

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ BİLİM DALI**

**LİTYUM İYON BATARYALARIN TERMAL YÖNETİMİ İÇİN SAYISAL
ÇALIŞMALAR**

Furkan DİLBAZ

**Danışman
Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL**



MANİSA-2023

**FURKAN
DILBAZ**

**LİTYUM İYON BATARYALARIN TERMAL
YÖNETİMİ İÇİN SAYISAL ÇALIŞMALAR**

2023

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Furkan DİLBAZ



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLO DİZİNİ	IX
TEŞEKKÜR.....	X
ÖZET	XI
ABSTRACT.....	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Lityum İyon ve Diğer Batarya Hücre Kimyaları	2
1.1.1. Kurşun (Pb)-Asit Bataryalar	4
1.1.2. Nikel-Kadmiyum Bataryalar.....	6
1.1.3. Nikel-Metal Hidrür Bataryalar	7
1.1.4. Lityum İyon Bataryalar.....	8
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	13
2.1. Lityum İyon Bataryaların Çalışma Prensibi.....	13
2.2. Lityum Hücre Form Faktörleri.....	14
2.2.1. Düğme Tipi Hücreler	14
2.2.2. Silindirik hücreler	15
2.2.3. Prizmatik hücreler	15
2.3. Batarya Performansını Etkileyen Faktörler.....	17
2.3.1. Hücre ve batarya tasarımı	17
2.3.2. Deşarj akımının çekilmesi.....	18
2.3.3. Deşarj sırasında batarya sıcaklığı.....	19
2.3.4. Batarya Yaşı ve Depolama Koşulları	20
2.4. Lityum İyon Bataryalarda Termal Sorunlar.....	21
2.4.1. Kapasite ve Güç Azalması	21
2.4.2. Kendinden Deşarj.....	22
2.4.3. Termal Bozunma.....	22
2.4.4. Elektrik Dengesi.....	24
2.4.5. Düşük Sıcaklık Performansı.....	24
2.5. Lityum iyon Bataryaların Sıcaklığa Bağlı Elektrokimyasal Özellikleri	24
2.5.1. Termodinamik Özellikler	25
2.5.2. Enerji Kayıpları.....	27
2.5.3. Sıcaklığın Dirençler Üzerindeki Etkileri.....	30
2.5.3.1. Ohmik Direnç.....	30

2.5.3.2. Yük Transfer Direnci	31
2.5.3.3. Yüzey film direnci	33
2.5.4. Sıcaklığa Bağlı Yaşlanma Mekanizmaları	34
2.5.5. Sıcaklık Dağılımının Etkisi	34
2.6. Lityum İyon Bataryalarda Isı Üretimi	35
2.6.1. Tersinir Isı Kaynağı	37
2.6.2. Tersinmez Isı Kaynağı	38
2.7. Batarya Termal Yönetim Sistemleri	38
2.7.1. Aktif Batarya Termal Yönetim Sistemleri	40
2.7.1.1. Hava Tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemleri	40
2.7.1.2. Sıvı Tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemleri	42
2.7.2. Pasif Batarya Termal Yönetim Sistemleri	46
2.7.2.1. Faz Değiştiren Malzeme Tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemleri	46
2.7.2.2. Isı Boruları Tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemleri	50
2.7.3. Hibrit Batarya Termal Yönetim Sistemleri	52
2.8. Nanoakışkanlar	53
2.8.1. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri	54
2.8.1.1. Yoğunluk	55
2.8.1.2. Özgül ısı kapasitesi	55
2.8.1.3. Isıl İletkenlik	56
2.8.1.4. Viskozite	58
2.9. Lityum İyon Bataryaların Modellenmesi	60
2.9.1. Newman Pseudo-2D (P2D) Modeli	64
2.9.2. Eşdeğer Devre Modeli (ECM)	65
2.9.3. NTGK Modeli	68
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER	71
3.1. Matematiksel Modeller	71
3.1.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)	71
3.1.1.1. Sonlu Hacimler Yöntemi	73
3.1.2. Batarya Model Denklemleri	74
3.1.3. Akış Denklemleri	77
3.1.4. Nanoakışkan Model Denklemleri	78
3.1.5. Faz Değiştiren Malzeme Denklemleri	80
3.2. Çalışmanın Doğrulanması	83
3.3. Batarya Geometrisi ve Termal Yönetim Sistem Tasarımı	86
3.3.1. Batarya Modül Geometrisi	87
3.3.2. Faz Değiştiren Malzemeler ile BTYS Geometrisi	88

3.3.3. Sıvı Soğutma Tabanlı BTYS Geometrisi.....	90
3.3.4. Hibrit Tabanlı BTYS Geometrisi.....	91
3.4. Mesh Yapısı ve Bağımsızlık Çalışması	92
3.5. Sınır Şartları	99
3.5.1. Batarya Modülü Sınır Şartları	101
3.5.2. Faz Değiştiren Malzemeler ile BTYS Model Sınır Şartları	103
3.5.3. Sıvı ile ve Hibrit BTYS Model Sınır Şartları.....	104
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	108
4.1. Batarya Modülünün Termal Performansının Değerlendirilmesi.....	108
4.1.1. Deşarj Hızının Batarya Modülünün Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi	108
4.2. FDM ile BTYS'nin Termal Performansının Değerlendirilmesi	111
4.2.1. Deşarj Hızının FDM ile BTYS'nin Soğutma Performansına Etkisi	111
4.2.2. Deşarj Hızının FDM'nin Sıvılaşma Oranına Etkisi	114
4.3. Sıvı ile BTYS'nin Termal Performansının Değerlendirilmesi.....	116
4.3.1. Reynolds Sayısı ve Nanoakışkan Katı Partikül Oranının Sıvı destekli BTYS'nin Soğutma Performansına Etkisi.....	116
4.3.2. Nanopartikül Şeklinin Sıvı ile BTYS Modelinin Termal Performansına Etkisi	121
4.4. Hibrit BTYS'nin Termal Performansının Değerlendirilmesi.....	124
4.4.1. Reynolds Sayısının Hibrit BTYS'nin Termal Performansına Etkisi	125
4.4.2. Hacim Oranının Hibrit BTYS'nin Soğutma Performansına Etkisi	128
4.4.3. Reynolds Sayısı ve Hacim Oranının Hibrit BTYS Modelindeki FDM'nin Sıvı Oranına Etkisi.....	131
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	135
KAYNAKÇA.....	140

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

BTYS	Batarya termal yönetim sistemi
BMS	Batarya yönetim sistemleri
CO	Karbon monoksit
CO₂	Karbondioksit
DoD	Deşarj derinliği
ECM	Eş değer devre modeli
EV	Elektrikli araçlar
FDM	Faz değiştiren malzeme
HEV	Hibrit elektrikli araçlar
Li	Lityum
Li⁺	Lityum iyonu
LiCoO₂	Lityum kobalt oksit
LiFePO₄	Lityum demir fosfat
LiNiO₂	Lityum nikel oksit
LMO	Lityum-manganez oksit
LTO	Lityum titanat oksit
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüpler
NCA	Lityum nikel kobalt alüminyum oksit
NiCd	Nikel-kadmiyum
NiMH	Nikel metal hidrür
NMC	Lityum nikel manganez kobalt oksit
NTGK	Newman, Tiedemann, Gu, and Kim
NO_x	Azot oksitler
OCP	Açık devre potansiyeli
Pb	Kurşun
PbO₂	Kurşun dioksit
PbSO₄	Kurşun sülfat
PHEV	Plug-in hibrit elektrikli araçlar
PID	Orantılı-integral-türev
Re	Reynolds Sayısı

SEI	Katı / elektrolit arayüzeyi
SoC	Şarj durumuna

SEMBOLLER

μ_i	Bileşiklerin kimyasal potansiyeli
Z_i	Lityumun etkin yükü
F	Faraday sabiti (96487 coulomb/mol)
ε	Elektriksel potansiyel
ΔG°	Gibbs serbest enerjisi
n	Transfer edilen iyon sayısı
E°	Elektromotor kuvveti
a_i	Moleküllerin aktivitesi
R	Gaz sabiti (8.314 J K ⁻¹ mol ⁻¹)
T	Sıcaklık (°C)
V	Volt (V)
E	Hücre potansiyeli (V)
η	Aşırı potansiyeli (V)
I	Şarj / deşarj akımı (A)
R_i	Hücre iç empedansı
C_B	Elektroaktif moleküllerin bulk konsantrasyonu
C_E	Elektrot konsantrasyonu
σ	Elektriksel iletkenliği
E_a	Aktivasyon enerjisini
k_B	Stefan–Boltzmann sabiti
R_{ct}	Yük transfer direnci
I_o	Değişim akımı yoğunluğu
A	Elektrot yüzey alanı
k_s	Reaksiyon standart hız sabiti
α	Transfer katsayısı
c	Katı faz konsantrasyonu
Ω	ohm (1/S)
Q_g	Toplam ısı üretim oranı (W)

Q_{rev}	Tersinir ısı üretimi (W)
Q_{irr}	Tersinmez ısı üretimi (W)
ΔS	Entropi değişimini
H_L	Gizli ısı (J/kg)
H	Entalpi
L	Elektrot kalınlığı (μm)
φ	Nanopartikül konsantrasyonu
ρ	Yoğunluk (kg.m ⁻³)
c_p	Özgül Isı kapasitesi (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
k	Termal iletkenlik (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
μ	Dinamik viskozite kg/m.s
ΔP	Basınç Düşüşü (Pa)
B	Termal Genleşme Katsayısı
Ṃ_f	Hacimsel debi (m ³ /s)
m_f	Kütlesel debi (kg/s)

ALT İNDİSLER

nf	Nanoakışkan
np	Nanopartikül
f	Temel akışkan
s	Katı
l	Sıvı
w	Su
gen	Üretilen
ech	Elektrokimyasal
ref	Referans durum

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı batarya ve enerji depolama cihazları için Ragon grafikleri.....	4
Şekil 1.2. Tipik bir kurşun asit batarya örneği.....	6
Şekil 1.3. NiMH batarya hücresi ve paketi.....	8
Şekil 2.1. Deşarj ve şarj olaylarının şematik gösterimi	13
Şekil 2.2. Düğme hücresi ve ana bileşenleri.....	14
Şekil 2.3. Silindirik hücre form faktörü (a) ve iç yapısı (b).....	15
Şekil 2.4. Prizmatik hücre form faktörü (a) ve iç yapısı (b)	16
Şekil 2.5. Kese hücre form faktörü (a) ve iç yapısı (b).....	17
Şekil 2.6. Deşarj eğrilerinin karakteristiği	19
Şekil 2.7. Artan sıcaklığın batarya kapasitesi üzerindeki etkisi.....	19
Şekil 2.8. Farklı sıcaklıklarda deşarj akımının batarya kapasitesi üzerindeki etkisi.....	20
Şekil 2.9. SEI tabakasının oluşumunun şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.10. LiFePO ₄ hücresinin farklı çalışma sıcaklıklarında kapasite azalması	22
Şekil 2.11. Termal bozunma aşamaları	23
Şekil 2.12. Lityum iyon pil ömrünün sıcaklık ve şarj hızı ile ilişkisi	25
Şekil 2.13. Tafel eğrisinin şematik olarak gösterimi.....	28
Şekil 2.14. Bir bataryanın tipik polarizasyon eğrisi.....	30
Şekil 2.15. Yük transfer direncinin sıcaklıkla değişimi	33
Şekil 2.16. Lityum iyon bataryalardaki ısı üretimi kaynaklarının şematik olarak gösterimi .	37
Şekil 2.17. Çevrim ömrünün sıcaklığa bağlı olarak değişimi.....	39
Şekil 2.18. Hava ile BTYS'lerin genel şematik gösterimi.....	42
Şekil 2.19. Aktif ve pasif sıvı termal yönetim için genel şematik gösterimi	43
Şekil 2.20. 18650 silindirik batarya hücrelerinin örnek soğutma stratejisi.....	45
Şekil 2.21. Faz değiştiren malzemelerin ısı depolama süreci	47
Şekil 2.22. Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması.....	48
Şekil 2.23. Isı borusunun çalışma prensibinin şematik olarak gösterimi.....	51
Şekil 2.24. Nanopartiküllerin Brownian hareketinin şematik gösterimi.....	56
Şekil 2.25. Partikül kümelenmesinin şematik gösterimi.....	57
Şekil 2.26. Sıvı katmanlaşmasının şematik gösterimi	57
Şekil 2.27. MSMD yaklaşımının şematik olarak gösterimi	61
Şekil 2.28. Hesaplama alanlarındaki çözüm değişkenleri ve hesaplama alanlarına aktarılan bağlantıların şematik gösterimi	62
Şekil 2.29. Lityum iyon bataryanın şematik gösterimi	65
Şekil 2.30. Yaygın olarak kullanılan eşdeğer devre modelleri; (a) R _{int} model, (b) Thevenin model, (c) empedans modeli, (d) çalışma zamanına dayalı elektrik devre model	66
Şekil 2.31. 6 parametrelili ECM modeli şematik gösterimi.....	67
Şekil 2.32. Paralel levha elektrotlar arasındaki akım akışının şematik diyagramı	68
Şekil 3.1. HAD işlem basamaklarının şematik gösterimi.....	72
Şekil 3.2. Batarya hücresinin kesit alanın şematik gösterimi	75
Şekil 3.3. Nanoakışkanda kullanılan nanoparçacık şekillerinin şematik gösterimi	78
Şekil 3.4. Doğrulama çalışmasında kullanılan sayısal çözüm ağı görselleri	83
Şekil 3.5. Farklı deşarj hızlarında ortalama sıcaklığın zaman ile değişiminin Panchal ve ark. çalışması ile karşılaştırılması	85
Şekil 3.6. Farklı deşarj hızlarında maksimum sıcaklığın Panchal ve ark. çalışması ile karşılaştırılması	85
Şekil 3.7. Batarya modülü ve termal yönetim sistemleri; (a) Batarya modülü, (b) FDM ile BTYS, (c) Sıvı ile BTYS ve (d) Hibrit BTYS	87
Şekil 3.8. Batarya hücresinin geometrik detayları.....	88

Şekil 3.9. FDM ile BTYS yönteminin geometrik detayları	89
Şekil 3.10. Soğutma plakasının geometrik detayları	90
Şekil 3.11. Serpantin kanalların geometrik detayları	91
Şekil 3.12. Hibrit BTYS'nin geometrik detayları	92
Şekil 3.13. Çözüm ağından bağımsızlık çalışması	94
Şekil 3.14. Sıvı Soğutma ile BTYS çözüm ağı	95
Şekil 3.15. Çözüm ağı görünüşleri (a) I bölgesinin, (b) II bölgesinin mesh görünümü	96
Şekil 3.16. Soğutma plakasının detay çözüm ağı görselleri	97
Şekil 3.17. Batarya modülünün zaman adımına göre sıcaklık değişimi	98
Şekil 3.18. Zaman adımına göre FDM'nin hacimce ortalama sıvılaşma oranının değişimi ..	99
Şekil 3.19. Sıvı ile BTYS Sınır Şartları	106
Şekil 3.20. Hibrit BTYS Sınır Şartları	107
Şekil 4.1. Farklı deşarj hızlarında bataryanın sıcaklığının zaman ile değişimi	109
Şekil 4.2. Farklı deşarj hızlarında batarya modülünün sıcaklık dağılımı	110
Şekil 4.3. FDM ile BTYS kullanılan batarya modülünün maksimum sıcaklığı üzerinde farklı deşarj hızlarının etkisi	112
Şekil 4.4. FDM ile BTYS'nin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi	113
Şekil 4.5. Deşarj hızının zamanla FDM'nin sıvılaşma oranına etkisi	114
Şekil 4.6. Deşarj hızının FDM'nin sıvılaşma oranına etkisi	115
Şekil 4.7. Maksimum sıcaklığın Re sayısı ve hacim oranı ile değişimi	117
Şekil 4.8. Soğutma ortamının batarya paketi sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi	118
Şekil 4.9. Re sayısı ve hacim oranının sıcaklık farkı üzerindeki etkisi	119
Şekil 4.10. Re sayısı ve hacim oranının pompa gücü üzerindeki etkisi	121
Şekil 4.11. Re 500 ve %2 hacim oranında nanopartikül geometrisinin maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi	122
Şekil 4.12. Re 500 ve %2 hacim oranında nanopartikül geometrisinin batarya paketi üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi	123
Şekil 4.13. Re 500 ve %2 hacim oranında nanopartikül geometrisinin basınç düşüşü üzerindeki etkisi	124
Şekil 4.14. Hibrit BTYS modelinde Re sayısının batarya üzerindeki maksimum sıcaklığa etkisi	125
Şekil 4.15. Hibrit BTYS modelinde Re sayısının sıcaklık farkına etkisi	126
Şekil 4.16. Hibrit BTYS modelinde Re sayısının batarya üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi	127
Şekil 4.17. Katı partikül hacim oranının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi, Re=750....	128
Şekil 4.18. Hacim oranının sıcaklık farkı üzerindeki etkisi, Re=750	129
Şekil 4.19. Katı partikül hacim oranının sıcaklık dağılımına etkisi, Hibrit BTYS	130
Şekil 4.20. %2 Al ₂ O ₃ oranında Re sayısının zamanla FDM'nin sıvılaşma oranına etkisi ...	131
Şekil 4.21. Katı faz içerisindeki sıvı faz dağılımına Re sayısının etkisi	132
Şekil 4.22. Hacim oranın zamanla sıvılaşma oranına etkisi, Re=750	133
Şekil 4.23. Hacim oranının FDM içerisindeki sıvı faz dağılımına etkisi	134

TABLO DİZİNİ

Tablo 1.1. Lityum bazlı kimya içermeyen batarya türleri	4
Tablo 1.2. Nikel bazlı batarya kimyalar	8
Tablo 1.3. Yaygın kullanılan li-iyon bataryaların genel performans özellikleri	12
Tablo 2.1. Literatürde bulunan farklı termal iletkenlik modelleri	58
Tablo 2.2. Literatürde bulunan nanoakışkan viskozite modelleri.....	60
Tablo 3.1. Newman P2D modelindeki yönetici denklemleri.....	76
Tablo 3.2. Basık küremsi şekle sahip parçacıklar için katsayılar	80
Tablo 3.3. Çeşitli parçacık geometrilerini içeren nanoakışkanın termal iletkenliğinin hesaplanması için denklem (3.16)'da yer alan katsayılar ve en boy oranları	80
Tablo 3.4. Denklem (3.17)'de çeşitli parçacık geometrilerine sahip nanoakışkanların viskozitesini hesaplamak için kullanılan katsayıları gösterir.	80
Tablo 3.5. Panchal ve ark. çalışmasında kullanılan batarya özellikleri	84
Tablo 3.6. LiFePO ₄ için Newman P2D parametreleri	84
Tablo 3.7. HAD analizlerinde genellikle bakılan kalite kriterleri ve değer aralıkları	93
Tablo 3.8. Sıvı soğutma ile BTYS'nin çözüm ağı kalite değerleri.....	94
Tablo 3.9. Çalışmada kullanılan bataryanın özellikleri	101
Tablo 3.10. Newman P2D model parametreleri	102
Tablo 3.11. Analizlerde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri	103
Tablo 3.12. RT-42 saf parafin malzemesinin termofiziksel özellikleri	104
Tablo 3.13. Temel akışkanın ve alümina nanopartikülün termofiziksel özellikleri	105
Tablo 4.1. Batarya modülündeki en yüksek sıcaklık ve sıcaklık farkı	111
Tablo 4.2. Soğutma ortamının batarya modülündeki en yüksek sıcaklığa etkisi.....	117
Tablo 4.3. Re sayısı ve hacim oranının basınç düşüşü üzerindeki etkisi	120

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince ve tez çalışmam boyunca bana her konuda destek olan,engin bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİL'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım sürecimde her adımda bana destek olan, motivasyon veren ve yönlendiren Numesys İleri Mühendislik AŞ'ye ve Akışkanlar birimindeki değerli çalışma arkadaşlarıma en derin teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olduklarını bildiğim, her konuda beni destekleyen sevgili aileme; annem Handan DİLBAZ ve kardeşim Serkan DİLBAZ'a gönülden teşekkür ederim. Bana her zaman ilham kaynağı olan bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bugün olduğum kişi olmamı sağlayan canım babam Ahmet DİLBAZ'a sonsuz teşekkür ederim.

Tez yazım sürecim boyunca beni biran bile yalnız bırakmayarak her adımda yanımda olan, yönlendirici ve cesaretlendirici sözleri ile bana motivasyon kaynağı olan Buse SEZER'e destekleyici tutumu, sabrı ve bu zorlu yolculuğu eğlenceli hale getirdiği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Furkan DİLBAZ

Manisa, 2023

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Lityum İyon Bataryaların Termal Yönetimi İçin Sayısal Çalışmalar

Furkan DİLBAZ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

Yapılan tez çalışmasında, li-iyon bataryaların ideal çalışma sıcaklığında çalışabilmeleri için Faz değiştiren malzeme (FDM), sıvı destekli ve hibrit olmak üzere üç farklı batarya termal yönetim sistem (BTYS) tasarımı yapılmıştır. BTYS'lerin etkinliği maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımı dikkate alınarak belirlenmiştir. 20 Ah kapasiteli batarya modülü için soğutmanın uygulanmadığı durumda üç farklı deşarj hızında (2C, 3C ve 4C) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ardından en uygun termal yönetim sisteminin belirlenmesi amacı ile FDM ile, sıvı destekli ve hibrit BTYS'nin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. FDM ile BTYS'nin etkinliği üç farklı deşarj hızında incelenmiştir. Sıvı destekli BTYS için su ve Al_2O_3 nanoakışkan olmak üzere iki farklı soğutma ortamının termal performansı dört farklı Reynolds (Re) sayısında (250, 500, 750 ve 1000), üç farklı hacim oranında (%0.5, %1 ve %2) ve dört farklı nanopartikül geometrisinde (basık küresel, blok, silindirik ve platelet) incelenmiştir. Hibrit BTYS'nin soğutma etkinliği dört farklı Re sayısında ve üç farklı hacim oranı dikkate alınarak incelenmiş olup soğutma kanallarının FDM üzerindeki ısı performansına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada yapılan tüm simülasyonlar için hesaplamalı akışkanlar yazılımı olan Ansys Fluent programı kullanılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde maksimum sıcaklıkta %28 oranında bir iyileşme sağladığı saptanmış olup bu oran FDM ve sıvı destekli soğutma tekniklerinde sırası ile %26 ve %27'dir. Ancak sıcaklık farkı incelendiğinde sadece hibrit ve faz değiştiren malzemenin optimum sıcaklık farkı olan 5 °C'nin altına düşürdüğü belirlenmiştir. Hibrit soğutma tekniği, FDM'nin erime başlangıç zamanını azalmasını ve katı faz içerisindeki sıvı faz dağılımını azaltılmasını sağlar ve parafin malzemesinin soğutma verimini artırır. Bu sebeple, hibrit BTYS'nin batarya modülünün soğutulmasında en uygun strateji olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batarya soğutma, HAD, nanoakışkan, nanopartikül şekli, termal yönetim

2023, 158 sayfa

ABSTRACT

M.Sc.

Numerical Studies for Thermal Management of Lithium-Ion Batteries

Furkan DİLBAZ

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

In the thesis study, three different battery thermal management systems (BTMS) were designed, including Phase-changing material (PCM), liquid-assisted and hybrid, in order for li-ion batteries to operate at the ideal operating temperature. The maximum temperature and temperature distribution have been analyzed to determine the effectiveness of BTMS. For the 20 Ah capacity battery module, simulations were carried out at various discharge rates (2C, 3C, and 4C) in the absence of cooling. An appropriate thermal management solution was then determined by doing simulations of FDM, liquid-assisted, and hybrid BTMS. The effectiveness of PCM and BTMS was studied at three different discharge rates. For liquid-supported BTMS, the thermal performance of water and Al_2O_3 nanofluid coolin medium was investigated at four different Reynolds numbers (Re) (250, 500, 750, and 1000), three different volume ratios (0.5%, 1%, and 2%) and four different nanoparticle geometries (Oblate spheroid, block, cylinder, and platelet). The cooling efficiency of hybrid BTYS was researched using four different Re values and three different volume ratios, as well as the effect of cooling channels on thermal performance on PCM. Ansys Fluent program, which is a computational fluids software, was used for all simulations performed in this study.

When the findings were evaluated, it was discovered that Hybrid BTMS produced a 28% improvement in maximum temperature, while PCM and liquid-assisted cooling approaches provided 26% and 27% improvements, respectively. When the temperature difference was investigated, however, it was discovered that only the hybrid and phase-changing materials lowered it below 5 °C, which is the appropriate temperature difference. By reducing the liquid phase distribution in the solid phase and the melting start time using the hybrid cooling technique, paraffin can be cooled more effectively. It has been discovered that hybrid BTMS is the best cooling method for the battery module because of this.

Keywords: Battery cooling, CFD, nanofluid, nanoparticle shape, thermal management

2023, 158 pages

1. GİRİŞ

Çevre kirliliği ve enerji problemi 20. Yüzyılın sonlarından itibaren iki önemli küresel sorun haline gelmiş ve fosil yakıta dayalı ulaşım sektörü küresel iklim değişikliğine ve kentsel hava kalitesinin bozulmasına öncülük eden ana faktörlerden biri olmuştur [1]. Bunun yanında Uluslararası Enerji Görünümü (2019) [2], özellikle ekonomik büyüme hızının daha yüksek olduğu ülkeler dünyanın enerji talebini arttıracığı yönünde görüş bildirmiştir. Bu durumda fosil yakıtlarının hızla tükenmesi sonucunda artan enerji talebi karşılanamayacak ve bunun bir sonucu olarak da enerji krizi ortaya çıkacaktır [3,4]. Bu sebeple, hükümetler bahsi geçen sorunların çözümü için sıfır emisyon parolası ile birlikte alternatif kaynaklara yönelim için büyük bir çaba sarf ettiler [5] ve bu doğrultuda, azot oksitler (NO_x), karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO_2) gibi zararlı gazların ve sera gazlarının emisyonunun azaltılması için elektrikli araçlar (EV), hibrit elektrikli araçlar (HEV) ve plug-in hibrit elektrikli araçların (PHEV) günlük kullanımının yaygınlaşmasını destekleyici bir dizi politika yürüttüler [1]. Bu destekler sonucunda, 2014 yılında, 2013 yılına kıyasla %50 büyümeyi temsil eden yaklaşık olarak 315.000 EV satıldı. 2015 yılında ise bu sayı yaklaşık olarak 550.000'di ve 2016 yılında, 2015 yılına kıyasla %40 oranının üstünde bir artışla 774.000 EV satışı gerçekleştirildi [6].

Enerji kaynaklarının giderek azalması ve geleneksel enerji kaynaklarının çevre kirliliğine sebebiyet vermesi ile araştırmacılar güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal, biyoyakıt vb. gibi alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak sera gazı emisyonunu %40 oranında azaltıldığı Anderson ve arkadaşları tarafından belirtilmiştir [7]. Ancak bu tür enerji kaynaklarında ki temel sorun, kesikli ve heterojen yapıları nedeni ile tekdüze olmayan enerji çıktılarının olmasıdır [8, 9]. Bu sebeple bu kaynaklardan üretilen enerjilerin depolanma ihtiyacı ortaya çıkar. Günümüzde, enerji depolanması için kullanılan ve bilinen ve en etkili araç bataryadır. Bu cihazlar aktif maddenin kimyasal enerjisini redoks reaksiyonu yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek elektrik enerjisini depolar ve daha sonra ihtiyaç duyulduğunda kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek kullanıma sunar [10]. Bahsi geçen bu sebeplerden dolayı bataryalar içten yanmalı motorlara alternatif bir enerji kaynağı olarak elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve plug-in hibrit elektrikli araçların güç ünitelerinde yerlerini

almaktadır. Bununla birlikte aracın performansı, maliyeti, güvenliği, kullanılan bataryanın kimyasına ve özelliklerine oldukça bağlıdır. Bu kriterler doğrultusunda piyasada bulunan ve potansiyel olarak yakın gelecekte de geliştirilmeye devam eden pil teknolojileri bu araçların bünyesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Örneğin, EV1 ve RAVEV araçlarının orijinal versiyonlarında kurşun-asit batarya, Peugeot 106 ve Citroen AX araçlarında nikel-kadmiyum batarya, Toyota Prius aracında nikel metal hidrit bataryalar ve Tesla Roadstar aracında lityum iyon bataryalar kullanılmaktadır [11].

Bu çalışmanın amacı, lityum-manganez oksit (LMO) bataryaların soğutulması için genellikle kullanılan faz değıştiren malzemeler, sıvı destekli ve hibrit batarya termal yönetim sistemlerinin (BTYS) termal performansını belirlemektir. Bu doğrultuda, üç farklı BTYS modeli geliştirilmiştir. Deşarj hızı (2C, 3C ve 4C), Reynolds sayısı (250, 500, 750, 1000), katı nanopartikül hacmi (%0.5, %1 ve %2) ve nanopartikül geometrisi (basık küresel, blok, silindir ve plak şeklinde) gibi çeşitli parametreler dikkate alınarak tasarlanan BTYS modellerinin soğutma performansı araştırılmıştır. BTYS modelinin tasarımı, bataryanın maksimum sıcaklık değerini ideal koşul olan 50 °C'nin altında tutmak, sıcaklık farkını 5 °C'nin altında tutmak ve sıcaklık dağılımını homojenleştirmek amacıyla yapılmıştır.

Bu tez çalışması, enerji depolama ve elektrikli araç endüstrisi gibi bataryaların sıkça kullanıldığı sektörlerle odaklanmaktadır. Bu sektörlerde, li-iyon bataryaların, kullanımındaki kısıtlamaları ortadan kaldırmak ve ömürlerini iyileştirmek için termal yönetim büyük bir öneme sahiptir. Çalışma, LMO batarya modülünün maksimum sıcaklığı, yüzeylerindeki sıcaklık farkı ve sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olan üç farklı termal yönetim tekniğini nümerik olarak araştırarak, uygun bir termal yönetim sistemini belirlemeyi hedeflemektedir. Bu özgün yaklaşımıyla çalışma, yenilikçi bir perspektif sunmaktadır.

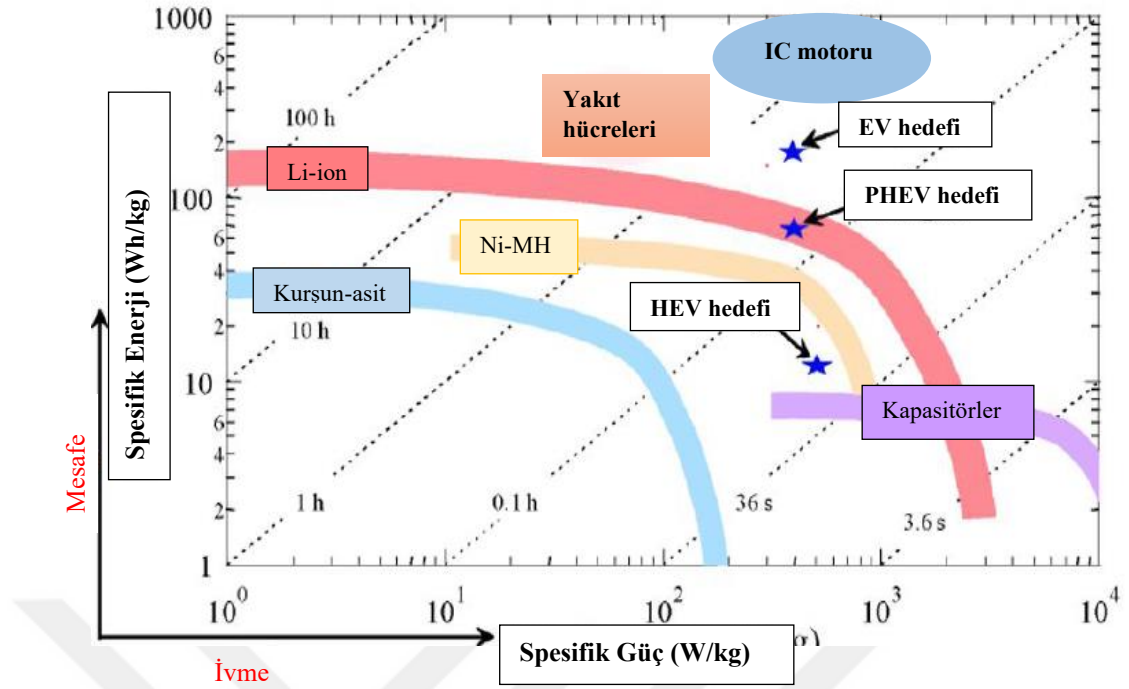
1.1. Lityum İyon ve Diğer Batarya Hücre Kimyaları

Bataryalar, Linden ve Reddy'e göre aktif maddelerinde bulunan kimyasal enerjiyi bir elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme (redoks) reaksiyon yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen cihazlar olarak tanımlanmaktadır [12].

Bunun anlamı hücreye bir akım uygulandığında, batarya hücresinin içinde bulunan anot ve katot arasında bir kimyasal reaksiyon meydana gelir ve elektrotlar arasında iyon geçişi sağlanarak elektrik enerjisi depolanır veya üretilir [13].

Temel olarak bir pilin yapısında elektrot (katot ve anot), elektrolit ve ayırıcı (separatör) olarak adlandırılan yapılar bulunmaktadır. Katot, pil hücresinin pozitif tarafı ve reaksiyon sırasında devreden geçen elektronları toplayan elektrot olarak tanımlanır. Katot tarafında reaksiyonlar sonucunda indirgenme gerçekleşir. Anot, Pil hücresinin negatif tarafı ve elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında elektronların üzerinden akarak devreye aktığı elektrot olarak tanımlanır. Anot tarafında, reaksiyonlar sonucunda yükseltgenme gerçekleşir. Ayırıcı, İki elektrotun (katot ve anot) birbirine temasını ortadan kaldırarak kısa devre oluşmasını engeller ve iyon geçişine izin verir. Elektrolit, pil içerisinde iyonlar aracılığı ile elektrotlar arasında yük aktarımını sağlayan ortamdır. Çeşitli tuzların su, baz veya asitler ya da organik çözücülerde çözünmesi ile meydana gelir [11].

Bataryalar genel olarak, birincil ve ikincil olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır [13]. Birincil bataryalar, şarj edilemeyen, tek kullanımlık piller olarak tanımlanır. Birçok ev cihazında kullandığımız basit alkalin piller birincil bataryalara örnek olarak verilebilir. İkincil bataryalar ise boşaldıktan sonra tekrar tekrar şarj edilebilen, çok amaçlı pillerdir. Bataryada gerçekleşen reaksiyonun tersinir olmasından dolayı bu tip piller şarj edilip tekrar kullanılabilir [11]. Şarj edilebilir bir pilin ömrü veya kullanımı, kimyasına ve çalışma profiline bağlıdır. Şekil 1.1’de yaygın olarak kullanılan enerji depolama cihazları Ragon grafiğinde gösterilmektedir [13]. Çeşitli batarya türleri sahip oldukları kimya yapılarından dolayı farklı performans özelliklerine sahiptir. Bu nedenle her bir batarya türünün kullanıldığı uygulama alanları farklılık gösterir. Tablo 1.1’de yaygın olarak kullanılan lityum bazlı kimya içermeyen batarya türleri karşılaştırılmıştır [13].



Şekil 1.1. Farklı batarya ve enerji depolama cihazları için Ragon grafikleri [10]

Tablo 1.1. Lityum bazlı kimya içermeyen batarya türleri [13]

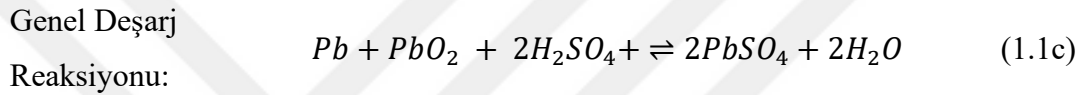
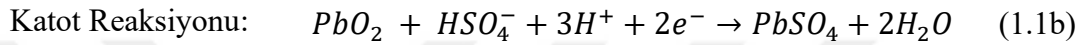
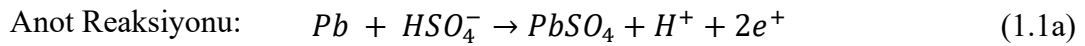
	Kurşun-Asit	Nikel-Kadmiyum	Nikel Metal Hidrit
Spesifik Enerji (Wh/kg)	30-40	40-60	30-80
Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	60-70	50-150	140-300
Spesifik Güç (W/kg)	60-180	150	250-1000
Güç Yoğunluğu (W/L)	100	210	400
Nominal Voltaj	2	1.2	1.2
Çevrim Ömrü	300-800	1000-2000	1000-2500
Çalışma Sıcaklık Aralığı (°C)	-20 °C- 60 °C	-40 °C- 60 °C	-20 °C- 60 °C

1.1.1. Kurşun (Pb)-Asit Bataryalar

Günümüzde en yaygın kullanılan pil kimyalarından biri olan kurşun-asit pillerin ilk pratik versiyonu 1860 yılında, Fransız fizikçi Gaston Planté (1834-1889) tarafından icat edildi [12]. Bir kurşun asit batarya, kurşun ve sülfürik asitten yapılmış bir macunla kaplanmış bir grup kurşun levha veya kurşun ızgaradan oluşur. Bu plakalar daha sonra seri olarak bağlanır ve elektrolit görevi gören bir asit çözeltisine daldırılır. Burada pozitif plakalar (katot) kurşun dioksit (PbO_2), negatif plakalar ise

kurşun (Pb) içerir. Ayrıca plakaların birbirlerine temas ederek kısa devre oluşmasını önlemek içinde çoğunlukla plastik ayırıcılar bu batarya kimyasında kullanılır. [13].

Bir Pb-asit pil deşarj işlemi sırasında, anot malzemesi olan kurşun değerlik yükünü değiştirerek elektronların serbest kalmasına ve kurşun sülfat ($PbSO_4$) kristallerinin oluşmasına neden olur. Bu işlem (deşarj) sonrasında, her iki elektrot da kurşun sülfata ($PbSO_4$) dönüşerek elektrolit çözeltisinin sülfat iyonlarını tüketecektir [11]. Bu bataryaya ait elektrokimyasal reaksiyon denklem 1.1’de gösterilmiştir [11].



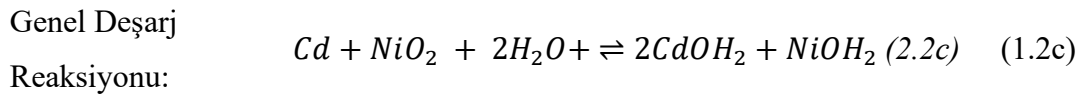
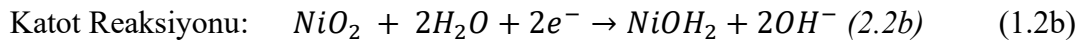
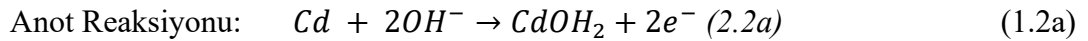
Kurşun-asit piller yüksek güç yoğunluğuna, yüksek verimliliğe (%70 – 90) ve düşük maliyete (300-600\$/kWh) sahip olmalarına rağmen düşük enerji yoğunluğu, düşük çevrim ömürleri ve pil kimyasının çevrim ömrünü daha da kısaltan yüksek akımlarla şarj etme potansiyelinin düşük olması nedeni ile kullanımı sınırlıdır. [14] Günümüzde kurşun-asit piller, yüksek güç kapasiteleri nedeni ile araçlarda motor çalıştırma, aydınlatma ve ateşleme uygulamalarında kullanılan standart akülerdir. Bununla birlikte, forkliftler gibi bazı endüstriyel uygulamalarda ve e-bisiklet gibi son derece düşük maliyet gerektiren sektörlerde de sıklıkla kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 1.2’de tipik bir kurşun asit batarya gösterilmektedir. Kısacası kurşun-asit bataryalar yüksek güç yoğunluğu ve düşük çevrim gereksinimleri gerektiren uygulamaların yanında ağırlık ve boyutun sorun olmadığı ve maliyet duyarlılığının öneminin bulunmadığı uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [12, 13].



Şekil 1.2. Tipik bir kurşun asit batarya örneği

1.1.2. Nikel-Kadmiyum Bataryalar

Nikel-kadmiyum (NiCd) bataryalar, dayanıklı ve maliyetlerinin düşük olması nedeniyle piyasada oldukça ünlü olan bir başka pil türüdür [15]. Bir NiCd pilin yapısında bulunan pozitif elektrot (katot) Ni(OH)_2 ve negatif elektrot (anot) ise kadmiyum (Cd) metalini içermektedir [9, 15]. Tam hücre deşarj işlemi sırasında pozitif ve negatif elektrotlarda meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar denklem 1.2' de gösterilmiştir [16].

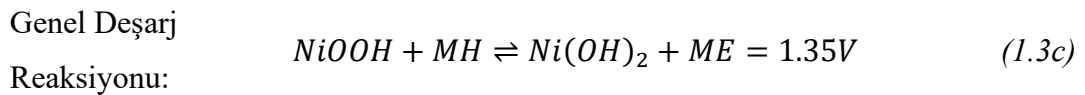
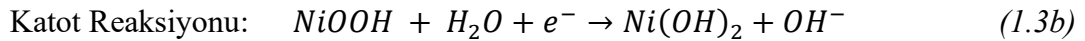
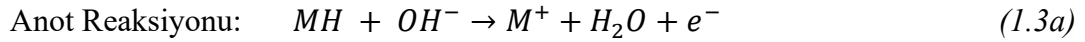


NiCd tipi bataryalar şarj sürelerinin kısa olması ve düşük sıcaklıklarda iyi çalışabilmeleri sebebiyle taşınabilir elektrikli süpürgeler, tıraş makineleri kablosuz telefonlar gibi yüksek güç gereksinimine ihtiyaç duyan uygulamalarda tercih edilirler. [11]. Buna karşın bu batarya kimyasının karşılaştığı en büyük sorunların başında, Lityum iyon bataryalar ile kıyaslandığında nispeten düşük enerji yoğunluğuna ($\sim 40\text{-}60 \text{ Wh/kg}$) sahip olmaları ve hafıza etkisi gelmektedir [13, 15]. Hafıza etkisi pilin alt kesme gerilimine (tam deşarj) kadar deşarj edilmeden şarj edildiğinde ilk kapasitesini vermemesi olarak tanımlanmaktadır [9]. Bunun anlamı kısmi deşarj işleminden sonra

tekrar şarj edildiğinde kapasitesini kaybeder. Hafıza etkisinden dolayı bu pil türünün kullanıldığı uygulamalar zaman zaman tamamen deşarj edilmelidir. Yukarıda bahsedilen bu sebeplerden dolayı NiCd batarya kimyası otomotiv sektöründe geniş bir pazar bulamamış ancak tüketici elektroniği ve hafif raylı sistem uygulamaları için oldukça uygun olduğu görülmektedir [13].

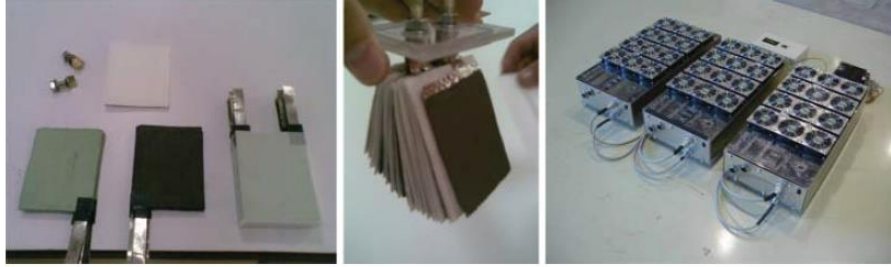
1.1.3. Nikel-Metal Hidrür Bataryalar

Kadmiyum metalinin zehirli ve çevreye zararlı olmasından kaynaklanan alternatif arayışlar sonucunda 1990 yılında Japon şirketi Sanyo nikel metal hidrür (NiMH) pillerin tanıtımını gerçekleştirmiştir. [13, 15]. NiMH pillerin nominal çalışma voltajı NiCd pillerin nominal çalışma voltajı (1.2V) ile aynıdır [9]. Bu piller isimlerini anottaki metal hidrür ve katodunda yer alan Ni(OH)₂'ten almaktadır [9]. Buradaki kimyasal reaksiyon nikel oksit anot ve metal hidrür katot tarafından hidrojenin salınıp absorplanması işlemine dayanmaktadır [11]. Şekil 1.3'de NiMH batarya hücresi ve paketi gösterilmiştir. Pil kimyasının deşarj işlemi sırasında negatif ve pozitif elektrotlarda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar denklem 1.3'de gösterilmektedir [11].



NiMH piller şarj edildiğinde anotta bulunan alaşım hidrojen iyonlarını absorplar ve bunları katı halde saklar. Bu durum kendi kendine deşarj oranını artırarak NiMH pilleri elverişsiz hale getirir. Öte yandan NiMH kimyaya sahip bataryalar NiCd kimyalara kıyasla kısmi deşarj kullanımı altında çok düşük voltaj depresyonuna (Hafıza etkisi) sahiptir [11]. NiMH bataryaların enerji içeriği NiCd bataryalara göre daha yüksek olduğundan cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, tıraş makineleri gibi taşınabilir elektronik cihaz uygulamalarında kullanılmaktadır. NiMH bataryalar ilk olarak General Motors tarafından tanıtılan EV1 elektrikli aracının yapısında yer alır. Bunun yanında çoğunlukla Toyota tarafından üretilen hibrit elektrikli araç olan Toyota

Prius aracının batarya takımının yapısında kullanılmaktadır [11, 13]. Bunun yanında, Tablo 1.2’de piyasada en yaygın olarak kullanılan Nikel bazlı batarya kimyaları ve kullanım alanları gösterilmektedir.



Şekil 1.3. NiMH batarya hücresi ve paketi [11]

Tablo 1.2. Nikel bazlı batarya kimyalar [13]

	Nikel Metal Hidrür	Nikel Kadmiyum	Nikel Çinko	Nikel Hidrojen
Batarya Kimyası	NiMh	NiCd	NiZn	NiH ₂
Spesifik enerji (Wh/kg)	30-80	40-60	70-110	50-65
Enerji yoğunluğu (Wh/L)	140-300	50-150	130-350	55-110
Spesifik güç (W/kg)	250-1000	150	280-2500	-
Güç yoğunluğu (W/L)	400	210	420-7000	-
Nominal voltaj (V)	1.2	1.2	1.6	1.4
Çevrim Ömrü	500-1500	1000-2000	300-900	>2000
Kendinden deşarj (% ay başına)	30%	20%	20%	-
Çalışma sıcaklığı aralığı (°C)	-20 ila +60	-40 ila +60	-20 ila +50	-

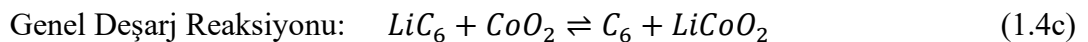
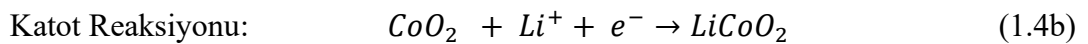
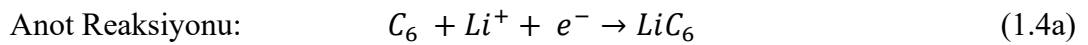
1.1.4. Lityum İyon Bataryalar

Lityum iyon piller ilk kez 1912 yılında Gilbert N. Lewis tarafından keşfedilmiş olmasına karşın lityum kimyaya ait pillerin ticarileşmesi 1970’li yılların başlarında ilk birincil lityum iyon pillerin ortaya çıkması ile başlamıştır. Şarj edilebilir lityum iyon

pillerin ortaya çıkması ise 20 yıllık bir çalışma sonucunda olmuştur. İlk şarj edilebilir ticari lityum iyon pil kimyası John Goodenough'un çalışmalarına dayanarak 1991 yılında bir Japon şirketi olan Sony tarafından piyasaya sürülmüştür [15, 17]. Lityum iyon (li-iyon) bataryalar daha az ağırlıkta ve düşük hacimde yüksek enerji ve güç sağladıklarından dolayı dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gibi taşınabilir elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. Bunun yanında sahip olduğu özellikler sebebi ile elektrikli ve hibrit elektrikli araç uygulamalarında li-iyon kimyası kullanılmaktadır.

Bataryanın şarj reaksiyonu sırasında dışarıdan uygulanan elektrik enerjisi katot pozitif elektrottan Lityum iyonlarını (Li^+) koparır. Burada katot aktif maddenin kristal yapısından kopan Li^+ elektrolit boyunca difüz eder ve bu sırada pozitif elektrottan ayrılan elektronlar akım iletici kabloyla anoda iletilirler. Burada ki elektronlar anodu negatif yüklerken elektrolitteki Li^+ negatif elektrotun yapısına katılırlar. Şarj işlemi sırasında gerçekleşen bu olayın tersinde ise lityum iyon pil deşarj olmaktadır. Burada Li^+ reaksiyona direk olarak katılım göstermez, anot ve katot yapısına yerleşir veya ayrılır [18].

Li-iyon batarya hücreleri anot-katot, elektrolit ve separatörden oluşur. Anot negatif elektrot, katot pozitif elektrottur. Elektrotlar arasına ayırıcı olarak adlandırılan bir eleman yerleştirilir [19]. Li-iyon batarya içerisinde bulunan anot ve katottun yapısında kullanılan elektro aktif malzemeler pilin kapasitesini belirlemede kritik rol oynar. [9] Pozitif elektrot, lityum kobalt oksit ($LiCoO_2$), lityum nikel oksit ($LiNiO_2$) veya lityum demir fosfat ($LiFePO_4$) gibi metal oksitlerden meydana gelebilir [13]. Negatif elektrot malzemesi olarak grafit, sahip olduğu yüksek özgül enerji ve düşük maliyet nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun yanında diğer anot malzemeleri lityum titanat oksit (LTO) ve silikondur [13]. İyon hareketini sağlamak amacıyla, elektrolit lityum tuzları ve organik çözücülerden meydana gelir. Batarya kimyasının ($LiCoO_2$) deşarj işlemi sırasında negatif ve pozitif elektrotlarda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar denklem 1.4'de ifade edilmektedir [11].



Li-iyon bataryalar, diğer batarya teknolojilerine göre belirgin üstünlükler sunar. Bunlar şunları içerir.

- **Yüksek enerji yoğunluğu-** Lityum iyon piller, diğer pil türlerine kıyasla yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Burada enerji yoğunluğu iki şekilde tanımlanabilir. İlk olarak, bir pilin ağırlığına kıyasla ne kadar enerjiye sahip olduğunu ifade eden gravimetrik enerji yoğunluğu olarak tanımlanır. Bu Watt-saat / kilogram (Wh / kg) olarak ifade edilir. İkinci tanım ise bir pilin hacmine kıyasla sahip olduğu enerji (Wh / litre (Wh / l)) olarak ifade eden hacimsel enerji yoğunluğu şeklindedir [19].
- **Hücre voltajı-** Bir lityum iyon hücresi ortalama 3,6 volt (V) üretir, bu da diğer batarya kimyalarından çok daha yüksektir. Örneğin NiMH ve NiCd ikincil bataryalar yaklaşık olarak 1.2-1.5 V nominal değerinde çalışır. Bundan dolayı, her hücre daha fazla voltaj ürettiğinden, birçok batarya uygulamasında daha az li-iyon hücresi gerekir. Örneğin, bir telefonun güç sağlamak için yalnızca bir hücreye ihtiyacı vardır. Bu, güç yönetimini önemli ölçüde basitleştirir [19].
- **Düşük kendi kendine deşarj oranları-** Birçok şarj edilebilir pilin karşılaştığı en büyük sorun hızlı deşarj oranlarıdır. Bununla birlikte, li-iyon hücrelerin deşarj oranı çok daha düşüktür [19].
- **Hafıza etkisi-** Diğer türlere göre li-iyon bazlı piller hafıza etkilerine karşı duyarlı değildir. Örneğin Nikel bazlı bir batarya türüne (NiCd) kısmi şarj uyguladıktan sonra tekrar şarj edersek daha önceki sahip olduğu kapasiteyi bize vermeyecektir. Bu sebeple li-iyon bataryalar diğer batarya türlerine göre şarj ve deşarj işlemleri sırasında kapasitelerinin tamamından yararlanabiliriz. Bu da esnek bir şekilde şarj ve deşarj edebilme imkânı sunar [15].
- **Çevrim ömrü-** Li-iyon bataryalar diğer batarya türlerine karşın daha fazla çevrim ömrü sunarlar. Örneğin NiMH piller maksimum 500 çevrim dayanırken lityum iyon pillerde bu oran 1000 çevrim değerlerini aşmaktadır. Bundan dolayı, lityum iyon kimyaya sahip piller daha uzun ömürlü olarak ifade edilir [9].
- **Çeşitli farklı pil türlerine sahiptir-** Günümüzde birçok li-iyon batarya türü mevcuttur. Lityumun birçok avantajı olduğu için diğer malzemelerle

birleştirilerek belirli bir uygulama için kullanılabilir. Bazıları, telefonlar gibi elektronik cihazlar için harika olan yüksek özgül enerjiye sahipken, diğerleri, elektrikli aletler için harika olan yüksek özgül güce sahiptir [19].

Li-iyon pillerin birçok faydası bulunmasına rağmen aşağıdaki gibi bazı sınırlamaları da mevcuttur.

- **Bataryaların korumaya ihtiyacı vardır-** Aşırı şarjdan ve çok fazla deşarj edilmekten korunmaları gerekir. Li-iyon bataryalar çok sık tamamen deşarj edilirlse performanslarının büyük ölçüde etkilenir. Bununla birlikte, şarj sırasında çekilen akımın güvenli sınırlar içinde tutulması da önemlidir [19].
- **Yaşlanma-** Lityum bataryalar, diğer batarya teknolojilerine kıyasla hızlı bir şekilde yaşlanma eğilimindedir. Bu bozulma, sadece zamana bağımlı değil, aynı zamanda bir bataryanın maruz kaldığı şarj/deşarj döngülerinin sayısından da etkilenir [19].
- **Maliyet-** Bir li-iyon hücre yapmak, NiCd batarya yapmaktan %40 daha maliyetlidir. Bu maliyet, özellikle telefonlar gibi seri üretilen ürünlerle tüketiciye düştüğü için imalatda dikkate alınması gereken önemli bir faktördür [15].

Günümüzde, birçok farklı lityum iyon kimyaları mevcut olup bu kimyalar katotların bileşimlerine göre adlandırılmaktadır. Lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum mangan oksit (LiMn_2O_4), lityum demir fosfat (LiFePO_4 veya LFP), lityum nikel kobalt alüminyum oksit (LiNiCoAlO_2 veya NCA) ve lityum nikel mangan kobalt oksit (LiNiMnCoO_2 veya NMC) Yaygın olarak kullanılan lityum bazlı kimyalara örnek olarak verilebilir [11]. Bunlar arasında LiFePO_4 , en düşük özgül enerjiye ve kısa takvim ömrüne sahiptir; bunun ile birlikte güvenli bir kimyaya sahiptir ve maliyeti düşüktür. LiMn_2O_4 , yüksek özgül enerjiye, güce ve nispeten düşük maliyete sahiptir. Bu nedenle cep telefonlarında ve elektrikli ve hibrit elektrikli araç uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Ancak yüksek sıcaklıklara oldukça duyarlıdır. LiCoO_2 , yüksek özgül enerjilere ulaşabilen bu kimyalar içerisinde barındırdığı kobalt (Co) miktarından dolayı pahalıdır [11]. Tablo 1.3’de yaygın olarak kullanılan lityum iyon kimyaya sahip pillerin genel performans özellikleri özetlenmiştir.

