DIŞ ORTAM SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK BATARYA HÜCRESİNİN ELEKTRİKSEL VE ISIL ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

İhsan YAZICI

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞ ORTAM SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK BATARYA HÜCRESİNİN ELEKTRİKSEL VE ISIL ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

İhsan YAZICI
0009-0005-6933-816X

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2026
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DIŞ ORTAM SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK BATARYA HÜCRESİNİN ELEKTRİKSEL VE ISIL ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ
İhsan YAZICI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Elektrikli araçların performansını, güvenliğini ve çevrim ömrünü doğrudan etkileyen en kritik faktörlerden biri batarya termal yönetim sistemidir. Batarya hücrelerinde elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısının etkin bir şekilde yönetilememesi, kapasite düşüşüne ve geri döndürülemez termal hasarlara yol açabilmektedir. Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan 73 Ah kapasiteli kese tipi bir lityum-iyon batarya hücresinin termal davranışları, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, Ansys Fluent yazılımı ve MSMD çatısı altındaki NTGK elektrokimyasal modeli kullanılarak bataryanın 3 boyutlu sayısal modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen model, laboratuvar ortamında 0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C ortam sıcaklıklarında, 1C ve 2C deşarj hızlarında elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Analiz sonuçları, simülasyon verilerinin deneysel ölçümlerle yüksek bir uyumluluk gösterdiğini ve maksimum sıcaklık artışının %5'in altında bir hata payı ile öngörülebildiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, batarya termal yönetim sistemlerinin tasarımında, maliyetli ve zaman alıcı deneysel süreçlere alternatif olarak doğrulanmış sayısal modellerin güvenle kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, lityum-iyon batarya, ısıl yönetim, NTGK modeli.
2026, xvii + 65 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis
NUMERICAL INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES OF A BATTERY CELL DEPENDING ON AMBIENT TEMPERATURE

İhsan YAZICI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Battery thermal management system constitutes one of the most critical factors directly affecting the performance, safety, and cycle life of electric vehicles. Ineffective management of heat generated by electrochemical reactions within battery cells can lead to capacity fading and irreversible thermal damage. In this thesis, the thermal behavior of a 73 Ah pouch-type lithium-ion battery cell, widely used in electric vehicles, was investigated using computational fluid dynamics methods. Within the scope of the study, a 3D numerical model of the battery was developed using Ansys Fluent software and the NTGK electrochemical model under the MSMD framework. The developed model was validated by comparing it with experimental data obtained in a laboratory environment at 0 °C, 10 °C, 20 °C and 30 °C ambient temperatures under 1C and 2C discharge rates. The analysis results demonstrated that the simulation data showed high agreement with the experimental measurements, predicting the maximum temperature rise with an error margin of less than 5%. This study proves that validated numerical models can be reliably used in the design of battery thermal management systems as an efficient alternative to costly and time-consuming experimental processes.

Key words: Electric vehicles, lithium-ion battery, thermal management, NTGK model
2026, xvii + 65 pages.

TEŞEKKÜR

Ülkemizde batarya teknolojileri alanında nitelikli çalışmalar yapılabilmesi adına üniversitemize kazandırdığı laboratuvar imkanları ve tez sürecimdeki değerli rehberliği için danışmanım Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu çalışmanın yürütülmesinde 22AG001 proje numarasıyla finansal destek sağlayan TÜBİTAK 1004 Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı kapsamındaki Elektrikli Taşıtlar İçin Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu'na ve TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın laboratuvar aşamasında bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, zorlu zamanlarda dostluğunu ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. Berkay TAHİRAĞAOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca aldığım her kararda yanımda duran, beni karşılıksız seven ve destekleyen, beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan canım aileme; annem, babam ve kıymetli ablalarıma teşekkürlerimi sunarım.

