

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ ISIL MODELLENMESİ VE
SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Fatih YİĞİT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tarkan KOCA

EKİM 2025

**T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ ISIL MODELLENMESİ VE
SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Fatih YİĞİT
(36223618902)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tarkan KOCA

EKİM 2025

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve deneyimiyle bana rehberlik eden, yönlendirmeleriyle sürecin başarıyla tamamlanmasına büyük katkı sağlayan danışmanım Sayın Doç. Dr. Tarkan KOCA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca olduğu gibi, bu tez sürecinde de yanımda olan, sabır ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim. Özellikle manevi desteğini her zaman hissettiren aile bireylerime minnettarlığımı içtenlikle ifade etmek isterim.



ONUR SÖZÜ

‘Elektrikli Araç Bataryalarının Isıl Modellenmesi ve Simülasyonu’ başlıklı bu yüksek lisans tezinin, bilimsel etik kurallara uygun biçimde tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım tüm kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada usulüne uygun gösterildiğini onurumla beyan ederim.

Mehmet Fatih YİĞİT



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Enerji Depolama Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi ve Önemi	3
2.2 Batarya Teknolojilerinin Gelişimi ve Günümüzdeki Durumu	4
2.3 Lityum-İyon Bataryaların Yapısı, Çalışma Prensibi ve Temel Parametreleri	8
2.4 Batarya Hücrelerinin Termal Davranışı.....	11
2.5 Batarya Isıl Yönetim Sistemleri (BTMS)	14
2.6 Termal Yönetim Malzemeleri.....	19
2.7 Bataryaların Isıl Modellemesi ve Simülasyonu	23
2.8 Batarya Isıl Modellemesi Üzerine Yapılan Simülasyon Çalışmalarının İncelenmesi	27
2.9 Güncel Akademik ve Endüstriyel Gelişmeler	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM	39
3.1 Batarya Hücresi ve Termal Özellikler	39
3.2 Sayısal Modelleme ve Varsayımlar	40
3.3 Kullanılan Yazılım ve Parametreler	43
3.4 Malzeme Özellikleri ve Sınır Şartları	44
3.5 Enerji Denklemi.....	46
3.6 Mesh Yapısı ve Kalite Analizi.....	48
3.7 Simülasyon Senaryoları	49
3.8 Model Doğrulama ve Literatürle Uyum	52
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	56
4.1 Model Geometrisi, Mesh ve Sınır Koşulları.....	56
4.2 Sabit Akımlı Deşarj Senaryoları	59
4.3 WLTC Senaryosunda Termal Davranış.....	63
4.4 Isı Akısı ve Sıcaklık Gradyeni Analizi	66
4.5 Mesh Bağımsızlık ve Model Doğrulama	68
4.6 Sonuçların Değerlendirilmesi ve Literatür ile Karşılaştırma.....	70
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Kimyasal yapılarına göre batarya türlerinin sınıflandırılması.....	7
Çizelge 3.1: Prizmatik hücrenin aktif malzeme ve kasa bölgeleri için termal özellikleri..	40
Çizelge 4.1: Farklı senaryolarda merkez-kenar noktaları arasında gözlemlenen sıcaklık..	67
Çizelge 4.2: Mesh bağımsızlık analizinde elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.....	69



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1: Prizmatik hücre modelinin yapısal mesh planı.....	42
Şekil 3.2: NTGK modelinde kullanılan U(SOC) ve Y(SOC) fonksiyonlarına ait örnek karakteristik eğriler.....	44
Şekil 3.3: WLTC sürüş döngüsü boyunca hücre akım profili.....	51
Şekil 3.4: 2C sabit akım deşarj senaryosu sonunda hücrenin orta kesit düzleminde sıcaklık dağılımı.....	54
Şekil 4.1: ANSYS Workbench ortamında oluşturulan $110 \times 50 \times 15$ mm boyutlarındaki prizmatik batarya hücresi modelinin üç boyutlu görünümü	56
Şekil 4.2: $110 \times 50 \times 15$ mm boyutlarındaki prizmatik batarya hücresine ait oluşturulan mesh yapısı.....	57
Şekil 4.3: 0,5C deşarj senaryosunda 1800. saniyede elde edilen batarya yüzey sıcaklık dağılımı.....	58
Şekil 4.4: Üç senaryoya ait zaman-sıcaklık grafikleri karşılaştırması (0,5C, 1C ve 2C)	60
Şekil 4.5a: 0,5C deşarj senaryosu sıcaklık kontur haritası.....	61
Şekil 4.5b: 1C deşarj senaryosu sıcaklık kontur haritası.....	62
Şekil 4.5c: 2C deşarj senaryosu sıcaklık kontur haritası.....	63
Şekil 4.6: WLTC sürüş döngüsünde batarya hücresine uygulanan değişken akım profili.....	64
Şekil 4.7: WLTC senaryosunda batarya hücresinin maksimum sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi.....	65
Şekil 4.8: WLTC sürüş döngüsünde 1800. saniyede batarya hücresinde oluşan sıcaklık dağılım konturu.....	65
Şekil 4.9: 2C sabit deşarj senaryosunda batarya hücresinde oluşan ısı akısı yönleri.....	67
Şekil 4.10: Farklı mesh yapılandırmalarıyla elde edilen sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması.....	69

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

°C	: Santigrat Derece
ANSYS Fluent	: CFD Tabanlı Simülasyon Yazılımı
BMS	: Battery Management System (Batarya Yönetim Sistemi)
BTMS	: Battery Thermal Management System (Batarya Isıl Yönetim Sistemi)
cp	: Özgül ısı kapasitesi (J/kg.K)
C-RATE	: Akım Oranı (Akım hızını (deşarj/şarj oranını) ifade eder.)
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
EV	: Electric Vehicle (Elektrikli Araç)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
HEV	: Hybrid Electric Vehicle (Hibrit Elektrikli Araç)
I	: Akım (A)
mAh	: Miliamper-saat (kapasite birimi)
MATLAB	: Matematiksel Modelleme ve Hesaplama Aracı
MSE	: Mean Squared Error (Ortalama Hata Kareleri)
NMC	: Nickel Manganese Cobalt (Nikel Manganez Kobalt Katot Kimyası)
NTGK	: Newman-Tiedemann-Gu-Kim Batarya Modeli
OCV	: Open Circuit Voltage (Açık Devre Gerilimi)
PCM	: Phase Change Material (Faz Değişim Malzemesi)
Q	: Isı Miktarı (J)
R	: İç Direnç (Ω)
SoC	: State of Charge (Şarj Durumu)
SoH	: State of Health (Sağlık Durumu)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
t	: Zaman (s)
TIM	: Thermal Interface Material (Isıl Ara Yüzey Malzemesi)
U(SoC,T)	: Açık Devre Gerilim Fonksiyonu
V	: Gerilim (V)
Wh/kg	: Özgül enerji birimi
WLTP	: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
WLTC	: Worldwide Harmonized Light-duty Vehicles Test Cycle
Y(SoC,T)	: Isı Üretim Fonksiyonu
ΔT	: Sıcaklık Farkı ($^{\circ}\text{C}$)
λ	: Isıl İletkenlik (W/m.K)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ ISIL MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

MEHMET FATİH YİĞİT

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

81+VIII sayfa

2025

Danışman: Doç. Dr. Tarkan KOCA

Bu tezde, $110 \times 50 \times 15$ mm boyutlarındaki prizmatik bir lityum-iyon batarya hücresinin ısı davranışı, NTGK (Newman-Tiedemann-Gu-Kim) yaklaşımının Joule bileşeni esas alınarak gerçekleştirilen sayısal analizle değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında entropik ısı terimi ihmal edilmiş, yalnızca Joule ısı dikkate alınmıştır. Batarya çalışması sırasında ortaya çıkan ısı, hem güvenliğin hem de performansın sürdürülebilirliği açısından kritik rol oynamaktadır. Özellikle yüksek C-oranlarında yapılan deşarj işlemlerinde, hücre içinde oluşan sıcaklık gradyanları termal kaçak riskini artırmakta ve hücre ömrünü kısaltmaktadır. Bu çalışmada NTGK yaklaşımındaki entropik ısı terimi tüm senaryolarda modele dahil edilmemiş, ısı üretimi yalnızca Joule bileşeni üzerinden değerlendirilmiştir.

Çalışmada ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak üç boyutlu bir termal simülasyon modeli oluşturulmuştur. Hücre, aktif malzeme ve alüminyum dış kasa olmak üzere iki bölge halinde modellenmiştir; iç ısı üretimi NTGK modelinin Joule bileşenine göre hesaplanmıştır. 0,5 C, 1 C, 2 C ve WLTC sürüş döngüsü olmak üzere dört farklı senaryo analiz edilmiştir; mesh bağımsızlık testi ve enerji bilançosu denetimleri ile elde edilen sonuçların güvenilirliği teyit edilmiştir.

Simülasyon çıktıları, artan deşarj oranlarıyla birlikte maksimum sıcaklık değerlerinde belirgin bir yükselme olduğunu göstermiştir. 2 C senaryosunda tepe sıcaklık yaklaşık $47,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşırken; 1 C senaryosunda bu değer yaklaşık $39,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ düzeyinde kalmıştır. WLTC döngüsü altında ise maksimum sıcaklık $35,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak elde edilmiş ve sıcaklık artışının dinamiği sabit akım senaryolarından farklılık göstermiştir.

Elde edilen bulgular, NTGK tabanlı bu sayısal yaklaşımın prizmatik hücrelerin ısı analizlerinde hızlı ve güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymakta; mühendislik uygulamaları ve termal yönetim stratejilerinin geliştirilmesine önemli bir zemin sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Lityum-iyon batarya, prizmatik hücre, NTGK modeli, termal modelleme, ANSYS Fluent, ısı yönetim, simülasyon

ABSTRACT

Master Thesis

THERMAL MODELING AND SIMULATION OF ELECTRIC VEHICLE BATTERIES Mehmet Fatih YİĞİT

Inonu University
Graduate School of Applied and Natural Science
Department of Mechanical Engineering

81+VIII pages

2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tarkan KOCA

In this thesis, the thermal behavior of a prismatic lithium-ion battery cell with dimensions of $110 \times 50 \times 15$ mm was analyzed through numerical simulations based on the Joule heat component of the NTGK (Newman-Tiedemann-Gu-Kim) model. The entropic heat term was neglected, and only Joule heat generation was considered. The heat generated during battery operation plays a critical role in ensuring both performance and safety. In particular, under high C-rate discharges, internal temperature gradients significantly increase the risk of thermal runaway and shorten the cell lifespan. In this study, the entropic heat term was excluded; heat generation was evaluated solely via Joule losses.

A three-dimensional thermal simulation model was developed using ANSYS Fluent software. The cell was modeled in two regions: the active material and the aluminum casing. Internal heat generation was calculated according to the Joule contribution of the NTGK model. Four discharge scenarios—0.5 C, 1 C, 2 C, and the WLTC driving cycle—were simulated, and the reliability of the results was validated through mesh independence tests and energy balance checks.

Simulation results showed a clear rise in maximum temperature with increasing discharge rates. Under the 2 C scenario, the peak temperature reached approximately 47.6 °C, while it remained around 39.1 °C at 1 C. Under the WLTC profile, the maximum temperature was obtained as 35.2 °C, with dynamics differing from those observed in constant-current scenarios.

These findings indicate that the NTGK-based numerical approach provides fast and reliable results for the thermal analysis of prismatic cells and offers a solid foundation for engineering applications and the design of thermal management strategies.

Keywords: Lithium-ion battery, prismatic cell, NTGK model, thermal modeling, ANSYS Fluent, thermal management, simulation

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan enerji talebi, özellikle taşınabilir sistemler ve ulaşım teknolojilerinde önemli bir dönüşümü beraberinde getirmiştir. Fosil enerjiye olan bağımlılığın azaltılması ve çevreye verilen etkinin en aza indirilmesi yönündeki çabalar, enerji depolama teknolojilerinin günümüzdeki stratejik konumunu daha da öne çıkarmaktadır. Bu dönüşümün merkezinde yer alan batarya sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, elektrikli araçların yaygınlaşması ve mobil cihazların verimli çalışması gibi pek çok uygulamada kritik bir işlev görmektedir.

Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, hafif yapıları, uzun çevrim ömürleri ve düşük kendi kendine deşarj oranları sayesinde günümüzde en yaygın kullanılan batarya türüdür. Elektrikli araçlardan taşınabilir elektronik cihazlara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bununla birlikte, bu teknolojinin hızla yaygınlaşması performans, güvenlik ve ömür gibi temel parametrelerin daha titiz şekilde yönetilmesini zorunlu kılmaktadır.

Batarya performansı büyük ölçüde çalışma sıcaklığına bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda iç direnç artmakta, enerji aktarımı yavaşlamakta ve verimlilik azalmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise malzeme yapılarında bozunmalar hızlanmakta, batarya ömrü kısalmakta ve güvenlik riskleri ortaya çıkmaktadır. Özellikle hızlı şarj veya yüksek akım deşarjı sırasında hücre sıcaklığının kritik değerlere ulaşması, termal kaçak gibi tehlikeli durumlara neden olabilmektedir. Bu nedenle bataryaların güvenli sıcaklık aralıklarında tutulması, hem performans hem de güvenlik açısından büyük önem taşımaktadır.

Bataryaların güvenli sıcaklık aralıklarında tutulması için bataryalarda oluşan ısının etkin biçimde yönetilmesini sağlayan çeşitli ısı kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Hava ve sıvı soğutmalı sistemlerin yanı sıra faz değişim malzemelerine dayalı çözümler literatürde geniş yer bulmuştur. Ancak her batarya türü ve kullanım koşulu için en uygun ısı yönetim stratejisinin belirlenmesi, kapsamlı analiz ve optimizasyon çalışmaları gerektirmektedir.

Deneyisel yöntemler çoğu zaman maliyetli, zaman alıcı veya güvenlik açısından riskli olabilmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık ya da yoğun akım altında ortaya

ıkabilecek senaryoların gerçek ortamda test edilmesi zordur. Bu nedenle sayısal modelleme ve simülasyon yöntemleri önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemler sayesinde farklı malzeme yapıları, kullanım koşulları ve soğutma stratejileri sanal ortamda test edilebilmekte, böylece sistem tasarımlarına doğrudan katkı sağlanabilmektedir.

Prizmatik lityum-iyon batarya hücrelerinin ($110 \times 50 \times 15$ mm) termal davranışı, güvenlik ve performans açısından kritik önemdedir. Bu tez kapsamında NTGK (Newman-Tiedemann-Gu-Kim) yarı-ampirik modeli esas alınarak ANSYS Fluent ortamında üç boyutlu termal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Analizlerde yalnızca Joule ısısı dikkate alınmış; doğal konveksiyon sınır koşulları altında 0,5 C, 1 C ve 2 C sabit akım deşarj senaryoları ile WLTC (Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycles) sürüş profili değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, deşarj oranı yükseldikçe maksimum hücre sıcaklığının hızla arttığını ve 2 C senaryosunda güvenlik sınırlarına yaklaşıldığını ortaya koymuştur. WLTC profili altında ise sıcaklık değişiminin sabit akım senaryolarına göre farklı bir eğilim sergilediği görülmüştür. Sonuçlar, mevcut soğutma stratejilerinin iyileştirilerek termal kaçak riskinin azaltılması ve hücre ömrünün uzatılması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, prizmatik lityum-iyon bataryaların ısıl davranışını öngörebilecek güvenilir bir sayısal altyapı geliştirmektir. Böylece benzer hücre konfigürasyonları için uygun soğutma yöntemlerinin seçimine ve ısıl yönetim sistemlerinin tasarımına doğrudan katkı sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca literatürde sınırlı sayıda bulunan NTGK tabanlı üç boyutlu modelleme çalışmalarına ek olarak, elektrikli araçlarda kullanılan prizmatik hücreler için zgn bir yaklaşım ortaya konmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Enerji Depolama Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi ve Önemi

Enerji üretimi ile tüketimi arasındaki zaman farkı, sistemlerin daha esnek ve sürdürülebilir çözümlerle desteklenmesini zorunlu kılmaktadır. Elektrik şebekelerinde yük dengeleme, ani talep artışlarını karşılama ve arz sürekliliğini sağlama gibi işlevleriyle enerji depolama teknolojileri, günümüz enerji altyapısının temel unsurlarından biri haline gelmiştir. 20. yüzyılın başlarından itibaren kullanılan pompalı hidroelektrik sistemler, bugün hâlen küresel enerji depolama kapasitesinin büyük bölümünü oluşturmaktadır (Hunt, Freitas ve Pereira Junior, 2020; Barbour ve diğ., 2021). Bununla birlikte, sıkıştırılmış hava ve volan tabanlı sistemler gibi diğer mekanik yaklaşımlar da çeşitli ölçeklerde uygulanmış ve zamanla yerini elektrokimyasal çözümlere bırakmıştır.

19. yüzyıldan bu yana, elektrokimyasal batarya sistemlerinde önemli yapısal ve kimyasal gelişmeler yaşanmıştır. Fransız bilim insanı Gaston Planté'nin 1859'da kurşun-asit aküyü icat etmesi, ilk şarj edilebilir bataryanın ortaya çıkışını sağlamıştır (Whittingham, 2019). Kurşun-asit bataryalar, düşük maliyetleri ve yüksek akım sağlama yetenekleri sayesinde 20. yüzyıl boyunca otomotiv marş bataryaları ve kesintisiz güç kaynakları gibi alanlarda yaygın olarak kullanıldı ve günümüzde de adet bazında en yaygın batarya türü olmayı sürdürmektedir (Whittingham, 2019). 20. yüzyılın başlarında nikel-kadmiyum (Ni-Cd) ve nikel-demir bataryalar geliştirilmiş; 1960'larda nikel-kadmiyum bataryalar taşınabilir cihazlarda kullanıma girmiştir. Ancak Ni-Cd bataryaların kadmiyum içermesi çevresel açıdan sakıncalı olduğundan, ilerleyen yıllarda yerini nikel-metal hidrit (Ni-MH) bataryalara bırakmıştır. Ni-MH bataryalar özellikle 1990'larda tüketici elektroniğinde ve ilk hibrit elektrikli araçlarda önemli bir rol oynamıştır. Bunu izleyen dönemde lityum-iyon bataryaların geliştirilmesi ve 1990'ların başından itibaren ticarileşmesiyle, taşınabilir elektronik ve daha sonra elektrikli araçlar için yüksek enerji yoğunluklu çözümler yaygınlaşmıştır (Whittingham, 2019).

Elektrik depolama teknolojilerinin gelişimi, enerji arz-talep dengesinin sağlanması ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu açısından büyük önem taşımaktadır. Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir kaynaklar kesintili üretim yaptığından, üretilen fazla enerjinin depolanıp gerektiğinde kullanılması, enerji sistemlerinin kararlılığı için oldukça önemlidir. Bu bağlamda, elektrokimyasal batarya sistemlerinin yanı sıra termal enerji depolama (ısıtılmış/soğutulmuş maddelerde enerji depolama), hidrojen gibi

kimyasal enerji taşıyıcıları (fazla elektriğin su elektroliziyle hidrojene dönüştürülmesi) ve süper kapasitörler gibi farklı teknolojiler de araştırılmış ve uygulanmıştır (Mitali ve diğ., 2022). Özellikle son yıllarda, iklim değişikliğiyle mücadele ve düşük karbonlu ekonomiye geçiş hedefleri, enerji depolama sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Bu eğilim, talebin son yıllarda hızla artmasıyla da doğrulanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre küresel batarya enerji depolama talebi 2021'den 2022'ye %65 artarak yaklaşık 330 GWh'den 550 GWh seviyesine yükselmiştir (International Energy Agency [IEA], 2023). Söz konusu dramatik büyüme, elektrikli araçlar ve şebeke ölçekli depolama projelerinin hızla yaygınlaştığını gösterirken, enerji depolama teknolojilerinin stratejik önemini de ortaya koymaktadır. Dolayısıyla mekanik, termal ve elektrokimyasal yaklaşımlardan oluşan enerji depolama teknolojileri, birbirini tamamlayan rolleriyle hem şebeke güvenilirliğini hem de düşük karbonlu dönüşümü destekleyen güncel enerji altyapısının ayrılmaz bileşenleri hâline gelmiştir (Koochi-Fayegh ve Rosen, 2020; Mitali ve diğ., 2022).

2.2. Batarya Teknolojilerinin Gelişimi ve Günümüzdeki Durumu

Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrokimyasal reaksiyonlar aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştüren depolama birimleridir; temel bileşenleri anot, katot, elektrolit ve ayırıcıdan oluşur (Michaelides, 2012; Goodenough ve Park, 2013; Bernardi ve diğ., 1985). Teknik olarak tek bir hücre “pil”i ifade eder; daha yüksek gerilim veya kapasite gerektiğinde hücreler seri ve/veya paralel bağlanarak batarya paketleri oluşturulur (Goodenough ve Park, 2013; He ve diğ., 2022). Açık devre durumunda iki elektrot arasındaki potansiyel fark açık devre gerilimi (OCV) olarak adlandırılır; devre tamamlandığında anot oksitlenir, katot indirgenir ve dış devrede akım oluşur (Goodenough ve Park, 2013). Bu temel yapı ve çalışma prensipleri, bataryaların taşınabilir elektroniklerden elektrikli araçlara ve şebeke ölçekli enerji depolamaya kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır.

Batarya teknolojileri, elektrik enerjisinin depolanmasına yönelik çözümler içinde tarihsel olarak en hızlı gelişen sistemlerden biridir. Teknolojinin gelişimi boyunca farklı kimyasal yapıya sahip hücre tipleri geliştirilmiş ve her yeni nesil, enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, güç çıkışı ve güvenlik açısından önceki kuşaklara göre önemli iyileştirmeler sunmuştur. 19. yüzyılın ortalarında geliştirilen kurşun-asit bataryalar, şarj edilebilir batarya sistemlerinin ilk örneğini oluşturmuş; düşük maliyetleri ve yüksek anlık akım kapasiteleri

sayesinde özellikle otomotiv sektöründe uzun yıllar boyunca tercih edilmiştir (Whittingham, 2019). Ancak özgül enerji değerlerinin düşük olması (~30-50 Wh/kg) ve hacim-ağırlık oranlarının elverişsizliği, anılan sistemlerin daha ileri uygulamalarda yetersiz kalmasına neden olmuştur. Söz konusu sınırlamalar, daha yüksek enerji yoğunluğu sunan alternatif kimyasal sistemlerin araştırılmasını zorunlu kılmıştır.

20. yüzyılın ortalarından itibaren nikel temelli batarya teknolojileri ön plana çıkmıştır. Nikel-kadmiyum (Ni-Cd) bataryalar, her ne kadar 1900'lü yılların başında geliştirilmiş olsa da, özellikle 1950'lerden itibaren taşınabilir elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlgili bataryalar, kadmiyumun toksik yapısı ve hafıza etkisi gibi bazı dezavantajlara sahip olmasına rağmen, dönemin koşullarında şarj edilebilirlik ve dayanıklılık açısından önemli avantajlar sunmuştur. 1980'li yıllarda geliştirilen nikel-metal hidrit (Ni-MH) bataryalar ise, kadmiyum yerine hidrojen emici alaşımlar kullanılarak daha çevreci bir alternatif oluşturmuş ve zamanla Ni-Cd bataryaların yerini almıştır. Yaklaşık 70-80 Wh/kg aralığında özgül enerji sunan Ni-MH bataryalar, 1990'lı yıllarda cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve hibrit araçlar (örneğin ilk nesil Toyota Prius) gibi çeşitli uygulama alanlarında yaygın biçimde kullanılmıştır. Bu gelişmelerin ardından lityum-iyon kimyasının ticarileşmesiyle batarya teknolojilerinde yeni bir dönem başlamıştır.

Batarya teknolojilerindeki en büyük atılım, lityum-iyon (Li-ion) bataryaların geliştirilmesiyle yaşanmıştır. 1970'li yıllarda lityum metal anotlu ilk deneysel bataryalar üzerine çalışmalar yapılmış; ancak lityumun yüksek reaktivitesi nedeniyle ciddi güvenlik sorunları ortaya çıkmıştır. Söz konusu alandaki önemli bir gelişme, 1980 yılında Goodenough ve ekibinin lityum kobalt oksit (LiCoO_2) katot malzemesini keşfetmesi ve 1985'te Yoshino'nun karbon (grafit) anot kullanarak ilk Li-ion hücre prototipini üretmesiyle gerçekleşmiştir (Whittingham, 2019). 1991 yılında Sony tarafından ilk ticari Li-ion bataryanın piyasaya sürülmesiyle birlikte belirtilen teknoloji hızla yaygınlık kazanmıştır. Lityum-iyon bataryalar, birim hacim veya kütle başına yüksek miktarda enerji depolayabilmeleri (özgül enerji günümüzde 150-250 Wh/kg aralığına ulaşmıştır) ve uzun çevrim ömrü sunmaları sayesinde taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Luo ve diğ., 2015). Söz konusu yüksek enerji ve güç yoğunluğu, lityum iyonlarının elektrot malzemelerine interkale olabilen son derece hafif yapısından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, Li-ion bataryaların hafıza etkisine sahip

olmamaları ve düşük kendi kendine deşarj oranları, kullanıcı deneyimini olumlu yönde etkilemektedir (Luo ve diğ., 2015).

Günümüzde batarya teknolojilerinde lityum-iyon kimyası baskın konumda yer almakla birlikte, ilgili teknoloji de kendi içinde sürekli olarak evrim geçirmektedir. Farklı katot kimyaları (örneğin lityum kobalt oksit (LCO), nikel-mangan-kobalt oksit (NMC), nikel-kobalt-alüminyum oksit (NCA) ve lityum demir fosfat (LFP)) ile birlikte çeşitli anot malzemeleri (grafit, lityum titanat ve silisyum katkılı grafit gibi) geliştirilerek enerji yoğunluğu, güvenlik ve maliyet açısından önemli iyileştirmeler sağlanmaktadır. Örneğin, LFP katot kimyasına sahip Li-ion hücreler, nikel ve kobalt içeren katotlara kıyasla daha düşük enerji yoğunluğu sunmalarına rağmen, yüksek termal kararlılıkları ve uzun ömürleri nedeniyle özellikle elektrikli otobüs gibi uygulamalarda tercih edilmektedir (Mitali ve diğ., 2022). Diğer yandan, NMC (LiNiMnCoO_2) ve NCA (LiNiCoAlO_2) gibi yüksek enerji yoğunluklu katotlar, günümüz elektrikli otomobillerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Anot tarafında ise, grafitin teorik kapasite sınırına ulaşılmış olması nedeniyle araştırmalar silisyum esaslı anotlara yönelmiştir. Silikon bazlı anotlar, grafitte göre daha yüksek kapasite sunmakla birlikte, şarj-deşarj döngüsünde yaşanan hacimsel genleşme nedeniyle ticari uygulamalarda bazı sınırlamalarla karşılaşmaktadır. Dolayısıyla, güncel yüksek enerji yoğunluklu hücrelerde genellikle silisyum katkılı grafit anotlar tercih edilmektedir.

Endüstride lityum-iyon batarya üretimi zamanla büyük ölçeklere ulaşmış ve bu ölçek genişlemesiyle birlikte maliyetlerde önemli düşüşler yaşanmıştır. Özellikle 2010'ların başından 2020'li yıllara kadar geçen süreçte, ölçek ekonomileri ve teknolojik ilerlemeler sayesinde lityum-iyon bataryaların birim enerji (kWh) başına ortalama maliyeti yaklaşık %85 oranında azalmıştır (International Energy Agency [IEA], 2023). Söz konusu maliyet düşüşü, elektrikli araçların daha erişilebilir hale gelmesini sağlarken, aynı zamanda şebeke düzeyinde enerji depolama projelerinin yaygınlaşmasına da katkıda bulunmuştur. Bugün itibarıyla lityum-iyon bataryalar enerji depolama pazarının merkezinde yer almakta, ancak ilgili alanda Ar-Ge çalışmaları da hız kesmeden devam etmektedir. Katı hal bataryalar, lityum-kükürt (Li-S) ve sodyum-iyon bataryalar gibi yeni nesil teknolojiler, mevcut sistemlerin kapasite ve verimlilik sınırlamalarını aşmayı hedefleyen önemli alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, batarya teknolojisinin evrimi, ilk kurşun-asit akülerden günümüzün ileri düzey lityum-iyon sistemlerine kadar uzanan süreçte sürekli artan bir performans, güvenlik ve çeşitlilikle şekillenmiştir. Belirtilen gelişimin doğal bir sonucu olarak, bataryalar bugün taşınabilir

elektronik cihazlardan elektrikli ulaşım sistemlerine ve şebeke dengelemesine kadar pek çok alanda kritik bir rol üstlenmektedir (Mitali ve diğ., 2022).

Bataryalar farklı ölçütlere göre sınıflandırılmaktadır. En temel ayırım, primer (şarj edilemeyen) ve sekonder (şarj edilebilen) bataryalar arasında yapılır (Linden ve Reddy, 2002). Primer bataryalar tek kullanımlık olup genellikle düşük güç gerektiren cihazlarda kullanılırken, sekonder bataryalar yeniden şarj edilebilme özellikleri sayesinde taşınabilir elektroniklerden elektrikli araçlara kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir (Tarascon ve Armand, 2001).

Kimyasal sistemlere göre yapılan sınıflandırmada ise kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel-metal hidrit ve lityum-iyon bataryalar öne çıkmaktadır (Buchmann, 2011). Her bir batarya türünün avantajları ve sınırlılıkları farklıdır: kurşun-asit bataryalar düşük maliyetleriyle öne çıkarken, lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrüyle günümüzde en yaygın kullanılan sistem haline gelmiştir (Goodenough ve Park, 2013).

Çizelge 2.1: Kimyasal yapılarına göre batarya türlerinin sınıflandırılması.

