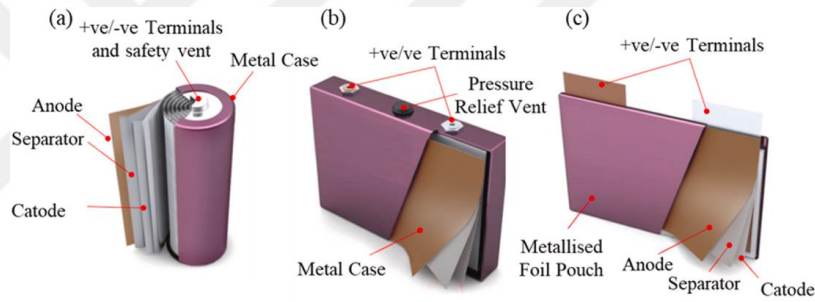
Özellikler	Kurşun Asit	Nikel metal hidrür	Lityum-iyon		
			Kobalt	Manganez	Fosfat
Ana bileşenler	Metalik Kurşun, Kurşun Dioksit, Kurşun Sülfat ve Sülfürik Asit	Hidrojen, Nikel Hidroksit ve Potasyum Hidroksit	Lityum, Demir, Alüminyum, Bakır, Kobalt	Lityum, Manganez, Grafit	Lityum, Demir, Fosfat, Alüminyum, Bakır, Organik Elektrolit, Grafit
Özgül Enerji (Wh/kg)	30–50	60–120	150–190	100–135	90–120
İç Direnç (mΩ)	<100 12 V paketi	200–300 6 V'luk paket	150–300 7,2 V paketi	Hücre başına 25–75	Hücre başına 25–50
Yaşam Döngüsü (%80 Deşarj)	200–300	300–500	500–1000	500–1000	1000–2000
Hızlı Şarj Süresi	8–16 saat	2–4 saat	3–4 saat	≤1 saat	≤1 saat
Aşırı Şarj Toleransı	Yüksek	Düşük	Düşük, Damlama şarjını tolere edemiyor		
Kendiliğinden Deşarj/Ay (25 °C)	%5	%30	<%10		
Hücre Gerilimi (Nominal)	2V	1,2V	3,6V	3,8V	3,3V
Şarj Kesme Gerilimi (V/hücre)	2.40	Gerilim İmzasına Göre Tam Şarj Tespiti	4.20		3.60
Şarj Kesme Gerilimi (V/hücre, 1C)	1.75	1.00	2,50–3,00		2.80
Tepe Yük Akımı	5C	5C	>3C	>30C	>30C
Şarj Sıcaklığı	–20 ila 50 °C	0 ila 45 °C	0 ila 45 °C		
Boşaltım Sıcaklığı	–20 ila 50 °C	–20 ila 65 °C	–20 ila 60 °C		
Bakım Gereksinimleri	3-6 Ay	60–90 Gün	Gerekli değil		
Güvenlik gereksinimleri	Termal Olarak Kararlı	Termal Olarak Kararlı, Sigorta Koruması Ortak	Koruma Devresi Zorunlu		

2.6. Lityum İyon Hücre Tipleri

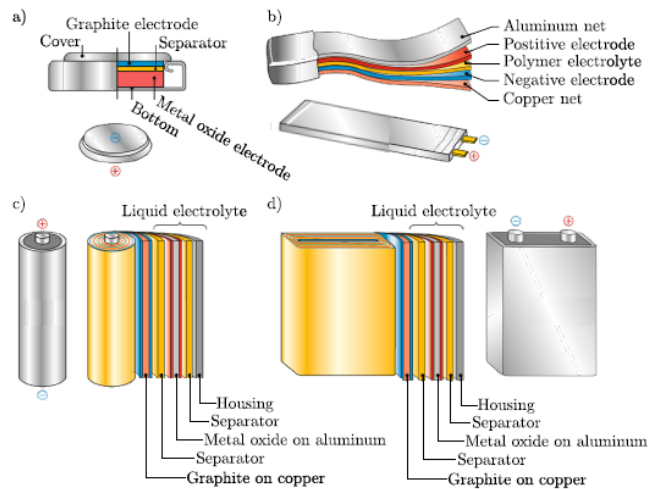
Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar, hücre tasarımları açısından silindirik, prizmatik ve poşet (pouch) hücreler olmak üzere Şekil 2.7’de görüldüğü üzere üç ana formda üretilmektedir. Bu üç yapı, farklı mekanik, termal ve üretimsel özelliklere sahiptir ve kullanım alanlarına göre tercih edilmektedir. Şekil 2.8’de mekanik yapılar gösterilmiştir. Silindirik Hücreler: Yaygın ev tipi pillerin yapısına benzeyen bu hücreler, anot ve katot tabakalarının spiral şekilde sarılmasıyla oluşturulur. Diğer Li-ion pillere göre üretimleri kolay ve ekonomiktir ve çok yönlü mekanik dayanıklılığa sahiptirler. Küçük boyutları, iyi ısı yönetim sağlar ancak sıcaklık gradyanlarına karşı duyarlıdırlar. Ayrıca güvenlik açısından PTC ve CID gibi entegre koruma sistemlerine olanak tanır.

Prizmatik Hücreler: Genellikle alüminyum veya çelikle kaplanmış folyo katmanlardan oluşan bu hücreler, daha yüksek enerji yoğunluğu sağlarken, mekanik dayanıklılıkları yön bağımlıdır. Daha büyük boyutlara sahip olmaları nedeniyle, prizmatik hücreler daha yüksek enerji ve kapasite sunar. Bu da aynı enerji düzeyine ulaşmak için daha az sayıda hücre ve bağlantı kullanılmasını mümkün kılarak üretim maliyetlerini düşürebilir. Ayrıca LFP kimyasıyla uyumlulukları, gelecekteki potansiyellerini artırmaktadır.

Poşet (Pouch) Hücreler: Esnek plastik ve alüminyum filmle kaplı bu hücreler, diğer iki tipe göre daha hafiftir. Ancak rijit olmayan yapıları, mekanik dayanıklılıklarını sınırlar. Termal açıdan daha az sıcaklık duyarlılığı gösterirler, fakat gaz oluşumu nedeniyle şişme ve patlama gibi riskler barındırır. Bu nedenle termal kontrol sistemleri daha karmaşık olabilir [25].



Şekil 2.7. Hücre yapım türleri. (a) silindirik hücre (b) prizmatik hücre (c) kese hücresi [9].



Şekil 2.8. LIB'lerin (Lityum-iyon Bataryaların) mekanik yapısı (a) düğme hücre b) poşet hücre c) silindirik hücre d) prizmatik hücre [12].

2.7. Lityum İyon Bataryalar İçin Eşdeğer Devre Modelleri

Li-ion bataryaların çalışma dinamiklerini anlamak ve simüle etmek amacıyla birçok modelleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler, temel aldıkları modelleme prensiplerine göre elektrokimyasal modeller, matematiksel modeller ve eşdeğer devre modeller olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır [26].

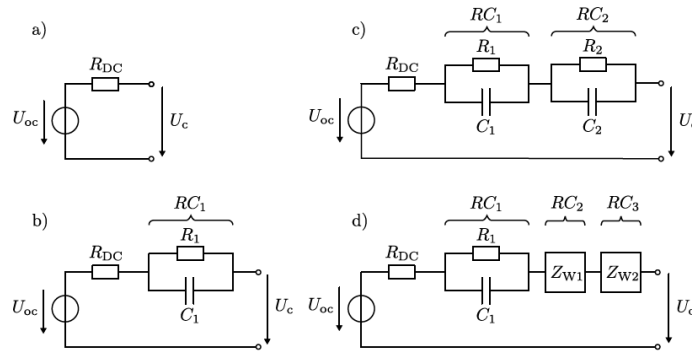
Elektrokimyasal modeller, bir dizi kısmi diferansiyel denklemden oluşmakta olup örneğin elektrotlar arasındaki kütle, yük ve ısı taşınımı gibi Li-ion batarya içerisindeki dinamik reaksiyonları doğru bir şekilde tanımlayabilmektedir. Parametre belirsizlikleri ve hesaplama karmaşıklığı, gerçek zamanlı bir BMS'de elektrokimyasal modellerin kullanımını sınırlamaktadır.

Matematiksel modeller, akım, SOC ve gerilim arasındaki ilişkiyi doğrudan tanımlamak amacıyla matematiksel fonksiyonlar kullanarak oluşturulmaktadır. Bu model, bataryanın termal ve yaşlanma davranışları eklenerek performansı artırmak için daha da geliştirilebilmektedir. Elektrokimyasal modellerle karşılaştırıldığında, matematiksel modeller daha basit bir yapıya ve daha doğrudan bir parametre tanımlama sürecine sahiptir. Ancak, bu yapısal sadelik nedeniyle matematiksel modellerin dinamik doğruluğu hâlâ oldukça sınırlıdır.

Eşdeğer devre modelleri (ECM), pil modellemesi için doğruluk ve karmaşıklık arasında iyi bir denge sağlamak için yaygın olarak kullanılır. ECM, pilin elektrokimyasal reaksiyonlarını ve fiziksel olaylarını temsil etmek için elektrik devresindeki direnç ve kapasitans elemanlarını kullanır [26]. Elektrokimyasal modellerle karşılaştırıldığında, Eşdeğer Devre Modeli daha az sayıda parametreye sahiptir ve parametreleştirilmesi daha kolaydır. Bu nedenle çalışmalarda temel alınan eşdeğer batarya modeli üzerinde detaylı araştırmaya Bölüm 2.7.1.'de yer verilmiştir.

2.7.1. Eşdeğer Devre Modeli

Eşdeğer Devre Modelleri genel olarak, bataryanın açık devre gerilimini (OCV) temsil eden bir gerilim kaynağı, dirençler, endüktanslar ve kapasitörlerle birlikte kullanılmaktadır. Bu ilave pasif bileşenler, bataryanın dinamik davranışını yaklaşık olarak modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 2.9'da farklı karmaşıklık düzeylerine sahip eşdeğer devre modellerini göstermektedir [12].



Şekil 2.9. LIB'ler için elektriksel eşdeğer devre şemaları. [12]

Şekil 2.9'da yer alan şemaların davranış biçimleri şu şekilde izah edilmektedir:

a) Birinci Eşdeğer Devre Şeması: Birinci eşdeğer devre diyagramı, ideal bir gerilim kaynağı U_{oc} ve seri bağlı bir direnç R_{DC} içermektedir. U_{oc} hücrenin iç voltajını, R_{DC} ise bataryanın iç direncini temsil etmektedir. Terminallere bir yük akımı uygulandığında, iç direnç üzerinde bir voltaj düşüşü meydana gelmektedir. Sistemin adım yanıtı dikdörtgen şeklindedir ve dinamik batarya davranışını neredeyse hiç yansıtamamaktadır.

b) Birinci Eşdeğer Devre Şemasının Genişletilmesi: İlk eşdeğer devre diyagramı, bir RC elemanı ile genişletilmektedir. RC'nin adım yanıtı üstel karakterdedir (P_{T1} elemanı). Bu nedenle, R_{DC} ile RC_1 , dinamik batarya davranışını daha iyi simüle edebilmektedir.

c) Dinamik Davranışı Geliştirmek İçin Eklenen RC Elemanları: Dinamik davranışı daha da geliştirmek amacıyla ilave bir RC elemanı eklenmektedir. Bu sayede batarya modeli, bir batarya hücrenin voltaj ve akım davranışını, R_{DC} , RC_1 ve RC_2 'nin üst üste bindirilmesiyle neredeyse birebir şekilde yeniden üretebilmektedir. Bu eşdeğer devre diyagramı, birçok yayında batarya modellemesinin temeli olarak kullanılmaktadır.

d) Warburg Empedansları ile Son Doğruluk Artışı: Hassasiyette son bir artış, Warburg empedanslarının kullanılmasıyla elde edilmektedir. Ancak bu tür batarya modellemesi, hesaplama açısından oldukça karmaşıktır [12].

2.8. Batarya Yönetim Sistemi (BMS-BYS)

Piller, taşınabilir cihazlar, endüstriyel sistemler, telekomünikasyon altyapıları, elektrikli araçlar ve mikro şebekeler gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılabilen enerji depolama cihazları olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda, şarj edilebilir Li-ion piller düşük

ağırlıkları, yüksek enerji yoğunlukları, uzun ömürleri, yüksek kapasiteleri, hızlı şarj yetenekleri, düşük kendi kendine deşarj seviyeleri ve çevre dostu yapıları sayesinde otomotiv ve şebekeye bağlı sistemlerde hayati bir rol üstlenmektedir [4]. Li-ion batarya hücre seviyesi ve paket seviyesi kontrol değişkenlerinin güvenli çalışma koşulları için doğru bir şekilde muhafaza edilmesi gerekmektedir. Bu kontrol değişkenleri, batarya yönetim sistemi tarafından izlenmekte ve korunmaktadır [4].

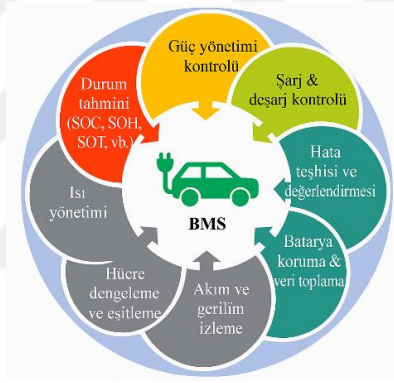
Şekil 2.10'da BMS fonksiyonları gösterilmektedir. BMS, bir batarya paketinin beyni gibi işlev gören çıkışları izleyen ve bataryayı kritik hasarlardan koruyan elektronik bir cihazdır. Bu sistem sıcaklık, voltaj ve akımın izlenmesini, arıza tahmini veya önlenmesini ayrıca batarya parametre analizleri için iletişim protokolü aracılığıyla veri toplanmasını kapsamaktadır [3]. Bir batarya paketi, uygulamanın gerektirdiği çalışma gerilimini ve kapasiteyi sağlayabilmek için seri ve paralel bağlı birçok batarya hücresinden oluşmaktadır. Ancak, birbirine bağlı batarya hücreleri arasında voltaj ve kapasite uyumsuzluğu mevcutsa tüm batarya paketi verimli bir şekilde çalışmamaktadır [27]. Seri bağlı hücrelerin işletimindeki en büyük zorluk, hücre voltajı, depolama kapasitesi ve iç direnç açısından hücre dengesizliğidir.

Üretim tutarsızlıkları, kullanım ortamındaki farklılıklar, çevrim ömrü (yaşlanma) gibi faktörler, bir batarya paketinde hücre dengesizliğinin başlıca nedenlerinden bazılarıdır. Buna ek olarak, batarya paketindeki hücrenin konumu da ısı dağılımı ve kendi kendine deşarj farklılıklarından dolayı hücre dengesizliğine neden olur. Lityum iyon batarya (LIB) paketindeki hücre dengesizliği, kapasite kaybı, termal kararsızlık, kalıcı kapasite kaybı ve hatta kimyasal patlama gibi sorunlara yol açan düşük şarj, aşırı şarj, düşük deşarj ve aşırı deşarj gibi dört temel probleme neden olur. Bu olumsuz işletim koşullarını önlemek için etkili bir hücre dengeleme düzenine sahip bir batarya yönetim sistemi (BMS) son derece önemlidir. Bu sistem, LIB paketinin güvenliğini sağlarken maksimum ömür ve şarj-deşarj kapasitesini artırmayı hedeflemektedir [28].

Li-ion piller için çeşitli hücre dengeleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, hücre voltajı ve SOC temel alınarak pasif ve aktif hücre dengeleme yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Pasif dengeleme teknikleri, direnç bileşeni aracılığıyla aşırı yükü tamamen enerjilendirilmiş hücrelerden ayırır ve tüm hücreleri en düşük hücre yüküne benzer

şekilde formüle eder. Bu teknik daha güvenilirdir ve daha az sayıda bileşen kullanır, bu da genel sistem maliyetini azaltır. Ancak bu teknik, enerjinin ısı olarak dağılması ve enerji kayıplarına yol açması nedeniyle sistemin verimliliğini azaltır. Dolayısıyla bu teknik düşük güç uygulamaları için uygundur. Aktif hücre dengeleme teknikleri, yüksek enerjili hücrelerden yükü dışarı atarak daha düşük enerjili hücrelere iletir. Bu teknik, pil modülündeki enerjiyi koruyarak sistemin etkinliğini artırır. Pasif hücre dengeleme tekniğine göre hücreler arasında denge kurmak daha az zaman alır. Ancak bu teknik, genel sistem maliyetini artıran karmaşık devrelere sahiptir. Dolayısıyla aktif hücre dengeleme, yüksek güç uygulamaları için uygundur. Kondansatör, indüktör gibi enerji depolama bileşenlerine göre sınıflandırılan çeşitli aktif dengeleme devre topolojileri vardır [3].

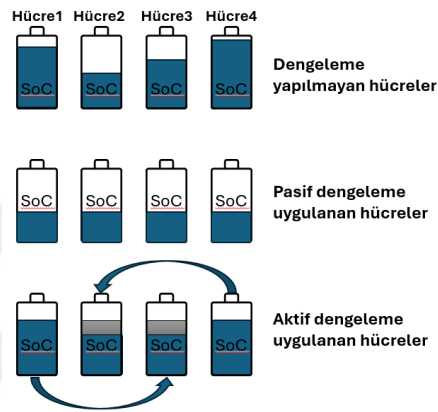


Şekil 2.10. BMS fonksiyonları [19].

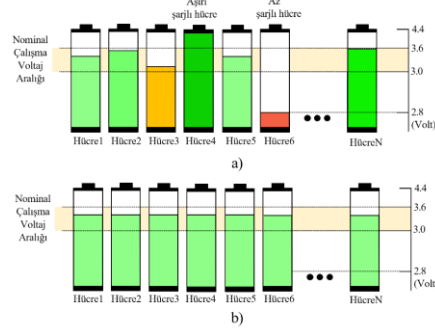
2.9. Dengeleme Sistemleri

Li-ion batarya paketlerinde, çevresel koşullar, üretim süreci ve hücreler arasındaki doğal farklılıklar nedeniyle hücreler hiçbir zaman tamamen özdeş olamamaktadır; özellikle ölçümler uygun şekilde yapılmadığında bu farklar daha da belirginleşmektedir. Daha üstün bir batarya sistemi için hücreler arasındaki farkların mümkün olduğunca az tutulabilmesi amacıyla batarya hücrelerinin sürekli olarak dengelenmesi gerekmektedir [3]. Hücre dengeleme yöntemleri genel olarak pasif ve aktif dengeleme olarak ikiye ayrılmaktadır. Pasif dengelemede fazla enerji ısı şeklinde boşa harcanırken, aktif dengelemede fazla enerji farklı hücrelere ya da daha zayıf hücrelere aktarılmakta ve böylece tüm hücreler arasında enerji dengesi sağlanmaktadır. Şekil 2.11’de aktif ve pasif dengelemede pilin şarj durumlarına etkisi görülmektedir. Şekil 2.12’de seri hücreler arasındaki dengesizlikler ve dengelenmiş hücreler görülmektedir.

Aktif hücre dengeleme, enerji transferi için kondansatörler, transformatörler, indüktörler ve dönüştürücüler gibi enerji depolama bileşenlerini kullanmaktadır. Pasif dengeleme ile karşılaştırıldığında, aktif dengelemede ısı şeklinde oluşan enerji kayıpları daha azdır; bu da enerji transferinin daha yüksek verimlilikle gerçekleştirilmesini sağlamaktadır [29]. Aktif dengelemenin en büyük avantajı, batarya enerjisinin çok daha verimli kullanılabilmesidir. Ancak, bu yöntem her zaman daha karmaşık devre yapılarına ve kontrol algoritmalarına ihtiyaç duymaktadır [30].



Şekil 2.11. Li-ion pilin şarj durumuna dayalı hücre dengeleme tekniği [3].



Şekil 2.12. (a) N hücreli batarya paketinde hücre dengesizlikleri. (b) N hücreli batarya paketinde dengelenmiş hücreler [31].

Bu tezde Pasif ve Aktif Dengeleme yöntemlerinin bir temelleri üzerinde durulup dengeleme topolojilerinin kıyaslaması ile ilgili literatürün incelenmiştir. Literatürde yapılan karşılaştırmalı analizlerde dengeleme hızı, şarj/deşarj yetenekleri, dengeleme ve hücre uygulaması için gereken birincil bileşenler, alan, maliyet, verimliliklere yer verilmiştir. Örnek bir karşılaştırmalı analiz Tablo 2.3'te verilmiştir. Takip eden bölümlerde dengeleme topolojileri detaylı olarak incelenmiştir.

Tablo 2.3. Yük dengeleme topolojilerinin karşılaştırılması [32] [8]

Dengeleme Teknikleri, Yöntemleri ve Türleri	Dengeleme İçin Eleman Sayısı (n Hücre)	Dengeleme Süresi, Kontrol Karmaşıklık ₁	Güç Kaybı, Verimlilik	Gerilim ve Akım Stresleri	Boyut ve Maliyet	Avantajlar	Dezavantajlar
Sabit Şönt, Pasif ve Sabit	n direnç	Yavaş, Basit	Yüksek, Kötü	Sıfır Sıfır	Küçük, Ucuz	Çok basit kontrol sistemi, çok küçük boyut ve düşük maliyet	Uzun dengeleme süresi, yüksek güç kaybı, termal yönetim gereksinimi, düşük verimlilik
Anahtarlı Şönt, Pasif ve Sadece Şarj	n anahtar, n direnç	Yavaş, Basit	Yüksek, Düşük	Yüksek Yüksek	Küçük, Ucuz	Basit kontrol sistemi, çok ucuz ve küçük boyutlu, HEV'de uygulanabilir ancak EV'de bazı sınırlamaları vardır	Uzun dengeleme süresi, yüksek güç kaybı, termal yönetim gereksinimi, düşük verimlilik
Analog Şönt, Pasif ve Sadece Şarj	n anahtar, n Op-amps, 3n direnç, n kapasitör	Yavaş, Basit	Yüksek, Düşük	Yüksek Yüksek	Küçük, Ucuz	Basit kontrol sistemi, çok küçük ve ucuz	Yüksek güç kaybı, termal yönetim gereksinimi, düşük verimlilik
Tek Anahtarlı Kapasitör, Aktif ve Şarj/Deşarj	n + 5 anahtar, 1 kapasitör	Orta, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Düşük Düşük	Küçük, Orta	Çift yönlü, basit kontrol, iyi verimlilik, HEV ve EV uygulamaları için uygunluk	Karmaşık kontrol sistemi, düşük güç kaybı
Anahtarlı Kapasitör, Aktif ve Şarj/Deşarj	2n anahtar, n - 1 kapasitör	Orta, Orta	Düşük, Daha iyi	Düşük Düşük	Orta, Orta	Çift yönlü, basit kontrol, düşük akım ve gerilim stresi	Çok sayıda anahtar gereksinimi, orta seviye dengeleme hızı
Çift Katmanlı Anahtarlı Kapasitör, Aktif ve Şarj/Deşarj	2n anahtar, 2n - 3 kapasitör	Orta, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Düşük Düşük	Orta, Orta	Çift yönlü, iyi verimlilik, anahtarlı kapasitör ile karşılaştırıldığında hızlı dengeleme	Çok sayıda anahtar gereksinimi, orta seviye dengeleme hızı
Modüler Anahtarlı Kapasitör, Aktif ve Şarj/Deşarj	M(n + 2) anahtar, M(n - 1) kapasitör	Orta, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Düşük Düşük	Orta, Orta	Çift yönlü, düşük akım ve gerilim stresi, yüksek güç uygulamalarında kullanılması	Çok sayıda anahtar gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi, büyük boyut ve yüksek maliyet
Tek İndüktörlü, Aktif ve Şarj/Deşarj	2n - 2 anahtar, 1 indüktör, 2n - 2 diyot	Yüksek, Karmaşık	Düşük, Yüksek	Düşük Düşük	Orta, Orta	Çift yönlü, düşük güç kaybı, düşük akım ve gerilim zorlanması	Çok sayıda anahtar ve diyot gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi
Çoklu İndüktörlü, Aktif ve Şarj/Deşarj	n + 1 anahtar, n - 1 indüktör	Yüksek, Karmaşık	Düşük, Yüksek	Düşük Düşük	Büyük, Orta	Çift yönlü, düşük güç kaybı, düşük akım ve gerilim zorlanması, a tek indüktör ve anahtarlı kapasitör ile karşılaştırıldığında hızlı dengeleme	Çok sayıda anahtar ve akım filtre kapasitörü gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi
Tek Sarımlı Transformatör, Aktif ve Şarj/Deşarj	n + 6 anahtar, 1 diyot, 2 indüktör, 1 transformatör	Orta, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Orta Orta	Büyük, Pahalı	Çift yönlü, orta dengeleme hızı, düşük manyetik kayıp	Dengeleme için çok sayıda anahtar ve bileşen gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi
Çok Sarımlı Transformatör, Aktif ve Şarj/Deşarj	2 anahtar, n diode, 1 winding transformatör, n + 1 indüktör	Orta, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Orta Düşük	Büyük, Pahalı	Çift yönlü, orta dengeleme hızı, HEV ve EV uygulamaları için uygunluk	Dengeleme için çok sayıda anahtar ve bileşen gereksinimi, gelişmiş kontrol sistemi, yüksek manyetik kayıp ve büyük boyut
Modüler Sarımlı	M(n + 2) anahtar,	Orta, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Düşük Düşük	Büyük, Pahalı	Yüksek güçlü ES sistemlerinde	Dengeleme için çok sayıda anahtar

Transformatör, Aktif ve Şarj/Deşarj	Mn diyot, $M(n + 2)$ indüktör, $M - 1$ transformatör					uygulama için uygunluk ve HEV ile kullanılabilirlik	ve bileşen gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi, büyük boyut ve yüksek maliyet
Fly-Back Dönüştürücü, Aktif ve Şarj/Deşarj	2n anahtar, 2n indüktör, n sarmımlı transformatör	Orta, Orta	Düşük, İyi	Düşük Düşük	Büyük, Pahalı	Çift yönlü, orta dengeleme hızı, düşük güç kaybı, düşük akım ve gerilim stresi	Dengeleme için çok sayıda anahtar ve bileşen gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi, büyük boyut ve yüksek maliyet
Boost Dönüştürücü, Aktif ve Şarj/Deşarj	n + 1 anahtar, 1 diode, n + 1 indüktör 1 kapasitör	Yüksek, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Düşük Düşük	Orta, Orta	Çift yönlü, yüksek dengeleme hızı, düşük akım ve gerilim zorlaması, küçük güç kaybı	Uygun ve akıllı gerilim algılama gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi, yüksek maliyet
Buck-Boost Dönüştürücü, Aktif ve Şarj/Deşarj	2n - 2 anahtar, n - 1 indüktör	Yüksek, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Düşük Düşük	Orta, Orta	Çift yönlü, çok yüksek dengeleme hızı, düşük akım ve gerilim stresi, küçük güç kaybı	Uygun ve akıllı gerilim algılama gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi,
Rampalı Dönüştürücü, Aktif ve Şarj/Deşarj	n anahtar, n diyot, n/2 indüktör, n kapasitör	Orta, Karmaşık	Düşük, İyi	Orta Orta	Büyük, Pahalı	Çift yönlü, daha az güç kaybı, yumuşak anahtarlama, iyi verimlilik	Dengeleme için çok sayıda anahtar ve bileşen gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi, yüksek maliyet
Cuk Dönüştürücü, Aktif ve Şarj/Deşarj	2n - 2 anahtar, 2n - 2 indüktör, N - 1 kapasitör	Yüksek, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Düşük Düşük	Orta, Orta	Çift yönlü, yüksek dengeleme verimliliği, düşük akım ve gerilim stresi, HEV ve EV için uygunluk	Dengeleme için çok sayıda anahtar ve bileşen gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi, büyük boyut ve yüksek maliyet
Rezonanslı Dönüştürücü, Aktif ve Şarj/Deşarj	2n - 2 anahtar, n - 1 indüktör, n - 1 kapasitör	Yüksek, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Düşük Düşük	Orta, Pahalı	Çift yönlü, yüksek dengeleme verimliliği, daha az güç kaybı, düşük akım ve gerilim stresi, HEV ve EV için uygunluk	Uygun ve akıllı gerilim algılama gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi
Tam Köprü Dönüştürücü, Aktif ve Şarj/Deşarj	2n + 2 anahtar, 2 kapasitör	Orta, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Yüksek Yüksek	Büyük, Pahalı	Çift yönlü, yüksek dengeleme verimliliği, güç kaybı ihmal edilebilir	Karmaşık kontrol sistemi, yüksek maliyet
PWM Kontrollü, Aktif ve Şarj/Deşarj	n anahtar, 2 direnç 2 diyot, n - 1 indüktör	Orta, Karmaşık	Düşük, Daha iyi	Yüksek Yüksek	Büyük, Pahalı	Çift yönlü, orta dengeleme verimliliği	Dengeleme için çok sayıda anahtar ve bileşen gereksinimi, karmaşık kontrol sistemi, yüksek akım ve gerilim zorlanması
Tam Şönt Dengeleme, Aktif ve Şarj	2n anahtar, n diyot	Orta, Orta	Düşük, İyi	Düşük Düşük	Küçük, Ucuz	Orta dengeleme verimliliği, küçük boyut ve ucuz	Yalnızca şarj modunda çalışır

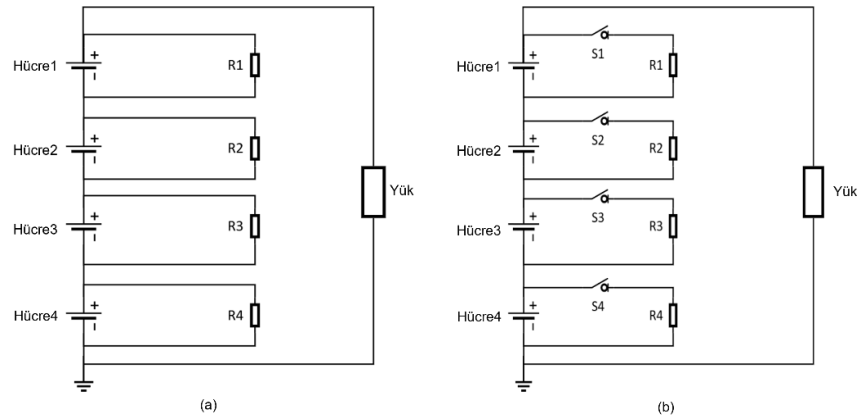
2.9.1. Pasif Dengeleme

Pasif dengeleme yönteminde, yüksek şarj durumunda bulunan hücrenin fazla enerjisi, paralel şönt direnç üzerinden ısıya dönüştürülerek düşük şarj durumundaki hücreyle eşitlenmektedir. Bu yöntem, sabit şönt direnç ve anahtarlama şönt direnç topolojileri

olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Uygulaması basit ve kolay olmakla birlikte, enerji geri kazanımı sağlanamamakta ve enerji ısı olarak kaybedilmektedir. Düşük dengeleme hızı ve termal sorunlar nedeniyle, yöntemin verimliliği sınırlı kalmaktadır [31].