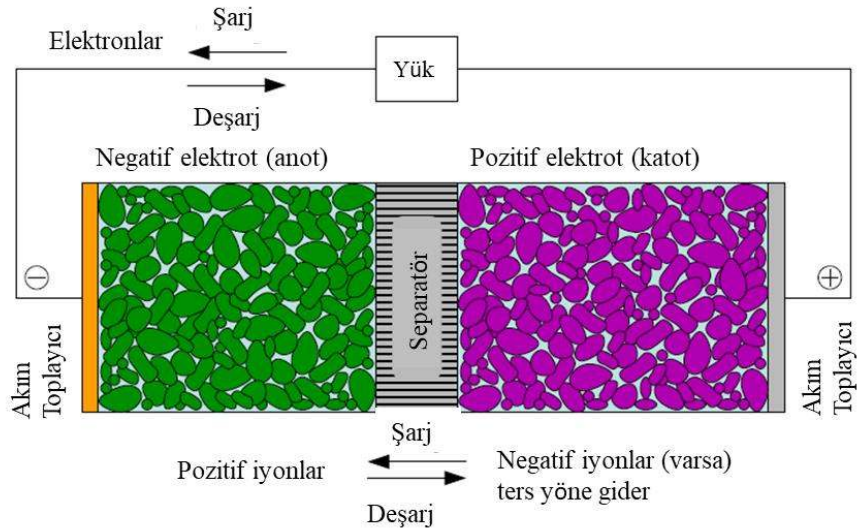
Tablo 1.3. Yaygın kullanılan li-iyon bataryaların genel performans özellikleri [13]

	Lityum Demir Fosfat	Lityum Manganez Oksit	Lityum Titanat	Lityum Kobalt Oksit	Lityum Nikel Kobalt Alüminyum	Lityum Nikel Manganez Kobalt
Katot kimyası tanımlayıcısı	LFP	LMO	LTO	LCO	NCA	NMC
Spesifik enerji (Wh/kg)	80-130	105-120	70	120-150	80-220	140-180
Enerji yoğunluğu (Wh/L)	220-250	250-265	130	250-450	210-600	325
Spesifik güç (W/kg)	1400-2400	1000	750	600	1500-1900	500-3000
Güç yoğunluğu (W/L)	4500	2000	1400	1200-3000	4000-5000	6500
Volt (V)	3.2-3.3	3.8	2.2-2.3	3.6-3.8	3.6	3.6-3.7
Çevrim Ömrü	1000-2000	>500	>4000	>700	>1000	1000-4000
Kendinden deşarj (% ay başına)	<1%	5%	2-10%	1-5%	2-10%	1%

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Lityum İyon Bataryaların Çalışma Prensibi

Lityum metali, elektrokimyasal potansiyelinin yüksek, yoğunluğunun ($0,534 \text{ gr/cm}^3$) ve redoks potansiyelinin düşük olmasından dolayı diğer metallerin yerine ideal bir batarya malzemesi olarak kullanılmaktadır [9]. Burada Lityum iyon batarya terimi, anot ve katot arasında Li^+ akışının olduğu şarj edilebilir batarya ailesini ifade eder [20] ve enerjiyi kimyasal enerji olarak depolayan, daha sonra bir devre bağlandığında elektrik enerjisine dönüştüren ve akımın akmasına izin veren hücreler olarak tanımlanmaktadır. Li-iyon bataryaların diğer batarya türlerine göre daha uzun ömürlü olmaları, maliyetlerinin düşük olması, güç yoğunluklarının ve enerji verimliliklerinin yüksek olması, kendi kendine deşarj oranlarının düşük olması ve hafıza etkisinin bulunmaması sebebi ile tercih edilme nedenlerindendir. Li-iyon bataryalarda meydana gelen enerji dönüşümü, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşmesi (deşarj) ve elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye dönüşmesi (şarj) olarak iki şekilde gerçekleşir. Bir lityum iyon hücresinde meydana gelen bu dönüşümler Şekil 2.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Deşarj ve şarj olaylarının şematik gösterimi [21]

Bir li-iyon bataryanın şarj / deşarj süreci, lityum iyonların ve elektronların transferi ile gerçekleşir. Burada şarj sırasında dışarıdan uygulanan bir elektrik akımı sebebi ile katottan lityum iyonları kopar ve elektrolit boyunca difüz ederek anot aktif maddenin (genelde grafit) kristal örgüsü içerisine yerleşir [9]. Bu işlem sırasında

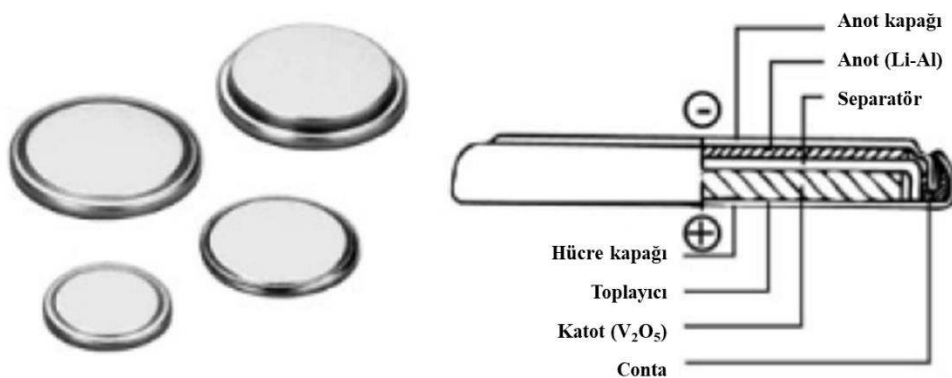
elektrik dengesini korumak için, pozitif elektrottan ayrılan aynı miktarda elektronlar aynı anda serbest bırakılır ve akım iletici kabloyla negatif elektroda iletilirler [18, 22]. Şarj reaksiyonunda negatif elektrot (anot) elektron olarak indirgenirken pozitif elektrot (katot) elektron kaybettiği için yükseltgenir [22]. Deşarj işlemi sırasında ise batarya şarj edilirken gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların tam tersi gerçekleşir. Yani şarj sırasında anoda geçen lityum iyonları katotta bulunduğu ilk konumlarına yerleşmek için harekete geçerek elektronlarda depolanan enerjiyi salarlar [18].

2.2. Lityum Hücre Form Faktörleri

Farklı iç yapı konfigürasyonlarından ve kullanım alanlarından dolayı lityum iyon bataryalar farklı şekillerde üretilirler, bu farklılık hücre form faktörü olarak adlandırılmaktadır [23]. Bataryanın şeklini ifade eden bu faktör düğme, silindirik, prizmatik ve kese olmak üzere dört ana şekile sahiptir.

2.2.1. Düğme Tipi Hücreler

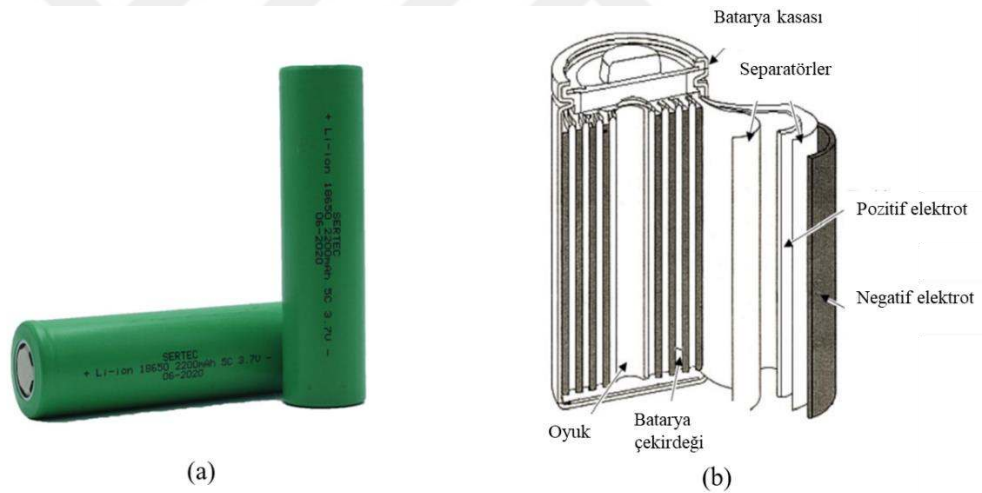
Düğme tipi hücreler, tek bir elektrokimyasal hücre içeren küçük ve yassı bir yapıya sahiptir [23]. Bu tipteki hücre yapıları sahip oldukları kompakt tasarım nedeniyle saatler, telefonlar, araba anahtarları gibi çeşitli küçük cihazlara güç sağlamak için kullanılmaktadır. Üretimlerinin ucuz olmasına karşın kapasitelerinin sınırlı olması sebebiyle fazla güç gerektiren uygulamalarda tercih edilmezler [19]. Şekil 2.3’de düğme hücresi ve iç yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2. Düğme hücresi ve ana bileşenleri [19]

2.2.2. Silindirik hücreler

Silindirik hücre yapısında, elektrolit içerisine daldırılmış jellyroll adı verilen rulo şeklinde sarılmış elektrotlar (pozitif ve negatif) ve separator bulunmaktadır [24]. Silindirik form faktörüne sahip hücreler, yüksek özgül enerjiye, uzun kullanım ömrüne sahip ve ekonomiktir. Bunun yanında sahip olduğu silindir şeklinden dolayı yüksek basınca dayanabildiği için üretimi kolay ve mekanik olarak stabildir [19]. Bu sebeple de günümüzde popülerliğini hala korumaktadır. Piyasada 18650 (18 mm çap ve 65 mm uzunluk) ve 26650 (26 mm çap ve 65 mm uzunluk) olarak adlandırılan iki standart silindirik lityum iyon batarya yaygın olarak kullanılmaktadır. Silindirik form faktörüne sahip hücreler elektrikli el aletleri, oyuncaklar, lambalar, otomotiv endüstrisi ve mobil enerji sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. [12]. Şekil 2.4’de 18650 standardına sahip silindirik hücre form faktörü ve iç yapısı gösterilmektedir.

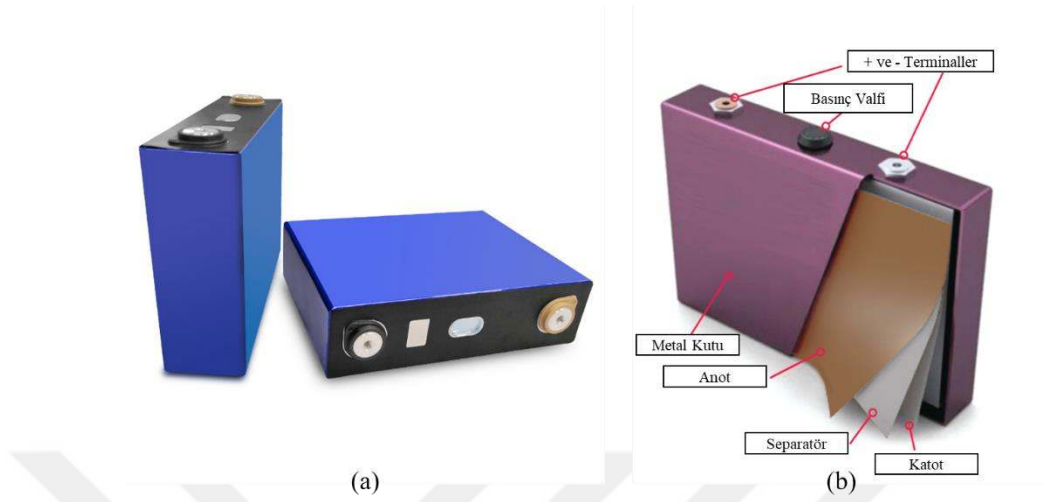


Şekil 2.3. Silindirik hücre form faktörü (a) ve iç yapısı (b) [25, 26]

2.2.3. Prizmatik hücreler

Daha ince bataryalara duyulan ihtiyacı karşılamak için geliştirilen prizmatik hücre form faktörü ilk olarak 1990’ların başlarında görüldü [19, 24]. Kübik formdaki metal veya sert plastik bir muhafazaya sığdırmak için sıkıştırılmış, sarılmış, veya preslenmiş anot, katot, seperator (ayırıcı) ve elektrolit bir prizmatik hücrenin iç yapısını oluşturmaktadır [27]. Bu tasarımda hücreler ince kılıflara sarılır ve katmanlı bir şekilde yerleştirme yaklaşımı ile hücre içindeki alandan en iyi şekilde yararlanılır. Ancak silindirik hücrelerden daha maliyetlidir [19]. Bu hücre form faktörüne sahip

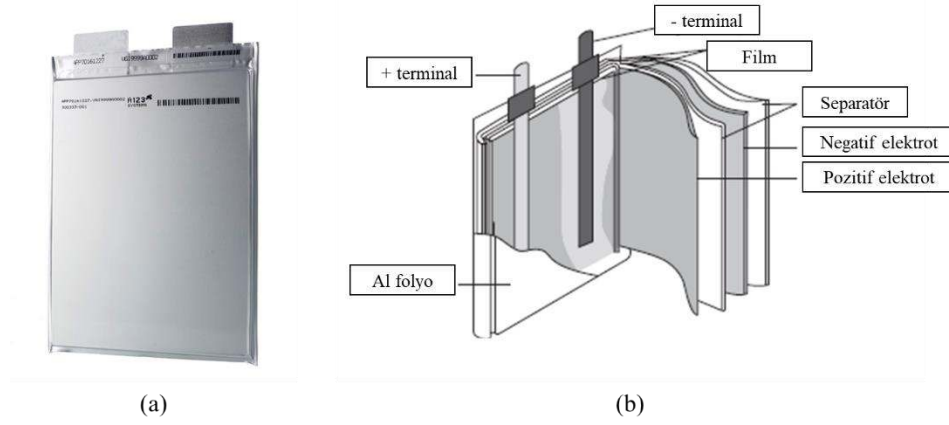
bataryalar akıllı telefonlarda, diz üstü bilgisayarlarda ve elektrikli araçlar gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Şekil 2.5’de prizmatik hücre ve iç yapısı görülmektedir.



Şekil 2.4. Prizmatik hücre form faktörü (a) ve iç yapısı (b) [28, 29]

2.2.4. Kese hücreleri

Hücrelerin içerisindeki elektrot ve separatör katmanlarının katlanıp istiflenmesi ve sızdırmaz esnek bir folyo şeklindeki kese (hücre kabı) içerisine alınması ile kese formundaki hücreler oluşturulur [27]. Bu şekilde tasarlanan hücre form faktörü, elektrot ve separatör yerleşiminden dolayı oldukça yüksek paketlenme verimliliği (%90) sunar [19]. Bu yapıdaki bataryalar dronlar, model uçaklar ve arabalar gibi yüksek akım yüklerine ihtiyaç duyan uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir [19]. Ancak gaz oluşumu kese hücrelerinde oldukça önemli bir sorundur [30]. Şarj / deşarj döngüsü sırasında yaşlanmaya ve kullanıma bağlı olarak elektrolit ayrışması ile CO₂ ve CO gibi gazlar üretilir. Ayrıca aşırı şarj durumu ve aşırı ısınma gibi stres faktörleri bu gazların salınımını arttırmaktadır [19]. Bu durum kese hücrelerin kullanım sırasında şişmesine neden olarak hücrelerin yanmasına hatta patlamasına sebebiyet verir. Küçük kese hücreler 500 çevrim sonrası kendi hacminin %8-%10’u kadar genişlerken, büyük hücrelerde bu hacimce genişleme 5000 çevrimden sonra gerçekleşir [19]. Şekil 2.6’da kese hücresi ve iç yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Kese hücre form faktörü (a) ve iç yapısı (b)

2.3. Batarya Performansını Etkileyen Faktörler

Lityum iyon bataryalar diğer batarya türleri ile kıyaslandığında üstün performans özellikleri sergilerler. Örneğin lityum iyon bataryalar sağladıkları yüksek çalışma voltajı (2.5 V-4.2V) nedeniyle belirli bir voltaj değerine sahip bir batarya paketi oluşturulmak istendiğinde daha az hücre kullanımına gereksinim duyar [12]. Ayrıca lityum iyon hücrelerin yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluğu sunması yüksek güç gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir [12]. Ancak bir batarya hücresinin çalışma performansı birçok faktör tarafından etkilenir [31]. Örneğin sıcaklık batarya performansını doğrudan etkileyen faktörlerdendir. Sıcaklığın belirli bir seviyeden yüksek olması yaşlanma reaksiyonlarını hızlandırarak batarya ömrünün azalmasına sebebiyet verir. Kritik seviyenin üstünde bir sıcaklık ise batarya hücresine zarar verebileceği gibi yanmasına ve hatta patlamasına sebebiyet verebilir. Bu bölümde batarya performansını etkileyen genel faktörler verilmektedir.

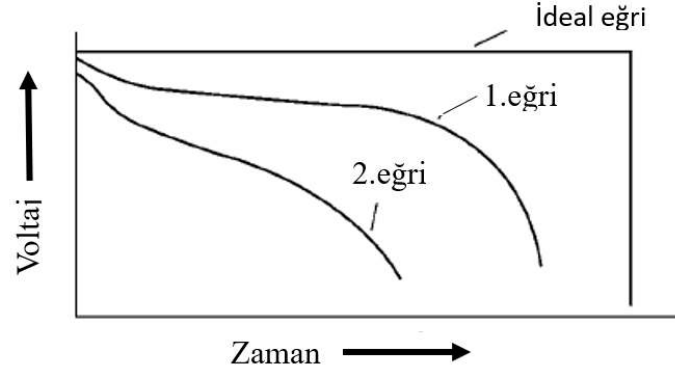
2.3.1. Hücre ve batarya tasarımı

Hücresinin şekli veya konfigürasyonu iç direnci ve ısı dağılımını ve dolayısıyla bataryanın kapasitesini etkileyecektir. Örneğin uzun, dar şekilli bir silindirik hücrenin iç direnci aynı tasarımdaki geniş ve kısa şekilli silindirik hücrenin iç direncinden daha az olacaktır. Hacmi ile orantılı olarak yüksek deşarj hızlarında daha iyi performans gösterebilmektedir [12]. Ayrıca termal olarak doğru bir şekilde tasarlanmayan bataryalarda sıcaklık kontrolü düzgün bir şekilde sağlanamayacağı için yüksek

sıcaklıklarda termal kaçak reaksiyonları meydana gelir ve bu reaksiyonlar batarya hücresinin yanmasına hatta patlamasına sebebiyet verebilir. Düşük sıcaklıklarda ise hücre içerisindeki elektrokimyasal reaksiyonların azalması sebebi ile kapasite kaybı yaşanabilmektedir. Bu sebeple bataryanın verimli ve güvenli çalışabilmesi için termal açıdan doğru bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bunun yanında mekanik olarak zayıf olan hücreler, basınç contalarını ve havalandırma deliklerinin yetersizliği ve toleransların yanlış belirtilmesi gibi tasarım hataları nedeniyle batarya hücreleri zarar görebilir, ömürleri azalabilir ve hatta ciddi güvenlik açıkları meydana gelebilmektedir.

2.3.2. Deşarj akımının çekilmesi

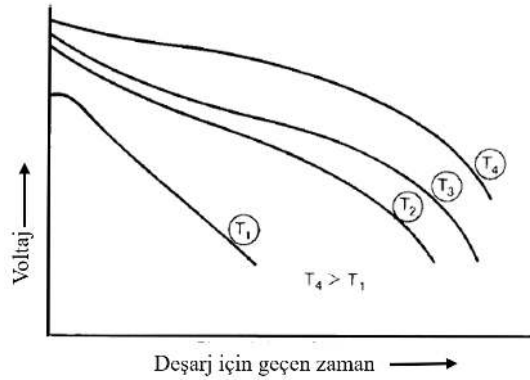
Bir batarya hücresi deşarj edildiğinde buradaki voltaj değeri teorik voltajdan daha düşük olacaktır. Voltaj ve teorik voltaj arasında oluşan bu fark, batarya direncinden kaynaklanan IR (deşarj akımı ve iç direncin bir ürünüdür) kayıpları ve deşarj sırasında aktif maddelerin polarizasyonundan kaynaklanmaktadır [12]. Bu durum Şekil 2.7’de gösterilmektedir. İdeal bir durumda batarya deşarjı, aktif maddeler tükenene ve kapasite tam olarak kullanılıncaya kadar teorik voltajda ilerler ve voltaj daha sonra sıfır değerine ulaşır. Burada deşarj ürünlerinin birikmesi, aktivasyon ve polarizasyon etkileri nedeniyle hücre direnci arttığından dolayı deşarj voltajı azalır. Deşarj akımı arttıkça deşarj akımı ve iç direncin bir ürünü olan IR kayıpları ve polarizasyon etkilerinin artmasından dolayı voltaj değeri azalacaktır. Bunun sonucunda hücrenin kullanım ömrü azalacaktır [15]. Aynı zamanda yüksek bir akımda şarj veya deşarj edilmesi durumunda hücrenin iç direnci artar ve dolayısıyla batarya hücresi termal olarak kararsız hale gelir. Bu kararsızlık sıcaklığın artmasına neden olur ve bunun sonucunda da yaşlanma reaksiyonlarını hızlanarak batarya kullanım ömrü azalır. Hatta termal kararsızlık batarya hücresinin veya paketinin patlamasına sebebiyet vermektedir [12, 15].



Şekil 2.6. Deşarj eğrilerinin karakteristiği [12]

2.3.3. Deşarj sırasında batarya sıcaklığı

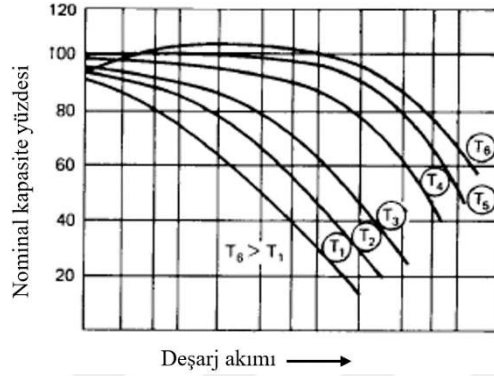
Bataryanın performansı, gücünü ve enerjisini farklı sıcaklık aralıklarında iletme yeteneğine bağlıdır [15]. Düşük sıcaklıklar hücrenin iç direnci artmasına ve kimyasal aktivitenin azalmasına neden olacağından dolayı bataryanın ömrü ve voltaj özellikleri üzerinde sıcaklık faktörü doğrudan etkilidir [31]. Şekil 2.8’de artan sıcaklığın batarya kapasitesi üzerindeki etkisi aynı deşarj akımına sahip voltaj zaman grafiğinde gösterilmektedir. Burada T_4 sıcaklığı normal oda sıcaklığını temsil etmektedir.



Şekil 2.7. Artan sıcaklığın batarya kapasitesi üzerindeki etkisi [31]

Bu grafikten de anlaşılacağı üzere deşarj sıcaklığının düşürülmesi, deşarj eğrisinde bir artışa ve dolayısıyla da kapasitenin düşmesine neden olacaktır. Daha yüksek sıcaklıklarda ise iç direnç azalır ve deşarj voltajı artar. Buna bağlı olarak amper saat (kulombik) kapasite ve enerji çıkışı genellikle artar [31]. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda kimyasal aktivite artar ve deşarj sırasında hücrenin kendi kendine deşarjı olarak bilinen bir olay meydana getirecek kadar hızlı bir kimyasal aktivite söz konusu olabilir. Hem spesifik özellikler hem de deşarj profilleri her batarya tasarımı için farklı

olabilir. Bununla beraber, Şekil 2.9’da çeşitli sıcaklıklarda deşarj akımının batarya kapasitesi üzerindeki etkisi görülmektedir. Artan deşarj yükü ve azalan sıcaklık ile beraber bataryanın kapasitesi hızlı bir şekilde düşer. Yüksek deşarj yüklerinde ise batarya sıcaklığı ortam sıcaklığının çok üzerine çıkabileceğinden dolayı kapasite kaybı, yanma ve hatta patlama gibi belirgin etkilere neden olabilir.



Şekil 2.8. Farklı sıcaklıklarda deşarj akımının batarya kapasitesi üzerindeki etkisi [31]

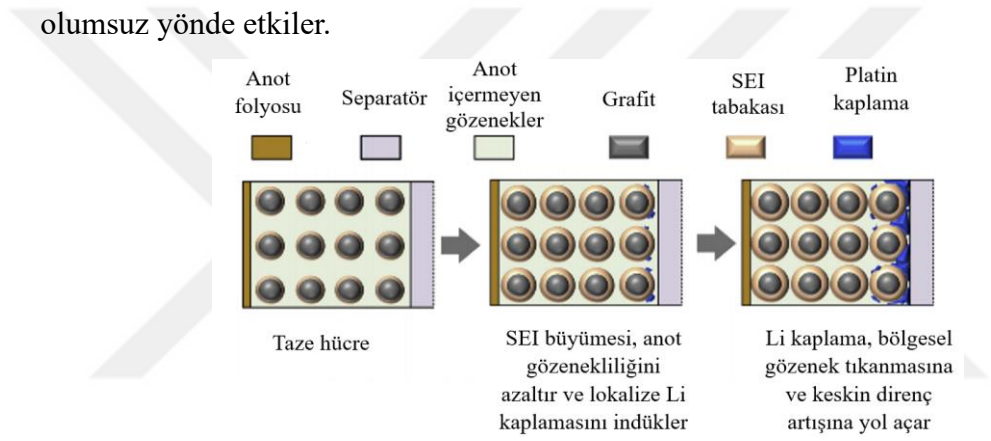
2.3.4. Batarya Yaşı ve Depolama Koşulları

Bataryanın performansı, zamanla yapısında gerçekleşen fiziksel değişimler ve istenmeyen reaksiyonlar nedeni ile kademeli olarak azalır. Bu etken geri döndürülemez ve bataryanın bozulmasına neden olur [19]. Bu sebeple yaşlanma fenomeni hem zamanın ve hem de kullanımın batarya hücresi üzerindeki etkisini tanımlamak için yaygın olarak kullanılır [32]. Batarya yaşlanması takvim ve çevrim yaşlanması olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır [33].

Takvim yaşlanması, bataryanın depolama sırasında kaybedilen kapasitenin geri döndürülemez (tersinir olmayan) bir oranı olarak tanımlanmaktadır. Kısaca bataryanın raf ömründen kaynaklanan bozulmadır [34, 35]. Takvim yaşlanmasını etkileyen faktörler sıcaklık, depolama koşulları ve zamandır [32].

Çevrim yaşlanması ise bataryanın şarj / deşarj çevriminin bir etkisi sonucu oluşmaktadır [32]. Sıcaklık, çevrim sayısı ve şarj / deşarj voltajı çevrim yaşlanmasını etkileyen faktörlerdir [32].

Yaşlanma mekanizması kimyasal veya mekanik etmenlere bağlı olacak şekilde gerçekleşebilir. Bununla beraber elektrotların bileşimine oldukça bağlıdır. Bu nedenle yaşlanma etkeninin ana nedeni elektrotların yapısının bozulmasıdır [32]. Örneğin grafit bir elektrotta yaşlanma sebebi elektrot/elektrolit arayüzünde zamanla katı bir ara yüzeyin gelişmesidir [36]. Katı/elektrolit arayüzeyi (SEI) olarak adlandırılan bu arayüzey, bataryanın ilk şarjı sırasında oluşarak elektrodu korozif etkilerden koruma görevi üstlenir [37]. Ancak li-iyon batarya, elektrokimyasal kararlılık aralığının dışında bir gerilim ile çalıştığında kararlı değildir. Böylece SEI tabakası li-iyon kaybına ve elektrolit bozulmasına sebebiyet verecek şekilde zamanla gelişir [38, 39]. Şekil 2.10'da SEI tabakasının oluşumu şematik olarak gösterilmektedir. Bu sebeple yaşlanma durumu bataryanın kapasitesinin azalmasına neden olarak performansını olumsuz yönde etkiler.



Şekil 2.9. SEI tabakasının oluşumunun şematik gösterimi [40]

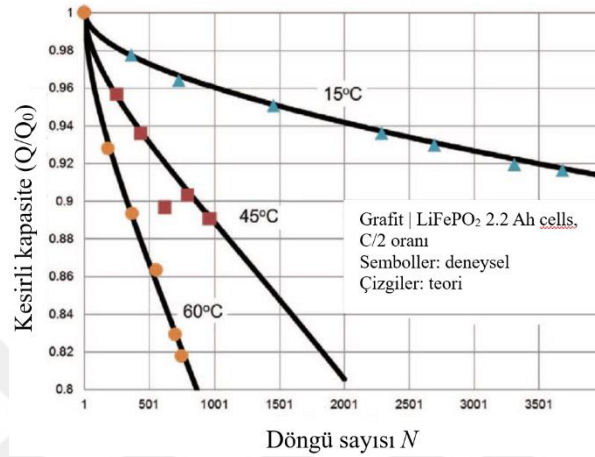
2.4. Lityum İyon Bataryalarda Termal Sorunlar

Bu bölümde, kapasite ve güç azalması, kendi kendine deşarj, termal bozunma, elektrik dengeleri ve düşük sıcaklık performansı olmak üzere lityum iyon bataryaların ortak termal sorunları kısaca tartışılmaktadır.

2.4.1. Kapasite ve Güç Azalması

Özgül enerji ve özgül güç bir batarya hücresinin performansını belirleyen iki önemli parametredir. Bataryanın şarj / deşarj süreci boyunca zamanla kullanılabilir gücü ve kapasitesi azalmaktadır. Aşırı şarj durumunda lityum iyon birikimi, elektrolit / aktif malzeme bozulmaları ve elektrot veya akım toplayıcı yüzeylerinde pasif film oluşumu kullanılabilir kapasitenin ve gücün azalmasına yol açan faktörlerdir. [36, 41].

Aktif malzemenin inaktif faza dönüşmesi ve artan iç empedans hızı sonucunda sırasıyla enerji kaybı ve güç kaybı meydana gelir [42]. Johnson ve arkadaşları ticari bataryaların kapasitesinin ilk 150 döngü (şarj-dinlenme-deşarj süreci) sonunda %10-40 oranında azaldığını belirtmişlerdir [43]. Deshpande ve ark. LiFePO_4 hücrelerinin şarj /deşarj sürecinin daha yüksek ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmesinin kapasite azalmasını hızlandırdığını ve çevrim ömrünü kısalttığını gösterdiler (Şekil 2.11) [44].



Şekil 2.10. LiFePO_4 hücresinin farklı çalışma sıcaklıklarında kapasite azalması [44]

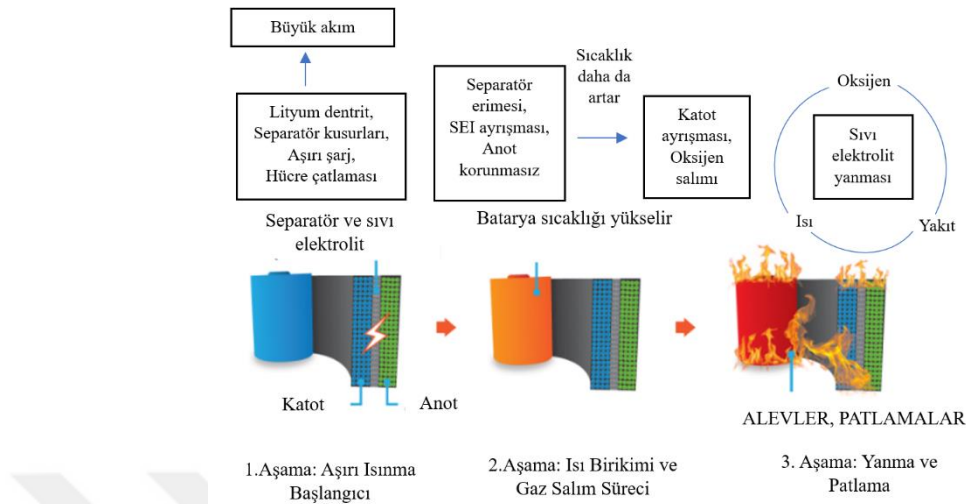
2.4.2. Kendinden Deşarj

Kendinden deşarj, elektrotlar veya harici bir devre olmaksızın kimyasal reaksiyonların bataryanın şarjını azalttığı bir olgu olarak tanımlanır. Bataryanın kendinden deşarj hızı büyük ölçüde sıcaklığa ve şarj durumuna (SoC) bağlıdır [45.]. Daha yüksek sıcaklıklarda, aktif malzemenin yüzeyinde yer alan lityum iyonları elektrolit içerisinde çözünerek kendinden deşarjı artırır [36]. Sistem ve batarya konfigürasyonuna bağlı olarak ikincil batarya sistemleri oda sıcaklığında %2 ile %30 arasında değişen kendinden deşarj oran sergiler [10]. Kendinden deşarj bataryanın kullanılmadığı durumlarda takvim ömrünü doğrudan etkiler.

2.4.3. Termal Bozunma

Termal bozunma bataryanın iç ısısının artmasıyla beraber yapısal bozulmanın meydana geldiği bir süreçtir. Ekzotermik reaksiyonlar sebebi ile oluşan iç ısı, sıcaklığı artırır ve batarya bileşenlerini deforme etmeye başlar [19, 46]. Sıcaklığın 150 °C'yi

aştığı durumda ise elektrotlarda geri döndürülemez parçalanma reaksiyonları gerçekleşir [9]. Şekil 2.12’de termal bozunma aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Termal bozunma aşamaları [47]

İlk aşamada, yüksek akım, fazla şarj veya dış ortam sıcaklığının yüksek olması gibi etmenler sebebi ile hücrede aşırı ısınma meydana gelir. Bunun bir sonucu olarak, anot üzerinde oluşmuş olan ince pasifleştirici SEI katmanı parçalanır. SEI katmanının parçalanması 80 °C gibi nispeten düşük bir sıcaklık değerinde başlar [9]. Bu katmanın parçalanmasından sonra elektrolit yüksek ve kontrolsüz bir sıcaklıkta reaksiyona girerek ortama ısı salar ve dolayısı ile sıcaklığı daha da artırır. Sıcaklık arttıkça, anot reaksiyonundan gelen ısı, elektrolitte kullanılan organik çözücülerin parçalanmasına neden olarak hidrokarbon gazlarını açığa çıkarır. Buradaki elektrolit bozulması genel olarak 110 °C’de başlar [9]. Elektrolitin bozulmasından kaynaklanan gaz salınımı hücrenin içinde basınç birikmesine neden olur [10]. Yaklaşık 135 °C’de polimer separatörün erimesi ile beraber elektrotlar arasındaki fiziksel temas ortadan kalkarak kısa devre reaksiyonlarını başlatır [9]. Bu sebeple batarya sahip olduğu enerjiyi en kısa sürede boşaltmak isteyecektir. Bu kadar hızlı bir şekilde akım boşaltma eğilimi iç yapıda iç direnci artmasına ve dolayısıyla sıcaklığın artmasına neden olacaktır. Bu durumda, bataryanın sıcaklığı 150-300 °C aralığını geçer ve katot parçalanarak serbest radikaller meydana gelir [9]. Bundan sonraki süreçte çok kısa bir zamanda sıcaklık 500 °C’yi geçerek dış kap deforme olur. Bu deformasyon sonucunda hava ile temas başlar ve organik bileşikler hızla alev alarak patlama gerçekleşir [9, 48].

2.4.4. Elektrik Dengesi

Batarya hücreleri belirli özellikleri sahip batarya modüllerini elde etmek için seri (istenen kapasiteyi) veya paralel (istenen gücü) olarak bağlanır [10]. Oluşturulan bu modüller bir araya getirilip tekrar seri veya paralel olarak bağlanarak batara paketlerini oluşturur. Seri olarak bağlanan hücrelerin kapasiteleri uyuşmuyorsa, bataryanın toplam enerji üretimi azalacaktır [10]. Bu durum en zayıf hücrenin batarya takımını sınırlaması ile açıklanabilir. Böylece batarya paketi tamamen şarj edildiğinde en zayıf hücre aşırı şarj edilmiş olacaktır. Bunun sonucunda o hücrede istenmeyen yan reaksiyonlar termal bozunmalara sebebiyet verebilir. Bunu önlemek için her bir hücrenin voltajlarının teker teker kontrol edilmesi gerekmektedir [49]. Ayrıca, güvenlik ve daha iyi performans sağlamak için batarya paketlerindeki sıcaklık dağılımı eşit tutulmalıdır. Bu sebeple sağlıklı batarya paketi için hücrelerinde ki elektrik dengeleri oldukça önemlidir.

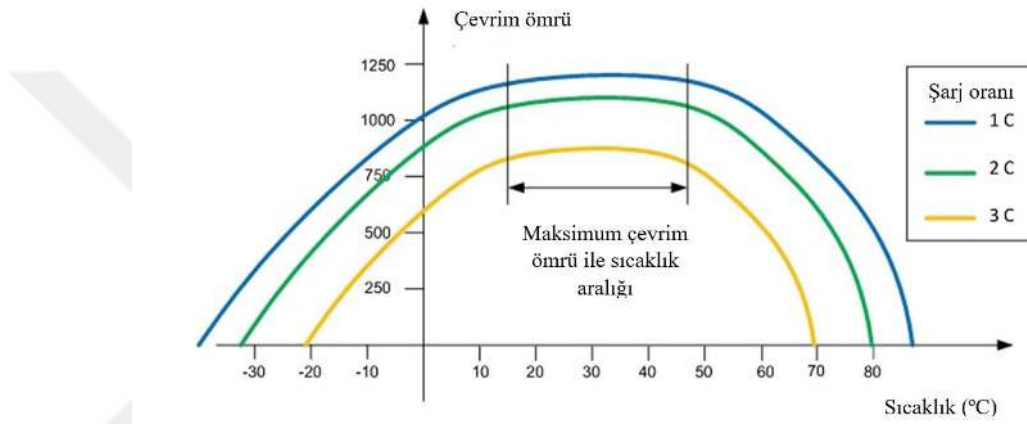
2.4.5. Düşük Sıcaklık Performansı

Düşük ve sıfırın altındaki sıcaklıklara sahip çalışma koşullarında batarya hücreleri içerisindeki kimyasal reaksiyonların yavaşlaması, elektrolit içerisindeki iyonik hareketliliğin azalmasına dolayısıyla da elektronik iletkenliğin azalmasından kaynaklı olarak güç ve kapasite oranlarının düşmesine neden olur. Buna bağlı olarak da batarya performansında kayıpların yaşanır [50].

2.5. Lityum iyon Bataryaların Sıcaklığa Bağlı Elektrokimyasal Özellikleri

Bataryalar elektrik enerjisini elektrokimyasal enerji olarak depolama ve gerektiğinde kullanmamızda kritik bir öneme sahip olan cihazlardır. Bataryanın ömrü ve bozulma hızı çalışma sıcaklığına, deşarj derinliğine (DoD) ve şarj / deşarj döngüleri arasında ki zaman aralıkları gibi birçok faktörden etkilenir. Ancak bu faktörler arasında sıcaklık bataryanın kapasitesi, gerekli güç çıkışı ve çevrim ömrü gibi çalışma performansını ve güvenliğini doğrudan etkileyen en kritik etmendir [51]. Şekil 2.13’da bataryaların optimum çalışma sıcaklığında ki çevrim ömrü gösterilmektedir. Örneğin sıcaklığın optimum değerden çok yüksek olması sonucu aktif madde ve elektrolitin ayrışması sonucu elektrot/elektrolit arayüzünde değişiklikler (SEI tabakasının

büyümesi, çözünme ve çökelme gibi) meydana gelir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise artan yan reaksiyon hızları sonucunda kapasite azalması, güç kaybı ve termal bozunma gibi performans azaltıcı ve güvenliği tehlikeye atacak durumlar söz konusu olur [52]. Düşük sıcaklıklarda elektrolitin iyonik iletkenliğinin azalması ve elektrot/elektrolit arayüzünde artan yük direnci sebebiyle düşük enerji ve düşük güç çıkışı ile sonuçlanmaktadır [10]. Bu nedenle sıcaklığın elektrokimyasal özellikler üzerindeki etkisinin bilinmesi önemlidir. Bu bölümde elektrokimyasal reaksiyonların termodinamik özellikleri, sıcaklığın direnç, fizikokimyasal özellikleri, bataryanın ömrü üzerindeki etkileri tartışılmaktadır.



Şekil 2.12. Lityum iyon pil ömrünün sıcaklık ve şarj hızı ile ilişkisi [53]

2.5.1. Termodinamik Özellikler

Li-iyon bataryaların termodinamik bilgisi, şarj/deşarj sırasında elektrotların ve elektrolitin elektrokimyasal davranışını anlamak için gereklidir. Elektrokimyasal reaksiyonlar esas olarak negatif ve pozitif elektrot arayüzlerinde gerçekleşir [10]. Hücre içerisindeki elektrokimyasal reaksiyonların serbest Gibbs enerjisi o hücrenin gerilimini belirler [9]. Her bir bileşenin elektriksel potansiyeli ile kimyasal potansiyelinin toplamı elektrokimyasal potansiyeli ifade etmektedir. Denklem 2.1'de bu ifade açıkça gösterilmektedir [9].

$$\Phi = \mu_i + Z_i \cdot F \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Burada, μ_i bileşiklerin kimyasal potansiyelini, Z_i , lityumun etkin yükünü, F faraday sabitini ve ε elektriksel potansiyeli temsil etmektedir. Zamanla anot ve katottaki

elektrokimyasal potansiyel dengeye ulaşır ve hücre gerilimi denklem 2.2’de belirtilen Nernst eşitliği ile ifade edilir [9].

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{Z_i F} (\mu_{katot} - \mu_{anot}) \quad (2.2)$$

İki elektrot arasında hareket eden lityum iyonunun kimyasal potansiyeli hücre gerilimi olarak tanımlanmaktadır [9]. Hücrenin kimyasal potansiyelinden kaynaklanan gerilim ile şarj / deşarj sırasındaki gerilim aynı anlama gelmektedir [54]. Genelleştirilmiş terimlerle, bir elektrottaki indirgenme (ileri yönde) reaksiyonu denklem 2.3’deki şekilde ifade edilir [12].



Burada A’nın a molekülü, C’nin c molekülünü oluşturmak için n sayıda elektron (e) alır. Ayrıca diğer elektrottaki yükseltgenme (ileri yönde) reaksiyonu denklem 2.4’de gösterildiği gibidir [12].



Hücrede ki genel reaksiyon bu iki reaksiyonun birleşmesi ile elde edilir ve denklem 2.5’de ki şekilde ifade edilir.



Redoks reaksiyonu sonucu elektrotlardaki aktif malzemeye ait kimyasal enerji, elektrik enerjisine dönüşür ve burada ki enerji değişimi denklem 2.6’da gösterildiği üzere serbest Gibbs enerjisi ile değişmektedir [9,]. Standart serbest Gibbs enerjisi, hücre içerisinde ki elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elde edilen elektriksel enerjinin dış devreye aktaran elektromotor gücü olarak tanımlanmaktadır [12].

$$\Delta G^\circ = -nFE^\circ \quad (2.6)$$

Burada, n transfer edilen iyon sayısını, F faraday sabitini (96487 coulomb/mol) ve E° , elektromotor kuvvetini temsil etmektedir.

Standart koşullardan farklı olarak hücre potansiyelinin derişime bağıllığı denklem 2.7'daki Nernst eşitliği ile tanımlanmaktadır [12].

$$\Delta E = \Delta E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_B^b} \quad (2.7)$$

Burada, a_i ilgili moleküllerin aktivitesini, R gaz sabitini (8.314 J K⁻¹ mol⁻¹) ve T Kelvin biriminden sıcaklığı ifade etmektedir.

2.5.2. Enerji Kayıpları

Elektrokimyasal oksidasyon ve elektrotların indirgenmesiyle elde edilen maksimum elektrik enerjisi miktarı, elektrokimyasal çiftlerin standart serbest Gibbs enerjisindeki değışimle orantılıdır. Ancak, deşarj sırasında polarizasyon kaybı ve hücre iç empedansı nedeniyle kimyasal enerji tamamen faydalı elektrik enerjisine dönüştürülemez. Aktivasyon polarizasyonu ve konsantrasyon polarizasyonu bir bataryanın şarj / deşarj döngüsü sırasında ki aktivasyon kaynaklarıdır. Bu nedenle hücre potansiyeli (E) denklem 2.8'de gösterildiğı gibi türetilir [55].

$$E = E_0 \pm (\eta_a + \eta_c + iR_i) \quad (2.8)$$

Bu denklemde $\pm$ şarj / deşarj durumunu, η_a ve η_c anot ve katot aşırı potansiyellerini, I şarj / deşarj akımını ve R_i hücre iç empedansını temsil etmektedir.

Aktivasyon polarizasyonu veya yük transferi aşırı potansiyeli, elektrokimyasal reaksiyonlara karşı enerji bariyerinin aşılmasıyla ilişkili voltaj kaybı olarak tanımlanmaktadır. Genellikle elektrotlar üzerindeki yükseltgenme veya indirgenme reaksiyonları gerekli olan elektrik akımını elde etmek için yeterli olmadığında meydana gelir. Aktivasyon polarizasyonunu azaltmak için elektrot malzemelerinin oldukça gözenekli olması gerekir böylelikle maksimum reaksiyon hızlarına ulaşılır.

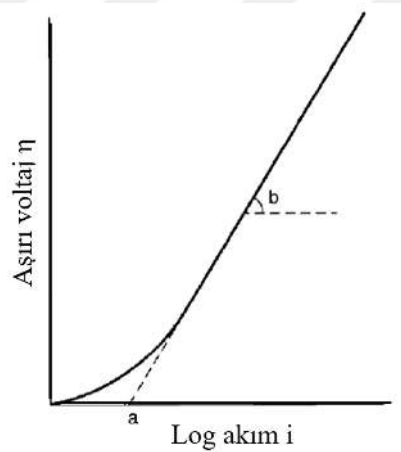
Aktivasyon polarizasyonu, çalışma sıcaklığının, SoC'nin ve elektrot özelliklerinin bir fonksiyonudur ve denklem 2.9'daki gibi ifade edilir [55].

$$\eta_{ct} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.9)$$

Ayrıca Aktivasyon polarizasyonu Tafel denklemi olarak da ifade edilmekte ve aşağıdaki denklem 2.10 ile gösterilir [56].

$$\eta_{ct} = a + b \ln(i) \quad (2.10)$$

Burada, $a = \frac{RT}{\alpha F} \ln(i_0)$ ve $b = \frac{RT}{\alpha F}$ [57]. Tafel eğrisinin şematik gösterimi Şekil 2.14'de gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Tafel eğrisinin şematik olarak gösterimi [55]

Konsantrasyon polarizasyonu, elektrot yüzeyi ile elektrolit kütlesi arasındaki konsantrasyon farkıyla ilişkili kütle transfer direnci olarak tanımlanmaktadır. Minimum konsantrasyon polarizasyonuna sahip olmak için, düşük kütle taşınım sınırlamalarında elektrolit difüzyonu maksimum olmalıdır. Konsantrasyon polarizasyonu denklem 2.11'de ifade edilmektedir [55, 58].

$$\eta_c = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{C_B}{C_E} \right) \quad (2.11)$$

Burada C_B , elektroaktif türlerin bulk konsantrasyonu ve C_E , elektrottaki konsantrasyonu temsil etmektedir.

Bir diğer enerji kayıp kaynağı ise, dahili empedans nedeniyle voltaj düşüşü olan ve hücreden çekilen akımla orantılı olan ohmik polarizasyon veya IR düşüşüdür [10]. İyonik elektrolit direnci ve elektrot aktif malzemesinin elektronik direnci, akım toplayıcıları pozitif ve negatif tablalar (sekmeler, kutuplar) ve akım toplayıcılar ile elektrotlar arasındaki temas direnci toplam hücre içi empedansı oluşturmaktadır [10]. Bu nedenle, elektrotların ve akım toplayıcıların elektronik iletkenliği ile birlikte elektrolitin iyonik iletkenliği, ohmik düşüşünü azaltmak için yeterince yüksek olmalıdır [58].

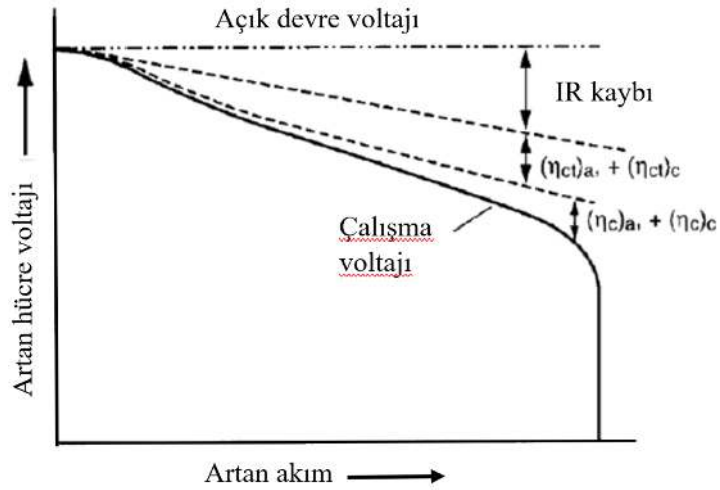
$$\eta_{ohmik} = -iR_i \quad (2.12)$$

Bu nedenle denklem 2.8 şu şekilde tekrar yazılabilir.

$$E = E_0 \pm ([(\eta_{ct})_a + (\eta_c)_a] + [(\eta_{ct})_c + (\eta_c)_c] + iR_i) \quad (2.13)$$

Denklem 2.13, polarizasyon ve ohmik düşüş sonucunda faydalı potansiyelin bir kısmının kaybolduğunu gösterir. Ayrıca bu denklemdeki ifade Şekil 2.15’de şematik olarak gösterilmektedir. Katodun ve anotun açık devre potansiyeli (OCP), denklem 2.14’de olduğu gibi sıcaklığın ve konsantrasyonların bir fonksiyonu olarak Taylor serisi ile yaklaşık olarak hesaplanabilir [59].

$$E_{0,j}(T, SOC) = E_{0,j}(T_{ref}, SOC) + \frac{\delta E_{0,j}}{\delta T} (-T_{ref}) \quad (2.14)$$



Şekil 2.14. Bir bataryanın tipik polarizasyon eğrisi [55]

2.5.3. Sıcaklığın Dirençler Üzerindeki Etkileri

Ohmik direnç, yüzey film direnci ve yük transfer direnci olmak üzere lityum iyon bataryaların üç ana direnci bu bölümde ele alınmaktadır [60, 61].

2.5.3.1. Ohmik Direnç

Bir hücrenin ohmik direnci, elektrolitin iyonik direncini ve hücre bileşenlerinin (akım toplayıcılar, elektrot malzemeleri ve hücre terminalleri vb.) elektronik direncini içermektedir [10]. Ayrıca hücrenin belirli bir akımı işleme kapasitesi ohmik direnç tarafından belirtilir [62]. Deşarj işleminin başlangıcı sırasında görülen anlık voltaj düşüşü bu direnç tipinden kaynaklanmaktadır [10].

Elektronik iyonik direnç ve diğer elektronik iletkenlerin elektronik dirençleri lityum iyon bataryaların çalışma sıcaklığı tarafından etkilenir [10]. Çalışma sıcaklığı azaldıkça elektrolitin iyonik direnci artacağından dolayı elektrolit içerisinde iyonik hareket azalır ve iyonların elektrolit arayüzeyinde elektronlarını bırakması zorlaşmaktadır [9]. Bu nedenle sıcaklık ne kadar düşerse elektrolit iyonik direnç de o kadar yüksek olur. Ancak elektrolit direncinden farklı olarak elektronik öz direnç sıcaklık ile birlikte artar [63]. Bu durum, sıcaklığın artması sonucu elektrik iletkenlerinin iletkenliklerinin azalması ile denklem 2.15’de açıklanır [10, 64].

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{T} \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (2.15)$$

Burada, σ iletkenliği, T sıcaklığı, E_a aktivasyon enerjisini ve k_B Stefan–Boltzmann sabitini temsil etmektedir.

2.5.3.2. Yük Transfer Direnci

Yük transfer direnci elektrot/elektrolit arayüzü üzerindeki yük transfer süreci ile ilgili direnç olarak tanımlanır. Elektrot elektrolit arayüzü üzerindeki yük transfer süreci ile ilişkili direnç, yük transfer direnci (R_{ct}) olarak tanımlanır ve denklem 2.16'da ki gibi ifade edilir. Yük transferi kontrollü elektrokimyasal reaksiyonlar için Bulter Volmer denklemindeki reaksiyon kinetiği ile ilgilidir [67].

$$R_{ct} = \frac{RT}{F I_o} \quad (2.15)$$

Burada I_o , reaksiyonun değişim akımı yoğunluğudur ve sıcaklık ile SoC'nin bir fonksiyonudur.