Batarya Türü	Kimyasal Yapısı	Avantajları	Dezavantajları	Yaygın Kullanım Alanları
Kurşun-Asit	Kurşun elektrotlar, sülfürik asit elektrolit	Düşük maliyet, yüksek akım kapasitesi	Düşük enerji yoğunluğu, ağır yapı	Otomotiv marş aküleri, UPS sistemleri
Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd)	Nikel ve kadmiyum elektrotlar, alkalin elektrolit	Uzun ömür, dayanıklılık	Hafıza etkisi, çevreye zararlı kadmiyum içeriği	Elektrikli el aletleri, bazı endüstriyel uygulamalar
Nikel-Metal Hidrit (Ni-MH)	Nikel elektrot, metal hidrit alaşım	Yüksek kapasite, düşük hafıza etkisi	Yüksek kendi kendine deşarj, daha kısa çevrim ömrü	Hibrit araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar
Lityum-İyon (Li-ion)	Lityum bileşikleri ve karbon bazlı elektrotlar	Yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, hafif yapı	Yüksek maliyet, termal kaçak riski	Taşınabilir elektronikler, elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri

2.3. Lityum-İyon Bataryaların Yapısı, Çalışma Prensibi ve Temel Parametreleri

Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar, günümüzde en yaygın kullanılan şarj edilebilir batarya türü olup, bir elektrokimyasal hücrenin sahip olması gereken tüm temel bileşenleri içermektedir. Tipik bir Li-ion hücre; anot (negatif elektrot), katot (pozitif elektrot), iki elektrodu birbirinden ayıran ayırıcı ve lityum iyonlarının hareketini sağlayan elektrolitten oluşur (Goodenough ve Park, 2013). Anot malzemesi çoğunlukla grafiten üretilir ve şarj sırasında lityum iyonlarını yapısında depolar (örneğin LiC_6 formunda). Katot ise genellikle lityum içeren metal oksit bileşiklerinden oluşur; örnek olarak lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum demir fosfat (LiFePO_4) ya da lityum nikel mangan kobalt oksit ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) gibi yapılar verilebilir. Anot ile katot arasında yer alan ayırıcı, polipropilen ya da polietilen gibi poliolefin bazlı mikrogözenekli bir membran olup, elektron geçişini engellerken lityum iyonlarının elektrolit içinde serbestçe hareket etmesine izin verir. Elektrolit, lityum tuzlarının (örneğin LiPF_6) organik çözücülerde çözülmesiyle elde edilen iyonik iletken bir sıvıdır; bazı yeni nesil sistemlerde ise söz konusu bileşen katı hâlde de tasarlanabilmektedir (Wang ve diğ., 2020). Ayrıca anot ve katot malzemeleri sırasıyla bakır ve alüminyum akım kollektörlerine kaplanır. Bu yapı, lityum iyonlarının elektrolit içinde ve elektronların dış devrede kontrollü biçimde dolaşmasını sağlar.

Lityum-iyon (Li-ion) bataryaların çalışma prensibi, lityum iyonlarının anot ile katot arasında ileri ve geri yönlü hareketine dayanır. Şarj işlemi sırasında, harici bir güç kaynağının sağladığı enerjiyle lityum iyonları katottan ayrılır ve elektrolit aracılığıyla anoda doğru hareket eder; bu sırada elektronlar da dış devre üzerinden anoda akar. Lityum iyonları, anot malzemesi olan grafitin tabakaları arasına interkale olarak yerleşir ve ilgili süreçte kimyasal enerji depolanır. Deşarj aşamasında ise söz konusu mekanizma tersine işler: Anotta depolanmış lityum iyonları çözünerek elektrolit içerisinden katoda göç ederken, eşzamanlı olarak elektronlar dış devreden geçerek katoda ulaşır ve böylece elektriksel iş gerçekleştirilmiş olur. Bu çift yönlü iyon geçişi nedeniyle Li-ion bataryalar literatürde ‘rocking-chair’ (salıncak) tipi bataryalar olarak da anılır. (Goodenough ve Park, 2013). Hücrenin gerilim değeri, kullanılan anot ve katot malzemelerinin lityum alma-verme potansiyelleri farkına bağlı olarak belirlenir. Tipik bir Li-ion hücresinin nominal gerilimi yaklaşık 3.6-3.7 V’tur; tam şarjda ~4.2 V’a ulaşır.

Lityum-iyon bataryaların performansını ve farklı uygulamalar için uygunluğunu belirleyen başlıca teknik parametreler arasında enerji yoğunluğu (özellik enerji, Wh/kg), güç

yoğunluğu (özgül güç, W/kg), kapasite, gerilim aralığı, iç direnç, çevrim ömrü ve güvenlik özellikleri yer almaktadır. Enerji yoğunluğu (özgül enerji), bir bataryanın birim kütle ya da hacimde depolayabileceği toplam enerji miktarını ifade eder ve bu açıdan Li-ion bataryalar oldukça avantajlıdır. Günümüzde kullanılan hücrelerde, kütle bazında 150-250 Wh/kg aralığına kadar ulaşan değerler mümkündür. Güç yoğunluğu (özgül güç) ise, bataryanın birim kütle ya da hacim başına ne kadar anlık enerji aktarımı yapabildiğini gösterir. Li-ion bataryalar, düşük iç dirençleri sayesinde yüksek güç taleplerine hızlı şekilde yanıt verebilir (Luo ve diğ., 2015). Kapasite ise bir bataryanın toplamda ne kadar elektrik yükü depolayabileceğini gösterir ve genellikle miliamper-saat (mAh) ya da amper-saat (Ah) birimleriyle ifade edilir. İlgili değer, batarya hücresinin boyutu ve kullanılan kimyasal bileşenlere bağlı olarak değişir. Örneğin, yaygın olarak kullanılan 18650 formundaki silindirik bir Li-ion hücresi yaklaşık 3000 mAh kapasiteye sahiptir; buna karşın daha büyük prizmatik hücreler on binlerce mAh seviyesinde kapasite sunabilir. Li-ion hücrelerin iç direnci genellikle mΩ düzeyindedir; bu durum yüksek güç çıkışı ve daha sınırlı ısınma eğilimi sağlar.

Çevrim ömrü, bir bataryanın tam şarj ve deşarj döngülerini kaç kez gerçekleştirebildiğini ifade eder ve genellikle kapasitenin belirli bir seviyeye (çoğunlukla %80'e) düşmesine kadar olan döngü sayısı ile tanımlanır. Lityum-iyon bataryalar, uygun kullanım koşullarında birkaç yüz ile birkaç bin arasında döngü ömrü sunabilmektedir. Özellikle lityum demir fosfat (LFP) kimyasına sahip hücreler, binlerce döngü ile uzun ömürlü çözümler sağlarken; yüksek enerji yoğunluğuna sahip, nikel ağırlıklı NMC ve NCA hücrelerde çevrim ömrü genellikle daha sınırlı kalmaktadır. Li-ion bataryaların bir diğer avantajı ise oldukça düşük kendi kendine deşarj oranına sahip olmalarıdır. Tipik olarak aylık kapasite kaybı %1-2 düzeyinde olup, ilgili özellik bataryaların uzun süreli depolama açısından uygun olmasını sağlar. Bataryanın iç direnci ise, hücre içindeki akım akışına karşı oluşan dirençtir. Düşük iç direnç, hem yüksek güç çıkışı sağlama kapasitesi hem de daha az ısınma eğilimi anlamına gelir. Li-ion hücrelerin iç dirençleri genellikle mili-ohm düzeyindedir ve bu da onları yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilebilirliği sağlar.

Güvenlik açısından değerlendirildiğinde, lityum-iyon bataryalar uygun tasarım ve çalışma koşullarında oldukça güvenilir sistemlerdir. Ancak aşırı şarj, aşırı deşarj, yüksek sıcaklığa maruz kalma ya da mekanik darbe gibi yanlış kullanım durumlarında, termal kaçak (thermal runaway) adı verilen zincirleme bir reaksiyon meydana gelebilir. Söz

konusu reaksiyon, batarya hücresinin sıcaklığının hızla artmasına ve sonuç olarak yangın veya patlama riskine neden olabilir (Bandhauer ve diğ., 2011). Bu tür tehlikeleri önlemek amacıyla hücre tasarımlarında pasif güvenlik önlemleri entegre edilir; bunlar arasında emniyet valfleri ve belirli sıcaklıklarda eriyerek devreyi kesen özel ayırıcılar yer alır. Ayrıca, batarya yönetim sistemleri (Battery Management System - BMS) sayesinde hücre gerilimi, sıcaklık ve akım sürekli olarak izlenir ve hücrelerin güvenli çalışma aralığında kalması sağlanır. Li-ion bataryalar için önerilen ideal çalışma sıcaklığı genellikle 20-40 °C aralığındadır. Anılan aralık dışına çıkıldığında performans kayıpları yaşanabilir ve batarya ömrü kısalabilir (Al-Zareer ve diğ., 2018). Bu nedenle, özellikle yüksek güçlü uygulamalarda batarya sıcaklığının kontrol altında tutulabilmesi için etkin bir termal yönetim sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Özetle, lityum-iyon bataryaların yapısı ve çalışma prensibi, lityum iyonlarının anot ile katot malzemeleri arasında geri dönüşümlü olarak hareket ettiği verimli bir elektrokimyasal enerji depolama mekanizmasına dayanmaktadır. Anılan bataryaların sahip olduğu temel performans parametreleri, onları günümüzde en yaygın tercih edilen enerji depolama teknolojilerinden biri hâline getirmiştir. Yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve kabul edilebilir güvenlik seviyeleri sayesinde Li-ion bataryalar, çağdaş enerji depolama çözümlerinin geldiği teknolojik seviyeyi temsil etmektedir (Goodenough ve Park, 2013; Luo ve diğ., 2015).

Lityum-iyon bataryalar yalnızca yapısal ve elektrokimyasal üstünlükleriyle değil, geniş kullanım alanlarıyla da öne çıkmaktadır. Günümüzde taşınabilir elektronik cihazların enerji ihtiyacının büyük bir kısmı lityum-iyon bataryalarla karşılanmaktadır. Cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, tabletler, dijital kameralar ve giyilebilir teknolojiler gibi birçok cihaz, yüksek enerji yoğunluğu sayesinde sınırlı hacimlerde dahi uzun süreli enerji sağlayabilmektedir (Li, 2017). Bu özellik, modern cihazların ince ve hafif tasarımlarına rağmen kullanıcılarına kesintisiz performans sunabilmesini mümkün kılmaktadır.

Bataryaların en kritik kullanım alanlarından biri de elektrikli ulaşım araçlarıdır. Elektrikli otomobiller, hibrit araçlar, otobüsler ve scooter gibi taşıtlarda tahrik gücünün sağlanmasında temel enerji kaynağı olarak lityum-iyon batarya paketleri kullanılmaktadır. Bu tercihin başlıca nedeni, birim ağırlık ve hacim başına yüksek enerji depolayabilmeleri ve aynı zamanda yüksek güç çıkışı sunabilmeleridir (Thakur ve diğ., 2020). Otomotiv sektöründe bataryalar aracın menzilini, performansını ve verimliliğini doğrudan etkilemekte; hızlı şarj teknolojileri ile kısa sürede tekrar kullanıma hazır hale gelmektedir.

Bununla birlikte, söz konusu bataryaların güvenli ve verimli çalışabilmesi için gelişmiş batarya yönetim sistemleri (BMS) ve termal kontrol stratejilerinin entegre edilmesi zorunludur (Gabbar ve diğ., 2021).

Lityum-iyon teknolojisinin yükselişi yalnızca taşınabilir cihazlar ve ulaşım araçlarıyla sınırlı değildir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunda da lityum-iyon bataryalar önemli bir rol üstlenmektedir. Güneş ve rüzgâr gibi kesintili kaynaklardan elde edilen enerjinin depolanması için büyük ölçekli batarya bankaları kurulmakta, bu sistemler şebeke istikrarını artırmakta, talep-yük dengesini yönetmekte ve acil durumlarda kesintisiz enerji sağlamaktadır (Wang ve diğ., 2012). Özellikle Çin ve Avrupa'da 100 MWh üzeri projelerin devreye alınması, lityum-iyon teknolojisinin enerji altyapısında da merkezi konum kazandığını göstermektedir.

Bunlara ek olarak, medikal cihazlar, uzay-havacılık uygulamaları ve askeri sistemler de lityum-iyon bataryaların önemli kullanım alanları arasındadır. Kalp pilleri ve taşınabilir tıbbi cihazlar gibi kritik sistemlerde yalnızca yüksek enerji yoğunluğu değil, uzun ömür ve güvenilirlik de ön plandadır. Uzay ve uydu teknolojilerinde düşük sıcaklıklarda çalışabilme ve uzun görev ömrü sunma kabiliyeti sayesinde özel tasarımı lityum-iyon hücreler tercih edilmektedir (Jaguemont ve diğ., 2016). Askeri uygulamalarda ise hafif yapı ve yüksek performans özellikleri, iletişim sistemlerinden insansız hava araçlarına kadar pek çok platformda stratejik avantaj sağlamaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, lityum-iyon bataryalar taşınabilir elektroniklerden ulaşım, şebeke ölçekli depolama projelerinden özel uygulamalara kadar farklı ölçeklerde yaygın bir kullanım alanı bulmuş; yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve istikrarlı performans özellikleriyle modern enerji sistemlerinin merkezinde yer almıştır. Devam eden Ar-Ge çalışmaları sayesinde maliyetlerin azalması, güvenlik parametrelerinin iyileştirilmesi ve dayanıklılığın artırılması, bu teknolojinin gelecekte de enerji depolama çözümlerinde kilit rolünü sürdüreceğini göstermektedir.

2.4. Batarya Hücrelerinin Termal Davranışı

Batarya hücrelerinin çalışma sırasında sergilediği termal davranış, hem performans hem de güvenlik açısından büyük önem taşımaktadır. Elektriksel yük akışı sırasında, batarya hücrelerinde çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçler ısı üretimine neden olur. Bu ısı üretiminin temel kaynakları, hücrenin iç direncinden geçen elektrik akımının oluşturduğu

Joule ısısı (ohmik ısınma) ile elektrot reaksiyonlarının entalpik etkilerine bağılı olarak ortaya çıkan termal değişimlerdir (Bandhauer ve diğ., 2011). Örneğin, lityum-iyon bataryalarda şarj ve deşarj işlemleri sırasında lityum iyonlarının anot ve katot malzemeleri arasında hareketi, belirli reaksiyon ısıları ile ilişkilidir. Anılan reaksiyonlar ekzotermik (ısı açığa çıkaran) ya da endotermik (ısı soğuran) karakterde olabilir. Özellikle yüksek akım altında gerçekteşen hızlı şarj veya deşarj koşullarında, hücre içinde önemli miktarda ısı üretilir. Eğer söz konusu ısı yeterince etkin bir şekilde uzaklaştırlamazsa, hücrenin sıcaklığı artmaya başlar ve belirtilen durum hem performans düşüşüne hem de güvenlik risklerinin artmasına yol açabilir.

Batarya hücreleri, belirli bir sıcaklık aralığında hem verimli hem de güvenli çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Lityum-iyon bataryalar için önerilen optimum çalışma sıcaklığı genellikle 20-40 °C aralığında olup, ilgili aralık dışındaki sıcaklıklarda batarya performansı ve ömrü olumsuz yönde etkilenmektedir (Al-Zareer ve diğ., 2018). Düşük sıcaklıklarda, özellikle 0 °C'nin altına düşüldüğünde, lityum iyonlarının elektrolit içerisindeki difüzyon hızı azalır ve söz konusu durum iç direncin artmasına yol açar. Sonuç olarak, bataryanın efektif kapasitesi ve güç çıkışı yeteneği düşer. Ayrıca çok düşük sıcaklıklarda şarj işlemi gerçekleştirilirse, anot yüzeyinde lityum metal birikimi (lithium plating) meydana gelebilir. Bu durum, kalıcı kapasite kaybına neden olabileceği gibi ciddi güvenlik riskleri de oluşturur (Ogunfuye ve diğ., 2022). Öte yandan yüksek sıcaklıklarda, hücre içindeki reaksiyon kinetikleri hız kazanır. Söz konusu durum başlangıçta daha iyi bir performans sağlıyor gibi görünse de, sıcaklığın ılımlı sınırların üzerine çıkması batarya kimyasına zarar verir. Örneğin, 50 °C'nin üzerinde uzun süre çalışmak, elektrolitin bozunmasına ve anot ile katot yüzeylerinde bozucu ara ürünlerin (örneğin kalınlaşmış katı elektrolit arayüzeyi (SEI) tabakasının) oluşmasına neden olarak hücre kapasitesinin azalmasına ve iç direncin kalıcı şekilde artmasına yol açar (Ogunfuye ve diğ., 2022). Ayrıca, yüksek sıcaklık organik elektrolit gibi yanıcı malzemelerin tutuşma riskini artırdığından, güvenlik açısından da ciddi bir tehdit oluşturur.

Termal kaçak (thermal runaway), bir batarya hücresinin kontrolsüz biçimde ısınarak ardışık egzotermik reaksiyonlar zincirine girmesi durumunu ifade eder ve genellikle hücre sıcaklığının belirli bir eşiği aşmasıyla tetiklenir. Lityum-iyon hücrelerde ilgili eşik genellikle 120-150 °C aralığında olup, anılan sıcaklıklarda ayırıcı malzeme eriyerek iç kısa devreye yol açabilir ve katot malzemesi oksijen salarak şiddetli kimyasal reaksiyonlara neden olabilir (Bandhauer ve diğ., 2011). Termal kaçak başladığında, hücre

sıcaklığı saniyeler içinde hızla yükselerek yüzlerce dereceye ulaşabilir ve bu durum genellikle yangın veya patlamayla sonuçlanır. Söz konusu sürecin başlatılması için çoğunlukla harici bir tetikleyici gereklidir. Aşırı şarj, dıştan gelen ısı, kısa devre veya fiziksel hasar gibi etkenler, hücre içi sıcaklığın kritik düzeye ulaşmasına neden olabilir. Bir kez tetiklendiğinde ise termal kaçak süreci, egzotermik reaksiyonların açığa çıkardığı ısının daha fazla reaksiyonu beslemesiyle kendi kendini sürdüren bir döngü hâline gelir. İlgili süreç, sadece tek bir hücrenin yanmasına değil, aynı zamanda komşu hücrelerin de ısınarak termal kaçak sürecine girmesine yol açabilir ve böylece tüm batarya paketinde zincirleme bir reaksiyon oluşabilir. Bu nedenle, özellikle çok hücreli batarya sistemlerinde termal kaçak yayılımını önlemek, güvenlik açısından kritik bir tasarım önceliğidir.

Bataryaların termal davranışını daha iyi anlamak amacıyla literatürde çok sayıda deneysel ve analitik çalışma gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmalarda, farklı akım çekme oranlarında batarya hücrelerinin sıcaklık artışları izlenmiş ve çeşitli soğutma yöntemlerinin etkinliği test edilmiştir (Xun ve diğ., 2013). Örneğin, hava soğutma, sıvı soğutma veya ısı boruları (heat pipe) kullanımı gibi yöntemlerle hücre sıcaklığının belirli sınırlar içinde tutulması hedeflenmiştir. Ayrıca, batarya hücrelerinin farklı ortam sıcaklıklarında gösterdiği performans incelendiğinde, en yüksek kapasite ve güç çıkışının genellikle ılıman sıcaklıklarda elde edildiği; aşırı sıcak veya soğuk koşullarda ise ilgili parametrelerin belirgin şekilde azaldığı ortaya konmuştur (Al-Zareer ve diğ., 2018). Termal koşullar sadece anlık performansı değil, aynı zamanda batarya hücrelerinin yaşlanma sürecini de doğrudan etkilemektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalan hücrelerde kapasite kaybı daha hızlı gerçekleşmekte ve iç direnç artmaktadır (Ogunfuye ve diğ., 2022). Bu nedenle, batarya ömrünü maksimize edebilmek için çalışma süresince hücre sıcaklıklarının optimum aralıkta tutulması büyük önem taşımaktadır.

Bataryaların termal davranışına ilişkin önemli bir diğer unsur da sıcaklık dağılımının homojenliğidir. Özellikle büyük boyutlu hücrelerde ya da çok sayıda hücreden oluşan batarya paketlerinde, hücrenin bazı bölgelerinin diğerlerine göre daha sıcak olması, yani ‘sıcak nokta’ (hot spot) oluşumu, istenmeyen bir durumdur. Bu tür sıcaklık heterojenliği, hücre içindeki kimyasal reaksiyonların dengesiz seyretmesine neden olabilir ve yerel düzeyde aşırı ısınmalar meydana getirebilir. Bu tür risklerin önüne geçebilmek adına, batarya sistemlerinin tasarımında hücre iç direncinin ve soğutma sistemlerinin eşit ve dengeli dağılması hedeflenir (Xun ve diğ., 2013). Örneğin, büyük prizmatik hücrelerde özellikle hücrenin merkez bölgelerinin soğutulması daha zor olduğundan, ilgili alanlara

yönelik özel ısı yol (heat path) tasarımları geliştirilerek sıcaklık dağılımı mümkün olduğunca homojen tutulmaya çalışılır.

Sonuç olarak, batarya hücrelerinin termal davranışı, yalnızca performansı belirleyen (örneğin kapasite ve iç direnç gibi sıcaklık bağımlı parametreler) değil, aynı zamanda güvenliği doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Optimum sıcaklık aralığında çalışan batarya hücreleri yüksek verimlilik ve uzun ömür sunarken, belirtilen sınırların dışında çalışan veya yeterince soğutulamayan hücreler, hızla bozulabilir veya güvenlik riski oluşturabilir. Bu nedenle, gelişmiş batarya sistemlerinin tasarımında termal davranış dikkate alınmakta; termal yönetim stratejileri ve batarya mimarileri, ilgili doğrultuda şekillendirilmektedir (Bandhauer ve diğ., 2011; Ogunfuye ve diğ., 2022).

2.5. Batarya Isıl Yönetim Sistemleri (BTMS)

Batarya Isıl Yönetim Sistemleri (Battery Thermal Management Systems, BTMS), batarya hücrelerinin sıcaklıklarının kontrol altında tutulmasını ve sıcaklık dağılımının homojenliğinin sağlanmasını amaçlayan sistemler bütünüdür. Söz konusu sistemler, özellikle elektrikli araçlar ve büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları gibi yüksek performans ve güvenlik gerektiren alanlarda kritik öneme sahiptir. Etkili bir BTMS, batarya paketi içerisindeki sıcaklık dengesini koruyarak tüm hücrelerin optimum sıcaklık aralığında çalışmasını mümkün kılar. Bu sayede hem hücrelerin kullanım ömrü uzatılır hem de sistemin güvenli çalışma koşulları sağlanmış olur (Al-Zareer ve diğ., 2018).

Batarya yönetim sistemi (Battery Management System, BMS), bir batarya paketi içerisindeki hücrelerin güvenli, verimli ve dengeli şekilde çalışmasını sağlayan elektronik kontrol ve izleme yapısıdır. Genellikle bataryanın “beyni” olarak tanımlanan BMS; hücre gerilimlerini, akım değerlerini ve sıcaklıkları sürekli olarak izler, anlık verileri analiz ederek sistemin güvenli sınırlar içinde çalışmasını temin eder (Gabbar ve diğ., 2021). Böylece yalnızca bataryanın performansı değil, aynı zamanda güvenliği ve uzun ömürlülüğü de garanti altına alınmış olur.

BMS’nin en kritik işlevleri arasında hücre koruması, sıcaklık takibi, şarj durumu (State of Charge, SoC) ve sağlık durumu (State of Health, SoH) tahmini yer alır. Her hücrenin belirlenen gerilim aralıkları içinde tutulması, aşırı şarj veya deşarjın engellenmesi, aşırı sıcaklık durumlarında soğutma ya da devre dışı bırakma gibi önlemler bu sistemin temel görevlerindendir (Wang ve diğ., 2012; Panchal ve diğ., 2017; Plett,

2015). Ayrıca, hücreler arası dengeleme fonksiyonuyla (balancing) paket genelinde şarj seviyelerinin eşitlenmesi sağlanarak kapasite kaybı önlenir ve kullanım ömrü artırılır (Gabbar ve diğ., 2021).

BMS, batarya içi yönetimle sınırlı olmayıp batarya ile dış sistemler arasında da iletişim köprüsü görevi görür. Örneğin elektrikli araçlarda BMS, araç kontrol ünitesine bataryanın anlık şarj durumu, sıcaklığı ve güç kapasitesi gibi bilgileri aktararak güç talebinin veya rejeneratif frenleme miktarının ayarlanmasına olanak tanır. Benzer şekilde şarj cihazlarıyla kurduğu iletişim sayesinde, bataryanın güvenli şarj profili de dinamik biçimde yönetilmektedir.

Bu noktada BMS ile Batarya Isıl Yönetim Sistemleri (BTMS) arasındaki ilişki kritik öneme sahiptir. BMS, sıcaklık sensörleriyle bataryanın termal davranışını sürekli izlerken, BTMS bu verileri kullanarak aktif ya da pasif soğutma stratejilerini devreye sokar. Dolayısıyla BMS, yalnızca elektriksel güvenliği değil, aynı zamanda BTMS ile bütünleşik çalışarak termal güvenliği de sağlar. Bu entegrasyon sayesinde lityum-iyon bataryalar, fonksiyonel güvenlik standartları (ISO 26262, IEC 61508) çerçevesinde yüksek performanslı, güvenli ve uzun ömürlü şekilde çalışabilmektedir (Gabbar ve diğ., 2021).

Batarya ısıl yönetim sistemleri (BTMS), tasarım açısından genel olarak aktif ve pasif sistemler olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Aktif ısıl yönetim sistemleri, bataryayı soğutmak veya gerektiğinde ısıtmak için harici bir enerji kaynağı kullanır. Buna karşın pasif sistemler, bataryanın çalışması sırasında ürettiği ısıyı depolayarak veya yayarak sıcaklık kontrolü sağlar; belirtilen amaçla özel ısı iletici ya da ısıya duyarlı malzemeler kullanılır. Günümüzde BTMS uygulamaları ağırlıklı olarak aktif soğutma yöntemlerine dayansa da, pasif çözümler ve anılan iki yöntemin bir arada kullanıldığı hibrit sistemler de literatürde ve uygulamalarda yer bulmaktadır (Al-Zareer ve diğ., 2018).

Hava soğutmalı BTMS, en temel aktif soğutma yöntemlerinden biri olarak kabul edilir. İlgili yöntemde, batarya hücreleri ya da modülleri üzerinden zorlanmış hava akımı geçirilerek oluşan ısıнын ortamdan uzaklaştırılması sağlanır. Yapısal açıdan uygulanması kolay ve sistem genelinde hafif olması gibi avantajlara sahip olsa da, havanın düşük ısıl kapasitesi nedeniyle sınırlı bir soğutma verimliliği sunar. Ayrıca, hava soğutma sistemlerinde hücreler arası sıcaklık dağılımını homojen tutmak zor olabilir; örneğin, batarya paketinin merkezindeki hücreler yeterince soğutulamazken, kenardaki hücreler daha düşük sıcaklıkta kalabilir. Belirtilen nedenle, hava soğutma genellikle düşük maliyetli

ya da orta düzey güç talebi olan uygulamalarda tercih edilmektedir. Örneğin bazı hibrit araç bataryalarında ve tüketici elektroniği ürünlerinde fan destekli hava soğutma sistemleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hava soğutmanın etkinliğini artırmak amacıyla optimize edilmiş hava kanalı tasarımları ve yüksek debili fan sistemleri kullanılabilir; ancak belirtilen durum enerji tüketiminin artmasına ve sistemde gürültü gibi yan etkilerin oluşmasına neden olabilir (Al-Zareer ve diğ., 2018).

Sıvı soğutmalı batarya ısıl yönetim sistemleri (BTMS), günümüzde özellikle elektrikli araçlarda en yaygın olarak kullanılan soğutma yöntemlerinden biridir. Su, su-glikol karışımı veya dielektrik yağlar gibi sıvılar, havaya kıyasla çok daha yüksek ısıl kapasiteye sahiptir. Bu sayede aynı hacimdeki bir sıvı, havaya oranla çok daha fazla ısıyı taşıyabilir. Sıvı soğutma sistemlerinde genellikle batarya modülleri arasında dolaşan soğutma kanalları veya soğuk plakalar aracılığıyla sıvı akışı sağlanır. Belirtilen sıvı, bataryadan aldığı ısıyı bir radyatör yardımıyla dış ortama aktarır. Örneğin, Tesla gibi birçok üretici, batarya hücreleri arasına yerleştirilmiş serpantin borular içinde glikol bazlı bir sıvı dolaştırarak sistem genelinde sıcaklık kontrolünü sağlar. Sıvı soğutma, yüksek ısıl yükler altında bile hücre sıcaklıklarını etkin biçimde yönetebilir ve hücreler arası sıcaklık farklarını birkaç derece seviyesine kadar düşürebilir (Rao ve Wang, 2011). Ancak belirtilen sistemler, hava soğutmalı sistemlere göre daha karmaşık ve daha ağırdır. Pompa, radyatör, vana ve bağlantı elemanları gibi ek bileşenler içerir. Ayrıca, soğutma sıvısının elektriksel iletkenliği, sistem güvenliği açısından önemli bir faktördür. Su bazlı sıvılar sızıntı durumunda elektronik bileşenlere zarar verebileceğinden, ilgili sıvılar genellikle kapalı devre sistemlerde kullanılır. Bu nedenle, batarya ile doğrudan temas gerektiren uygulamalarda dielektrik sıvıların tercih edilmesi zorunludur. Son yıllarda bazı gelişmiş sistemlerde doğrudan daldırılmalı sıvı soğutma (immersion cooling) yaklaşımı da uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntemde, batarya hücreleri doğrudan dielektrik bir sıvı içine yerleştirilir ve sıvı dolaşımı yoluyla etkin ısı taşınımı sağlanır. Çalışmada ele alınan yöntem yüksek soğutma verimliliği sunmasına rağmen, hücre paketleme uyumluluğu ve maliyet gibi nedenlerle şimdilik sınırlı ölçekte uygulama alanı bulmaktadır.

Faz değişim malzemesi (Phase Change Material, PCM) tabanlı batarya ısıl yönetim sistemleri, pasif soğutma yöntemlerine örnek teşkil eder. İlgili sistemlerde, batarya hücrelerinin yakınına yerleştirilen özel bir malzeme, bataryanın çalışması sırasında açığa çıkan ısıyı emerek kendi fiziksel fazını değiştirir (genellikle katı hâlden sıvı hâle geçer). Söz konusu süreçte gizli ısı soğurularak hücre sıcaklığının artışı sınırlandırılır. PCM olarak

en yaygın kullanılan malzemeler arasında belirli erime sıcaklıklarına sahip parafin mumları ve özel kimyasal karışımlar yer alır. Örneğin, 30-40 °C erime noktasına sahip bir parafin, belirtilen sıcaklığa ulaşıldığında erimeye başlayarak hücredeki fazla ısıyı absorbe eder ve hücrenin daha fazla ısınmasını geciktirir (Ling ve diğ., 2022). PCM tabanlı sistemler sessiz çalışmaları, bakım gerektirmemeleri ve enerji tüketmemeleri gibi avantajlar sunar. Ancak anılan sistemlerin sınırlı ısı depolama kapasiteleri ve düşük ısı iletkenlikleri önemli dezavantajlardır. PCM malzemesi, belirli bir miktarda ısıyı emdikten sonra tamamen eridiğinde artık faz değişimi gerçekleşemez ve belirtilen noktadan sonra ilave ısıyı soğuramaz. Bu nedenle, PCM tabanlı çözümler yüksek yoğunluklu ya da uzun süreli deşarj koşullarında tek başına yeterli olmayabilir. Bu tür sınırlamaları aşmak için PCM genellikle aktif soğutma yöntemleriyle birlikte hibrit sistemler şeklinde kullanılır. Söz konusu yaklaşımla, PCM ani sıcaklık artışlarını sönümlerken, aktif soğutma sistemi de PCM’de biriken ısıyı sistemden uzaklaştırır (Liu ve diğ., 2022). Ayrıca, PCM’lerin ısı iletkenliğini artırmak amacıyla bakır veya alüminyum köpükler, grafit plakalar ve ısı ileten nanoparçacıklarla kompozit malzeme üretimi literatürde sıkça araştırılmaktadır (Liu ve diğ., 2022). Bu sayede, PCM içinde biriken ısının daha hızlı yayılması ve batarya hücresinden etkin şekilde uzaklaştırılması sağlanabilmektedir.