İhsan YAZICI
29/01/2026

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....viii
ABSTRACT....ix
TEŞEKKÜR....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....xii
ŞEKİLLER DİZİNİ....xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ....xvii
1. GİRİŞ....1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....3
2.1. Elektrikli ve Hibrit Araç Teknolojileri....3
2.2. Enerji Depolama Sistemleri ve Karakteristikleri....3
2.3. Batarya Teknolojilerinin Gelişimi ve Karşılaştırmalı Performans Analizi....4
2.3.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum-iyon Batarya Kimyaları....6
2.4. Lityum-iyon Batarya Hücre Tasarımları ve Fiziksel Yapılandırma....7
2.5. Batarya Isıl Modelleme Yaklaşımları ve MSMD Metodolojisi....9
2.6. Deşarj Hızının Isıl Davranışa Etkisi....14
2.7. Thermal Runaway Mekanizması....15
2.8. Batarya Yönetim Sistemleri (BYS) ve Temel Fonksiyonları....16
2.8.1. Batarya Yönetim Sisteminin Sağladığı Avantajlar....17
2.8.2. Elektrikli Ulaşımda BYS'nin Rolü ve Standardizasyon....18
2.8.3. Batarya Yönetim Sistemlerinde (BYS) Isıl Kontrol....19
3. MATERYAL VE YÖNTEM....21
3.1. İncelenen Batarya Hücresi ve Özellikleri....22
3.2. Geometrik Model ve Sayısal Ağ Yapısı....23
3.2.1. Çözüm Ağı Oluşturma ve Parametreleri....24
3.3. Malzeme Özellikleri ve Sınır Şartları....25
3.3.1. Malzeme Özellikleri....26
3.3.2. Sınır Şartları....28
3.4. Sıcaklık İzleme Noktaları....28
3.5. Deneysel Çalışma....29
3.5.1. Deneysel Test Düzeneği ve Kullanılan Ekipmanlar....30
3.5.2. Deney Prosedürü....33
4. BULGULAR....34
4.1. Sabit Akım Deşarj Deneyi Sonuçları....34
4.2. Deneysel Karakterizasyon Sonuçları ve Isıl Davranış Analizi....39
4.3. Sayısal Model Sonuçları ve Deneysel Doğrulama....44
4.3.1. Deşarj Voltaj Karakteristiklerinin Doğrulanması....45
4.3.2. Zamana Bağlı Sıcaklık Değişiminin Doğrulanması....50
4.3.3. Yüzey Sıcaklık Dağılımlarının Karşılaştırmalı Görsel Analizi....57
5. TARTIŞMA VE SONUÇ....60
KAYNAKLAR....62
ÖZGEÇMİŞ....65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a_n	Polinom katsayıları
b_n	Polinom katsayıları
C	Kapasitans
C_1	NTGK modeli Y parametresi sıcaklık sabiti
C_2	NTGK modeli U parametresi sıcaklık sabiti
C_p	Özgül ısı kapasitesi [J/kg.K]
h	Isı taşınım katsayısı [W/m^2.K]
I	Akım [A]
j	Hacimsel akım yoğunluğu [A/m^3]
j_{ECh}	Elektrokimyasal reaksiyon kaynaklı hacimsel akım yoğunluğu [A/m^3]
j_{short}	Kısa devre kaynaklı hacimsel akım yoğunluğu [A/m^3]
k	Isıl iletkenlik [W/m.K]
$\dot{q}_{abuse}$	Termal kaçak reaksiyonları kaynaklı ısı üretim oranı [W/m^3]
$\dot{q}_{ECh}$	Elektrokimyasal reaksiyon ısı üretim oranı [W/m^3]
$\dot{q}_{short}$	Kısa devre kaynaklı ısı üretim oranı [W/m^3]
$Q_{nominal}$	Bataryanın nominal kapasitesi [Ah]
Q_{ref}	Bataryanın referans kapasitesi [Ah]
q	Hacimsel ısı üretim oranı [W/m^3]
q^n	Yüzey ısı akısı [W/m^2]
P	Isı üretim hızı [W]
R	Direnç [Ω]
t	Örnekleme zamanı [s]
T	Yerel sıcaklık [°C]
T_{amb}	Ortam sıcaklığı [°C]
T_{ref}	NTGK modeli referans sıcaklık [K]
T_S	Yüzey sıcaklığı [°C]
T_∞	Serbest akış sıcaklığı [°C]
U	Açık devre gerilimi [V]
V	Gerilim [V]
Vol	Batarya hücresinin hacmi [m^3]
V_t	Batarya terminal gerilimi [V]
Y	NTGK model parametresi [S]
Δ	Fark
δ	Malzeme kalınlığı [m]
δ_c	Akım toplayıcı kalınlığı [m]
δ_e	Elektrot kalınlığı [m]
δ_{toplam}	Hücre katmanlarının toplam kalınlığı [m]
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
σ	Elektriksel iletkenlik [S/m]
σ_+	Pozitif elektrot elektriksel iletkenliği [S/m]
σ_-	Negatif elektrot elektriksel iletkenliği [S/m]
σ_c	Akım toplayıcı elektriksel iletkenliği [S/m]
σ_e	Elektrot elektriksel iletkenliği [S/m]
φ_+	Pozitif elektrot elektriksel potansiyeli [V]