Değişim akımı yoğunluğu, I_o , denklem 2.16'da verildiği gibi katı fazdaki Li^+ konsantrasyonu ile doğrusal olmayan bir ilişkiye sahiptir.

$$I_o = F A k_s c^\alpha \quad (2.16)$$

A , k_s ve α sırasıyla elektrot yüzey alanı, reaksiyon standart hız sabiti ve transfer katsayısıdır. Katı faz konsantrasyonu (c) ise denklem 2.17'de ki şekilde ifade edilebilir.

$$c = c_s \cdot SOC \quad (2.17)$$

Burada c_s , elektrottan alınabilecek maksimum konsantrasyonu ifade eder. Bu sebeple, denklem 2.16'daki c^α şu şekilde yazılabilir.

$$c^\alpha = c_s^\alpha \cdot SOC^\alpha = k_1 \cdot SOC^\alpha \quad (2.18)$$

Böylelikle daha önce belirtilen, denklem 2.15, 2.16 ve 2.18 birleştirilerek, denklem 2.15'i yeniden yazabiliriz ve bu ifade denklem 2.19'da gösterilmektedir.

$$R_{ct} = \frac{RT}{F^2 A k_s k_1 (SOC)^\alpha} \quad (2.19)$$

Reaksiyon standart hız sabiti, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Arrhenius denkleminde elde edilir ve denklem 2.20'de gösterilmiştir.

$$k_s = A_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.20)$$

Daha sonra, denklem 2.19, denklem 2.21'de gösterildiği şekilde yeniden yazılabilir.

$$R_{ct} = \frac{RT \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)}{F^2 A k_1 A_0 (SOC)^\alpha} = \frac{k T \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)}{(SOC)^\alpha} \quad (2.21)$$

Burada, $k = \frac{R}{F^2 A k_1 A_0}$ ifadesi bir sabittir. Yük transfer direncinin (R_{ct}) SoC ve T'ye göre bağımlılığı ayrı ayrı elde edilebilir. Bu yaklaşımda, denklem 2.21, denklem 2.22'de gösterildiği gibi yazılmalıdır.

$$\ln\left(\frac{R_{ct}}{T}\right) = \ln k + \left(\frac{E_a}{R}\right) - \alpha \ln(SOC) \quad (2.22)$$

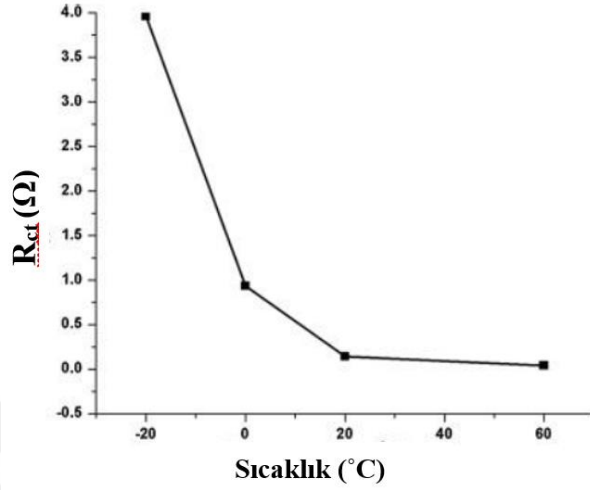
Daha sonra bu denklemlerin diferansiyelleri alınarak denklem 2.23 ve denklem 2.24 elde edilir.

$$\frac{d \ln\left(\frac{R_{ct}}{T}\right)}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{E_a}{R} \quad (2.23)$$

$$\frac{d \ln\left(\frac{R_{ct}}{T}\right)}{d \ln(SOC)} = -\alpha \quad (2.24)$$

Zheng ve ark. [66.] ve Kumar ve ark. [67.], yapmış oldukları çalışmalarda elektrot/ elektrolit arayüzünde ki yük transfer direncinin, Lityum iyon hücrelerde

sıcaklığa en bağımlı direnç kaynağı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, Kumar ve ark. [67.] tarafından yapılan bir çalışmada, LiCoO₂ hücresinin yük transfer direncinin (R_{ct}) -20 ila 60 °C sıcaklık aralığında 4 Ω 'dan yaklaşık 0 Ω 'a düştüğünü göstermişlerdir. Kumar ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada sıcaklığa göre yük transfer direncinde ki değişim Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Yük transfer direncinin sıcaklıkla değişimi [67]

2.5.3.3. Yüzey film direnci

Li-iyon bataryalarda yaygın olarak kullanılan elektrolitler, negatif elektrot potansiyelinde termodinamik olarak kararlı değildir. Bu nedenle, elektrot / elektrolit arayüzeyinde indirgenir ve kimyasal olarak ayrışır. [68, 69] Ayrışan ürünler elektrolit çözeltisinde çözünmez ve çökerek elektrotların yüzeyinde koruyucu bir film tabakası oluştururlar. Bu koruyucu tabaka, elektrolit bileşenlerinin anot yüzeyinde daha fazla indirgenmesini önleyen katı elektrolit arayüzeyi (SEI) olarak adlandırılır. [41, 70] SEI katmanıyla ilişkili direnç, yüzey film direnci (R_{SEI}) olarak ifade edilir ve denklem 2.25'de ki gibi tanımlanır.

$$\frac{1}{R_{SEI}} = A_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (2.25)$$

2.5.4. Sıcaklığa Bağlı Yaşlanma Mekanizmaları

Bataryanın kapasitesinin azalmasına ve direnç artışına neden olan ve yaşlanma mekanizmalarını daha karmaşık hale getiren çok sayıda faktör bulunmaktadır [71.]. Sıcaklık, düşük veya yüksek SoC ve elektrik akımı bir lityum iyon bataryanın performansının azalmasına neden olan ana faktörlerdir [10]. Yaşlanma fenomeni başlangıçta batarya hücre elektrolitinin kimyasal bileşiminde gerçekleşir. Ancak elektrotların bozulması yaşlanmanın ana kaynağıdır [32]. Başlıca bilinen yaşlanma mekanizmaları aşağıdaki şekilde özetlenebilir [50].

- Elektrot yapısında meydana gelen değişiklikler
- Elektrolitin ayrışması
- Aktif malzemenin çözünmesi
- Elektrottaki faz değişimi
- Elektrotlar ve akım toplayıcı yüzeyi üzerinde pasif film oluşumudur.

2.5.5. Sıcaklık Dağılımının Etkisi

Bataryaların performansına sıcaklığın dışında etkiyen bir başka önemli parametrede hücreler arasında ve her bir hücre içerisindeki düzensiz sıcaklık dağılımlarının varlığıdır. Bu durum elektrik dengesizliklerine, batarya performans kaybına ve güç azalmasına neden olur [72]. Tek bir hücre özelinde ise katmanları boyunca sıcaklık dengesizliklerine, hücre boyunca düzensiz akım yoğunluğuna ve bölgesel olarak yaşlanmaya neden olur [51, 73]. Troxler ve ark. [74], yüz hücreye sahip bir batarya paketinin hücreleri arasına kontrollü sıcaklık gradyanı uyguladı ve sıcaklık gradyanının hücre dirençleri üzerindeki etkisini inceleyerek bir model önerdi. Bu yaklaşımda, paralel bağlı direnç setlerinin eş değer dirençlerini hesapladılar ve her bir direnci sıcaklığın bir fonksiyonu olarak düşündüler. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ile türetilmiş katı elektrolit interfaz (SEI) direncine ve yük transfer direncine karşı sıcaklık verilerini denklem 2.26'da gösterilen bir Arrhenius eşitliğine uydurdu.

$$R(T) = R_{ref} \exp \left[-\frac{E_a}{R_{gas}} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.26)$$

Burada, R_{eff} referans sıcaklıktaki direnci, R_{gas} ideal gaz sabitini, T_{ref} referans direncin karşılık geldiği referans sıcaklığı ve T hücre sıcaklığını ifade eder. Aktivasyon enerjisi (E_a) ise direncin sıcaklık hassasiyetini kontrol eder.

Klein ve ark. [75] 10 Ah kapasiteli Lityum iyon kese tipi batarya hücresinin nominal kapasitesi üzerinde sıcaklık gradyanının etkilerini inceledi. Bu çalışmanın sonucunda sıcaklık gradyanının artması ile beraber potansiyel değerlerinin arttığını belirttiler. Ayrıca sıcaklık gradyanının, artan sıcaklık farkı ve azalan SoC değeriyle beraber maksimum kapasiteyi etkilediğini ifade ettiler.

2.6. Lityum İyon Bataryalarda Isı Üretimi

Şarj ve deşarj işleminin neden olduğu elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda lityum iyon batarya hücresinde ısı oluşumu meydana gelir. Bu reaksiyonlar sonucunda bataryanın separatör, elektrotları ve akım kolektörleri gibi bileşenlerinde farklı miktarlarda ısı üretimi gerçekleşir [76]. Şekil 2.17’de bir lityum iyon hücresindeki ısı kaynakları şematik olarak gösterilmektedir. Elektronlar akım kolektörlerinden geçerken ohmik direnç sebebiyle ısı üretirler. Elektrolitten separatör yapısına difüz eden lityum iyonların, separatörün mikro gözenekli yapısından geçerken ohmik direnç ile karşılaşması sonucu ısı üretilir. Elektrotlarda ise, elektrokimyasal reaksiyonların meydana geldiği aktif bölgede, aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonları sonucunda ısı üretimi gerçekleşir. Sonuç olarak tersinir, tersinmez, karışım ısı (elektrolit ve aktif malzeme içindeki konsantrasyon gradyanlarıyla ilişkili) [77] ve faz değişim ısı [78] olmak üzere çok çeşitli kaynaklar lityum iyon bataryalarda ısı üretimine katkı sağlar [76, 79]. Ancak tersinir (elektrot/elektrolit arayüzünde interkalasyon/deinterkalasyon reaksiyonları nedeniyle üretilen ısı) ve tersinmez (elektrotlarda ve elektrolitte Joule (Ohmik) ısı ve reaksiyon ısı) ısı kaynakları hücre içerisinde ısı üretimine katkı sağlayan başlıca ısı kaynaklarıdır [80]. Bununla beraber karışım ısı ve faz değişim ısı tersinir ve tersinmez ısı kaynaklarına göre etkilerinin daha az olmalarından dolayı literatürde genellikle görmezden gelir [81].

Bir lityum iyon batarya hücresinde ki ısı üretimi tersinir ve tersinmez ısı kaynaklarının toplamı ile denklem 2.27’da ki gibi ifade edilir.

$$Q_g = Q_{rev} + Q_{irr} \quad (2.27)$$

Burada, Q_g toplam ısı üretim oranı, Q_{rev} tersinir ısı üretimi ve Q_{irr} tersinmez ısı üretimini ifade eder.

Toplam ısı üretimi oranı [79] denklem 2.28’da gösterildiği gibi hesaplanır.

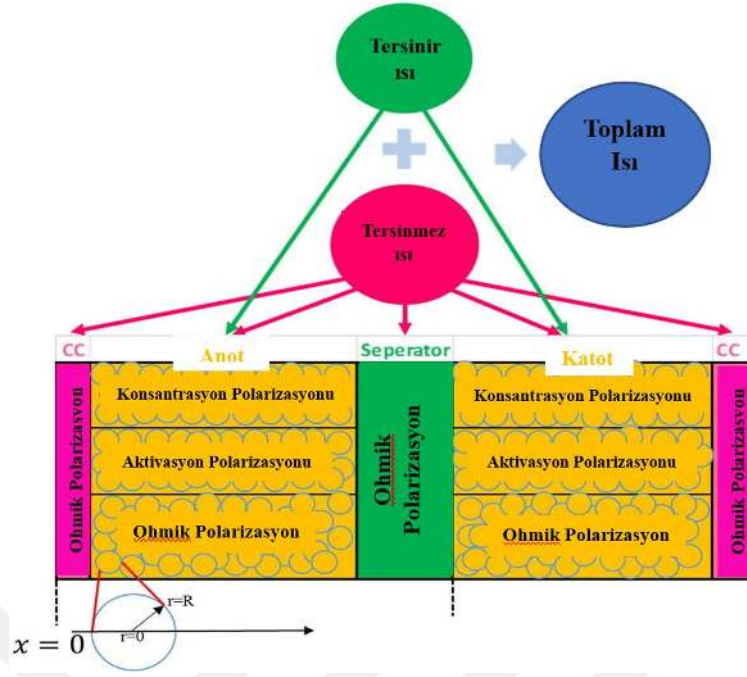
$$Q_g = I(E_{OCP} - E) - I \left[T \frac{dE_{OC}}{dT} \right] \quad (2.28)$$

Burada, I akımı (A), E_{OCP} açık devre potansiyelini (V), E hücre potansiyelini (V) ve $\frac{dE_{OC}}{dT}$ SOC’nin fonksiyonu olan entropik ısı katsayısını ifade eder.

Denklem 2.28’in bir başka ifadesi de denklem 2.29’daki gibidir [82].

$$Q_g = I^2 R_i - IT \frac{\Delta S}{nF} \quad (2.29)$$

Burada, R_i iç direnci, ΔS entropi değişimini, n elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu transfer edilen electron sayısı, F ise Faraday sabitini temsil eder.



Şekil 2.16. Lityum iyon bataryalardaki ısı üretimi kaynaklarının şematik olarak gösterimi, x yönü hücre kalınlığını, r yönü ise 0'dan partikül yarıçapına kadar olan yarıçapı kapsar [83]

2.6.1. Tersinir Isı Kaynağı

Tersinir ısı üretimi lityum iyon bataryaların şarj/deşarj döngüsü lityum ve iyonlarının interkalasyon ve de-interkalasyon işlemleri sırasında meydana gelen entropi değişikliklerinden kaynaklanır [79]. Tersinir ısı akım, iç sıcaklık ve açık devre potansiyeli ile ilgilidir [84]. Elektronların interkalasyon ve de-interkalasyonu sonucu oluşan entropik ısı kaybı denklem 2.30'daki [85] şekilde ifade edilir.

$$Q_{rev} = -IT \frac{dE_{OC}}{dT} \quad (2.30)$$

Burada bahsedilen entropik ısı katsayısı, farklı sıcaklıklarda ki bataryanın açık devre voltajına göre değişiklik gösterir. Entropik ısı kaybı, bir batarya hücresinin şarj veyadeşarj durumuna bağlı olarak pozitif veya negatif işaretli olabilir. Böylece tam bir döngü için çok küçük bir değere sahip olur. Bu nedenle HEV ve EV uygulamalarının çoğunda tersinir ısı kayıpları ihmal edilir [86].

2.6.2. Tersinmez Isı Kaynağı

Tersinmez ısı elektrolitte ve akım kolektörlerinde üretilir. Bir batarya hücresinde ki toplam ısıнын %70'inden fazlasına önemli bir katkısı bulunur [85]. Joule (Ohmik) ısısı ve reaksiyon ısısı ile tersinmez ısı üretiminin başlıca kaynaklarıdır. Burada Joule ısısı, elektrolitteki iyonların akışına ve katı hal elektrot malzemeleri (yani partikül faz) ve akım kolektörlerindeki elektronlara karşı etkili direncin bir sonucu olarak ortaya çıkar [79]. Ekzotermik bir reaksiyondur ve doğrudan C-oranına bağlıdır [87]. Reaksiyon ısısı ise elektrokimyasal reaksiyonlarla ilişkilidir ve reaksiyonlar için mevcut yüzey alanı miktarına ve aşırı potansiyele bağlıdır [80]. Tersinmez ısı üretim oranı aşağıdaki denklem 2.31'deki şekilde ifade edilir [87].

$$Q_{irr} = I(E_{OCP} - E) = I^2 R_i \quad (2.31)$$

2.7. Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Bataryaların şarj/deşarj süreçleri sırasında hücre içerisinde gerçekleşen bir dizi kimyasal reaksiyon sonucunda ohmik ve ohmik olmayan mekanizmalar sebebiyle ısı üretimi gerçekleşir ve batarya sıcaklığında ki değişimi kaçınılmaz hale getirir [88]. Sıcaklık hücre içerisinde ki elektrokimyasal reaksiyonları doğrudan etkilediği için bataryanın performansı açısından oldukça önemli bir parametredir. Bu sebeple bataryaların belli bir sıcaklık aralığında sağlıklı bir şekilde çalışması hücrenin ömrü ve kapasitesi açısından gereklidir [89]. Bir lityum iyon bataryanın verimli ve sağlıklı bir şekilde performans göstermesi için gerekli olan optimum çalışma sıcaklığı 20 ° C ile 50 ° C arasında değişir [90, 91]. Şekil 2.18'de çevrim ömrünün sıcaklığa bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Çevrim ömrünün sıcaklığa bağlı olarak değişimi [92]

Düşük sıcaklıkta, elektrolitin viskozitesi artış gösterir ve buna bağlı olarak da iyonik iletkenliğinin azalması anlamına gelmektedir. Bu durum hücrenin iç direncini artırır [93, 94]. Ayrıca, 0 ° C'nin altında ki sıcaklıklarda geri dönüşü olmaya hücre hasarlarına neden olabilecek özel yaşlanma mekanizmaları meydana gelir. Bu mekanizmalardan en önemlisi şarj sırasında elektrotların yüzeyinde ki şarj transfer direncinin artması sebebiyle anot üzerinde lityum birikmesi ile oluşan lityum kaplama ve bunun sonucunda da katoda kadar uzanan lityum dentritik yapılarının oluşmasıdır [24, 94].

Bataryaların optimum çalışma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda uzun süreli performans göstermeleri de yaşlanma mekanizmalarında rol oynar. Genel olarak, çalışma sıcaklığının 10 °C yükselmesi batarya hücresinin hizmet ömrünü %50 oranında azalmasına neden olur [24]. Arrhenius yasasına göre, kimyasal reaksiyon hızı sıcaklık artışıyla üstel olarak artar. Bu durumda yüksek sıcaklıklarda elektrolitin termal olarak bozulması ve bunun sonucunda termal kaçak reaksiyonları oluşması ile beraber batarya hücresinin alev alması ve hatta patlaması söz konusu olacaktır [24, 88]. Bu sebeple elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların verimli ve güvenli bir şekilde çalışabilmeleri için etkin bir BTYS tasarlanması hayati önem taşımaktadır.

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların soğuk ve sıcak iklim koşullarında verimli bir şekilde çalışabilmeleri beklenir. Bu sebeple etkin bir batarya termal yönetim sisteminin en önemli görevi batarya paketinin sıcaklığını optimum çalışma koşullarında tutulması yani düşük sıcaklıklar da bataryanın verimliliğini arttıracak şekilde ısıtması ve yüksek sıcaklıklarda da bataryayı soğutması gerekmektedir.

Bununla birlikte bir diğer önemli görevi ise hücrelerde homojen bir sıcaklık dağılımının sağlanmasıdır. Batarya paketinde bulunan her bir hücrenin aynı noktadan ölçülen sıcaklık farkının 5 °C'den az olması istenir [95, 96]. Eğer hücre sıcaklıklarının homojenliği korunmazsa, batarya paketinde bulunan hücreler farklı yaşlanır ve bu durum kullanılabilir enerji miktarını azalmasına neden olur. [88].

Batarya termal yönetim sisteminin elektrikli araçlara uygulanabilmesi için kompaktlık, hafiflik, düşük maliyet, yüksek güvenilirlik, kolay bakım ve düşük parazittik güç kullanımı gibi özelliklere sahip olması gerekir [97]. Bununla beraber hava ile soğutma, sıvı ile soğutma, faz değiştiren malzemelerle (FDM) ile soğutma ve ısı boruları ile soğutma, batarya termal yönetiminde sıklıkla kullanılan tekniklerdir [98, 99, 100].

2.7.1. Aktif Batarya Termal Yönetim Sistemleri

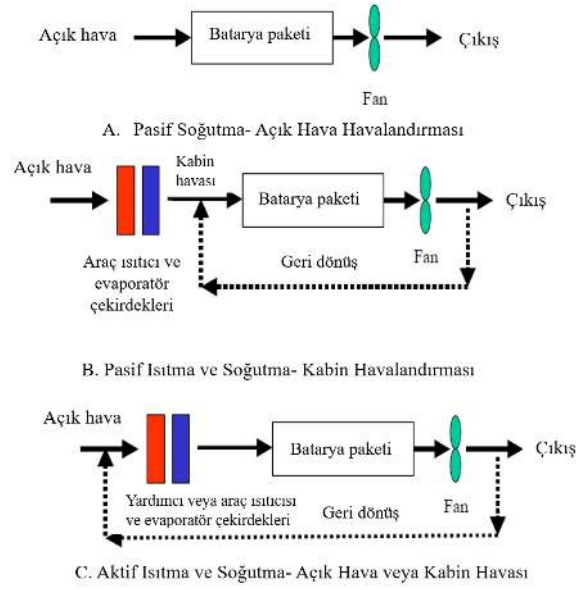
Fan ve pompa gibi harici cihazlar kullanılarak li-iyon batarya hücresinin şarj / deşarj süreci boyunca sıcaklığının kontrol edilmesini sağlayan yöntemler aktif batarya termal yönetim sistemleri olarak adlandırılır. Bu sistemlerde batarya sıcaklığını performans kaybının ve güvenlik sorununun olmadığı çalışma sıcaklığı aralığında tutabilmek için elektrik enerjisi tüketir [101].

2.7.1.1. Hava Tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Hava bazlı batarya termal yönetim sistemlerinin basitliği, maliyetinin düşük olması ve hafifliği nedeniyle yaygın olarak kullanılan geleneksel bir yöntemdir [102]. Bu avantajlarından dolayı birçok elektrikli araç üreticisi (Honda Isight, Toyota Prius, Nissan Leaf, Renault Zoe ve Mitsubishi i-MiEV gibi) bataryaların soğutulması için hava bazlı sistemleri tercih etmektedir [103]. Hava ile soğutma teknolojisi kullanan sistemler doğal taşınım ve zorlanmalı taşınım kullanılır. Ancak doğal taşınım kullanılarak yapılan soğutma stratejileri havanın düşük ısı transfer katsayısı nedeniyle aşırı ortam koşullarında etkinliği azalmaktadır. Bu nedenle doğal taşınım yerine zorlanmalı taşınım ile bataryaların soğutulması sağlanır. Bununla birlikte, bir ortam olarak hava, düşük ısı kapasitesi ve termal iletkenliği nedeniyle soğutma sınırlamalarına sahiptir. [104]. Bu sebeple araştırmacılar hava ile batarya termal

yönetim sisteminin lityum iyon bataryaların maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı üzerindeki etkinliğini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Shahid ve Agelin-Chaab [104] yapmış olduğu çalışmada, hareketli parça ve pompalama gücü gereksinimine ihtiyaç duymayan hibrit bir batarya termal yönetim sistemi önerdiler. Bunun için hava akışının soğutma performansını arttırmak amacı ile çoklu delta kanatçık girdap üreteçleri ve ölü hava bölgelerine akışı yönlendirmek için batarya paketinde jet girişlerini kullandılar. Bu tasarıma ek olarak girdap üreteçleri, jet girişleri ve sıvı ceketinin de kullanıldığı hibrit bir sistem tasarladılar. Tasarladıkları iki batarya termal yönetim sisteminin soğutma performanslarını karşılaştırdılar. Sonuç olarak önerilen hibrit sistemin hem paket hem de hücre seviyesinde etkin ve sıcaklık homojenliğini sağladığını belirttiler. Cen ve Jiang [105] yapmış oldukları çalışmada, batarya paketinin ısı verimini artırmak için kanatlı bir borulu ısı eşanjörü kullandılar ve soğutma sistemini araç havalandırma sistemine entegre ettiler. Çalışmalarında, genişleme valfi kısma seviyesi, termostat duyarlılığı ve orantılı-integral-türev (PID) algoritması gibi çeşitli deneysel prosedürleri araştırdılar. Kısma valfi daha geniş bir açıklıkta olursa, soğutma sıvısının aşırı ısınmasını önlediğini ve akü modülündeki en yüksek sıcaklık farkının 2 °C olduğunu gösterdiler. Xie ve ark. [106] yapmış olduğu çalışmada, lityum iyon bataryaların termal performansını arttırmak için soğutma ortamı olarak hava kullanılan batarya termal yönetim sistemini kullandılar. Bu sistemin etkinliğini arttırmak amacıyla iki tip girdap üretici tasarladılar. Tasarladıkları girdap üreteçlerinin hava akışına ve ısı transferine olan etkilerini belirlemek için sayısal simülasyonlardan yararlandılar. Bu çalışma sonucunda, her iki girdap üreticinin ısı transferini arttırdığını ancak sadece delta kanatçık tasarımının yerel ısı transferini arttırdığını gösterdiler.

Hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemini özetleyecek olursak, yöntemin tasarımının basit, maliyetinin düşük ve hafif olması nedenine karşın havanın ısı transfer katsayısının düşük olması nedeniyle batarya hücrelerinden ısı emilimi yavaştır. Ayrıca yüksek şarj / deşarj hızlarında (5-10 C) batarya hücrelerini soğutmak için yüksek hava akış hızları gerekmektedir. Buda sistemin maliyetini arttıran bir etmendir. Şekil 2.19'da hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerinin genel şeması gösterilmektedir.

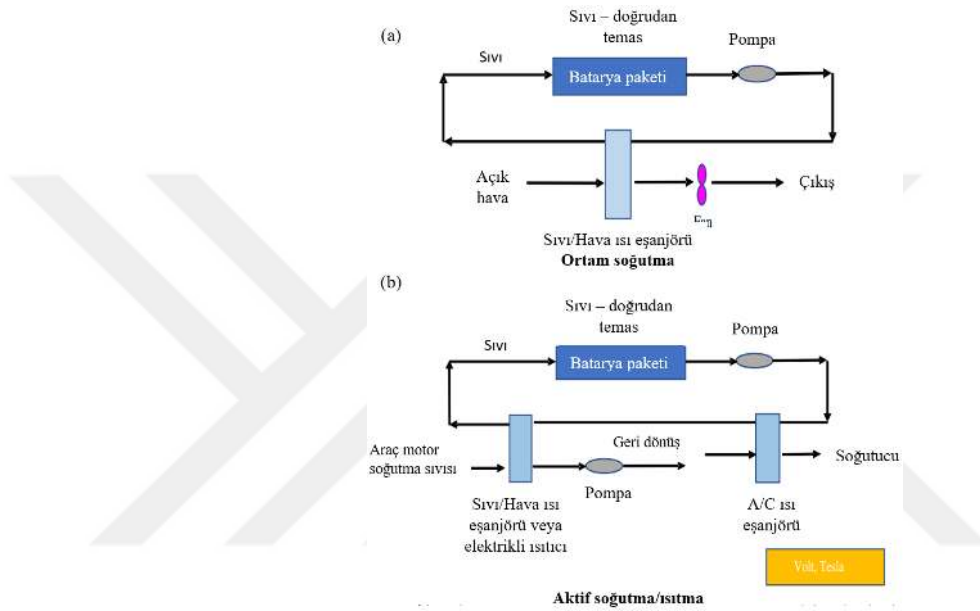


Şekil 2.18. Hava ile BTYS'lerin genel şematik gösterimi [107]

2.7.1.2. Sıvı Tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Yüksek C-oranlarında ki şarj / deşarj döngüsü sırasında batarya paketinin çalışma sıcaklığının kontrolünde hava ile soğutma uygulanan batarya termal yönetim sistemlerinin havanın ısı transfer katsayısının sıvılarınkine kıyasla oldukça düşük olması nedeniyle gerekli soğutma gereksinimlerini karşılamakta zorlandıkları belirtilmektedir [108]. Hava ile karşılaştırıldığında soğutma sıvılarının kullanıldığı batarya termal yönetim sistemlerinin sıvılardaki daha ince sınır tabakası sayesinde daha iyi bir ısı dağılım performansı göstermeleri, [101], %40 oranına kadar parazittik enerji tasarrufu sağlamaları ve batarya paketinin soğutma verimliliğini düşürmeden daha kompakt yapıda tasarlanabilmeleri gibi çeşitli avantajları bulunmaktadır [109]. Bununla birlikte, elektrikli araçlarda sıvı soğutmanın uygulanabilmesi için eşanjör, valf, pompa vb. bazı ekstra donanımlara gereksinim bulunmaktadır. Bu ekipmanların sisteme eklenmesi enerji tüketimini, maliyeti ve sistemin karmaşıklığını artırır [85]. Bu sebeple batarya üreticilerinin aktif ve pasif sıvı soğutma veya ısıtma için genellikle kullandıkları çeşitli soğutma stratejileri Şekil 2.20'de gösterilmektedir. Burada pasif sıvı soğutma sisteminde soğutucu ortamdan ısının uzaklaştırılması için ortam havası kullanılır. Ortam koşullarının ılıman bir sıcaklıkta (10–35 °C) olması batarya termal yönetiminin daha iyi bir performans göstermesi açısından önemlidir [103]. Bunun yanı sıra çok sıcak veya soğuk ortam koşullarında pasif termal yönetim sisteminde soğutma

sıvısından ısıyı uzaklaştırmak için ortam havası yetersiz kaldığından dolayı aktif soğutma / ısıtma sistemleri kullanılır. Burada soğutma sıvısındaki ısının uzaklaştırılması ısı değiştiriciler ile sağlanır. Bu termal yönetim sistemi buharlaştırıcılar (evaporatör), ısıtma petekleri, motor soğutma suyu vb. gibi ekipmanlara gereksinim duyar [103]. Tesla, BMW i-3 ve i-8, Chevy Volt, Audi e-Tron GT ve Jaguar I-PACE batarya termal yönetim sistemi olarak sıvı soğutmayı kullanan elektrikli araçlara örnek olarak verilebilir [103].



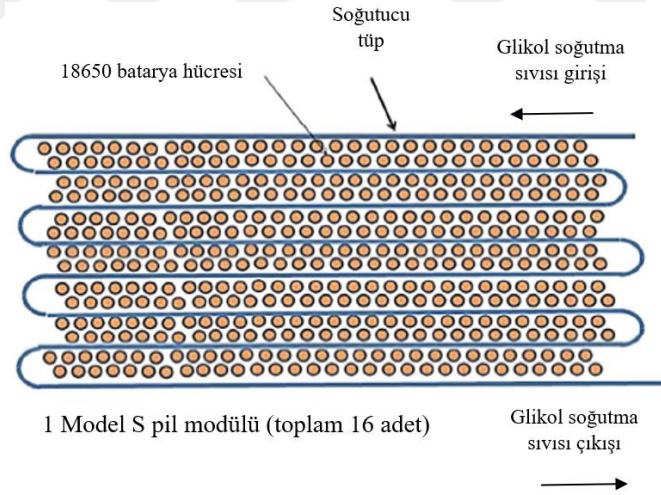
Şekil 2.19. Aktif ve pasif sıvı termal yönetim için genel şematik gösterimi [103]

Araştırmacılar lityum iyon bataryalar için kullanılan sıvı soğutma sistemlerinin performansını arttırmak için çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Yates ve ark. [110] batarya termal yönetim sistemi üzerine yapmış oldukları çalışmada mini-kanal soğutmalı silindir (MCC) ve kanal soğutmalı ısı emici (CCHS) olmak üzere iki tane soğutma sistemi tasarladılar. Kanal sayısının, delik çapının, kütleli debinin ve akışkanın giriş konumunun etkileri sayısal olarak incelendi. Bu çalışmanın sonucunda her iki soğutma yönteminin de maksimum sıcaklığı ve sıcaklık dağılımını iyi bir şekilde kontrol ettiği ancak MCC soğutma yönteminin daha etkili soğutma sağladığını belirttiler. Wang ve ark. [111] yapmış olduğu çalışmada farklı batarya soğutma yapılarını tasarladılar. Farklı soğutma yapılarının, mini kanalların sayısının ve giriş kütleli debisinin batarya paketinin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerini tek faktör analiz yöntemi kullanarak incelediler. Sonuçlar soğutma yapısı tasarımının batarya paketindeki en yüksek

sıcaklığı önemli ölçüde etkilediğini gösterdi. Ayrıca mini kanalların sayısı arttıkça batarya paketindeki en yüksek sıcaklığın düşüş eğilimi ile azaldığını gösterdiler. Deng ve ark. [112] prizmatik lityum iyon bataryaların etkili bir şekilde soğutulması için serpantin kanal konfigürasyonuna sahip soğutma plakası tasarladılar. Yaptıkları çalışmada kanal sayısı, kanal yerleşimi ve akışkanın kanala giriş sıcaklığının bataryanın termal performansı üzerindeki etkilerinin incelemek için bir dizi sayısal çalışmalar gerçekleştirdiler. Sonuç olarak kanal sayısının artmasının termal performansı iyileştirdiğini, kanal yerleşiminin de ısı transfer performansı etkilediğini gösterdiler. Chen ve ark. [113] batarya termal yönetim sistemleri için hava soğutma, doğrudan sıvı soğutma, dolaylı sıvı soğutma ve kanatçıklar ile soğutma olmak üzere dört farklı soğutma stratejisini incelediler. Soğutma yöntemlerinin etkinliklerini değerlendirebilmek için farklı soğutucu akışkan hızlarına veya ısı transfer katsayılarına sahip durumlarda, bir hücredeki soğutucu akış güç tüketimini, maksimum sıcaklık artışını, sıcaklık farkını ve soğutma yöntemleri arasında aynı hacim varsayımı yapılarak soğutma sisteminin batarya paketinde ki ilave ağırlığını karşılaştırdılar. Sonuç olarak hava soğutma sisteminin aynı ortalama sıcaklığı korumak için diğer yöntemlere daha fazla enerjiye gereksinimi olduğunu gösterdiler. En maksimum sıcaklıktaki artışın en düşük olduğu yöntemin dolaylı sıvı soğutma olduğunu belirttiler. Kanatçık ile soğutma yönteminin ise batarya paketine en fazla ilave ağırlık sağlayan yöntem olduğunu gösterdiler. Doğrudan sıvı soğutma tekniğinin soğutma performansı dolaylı soğutma sisteminden daha yüksek olmasına rağmen dolaylı soğutma sisteminin daha pratik olduğunu belirttiler. Lan ve ark. [114] alüminyum mini kanallı tüpler kullanılarak yeni bir batarya termal yönetim sistemi tasarladılar. Bu sistemin termal performansını belirlemek için farklı deşarj hızları, farklı akış hızları ve farklı kanal tasarımlarını tek bir prizmatik Li-iyon hücre için parametrik olarak incelediler. Sonuç olarak tasarlanan sistemin maksimum sıcaklık artışını ve sıcaklık farkını azalttığını ve mini kanalların batarya termal yönetimi için uygulanabileceğini gösterdiler.

Sıvı soğutma teknikleri genel olarak doğrudan ve dolaylı olarak sınıflandırılmaktadır [102]. Doğrudan sıvı soğutma, batarya ile sıvının temasını gerektirmektedir. Örnek olarak sıvı daldırmalı soğutma verilebilir [115]. Doğrudan soğutma ile hücrenin tüm yüzeyini ve elektrotlardaki (pozitif ve negatif) yerel ısıtma etkisini azaltarak sıcaklık homojenliğini iyileştirilebilir. Bu yöntemin uygulanabilmesi

için yüksek soğutma verimine ulaşmak için yüksek ısı iletkenliği, düşük viskozite, yüksek ısı kapasitesi gibi özelliklere sahip potansiyel soğutma ortamları tercih edilmelidir [108]. Ancak bu yöntemde batarya soğutma ortamının içerisine daldırılacağı için kullanılan potansiyel soğutma ortamlarının elektriksel kısa devreyi önlemek için dielektrik (iletken olmayan) olması gerekmektedir [116]. Bu yöntemde kullanılan hidrofloroeter, mineral yağlar, deiyonize su veya silikon bazlı yağlar dielektirik sıvılara örnek olarak verilebilir [117]. Dolaylı sıvı soğutma, bataryanın soğutulması için soğutma ortamı ile temas etmesine gereksinimi yoktur. Bunun yerine bataryanın soğutma plakaları ve ısı boruları ile temas etmesi sağlanır. Doğrudan soğutmanın avantajlarına rağmen dolaylı soğutma yöntemi daha güvenlidir [108]. Ayrıca kullanılan soğutma ortamlarının yüksek termal iletkenliğe ve düşük viskozitelere sahip olmaları nedeniyle daha az güç tüketimi sağlar ve ısı transfer verimliliğini artırır [108]. Dolaylı soğutma sisteminde soğutucu akışkan olarak su, nanoakışkan, sıvı metal veya glikol/su karışımı kullanılabilir [102]. Tesla elektrikli aracının kullanmış olduğu soğutma tekniği Şekil 2.21’de gösterilmektedir. Burada silindirik lityum iyon bataryaların soğutulması için serpantin şeklindeki metalik tüpler kullanılmaktadır.



Şekil 2.20. 18650 silindirik batarya hücrelerinin örnek soğutma stratejisi [103]

Özetlenecek olursa, sıvı soğutmanın hava soğutmadan daha verimli olduğu ancak hacmi, karmaşıklığı, kaçak problemlerini ve giderleri arttırdığı görülmüştür. BTMS sıvı soğutma durumunda bu sorunların ele alınması gerekir.

2.7.2. Pasif Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Pasif BTYS'ler, güç tüketimi olmadan batarya sıcaklığını kontrol edebilen sistemler olarak tanımlanmaktadır. Aktif termal yönetim sistemlerinin aksine hareketli parçalar içermemesi ve güç tüketimlerinin olmamasından dolayı pasif termal yönetim sistemlerine olan ilgi zamanla artmaktadır. Yaygın olarak kullanılan pasif termal yönetim sistemleri faz değiştiren malzemeler ve ısı borularıdır [101].

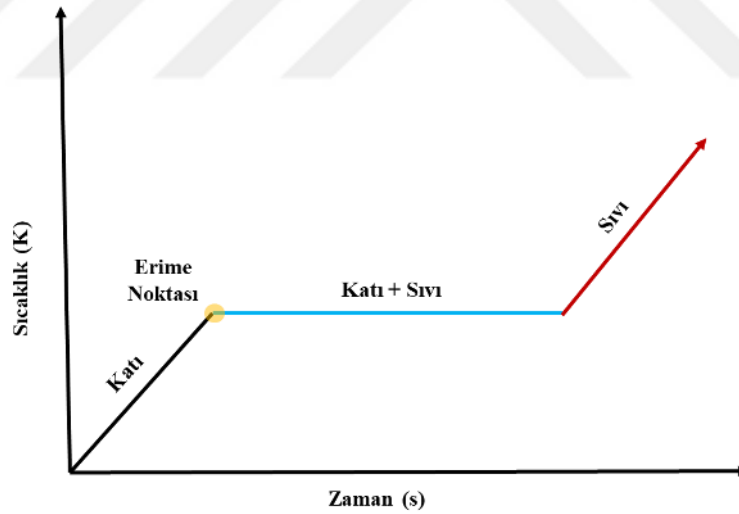
2.7.2.1. Faz Değiştiren Malzeme Tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Neredeyse izotermal durumda faz değişimi ile enerji depolayan gizli ısı depolama malzemeleri faz değiştiren malzemeler (FDM) olarak adlandırılır [118]. Termodinamik teorisine göre, bir maddenin sıcaklığı, faz değişimi sırasında sabit kalır. Buna göre faz değişim malzemeleri termal enerji deposu olarak kullanılabilir [119]. Yani FDM'lere dışarıdan ısı verildiğinde, ilk olarak katı formda duyulur ısıyı (ısıtma veya soğutma yoluyla olan enerji) depolar. Daha sonra erime sıcaklığına ulaştıktan sonra ise sabit bir sıcaklıkta fazın katıdan sıvıya dönüşmesiyle gizli ısı (eritme, buharlaştırma veya katılaştırma ile sıvılaştırma yoluyla olan enerji) depolaması gerçekleştirir. Fazın tersine çevrilmesi başladığında, gizli ısının çevreye salınması nedeniyle faz değiştiren malzemenin sıcaklığı yükselir [101, 120]. Bu nedenle FDM'ler güneş enerjisini [121] veya herhangi bir atık enerjiyi [122] depolamak, elektronik soğutma [123], bina termal yönetimi [124] ve batarya termal yönetimi [125] gibi termal yönetim uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bataryaların FDM ile soğutulması, enerji ihtiyacına gereksinim duymayan pasif bir tekniktir. FDM tabanlı batarya termal yönetim sisteminin en önemli özelliği, FDM'in faz değişimi sırasında gizli ısıyı soğurması veya salmasıdır. Bataryaların şarjdeşarj döngüsü sırasında ürettikleri ısı FDM tarafından emilir. Böylece FDM'nin sıcaklığı erime sıcaklığına kadar artmaya başlar. Erime sıcaklığına ulaştığında FDM'de faz değişimi başlayarak sıvı faza geçiş yapar ve doğal konveksiyonu başlatır böylece batarya hücrelerinden ısı emilimini daha da artırır. Ancak FDM'nin tamamen erimesi sonucunda düşük termal iletkenlik nedeniyle bir ısı transfer bariyeri haline gelebilir [108]. Bunun sonucunda batarya hücrelerinin daha da ısınmasına neden olur. Bu durumun engellenmesi için depolanan ısının FDM tarafından atmosfere dağıtılması

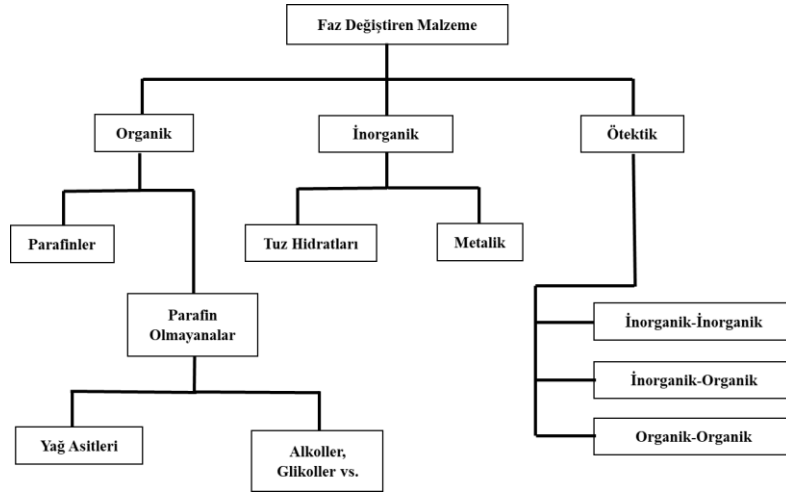
önemlidir. Bu sayede, FDM tabanlı batarya termal yönetim sistemi hücredeki maksimum sıcaklık artışını azaltabilir. [101]. Tersine bir durumda yani bataryanın bekleme süresi sırasında FDM depoladığı enerjiyi serbest bırakarak hücrelerin ısıtılması görevini görür [108]. FDM'lerin ısı depolama süreci Şekil 2.22'de gösterilmektedir. Bu nedenle, BTYS'ler için uygun FDM seçimi çok kritiktir ve aşağıdaki gereksinimleri karşılaması gerekir [101].

- Batarya hücrelerinden maksimum miktarda ısı soğurulması için yüksek gizli ısı ve özgül ısı kapasitesi,
- FDM'nin daha iyi ısı dağıtım oranı ve emilimine sahip olması için yüksek termal iletkenlik,
- Batarya paketinin ağırlığına etkisinin az olması için düşük yoğunluk,
- Elektrotlar veya elektrolit ile kimyasal olarak reaksiyona girmemeli,
- Bataryanın çok sayıda şarj / deşarj döngüsü için FDM'in kullanımı açısından FDM döngüsel kararlılığı ve
- Ucuz ve kolay bulunabilir olması gerekir.



Şekil 2.21. Faz değiştiren malzemelerin ısı depolama süreci [126]

Yaygın olarak kullanılan faz değiştiren malzemeler Şekil 2.23'de görüldüğü üzere organik FDM, inorganik FDM ve ötektik FDM olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 2.22. Faz değıştiren malzemelerin sınıflandırılması [127]

Ötektik bileşenler her biri uyumlu bir şekilde eriyen ve katılaşılan iki veya daha fazla bileşenin minimum erime noktalı karışımı olarak tanımlanmaktadır [120]. İzotermal olarak katılaşırlar ve erirler. Bununla birlikte, sıvı faz, bileşenlerinin katı fazlarının karşımı ile dengedir [128]. Bu sebeple Ötektik bir FDM, organik, inorganik veya her ikisinin iki veya daha fazla bileşiminin bir kombinasyonudur. Ötektik FDM'lerin en önemli sorunu yüksek maliyetinin olmasıdır [120].

İnorganik FDM, hidratlanmış tuzlardan veya metallerden oluşur. Nitratlar, karbonatlar ve sülfatlar gibi çoğu metal tuzu, yüksek erime noktalarına sahiptir ve 200-1000°C'de orta ve yüksek sıcaklıkta termal depolama uygulamaları için uygundur [129].

Organik FDM, parafin ve yağ asitleri gibi karbon bazlı bir bileşiklerden oluşur. Parafin gibi yaygın olarak kullanılan organik faz değıştiren malzemeler sahip oldukları yüksek gizli ısı, toksik olmama, kimyasal olarak kararlı olma ve aşındırıcı olmama gibi çeşitli avantajlarından dolayı öne çıkar [119]. Dezavantajları ise, parafin malzemesinin faz geçişi gerçekleştikten sonra hacmi değışmektedir. Bu durum, birkaç katı-sıvı faz geçiş döngüsünden sonra parafinin termomekanik özelliklerini etkileyebilecek şekil değışikliğine sebebiyet verebilir. Bunun yanında eriyerek sıvı hale geçen parafinin ekipmanlara sızması daha kolaydır [120]. Ayrıca, termal iletkenliklerinin düşük olması nedeniyle emilen ısıyı dış ortama hızla bir şekilde atamaz. Bu sebeple araştırmacılar saf parafinin termal iletkenliğini iyileştirmek için nano malzemeler [130], gözenekli

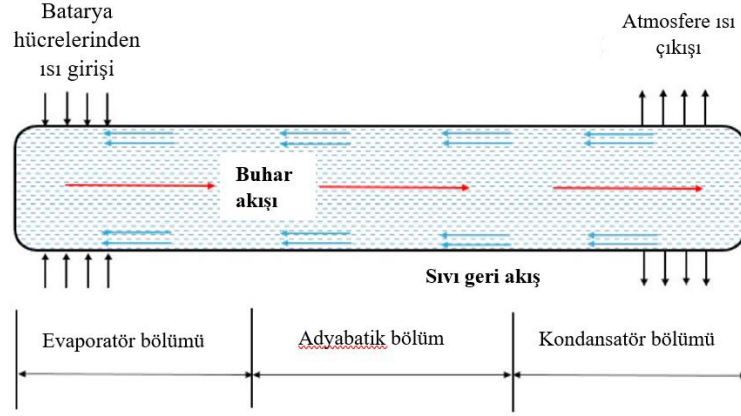
malzemeler [131], metalik malzemeleri eklemektedir. [132]. Bu doğrultuda araştırmacılar FDM'lerin termal iletkenliklerini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar. Verma ve Rakshit [133], güç koşullarında ve yüksek ortam sıcaklığında lityum iyon batarya paketinin termal davranışını parametrik olarak incelediler. Bu çalışmada, batarya sıcaklığının kontrolü için uzunlamasına dikdörtgen kanatçık ve FDM içeren termal yönetim sistemi tasarladılar. Sonuç olarak 30 mm uzunluğunda kanatçıkların kullanıldığı durumda 7 mm, 9 mm ve 12 mm FDM kalınlıkları için bataryada oluşan maksimum sıcaklığın sırasıyla 16 K, 22 K ve 26 K düştüğünü gösterdiler. Ayrıca kanatçıkların eklenmesi batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkını iyileştirdiğini belirttiler. Liu ve ark. [134] pasif BTYS olan FDM'nin temas alanını ve termal iletkenliğini iyileştirmek için bal peteği yapısına sahip kanatçık tasarımı gerçekleştirdi. Bu çalışmada, optimum bal peteği yapısını belirleyebilmek için farklı bal peteği çekirdek şekillerinin, boyutlarının ve dizilimlerini doğal taşınım altında ki FDM'nin erime durumu üzerindeki etkilerini incelediler. Yapılan çalışma sonucunda, doğal konveksiyon altında altıgen geometriye sahip bal peteği kanatçık yapısı ile karşılaştırıldığında üçgen bal peteği kanatçık geometrisine sahip FDM'nin batarya hücresi üzerindeki sıcaklık düşüşünü %23.3 oranında iyileştirdiği belirtildi. Fan ve ark. [135] FDM'lerin kullanıldığı pasif BTYS'lerin etkinliğini arttırmak için metal kanatçıkları kullandılar. Yapmış oldukları çalışmada, kanatçıkların dağılımı, kanatçık uzunluğu ve ortam sıcaklığının batarya modülünün termal davranışı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelediler. Sonuç olarak, metal kanatçıkların ısı dağıtımını arttırdığını ve bununla beraber çalışma süresini iyileştirdiğini belirttiler. Zou ve ark. [136] li-iyon bataryaların termal yönetiminde kullanılan FDM'lerin termal performansını arttırmak için saf FDM içerisine çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve grafen ekleyerek MWCNT tabanlı, grafen tabanlı ve MWCNT/grafen tabanlı kompozit faz değişim malzemelerini hazırladılar ve termal performanslarını deneysel olarak incelediler. Bu çalışma sonucunda, saf faz değiştiren malzeme içerisine grafenin eklenmesi MWCNT eklenmesine göre termal iletkenliği daha fazla iyileştirdiğini belirttiler. Wang ve ark. [132] silindirik bataryanın sıcaklık kontrolü için kompozit faz değiştiren malzeme ve dikey kanatçık yapısına sahip bir termal yönetim sistemi tasarladılar. Yapılan bu çalışmada ortam sıcaklığı, farklı sayıda dikey kanatçık ve ısı girdisinin etkilerini inceleyerek tasarlanan batarya termal yönetim sisteminin etkinliği araştırıldı. Çalışma sonucunda dikey kanatçık yapısına sahip FDM termal yönetim sisteminin uzun çalışma süreleri ile iyi termal performans sağladığını

belirttiler. Samimi ve arkadaşları [137] li-iyon bataryaların soğutulmasında pasif bir termal yönetim olan kompozit FDM kullandılar. Bu çalışmada, kompozit FDM içerisindeki karbon fiber oranının batarya sıcaklığı üzerindeki etkileri etkilerini incelediler. Sonuç olarak, FDM içerisine karbon fiberlerin eklenmesi, FDM'nin termal iletkenliğini arttırdığını ve bu nedenle hücre içerisinde ki sıcaklık dağılımını olumlu yönde etkilediğini belirttiler. Ayrıca karbon fiber yüzdesinin artması batarya hücresindeki sıcaklık dağılımını iyileştirdiğini gösterdiler.

2.7.2.2. Isı Boruları Tabanlı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Isı boruları harici bir güce gereksinim duymadan kendiliğinden çalışabilen ve çok küçük sıcaklık farklarında bile sıvı-gaz faz değişim prensibini kullanarak büyük miktarlarda ki ısıyı yüksek hızlarda önemli mesafelere taşıyabilen pasif termal yönetim cihazlarıdır [97]. Isı boruları sahip oldukları kompakt yapı, esnek geometri, uzun ömür, katı iletkenlere göre termal iletkenliklerinin yüksek olması ve bakımının kolay olması nedeniyle elektronik cihaz soğutma gibi sıcaklık kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [101, 138]. Bahsedilen avantajlarına rağmen ısı borularının kapasitelerinin, verimliliklerinin ve temas alanlarının düşük olması nedeniyle elektrikli araçların bataryalarında termal yönetim cihazları olarak kullanımı henüz gerçek amacında uygulanmamaktadır [97].

Isı borularının yapısında sızdırmaz metal bir kap ve çalışma sıvısı bulunmaktadır. Bununla beraber, buharlaşma, adyabatik ve yoğuşma bölümleri olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. Şekil 2.24'de bir ısı borusunun çalışma prensibi şematize edilmektedir. Buharlaşma bölümü soğutulması gereken ısı kaynağıyla yani batarya hücreleri ile temas halindedir. Çalışma sıvısı batarya hücrelerinden ısıyı alarak buhar fazına geçiş yapar. Buradaki buhar fazı iç basınç farkından dolayı adyabatik bölümden geçerek yoğuşma bölümüne doğru taşınır. Yoğuşma bölümünde, buhar fazı almış olduğu ısıyı zorlamalı veya doğal taşınım yolu ile atmosfere vererek yoğuşur. Daha sonra sıvı faza geçiş yapan çalışma sıvısı kılcal kuvvetlerin etkisi ile buharlaşma bölümüne yönlendirilerek ısı transfer döngüsü tamamlanır [139].



Şekil 2.23. Isı borusunun çalışma prensibinin şematik olarak gösterimi [119]

Isı borularının başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için buharlaşma bölümünde iyi bir termal temasın yanı sıra yoğuşma bölümünde yeterli ısı dağılımının sağlanması gerekmektedir [119]. Bu sebeple araştırmacılar ısı borularının verimliliğini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar. Chen ve Li [140], lityum iyon bataryanın sıcaklık kontrolünü iyileştirmek için TiO_2 nanoakışkan içeren titreşimli bir ısı borusunu içeren bir termal yönetim sistemini deneysel olarak araştırdılar. Yapılan çalışmalar sonucunda, ortam sıcaklığı arttığında, titreşimli ısı borusunun lityum-iyon batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklıktaki artışını bastırdığını gösterdiler. Behi ve ark. [141] yapmış olduğu çalışmada, prizmatik LTO bataryanın sıcaklık kontrolü için 3 farklı soğutma stratejisinin termal performansını hem deneysel hem de sayısal olarak incelediler. Sonuçlar, yüksek deşarj hızında (8 C) en etkili soğutma yönteminin düz ısı borulu batarya termal yönetim sisteminin olduğunu göstermektedir. Bu yöntemin LTO pil takımındaki maksimum sıcaklığı doğal hava soğutma yöntemine kıyasla %32.6 oranında azalttığını belirtmişlerdir. Zhang ve Wei'nin [139] yapmış oldukları çalışmada, yüksek deşarj yükü altındaki prizmatik lityum iyon bataryanın sıcaklık homojenliğini iyileştirmek için düz ısı boruları içeren bir batarya termal yönetim sisteminin etkinliğini deneysel ve sayısal olarak incelediler. Sonuç olarak, düz ısı borulu termal yönetim sisteminin batarya hücresindeki sıcaklığı $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve sıcaklık farkını da $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında etkili bir şekilde kontrol edildiğini gösterdiler.

2.7.3. Hibrit Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Daha önce bahsedilen aktif ve pasif sistemlerin dezavantajlarını ortadan kaldırmak ve batarya hücrelerinde daha iyi termal yönetim sağlamak amacı ile hibrit batarya termal yönetim sistemleri kullanılmaktadır. Bu tür sistemler iki veya daha fazla batarya termal yönetim sisteminin beraber kullanılması ile oluşur. Hava sirkülasyonlu FDM, sıvı sirkülasyonlu FDM ve ısı borulu FDM günümüzde yaygın olarak kullanılan hibrit BTYS'dir [101].

Hava sirkülasyonlu FDM tekniği, faz değiştiren malzemelere dayalı pasif bir yöntem ve zorlanmış hava akışına dayalı aktif bir yöntemin kombinasyonudur. FDM kalınlığı, hava boşluğu, hava hızı, FDM tipi ve içerisinde kullanılan katkı maddeleri hava sirkülasyonlu FDM tabanlı hibrit batarya termal yönetim sisteminin performansını etkileyen faktörlerdir [103]. Qin ve ark., [142]. Dört tane 18650 ölçülerine sahip silindirik lityum iyon bataryaların termal yönetimi için hava sirkülasyonlu genişletilmiş grafit FDM hibrit tekniğini kullandılar. Yapılan çalışma sonucunda, 30 °C hava sıcaklığı ve 2.5 ms^{-1} akış hızında hibrit batarya termal yönetim sisteminin batarya sıcaklığını 40 °C'nin atında tuttuğunu gösterdiler

Sıvı sirkülasyonlu FDM tekniği, saf veya katkı maddeleri ile termal özellikleri iyileştirilmiş faz değiştiren malzemeler ve sıvı soğutmanın kombinasyonu ile oluşturulan hibrit BTYS'dir. Bu sistemin çalışma mantığı şu şekildedir: Batarya hücresinde üretilen ısıyı faz değiştiren malzeme doğrudan alır ve sıvı soğutma sistemine aktarır. Burada sıvı soğutmada kullanılan akışkan faz değiştiren malzemeden aldığı ısıyı uzaklaştırır. Böylece batarya hücresindeki maksimum sıcaklığı optimum bir aralıkta ve batarya boyunca daha düzgün bir sıcaklık dağılımı sağlanır. Gao ve ark. [143] prizmatik li-iyon bataryalar için kompozit FDM ve s- şeklindeki mikro kanallı su soğutmayı birleştiren hibrit BTYS'nin etkinliğini araştırdılar. Yapılan çalışmada, kompozit FDM içerisindeki genişletilmiş grafit oranı, akış hızı, deşarj hızı ve ortam sıcaklığının hibrit batarya termal yönetim sisteminin termal performansı üzerindeki etkilerini sayısal simülasyon ve deneysel olarak incelediler. Sonuçlar, Hibrit sistemin sadece kompozit FDM'nin kullanıldığı duruma göre termal performansı arttırdığını göstermektedir. Akbarzadeh ve ark. [144] li-iyon bataryalar için sıvı soğutma plakası ve FDM'nin beraber kullanıldığı hibrit batarya termal yönetim sistemi tasarladılar.