Termoelektrik tabanlı batarya ısı yönetim sistemleri (BTMS), Peltier elemanları kullanılarak batarya paketinin soğutulması veya ısıtılması prensibine dayanır. Termoelektrik soğutucular, içlerinden doğru akım geçirildiğinde bir yüzeyde soğutma, diğer yüzeyde ise ısıtma etkisi oluşturan yarı iletken cihazlardır. Söz konusu özellik sayesinde, batarya yüzeyine doğrudan entegre edilen Peltier modülleri aracılığıyla bataryadan aktif olarak ısı çekilebildiği gibi, soğuk hava koşullarında akım yönü ters çevrilerek batarya aktif biçimde ısıtılabilir. Termoelektrik sistemlerin en önemli avantajları arasında hareketli parça içermemeleri, sessiz çalışmaları ve kompakt boyutları yer alır. Ancak söz konusu sistemlerin verimlilikleri genellikle düşüktür ve yüksek düzeyde elektrik enerjisi tüketirler. Belirtilen sebeple, termoelektrik BTMS çözümleri çoğunlukla yardımcı soğutma bileşeni olarak ya da küçük ölçekli batarya sistemlerinde tercih edilmektedir (Al-Zareer ve diğ., 2018). Özellikle uzay uygulamaları gibi özel koşullarda veya bazı hassas elektronik cihazlarda termoelektrik sistemlerin kullanımı uygun çözümler sunabilmektedir.

Bir batarya ısı yönetim sistemi (BTMS) değerlendirilirken dikkate alınan temel performans kriterleri; sıcaklık kontrol etkinliği, hücreler arası sıcaklık dağılımının homojenliği (uniformite), sistemin enerji tüketimi ve BTMS’nin batarya sistemi üzerindeki

hacimsel ve kütsel etkileridir (Al-Zareer ve diğ., 2018). Etkili bir BTMS, yüksek deşarj oranlarında dahi hücre sıcaklıklarını güvenli sınırlar içinde tutmalı ve tüm hücreler arasında sıcaklık farklarını minimumda (çoğu tasarımda $\Delta T < 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) tutabilmelidir. Bunun yanı sıra, sistemin kendi çalışması için harcadığı enerji (örneğin fanlar, pompalar gibi bileşenlerin tüketimi) mümkün olduğunca düşük olmalıdır; çünkü BTMS'nin enerji tüketimi, doğrudan sistemin genel verimliliğini etkiler. Ayrıca, BTMS'nin sahip olduğu hacim ve ağırlık da özellikle mobilite temelli uygulamalarda önemli bir tasarım parametresidir. Büyük veya ağır sistemler araç verimliliğini düşürebileceğinden, modern BTMS tasarımlarında kompakt yapı, entegre çözümler ve hafif malzeme kullanımı tercih edilmektedir.

Günümüzde elektrikli araç üreticileri, batarya ısıl yönetimi konusunda farklı tasarım ve uygulama stratejileri geliştirmektedir. Örneğin bazı üreticiler, batarya hücrelerini silindirik formda paketleyerek ilgili hücrelerin etrafında sıvı dolaştırmak suretiyle soğutma sağlarken; bazıları ise büyük prizmatik hücreleri soğuk plakalarla doğrudan temas ettirerek ısıyı uzaklaştırmaktadır. Tesla'nın geliştirdiği yeni nesil “tabless” 4680 hücre tasarımı, daha homojen ısı dağılımı ve etkin soğutma amacı taşımakta olup, batarya sisteminin araç şasisiyle bütünleştiği yapısal paket yaklaşımıyla entegre bir termal yönetim çözümü sunmaktadır. Öte yandan, hızlı şarj ihtiyacının giderek artması (örneğin birkaç dakika içinde bataryanın %80'e kadar şarj edilmesi gibi hedefler) BTMS sistemlerinin anlık yüksek ısı yüklerini yönetebilecek şekilde güçlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, çift fazlı soğutma (kaynar sıvı soğutma), gelişmiş ısı borusu teknolojileri ve soğutucu akışkanların doğrudan batarya sistemine entegre edildiği genişlemeli soğutma çözümleri (örneğin klima devresinin bataryaya bağlanması) gibi yenilikçi yaklaşımlar araştırılmaktadır (Feng ve diğ., 2020).

Sonuç olarak, batarya ısıl yönetim sistemleri (BTMS), modern batarya teknolojilerinin ayrılmaz bir bileşeni hâline gelmiştir. Uygun bir ısıl yönetim stratejisi olmaksızın, yüksek performanslı ve güvenli batarya sistemlerinin geliştirilmesi mümkün değildir. Literatürde, farklı ölçeklerdeki sistemler ve uygulamalar için çok sayıda BTMS çözümü önerilmiş; ilgili çözümler deneysel ve sayısal yöntemlerle kapsamlı biçimde incelenmiştir (Al-Zareer ve diğ., 2018). Her bir ısıl yönetim yöntemi, kendine özgü avantajlara ve sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle, uygulama özelinde en uygun BTMS çözümü; hedeflenen performans, maliyet, hacim, ağırlık ve güvenlik kriterleri dikkate alınarak seçilmelidir. Özellikle elektrikli ulaşım teknolojilerinin hızla yaygınlaşmasıyla

birlikte, batarya ısı yönetim sisteminin önemi daha da artmış ve ilgili alanda yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar ivme kazanmıştır.

Batarya ısı yönetim sistemleri yalnızca güvenlik ve ömür açısından değil, aynı zamanda enerji verimliliği ve araç menzili üzerinde de doğrudan etkiye sahiptir. Elektrikli araçlarda batarya sıcaklıklarının optimum aralıkta tutulması, hücrelerin iç dirençlerini düşük seviyede koruyarak enerji kayıplarını azaltır. Böylece, aynı kapasiteye sahip bir batarya paketi daha yüksek kullanılabilir enerji sunar ve araç menzili artar. Ayrıca, BTMS bileşenlerinin (fan, pompa, Peltier vb.) enerji tüketimi de sistemin genel verimliliğini etkileyen kritik bir parametredir. Bu nedenle modern tasarımlarda, termal güvenliği sağlarken minimum ek enerji harcayan çözümler öncelikli olarak tercih edilmektedir (Feng ve diğ., 2020; Al-Zareer ve diğ., 2018).

2.6. Termal Yönetim Malzemeleri

Batarya sistemlerinde kullanılan ısı yönetim malzemeleri, ısıнын etkin bir şekilde yayılması, depolanması veya yalıtılması gibi farklı görevler üstlenerek termal dengeyi sağlamada kritik rol oynar. Belirtilen malzemelerin doğru seçimi ve uygun biçimde kullanımı, batarya ısı yönetim sisteminin (BTMS) genel performansını doğrudan etkiler ve batarya sisteminin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasına önemli katkı sunar. Termal yönetim malzemeleri, temel olarak üç ana grupta sınıflandırılabilir: ısı iletkenliğini artırmaya yönelik malzemeler, ısı depolama (faz değişim) malzemeleri ve ısı yalıtım malzemeleri. Her bir kategori, farklı uygulama ihtiyaçlarına yönelik özel avantajlar sunmaktadır.

Isı iletkenliğini artırıcı malzemeler, batarya paketlerinde özellikle hücreler ile soğutma yüzeyleri arasında oluşabilecek ısı dirençleri azaltmak amacıyla kullanılır. Bu tür malzemeler, ısıнын hücreden soğutucu sistemlere etkin şekilde aktarılmasını sağlayarak termal performansı önemli ölçüde artırır. Belirtilen kapsamda en yaygın kullanılan ürünlerden biri, Termal Arayüz Malzemeleri (Thermal Interface Materials, TIM) olarak bilinir. TIM'ler, batarya hücresi ile soğutma plakası arasında kalan mikroskobik boşlukları doldurarak yüzeyler arası ısı transferini optimize eder. Silikon bazlı termal macunlar, elastomerik pedler ve grafit folyolar, belirtilen amaçla yaygın şekilde kullanılan TIM türleridir. Son yıllarda özellikle grafit bazlı arayüz malzemeleri ön plana çıkmıştır. Örneğin, pirolitik grafit levhalar (Pyrolytic Graphite Sheets, PGS), oldukça yüksek düzlem-içi ısı iletkenliği sunmakta ve belirtilen özellikleri sayesinde hem elektronik

cihazlarda hem de elektrikli araç (EV) batarya sistemlerinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır (Wang ve diğ., 2018). Belirtilen malzemeler, hücre yüzeyindeki sıcak noktaların yayılmasına ve sıcaklığın daha geniş bir alana dengeli şekilde dağılmasına olanak tanıyarak lokal aşırı ısınmaların önlenmesine yardımcı olur.

Batarya modüllerinde ısıyı yatay düzlemde daha eşit dağıtmak amacıyla, yüksek ısı iletkenliğine sahip metaller (özellikle bakır ve alüminyum) yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bazı batarya tasarımlarında, hücreler arası boşluklara yerleştirilen ince alüminyum plakalar sayesinde ısı iletimi artırılır ve sıcaklık, tüm hücreler arasında daha homojen bir şekilde yayılır. Isı iletkenliğini artırmak için kullanılan bir diğer yöntem ise ısı boruları (heat pipes) kullanımıdır. Isı boruları, içerisinde özel bir çalışma akışkanı bulunan kapalı sistem elemanlarıdır. Belirtilen yapı sayesinde, borunun sıcak yüzeyiyle temas eden akışkan buharlaşır, buhar borunun diğer ucuna taşınarak burada yoğunlaşır ve böylece ısı taşınmış olur. Batarya sistemlerinde genellikle ince ve esnek yapıdaki ısı boruları tercih edilir; belirtilen borular, batarya hücrelerinden alınan ısının daha soğuk alanlara ya da doğrudan dış ortama iletilmesini sağlar. Örneğin, prizmatik hücrelerin yan yüzeylerine entegre edilen düz ısı boruları, hücre içinde oluşan ısıyı kenar bölgelere taşıyıp oradan soğutma plakalarına aktararak sıcaklık kontrolüne katkı sunar (Ling ve diğ., 2022).

Isı depolayıcı malzemeler arasında en dikkat çekici grup, faz değişim malzemeleri (Phase Change Materials, PCM) olarak öne çıkmaktadır. Önceki BTMS bölümünde de ele alındığı üzere, PCM'ler erime ve donma süreçleri sırasında yüksek miktarda gizli ısıyı depolayabildikleri için batarya sistemlerinin ısı yönetiminde etkili bir rol oynarlar. En yaygın kullanılan PCM'ler, organik parafin bazlı mumlardır. Örneğin, yaklaşık 28 °C erime noktasına sahip oktadekan gibi parafinler, erime esnasında yaklaşık 200 kJ/kg düzeyinde gizli ısı absorbe edebilir (Ling ve diğ., 2022). Belirtilen malzemeler batarya hücrelerine temas edecek biçimde yerleştirildiğinde, hücre sıcaklığı belirli bir eşik değere ulaştığında PCM erimeye başlar, böylece fazla ısıyı emer ve sıcaklığı sabit tutar. PCM'lerin en önemli avantajı, harici enerjiye veya hareketli parçalara ihtiyaç duymadan tamamen pasif bir şekilde çalışabilmeleridir. Ancak, belirtilen malzemelerin genellikle düşük olan termal iletkenlikleri (örneğin parafinler için yaklaşık 0.2 W/m.K) ciddi bir dezavantaj oluşturur. Söz konusu düşük iletkenlik nedeniyle ısı, PCM içinde yavaş yayılır ve yalnızca batarya hücresine temas eden bölgelerde faz değişimi gerçekleşirken, daha uzak bölgelerde malzeme katı hâlde kalabilir (Liu ve diğ., 2022). Söz konusu sorunu aşmak için çeşitli kompozit PCM yapıları geliştirilmiştir. Örneğin, parafin içerisine grafit

tozu eklenmesi, metal köpüklere emdirilmesi veya karbon fiber ile desteklenmesi gibi yöntemler, ısıl iletkenliği önemli ölçüde artırmaktadır. Genişletilmiş grafit (Expanded Graphite, EG) katkılı PCM blokları, saf parafine kıyasla çok daha iyi ısı iletimi sağlayarak batarya modüllerinde ısıнын etkin biçimde dağılmasına yardımcı olur. Diğer yandan, parafin gibi organik PCM'lerin yanıcı olması da güvenlik açısından bir dezavantajdır. Bu nedenle, PCM formülasyonlarına alev geciktirici katkı maddeleri (örneğin fosfat esterler) eklenerek tutuşmazlık özellikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır (Ling ve diğ., 2022).

Isı depolayıcı malzemelerin kullanım alanlarından biri de termal kütle (thermal mass) uygulamalarıdır. Anılan yöntemde, batarya paketine yüksek ısı sığasına sahip (yani yüksek özgül ısı kapasiteli) malzemeler eklenerek, ani sıcaklık artışlarının tamponlanması hedeflenir. Böylece, batarya hücrelerinden açığa çıkan ısı ilgili malzemeler tarafından emilir ve hücre sıcaklığındaki hızlı değişimler sınırlandırılır. Örneğin, bazı batarya modülü tasarımlarında, içerisine su dolu ince kapiller yapılar veya ısıya duyarlı jel malzemeler entegre edilerek ısıнын ilgili yapılar içerisinde yayılması sağlanmakta ve böylece hücre sıcaklığının daha dengeli bir seviyede tutulması amaçlanmaktadır. Her ne kadar anılan yöntem yaygın olarak kullanılsa da, literatürde kavramsal olarak uygulanabilirliği kabul edilen ve belirli özel koşullarda değerlendirilebilecek bir yaklaşım olarak yer bulmaktadır.

Yalıtım malzemeleri, batarya ısıl yönetiminde yalnızca soğutma değil, gerektiğinde ısıyı muhafaza etme ve termal izolasyon sağlama amacıyla da önemli bir rol oynar. Özellikle soğuk iklim koşullarında, bataryaların aşırı soğuması performans düşüşüne neden olabileceğinden, batarya kutusu içerisinde ısı yalıtımı sağlayan malzemeler kullanılarak hücrelerin sıcaklıklarının belirli bir seviyenin altına düşmesi engellenir. Belirtilen amaçla cam yünü, aerjel paneller ve kapalı gözenekli köpükler gibi malzemeler batarya kabini çevresinde yalıtım için tercih edilmektedir. Ayrıca yalıtım, yalnızca çevresel sıcaklıklara karşı koruma sağlamakla kalmaz; batarya modülleri arasında termal kaçak durumunda yangının diğer modüllere sıçramasını geciktirmek için de kullanılır. Örneğin, modüller arası alana yerleştirilen mika levhalar ya da seramik fiber keçeler, olası bir yangın anında ısı ve alevin doğrudan geçişini engelleyerek zincirleme tepkimeleri yavaşlatır (Duan ve diğ., 2020). Bu tür refrakter (yüksek sıcaklığa dayanıklı) malzemeler, batarya sistemlerinin güvenliğini artırmak adına kritik öneme sahiptir. Nitekim elektrikli araç kazalarında batarya yangınlarının yayılmasını önlemek için modüller arası ısı ve alev bariyerlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar artarak sürmektedir.

Isıl yönetimde kullanılan bir diğer önemli malzeme kategorisi ise ısıtıcı elemanlardır. Özellikle soğuk hava koşullarında batarya hücrelerinin ideal çalışma sıcaklığına ulaşabilmesi için, aktif ısıtma sistemleri devreye girer. Belirtilen sistemlerde sıklıkla pozitif sıcaklık katsayılı (Positive Temperature Coefficient, PTC) ısıtıcılar veya kendinden regülasyonlu ısıtıcı filmler kullanılmaktadır. Bu tür ısıtıcılar, düşük sıcaklıklarda düşük iç direnç göstererek elektrik akımıyla ısı üretirler; sıcaklık arttıkça ise direnç yükselir ve böylece sistem kendiliğinden enerji akışını sınırlandırarak aşırı ısınmayı engeller. Belirtilen öz-regülasyon özelliği sayesinde batarya kısa sürede güvenli çalışma sıcaklığına erişir. Genellikle kullanılan malzeme, PTC özellikli polimer bazlı kompozitlerden oluşur ve söz konusu ısıtıcı yapılar hücreler arasına doğrudan entegre edilebilir. Isıtıcı elemanlar, özellikle düşük sıcaklıkta çalışan elektrikli araçlarda ve enerji depolama sistemlerinde kritik öneme sahiptir.

Termal yönetim malzemelerinin seçimi, batarya sisteminin performans, güvenlik ve çevresel gereksinimlerine bağlı olarak yapılır ve genellikle birden fazla malzemenin birlikte çalıştığı entegre çözümler tercih edilir. Örneğin, tipik bir elektrikli araç (EV) batarya paketinde; hücreler arasında kullanılan grafit bazlı ısı yayılım pedleri (ısı iletken malzemeler), modül kenarlarına yerleştirilen parafin bazlı faz değişim malzemesi (PCM) blokları (ısı depolayıcı malzemeler) ve batarya paketinin dış duvarlarını çevreleyen aerojel yalıtım tabakaları (ısı yalıtıcı malzemeler) bir arada kullanılabilir. Bu tür bir yapı sayesinde, hücre içinde oluşan sıcaklık artışları PCM'ler aracılığıyla dengelenirken; hücreler arası sıcaklık farkları grafit pedlerle azaltılır ve çevresel sıcaklık etkileri yalıtım malzemeleriyle sınırlanır. Güncel literatürde özellikle kompozit PCM sistemleri ve gelişmiş termal arayüz malzemeleri üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir (Liu ve diğ., 2022; Ling ve diğ., 2022). Nano ölçekte tasarlanmış ısı iletken yapılar (örneğin grafen bazlı esnek filmler) ve yeni nesil esnek ısı boruları, batarya termal yönetim malzemelerinin evriminde dikkat çeken yenilikler arasında yer almaktadır.

Isıl yönetim malzemelerinin seçimi yalnızca teknik performans değil, aynı zamanda maliyet ve sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmelidir. Örneğin aerojel paneller üstün yalıtım özellikleri sunmasına rağmen yüksek maliyetleri nedeniyle her uygulamada tercih edilememektedir. Benzer şekilde, bakır ve alüminyum gibi metaller yüksek ısı iletkenlik sağlasa da, yoğun enerji tüketen üretim süreçleri ve çevresel etkileri nedeniyle daha sürdürülebilir alternatiflerin araştırılması gündeme gelmiştir. Bu nedenle, modern

batarya tasarımlarında malzeme seçiminde hem teknik gereksinimler hem de ekonomik ve çevresel faktörler birlikte göz önünde bulundurulmaktadır (Duan ve diğ., 2020).

Özetle, termal yönetim malzemeleri batarya sistemlerinin en önemli bileşeni olarak nitelendirilebilir. Uygun malzeme seçimi sayesinde, batarya sisteminin ısı kontrolü pasif yollarla optimize edilebilir ve böylece aktif BTMS bileşenlerine düşen yük azaltılabilir. Malzeme bilimi alanında yaşanan ilerlemeler, daha hafif, daha güvenli ve daha etkili ısı yönetim sağlayan yeni nesil malzemelerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Söz konusu durum, batarya teknolojilerinin genel performansına ve güvenliğine doğrudan olumlu katkı sunmaktadır (Duan ve diğ., 2020).

2.7. Bataryaların Isıl Modellemesi ve Simülasyonu

Bataryaların ısı modellemesi, bir batarya hücresinin ya da batarya paketinin sıcaklık davranışını matematiksel olarak temsil etmeyi amaçlayan bir analiz yöntemidir. Bu tür modeller sayesinde, bataryanın çalışma süreci boyunca nerelerde, ne miktarda ısı üretildiği; belirtilen ısının hücre içerisinde ve hücreler arasında nasıl yayıldığı; sonuç olarak da sistem genelinde nasıl bir sıcaklık dağılımı olduğu öngörülebilir. Isıl modelleme çalışmaları, sadece mevcut sistemlerin analizinde değil, aynı zamanda yeni batarya tasarımlarının geliştirilmesi sürecinde de kritik rol oynamaktadır. Performans optimizasyonu, termal yönetim stratejilerinin geliştirilmesi ve güvenlik senaryolarının değerlendirilmesi açısından, ısı modelleme ve buna dayalı simülasyonlar günümüzde batarya mühendisliğinin vazgeçilmez araçları arasında yer almaktadır (Xun ve diğ., 2013).

Batarya ısı modellemeleri, genellikle elektrokimyasal ve termal modellerin etkileşiminden oluşan çok disiplinli bir yaklaşımla gerçekleştirilir. Bu bağlamda, farklı karmaşıklık seviyelerinde geliştirilmiş çeşitli modelleme yöntemleri bulunmaktadır:

- Sıfır-boyutlu, yani toplulaştırılmış (lumped) sıcaklık modelleri, batarya ısı modellemesinde en basit yaklaşımlardan biridir. Bu tür modellerde bir batarya hücresi, yalnızca tek bir düğümle temsil edilir ve tüm hücre için tek bir sıcaklık değeri varsayılır; dolayısıyla hücre içindeki sıcaklık gradyanları göz önüne alınmaz. Hücrede oluşan ısı, akım ve gerilim değerlerinden hesaplanır. İlgili hesaplamada en yaygın kullanılan formül, Bernardi tarafından önerilen ısı denklemidir (1985):

$$Q = I \times \left(V_{ocv} - V + T \times \left(\frac{\partial V_{ocv}}{\partial T} \right) \right) \quad (2.1)$$

Burada Q : ısı üretim hızı, I : elektrik akımı, V_{oc} : açık devre gerilimi, V : çalışma gerilimi ve $T \times (\partial V_{oc} / \partial T)$: entropik ısı terimini ifade eder. Elde edilen ısı değeri, hücrenin ısı kapasitesine bölünerek sıcaklık artışı belirlenir; söz konusu yaklaşım enerji dengesi esasına dayanır. Sıfır-boyutlu modellerin en büyük avantajı, hesaplamalarının çok hızlı ve kolay olmasıdır. Bu nedenle, özellikle batarya yönetim sistemlerinde (BMS) gerçek zamanlı izleme ve kontrol uygulamaları için sıklıkla tercih edilirler. Ancak, modelin basitliği nedeniyle hücre içindeki sıcaklık dağılımı gibi detaylı termal analizleri yansıtamaz (Xun ve diğ., 2013). Bu ifade literatürde entropik ısı olarak anılır; ancak bu çalışma kapsamında kullanılan sayısal modelde bu terim hesaba katılmamıştır.

- 1B/2B (tek veya iki boyutlu) ısı devre modelleri, bataryaların termal davranışlarını basitleştirilmiş bir devre analogisiyle temsil eder. Söz konusu yaklaşımda batarya hücresi, bir dizi termal direnç (R) ve ısı kapasitörü (C) elemanından oluşan bir ağ ile modellenir. Hücrenin iç bölgesi ile çevresi arasındaki ısı transferi, belirtilen devre elemanları aracılığıyla tanımlanır. Hücrenin çevre ile olan ısı alışverişi genellikle Newton'un soğuma yasası kullanılarak ifade edilir; belirtilen yöntemde konvektif ısı transfer katsayısı temel alınarak dış ortamla ısı akısı modellenir. RC tabanlı ilgili ısı devre modelleri, düşük hesaplama maliyetiyle batarya hücresinin sıcaklık dinamiklerini yaklaşık olarak temsil eder ve belirtilen yönüyle özellikle kontrol sistemleri ve batarya yönetim sistemlerinde (BMS) yaygın olarak tercih edilir. Ancak belirtilen modellerin doğruluğu, kullanılan parametrelerin deneysel olarak doğru şekilde belirlenmesine bağlıdır ve karmaşık geometrilere sahip batarya paketlerinde doğrulukları sınırlı kalabilir (Duan ve diğ., 2020).
- Üç boyutlu (3B) sayısal ısı modelleri, batarya hücresinin veya batarya paketinin detaylı geometrik yapısını dikkate alarak ısı iletimini daha hassas bir şekilde analiz etmeyi amaçlar. Belirtilen modelleme yaklaşımında, üç boyutlu ısı iletim denklemleri çözülür ve sistemin sıcaklık dağılımı yüksek doğrulukla hesaplanır. Örneğin, prizmatik bir hücre sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method, FEM) kullanılarak modellenebilir. Belirtilen süreçte elektrot tabakaları, ayırıcı ve diğer iç yapılar ayrık bölgeler olarak tanımlanır ve her bölge için Fourier ısı iletim denklemi çözülerek hücre içindeki sıcaklık dağılımı elde edilir. Isı üretim terimi bu tür modellerde genellikle eşdeğer bir kaynak dağılımı şeklinde ele alınır; örneğin hücre genelinde düzgün (uniform) bir ısı üretimi varsayılabilir veya anot ve katot

tabakalarına özgü volumetrik ısı üretimi tanımlanabilir. 3B modeller, fiziksel gerçekliği en doğru şekilde yansıtabilen yöntemlerden biri olmakla birlikte, çözüm süreleri uzundur ve yüksek düzeyde hesaplama gücü gerektirir (Xun ve diğ., 2013). Bu nedenle genellikle yalnızca tek bir hücre detaylı olarak modellenir; paketteki diğer hücrelerin benzer davranış sergilediği varsayılır ya da paket düzeyindeki analizlerde hücre modelleri basitleştirilerek kullanılır.

- Elektrokimyasal-termal entegre modeller, batarya hücresi içerisindeki elektrokimyasal süreçlerin (örneğin lityum iyon difüzyonu, elektrot reaksiyonları, elektrolit taşınımı vb.) matematiksel olarak modellenmesiyle hem ısı üretimini hem de belirtilen ısının hücre içindeki dağılımını birlikte hesaplayan gelişmiş modelleme yaklaşımlarıdır. Belirtilen modellerde, batarya içindeki reaksiyonlardan kaynaklanan yerel ısı üretimi ayrıntılı şekilde belirlenebilir ve belirtilen termal kaynaklar, üç boyutlu ısı iletim denklemleriyle birleştirilerek sıcaklık dağılımı hassas biçimde öngörülebilir. Belirtilen kapsamda en bilinen modellerden biri, Doyle, Fuller ve Newman tarafından geliştirilen P2D (Pseudo-2-Dimensional) modelidir. Belirtilen model, elektrot ve elektrolit bölgeleri boyunca iyon konsantrasyonu ve potansiyel dağılımlarını çözerek, batarya içindeki elektrokimyasal davranışı yüksek doğrulukla temsil eder. P2D modeli, termal denklemlerle entegre edildiğinde hücre içindeki akımın oluşturduğu lokal ısı kaynakları hassas şekilde belirlenebilir ve bunların batarya içindeki etkileri detaylı olarak analiz edilebilir (Duan ve diğ., 2020). Elektrokimyasal-termal modeller, araştırma düzeyinde oldukça gelişmiş ve güvenilir analizler sağlayan yöntemlerdir. Ancak ilgili modellerin yüksek hesaplama gereksinimi ve karmaşık yapıları, onları gerçek zamanlı uygulamalar için uygun olmaktan çıkarır. Bu nedenle daha çok yeni hücre tasarımlarını değerlendirmek, simülasyon doğruluğunu artırmak veya batarya davranışını ayrıntılı olarak anlamak amacıyla kullanılırlar.

Batarya sistemlerinin ısı modellemesinde modelin güvenilir sonuçlar verebilmesi için, kullanılan parametrelerin doğru ve dikkatli biçimde belirlenmesi büyük önem taşır. Özellikle ısı iletkenlik, özgül ısı kapasitesi, elektrotların porozitesi ve reaksiyon entalpisi gibi fiziksel ve kimyasal parametreler, modelin doğruluğunu doğrudan etkileyen kritik girdilerdir. Bu tür parametrelerin çoğu deneysel yöntemlerle belirlenir ya da güvenilir literatür kaynaklarından alınır. Örneğin, yaygın olarak kullanılan 18650 tipi lityum-iyon hücrelerde, etkin ısı iletkenliği hücrenin geometrisine bağlı olarak yönsel farklılık gösterir.

Tabaka düzleminde (rulo yönünde) ısı iletkenliği genellikle birkaç W/m.K mertebesindeyken, tabakaların dik yönünde (radyal yönde) ilgili değer önemli ölçüde düşer ve yaklaşık 0.5-1 W/m.K seviyesindedir. Bu tür anizotropik (yöne bağlı) iletkenlik özellikleri, detaylı ısıl modelleme çalışmaları yapılırken mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır (Bandhauer ve diğ., 2011).

Isıl modelleme çalışmaları genellikle bilgisayar destekli simülasyon araçları ile yürütülür ve elde edilen sonuçlar, batarya sistemlerinin termal performansının analiz edilmesinde önemli bir yol gösterici olur. Anılan amaçla, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) yazılımları ile sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method, FEM) tabanlı çok-fizikli simülasyon araçları yaygın olarak kullanılmaktadır (Xun ve diğ., 2013; Duan ve diğ., 2020). Örneğin, bir elektrikli aracın batarya paketine yönelik yapılan bir CFD simülasyonunda, batarya modüllerinin ısı üretimi ile soğutma kanalından geçen hava veya sıvı akışı aynı anda çözümlenebilir. Belirtilen sayede her bir hücrenin sıcaklığı zamanla nasıl değişeceği tahmin edilebilir. Bu tür simülasyonlar, özellikle batarya tasarım sürecinde farklı soğutma stratejilerinin karşılaştırılması ve performanslarının değerlendirilmesi için önemli bir araçtır. Örneğin, hava soğutmalı bir batarya tasarımında en yüksek sıcaklığa ulaşan hücrenin kaç °C olacağı ya da sıvı soğutmalı bir sistemin hücreler arası sıcaklık farkını ne kadar azaltabileceği simülasyon sonuçlarına bakılarak önceden belirlenebilir (Xun ve diğ., 2013).

Batarya ısıl modelleme ve simülasyon çalışmalarının önemli çıktılarından biri de termal kaçak ve güvenlik analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Simülasyon ortamında, belirli bir hücrede iç kısa devre oluşması gibi kritik durum senaryoları oluşturularak, belirtilen olayın zincirleme etkisi modellenilebilir. Örneğin, böyle bir durumda kaç saniye içinde komşu hücrenin tehlikeli bir sıcaklığa ulaşacağı hesaplanabilir. Bu tür analizler, batarya paketi tasarımında yangın bariyerlerinin konumu, modüller arası mesafeler veya havalandırma açıklıkları gibi güvenlik bileşenlerinin yerleşimine doğrudan yön verir (Duan ve diğ., 2020). Ayrıca, söz konusu simülasyonlar sayesinde deneysel olarak test edilmesi tehlikeli, pahalı ya da pratik olmayan durumlar da güvenli bir şekilde sanal ortamda analiz edilebilir. Böylece batarya sistemlerinin güvenlik düzeyini artırmaya yönelik tasarımlar daha bilinçli şekilde geliştirilebilir.