Sabit direnç dengeleme yönteminde (Şekil 2.13.a), her hücreye paralel bağlı şönt direnci üzerinden hücre terminal voltajlarına orantılı olarak sürekli bir akım geçmektedir. Bu yöntem, herhangi bir kontrol mekanizması gerektirmeden dengeleme sağlamaktadır; ancak sürekli enerji kaybına neden olmakta ve dengeleme hızı düşük kalmaktadır. Aşırı şarj ve aşırı deşarj riskleri nedeniyle, bu yöntem Lityum-iyon pillerde tercih edilmemekte; ancak Kurşun-asit ve Nikel bazlı pillerde kullanılmaktadır [30].

Anahtarlamalı direnç dengeleme yönteminde (Şekil 2.13.b), her şönt direncine ek olarak bir anahtar bağlanarak sistem çalıştırılmaktadır. Şarj işlemi sırasında, tamamen dolan hücrelerin anahtarları açılmakta ve fazla enerji şönt dirençleri üzerinde dağıtılarak aşırı şarj durumu önlenmektedir. Deşarj sürecinde ise, tamamen boşalan bir hücre çıkış gücü sağlamayı durdurmakta ve diğer hücrelerden gelen enerji, şönt dirençlerine yönlendirilmektedir. Ayrıca, sistemde şarj veya deşarj işlemi gerçekleşmese bile, hücreler arasındaki SOC farkı belirli bir eşik değeri aştığında dengeleme işlemi başlatılmaktadır [30].



Şekil 2.13. a) Sabit direnç ile dengeleme b) Anahtarlamalı direnç ile dengeleme [30].

2.9.2. Aktif Dengeleme

Aktif dengeleme yöntemlerine ait birçok farklı devre modeli bulunmaktadır. Temel olarak bu yöntemler, kapasitör tabanlı, indüktör tabanlı ve dönüştürücü tabanlı olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Her bir yöntem, devre yapıları, uygulanabilirlik,

verimlilik ve maliyet gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır [33]. Bu yöntemlerin seçimi, batarya sisteminin gereksinimlerine, kullanım senaryosuna ve performans hedeflerine göre belirlenmektedir.

Tablo 2.4, farklı dengeleme yöntemlerinin hız, güvenilirlik, kontrol zorluğu, maliyet, boyut, şarj ve deşarj kabiliyeti, verimlilik ve uygulama alanları açısından karşılaştırmasını içermektedir [34].

Tablo 2.4. Aktif hücre dengeleme topolojilerinin karşılaştırılması [34].

Tür	Dengeleme Hızı	Güvenilirlik	Kontrol Stratejisi	Maliyet	Boyut	Şarj ve Deşarj	Verimlilik	Uygulama
Tek Anahtarlamalı Kapasitör	Düşük	Orta	Zor	Yüksek	Hacimli	Her İkisi	Yüksek	+++/>+
Çoklu Kapasitörler	Çok Düşük	Orta	Orta	Orta	Orta	Her İkisi	Yüksek	+++/>+
Tek/Çoklu İndüktörler	Orta	Orta	Zor	Orta	Orta	Her İkisi	Orta	+++/>+
Tek Transformatör	Düşük	Düşük	Zor	Düşük	Kompakt	Yalnızca Şarj	Düşük	++
Çoklu Transformatör	Düşük	Düşük	Orta	Orta	Kompakt	Yalnızca Şarj	Düşük	++
Forward Dönüştürücü	Orta	Orta	Zor	Orta	Orta	Her İkisi	Orta	++
Flyback Dönüştürücü	Orta	Orta	Zor	Orta	Orta	Her İkisi	Orta	++
Full Bridge Dönüştürücü	Yüksek	Orta	Zor	Düşük	Kompakt	Her İkisi	Yüksek	++
Cuk Dönüştürücü	Orta	Orta	Zor	Orta	Orta	Her İkisi	Orta/Yüksek	+++/>+
Buck veya Boost Dönüştürücü	Yüksek	Orta	Zor	Orta	Orta	Her İkisi	Yüksek	+++/>+
Yarı Rezonanslı Dönüştürücü	Düşük	Çok Düşük	Zor	Düşük	Orta	Her İkisi	Orta	+++/>+
Ramp Dönüştürücü	Düşük	Çok Düşük	Zor	Düşük	Orta	Her İkisi	Düşük	++

+: Düşük Güç, ++: Orta Güç, +++: Yüksek Güç

Aktif hücre dengeleme topolojilerinin seçiminde kontrol sistemi ve planlama perspektifleri önemli rol oynamaktadır. Kontrol stratejileri, şarj ve deşarj süreçlerinin yönetimi açısından güvenilirlik ve etkinlik ile belirlenir. Daha temel kontrol

mekanizmaları, daha yüksek güvenilirlik sağlarken, indüktör tabanlı topoloji hem şarj hem de deşarj dengelemesi için daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır [34].

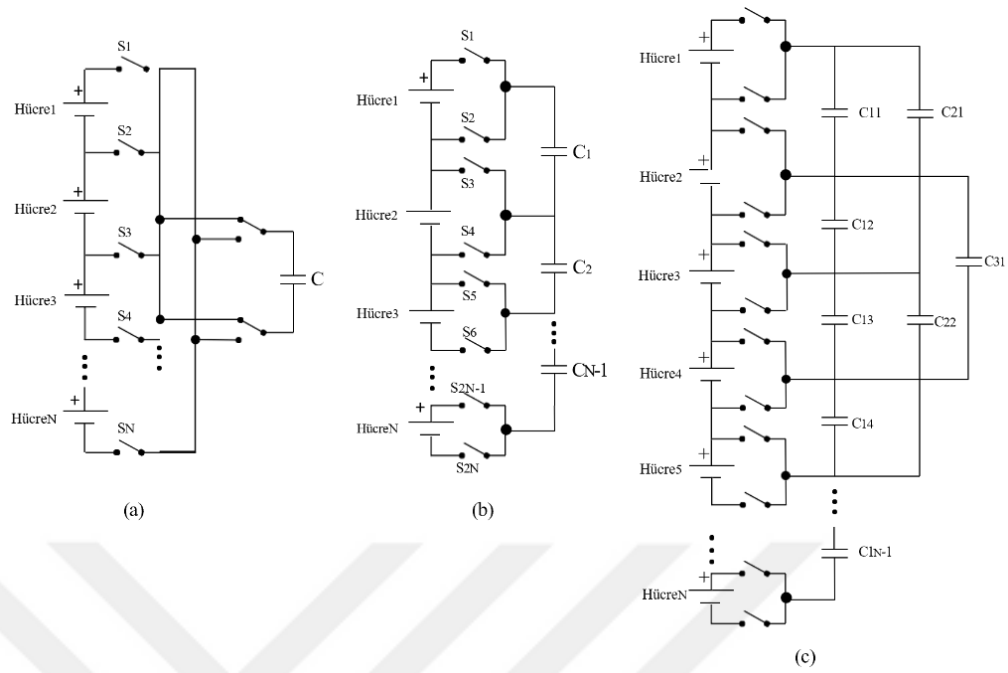
Tablo 2.3 ve 2.4’te karşılaştırmalar incelendiğinde maliyetle ilgili değerlendirmelere yer verildiği görülmektedir. Literatürde, aktif dengeleme sistemlerinin pasif yöntemlere göre verimlilik kazancı sağladığı açıkça görülmektedir. Ayrıca, verimlilik ve maliyet iyileştirmelerine yönelik araştırmaların giderek genişlediği görülmektedir. Dinh et al. [35] önerdiği CLLC rezonant yapıya dayalı sistem, anahtar ve kontrol elemanlarının sayısını geleneksel hücreden hücreye yöntemlerine göre azaltarak hem maliyeti düşürmekte hem de yaklaşık %96 dengeleme verimliliğine ulaşmaktadır. Shylla et al. [36] çalışmasında Buck-Boost ve Flyback dönüştürücü tabanlı dengeleme yöntemlerini incelemiş; batarya ve dönüştürücünün modüler yapılar halinde seri bağlanmasının ya da alt devreler biçiminde tasarlanmasının, devre yapısını geleneksel sistemlere kıyasla sadeleştirdiğini ve bu durumun devre boyutunu küçülterek maliyetleri azaltabileceğini ifade etmiştir.

Genel olarak, bir dengeleme yönteminin seçiminde verimlilik, maliyet ve sistem karmaşıklığı arasındaki dengenin dikkatle değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir.

2.9.2.1. Kapasitör Tabanlı Aktif Dengeleme

Kapasitör tabanlı aktif dengeleme yönteminde, hücrelere paralel bağlanan kapasitörler aracılığıyla enerji depolanmaktadır. Başlangıçta geliştirilen anahtarlama kapasitör dengeleme yöntemi, daha az sayıda kapasitör ve basit kontrol algoritmaları ile çalışmaktadır; ancak hücre sayısının arttığı, özellikle çok sayıda hücrenin seri bağlandığı sistemlerde dengeleme süresi uzun olmaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla, çift katmanlı, zincir yapılı, paralel bağlantılı gibi çeşitli topolojiler ve modüler tasarımlar geliştirilmektedir.

Modüler tasarımlar, ek kapasitörler kullanılarak bitişik hücre gruplarını dengelemeye yönelik olarak uygulanmaktadır. Tek kapasitörle gerçekleştirilen dengeleme ise, doğrudan en yüksek ve en düşük SOC seviyesine sahip hücreler arasında dengeleme yapabilmekte; ancak bu yöntem, daha karmaşık kontrol algoritmaları gerektirmektedir [30]. Şekil 2.14 farklı Kondansatör tabanlı aktif dengeleme topolojisi devre yapılarına yer verilmiştir.



Şekil 2.14. Kondansatör tabanlı aktif dengeleme topolojisi (a) tekli anahtarlmalı kondansatör (b) çoklu anahtarlmalı kondansatör (c) çift katmanlı anahtarlmalı kondansatör [31].

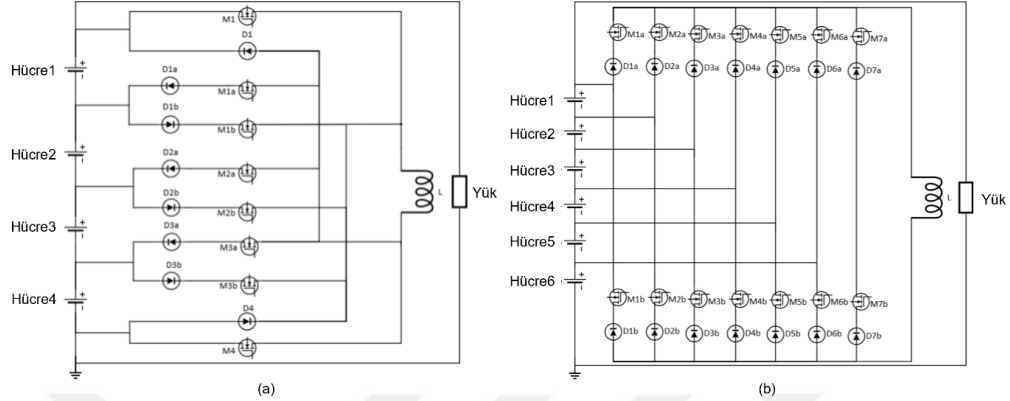
2.9.2.2. İndüktör Tabanlı Aktif Dengeleme

İndüktörler, akım taşıdığı sürece manyetik alanlar şeklinde enerji depolayarak batarya hücreleri arasındaki enerji transferini gerçekleştirmektedir. Hücre dengeleme devrelerinde kullanılan indüktör ve anahtarların sayısına bağlı olarak çoklu indüktör dengeleme, zincir yapılı çoklu indüktör dengeleme, çok katmanlı indüktör dengeleme ve tek indüktör dengeleme yöntemleri uygulanmaktadır [30].

2.9.2.1.1. Tek İndüktör Dengeleme

Tek indüktörlü dengeleme yöntemi, enerji transferini yönetmek amacıyla MOSFET'lerden yararlanmaktadır. Bu yöntemde Şekil 2.15'te yer alan iki temel uygulama bulunmaktadır: Bunlardan ilki, enerjinin en yüksek SOC sahip hücreden en düşük SOC'a sahip hücreye doğrudan aktarılmasıdır. İkincisi ise, en düşük SOC'a sahip hücreyi şarj edebilmek için tüm bataryadan enerji çekilmesi esasına dayanmaktadır [30]. Her iki uygulamada da belirli MOSFET'lerin açılmasıyla indüktörde enerji depolanmakta, ardından bu enerji hedef hücreye yönlendirilmektedir. Her iki yöntemde de MOSFET'lere seri bağlı diyotlar, kısa devreleri önlemek amacıyla devreye

eklenmektedir. Tek indüktörlü sistemler, esnek bir yapı sunmasına rağmen kontrol algoritmaları karmaşık olmakta ve dengeleme süresi orta seviyede kalmaktadır [30].

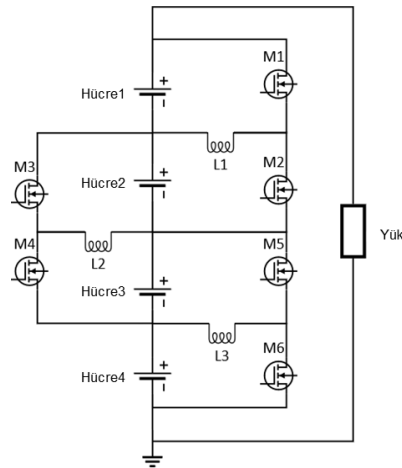


Şekil 2.15. Tek indüktörlü dengeleme (a) hücreden hücreye (b) bataryadan hücreye [30].

2.9.2.1.2. Çoklu İndüktör Dengeleme

Birden fazla indüktör kullanılan sistemlerde hücreler arası enerji transferi daha hızlı gerçekleşmektedir. n hücreyi dengelemek için $n-1$ indüktör kullanılmaktadır. Bu yöntemde, komşu iki hücrenin voltaj farkı ölçülerek, öncelikle yüksek voltajlı hücre anahtarlanmaktadır ve PWM kontrolü uygulanmaktadır [37].

Tek indüktörlü sistemler, daha kısa dengeleme süresi sunarken, Şekil 2.16’da yer alan çoklu indüktörlü sistemlerde enerjinin batarya paketi boyunca aktarımı daha uzun sürebilmektedir. Bu nedenle yöntem seçimi, batarya paketinin büyüklüğüne ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir [37].



Şekil 2.16. Çoklu indüktörlü dengeleme [30].

2.9.2.3. Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme

Hücre dengeleme sürecinde kullanılan enerji dönüştürücüler, Cûk, Buck-Boost, Flyback, Ramp, Full-Bridge ve Yarı rezonans (Quasi-Resonant) gibi çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Bu dönüştürücüler, dengeleme sürecinin tam kontrolünü sağlamakla birlikte, nispeten yüksek maliyet ve karmaşıklık gibi dezavantajlarla karşı karşıya kalmaktadır [37]. Literatür ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde, çok sayıda dengeleme devresinin ve çeşitli kontrol stratejilerinin mevcut olduğu görülmektedir. Bu kontrol stratejilerinin büyük çoğunluğu sezgisel niteliktedir. Bu nedenle, söz konusu stratejilerin sınıflandırılması ve performans değerlendirmelerinin yapılması karmaşık hale gelmektedir. SOC tabanlı bir hücre dengeleme yöntemi ile kontrol edilen DC-DC dönüştürücü kullanan dengeleme yöntemlerine yönelik güncel yayınlara detaylı şekilde yer verilmiş; incelenen çalışmaların performansları ise Tablo 2.5'te özetlenmiştir.

Tablo 2.5. SOC tabanlı BMS'lerin DC-DC dönüştürücü tabanlı aktif hücre dengeleme sistemleri için yürütülen çalışmalar [31].

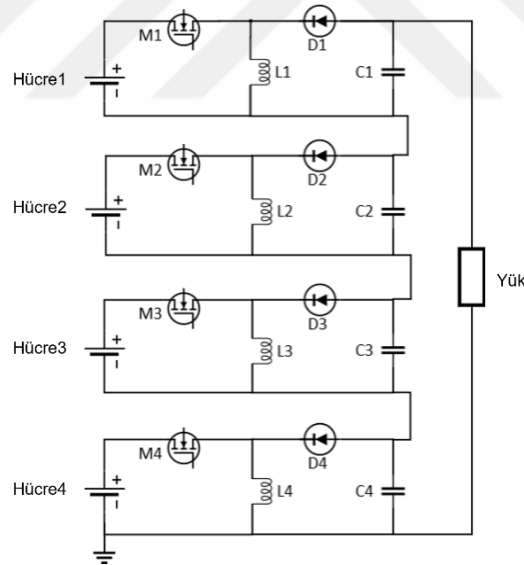
Kaynak	Dengeleme Topolojisi / Devresi	Dengeleme Algoritması	Hücre Sayısı	Başlangıç SOC Farkı	Dengeleme Sonu SOC Farkı	Dengeleme Süresi	Başlangıç Ortalama SOC	Bitiş Ortalama SOC
Wu et al., 2021	Doğrudan CTC-Cuk dönüştürücü	FLC	6	%18	%1.02	429 sn	%67.16	%66.98
Ouyang et al., 2017	Komşu CTC-Cuk dönüştürücü	SMC	4	%11	%2	2286 sn	%76.75	~%75
Liao ve Chen, 2022	Doğrudan CTC-Buck-Boost dönüştürücü	FLC	9	%19	%2.16	2974 sn	%65.44	%64.36
Ma et al., 2018	CTC-Buck-Boost dönüştürücü	FLC	32	%20	%<0.5	1150 sn	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş
Wang et al., 2015	PTC-Tekli Flyback	Ortalama fark algoritması	12	%5.2	%1.5	4640 sn	~%28	~%23
Wang et al., 2015	CTP-Tekli Flyback	Ortalama fark algoritması	12	%5.2	%1.5	3260 sn	~%28	~%26
Imtiaz et al., 2013	CTP-Tekli Flyback	Sabit duty cycle ile sezgisel yapı	4	%37	%4	~5500 sn	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş
Zhang et al., 2015	PTC-Çoklu Flyback	GA (Genetik Algoritma)	12	%30	%0.1	799 sn	Belirtilmemiş	~%60
Wang et al., 2022	CTPTC -Çoklu Flyback	MPC	5	%13	<%1	292 sn	%74	%73.3
Wang et al., 2018	CTPTC -Çoklu Flyback	FLC	4	%80	%0.1	3480 sn	%62.25	%66
McCuirie et al., 2016	CTPTC -Çoklu Flyback	MPC	6	%27	%2	1260 sn	%68.35	%69

FLC : Fuzzy Logic Control, SMC : Sliding Mode Controller, MPC : Model Predictive Control, CTC : Cell to Cell, CTPTC : Cell to Pack to Cell, PTC : Pack to Cell

Dengeleme hızı, dengeleme akımına, maksimum ve minimum SOC'ye sahip hücreler arasındaki başlangıç SOC farkına, hücre sayısına, hücrenin nominal kapasitesine ve dengeleme sonunda ulaşılmak istenen SOC hedef aralığına bağlıdır. Bu bağlamda, aynı SOC farkı ile başlayan ve çok daha kısa sürede tamamlanan bir dengeleme süreci ya yüksek bir dengeleme akımı ya daha az sayıda hücre ya da düşük kapasiteli hücreler ile gerçekleştirilebilmektedir. [31]

2.9.2.3.1. Buck-Boost Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme

Şekil 2.17'de gösterilen Buck-Boost Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme yönteminde, her hücreye bağımsız bir Buck-Boost dönüştürücü bağlanarak dengeleme sağlanmaktadır. MOSFET PWM sinyallerinin görev oranları, voltaj dönüşüm oranlarını ve hücre çıkış gücünü kontrol etmektedir. Boost dönüştürücüden farklı olarak, Buck-Boost dönüştürücülerde voltaj dönüşüm oranları hem 1'den büyük hem de 1'den küçük olabilir, bu da kontrol algoritmalarına daha fazla esneklik sağlamaktadır.



Şekil 2.17. Buck-boost dönüştürücü ile dengeleme [30].

Step-down (Buck), step-up (Boost) ve Buck-Boost enerji dönüştürücüleri, hücre dengeleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, farklı dengeleme topolojilerine sahiptir. Örneğin, Boost dönüştürücü tek bir hücredeki fazla enerjiyi batarya paketine aktarmak için kullanılırken, Buck-Boost dönüştürücü yüksek SOC'li hücrelerden enerjiyi alıp DC bara veya bir depolama elemanına ileterek daha zayıf hücrelere geri aktarmaktadır. Bu sistemlerin çalışması için hücre voltajlarının algılanması

ve akıllı bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Dönüştürücü tabanlı dengeleme yöntemleri nispeten pahalı ve karmaşık olsa da modüler tasarıma uygunluk sağlamaktadır [37]. Buck-Boost dönüştürücü tabanlı devreler, içerdiği indüktör ve anahtarlama elemanı sayısına bağlı olarak farklı devre yapılarıyla tasarlanabilmektedir. Bu makalede, Buck-Boost tabanlı dengeleme yöntemi ele alındığından, devre yapılarına ve anahtarlama davranışlarına ilişkin detaylı incelemeler yapılmıştır. Tablo 2.6'da farklı yapıya sahip Buck-Boost dönüştürücü tabanlı devreler yer almaktadır.

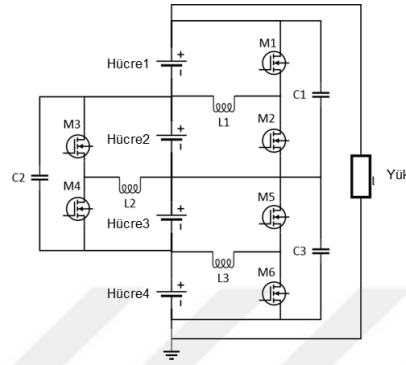
Tablo 2.6. Buck Boost dönüştürücü tabanlı devreler

<p>Şekil 2.18. Geleneksel Buck-Boost dönüştürücü tabanlı dengeleme devresi [38].</p>	<p>Şekil 2.19. İndüktör tabanlı katmanlı çift yönlü ekolayzır (IBLBE) [33].</p>
<p>Aktif hücre dengelemesi için geleneksel Buck-Boost dönüştürücü Şekil 2.18'te gösterilmiştir. Seri olarak bağlanmış N adet hücreyi dengelemek için N-1 dengeleyici devreden oluşur. Her dengeleyici devresi bir indüktör ve iki anahtardan oluşur.</p>	<p>Aktif hücre dengelemesi için indüktör tabanlı katmanlı çift yönlü ekolayzır (IBLBE) Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Seri olarak bağlanmış N adet hücreyi dengelemek için N dengeleyici devreden oluşur. Her dengeleyici devresi bir indüktör ve iki anahtardan oluşur.</p>

2.9.2.3.2. Cuk Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme

Cuk Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme, çoklu indüktör dengelemesi ile benzerlik göstermektedir. Şekil 2.20'de görülen bu yöntemde, her iki bitişik hücre arasına bir Cuk dönüştürücü bağlanarak enerji transferi sağlanmaktadır.

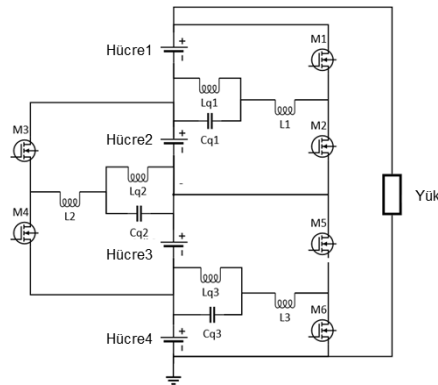
Kesintili kapasitör voltaj modu (DCVM) kullanıldığında, MOSFET'lerin sıfır voltajda anahtarlanması, anahtarlama kayıplarını azaltarak dengeleme verimliliğini artırmaktadır. Ancak, N hücre için (N-1) Cuk dönüştürücü gereksinimi, yüksek maliyet oluşturmakta ve bitişik olmayan hücreler arasındaki dengeleme sürecini yavaşlatmaktadır.



Şekil 2.20. Cuk dönüştürücü ile dengeleme [30].

2.9.2.3.3. Yarı rezonans dönüştürücü dengelemesi

Şekil 2.21'de gösterilen Yarı rezonans dönüştürücü dengelemesi, her iki bitişik hücre arasına bir Yarı rezonans dönüştürücü bağlanarak gerçekleştirilmektedir. MOSFET'ler, PWM sinyalleriyle kontrol edilerek bitişik hücreler arasında enerji transferini sağlamaktadır. Her Yarı rezonans dönüştürücüde, L_{qi} ve C_{qi} bileşenleri bir rezonans tankı gibi çalışarak MOSFET anahtarlama akımını sıfıra düşürmekte, böylece anahtarlama kayıpları ve EMI emisyonları azaltılarak dengeleme verimliliği artırılmaktadır. Ancak, bitişik olmayan hücreler arasındaki enerji transferi yavaş ve verimsizdir. Ayrıca, her iki hücre arasında bir quasi-rezonant dönüştürücü gereksinimi, maliyet ve paketleme açısından ek zorluklar oluşturmaktadır.