Sonuçlar hibrit sistemin, sıvı soğutma sırasındaki pompanın enerji tüketimini yaklaşık %40 azalttığını belirttiler. Ping ve ark. [145] prizmatik LiFePO_4 batarya paketini optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutabilmek için faz değıştiren malzeme ve sıvı soğutmayı birleştirerek hibrit batarya termal yönetim sistemi tasarladılar ve bu sistemin etkinliğini sayısal olarak incelediler. Sonuçlar, hibrit sistemin 45 °C ortam sıcaklığında bile iyi bir soğutma performansı sergilediğini göstermektedir.

Isı borulu FDM tekniğı, iki tane pasif termal yönetim sistemi olan faz değıştiren malzemeler ve ısı borularının kombinasyonu ile tasarlanan hibrit batarya termal yönetim sistemidir. Bu tip bir hibrit batarya termal yönetim sisteminde, batarya hücreleri tarafından üretilen ısı ilk olarak FDM tarafından absorplanır ve depolanır. Daha sonra ısı borusunun buharlaşma bölümü tarafından depolanan ısı emilir ve doğal konveksiyon veya basınçlı hava/sıvı kullanılarak yoğunlaşma bölümü aracılığı ile atmosfere salınır. Jiang ve Qu [146] yapmış olduğı çalışmada, FDM ve ısı borusunun kombinasyonu ile tasarlanan hibrit batarya termal yönetim sisteminin etkinliğini araştırdılar. Sonuç olarak FDM ve ısı borusu kombinasyonunun, uzun süreli çalışma koşullarında batarya sıcaklığını kontrol etmek için etkili bir yöntem olduğunu gösterdiler.

2.8. Nanoakışkanlar

Sıvı soğutma sistemlerinde kullanılan su, etilen glikol ve mineral yağlar gibi geleneksel sıvıların ısı transfer performansını iyileştirmenin etkili bir yolu küçük katı partiküllerin bu sıvıların içerisine eklenmesidir. 1995 yılında Choi ve ark. [147] bir sıvı içindeki nano boyutlu katı parçacıkların koloidal süspansiyonları olarak tanımlanan nanoakışkanları keşfetti ve termal özelliklerini araştırdı. Bu araştırmalar sonucunda, suyun içerisine bakır nano parçacıkların eklenmesinin, suyun termal iletkenliğini %60 oranında artırdığını belirttiler. Geleneksel sıvıların içerisinde kullanılacak olan nano boyutlu partikül malzemeler, baz sıvı ile kimyasal inertliklerine göre seçilir. Bu nedenle, yaygın olarak kullanılan nano parçacıklar arasında oksitler (alümina Al_2O_3 , silika SiO_2 , titanya TiO_2 , bakır oksit CuO), metaller (Cu, Au, Ag), grafen pulları ve karbon nanotüpler (CNT) bulunur.

Nanoakışkanların geleneksel katı-sıvı süspansiyonlara göre birçok avantajı mevcuttur. Bu avantajlar şöyle özetlenebilir [148].

- ✓ Yüksek özgül yüzey alanı,
- ✓ Yüksek koloidal süspansiyon stabilitesi,
- ✓ Düşük pompalama gücü ve eşdeğer ısı transferi,
- ✓ Geleneksel kolloidlere kıyasla daha az partikül tıkanması ve
- ✓ Partikül malzemesini, konsantrasyonunu, boyutunu ve şeklini değiştirerek termodinamik ve taşıma özelliklerinin daha yüksek düzeyde kontrolü.

Nanoparçacıkların varlığı, yalnızca temel sıvının termofiziksel özelliklerini değiştirmekle kalmaz, aynı zamanda ısı transfer mekanizmasını da etkiler [149]. Teorik açıdan bakıldığında, Brownian hareketi, nanopartikülleri çevreleyen baz sıvının sıvı tabakalaşması ve nanopartikül kümelenmesi termal iletkenliği artırma mekanizmasının olası açıklamalarıdır [150].

2.8.1. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Temel sıvı içerisine nanopartiküllerin eklenmesi akışkanın termofiziksel özelliklerini iyileştiren ve ısı transferini arttıran pasif bir tekniktir. Bu sebeple nanoakışkanların tüm olası uygulamalarında termofiziksel özelliklerin doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Konvektif ısı transferinde, ısı iletkenlik, yoğunluk, özgül ısı kapasitesi ve viskozite nanoakışkanların etkinliğinin belirlenmesinde anahtar termofiziksel özelliklerdir.

Nanoakışkanların davranışını yöneten fiziğin karmaşıklığı bu akışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesini zorlaştırır. Bununla beraber nanoakışkanların yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesi akışkan-katı karışımlara uygulanabilen karışım modeline göre tahmin edilebilmektedir. Ancak termal iletkenlik ve viskozite söz konusunda olduğunda ise literatürde bulunan hem deneysel sonuçlarda hem de teorik modellerde önemli tutarsızlıklar mevcuttur. Bu nedenle hem viskozite hem de ısı iletkenlik için çok çeşitli korelasyonlar önerilmiştir.

2.8.1.1. Yoğunluk

Yoğunluk, Reynolds sayısını, basınç kaybını, sürtünme faktörünü ve Nusselt sayısını doğrudan etkilediği için nanoakışkanların ısı transfer performanslarının belirlenmesinde önemli bir termofiziksel özelliktir [151]. Nanoakışkanların yoğunluğunun belirlenmesinde Pak ve Cho [152] tarafından önerilen aşağıdaki denklem 2.32 ile belirlenir.

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_f \quad (2.32)$$

Burada, φ katı parçacık hacim oranı, ρ yoğunluğu ifade eder. Ayrıca nf, p ve f alt simgeleri ise sırası ile nanoakışkan, katı parçacık ve akışkanı temsil etmektedir.

2.8.1.2. Özgül ısı kapasitesi

Özgül ısı nanoakışkanların ısı transfer hızını etkilediği için önemli termofiziksel bir özelliktir. Tanım olarak özgül ısı, bir gram nanoakışkanın sıcaklığını bir santigrat derece yükseltmek için gereken ısı miktarıdır. Nanoakışkanların özgül ısını belirlemek için kullanılan iki tane özgül ısı modeli bulunmaktadır. Sıvı-parçacık karışım formülünden yola çıkarak Pak ve Cho [152] sunulan ilk model nanopartiküllerin hacim konsantrasyonuna dayalıdır ve aşağıdaki denklem 2.33 ifade edilmektedir.

$$C_{Pnf} = \varphi (C_P)_p + (1 - \varphi) (C_P)_f \quad (2.33)$$

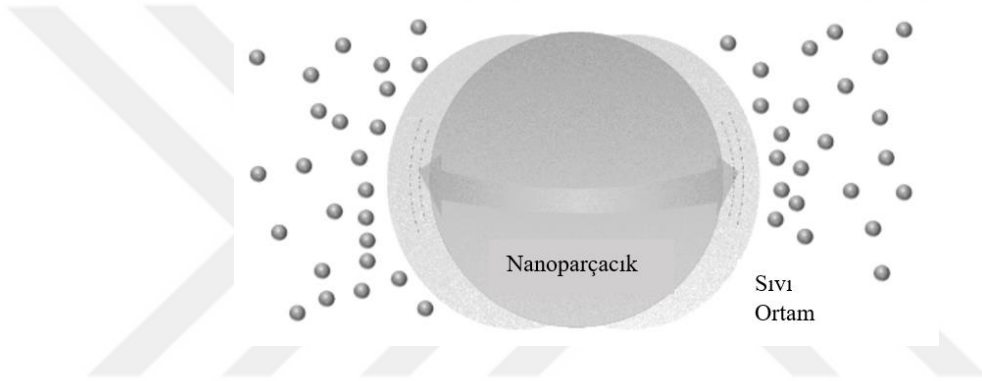
Isıl denge mekanizmasına dayalı olan ikinci özgül ısı modeli Xuan ve Roetzel [153] tarafından önerilir ve aşağıdaki denklem 2.34 ile ifade edilir.

$$(\rho C_P)_{nf} = \varphi (\rho C_P)_p + (1 - \varphi) (\rho C_P)_f \quad (2.34)$$

Burada, partikül hacim oranı φ , yoğunluk ρ , özgül ısı kapasitesi C_P ile ifade edilir. Ayrıca nf, p ve f alt simgeleri ise sırası ile nanoakışkan, katı parçacık ve akışkanı temsil etmektedir.

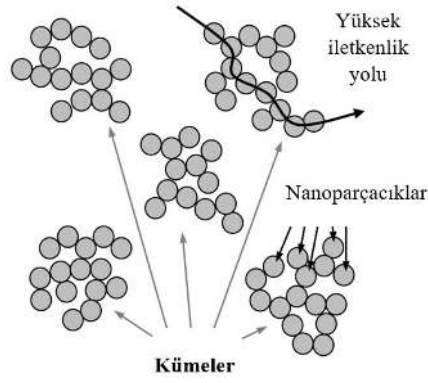
2.8.1.3. Isıl İletkenlik

Soğutma için kullanılan geleneksel sıvılara, nano ölçekte katı partikül eklenmesi soğutma sıvılarının termal iletkenliğini arttıran bir yöntemdir. Bu etkinin başlıca nedenlerinden biri sıvı içerisinde asılı halde duran parçacıkların rastgele hareketi olarak adlandırılan Brownian hareketidir. Bu hareketler enerji doğrudan nano parçacıklar aracılığı ile taşır ve buna ek olarak, nano ölçekteki katı partiküllerin dağılımdaki rastgele hareketi, sıvı moleküllerin nanoparçacıkların yakınında karışmasıyla sonuçlanır. Bu durum Brownian hareketine bağlı mikro konveksiyonun ısı iletkenliğe etkisinin de önemli olduğu öne sürülmektedir [154]. Şekil 2.25’de Brownian hareketi gösterilmektedir.



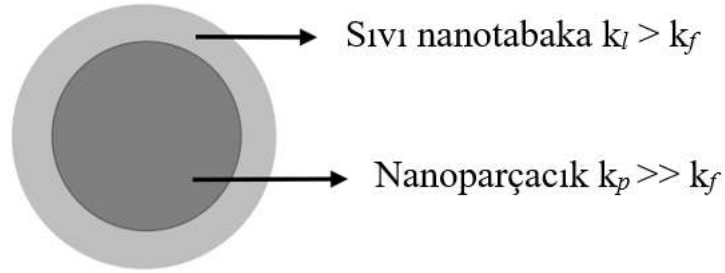
Şekil 2.24. Nanopartiküllerin Brownian hareketinin şematik gösterimi [148]

Nano boyuttaki katı partiküllerin akışkanlara eklenerek ısı iletkenliği arttırmasının bir başka açıklaması da akışkanların içerisinde nano parçacıkların kümeler oluşturmasıdır. Evans ve arkadaşlarının [155] yapmış olduğu çalışmada, sıvı matris ile karşılaştırıldığında ısının katı parçacıklar aracılığı ile daha hızlı iletildiği ve kümelenme oluşumunun ise nispeten daha büyük mesafeler boyunca hızlı ısı taşınması ile sonuçlanabileceğini öne sürdüler. Partikül kümelenmesinin oluşturduğu bu fenomen Şekil 2.26’da gösterilmektedir. Kümelenmenin artması viskoziteyi arttıracığından dolayı bu bölgelerde ısı transferini olumsuz yönde etkileyen sedimentasyona neden olmaktadır. Bu nedenle maksimum termal iletkenlik artışı için optimum bir kümelenme seviyesi olmalıdır.



Şekil 2.25. Partikül kümelenmesinin şematik gösterimi [156]

Sıvı moleküllerin katı yüzeyler etrafında katmanlı yapılar oluşturduğu gözlenmektedir. Sıvı katmanlaşması olarak adlandırılan nano katmanların sıvı matristen daha büyük bir etkin termal iletkenliğe sahip olması beklenmektedir [157]. Şekil 2.27’de sıvı katmanlaşma fenomeni gösterilmektedir. Bu katmanlı yapılar, nanoparçacıklar ile bir yığın sıvı arasında bir termal köprü görevi görür ve termal iletkenliği arttırdığı öne sürülmektedir. [158].



Şekil 2.26. Sıvı katmanlaşmasının şematik gösterimi k_l , k_f , k_p sırasıyla nanotabaka, baz sıvı ve nanopartikülün termal iletkenliğidir [156]

Nanoakışkanların ısı iletkenliklerindeki değişimi araştırmak için teorik araştırmaların yanı sıra birçok deney yapılmıştır. Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin belirlenmesinde araştırmacılar tarafından çok sayıda teorik model geliştirildi ve bu modellerin deneysel çalışmalar ile karşılaştırılması için de birçok deney yapıldı. Tablo 2.1’de teori ve deneylere dayalı olarak çeşitli araştırmacılar tarafından türetilen nanoakışkanların termal iletkenliğini belirlemek için kullanılan modellerin bir özeti listelenmektedir.

Tablo 2.1. Literatürde bulunan farklı termal iletkenlik modelleri

Model	Nanoakışkanların termal iletkenlik eşitlikleri	Yorumlar
Maxwell [159]	$k_{nf} = \frac{2k_f + k_p + 2\varphi(k_p - k_f)}{2k_f + k_p - \varphi(k_p - k_f)} k_f$	Küresel parçacıklara sahip nanoakışkanların etkili termal iletkenliği, temel sıvıların ve katı parçacıkların hacim oranına ve termal iletkenliklerine bağlıdır.
Hamilton ve Crosser [160]	$k_{nf} = k_f \left[\frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\varphi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \varphi((k_f - k_p))} \right]$	Küresel olmayan parçacıkların etkin termal iletkenliğini bir şekil faktörü (n) kullanarak hesaplanması önerilen geliştirilmiş Maxwell modelidir. $n = 3/\psi$, ψ parçacık küreselliğidir.
Wasp [161]	$k_{nf} = k_f \left[\frac{2k_f + k_p - 2\varphi(k_f - k_p)}{2k_f + k_p + \varphi(k_f - k_p)} \right]$	Küresel parçacıklar ($\psi = 1$) altında Maxwell ve Hamilton ve crosser modelleri ile aynı sonucu verir.
Timofeeva ve ark. [162]	$k_{nf} = k_f(1 + 3\varphi)$	TiO ₂ nanopartiküllerinin termal iletkenliğini analiz etmek için etkili ortam teorisini önerdi.
Xuan ve ark. [163]	$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_p - k_f)} k_f + \frac{\rho_p \varphi (C_p)_p}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi \mu_f r_c}}$	Brownian hareketini ve nanopartikül kümelerinin agregasyon yapısını dikkate alır. Akışkan sıcaklığı (T) nanopartikül yoğunluğu (ρ), nanopartikül özgül ısısı (C_p) akışkan viskozitesi (μ_f), Boltzmann sabiti (k_B) ve kümelerin ortalama yarıçapı (r_c) ifade edilir.
Bruggeman ve ark. [164]	$k_{eff} = \frac{1}{4} [(3\varphi - 1)k_p + (2 - 3\varphi)k_f] + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta}$ $\Delta = (3\varphi - 1)^2 \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^2 + (2 - 3\varphi)^2 + 2(2 + 9\varphi - 9\varphi^2) \left(\frac{k_p}{k_f} \right)$	Homojen olarak dağılmış küresel partiküller barındıran iki fazlı karışımları için önerilmiştir.
Yu and Choi [158]	$\left[\frac{k_{nf}}{k_f} \right] = \left[\frac{k_p + 2k_f + 2f_v(k_p - k_f)(1 + \beta)^3}{k_p + 2k_f - 2f_v(k_p - k_f)(1 + \beta)^3} \right]$	Nanopartiküllerin tüm hacim oranlarının, nano tabaka ve nanoparçacıkların termal iletkenliği hesaba katılır. Nanotabaka kalınlığının nanoparçacık çapına oranı β ile temsil edilir.

2.8.1.4. Viskozite

Nanoakışkanların viskozitesi, zorlanmış konveksiyon uygulamalarında basınç düşüşünü ve pompalama gücünü doğrudan etkilediği için oldukça önemli termofiziksel bir özelliktir. Nanoakışkan viskozitesi, süspansiyonun akışa direnme

eğiliminin bir ölçüsüdür. Ayrıca kayma geriliminin kayma hızına oranı olarak da tanımlanmaktadır [165]. Nanoakışkanların efektif viskozitesi, katı partikülün hacim oranına, partikül morfolojisine, kayma hızına ve sıcaklık [166, 167] gibi faktörlere bağlıdır.

- Katı partikülün temel akışkan içerisindeki hacim oranı, nanoakışkan viskozitesini etkileyen en önemli faktördür. Nanoparçacık oranının akışkan içerisinde ağırlıkça %'si arttıkça nanoakışkanın viskozitesi de bununla birlikte artar.
- Nanopartikül morfolojisi hem şekil hem de boyut olarak nanoakışkan viskozitesini ve soğutma sisteminin pompalama gücünü etkiler. Nguyen ve arkadaşları [167] sıcaklık ve partikül hacim konsantrasyonunun su- Al_2O_3 nanoakışkanın dinamik viskozitesi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelediler. Ayrıca bu çalışmada iki farklı partikül boyutunun (36 nm ve 47 nm) nanoakışkan viskozitesine etkisini araştırdılar. Bu çalışma sonucunda, nanoakışkan viskozitesi hem sıcaklığa hem de partikül konsantrasyonuna bağlı olduğunu, parçacık boyutunun etkisinin ise yüksek hacim oranlarında daha belirgin olduğunu ve partikül boyutunun artmasının viskoziteyi arttırdığını gösterdiler.
- Kayma hızı, Newtonsal davranış göstermeyen nanoakışkanlarda viskoziteyi etkiler. Nanoakışkanların yüksek katı partikül konsantrasyonlarında kayma inceltici (ing. Shear thinning) akışkan olarak performans göstermektedir [168]. Ayrıca düşük hacim oranlarında ise nanoakışkalar newtonyen davranış göstermektedir.
- Sıcaklık, nanoakışkanların viskozitesini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Ghanbarpour ve ark. [169], nanoakışkanların viskozitesini dikkate alarak nanopartiküllerin akışkan-mekanik davranışını inceledi. Sonuç olarak nanoakışkanın viskozitesinin katı partikülün temel akışkan içerisindeki kütle konsantrasyonundaki artışla arttığını ancak sıcaklıkla azaldığını gösterdiler.

Nanoakışkanların viskozitesinin belirlenmesi için araştırmacılar tarafından birçok model geliştirildi. Tablo 2.2'de literatürde bulunan nanoakışkan viskozite modelleri listelenmektedir.

Tablo 2.2. Literatürde bulunan nanoakışkan viskozite modelleri

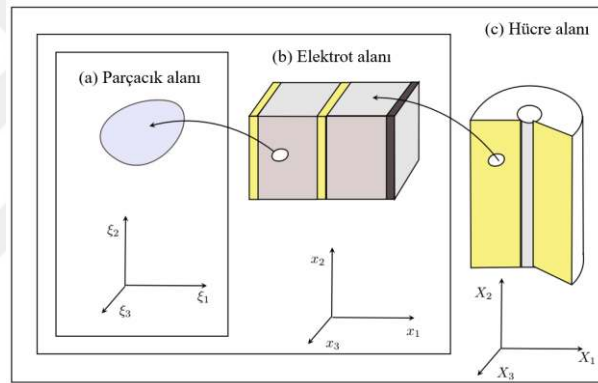
Model	Nanoakışkanların viskozite eşitlikleri	Yorumlar
Einstein [170]	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi)$	Küresel katı parçacıkların Düşük hacim oranları ($\varphi < \%2$) için uygundur.
Brinkman [171]	$\mu_{nf} = \mu_f \left[\frac{1}{(1 - \varphi)^{2.5}} \right]$	Ortalama partikül konsantrasyonları için Einstein modelinin genişletilmiş halidir. $\varphi < \%4$ olduğu durumlar için geçerlidir.
Batchelor [172]	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2)$	Partiküllerin Brownian hareketinin, rijit ve küresel parçacıkların yaklaşık izotropik bir süspansiyonunun kütle gerilimi üzerindeki etkisi dikkate alındı
Krieger ve Dougherty [173]	$\mu_{nf} = \mu_f \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m} \right)^{-\eta\varphi_m}$	Rastgele tek dağılımlı rijit küresel parçacıkların kayma viskozitesi için yarı deneysel bir modeldir. η , içsel viskozite ($\eta = 2.5$), φ_m , maksimum partikül paketleme fraksiyonudur ve 0.495 ile 0.54 arasında değişir. Ayrıca yüksek kayma hızlarında neredeyse sabittir ($\varphi_m = 0.605$).
Bicerano ve ark. [174]	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + \eta\varphi + k_H\varphi^2)$	Viskozitenin hacimsel etkisinin de düşünüldüğü korelasyondur.
Nguyen ve ark. [167]	$\mu_{nf} = \mu_f(2.1275 - 0.0215T + 0.00027T^2)$	Katı partikül hacim oranının %1 ile %4 arasında değiştiği ve sıcaklığa bağlı modeldir.

2.9. Lityum İyon Bataryaların Modellenmesi

Günümüzde lityum iyon bataryalar uygulama alanlarına göre farklı boyutlarda, kapasitede ve güçte olabilmektedir. Elektrikli veya hibrit elektrikli araçlarda gerekli güç şartını sağlamak için kullanılan lityum iyon bataryalar fiziksel olarak daha büyük ve yüksek kapasitedirler. Bununla birlikte bataryaların ölçeklendirilmesi sistemdeki fiziksel olayların karmaşıklığını arttırırken küçük batarya sistemlerini etkilemez. Bir batarya sistemi atomik seviyelerden sistem seviyelerine kadar değişen geniş bir uzunluk ve zaman ölçeğine sahiptir. Böylesine geniş bir ölçekte gerçekleşen fiziksel fenomenlerin karmaşıklığı sebebiyle lityum iyon batarya hücre üreticileri için makroskobik tasarım özelliklerinin bölgesel mikroskobik süreçleri nasıl etkilediğinin anlaşılabilmesi araçlarda kullanılan büyük lityum iyon batarya sistemlerinin geliştirilmesinde en büyük engellerden biridir. Batarya sistemlerinin güvenliği ve sağlığı açısından batarya hücrelerinin termal, elektriksel, elektrokimyasal ve mekanik davranışının belirlenmesi oldukça kritiktir. Aynı zamanda farklı uzunluk ölçeklerinde meydana gelen fiziksel fenomenlerin, farklı mekanizmalar ile nasıl ilişkili olduğunun anlaşılması gerekir. Ancak çeşitli uzunluk ve zaman ölçeklerini barındıran karmaşık

geometrilerin farklı fizikokimyasal süreçleri yakalamak için tek bir hesaplama alanı kullanmak ve bu sayede batarya hücre performansını, termal bozunma ve güvenlik durumunun tahmini için sayısal simülasyonları gerçekleştirmek hesaplama açısından oldukça maliyetlidir. Bu sebeple, uzun yıllar boyunca ABD Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından desteklenen, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), lityum iyon bataryaların bilgisayar simülasyonu için, çeşitli uzunluk ölçekleri arasındaki fiziksel etkileşimi baz alan Çok Ölçekli Çok Boyutlu (MSMD) model olarak bilinen bir modelleme çerçevesi geliştirmiştir [175].

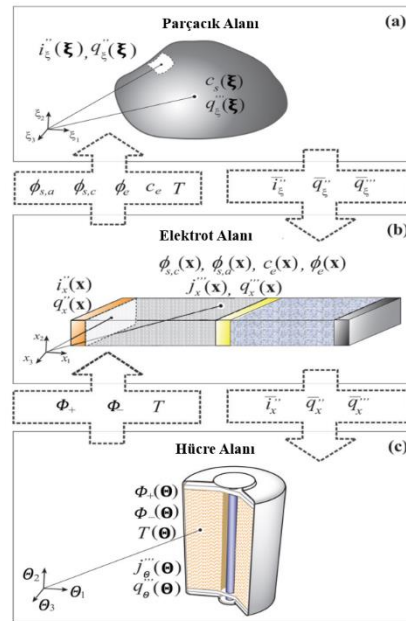
MSMD yaklaşımında, çeşitli uzunluk ve zaman ölçeklerinde ayrı çözüm alanları sağlayarak parçacık, elektrot ve hücre ölçeklerinde gerçekleşen etkileşimleri çözerek hesaplama verimliliği sağlar. MSMD yaklaşımı Şekil 2.28’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.27. MSMD yaklaşımının şematik olarak gösterimi [176]

MSMD yaklaşımının içerisinde bulunan her alan, ilgili alanda çözülen değişkenlerin uzamsal olarak ayrıştırılması için kendi bağımsız koordinat sistemini kullanır [175]. Bununla birlikte MSMD model yaklaşımı hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Daha düşük hiyerarşi alanında tanımlanan çözüm değişkenleri, daha yüksek hiyerarşi alanında çözülen çözüm değişkenlerinden daha iyi bir uzamsal çözünürlüğe sahiptir. Her etki alanı seviyesi, birleştirme koşulları nedeniyle bir sonraki daha ince ve bir sonraki daha kaba etki alanı seviyesine bağlanır [176]. Bunun sonucunda, daha küçük uzunluk ölçeklerinde meydana gelen fiziğin fiziksel ve kimyasal nicelikleri, buna karşılık gelen küçük ölçekli geometrinin etkisini çözmek için daha ince bir uzamsal çözünürlükle değerlendirilir. Daha büyük ölçekli nicelikler, daha kaba uzamsal çözünürlükte hesaplanarak daha küçük ölçekli geometrik özelliklerin karmaşıklıklarını

ortadan kaldırır. Bununla beraber, MSMD yaklaşımı, batarya geometrisi partikül alanı, elektrot alanı ve hücre alanı olmak üzere birbirleri ile etkileşimde bulunan üç bağılı alana ayrılır [177]. MSMD model yaklaşımında, farklı ölçeklerde tanımlanan fizik modelleri, Şekil 2.29’da görüldüğü gibi iki yönlü alanlar arası bağıntılar ile beraber eş zamanlı olarak çözülür. Genel olarak, daha yüksek hiyerarşi alanından daha düşük hiyerarşi alanına bilgi alan değişkenleri kullanılarak aktarılır. Üst hiyerarşi boyutundaki alan değişkenleri, bir alt hiyerarşi boyutundaki alt modele girdi olarak verildiğinde burada yani alt hiyerarşi boyutunda bu girdiler ortalama kümelenmiş değerler olarak kabul edilir. Kısacası, üst hiyerarşi boyutundan gelen girdiler, alt hiyerarşi boyutunun koordinat sisteminde ki uzamsal bağımlılığa sahip değildir. Ayrıca, alt hiyerarşi boyutundan, üst hiyerarşi boyutuna bilgi aktarımı kaynak terimler vasıtasıyla yapılır. Bu yaklaşım, bir üst bölge seviyesine geçmeden önce alt bölge seviyesinin koordinat sistemine olan bağımlılığını ortadan kaldırır. Bununla birlikte, ısı kaynaklarının birleştirilmesi de benzer bir şekilde yapılır ve tüm uzunluk ölçeklerinde gerçekleşir. Sonuç olarak MSMD çözüm yöntemi, bir batarya içindeki potansiyel dağılımı ve dolayısıyla batarya içindeki ayrıntılı ısı üretimi dağılımını çözebilir. Burada kullanılan bu yaklaşım lityum iyon bataryalarının çeşitli uzunluk ölçeklerinde meydana gelen fiziğin araştırılması için uygun ve çoklu alt model seçeneklerine izin vererek model esnekliği sağlayan modüler bir çerçeve sağlar.



Şekil 2.28. Hesaplama alanlarındaki çözüm değişkenleri ve hesaplama alanlarına aktarılan bağlantıların şematik gösterimi [176]

Batarya termal ve elektrik alanları, aşağıdaki diferansiyel denklemler kullanılarak batarya hücresinin ölçeğinde CFD alanında çözülür ve aşağıdaki denklem 2.35, 2.36 ve 2.37'deki şekilde ifade edilir. [178, 179].

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \varphi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \varphi_-|^2 + \dot{q}_E + \dot{q}_s + \dot{q}_a \quad (2.35)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \varphi_+) = -(j_E - j_s) \quad (2.36)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \varphi_-) = j_E - j_s \quad (2.37)$$

Burada, σ_+ ve σ_- pozitif ve negatif elektrotun efektif elektrik iletkenliklerini, φ_+ ve φ_- pozitif ve negatif elektrottaki faz potansiyellerini, j_E ve $\dot{q}_E$ sırasıyla hacimsel akım transfer hızını ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan elektrokimyasal reaksiyon ısısını, j_s ve $\dot{q}_s$ sırasıyla batarya hücresinin dahili kısa devresinden kaynaklı akım aktarım hızını ve ısı üretimini ve $\dot{q}_a$ ise kötü termal koşullar altında oluşan termal kaçak reaksiyonları tarafından üretilen ısıyı ifade eder.

Genel olarak, Li-iyon batarya modellerini ampirik modeller ve elektrokimyasal modeller olmak üzere iki şekilde sınıflandırabiliriz [180]. Sayısal simülasyonlarda kullanılan ampirik modeller batarya hücresinin geçmiş deneysel verilerine dayanarak bataryaların gelecekteki durumlarını tahmin eder. Bu modellerin ana unsurları akım ve hücre potansiyeli gibi şarj/deşarj karakteristiğinden gelen bilgilerden belirlenir. Ampirik modellerin hesaplama açısından hızlı ve basit olmaları, bu modellerin en büyük avantajıdır. Bununla beraber, fizik tabanlı parametrelerin belirlenememesi, batarya hücresinin yaşlandıkça özelliklerinin güncellenememesi ve bir batarya hücresinin ampirik modeli bir başka batarya hücre türlerine aktarılamaması bu modellerin dezavantajları arasındadır. Elektrokimyasal modeller ise çok daha karmaşık ve kimyasal/elektrokimyasal kinetik taşınım denklemlerine dayanmaktadır [180]. Bu modeller lityum iyon bataryaların özelliklerini ve elektrokimyasal reaksiyonlarını simüle etmek için kullanılmaktadır. Lityum iyon batarya araştırmalarında yaygın olarak kullanılan Pseudo 2D (P2D) modeli gözenekli elektrot teorisine, konsantrasyon çözelti teorisine ve kinetik denklemlere dayanan fiziksel bir modeldir. P2D modeli lityum bataryada ki lityum geçişi doğru bir şekilde

yakalayabilmektedir [181]. Bununla beraber, modelin karmaşık olması, içerdği fiziksel parametreler ve çözülmesi gereken denklemlerin fazlalığı modelin hesaplama maliyetini arttırmaktadır.

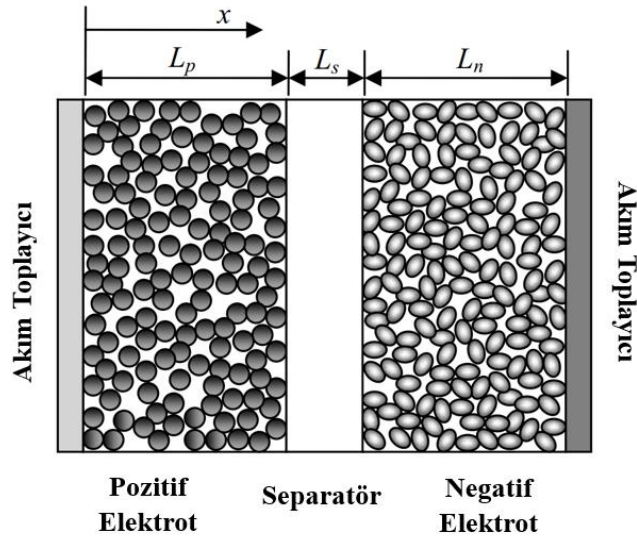
Bataryaların modellenmesi için literatürde sıklıkla bahsi geçen elektrokimyasal bir model olan Newman Pseudo-2D (P2D) modeli, yarı ampirik bir model olan Newman, Tiedemann, Gu and Kim (NTGK) modeli ve deneysel bir model olan eş değer devre modeli (ECM) MSMD yaklaşımının alt modelleri olarak kullanılmaktadır. Burada ki alt modeller kullanarak batarya geometrisinin sahip olduğu farklı uzunluk ölçeklerinde ki çeşitli fizik çözülebilmektedir.

2.9.1. Newman Pseudo-2D (P2D) Modeli

Bataryaların içerisinde ki fiziksel ve kimyasal süreçlerin anlaşılması, batarya hücrelerinin elektrokimyasal denklemlere dayalı olarak modellenmesi ile sağlanır. Lityum iyon bataryaların gözenekli elektrot yapısına sahip olması, katı-elektrolit arayüzey alanını arttırarak yavaş gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların olumsuz etkilerini ortadan kaldırır [182, 183]. Ancak gözenekli ortamın karmaşık geometrisi nedeniyle, güvenilir batarya modellerinin geliştirilmesinde pratik zorluklar yaşanmıştır. Newman ve Tiedemann 1975 yılında, gözenekli elektrot teorisini makroskobik bir yaklaşım kullanarak geliştirdiler [182]. Doyle ve arkadaşları 1993 yılında gözenekli elektrot teorisi ve konsantrasyon çözelti teorisinin bir kombinasyonunu kullanarak lityum iyon bataryalar için Pseudo-2 Boyutlu (P2D) modelini sundular [184]. Bu model, lityum difüzyon dinamiklerini ve yük transfer kinetiğini çözerek ikili interkalasyon elektrot sisteminde ki bir hücrenin elektrik tepkisini tahmin edebilir [185]. Malzeme özelliklerine ve elektrot tasarımına dayalı olan P2D modeli bir lityum iyon bataryanın performansını açıklamak için akademide ve endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Newman Pseudo-2D modelinde, elektrotlar gözenekli bir matris olarak kabul edilir ve davranışları elektrolit tarafından çevrelenmiş küresel parçacıklar olarak modellenir [183]. Küresel parçacıkların yüzey alanı aracılığı ile lityum iyonlarının interkalasyon ve deinterkalasyon işlemleri gerçekleştirilir [185]. Ayrıca burada gerçekleşen transfer süreçlerinin çoğunlukla tek yönlü olarak gerçekleşmesi bu

modelin bir boyutlu bir matematiksel model olarak uygulanabilirliğini gösterir [184]. Şekil 2.30'da şematik olarak lityum iyon batarya gösterilmektedir. Soldan sağa batarya bileşiklerini sıralayacak olursak, akım toplayıcı, pozitif elektrot, ayırıcı, negatif elektrot ve akım toplayıcıdan oluşmaktadır. Burada ilgili dört tane arayüz vardır. Bunlar sırasıyla $x = 0$, $x = L_p$, $x = L_p + L_s$ ve $x = L_p + L_s + L_n$ 'dir. Buradaki L_p , L_s ve L_n ifadeleri sırasıyla pozitif elektrotun, ayırıcının ve negatif elektrotun uzunluklarını ifade etmekte ve x eksenini üzerinde ki bir boyutlu hücre geometrisinin sınırlarını tanımlamaktadır.

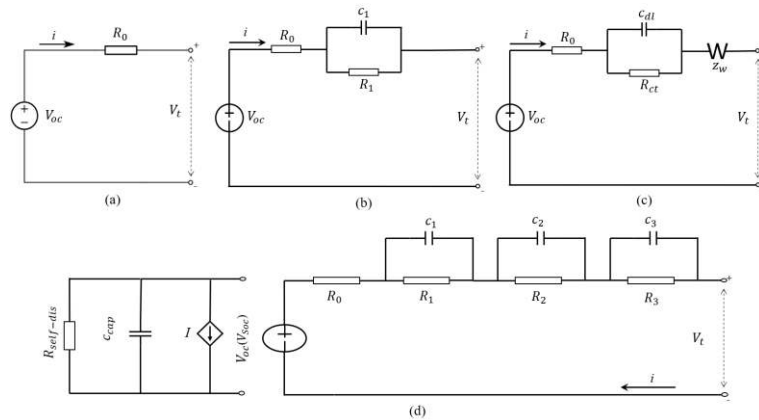


Şekil 2.29. Lityum iyon bataryanın şematik gösterimi [181]

2.9.2. Eşdeğer Devre Modeli (ECM)

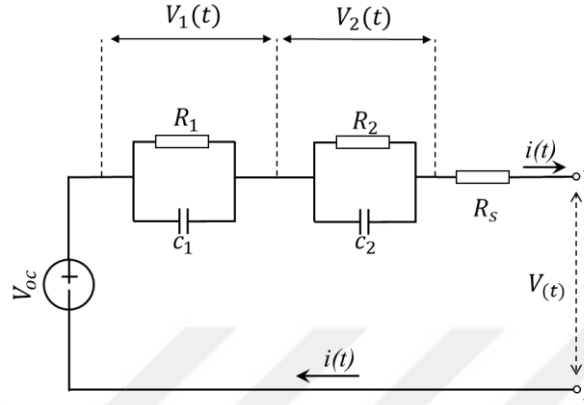
Eş değer devre modelleri (ECM) dikkate alınarak yapılan batarya modellemelerinde batarya hücresinin elektrokimyasının derinlemesine anlaşılması gerekmez. Bununla birlikte, batarya hücre dinamiklerini simüle edebildiği için otomotiv sektöründe batarya yönetim sistemleri (BMS) gibi gerçek zamanlı uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. ECM'ler genellikle batarya hücrelerini, dirençler ve kapasitörlerden oluşan birer elektrik devresi olarak modeller. Şekil 2.31'de gösterildiği üzere literatürde, R_{int} , Thevenin tabanlı elektrik modeli, empedans tabanlı elektrik modeli ve çalışma zamanına dayalı elektrikli modeli olmak üzere çeşitli ECM'ler bulunmaktadır [23, 186]. Şekil 2.31 (a)'da görüldüğü üzere R_{int} modeli en basit eş değer devre modellerinden biridir. Model sırasıyla deşarj ve şarj

durumunda farklı direnç değerlerini hesaba katan bir açık devre voltajından (V_{oc}) ve bir dirençten (R_0) oluşur [187]. Thevenin tabanlı elektrik modeli, R_{int} modelini temel alarak devreye paralel bir RC ağını ekleyerek bataryanın polarizasyon etkisini simüle etmek için kullanılır. Thevenin modeli nispeten basit bir yapıya ve yüksek simülasyon doğruluğuna sahiptir. Thevenin modelinin en büyük dezavantajı ise tüm parametrelerin sabit kabul edilmesidir. Thevenin modeli Şekil 2.31 (b)'de görüldüğü gibi açık devre voltajı, iç dirençler ve eş değer kapasitanslar olmak üzere 3 bölümden oluşur [23]. Şekil 2.31 (c)'de gösterilen empedans tabanlı modeller, elektrokimyasal empedans spektroskopisi yöntemini frekans alanında bir ac-eşdeğer empedans modeli elde etmek için kullanır ve karmaşık bir eşdeğer ağ yapısını empedans spektrumlarına uyması için kullanır [187]. Empedans tabanlı eşdeğer devre modelleri yalnızca sabit bir SOC ve sıcaklık durumu için çalışmaktadır. Bu nedenle batarya hücresinin DC tepkisini tahmin edemezler. Şekil 2.31(d)'de gösterilen çalışma zamanına dayalı eşdeğer devre modeli, sabit bir akım altında çalışma süresi ve DC yanıt simülasyonu için oldukça karmaşık bir modeldir. Geçici yanıt için sınırlı bir modellenebilirliği vardır. Chen ve Rincon-Mora [189] sistem tasarımı, entegrasyonu ve optimizasyonu için bahsedilen eşdeğer devre modellerinin olumlu yanlarını birleştiren kapsamlı bir model üzerinde çalıştılar. Bu model, Thevenin tabanlı modellerin geçici kapasitelerini, empedans tabanlı modellerin alternatif akım (AC) özelliklerini ve çalışma zamanı tabanlı modellerin çalışma zamanı bilgilerini birleştirir. Önerilen bu model hem çalışma ömrünü hem de I-V performansını doğru bir şekilde yakalayarak taşınabilir elektronikler için sistem verimliliğini artırma ve batarya çalışma süresini uzatma olanağı sunar.



Şekil 2.30. Yaygın olarak kullanılan eşdeğer devre modelleri; (a) R_{int} modeli, (b) Thevenin modeli, (c) empedans modeli, (d) çalışma zamanına dayalı elektrik devre modeli [190]

Anslys Fluent Chen ve Rincon-Mora'nın çalışmasını baz alarak Şekil 2.32'de görüldüğü üzere 6 parametrelili (V_{oc} , R_s , R_1 , C_1 , R_2 , C_2) eşdeğer devre modelini benimsemiştir. Modelde kullanılan parametreler SOC ve sıcaklığın birer fonksiyonudur [178].



Şekil 2.31. 6 parametrelili ECM modeli şematik gösterimi

Modelin yönetim eşitlikleri denklem 2.38, 2.39, 2.40 ve 2.41'deki şekilde ifade edilir;

$$V(t) = V_{oc} + V_1 + V_2 - R_s \cdot i(t) \quad (2.38)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} V_1 + \frac{1}{C_1} \cdot i \quad (2.39)$$

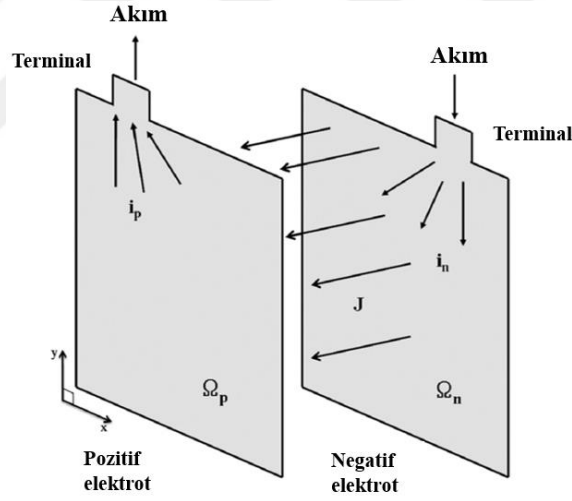
$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2 C_2} V_2 + \frac{1}{C_2} \cdot i \quad (2.40)$$

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{i(t)}{3600 Q_{ref}} \quad (2.41)$$

ECM modeli hem tek bir batarya hücresinin hem de batarya paketinin şarj ve deşarj sürecini simüle edilmesine olanak sağlar. Ayrıca bu model çok yönlü ve hesaplama maliyeti Newman P2D modeline göre oldukça düşüktür.

2.9.3. NTGK Modeli

Batarya yönetim algoritmalarını optimize etmek için lityum iyon bataryaların sıcaklığa bağlı performanslarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu doğrultuda Kwon ve ark. [191] ohm yasası ve elektrotlardaki yük korunumunu dikkate alarak elektrotların basitleştirilmiş polarizasyon özelliklerine dayalı olan basit bir modelleme yaklaşımını çalıştılar. Bu çalışmada, elektrotlar üzerinden geçen akım nedeniyle ohmik ısıyı ve katı/elektrolit arayüzündeki yük geçişi nedeniyle üretilen ısınmayı açıklayan lityum polimer bataryanın modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Isı üretim oranı potansiyel ve akım yoğunluğu dağılımlarının modellenmesi ile belirlenir. Hesaplanan potansiyel ve akım yoğunluğu dağılımından deşarj süresinin bir fonksiyonu olarak elektrotlardaki deşarj derinliği (DoD) belirlenir. Şekil 2.33’de bir bataryanın levha elektrotlarındaki akım akışı şematik olarak gösterilmektedir. Elektrotlar arası mesafenin çok küçük olduğu varsayılır ve bu sebeple elektrotlar arası akım akışı elektrotlara diktir.



Şekil 2.32. Paralel levha elektrotlar arasındaki akım akışının şematik diyagramı [192]

Pozitif ve negatif elektrotlardaki akım akışının yönetimsel denklemleri sırası ile denklem 2.42 ve denklem 2.43 ile ifade edilir [192, 193].

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \phi_+) = -J \quad (2.42)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) = +J \quad (2.43)$$

Burada, pozitif ve negatif elektrotun elektriksel iletkenlikleri sırası ile σ_+ ve σ_- , pozitif ve negatif elektrotlardaki faz potansiyelleri sırası ile ϕ_+ ve ϕ_- , akım yoğunluğu ise J ile ifade edilir.

Akım yoğunluğu aşağıdaki denklem 2.44 ile hesaplanır [194].

$$J = Y(\phi_+ - \phi_- - U) \quad (2.44)$$

Burada, pozitif ve negatif potansiyeller arasındaki fark ($\phi_+ - \phi_-$) ile ifade edilir. DoD'nin birer fonksiyonu olan batarya parametreleri Y ve U terimleri ile ifade edilir ve sırası ile denklem 2.45 ve denklem 2.46 ile tanımlanır [194].

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 b_n (DOD)^n \right) e^{C_1 \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (2.45)$$

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DOD)^n \right) C_2 (T - T_{ref}) \quad (2.46)$$

Burada, a ve b deney ile belirlenen, C_1 ve C_2 bataryaya özgü model sabitleridir.

Elektrotta DoD'nin dağılımı, akım yoğunluğunun dağılımından denklem 2.47'deki gibi hesaplanır [194].

$$DoD = \frac{\int_0^t J dt}{Q_T} \quad (2.47)$$

Burada, t deşarj süresini (sn), J elektrotlardaki akım yoğunluğunu ve Q_T elektrotlarda alan başına teorik kapasiteyi ($Ah m^{-2}$) ifade eder. Elektrokimyasal reaksiyon ısısı ise denklem 2.48'deki şekilde hesaplanır [193].

$$\dot{q}_{Ech} = J \left[(U - V) - T \frac{dU}{dt} \right] \quad (2.48)$$

Burada, U açık devre potansiyelini, V hücre voltajını temsil eder. Yukarıdaki denklemdeki ilk terim $(U - V)$ aşırı potansiyeli, ikinci terim ise entropik ısıyı tanımlamaktadır.

Basit ve yarı ampirik elektrokimyasal model olan NTGK modeli elektrik yükünün çok fazla değişmediği koşullarda bataryanın şarj/deşarj döngüsünü simüle etmek için oldukça kullanışlı ve hesaplama maliyeti düşüktür. Yani elektrik yükünün sabit olduğu koşullarda örneğin sabit C oranında bataryanındeşarjı gibi durumlarda oldukça verimli bir modeldir. Ancak elektrik yükünün ani değişimler gösterdiği gerçek sürüş çevrimi gibi koşullarda NTGK modeli bataryanın atalet değişikliklerini hesaba katmayacaktır. Bu sebeple, ani yük değişimleri sebebiyle batarya dinamiklerinin doğru yakalanabilmesi için deneysel bir model olan ECM tercih edilmelidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Matematiksel Modeller

Bu tez çalışmasında kullanılan matematiksel modellerden bu bölümde bahsedilmiştir. Hesaplama akışkanlar dinamiği, sonlu hacimler metodu, süreklilik, momentum, enerji korunum denklemleri, elektrokimyasal ve termal denklemler bu bölümde detaylı olarak verilmiştir.

3.1.1. Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD)

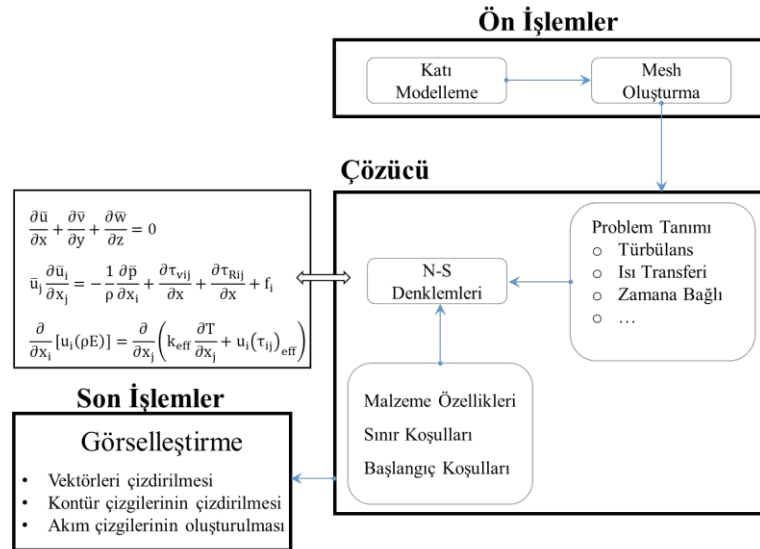
Hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD) akışkan akışlarını, ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonlar ve ilgili fiziksel olayları içeren sistemlerin davranışını bilgisayar tabanlı simülasyon yolu ile inceleyen bilim dalıdır. HAD tekniği karmaşık akışkan hareketleri gibi ilgili fiziksel olayların tahmin edilmesinde oldukça güçlü nümerik bir yöntemdir. Bu yönüyle endüstriyel ürün ve süreçlerin tasarımında HAD giderek daha hayati bir haline gelmektedir. Bu sebeple, savunma ve uzay/havacılık, otomotiv, enerji, denizcilik, biyomedikal/sağlık, kimyasal süreçler ve beyaz eşya gibi endüstriyel alanlarda HAD oldukça geniş bir kullanıma sahiptir. Akışkan sistemi tasarımına yönelik uygulanan deney tabanlı yaklaşımlara göre HAD birkaç benzersiz avantaja sahiptir.

- Tasarım maliyetlerinin azaltılması ve tasarım süreçlerini hızlandırması,
- Deney maliyetlerinin çok yüksek olduğu sistemleri inceleme becerisi,
- Alternatif akışkan malzemelerinin incelenmesiyle deney maliyetlerinin düşürülmesi,
- Tasarım optimizasyonu ile zamandan kazanç sağlanması,
- Prototip maliyetlerinin azaltılmasıdır.

Analitik olarak çözülemeyen akışkanlar ile ilgili olaylar kısmi veya tam diferansiyel denklemler ile açıklanabilir. Bununla birlikte, bu denklemlerin nümerik olarak çözümlenebilmesi için bilgisayar yardımı ile kısmi diferansiyel denklemlerin kısmi diferansiyel denklemleri ayrıklaştırma yöntemleriyle cebirsel denklem sistemlerine dönüştürmek gereklidir. Bu adımdan sonra tüm cebirsel ifadeler nümerik olarak çözümlenerek çözüm alanı oluşturulur. Bu yaklaşımın temel özelliği uzay

ve/veya zamanda küçük alanlara uygulanmasıyla farklı konumlarda ayrı sonuçlar sağlamasıdır. Bu sayede, karmaşık akışkan davranışları yaklaşık olarak tahmin edilebilmektedir. Ancak, nümerik çözümlerin doğruluğu, kullanılan ayrıklaştırma yöntemlerinin kalitesine bağlı olarak değişebilir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin işlem adımları temelde ön-işlemler, çözücü ve son işlemler olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Şekil 3.1’de bu işlem adımların şematik görünümü gösterilmektedir. Ön işlemler, akış probleminden HAD programına girdi sağlamak ve ardından bu girdinin çözücü tarafından kullanılması için uygun bir forma dönüştürülmesinden oluşmaktadır. Bu aşamada, problemin tanımlanması, hesaplama alanının belirlenmesi yani ilgilenilen alandaki geometrinin tanımı ve çözüm ağı adını verdiğimiz mesh yapılarının oluşturulmasını (hesaplama alanının daha küçük ve birbirleri ile örtüşmeyen alt alanlara bölünmesi) içermektedir. Çözücü aşamasında, hesaplama alanının (sonlu) kontrol hacimleri üzerinde akışkan davranışını tanımlayan denklemlerin entegrasyonu, ayrıklaştırma işlemi (integral denklemlerinin bir cebirsel denklem sistemlerine dönüştürülmesi) ve cebirsel denklemlerin iteratif çözümünü içermektedir. Son işlemler ise elde edilen sonuçların görselleştirilmesini (vektör ve kontürlerin çizdirilmesi, akım çizgilerinin oluşturulması gibi) içermektedir.



Şekil 3.1. HAD işlem basamaklarının şematik gösterimi

Bu tez çalışmasında, Ansys Fluent kullanılmıştır. Ansys Fluent sonlu hacimler metodunu kullanarak çözüm yapan güçlü bir HAD yazılımıdır. Geometri tasarımı,

çözüm ağının oluşturulması ile ilgili işlemler Ansys programı içerisinde bulunan farklı modüller kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Denklem 3.1’de nümerik analizlerde kullanılan genel transport denklemi verilmiştir.

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_v \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_v S_\phi dV \quad (3.1)$$

Zamana bağlı terim + Taşınım = Difüzyon + Kaynak Terimleri

3.1.1.1. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde yaygın olarak kullanılan nümerik bir yöntemdir. Bu yöntem, korunum denklemlerinin integral formunu direk olarak fiziksel uzayda ayrıklaştırır. Sonlu hacimler yöntemi ilk olarak iki boyutlu, zamana bağlı Euler denklemlerinin çözümü için McDonald (1971), MacCormack ve Paullay (1972) gibi araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Daha sonra bu yöntem üç boyutlu akışlar için Rizzi ve Inouye (1973) tarafından genişletilmiştir. Sonlu hacimler yönteminde hesaplama alanı, sonlu sayıda ve her biri birbirleri ile komşu kontrol hacimlerine bölünür. Kontrol hacimlerinin her biri için ilgili özelliklerin tam korunumu ifade edilir ve değişken değerler merkez noktalarında hesaplanır. Merkezdeki değerler kullanılarak interpolasyon işlemi ile kontrol hacminin yüzeyindeki değerler ifade edilir. İkinci dereceden formüller uygulanarak yüzey ve hacim integrallerinin yaklaşık değerleri elde edilir. Bunun sonucunda, komşu düğümlerin değerlerini içeren cebirsel eşitlikler her bir kontrol hacminde ifade edilir [195].

Sonlu hacimler yöntemi, düğüm noktaları (ağ kesişim noktaları) yerine kontrol hacimlerini baz alarak çalıştığından dolayı her türlü sayısal çözüm ağına uygulanabilir. Düğüm noktalarının dikkate alındığı problemlerde düzenli çözüm ağı yapıları daha önemliyken, kontrol hacimlerinde çözüm yapan bu yöntem düzensiz çözüm ağlarının geometrik cisme uygun yerleşimleri ile çalışır. Sayısal çözüm ağı sadece kontrol hacmi sınırları dikkate alınarak oluşturulduğundan, aynı yüzey integrallerinin aynı sınırları paylaşan kontrol hacimlerine uygulanması durumunda korunum yasaları sağlanır. Bu yöntem yöntemi, sonlu farklar yönteminde olduğu gibi geometriye uygun koordinat

sistemi dönüşümü gibi denklem dönüşümlerine ihtiyaç duymaz ve bu nedenle kullanım açısından oldukça elverişlidir.