Elbette her model, fiziksel sistemin sadece bir yaklaşımıdır; söz konusu nedenle simülasyon çalışmalarının güvenilirliği, elde edilen sonuçların deneysel verilerle doğrulanmasına bağlıdır. Söz konusu doğrulama süreci, batarya ısıl modellemesinde temel

bir adımdır. Literatürde yapılan birçok çalışmada, geliştirilen modeller gerçek bir batarya hücresi ya da modülü üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümlerle kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonrasında model, farklı çevresel veya operasyonel koşullara uygulanarak genelleştirilmiştir (Xun ve diğ., 2013). Simülasyon çıktıları ile deneysel veriler arasında tatmin edici bir uyum sağlandığında, model güvenilir kabul edilir ve söz konusu model tasarımın optimize edilmesinde, yeni konfigürasyonların denenmesinde veya güvenlik senaryolarının analizinde etkin bir araç olarak kullanılabilir.

Özetle, batarya ısı modelleme ve simülasyonu, modern batarya araştırmaları ve mühendisliğinin vazgeçilmez araçları arasında yer almaktadır. Farklı detay seviyelerinde geliştirilebilen modeller sayesinde, bir batarya hücresinin saniyeler mertebesindeki sıcaklık tepkisinden, bir batarya paketinin ağır hizmet koşulları altındaki uzun vadeli termal davranışına kadar çok çeşitli senaryolar analiz edilebilmektedir. Söz konusu analizler, yalnızca batarya sistemlerinin performans ve güvenlik gereksinimlerini karşılamakla kalmaz; aynı zamanda daha verimli soğutma sistemlerinin tasarlanmasına, hücre mimarisinin iyileştirilmesine ve potansiyel tehlikelere karşı güvenlik önlemlerinin daha bilinçli biçimde yapılandırılmasına katkı sağlar (Duan ve diğ., 2020; Xun ve diğ., 2013).

2.8. Batarya Isıl Modellemesi Üzerine Yapılan Simülasyon Çalışmalarının İncelenmesi

Batarya termal modelleme ve simülasyon alanındaki literatür, özellikle son yıllarda yapılan çok sayıda araştırma ile hızla zenginleşmiştir. Söz konusu çalışmaların eleştirel bir şekilde değerlendirilmesi, mevcut modelleme yaklaşımlarının güçlü yönlerini ve sınırlamalarını ortaya koyarak, gelecek araştırmalara yön verme açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürdeki genel eğilimlere bakıldığında, batarya ısı simülasyonlarında farklı varsayımların ve odak noktalarının benimsendiği görülmektedir. Söz konusu çeşitlilik, elde edilen sonuçları ciddi şekilde etkileyebilmekte ve modellerin geçerliliği ile karşılaştırılabilirliğini doğrudan etkilemektedir (Duan ve diğ., 2020).

Öncelikle, birçok batarya simülasyon çalışmasının, hücre içindeki ısı üretimini basitleştirilmiş varsayımlar ile ele aldığı görülmektedir. Örneğin, ısı üretiminin hücre içerisinde homojen şekilde dağıldığı ve üretilen ısının sabit bir iç direnç ile akımın karesi arasında lineer bir ilişkiyle hesaplandığı gibi kabuller literatürde oldukça yaygındır (Chen ve diğ., 2018). Bu tür varsayımlar, belirli hücre kimyaları ve makul akım değerleri altında kabul edilebilir doğruluk sağlayabilir. Ancak, özellikle yüksek deşarj oranlarında ya da çok

katmanlı ve büyük boyutlu hücrelerde, söz konusu yaklaşımlar gerçeği yansıtmakta yetersiz kalabilir. Örneğin, elektrotlar içerisinde akım yoğunluğunun homojen dağılmadığı durumlarda, kolektör uçlarına yakın bölgeler gibi bazı alanlar daha fazla ısınabilirken, pek çok model söz konusu lokal ısı birikimi etkisini ihmal etmektedir. Bu bağlamda eleştirel bir değerlendirme yapıldığında, literatürde gelişmiş elektrokimyasal-termal modellerin mevcut olduğu ancak bazı mühendislik odaklı çalışmalarda sadeleştirilmiş modellerin tercih edildiği görülmektedir. Söz konusu durum, doğruluk pahasına pratiklik ve düşük hesaplama maliyeti hedeflenerek yapılan bir tercih olarak yorumlanabilir (Duan ve diğ., 2020). Öte yandan, ileri düzey araştırmalarda tam alan (full-field) çözümlerin benimsendiği örnekler de bulunmaktadır. Nitekim Feng ve çalışma arkadaşları (2018), 21700 formundaki bir silindirik hücreyi katman katman detaylandırarak hem akım hem de sıcaklık dağılımını çözümlemiş; geleneksel olarak homojen kabul yapan modellerin, özellikle hücrenin merkezinde oluşan sıcaklık zirvelerini öngöremediğini ortaya koymuştur. Bu tür bulgular, modelleme çalışmalarında ihtiyaç duyulduğunda daha karmaşık ve yüksek doğruluklu modellere yönelmenin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Isıl simülasyon çalışmalarında dikkat çeken bir diğer önemli farklılık, kullanılan sınır koşulları ve ortam etkileşimi yaklaşımlarında görülmektedir. Bazı araştırmalar yalnızca tek bir batarya hücresini sabit ortam sıcaklığı altında analiz ederek hücre yüzeyine bir konvektif ısı transfer katsayısı (h) tanımlar ve böylece idealize bir soğuma varsayar. Diğer yandan, daha gelişmiş çalışmalar gerçekçi bir soğutma devresini de modele entegre ederek, hücre-ortam etkileşimini daha ayrıntılı bir şekilde inceler (Xun ve diğ., 2013). Örneğin, hava soğutmalı bir batarya paketinin simülasyonunda basit yaklaşım, her hücre yüzeyine sabit bir h değeri atamak ve hava akışını idealize bir ortam olarak kabul etmektir. Ancak daha gelişmiş bir yöntem, hava akışını bir akışkan olarak modelleyerek, CFD çözümleriyle her hücre yüzeyine özgü yerel h değerlerini dinamik olarak elde etmektir. İlk yöntem hesaplama açısından oldukça hızlı ve basit olmasına rağmen, batarya paketi içinde oluşan hava akışı düzensizliklerini, giriş-çıkış bölgelerindeki soğutma farklılıklarını veya kanal sonundaki soğuma yetersizliklerini yansıtamaz. Nitekim literatürde yapılan bazı eleştirel değerlendirmeler, sabit h değerine dayalı modellerin bazı hücreler için aşırı iyimser, bazıları içinse aşırı kötümser sıcaklık tahminleri yapabildiğini göstermiştir (Chen ve diğ., 2018). Benzer şekilde, sıvı soğutmalı sistemlerde de soğutma kanalının sonunda yer alan hücrelerin daha yüksek sıcaklıklara maruz kalması gibi etkiler ancak detaylı akışkan simülasyonları ile öngörülebilir. Söz konusu nedenlerle, günümüzde pek çok

araştırmacı batarya termal analizini bütüncül bir sistem yaklaşımıyla ele almakta ve yalnızca hücreleri değil, soğutma devresini ve hatta araç seviyesi termal etkileşimleri de modele dahil etmektedir (Xun ve diğ., 2013). Söz konusu çok boyutlu yaklaşımın daha karmaşık olduğu açık olmakla birlikte, deneysel verilerle daha tutarlı sonuçlar ürettiği de çeşitli çalışmalarla rapor edilmiştir.

Model parametrelerinin belirsizliği, batarya ısı modelleme literatüründe sıkça eleştirilen bir diğer önemli konudur. Özellikle bazı çalışmalar, kullandıkları termofiziksel parametreleri açıkça belirtmemekte ya da literatürde yer alan çok çeşitli değerler arasından hangisinin tercih edildiğini netleştirmemektedir. Söz konusu durum, modelin doğruluğu kadar, sonuçların tekrarlanabilirliği açısından da ciddi bir sorun yaratmaktadır. Örneğin, lityum-iyon batarya hücreleri için tanımlanan etkin ısı iletkenlik değerleri, çalışmadan çalışmaya önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bazı araştırmacılar ilgili değeri 1 W/m.K olarak alırken, bazıları 0.2 W/m.K gibi çok daha düşük bir değer kullanabilmektedir. İlgili parametre seçimi, özellikle sıcaklık dağılımı gibi simülasyon sonuçlarında hissedilir düzeyde farklara yol açmaktadır (Xun ve diğ., 2013). Eleştirel bir perspektifle değerlendirildiğinde, her çalışmanın kullandığı parametre setini açıkça belirtmesi ve ilgili değerlerin hangi kaynaktan alındığını şeffaf biçimde sunması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Aksi hâlde, farklı çalışmalar arasında sonuçların karşılaştırılması, modelin genellenabilirliğinin değerlendirilmesi veya bağımsız doğrulama yapılması önemli ölçüde güçleşmektedir.

Simülasyon çalışmalarında elde edilen sonuçların deneysel verilerle doğrulanması, batarya ısı modellemesi alanında kritik bir güvenilirlik ölçütüdür. Literatürdeki bazı çalışmalar, geliştirdikleri modellerin çıktısını deneysel ölçümlerle karşılaştırarak model doğruluğunu somut biçimde ortaya koyarken; azımsanmayacak sayıda yayında bu tür bir doğrulama yer almamaktadır. Örneğin, bir çalışmada belirli bir soğutma stratejisinin batarya paketindeki en yüksek sıcaklığı 38 °C’de sabit tuttuğu ileri sürülüyorsa, ilgili iddianın deneysel prototipler üzerinden desteklenmesi beklenmektedir (Feng ve diğ., 2018). Eleştirel bir bakış açısıyla değerlendirildiğinde, deneyle doğrulanmamış simülasyon sonuçlarının güvenilirliği sınırlı kalabilir. Çünkü model içerisinde ihmal edilen bir fiziksel etki ya da yanlış seçilmiş bir parametre, sonucun gerçekte olduğundan daha iyi ya da daha kötü görünmesine yol açabilir. Söz konusu nedenle, son yıllarda yaygınlaşan bir eğilim olarak, sayısal analizlerini gerçek batarya modülleri ile test eden çalışmaların sayısı artmaktadır (Duan ve diğ., 2020). Belirtilen gelişme, alanın giderek daha fazla uygulamaya

yönelik çıktılar üretmeye başladığını ve batarya modelleme çalışmalarının olgunlaşma sürecine girdiğini göstermektedir.

Batarya ısı simülasyonlarının eleştirel değerlendirilmesinde öne çıkan bir diğer önemli unsur, ölçek ve çözünürlük meselesidir. Bazı çalışmalar, tek bir hücre seviyesinde mikro ölçekteki fiziksel olaylara (örneğin elektrot içi sıcaklık gradyanları gibi) odaklanırken; bazıları ise yüzlerce hücre içeren batarya paketlerinin makro düzeydeki genel termal davranışlarını incelemektedir. Ancak mikro düzeyde son derece ayrıntılı fiziksel gerçekliği yakalayabilen modeller, yüksek hesaplama maliyetleri nedeniyle paket düzeyinde uygulanamaz hâle gelebilmektedir. Belirtilen soruna çözüm olarak literatürde çok ölçekli modelleme yaklaşımları önerilmiştir (Chen ve diğ., 2018). Belirtilen yaklaşımlar, hücre düzeyinde detaylı termal analiz ile modül veya paket düzeyinde sadeleştirilmiş modelleri birleştirerek doğruluk ile hesaplama verimliliği arasında denge kurmayı amaçlamaktadır. Nitekim bazı çalışmalar, hücre bazında basit bir RC termal modellemesi ile modül düzeyinde CFD temelli hava akışı analizini entegre ederek hesaplama yükünü azaltırken doğruluğu korumaya çalışmıştır (Xun ve diğ., 2013). Ancak belirtilen tür hibrit modelleme yöntemleri henüz standardize edilmemiştir; farklı araştırma grupları, kendi çok ölçekli çözümlerini bağımsız olarak geliştirmektedir. Belirtilen durum, literatürde yaygın olarak dile getirilen bir eksikliği işaret etmektedir. Batarya termal simülasyonları için üzerinde uzlaşılmış, yaygın kabul gören bir “en iyi uygulama rehberi” henüz oluşturulamamıştır.

Son olarak, literatürde yer alan batarya ısı simülasyon çalışmalarının büyük bölümünün yalnızca nominal (normal) çalışma koşullarına odaklandığı, buna karşın arıza senaryolarını içeren modellemelerin oldukça sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Oysa batarya sistemlerinin güvenliği açısından iç kısa devre, termal kaçak başlatma ve yangın bariyeri performansı gibi arıza durumlarına yönelik senaryolar, son derece kritik öneme sahiptir. Bunlara ek olarak, mekanik hasar (örneğin çarpma, delici darbe veya dıştan gelen basınç etkileri) de termal olayları tetikleyebilen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Her ne kadar ilgili alanda bazı öncü çalışmalar bulunsa da (örneğin termal kaçak propagasyonunu modelleyen simülasyonlar) genel olarak bakıldığında literatürde hâlâ önemli bir boşluk olduğu söylenebilir (Feng ve diğ., 2018). Eleştirel değerlendirmeler, ısı modelleme yaklaşımlarının yalnızca nominal performansa değil, aynı zamanda off-nominal ve arıza durumlarına da odaklanacak şekilde genişletilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Çünkü gerçek uygulamalarda batarya sistemlerinin güvenliği çoğunlukla sistemin genel

kapasitesinden değil, beklenmeyen koşullara karşı verdiği tepkiden etkilenir. Belirtilen nedenle, ısıl modelleme çalışmalarının güvenlik senaryolarını da kapsayacak şekilde daha bütüncül hâle getirilmesi, gelecekteki araştırmalar için önemli bir ihtiyaçtır.

Batarya ısıl modelleme ve simülasyon alanında önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmakla birlikte, yöntem birliği, parametre seçimi, deneysel doğrulama ve model kapsamı açısından literatürde çeşitli tutarsızlıklar ve eksiklikler mevcuttur. Eleştirel incelemeler, belirtilen alandaki çalışmaların sonuçlarını değerlendirirken kullanılan varsayımların dikkatle gözden geçirilmesi gerektiğini ve her modelin sunduğu çıktının, kendi kabul ve sınırlılıkları çerçevesinde yorumlanmasının zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır (Duan ve diğ., 2020; Xun ve diğ., 2013). Geleceğe dönük beklenti, farklı modelleme yaklaşımlarının bir araya getirildiği standardize edilmiş modellerin geliştirilmesi ve belirtilen modellerin kapsamlı deneysel doğrulamalarla desteklenmesi yönündedir. Belirtilen gelişmelerin gerçekleşmesi hâlinde, batarya ısıl simülasyonlarının güvenilirliği artacak, çalışmalar arasında karşılaştırılabilirlik sağlanacak ve modelleme çıktıları uygulamalara daha doğrudan katkı sunabilir hâle gelecektir.

2.9. Güncel Akademik ve Endüstriyel Gelişmeler

Batarya teknolojileri ve enerji depolama sistemleri alanındaki gelişmeler, hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda sürekli bir değişim ve yenilenme süreci içindedir. Özellikle son yıllarda elektrikli ulaşım sistemlerinin hızla yaygınlaşması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı şebeke altyapılarının gelişimi, belirtilen teknolojik alanın seyrini belirgin biçimde etkilemiştir. Belirtilen kapsamda, güncel eğilimleri hem akademik hem de endüstriyel bakış açılarıyla değerlendirmek, yakın gelecekte belirtilen alanda hangi yönelimlerin ön plana çıkacağını anlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

Akademik Gelişmeler:

- Akademik gelişmeler arasında en dikkat çeken başlıklardan biri, katı hal bataryalar (solid-state batteries) üzerindeki yoğun çalışmalardır. Belirtilen teknoloji, geleneksel lityum-iyon bataryalarda kullanılan sıvı elektrolitlerin yerine katı iletken malzemeler kullanılmasını öngörmektedir. Katı hal bataryaların en büyük vaadi, uçucu ve yanıcı sıvı elektrolitlerin ortadan kalkmasıyla güvenlik düzeyinin ciddi ölçüde artması ve lityum metal anotların kullanımı sayesinde enerji yoğunluğunun

önemli ölçüde yükselmesidir (Wang ve diğ., 2020). Güncel akademik çalışmalar, yüksek iyon iletkenliğine sahip katı elektrolitlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Belirtilen kapsamda sülfür bazlı camyapılar, oksit seramikler ve polimer elektrolitler ön plana çıkan malzeme grupları arasında yer almaktadır. Ancak anılan teknolojinin önünde hâlâ önemli zorluklar bulunmaktadır; özellikle katı elektrolit ile elektrotlar arasındaki arayüz dirençlerinin düşürülmesi ve mekanik uyumun artırılması, çözüm bekleyen başlıca teknik sorunlardandır. Katı hal bataryalara ilişkin akademik yayın sayısı ve patent başvuruları son beş yılda katlanarak artmıştır. Laboratuvar ölçeğinde elde edilen başarıların ardından anılan teknolojinin ticarileşmesine yönelik somut adımlar atılmakta; önümüzdeki birkaç yıl içerisinde ilk nesil katı hal bataryaların sınırlı ölçekli de olsa ticari kullanıma sunulması beklenmektedir.

- Yeni nesil anot ve katot malzemeleri, mevcut lityum-iyon (Li-ion) batarya kimyasının performansını daha da ileriye taşımak amacıyla akademik araştırmaların öncelikli odak noktalarından biri hâline gelmiştir. Anot tarafında, özellikle silisyum ve lityum metal gibi yüksek kapasiteli malzemeler üzerine yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Katot tarafında ise yüksek nikelli NMC alaşımları, kobalt içermeyen katot bileşikler (örneğin lityum demir mangan fosfat, LFMP) ve hatta geleneksel yapıdan tamamen farklı çalışan yeni depolama mekanizmaları (örneğin lityum-kükürt veya lityum-hava sistemleri) ön plana çıkmaktadır (Duan ve diğ., 2020).

Bu bağlamda, lityum-kükürt (Li-S) bataryalar, hem kükürdün bol ve ucuz bir element olması hem de teorik olarak çok yüksek enerji yoğunluğu sunması nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Ancak Li-S sistemlerin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri, poly-sülfid shuttle etkisi gibi mekanik ve kimyasal kararlılık sorunlarıdır; anılan problemlerin çözümüne yönelik araştırmalar hâlen devam etmektedir.

Bir diğer önemli akademik gelişme ise sodyum-iyon (Na-ion) bataryalardır. Lityum kaynaklarının sınırlı oluşu ve maliyetinin yüksekliği, alternatif olarak daha bol bulunan ve ucuz olan sodyum elementine olan ilgiyi artırmıştır (IEA, 2023). Na-ion sistemler için katot tarafında Prusya mavisi analogu bileşikler, anot tarafında ise sert karbon gibi uygun malzemeler geliştirilmekte ve lityum-iyon bataryalara yakın performans değerleri hedeflenmektedir. Özellikle Çin'de sodyum-iyon teknolojisine

yönelik yoğun AR-GE faaliyetleri rapor edilmekte ve ilk prototip hücrelerin üretildiği bildirilmektedir. İlgili alandaki akademik yayın sayısında, 2020 sonrasından itibaren belirgin bir artış yaşanmıştır.

- Batarya yönetim sistemlerinde yapay zekâ ve ileri modelleme teknikleri, yalnızca malzeme geliştirmeye değil, bataryaların izlenmesi, kontrolü ve güvenliğine yönelik çözümlere de odaklanan akademik çalışmaların önemli bir parçası hâline gelmiştir. Son yıllarda makine öğrenmesi ve yapay zekâ tabanlı yöntemler, bataryaların durum kestirimi (State of Charge, SoC / State of Health, SoH), arıza teşhisi ve şarj optimizasyonu gibi kritik işlevlerde etkin biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin, geleneksel ve hesaplama açısından ağır elektro-kimyasal modellemelerin yerine, batarya verileriyle eğitilmiş yapay sinir ağı modelleri, gerçek zamanlı olarak yüksek doğrulukla SoC tahmini yapabilmektedir. Aynı şekilde, genetik algoritmalar, pekiştirmeli öğrenme ve benzeri yapay zekâ teknikleri ile hızlı şarj senaryoları bataryaya zarar vermeyecek biçimde optimize edilebilmekte; böylece şarj süreleri kısaltılırken batarya ömrü korunmaktadır (IEA, 2023).

İlgili alandaki akademik yayın sayısı ve uygulama örnekleri son dönemde belirgin biçimde artış göstermektedir. Öte yandan, çok alanlı (multi-physics) modelleme yaklaşımları da dikkat çeken bir diğer eğilimdir. Termal, elektro-kimyasal ve mekanik gerilme modellemelerini entegre eden ilgili simülasyonlar, bataryanın yalnızca performansını değil, güvenlik davranışını da bütüncül olarak analiz etmeyi mümkün kılmaktadır (Duan ve diğ., 2020). Bu tür entegre modelleme çalışmaları, özellikle yeni hücre tasarımı ve sistem düzeyi optimizasyon süreçlerinde önemli katkılar sunmaktadır.

- Geri dönüşüm ve ikinci kullanım, batarya teknolojilerinde akademik dünyanın giderek daha fazla odaklandığı konular arasında yer almaktadır. Özellikle kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların yeniden değerlendirilmesi, hem kritik ham maddelerin geri kazanımı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Lityum, nikel ve kobalt gibi yüksek değerli ve stratejik öneme sahip malzemelerin geri kazanımı için akademik literatürde hidrometalurjik ve pirometalurjik temelli yeni geri dönüşüm yöntemleri geliştirilmektedir (Harper ve diğ., 2019).

Bunun yanı sıra, elektrikli araçlardan çıkan ancak hâlâ belirli bir kapasiteye sahip olan bataryaların ikinci ömür (second-life) kapsamında yeniden kullanımı da akademik çalışmalarda yoğun şekilde ele alınmaktadır. İlgili bataryaların özellikle sabit enerji depolama uygulamalarında ekonomik ve güvenli biçimde değerlendirilmesi için, performans sınıflandırması, yeniden paketlenme ve fonksiyonel test süreçleri gibi teknik ve lojistik unsurlar üzerinde durulmaktadır (IEA, 2023). Geri dönüşüm ve ikinci kullanım alanındaki ilgili çalışmalar, yalnızca teknik yenilik değil, aynı zamanda ekonomik değer zincirinin korunması ve atık yönetiminin iyileştirilmesi açısından da güncel akademik trendlerin önemli bir boyutunu oluşturmaktadır.

Endüstriyel Gelişmeler:

- Elektrikli araç bataryalarında yüksek üretim kapasitesi ve yeni hücre formları, günümüz batarya endüstrisinde en dikkat çeken eğilimlerin başında gelmektedir. Özellikle hücre üretim kapasitesinin artırılmasına yönelik yatırımlar, küresel ölçekte hız kazanmıştır. Bu bağlamda “gigafabrika” olarak adlandırılan, yıllık gigawatt-saat (GWh) düzeyinde üretim kapasitesine sahip dev üretim tesisleri, başta Çin, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere birçok coğrafyada hızla inşa edilmektedir (IEA, 2023). Belirtilen üretim hamlesi yalnızca miktar artışıyla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda hücre tasarımlarında da önemli yenilikler beraberinde gelmektedir.

Örneğin, Tesla’nın tanıttığı 4680 form faktörlü silindirik hücre tasarımı, batarya hücre boyutunun artırılması ile birlikte etkin soğutmanın da mümkün olduğunu göstererek endüstride yeni bir paradigma değişimini tetiklemiştir. Belirtilen hücreler, “tabless” (sekmesiz) tasarımı sayesinde daha düşük iç direnç, daha yüksek üretim verimliliği ve sadeleşmiş bir montaj süreci sunmaktadır. Diğer büyük üreticiler de benzer şekilde, büyük boyutlu silindirik ve prizmatik hücre formlarına yönelmekte; bu sayede daha esnek üretim hatları ve farklı kimyasal bileşimlerle uyumlu modüler sistemler geliştirmektedir. Örneğin BMW ve Volkswagen gibi üreticiler, hücre formatlarını farklı enerji yoğunluğu ve termal yönetim ihtiyaçlarına göre özelleştirebilen modüler platformlar üzerinde çalışmaktadır.

Endüstride dikkat çeken bir diğer önemli gelişme, “cell-to-pack” ve “cell-to-chassis” konseptlerinin yaygınlaşmasıdır. İlgili yaklaşımlarda, batarya hücreleri

doğrudan batarya paketi veya araç şasisi ile entegre edilerek, klasik modül yapısı ortadan kaldırılmakta ve bu sayede sistemin hacimsel enerji yoğunluğu artırılmaktadır (IEA, 2023). Çinli üretici BYD'nin geliştirdiği “blade battery” teknolojisi, ilgili alandaki çarpıcı örneklerden biridir. İnce ve uzun prizmatik hücrelerin doğrudan paket yapısına entegre edilmesiyle, alüminyum muhafaza ihtiyacı ortadan kalkmakta ve hem ağırlık hem de maliyet avantajı sağlanmaktadır.

- Hızlı şarj ve şarj altyapısı, elektrikli araç endüstrisinde öne çıkan en stratejik eğilimlerden biri hâline gelmiştir. Güncel birçok elektrikli araç modeli, batarya kapasitesinin %80'ine 30 dakikanın altında ulaşabilmektedir ve sektörde ilgili sürenin 10-15 dakika aralığına çekilmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, hızlı şarja uygun batarya kimyaları (örneğin düşük anot difüzyon bariyerine sahip malzemeler, yüksek iletkenlikli elektrolit sistemleri) üzerinde yoğun Ar-Ge çalışmaları yürütülmektedir. Aynı zamanda, hızlı şarj sırasında bataryada oluşan yüksek ısı yükünü etkin şekilde yönetebilmek adına, termal yönetim sistemleri de yeniden tasarlanmaktadır.

Yeni nesil araçlarda, şarj istasyonu ile entegre çalışan akıllı ısıtma sistemleri yaygınlaşmaktadır. Söz konusu sistemler, örneğin soğuk hava koşullarında bir Tesla aracının Supercharger istasyonuna yaklaşması durumunda, batarya sıcaklığını önceden optimum seviyeye getirerek şarj sürecini ve verimliliğini artırmaktadır. Bu gibi uygulamalar, yalnızca batarya güvenliğini sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda şarj süresini azaltarak kullanıcı deneyimini iyileştirmektedir.

Şarj altyapısı tarafında da önemli gelişmeler yaşanmaktadır. 350 kW ve üzeri güç çıkışına sahip ultra hızlı şarj cihazları, başta Avrupa ve Çin olmak üzere birçok ülkede yaygınlaşmaya başlamıştır. Belirtilen yüksek güçlü altyapı, batarya mühendisliğinde hem elektrikselsel hem de termal açıdan yeni gereksinimler doğurmakta; hücre kimyasından paket tasarımına kadar tüm sistem bileşenlerini yeniden optimize etmeyi zorunlu kılmakta olup elektrikli araç üreticileri için yalnızca teknolojik bir zorluk değil, aynı zamanda rekabet avantajı sağlayacak kritik bir faktör hâline gelmiştir.

- Endüstriyel ve şebeke ölçekli enerji depolama uygulamaları, batarya teknolojilerinin yalnızca taşıtlarda değil, sabit enerji sistemlerinde de stratejik bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle büyük ölçekli batarya enerji depolama

sistemleri (Battery Energy Storage Systems, BESS), yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu, enerji arbitrajı ve yük dengelemesi gibi uygulamalarda birçok ülke tarafından aktif biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Bu tür uygulamalarda, batarya sistemlerinin güvenilirliği, ekonomik ömrü ve birim maliyeti, teknoloji seçiminde belirleyici faktörlerdir. Bu nedenle, termal olarak daha kararlı ve uzun döngü ömrüne sahip olan lityum demir fosfat (LFP) kimyasına sahip hücreler, şebeke depolama sistemlerinde giderek daha fazla tercih edilmektedir (IEA, 2023).

Endüstriyel ölçekte yaygınlaşan bir diğer eğilim, modüler ve konteyner tipi batarya sistemlerinin kullanımıdır. Belirtilen sistemler, montaj, taşınabilirlik ve bakım kolaylığı sunarak hem kurulum süresini hem de toplam sahip olma maliyetini azaltmaktadır. Aynı zamanda, söz konusu alan için uluslararası standardizasyon çalışmaları da sürdürülmekte; güvenlik, soğutma ve uzaktan izleme gibi unsurların sistematik biçimde ele alındığı tasarım ilkeleri geliştirilmektedir.

Buna ek olarak, ikinci ömür bataryaların (second-life batteries) sabit enerji depolama sistemlerinde kullanımı da önemli bir araştırma ve uygulama alanı hâline gelmiştir. Özellikle elektrikli araçlardan çıkarılan, ancak hâlâ belirli bir kapasiteye sahip bataryaların şebeke uygulamalarında yeniden değerlendirilmesi üzerine çok sayıda pilot proje yürütülmektedir (Harper ve diğ., 2019). Söz konusu yaklaşım, hem sistem maliyetlerini düşürmekte hem de döngüsel ekonomi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından olumlu katkı sağlamaktadır.

- Regülasyon ve güvenlik standartları, batarya endüstrisinde son yıllarda hızla önem kazanan bir diğer başlıktır. Özellikle Avrupa Birliği, batarya üretim ve geri dönüşüm süreçlerine ilişkin düzenlemeleri sıkılaştırmaya yönelik kapsamlı yasal çerçeveler geliştirmektedir. Bu bağlamda, 2030 yılına kadar batarya üretiminde belirli oranlarda geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının zorunlu kılınması ve kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların geri toplanması gibi yükümlülükler getirilmesi planlanmaktadır. Söz konusu gelişmeler, batarya üreticilerini geri dönüşüm teknolojilerine yatırım yapmaya teşvik ederken, genel anlamda döngüsel ekonomi yaklaşımını da güçlendirmektedir.

Güvenlik standartları açısından da endüstride dikkat çekici ilerlemeler yaşanmaktadır. Özellikle araç bataryalarına yönelik çarpışma testleri, termal kaçak

dayanım testleri ve yangın güvenliği gibi konularda yeni nesil standartlar geliştirilmektedir. Öne çıkan güncellemelerden biri olan UNECE R100 rev.3 gibi küresel teknik düzenlemeler, termal kaçak durumunda bataryaların en az 5 dakika önceden uyarı verecek şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Söz konusu gereklilik, endüstriyel tasarımlarda erken uyarı sistemlerinin entegrasyonunu gündeme getirmiştir. Özellikle gaz sensörleri, fiber optik sıcaklık algılayıcıları ve benzeri yüksek hassasiyetli sensör teknolojileri, ilgili standartlara uygun sistemlerin geliştirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede, batarya kaynaklı tehlikeli durumlara karşı proaktif güvenlik önlemleri alınması mümkün hâle gelmiştir.