φ_{-}	Negatif elektrot elektriksel potansiyeli [V]

Kısaltmalar	**Açıklama**
BIYS	Batarya Isıl Yönetim Sistemi
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
CAN	Denetleyici Alan Ağı
CC	Sabit Akım
DoD	Deşarj Derinliği
ECM	Eşdeğer Devre Modeli
ECU	Elektronik Kontrol Ünitesi
EV	Elektrikli Araç
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
İYM	İçten Yanmalı Motor
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
LMO	Lityum Mangan Oksit
LTO	Lityum Titanat Oksit
MSMD	Çok Ölçekli Çok Boyutlu Model (Multi-Scale Multi-Dimensional)
NCA	Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NiMH	Nikel Metal Hidrür
NMC	Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit
NTGK	Newman, Tiedemann, Gu ve Kimball Modeli
OCV	Açık Devre Gerilimi
PCM	Faz Değiştiren Malzeme
PHEV	Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araç (Plug-in)
SEI	Katı Elektrolit Arayüzü
SOA	Güvenli Çalışma Alanı
SOC	Şarj Durumu
SOH	Batarya Sağlık Durumu
UDDS	Şehir İçi Dinamometre Sürüş Programı
UDS	Kullanıcı Tanımlı Skaler
WLTP	Küresel Uyumlu Hafif Araç Test Prosedürü

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Çeşitli enerji kaynaklarının özgül güç ve özgül enerji karakteristiklerini gösteren Ragone diyagramı	4
Şekil 2.2.	Elektrikli araç uygulamalarında kullanılan batarya teknolojilerinin gravimetrik ve hacimsel enerji yoğunluklarına göre gelişimi ve güvenlik kıyaslaması	5
Şekil 2.3.	Farklı Lityum-iyon batarya kimyalarının özgül enerji, güç, güvenlik, ömür ve maliyet parametrelerine göre radar diyagramı üzerinde karşılaştırılması	7
Şekil 2.4.	Batarya Yönetim Sisteminin (BYS) temel fonksiyonel mimarisi ve alt birimleri	17
Şekil 2.5.	Elektrikli araç güç aktarma organları mimarisi ve batarya yönetim sisteminin (BYS) sistem içerisindeki entegrasyonu	19
Şekil 3.1.	Tez çalışması kapsamında izlenen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analiz metodolojisinin akış şeması	22
Şekil 3.2.	Analiz çalışmasında kullanılan 73 Ah kapasiteli kese tipi batarya hücresinin 3 boyutlu geometrik modeli	23
Şekil 3.3.	Batarya hücresi mesh yapısı	25
Şekil 3.4.	Batarya hücresi mesh yapısı	25
Şekil 3.5.	Sayısal analizde referans alınan sıcaklık izleme noktalarının batarya yüzeyindeki konumları	29
Şekil 3.6.	Batarya test düzeneğinin şematik gösterimi	30
Şekil 3.7.	BATEG Laboratuvarında yer alan batarya test düzeneği	31
Şekil 4.1.	0 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması	34
Şekil 4.2.	10 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması	35
Şekil 4.3.	20 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması	35
Şekil 4.4.	30 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması	36
Şekil 4.5.	Hücrenin 1 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi	37
Şekil 4.6.	Hücrenin 2 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi	38
Şekil 4.7.	0 °C dış ortam koşulunda 1 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	39
Şekil 4.8.	10 °C dış ortam koşulunda 1 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	40
Şekil 4.9.	20 °C dış ortam koşulunda 1 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	40
Şekil 4.10.	30 °C dış ortam koşulunda 1 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	41
Şekil 4.11.	0 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	41
Şekil 4.12.	10 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	42

Şekil 4.13.	20 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	42
Şekil 4.14.	30 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	43
Şekil 4.15.	0 °C ortam sıcaklığında ve 1C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması	45
Şekil 4.16.	10 °C ortam sıcaklığında ve 1C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması	46
Şekil 4.17.	20 °C ortam sıcaklığında ve 1C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması	46
Şekil 4.18.	30 °C ortam sıcaklığında ve 1C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması	47
Şekil 4.19.	0 °C ortam sıcaklığında ve 2C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması	48
Şekil 4.20.	10 °C ortam sıcaklığında ve 2C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması	48
Şekil 4.21.	20 °C ortam sıcaklığında ve 2C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması	49
Şekil 4.22.	30 °C ortam sıcaklığında ve 2C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması	49
Şekil 4.23.	0 °C ortam sıcaklığında ve 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	51
Şekil 4.24.	10 °C ortam sıcaklığında ve 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	51
Şekil 4.25.	20 °C ortam sıcaklığında ve 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	52
Şekil 4.26.	30 °C ortam sıcaklığında ve 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	52
Şekil 4.27.	0 °C ortam sıcaklığında ve 2 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	54