3.1.2. Batarya Model Denklemleri

Batarya hücresindeki şarj/deşarj süreci boyunca meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda ısı üretimi gerçekleşir. Tek bir batarya hücresi tarafından üretilen ısı, genel enerji korunum denklemi [196] ile aşağıdaki denklem 3.2 ile ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_b C_{p,b} T_b) = \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) + \dot{Q}_{gen} \quad (3.2)$$

Burada, $\dot{Q}_{gen}$ (W) elektrokimyasal reaksiyon tarafından üretilen ısıyı, T_b (K) hücredeki ortalama sıcaklığı, ρ_b (kg.m⁻³) hücre boyunca yoğunluğu, $C_{p,b}$ (J.kg⁻¹.K⁻¹) özgül ısı kapasitesini ve k_b (W.m⁻¹.K⁻¹) anizotropik termal iletkenliği temsil eder.

Bataryanın ısı üretim hızı ($\dot{Q}_{gen}$), batarya hücresi içerisindeki 3 boyutlu sıcaklık dağılımına önemli katkıda bulunur. Bununla birlikte, bataryanın aktif bölgesi tarafından üretilen ısı temel olarak hücre içinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlardan ve akım geçişi nedeniyle oluşan hücre içi direncinden kaynaklanır. Bataryanındeşarjı sırasında çekirdek bölgesinde üretilen ısı denklem 3.3 ile ifade edilir [197, 198].

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{ech} + \dot{Q}_j = \frac{1}{nF}(-T\Delta S) + I(E - V) \quad (3.3)$$

Burada, $\dot{Q}_{ech}$ elektrokimyasal reaksiyonlar tarafından üretilen ısıyı, $\dot{Q}_j$ hücre iç direnci tarafından üretilen Joule ısını, ΔS entropi değişimini, F Faraday sabitini, n elektrokimyasal reaksiyonlardaki elektron sayısını, I pilden geçen akımı, V pilin çalışma gerilimini ve E açık devre gerilimini ifade eder.

Batarya hücre malzemelerinin termofiziksel özelliklerini hesaplamak için aşağıdaki korelasyonlardan yararlanılmıştır.

Tek bir hücrenin yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesi, kullanılan malzemelerin niteliklerine göre denklem 3.4 ve 3.5’de gösterildiği gibi hesaplanır [196].

$$\rho_b = \frac{\sum L_i * \rho_i}{\sum L_i} \quad (3.4)$$

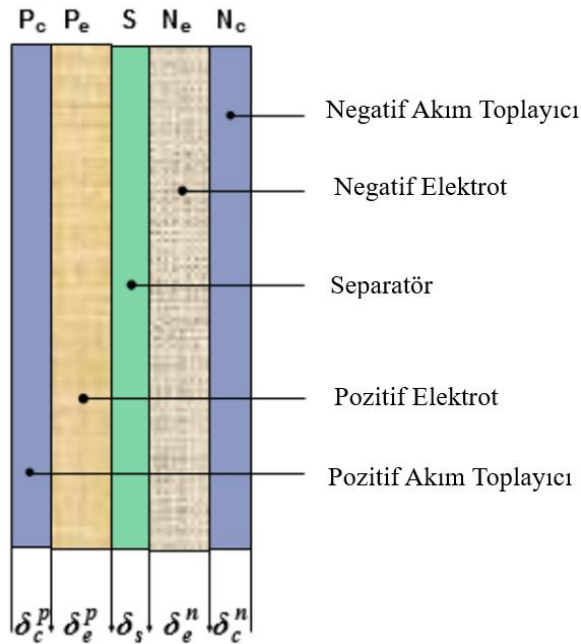
$$c_{p,b} = \frac{\sum L_i * c_{pi}}{\sum L_i} \quad (3.5)$$

Batarya hücresinin kalınlığı küçük olduğundan dolayı sıcaklık dağılımının kalınlık yönünden ısı transferinin üniform olduğu kabul edilir. Bununla birlikte, hücre boyunca bataryanın ısı iletkenliğinin anizotropik olduğu varsayılır. Yükseklik (y), genişlik (z) ve kalınlık (x) yönlerindeki ısı iletkenlik denklem 3.6 ve 3.7’deki gibi hesaplanır [196].

$$k_{T,y} = k_{T,z} = \frac{\sum L_i * k_{T,i}}{\sum L_i} \quad (3.6)$$

$$k_{T,x} = \frac{\sum L_i}{\sum L_i / k_{T,i}} \quad (3.7)$$

Belirli bir yönde tek bir hücre katman kalınlığı L_i ile ve bu yöndeki tabakaların termal iletkenlikleri $k_{T,i}$ ile tanımlanır. Şekil 3.2’de batarya hücresinin katmanlarının şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.2. Batarya hücresinin kesit alanın şematik gösterimi [193]

Bu tez çalışması kapsamında batarya modeli olarak, gözenekli elektrot ve konsantre çözelti teorilerini kullanarak geliştirilen fizik tabanlı bir model olan Newman Pseudo-2D elektrokimyasal modeli kullanılmıştır. Elektrolit ve katı fazlarla ilgili Newman P2D modelinin korunum denklemleri Tablo 3.1’de özetlenmektedir.

Tablo 3.1. Newman P2D modelindeki yönetici denklemleri [179, 181, 199]

Korunum Eşitlikleri		Sınır Şartları
Katı fazda kütle korunumu	$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right)$	$\left. \frac{\partial c_s}{\partial t} \right _{r=0} = 0,$ $-D_s \left. \frac{\partial c_s}{\partial t} \right _{r=R_s} = \frac{j^{Li}}{a_s F}$
Elektrolitte kütle korunumu	$\frac{\partial(\epsilon_e c_e)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e^{eff} \frac{\partial c_e}{\partial x} \right) + \frac{1-t_+^o}{F} j^{Li}$	$\left. \frac{\partial c_e}{\partial x} \right _{x=0}, \left. \frac{\partial c_e}{\partial x} \right _{L_{hücre}=0}$
Katı fazda yük korunumu	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right) - j^{Li} = 0$	$\phi_s(0) = 0,$ $\phi_s(l_n + l_s + l_p) = \phi_+ - \phi_-,$ $\left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right _{x=l_n} = \left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right _{x=l_n+l_s} = 0$
Elektrolitte yük korunumu	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_D^{eff} \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} \right) + j^{Li} = 0$	$\left. \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right _{x=l_n} = \left. \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right _{x=l_n+l_s} = 0$
İfadeler	$j^{Li} = a_s i_0 \left\{ \exp \left[\frac{\alpha_a F}{RT} \eta \right] - \exp \left[\frac{\alpha_c F}{RT} \eta \right] \right\},$ $\eta = \phi_s - \phi_e + U,$ $i_0 = F k_m (c_e)^{\alpha_a} (c_{s,max} - c_{s,e})^{\alpha_a} (c_{s,e})^{\alpha_c}$	
Etkin özellikler	$D_e^{eff} = D_e \epsilon_\epsilon^\beta,$ $\kappa^{eff} = \kappa \epsilon_\epsilon^\beta,$ $\kappa_D^{eff} = \frac{2RT}{F} \kappa^{eff} (t_+^o - 1) \left(1 + \frac{d \ln f_+}{d \ln c_e} \right),$ $\sigma^{eff} = \sigma \epsilon_s^\beta,$ $a_s = \frac{3\epsilon_s}{r_s},$ $D_s = D_{s,eff} \exp \left[\frac{-E_d}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{reff}} \right) \right],$ $k_m = k_{m,eff} \exp \left[\frac{-E_r}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{reff}} \right) \right]$	

Yukarıdaki tabloda yer alan denklemler aşağıdaki gösterimleri kullanır:

σ^{eff} : Efektif elektrik iletkenliği (katı faz)	α_a : Anotta yük transfer katsayısı
κ : Elektrolit iyonik iletkenliği	α_c : Katotta yük transfer katsayısı
κ_D^{eff} : Elektrolit difüzyon iletkenliği	α_s : Birim hacim başına katı/elektrolit arayüzey alanı
D_s : Li'nin katıdaki difüzyon katsayısı	F : Faraday sabiti
D_e : Li+'nın elektrolit fazındaki difüzyon katsayısı	R : Evrensel gaz sabiti
t_+^0 : Li+'nın aktarım sayısı	f_+ : Elektrolit aktivite katsayısı
U : Elektrot reaksiyonlarındaki açık devre voltajı	β : Bruggeman gözeneklilik üsteli
$c_{s,max}$: Katı fazda maksimum Li konsantrasyonu	ε_e : Elektrottaki elektrolit fazının hacim fraksiyonu
$c_{s,e}$: Katı partikül yüzeyinde Li konsantrasyonu	ε_s : Elektrottaki aktif malzemenin hacim fraksiyonu
$D_{s,ref}$: Referans katı difüzyon katsayısı	ε_f : Elektrottaki dolgu malzemesinin hacim oranı ($\varepsilon_e + \varepsilon_s + \varepsilon_f = 1$)
$k_{m,ref}$: Referans reaksiyon hızı sabiti	E_d : D_s 'nin sıcaklık duyarlılığını kontrol eden aktivasyon enerjisi
T_{ref} : Referans sıcaklığı	E_r : k_m 'nin sıcaklık hassasiyetini kontrol eden aktivasyon enerjisi

3.1.3. Akış Denklemleri

Soğutma plakasının serpantin kanalları boyunca geçen akışkanın kütle, momentum ve enerji korunumu denklem 3.8, 3.9 ve 3.10'daki gibi ifade edilir [200].

$$\nabla \cdot \vec{\vartheta} = 0 \quad (3.8)$$

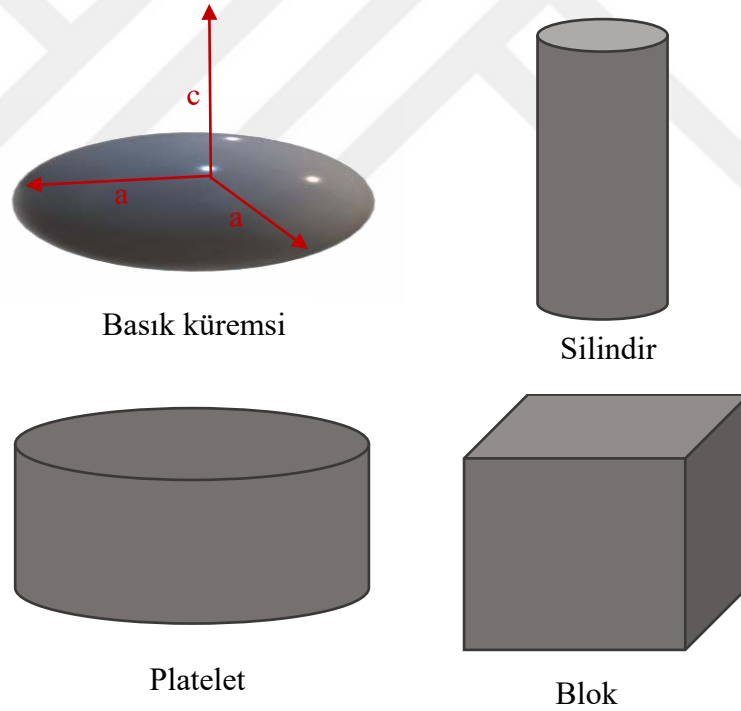
$$\rho_w \left[\frac{\partial \vec{\vartheta}}{\partial t} + (\vec{\vartheta} \cdot \nabla) \vec{\vartheta} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{\vartheta} \quad (3.9)$$

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w c_w \vec{\theta} T_w) = \nabla \cdot (k_w \nabla T_w) \quad (3.10)$$

Serpantin kanallardan akan akışkanın yoğunluğu (kg.m^{-3}), özgül Isı kapasitesi ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), termal iletkenlik ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), sıcaklık (K), ve hız (m.s^{-1}) sırasıyla ρ_w , c_w , k_w , T_w ve $\vec{\theta}$, ile gösterilir.

3.1.4. Nanoakışkan Model Denklemleri

Bu tez çalışması kapsamında, serpantin kanallarından geçen soğutma ortamı $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Su}$ nanoakışkanı kullanılmıştır. $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Su}$ nanoakışkanın ısıl performansı %0, %0.5, %1 ve %2 olmak üzere dört farklı hacim oranında ve blok, silindir, platelet ve basık küremsi (ing. oblate spheroid) olmak üzere dört farklı partikül şeklinde incelenmiştir. Çalışmada kullanılan parçacık şekillerinin şematik gösterimi şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Nanoakışkanda kullanılan nanoparçacık şekillerinin şematik gösterimi

Tüm katı partikül şekilleri için nanoakışkanların yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesi denklem 3.11 ve 3.12’ deki şekilde hesaplanır [201].

$$\rho_{nf} = \rho_f(1 - \varphi) + \rho_{np}\varphi \quad (3.11)$$

$$(c_p)_{nf} = \frac{(1 - \varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_{np}}{\rho_{nf}} \quad (3.12)$$

nf, np, ve f, alt simgeleri sırasıyla nanoakışkan, nanopartikül ve baz akışkanı belirtir ve ayrıca nanoakışkan konsantrasyonu φ , ile gösterilir.

Basık küremsi şekle sahip nano boyuttaki katı partikülleri içeren nanoakışkanların termofiziksel özelliği denklem 3.13’de gösterildiği şekilde hesaplanır [166].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_{np} + (n - 1)k_f - (n - 1)(k_f - k_{np})\varphi}{k_{np} + (n - 1)k_f + \varphi(k_f - k_{np})} \quad (3.13)$$

Burada n, şekil faktörünü ($n = 3/\psi$) gösterir ve basık küremsi şeklindeki parçacıklar için partikül küreselliği (ψ) tablo 3.2’de ifade edilir.

Basık küremsi şeklindeki parçacıklar içeren nanoakışkanın viskozitesi denklem 3.14’de gösterildiği şekilde hesaplanır [202].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-2} \quad (3.14)$$

Burada basık küremsi şekle sahip katı parçacıkları içeren nanoakışkan için paketleme fraksiyonun (φ_m) büyüklüğü Mueller ve arkadaşları tarafından sunulmuş [202] ve tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Basık küremsi şeklindeki parçacıkların geometrik özelliğini gösteren δ ’nın büyüklüğü denklem 3.15 ile şu şekilde hesaplanır [203].

$$\delta = \frac{c}{a} \quad (3.15)$$

Basık küremsi şeklindeki partiküllere ait c ve a ifadeleri Şekil 3.3’de göstermektedir. Ayrıca Tablo 3.2’de bu parçacık şekli için δ büyüklüğü gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Basık küremsi şekle sahip parçacıklar için katsayılar [204]

Partikül Şekli	ψ	n	δ	φ_m
Basık Küremsi	0.4904	6.117	0.13	0.575

Silindir, blok ve platelet şeklindeki nano parçacıkları içeren nanoakışkanların termal iletkenlikleri ve viskoziteleri sırasıyla denklem 3.16 ve 3.17 kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır [166].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + (C_k^{şekil} + C_k^{yüzey})\varphi = 1 + C_k\varphi \quad (3.16)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + A_1 + A_2\varphi^2) \quad (3.17)$$

Burada $C_k^{şekil}$ nanoparçacık geometrisinin termal iletkenliğe etkisini belirtir ve $C_k^{yüzey}$ nanoakışkan termal iletkenliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olan katı/sıvı arayüzünden etkilenen yüzey direncini temsil eder. Tablo 3.3’de çeşitli nanoparçacık geometrileri için C_k değerlerini listelenir. Ayrıca Tablo 3.4’de çeşitli parçacık şekilleri için A_1 ve A_2 sabitleri verilmiştir.

Tablo 3.3. Çeşitli parçacık geometrilerini içeren nanoakışkanın termal iletkenliğinin hesaplanması için denklem (3.16)’da yer alan katsayılar ve en boy oranları [205]

Nanoparçacık	En Boy Oranı	C_k	C_k^{shape}	$C_k^{surface} = C_k - C_k^{shape}$
Silindir	1:8	3.95	4.82	-0.87
Blok	1:1:1	3.37	3.72	-0.35
Platelet	1:1/8	2.61	5.72	-3.11

Tablo 3.4. Denklem (3.17)’de çeşitli parçacık geometrilerine sahip nanoakışkanların viskozitesini hesaplamak için kullanılan katsayıları gösterir [205].

Sabitler	Silindir	Blok	Platelet
A_1	13.5	1.9	37.1
A_2	904.4	471.4	612.6

3.1.5. Faz Değiştiren Malzeme Denklemleri

Bu tez çalışmasında entalpi-gözeneklilik yöntemi, FDM’nin katı-sıvı faz değişimini modellemek için kullanılır [206]. Bu yöntemde eriyik arayüz izlenmez

bunun yerine hesaplama alanında erime oranı (sıvılaşma oranı) hesaplanır. Ayrıca bu yöntemde, FDM'nin tüm alanı gözenekli bir bölge olarak varsayılır. Bu sebeple, FDM'nin katı ve sıvı olduğunu gösteren sıvılaşma oranının değeri 0 ile 1 arasında erime işleminin ilerlemesine göre değişiklik gösterir. Yani katı faz için sıvılaşma oranı 0 iken sıvı faza geçişte bu oran 1 değerini alır. Bu oran her bir iterasyonda entalpi dengesine dayalı olarak yenilenir. FDM'nin modellenenebilmesi için yapılan varsayımlar şunlardır.

- FDM'nin erime işlemi sırasındaki sıvı akışı laminar, zamana bağlı ve sıkıştırılamazdır.
- FDM'nin termofiziksel özellikleri, yoğunluğun sıcaklıkla değişimi dışında sabittir.
- Boussinesq yaklaşımı, FDM'nin kaldırma kuvveti etkisini modellemek için kullanılır.
- Radyasyon ısı transferinin etkisi ihmal edilir.

Bu çalışmada kullanılan FDM modeli için yönetici denklemler aşağıdaki gibi ifade edilir [207, 208].

Süreklilik eşitliği denklem 3.18' de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.18)$$

Momentum eşitliği denklem 3.19' da gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \xi \vec{g}(T - T_{ref}) + S \quad (3.19)$$

S, mushy bölgedeki azaltılmış gözeneklilik nedeniyle momentum kaynak terimidir ve denklem 3.20 ile ifade edilir [209].

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} A_{mush} \vec{v} \quad (3.20)$$

Burada, β sıvı hacim oranını, ε sıfıra bölünmeyi önlemek için çok küçük bir sayıyı (0.001), A_{mush} mushy bölge sabitini ve $\vec{v}$ hız vektörünü temsil eder. Enerji eşitliği denklem 3.21' de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.21)$$

Burada sıvı FDM'nin yoğunluğu ρ , sıvı FDM'nin hız vektörü $\vec{v}$, basınç P, dinamik viskozite μ , termal genleşme katsayısı ξ , yer çekim vektörü $\vec{g}$, referans sıcaklık T_{ref} , termal iletkenlik k ve entalpi H ile gösterilir.

FDM'nin entalpisi denklem 3.22'de görüldüğü gibi duyulur entalpi ve gizli ısının toplamı olarak hesaplanır.

$$H = h + \Delta H \quad (3.22)$$

Faz değiştiren malzemenin duyulu entalpisi aşağıdaki denklem 3.23 ile hesaplanır.

$$h = h_{ref} \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (3.23)$$

Gizli ısı, denklem 3.24'de gösterildiği gibi sıvılaşma oranının ve entalpinin bir fonksiyonu olarak hesaplanır.

$$\Delta H = \beta L \quad (3.24)$$

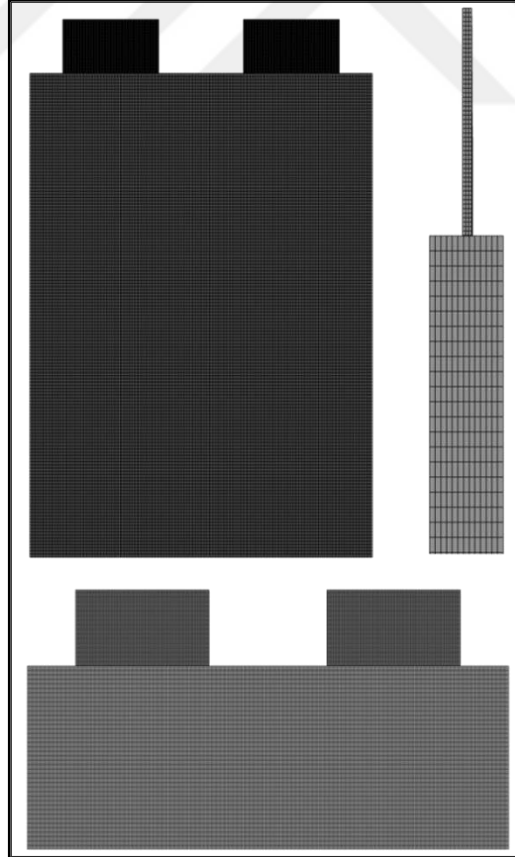
FDM'nin katı olduğu durumda ($\beta = 0$) gizli ısı sıfır ($L = 0$), FDM'nin sıvı olduğu durumda ($\beta = 1$) ise gizli ısı H_L 'dir.

Sıvılaşma oranı, denklem 3.25'de gösterildiği gibi katılaşma (T_s) ve sıvılaşma (T_l) sıcaklığının bir fonksiyonu olarak kabul edilir.

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s < T < T_l \\ 1, & T > T_l \end{cases} \quad (3.25)$$

3.2. Çalışmanın Doğrulanması

Sonuçların güvenilirliği için bu tez çalışmasında simülasyonda kullanılan kodun geçerliliği Panchal ve ark. [215] çalışmasına başvurularak doğrulanmıştır. Bu çalışmada, 20 Ah kapasiteli LiFePO₄ batarya hücresinin farklı deşarj hızlarında (2C, 3C ve 4C) termal analizi Newman P2D elektrokimya modeli kullanılarak Ansys Fluent yazılımında gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı ve bataryanın ilk sıcaklığı eşit olduğu varsayılmış ve değeri 22 °C'dir. Doğrulama çalışması için yapılan simülasyonlarda sayısal çözüm ağ yapısı olarak hexahedral elemanlar tercih edilmiş olup maksimum skewness kalite değeri 0.83'tür. Şekil 3.4'de doğrulama çalışmasında kullanılan sayısal çözüm ağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Doğrulama çalışmasında kullanılan sayısal çözüm ağı görselleri

Tablo 3.5’de çalışmada kullanılan batarya hücresinin özellikleri ve Tablo 3.6’da LiFePO₄ için Newman P2D parametreleri gösterilmiştir.

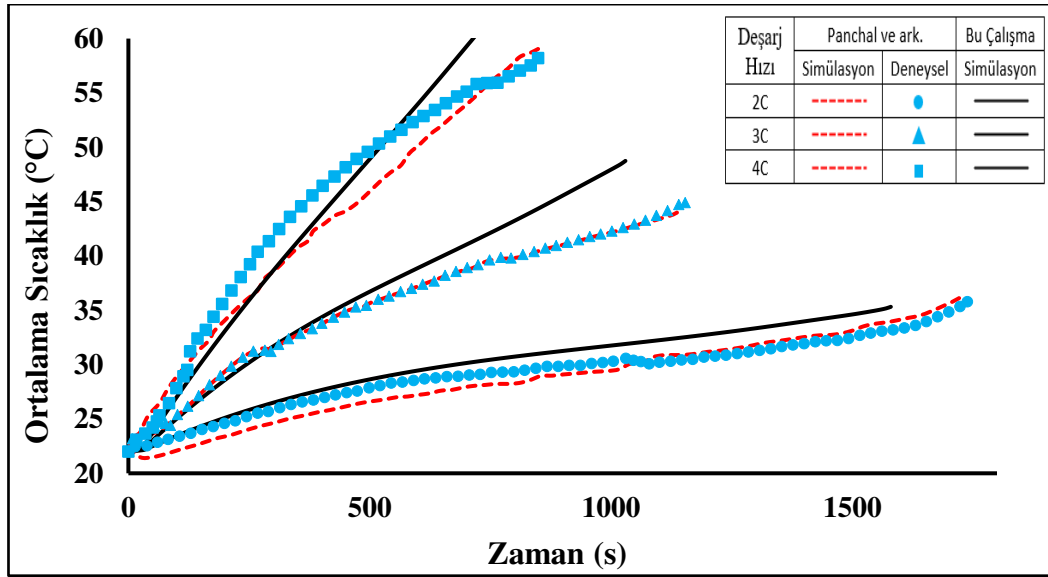
Tablo 3.5. Panchal ve ark. çalışmasında kullanılan batarya özellikleri [215]

Katot Malzemesi	LiFePO₄
Anot Malzemesi	Grafit
Nominal Kapasite	20 Ah
Min kesme gerilimi [V]	2.0
Maks kesme gerilimi [V]	4.1
Boyutlar [mm]	7.25 x 160 x 227

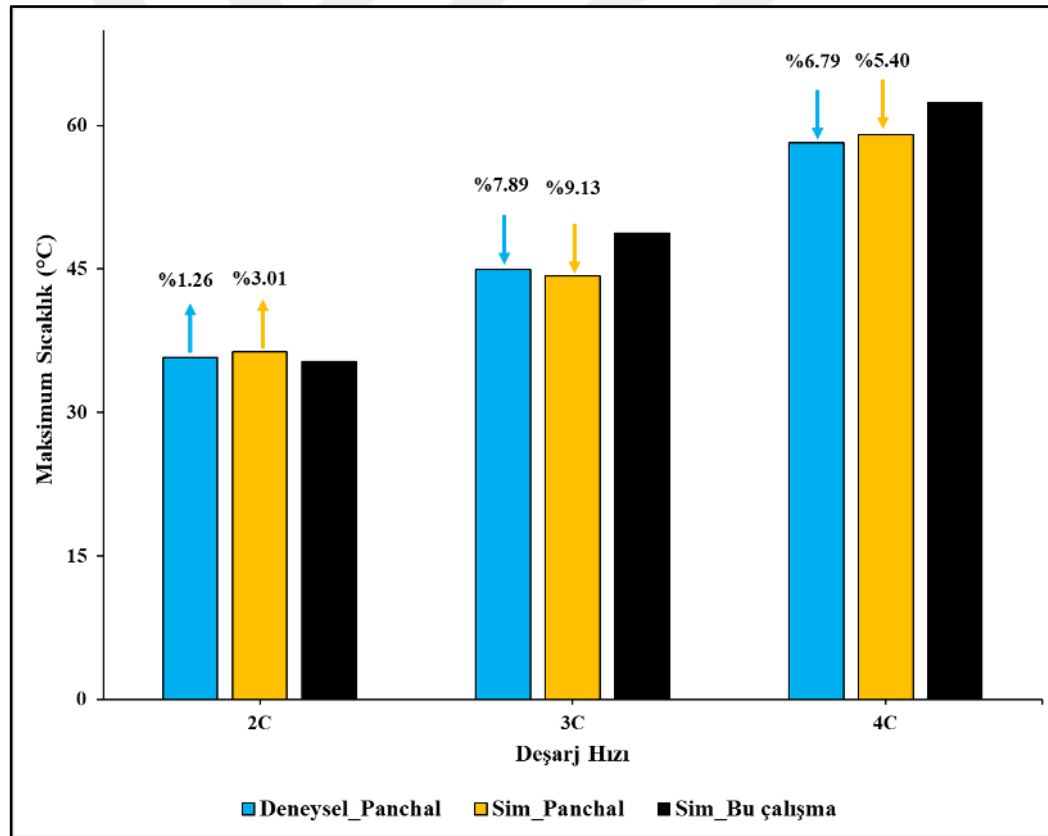
Tablo 3.6. LiFePO₄ için Newman P2D parametreleri [215]

Parametre	Katot	Anot	Separatör
L (μm)	183	100	52
R (μm)	8	12.5	-
$c_{s, \max}$ (mol/m³)	22806	31370	-
c_s (mol/m³)	3886.2	14870.76	-
c_e (mol/m³)	2000	2000	2000
ε_e	0.444	0.357	1
ε_f	0.259	0.172	-
D_s (m²/s)	1×10^{-13}	3.9×10^{-14}	-
σ (S/m)	3.8	100	-
Brugg (σ)	1.5	1.5	1.5
$k_{m, \text{ref}}$	3×10^{-11}	4.82×10^{-6}	-
Elektrolit			
D_e (m²/s)	7.5×10^{-11}		
t^+	0.363		

Doğrulama çalışması için kullanılan 20 Ah kapasiteli LiFePO₄ batarya hücresinin farklı deşarj hızlarındaki termal analizinden elde edilen sonuçlar Panchal ve ark. [215] tarafından yapılan deneysel ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması yapılarak kodun geçerliliği belirlenmiştir. Şekil 3.5’de batarya hücresinin ortalama sıcaklığının zaman ile değişim sonuçlarının referans çalışmadaki sonuçlar ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekil 3.6’da farklı deşarj hızlarında maksimum sıcaklığın referans makaledeki sonuçlar ile karşılaştırılması sunulmuştur.



Şekil 3.5. Farklı deşarj hızlarında ortalama sıcaklığın zaman ile değişiminin Panchal ve ark. [215] çalışması ile karşılaştırılması



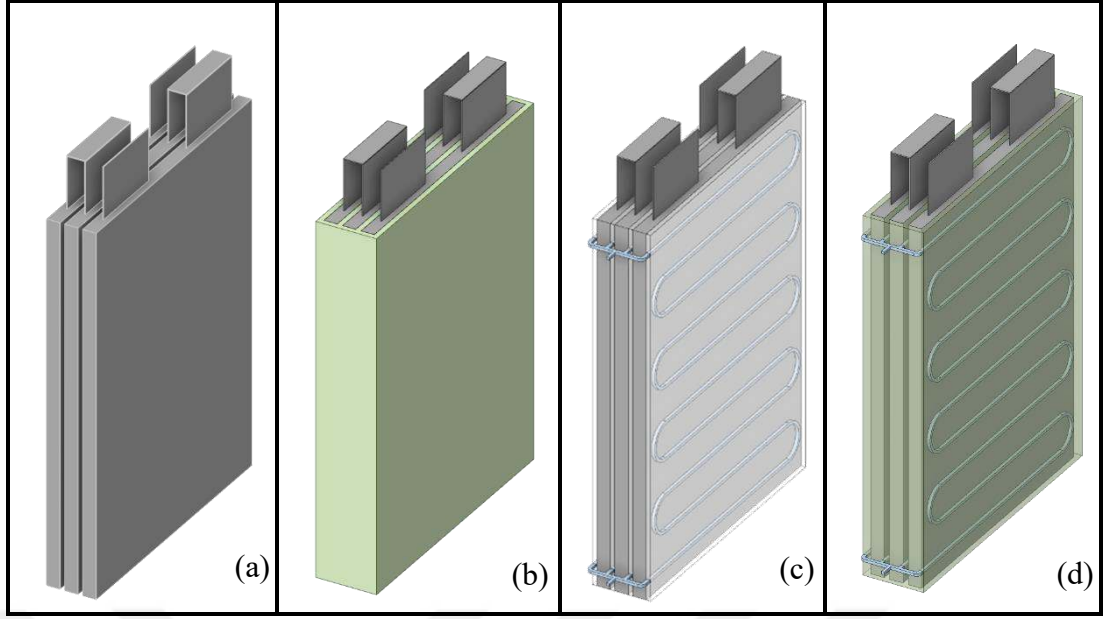
Şekil 3.6. Farklı deşarj hızlarında maksimum sıcaklığın Panchal ve ark. [215] çalışması ile karşılaştırılması

Yapılan doğrulama çalışmasında elde edilen sonuçlar Panchal ve ark. sunmuş oldukları deneysel ve simülasyon çalışmalarının sonuçları ile karşılaştırılmış olup elde edilen bulgular özeti aşağıda sunulmuştur.

- ✓ 2C deşarj hızında, Panchal ve ark. tarafından yapılan deneysel çalışmaya göre %1.26 ve simülasyon çalışmasına göre %3.01,
- ✓ 3C deşarj hızında, Panchal ve ark. tarafından yapılan deneysel çalışmaya göre %7.89 ve simülasyon çalışmasına göre %9.13,
- ✓ 4C deşarj hızında, Panchal ve ark. tarafından yapılan deneysel çalışmaya göre %6.79 ve simülasyon çalışmasına göre ise %5.40 oranında sonuçların uyduğu görülmektedir.

3.3. Batarya Geometrisi ve Termal Yönetim Sistem Tasarımı

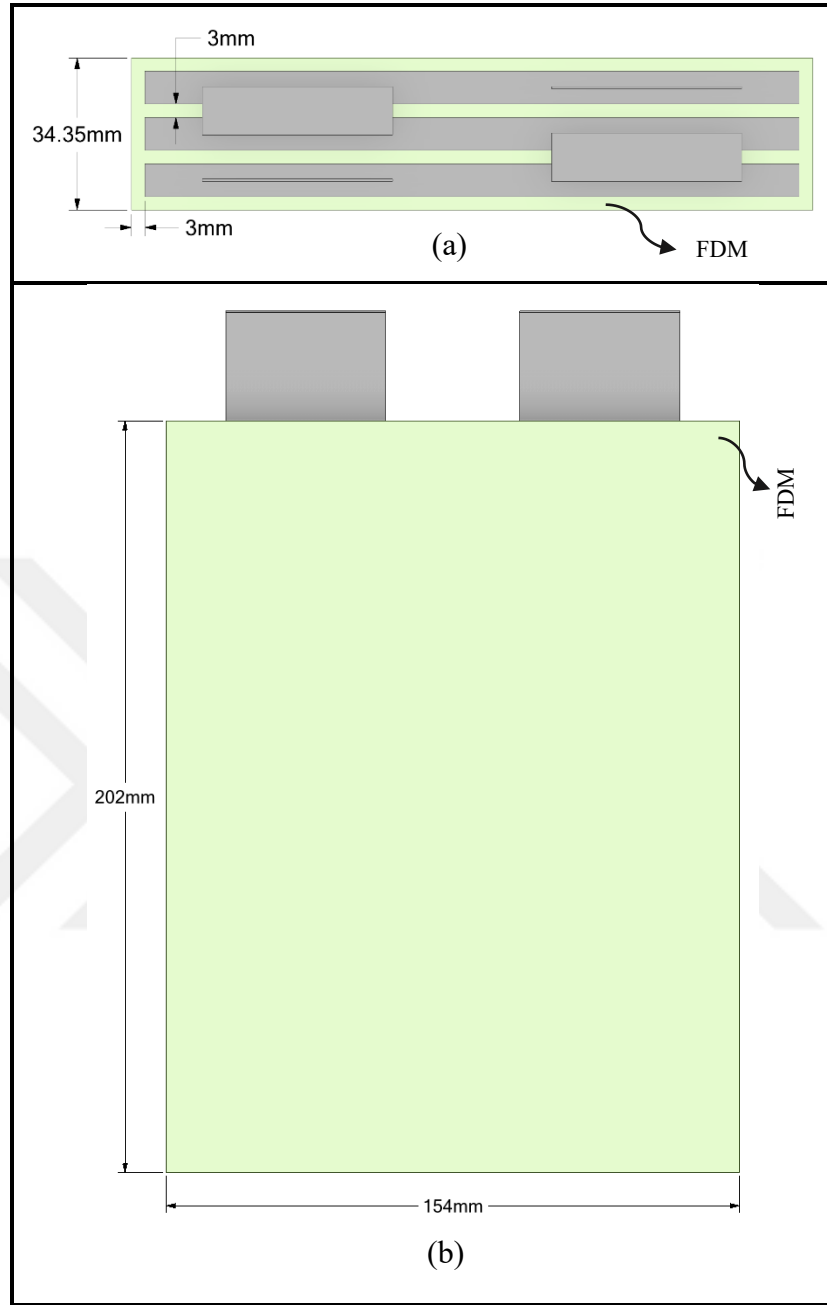
Bu çalışmada kullanılan batarya ve batarya termal yönetim sistemlerinin (BTYS) tasarımı ANSYS SpaceClaim Direct Modeler (SCDM) modülünde yapılmıştır. Batarya modülü ve tasarlanan batarya termal yönetim sistemleri (BTYS) şekil 3.7’de gösterilmektedir. Burada Şekil 3.7 (a)’da 3 seri 1 paralel (3s1p) konfigürasyona sahip batarya modülünü, Şekil 3.7 (b), Şekil 3.7 (c) ve Şekil 3.7 (d) batarya modülünün sıcaklığının optimum çalışma sıcaklık aralığında tutulması için tasarlanan batarya termal yönetim sistemlerini göstermektedir. Bu sistemler sırası ile faz değiştiren malzemeler (FDM) ile, sıvı soğutma ile ve hibrit BTYS’dir.



Şekil 3.7. Batarya modülü ve termal yönetim sistemleri; (a) Batarya modülü, (b) FDM ile BTYS, (c) Sıvı ile BTYS ve (d) Hibrit BTYS

3.3.1. Batarya Modül Geometrisi

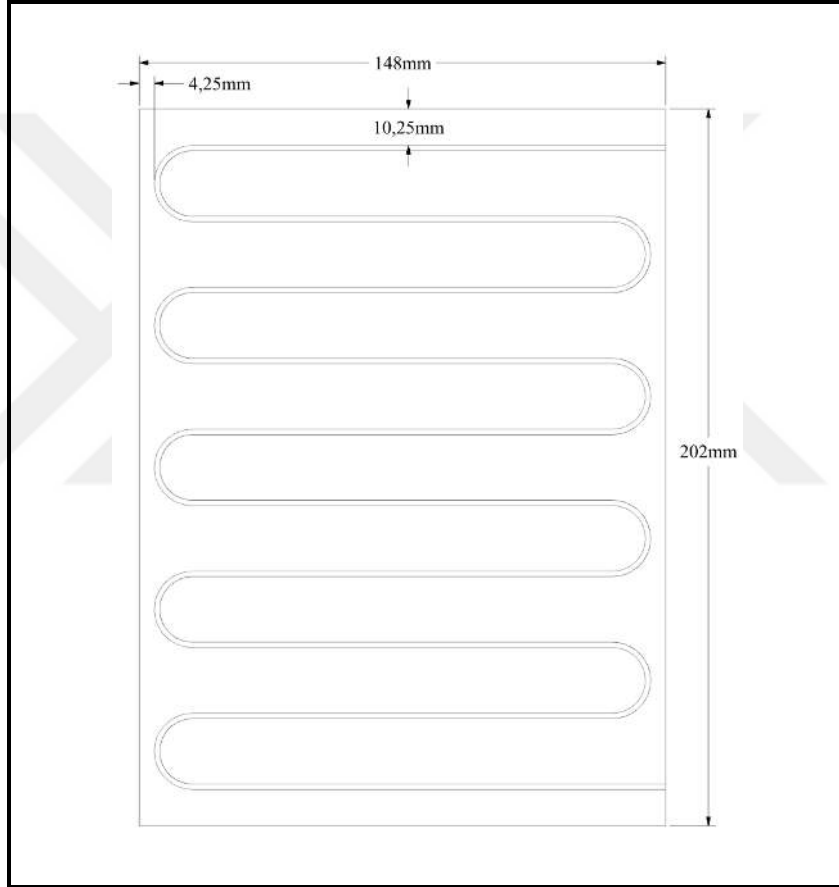
Bu çalışmada kullanılan batarya modülü, 20 Ah kapasiteli ve birbirlerine seri olarak bağlı 3 batarya hücresinden oluşmaktadır. Şekil 3.7 (a)'da 3 seri 1 paralel (3s1p) konfigürasyona sahip batarya modülü gösterilmektedir. Bir batarya hücresi aktif ve pasif olarak iki bölgeye ayrılır. Aktif bölge elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bölümdür. Batarya hücresinin aktif bölgesi LMO katot, grafit anot ve elektrolitten oluşmaktadır ve boyutları 7.45x202x148 mm'dir. Pasif bölge ise elektrik aktarımının sağlandığı bölümdür. Pasif bölge batarya terminalleri ve baralardan oluşmaktadır. Terminallerin boyutu 0.5x29.05x43 mm ve baraların boyutu ise 10.45x0.5x43 mm'dir. Negatif terminal malzemesi bakır, pozitif terminal ve baraların malzemesi ise alüminyumdur. Batarya hücresinin geometrik detayları Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



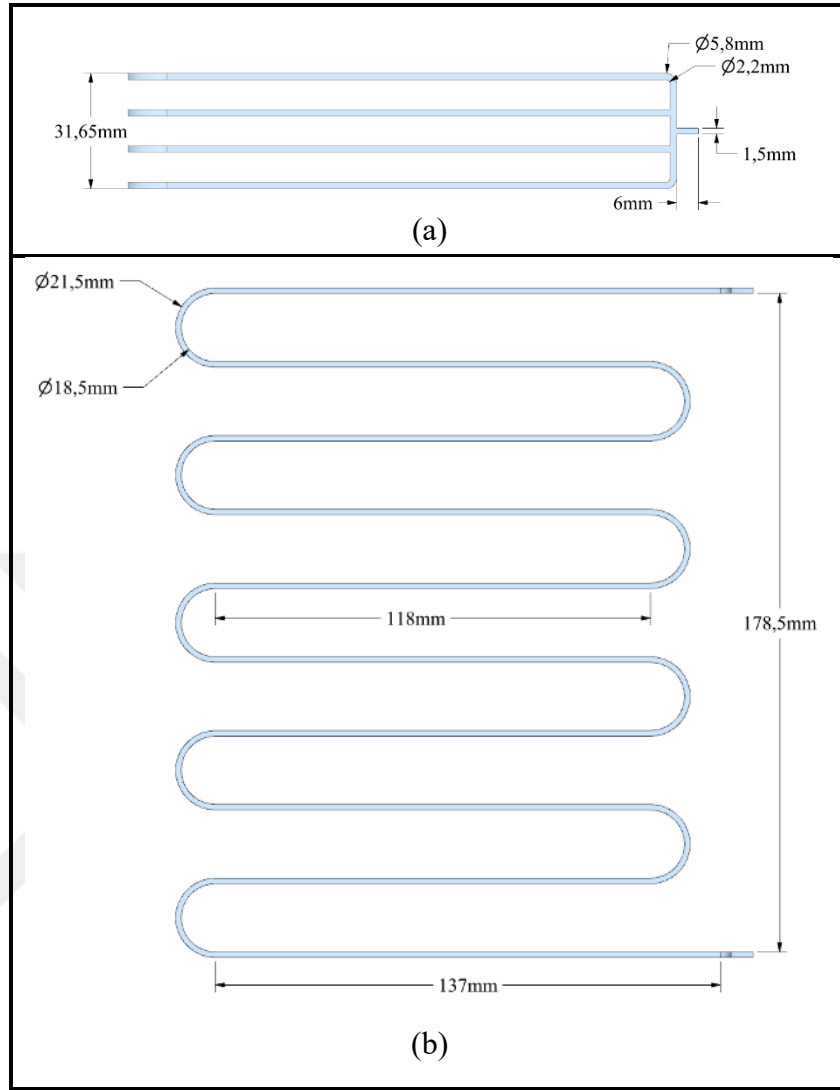
Şekil 3.9. FDM ile BTYS yönteminin geometrik detayları (a) üst görünüm, (b) ön görünüm

3.3.3. Sıvı Soğutma Tabanlı BTYS Geometrisi

Batarya modülünün soğutulması için kare kesitli serpantin kanalları içeren alüminyum soğutma plakası tasarlanmıştır. Şekil 3.7 (c)'de görüldüğü gibi tasarlanan sıvı soğutma ile BTYS üç tane batarya hücresi ve kalınlığı 2.5 mm olan dört tane serpantin kanallı soğutma plakasının birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Şekil 3.10'da soğutma plakasının geometrik detayları ve Şekil 3.11'de serpantin kanalların geometrik detayları verilmiştir.



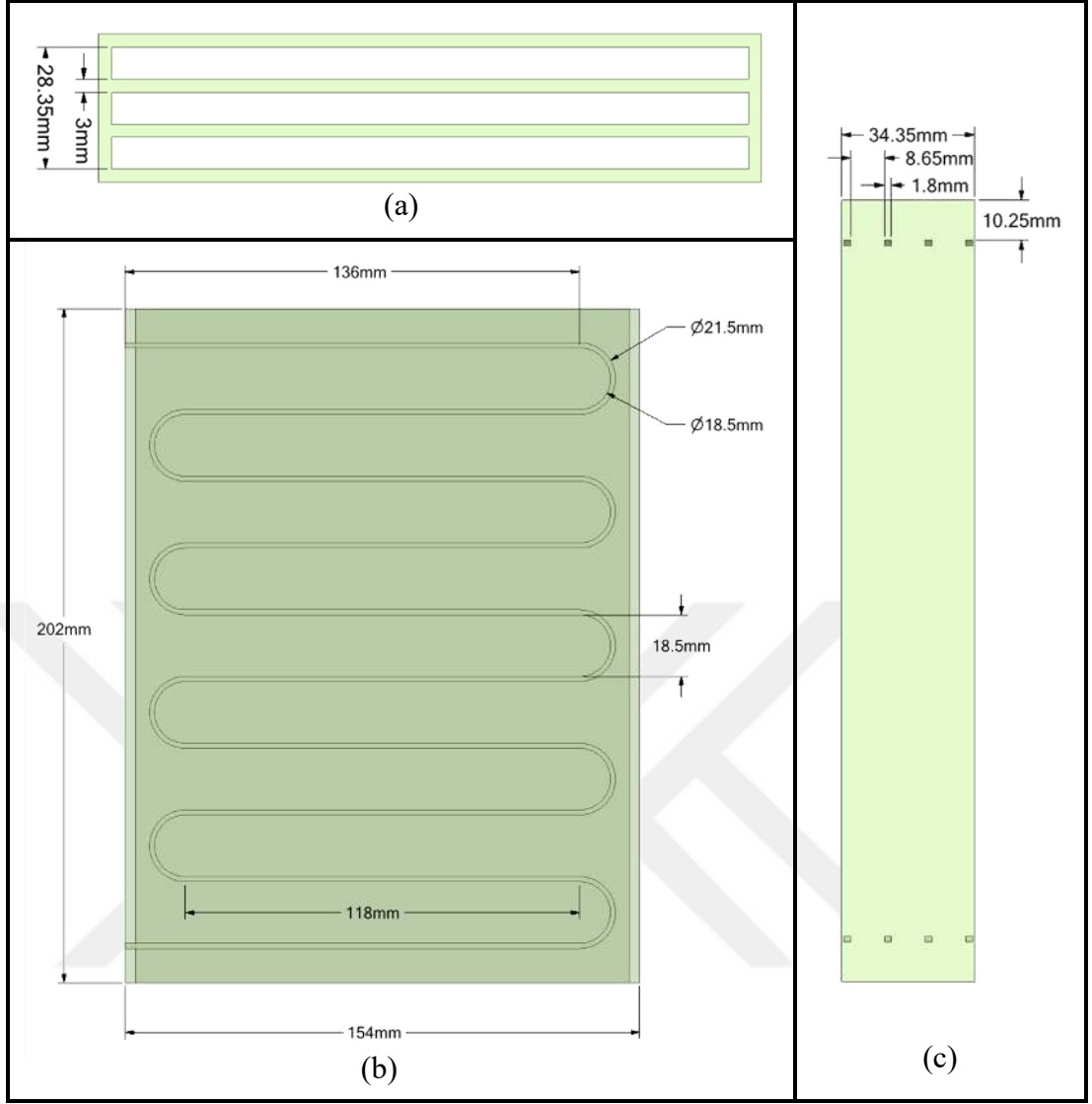
Şekil 3.10. Soğutma plakasının geometrik detayları



Şekil 3.11. Serpantin kanalların geometrik detayları (a) üst görünüm, (b) ön görünüm

3.3.4. Hibrit Tabanlı BTYS Geometrisi

Bu çalışmada kullanılan pasif soğutma tekniği olan FDM ile BTYS ve aktif soğutma tekniği olan sıvı ile BTYS tekniklerinin birlikte kullanılması ile tasarlanan hibrit BTYS Şekil 3.7 (d)'de gösterilmektedir. Hibrit BTYS tekniğinde faz değiştiren malzeme olarak R-42 saf parafin malzemesi tercih edilmiş ve FDM içerisinde alüminyum serpantin kanallar geçirilmiştir. Tasarlanan hibrit BTYS'nin geometrik detayları şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Hibrit BTYS'nin geometrik detayları (a) üst görünüm, (b) ön görünüm (c) yan görünüm

3.4. Mesh Yapısı ve Bağımsızlık Çalışması

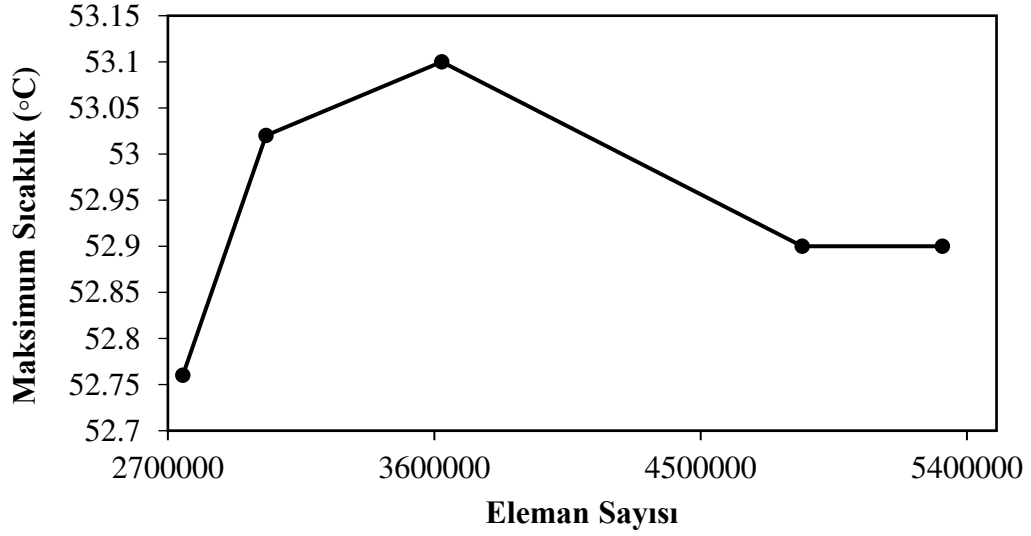
Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde sonuçların doğruluğunu etkileyen en önemli konuların başında geometrimiz üzerinde oluşturulan sayısal çözüm ağı gelmektedir. Oluşturmuş olduğumuz sayısal çözüm ağımızın sayısına ve kalitesine göre sonuçlarımız farklılık gösterebilir. Bununla birlikte gereğinden fazla sayıda oluşturulan çözüm ağı ise hesaplama maliyetimizi arttırır. Bu durumun önüne geçmek ve sonuçların çözüm ağına bağıllılığını ortadan kaldırmak için sayısal çözüm ağından bağımsızlık çalışması yapılarak optimum sayıda sayısal çözüm ağ aralığımız belirlenmiştir.

Ansyes Fluent Meshing modülü geometri üzerinde sayısal çözüm ağıının oluşturulması için kullanılmıştır. Fluent meshing'ın en belirgin özelliğı yerel polihedral çözüm ağı tipini oluşturmasıdır. Bu sebeple, bu tez kapsamında çalışılan batarya termal yönetim geometrilerinde polihedral çözüm ağı teknolojisi kullanılmıştır. Bu eleman tipinin avantajı, komşu hücreler ile bilgi alışverişinin daha fazla olması, eleman sayısının daha az olması ve daha az iterasyon ile daha kısa sürede yakınsama sağlamasıdır. Ancak eleman sayısını azaltmasına karşın Ram tüketimini arttırdığından dolayı daha fazla bilgisayar kaynağına gereksinim duyması bu eleman tipinin dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır. Nümerik yapılan çalışmalarda çözüm ağıının sayısının yanında kalitesi de oldukça önemlidir. Bu sebeple, oluşturduğumuz çözüm ağlarının belli kalite değerleri arasında olmasına özen göstermemiz gerekir. Genel olarak orthogonal ve skewness kalite kriterleri ise çözüm ağı yapımızın çarpıklığını ifade eder. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğı analizlerinde genellikle bakılan kalite kriterleri ve değer aralıkları Tablo 3.7'de gösterilmektedir.

Tablo 3.7. HAD analizlerinde genellikle bakılan kalite kriterleri ve değer aralıkları

Kalite Kriteri	Değer aralığı
Minimum Orthogonal Quality	Min Orthogonal ≥ 0.1
Maksimum Skewness	Max Skewness ≤ 0.95

Sıvı soğutma ile BTYS için yapılan çözüm ağıından bağımsızlık çalışması, 3C sabit bir deşarj hızında, 250 Reynolds sayısında ve soğutucu ortamın su kullanıldığı durum dikkate alınarak beş farklı çözüm ağı sayısında gerçekleştirilmiş olup modül üzerinde oluşan en yüksek sıcaklıklar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları Şekil 3.13'de verilmiş olup her bir çözüm ağıının kalite kriterleri Tablo 3.8'de özetlenmiştir.



Şekil 3.13. Çözüm ağından bağımsızlık çalışması

Tablo 3.8. Sıvı soğutma ile BTYS'nin çözüm ağı kalite değerleri

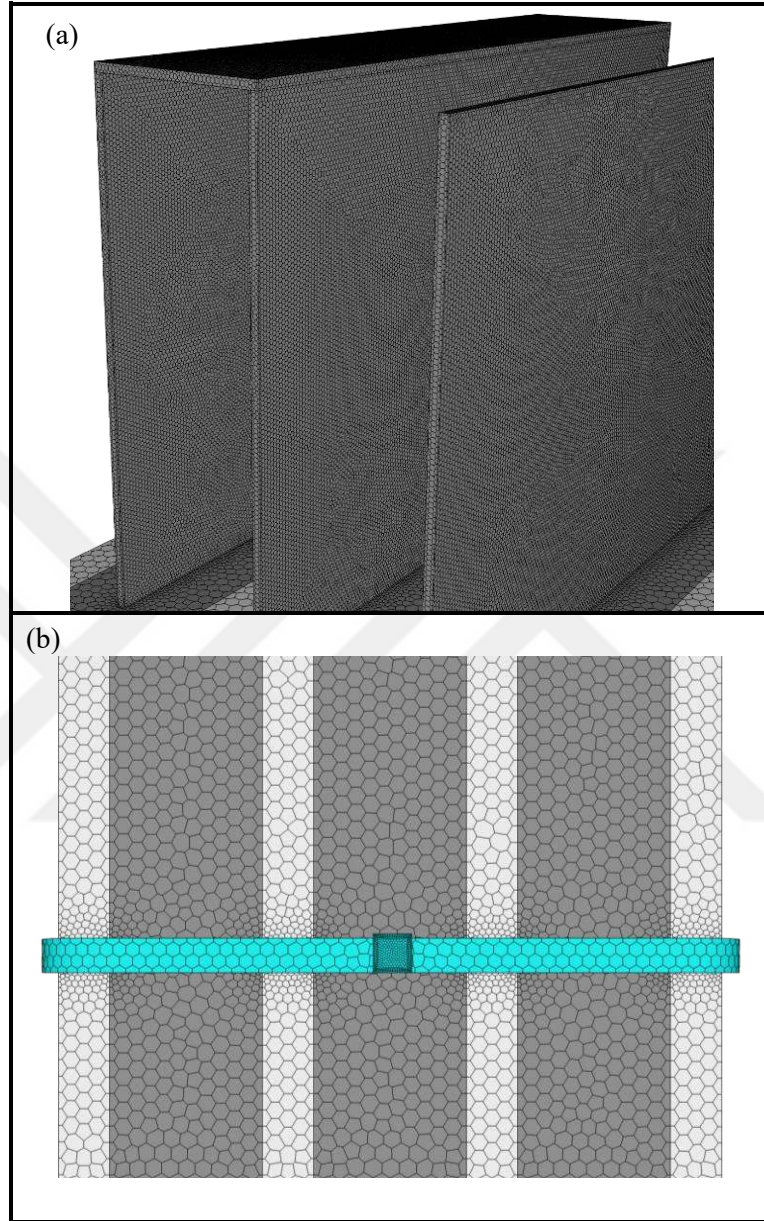
Eleman Sayısı	Min Orthogonal	Max Skewness
2750336	0.151	0.85
3031542	0.181	0.82
3625386	0.156	0.84
4842801	0.150	0.85
5316570	0.150	0.85

Farklı çözüm ağı sayılarında gerçekleştirilen analizlerde 4842801 eleman sayısından sonra batarya modülü üzerindeki en yüksek sıcaklık değerinin değişiklik göstermediği görülmektedir. Şekil 3.14'de 4842801 eleman sayısına sahip sıvı ile BTYS'nin polihedral çözüm ağı yapısı görülmektedir.