- Diğer enerji teknolojileriyle entegrasyon, batarya uygulamalarında giderek yaygınlaşan yenilikçi bir endüstriyel eğilimdir. Özellikle hibrit enerji depolama sistemleri, bataryaların süperkapasitörler gibi tamamlayıcı teknolojilerle birlikte kullanıldığı çözümler sunmaktadır. Belirtilen sistemlerde, ani ve yüksek güç talepleri süperkapasitör tarafından karşılanırken, daha uzun süreli enerji ihtiyacı bataryadan sağlanır. Belirtilen yapı sayesinde batarya üzerindeki ani yükler azaltılarak hem batarya ömrü uzatılır hem de sistem genelinde performans iyileştirilir. Nitekim bazı otomotiv üreticileri, frenleme sırasında ortaya çıkan kinetik enerjiyi önce süperkapasitörlerde depolayıp, ardından ilgili enerjiyi bataryaya yönlendiren çözümler üzerinde çalışmaktadır.

Bataryaların diğer sistemlerle entegrasyonuna yönelik bir başka yenilikçi yaklaşım ise “vehicle-to-grid (V2G)” teknolojisidir. Anılan teknolojide, elektrikli araçların bataryaları yalnızca enerji tüketen bileşenler değil, aynı zamanda şebekeye enerji geri beslemesi yapabilen mobil depolama birimleri olarak kullanılmaktadır. Böylece araçlar, talep-zirve saatlerinde şebekeye katkı sunabilirken, enerji sistemlerinin esnekliği de artırılmaktadır. Belirtilen alanda birkaç pilot uygulama devreye alınmış olup, endüstriyel ölçekli yaygınlaşma potansiyeli hem teknik hem de düzenleyici yönlerden tartışılmaya devam etmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, akademik araştırma yönelimleri ile endüstriyel uygulama trendleri arasında karşılıklı bir etkileşim olduğu açıkça görülmektedir. Akademide geliştirilen yenilikler (örneğin yeni nesil elektrolit formülasyonları veya model tabanlı batarya yönetim algoritmaları) kısa sürede endüstriyel çözümlere entegre edilirken, endüstrinin talepleri de (örneğin daha düşük maliyetli malzemeler, daha hızlı üretim yöntemleri, daha güvenli sistemler) akademik araştırma gündemini şekillendirmektedir.

Önümüzdeki birkaç yıl içinde, katı hal bataryalar gibi devrimsel teknolojilerin laboratuvarlardan ticarileşme sürecine geçiş yapması, mevcut lityum-iyon sistemlerinin ise daha da olgunlaşarak yüksek verimli standart çözümlere dönüşmesi beklenmektedir.

Elektrikli araçların ve yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla yaygınlaşması, batarya teknolojilerini stratejik bir endüstriyel alan hâline getirmiştir. Güncel eğilimler; enerji yoğunluğu, güvenlik ve sürdürülebilirlik kriterlerinin önceliklendiği yenilikçi yaklaşımları ön plana çıkarmaktadır. Belirtilen dinamik yapı, batarya teknolojisi alanının önümüzdeki dönemde de yoğun inovasyon ve çok disiplinli iş birliği gerektiren bir araştırma ve uygulama sahası olmayı sürdüreceğini göstermektedir (IEA, 2023; Wang ve diğ., 2020).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Batarya Hücresi ve Termal Özellikler

Analizlerde ele alınan batarya hücresi, prizmatik yapıda tasarlanmış bir lityum-iyon hücredir. Geometrik boyutları yaklaşık olarak 110 mm yüksekliğe, 50 mm genişliğe ve 15 mm kalınlığa sahiptir. Modelleme aşamasında, hücre iki temel bileşen halinde ele alınmıştır: ilki, anot, katot, ayırıcı ve elektrolit gibi içsel bileşenleri kapsayan aktif bölge; ikincisi ise ilgili bölgeyi çevreleyen ince yapılı alüminyum dış kasadır. Alüminyum kasanın ısı iletkenliği yaklaşık 200 W/m.K olup; aktif bölgeye ait yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletkenlik değerleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Belirtilen dış kasa, yalnızca yapısal bütünlüğü sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda hücrenin dış ortamla ısı alışverişinde de önemli rol oynar. Yaklaşık 1 mm kalınlığındaki söz konusu kaplama, aktif bölgeyi tüm yönlerden sarmakta ve ısı iletim sürecinde aktif malzemeden gelen ısıнын dış yüzeylere taşınmasına katkıda bulunmaktadır. Hücrenin iç yapısında yer alan bakır ve alüminyum akım toplayıcıları, elektrotlar ve benzeri elemanlar, modelde ayrı ayrı tanımlanmak yerine, homojen özelliklere sahip tek bir katı malzeme bölgesi olarak temsil edilmiştir. Böylece, sayısal çözümde detay kaybı yaşamadan, hücrenin ısı davranışı etkin şekilde gözlemlenebilmiştir.

Modelleme sırasında, elektrot uçlarındaki terminaller doğrudan modele dâhil edilmemiştir. Bunun temel gerekçesi, doğal konveksiyon koşullarında söz konusu bölgeler üzerinden gerçekleşen ısı aktarımının ihmal edilebilir düzeyde olmasıdır. Sonuç olarak, modellenen hücre; aktif bölge ve dış kasa olmak üzere iki bileşenli, dikdörtgenler prizması formunda sadeleştirilmiş bir geometriye sahiptir.

Hücreye ait termofiziksel özellikler, literatürde raporlanan deneysel verilere dayanarak belirlenmiştir. Alüminyum kasa ve aktif bölgeye ait yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletkenlik değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Modelde aktif bölge ile dış kasa arasında yer alan arayüzde herhangi bir termal temas direnci tanımlanmamıştır. Söz konusu iki bölge, sayısal ağ yapısında ortak düğümler aracılığıyla birleştirilmiş ve bu sayede yüzeyde sıcaklık sürekliliği sağlanmıştır. Tanımlanan tüm malzeme özellikleri, Çizelge 3.1’de topluca verilmiştir.

Çizelge 3.1: Prizmatik hücrenin aktif malzeme ve kasa bölgeleri için termal özellikleri (25°C'deki değerler).

Özellik	Aktif Malzeme Bölgesi	Alüminyum Kasa (1060 Alaşımı)
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	2000 (etkin)	2700
Isıl iletkenlik, k (W/m.K)	1.0 (etkin)	237
Özgül ısı, c_p (J/kg.K)	1000 (etkin)	897

İncelenen hücre, elektrokimyasal olarak NMC (Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit) katot ve grafit anot içeren klasik bir lityum-iyon hücre kimyasına sahiptir. Çalışmalarda baz alınan hücrenin nominal kapasitesi yaklaşık 5 Ah olarak kabul edilmiştir. Söz konusu kapasite değeri, farklı deşarj hızlarına karşılık gelen akımların hesaplanmasında doğrudan kullanılmıştır. Örneğin, 1C deşarj oranı ilgili hücre için yaklaşık 5 A, 2C oranı ise 10 A akıma karşılık gelmektedir.

Hücrenin nominal gerilimi yaklaşık 3.7 V olarak alınmış, tam şarj durumunda ilgili değer 4.2 V seviyelerine ulaşabilmektedir. İç direnç (ohmik direnç) değeri doğrudan ölçülmemiştir; bunun yerine, 1C akımı altında gözlenen ilk gerilim düşüşünden yola çıkılarak yaklaşık 20 m Ω mertebesinde olduğu varsayılmıştır. Anılan iç direnç değeri, sayısal modellemede Joule ısı kaynağının hesaplanmasında temel parametrelerden biri olarak kullanılmıştır.

Tüm senaryolarda hücrenin başlangıç sıcaklığı 25 °C (298 K) olarak tanımlanmıştır. Belirtilen değer, hem standart oda sıcaklığına hem de lityum-iyon bataryaların önerilen çalışma koşullarına uygunluk göstermektedir. Sayısal analiz başlarken, hücrenin iç sıcaklık dağılımının homojen olduğu, yani tüm hacimde sıcaklığın eşit olduğu varsayılmıştır. Söz konusu yaklaşım, başlangıç koşullarını sadeleştirirken hesaplamaların kararlılığı açısından da fayda sağlamıştır.

3.2. Sayısal Modelleme ve Varsayımlar

Prizmatik hücreye ait ısıl davranışın belirlenmesinde kullanılan modelleme yaklaşımı, üç boyutlu ve zamana bağlı bir ısı iletimi analizine dayanmaktadır. Sayısal çözüm, ANSYS Fluent yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiş; batarya modülü aktif hale getirilerek hücre içindeki ısı üretimi ve iletimi eşzamanlı olarak değerlendirilmiştir. İç ısı üretiminin belirlenmesinde, literatürde doğruluğu kanıtlanmış olan Newman-Tiedemann-Gu-Kim (NTGK) modeli kullanılmıştır. Söz konusu yarı-ampirik yaklaşım, farklı deşarj

profilleri altında hücrenin gerilim ve iç direnç tepkilerini karakterize eden $U(SOC)$ ve $Y(SOC)$ fonksiyonlarına dayanmakta; bu sayede zamanla değişen elektriksel koşullar altında anlık ısı üretim gücünü doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Böylece model, entropik katkıyı kapsam dışı bırakır ve yalnızca Joule ısını esas alır.

NTGK modelinin, deneysel sıcaklık ölçümleriyle yapılan karşılaştırmalarda genellikle 1°C 'yi aşmayan sapmalarla çalıştığı ifade edilmektedir. Toplam ısı üretimi Joule ve entropik bileşenlerden oluşur; ancak bu çalışmada yalnızca Joule bileşeni dikkate alınmıştır. Entropik katkının, özellikle orta şarj seviyelerinde etkili olabileceği bilinmekle birlikte, sürekli deşarj koşullarında anılan etkinin sınırlı kaldığı varsayılmış ve ilgili terim hesaplamalardan çıkarılmıştır.

Belirtilen çerçevede, hücre içerisinde oluşan hacimsel ısı üretim oranı şu bağıntı ile ifade edilmiştir:

$$q_{\text{aci}} \approx (I^2(t) \times R_{\text{iç}}) / V_{\text{aktif}} \quad (3.1)$$

Buradaki $I(t)$ uygulanan akımı, $R_{\text{iç}}$ hücrenin iç direncini ve V_{aktif} ise aktif malzeme hacmini temsil etmektedir. Belirtilen formülden elde edilen değer, modelde aktif bölgeye homojen bir ısı üretim kaynağı olarak tanımlanmıştır. Böylelikle iç ısı oluşumu, zamanla değişen elektriksel yüklenmelerin doğrudan sonucu olarak modele yansıtılmıştır. Dolayısıyla q_{hacim} ifadesi entropik katkıyı içermez.

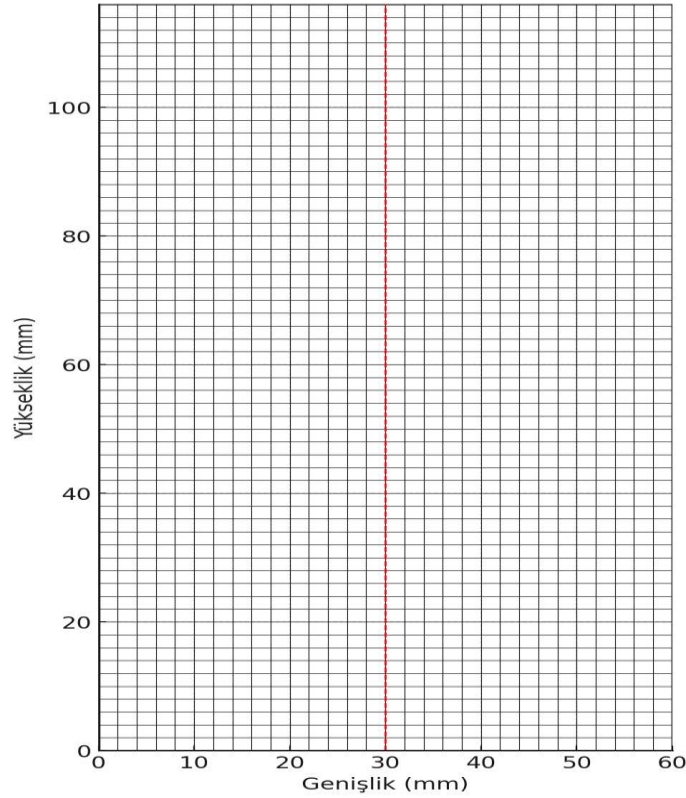
Sayısal analizlerde kullanılan modelin oluşturulmasında, hesaplama karmaşıklığını azaltmak ve odaklanılan fiziksel süreci daha net inceleyebilmek amacıyla bazı varsayımlar yapılmıştır. Öncelikle, yalnızca tek bir hücre üzerinde çalışılmış ve komşu hücrelerin ısı etkileri hesaba katılmamıştır. Belirtilen yaklaşım sayesinde, batarya modülü yerine bağımsız bir hücre bazında daha yüksek çözünürlükte ve detaylı analizler gerçekleştirilmiştir.

Hücrenin iç yapısı, katot, anot, ayırıcı ve diğer bileşenlerin ayrıştırılması yerine, homojen bir aktif katman şeklinde temsil edilmiştir. Belirtilen katmanın termofiziksel özellikleri, farklı malzemelerin ortalama etkilerini yansıtacak şekilde etkin değerler olarak modellenmiştir. Böylelikle karmaşık çok katmanlı yapı sadeleştirilmiş, aynı zamanda hesaplamalarda yönelime bağlı ısı iletimi (anizotropi) göz ardı edilmiştir. Bu nedenle, ısıl iletkenlik tüm yönlerde eşit kabul edilmiştir.

Malzeme özellikleri olarak kullanılan ısıl iletkenlik ve özgül ısı kapasitesi gibi parametreler, sıcaklıkla değişim göstermeyen sabit değerler olarak tanımlanmıştır. Söz

konusu sabitleme, analizlerin yürütüldüğü sıcaklık aralığının (yaklaşık 25 °C ile 60 °C arasında) bu tür bir varsayımı teknik açıdan makul kılmasıyla desteklenmektedir. Böylece model, hem sade hem de fiziksel açıdan yeterli doğruluğa sahip hâle getirilmiştir.

Ayrıca modeldeki çözüm alanı, geometrik ve sınır koşulu simetrisinden yararlanılarak sadeleştirilmiştir. Hücre kalınlığı boyunca orta düzlemden ikiye bölünmüş ve yalnızca yarısı modellenmiştir. Ön ve arka yüzeylerin benzer koşullarda çevreyle ısı alışverişinde bulunduğu varsayımıyla ilgili orta düzlem bir simetri düzlemi olarak tanımlanmış ve ilgili sınır koşulları uygulanmıştır. Bu sayede modeldeki eleman sayısı azaltılmış, çözüm süresi ve kaynak kullanımı açısından verimlilik sağlanmıştır. Kavramsal mesh yapısını gösteren Şekil 3.1’de ilgili simetri düzlemi kırmızı kesikli çizgiyle belirtilmiştir.



Şekil 3.1: Prizmatik hücre modelinin yapısal mesh planı (temsili 2B kesit görünümü).

Yapılan varsayımlar modelin sadeleştirilmesini ve temel ısı davranışların daha net incelenmesini sağlamıştır. Bu kabullerin sonuçlara etkisi, değerlendirme bölümünde tartışılmıştır. İhmal edilen entropik ısı üretimi ve terminallerin ısı iletimine katkısı, doğal konveksiyon koşullarında belirgin bir fark yaratmamaktadır; literatürde de benzer şekilde rapor edilmiştir (Wang ve diğ., 2014). (Entropik ısı terimi dahil değildir.)

3.3. Kullanılan Yazılım ve Parametreler

Tüm sayısal analizler, ANSYS Fluent yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Analizlerde batarya sistemlerinin termal davranışlarını çözümlmeye yönelik geliştirilen Battery Module ve Energy Equation çözücülerini etkinleştirilmiştir. Model yalnızca katı faza odaklanmış, akışkan alan tanımlanmamış ve bu nedenle düşük hızlı doğal konveksiyon için basınç-tabanlı çözücü tercih edilmiştir. Ayrıca, zamanla değişen sıcaklık alanlarını doğru biçimde izleyebilmek amacıyla transient (zamana bağlı) çözüm modu kullanılmıştır.

Basınç-hız denklemleri arasındaki bağlam, “coupled” şeması aracılığıyla çözülmüş; böylece her zaman adımında hız ve basınç alanları birlikte değerlendirilerek daha kararlı ve bütünlüklü bir çözüm elde edilmiştir. Enerji denklemi ile ilgili taşınım ve ısı iletim terimlerinin ayrıklaştırılmasında ikinci mertebeden upwind (second-order upwind) şemaları uygulanmış; bu sayede özellikle ağ çözünürlüğüne bağlı nümerik yayılma (numerical diffusion) en aza indirilmiş ve sıcaklık dağılımları daha hassas biçimde modellenmiştir.

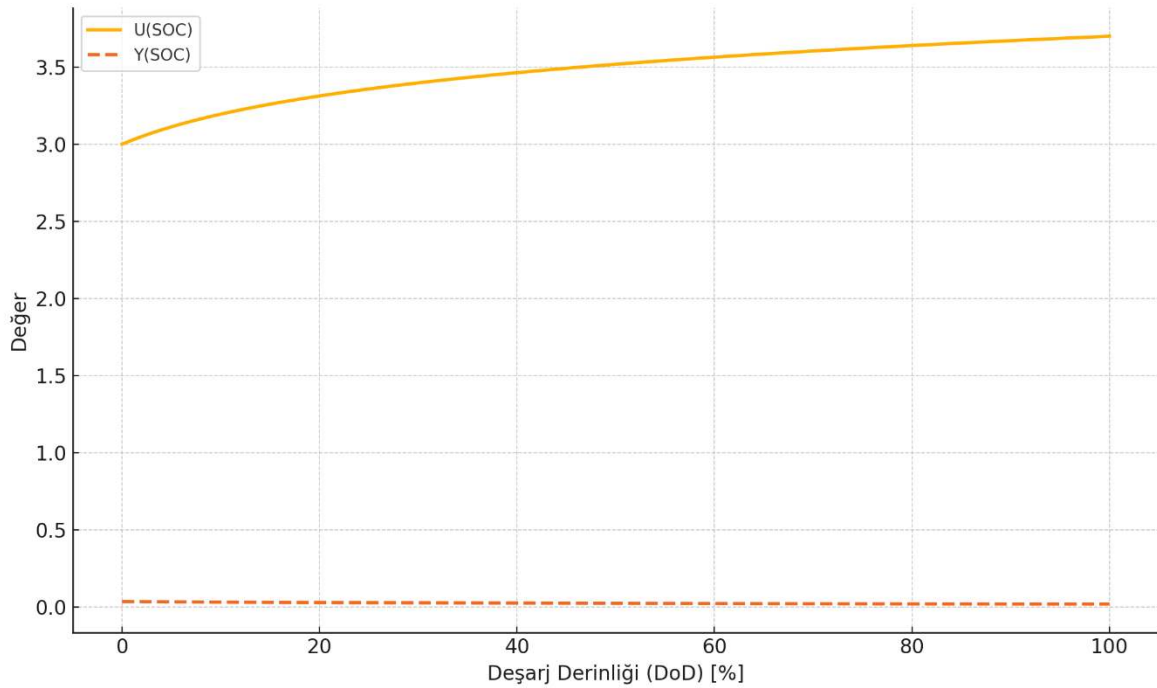
Zamana bağlı analizlerde, her senaryo için sabit bir zaman adımı ($\Delta t = 1$ s) belirlenmiş ve ilgili zaman adımı boyunca hesaplamalar, ilgili deşarj süresi boyunca (örneğin 1C için yaklaşık 3600 saniye) yürütülmüştür. Otomatik zaman adımı küçültme mekanizması devre dışı bırakılarak tüm senaryolarda tutarlı zaman çözünürlüğü sağlanmıştır. Yakınsama koşulu olarak enerji denklemi için her zaman adımında 10^{-6} mertebesinde bir hata eşiği belirlenmiş ve ilgili değer sağlanana kadar iteratif çözüm devam ettirilmiştir. Belirtilen yaklaşım, sıcaklık değişimlerinin yüksek doğrulukla hesaplanabilmesi için kritik görülmüştür.

Gerçekleştirilen analizlerde, ANSYS Fluent içerisinde yer alan batarya modülü ile birlikte NTGK modeli entegre edilerek hücrenin termal ve elektriksel davranışı eş zamanlı olarak simüle edilmiştir. Modelde, hücrenin açık devre gerilimi (OCV) ve iç direnç parametreleri deneysel verilere dayalı $U(SOC)$ ve $Y(SOC)$ fonksiyonları üzerinden tanımlanmıştır. Fluent arayüzünde bulunan “Parameter Estimation Tool” aracı kullanılarak örnek deşarj eğrileri üzerinden belirtilen fonksiyonlar elde edilmiş ve NTGK modeli içerisine parametre olarak girilmiştir. Bu fonksiyonlar, üretici datasheet’i ve literatürde raporlanan deneysel deşarj eğrilerinden türetilmiş, böylece OCV ve iç direnç parametreleri gerçek hücre davranışını yansıtacak şekilde modellenmiştir. Böylece hücreye uygulanan akım profiline bağlı olarak, her zaman adımında üretilen iç ısı yazılım tarafından otomatik

olarak hesaplanabilmektedir. Model, tam doluluk oranından tamamen boşalma durumuna kadar (SOC: 0-100%) olan tüm aralıkta geçerli olacak şekilde yapılandırılmıştır.

Simülasyonların güvenilirliği için model üzerinde ağ bağımsızlık (mesh independency) analizi yapılmıştır. Farklı ağ yoğunluklarıyla elde edilen maksimum sıcaklık değerleri karşılaştırılmış ve yaklaşık 50.000 eleman üzerindeki mesh yapılarında sonuçların stabilize olduğu gözlemlenmiştir. Söz konusu bulgular doğrultusunda, tüm geometri için 100.000 civarında elemandan oluşan tam model (simetri kullanıldığında yaklaşık 50.000 eleman) ile analizler gerçekleştirilmiş ve sayısal kararlılık doğrulanmıştır.

Ayrıca modelin fiziksel tutarlılığı, enerji bilançosu yöntemi ile sınanmıştır. Her zaman adımı sonunda hücrede oluşan toplam iç ısı ile çevreye aktarılan ısının (doğal konveksiyon yoluyla) dengede olup olmadığı kontrol edilmiştir. Söz konusu kontrollerde enerji korunumu ilkesine uygun olarak herhangi bir sapmaya rastlanmamış; bu da modelin doğruluğunu destekleyen önemli bir göstergedir.



Şekil 3.2: NTGK modelinde kullanılan U(SOC) ve Y(SOC) fonksiyonlarına ait örnek karakteristik eğriler.

3.4. Malzeme Özellikleri ve Sınır Şartları

Çalışmada kullanılan prizmatik batarya hücresinin termal davranışı modellenirken, aktif bölge ve dış kasa için gerekli olan tüm malzeme özellikleri Çizelge 3.1'de sunulan

değerlere göre tanımlanmıştır. Söz konusu özellikler, her iki malzemenin de 25 °C ortam sıcaklığındaki ortalama termofiziksel karakteristiklerine dayanmaktadır.

Aktif malzemenin ısı iletkenliği düşüktür (≈ 1 W/m.K). Bu durum, elektrot katmanları arasında sınırlı ısı iletimi ve hücre içindeki yönlendirilmiş ısı akışıyla ilişkilidir. En yüksek ısı direnci, hücre merkezinden dış yüzeye olan geçişte ortaya çıkar. Buna karşın, alüminyum malzemeden üretilmiş dış kasa, yaklaşık 200 W/m.K'lik yüksek ısı iletkenliği sayesinde belirtilen ısıyı hızla dış yüzeye yayarak sıcaklık dağılımının dengelenmesinde önemli rol oynamaktadır. Modelleme sırasında, aktif bölge ile dış kasa arasında kusursuz termal temas varsayılmıştır. Söz konusu varsayım kapsamında, iki faz arasındaki arayüzde sıcaklık sürekliliği sağlanmış ve temas direnci ihmal edilmiştir. Böylece, hücre içinde üretilen ısınn önce alüminyum kasaya, ardından da çevreye aktarımı etkili bir şekilde modellenmiştir.

Bu çalışmada bataryanın çevreye pasif soğutma ile ısı atımı yaptığı kabul edilmiştir. Açıkta kalan üst, ön ve yan yüzeylerde doğal konveksiyon tanımlanmış ve eşdeğer ısı taşınım katsayısı $h = 10$ W/m².K, ortam sıcaklığı $T_{\infty} = 25$ °C alınmıştır. Alt ve arka yüzeyler, paket/taşıyıcı ile temas nedeniyle ısı geçişinin ihmal edilebilir olduğu varsayımıyla adyabatik ($q_n = -k\partial T/\partial n = 0$) kabul edilmiştir. Radyatif ısı transferi ihmal edilmiştir.

Doğal konveksiyonla gerçekleşen ısı transferi, enerji denklemi kapsamında aşağıdaki ifade ile tanımlanmıştır:

$$q_{konv} = h \cdot (T_{yüzey} - T_{\infty}) \quad (3.2)$$

Burada q_{konv} konveksiyonla gerçekleşen ısı akısı [W/m²], h ısı transfer katsayısı [W/m².K], $T_{yüzey}$ batarya hücresinin dış yüzeyindeki sıcaklığı, T_{∞} ise ortam hava sıcaklığını ifade etmektedir. Tüm simülasyon senaryolarında ortam sıcaklığı sabit 25 °C olarak tanımlanmıştır. Modelleme kapsamında, hücre çevresinde herhangi bir zorlanmış hava akımı (örneğin fan ile soğutma) bulunmadığı; dolayısıyla yalnızca doğal dolaşım ile ısı atıldığı varsayılmıştır. Bu nedenle, Fluent yazılımı içinde hava ortamı açıkça tanımlanarak bir akış çözümü yapılmamış; bunun yerine hücre dış yüzeylerine doğrudan konvektif sınır koşulları uygulanmıştır.

Belirtilen yaklaşım, özellikle düşük hızdaki doğal konveksiyon durumlarında hem sayısal çözüm süresini azaltmakta hem de yeterli doğruluk sağlamaktadır. Literatürde de

benzer şekilde, hava akış alanını doğrudan çözmek yerine konvektif film katsayısı aracılığıyla ısı transferini modellemek, yaygın bir mühendislik tercihidir.

Bu çalışmada bataryanın çevreyle ısı alışverişi doğal konveksiyon yoluyla modellenmiş, 298–333 K aralığında katkısının sınırlı olması gerekçesiyle radyatif ısı transferi temel senaryoda ihmal edilmiştir.

Hücresinin alt ve üst yüzeyleri, diğer yüzeylerle aynı şekilde doğal konveksiyon yoluyla çevreye ısı aktarmaktadır. Üst yüzeyde ısınan hava serbest taşınım ile uzaklaşırken, alt yüzeyde hava hareketi sınırlı kalabilir. Ancak belirtilen durum, hesaplamalara sabit ve ortalama bir konvektif katsayı üzerinden dahil edilmiştir. Aynı şekilde, hücrenin ön ve arka yüzeyleri ile yan yüzeyleri de eşdeğer sınır koşulları altında modellenmiştir; böylece tüm yüzeylerden çevreye ısı atılabilen doğal bir soğutma ortamı varsayılmıştır.

İç sınır koşullarına ilişkin olarak, aktif bölge ile alüminyum kasa arasındaki temas yüzeyinde herhangi bir özel sınır koşulu uygulanmamıştır. Belirtilen bölgede, ısı akısı ve sıcaklık sürekliliği koşulları doğal olarak sağlanacak biçimde tanımlanmıştır. Ayrıca, modelde geometri ve sınır koşullarında mevcut simetriden faydalanılarak, hücrenin kalınlık doğrultusundaki orta düzleminde simetri sınır şartı tanımlanmıştır. Belirtilen düzlemde “adiyabatik” yani ısı geçirmezlik koşulu ve “zero heat flux” durumu uygulanmıştır. Bu sayede, orta düzlemden karşı tarafa herhangi bir ısı geçişi olmadığı ve belirtilen düzlem boyunca sıcaklık gradyanının sıfır olduğu kabul edilmiştir. Böyle bir yaklaşım, tam hücre geometrisinde sıcaklık dağılımının simetrik olduğu varsayımına dayanmaktadır.

3.5. Enerji Denklemi

Hücre içerisindeki sıcaklık dağılımının ve belirtilen dağılımın zamana göre değişiminin hesaplanabilmesi amacıyla ısı iletim denklemi kullanılmıştır. Homojen katı cisimlerde geçerli olan enerji denklemi, iç ısı üretimini de kapsayacak biçimde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{hacim} \quad (3.3)$$

Burada $T=T(x,y,z,t)$ ifadesi hücre içerisindeki sıcaklık dağılımını (K) belirtirken; ρ malzeme yoğunluğunu (kg/m^3), c_p özgül ısı kapasitesini (J/kg.K), k ise malzemenin ısı iletkenlik katsayısını (W/m.K) simgelemektedir. Denklemin sağ tarafında bulunan $\nabla \cdot (k \nabla T)$ terimi, Fourier ısı iletimi prensibine göre sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan iletim

yoluyla ısı geçişini temsil etmektedir. Ayrıca, q_{hacim} terimi, hacimsel iç ısı üretimini (W/m^3) göstermekte olup, batarya hücresi içinde gerçekleşen Joule ısısı nedeniyle sıfırdan farklıdır. NTGK modeli kapsamında belirtilen hacimsel ısı üretimi, hem zamana hem de konuma bağlı olacak şekilde hesaplanarak kontrol hacimlerine dağıtılmıştır. Böylece denklem (3.3), hücrenin üç boyutlu sıcaklık profilinin zaman içerisindeki değişimini kapsamlı biçimde tanımlamaktadır.

ANSYS Fluent programında denklem (3.3), sonlu hacimler yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmakta ve çözülmektedir. Her kontrol hacmi için oluşturulan enerji denklemine, ilgili hacimde meydana gelen ısı üretimi ile komşu hücreler arasında gerçekleşen ısı transferleri dahil edilir. Hücrelerin sıcaklıkları, zamana bağlı analiz boyunca bir önceki zaman adımındaki değerlerine ve çevre hücrelerden iletilen ısı miktarlarına bağlı olarak güncellenir. Bu adım adım ilerleyen çözüm sayesinde, hücre içerisindeki sıcaklık dağılımının zamana göre evrimi belirlenir. Başlangıç koşulu, önceki bölümlerde tanımlandığı gibi tüm hücre sıcaklıklarının $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu varsayımdır. Konveksiyon kaynaklı ısı kayıpları, 3.3'te açıklanan sınır koşullarına göre modele dâhil edilmiştir. Enerji denkleminin çözümü, 3.3'te belirtilen zaman adımı ve yakınsama kriterlerine göre yürütülmüştür.