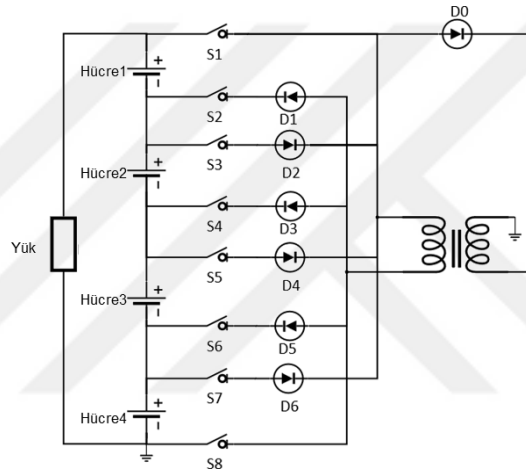


Şekil 2.21. Yarı rezonanslı dönüştürücü ile dengeleme [30].

2.9.2.3.4. Tek Flyback Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme

Tek Flyback Dönüştürücü Tabanlı Dengeleme yöntemi, hücreler arasındaki enerji transferini sağlamak için tek bir transformatör kullanmaktadır. Yüksek SOC'ye sahip hücreler, transformatör aracılığıyla tüm bataryayı şarj etmek için seçilmektedir.

Dengeleme sürecinde, MOSFET'ler açıldığında enerji hücreden transformatöre aktarılmakta, kapandığında ise transformatörde depolanan enerji tüm bataryaya geri beslenerek hücrelerin SOC değerleri dengelenmektedir. Tek bir flyback dönüştürücü kullanılması maliyeti düşürmekte ve dengeleme hızını artırmaktadır.



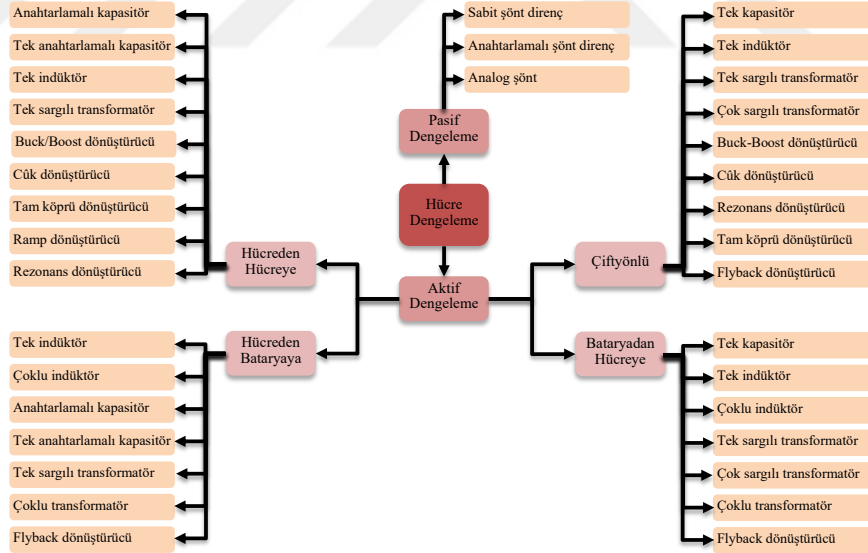
Şekil 2.22. Tekli flyback dönüştürücü ile dengeleme [30].

2.9.3. Enerji Taşıma/Aktarım Yolları/Yönleri

Bu bölümde, enerji taşınma yollarını temsil eden farklı dengeleme yöntemleri ele alınmıştır. Dengeleme yöntemleri, enerji taşınma yollarına göre Dissipatif (Enerji Harcayan) ve Non-Dissipatif (Enerji Korunmalı) dengeleme olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. [12] Dissipatif yöntemler pasif dengeleme tekniği, Non-Dissipative yöntemler ise aktif dengeleme teknikleridir.

Aktif dengeleme yöntemleri, enerjii doğrudan bir hücreden diğerine, batarya paketine veya batarya paketinden bir hücreye aktarmak için şarj taşıma elemanları veya voltaj/akım transformatörleri kullanmaktadır. Bu yöntem, daha yüksek verimlilik sağlamakla birlikte daha karmaşık kontrol sistemleri gerektirmektedir [12]. Aktif Dengeleme Teknikleri dört gruba ayrılmaktadır [39] ve Şekil 2.23'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

1. Hücreden Hücreye: Bitişik Hücreler Arası dengelemede enerji yalnızca komşu hücreler arasında aktarılır, ancak uzun mesafeli aktarım için yavaştır. (Örnek: Anahtarlama kapasitör ve rezonans dönüştürücüler). Doğrudan Hücreden Hücreye dengelemede örneğin kapasitör gibi ortak bir enerji depolama elemanı kullanarak doğrudan hücreler arası enerji transferi sağlar.
(Örnek: Tek kapasitör veya tek indüktör topolojileri).
2. Hücreden Pakete: En yüksek şarj durumuna (SOC) sahip hücreden enerji pakete aktarılır. Hücreden bataryaya dengeleme, en yüksek verimliliğe sahiptir. [39]
3. Paketten Hücreye: En düşük SOC seviyesine sahip hücreye enerji paket seviyesinden aktarılır.
4. Hücreden Pakete ve Hücreye (Çift yönlü): İhtiyaca bağlı olarak, enerji hücreden bataryaya veya bataryadan hücreye transfer edilmektedir [39]. Hız ve verimlilik yüksektir ancak kontrol karmaşıktır. (Örnek: Çift yönlü transformatörler) [12].



Şekil 2.23. Hücre dengeleme topolojisi [8].

2.9.4. Kontrol Yöntemleri

Kontrol değişkenleri, kontrol stratejisinin girdisini oluşturarak batarya paketleri ve hücreler hakkında bilgi sağlamaktadır. Terminal gerilimi, açık devre gerilimi (OCV), şarj durumu (SOC) ve kapasite, bu değişkenlere örnek olarak verilebilir. Girdi değişkenlerinin

doğru şekilde analiz edilmesi, dengeleme yöntemlerinin doğruluğunu doğrudan etkileyen temel unsurlardır. Kontrol değişkenlerine göre kontrol stratejileri hücre gerilimine dayalı, SOC'ye dayalı ve kapasiteye dayalı olmak üzere sınıflandırılmaktadır. [40] Tablo 2.7'de kontrol yöntemlerinin literatürde kullanımına yer verilmiştir.

Tablo 2.7. Hücre dengeleme topolojilerinin dengeleme süreleri üzerine çalışmaların karşılaştırması [41].

Yıl	Topoloji	Kontrol Değişkeni	Hücre Sayısı	Dengeleme Süresi
2011	Çok anahtarlama indüktör	SOC	4	40 dakika
2011	Buck-Boost dönüştürücü	SOC	4	1.7 dakika
2011	Tek anahtarlama indüktör	SOC	4	24 dakika
2011	Anahtarlama şönt direnç	SOC	4	36 dakika
2011	Tek anahtarlama kapasitör	SOC	4	195 dakika
2011	Çift katmanlı tek anahtarlama kapasitör	SOC	4	168 dakika
2011	Anahtarlama kapasitör	SOC	4	315 dakika
2013	Çift yönlü flyback dönüştürücü	SOC	8	30 dakika
2013	Tek yönlü flyback dönüştürücü	SOC	4	91 dakika
2014	Boost dönüştürücü ve yarı-rezonanslı LC dönüştürücü	Hücre gerilimi	8	53 dakika
2015	Çift yönlü flyback dönüştürücü	SOC	48	16 dakika
2016	Çift yönlü çoklu flyback dönüştürücü	SOC	6	25 dakika
2017	IBLBE	Hücre gerilimi	16	37 dakika
2017	Rezonans-LC ve Buck dönüştürücü	Hücre gerilimi	8	63 dakika
2017	Cuk dönüştürücü	SOC	4	38 dakika
2018	İki yönlü flyback dönüştürücü	SOC	90	84 dakika
2018	Buck-Boost dönüştürücü	SOC	8	19 dakika
2019	Çift aktif köprü dönüştürücü	SOC	12	25 dakika
2020	CBB-PCSC*	Hücre gerilimi	6	33 dakika
2020	CBB-PCSC*	Hücre gerilimi	4	26 dakika
2020	Tek yönlü Buck-Boost dönüştürücü	SOC	4	27 saniye

*CBB-PCSC: Coupled Buck-Boost – Parallel Connected Switching Capacitor

2.9.4.1. Hücre Voltajına Dayalı Kontrol Yöntemi

Hücre gerilimine dayalı dengeleme, hücreler arasındaki gerilim farkına göre enerji transferi yaparak dengeleme sağlayan bir yöntemdir. Dengeleme sistemi hücre gerilimlerini eşik değer ile karşılaştırarak fark belirli bir sınırı aştığında, yüksek gerilimli hücrelerden düşük gerilimli hücelere enerji aktarımı gerçekleştirilmektedir.

Terminal gerilimine dayalı dengeleme yöntemleri, doğrudan ölçüm yapılabildiği için kolay uygulanabilmektedir. Ancak, iç direnç farklılıkları nedeniyle bazı hatalar oluşabilmekte ve batarya yaşlanması nedeniyle kapasite kaybı yaşanabilmektedir. Thevenin eşdeğer devre modeli, terminal gerilimini açık devre gerilimi (OCV), iç direnç kayıpları ve polarizasyon gerilimi üzerinden açıklamaktadır.

OCV ile SOC arasında doğrudan bir bağlantı bulunmakta olup benzer SOC değerlerine sahip hücrelerin OCV'leri de benzerdir. Ancak, iç direnç farklılıkları nedeniyle terminal gerilimlerinde değişimler gözlemlenebilir. Bu yöntemin sınırlamalarını aşmak ve batarya paketinin kapasitesini artırmak amacıyla, şarj gerilim hücre eğrisi teorisi geliştirilmiştir [40].

2.9.4.2. Kapasiteye Dayalı Kontrol Yöntemi

Bataryanın şarj, deşarj ve toplam kapasitesi, kapasite tabanlı dengeleme yöntemlerinde giriş değişkenleri olarak kullanılmaktadır. Hücrelerin SOC ve voltajları eşit olsa bile, iç direnç ve kapasite farklılıkları nedeniyle deşarj edilebilir kapasiteleri değişiklik gösterebilmektedir.

Batarya maksimum voltaja ulaştığında, en yüksek kapasiteye sahip hücre en fazla artık kapasiteye sahip olacaktır. Bu durum, bataryanın enerji kullanım verimliliğini azaltarak ömrünü kısaltmaktadır.

Kapasite tabanlı kontrol stratejileri çeşitli avantajlar sunmaktadır. Öncelikle, enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmakta ve bataryanın toplam ömrünü uzatarak elektrikli araçlar (EV'ler) için daha ekonomik bir çözüm sağlamaktadır. Ancak, her hücrenin kapasitesinin gerçek zamanlı belirlenmesi, BMS donanımı üzerinde hesaplama yükü oluşturabilmektedir. Ayrıca, kapasitenin tahmin edilmesi için SOC verisinin gerekliliği, hesaplama karmaşıklığını artırmaktadır [40].

2.9.4.3. SOC'ye Dayalı Kontrol Yöntemi

SOC tabanlı dengeleme tekniklerinde, batarya hücresinin SOC durumu giriş değişkeni olarak kullanılmaktadır. Şarj ve deşarj sürecinde, en yüksek SOC'ye sahip hücreden en düşük SOC'ye sahip hücreye enerji transferi gerçekleştirilmektedir.

Bu yöntem, terminal gerilimine dayalı tekniklere kıyasla daha hassas bir dengeleme sağlamaktadır, çünkü bataryanın iç durumunu yansıtan OCV ile SOC arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Ayrıca, hücreler arasında kapasite farkı bulunsa bile SOC tabanlı dengeleme kontrol algoritmaları, neredeyse hücrelerin tamamen şarj olmasını veya tamamen deşarj edilmesini sağlayarak batarya paketinin tüm enerjisinin kullanılmasına olanak tanımaktadır.

SOC, bataryanın deşarj edilebilir kapasitesinin nominal kapasitesine oranı olarak tanımlanmaktadır ve doğrudan bir sensörle ölçülemez. Bu nedenle, farklı SOC tahmin yöntemleri geliştirilmiştir [40]. Bataryanın durumunu tahmin etmek için doğrudan yöntem, model tabanlı yöntemler ve veriye dayalı yöntemler olmak üzere üç ana yöntem uygulanmaktadır [42].

Doğrudan tahmin yöntemleri batarya gerilimi ve akımı kullanılarak iç direnç hesaplaması yapılmakta ve bu yöntemle SOC ile SOH belirlenmektedir. Termokupl, direnç termometresi ve fiber Bragg-ızgara sensörü gibi sensörler batarya hücresine doğrudan entegre edilerek SOT ölçümleri yapılmaktadır [42].

OCV tahmin yönteminde OCV ölçülerek çevrimdışı bir tablo oluşturulmakta ve SOC değeri basit ancak doğru bir şekilde belirlenmektedir. Ancak bataryaların histerezis özelliği, ölçülen parametrelerde farklılıklara yol açmakta ve bu durum tahmin hatalarının oluşmasına neden olmaktadır [19]. Bununla birlikte, OCV yönteminin temel dezavantajı, denge durumuna ulaşmak için uzun süreli bir dinlenme süresine ihtiyaç duymasındır [42].

İç Direnç Tahmin Yönteminde, batarya akımı ve gerilim verileri kullanılarak bataryanın iç direnci hesaplanmakta; elde edilen bu veriler aracılığıyla şarj durumu, sağlık durumu ve kapasite gibi batarya durumları tahmin edilmektedir. Ancak, iç direncin genellikle çok düşük seviyelerde bulunması ölçüm hassasiyetini olumsuz yönde etkilemekte ve güvenilir tahminler yapılmasını zorlaştırabilmektedir [19].

Coulomb sayımı (CC), bataryanın SOC değerinin minimum enerji tüketimiyle tahmin edilmesine yardımcı olan basit bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, belirli bir zaman aralığında şarj ve deşarj sırasında geçen toplam akım esas alınarak SOC hesaplanmaktadır. Ancak, sensör hataları ve SOC'nin başlangıç değerinin bilinmemesi nedeniyle bu yöntemin doğruluğu olumsuz etkilenmektedir.

SOH, SOT, SOC ve RUL gibi batarya parametreleri, model tabanlı Kalman Filtresi (KF) teknikleri aracılığıyla tahmin edilmektedir. Ek bir termal sensöre ihtiyaç duyulmadan, yüzey sıcaklığı ve iç sıcaklığın belirlenmesi amacıyla, termal ve elektro-termal simülasyona dayalı yenilikçi ve uzun süreli Kalman Filtresi tekniği uygulanmaktadır.

PF (Parçacık Filtresi), kesirli dereceli kestirici ve oransal-integral gözleyici gibi diğer model tabanlı yöntemlerle de batarya durum parametreleri tahmin edilmektedir [42].

Veri tabanlı yöntemler, batarya sistemlerini kara kutu (black-box) yaklaşımıyla ele almakta ve model kurmak yerine büyük veri kümelerinden gizli ilişkiler çıkarılarak doğrudan tahmin modelleri oluşturulmaktadır.

Bu doğrultuda, makine öğrenmesi (ML), yapay sinir ağı (NN), destek vektör makineleri (SVM), genetik algoritmalar gibi çeşitli veri tabanlı yöntemler batarya durum tahminlerinde kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle özellikle SOH, RUL ve kapasite bozulması gibi performans göstergeleri tahmin edilmektedir.

Veri tabanlı elektrotermal batarya modelleri, kapasite, RUL ve iç sıcaklık gibi değerlerin hassas şekilde tahmin edilmesini sağlamakta ve araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller aynı zamanda şarj kontrol algoritmalarına entegre edilmekte ve sabit akım/sabit gerilim yerine; maksimum akım, en sağlıklı veya en kısa sürede şarj gibi yeni stratejiler uygulanmaktadır [19].

Bu çalışmadaki SOC tabanlı kontrol yöntemleri kullanıldığından SOC yöntemi detaylı olarak incelenmiştir. Tablo 2.8'de SOC tahmin yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarına özet olarak yer verilmiştir. SOC tahmin yönteminde doğrudan yöntem kullanılarak hem kolay uygulanabilirlik diğer kontrol yöntemlerine göre hassasiyetlik unsurları dikkate alınmıştır.

Tablo 2.8. SOC tahmin yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları [31].

Kategori	Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar / Sınırlılıklar
Doğrudan Tahmin	OCV (Açık Devre Gerilimi)	Yüksek tahmin doğruluğu Kolay uygulanabilir	Çok uzun dengeleme süresi gerektirdiğinden çevrim içi uygulamaya uygun değildir. Deşarj koşullarında kullanılamaz
	CC (Coulomb Sayımı)	Basit yöntem Kolay uygulanabilir	Ölçüm hataları ve bozucular birikmektedir. Başlangıç SOC değerinin belirlenmesi zor olmaktadır ve bu durum kümülatif hatalara yol açmaktadır. Yöntem, akım sensörünün doğruluğuna bağlı olmaktadır.
	EIS	Düşük maliyet SOC değişimlerine duyarlılık	Çevrim içi uygulamalarda kullanıma uygun olmamaktadır. Uygun bir elektrokimyasal model gerekli olmaktadır. Batarya empedansı, yaşlanma ve sıcaklık değişimlerine bağlı olmaktadır.
Yapay Zekâ Tabanlı	NN	Batarya modelinin doğrusal olmayan yapısına, herhangi bir fiziksel bilgi gerektirmeksizin iyi uyum sağlamaktadır. Yüksek tahmin doğruluğu sağlamaktadır. Çevrim dışı eğitim sürecinin ardından çevrim içi olarak uygulanabilmektedir.	SOC'yi etkileyen tüm çalışma koşullarını kapsayacak giriş parametrelerinin toplanması mümkün olmamaktadır. Büyük boyutlu bir bellek birimine ihtiyaç duyulmaktadır. Hesaplamalar karmaşık olmakta ve zaman alıcı olmaktadır.
	FL		
	SVM		
	ANFIS		
Model Tabanlı	KF Tabanlı Yöntemler	Yüksek tahmin doğruluğu sağlamaktadır.	Batarya modelinin yüksek doğrulukta olması gerekmektedir. Yaşlanma ve sıcaklık gibi belirsiz faktörler nedeniyle doğru bir batarya modeli elde edilmesi zor olmaktadır. Karmaşık matematiksel hesaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır.
	H-∞	Yanlış başlangıç SOC değerinde bile hızlı yakınsama göstermektedir.	
	PF	Çevrim içi uygulamalarda kullanılabilir.	

3. BÖLÜM

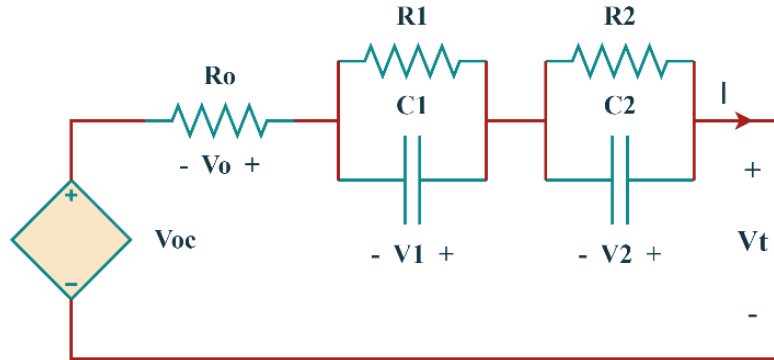
BULGULAR

3.1. Pil Tasarımı

Lityum-iyon pillerin temel parametreleri, uygun modelleme teknikleri kullanılarak belirlenebilir. Bu piller, farklı analiz seviyeleri ve amaçlara göre çeşitli yöntemlerle modellenebilir. Yaygın modelleme yaklaşımları arasında elektrokimyasal model, termal-elektrokimyasal model, eşdeğer devre modeli ve veri odaklı model yer almaktadır. [43]

Bu tez çalışmasında, pil modellemesi için eşdeğer devre modeli yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin temel avantajı, pilin iç kimyasal reaksiyonlarını derinlemesine incelemeye gerek kalmadan güvenilir sonuçlar sunabilmesidir. Ayrıca, eşdeğer devre modeli hem dinamik hem de statik pil davranışlarını anlamak ve simüle etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Lityum-iyon pilin Thevenin eşdeğer devresi, temel elektriksel karakteristikleri temsil edecek şekilde tasarlanmış olup, Şekil 3.1.'de gösterilmektedir. Bu model, pilin iç direnci, açık devre gerilimi ve dinamik tepkilerini göz önünde bulundurarak sistemin analizini kolaylaştırmaktadır.



Şekil 3.1. Lityum -iyon pilin Thevenin eşdeğer devre modeli.

Thevenin eşdeğer devresi, pil parametresi tahmininin doğruluğunu artırmak için bir 2RC ağından oluşur. R_0 bir ohmik dirençtir, R_1 ve C_1 elektrokimyasal polarizasyon direnci ve kapasitansdır, R_2 ve C_2 konsantrasyon polarizasyon direnci ve kapasitansdır. Pilin durum denklemi şu şekilde ifade edilebilir.

Thevenin eşdeğer devresi, pil parametrelerinin tahmin doğruluğunu artırmak amacıyla 2RC ağı kullanılarak modellenir. Modelde R_0 pilin içindeki ohmik dirençtir, R_1 ve C_1 Elektrokimyasal polarizasyonu temsil eden direnç ve kapasitans elemanlarıdır, R_2 ve C_2 konsantrasyon polarizasyonunu temsil eden direnç ve kapasitans elemanlarıdır.

V_1 , V_2 polarizasyon voltajı, I pil akımı, V_t pil terminal voltajı ve V_{OC} yük koşulu altında pil potansiyelini temsil eden açık devre voltajıdır [38].

Terminal voltajı V_t aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$V_t = V_1 - V_2 - IR_0 \quad (3.1)$$

Bu tezde gerçekleştirilen Simülasyon çalışmalarında pil modeli olarak Tablo 3.1'de parameterleri verilen MATLAB/Simulink kütüphanesindeki batarya modelinden faydalanılmıştır. Kütüphane daha da genişletilebilir şekilde yapılandırılabilir durumdadır.

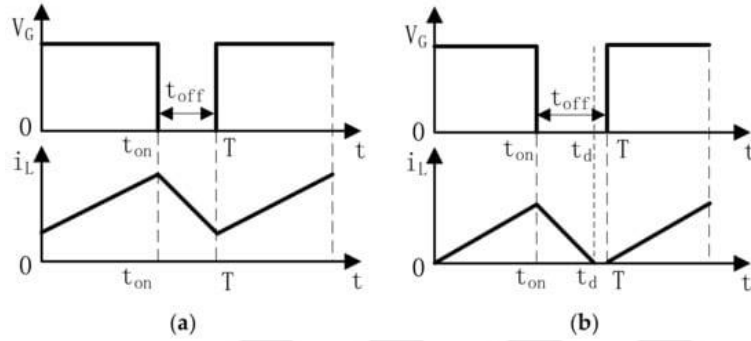
Tablo 3.1. MATLAB Pil hücrelerine ait parametreler.

Nominal Gerilim	Maksimum Gerilim	Kesme Gerilimi	Nominal Kapasite	Maksimum Kapasite	Nominal Deşarj Akımı	Pil İç Direnci
3.7 V	4.3068 V	2.775 V	2.3513 Ah	2.6 Ah	1.1304 A	0.014231 Ω

3.2. Enerji Transfer Modu

Akımı dengelemek amacıyla Sürekli Akım Modu (CCM) ve Kesikli Akım Modu (DCM) olmak üzere iki farklı kontrol modu bulunmaktadır [44]. Her iki modun çalışma dalga formları Şekil 3.2'de gösterilmektedir. CCM'de sistem geri besleme kontrolüne sahip büyük bir indüktör akımına sahiptir. Bu modda, indüktör akımı anahtarın kapalı olduğu süre boyunca sıfıra düşmez. DCM'de indüktör, anahtarın kapalı olduğu sürede depoladığı tüm enerjiyi serbest bırakır ve bu nedenle indüktör akımı belirli bir noktada sıfıra iner. DCM modda sistem akım sensörleri ve geri besleme kontrolü olmadan çalışabilir.

Önerilen dengeleyiciler hem CCM hem de DCM modlarında çalışabilmektedir. CCM'de çalışırken, diyot akımı kapalı periyot sırasında sıfırın üzerinde kalır. Buna karşılık, DCM'de diyot akımı kapalı periyot sırasında sıfıra düşmelidir.



Şekil 3.2. Enerji transfer modu (a) CCM (b) DCM [33].

Dengeleyici her iki modda da şarj ve deşarj işlemlerini gerçekleştirebilir. Bu süreçlerin doğru bir şekilde yönetilebilmesi için anahtarlama periyodu ve anahtarlama elemanlarının açma-kapama süreleri kritik öneme sahiptir. Anahtarlama periyodu T ile ifade edilirken, Görev Döngüsü (Duty Cycle), periyodik bir sinyalin aktif (yüksek) olduğu sürenin toplam periyoda oranı olarak tanımlanır ve genellikle yüzde (%) cinsinden ifade edilir. Bu bağlamda t_{on} anahtarın kapalı kalma süresi, t_{off} anahtarın açık kalma süresidir.

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (3.2)$$

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.3)$$

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları kapsamında, tek indüktör tabanlı ve Buck-Boost tabanlı devre modelleri tercih edilmiştir. Dengeleme işlemi sırasında indüktörün manyetik doygunluğu ve kontrol karmaşıklığı [45] göz önünde bulundurulduğunda indüktörün kesikli akım modunda (DCM) çalışması tercih edilmiştir.

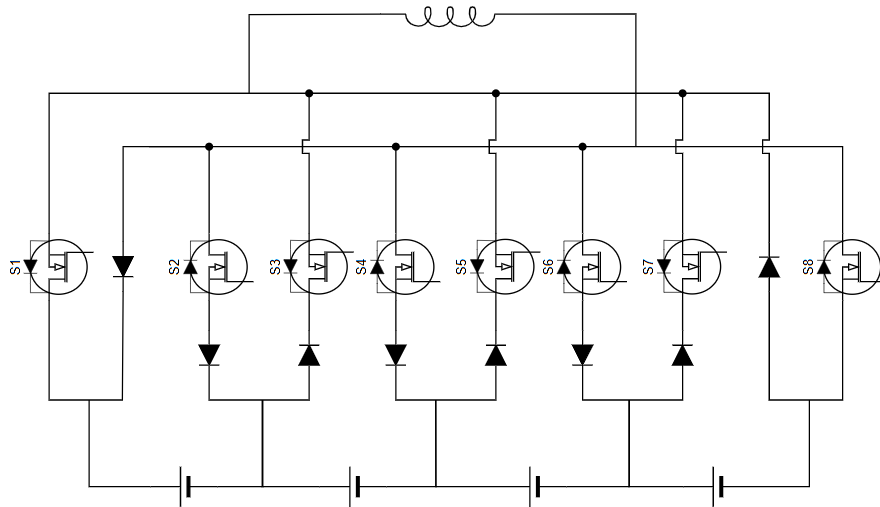
3.3. İndüktör Tabanlı Aktif Dengeleme Modelleme Çalışmaları

3.3.1. Devre Tasarımı

Tek indüktör tabanlı dengeleme ile ilgili literatürde yapılan pek çok çalışma mevcuttur. Bu tez kapsamında kullanılan devre yapısı ve algoritma ilgili literatür çalışmaları incelenerek belirlenmiştir.