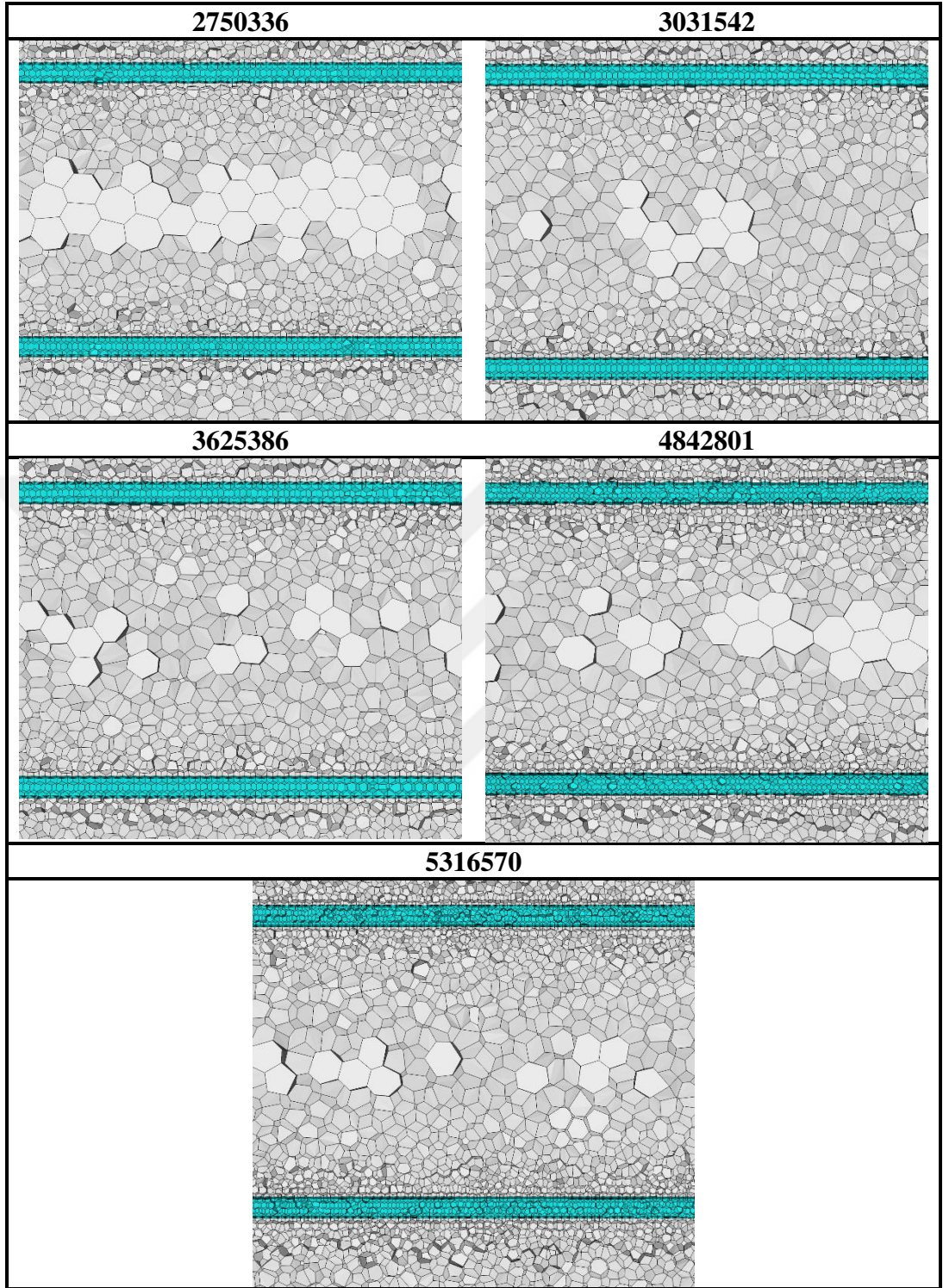
Şekil 3.14. Sıvı Soğutma ile BTYS çözüm ağı

Şekil 3.15 (a) ve (b)'de Şekil 3.14'de kırmızı ile belirtilen alanların büyütülerek detay mesh görünümleri bu bölgelerdeki çözüm ağının dağılımını göstermektedir.



Şekil 3.15. Çözüm ağı görünümleri (a) I bölgesinin, (b) II bölgesinin mesh görünümü

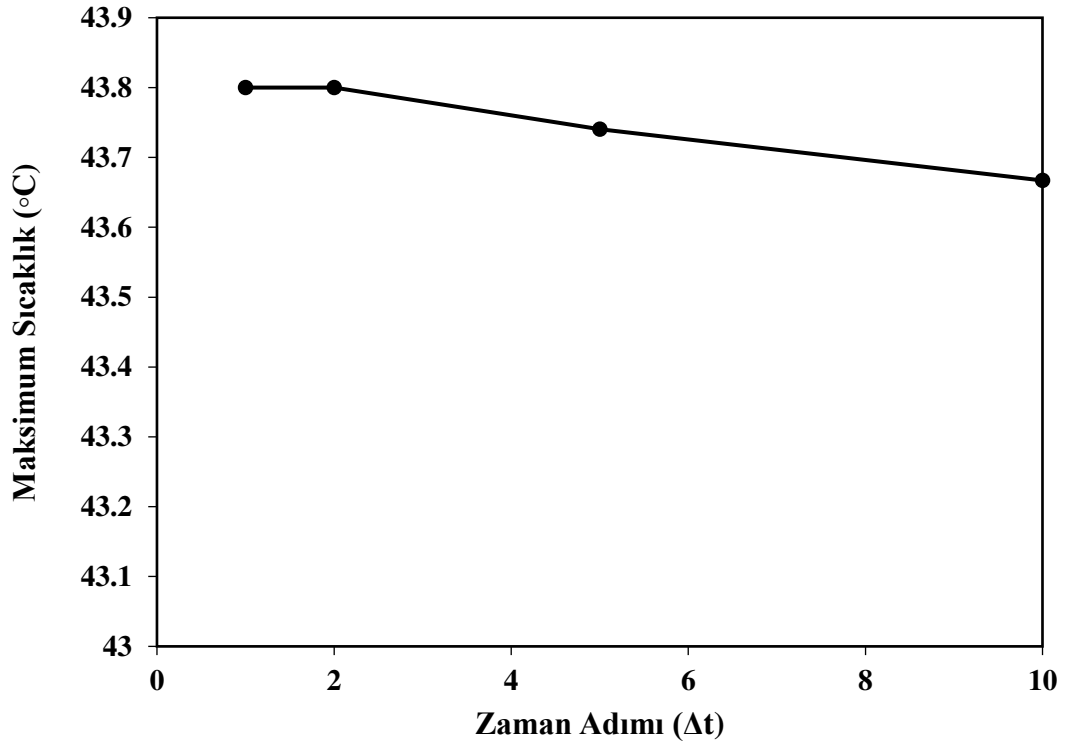
Şekil 3.16'de soğutma plakasının kesitinden alınan detay mesh görselleri artan eleman sayısına göre çözüm ağının yoğunluğunun nasıl değiştiğini gösterir.



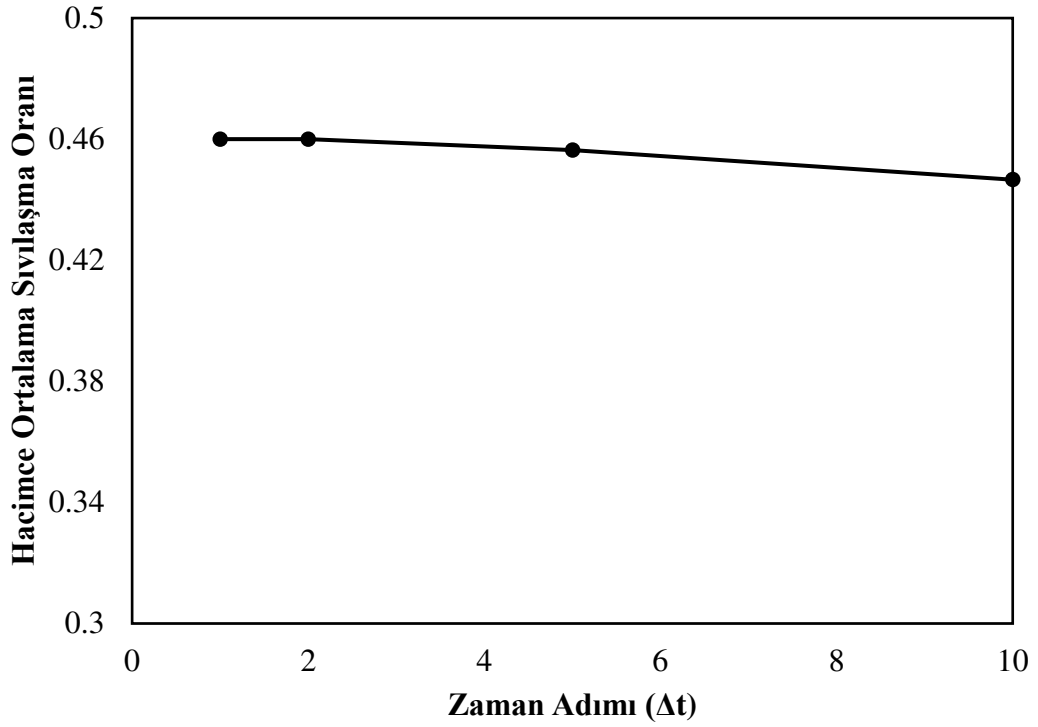
Şekil 3.16. Soğutma plakasının detay çözüm ağı görselleri

Zamana bağlı analiz uygulamalarında çözüm ağı ile birlikte analizin stabilitesini ve süresini etkileyen bir başka faktör zaman adımı (Δt) boyutudur. Zaman adımının doğru seçilmesi analizin yakınsaması ve süresi açısından oldukça önemlidir.

Bu sebeple uygun zaman adımının belirlenmesi için dört farklı zaman adımı dikkate alınarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada, FDM ile BTYS modeli kullanılmış olup batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklık ve FDM'nin ortalama sıvılaşma oranı dikkate alınarak optimum zaman adımı belirlenmiştir. Şekil 3.17'de zaman adımına göre sıcaklık değişimi ve Şekil 3.18'de ise zaman adımına göre FDM'nin hacimce ortalama sıvılaşma oranının değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Batarya modülünün zaman adımına göre sıcaklık değişimi



Şekil 3.18. Zaman adımına göre FDM'nin hacimce ortalama sıvılaşma oranının değişimi

Sonuçlar incelendiğinde, zaman adımının 1 ve 2 seçilmesi durumunda hem maksimum sıcaklık hem de hacimce ortalama sıvılaşma oranı değerlerinin değişiklik göstermediği görülmektedir. Bu sebeple, analiz süresinden kazanç sağlamak için zaman adımı boyutu (Δt) olarak 2 s kullanılmıştır.

3.5. Sınır Şartları

Çalışma sıcaklığının üstünde sıcaklık değerlerinde çalışma ve sıcaklık dağılımının düzensiz olması bataryaların performanslarını ve sağlıklarını olumsuz yönde etkileyen önemli iki parametredir. Bu doğrultuda, batarya modülü ve farklı batarya termal yönetim sistemlerinin soğutma performansları maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı parametreleri dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu tez kapsamında çalışılan sıvı ile ve hibrit BTYS modellerinde 250, 500, 750 ve 1000 olmak üzere dört farklı Re sayısında analizler gerçekleştirilmiş olup soğutma ortamlarının termal performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kanal içerisinden geçen akışkan zamandan bağımsız olarak çözülmüş ve sıkıştırılmaz laminar bir akış olarak modellenmiştir. Serpantin kanalların iç duvarlarında

kaymamazlık sınır koşulu uygulanmıştır. Batarya ve FDM modelleri için zamana bağlı bir çözüm gerçekleştirilmiş olup zaman adımı şekil 3.14 ve şekil 3.15’de yapılan çalışmaya göre seçilmiştir. Bununla birlikte, tüm modellerde radyasyon etkileri ve temas direnci etkileri göz ardı edilmiştir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen batarya simülasyonlarının hepsinde çözüm süresinden kazanç sağlamak için Derecesi azaltılmış (ing. Reduced Order) Çözüm Metodu (ROM) kullanılmıştır. Bölüm 2.9’da açıklanan MSMD yönteminde çözülen ikili potansiyel denklemlerin (2.36 ve 2.37) değişen elektrik yük durumu ve bataryanın şarj durumunun değişmesi nedeniyle her bir zaman adımında çözülmesi gerekir. Ancak aşağıdaki kabuller yapılarak bu ikili potansiyel terimlerin tekrar tekrar çözülmeden hesaplanması ROM çözüm yöntemi ile mümkündür.

- Elektrik iletkenliği sıcaklığa bağlı değildir
- Transfer akımı yoğunluğu, bir bataryanın aktif bölgesi üzerinde eşittir

Yapılan bu kabuller altında ikili potansiyel denklemin homojen lineer kısmi diferansiyel denklemler haline geldiğini ortaya koyar. Bu ikili potansiyel denklemini her bir zaman adımında çözmek yerine herhangi bir elektrik yükü altında ki ikili potansiyel alanın bir referans potansiyel alandan elde edilmesi için bir ölçekleme prosedürü kullanılır. Bu teknik ile her bir zaman adımında ikili potansiyel denklem çözme ihtiyacı tamamen ortadan kaldırılır. Bu nedenle, genel bir elektrokimyasal-termal simülasyonun maaliyeti saf bir termal simülasyon maaliyetine düşürülerek batarya simülasyonlarda önemli miktarda hesaplama süresinden kazanç sağlanır.

Bu tez çalışmasında, çözüm metodu olarak coupled algoritması kullanılır. Coupled algoritması akış denklemlerini, ısı transferini, kimyasal reaksiyonlar veya çok fazlı akışlar gibi diğer fiziksel olayların denklemlerini çözmek için kullanılan çözüm algoritmasını ifade eder. Coupled çözüm algoritması farklı fiziksel olaylar için denklemlerin ayrı ayrı veya sıralı olarak değil de eş zamanlı bir şekilde çözer. Yani momentum ve basınca dayalı süreklilik denklemlerini birlikte çözer. Bu durum farklı fiziksel olaylar arasındaki etkileşimi daha iyi ifade eder. Bu da daha doğru sonuçlara yol açabilir ancak aynı zamanda daha fazla hesaplama kaynağı gerektirir. Bununla

birlikte, basınç ve diğer ayırıklaştırma şemaları ikinci dereceden ayırıklaştırma seçimi yapılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Batarya Modülü Sınır Şartları

Batarya modülünün analizleri MSMD yaklaşımının bir alt modeli olan Newman P2D modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu model ile ilgili yönetimsel denklemler Bölüm 3.1’de detaylandırılmıştır. Bu çalışmada 20 Ah nominal kapasiteye sahip batarya modeli 2C, 3C ve 4C olmak üzere üç farklı deşarj hızlarında çözülmüştür. Bataryanın katot ve anot malzemeleri ile min/maks kesme gerilimleri Tablo 3.9’da verilmiştir. Ayrıca Tablo 3.10’da Newman P2D model parametrelerine ait detaylar özetlenmektedir.

Tablo 3.9. Çalışmada kullanılan bataryanın özellikleri

Katot Malzemesi	LMO
Anot Malzemesi	Grafit
Nominal Kapasite	20 Ah
Min kesme gerilimi	3 V
Maks kesme gerilimi	4.2 V

Tablo 3.10. Newman P2D model parametreleri [181]

Parametre	Katot	Anot	Separatör
L (μm)	180	120	40
R (μm)	8	12.5	-
$c_{s,max}$ (mol/m^3)	22860	26390	-
c_s (mol/m^3)	3886.2	14870.76	-
c_e (mol/m^3)	2000	2000	2000
ε_e	0.444	0.357	1
ε_f	0.259	0.172	-
D_s (m^2/s)	1×10^{-13}	3.9×10^{-14}	-
σ (S/m)	3.8	100	-
Brugg (σ)	1.5	1.5	1.5
$k_{m,ref}$	3×10^{-11}	4.82×10^{-6}	-
Elektrolit			
D_e (m^2/s)		7.5×10^{-11}	
t^+		0.363	

Yukarıdaki tabloda yer alan simgeler aşağıdaki gösterimleri kullanır:

L : Elektrot kalınlığı	D_s : Katı elektrot parçacıklarında Li difüzyon katsayısı
R : Elektrot parçacığı yarıçapı	D_e : Elektrolitteki Li^+ difüzyon katsayısı
$c_{s,max}$: Katı fazdaki maksimum lityum konsantrasyonu	σ : Elektriksel iletkenlik
c_s : Elektrottaki ilk Li konsantrasyonu	Brugg [β]: Bruggeman Üssü
c_e : Elektrolitteki ilk Li^+ konsantrasyonu	$k_{m,ref}$: Referans elektrokimyasal reaksiyon hız sabiti
ε_e : Elektrolit malzemesinin hacim oranı	t^+ : Li^+ iyonun aktarım sayısı
ε_f : Elektrottaki dolgu malzemesinin hacim oranı	

Bataryanın pasif bölgeleri olarak tanımlanan baraların ve pozitif terminal malzemesi alüminyum ve negatif terminal malzemesi bakırdır. Bataryanın aktif bölgesinin termofiziksel özellikleri Bölüm 3.1’de bahsedilen denklem 3.4, 3.5, 3.6 ve 3.7’ye göre hesaplanmıştır. İlgili malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 3.11’de özetlenmiştir.

Tablo 3.11. Analizlerde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri [211]

Malzeme	Yoğunluk (kg.m ⁻³)	Özgül Isı Kapasitesi (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Isıl İletkenlik (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Elektrik İletkenliği (S/m)
Alüminyum	2710	902	237	3.54×10^7
Bakır	8930	386	398	5.8×10^7
Batarya	2105.853	1453.412	$k_{T,y} = k_{T,z} = 26.84$ $k_{T,x} = 0.968$	3.79×10^6

Batarya modülünün dış duvarları konvektif bir sınır koşuluna tabidir. Birim alan q_a (W.m⁻²) başına batarya modülünden ortama yayılan ısı Newton'un soğutma yasası kullanılarak aşağıdaki denklem 3.26 ile hesaplanır.

$$q_a = h_a(T_{bm} - T_a) \quad (3.26)$$

Burada T_{bm} ortalama sıcaklığı, T_a ortam sıcaklığını ve h_a ise ısı transfer katsayısını temsil eder. Bu çalışma için ısı transfer katsayısı 5 (W.m⁻².K⁻¹) olarak kabul edilmiş olup ortam sıcaklığı 30 °C'dir.

3.5.2. Faz Değiştiren Malzemeler ile BTYS Model Sınır Şartları

Faz değiştiren malzemeler ile FDM neredeyse izotermal durumda faz değişimi sebebiyle şarj/deşarj sürecinde üretilen ısıyı depolayarak bataryaların sıcaklığını kontrol etmemize olanak sağlayan pasif termal yönetim sistemi olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada FDM olarak RT-42 saf parafin malzemesi kullanılmış olup termofiziksel özellikleri Tablo 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.12. RT-42 saf parafin malzemesinin termofiziksel özellikleri [212]

Özellikler	RT-42
Yoğunluk (ρ) [kg/m ³]	760
Özgül Isı Kapasitesi (c_p) [J/kg.K]	2000
Isıl İletkenlik (k) [W/m.K]	0.2
Dinamik Viskozite (μ) [kg/m.s]	0.02351
Termal Genleşme Katsayısı (β) [K ⁻¹]	0.0033
Gizli Isı (H_L) [J/kg]	165000
Katılaşma Sıcaklığı (T_s) [°C]	38
Sıvılaşma Sıcaklığı (T_l) [°C]	42

Faz değiştiren malzemeler ile ilgili yönetimsel denklemler bölüm 3.1’de detaylandırılmıştır. Bu çalışmada, mushy bölge sabiti 100000 olarak alınmış olup kaldırma kuvveti etkisini ve yoğunluğun sıcaklık ile değişimini modellemek için Boussinesq yaklaşımı uygulanmıştır. Faz değiştiren malzemenin dış duvarlarına konvektif sınır koşulu uygulanmış olup ısı transfer katsayısı 5 (W.m⁻².K⁻¹) olarak kabul edilmiştir. Ayrıca ortam sıcaklığı 30 °C’dir.

3.5.3. Sıvı ile ve Hibrit BTYS Model Sınır Şartları

Sıvı ile BTYS Sınır Şartları

Deşarj sürecinde batarya modülünde üretilen ısı bir batarya hücresinin her iki yanına da temas edecek şekilde yerleştirilen serpantin kanallı alüminyum soğutma plakalarına iletim ile ısı transferi mekanizması sayesinde iletilir. Soğutma kanallarından geçen soğutma sıvısı iletilen bu ısıyı konveksiyon yolu ile uzaklaştırarak batarya modülünün soğutulmasını sağlar.

Bu çalışmada su ve farklı partikül şekline ve hacim oranlarına sahip Al₂O₃ nanoakışkan sıvı ve hibrit BTYS modellerinde soğutma ortamı olarak kullanılmıştır. Akışkanlar ile ilgili yönetimsel denklemler ve çalışmada kullanılan nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin hesaplanması için gerekli korelasyonlar Bölüm 3.1’de detaylandırılmıştır. Tablo 3.13’de temel akışkan ve nanopartikülün termofiziksel özellikleri gösterilmektedir. Nano partiküllerin şekil etkisi literatürde verilen

korelasyonlar kullanılarak analizlere dahil edilmiştir. Ayrıca su ve nanoakışkanın batarya modülü üzerindeki soğutma performanslarının karşılaştırılabilmesi için denklem 3.27’de görüldüğü üzere Reynolds sayısı eşitliği sağlanmıştır.

$$Re = \frac{\rho_w \cdot u_w \cdot D_h}{\mu_w} = \frac{\rho_{nf} \cdot u_{nf} \cdot D_h}{\mu_{nf}} \quad (3.27)$$

Burada ρ , u ve μ sırası ile soğutucu akışkanın yoğunluğunu, hızını ve dinamik viskozitesini, w ve nf alt indisleri ise su ve nanoakışkanı ifade eder. D_h hidrolik yarıçaptır.

Soğutma sıvısını kanallardan dolaştırmak için gerekli olan pompa gücü (P_{pompa}) Watt (W) cinsinden aşağıdaki denklem 3.28 ile ifade edilir [214].

$$P_{pompa} = \Delta P \times \dot{V}_f \quad (3.28)$$

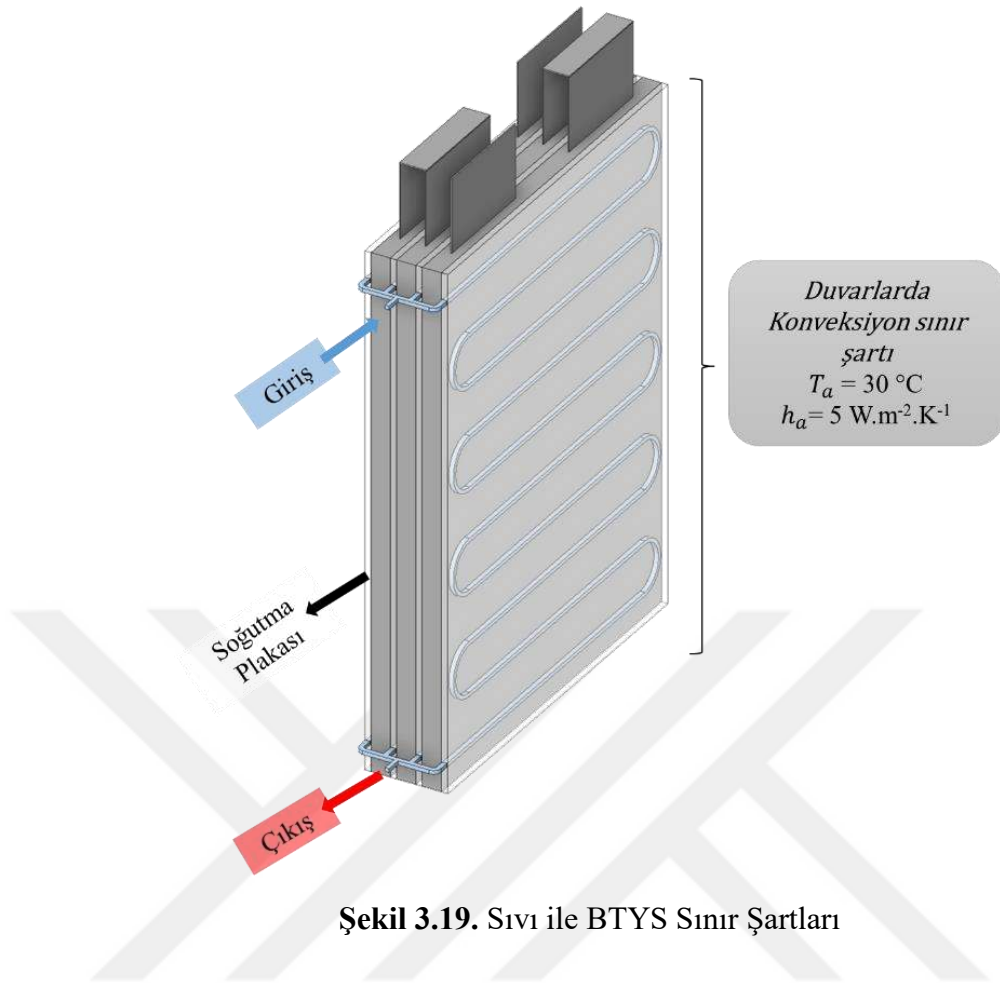
$$\dot{V}_f = \dot{m}_f / \rho_f \quad (3.29)$$

Burada, ΔP basınç düşüşünü, $\dot{V}_f$ akışkanın hacimsel debisini $\dot{m}_f$ ve ρ_f sırası ile akışkanın kütledebisini ve yoğunluğunu ifade eder.

Tablo 3.13. Temel akışkanın ve alümina nanopartikülün termofiziksel özellikleri [213]

Termofiziksel Özellikler	P (kg.m ⁻³)	C _p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	μ (Pa.s)
Alümina (Al ₂ O ₃)	3970	765	40	N/A
Su	996	4178	0.615	7.98x10 ⁻⁴

Şekil 3.13'da görüldüğü üzere giriş sınır koşuluna velocity inlet uygulanmış ve hız tanımlaması yapılmış olup, çıkış sınır koşuluna ise pressure outlet uygulanmış ve atmosfere açıldığından gösterge basıncı 0 olarak tanımlanmıştır. Batarya modülünün ve akışkanın giriş sıcaklıkları aynı olarak alınmış olur 30 °C 'dir. Modelin duvarlarına ise konveksiyon sınır şartı uygulanmış olup ısı taşınım katsayısı 5 (W.m⁻².K⁻¹) ve ortam sıcaklığı 30 °C olarak ele alınmıştır.



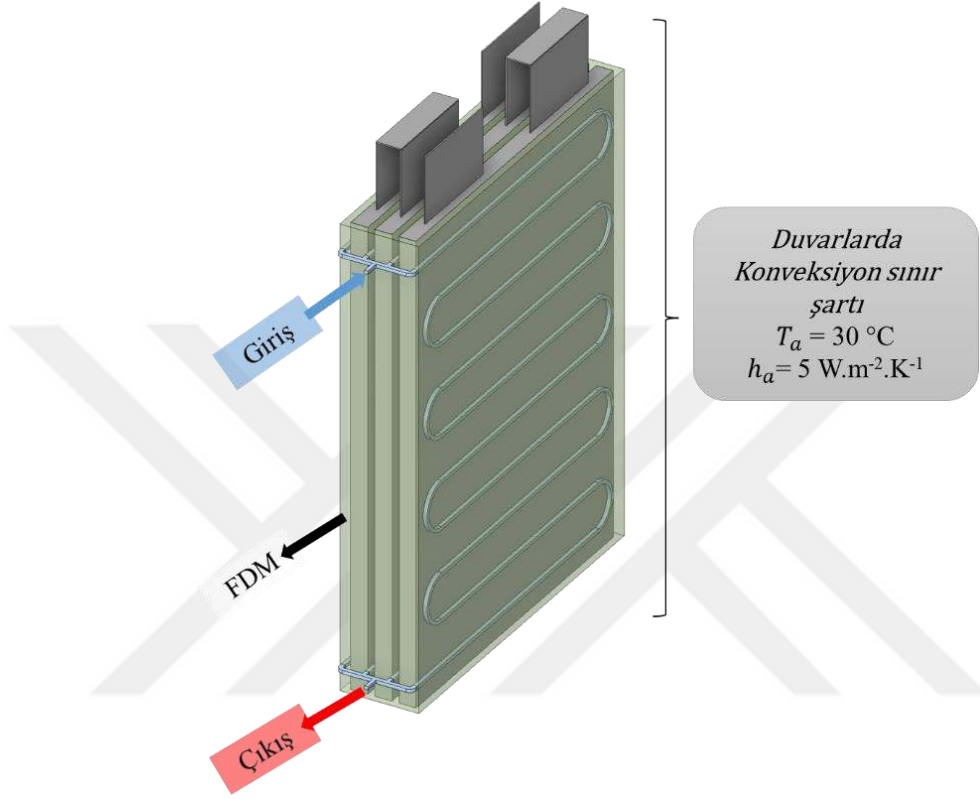
Şekil 3.19. Sıvı ile BTYS Sınır Şartları

Hibrit BTYS sınır şartları

Bu uygulamada, batarya modülündeki sıcaklık ve sıcaklık dağılımını iyileştirmek için FDM ve Alüminyum serpantin kanalların beraber kullanıldığı hibrit BTYS kullanılmıştır. FDM tarafından bataryadan alınan ısı kanallardan geçen akışkan vasıtasıyla ortamdan uzaklaştırılır.

Soğutma ortamı olarak platelet şekle sahip Al_2O_3 nanoakışkanı kullanılmış olup giriş sınır koşulu velocity inlet ve çıkış sınır koşulu pressure outlet olarak tanımlanmıştır. Soğutma ortamının giriş sıcaklığı ile batarya ve FDM'nin ilk sıcaklıkları aynı olarak alınmış ve değeri 30 °C'dir. Duvarlarda konvektif sınır koşulu uygulanmış olup ısı transfer katsayısı 5 ($W.m^{-2}.K^{-1}$)'tir. Ayrıca serpantin akış hacmi duvarlarına bir katman olacak şekilde shell conduction uygulanmış olup kalınlığı 0.00025 m'dir. Shell conduction bir ön işlemcide duvar kalınlığına çözüm ağı oluşturmaya gerek olmadan bir veya daha fazla duvar hücre katmanını modellemeye

olanak sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde iletim ile ısı transferinin duvarın normali ve teğeti yönünde çözülür ve çözüm ağı sayısını düşürerek hesaplama süresinden kazanç sağlar. Bununla birlikte, kanalların i yüzeylerine kaymamazlık sınır koşu tanımlanmış olup akış sıkıştırılmaz laminerdir. şekil 3.20 'de hibrit BTYS'nin sınır şartları gösterilmektedir.



şekil 3.20. Hibrit BTYS Sınır şartları

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

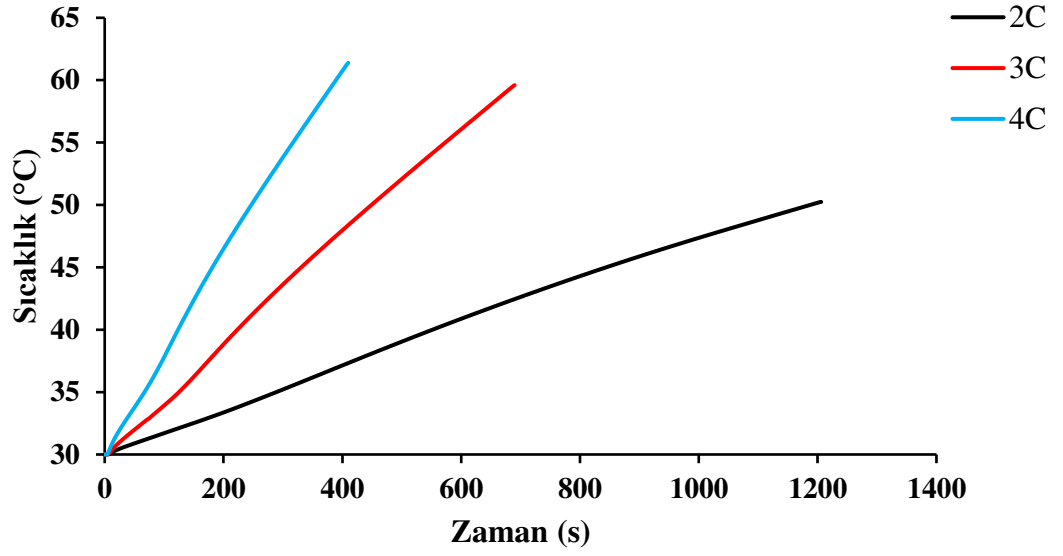
Bu araştırma kapsamında, başlangıçta seri olarak bağlanmış üç batarya hücresinden oluşan bir batarya modülünün deşarj sürecindeki maksimum sıcaklığı, Ansys Fluent adlı hesaplamalı akışkanlar yazılımı kullanılarak analiz edildi. Daha sonra farklı soğutma stratejileri (FDM, sıvı ve hibrit) arasında karşılaştırmalar yapılarak, batarya modülünün güvenli ve sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için gereken optimal çalışma sıcaklık aralığına odaklanıldı. Aynı zamanda homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmek amaçlandı. Bu amaç doğrultusunda çeşitli analizler farklı parametrelerle gerçekleştirildi ve bu bölümde elde edilen bulgular ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

4.1. Batarya Modülünün Termal Performansının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, soğutma stratejisi kullanılmayan 3s1p (üç seri bir paralel) konfigürasyonuna sahip batarya modülünün 2C, 3C ve 4C olmak üzere farklı deşarj hızları altındaki termal davranışı incelenmiştir.

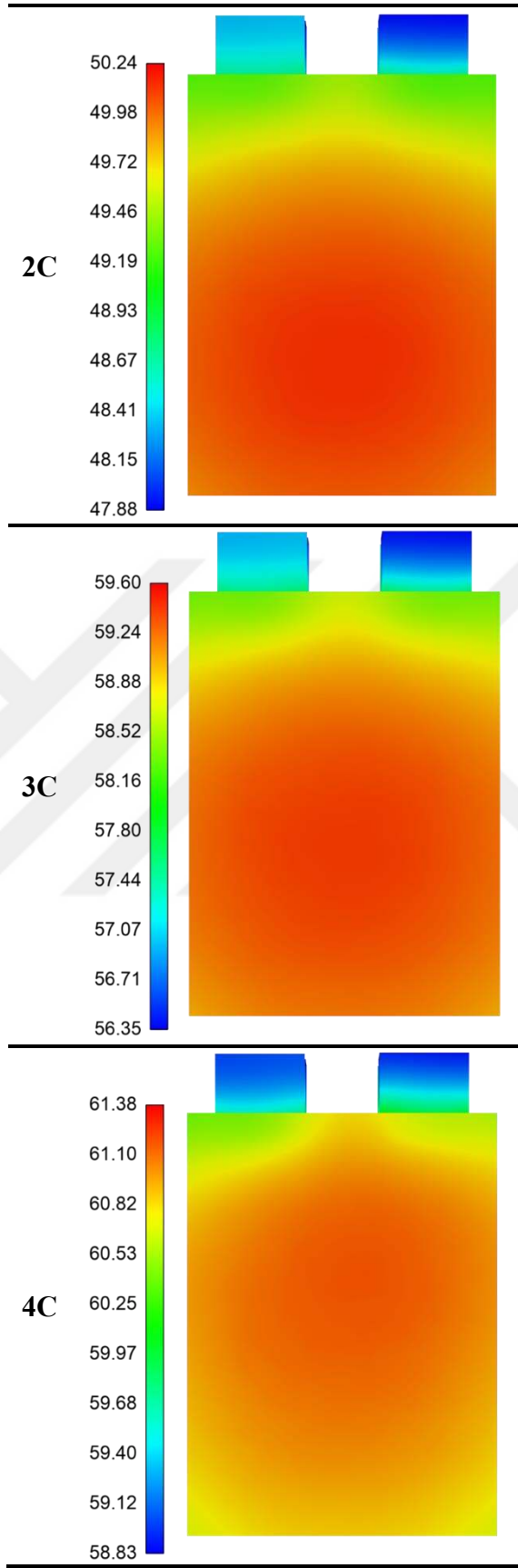
4.1.1. Deşarj Hızının Batarya Modülünün Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.1’de farklı deşarj hızları altında batarya modülünde oluşan sıcaklığın zaman ile değişimi gösterilmektedir. C oranı bir bataryanın kapasitesine göre deşarj hızının bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Yani C oranı ne kadar yüksek olursa o kadar fazla akım çekilir ve dolayısıyla da batarya hücresi daha kısa zamanda deşarj olur. Bununla birlikte yüksek deşarj hızlarında batarya hücresinden daha fazla akım çekileceğinden dolayı kayıplarda (polarizasyon ve IR) o kadar fazla olur. Bu sebeple, deşarj hızı arttıkça batarya modülündeki maksimum sıcaklığında arttığı görülmektedir.



Şekil 4.1. Farklı deşarj hızlarında bataryanın sıcaklığının zaman ile değişimi

Bataryaların çalışma performansını etkileyen bir başka önemli parametre ise batarya hücresindeki düzgün olmayan sıcaklık dağılımıdır. Bu durum bataryada elektrik dengesizliklerine, performans kaybına, güç azalmasına ve ömrünün kısılmasına neden olur. Batarya modülü üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Batarya hücresindeki en yüksek sıcaklığın aktif bölgenin orta noktalarında olduğu görülmektedir. C oranının artması ile beraber batarya hücresindeki sıcaklık dağılımının düzensizliğinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.2. Farklı deşarj hızlarında batarya modülünün sıcaklık dağılımı

Tablo 4.1’de farklı deşarj hızlarında batarya modülünde oluşan en yüksek sıcaklık değeri ve batarya yüzeyindeki sıcaklık farkı değerleri verilmiştir. Artan deşarj hızı ile beraber batarya hücresindeki sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.1. Batarya modülündeki en yüksek sıcaklık ve sıcaklık farkı

C- Oranı	Maksimum Sıcaklık (°C)	Sıcaklık Farkı (ΔT)
2C	50.242	2.358
3C	59.594	3.240
4C	61.384	2.553

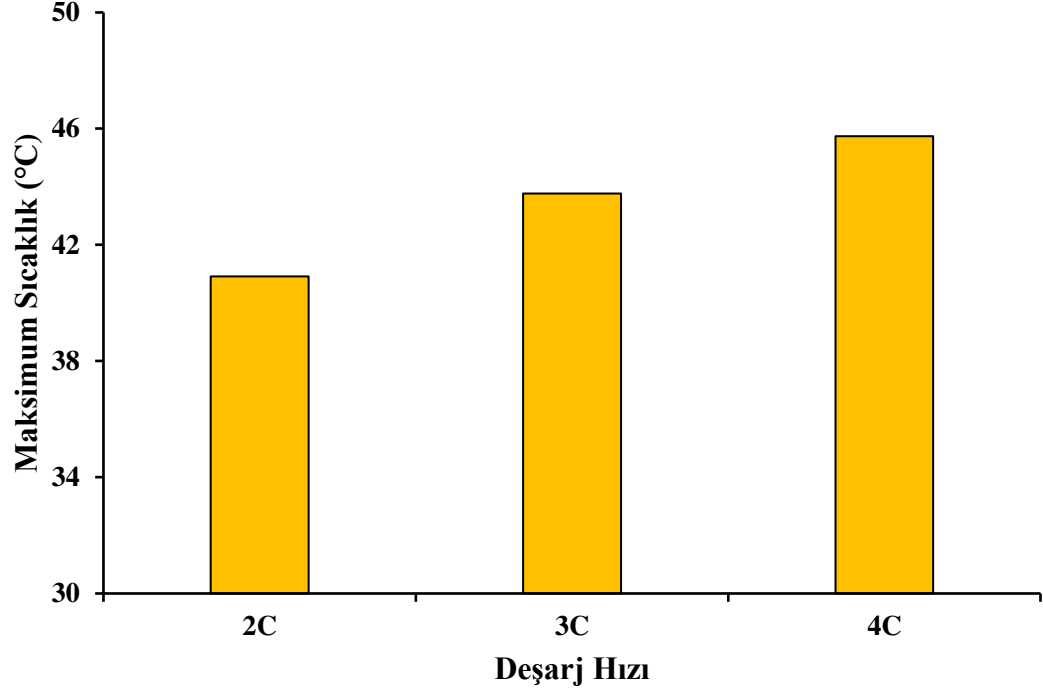
Bataryaların optimum çalışma sıcaklık aralığının (20-50 °C) dışında uzun süreler boyunca çalışması ve hücrelerdeki düzensiz sıcaklık dağılımları nedeniyle verimli ve güvenli bir şekilde çalışamazlar. Bu sebeple uygun bir batarya termal yönetim sisteminin kullanılması gerekmektedir.

4.2. FDM ile BTYS’nin Termal Performansının Değerlendirilmesi

4.2.1. Deşarj Hızının FDM ile BTYS’nin Soğutma Performansına Etkisi

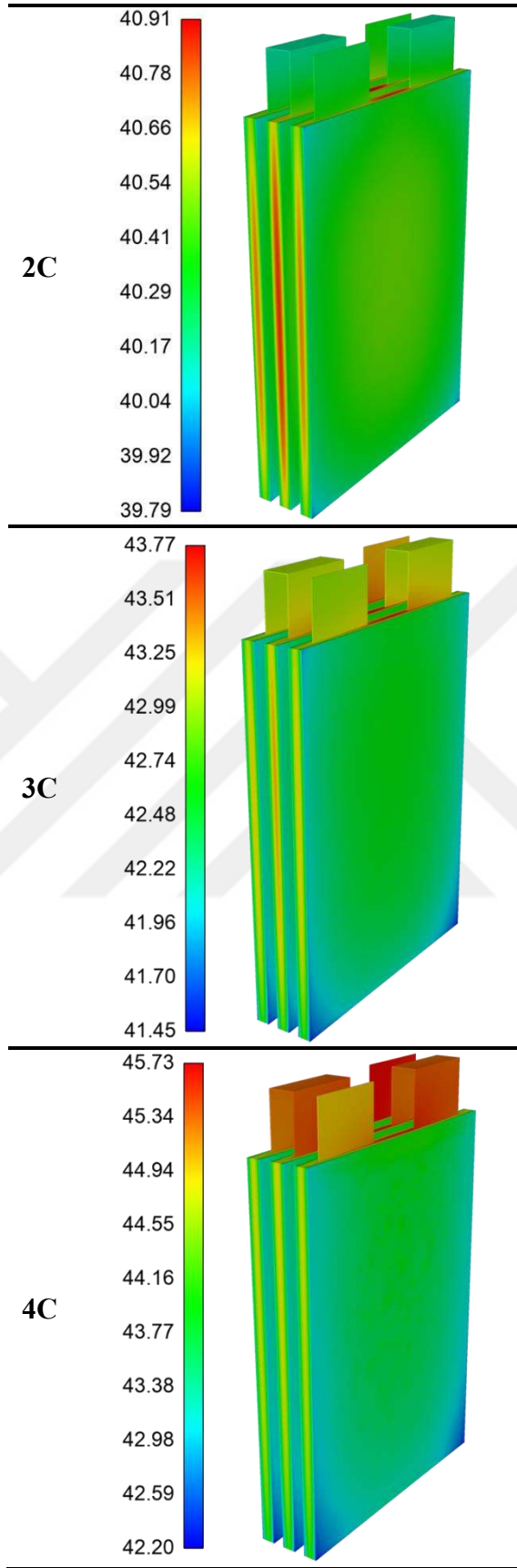
3s1p konfigürasyonuna sahip batarya modülünün 2C, 3C ve 4C olmak üzere farklı C oranlarındaki deşarj süreçleri sırasında uygun çalışma sıcaklık aralığında tutulabilmesi amacı ile faz değiştiren malzeme kullanılarak batarya termal yönetim sistemi tasarlanmış olup faz değiştiren malzeme olarak RT-42 parafin kullanılan sistemin soğutma performansı araştırılmıştır. Araştırma bulguları bu bölümde detaylandırılmıştır.

2C, 3C ve 4C deşarj hızlarında FDM ile BTYS’inin batarya modülünde ki maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Deşarj hızı arttıkça batarya modülünün sıcaklığının arttığı görülmektedir. Soğutma stratejisi olarak FDM ile BTYS’nin kullanıldığı durumda 2C, 3C ve 4C olmak üzere üç farklı deşarj hızında batarya modülündeki en yüksek sıcaklığın 50 °C’nin altında olduğu belirlenmiş olup sıcaklık değerleri sırası ile 40.91 °C, 43.776 °C ve 45.736 °C’dir.



Şekil 4.3. FDM ile BTYS kullanılan batarya modülünün maksimum sıcaklığı üzerinde farklı deşarj hızlarının etkisi

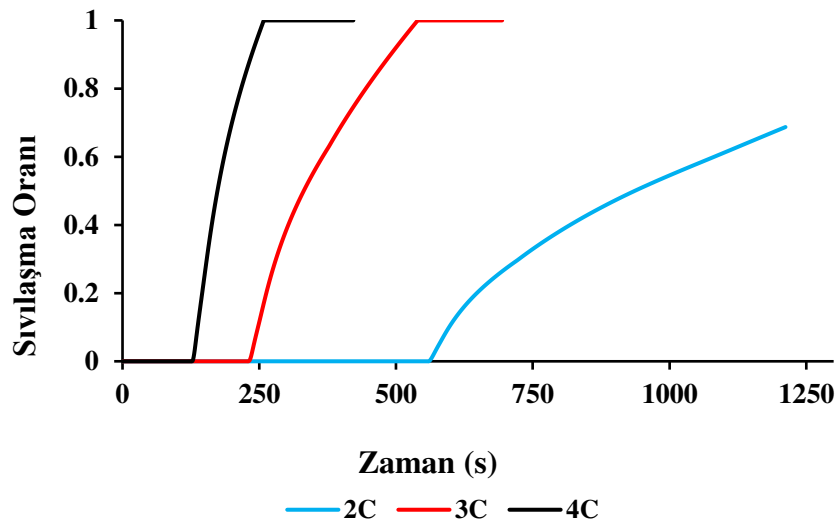
Şekil 4.4’de FDM ile BTYS’nin batarya modülü üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi gösterilmektedir. FDM ile BTYS kullanılarak batarya hücreleri üzerinde daha düzgün bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.



Şekil 4.4. FDM ile BTYS'nin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi

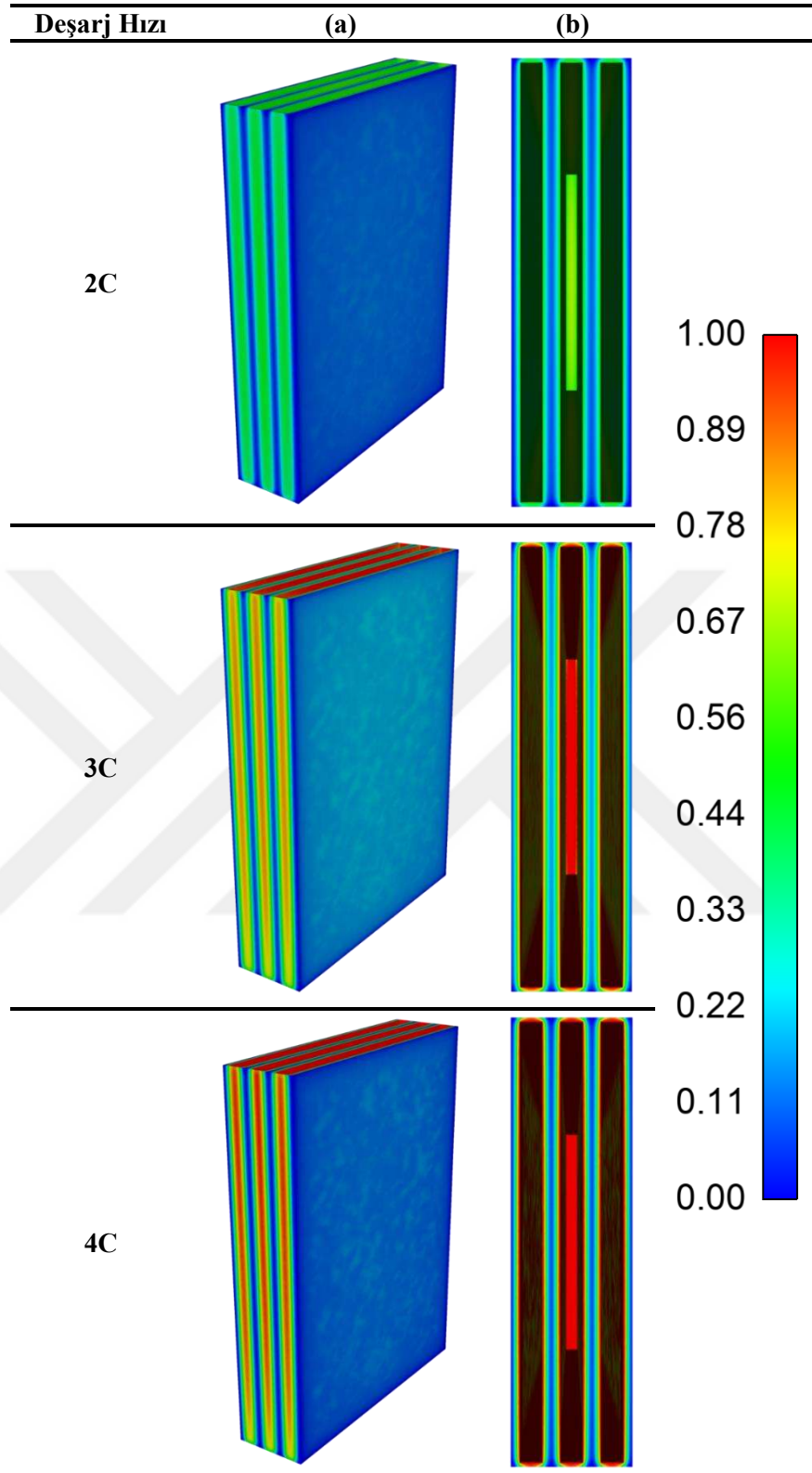
4.2.2. Deşarj Hızının FDM'nin Sıvılaşma Oranına Etkisi

FDM ile BTYS kullanılarak yapılan soğutma işleminde 2C, 3C ve 4C olmak üzere üç farklı C oranında bataryanın deşarj süreci boyunca üretilen ısı, RT-42 parafin faz değıştiren malzemesi tarafından emilir. Bu işlem sırasında batarya modülünün sıcaklığı azalırken FDM'nin sıcaklığı artar. RT-42 parafin malzemesi zamanla erime sıcaklığına ulaşarak sıvı faza geçiş yapar. FDM'nin sıvılaşma oranının farklı C oranlarında zaman ile değışimi Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Deşarj hızının zamanla FDM'nin sıvılaşma oranına etkisi

Deşarj hızının 2C olduğu durumda FDM'nin sıvılaşma oranı 1212 s sonunda sadece %69 olduğu gözlenmiştir. Bu durum, RT-42 parafin faz değıştiren malzemesinin kapasitesinin belli bir kısmının soğutma işlemine dahil olmadığı anlamına gelir. Bununla birlikte 3C ve 4C deşarj hızlarında ise faz değıştiren malzeme içerisindeki en yüksek sıvılaşma oranının sırasıyla 540 s sonunda %100 ve 260 s sonunda %100'e ulaştığı gözlemlenmiştir. Deşarj hızının FDM'nin sıvılaşma miktarının dağılımı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Burada 3C ve 4C deşarj hızlarında bataryanın FDM ile temas ettiği yüzeylerde sıvılaşma oranının %100 olduğu gözlemlenmektedir. Deşarj hızının artması ile beraber FDM'nin sıvılaşma oranını ve katı içerisinde ki sıvı faz dağılımını artırdığı gözlenmektedir. FDM destekli BTYS'lerde deşarj işlemi sonunda FDM'nin tamamının değil çoğunun eritildiği durumu sağlamak en uygun koşuldur.