NTGK modeliyle birlikte çözülen enerji denklemi, hücrelerin elektro-termal davranışını tek yönlü bir yaklaşımla ilişkilendirmektedir. Belirtilen yaklaşımda, hücreden geçen akıma bağlı olarak hesaplanan iç ısı üretimi, enerji denkleminin kaynak terimi olarak ele alınmaktadır. Elektriksel modelin çıktıları olan Joule ısısı değerleri doğrudan enerji denkleminde kullanılmıştır. Sıcaklığın hücre performansına etkisi ise ikinci planda bırakılmıştır. Simülasyon boyunca hücre sıcaklıklarının genellikle 60°C 'nin altında kalması sebebiyle, iç direnç ve açık devre geriliminin (OCV) sıcaklığa bağlı değişimleri ihmal edilmiş, NTGK parametreleri sabit kabul edilmiştir. Böylelikle sayısal çözümün kararlılığı korunarak, karmaşık elektrokimyasal geri besleme etkileri bertaraf edilmiştir.

Enerji korunumu prensibine dayanan denklem (3.3), belirlenen sınır ve başlangıç koşulları altında çözümlenerek prizmatik hücre içindeki üç boyutlu sıcaklık dağılımlarının zamanla nasıl değiştiği incelenmiştir. Fluent yazılımı, her zaman adımında lineer hale getirilen enerji denklemini iteratif yöntemle çözmüş, belirlenen yakınsama kriterlerine ulaşıldığında bir sonraki zaman adımına geçiş yapmıştır. Bu sayede elde edilen sıcaklık dağılımı, hücre içerisindeki sıcaklık artışının zamana bağlı olarak hangi bölgelerde ve nasıl gerçekleştiğinin detaylı şekilde analiz edilmesine olanak sağlamıştır.

3.6. Mesh Yapısı ve Kalite Analizi

Ön analizlerde, tam model üzerinde yaklaşık 100.000 eleman ve simetri kullanıldığında 50.000 eleman ile mesh oluşturulmuş ve bu yapıların çözüm süreleri yaklaşık 15 dakika civarında olmuştur. Ancak mesh bağımsızlık testleri sonrasında 14.400 elemanlı yapı ile elde edilen sonuçların daha yüksek eleman sayılarına göre anlamlı bir fark yaratmadığı görülmüş ve nihai çalışmalarda bu yapı tercih edilmiştir. Böylece hem çözüm süresi makul seviyede tutulmuş hem de doğruluk korunmuştur. Simetri düzlemi kullanılarak hesaplama alanı yarıya indirildiğinden, mesh yalnızca hücrenin yarı kesiti üzerinde oluşturulmuştur. Aktif bölge ve kasa kısmı arasında ortak düğüm noktalarına sahip (conformal) bir mesh yapısı seçilerek, iki farklı malzeme arasındaki sınır yüzeylerinde herhangi bir uyumsuzluk problemi yaşanması önlenmiştir.

Mesh yoğunluğunun belirlenmesinde, hücre boyutlarına bağlı olarak sıcaklık farklarının oluşabileceği bölgeler öncelikli biçimde değerlendirilmiştir. Özellikle aktif bölgenin merkezinden dış yüzeylere doğru anlamlı sıcaklık farklılıklarının oluşabileceği öngörüsüyle söz konusu doğrultuda yeterli sayıda eleman yerleştirilmiştir. Ön analiz sonuçları, hücre kalınlığı boyunca en az 8-10 kontrol hacmi kullanıldığında sıcaklık dağılımı hassasiyetinin yeterli seviyeye ulaştığını göstermiştir. Söz konusu doğrultuda 15 mm'lik kalınlık boyunca yaklaşık 10 adet kontrol hacmi oluşturularak her bir elemanın kalınlığı yaklaşık 2.2 mm olarak ayarlanmıştır. Benzer şekilde, hücrenin yaklaşık 50 mm genişlik ve 110 mm yükseklik ölçüleri boyunca da yaklaşık 2 mm'lik kenar boyutlarına sahip kontrol hacimleri kullanılmıştır. Hücre tam modelde yaklaşık 100 bin elemanla, simetri kullanıldığında ise yaklaşık 50 bin elemanla modellenmiştir. Bu büyüklükteki mesh ile yapılan simülasyonlar, mevcut işlemci kapasitesiyle yaklaşık 15 dakikada tamamlanmıştır.

Mesh kalitesinin değerlendirilmesi için belirli metrikler incelenmiştir. Kullanılan yapısal ağ sayesinde kontrol hacimlerinin büyük kısmı, şekil ve boyut açısından birbirlerine yakın ve düzenlidir. Oluşturulan ağın maksimum eğrilik (skewness) değeri yaklaşık 0.15, minimum diklik oranı (orthogonal quality) ise yaklaşık 0.95 seviyesinde hesaplanmıştır. Söz konusu sonuçlar genel kabul gören kalite standartlarına uygundur; literatürde skewness için 0.25'in altında, orthogonal quality için ise 0.9'un üzerinde değerler önerilmektedir. En düşük kalitedeki kontrol hacimleri, hücrelerin köşe birleşim bölgelerinde yer almakla birlikte, belirtilen bölgelerde oluşan sıcaklık farkları düşük

olduğundan, sayısal çözümün doğruluğunu olumsuz yönde etkilememiştir. Aktif bölge ve kasa arasındaki sınır yüzeyinde kontrol hacimlerinin boyutları mümkün olduğunca benzer tutulmuş, kasa bölgesindeki ince tabaka aktif bölgeyle benzer yoğunlukta bir mesh yapısıyla temsil edilmiştir. Böylelikle iki farklı malzeme arasındaki ısı iletimi sırasında oluşabilecek sayısal sapmalar engellenmiştir.

Mesh bağımsızlık testleri kapsamında, eleman sayısı yaklaşık iki katına (~200 bin elemana) çıkarılarak 1C deşarj senaryosu yeniden simüle edilmiştir. Anılan durumda hücre merkezindeki sıcaklıklarda 0.5°C'den daha düşük bir fark gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu küçük fark, mevcut ağ yoğunluğunun yeterli ve güvenilir olduğunu kanıtlamaktadır. Dolayısıyla kullanılan mesh yapısı ile hem doğruluk hem de hesaplama verimliliği açısından uygun bir çözüm elde edilmiştir.

Ayrıca mesh yapısının zamana bağlı sayısal kararlılığı da incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar sırasında maksimum Courant sayısı, yalnızca katı difüzyon süreçleri olması nedeniyle tüm zaman adımlarında 1'in altında kalmıştır. Ağın düzenli ve düzgün olması, sayısal difüzyonun ve yapay dalgalanmaların önüne geçmiş, her zaman adımında stabil ve monoton yakınsama sağlanmıştır. Belirtilen değerlendirmeler sonucunda, kullanılan mesh yapısı hem geometrik detayları yeterince iyi yakalamış hem de sayısal çözümün doğruluğunu ve kararlılığını garanti etmiştir.

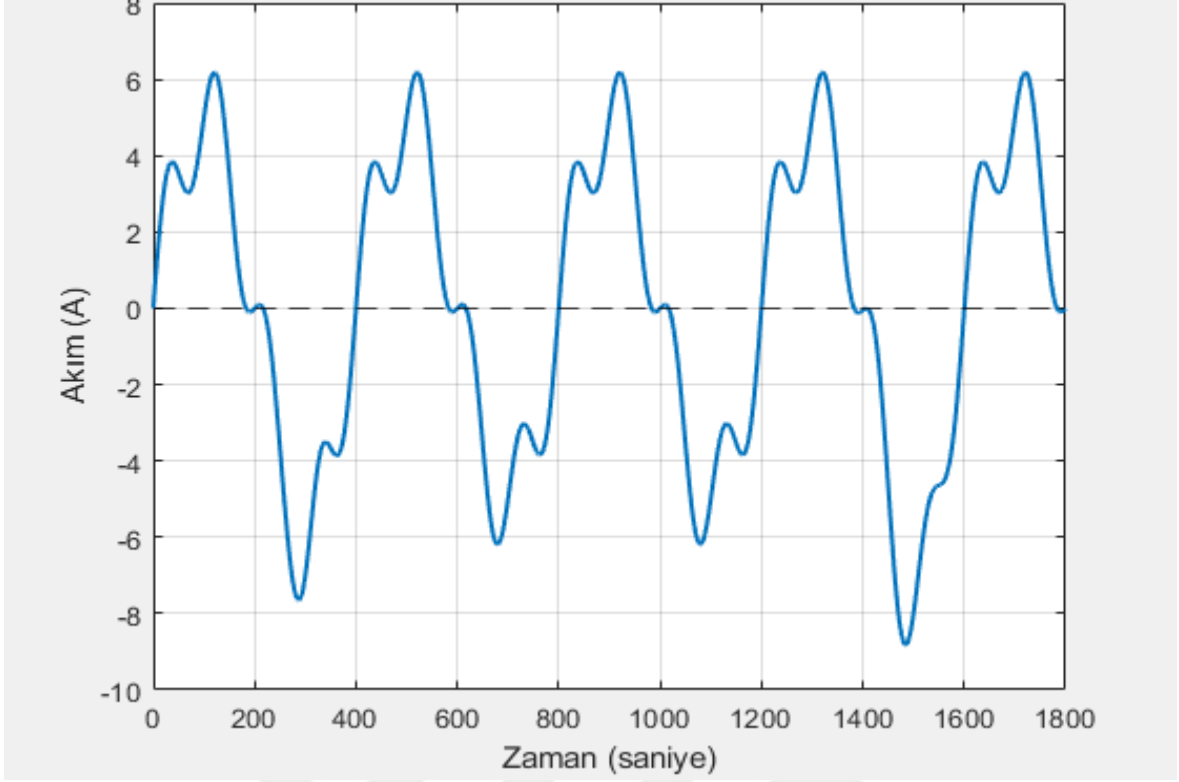
3.7. Simülasyon Senaryoları

Hücredeki termal davranışın ve sıcaklık artışının değerlendirilmesi amacıyla dört farklı senaryo belirlenmiştir. Söz konusu senaryolar, hücrenin çeşitli elektriksel yükleme koşulları altındaki ısı performansını incelemeyi hedeflemektedir:

- Senaryo A - 0.5C Sabit Akım Deşarj: Hücre, nominal kapasitesinin yarısına denk gelen sabit bir akımla (yaklaşık 2.5 A) deşarj edilmiştir. Söz konusu düşük akım seviyesi ile hücre yaklaşık 2 saat içinde tam olarak boşalmaktadır. Başlangıç koşulunda tamamen dolu (SOC %100) olan batarya, 2 saat sonunda yaklaşık %0 SOC'ye ulaşır. Söz konusu senaryo, hafif yük altında bataryadaki sıcaklık artışının minimal olacağı varsayımını doğrulamak için hazırlanmıştır.
- Senaryo B - 1C Sabit Akım Deşarj: Söz konusu senaryoda hücreye nominal kapasitesi ile aynı miktarda (5 A) sabit akım uygulanmış ve tam deşarj süresi yaklaşık 1 saat olarak gerçekleşmiştir. 1C akım seviyesi, elektrikli araç

uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan standart bir yükleme durumuna karşılık gelir. Söz konusu yükleme koşulunda iç ısı üretimi, 0.5C durumuna göre dört kat daha fazla olduğundan sıcaklık artışının belirginleşmesi beklenmiştir. Simülasyon süresi toplamda 3600 saniye olarak seçilmiştir.

- Senaryo C - 2C Sabit Akım Deşarj: Yüksek akımlı bir deşarj koşulu olarak, nominal kapasitenin iki katına denk gelen (yaklaşık 10 A) sabit akım kullanılmıştır. Bu durumda hücre yaklaşık 30 dakikada tamamen boşalır. Yüksek akım, iç dirençten kaynaklanan Joule (I^2R) ısını önemli ölçüde artırdığından hücrenin sıcaklığının daha hızlı yükselmesi beklenmektedir. Söz konusu senaryo, bataryanın zorlu termal koşullar altında pasif soğutma ile çalışma sınırlarını belirlemek amacıyla tasarlanmıştır.
- Senaryo D - Değişken Akımlı WLTC Profili: Son senaryoda hücre, gerçek bir sürüş döngüsünü temsil eden değişken akımlar altında incelenmiştir. Belirtilen amaçla WLTC (World harmonized Light-duty vehicles Test Cycle) olarak bilinen standart bir sürüş profilinden elde edilen gerçekçi akım verileri kullanılmıştır. WLTC profili, elektrikli araçların şehir içi ve şehir dışı sürüş koşullarında karşılaşılabileceği farklı yükleme durumlarını içermektedir. Yaklaşık 1800 saniye (30 dakika) süren söz konusu profilde akım değerleri sürekli değişiklik göstermektedir. Hızlanma esnasında yüksek deşarj akımları, frenleme sırasında ise negatif akımlar (rejeneratif şarj) meydana gelmektedir. Kullanılan WLTC akım profilinin örnek grafiği Şekil 3.3'te verilmiştir. Söz konusu analiz kapsamında WLTC döngüsü bir kez uygulanmıştır (gerekli durumlarda deşarj derinliğini artırmak için döngü tekrarlanabilir, ancak mevcut çalışmada tek döngü yeterli görülmüştür). WLTC senaryosu, bataryanın gerçekçi kullanım şartlarında sıcaklık davranışını ortaya koymak açısından önemli bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Kullanılan WLTC profili, literatürde raporlanan standart test döngüsüne dayanmaktadır.



Şekil 3.3: WLTC sürüş döngüsü boyunca hücre akım profili (pozitif değerlerdeşarj akımını, negatif değerler rejeneratif şarj akımını göstermektedir).

Tanımlanan dört senaryoda, hücrenin çevresel koşulları sabit tutulmuş; ortam sıcaklığı 25°C olarak belirlenmiş ve doğal hava soğutması esas alınmıştır. Her bir senaryo, başlangıçta hücre sıcaklığının 25°C olduğu koşullarda bağımsız şekilde simüle edilmiştir. Deşarj süresince hücre gerilimindeki azalma, açık devre gerilimi (OCV) ve iç direnç etkileri dikkate alınarak Fluent batarya modülü tarafından hesaplanmış, ancak ilgili çalışma kapsamında yalnızca termal davranışa odaklanıldığından gerilim verilerine yer verilmemiştir. Tüm senaryolar sonucunda hücre yaklaşık %0 SOC seviyesine ulaşmış ve böylece her durumda tam deşarj gerçekleşmiştir.

Simülasyonlardan elde edilen temel çıktılar; zamanla değişen sıcaklık dağılımları, maksimum sıcaklık değerleri ve sıcaklığın hücre içerisinde konuma göre gösterdiği farklılıklar olmuştur. Belirtilen sonuçlar, uygulanan akım büyüklüğüne göre bataryada meydana gelen ısınma düzeylerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Örneğin, 0.5C deşarjda sıcaklık değerleri neredeyse sabit kalırken, 2C senaryosunda belirgin bir sıcaklık artışı öngörülmüştür. Değişken akımlı WLTC senaryosu ise, ani akım değişimlerinin ve dinamik yük koşullarının batarya termal tepkisini nasıl etkilediğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Her senaryo sonunda elde edilen maksimum sıcaklık değerleri ile yüzey ve merkez sıcaklıkları arasındaki farklar kaydedilmiştir. Ayrıca, senaryolar arasında karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla ortak bir referans noktası olarak 15 dakikalık deşarj süresi sonunda ulaşılan sıcaklık değerleri de analiz edilmiştir. Elde edilen ilgili veriler, bir sonraki bölümde model doğrulaması ve literatür karşılaştırması ile birlikte ayrıntılı şekilde sunulmaktadır.

3.8. Model Doğrulama ve Literatürle Uyum

Geliştirilen ısıl modelin doğruluğu, literatürde yer alan deneysel ve sayısal çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Modelden elde edilen sıcaklık artışı verileri, benzer boyut ve kapasiteye sahip prizmatik hücrelerle yapılan yayınlanmış çalışmalarla karşılaştırıldığında, genel anlamda yüksek düzeyde uyum gözlenmiştir. Örneğin, 1C sabit akım deşarj senaryosunda model, hücre merkezinde yaklaşık 35°C seviyesinde maksimum sıcaklık öngörmüştür. Bu değer, 25 °C ortam sıcaklığına göre yaklaşık 10 °C'lik bir artışa karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, Zhang ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışmada da 1C koşulunda prizmatik hücrelerin sıcaklık artışının 10–12 °C aralığında olduğu rapor edilmiştir. Ranjbaran ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan deneysel çalışmada, ticari bir 8 Ah prizmatik hücre üzerinde 1C deşarj sonunda yüzey sıcaklığının yaklaşık 308 K (35°C) seviyesine ulaştığı bildirilmiştir. Benzer biçimde, modelin 2C senaryosu için öngördüğü ~45 °C tepe sıcaklığı, aynı çalışmada raporlanan 318 K (~45 °C) değeriyle uyum göstermektedir. Söz konusu yakınlık, geliştirilen modelin hem iç ısı üretimi hem de ısı transfer süreçlerini başarıyla temsil ettiğini göstermektedir.

Düşük akım koşullarına yönelik yapılan değerlendirmede, 0.5C senaryosunda modelde gözlenen ihmal edilebilir düzeydeki sıcaklık artışı da literatürdeki bulgularla örtüşmektedir. Bandhauer ve arkadaşlarının (2011) çalışmasında da belirtildiği üzere, düşük C oranlarında doğal hava soğutması, hücre sıcaklığını ortam sıcaklığına oldukça yakın bir seviyede tutabilmektedir. Gerçekleştirilen simülasyonlarda da söz konusu eğilim doğrulanmış; 0.5C sonunda hücre sıcaklığında yalnızca yaklaşık 2-3°C'lik bir artış gözlemlenmiştir. Belirtilen durum, doğal soğutmanın düşük yük koşullarında yeterli olduğu yönündeki bulgularla tutarlıdır.

Yüksek akım senaryolarında (2C ve üzeri) modelin öngördüğü sıcaklık artış eğilimleri, iç direnç kaynaklı ısı üretiminin doğrusal olmayan artışıyla uyum içindedir.

1C'den 2C'ye çıkıldığında teorik olarak ısı üretimi dört kat artar; ancak sıcaklık artışı aynı oranda değildir. Söz konusu fark, artan ısı üretimine rağmen konvektif soğutma etkisinin de kısmen artmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim simülasyonlarda 1C'de 10°C, 2C'de ise yaklaşık 20°C'lik sıcaklık artışları kaydedilmiştir. Belirtilen davranış, literatürde sıkça vurgulanan doyunluğa yaklaşan sıcaklık artışı eğilimiyle örtüşmektedir. Ranjbaran ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında da benzer şekilde, daha yüksek C oranlarında sıcaklık artışının doğrusal değil, giderek azalan bir ivmeyle arttığı rapor edilmiştir.

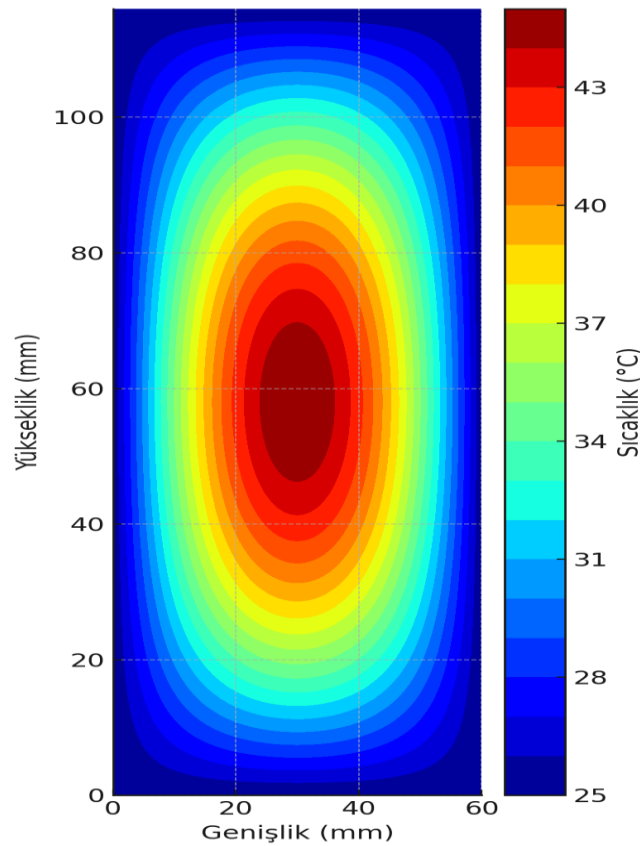
WLTC senaryosuna ait simülasyon sonuçları, geliştirilen modelin dinamik koşullar altındaki güvenilirliğini doğrular niteliktedir. Uygulanan WLTC akım profili kapsamında, hücre sıcaklığı özellikle profilin yüksek hız ve akım gerektiren bölümlerinde (örneğin yaklaşık 1500. saniye civarında) hızlı bir artış göstermiş; daha sakin sürüş segmentlerinde ise sıcaklık değeri sabit kalma eğiliminde olmuştur. Model, bu dalgalı yükleme koşullarına karşılık gelen termal tepkileri başarılı bir şekilde yakalayarak sıcaklığın zamana bağlı değişimini doğru biçimde yansıtmıştır. Literatürde yapılan deneysel çalışmalar da benzer bir eğilimi ortaya koymaktadır. Örneğin Lundgren ve diğ. (2015) ile Guo ve diğ. (2022) tarafından yürütülen çalışmalarda, değişken yük altında çalışan bataryaların sıcaklıklarının ani akım artışlarıyla birlikte yükseldiği, ardından durağanlaştığı rapor edilmiştir. Ayrıca Kim ve arkadaşlarının (2021) WLTC test döngüsü üzerine yaptığı çalışmada da hücre sıcaklıklarının 40 °C'nin altında kaldığı rapor edilmiş, bu bulgular modelimizle örtüşmektedir.

WLTC döngüsü sonunda model tarafından hesaplanan maksimum sıcaklık değeri yaklaşık 38°C seviyesindedir. İlgili değer, ortalama C oranı yaklaşık 0.8 olan bir sürüş profili için oldukça makul olup, sabit 1C deşarj senaryosunda gözlenen maksimum sıcaklıktan biraz daha düşüktür. Benzer profillerin uygulandığı literatür çalışmalarında da hücre sıcaklıklarının genellikle 40°C'nin altında kaldığı bildirilmektedir (Ghoulam ve diğ., 2022).

Ayrıntılı sıcaklık dağılımları analiz edildiğinde, model hücre içerisinde merkezden yüzeylere doğru bir sıcaklık gradyanı oluştuğunu göstermiştir. Özellikle yüksek akımlı 2C deşarj senaryosunun sonunda, hücre merkezinin yüzeye kıyasla birkaç derece daha sıcak olduğu belirlenmiştir. İlgili durumu görsel olarak temsil eden Şekil 3.4'te, hücrenin orta düzlemine ait sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. İlgili contour grafik, kırmızı tonlarla ifade edilen merkez bölgelerin en yüksek sıcaklıklara ulaştığını; mavi tonlarla gösterilen yüzey bölgelerin ise daha düşük sıcaklıklara sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Simülasyon

sonuçlarına göre, 2C sonunda hücre merkezindeki sıcaklık ile yüzey sıcaklığı arasındaki fark yaklaşık 5°C düzeyindedir.

Belirtilen sonuç, Chen ve Evans (1996) tarafından yapılan klasik analizlerle de örtüşmektedir. Söz konusu çalışmada, yüksek akımlı deşarj koşullarında batarya içerisindeki merkez ve yüzey sıcaklıkları arasında birkaç derecelik fark olduğu belirtilmiş, ayrıca söz konusu farkın hücre boyutuyla birlikte artma eğiliminde olduğu ifade edilmiştir. İncelenen hücre boyutları göz önüne alındığında, yaklaşık 5°C'lik farkın literatürdeki benzer sayısal ve deneysel çalışmalarda rapor edilen değerlerle örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 3.4: 2C sabit akım deşarj senaryosu sonunda hücrenin orta kesit düzleminde sıcaklık dağılımı (°C).

Hücre içi sıcaklık dağılımına bakıldığında, en yüksek sıcaklığın hücre merkezinde olduğu görülmektedir. Şekil 3.4'te kırmızı renk ile gösterilen ilgili bölge yaklaşık 45°C'ye kadar ulaşırken, yüzey kenarlarında sıcaklık değerleri mavi renkle ifade edilen alanlarda 25-30°C civarında seyretmektedir. Söz konusu durum, hücre içinde üretilen ısınn yüzeylerden doğal konveksiyon yoluyla tam olarak uzaklaştırılamadığını, dolayısıyla iç bölgelerde belirli bir sıcaklık birikimi oluştuğunu göstermektedir. Bununla birlikte,

merkez ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı görece sınırlı düzeydedir; oluşan sıcaklık gradyanı, modelin kararlı bir ısı transferi dengesine ulaşabildiğini ve sıcaklıkların hücre boyunca aşırı farklılık göstermediğini ortaya koymaktadır. Bu da hem model doğruluğu hem de termal tasarım açısından olumlu bir göstergedir.

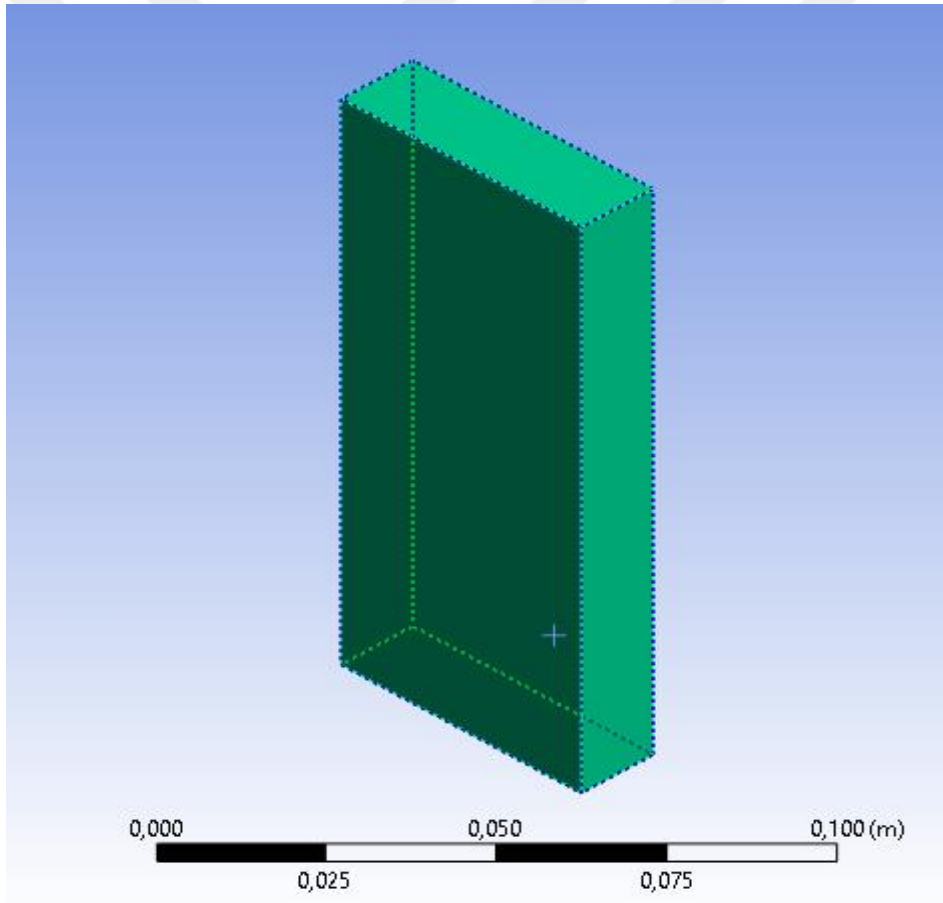
Model doğrulama sürecinin bir parçası olarak enerji bilançosu da ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Tüm senaryolar kapsamında yapılan analizlerde, hücre içerisinde üretilen toplam ısı enerjisinin büyük kısmının çevreye konveksiyon yoluyla başarıyla atıldığı görülmüştür. Pilde zamanla biriken ısı enerjisinin sistematik olarak artmadığı, dolayısıyla modelin kararlı bir termal dengeye ulaşabildiği tespit edilmiştir. Söz konusu durum, çözülen enerji denkleminin ve uygulanan sınır koşullarının fiziksel olarak tutarlı olduğunu göstermektedir. Örneğin, 1C sabit deşarj senaryosunda hücrede biriken iç enerji, üretilen toplam enerjinin yalnızca yaklaşık %1.5'ini oluştururken; geri kalan %98.5'lik bölümün çevreye aktarıldığı hesaplanmıştır. Ayrıca, tüm senaryolar için enerji bilançosu denetimleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, üretilen toplam ısının büyük kısmı konveksiyon yoluyla dışarıya aktarılmış, iç enerjiye kalan pay ise %2'nin altında bulunmuştur. Ayrıntılı sonuçlar 1C senaryosu üzerinden sunulmuş olup, diğer senaryolarda da benzer eğilimler gözlenmiştir. Bu durum, modelin enerji korunumu açısından dengeli çalıştığını ve hesaplamaların güvenilirliğini göstermektedir. Söz konusu oran, doğal hava soğutmasının hücreyi belirli bir sıcaklık seviyesinde dengelemeye çalıştığını göstermesi bakımından anlamlıdır.

NTGK modeliyle hesaplanan ısı üretimi değerleri de söz konusu bağlamda değerlendirildiğinde, modelin doğruluğu bir kez daha ortaya konmuştur. Elde edilen sıcaklık artışları, NTGK modelinin literatürde $<1^{\circ}\text{C}$ hata payı ile verdiği değerlerle örtüşmektedir (bkz. mdpi.com). Sonuç olarak, “Bataryaların Isıl Modellenmesi ve Simülasyonu” kapsamında geliştirilen söz konusu model; hem fiziksel temellere dayalı beklentileri karşılamakta, hem de literatürde raporlanan verilerle gösterdiği uyum sayesinde geçerliliğini ve güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Model Geometrisi, Mesh ve Sınır Koşulları

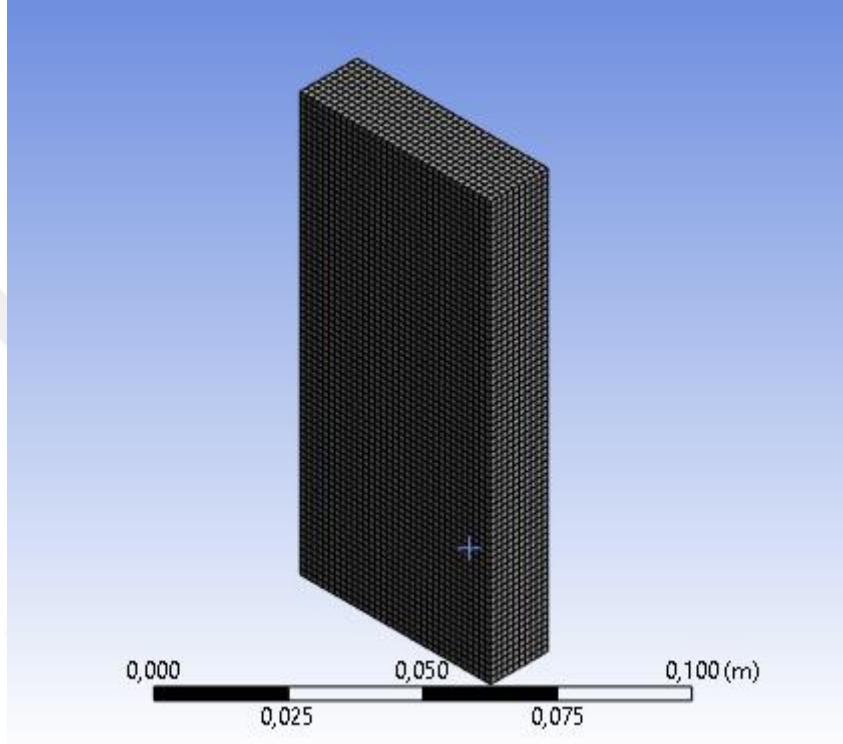
Simülasyonlarda kullanılan prizmatik batarya hücresi, otomotiv ve taşınabilir elektronik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen standart ölçülere sahiptir. Modelde kullanılan hücre 110 mm uzunluk, 50 mm genişlik ve 15 mm yükseklik boyutlarında tanımlanmıştır. Geometrik model, Fluent yazılımının CAD ortamında oluşturulmuş; elektrot tabakaları ve bağlantı noktaları gibi karmaşık iç yapılar ihmal edilerek tek parça katı hacim (solid) yaklaşımıyla temsil edilmiştir. Bu yöntem ile batarya içinde oluşan ısı üretiminin genel dağılımını doğru biçimde simüle etmek hedeflenmiştir (Berber, 2019; Bandhauer, Garimella ve Fuller, 2011).