Şekil 4.28.	10 °C ortam sıcaklığında ve 2 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	54
Şekil 4.29.	20 °C ortam sıcaklığında ve 2 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	55
Şekil 4.30.	30 °C ortam sıcaklığında ve 2 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	55
Şekil 4.31.	Farklı deşarj hızlarında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılım konturları: A) 0 °C - 1C, B) 0 °C - 2C.	57
Şekil 4.32.	Farklı deşarj hızlarında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılım konturları: A) 10 °C - 1C, B) 10 °C - 2C.	57
Şekil 4.33.	Farklı deşarj hızlarında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılım konturları: A) 20 °C - 1C, B) 20 °C - 2C.	58
Şekil 4.34.	Farklı deşarj hızlarında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılım konturları: A) 30 °C - 1C, B) 30 °C - 2C.	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

			Sayfa
Çizelge	2.1.	Farklı lityum-iyon hücre tasarımlarının yapısal özellikleri, avantajları ve dezavantajlarının karşılaştırılması	8
Çizelge	3.1.	Çalışmada kullanılan batarya hücresinin özellikleri	23
Çizelge	3.2.	Mesh istatistikleri ve kalite metrikleri	24
Çizelge	3.3.	Sayısal modelde kullanılan batarya bileşenlerinin termofiziksel özellikleri	27
Çizelge	3.4.	Sıcaklık izleme noktalarının koordinatları	29
Çizelge	3.5.	Deneysel çalışmada kullanılan cihazlara ait özellikler	32

1. GİRİŞ

Hava kirliliği, başta insanlar olmak üzere tüm canlıların hayatını riske atmakla birlikte ülke ekonomilerinin gelişimini de olumsuz etkilemektedir. Sanayileşme, kentleşme ve ulaşım faaliyetlerinden kaynaklanan zararlı gazlar, küresel hava kalitesi üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Fussell vd., 2022). Özellikle ulaşım araçlarına olan talebin yükselmesiyle, bu araçlardan yayılan egzoz emisyonları, hava kirliliğinin artmasında büyük bir paya sahiptir. İstatistiklere göre, araç egzozları hava kirliliği kaynaklarının %30 ila %50'sinden fazlasını oluşturmaktadır (Gilpin vd., 2014).

İçten yanmalı motorlarda yakıtın yanması sonucu; parçacık maddeler, uçucu organik bileşikler ve karbon oksitler dahil olmak üzere çok sayıda zararlı madde atmosfere salınmaktadır (Wang vd., 2023). Dizel motorlar, yüksek yakıt verimliliği sunsalar da yaydıkları partikül maddeler nedeniyle akciğer kanseri ve kardiyovasküler hastalıkların görülme sıklığını artıran risk faktörleri arasında gösterilmektedir (Chio vd., 2014). Bu çevresel ve sağlık odaklı endişeler, otomotiv endüstrisini fosil yakıtlı araçlardan uzaklaşarak, daha düşük karbon ayak izine sahip elektrikli, hibrit ve plug-in hibrit araçlara (PHEV) yönelmeye zorlamıştır.

Elektrikli araçların (EV) yaygınlaşmasındaki en kritik bileşen, enerji depolama ünitesi olan lityum-iyon bataryalardır. Ancak bu bataryaların performansı, güvenliği ve çevrim ömrü, çalışma sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Batarya hücreleri, şarj ve deşarj işlemleri sırasında elektrokimyasal reaksiyonlar ve iç direnç nedeniyle ısı üretir. Üretilen bu ısının etkili bir şekilde tahliye edilememesi; performans kaybına, kapasite düşüşüne ve ileri seviyede ısıl kaçak (thermal runaway) adı verilen tehlikeli durumlara yol açabilir. Bu nedenle, batarya paketlerinin optimum sıcaklık aralığında tutulması için ısıl yönetim sistemlerinin tasarımı ve analizi hayati önem taşımaktadır.

Batarya termal yönetim sistemlerinin geliştirilmesinde geleneksel deneysel yöntemler kritik bir rol oynasa da, tek başına yeterli çözüm sunamamaktadır. Deneysel çalışmalarda, batarya hücresinin sadece yüzey sıcaklıkları ölçülebilmekte, hücrenin merkezindeki sıcaklık artışı ve iç katmanlardaki sıcaklık gradyanları tam olarak tespit edilememektedir.