Vardhan et al. tek indüktörlü batarya dengeleme devresini PI tabanlı sabit akım kontrolü ve otomatik SOC karşılaştırmalı anahtarlama ile modellemektedir [44]. Bu çalışma, sürekli ve kesintili akım modlarını ayrı ayrı analiz ederek farklı çalışma koşullarındaki dengeleme performansını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Ayrıca, hibrit araçlar gibi dinamik ortamlara uygun bir çözüm sunmuştur. Song et al. tek indüktörle çalışan ve SOC tabanlı kontrol stratejisiyle desteklenen aktif dengeleme devresi önermektedir [46]. Bu yapı hem bitişik hem de bitişik olmayan hücreler arasında enerji aktarımı sağlayarak daha az bileşenle verimli dengeleme sunar. Simülasyon sonuçları, sistemin hem şarjlı hem de statik durumda yüksek dengeleme başarısı sağladığını göstermektedir.

Tek indüktör tabanlı dengeleme devresi, Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Bu yöntemde, tek bir indüktör kullanılarak farklı MOSFET'lerin anahtarlama ile hücreler arasında enerji transferi sağlanmaktadır. İndüktör, batarya paketindeki tüm hücreleri dengelemektedir. Dengeleme devresi için kısa devre korumasını sağlamak amacıyla MOSFET'lere seri bağlı diyotlar eklenmiştir. Devrede yer alan B_1, B_2, \dots, B_n hücreleri seri bir pil takımı oluştururken, L enerji depolama indüktörü olarak görev yapar. S_1, S_2, \dots, S_n ise anahtarlama elemanlarıdır. Denetleyici, en yüksek ve en düşük SOC değerine sahip hücreleri tespit eder. Anahtarlama görev döngüsü ayarlanabilir olarak belirlenmiştir. Bu süreçte, şarj döngü süresi boyunca (t_{on}) enerji, daha yüksek SOC'ye sahip hücreden indüktöre aktarılır. Kalan döngü süresi boyunca (t_{off}) ise bu enerji indüktörden daha düşük SOC'ye sahip hücreye iletilir. Ayarlanabilir görev döngüsü, iki hücre voltajının eşitlenmesini sağlar.



Şekil 3.3. Tek indüktör tabanlı aktif dengeleme devresi.

3.3.2. Dengeleme İlkesi

Tek indüktör tabanlı devredeki dengeleme ilkesinin anlatımı için anahtarlama davranışı inceleyen Tablo 3.2 hazırlanmıştır.

Tabloda en yüksek ve en düşük SOC değerlerine sahip hücreler dikkate alınarak anahtarlama elemanlarının açılma kapanma durumları gösterilmiştir ve Şekil 3.6'da devre döngüleri yer almaktadır.

3.3.2.1. İndüktör Akımının Modellenmesi

Tek indüktör tabanlı dengelemede çalışma modu olarak DCM kullanılması kararlaştırılmıştır. DCM moduna göre indüktör akım davranışları incelenmiştir.

Dengeleme ilkesi ve indüktör akım davranışları örnek olarak iki bitişik hücreden Hücre 4 en yüksek SOC'ye ve Hücre 3 en düşük SOC'ye sahip olduğu durum üzerinde açıklanmıştır ve şarj deşarj döngüleri şekil 3.4'te gösterilmiştir. Şarj sürecinde akımın izlediği yönler Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Bu durumda, enerji, yüksek SOC'ye sahip hücreden düşük SOC'ye sahip hücreye doğru aktarılır ve böylece sistemde bir dengeleme sağlanır.

t_{on} sırasında Hücre 4'ten indüktöre (L) aktarılan enerji miktarı Denklem 3.4 ve 3.5 kullanılarak hesaplanabilir ve Denklem 3.6 elde edilir [39].

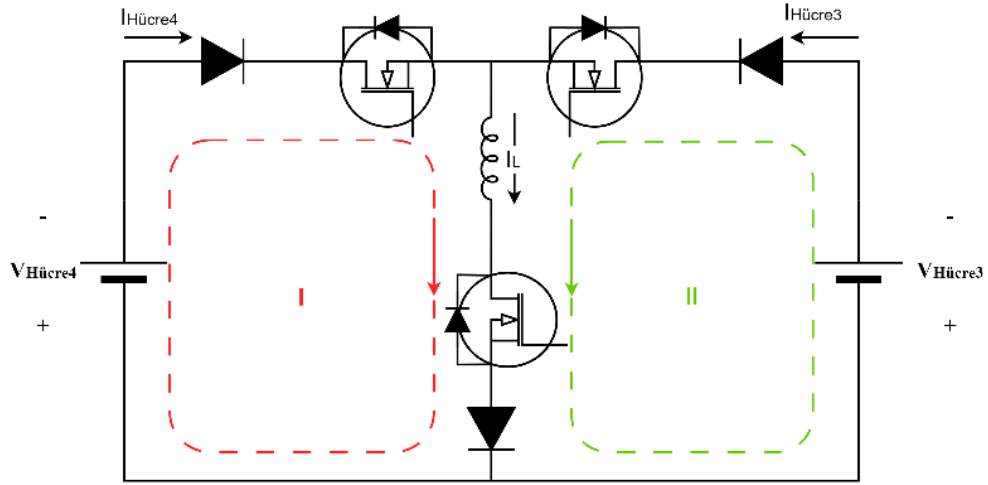
$$V_L = V_{hücre4} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.4)$$

$$I_L = \frac{1}{L} \int_0^{t_{on}} V_{hücre4} dt = \frac{V_{hücre4}}{L} t_{on} \quad (3.5)$$

$$Q_{hücre4} = \frac{1}{2} L I_L^2 = \frac{1}{2} \frac{t_{on}^2 V_{hücre4}^2}{L} \quad (3.6)$$

$t_{on}=1-t_{off}$ süresi boyunca enerji L'den 3. Hücreye aktarılır ve 3. Hücre şarj olur. Bu enerji Denklem 3.7 deki gibi hesaplanır [39].

$$Q_{hücre3} = Q_{hücre4} = \frac{1}{2} \frac{V_{hücre4}^2}{L} t_{on}^2 \quad (3.7)$$



Şekil 3.4. Hücre4 ve Hücre3 arasındaki enerji transferlerini gösteren eşdeğer devre.

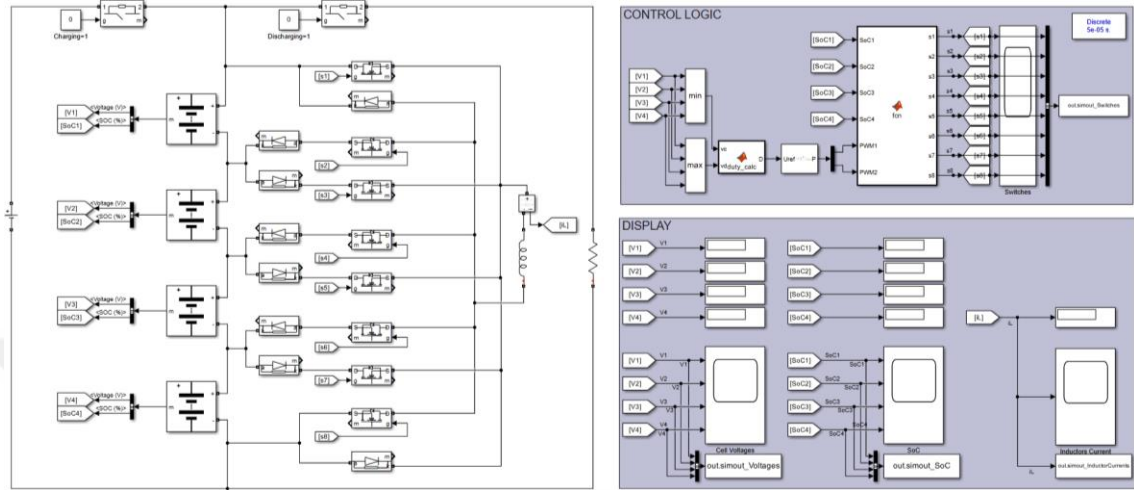
Bu topoloji için görev döngüsü yaklaşık %50'dir. Bunun nedeni, transistörlerin açma gecikme süresi (delay on time) ve kapama gecikme süresine (delay off time) sahip olmasıdır. Açma gecikme süresi, MOSFET'in gate ve source uçları arasındaki kapasitörün eşik gerilimine ulaşana kadar şarj olması için gereken süredir. Hücre dengeleme algoritması, en yüksek SOC'ye sahip hücreden fazla enerjiyi yarım döngüde alır ve bir sonraki yarım döngüde en düşük SOC'ye sahip hücreye enerji aktarır. [39]

3.3.2.2. Dengeleme Kontrol Yöntemi

Tek indüktör tabanlı dengeleme devresinin simülasyonu için MATLAB/Simulink ile devre modeli hazırlanmıştır. Modelde Simulink kütüphanesinden faydalanılmıştır. Dengeleme algoritmasında kullanılan parametreler, LIB paketinin her bir hücresi için MATLAB Simulink kütüphanesinde bulunan basit ve uygulanması kolay li-ion pil bloğu kullanılarak elde edilmiştir. Pil modelinde MATLAB bloğu kapasite (Ah), SOC (%), Nominal voltaj (V) gibi pil parametrelerini kullanabilme imkanı sunmaktadır. Bu parametreler rahatlıkla sisteme girdi olarak verilmiştir.

Dengeleme devresi, seri bağlı n adet hücre içeren bir batarya paketine sahiptir ve bu hücreler B_1, B_2, \dots, B_n şeklinde ifade edilir. Dengeleme devresinde toplam $2n$ adet MOSFET anahtarlama elemanı bulunmaktadır. Dengeleme sırasında hücrelerin kısa devre riskini önlemek amacıyla her güç MOSFET'i ile seri bağlı bir diyot bulunmaktadır. Bu yapı sayesinde, toplamda $2n$ adet güç MOSFET ve diyot kullanılır.

Ayrıca modelde devrenin statik, şarj ve deşarj durumlarının değerlendirebilmesi içinde anahtarlama elemanları kullanılmıştır. Kontrol algoritmasının oluşturulabilmesi için ise MATLAB Fonksiyon bloğundan faydalanılmıştır.

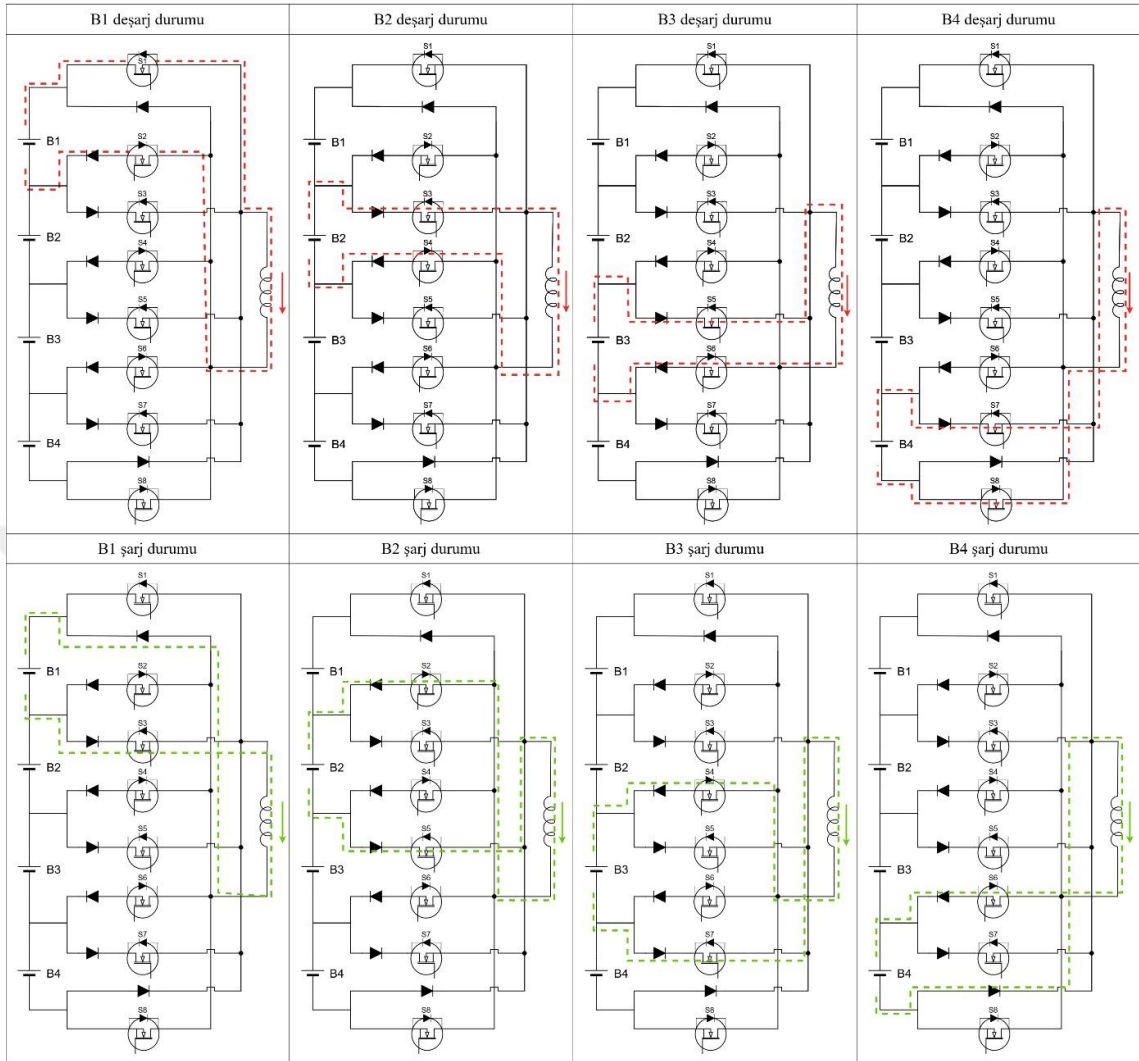


Şekil 3.5. Tek indüktör tabanlı dengeleme devresinin MATLAB/Simulink modeli.

Şekil 3.5'te Dört hücreli bir batarya paketi için oluşturulan MATLAB modeli gösterilmektedir. Modeldeki MOSFET'lerin anahtarlama davranışları Tablo 3.2.'de lojik düzeyde, Şekil 3.6'da ise enerji transfer yönleri gösterilmiştir. PWM sinyallerinin hangi süre boyunca ve hangi anahtarlara uygulanacağını ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır.

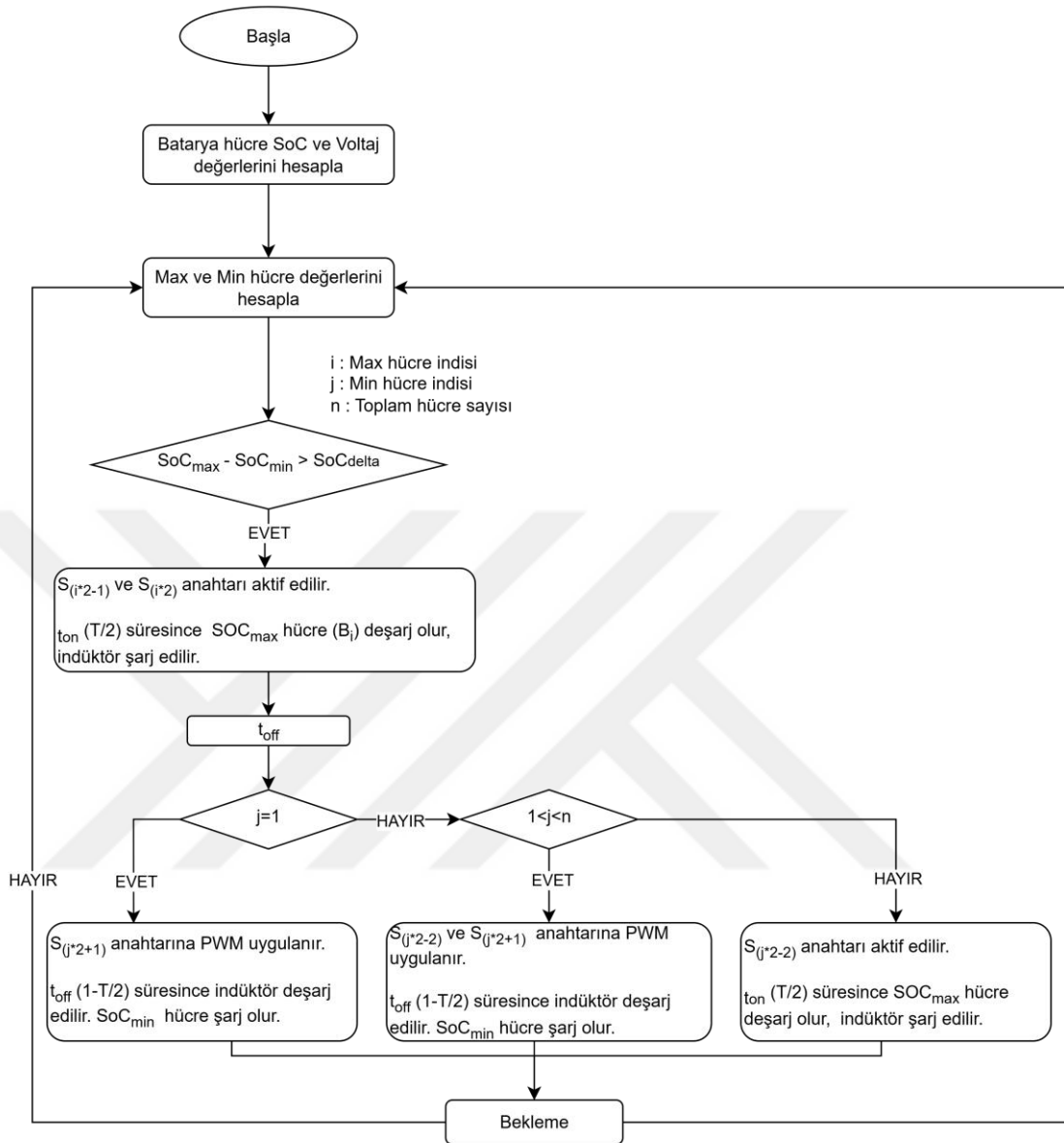
Tablo 3.2. Tek indüktör tabanlı dengeleme yöntemi için SOC durumlarına göre anahtarlama davranışları.

En yüksek SOC değerli hücre	Deşarj durumunda aktif olan anahtarlama elemanı	En düşük SOC değerli hücre	Şarj durumunda aktif olan anahtarlama elemanı
B1	S1, S2	B2	S2, S5
		B3	S4, S7
		B4	S6
B2	S3, S4	B1	S3
		B3	S4, S7
		B4	S6
B3	S5, S6	B1	S3
		B2	S2, S5
		B4	S6
B4	S7, S8	B1	S3
		B2	S2, S5
		B3	S4, S7



Şekil 3.6. Şarj deşarj durumlarına göre enerji transferler yönleri.

Bu çalışmada, tek indüktör tabanlı dengeleme yöntemi kullanılarak batarya hücreleri arasındaki SOC farklarını en aza indirmek amaçlanmıştır. Sistem her hücrenin SOC değerini tahmin ederek denetleyiciye iletir. Denetleyici, tüm hücrelerin SOC değerlerini karşılaştırarak en yüksek ve en düşük SOC'ye sahip hücreleri belirler ve dengeleme sürecini başlatır. Dengeleme işleminin başlaması için belirli bir eşitleme eşiğinin aşılması gerekmektedir. En yüksek ve en düşük SOC farkı $0.005V$ 'i aştığında, dengeleme devresi aktif hale gelir. SOC farkı belirlenen eşikten küçük olduğunda ise dengeleme işlemi durdurulur. Denetleyici, her hücrenin SOC değerini gerçek zamanlı olarak analiz eder ve bu değerler ile pil takımının ortalama SOC değeri arasındaki farkı hesaplar. Eğer SOC farkı belirlenen eşik değerinden düşükse dengeleme işlemi sonlandırılır; aksi takdirde süreç devam eder. Dengeleme yönteminin akış şeması Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Tek indüktörlü aktif dengeleme akış şeması.

3.3.3. Simülasyon Çıktıları

Bu bölümde, simülasyon sonuçları olarak ele alınmaktadır. MATLAB/Simulink ile elde edilen çıktılar grafiksel olarak sonuçların gözlemlenebilmesi için eklenmiştir.

Tek indüktörlü dengeleme modeli, Tablo 3.3 'te gösterilen başlangıç SOC ayarlarına ve aynı hücre kapasitesine sahip dört seri bağlı hücre ile simüle edilmektedir.

SOC farkları ve batarya kapasiteleri, simülasyon süresini en aza indirmek amacıyla seçilmiştir. SOC parametreleri Buck-Boost dönüştürücü ile aynı girilmiştir.

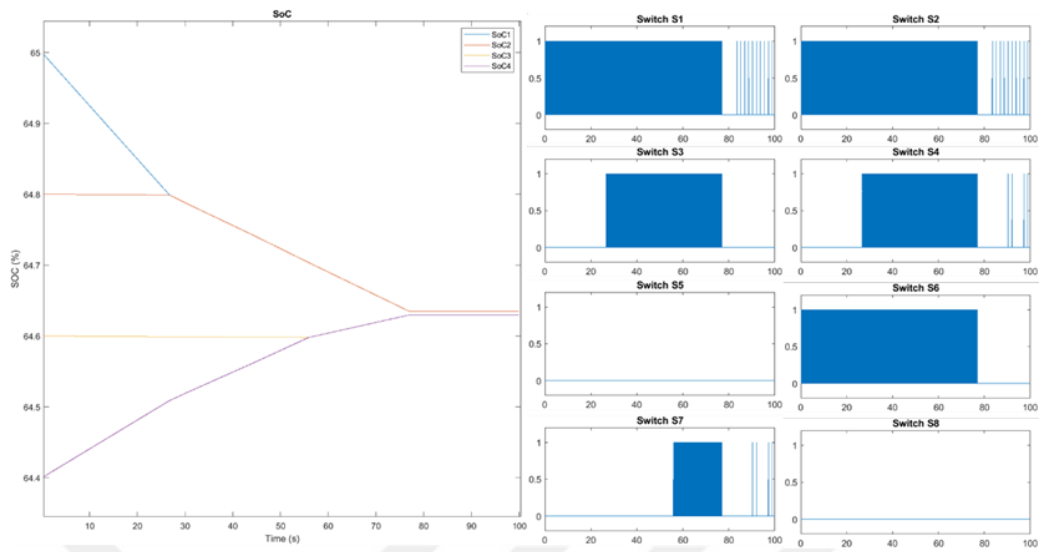
Tablo 3.3. Simülasyon parametreleri.

SoC1	%65
SoC2	%64.8
SoC3	%64.6
SoC4	%64.4
Nominal Gerilim	3.7V
Kapasite	2.6 Ah
İndüktör	330uH
Görev Döngüsü	Ayarlanabilir (0.15 il 0.5 arasında değişmektedir.)
PWM Frekansı	1kHz

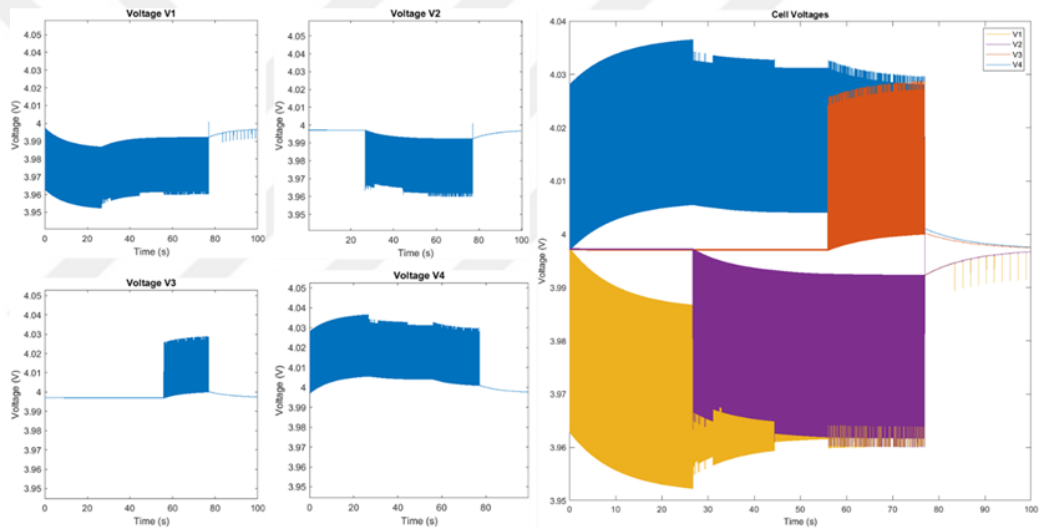
Dengeleyicinin simülasyon ile edinilen SOC dengeleme eğrisi, anahtarlama durumları, hücre gerilim dalga formu, indüktör akım dalga formu, statik, şarj ve deşarj durumlarına göre sırasıyla Şekil 3.8, 3.9 ve 3.10'da verilmiştir. Tablo 3.3'te görüldüğü üzere başlangıçta Hücre 1 ile Hücre 4 arasındaki SOC farkının en fazla olduğu görülmektedir. Bu iki hücre, indüktör aracılığıyla dengelenmektedir ve Şekil 3.7'da sunulan akış şemasına göre anahtarlama davranışları Şekil 3.6'da yer almaktadır. İndüktörden geçen dengeleme akımı statik, şarj ve deşarj durumlarına göre sırasıyla Şekil 3.8.c, 3.9.c, 3.10.c'de gösterilmektedir.

Statik durumda herhangi bir yük yokken SOC dengeleme eğrisi Şekil 3.8.a'da gösterilmiştir. Dengelemede Hücre 1 SOC değerinin zamanla azaldığı, Hücre 4 SOC değerinin zamanla arttığı görülmektedir. Hücre 1 kendinden sonraki en yüksek SOC değeri ile Hücre 4 kendinden sonraki en düşük SOC değeri ile aynı seviyeye gelmektedir. Daha sonra dengelemede yine en yüksek ve en düşük SOC değerlerine göre şarj deşarj işlemleri için anahtarlamalar uygulanarak devam etmektedir. En son ki durumda dört hücre arasında 0.005V fark ile dengeleme gerçekleşmektedir. Dengeleme işlemi sırasında uygulanan anahtarlama durumları Tablo 3.2'da görülmektedir. Bir dengeleme çevrimi içerisinde, indüktör ilk olarak hücre 1 tarafından 5A'e kadar şarj edilmekte; ardından indüktör, enerjisini hücre 4'e aktarmak üzere deşarj edilmekte ve akım 0 A değerine ulaşana kadar bu işlem sürmektedir. İndüktör değerinin sıfıra inmesi DCM'e göre enerji transferinin gerçekleştiğini kanıtlamaktadır.

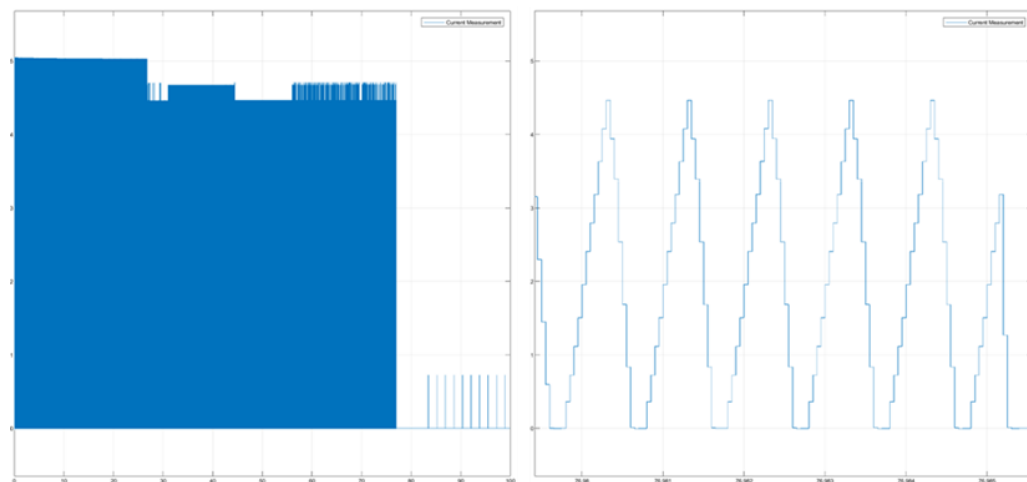
Dengeleme sistemi, hücrelerin güvenli gerilim aralığında tutulmasını sağlamak amacıyla 2.8V ile 4.2V arasındaki gerilimlerde dalgalanmasına izin vermektedir.