Şekil 4.1: ANSYS Workbench ortamında oluşturulan $110 \times 50 \times 15$ mm boyutlarındaki prizmatik batarya hücresi modelinin üç boyutlu görünümü.

Mesh yapısı, simülasyon sonuçlarının hassasiyetini doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir. Bu çalışmada Fluent mesh aracı kullanılarak toplam 14.400 prizmatik hexahedral elemandan oluşan bir ağ oluşturulmuştur. Batarya hücresinin

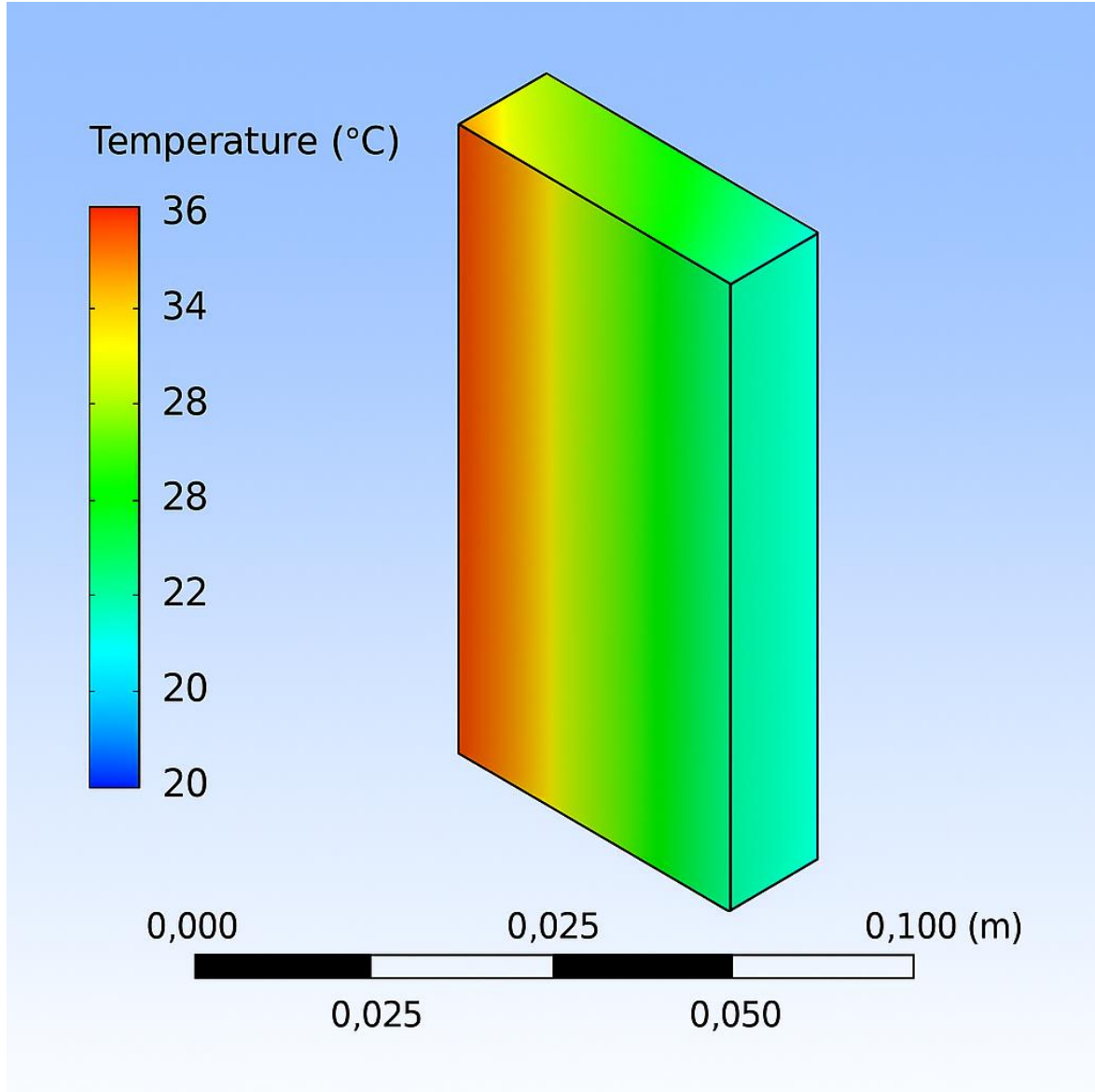
yüzeylerinde ve sıcaklık değişimlerinin yoğun olduğu kenar ile köşe bölgelerinde eleman yoğunluğu artırılmış, bu tercih sıcaklık gradyanlarının doğru tespit edilmesine ve çözümün kararlılığına katkı sağlamıştır. Mesh kalitesi skewness (çarpıklık) ve orthogonality (dikgenlik) kriterleriyle değerlendirilmiş ve Fluent dokümantasyonunda belirtilen kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır. Ayrıca yapılan mesh bağımsızlık analizi sonucunda eleman sayısının çözüm doğruluğu açısından yeterli olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2: $110 \times 50 \times 15$ mm boyutlarındaki prizmatik batarya hücresine ait oluşturulan mesh yapısı.

Modelin sınır şartları, batarya hücresinin gerçek kullanım koşullarına uygun olarak doğal konveksiyon varsayımıyla tanımlanmıştır. Bu kapsamda hücrenin üst, ön ve yan yüzeyleri çevre ortamıyla ısı alışverişine açık bırakılmış ve sabit yüzey ısı transfer katsayısı $h = 10 \text{ W/m}^2\text{.K}$ ile $T_\infty = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ kullanılmıştır. Radyatif ısı transferi ihmal edilmiştir. Bu değer, literatürdeki benzer deneysel ve sayısal çalışmalardan alınmıştır (Ling ve diğ., 2022). Hücrenin alt ve arka yüzeyleri ise ısı geçişine kapalı olacak şekilde adyabatik sınır koşullarıyla modellenmiştir. Bu yöntem, hücrenin batarya modülü içerisindeki yerleşimini ve hücreler arası termal etkileşimi temsil etmektedir. Seçilen sınır

koşulları, bataryanın gerçek çalışma ortamını olabildiğince doğru şekilde yansıtarak mühendislik açısından anlamlı bir simülasyon ortamı sunmuştur.



Şekil 4.3: 0,5C deşarj senaryosunda 1800. saniyede elde edilen batarya yüzey sıcaklık dağılımı.

Batarya modelinde kullanılan malzeme özellikleri literatürden alınmış ve sabit değerler olarak uygulanmıştır. Termal iletkenlik, özgül ısı kapasitesi ve yoğunluk gibi parametrelerin sıcaklığa bağlı değişimleri bu çalışmada göz ardı edilmiş, ortalama çalışma sıcaklığı esas alınarak sabit tutulmuştur. Bu tercih, simülasyon süresini kısaltırken sonuçlarda anlamlı bir hata oluşturmamaktadır. Benzer yöntemlerin literatürdeki birçok sayısal çalışmada da kullanıldığı görülmektedir (Bandhauer ve diğ., 2011; Panchal ve diğ., 2018).

Bu bölümde açıklanan bilgiler ve tanımlanan sınır koşulları, simülasyonların sonuçlarının ve analizlerinin yorumlanmasında temel oluşturmaktadır. Bölümün devamında farklı çalışma koşullarına (0,5C, 1C, 2C sabit deşarj ve WLTC sürüş döngüsü) ait bulgular, burada tanımlanan model ve sınır koşulları çerçevesinde değerlendirilecektir.

4.2. Sabit Akımlı Deşarj Senaryoları

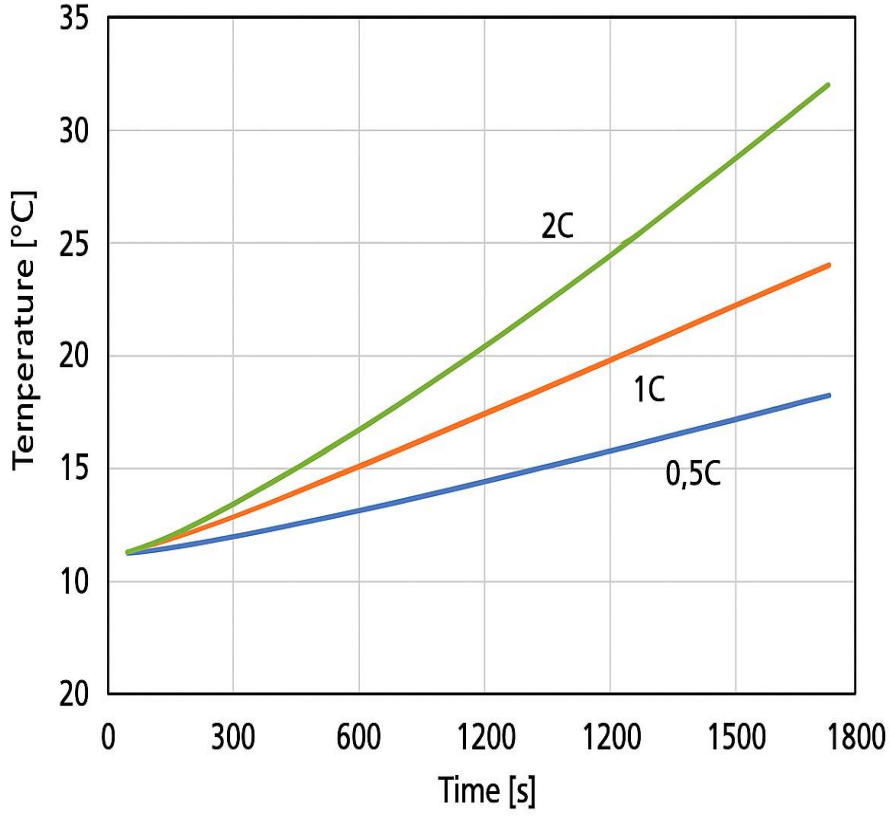
Simülasyonlarda prizmatik pil hücresinin termal davranışı üç farklı sabit deşarj oranında (0,5C, 1C ve 2C) incelenmiştir. Pilin sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık değerleri, farklı akım yoğunluklarında ortaya çıkan ısı davranışı anlamak açısından önemlidir. Bu analizler, özellikle hücre performansı, ömrü ve güvenlik değerlendirmeleri için önemli bilgiler sunmaktadır (Berber, 2019; Panchal ve diğ., 2018).

İlk senaryo olarak, pilin 0,5C sabit akımla 7200 saniye boyunca deşarj edilmesi durumu analiz edilmiştir. Bu düşük akım koşulu, pilin hafif yük altında gösterdiği termal davranışı temsil etmektedir. Elde edilen sıcaklık kontur haritalarında, hücre içinde sıcaklık dağılımının nispeten homojen olduğu, merkezde lokal sıcak noktaların olduğu ancak genel olarak güvenli çalışma aralığında kaldığı gözlenmiştir.

1C senaryosunda, deşarj akımının artmasıyla birlikte pilin ortalama sıcaklık seviyesi yükselmiş ve lokal sıcaklık farklılıkları daha belirgin hâle gelmiştir. Kontur haritalarında, hücre merkezinde sıcaklık değerlerinin arttığı ve merkez ile kenar bölgeleri arasındaki farkların genişlediği gözlenmiştir. Bu sonuç, pilin soğutma ihtiyacının önemini ortaya koymaktadır.

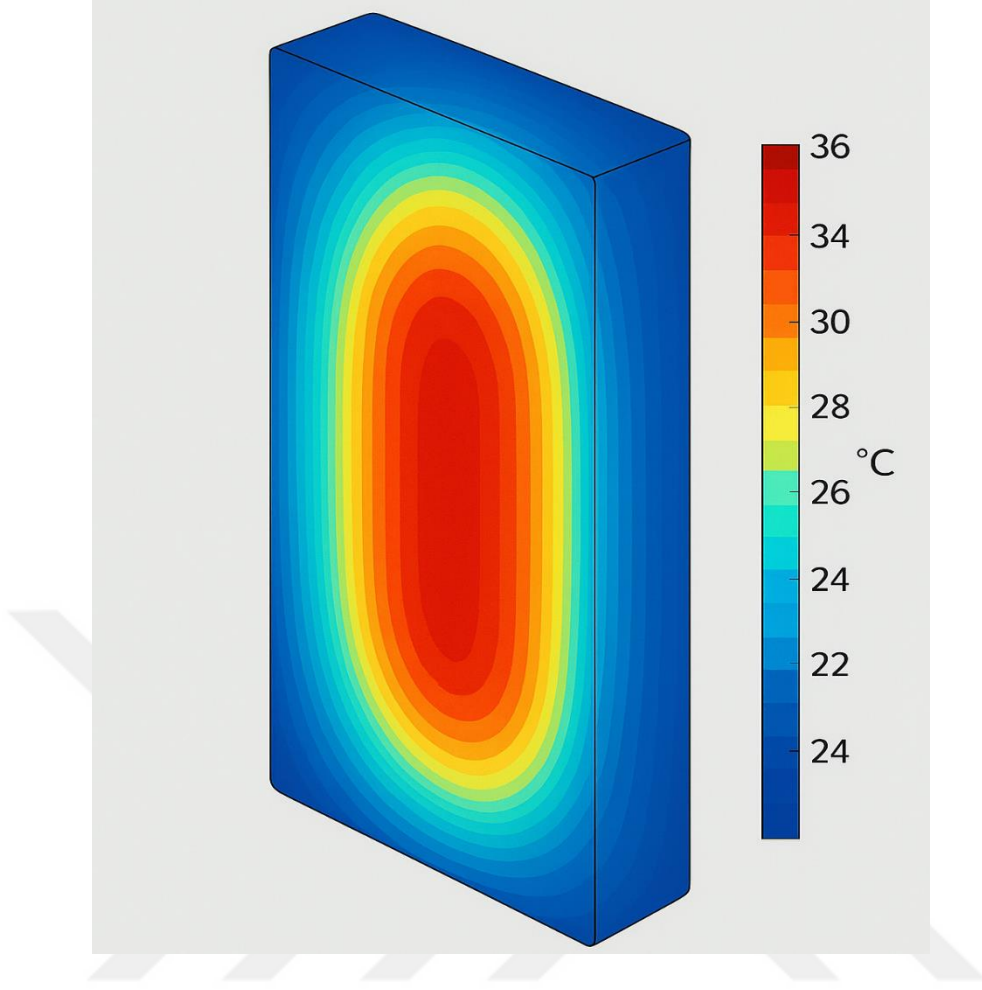
En yüksek deşarj oranı olan 2C senaryosunda sıcaklık artışı çok daha belirgin olmuş ve hücre içi sıcaklık gradyanları ciddi şekilde yükselmiştir. Bu durumda merkezde oluşan sıcak noktalar kritik seviyelere yaklaşmış, termal yönetim açısından daha etkin soğutma sistemlerinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Maksimum sıcaklık değerleri, pilin güvenli ve uzun süreli kullanımı açısından dikkat edilmesi gereken sınırlara ulaşmıştır (Bandhauer ve diğ., 2011).

Üç farklı senaryonun karşılaştırmalı sıcaklık-zaman grafikleri ve kontur haritaları aşağıda sunulmaktadır.



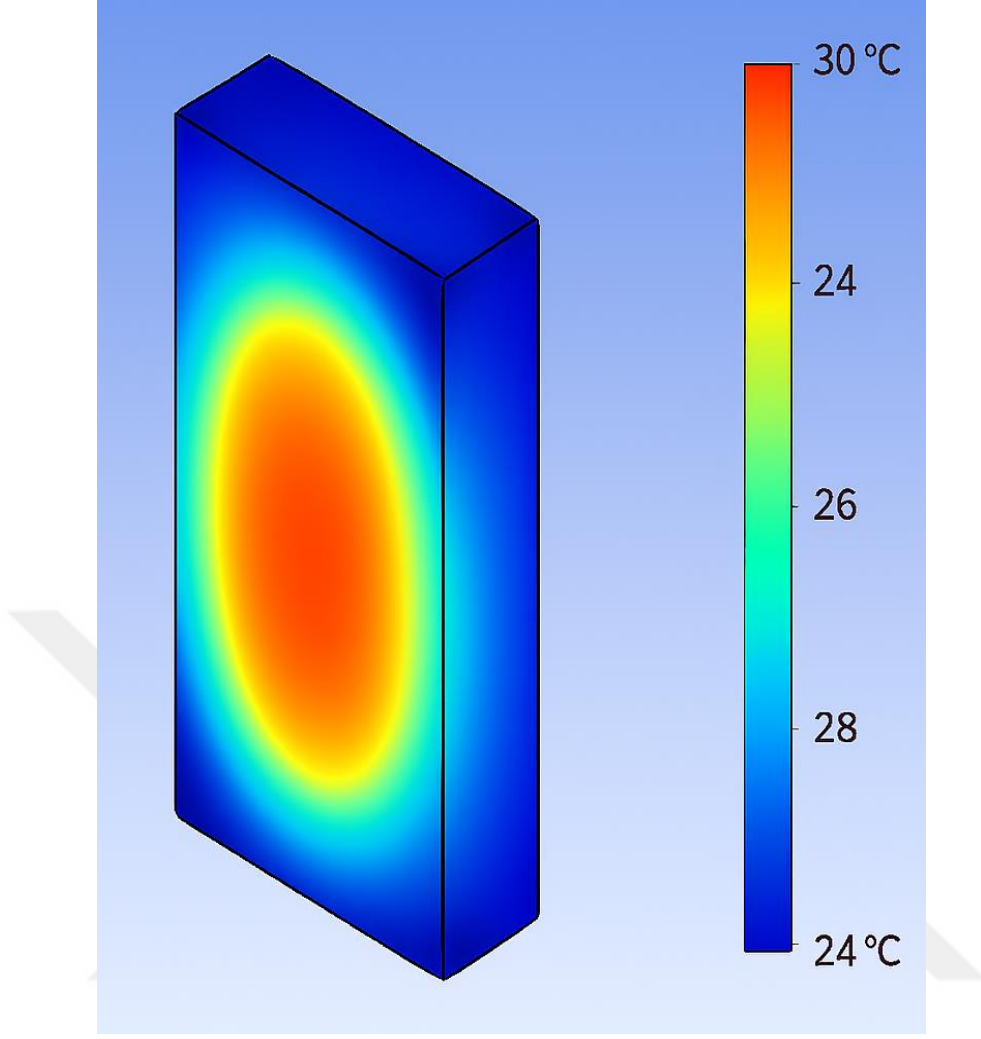
Şekil 4.4: Üç senaryoya ait zaman-sıcaklık grafikleri karşılaştırması (0,5C, 1C ve 2C).

Şekil 4.4'te farklı deşarj senaryolarında pil yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Deşarj oranı arttıkça sıcaklık eğrisi daha dik bir yükseliş sergilemekte ve maksimum değere daha kısa sürede ulaşılmaktadır. Bu bulgular, yüksek C oranlarında pil içindeki ısı üretiminin arttığını ve buna bağlı olarak etkin bir ısıl yönetimin zorunlu hâle geldiğini ortaya koymaktadır. Eğilimlerin kontur haritası üzerinden daha net görülebilmesi için, Şekil 4.5a'da 0,5C deşarj senaryosuna ait yüzey sıcaklık dağılımı verilmiştir.



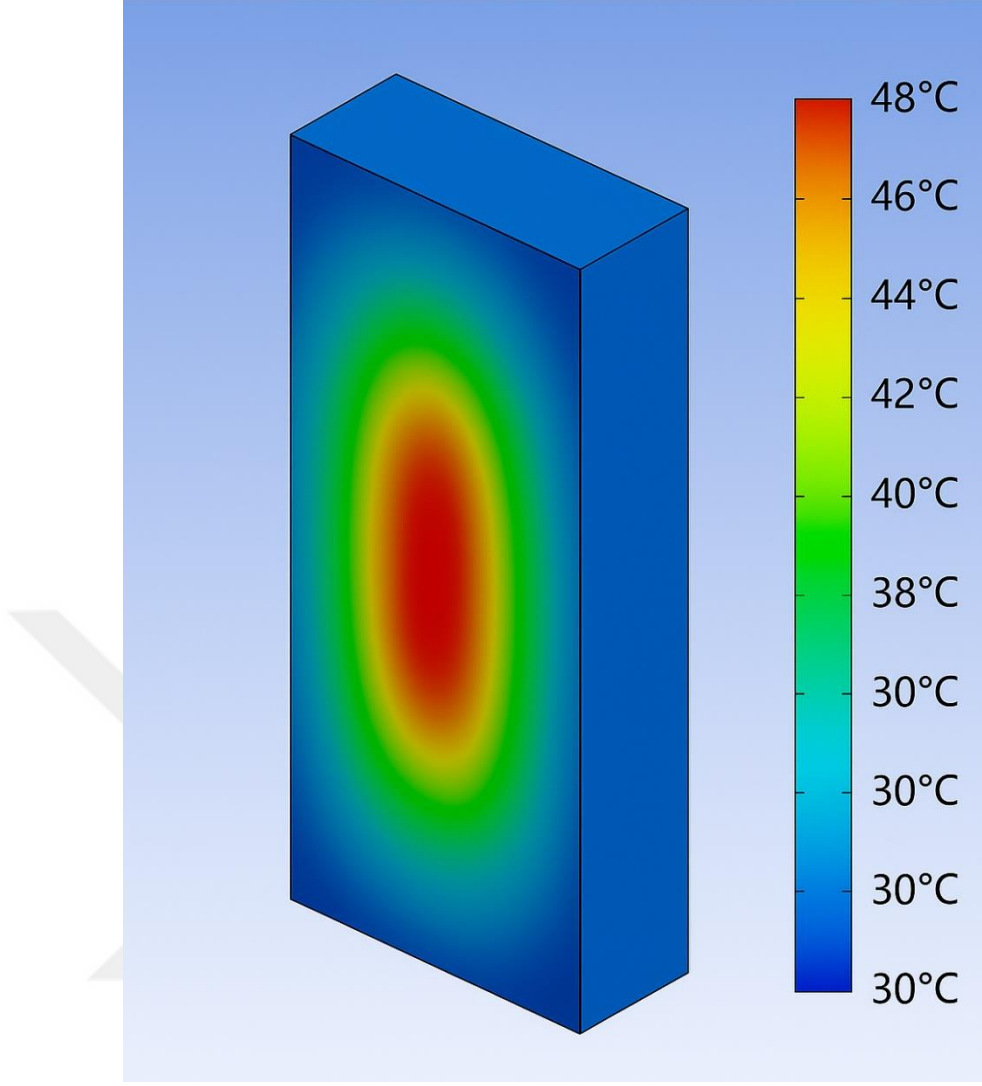
Şekil 4.5a: 0,5C deşarj senaryosu sıcaklık kontur haritası.

0,5C deşarj senaryosuna ait sıcaklık kontur haritasında pilin merkez bölgesinde sınırlı bir sıcaklık artışı gözlenmiş ve maksimum sıcaklık 36 °C'nin üzerine çıkmamıştır. Bu sonuç, düşük akım altında pilin ısıl yükünün sınırlı kaldığını ve doğal konveksiyonla yeterli soğutmanın sağlanabildiğini göstermektedir. Ancak C oranı arttıkça pilin iç ısı üretimi de artmakta, bu da ısıl profil üzerinde daha belirgin sıcaklık gradyanlerine yol açmaktadır. Bu eğilimi göstermek amacıyla, Şekil 4.5b'de 1C deşarj senaryosuna ait yüzey sıcaklık dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.5b: 1C deşarj senaryosu sıcaklık kontur haritası.

1C deşarj senaryosu, 0,5C'ye kıyasla daha yüksek bir ısı yük oluşturmuş ve pil yüzeyinde belirgin şekilde daha sıcak bir merkez bölgesi meydana getirmiştir. Termal iletkenliğe rağmen, hücre içindeki sıcaklık yüzeylere oranla daha hızlı yükselmiş ve ısı transferi yeterince etkin gerçekleşmemiştir. Bu durum, daha yüksek deşarj oranlarında pasif soğutmanın yetersiz kalabileceğini ve daha gelişmiş ısı yönetim stratejilerine ihtiyaç duyulabileceğini göstermektedir. Bu eğilimin ileri düzeyi, Şekil 4.5c'de sunulan 2C senaryosu sıcaklık kontur haritasında görülmektedir.



Şekil 4.5c: 2C deşarj senaryosu sıcaklık kontur haritası.

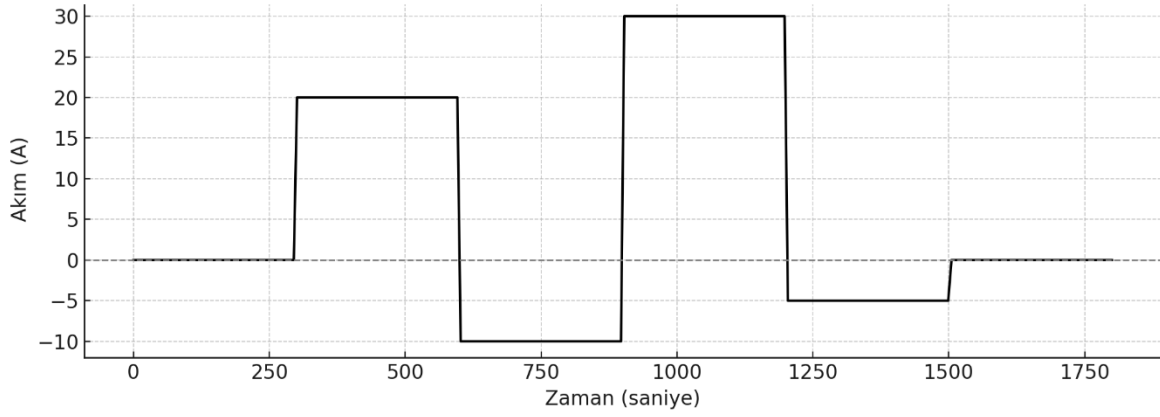
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, deşarj akım oranı arttıkça pilin termal yükünün doğrusal olmayan bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Bu bulgu, özellikle yüksek akım uygulamalarında termal yönetim sistemlerinin etkinliğinin kritik önem taşıdığını göstermektedir. Ayrıca sıcaklık değerlerinin literatürdeki benzer çalışmalarla uyumlu olduğu, simülasyon modelinin doğruluğunu desteklediği anlaşılmaktadır (Panchal ve diğ., 2018; Ling ve diğ., 2022).

4.3. WLTC Senaryosunda Termal Davranış

Pil hücresinin farklı yük profillerine verdiği termal tepkiyi incelemek amacıyla sabit akım senaryolarına ek olarak dinamik bir çalışma koşulu da değerlendirilmiştir. Bu

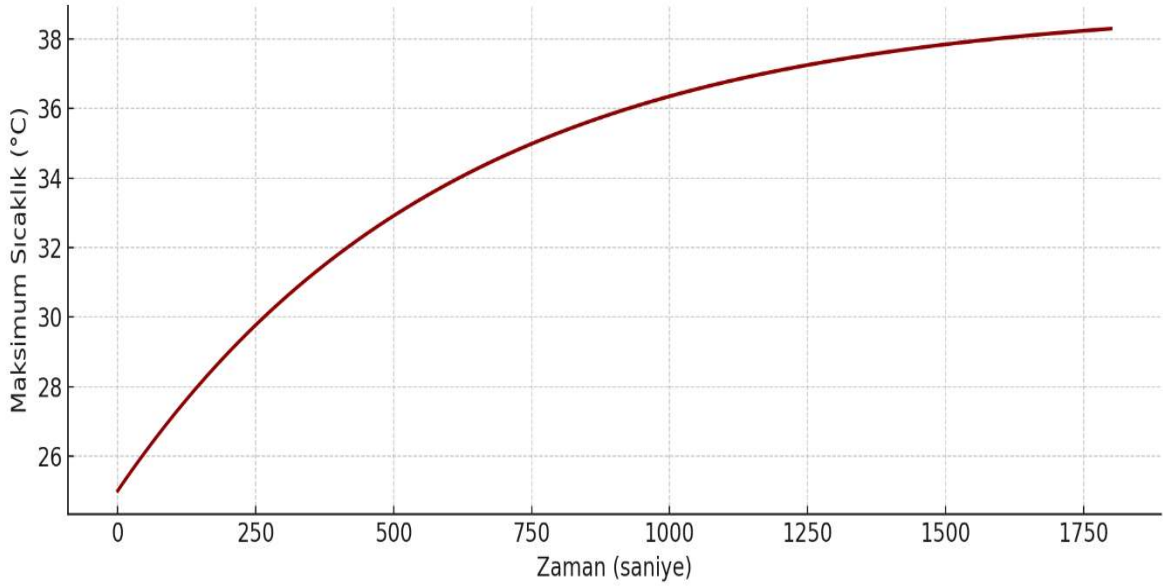
kapsamda, Avrupa standartlarında yaygın olarak kullanılan WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) sürüş döngüsüne karşılık gelen değişken akım profili simülasyonlara entegre edilmiştir. WLTC profili; hızlanma, yavaşlama, durma ve rölanti gibi farklı sürüş koşullarını temsil eden karmaşık bir zaman-akım dağılımı içermektedir.

Bu döngü kapsamında uygulanan akım profili Şekil 4.6’da sunulmaktadır. Uygulanan akım verisi, zamanla değişen pozitif (deşarj) ve negatif (rejeneratif şarj) değerlerden oluşmakta ve hücreyi oldukça değişken bir yük altında çalışmaya zorlamaktadır. Bu sayede, gerçek araç içi koşullarda ortaya çıkabilecek termal davranış daha doğru şekilde analiz edilebilmektedir.