Şekil 4.6. Deşarj hızının FDM'nin sıvılaşma oranına etkisi (a) izometrik görünüm (b) üst görünüm

4.3. Sıvı ile BTYS'nin Termal Performansının Değerlendirilmesi

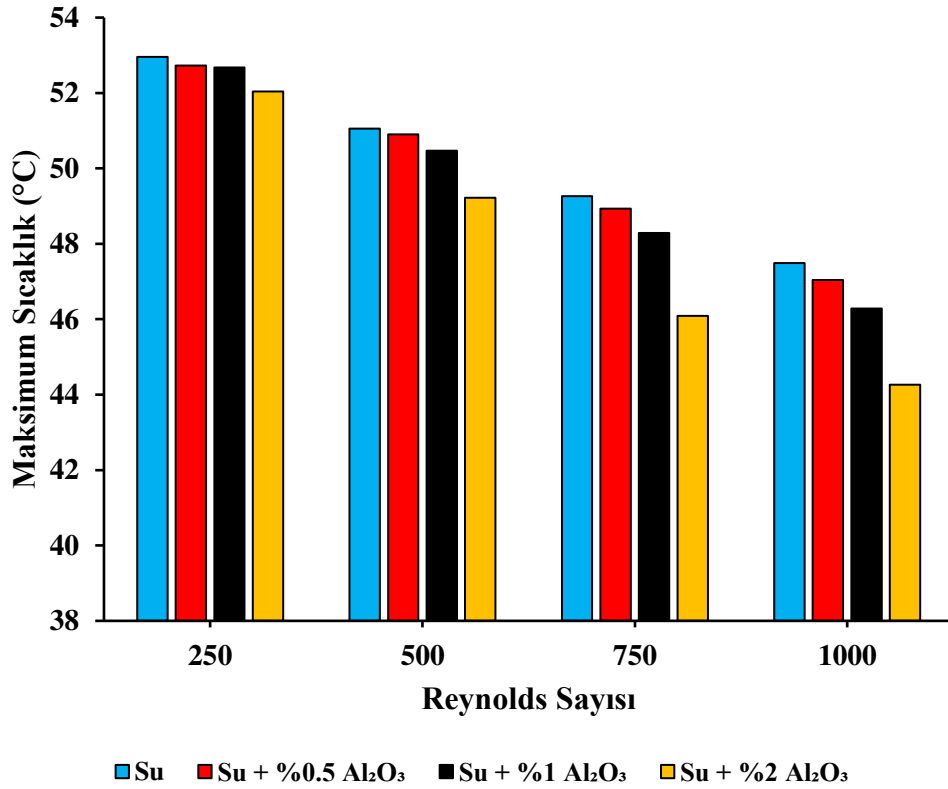
Bataryaların güvenli ve sağlıklı bir şekilde performans gösterebilmeleri için uygun sıcaklık aralığında çalışmaları gerekmektedir. Bu doğrultuda 3s1p konfigürasyona sahip 20 Ah kapasiteli LMO batarya modülünün soğutulması için serpantin kanallara sahip alüminyum soğutma plakalarından oluşan sıvı destekli termal yönetim stratejisi kullanılmıştır. Deşarj süreci boyunca batarya hücrelerinde oluşan sıcaklık soğutma plakalarına iletim yolu ile aktarılır ve buradan da serpantin kanal içerisinde geçen akışkan sebebiyle sistemden uzaklaştırılır.

Sıvı destekli BTYS modelinde, su ve alümina (Al_2O_3) nanoakışkan olmak üzere iki farklı soğutma ortamı kullanılmış olup sabit 3C deşarj hızında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada dört farklı Reynolds sayısında (250, 500, 750 ve 1000), temel akışkan içerisinde hacimce üç farklı nanopartikül oranında (%0.5, %1 ve %2) ve basık küremsi, blok, silindir ve platelet olmak üzere dört farklı nanopartikül şekillerinde bu soğutma ortamlarının termal performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiş olup analiz sonuçları bu bölümde detaylandırılmıştır.

4.3.1. Reynolds Sayısı ve Nanoakışkan Katı Partikül Oranının Sıvı destekli BTYS'nin Soğutma Performansına Etkisi

Batarya modülündeki maksimum sıcaklığın artan Re sayısı ve hacim oranı ile değişimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Re sayısı artması ısı transferini iyileştirirken batarya hücrelerinden emilen ısıyı artırır. Bu sayede de Re sayısının artması sıvı destekli BTYS'nin soğutma performansını arttıran bir etmen olduğu gözlemlenir. Bununla beraber nanoakışkan içerisinde bulunan nanopartiküllerin hacimce oranı soğutma ortamının termal performansını artırarak sistemin etkinliğini arttırdığı görülmektedir. Soğutma ortamının batarya modülündeki en yüksek sıcaklığa etkisi Tablo 4.2'de gösterilmektedir. Soğutma ortamına bakıldığında nanoakışkanın kullanıldığı sıvı destekli BTYS'nin termal etkinliğinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Reynolds sayısının 250 ve 500 olduğu durumda sıvı destekli BTYS'nin batarya takımının sıcaklığının 50 °C'nin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık değerinin ideal çalışma sıcaklık aralığının (20 °C-50 °C) dışındadır. Bu aralığın dışında yüksek sıcaklıklarda uzun süre çalışması durumunda batarya

hücrelerinde termal kaçakların oluşması ve ömürlerinin kısılması kaçınılmazdır. Ancak Re sayısının 750 ve 1000 olduğu durumda ve artan hacim oranında en yüksek sıcaklık değerinin 50 °C'nin altına düştüğü gözlemlenmiştir.



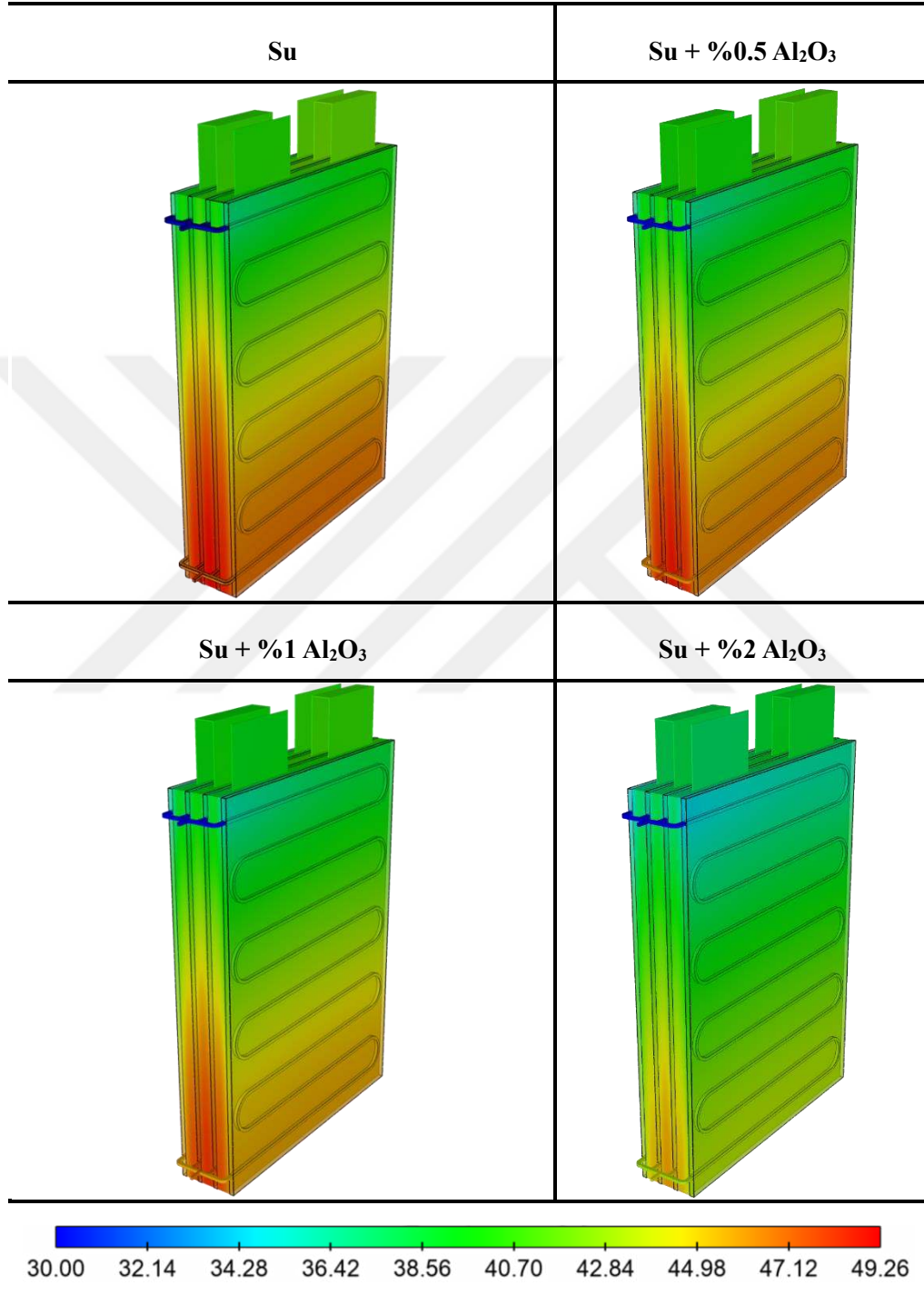
Şekil 4.7. Maksimum sıcaklığın Re sayısı ve hacim oranı ile değişimi

Tablo 4.2. Soğutma ortamının batarya modülündeki en yüksek sıcaklığa etkisi

Reynolds Sayısı	Su	Al ₂ O ₃ Nanoakışkan		
	Maksimum Sıcaklık (°C)	Maksimum Sıcaklık (°C)		
		φ: %0.5	φ: %1	φ: %2
250	52.96	52.73	52.68	52.04
500	51.06	50.90	50.47	49.22
750	49.26	48.94	48.29	46.09
1000	47.49	47.04	46.28	44.27

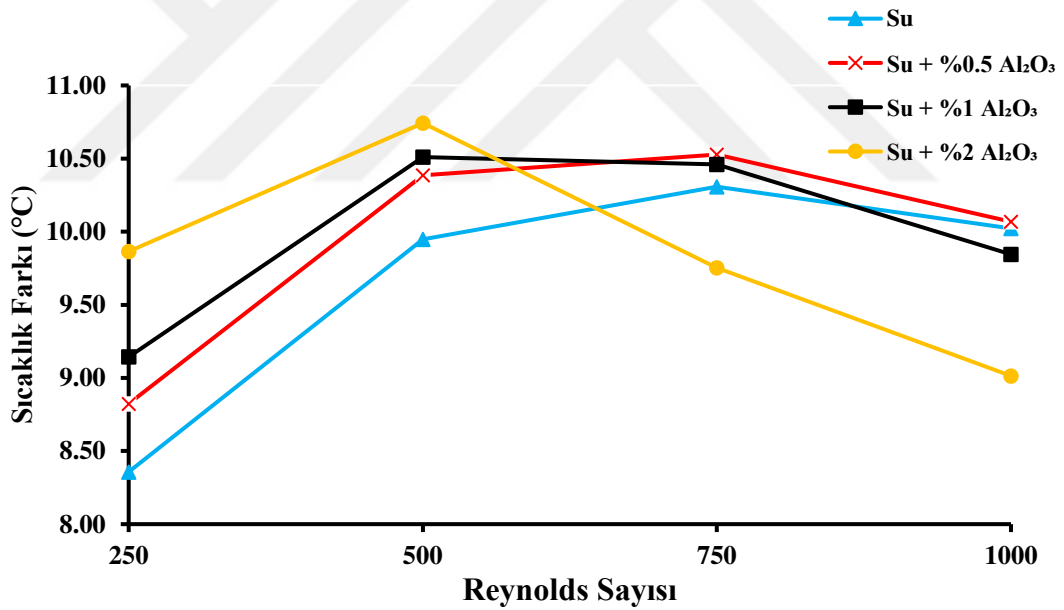
3C deşarj hızında ve 750 Reynolds sayısında soğutma ortamının batarya paketinin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun içerisine nano katı partiküllerin eklenmesi sıcaklık

dağılımını ve en yüksek sıcaklığı iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca temel akışkan içerisine eklenen nano boyuttaki katı partiküllerin hacimce oranlarının artırılması ısı transferini iyileştirerek daha iyi bir soğutma sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8. Soğutma ortamının batarya paketi sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi

Bataryaların termal performanslarının değerlendirilmesinde maksimum sıcaklığın yanında hücre yüzeylerindeki sıcaklık farkının da dikkate alınması gerekir. İdeal durumda bu sıcaklık farkının 5 °C'den küçük olması arzu edilir. Serpantin kanal içerisinden geçen su ve alümina nanoakışkanın ortadaki batarya hücresinin ön ve arka yüzeylerindeki sıcaklık farkı Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Burada, soğutma ortamının su ve hacimce %0.5 katı partikül içeren alümina nanoakışkan olduğu durumda 750 Re sayısına kadar sıcaklık farkının arttığı ve sonrasında düştüğü görülmektedir. Ancak hacim oranının %1 ve %2 olduğu alümina nanoakışkanında ise sıcaklık farkının 500 Re sayısından sonra azaldığı gözlemlenir. 1000 Re sayısında ve soğutucu akışkanın su, %0.5, %1 ve %2 alümina nanoakışkan olduğu durumda sıcaklık farkları sırası ile 10.02 °C, 10.07 °C, 9.84 °C ve 9.01 °C'dir. Tasarlanan serpantin kanallı sıvı destekli BTYS'nin batarya paketinde ki maksimum sıcaklığı ideal çalışma sıcaklığı olan 50 °C'nin altında tuttuğu ancak sıcaklık farkını ideal durum olan 5 °C'nin altına düşürmediği aksine oldukça üstünde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Re sayısı ve hacim oranının sıcaklık farkı üzerindeki etkisi

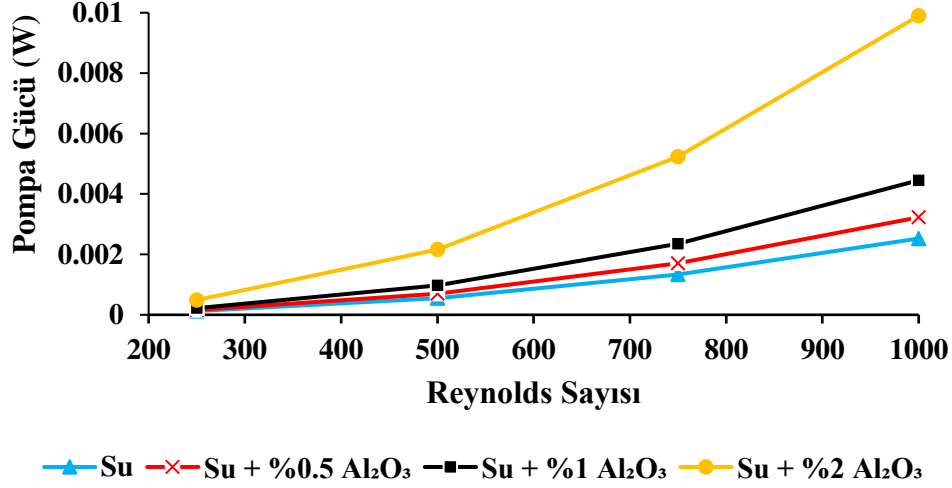
Basınç düşüşü, akışkanların hareketi için enerji tüketimini belirlediği için bu tarz termal yönetim sistemlerinde en önemli hidrodinamik parametrelerden biridir. Tablo 4.3'de Reynolds sayısı ve hacim oranına göre basınç düşüşünün değerleri gösterilmiştir. Burada, Re sayısının artmasıyla basınç düşüşünün arttığı görülmektedir. Benzer bir etki de hacim oranının arttığında gerçekleşir. Basınç düşüşünün artması

akışkanın kanal içerisinde dolaştırmak için gerekli olan pompalama gücünü doğrudan etkileyen bir faktördür.

Tablo 4.3. Re sayısı ve hacim oranının basınç düşüşü üzerindeki etkisi

Reynolds Sayısı	Su	Al ₂ O ₃ Nanoakışkan		
	Basınç Düşüşü (Pa)	Basınç Düşüşü (Pa)		
		φ: %0.5	φ: %1	φ: %2
250	415.37	492.06	615.29	1060
500	911.72	1088.88	1356.30	2330.31
750	1478.96	1757.54	2192.26	3770.38
1000	2101.68	2499.32	3113.16	5348.96

Pompa gücü, soğutma sistemi için harcanması gereken enerjiyi ifade ettiğinden dolayı sistemin maliyeti açısından oldukça önemli olan bir başka parametredir. Bu sebeple, Reynolds sayısının ve temel akışkan içerisinde ki katı partiküllerin hacimce oranının pompa gücüne etkisi Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Reynolds sayısının artması akışkanın kanallarda dolaşması için gerekli olan pompa gücünü arttırmaktadır. Daha yüksek Re sayılarında ise bu etki daha belirgindir. Bununla birlikte, gerekli pompa gücünü arttıran bir diğer faktör ise nanoakışkanın içerisinde bulunan katı partikül oranıdır. Artan katı partikül oranının pompalama gücünü arttırdığı gözlemlenmiştir. Dolayısı ile yüksek Re sayıları ve yüksek hacim oranlarındaki nanoakışkanın kanallar içerisinde dolaştırmak için gerekli enerji tüketimi soğutma ortamının su olduğu durumda ki enerji tüketiminden daha fazladır.



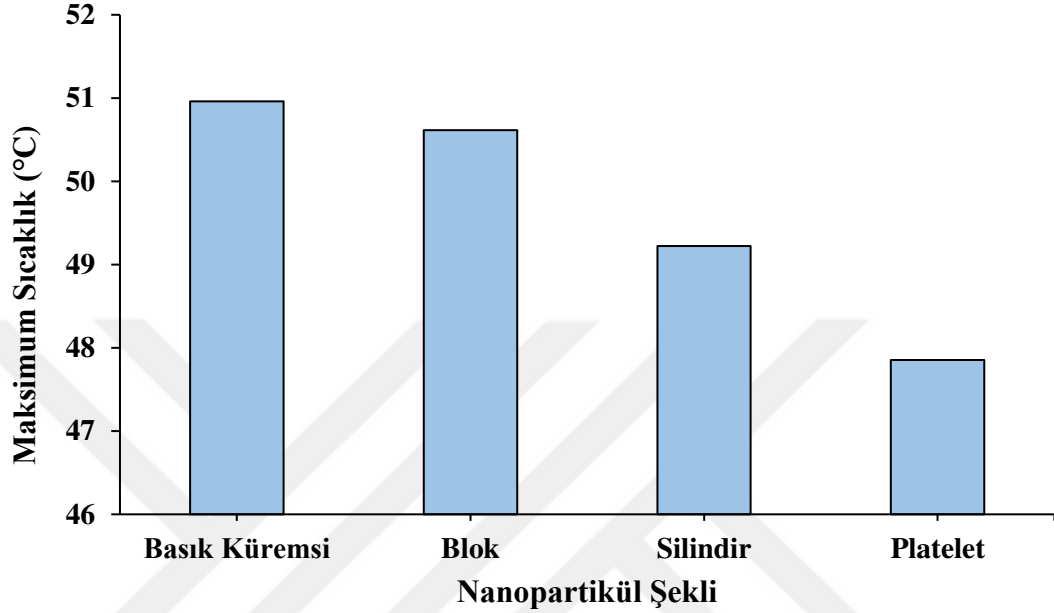
Şekil 4.10. Re sayısı ve hacim oranının pompa gücü üzerindeki etkisi

4.3.2. Nanopartikül Şeklinin Sıvı ile BTYS Modelinin Termal Performansına Etkisi

Alümina (Al_2O_3) nanoakışkanının nano partikül şeklinin batarya modülü üzerindeki termal verimliliğe katkısı bu bölümde incelenmektedir. Bu çalışmada, basık küresel, blok, silindir ve platelet olmak üzere dört farklı alternatif nano parçacık geometrisinin termofiziksel özellikleri bölüm 3'te açıklanan formülasyonlara göre hesaplanmıştır. Simülasyonlar 3C sabit deşarj hızında, 500 Re sayısında ve temel akışkan içerisinde ki partikül oranının hacimce %2 olduğu durumda gerçekleştirilmiştir.

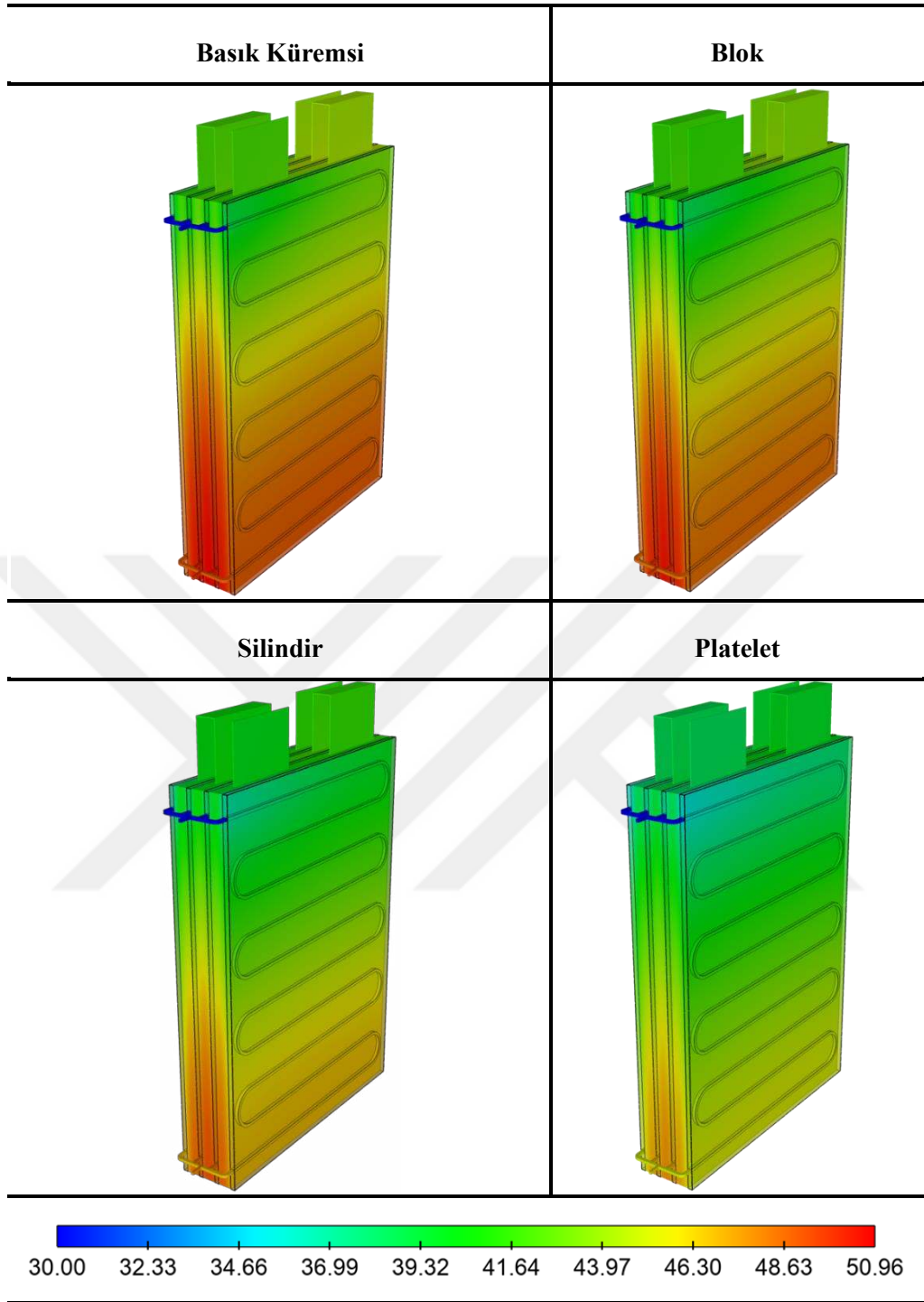
Şekil 4.11'de katı partikül geometrisinin batarya modülü üzerindeki maksimum sıcaklığa etkisi gösterilmektedir. Sabit Reynolds sayısında nanoakışkanların hızı çoğunlukla viskoziteleri ile belirlenir. Temel akışkan içerisinde nano boyuttaki parçacık hareketinin (Brown hareketi, dönme) fiziksel kısıtlamaları nedeniyle, sabit hacim oranında platelet ve silindir gibi silindirik bir geometriye sahip parçacıklar, yarı küresel nano boyuttaki parçacıklara göre daha yüksek viskoziteye sahiptir. Sonuç olarak, platelet ve silindir nano partiküller blok ve basık küresel nano partiküllere kıyasla daha yüksek hızlara neden olan yüksek viskoziteye sahiptir. Bununla birlikte, nano boyuttaki katı partikül geometrisinin ısı transfer hızı da bu durumdan etkilenir. Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı, batarya modülü üzerindeki en etkili soğutma partikül geometrisinin platelet olduğu durum için gözlemlenmiş olup

batarya modülündeki maksimum sıcaklık değeri 47.85 °C'dir. Platelet partikül geometrisinden sonra ısı transferine etki eden geometriler sırası ile silindir, blok ve basık küremsi geometriye sahip partiküller olduğu gözlemlenmiş olup maksimum sıcaklık değerleri sırası ile 49.22 °C, 50.61 °C ve 50.96 °C'dir.



Şekil 4.11. Re 500 ve %2 hacim oranında nanopartikül geometrisinin maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi

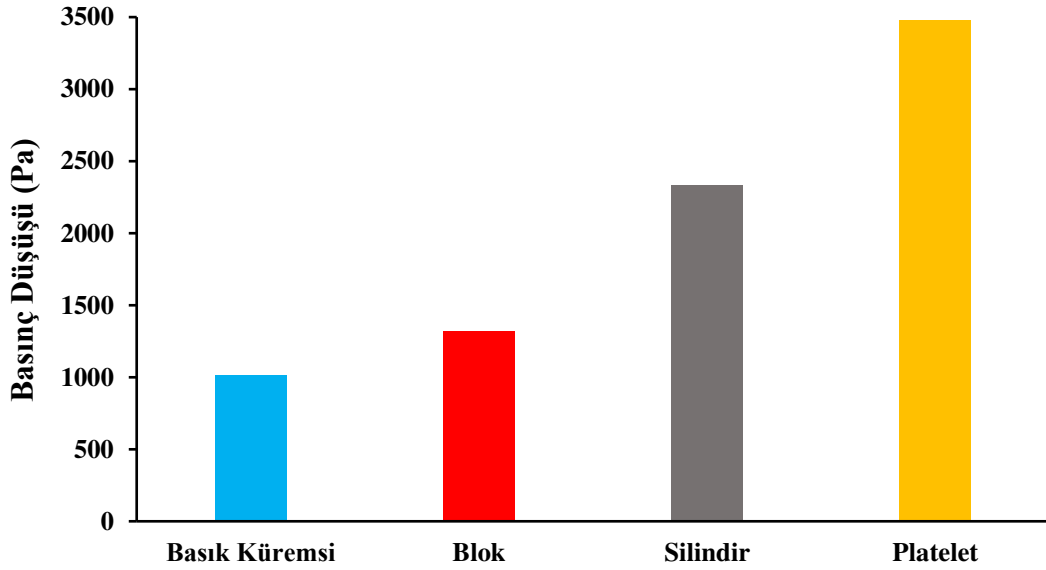
Şekil 4.12'de %2 hacim oranına sahip alümina nanoakışkanın 500 Re sayısında sırasıyla, basık küremsi, blok, silindir ve platelet geometriye sahip katı partiküllerin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Homojen sıcaklık dağılımına sahip bir batarya hücresinin, veriminin ve ömrünün artmasının yanı sıra termal kaçak olasılığını da azaltır. Platelet geometriye sahip nanoakışkanın diğer partikül geometrilerine kıyasla batarya paketi üzerindeki sıcaklık geçişi daha yavaş ve daha düzgün olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12. Re 500 ve %2 hacim oranında nanopartikül geometrisinin batarya paketi üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi

Şekil 4.13’de partikül şeklinin basınç düşüşüne etkisi gösterilmiştir. Burada platelet geometrisine sahip nanoakışkanın basınç kaybının diğer geometrilere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiş olup bunu sırası ile silindir, blok ve basık küremsi

geometrileri izlemektedir. Bunun nedeni, artan viskozite daha şiddetli akış direncine neden olacağı için basınç kaybını artırır.



Nanopartikül Geometrisi

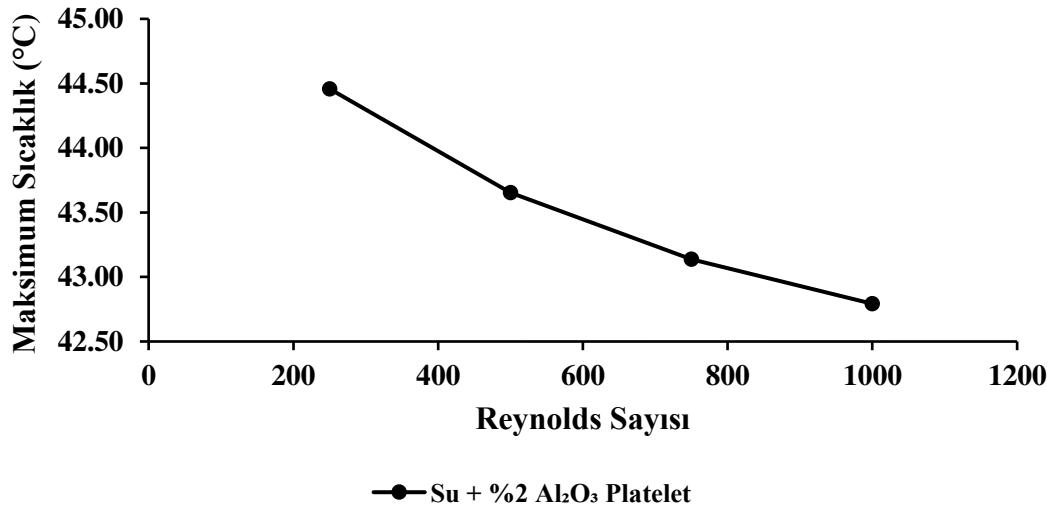
Şekil 4.13. Re 500 ve %2 hacim oranında nanopartikül geometrisinin basınç düşüşü üzerindeki etkisi

4.4. Hibrit BTYS'nin Termal Performansının Değerlendirilmesi

Batarya modülünün ideal çalışma sıcaklığı olan 50 °C'nin altında tutulması ve sıcaklık farkının 5 °C'den fazla olmaması için sıvı ve FDM destekli BTMS'nin birlikte kullanıldığı hibrit batarya termal yönetim sistemi tasarlanmıştır. Bu sistemde amaç sıvı destekli soğutma stratejisinin kullanıldığı durumdaki sıcaklık dağılımını iyileştirmek ve FDM'nin kullanıldığı soğutma stratejisinde ise RT-42 parafin faz değiştiren malzemesinin sıvı faza geçiş süresini uzatmaktır. Bu doğrultuda, 3C deşarj hızında farklı Reynolds sayılarında ve farklı hacim oranlarında soğutucu ortamın platelet geometriye sahip partikülleri içeren alümina nanoakışkanın olduğu durum için simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup sonuçlar bu bölümde detaylandırılmıştır.

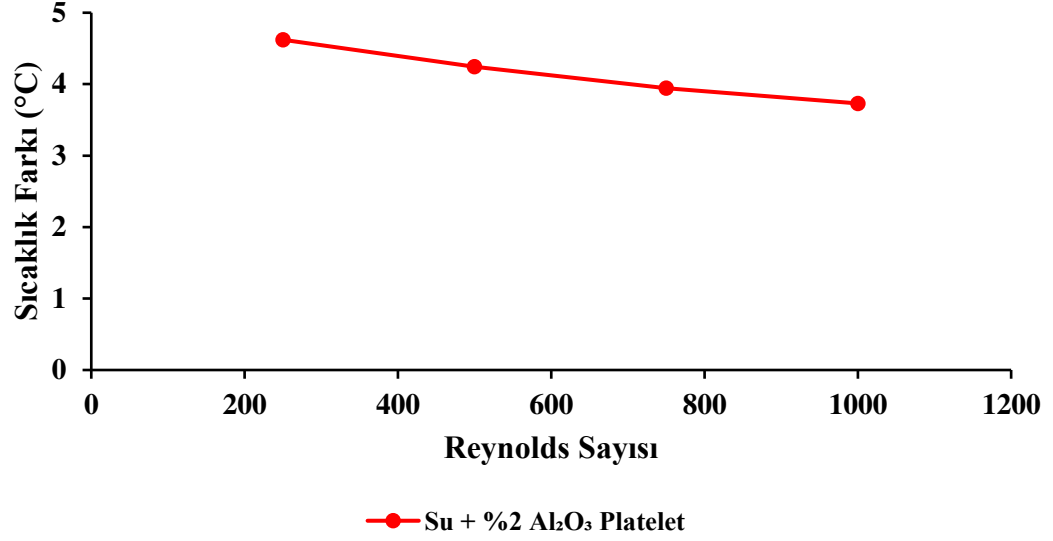
4.4.1. Reynolds Sayısının Hibrit BTYS'nin Termal Performansına Etkisi

Hibrit BTYS'de %2 hacim oranında platelet partikül geometrisine sahip nanoakışkan kullanıldığında Re sayısının 3s1p konfigürasyonuna sahip batarya modülünün maksimum sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Re sayısının artması hibrit termal yönetim sistemin termal performansını arttırmış olup maksimum sıcaklığı tüm Re sayılarında 50 °C'nin altında tuttuğu gözlemlenmiştir. 250, 500, 750 ve 1000 olmak üzere dört Re sayısında elde edilen maksimum sıcaklık değerleri sırası ile, 44.46 °C, 43.65 °C, 43.14 °C ve 42.79 °C'dir.



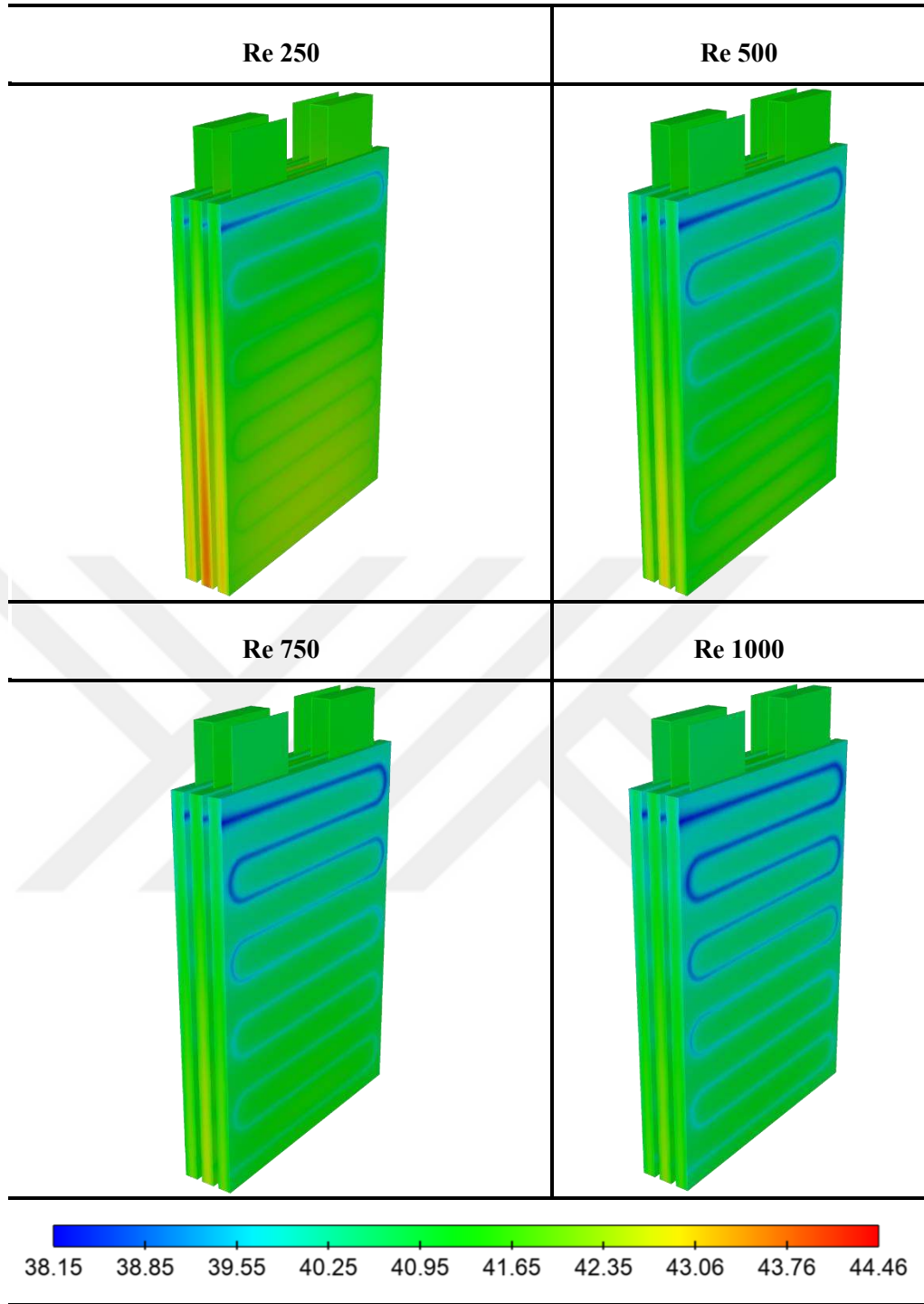
Şekil 4.14. Hibrit BTYS modelinde Re sayısının batarya üzerindeki maksimum sıcaklığa etkisi

Bataryanın deşarj sürecinde meydana gelen düzensiz sıcaklık dağılımları hücrelerin ömürlerini kısalttığı gibi verimliliğini azaltır. Bu sebeple sıcaklık farkının 5 °C'den küçük olması arzu edilir. Şekil 4.15'de merkezde bulunan batarya hücresinin ön ve arka yüzeylerindeki sıcaklık farkına Re sayısının etkisi gösterilmiştir. Hibrit sistemde Reynolds sayısının artmasının sıcaklık farkını 5 °C'nin altında olduğu gözlemlenmiştir. 250, 500, 750 ve 1000 olmak üzere dört Re sayısında sıcaklık farkı değerleri sırası ile 4.62 °C, 4.25 °C, 3.94 °C ve 3.73 °C'dir.



Şekil 4.15. Hibrit BTYS modelinde Re sayısının sıcaklık farkına etkisi

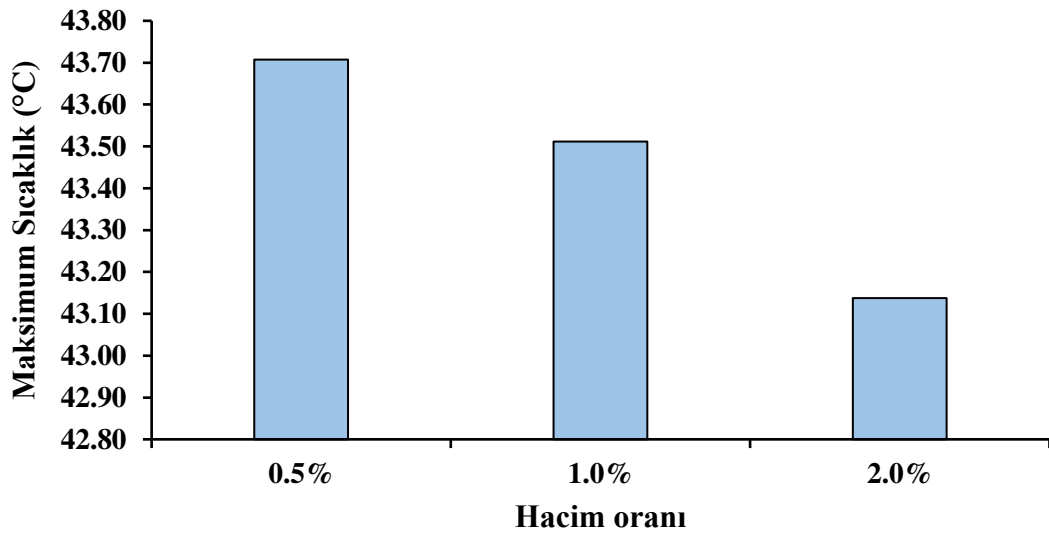
Soğutma stratejisi olarak hibrit BTYS'nin kullanıldığı durumda Reynolds sayısının batarya hücrelerinin sıcaklık dağılımına etkisi Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Burada Re sayısı arttıkça batarya hücre yüzeylerindeki sıcaklıkların homojen bir şekilde yayıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.16. Hibrit BTYS modelinde Re sayısının batarya üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi

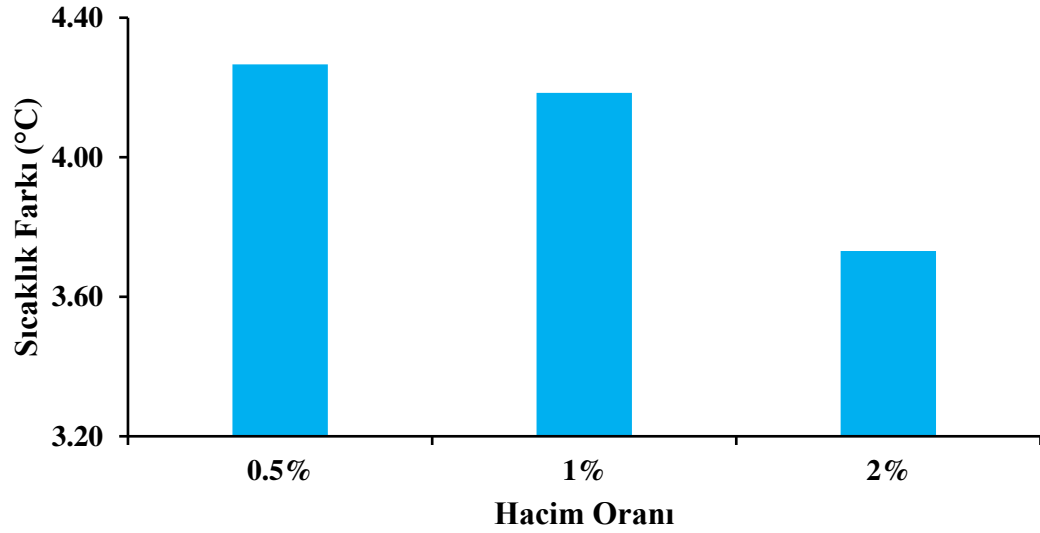
4.4.2. Hacim Oranının Hibrit BTYS'nin Soğutma Performansına Etkisi

Hibrit BTYS'de kullanılan alümina nanoakışkanın içerisinde bulunan platelet geometriye sahip partiküllerin hacimce oranının batarya modülünün maksimum sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Sabit 750 Re sayısında hacimce katı partikül oranının artması batarya modülündeki maksimum sıcaklığı azaltmıştır. %0.5, %1 ve %2 olmak üzere üç farklı hacimce nanopartikül oranında elde edilen maksimum sıcaklık değerleri sırası ile 43.71 °C, 43.51 °C ve 43.14 °C'dir.



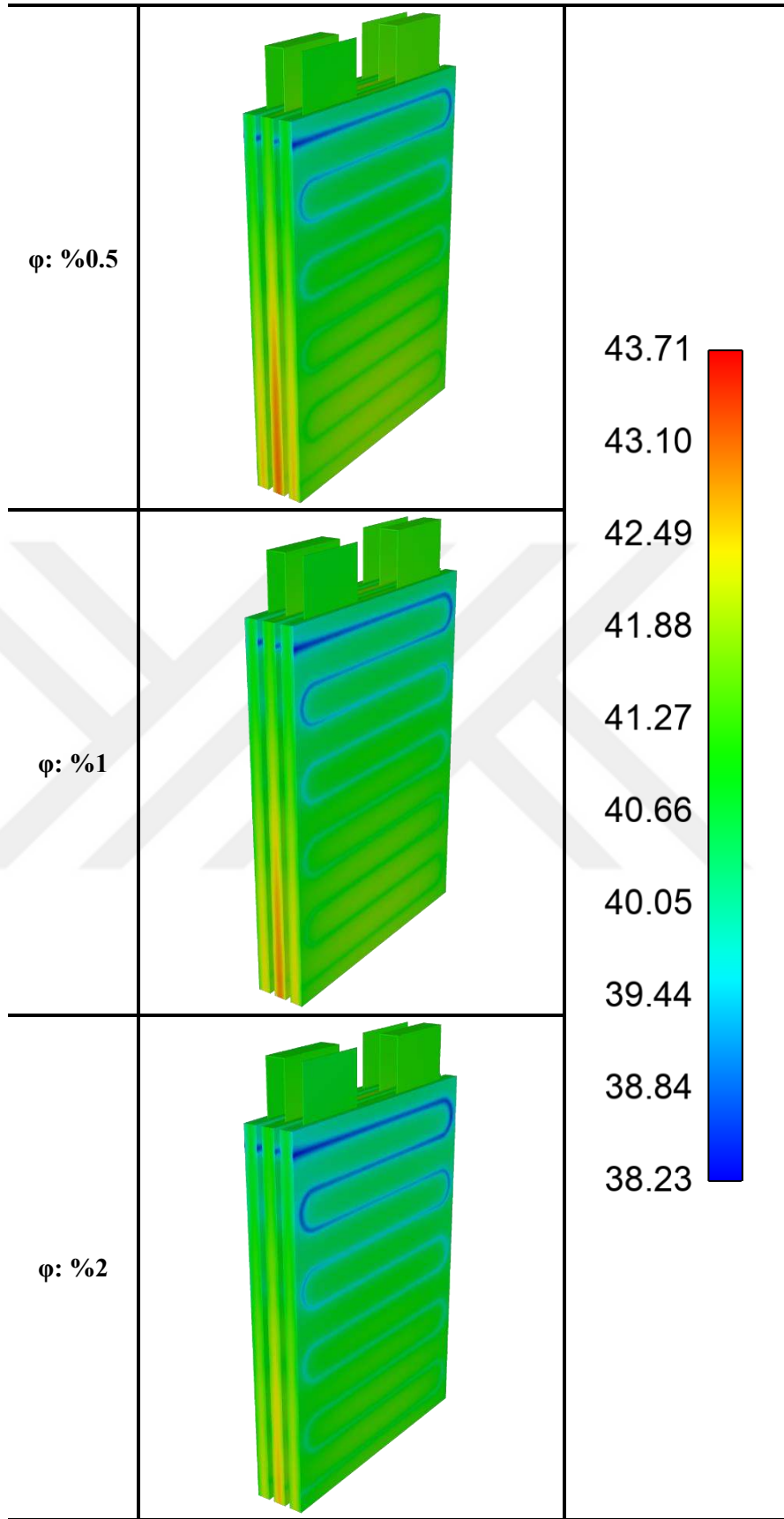
Şekil 4.17. Katı partikül hacim oranının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi, Re=750

Şekil 4.18'de merkezde bulunan batarya hücresinin ön ve arka yüzeylerindeki sıcaklık farkına temel akışkan içerisinde bulunan katı partiküllerin hacimce miktarının etkisi gösterilmiştir. Hibrit sistemde katı partikülün nanoakışkan içerisindeki hacimce oranının artmasının sıcaklık farkını 5 °C'nin altında tuttuğu gözlemlenmiştir. %0.5, %1 ve %2 olmak üzere üç farklı hacim oranında sıcaklık farkı değerleri sırası ile 4.27 °C, 4.18 °C ve 3.73 °C'dir.



Şekil 4.18. Hacim oranının sıcaklık farkı üzerindeki etkisi, $Re=750$

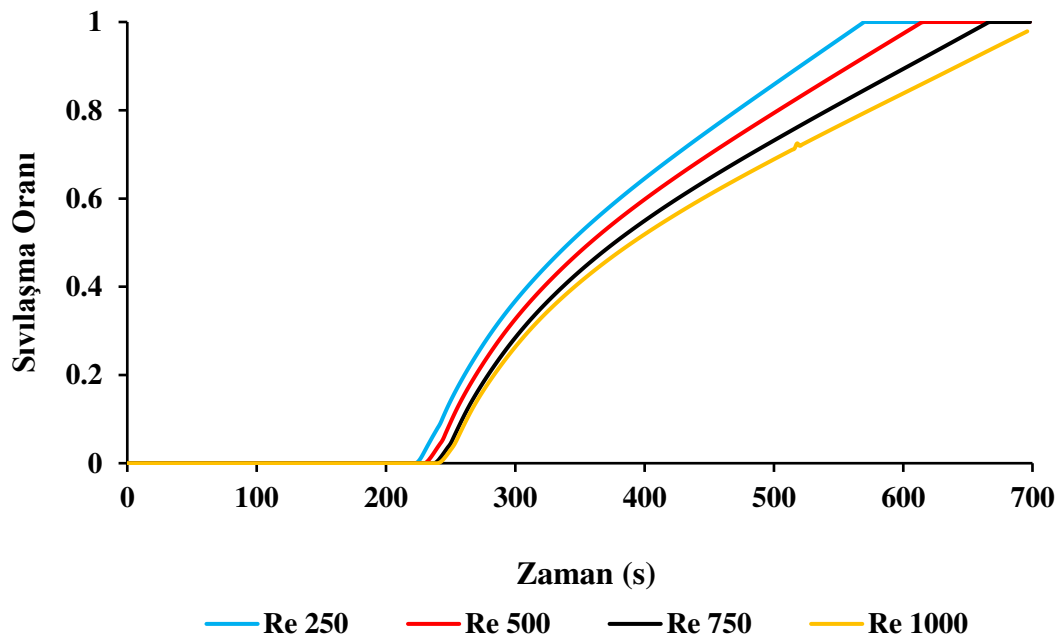
Hibrit BTYS modelinde sabit 750 Re sayısında ve sabit 3C deşarj hızında nanoakışkan içerisindeki hacimce katı partikül oranının batarya hücrelerinin sıcaklık dağılımına etkisi Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Burada hacim oranı arttıkça batarya hücre yüzeylerindeki sıcaklıkların homojen bir şekilde dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.19. Katı partikül hacim oranının sıcaklık dağılımına etkisi, Hibrit BTYS

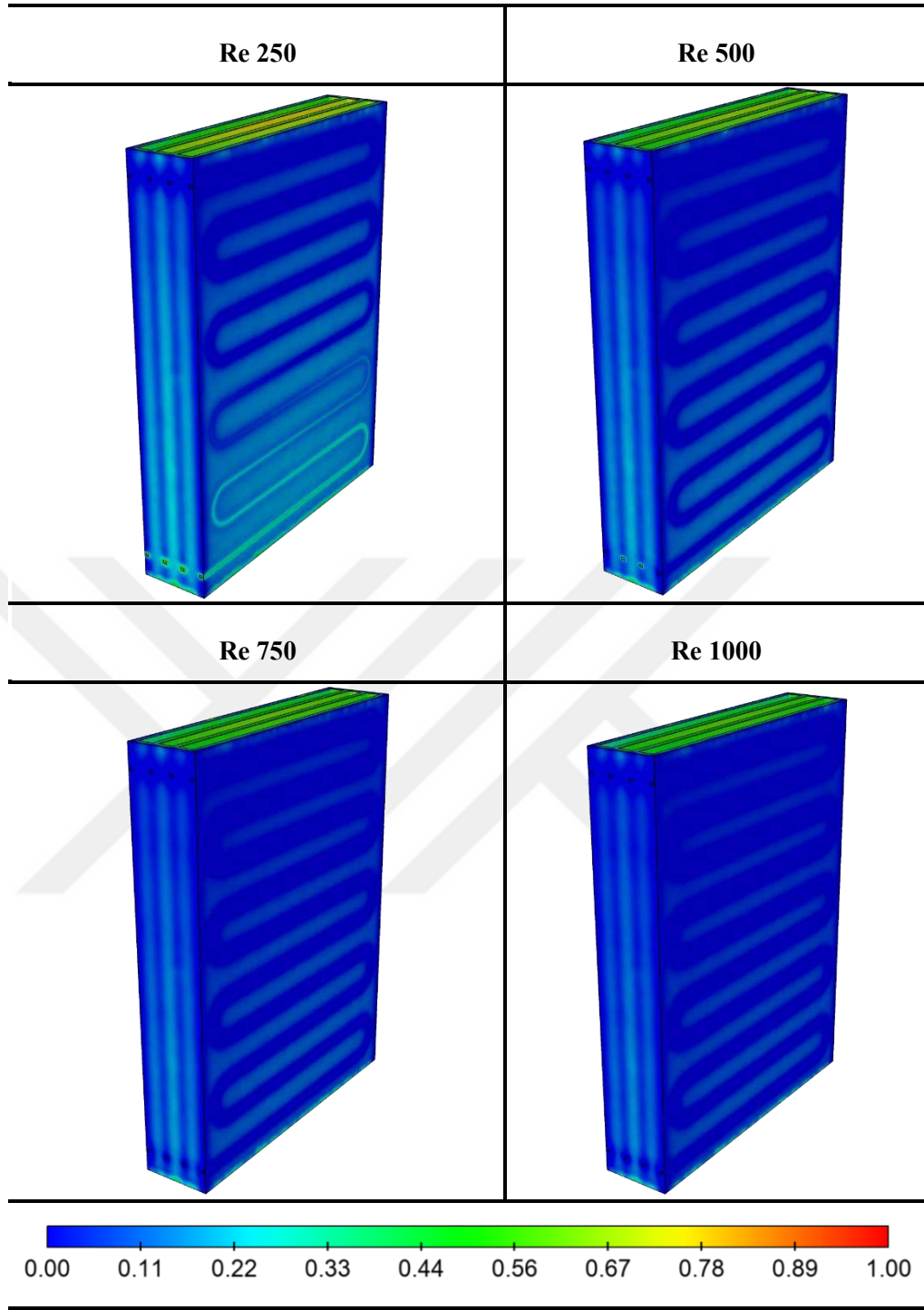
4.4.3. Reynolds Sayısı ve Hacim Oranının Hibrit BTYS Modelindeki FDM'nin Sıvı Oranına Etkisi

Soğutma stratejisi olarak hibrit BTYS kullanıldığında Sabit %2 hacim oranında Reynolds sayısının FDM'nin sıvılaşma oranına zamanla etkisi Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Burada artan Re sayısı ile beraber FDM'nin erime başlangıç zamanının geciktiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte Re sayısının artması ile FDM'nin maksimum sıvılaşma oranına ulaşma süresi de artmış olup 1000 Re sayısında bu değerin düştüğü gözlemlenmiştir.



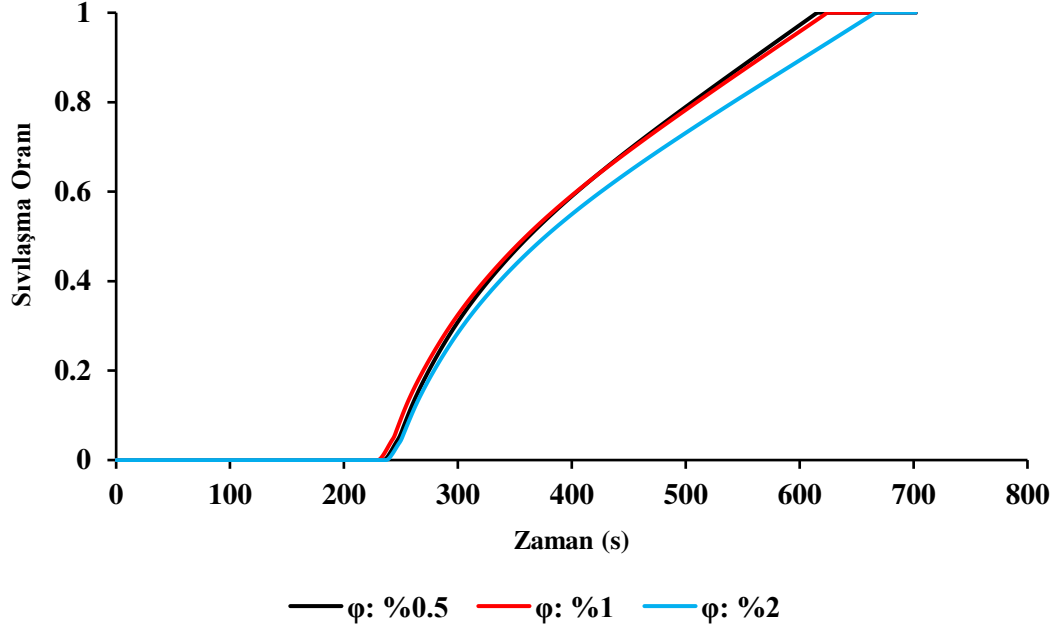
Şekil 4.20. %2 Al₂O₃ oranında Re sayısının zamanla FDM'nin sıvılaşma oranına etkisi

Şekil 4.21'de FDM'deki Katı faz içerisindeki sıvı faz dağılımına Re sayısının etkisi gösterilmiştir. Re sayısının artması ile katı RT-42 parafin malzemesi içerisinde ki sıvı faza geçişin azaldığı gözlemlenmiştir.