(a)

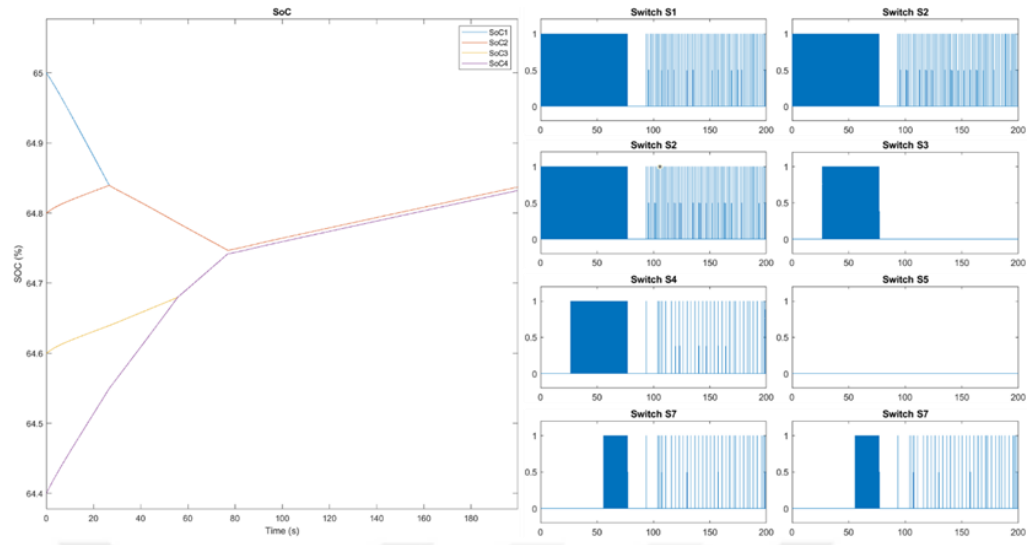


(b)

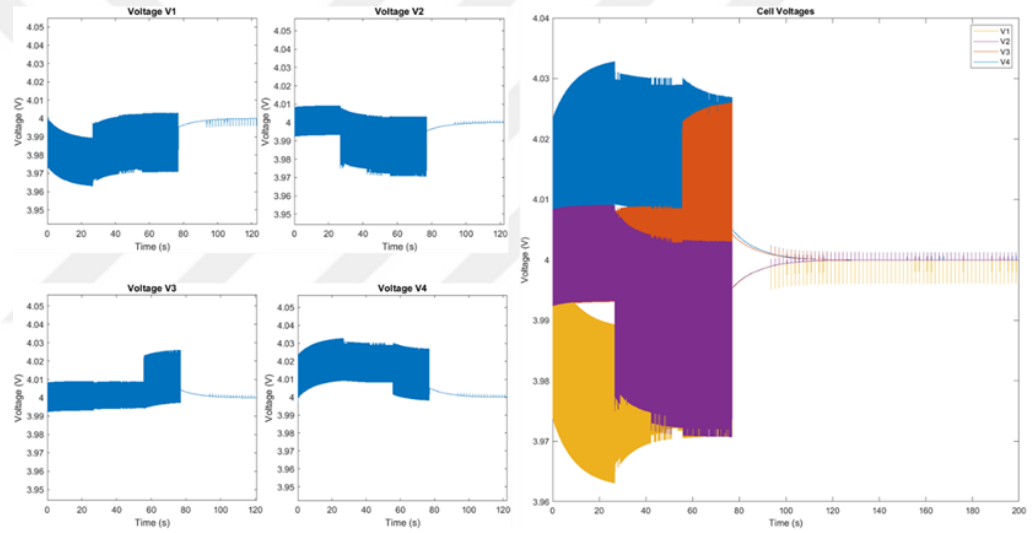


(c)

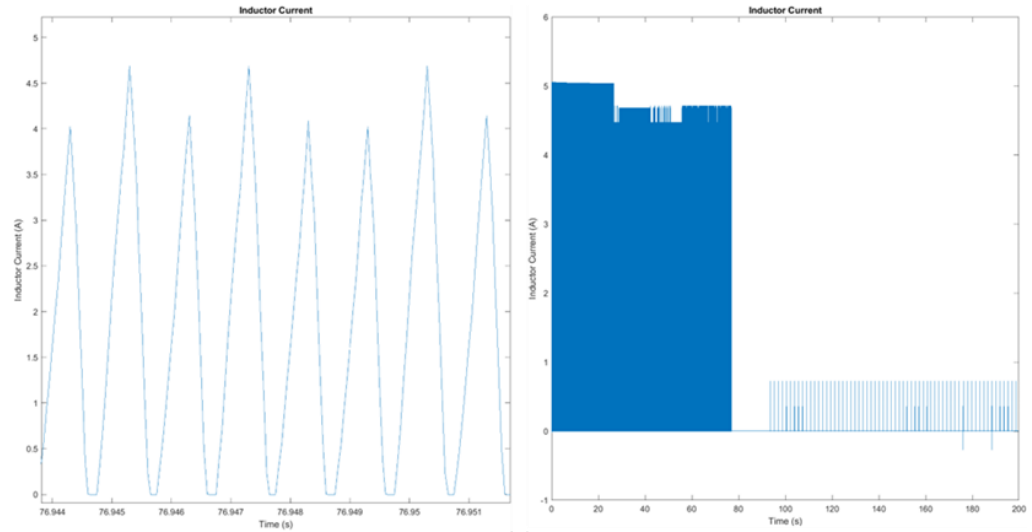
Şekil 3.8. Statik Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi.



(a)

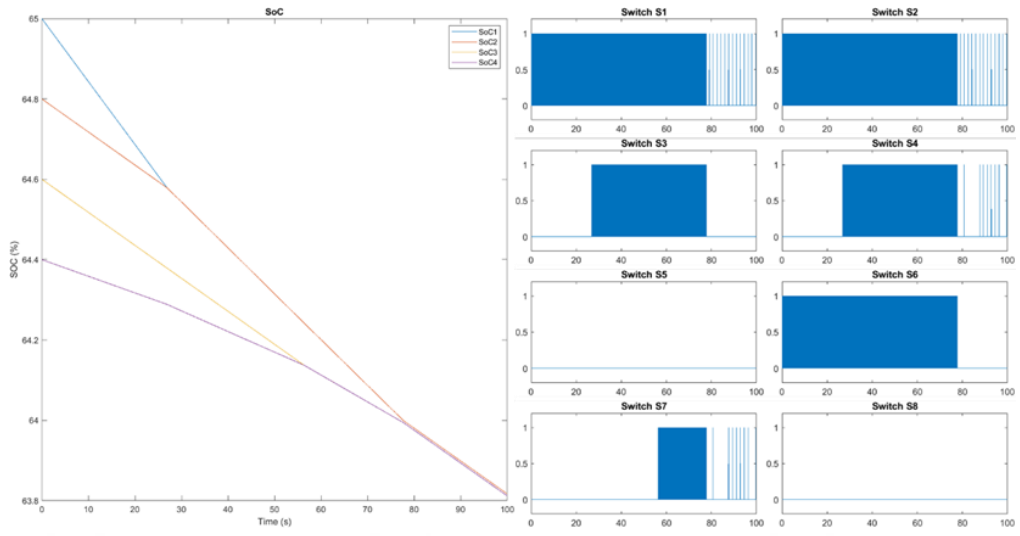


(b)

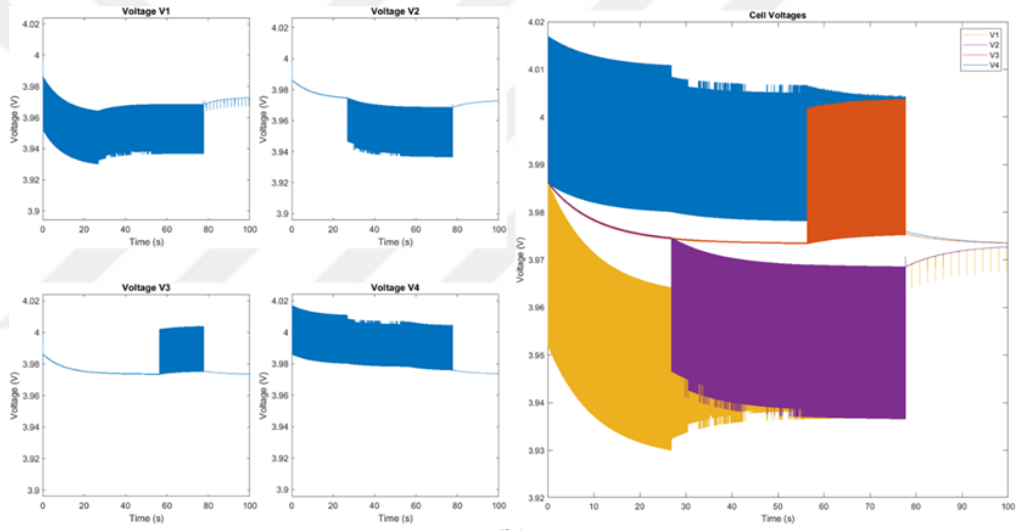


(c)

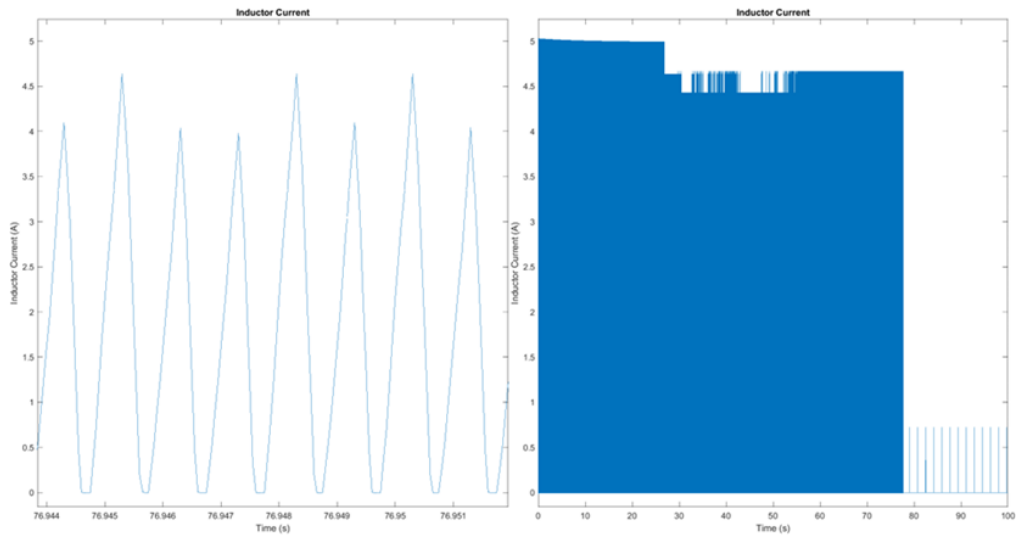
Şekil 3.9. Şarj Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.10. Deşarj Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi.

3.3.4. Sonuç-Tartışma

Statik, şarj ve deşarj durumlarına ait hücre SOC değerleri, dengelemeye ulaştığı süre ve dengeleme verimliliği Tablo 3.4'te gösterilmektedir. Dengeleme verimliliği MATLAB simülasyonu için hesaplanmıştır ve hücrelerin dengeleme başlangıcındaki SOC değerleri ile dengeleme sonunda ulaşılan SOC değerleri dikkate alınarak, dengeleme verimliliği Denklem 3.8'e [38] göre hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n SOC_{son_i}}{SOC_{başlangıç_i}} * 100 \% \quad (3.8)$$

- Statik modda herhangi bir yük yokken yapılan dengeleme %99.90 verimlilikle gerçekleşmiştir.
- Şarj modunda verimlilik %100.07'dir. Verimlilik değeri, sisteme dışarıdan enerji girişi olduğu için teorik değerleri aşan bir durumdur.
- Deşarj modunda ise sistem %99.91 verimlilik göstermiştir.

Tablo 3.4. Simülasyon sonuçları analizi.

Parametreler	Statik Mod	Şarj Modu (16V)	Deşarj Modu (10R)
SoC1	64.6347	64.7470	63.9993
SoC2	64.6347	64.7470	63.9993
SoC3	64.6297	64.7420	63.9943
SoC4	64.6297	64.7420	63.9943
Dengeleme süresi (saniye)	76.985	76.965	77.718
Dengeleme verimliliği (%)	99.90	100.07	98.91

Daha önceki incelenen çalışmaların karşılaştırması yapılarak nihai sonuca ulaşmak hedeflenmiştir. Tablo 3.5'te simülasyon sonuçları ve Tablo 3.6'da grafiksel sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Vardhan et al. [44] çalışmasında hücre SOC değerleri birbirlerine oldukça yakın olduğundan ve dengeleme akımının Song et al.'a [46] göre yüksek olmasından kaynaklı dengeleme süresinin kısa olması normal görünmektedir. Bu tezdeki çalışmada dengeleme akımı modlara göre 4,5A-5A arasında değişmektedir ve Vardhan et al.'a göre dengeleme akımı daha az ve SOC değerleri birbirlerine uzak olmasına rağmen dengeleme süreleri

birbirlerine yakın olarak gözlemlenmiştir. Bu tezdeki çalışma ile Song et al. çalışması karşılaştırıldığında ise dengeleme süresinde daha olumlu bir iyileşme görülmektedir.

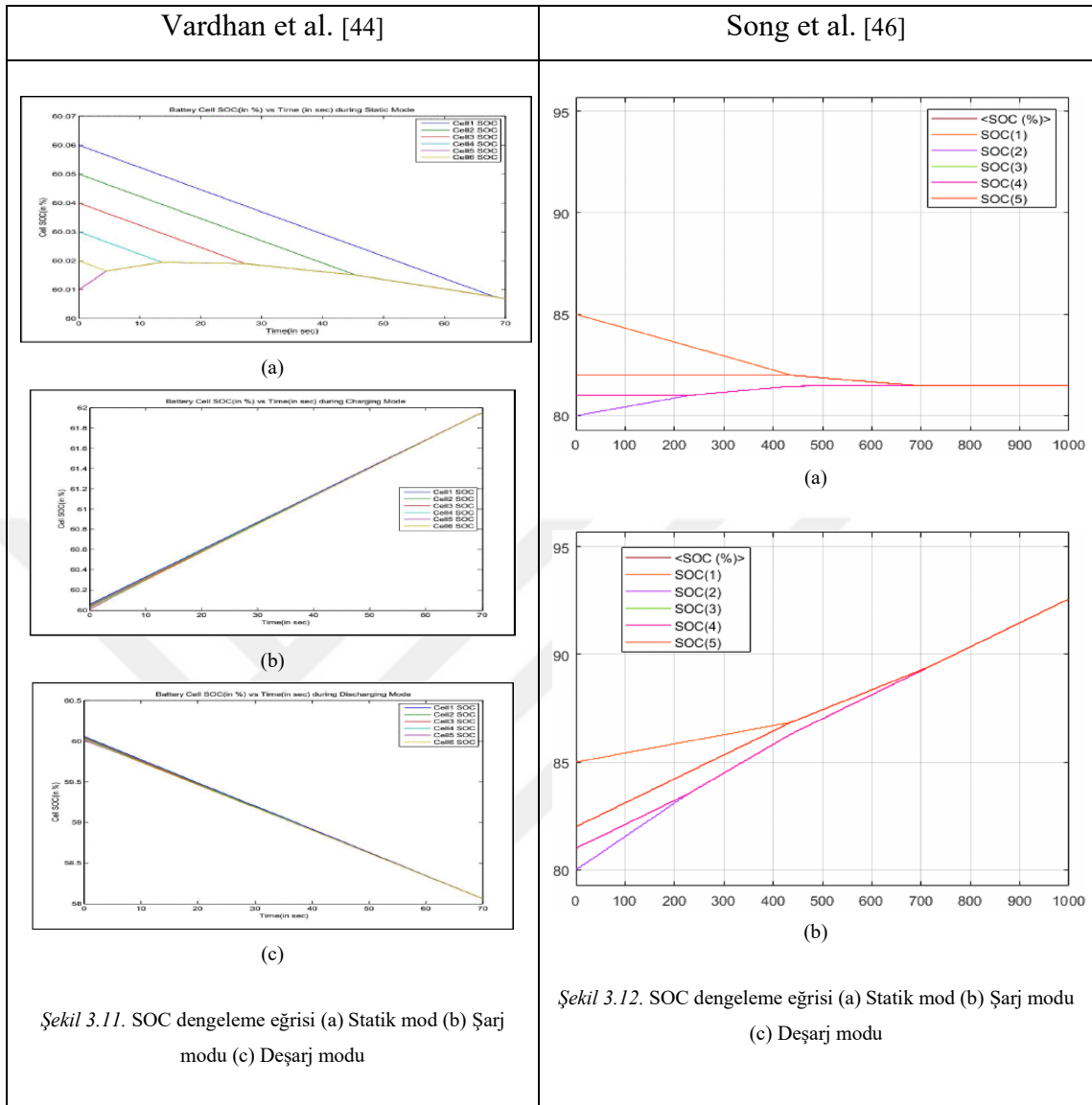
Bu tezdeki yapılan çalışmada kullanılan indüktör değerinin de Vardhan et al. ve Song et al.'a göre daha küçük olması boyut ve maliyet açısından daha avantajlı olacağı öngörülmektedir fakat indüktöre bağlı termal faktör gibi parametrelerin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu tezdeki çalışmanın ve literatürdeki çalışmaların daha doğru ve net bir karşılaştırma sunabilmesi için hücre sayılarının, pil kapasitelerinin ve SOC değeri gibi ana parametrelerin aynı olması daha etkili sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Tablo 3.5. Literatürdeki çalışmaların simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

Parametre	Vardhan et al. [44]	Song et al. [46]	Önerilen çalışma
H1 SOC	%60.06	%85	%65
H2 SOC	%60.05	%80	%64.8
H3 SOC	%60.04	%82	%64.6
H4 SOC	%60.03	%81	%64.4
H5 SOC	%60.01	%82	
H6 SOC	%60.02	-	
Pil Kimyası	Lityum-iyon	Lityum-iyon	Lityum-iyon
Pil Kapasitesi	75 Ah	10 Ah	2.7 Ah
Nominal Gerilim	3.7 V	4.2 V	3.7 V
İndüktans	2 mH	100 mH	300 uH
Şarj/Dengeleme Akımı	8 A (sabit, PI kontrol)	4 A	~4.5A
Kontrol Stratejisi	SOC tabanlı otomatik anahtarlama + PI	SOC tabanlı PWM kontrollü dengeleme	SOC tabanlı PWM kontrollü dengeleme
PWM Frekansı	10 kHz	Belirtilmemiş (manuel seçilen sinyaller)	1 kHz
Dengeleme Süresi	~70 s (statik)	680 s (statik), 685 s (şarj)	76.985 s (statik), 76.965 s (şarj), 77.718 s (deşarj)
Dengeleme Modları	Statik, Şarj, Deşarj, Karma	Statik ve Şarj	Statik, Şarj, Deşarj
Anahtar Sayısı	2n+2 (MOSFET + diyot)	2n (MOSFET)	
Ek Avantajlar	Sabit akım sayesinde kararlı transfer	Bitişik olmayan hücreler arası transfer	

Tablo 3.6. Literatürdeki çalışmaların simülasyon sonuçlarının grafiksel karşılaştırılması.



3.4. Buck-Boost Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme Çalışmaları

3.4.1. Devre Tasarımı

Buck-Boost dönüştürücü tabanlı dengeleyici devre tasarımları ve bu yapılara yönelik algoritmalar üzerine literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu tez kapsamında kullanılan devre yapısı ile geliştirilen algoritmalar, ilgili literatür çalışmaları incelenerek belirlenmiştir.

Wang et al. çalışması, modüler yapısı ve kontrolü kolay olan katmanlı bir IBLBE adlı çift yönlü Buck-Boost dönüştürücü dengeleme topolojisi önermiştir [33]. Ancak, önerilen yöntem gerilim tabanlı çalışmakta ve sabit görev oranı uygulamaktadır. Bu nedenle,

sistemin SOC açısından gerçek dengeye ulaşamama riski bulunmakta veya dengeye ulaşma süresi uzun olabilmektedir.

Lu et al. çalışması, dengeleme yöntemi olarak SOC'yi, ayar parametresi olarak ise gerilimi kullanan bir PI kontrol yöntemi önermektedir [47]. Bu yöntem ile hızlı bir dengeleme süreci ve düşük voltaj dalgalanması elde edilmiştir. Ancak çalışmada kullanılan lityum-iyon pil parametreleri gerçek değerlere dayanmamaktadır ve akım ile ilgili durumlar değerlendirilmemiştir.

Bu tez kapsamında, IBLE modeli üzerinde bir dengeleme kontrol yöntemi olarak SOC kullanılmış ve sabit görev döngüsü ile ayarlanabilir görev döngüsünün dengeleme performansları karşılaştırılmıştır.

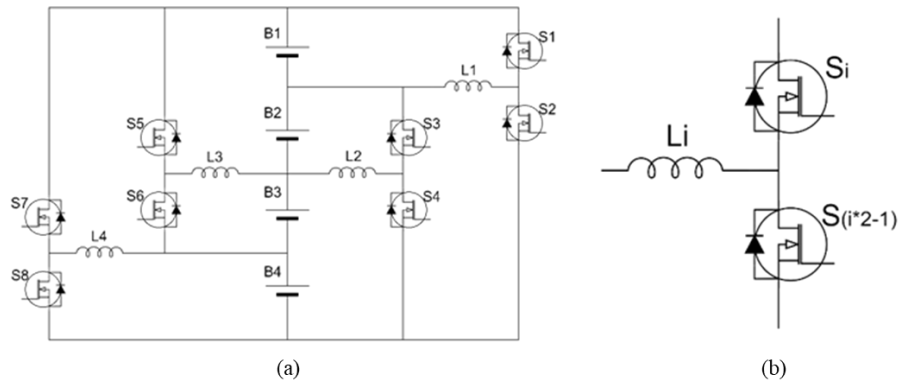
Simülasyon çalışmaları, statik, şarj, deşarj durumları olmak üzere inceleyecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Özellikle statik durumda; indüktans, anahtarlama frekansı ve indüktör gerilimi gibi parametreler için ayrıntılı hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalar simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Şekil 3.13'de üzerinde uygulaması yapılan çift yönlü buck boost tabanlı dengeleyicinin devre yapısı gösterilmektedir. Her bir hücre diğer hücreler arasındaki yük transferini kontrol eden Şekil 3.13.b de görülen dengeleme alt devresi ile donatılmıştır.

Seri olarak bağlı n adet hücre bir modülü oluşturmaktadır. Modülde kesme noktası k olarak belirlenmiştir. Eğer n çift sayıysa, $n = 2 \times k$; eğer n tek sayıysa, $n = 2 \times k - 1$ olmaktadır. Kesme noktasına göre anahtarlama algoritması oluşturulmuştur.

Şekil 3.13.a'da, uygulaması yapılan çift yönlü Buck-Boost tabanlı dengeleme devresinin yapısı gösterilmektedir. Her bir hücre, diğer hücreler arasındaki yük transferini kontrol eden ve Şekil 3.13.b'de gösterilen bir dengeleme alt devresi ile donatılmıştır. Seri bağlı n adet hücre bir modül oluşturmaktadır. Bu modülde, kesme noktası k olarak tanımlanmıştır.

Hücre sayısı çift ise $n=2k$, tek ise $n=2k-1$ şeklinde ifade edilmektedir. Anahtarlama algoritması, bu kesme noktasına göre oluşturulmuştur. Dengeleme devresine ilişkin hesaplamalar ise ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.13. 4 hücreli buck boost dönüştürücü devre şeması ve hücre dönüştürücü yapısı.

3.4.2. Dengeleme İlkesi

Bu bölümde, Şekil 3.14'te gösterilen Buck-Boost dönüştürücüye dayalı dengeleme devresinin temel yapısı incelenmiştir. İndüktör akımı, anahtarlama süreleri ve sistem yönetimi ile ilgili temel unsurlar ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Tablo 3.7'de, hücrelerin en düşük ve en yüksek SOC değerlerine göre S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 ve S8 anahtarlarının çalışma durumları analiz edilmiştir.

Bu analiz doğrultusunda Şekil 3.13'te sunulan devre algoritması açıklanmıştır. Algoritmanın anlaşılabilirliğini ve uygulanabilirliğini artırmak amacıyla devre modeli Simulink ortamında oluşturulmuştur. Kontrol algoritmasının uygulanmasında ise Stateflow yöntemi tercih edilmiştir. Stateflow yapısı, sistem yönetimini belirli bir mantık çerçevesinde ilettebildiği için hem okunabilirliği artırmakta hem de tasarım sürecine kurulum kolaylığı sağlamaktadır.

3.4.2.1. İndüktör Akımının Modellenmesi

Bu çalışmada, DC-DC dönüştürücülerde iki temel çalışma modu olan DCM ve CCM'den DCM modu tercih edilmiştir. Dengeleyici, şarj ve deşarj olmak üzere iki aşamadan oluşur. Toplam süre periyot (T) olarak tanımlanır; anahtarın iletim süresi "ton", kesim süresi ise "toff" olarak adlandırılır.

Deşarj modunda S_i anahtarı kapatıldığında, B_i hücresi L_i indüktörünü yükler ve L_i enerji depolar. Akım i_L kademeli olarak artar ve elektrik enerjisinin bir kısmı indüktörde depolanan manyetik enerjiye dönüşür. S_i anahtarının t_{on} kapanma süresi, indüktör akımı i_L 'nin maksimum değerini belirler.

V_c , S anahtarı kapatıldığında L_i 'de oluşan gerilimi (toplam pil geriliminin L_i 'yi şarj ettiği durum); V_d , S anahtarı açıldığında L_i 'de oluşan gerilimi (L_i 'nin toplam deşarj ettiği hücreyi şarj ettiği durum) ifade eder.

$$V_c = R_{on}i_{Li} + L \frac{di_{Li}}{dt} , \quad 0 < t \leq t_{on} \quad (3.9)$$

$$V_d = R_{off}i_{Li} + L \frac{di_{Ln}}{dt} - V_D , \quad t_{on} < t \leq t_d \quad (3.10)$$

R_{on} , anahtar kapatıldığında devrenin toplam direncini; V_D , MOSFET'in gövde diyotu boyunca ileri voltajını; R_{off} , anahtar kapatıldığında devrenin toplam direncini; t_d , indüktör akımının sıfıra düştüğü anı; i_t , indüktörün tepe akım değerini ifade eder. Denklem 3.11 çözümlerse:

$$i_{Li} = \begin{cases} \frac{V_c}{R_{on}} - \frac{V_c}{R_{on}} e^{-\frac{t}{L} R_{on}} = \frac{V_c}{R_{on}} \left(1 - e^{-\frac{t}{L} R_{on}}\right), & 0 < t \leq t_{on} \\ i_t e^{-\frac{(t-t_{on})}{L} R_{off}} - \frac{V_d + V_D}{R_{on}} \left(1 - e^{-\frac{(t-t_{on})}{L} R_{off}}\right), & t_{on} < t \leq t_d \end{cases} \quad (3.11)$$

$t=t_{on}$ ise indüktör maksimum değerine ulaşır.

$$i_t = -\frac{V_c}{R_{on}} \left(1 - e^{-\frac{(t_{on})}{L} R_{on}}\right) \quad t = t_{on} \quad (3.12)$$

R_{on} , R_{off} dirençleri ve V_D değerleri çok küçük olduğundan göz ardı edilir. Ardından anahtarlar kapandığında indüktör akımı doğrusal olarak artar; anahtarlar açıldığında indüktör akımı doğrusal olarak azalır. Nihai denklemler şu şekilde özetlenebilir.

$$i_{Li} = \begin{cases} \frac{V_c}{L_i} t, & 0 < t \leq t_{on} \\ \frac{V_c}{L_i} t_{on} - \frac{V_d}{L_i} (t - t_{on}), & t_{on} < t \leq t_d \\ 0, & t_{on} < t \leq T \end{cases} \quad (3.13)$$

$$i_t = \frac{V_c \cdot t_{on}}{L} = \frac{V_c \cdot D \cdot T}{L} \quad (3.14)$$

D , görev döngüsünü; T ise anahtarlama periyodunu ifade eder. DCM modunun sağlanabilmesi için indüktör akımının anahtar kapalıyken sıfıra düşmesi gerekir. Bu

durum, indüktördeki enerjinin tamamen bataryaya aktarılmasını garanti eder ve bu koşullara göre görev oranı türetilir.

$$D < \frac{v_2}{v_1 + v_2} \quad (3.15)$$

v_1 şarj olan pilin voltajı; v_2 deşarj olan pilin voltajıdır. D görev oranıdır. Dinamik işlem sırasında, pillerin voltajı her zaman dalgalanır. Hücre dengesizliğinin temel nedeni olan SOC, pil şarj olduğunda artacak ve pil boşaldığında azalacaktır.