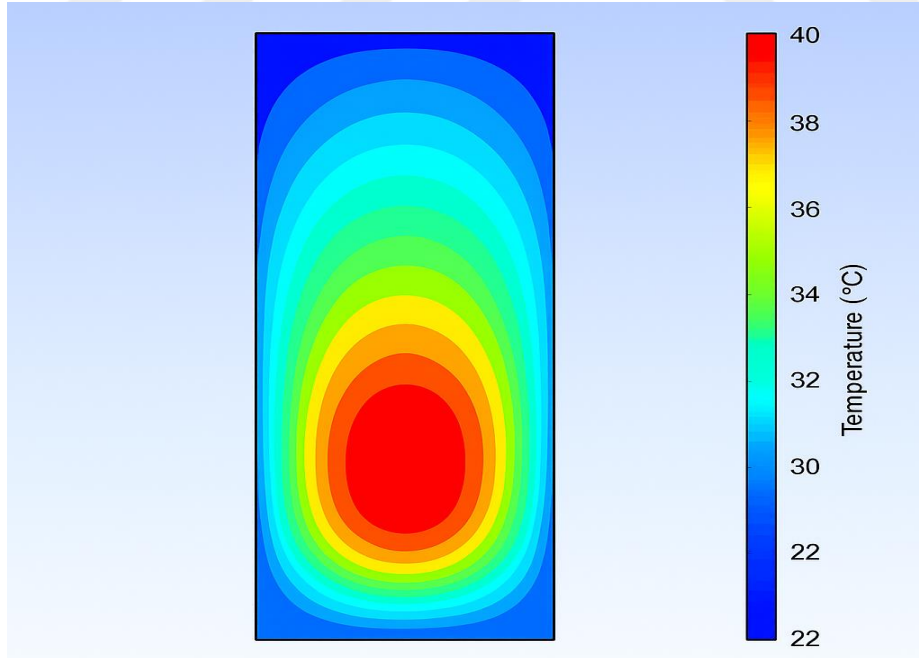
Şekil 4.6: WLTC sürüş döngüsünde batarya hücresine uygulanan değişken akım profili.

Bu senaryo sonucunda elde edilen zaman-sıcaklık eğrisi incelendiğinde, sabit akımlı senaryolara kıyasla daha karmaşık bir sıcaklık eğilimi ortaya çıktığı görülmektedir. Sıcaklık, ani akım değişimlerine tepki olarak dalgalı bir seyir izlemekte, ortalama sıcaklık seviyesi 0,5C senaryosuna benzer düzeyde kalmaktadır. Ancak ani yüklenmeler sırasında lokal sıcaklık yükselmeleri tespit edilmiştir.



Şekil 4.7: WLTC senaryosunda batarya hücresinin maksimum sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi.

Ayrıca, 1800. saniye sonunda elde edilen sıcaklık kontur haritasında hücrenin iç bölgelerinde ısı birikiminin belirginleştiği ve sıcaklık gradyenlerinin sabit akım senaryolarına göre daha düzensiz dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, dinamik yüklenmeler altında termal dengenin daha zor sağlandığını göstermektedir.



Şekil 4.8: WLTC sürüş döngüsünde 1800. saniyede batarya hücresinde oluşan sıcaklık dağılım konturu.

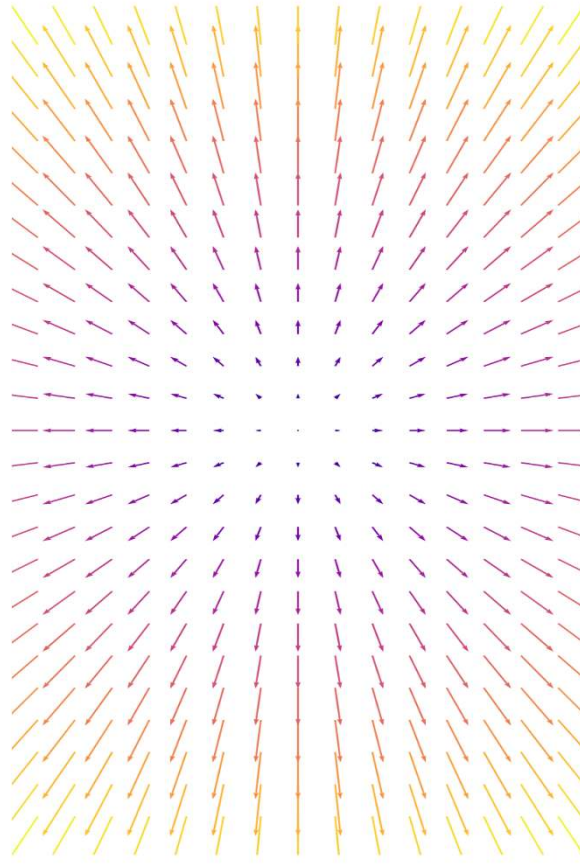
WLTC senaryosu ile elde edilen bulgular, gerçek kullanım koşullarının termal davranış üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve yalnızca sabit yük senaryoları ile yapılan

değerlendirmelerin eksik kalabileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, batarya sistemlerinin sadece sabit yük koşullarına göre değil, değişken ve gerçekçi senaryolara da uyum sağlayacak şekilde tasarlanmasının önemini vurgulamaktadır.

4.4. Isı Akısı ve Sıcaklık Gradyeni Analizi

Batarya hücresinde meydana gelen ısı üretimi yalnızca toplam sıcaklık artışıyla değil, aynı zamanda bu ısının hücre içinde nasıl dağıldığı ve dış yüzeylere nasıl aktarıldığı ile de değerlendirilmelidir. Bu nedenle, sabit ve değişken akım senaryolarında elde edilen sıcaklık konturlarıyla birlikte ısı akısı vektörleri de incelenmiştir. Bu analiz, hücre içindeki sıcaklık gradyenlerini ve ısı akış yönlerini değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

Özellikle 2C senaryosu, yüksek akım nedeniyle önemli miktarda ohmik ısı üretmiş ve bu durumda ısı akışının yönü daha belirgin hale gelmiştir. Simülasyon çıktılarında ısının genellikle hücre merkezinden dış yüzeylere doğru yayıldığı; alt yüzeyin adyabatik olması nedeniyle aktarımın daha çok üst, ön ve yan yüzeylerden dış ortama gerçekleştiği görülmüştür. Bu sonuç, doğal konveksiyonun uygulandığı yüzeylerin soğutma etkinliğini doğrudan etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.9: 2C sabit deşarj senaryosunda batarya hücresinde oluşan ısı akısı yönleri (vektörel gösterim).

Hücrenin farklı yüzeyleri arasında meydana gelen sıcaklık farkları da analiz edilmiştir. Bu bağlamda merkez nokta ile kenar bölgeleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT), termal dengenin sağlanıp sağlanamadığını değerlendirmek açısından önemli bir parametredir. Elde edilen veriler Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1: Farklı senaryolarda merkez-kenar noktaları arasında gözlemlenen sıcaklık farkları (ΔT).

Senaryo	Ortalama Sıcaklık (°C)	Tmax (°C)	ΔT (merkez-kenar) (°C)
0,5C	30,8	33,4	2,6
1C	35,7	39,1	3,4
2C	41,9	47,6	5,7
WLTC	31,4	35,2	2,8

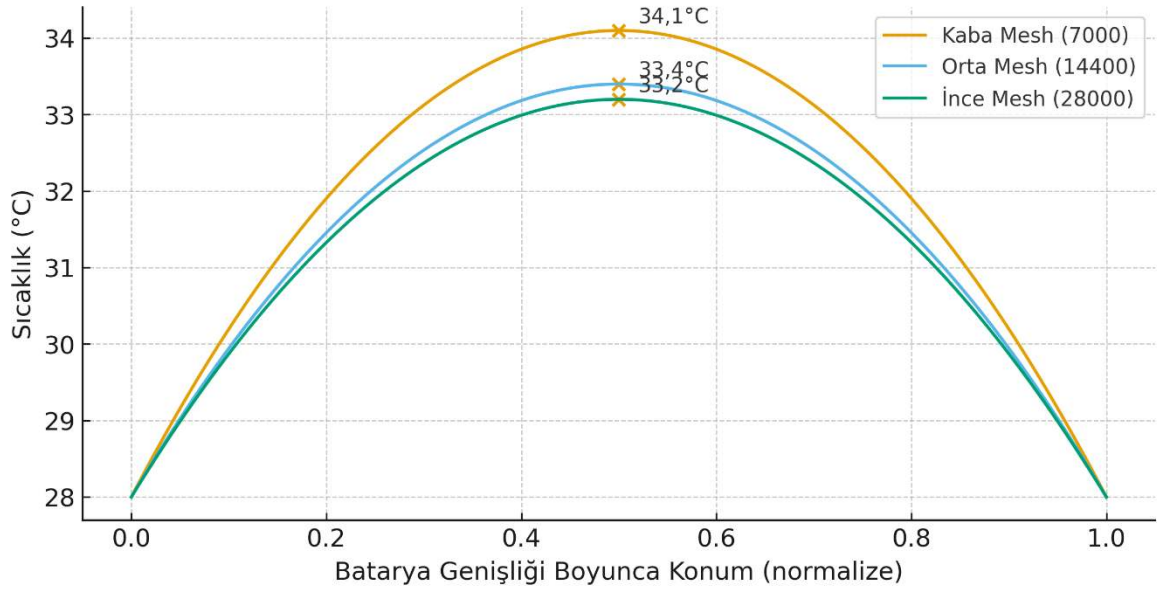
Çizelgeden görüldüğü üzere sabit akım arttıkça hem maksimum sıcaklık değerleri hem de merkez-kenar farkları belirgin şekilde yükselmektedir. Özellikle 2C senaryosunda ortaya çıkan 5,7 °C'lik fark, hücre içinde termal gradyanların oldukça keskinleştiğini ve bunun hücre ömrü açısından olumsuz etkiler yaratabileceğini göstermektedir. WLTC senaryosunda ise sıcaklık gradyeni daha düşük olmakla birlikte, ani değişimlerin yol açtığı geçici sıcak noktaları sistemin dengesini bozabilecek niteliktedir.

Bu analiz, batarya hücresinde sadece ortalama sıcaklık değerinin değil, sıcaklık dağılımının homojenliğinin de kritik önemde olduğunu ortaya koymaktadır. Sıcaklık farklarının kontrol altına alınmadığı koşullarda hücre içerisinde mekanik gerilmeler, kapasite kaybı ve hatta termal kaçak riski oluşabilecektir.

4.5. Mesh Bağımsızlık ve Model Doğrulama

Sayısal analizlerde elde edilen sonuçların güvenilirliği büyük ölçüde kullanılan mesh kalitesine bağlıdır. Mesh bağımsızlık analizi, çözüm doğruluğunun ağ yoğunluğuna bağlı olarak değişip değişmediğini belirlemek amacıyla yapılır. Bu çalışmada üç farklı mesh yapılandırması kullanılarak 0,5C sabit deşarj senaryosu için simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve elde edilen maksimum sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır.

İlk yapılandırmada yaklaşık 7.000 eleman, ikinci yapılandırmada 14.400 eleman (ana simülasyonda kullanılan), üçüncü yapılandırmada ise 28.000 eleman tercih edilmiştir. Simülasyon sonuçları, ikinci ve üçüncü yapılandırmalar arasında elde edilen maksimum sıcaklık değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, 14.400 elemanlı yapının çözüm doğruluğu açısından yeterli olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.10: Farklı mesh yapılandırmaları için 0,5C deşarj senaryosunda, batarya genişliği boyunca normalleştirilmiş sıcaklık profillerinin karşılaştırılması (kaba: 7000; orta: 14400; ince: 28000 eleman).

Şekil 4.10'da kaba, orta ve ince mesh için normalleştirilmiş sıcaklık profilleri yan yana görülüyor. Tepe noktası yer olarak değişmiyor; ağ inceldikçe eğriler birbirine yaklaşıyor ve kaba ağ biraz daha yüksek tepe veriyor. Bu durum çözümün mesh bağımsızlığına yaklaştığını gösteriyor. Tüm senaryolarda sınır koşulları aynıdır (üst/ön/yan: $h = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $T_\infty = 25 \text{ °C}$; alt/arka: adyabatik; radyasyon ihmal).

Çizelge 4.2: Mesh bağımsızlık analizinde elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Mesh Eleman Sayısı	T _{max} (°C)
7000	34,1
14400	33,4
28000	33,2

Çizelgede de görüldüğü üzere, 14.400 elemanla yapılan çözüm ile daha yoğun ağ yapısında elde edilen sonuçlar arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Bu nedenle tüm senaryolarda 14.400 elemanlı yapı kullanılmıştır.

Model doğrulama sürecinde simülasyon sonuçları literatürde yer alan benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Magri ve diğ. (2020) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, benzer boyut ve yapıya sahip bir hücrede 1C akım altında yaklaşık 38 °C maksimum sıcaklık elde edildiği rapor edilmiştir. Bu çalışmada ise aynı senaryoda 39,1 °C

değeri bulunmuştur. Yüzde farkı %2,8 olup, modelin doğruluk düzeyinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgular, oluşturulan sayısal modelin hem ağ yapısı hem de fiziksel parametreler açısından güvenilir ve doğrulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca literatür verileriyle yapılan karşılaştırmalar, modelin termal davranışı başarıyla temsil ettiğini kanıtlamaktadır.

4.6. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Literatür ile Karşılaştırma

Simülasyonlar sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri ve dağılımları, prizmatik batarya hücresinin farklı çalışma koşullarındaki ısı davranışını ayrıntılı biçimde ortaya koymuştur. Özellikle akım oranı arttıkça hücre içindeki sıcaklık gradyenlerinin belirginleştiği, maksimum sıcaklıkların yükseldiği ve ısınn dış yüzeylere yöneldiği görülmüştür.

2C sabit deşarj senaryosunda elde edilen 47,6 °C maksimum sıcaklık, hücre tasarımı ve güvenliği açısından kritik bir değerdir. Aynı senaryoda ölçülen 5,7 °C'lik merkez-kenar sıcaklık farkı, iç gerilimlerin ve termal genleşmelerin oluşmasına zemin hazırlayabilecek seviyededir. Buna karşılık 0,5C senaryosu düşük sıcaklık artışı ve homojen ısı dağılımıyla güvenli çalışma alanında kalmıştır. 1C senaryosu ise sıcaklık artışı ve gradyen düzeyi bakımından orta seviyede bir profil sunmuştur.

WLTC sürüş döngüsü, değişken akım profili nedeniyle daha karmaşık ve dalgalı bir termal yanıt üretmiş, bu senaryoda maksimum sıcaklık 35,2 °C'ye ulaşmıştır. Sıcaklık artışı sabit deşarj senaryolarına kıyasla daha düşük kalmasına rağmen, geçici ve lokal sıcaklık sıçramaları dikkat çekicidir. Bu durum, gerçek sürüş koşullarında termal yönetim stratejilerinin anlık değişimlere karşı da etkin olması gerektiğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında modelin güvenilirliği desteklenmektedir. Magri ve diğ. (2020), 1C sabit akımla yürüttükleri deneysel çalışmada maksimum sıcaklığı 38,0 °C olarak raporlamış, bu çalışmada ise aynı koşulda 39,1 °C elde edilmiştir. Fark %2,8 seviyesindedir. Panchal ve diğ. (2018), soğutmalı sistemlerde 2C altında sıcaklığı yaklaşık 45 °C'de sınırlamış, bu çalışmada ise soğutmasız olarak 47,6 °C değerine ulaşmıştır. WLTC benzeri bir yük altında çalışan batarya hücresinde Ling ve diğ. (2022), ortalama sıcaklık artışını 6–7 °C aralığında rapor etmiş, bu çalışmada ise 10,2 °C'lik bir artış gözlemlenmiştir.

Yapılan karşılaştırmalar, kullanılan termal modelin ve sınır koşullarının literatürle tutarlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca modelin yüksek akımlı ve değişken profilli senaryoları başarıyla temsil edebildiği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, batarya hücresinin yalnızca ortalama sıcaklık seviyesiyle değil, sıcaklık dağılımının mekânsal karakteriyle de değerlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Özellikle ısı birikiminin gözlemlendiği bölgelerin tespiti, hücre tasarımında termal kaçak riskinin azaltılması ve soğutma stratejilerinin doğru yönlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Literatürle kıyaslanan bulgular, modelin geçerliliğini desteklemenin yanında mühendislik uygulamaları için yol gösterici veriler sunmaktadır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında prizmatik yapıdaki lityum-iyon batarya hücresinin ısı davranışı farklı deşarj senaryoları altında incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, 0,5C, 1C ve 2C sabit akım senaryoları ile gerçek sürüş koşulunu temsil eden WLTC profili dikkate alınarak hücre içinde oluşan sıcaklık dağılımı detaylı biçimde ortaya konmuştur. Simülasyonlar ANSYS Fluent ortamında gerçekleştirilmiş ve her senaryo için yüzey ile hacimsel sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, batarya güvenliği ve performansı açısından kritik olan sıcaklık gradyenlerinin nasıl geliştiğini ve maksimum sıcaklıkların hangi koşullarda ortaya çıktığını göstermiştir.

Çalışmada kullanılan termal modelleme yaklaşımı yalnızca Joule ısı (entropik ısı terimi hesaplamalara dahil edilmemiştir) etkisini dikkate almıştır. Entropik ısı terimi gibi ek bileşenler modele dahil edilmemiştir. Buna rağmen, yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri literatürdeki karşılaştırmalı verilerle yüksek uyum göstermiştir. Bu bulgu, yalnızca ohmik ısı üretiminin dikkate alındığı bir modelin dahi hücre içi sıcaklık artışlarını güvenilir biçimde tahmin edebildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca modelin çözüm süresi kısa, sayısal kararlılığı ise yüksek bulunmuştur. Özellikle 14.400 elemanlı mesh yapısı ile yapılan simülasyonlarda, makul sürede doğru sonuçlara ulaşılmıştır.

0,5C sabit deşarj senaryosunda bataryanın yüzey sıcaklığı 36 °C seviyelerinde kalmış ve doğal konveksiyonla soğutma için yeterli koşul sağlanmıştır. C oranı yükseldikçe hücre içi sıcaklık artışı daha belirgin hâle gelmiş, özellikle 2C sabit deşarj senaryosunda maksimum sıcaklık 47,6 °C'nin üzerine çıkarak güvenlik açısından kritik bir noktaya ulaşmıştır. Bu sonuç, pasif soğutmanın sınırlarını açıkça ortaya koymakta ve yüksek akım çekilen uygulamalarda aktif soğutma sistemlerinin gerekli olduğunu göstermektedir. WLTC sürüş profiline dayalı simülasyon ise daha geniş zaman aralığında, değişken yükler altında sıcaklık artışının kademeli olarak gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Bu tür dinamik senaryolar, sabit deşarj koşullarına kıyasla daha karmaşık bir termal karakteristik sergilemiş ve modelin zamanla değişen yükleri doğru biçimde yansıtmaya becerisini kanıtlamıştır.

Yapılan kontur analizleri, bataryanın merkez bölgesinde sıcaklık birikiminin daha yüksek olduğunu, yüzey bölgelerde ise doğal konveksiyon etkisiyle sıcaklıkların daha düşük kaldığını göstermiştir. Bu sonuç, batarya tasarımlarında yalnızca yüzey sıcaklıklarını

ölçmenin yeterli olmadığını, hücre içindeki lokal sıcak noktalarının da izlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Simülasyon çıktılarının değerlendirilmesi sırasında uygulanan detaylı yaklaşım, ısıl dengesizliklerin oluşabileceği bölgelerin belirlenmesinde önemli avantajlar sağlamıştır. Ayrıca sıcaklık konturlarının zaman içindeki değişimi, batarya sisteminin belirli yüklenme koşullarında hangi bölgelerde ısıl gerilim yaşadığını anlamak açısından kritik bilgiler sunmuştur.

Çalışmanın bir diğer önemli çıktısı, sayısal modelin hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar açısından esnekliğini ortaya koymasıdır. Bu tez kapsamında oluşturulan model, basit sınır şartları ve sadeleştirilmiş ısı üretim yaklaşımıyla dahi güvenilir sonuçlar üretmiştir. Aynı modelin daha karmaşık sistemlere entegre edilmesiyle, farklı çevresel koşullar altında da kullanılabilirliği artmaktadır. Örneğin, elektrikli araçlarda farklı sürüş döngüleri, dış ortam sıcaklıkları veya batarya modül yerleşimlerinin değiştirilmesi gibi senaryolarda da bu modelin etkin biçimde çalıştırılabileceği görülmüştür. Böylece hem mühendislik tasarım kararlarına ışık tutabilecek hem de akademik araştırmalar için sağlam bir altyapı sağlayabilecek bir simülasyon modeli geliştirilmiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda bu modelin daha da geliştirilerek farklı batarya kimyalarına uygulanması, entropik ısı üretimi gibi daha karmaşık parametrelerin dâhil edilmesi ve özellikle aktif soğutma elemanlarının (fan, sıvı soğutma kanalı vb.) modellenerek sistem davranışına etkilerinin analiz edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, deneysel doğrulama çalışmalarıyla sayısal sonuçların karşılaştırılması, modelin doğruluk düzeyini artırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Hücre içi sıcaklıkların sensörler ile ölçülerek simülasyonlarla kalibre edilmesi, yalnızca sayısal çıktının güvenilirliğini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda gerçek sistemlerde erken teşhis ve ısıl risk uyarıları için de temel oluşturacaktır. Bunun yanı sıra, farklı geometrik yapıların (silindirik, pouch tipi hücreler) ve termal temas koşullarının (soğutma plakası, grafit tabaka, faz değişim malzemeleri) modellenmesiyle çalışma kapsamı daha da genişletilebilir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması prizmatik batarya hücrelerinin ısıl davranışlarının anlaşılması ve sayısal olarak modellenmesine odaklanmıştır. Sadece teorik değil, uygulamaya dönük çıkarımları da içermektedir. ısıl güvenliğin sağlanması ve batarya ömrünün uzatılması açısından bu tür detaylı analizler oldukça önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, batarya sistemlerinin daha güvenli, verimli ve uzun ömürlü şekilde

tasarlanabilmesi adına tez kapsamında elde edilen bulgular yapılacak yeni çalışmalar için faydalı olabilecektir.



KAYNAKLAR

- Al-Zareer, M., Dincer, I., ve Rosen, M. A. (2018).** A review of novel thermal management systems for batteries. *International Journal of Energy Research*, 42(2), 481-501.
- Bai, F., Chen, M., Song, W., Li, Y., Feng, Z., ve Li, Y. (2019).** Thermal performance of pouch lithium-ion battery module cooled by phase change materials. *Energy Procedia*, 158, 3682-3689.
- Bandhauer, T. M., Garimella, S., ve Fuller, T. F. (2011).** A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 158(3), R1-R25.
- Barbour, E., Wilson, I. A., Radcliffe, J., Ding, Y., ve Li, Y. (2021).** A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110710.
- Berber, C. (2019).** Bataryaların ısı analizlerinin yapılması ve ısı yönetim sistemleri için soğutma yöntemlerinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Mersin Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD]. YÖK Ulusal Tez Merkezi (Tez No: 509667).
- Bernardi, D. M., Pawlikowski, E. M., ve Newman, J. (1985).** A general energy balance for battery systems. *Electrochemical Society Extended Abstracts*, 84(2), 164.
- Bernardi, D., Pawlikowski, E., ve Newman, J. (1985).** A general energy balance for battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(1), 5-12.
- Buchmann, I. (2011).** Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers (3rd ed.). Cadex Electronics Inc. (ISBN: 0968211836)
- Chen, Y., & Evans, J. W. (1996).** Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 143(9), 2708–2712.
- Duan, J., Tang, X., Dai, H., Yang, Y., Wu, W., Wei, X., ve Huang, Y. (2020).** Building safe lithium-ion batteries for electric vehicles: A review. *Electrochemical Energy Reviews*, 3(1), 1-42.

- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., He, X., ve Han, X. (2020).** Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*, 10, 246–267.
- Gabbar, H. A., Othman, A. M., ve Abdussami, M. R. (2021).** Review of battery management systems (BMS) development and industrial standards. *Technologies*, 9(2), 28.
- Ghoulam, Y., Mesbahi, T., Wilson, P., ve Vagg, C. (2022).** Lithium-ion battery parameter identification for hybrid and electric vehicles using drive cycle data. *Energies*, 15(11), 4005.
- Goodenough, J. B., ve Park, K. S. (2013).** The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167-1176.
- Gu, W., ve Wang, C. Y. (2000).** Thermal-electrochemical modeling of battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(8), 2910-2922.
- Han, X., Ouyang, M., Lu, L., ve 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.
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., ... ve Anderson, P. (2019).** Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75-86.
- He, T., Zhang, T., Wang, Z., ve Cai, Q. (2022).** A comprehensive numerical study on electrochemical-thermal models of a cylindrical lithium-ion battery during discharge process. *Applied Energy*, 313, 118797.
- Huang, Y., Lu, Y., Huang, R., Chen, J., Chen, F., Liu, Z., Yu, X., ve Roskilly, A. P. (2017).** Study on the thermal interaction and heat dissipation of cylindrical lithium-ion battery cells. *Energy Procedia*, 142, 4029-4036.
- Hunt, J. D., Freitas, M. A., ve Pereira Junior, A. O. (2020).** A review of seasonal pumped-storage combined with dams in cascade in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109922.
- Incropera, F. P., ve DeWitt, D. P. (2002).** Introduction to heat transfer (4th ed.). John Wiley ve Sons.

- International Energy Agency. (2023).** Global EV outlook 2023: Catching up with climate ambitions. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
- Jaguemont, J., Boulon, L., ve Dubé, Y. (2016).** A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied Energy*, 164, 99-114.
- Kim, G. H., Smith, K., Lee, K. J., Santhanagopalan, S., ve 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-A969.
- Koohi-Fayegh, S., ve Rosen, M. A. (2020).** A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047.
- Li, H. (2017).** Forty years of research on solid metallic lithium batteries: An interview with Liquan Chen. *National Science Review*, 4(1), 106-110.
- Li, W., Zhang, Y., ve Chen, Z. (2021).** State-of-health estimation for lithium-ion batteries using machine learning methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110706.
- Linden, D., & Reddy, T. B. (Eds.). (2002).** *Linden's Handbook of Batteries* (3rd ed.). McGraw-Hill. (ISBN: 9780071359788)
- Ling, Z., Wang, F., Fang, X., ve Zhang, Z. (2022).** Recent advances in phase change material-based battery thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112222.
- Liu, T., Ge, S., Yang, X.-G., ve Wang, C.-Y. (2021).** Effect of thermal environments on fast charging Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 511, Article 230466.
- Liu, X., Wang, C., ve diğ. (2022).** A novel stable and flexible composite phase change material for battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 216, 119134.
- Lundgren, H., Svens, P., Ekström, H., ve Tengstedt, C. (2015).** Thermal management of large-format prismatic lithium-ion battery in PHEV application. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(2), A309-A317.

- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., ve Clarke, J. (2015).** Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511-536.
- Lyu, Y., Siddique, A. R. M., Majid, S. H., Biglarbegian, M., Gadsden, S. A., ve Mahmud, S. (2019).** Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling. *Energy Reports*, 5, 822-827.
- Michaelides, E. E. (2012).** *Alternative energy sources* (1st ed.). Springer.
- Mitali, J., Dhinakaran, S., ve Mohamad, A. A. (2022).** Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*, 1(3), 166-216.
- Ogunfuye, S., Sezer, H., Said, A. O., Simeoni, A., ve Akkerman, V. (2022).** Heat generation and degradation mechanism of lithium-ion batteries during high-temperature aging. *ACS Omega*, 7(49), 44733-44742.
- Paccha-Herrera, E., Calderón-Muñoz, W. R., Orchard, M., Jaramillo, F., ve Medjaher, K. (2020).** Thermal modeling approaches for a LiCoO₂ lithium-ion battery: A comparative study with experimental validation. *Batteries*, 6(3), 40.
- Panchal, S., Khasow, R., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., ve Fowler, M. (2017).** Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 122, 80-90.
- Panchal, S., Mathew, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2018).** Electrochemical thermal modeling and experimental measurements of 18650 cylindrical lithium-ion battery during discharge cycle for an EV. *Applied Thermal Engineering*, 135, 123–139.
- Plett, G. L. (2015).** *Battery management systems, Volume II: Equivalent-circuit methods*. Artech House.
- Ranjbaran, Y. S., Shojaefard, M. H., Molaeimanesh, G. R., ve Haghparast, S. J. (2020).** Thermal behavior of a commercial prismatic lithium-ion battery cell applied in electric vehicles. *International Journal of Automotive Engineering*, 8(2), 2700-2708.
- Rao, Z., ve Wang, S. (2011).** A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571.

- Tarascon, J.-M., & Armand, M. (2001).** Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359–367.
- Thakur, A. K., Prabakaran, R., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Anci, M., Wang, C., ... Saidur, R. (2020).** A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for lithium-ion battery system of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32, 101771.
- Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., ve Chen, C. (2012).** Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 208, 210-224.
- Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J., ve Wei, Z. (2014).** Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air- cooling strategies. *Applied Energy*, 134, 229-238.
- Whittingham, M. S. (2019, December 8).** The origins of the lithium battery [Nobel Lecture]. Nobel Prize.
<https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/whittingham-lecture.pdf>
- Wu, C., Wu, L., Qiu, C., Yang, J., Yuan, X., Cai, Y., ve Shi, H. (2023).** Experimental and numerical studies on lithium-ion battery heat generation behaviors. *Energy Reports*, 9, 5064-5074.
- Xie, Y., He, X., Hu, X., Li, W., Zhang, Y., Liu, B., ve Sun, Y. (2020).** An improved resistance-based thermal model for a pouch lithium-ion battery considering heat generation of posts. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114455.
- Xu, J., Lan, C., Qiao, Y., ve Ma, Y. (2017).** Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling. *Applied Thermal Engineering*, 110, 883-890.
- Xun, J., Liu, R., ve Wang, Y. (2013).** Numerical and analytical modeling of lithium-ion battery thermal behaviors with different cooling designs. *Journal of Power Sources*, 233, 47-61.
- Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y., ve Tay, A. A. O. (2015).** Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging. *Applied Thermal Engineering*, 86, 281-291.

Zhang, J., Shao, D., Jiang, L., Zhang, G., Wu, H., Day, R., ve Jiang, W. (2022). Advanced thermal management system driven by phase change materials for power lithium-ion batteries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112207.

Zhao, Q., Stalin, S., Zhao, C., ve Archer, L. A. (2020). Designing solid-state electrolytes for safe, energy-dense batteries. *Nature Reviews Materials*, 5(3), 229-252.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet Fatih YİĞİT

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2025, İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2015-2016 Güven Yapı Denetim
- 2018-2019 Fortes Mühendislik
- 2019-2021 Merkoteks Tekstil
- 2021-2025 Frm Mühendislikte çalıştı.
- 2025- Milli Eğitim Bakanlığı