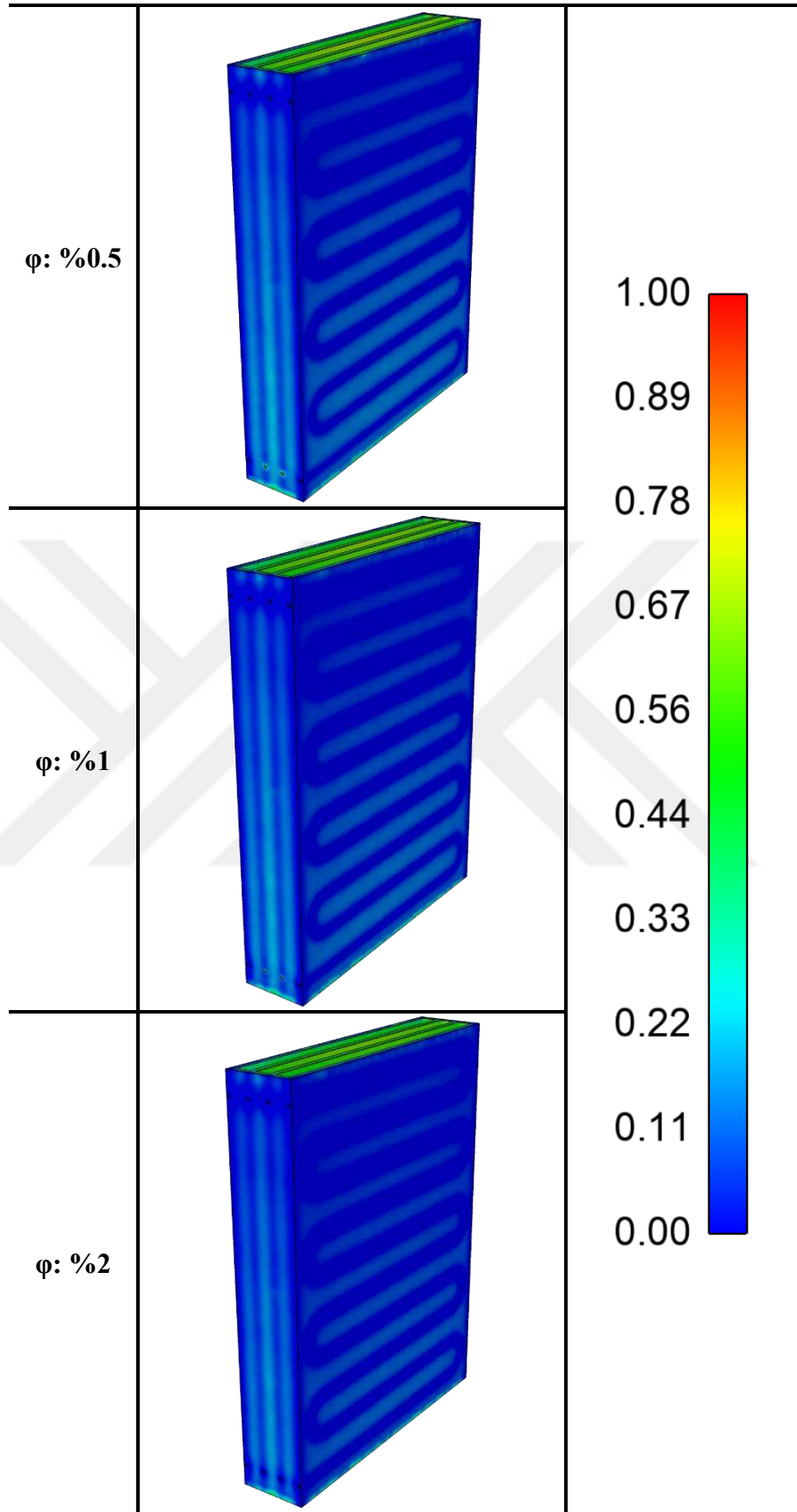
Şekil 4.21. Katı faz içerisindeki sıvı faz dağılımına Re sayısının etkisi

Şekil 4.22’de Sabit 750 Re sayısında hacim oranının zamanla FDM’nin sıvılaşma oranına etkisi gösterilmiştir. Burada hacim oranın FDM’nin erime başlangıç zamanına belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak hacim oranının artması FDM’nin maksimum sıvılaşma oranına ulaşma süresini arttırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.22. Hacim oranının zamanla sıvılaşma oranına etkisi, $Re=750$

Şekil 4.23’de hacim oranının FDM içerisindeki sıvılaşma dağılımına etkisi gösterilmiştir. Artan hacim oranı ile birlikte katı RT-42 parafin malzemesi içerisinde ki sıvı faza geçen bölgelerin azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.23. Hacim oranının FDM içerisindeki sıvı faz dağılımına etkisi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek sıcaklık koşullarında çalışma, lityum iyon bataryaların verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını doğrudan etkileyen en önemli sorunlarından biridir. İdeal çalışma sıcaklık aralığının üzerinde uzun süreli çalışma durumunda ise lityum iyon bataryaların, ömürlerinin kısılmasına, hücrelerde termal kaçak riskinin artmasına, yanmasına ve hatta patlamasına kadar gidebilecek ciddi güvenlik açıklıklarına neden olmaktadır. Bu nedenle lityum iyon bataryaların şarj ve deşarj süreci boyunca hücrede üretilen ısıнын çeşitli termal yönetim sistemlerinin kullanılarak etkili bir şekilde uzaklaştırılması gerekir. Bu tez çalışması kapsamında, 20 Ah kapasiteli seri bağlı üç batarya hücresinden oluşan batarya modülünün üç farklı C oranlarındaki deşarj sürecinde üretilen ısı bir HAD yazılımı olan Ansys Fluent programında nümerik olarak çözülmüştür. Batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımı dikkate alınarak FDM, sıvı destekli ve hibrit olmak üzere üç farklı batarya termal yönetim sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, FDM ile BTYS'nin performansı 2C, 3C ve 4C olmak üzere üç farklı deşarj hızında incelenerek soğutma etkinliği araştırıldı. Ayrıca deşarj hızının RT-42 parafin faz değiştiren malzemesinin sıvılaşma oranı üzerindeki etkisi incelendi. Sıvı destekli BTYS'nin etkinliği su ve alümina nanoakışkanı olmak üzere iki farklı soğutma ortamında incelenmiştir. Soğutucu akışkanların termal etkinliği 250, 500, 750 ve 1000 olmak üzere dört farklı Reynolds sayısında, %0.5, %1 ve %2 olmak üzere üç farklı katı partikül hacim oranında araştırıldı. Ayrıca nanoakışkan içerisine eklenen partikül geometrisinin ısı transferine etkisi basık küremsi, blok, silindir ve platelet olmak üzere dört farklı partikül geometrisi, akışkanın termofiziksel özellikleri kullanılarak nümerik olarak incelenmiştir. FDM ve sıvı destekli termal yönetim sistemlerinin negatif yanlarının giderilmesi için ikisinin beraber kullanılması ile tasarlanan hibrit BTYS'nin termal etkinliği sabit %2 hacim oranında platelet partikül geometrisine sahip alümina nanoakışkanın dört farklı Reynolds sayısında ve sabit 750 sayısında farklı hacim oranlarında araştırıldı. Bununla birlikte hibrit termal yönetim sisteminde kullanılan parafin faz değiştiren malzemenin sıvılaşma oranı farklı Re sayıları ve hacim oranları dikkate alınarak incelendi. Üç farklı batarya termal yönetim sisteminin 20 Ah kapasiteli batarya modülü üzerindeki soğutma etkinliği maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı baz alınarak karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışmasının ana sonuçları aşağıdaki gibi özetlenir.

- Soğutma kullanılmadığı durumda, deşarj hızının artması elektrokimyasal aktiviteyi arttırdığından dolayı hücrede üretilen ısı miktarını arttırır. Bu sebeple de deşarj hızı arttıkça batarya modülündeki maksimum sıcaklık artar. 2C, 3C ve 4C deşarj hızlarında gözlemlenen maksimum sıcaklık değerleri sırası ile 50.24 °C, 59.59 °C ve 61.38 °C'dir. Her üç deşarj hızında çalışan batarya sıcaklığının ideal koşul olan 50 °C'nin üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 2C, 3C ve 4C deşarj hızlarında batarya modülünde gözlemlenen sıcaklık farkları sırası ile 2.36 °C, 3.24 °C, 2.55 °C'dir. Batarya modülü üzerindeki sıcaklık farkı her ne kadar ideal koşul olan 5 °C'nin altında olsa da sıcaklık dağılımında bir düzensizlik söz konusudur. Bu sebeple uygun bir soğutma stratejisi kullanılarak batarya modülünün termal yönetiminin sağlanarak maksimum sıcaklığın düşürülmesi ve hücrelerdeki sıcaklık dağılımlarının homojenleştirilmesi oldukça önemlidir.
- Soğutma stratejisi olarak FDM ile BTYS'nin kullanıldığı durumda, deşarj hızının artması ile beraber batarya sıcaklığı artmış olup 2C, 3C ve 4C deşarj hızlarında gözlemlenen maksimum sıcaklık değerleri sırası ile 40.91 °C, 43.77 °C ve 45.74 °C'dir. FDM'nin kullanılması sonucunda sıcaklık değerleri ideal koşul olan 50 °C'nin altında olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık farkı ise 2C, 3C ve 4C deşarj hızlarında 0.68 °C, 1.28 °C ve 1.96 °C olduğu gözlemlenmiş olup ideal koşul olan 5°C'nin oldukça altındadır. Ayrıca deşarj hızının artması faz değiştiren malzemenin erime başlangıç zamanını kısalttığı, FDM içerisinde maksimum sıvılaşma oranına ulaşma zamanını azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca katı faz içerisindeki sıvı faz oranını arttırmıştır.
- Soğutmanın kullanılmadığı ve FDM ile BTYS'nin kullanıldığı durum karşılaştırıldığında, 2C, 3C ve 4C deşarj hızlarında FDM ile BTYS'nin batarya modülü üzerindeki maksimum sıcaklığı sırası ile %19, %27 ve %25 oranında bir azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca FDM ile BTYS soğutmanın kullanılmadığı durumdaki, 2C, 3C ve 4C deşarj hızlarında sıcaklık farkını sırası ile %71, %60 ve %23 oranında azaltmıştır.

- Soğutma stratejisi olarak Sıvı destekli BTYS'nin kullanıldığı durumda, Reynolds sayısının artması batarya hücreleri üzerindeki sıcaklığı azalttığı gözlemlenmiştir. Sıvı destekli BTYS'de soğutma ortamının su olduğu ve Re sayısı 250 olduğu durumda batarya modülü üzerinde maksimum sıcaklık değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiş olup değeri 52.96 °C'dir. Suyun kullanıldığı durumda Re sayısının 1000 olduğu durumda maksimum sıcaklık değeri 47.49 °C olduğu gözlemlenmiştir. Ancak soğutma ortamının alümina nanoakışkan olduğu durumda batarya modülündeki maksimum sıcaklıktaki azalmanın daha fazla olduğu gözlemlenmiş olup %2 hacim oranında, 250 ve 1000 Re sayılarında batarya modülü üzerindeki maksimum sıcaklık değeri sırası ile 52.04 °C ve 44.27 °C'dir. Dolayısıyla nanoakışkanın batarya hücrelerinin soğutulmasında suya göre bariz bir üstünlüğünün olduğu görülmektedir.
- 1000 Re sayısında %2 hacim oranına sahip nanoakışkanın aynı Re sayısında suyun kullanıldığı duruma göre batarya hücresinin maksimum sıcaklığının yaklaşık %7 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca soğutma sistemi kullanılmayan batarya üzerinde ki sıcaklıktaki azalma oranı 1000 Re sayısında su kullanıldığında %20 ve 1000 Re sayısında, %2 hacim oranına sahip nanoakışkan kullanıldığında ise %26 oranında olduğu gözlemlenmiştir. Sıvı destekli BTYS'nin batarya modülü üzerindeki sıcaklık dağılımını homojenleştirdiği ancak incelenen tüm parametrelerde sıcaklık farkını ideal olan 5 °C'nin üzerinde olduğu görülmektedir.
- Hacim oranın sıcaklık üzerindeki etkisi incelendiğinde sıvı destekli BTYS'de kullanılan nanoakışkan içerisindeki katı partikül oranının artması ile batarya modülü üzerindeki maksimum sıcaklık değerini azalttığı görülmektedir. Nanopartikül hacim oranının %2 olduğu durumda tüm Re sayılarında sıcaklık değerinin diğer hacim oranlarına göre daha fazla azaldığı görülmektedir. Batarya modülü üzerinde ki en yüksek sıcaklık değeri hacim oranının %0.5 ve Re sayısının 250 olduğu durumda gözlemlenmiş olup değeri 52.73 °C'dir. Re sayısının 1000 ve hacim oranının %2 olduğu durumda en düşük sıcaklık değeri gözlemlenmiş olup değeri 44.27 °C'dir. Re sayısının 1000 olduğu durumda %0.5, %1 ve %2 hacim oranlarının, soğutma kullanılmayan batarya modülündeki maksimum sıcaklığı sırası ile %21, %22 ve %26 oranında

düşürdüğü belirlenmiştir. Aynı Re sayısında hacim oranlarının sıcaklığı azaltma oranlarının birbirlerine göre kıyaslanması şu şekildedir. Re sayısının 1000 olduğu durumda, %2 hacim oranına sahip nanoakışkanın sırası ile %0.5 ve %1 hacim oranına sahip nanoakışkana göre batarya hücreleri üzerindeki maksimum sıcaklığı %6 ve %4 oranında azalttığı, %1 hacim oranının %0.5 hacim oranına göre sıcaklığı %2 oranında azalttığı gözlemlenmiştir.

- Nanopartikül geometrisinin batarya sıcaklığı üzerindeki etkisi incelendiğinde sabit Reynolds sayısında, silindirik geometriye sahip nanopartiküller, yarı küresel nanopartiküllere göre daha yüksek viskozitelerinin olmasından dolayı daha yüksek hız değerlerine sahiptir. Dolayısıyla ısı transfer hızı da bu durumdan etkilenir. Sonuç olarak, platelet ve silindir nano partiküller blok ve basık küresel nano partiküllere daha yüksek ısı transferine sahiptir. Sıcaklığı en çok azaltan partikül geometrisi platelet olmasına karşın basık küresel partikül geometri batarya sıcaklığının en yüksek olduğu partikül geometrisidir. Nanoakışkan içerisindeki çeşitli katı partiküller, 500 Re sayısında ve %2 hacim oranında, soğutma sistemi kullanılmayan batarya modülündeki sıcaklığı platelet geometriye sahip nanopartikül %20 oranında, silindir geometriye sahip nanopartikül %17, blok geometriye sahip nanopartikül %15 ve basık küresel geometriye sahip nanopartikülün bulunduğu nanoakışkan %14 oranında azalttığı gözlemlenmiştir.
- Sıvı destekli BTYS’de basınç düşüşü incelendiğinde Reynolds sayısının ve hacim oranının artması ile basınç düşüşü artmıştır. Farklı partikül geometrilerinin basınç düşüşüne etkisi incelendiğinde ise artan viskozite basınç düşüşünü arttırmış olup en yüksek basınç kaybı platelet geometriye sahip nanoakışkandır. Basınç düşüşü, akışkanların hareketi için enerji tüketimini belirlediği için sıvı destekli soğutma stratejilerinde oldukça önemli bir parametredir. Dolayısıyla yüksek Re sayılarında, yüksek viskozitelerde ve yüksek hacim oranlarında serpantin kanal içerisinde akışkanı dolaştırmak için gerekli olan enerji tüketimi artmaktadır.

- Soğutma stratejisi olarak hibrit BTYS'nin kullanıldığı durumda, artan Re sayısı hibrit termal yönetim sistemin termal performansını arttırmıştır. Tüm Re sayılarında ve hacim oranlarında maksimum sıcaklığı ideal çalışma sıcaklığı olan 50 °C'nin altında tuttuğu gözlemlenmiştir. Re sayısının 1000 ve hacim oranının %2 olduğu durumda hibrit BTYS'nin, soğutma sistemi bulunmayan batarya modülü üzerindeki sıcaklığı %28 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm Re sayılarında ve hacim oranlarında optimum sıcaklık farkı olan 5 °C'nin altında tuttuğu görülmektedir. Bununla birlikte hibrit BTYS'nin batarya modülü üzerindeki sıcaklık dağılımını homojenleştirdiği, FDM içerisinden geçen sıvı soğutmanın ise RT-42 parafin faz değiştiren malzemesinin erime başlangıç zamanını arttırdığını ve katı faz içerisindeki sıvılaşma oranını azaltarak FDM'nin termal performansını arttırdığını gözlemlenmiştir.
- Sonuç olarak, batarya modülündeki sıcaklığın azaltılması için tasarlanan batarya termal yönetim sistemlerinin (FDM, sıvı ve hibrit) termal performansları incelendiğinde, hibrit BTYS'nin diğer soğutma stratejilerine göre üstünlüğü olduğu, maksimum sıcaklığın ve sıcaklık dağılımının en fazla iyileşme gösterdiği termal yönetim sistemi olduğu gözlemlenmiştir. Sıvı destekli BTYS'nin ise yüksek Re sayılarında ve yüksek hacim oranının dışında maksimum sıcaklıkta ve sıcaklık dağılımında diğer termal yönetim sistemleri kadar başarılı olmadığı ve soğutma plakası içerisinde bulunan serpantin kanal tasarımının batarya üzerindeki sıcaklık farkını azaltamadığı gözlemlenmiştir. Üç farklı deşarj hızında FDM ile BTYS'nin ise batarya üzerindeki maksimum sıcaklığı 50 °C'nin altında ve sıcaklık farkını 5 °C'nin altında tuttuğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] S.F. Tie, C.W. Tan, A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 20 (2013) 82-102.
- [2] U. Energy Information Administration, Energy Information Administration, n.d. 10.5860/choice. 44-3624.
- [3] N. Abas, A. Kalair, N. Khan, Review of fossil fuels and future energy technologies, *Futures* 69 (2015) 31–49,
- [4] M. Lenzen, Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review, *Energy Convers. Manag.* 49 (2008) 2178–2199,
- [5] M.V.D. Steen, R.M.V. Schelven, R. Kotter, M.J.W.V. Twist, P.V.D. Mpa, EV Policy Compared: an International Comparison of Governments' Policy Strategy towards E-mobility, *E-Mobility in Europe: Springer*, 2015, pp. 27-53.
- [6] Global Plug-in Sales for 2016, 2017. <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>.
- [7] Roveda, A. C., Comin, M., Caires, A. R. L., Ferreira, V. S., & Trindade, M. A. G. (2016). Thermal stability enhancement of biodiesel induced by a synergistic effect between conventional antioxidants and an alternative additive. *Energy*, 109, 260-265.
- [8] Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 748-764.
- [9] Biçer, E., Mazman, M., Kaypmaz, C., Uzun, D. Li-iyon Piller ve Uygulamaları, 2nd ed.; Nobel Akademi Yayınları, Ankara, 2021, 216 p.
- [10] Alipour, M., Designing a Thermal Management System for Lithium-Ion Battery Packs Used in Electrical Vehicles, Koç University, Faculty of Engineering, Department of Chemical and Biological Engineering, İstanbul, 2019, 127 p. (Doctoral Thesis).
- [11] Dincer, İ., Hamut, Halil S., Javani, N., Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems, John Wiley & Sons Ltd, 2017.
- [12] Linden, D., Linden's Handbook of Batteries. Ed: Thomas B. Reddy, 4th ed.; McGraw-Hill Education, 2011, 1456 p.
- [13] Warner, John T., Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology, Elsevier Science, 2015, 262p.

- [14] Zhao, R., Liu, J., & Gu, J. (2015). The effects of electrode thickness on the electrochemical and thermal characteristics of lithium ion battery. *Applied Energy*, 139, 220-229.
- [15] Torabi, F., Ahmadi, P., *Simulation of Battery Systems: Fundamentals and Applications*, 1st ed.; Academic Press, 2019, 430 p.
- [16] Spiers, D., *Practical Handbook of Photovoltaics : Fundamentals and Applications*. Eds: Augustin McEvoy, Tom Markvart, Luis Castaner, 2nd ed.; Academic Press, 2012.
- [17] Buchmann, I., *Batteries In A Portable World: A Handbook On Rechargeable Batteries For Non-Engineers*, 3rd ed; Cadex Electronics Inc., 2011, 328 p.
- [18] Öncel, V. Li-iyon Piller İçin Grafen Esaslı Elektrotlar. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik, 2018 (Yüksek Lisans Tezi).
- [19] Turner, A., *The 2020 Lithium-Ion Battery Guide: The Easy DIY Guide To Building Your Own Battery Packs (Lithium Ion Battery Book)*, Seattle Publishing Company, 2020, 175 p.
- [20] Qiao, H., & Wei, Q. Functional nanofibers in lithium-ion batteries. *Functional Nanofibers and Their Applications*, Ed.: Qufu Wei, Woodhead Publishing, 2012, 197–208 p.
- [21] Plett, G. L. *Battery Management Systems Vol 1*, Artech House Publishers, 2015, 342 p.
- [22] Taylan, G., *Lityum İyon Pil Hücresinin Termal Karakterizasyonu*, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 2019, 47 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [23] Panchal, S., *Experimental Investigation and Modeling of Lithium-ion Battery Cells and Packs for Electric Vehicles*, University of Ontario Institute of Technology, Faculty of Engineering and Applied Science, Department of Mechanical Engineering, Ontario, 2016, 153 p. (Doctoral Thesis).
- [24] Korthauer, R. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Springer, 2018, 433 p.
- [25] Mahamud, R., & Park, C. (2022). Theory and Practices of Li-Ion Battery Thermal Management for Electric and Hybrid Electric Vehicles. *Energies*, 15(11), 3930.

- [26] Un, C., & Aydın, K. (2021). Thermal Runaway and Fire Suppression Applications for Different Types of Lithium Ion Batteries. *Vehicles*, 3(3), 480–497.
- [27] Weicker, P. A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management, Artech House, 2014, 300 p.
- [28] Himax electronics internet sitesi, 2022,
<https://himaxelectronics.com/product-item/lifepo4-battery-cell-3-2v>
- [29] Zschornak, M., Meutzner, F., Lück, J., Latz, A., Leisegang, T., Hanzig, J., Nentwich, M., Zosel, J. & Balbuena, P. (2018). Fundamental principles of battery design. *Physical Sciences Reviews*, 3(11), 20170111.
- [30] Mekonnen, Y., Sundararajan, A., & Sarwat, A.I. (2016). A review of cathode and anode materials for lithium-ion batteries. *SoutheastCon 2016*, 1-6.
- [31] Linden, D., Reddy, Thomas B., *Handbook of Batteries*, 3rd ed.; McGraw-Hill Education, 2001, 1200 p.
- [32] Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., & Riu, D. (2013). A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 241, 680-689.
- [33] Meissner, E., & Richter, G. (2005). The challenge to the automotive battery industry: the battery has to become an increasingly integrated component within the vehicle electric power system. *Journal of power sources*, 144(2), 438-460.
- [34] Erdinc, O., Vural, B., & Uzunoglu, M. (2009, June). A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading. In *2009 International Conference on Clean Electrical Power* (pp. 383-386). IEEE.
- [35] Sarre, G., Blanchard, P., & Broussely, M. (2004). Aging of lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 127(1-2), 65-71.
- [36] Arora, P., White, R. E., & Doyle, M. (1998). Capacity fade mechanisms and side reactions in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 145(10), 3647.
- [37] Buqa, H., Würsig, A., Vetter, J., Spahr, M. E., Krumeich, F., & Novák, P. (2006). SEI film formation on highly crystalline graphitic materials in lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 153(2), 385-390.
- [38] Goers, D., Spahr, M. E., Leone, A., Märkle, W., & Novák, P. (2011). The influence of the local current density on the electrochemical exfoliation of

- graphite in lithium-ion battery negative electrodes. *Electrochimica Acta*, 56(11), 3799-3808.
- [39] Broussely, M. I. C. H. E. L., Herreyre, S., Biensan, P., Kasztejna, P., Nechev, K., & Staniewicz, R. J. (2001). Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions. *Journal of Power Sources*, 97, 13-21.
- [40] Yang, X. G., Leng, Y., Zhang, G., Ge, S., & Wang, C. Y. (2017). Modeling of lithium plating induced aging of lithium-ion batteries: Transition from linear to nonlinear aging. *Journal of Power Sources*, 360, 28-40.
- [41] Vetter, J., Novák, P., Wagner, M. R., Veit, C., Möller, K. C., Besenhard, J. O., ... & Hammouche, A. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 147(1-2), 269-281.
- [42] Yamaki, J. I. (2002). Liquid electrolytes. *Advances in Lithium-Ion Batteries*, 155-183.
- [43] Johnson, B. A., & White, R. E. (1998). Characterization of commercially available lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 70(1), 48-54.
- [44] Deshpande, R., Verbrugge, M., Cheng, Y. T., Wang, J., & Liu, P. (2012). Battery cycle life prediction with coupled chemical degradation and fatigue mechanics. *Journal of the Electrochemical Society*, 159(10), A1730.
- [45] Garche, J., Dyer, C., Moseley, P. T., Ogumi, Z., Rand, D. A., & Scrosati, B. (Eds.). (2013). *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Newnes.
- [46] Scrosati, B., Hassoun, J., & Sun, Y. K. (2011). Lithium-ion batteries. A look into the future. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3287-3295.
- [47] SinoVoltaics internet sitesi, 2023 <https://sinovoltaics.com/energy-storage/battery-failures/stages-of-failure-in-lithium-ion-batteries/>
- [48] Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of power sources*, 208, 210-224.
- [49] Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R., & Strømman, A. H. (2011). Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. *Environmental science & technology*, 45(10), 4548-4554.
- [50] Madani, S. S., Swierczynski, M. J., & Kær, S. K. (2017, April). The discharge behavior of lithium-ion batteries using the dual-potential multi-scale multi-

- dimensional (msmd) battery model. In 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) (pp. 1-14). IEEE.
- [51] Song, W., Chen, M., Bai, F., Lin, S., Chen, Y., & Feng, Z. (2018). Non-uniform effect on the thermal/aging performance of Lithium-ion pouch battery. *Applied thermal engineering*, 128, 1165-1174.
- [52] Bandhauer, T. M., Garimella, S., & Fuller, T. F. (2011). A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(3), R1.
- [53] Rezvanizani, S. M., Liu, Z., Chen, Y., & Lee, J. (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. *Journal of power sources*, 256, 110-124.
- [54] Kang, B., *Designing Materials for Energy Storage with High Power and Energy Density: LiFePO₄ Cathode Material*, Massachusetts Institute Of Technology, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts, 2009, 274p. (Doctoral Thesis).
- [55] Broadhead, J., & Kuo, H. C. (2001). *Electrochemical principles and reactions*. Handbook of batteries, 2-1.
- [56] Butler, J. A. V. (1936). Hydrogen overvoltage and the reversible hydrogen electrode. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*, 157(891), 423-433.
- [57] Bockris, J. O. M., Reddy, A. K., & Gamboa-Aldeco, M. E. (1998). *Modern electrochemistry 2B: electrochemistry in chemistry, engineering, biology and environmental science (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media.
- [58] Barsoukov, E., & Macdonald, J. R. (2005). *Impedance spectroscopy theory, experiment, and Applications*, 2nd ed. (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2005).
- [59] Guo, M., Sikha, G., & White, R. E. (2011). Single-Particle Model for a Lithium-Ion Cell: Thermal Behavior. *Journal of The Electrochemical Society*, 158 (2), A122 – A132.
- [60] Chang, M. T., Lin, Y. S., Ling, S. H., Liang, S. H., Lin, C. H., & Chen, K. C. (2014). Identification of the Parameters in Equivalent Circuit Model of Lithium-Ion Batteries. *ECS Transactions*, 61(27), 125.

- [61] Heins, T. P., Harms, N., Schramm, L. S., & Schröder, U. (2016). Development of a new electrochemical impedance spectroscopy approach for monitoring the solid electrolyte interphase formation. *Energy technology*, 4(12), 1509-1513.
- [62] Kiehne, H. A. (2003). *Battery technology handbook* (Vol. 118). CRC Press.
- [63] Suresh, P., Shukla, A. K., & Munichandraiah, N. (2002). Temperature dependence studies of ac impedance of lithium-ion cells. *Journal of applied electrochemistry*, 32, 267-273.
- [64] Gadalla, A., Shaaban, E., Anas, F., Rafique, S., & Yousef, E. (2020). Resistivity-Temperature Dependence, Thermal And Electrical Parameters Of Se 65-x As 35 Sb x Thin Films:(1 μ m, 5 K. min⁻¹). *Chalcogenide Letters*, 17(5).
- [65] Macdonald, R., & Franceschetti, D. R. (1987). The electrical analogs of physical and chemical processes. *Impedance Spectroscopy*, 1, 27.
- [66] Zheng, H., Zhang, H., Fu, Y., Abe, T., & Ogumi, Z. (2005). Temperature effects on the electrochemical behavior of spinel LiMn₂O₄ in quaternary ammonium-based ionic liquid electrolyte. *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(28), 13676-13684.
- [67] Kumar, A. S., Satyavani, T. V. S. L., & Senthilkumar, M. (2016). Effect of temperature and charge stand on performance of lithium-ion polymer pouch cell. *Journal of Energy Storage*, 6, 239-247.
- [68] Aurbach, D., Markovsky, B., Shechter, A., Ein-Eli, Y., & Cohen, H. (1996). A comparative study of synthetic graphite and Li electrodes in electrolyte solutions based on ethylene carbonate-dimethyl carbonate mixtures. *Journal of the Electrochemical Society*, 143(12), 3809.
- [69] Aurbach, D. (2000). Review of selected electrode–solution interactions which determine the performance of Li and Li ion batteries. *Journal of Power Sources*, 89(2), 206-218.
- [70] Peled, E. (1979). The electrochemical behavior of alkali and alkaline earth metals in nonaqueous battery systems—the solid electrolyte interphase model. *Journal of The Electrochemical Society*, 126(12), 2047.
- [71] Feng, X., Fang, M., He, X., Ouyang, M., Lu, L., Wang, H., & Zhang, M. (2014). Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry. *Journal of power sources*, 255, 294-301.

- [72] Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., & Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied Thermal Engineering*, 94, 846-854.
- [73] Han, X., Ouyang, M., Lu, L., & Li, J. (2014). A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation. *Journal of Power Sources*, 268, 658-669.
- [74] Troxler, Y., Wu, B., Marinescu, M., Yufit, V., Patel, Y., Marquis, A. J., ... & Offer, G. J. (2014). The effect of thermal gradients on the performance of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 247, 1018-1025.
- [75] Klein, M., Tong, S., & Park, J. W. (2016). In-plane nonuniform temperature effects on the performance of a large-format lithium-ion pouch cell. *Applied Energy*, 165, 639-647.
- [76] Kılıç, Y., Elektrikli Arabalar İçin Geliştirilen Bir Lityum İyon Batarya Paketinin Isıl Yönetimi ve Optimizasyonu, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 2020, 88 93-s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [77] Farag, M., Sweity, H., Fleckenstein, M., & Habibi, S. (2017). Combined electrochemical, heat generation, and thermal model for large prismatic lithium-ion batteries in real-time applications. *Journal of Power Sources*, 360, 618-633.
- [78] Gu, W. B., & Wang, C. Y. (2000). Thermal-electrochemical modeling of battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(8), 2910.
- [79] Kantharaj, R., & Marconnet, A. M. (2019). Heat generation and thermal transport in lithium-ion batteries: a scale-bridging perspective. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 23(2), 128-156.
- [80] Chen, C. F., Verma, A., & Mukherjee, P. P. (2017). Probing the role of electrode microstructure in the lithium-ion battery thermal behavior. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(11), E3146.
- [81] Arora, S., Shen, W., & Kapoor, A. (2017). Critical analysis of open circuit voltage and its effect on estimation of irreversible heat for Li-ion pouch cells. *Journal of Power Sources*, 350, 117-126.
- [82] Diaz, L. B., Hales, A., Marzook, M. W., Patel, Y., & Offer, G. (2022). Measuring irreversible heat generation in lithium-ion batteries: an experimental methodology. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(3), 030523.

- [83] Nazari, A., & Farhad, S. (2017). Heat generation in lithium-ion batteries with different nominal capacities and chemistries. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1501-1517.
- [84] Bernardi, D., Pawlikowski, E., & Newman, J. (1985). A general energy balance for battery systems. *Journal of the electrochemical society*, 132(1), 5.
- [85] Choudhari, V. G., Dhoble, A. S., & Sathe, T. M. (2020). A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery used for electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 32, 101729.
- [86] Smith, K., & Wang, C. Y. (2006). Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles. *Journal of power sources*, 160(1), 662-673.
- [87] Balasundaram, M., Ramar, V., Yap, C., Li, L., Tay, A. A., & Balaya, P. (2016). Heat loss distribution: Impedance and thermal loss analyses in LiFePO₄/graphite 18650 electrochemical cell. *Journal of Power Sources*, 328, 413-421.
- [88] Tete, P. R., Gupta, M. M., & Joshi, S. S. (2021). Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review. *Journal of Energy Storage*, 35, 102255.
- [89] Sukkam, N., Onsree, T., & Tippayawong, N. (2022, November). Overview of machine learning applications to battery thermal management systems in electric vehicles. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2681, No. 1, p. 020004). AIP Publishing LLC.
- [90] Wu W, Yang X, Zhang G, Chen K, Wang S. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system. *Energy Convers Manage*. 2017; 138:486–92.
- [91] Ren Y, Yu Z, Song G. Thermal management of a Li-ion battery pack employing water evaporation. *J Power Sources*. 2017;360:166–71.
- [92] Battery and Energy Technologies Internet sitesi, 2023, https://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm
- [93] Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., ... & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(6), 653-666.
- [94] Petzl, M., Kasper, M., & Danzer, M. A. (2015). Lithium plating in a commercial lithium-ion battery—A low-temperature aging study. *Journal of power sources*, 275, 799-807.

- [95] Rao, Z., Qian, Z., Kuang, Y., & Li, Y. (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514-1522.
- [96] Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy conversion and management*, 182, 262-281.
- [97] Kim, J., Oh, J., & Lee, H. (2019). Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied thermal engineering*, 149, 192-212.
- [98] Kaabinejadian, A., Ahmadi, H. A., & Moghimi, M. (2020). Investigation of porous media effects on lithium-ion battery thermal management. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141, 1619-1633.
- [99] Landini, S., Leworthy, J., & O'Donovan, T. S. (2019). A review of phase change materials for the thermal management and isothermalisation of lithium-ion cells. *Journal of Energy Storage*, 25, 100887.
- [100] Jaguemont, J., Boulon, L., & Dubé, Y. (2016). A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied Energy*, 164, 99- 114.
- [101] Patel, J. R., & Rathod, M. K. (2020). Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 480, 228820.
- [102] Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy conversion and management*, 150, 304-330.
- [103] Rana, S., Kumar, R., & Bharj, R. S. (2023). Lithium-Ion Battery Thermal Management Techniques and Their Current Readiness Level. *Energy Technology*, 11(1), 2200873.
- [104] Shahid, S., & Agelin-Chaab, M. (2021). Development of hybrid thermal management techniques for battery packs. *Applied Thermal Engineering*, 186, 116542.
- [105] Cen, J., & Jiang, F. (2020). Li-ion power battery temperature control by a battery thermal management and vehicle cabin air conditioning integrated system. *Energy for Sustainable Development*, 57, 141-148.

- [106] Xie, J., Xie, Y., & Yuan, C. (2019). Numerical study of heat transfer enhancement using vortex generator for thermal management of lithium ion battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 1184-1193.
- [107] Wang, Q., Jiang, B., Li, B., & Yan, Y. (2016). A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106-128.
- [108] Xia, G., Cao, L., & Bi, G. (2017). A review on battery thermal management in electric vehicle application. *Journal of power sources*, 367, 90-105.
- [109] Schmidt, R., & Engineer, F. C. (2009, August). Packaging of new servers energy efficiency aspects. In *1st berkeley symposium on energy efficient electronics* (pp. 9-12).
- [110] Yates, M., Akrami, M., & Javadi, A. A. (2021). Analysing the performance of liquid cooling designs in cylindrical lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 33, 100913.
- [111] Wang, J., Lu, S., Wang, Y., Li, C., & Wang, K. (2020). Effect analysis on thermal behavior enhancement of lithium-ion battery pack with different cooling structures. *Journal of energy storage*, 32, 101800.
- [112] Deng, T., Zhang, G., & Ran, Y. (2018). Study on thermal management of rectangular Li-ion battery with serpentine-channel cold plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 143-152.
- [113] Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., & Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied Thermal Engineering*, 94, 846-854.
- [114] Lan, C., Xu, J., Qiao, Y., & Ma, Y. (2016). Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes. *Applied Thermal Engineering*, 101, 284-292.
- [115] Van Gils, R. W., Danilov, D., Notten, P. H. L., Speetjens, M. F. M., & Nijmeijer, H. (2014). Battery thermal management by boiling heat-transfer. *Energy Conversion and Management*, 79, 9-17.
- [116] Pesaran, A. A. (2001). Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions. *Battery Man*, 43(5), 34-49.
- [117] Kalaf, O., Solyali, D., Asmael, M., Zeeshan, Q., Safaei, B., & Askir, A. (2021). Experimental and simulation study of liquid coolant battery thermal management

- system for electric vehicles: A review. *International Journal of Energy Research*, 45(5), 6495-6517.
- [118] He, J., Yang, X., & Zhang, G. (2019). A phase change material with enhanced thermal conductivity and secondary heat dissipation capability by introducing a binary thermal conductive skeleton for battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 148, 984-991.
- [119] Jiang, K., Liao, G., Jiaqiang, E., Zhang, F., Chen, J., & Leng, E. (2020). Thermal management technology of power lithium-ion batteries based on the phase transition of materials: A review. *Journal of Energy Storage*, 32, 101816.
- [120] Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 18, 246-258.
- [121] Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., ... & Rahman, S. A. (2019). Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview. *Energies*, 12(16), 3167.
- [122] Li, D., Wang, J., Ding, Y., Yao, H., & Huang, Y. (2019). Dynamic thermal management for industrial waste heat recovery based on phase change material thermal storage. *Applied energy*, 236, 1168-1182.
- [123] Ali, H. M., Saieed, A., Pao, W., & Ali, M. (2018). Copper foam/PCMs based heat sinks: an experimental study for electronic cooling systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 381-393.
- [124] Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467-490.
- [125] Pan, M., & Zhong, Y. (2018). Experimental and numerical investigation of a thermal management system for a Li-ion battery pack using cutting copper fiber sintered skeleton/paraffin composite phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 531-543.
- [126] Feng, P. H., Zhao, B. C., & Wang, R. Z. (2020). Thermophysical heat storage for cooling, heating, and power generation: A review. *Applied Thermal Engineering*, 166, 114728.
- [127] Jurinak, J. J., & Abdel-Khalik, S. I. (1978). Properties optimization for phase-change energy storage in air-based solar heating systems. *Solar Energy*, 21(5), 377-383.

- [128] Lane, G. A. (2018). *Solar Heat Storage: Volume II: Latent Heat Material*. CRC press.
- [129] Li, Q., Li, C., Du, Z., Jiang, F., & Ding, Y. (2019). A review of performance investigation and enhancement of shell and tube thermal energy storage device containing molten salt based phase change materials for medium and high temperature applications. *Applied Energy*, 255, 113806.
- [130] Elgafy, A., & Lafdi, K. (2005). Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials. *Carbon*, 43(15), 3067-3074.
- [131] Mehrabi-Kermani, M., Houshfar, E., & Ashjaee, M. (2019). A novel hybrid thermal management for Li-ion batteries using phase change materials embedded in copper foams combined with forced-air convection. *International Journal of Thermal Sciences*, 141, 47-61.
- [132] Wang, Z., Zhang, H., & Xia, X. (2017). Experimental investigation on the thermal behavior of cylindrical battery with composite paraffin and fin structure. *international journal of heat and mass transfer*, 109, 958-970.
- [133] Verma, A., & Rakshit, D. (2022). Performance analysis of PCM-fin combination for heat abatement of Li-ion battery pack in electric vehicles at high ambient temperature. *Thermal Science and Engineering Progress*, 32, 101314.
- [134] Liu, F., Wang, J., Liu, Y., Wang, F., Chen, Y., Du, Q., ... & Yang, N. (2022). Natural convection characteristics of honeycomb fin with different hole cells for battery phase-change material cooling systems. *Journal of Energy Storage*, 51, 104578.
- [135] Fan, R., Zheng, N., & Sun, Z. (2021). Evaluation of fin intensified phase change material systems for thermal management of Li-ion battery modules. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 166, 120753.
- [136] Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P., & Hu, Y. (2018). Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 33-41.
- [137] Samimi, F., Babapoor, A., Azizi, M., & Karimi, G. (2016). Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers. *Energy*, 96, 355-371.

- [138] Lin, Z., Wang, S., Huo, J., Hu, Y., Chen, J., Zhang, W., & Lee, E. (2011). Heat transfer characteristics and LED heat sink application of aluminum plate oscillating heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 31(14-15), 2221-2229.
- [139] Zhang, Z., & Wei, K. (2020). Experimental and numerical study of a passive thermal management system using flat heat pipes for lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 166, 114660.
- [140] Chen, M., & Li, J. (2020). Nanofluid-based pulsating heat pipe for thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32, 101715.
- [141] Behi, H., Karimi, D., Behi, M., Jaguemont, J., Ghanbarpour, M., Behnia, M., ... & Van Mierlo, J. (2020). Thermal management analysis using heat pipe in the high current discharging of lithium-ion battery in electric vehicles. *Journal of energy storage*, 32, 101893.
- [142] Qin, P., Liao, M., Zhang, D., Liu, Y., Sun, J., & Wang, Q. (2019). Experimental and numerical study on a novel hybrid battery thermal management system integrated forced-air convection and phase change material. *Energy Conversion and Management*, 195, 1371-1381.
- [143] Gao, Z., Deng, F., Yan, D., Zhu, H., An, Z., & Sun, P. (2022). Thermal performance of thermal management system coupling composite phase change material to water cooling with double s-shaped micro-channels for prismatic lithium-ion battery. *Journal of Energy Storage*, 45, 103490.
- [144] Akbarzadeh, M., Kalogiannis, T., Jin, L., Karimi, D., Van Mierlo, J., & Berecibar, M. (2022). Experimental and numerical thermal analysis of a lithium-ion battery module based on a novel liquid cooling plate embedded with phase change material. *Journal of Energy Storage*, 50, 104673.
- [145] Ping, P., Zhang, Y., Kong, D., & Du, J. (2021). Investigation on battery thermal management system combining phase changed material and liquid cooling considering non-uniform heat generation of battery. *Journal of Energy Storage*, 36, 102448.
- [146] Jiang, Z. Y., & Qu, Z. G. (2019). Lithium-ion battery thermal management using heat pipe and phase change material during discharge-charge cycle: A comprehensive numerical study. *Applied Energy*, 242, 378-392.

- [147] Eastman, J. A., Choi, U. S., Li, S., Thompson, L. J., & Lee, S. (1996). Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 457, 3.
- [148] Bianco, V. (2015). Vafai K. (Ed.), Manca O. (Ed.), Nardini S. *Heat Transfer Enhancement with Nanofluids*. New York, Boca Raton: CRC Press.
- [149] Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (2002). Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). *International journal of heat and mass transfer*, 45(4), 855-863.
- [150] Ganvir, R. B., Walke, P. V., & Kriplani, V. M. (2017). Heat transfer characteristics in nanofluid—a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 75, 451-460.
- [151] Gupta, M., Singh, V., Kumar, R., & Said, Z. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638-670.
- [152] Pak, B. C., & Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11(2), 151-170.
- [153] Xuan, Y., & Roetzel, W. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of heat and Mass transfer*, 43(19), 3701-3707.
- [154] Wang, X., Xu, X., & Choi, S. U. (1999). Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 13(4), 474-480.
- [155] Evans, W., Prasher, R., Fish, J., Meakin, P., Phelan, P., & Keblinski, P. (2008). Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(5-6), 1431-1438.
- [156] Özerinç, S., *Heat Transfer Enhancement With Nanofluids*, Middle East Technical University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Ankara, 2010, 147p. (Master's thesis).
- [157] Yu, C. J., Richter, A. G., Datta, A., Durbin, M. K., & Dutta, P. (1999). Observation of molecular layering in thin liquid films using X-ray reflectivity. *Physical Review Letters*, 82(11), 2326.
- [158] Yu, W., & Choi, S. U. S. (2003). The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *Journal of nanoparticle research*, 5, 167-171.

- [159] Maxwell, J. C. (1881). A treatise on electricity and magnetism: Pt. III. Magnetism. pt. IV. Electromagnetism (Vol. 2). Clarendon press.
- [160] Hamilton, R. L., & Crosser, O. K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, 1(3), 187-191.
- [161] Wasp, E. J., Kenny, J. P., & Gandhi, R. L. (1977). Solid--liquid flow: slurry pipeline transportation.[Pumps, valves, mechanical equipment, economics]. Ser. Bulk Mater. Handl.:(United States), 1(4).
- [162] Timofeeva, E. V., Gavrilov, A. N., McCloskey, J. M., Tolmachev, Y. V., Sprunt, S., Lopatina, L. M., & Selinger, J. V. (2007). Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. *Physical Review E*, 76(6), 061203.
- [163] Xuan, Y., Li, Q., & Hu, W. (2003). Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. *AIChE Journal*, 49(4), 1038-1043.
- [164] Bruggeman, D. A. G. (1935). The calculation of various physical constants of heterogeneous substances. I. The dielectric constants and conductivities of mixtures composed of isotropic substances. *Annals of Physics*, 416, 636-791.165
- [165] Ali, N., Teixeira, J. A., & Addali, A. (2018). A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2018.
- [166] Bahiraei, M., & Monavari, A. (2020). Thermohydraulic characteristics of a micro plate heat exchanger operated with nanofluid considering different nanoparticle shapes. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115621.
- [167] Nguyen, C. T., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S., & Mintsa, H. A. (2008). Viscosity data for Al₂O₃–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?. *International journal of thermal sciences*, 47(2), 103-111.
- [168] Halelfadl, S., Estellé, P., Aladag, B., Doner, N., & Maré, T. (2013). Viscosity of carbon nanotubes water-based nanofluids: Influence of concentration and temperature. *International Journal of Thermal Sciences*, 71, 111-117.
- [169] Ghanbarpour, M., Haghighi, E. B., & Khodabandeh, R. (2014). Thermal properties and rheological behavior of water based Al₂O₃ nanofluid as a heat transfer fluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53, 227-235.

- [170] Einstein, A. (1906). A new determination of molecular dimensions. *Ann. Phys.*, 19, 289-306.
- [171] Brinkman, H. C. (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of chemical physics*, 20(4), 571-571.
- [172] Batchelor, G. K. (1977). The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of fluid mechanics*, 83(1), 97-117.
- [173] Krieger, I. M., & Dougherty, T. J. (1959). Concentration dependence of the viscosity of suspensions. *Trans. Soc. Rheol*, 3(1), 137-152.
- [174] Bicerano, J., Douglas, J. F., & Brune, D. A. (1999). Model for the viscosity of particle dispersions.
- [175] Kim, G. H., Smith, K., Lee, K. J., Santhanagopalan, S., & Pesaran, A. (2011). Multi-domain modeling of lithium-ion batteries encompassing multi-physics in varied length scales. *Journal of the electrochemical society*, 158(8), A955.
- [176] Melcher, A., Ziebert, C., Lei, B., Rohde, M., & Seifert, H. J. (2014). Modeling and simulation of the thermal behavior of Li-ion cells. In *CEES-Conf., Environmental Testing And Safety Of Batteries and Fuel Cells*, Pfnztal-Berghausen.
- [177] Lee, K. J., Smith, K., Pesaran, A., & Kim, G. H. (2013). Three dimensional thermal-, electrical-, and electrochemical-coupled model for cylindrical wound large format lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 241, 20-32.
- [178] ANSYS Fluent Battery Module Manual, Release 23R1, 2023.
- [179] Li, G., & Li, S. (2015). Physics-based CFD simulation of lithium-ion battery under the FUDS driving cycle. *ECS Transactions*, 64(33), 1.
- [180] Ramadesigan, V., Northrop, P. W., De, S., Santhanagopalan, S., Braatz, R. D., & Subramanian, V. R. (2012). Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective. *Journal of the electrochemical society*, 159(3), R31.
- [181] Cai, L., & White, R. E. (2008). Reduction of model order based on proper orthogonal decomposition for lithium-ion battery simulations. *Journal of the Electrochemical Society*, 156(3), A154.
- [182] Newman, J., & Tiedemann, W. (1975). Porous-electrode theory with battery applications. *AIChE Journal*, 21(1), 25-41.

- [183] Hariharan, K. S., Tagade, P., & Ramachandran, S. (2018). *Mathematical Modeling of Lithium Batteries: From Electrochemical Models to State Estimator Algorithms*. Springer International Publishing.
- [184] Doyle, M., Fuller, T. F., & Newman, J. (1993). Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell. *Journal of the Electrochemical society*, 140(6), 1526.
- [185] Jokar, A., Rajabloo, B., Désilets, M., & Lacroix, M. (2016). Review of simplified Pseudo-two-Dimensional models of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 327, 44-55.
- [186] Saldaña, G., San Martín, J. I., Zamora, I., Asensio, F. J., & Oñederra, O. (2019). Analysis of the current electric battery models for electric vehicle simulation. *Energies*, 12(14), 2750.
- [187] He, H., Xiong, R., & Fan, J. (2011). Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *energies*, 4(4), 582-598.
- [188] Nikdel, M. (2014). Various battery models for various simulation studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 477-485.
- [189] Chen, M., & Rincon-Mora, G. A. (2006). Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance. *IEEE transactions on energy conversion*, 21(2), 504-511.
- [190] Zhou, W., Zheng, Y., Pan, Z., & Lu, Q. (2021). Review on the battery model and SOC estimation method. *Processes*, 9(9), 1685.
- [191] Kwon, K. H., Shin, C. B., Kang, T. H., & Kim, C. S. (2006). A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, 163(1), 151-157.
- [192] Kim, U. S., Shin, C. B., & Kim, C. S. (2008). Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, 180(2), 909-916.
- [193] ANSYS Inc, ANSYS Fluent. Release 23 R1, Help System. Theory Guide 2023.
- [194] Kim, U. S., Yi, J., Shin, C. B., Han, T., & Park, S. (2011). Modeling the dependence of the discharge behavior of a lithium-ion battery on the environmental temperature. *Journal of The Electrochemical Society*, 158(5), A611.

- [195] Tu J., Yeoh G-H., Liu C., (Engin, T.), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Temelleri ve Uygulamaları Palme Yayınevi, Ankara, Türkiye, 2020, 477 s.
- [196] Monika, K., Chakraborty, C., Roy, S., Dinda, S., Singh, S. A., & Datta, S. P. (2021). Parametric investigation to optimize the thermal management of pouch type lithium-ion batteries with mini-channel cold plates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 164, 120568.
- [197] Pesaran, A. A., Vlahinos, A., & Burch, S. D. (1997). Thermal performance of EV and HEV battery modules and packs. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory.
- [198] Gu, W. B., & Wang, C. Y. (2000). Thermal-electrochemical modeling of battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(8), 2910.
- [199] Dao, T. S., Vyasarayani, C. P., & McPhee, J. (2012). Simplification and order reduction of lithium-ion battery model based on porous-electrode theory. *Journal of Power Sources*, 198, 329-337.
- [200] Lan, C., Xu, J., Qiao, Y., & Ma, Y. (2016). Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes. *Applied Thermal Engineering*, 101, 284-292.
- [201] Alsarraf, J., Moradikazerouni, A., Shahsavar, A., Afrand, M., Salehipour, H., & Tran, M. D. (2019). Hydrothermal analysis of turbulent boehmite alumina nanofluid flow with different nanoparticle shapes in a minichannel heat exchanger using two-phase mixture model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 520, 275-288.
- [202] Mueller, S., Llewellyn, E. W., & Mader, H. M. (2010). The rheology of suspensions of solid particles. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2116), 1201-1228.
- [203] Arani, A. A. A., Sadripour, S., & Kermani, S. (2017). Nanoparticle shape effects on thermal-hydraulic performance of boehmite alumina nanofluids in a sinusoidal-wavy mini-channel with phase shift and variable wavelength. *International Journal of Mechanical Sciences*, 128, 550-563.
- [204] Ooi, E. H., & Popov, V. (2013). Numerical study of influence of nanoparticle shape on the natural convection in Cu-water nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*, 65, 178-188.

- [205] Timofeeva, E. V., Routbort, J. L., & Singh, D. (2009). Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. *Journal of applied physics*, 106(1), 014304.
- [206] Voller, V. R., & Prakash, C. (1987). A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International journal of heat and mass transfer*, 30(8), 1709-1719.
- [207] Yang, H., Zhang, H., Sui, Y., & Yang, C. (2018). Numerical analysis and experimental visualization of phase change material melting process for thermal management of cylindrical power battery. *Applied Thermal Engineering*, 128, 489-499.
- [208] Sciacovelli, A., Colella, F., & Verda, V. (2013). Melting of PCM in a thermal energy storage unit: Numerical investigation and effect of nanoparticle enhancement. *International Journal of Energy Research*, 37(13), 1610-1623.
- [209] Brent, A. D., Voller, V. R., & Reid, K. T. J. (1988). Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal. *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, 13(3), 297-318.
- [210] Rubitherm İnternet sitesi, 2022, www.RUBITHERM.com
- [211] Lin, C., Chen, K., Sun, F., Tang, P., & Zhao, H. (2009, September). Research on thermo-physical properties identification and thermal analysis of EV Li-ion battery. In *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1643-1648). IEEE.
- [212] Qin, Z., Ji, C., Low, Z., Dubey, S., Choo, F. H., & Duan, F. (2017). Effect of fin location on the latent heat storage: a numerical study. *Energy Procedia*, 143, 320-326.
- [213] Asif, M., & Dhiman, A. K. (2021). Effect of alumina nanoparticle shape in a triangular porous array of heated periodic pin-fins. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38, 704-715.
- [214] Shiravi, A. H., Firoozzadeh, M., Bostani, H., Shafiee, M., & Bozorgmehrian, M. (2020). Experimental study on carbon nanofluid pressure drop and pumping power. *Advances in Nanochemistry*, 2(1), 27-31.
- [215] Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2017). Transient electrochemical heat transfer modeling and experimental validation of a large sized LiFePO₄/graphite battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 1239-1251.