3.4.2.2. Endüktans, Anahtarlama Frekansı ve Eşitleme Süresi

Hücre dengeleme süresi, bir batarya sisteminde dengeleyici devreye duyulan ihtiyacı belirlemede önemli bir ölçüttür. Bu sürenin azaltılması, yalnızca dengeleyici topolojisinin geliştirilmesiyle değil, aynı zamanda dengeleme akımının artırılmasıyla da mümkündür. Bunun nedeni, birim zamanda bir hücreden diğerlerine aktarılan yük miktarının hücreden geçen akımın ortalama değerine orantılı olmasıdır:

$$\Delta Q = i_{Bi_{ort}} \cdot T \cdot f \quad (3.16)$$

Burada, ΔQ bir hücreden diğerine bir saniyede aktarılan enerjidir, $i_{Bi_{ort}}$: B_i 'den geçen ortalama akımdır, T anahtarlama periyodudur ve f anahtarlama frekansıdır.

Dengeleme sürecinde, dengeleme devresindeki akım aşağıdaki gibi türetilir:

$$i_t = \frac{V_C}{L} D \cdot T = \frac{V_C \cdot D}{L \cdot f} \quad (3.17)$$

İndüktör akımının ortalama değeri:

$$i_{Li_{ort}} = \frac{1}{2} \frac{V_C \cdot D}{L \cdot f} \quad (3.18)$$

Dengeleme alt devresinde S_i , hücre B_i 'nin ortalama değeri:

$$i_{Bi_{avr}} = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{V_C \cdot D}{L \cdot f}, & Bi \text{ Li}'yi \text{ şarj ederken} \\ \frac{1}{2} \frac{V_C \cdot D \cdot (1 - D)}{L \cdot f}, & Li \text{ Bi}'yi \text{ şarj ederken} \end{cases} \quad (3.19)$$

İndüktör akımının ortalama değeri, $D^2 \cdot V_c$ ya da $D(1-D) \cdot V_c$ çarpımı ile orantılı; $L \cdot f$ çarpımı ile ters orantılıdır. Ancak, D ve V_c değerleri istenildiği gibi ayarlanamamaktadır.

Dengeleme süresi, dengeleme akımının ortalama değeriyle ters orantılıdır (Denklem 3.19'da gösterildiği gibi). Bu nedenle IBLBE (İndüktör Tabanlı Dengeleyici) yönteminde dengeleme süresi, $L \cdot f$ çarpımı ile orantılıdır. Bu durumda, indüktans (L) ve anahtarlama frekansı (f) seçimi ile farklı seviyelerde dengeleme akımı ve dengeleme süresi elde edilebilmektedir.

Anahtarlama frekansının artırılması hem indüktör hacmini azaltmakta hem de dengeleyici entegrasyonunu iyileştirmektedir.

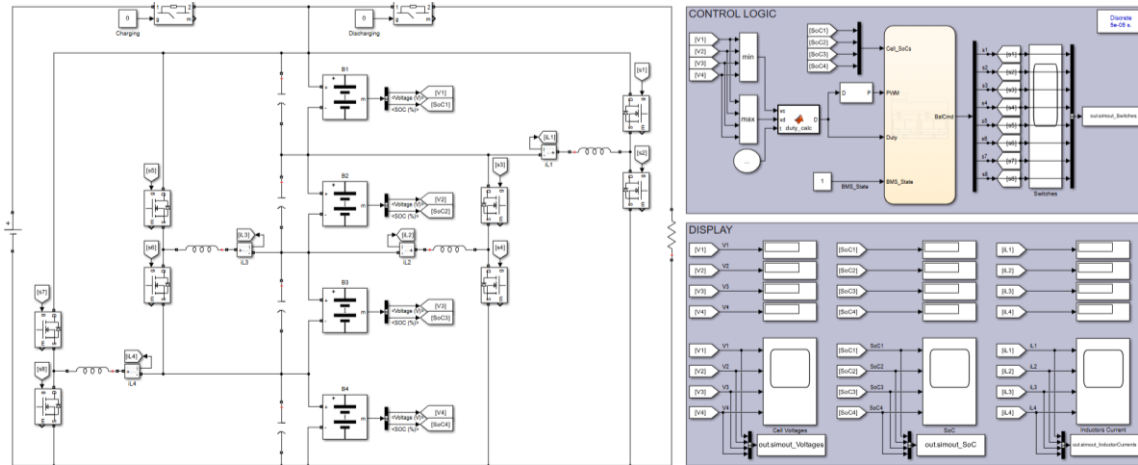
3.4.2.3. Dengeleme Kontrol Yöntemi

Buck-Boost dönüştürücü tabanlı dengeleme devresinin simülasyonu için MATLAB/Simulink ortamında Şekil 3.14'te görülen devre modeli oluşturulmuştur. Modelin tasarımında Simulink kütüphanesindeki bloklardan yararlanılmıştır.

Dengeleme algoritmasının uygulanabilmesi için lityum-iyon pil paketindeki her bir hücreye ait ölçüm verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, uygulaması kolay ve Simulink kütüphanesinde yer alan temel Li-ion pil bloğu kullanılmıştır. Pil modelinde SOC (%), nominal voltaj (V) gibi temel parametreler stateflow için giriş verisi olarak tanımlanmıştır. Bu parametreler batarya bloğundan çekilmiş ek bir alt sistem kurulmadan kolay bir şekilde girdi parametresi elde edilebilmiştir.

Devrede anahtarlama elemanı olarak gövde diyotlu MOSFET'ler kullanılmış; her bir MOSFET için S1'den S8'e kadar isimlendirilen PWM girişleri tanımlanmıştır. İndüktör akımı, anahtarlama davranışları, hücre voltajları ve SOC değerlerinin izlenebilmesi amacıyla izleme blokları eklenmiştir. Ayrıca, devrenin statik, şarj vedeşarj durumlarını temsil edebilmek için uygun anahtarlama elemanları modele dahil edilmiştir.

Kontrol algoritmasının oluşturulmasında ise Stateflow bloğu kullanılarak durum tabanlı bir yönetim yapısı geliştirilmiştir. Önerilen hücre dengeleme şemasında kullanılan dönüştürücü, indüktör doyumunu azaltmak ve güç anahtarlarındaki akım ve voltaj stresini azaltmak için kesikli akım modunda (DCM) çalışır [28].



Şekil 3.14. Buck Boost Dönüştürücü Dengeleme Devresinin MATLAB/Simulink modeli.

Şekil 3.15'te devrenin anahtarlama durumlarını listeleyebilmek ve modeli analiz edebilmek için alt sistemlerin şarj/deşarj döngüleri gösterilmiştir.

Tablo 3.7'de dönüştürücünün hücre SoC durumlarına göre anahtarlama davranışlarına yer verilmiştir. Devre döngülerindeki anahtarlamanın aktif pasif olma durumlarının Şekil 3.15 ve Tablo 3.7'de listelenmesi Şekil 3.16'da verilen akış şeması elde edilerek model algoritmasının oluşturulmasına yardımcı olmuştur.

Şarj/Deşarj durumlarını bir örnek üzerinden açıklamak gerekirse maksimum SOC değeri 2. Hücre, minimum SOC değeri 3. Hücre olduğu varsayıldığında:

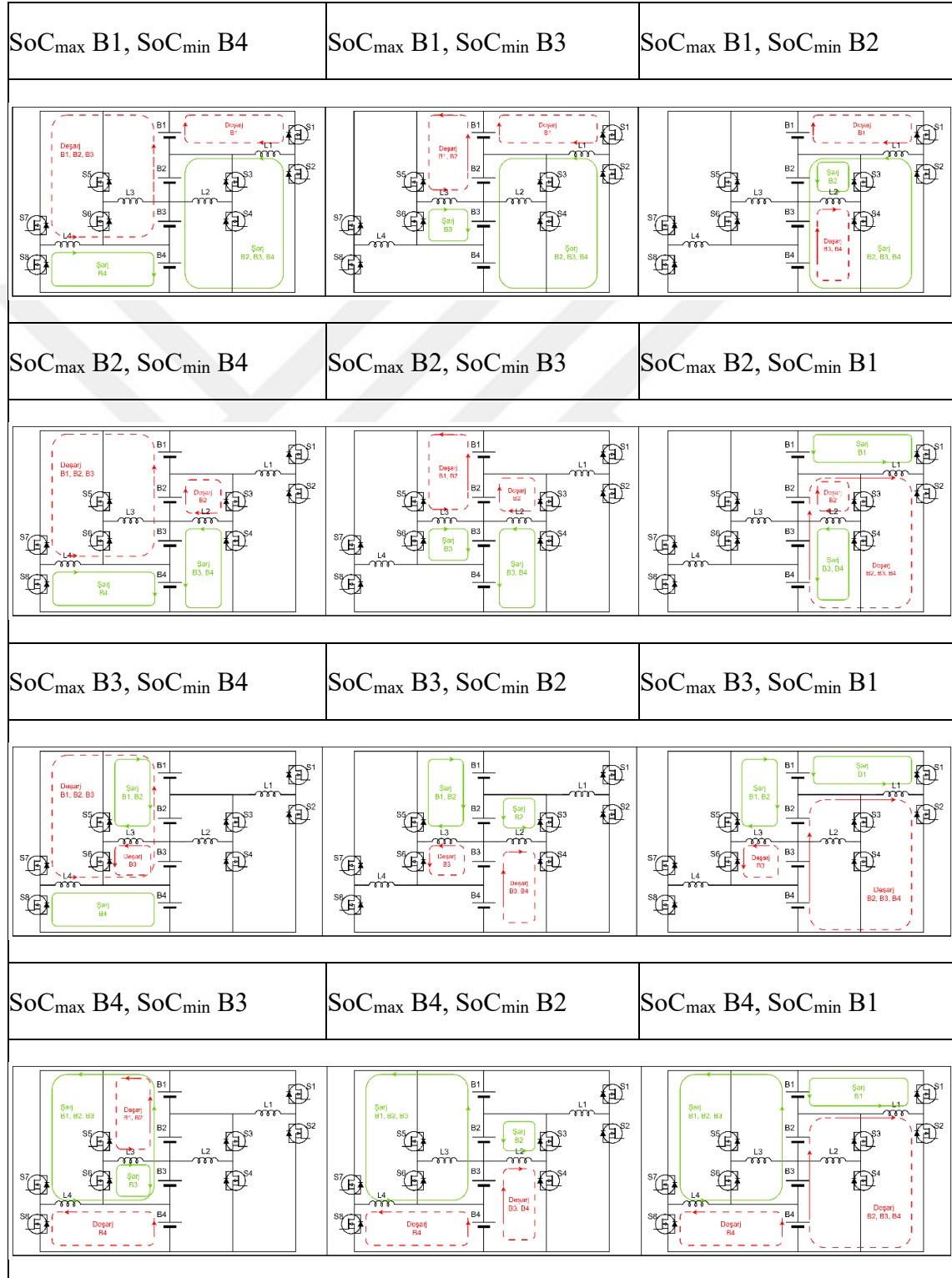
Aşama 1: L2 ve L3'ün Şarj Edilmesi

Tablo 3.7'de gösterildiği gibi, S3 ve S5 anahtarları önce kapalı konuma getirilir. B2 hücresi indüktör L2'yi şarj eder; B1 ve B2 hücreleri seri bağlı olarak indüktör L3'ü şarj eder. Bu süreçte L2 ve L3 indüktörlerinde depolanan manyetik enerji sayesinde akımlar i_{L3} ve i_{L2} kademeli olarak artar. Elektrik enerjisinin bir kısmı, indüktörlerde depolanan manyetik enerjiye dönüştürülür.

Aşama 2: L2 ve L3'ün Deşarj Edilmesi

Tablo 3.7'de gösterildiği gibi, S3 ve S6 anahtarları açık konuma getirilir. L1 indüktörü, S4'nin gövde diyotu üzerinden B1 ve B2 hücrelerini şarj eder; L4 indüktörü ise S6'nin gövde diyotu üzerinden B4 hücresini şarj eder. En fazla şarj olmuş hücre olan B2 ile en

az şarj olmuş hücre olan B3 aynı anda dengelenir. Ayrıca, dengeleme akımı sadece B2 ve B3 üzerinden değil, aynı zamanda B1 ve B4 üzerinden de akar. Bu durum, diğer dengeleme devrelerine kıyasla dengeleme sürecini hızlandırır.



Şekil 3.15. Buck-Boost tabanlı aktif hücre dengeleme için durumların devre döngüleri.

Tablo 3.7. Buck-Boost tabanlı aktif hücre dengeleme için durum tablosu.

			S1	S2			S3	S4			S5	S6			S7	S8		
Max	Min	Durum	S1a	S1b	D1a	D1b	S2a	S2b	D2a	D2b	S3a	S3b	D3a	D3b	S4a	S4b	D4a	D4b
SoC1	SoC4	1	1												1			
		2	0			1									0			1
SoC1	SoC3	1	1								1							
		2	0			1					0			1				
SoC1	SoC2	1	1				1											
		2	0			1	0			1								
SoC2	SoC4	1					1								1			
		2					0			1					0			1
SoC2	SoC3	1					1				1							
		2					0			1	0			1				
SoC2	SoC1	1		1			1											
		2		0	1		0			1								
SoC3	SoC4	1										1			1			
		2										0	1		0			1
SoC3	SoC2	1						1				1						
		2						0	1			0	1					
SoC3	SoC1	1		1								1						
		2		0	1							0	1					
SoC4	SoC3	1									1					1		
		2									0			1		0	1	
SoC4	SoC2	1						1								1		
		2						0	1							0	1	
SoC4	SoC1	1		1												1		
		2		0	1											0	1	

Durum 1 : Deşarj, Durum 2: Şarj

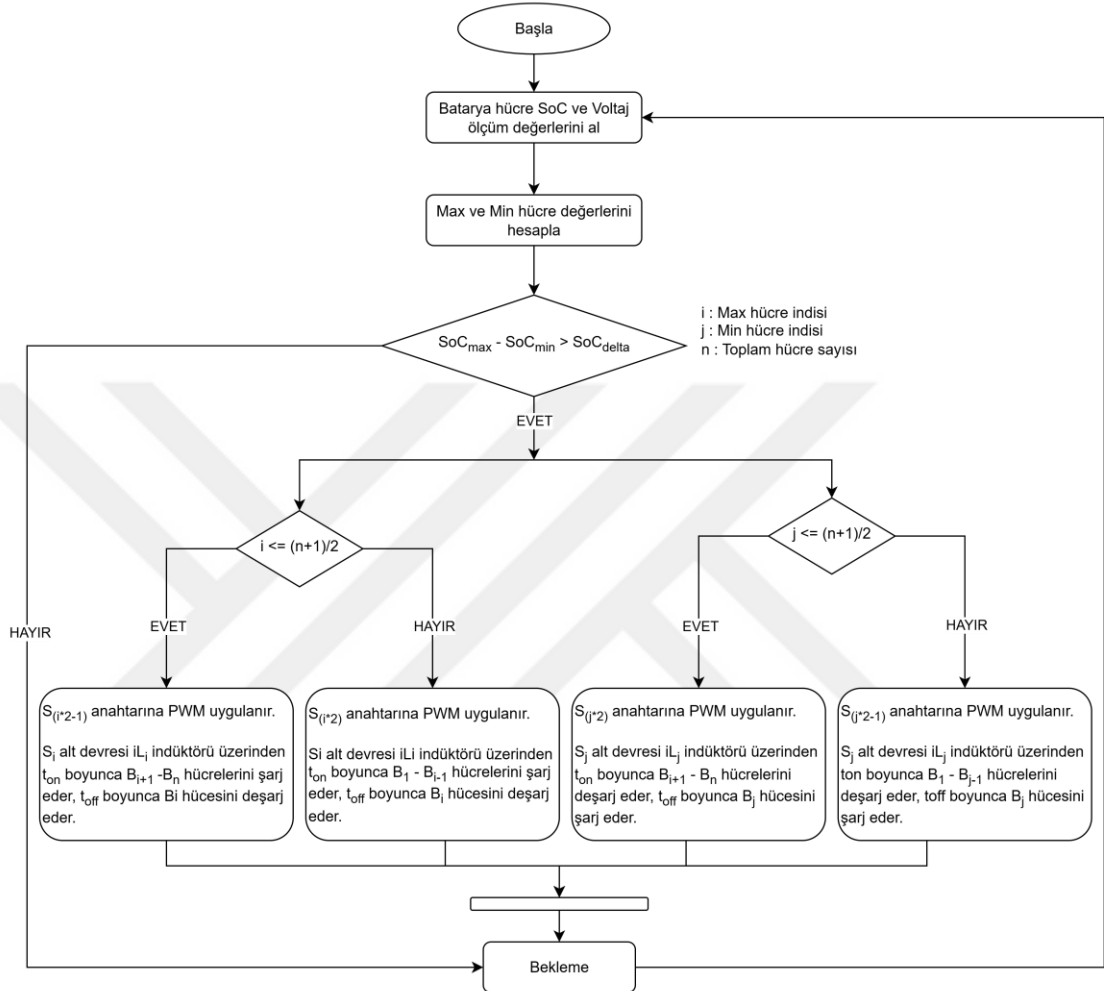
Devre modelinin kontrolü için Şekil 3.16'da gösterilen akış şeması oluşturulmuştur ve Şekil 3.17'de Stateflow'da uygulanmıştır. Akış şeması şu şekilde açıklanabilir:

Her bir hücre, dengelenmesini kontrol eden Şekil 3.14'te gösterilen bir dengeleme devresine sahiptir. Pil takımının dengelemeye başlama şartı $SOC_{delta} = SOC_{max} - SOC_{min} > 10$ mV'dur.

Toplam hücre sayısı n olan bir pil takımı için iki parçaya bölünmüştür. Bölünme durumu toplam hücre sayısı tek ya da çift olabileceğinden Hücre İndisi $\leq (n+1)/2$ (parça a) ve Hücre İndisi $\geq (n+1)/2$ (parça b) olarak ayrılmıştır. a ve b olarak bölünen parçalardaki ilgili hücre indisi dikkate alınarak şarj ve deşarj durumuna göre anahtarlamalar uygulanmaktadır.

Burada Maksimum hücre ve minimum hücrenin anahtarlama durumunun belirlenmesi pil takımının dengelenmesi için ana bileşenlerden biridir. Maksimum hücre indisi i, a bölümünde ise $S_{(i*2-1)}$ 'inci anahtarını yöneterek L_i 'yi, b bölümünde ise $S_{(i*2)}$ anahtarını

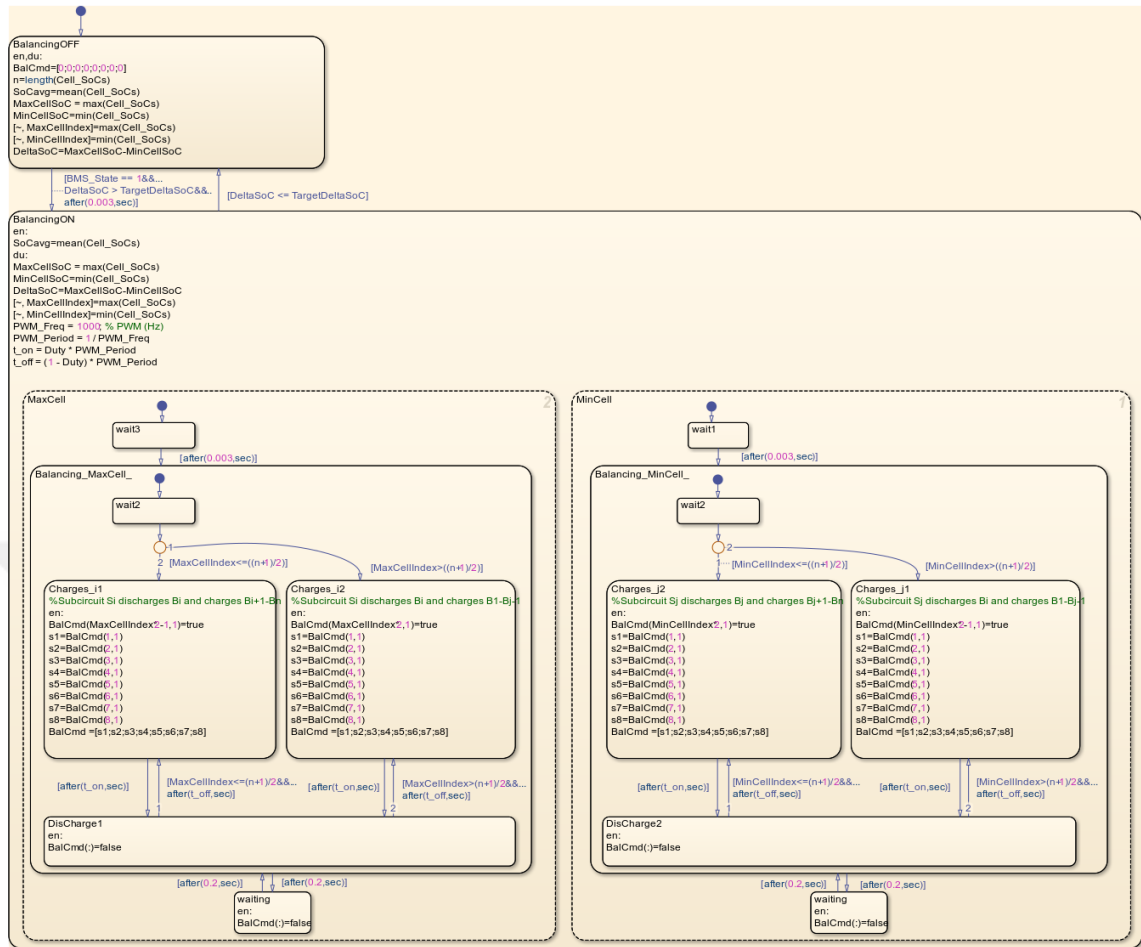
yöneterek L_i 'yi şarj eder. Minimum hücre indisi j , a bölümünde ise $S_{(j*2)}$ 'inci anahtarını yöneterek L_j 'yi , b bölümünde ise $S_{(j*2-1)}$ anahtarını yöneterek L_j 'yi şarj eder.



Şekil 3.16. Model devrenin dengeleme akış şeması

Devre modelindeki hücre SOC başlangıç değerlerine göre, dengeleme işlemine gerekip gerekmediğine karar verilir. Hücre voltajları, hücre dengesizliklerini belirlemek için kullanılırken hücre voltajı tabanlı kontrol stratejisi kullanılır.

Hücre dengesizliklerini belirlemek için zıt hücre SOC'leri kullanılır ve hücre SOC'sindeki dengesizlikler eşik değerinden (SOC_{Δ}) fazlaysa hücre SOC tabanlı kontrol stratejisi durumunda dengeleme işlemi gerçekleştirilir. Dengeleme sırasında hücre voltajları ve SOC'ler gerçek zamanlı olarak belirlenir ve karşılaştırılır ve dengelenmesi gereken hücre seçilir [28].



Şekil 3.17. Buck Boost Dönüştürücü Dengeleme Devre Modelinin Stateflow yapısı

3.4.3. Simülasyon Çıktıları

Bu bölümde, simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak ele alınmakta, Tablo 3.8’de simülasyon parametreleri listelenmektedir. Önerilen dengeleyicinin dengeleme performansını göstermek için dört adet lityum iyon pil ile dengeleme sistemi uygulanmıştır.

Dört bataryanın kapasite ve nominal gerilimleri aynı olmakla birlikte, SOC değerleri farklıdır. SOC farkları ve batarya kapasiteleri, simülasyon süresini en aza indirmek amacıyla seçilmiştir.

Simülasyonda kullanılan giriş parametresi olarak ayarlanabilen SOC değerleri tek indüktör ve Buck-Boost dönüştürücü tabanlı dengeleme yöntemlerinin model çalışmalarında iki yöntemin karşılaştırılabilmesi için aynı olmalarının daha iyi olacağı düşünülmüştür.

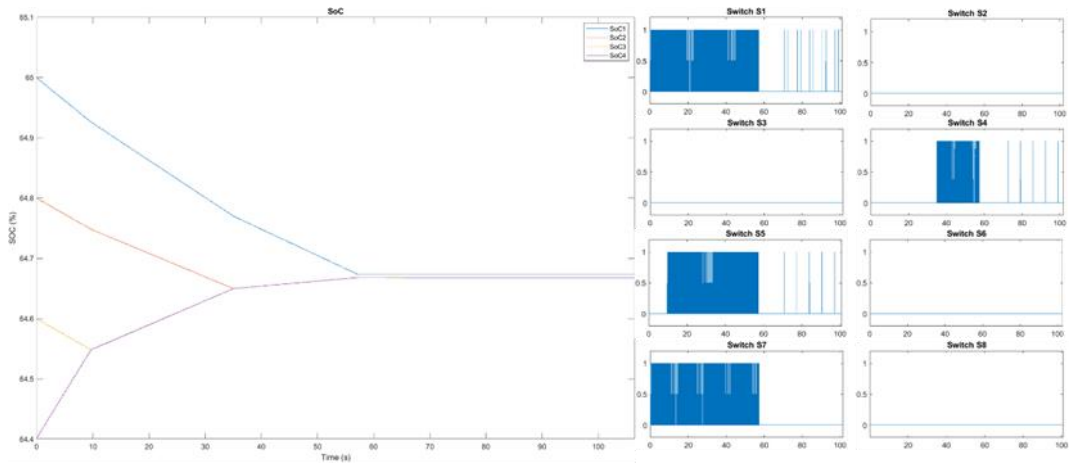
Tablo 3.8. Simülasyon Parametreleri

SoC1	%65
SoC2	%64.8
SoC3	%64.6
SoC4	%64.4
Nominal Gerilim	3.7V
Kapasite	2.6 Ah
İndüktör	330uH
Görev Döngüsü	Ayarlanabilir Görev Döngüsü (0.2 ile 0.5 arasında değişmektedir.)
PWM Frekansı	1kHz

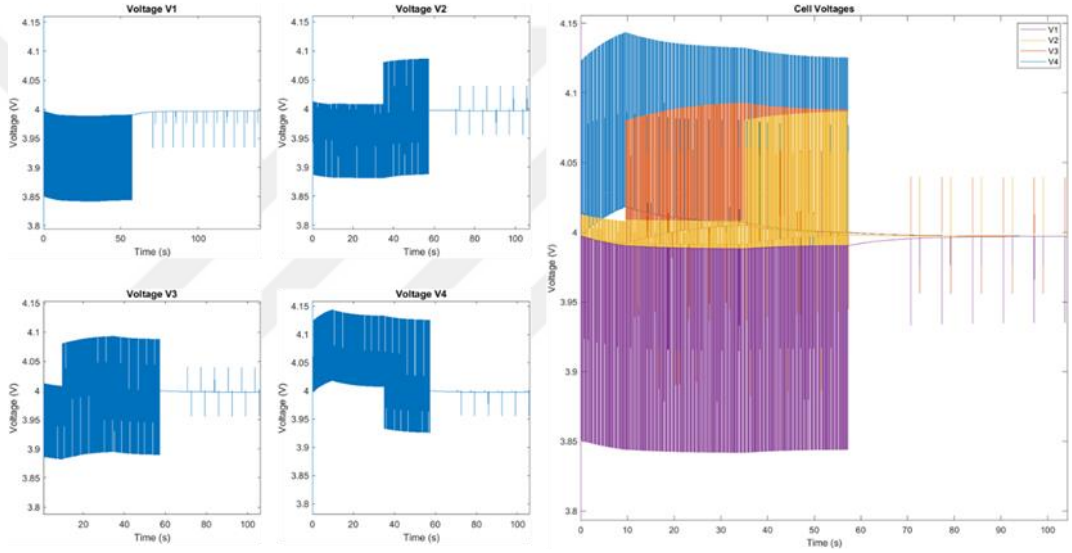
Tablo 3.8’de gösterildiği üzere en yüksek SOC değerli Hücre1, en düşük SOC değerli Hücre4’tür. Dengeleyicinin sırasıyla simülasyon ile edinilen hücre gerilim eğrisi, indüktör akım eğrisi, SOC dengeleme eğrisi anahtarlama durumları statik, şarj ve deşarj durumlarına göre sırasıyla Şekil 3.18, 3.19 ve 3.20’de verilmiştir.

Statik durumda herhangi bir yük yokken SOC dengeleme eğrisi Şekil 3.18.a’da gösterilmiştir ve dengeleme süresi yaklaşık 57.5 sn’dir. Şekil 3.16 ‘da sunulan akış şemasına göre anahtarlama davranışları Tablo 3.7’de yer almaktadır. Şekil 3.18.b’de görüldüğü üzere Hücre 1 deşarj edildiği süre boyunca hücre geriliminin zamanla azaldığı, Hücre 4 şarj edildiği süre boyunca geriliminin zamanla arttığı görülmektedir. Hücre1’in ilk gerilim değerinden düşüş gerçekleştirerek ve Hücre 4’ün ilk gerilim değerinden artış gerçekleştirerek dalgalanması normaldir. Şekil 3.18.c’de indüktörlerde depolanan akım değerleri gösterilmektedir. İndüktör akım eğrisinin ton süresince arttığı, toff süresince sifira ulaştığı dolayısıyla DCM davranışına göre hareket ettiği görülmektedir. Dengeleme sistemi, hücrelerin güvenli gerilim aralığında tutulmasını sağlamak amacıyla 2.8V ile 4.2V arasındaki gerilimlerde dalgalanmasına izin vermektedir.

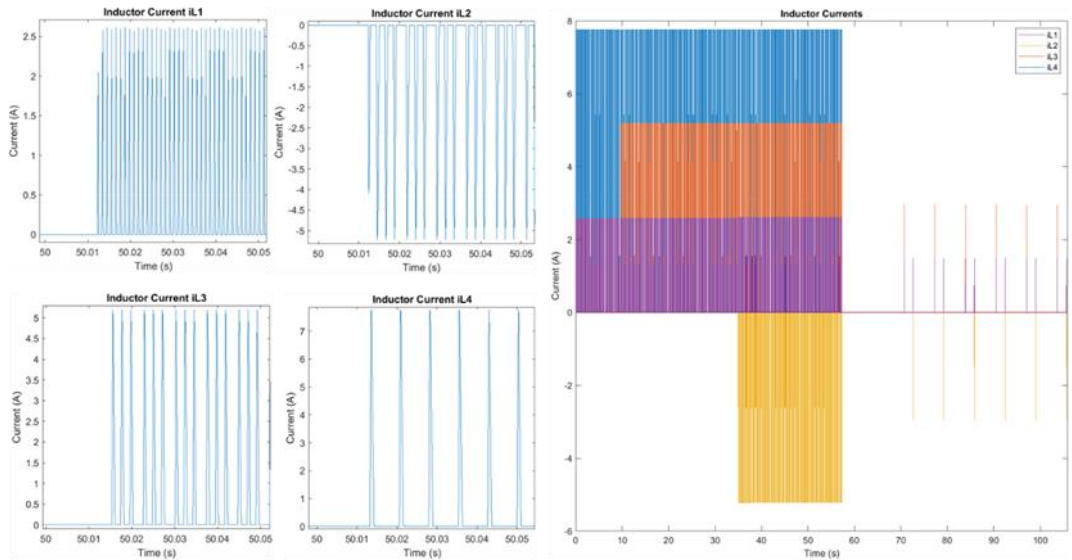
Her dengeleme döngüsünde, dengeleme süresi $t_{eq} = 0.03$ s ve bekleme süresi $t_{sd} = 0.03$ s’dir. Her dengeleme döngüsündeki bekleme süresi, hücrelerin polarizasyon voltajını ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Statik durumda görülen tepe akım değerleri i_{L1} için 2.5A, i_{L4} için 7.5A’dır. Simülasyon süresini kısaltabilmek ve analiz kolaylığı sağlayabilmek için indüktör şarj akımını nominal değerden yüksek tutulmuştur.



(a)

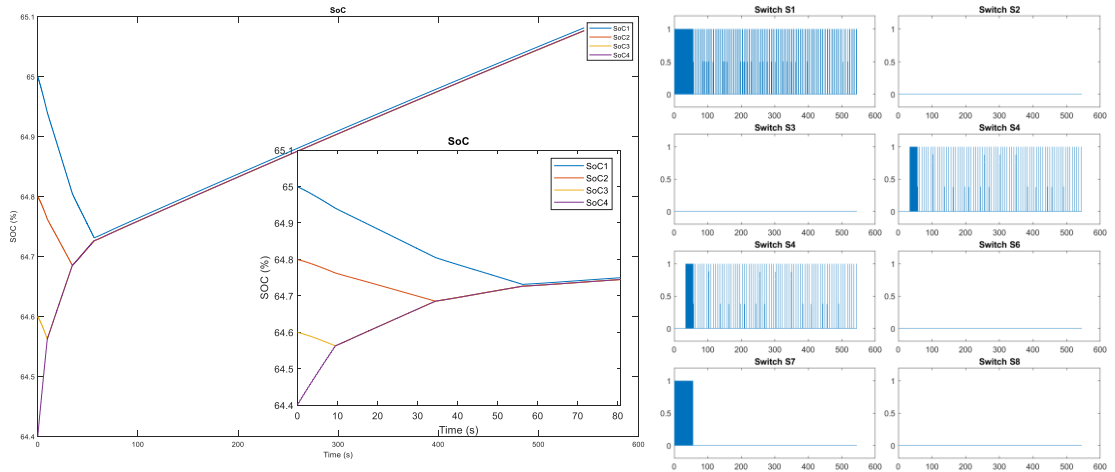


(b)

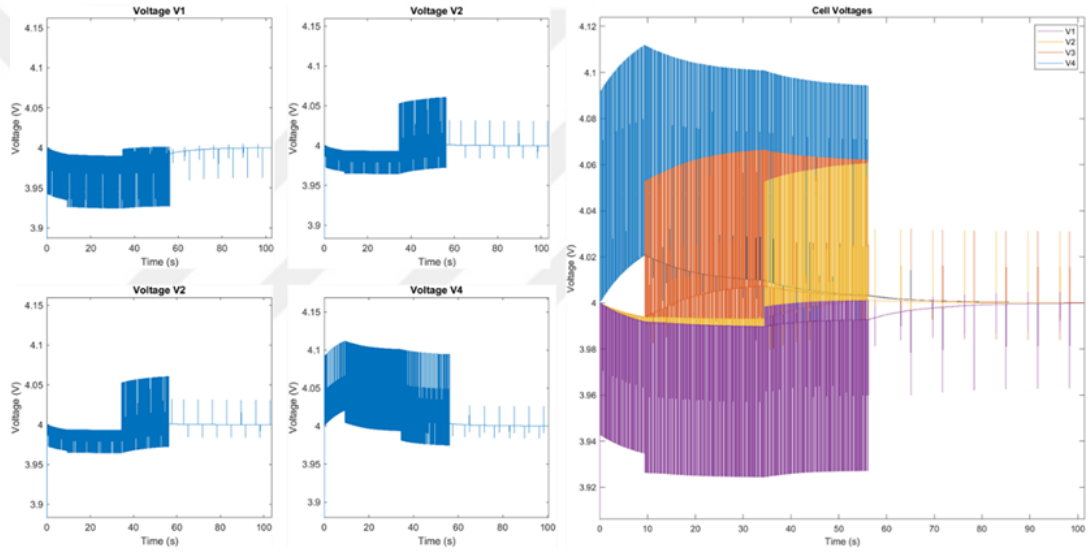


(c)

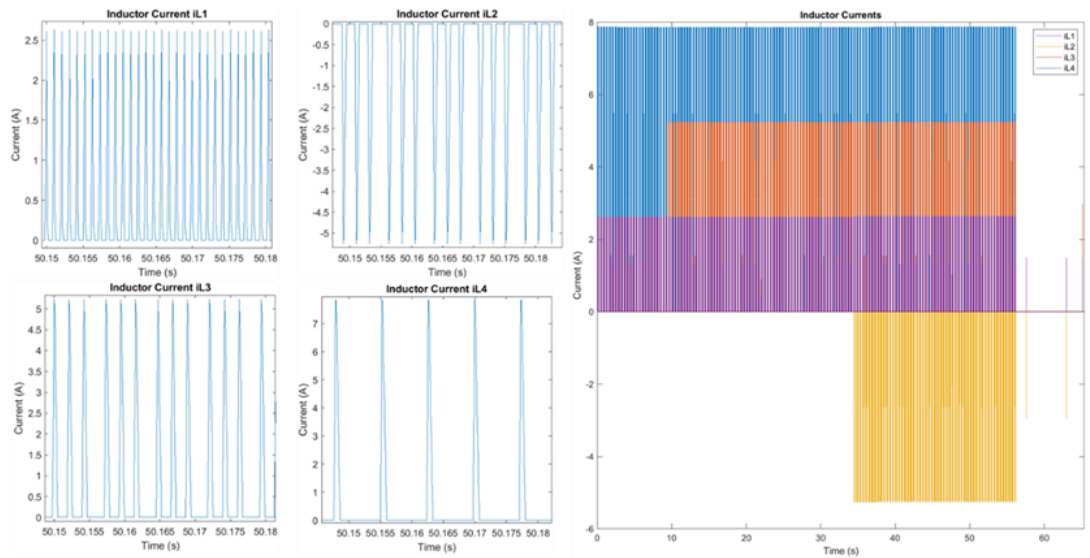
Şekil 3.18. Statik Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi



(a)

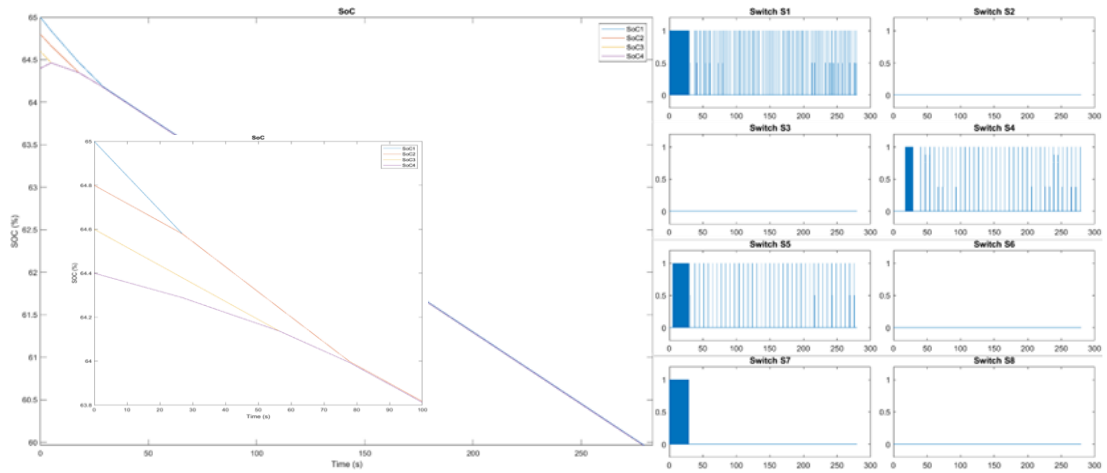


(b)

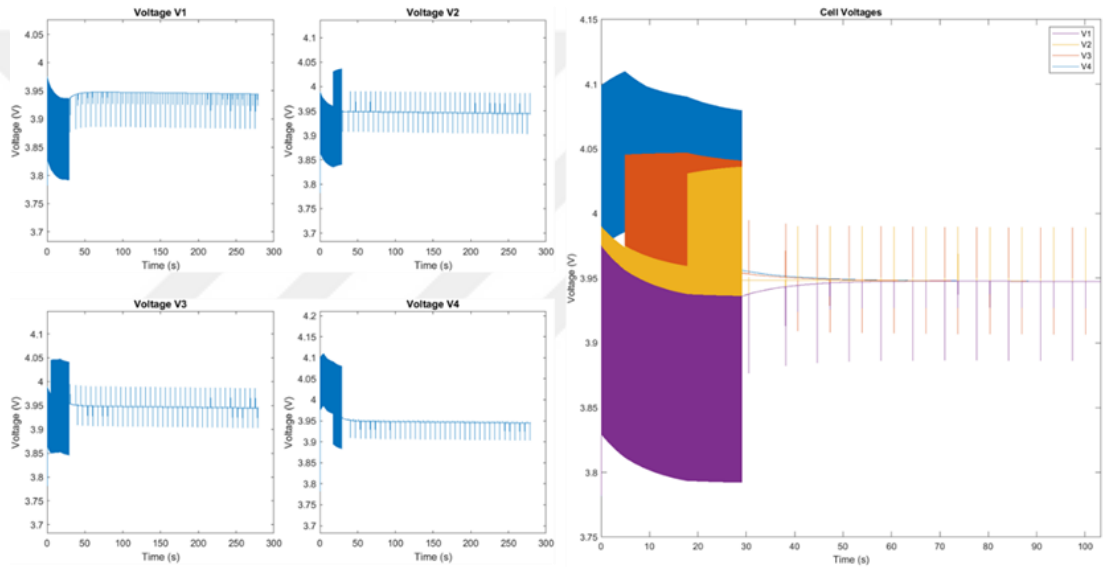


(c)

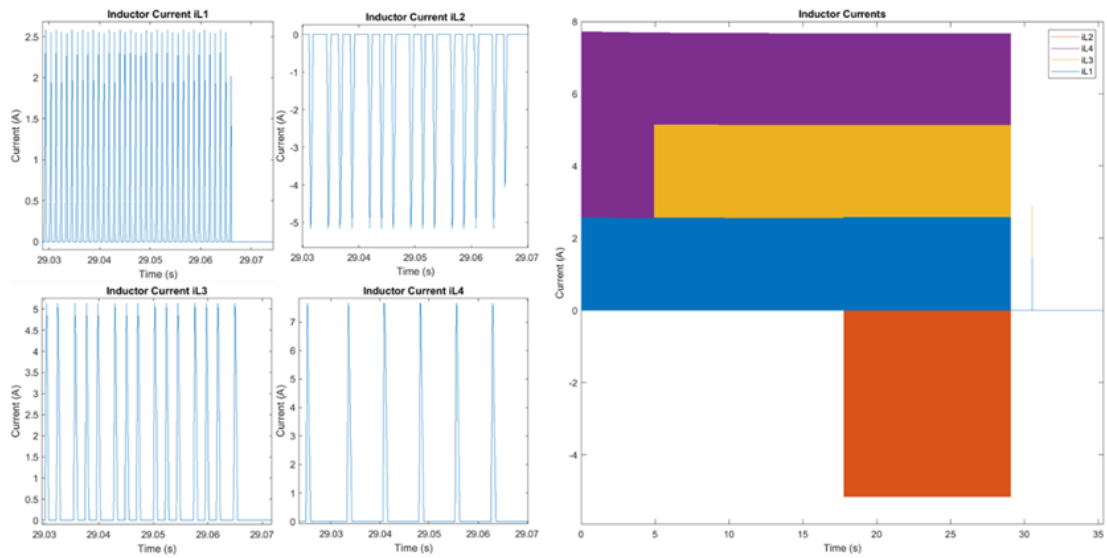
Şekil 3.19. Şarj Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.20. Deşarj Mod (a) SOC eğrisi (b) Hücre gerilim eğrisi (c) İndüktör akım eğrisi

3.4.4. Sonuç-Tartışma

Statik, şarj ve deşarj durumlarına ait hücre SOC değerleri, dengelemeye ulaştığı süre ve dengeleme verimliliği Tablo 3.9’da gösterilmektedir. Dengeleme verimliliği MATLAB simülasyonu için hesaplanmıştır ve hücrelerin dengeleme başlangıcındaki SOC değerleri ile dengeleme sonunda ulaşılan SOC değerleri dikkate alınarak, dengeleme verimliliği Denklem 3.8’e göre hesaplanmaktadır.

- Statik modda herhangi bir yük yokken yapılan dengeleme %99.95 verimlilikle gerçekleşmiştir.
- Şarj modunda verimlilik %100.04’dır; bu, sisteme dışarıdan enerji girişi olduğu için teorik değerleri aşan bir durumdur. Verimlilik değeri, sisteme dışarıdan enerji girişi olduğu için teorik değerleri aşan bir durumdur.
- Deşarj modunda ise sistem %99.189 verimlilik göstermiştir.

Tablo 3.9. Simülasyon Sonuçları Analizi

Parametreler	Statik Mod	Şarj Modu (16V)	Deşarj Modu (10Ohm)
SoC1 (%)	64.6730	64.7314	64.1819
SoC2 (%)	64.6680	64.7264	64.1769
SoC3 (%)	64.6681	64.7264	64.1769
SoC4 (%)	64.6681	64.7265	64.1769
Dengeleme süresi (saniye)	57.277	56.152	29.066
Dengeleme verimliliği (%)	99.95	100.04	99.189

Daha önceki incelenen çalışmaların karşılaştırması yapılarak nihai sonuca ulaşmak hedeflenmiştir. Tablo 3.9’da simülasyon sonuçları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Lu et al. [47] ve Shylla et al. [41] çalışmalarında simülasyon sürelerini kısaltmak için Lityum iyon pil parametrelerinden ve şarj/deşarj durumlarında gerilim/akım değerlerinden uzaklaşmışlardır.

Wang et al. [33] çalışmalarında gerilim yöntemi ile dengeleme uygulamıştır. Gerilim tabanlı dengelemenin uygulanması daha kolay olmasına rağmen, özellikle dinamik yük ve sıcaklık koşulları altında SOC tabanlı yöntemlere göre daha az hassastır. Ayrıca

çalışmada sistemin şarj ve deşarj durumu da incelenmemiştir ve doğrudan verimlilik ile ilgili sayısal değerlere ulaşılamamaktadır.

Ganesan et al. az sayıda dönüştürücü kullanarak verimlilik ve sadelik sağlamayı amaçlayan bir sistem önermiştir [38]. Çalışma, simülasyon ve deneysel doğrulama içermesi açısından kapsamlıdır. Ancak tek yönlü dengeleme modeli kullanılması nedeniyle, her hücre için ayrı bir Buck-Boost dönüştürücünün yer aldığı çift yönlü mimarilere kıyasla dengeleme süresi ve performans açısından sınırlı kalmaktadır.

Önerilen çalışmada geliştirilen yaklaşım çift yönlü enerji transferini uygulayarak ve daha önce yapılan çalışmalarını inceleyerek kapsamlı simülasyon çalışmaları uygulamıştır. Önceki çalışmalarda görülen sınırlamaların ötesine geçerek yüksek performans gerektiren uygulamalarda daha etkili bir çözüm sunma potansiyeli taşıdığı öngörülmektedir.

Tablo 3.10'da önceki çalışmalara ait parametreler, Tablo 3.11'de simülasyon çıktılarının yer verilmesi karşılaştırmayı kolaylaştırmak için düzenlenmiştir.

IBLBE, BPCSVE, SBBCEM modellerine ait verimlilik sonuçları çalışmalarda belirtilmemiştir.

Verimlilik ile kıyaslama NIBBC modeline göre yapıldığında önerilen çalışma verimlilik sonuçlarının NIBBC' e göre daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Kıyaslanmanın doğru olabilmesi için verimlilik hesabı NIBBC çalışmasındaki gibi yapılmıştır.

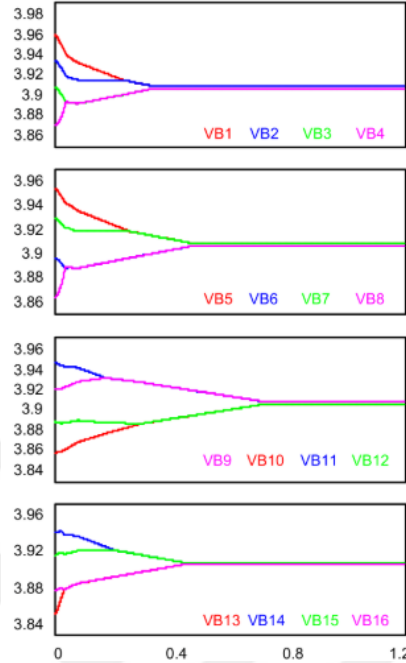
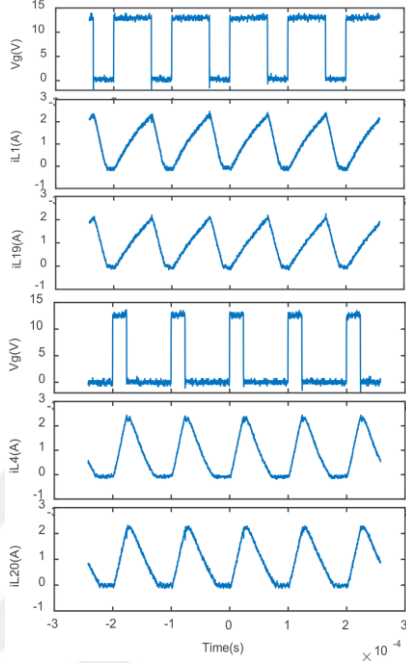
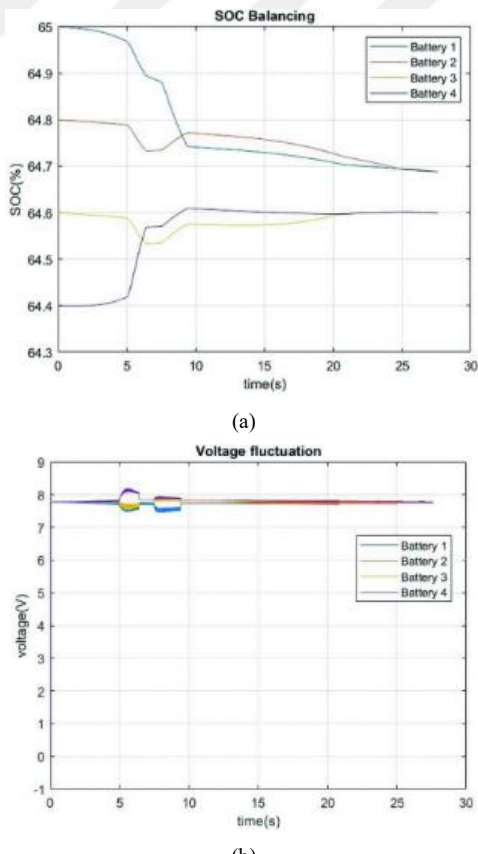
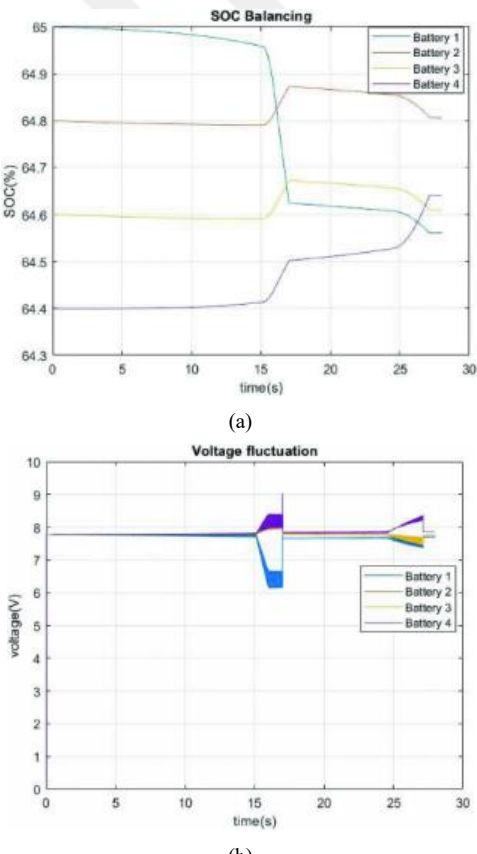
Önerilen çalışmadaki devre modeli IBLBE ile aynıdır fakat dengeleme yöntemleri SOC ve gerilim tabanlı olarak değişmektedir. Dengeleme süresi açısından kıyaslama yapılamamaktadır çünkü dengeleme frekansı IBLBE'de yüksek olduğundan simülasyon çok uzun sürdüğünden MATLAB üzerinde uygulanamamıştır. BPCSVE ile önerilen modelde SOC değerleri aynı tutulmuştur.

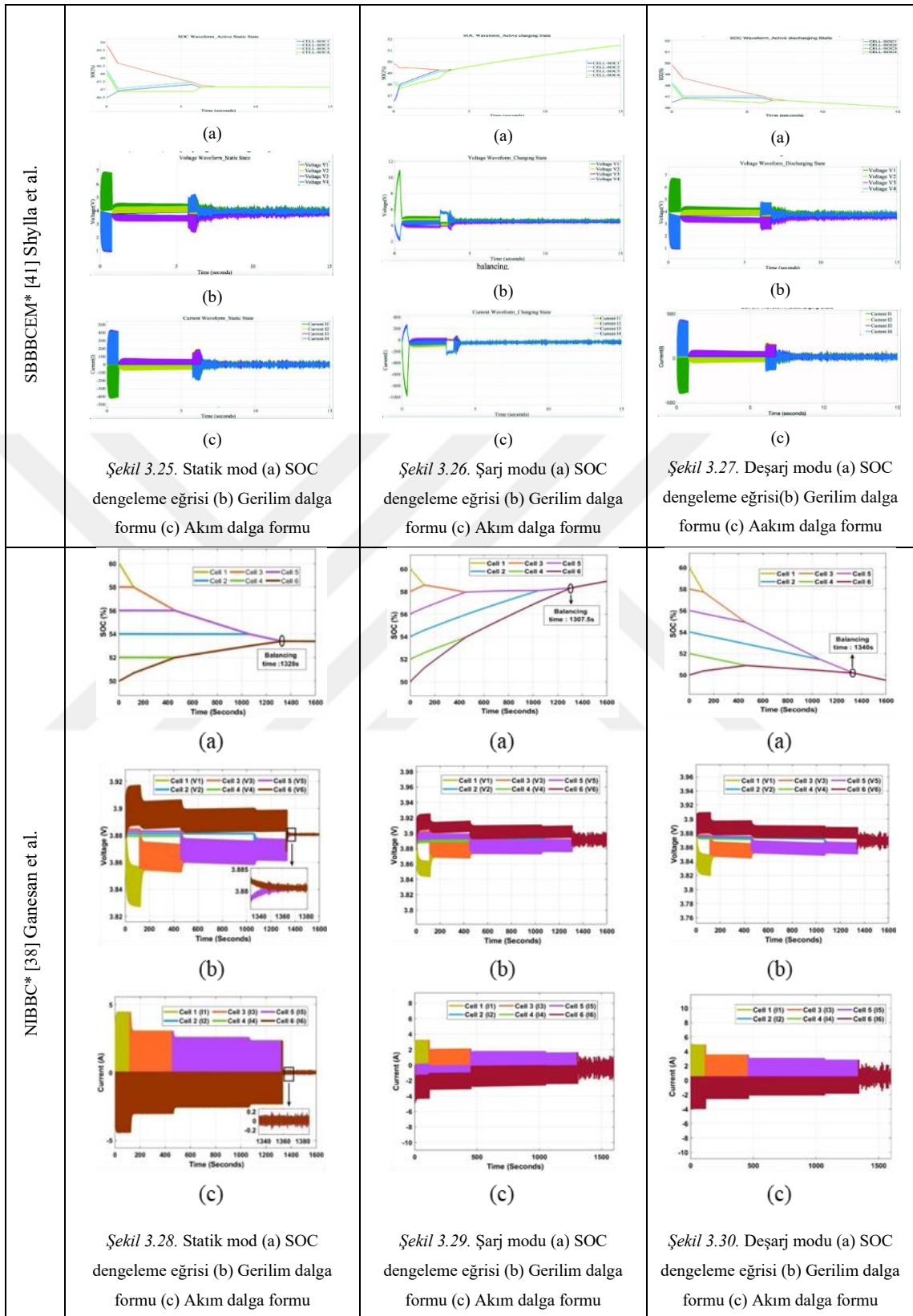
BPCSVE ait simülasyon parametreleri incelendiğinde lityum iyon pil nominal değerleri simülasyonu kolaylaştırmak için seçilmiştir. Dengeleme sürelerini SOC değerleriyle ilişkilendirebilmek için parametreler aynı olsa da dengeleme akımı, kullanılan devre bileşenlerinin aynı olmadığı unutulmamalıdır. Bu sebeple BPCSVE ile önerilen çalışma aynı SOC değerlerinde olduğunda BPCSVE statik durumda dengeleme süresinin daha kısa olması normaldir.

Tablo 3.10. Literatürdeki ve tezdeki çalışmaların simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

Parametre	IBLBE* [33] Wang et al.	BPCSVE* [47] Lu et al.	SBBBCEM* [41] Shylla et al.	NIBBC* [38] Ganesan et al.	Önerilen çalışma
H1 SOC	% 65	%65	% 46.50	%60	%65
H2 SOC	% 61	%64.8	% 48.20	%54	%64.8
H3 SOC	% 57	%64.6	% 49.80	%58	%64.6
H4 SOC	% 53	%64.4	%48	%52	%64.4
H5 SOC	-	-	-	%56	-
H6 SOC	-	-	-	%50	-
Pil	Sanyo lithium batteries	Lityum-iyon	Lityum-iyon	Lityum-iyon	Lityum-iyon
Pil kapasitesi	2.6 Ah	0.54Ah	0.54 Ah	2.2 Ah	2.7Ah
Nominal Gerilim	Sanyo ternary için 3.7V	7.2V	3.7V	3.6V	3.7V
Yük direnci	-	1k Ω	1 k Ω	-	10 Ω
Kapasitör	10 F	10 μ F	10 uF	40 μ F	-
İndüktör	Yaklaşık 100 uH	1 mH	1mH	14.2 μ H	330 μ H
Anahtarlama frekansı (f)	10 kHz	Belirtilmemiş	100 Hz	50 kHz	1 kHz
PWM duty cycle (D)	% 65	Ayarlanabilir	0.5	-	Ayarlanabilir
Statik dengeleme süresi (saniye)	0.7125	27	7.285	1328	57.277
Şarj durumunda dengeleme süresi (saniye)	-	-	3.953	1307.5	56.152
Deşarj durumunda dengeleme süresi (saniye)	-	-	7.91	1340	29.066
Verimlilik Statik (%)	-	-	-	97.05	99.95
Verimlilik Şarj (%)	-	-	-	106	100.04
Verimlilik Deşarj (%)	-	-	-	91.2	99.189

Tablo 3.11. Literatürdeki çalışmaların simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

IBLBE* [33] Wang et al.	 <p>Şekil 3.21. Statik modda 5 farklı modüle ait 4 adet seri hücrelerin gerilim yöntemi ile gerilim dalga formu.</p>	 <p>Şekil 3.22. Statik modda 2 farklı modüle ait hücrelerin gerilim yöntemi ile şarj ve deşarj akım dalga formu.</p>
BPCSVE* [47] Lu et al.	 <p>Şekil 3.23. Statik mod SOC-Gerilim yöntemine göre (a) SOC dengeleme eğrisi (b) Gerilim dalga formu</p>	 <p>Şekil 3.24. Statik mod SOC yöntemine göre (a) SOC dengeleme eğrisi (b) Gerilim dalga formu</p>



*IBL : indüktör tabanlı katmanlı çift yönlü dengeleme (inductor-based layered bidirectional equalizer)

*BPCSVE : Çift Yönlü PI Kontrollü SOC-Gerilim Dengeleme Sistemi (Bidirectional PI-Controlled SOC-Voltage Equalization System)

*SBBCEM : SOC Tabanlı Buck-Boost Hücre Dengeleme Modeli (SOC-Based Bidirectional Buck-Boost Cell Equalization Model)

*NIBBC : (Non-Inverting Buck-Boost Converter)

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma

Bu çalışmada aktif dengeleme yöntemleriyle yapılan çalışmalar kapsamlı olarak incelenmiş tek indüktör tabanlı ve buck boost tabanlı dengeleme topolojilerinin etkinliğini değerlendirmek için MATLAB-Simulink ortamında sistemin statik, şarj ve deşarj durumları için simülasyon çalışması yürütülmüştür. Aktif dengeleme topolojisini kontrol etmek için SOC tabanlı kontrol yöntemi uygulanmıştır. SOC tabanlı kontrol yöntemi, bataryanın kullanılabilir kapasitesini doğrudan temsil etmesi ve OCV ile olan güçlü ilişkisi sayesinde iç direnç veya kapasite farklılıklarından kaynaklanan hataları azaltarak terminal gerilimine dayalı yöntemlere kıyasla daha doğru ve tutarlı bir dengeleme sağladığı için tercih edilmiştir. Tüm sonuçlar, çalışma yapılan tek indüktör tabanlı ve Buck-Boost tabanlı devrelerin statik, şarj, deşarj durumlarında etkili bir dengeleme işlemi uygulayabileceğini desteklemiştir.

Tek indüktör tabanlı hücre dengelemede daha önce gerçekleştirilen çalışmalar simülasyon sonuçlarıyla birlikte incelenmiştir ve simülasyon parametreleri, dengeleme süreleri, dengeleme akımları yönünden karşılaştırma tablosu hazırlanmıştır. Bu şekilde tezde gerçekleştirilen model ile literatür karşılaştırması yapılmak istenmiştir. Geliştirilen modelde, diğer çalışmalara göre dengeleme süresi bakımından iyileşme görülmektedir.

Simülasyon sonuçlarına göre bu tezdeki tek indüktörlü devrenin statik, şarj ve deşarj modlarında sırasıyla 76.99 saniye, 76.97 saniye ve 77.72 saniyelik dengeleme süreleri literatürdeki modeller arasında Vardhan et al. [44] yaklaşık 70saniye; [46] yaklaşık 680 saniye karşılaştırılmıştır. Bu tezde, Vardhan et al. çalışmasında dengeleme akımına (8A) kıyasla daha düşük dengeleme akımı (yaklaşık 4.5-5A) ve daha büyük SOC farklarına

rağmen benzer sürede dengeleme sağlanmıştır. Song et al. [46] ile karşılaştırıldığında ise daha kısa bir dengeleme süresi elde edilmiştir.

Buck Boost tabanlı hücre dengelemede daha önce gerçekleştirilen çalışmalar simülasyon sonuçları ivedilikle incelenmiştir ve simülasyon parametreleri, dengeleme süreleri, verimlilik yönünden karşılaştırma tablosu hazırlanmıştır. Bu sayede bu tezde çalışılan devre modeliyle karşılaştırma yapmak mümkün olmuştur. Geliştirilen modelde, diğer çalışmalara göre iyileşme görülmektedir.

Simülasyon sonuçlarına göre Buck-Boost devresi, statik, şarj ve deşarj modlarında sırasıyla 57.27 saniye, 56.15 saniye, 29.06 saniyelik dengeleme süreleriyle tek indüktörlü devrenin sırasıyla 76.99 saniye, 76.97 saniye ve 77.72 saniyelik dengeleme sürelerine kıyasla yaklaşık %25 ila %63 oranında daha hızlı dengeleme gerçekleştirmiştir. Verimlilik açısından da Buck-Boost topolojisi; statik, şarj ve deşarj modlarında sırasıyla %99.95, %100.04 ve %99.19 verimlilikle çalışarak tek indüktörlü devrenin sırasıyla %99.90, %100.07 ve %98.91'lik değerlerine göre daha istikrarlı ve yüksek performans sergilemiştir.

Buck Boost tabanlı hücre dengeleme topolojisi ile indüktör tabanlı topoloji arasındaki karşılaştırma, Buck Boost tabanlı hücre dengeleme topolojisinin dengeleme hızı ve verimlilik açısından daha etkili olduğunu göstermiştir. Çalışmada kullanılan devre modelinde her bir hücre için dönüştürücü alt devresi bulunmaktadır. Bu durum hücreden hücreye dengeleme olanağı sağlamaktadır. Verimlilik ve dengeleme hızı açısından avantaj sağlasa da maliyet ve kontrol karmaşıklığı gibi dezavantajlara sahiptir. Bu yüzden dengeleme hızı ve verimliliğin elzem olmadığı uygulama alanlarında tek indüktör tabanlı aktif dengeleme yöntemi seçilebilir.

Ganesan et al. [38] tarafından sunulan NIBBC modeli, daha az dönüştürücü kullanarak sistemde sadelik ve enerji verimliliği sağlamayı hedeflemiştir. Ancak tek yönlü enerji aktarımı esasına dayandığı için performans ve dengeleme süresi açısından sınırlı kalmaktadır.

Bu tezde geliştirilen çift yönlü Buck-Boost mimarisi, benzer akım değerleriyle çalışmasına rağmen NIBBC modeli statik, şarj ve deşarj modlarında sırasıyla 1328 saniye, 1307.5 saniye, 1340 saniye dengeleme sürelerine göre çok daha kısa sürede

dengeleme sağlamıştır. Ancak, NIBBC modelinde başlangıçtaki SOC değerlerinin birbirinden daha uzak olması, dengeleme süresinin uzun olmasında etkili bir faktör olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Lu et al. [47] tarafından önerilen BPCSVE devre modeli, bu tezdeki yapıya oldukça benzemektedir. Karşılaştırmanın sağlıklı yapılabilmesi amacıyla simülasyonda uygulanan SOC başlangıç değerleri, BPCSVE çalışmasındaki değerlerle aynı seçilmiştir. Ancak BPCSVE modelinde kullanılan bazı parametrelerin (pil kapasitesi, yük direnci, indüktans vb.) idealize edilmesi nedeniyle dengeleme süresi bu tezdeki çalışmaya kıyasla daha kısa görünmektedir.

Buna ek olarak, hem Lu et al. hem de Shylla et al. [41] çalışmalarında simülasyon sürelerini kısaltmak amacıyla gerçek uygulama koşullarını yansıtmayacak pil parametreleri ile idealize edilmiş akım ve gerilim değerleri kullanılmıştır. Bu durum elde edilen dengeleme sürelerinin gerçek sistem koşullarında birebir karşılık bulamayabileceğini göstermektedir. Buna karşılık bu tezde kullanılan simülasyon parametreleri literatüre göre daha gerçekçi seçilmiş ve bu sayede hem yüksek performans hem de uygulamaya uygun güvenilir bir model elde edildiği öngörülmektedir. Ayrıca, kullanılan SOC tabanlı kontrol stratejisi sayesinde, dinamik yük ve sıcaklık değişimleri gibi koşullar altında bile dengeleme hassasiyetinin yüksek oranda korunabileceği düşünülmektedir. Bu yönüyle önerilen model, özellikle yüksek performans ve hızlı yanıt gerektiren uygulamalarda tercih edilebilecek güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

4.2. Sonuç ve Öneriler

Buck-Boost dönüştürücü ve tek indüktör tabanlı dengeleme yöntemlerinin tercih edilme nedeni aşağıda sıralanan avantajlara dayanmaktadır.

Aktif yöntemlerde kullanılan birçok topolojiye ilişkin literatürde karşılaştırma tabloları sunulmuştur. Aktif dengeleme sistemlerinde, dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 2.4'te verilmektedir. Tabloda Full-Bridge dönüştürücü yapısı ön plana çıksa da literatüre göre Buck-Boost dönüştürücüler, hücreler arası voltaj farkının düşük ancak dengeleme akım ihtiyacının yüksek olduğu durumlar [34] için uygun bir seçenek olarak belirtilmiştir. Bu yönüyle, kontrol karmaşıklığı ve donanım yoğunluğu daha fazla olan Full-Bridge gibi alternatif topolojilere kıyasla Buck-Boost yapılar daha sade bir mimari

sunmakta böylece sistemin daha kolay entegre edilebilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca Buck-Boost tabanlı yapıların yaygın şekilde çalışılmış olması, bu tezde elde edilen bulguların literatürle karşılaştırılabilir olmasını da sağlamıştır.

Öte yandan tek indüktörlü dengeleme yapıları Buck-Boost'a kıyasla daha az bileşen gereksinimi, düşük maliyet, basit kontrol algoritması ve daha az fiziksel alan ihtiyacı gibi avantajlara sahiptir. Bu yönüyle, dengeleme süresinin kritik olmadığı ve yüksek verimliliğin öncelikli olmadığı uygulamalarda pratik ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

Özetle batarya dengeleme sistemlerinin tasarımında yalnızca yüksek dengeleme verimliliği sağlamak yeterli değildir. Seçilecek topolojinin donanımsal karmaşıklığı, bileşen sayısı, kontrol algoritmasının uygulanabilirliği ve toplam sistem maliyeti de kapsamlı şekilde değerlendirilmelidir. Bu durumlar incelendiğinde aktif dengeleme yöntemlerinin tercihinde verimlilik, maliyet ve sistem karmaşıklığı arasında optimum bir denge kurulması, sistemin performansı ve uygulanabilirliği açısından öneme sahip olduğu söylenebilir.

Bu doğrultuda tez bulgularının geliştirilmesine katkı sunmak ve gelecekteki akademik çalışmalara yönlendirici olabilmek amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

Tek indüktör tabanlı dengelemede kullanılan daha küçük indüktör boyut ve maliyet açısından literatürdeki çalışmalara göre avantaj sağlıyor görünse de termal etkiler açısından değerlendirilmelidir. Daha sağlıklı karşılaştırmalar için hücre sayısı, kapasite ve SOC gibi parametrelerin benzer olması gerektiği düşünülmektedir.

Buck-Boost modlarında çalışan dönüştürücünün enerji dönüşüm karakteristikleri detaylı bir şekilde analiz edilmeli, dönüştürücü parametreleri ise sistem gereksinimlerine uygun olarak optimize edilmelidir. Bu sayede voltaj ve akım dalgalanmaları azaltılarak, sistemin genel enerji verimliliği artırılabilir.

Geliştirilen sistemde kullanılan her hücreye özel dönüştürücü yapısı, hücreler arası çift yönlü enerji transferine olanak sağlamak ve bu da dengeleme süresini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak bu yapı, donanımsal karmaşıklığı ve kontrol algoritmasının tasarım yükünü artırdığı için tasarım tercihlerinde sistemin hedeflenen uygulama alanı dikkate alınmalıdır.

Simülasyonlarda kullanılan piller, ideal bloklarla modellenmiştir. Gerçekçi çevresel koşulları (örneğin sıcaklık, yaşlanma, iç direnç değişimi) ve hücre dinamiklerini dikkate alan detaylı batarya modellerinin kullanılması SOC ve kapasite hesaplamalarında daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Bu doğruluk, dengeleme sürecinin daha hassas ve güvenilir hale gelmesine katkı sunacaktır.

Tezde kullanılan dengeleme verimliliği formülü şarj modunda %100'ün üzerinde değerler üretmiş olup bu durum sistemde dış enerji girişiyle açıklansa da enerji verimliliği tanımı gereği teorik olarak %100'ü aşamaz. Gerçek enerji verimliliğinin doğru şekilde yansıtılabilmesi için başlıca anahtarlama, iletim, pasif bileşen kayıpları gibi sistemdeki tüm kayıpların dikkate alınarak net giriş ve çıkış enerjileri üzerinden hesaplama yapılması gerekmektedir. Böylece verimlilik değerlendirmesi daha tutarlı hale gelecek ve sonuçların gerçek sistem performansını yansıtmaya gücü artacaktır.

Gelecekte yapılabilecek araştırmalarda geliştirilen dengeleme yapılarının donanım ortamında prototiplenerek test edilmesi, modelin simülasyon verileriyle karşılaştırılarak doğruluğunun değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, farklı hücre kimyalarına (örneğin LFP, NMC) sahip batarya sistemlerinde önerilen kontrol algoritmasının performansı test edilerek algoritmanın genel geçerliliği ve esnekliği de analiz edilebilir. Bu tür uygulamalar, çalışmanın endüstriyel uygulanabilirliğini artıracığı ve daha güvenilir batarya yönetim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Vishnumurthy, K. A., Girish, K. H., 2021. A comprehensive review of battery technology for e-mobility. **Journal of the Indian Chemical Society**, **98** (10): 100173.
2. Zou, Y., Lin, Z., Li, D., Liu, Z. C., 2023. Advancements in artificial neural networks for health management of energy storage lithium-ion batteries: A comprehensive review. **Journal of Energy Storage**, **73**: 109069.
3. Sugumar, H., 2021. Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology. **Energy Storage**, **3** (2).
4. Naveenkumar, P., Gunapriya, D., Sharma, V., 2023. An exhaustive investigation of battery management system (BMS). **3rd International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM 2023) Bildirileri**. (Web sayfası: https://www.researchgate.net/publication/370672695_An_Exhaustive_Investigation_of_Battery_Management_System_BMS), (Erişim tarihi: 20 Aralık 2023).
5. Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., Tan, N., 2021. A review study on battery management systems in electric vehicles. (Web sayfası: <http://dergipark.gov.tr/gujisa>), (Erişim tarihi: 12 Ocak 2025).
6. Liu, K., Peng, Q., Che, Y., Zheng, Y., Li, K., Teodorescu, R., Widanage, D., Barai, A., 2023. Transfer learning for battery smarter state estimation and ageing prognostics: Recent progress, challenges, and prospects. **Advances in Applied Energy**, **9**: 100117.
7. Nájera, J., Arribas, J. R., de Castro, R. M., Núñez, C. S., 2023. Semi-empirical ageing model for LFP and NMC Li-ion battery chemistries. **Journal of Energy Storage**, **72**: 108016.
8. Habib, A. K. M. A., Hasan, M. K., Issa, G. F., Singh, D., Islam, S., Ghazal, T. M., 2023. Lithium-ion battery management system for electric vehicles: Constraints, challenges, and recommendations. **Batteries**, **9** (3): 152.
9. Darikas, G., 2018. Design and implementation of a battery management system for lithium-ion batteries suitable for automotive applications. Aristotle University of Thessaloniki, Diploma Tezi, Thessaloniki. (Web sayfası: https://ikee.lib.auth.gr/record/298602/files/darikas_georgios_thesis.pdf), (Erişim tarihi: 30 Haziran 2025).

10. Rojas, O. E., Khan, M. A., 2022. A review on electrical and mechanical performance parameters in lithium-ion battery packs. **Journal of Cleaner Production**, **378**: 134381.
11. Saw, L. H., Ye, Y., Tay, A. A. O., 2016. Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. **Journal of Cleaner Production**, **113**: 1032-1045.
12. Ziegler, A., 2022. Possibilities and limitations of active battery management systems for lithium-ion batteries. Universitat Politècnica de Catalunya, Doktora Tezi, Barcelona. (Web sayfası: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/380367>), (Erişim tarihi: 30 Haziran 2025).
13. Yozgat, M., 2023. Hibrit insansız hava araçlarına (İHA) yönelik jeneratör sistemleri için batarya yönetim sistemi tasarımı. Yozgat Bozok Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Yozgat. (Web sayfası: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp?tezNo=813324>), (Erişim tarihi: 30 Haziran 2025).
14. Chang, W.-Y., 2013. The state of charge estimating methods for battery: A review. **Mathematical Problems in Engineering**, **2013**: 1-7.
15. Piller, S., Perrin, M., Jossen, A., 2001. Methods for state-of-charge determination and their applications. **Journal of Power Sources**, **96** (1): 113-120.
16. Eseosa, O., Nnaemeka, E. K., 2020. Optimizing state of charge (SOC), temperature, and state of health (SOH) of lithium-ion batteries. **Indian Journal of Engineering**, **17** (47): 237-249. (Web sayfası: https://www.researchgate.net/publication/340777901_Optimizing_State_of_Charge_SOC_temperature_and_State_of_Health_SOH_of_lithium-ion_batteries), (Erişim tarihi: 27 Temmuz 2025).
17. Wang, T., Zhu, C., Pei, L., Lu, R., Xu, B., 2013. The state of arts and development trend of SOH estimation for lithium-ion batteries. **9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2013) Bildirileri**, 359-364.
18. Kundakçı, İ. M., 2016. Elektrikli araç tasarımı ve batarya dengeleme sistemi. Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli. (Web sayfası: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=436203>), (Erişim tarihi: 13 Temmuz 2025).
19. Liu, W., Placke, T., Chau, K. T., 2022. Overview of batteries and battery management for electric vehicles. **Energy Reports**, **8**: 4058-4084.

20. Efe, Ş., Güngör, Z. A., 2021. Geçmişten günümüze batarya teknolojisi. **European Journal of Science and Technology Special Issue**, **32**: 947-955.
21. Huang, X., Zhou, R., Luo, X., Yang, X., Cheng, J., Yan, J., 2023. Experimental research and multi-physical modeling progress of zinc-nickel single flow battery: A critical review. **Advances in Applied Energy**, **12**: 100154.
22. Olabi, A. G., Abbas, Q., Shinde, P. A., Abdelkareem, M. A., 2023. Rechargeable batteries: Technological advancement, challenges, current and emerging applications. **Energy**, **266**: 126408.
23. Deng, D., 2015. Li-ion batteries: Basics, progress, and challenges. **Energy Science and Engineering**, **3** (5): 385-418.
24. Mohammadi, F., Saif, M., 2023. A comprehensive overview of electric vehicle batteries market. **e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, **3**: 100127.
25. Hummes, D. N., Hunt, J. D., Heeve, B. B., Schneider, P. S., Montanari, P. M., 2023. A comparative study of different battery geometries used in electric vehicles. (Web sayfası: <https://periodicos.ufes.br/lajer/article/view/42550/29367>), (Erişim tarihi: 21 Mart 2025).
26. Peng, J., Meng, J., Wu, J., Deng, Z., Lin, M., Mao, S., Stroe, D.-I., 2023. A comprehensive overview and comparison of parameter benchmark methods for lithium-ion battery application. **Journal of Energy Storage**, **71**: 108197.
27. Omariba, Z. B., Zhang, L., Sun, D., 2019. Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles. **IEEE Access**, **7**: 129335-129352.
28. Samanta, A., Chowdhuri, S., 2021. Active cell balancing of lithium-ion battery pack using dual DC-DC converter and auxiliary lead-acid battery. **Journal of Energy Storage**, **33**: 102109.
29. Mahanthappa, V. G., Vasanna, S. S., 2023. Modelling and simulation of DC/DC converter-based active cell balancing for battery management systems. Chalmers University of Technology, Yüksek Lisans Tezi, Gothenburg. (Web sayfası: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/856c57ea-2185-42df-891d-69e3484681e1/content>), (Erişim tarihi: 20 Ekim 2024).
30. Jiang, B., 2020. Active cell balancing algorithms in lithium-ion battery. Chalmers University of Technology, Yüksek Lisans Tezi, Gothenburg. (Web sayfası:

- <https://odr.chalmers.se/items/29ff4d58-6a5a-44d6-ac49-30236bdcd205>), (Erişim tarihi: 20 Ekim 2024).
31. Türksoy, A., 2022. Implementation of active cell balancing circuit for battery management system in electric vehicle. Çukurova University, Doktora Tezi, Adana. (Web sayfası: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=775814>), (Erişim tarihi: 30 Haziran 2025).
 32. Ketzer, M. B., Lima, A. M. N., Oliveira, A. C., Jacobina, C. B., 2013. Evaluating circuit topologies for battery charge equalization. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, 743-748.
 33. Wang, S., Kang, L., Guo, X., Wang, Z., Liu, M., 2017. A novel layered bidirectional equalizer based on a Buck-Boost converter for series-connected battery strings. **Energies**, **10** (7): 1011.
 34. Duraisamy, T., Kaliyaperumal, D., 2020. Active cell balancing for electric vehicle battery management system. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems**, **11** (2): 571-579.
 35. Dinh, M. C., Le, T. T., Park, M., 2024. A low-cost and high-efficiency active cell-balancing circuit for the reuse of EV batteries. **Batteries**, **10** (2): 61.
 36. Shylla, D., H. R., Swarnkar, R., 2023. Comparative analysis and evaluation of the different active cell balancing topologies in lithium ions batteries. **Journal of The Electrochemical Society**, **170** (8): 080501.
 37. Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., Van Mierlo, J., 2011. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. **2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2011) Bildirileri**, Chicago, IL, ABD, 1-7.
 38. Ganesan, S., Nagarajan, A. P., 2024. An efficient buck-boost converter for fast active balancing of lithium-ion battery packs in electric vehicle applications. **Computers and Electrical Engineering**, **118**: 109429.
 39. Najmabadi, A., 2013. Evaluation of active balancing algorithms and an improved method for a deployed active battery balancer as well as physical implementation. McMaster University, Yüksek Lisans Tezi, Hamilton. (Web sayfası: <https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/13267>), (Erişim tarihi: 26 Ocak 2025).

40. Ganesan, S., Nagarajan, A. P., 2023. A comprehensive review of various topologies and control techniques for DC-DC converter-based lithium-ion battery charge equalization. **International Transactions on Electrical Energy Systems, 2023**: 3648488.
41. Shylla, D., Swarnkar, R., Harikrishnan, R., Md Ali, S. H., 2023. Active cell balancing during charging and discharging of lithium-ion batteries in MATLAB/Simulink. **2nd International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS 2023) Bildirileri**, 201-208.
42. Waseem, M., Ahmad, M., Parveen, A., Suhaib, M., 2023. Battery technologies and functionality of battery management system for EVs: Current status, key challenges, and future perspectives. **Journal of Power Sources, 580**: 233349.
43. Li, C., Cui, N., Cui, Z., Wang, C., Zhang, C., 2022. Novel equivalent circuit model for high-energy lithium-ion batteries considering the effect of nonlinear solid-phase diffusion. **Journal of Power Sources, 523**: 230993.
44. Vardhan, R. K., Selvathai, T., Reginald, R., Sivakumar, P., Sundaresh, S., 2017. Modeling of single inductor based battery balancing circuit for hybrid electric vehicles. **IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Bildirileri**, 2293-2298.
45. Xu, X., Xing, C., Wu, Q., Qian, W., Zhao, Y., Guo, X., 2022. An active state of charge balancing method with LC energy storage for series battery pack. **Frontiers in Energy Research, 10**: 901811.
46. Song, S., Zhang, P., Yao, X., Yin, H., Lu, C., Li, B., 2021. Active equalization circuit and control design of series battery pack based on single inductance. **5th IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Energy Internet for Carbon Neutrality (EI2 2021) Bildirileri**, 3725-3729.
47. Lu, M., Fan, Y., Chong, B., 2020. A novel comprehensive SOC-voltage control scheme for lithium-ion battery equalization. **2020 IEEE International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC 2020) Bildirileri**, 1-6.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Sevgi Nur ŞAHBAZ

Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	Devam Ediyor
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği	2022
Lise	Melikgazi Necdet Taş Anadolu Lisesi, Kayseri	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2023-Halen	Ortem Elektronik, Kocaeli	2 yıl

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Şahbaz, S. N., Özdemir, A. T., 2024. Batarya yönetim sistemlerinde aktif dengeleme yöntemi, 175–185. **1st International Ohrid Scientific Researches and Innovation Congress (March 8–9, 2024, Ohrid, North Macedonia) Bildirileri**. (Web sayfası: <https://www.wosconkongreleri.com/wp-content/uploads/Makedonya-Kongre-Kitabi.pdf>), (Erişim tarihi: 17 Ağustos 2025).