Oysa batarya yaşlanmasını ve güvenliğini asıl tehdit eden faktör, dış yüzeyden ziyade hücrenin iç sıcaklığıdır. Ayrıca, farklı soğutma stratejilerini test etmek için her seferinde fiziksel prototip üretmek ve test düzeneği kurmak, hem yüksek maliyetli hem de zaman alıcı bir süreçtir. Bu kısıtlamalar nedeniyle, hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı sayısal analiz yöntemleri; batarya içindeki karmaşık elektrokimyasal ve ısıl süreçlerin 3 boyutlu olarak incelenmesine olanak tanıyan, maliyet etkin ve güvenilir bir çözüm ortağı olarak modern mühendislik çalışmalarında vazgeçilmez bir konuma yükselmiştir.

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlarda yaygın olarak tercih edilen kese tipi bir lityum-iyon batarya hücresinin ısıl davranışları, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, Ansys Fluent yazılımı ve MSMD (Multi-Scale Multi-Domain) çatısı altındaki NTGK (Newman, Tiedemann, Gu ve Kim) elektrokimyasal modeli kullanılarak bataryanın sayısal modellemesi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan model, laboratuvar ortamında 0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C ortam sıcaklıklarında, 1C ve 2C deşarj hızlarında elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çalışmanın temel amacı; deneysel testlerin maliyet ve zaman yükünü azaltacak, yüksek doğruluk oranına sahip validasyonu yapılmış bir ısıl simülasyon modeli ortaya koymaktır. Elde edilen sonuçlar, batarya ısıl yönetim sistemlerinin (BIYS) tasarımı için güvenilir bir referans noktası sunmayı hedeflemektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Elektrikli ve Hibrit Araç Teknolojileri

Yüzyılı aşkın süredir ulaşım sektörüne hâkim olan içten yanmalı motor (İYM) teknolojisi; artan dünya nüfusu ve yükselen lojistik talepleri karşısında, özellikle fosil yakıt kaynaklarına olan bağımlılığı artırması nedeniyle sürdürülebilirlik sınırlarını zorlamaktadır. Fosil yakıt tüketiminin neden olduğu emisyonların, küresel ısınma üzerindeki doğrudan etkisi ve insan sağlığına yönelik riskleri, ulaşım sektöründe daha temiz teknolojilere geçişi zorunlu kılmıştır (Gilpin vd., 2014; Fussell vd., 2022).

Geleneksel araçlarla kıyaslandığında elektrikli ve hibrit araç teknolojileri; motor çalışma verimliliğinin optimize edilmesi, rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanımı ve şebekeden şarj edilebilme (Plug-in) gibi özellikleri sayesinde enerji verimliliği açısından öne çıkmaktadır (Tarascon & Armand, 2001). Bu teknolojiler, enerji krizi ile mücadelede önemli bir çözüm olarak önerilse de; teknolojinin ticarileşme sürecinin ilk dönemlerinde yüksek batarya maliyetleri ve sınırlı sürüş menzili yaygınlaşmanın önündeki temel engeller olarak tanımlanmıştır (Chan, 2002).

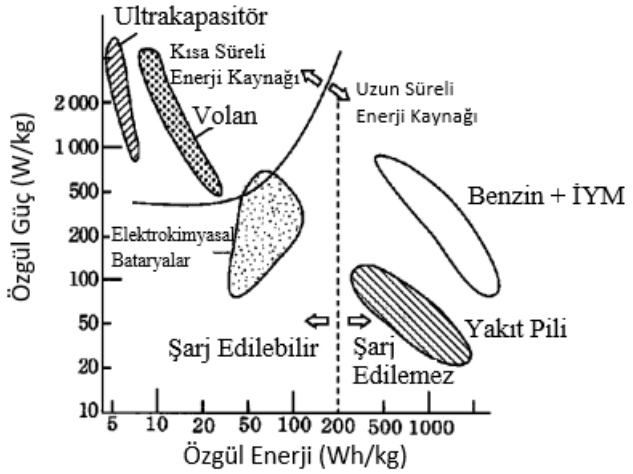
Ancak 2000'li yılların başında işaret edilen bu kısıtlamalar, geçen süre zarfında Lityum-iyon batarya teknolojisindeki gelişmeler ve maliyetlerin düşüş eğilimi sayesinde önemli ölçüde aşılmıştır (Berckmans vd., 2017). Günümüzde elektrikli araç menzilleri içten yanmalı motorlarla rekabet edebilir seviyelere ulaşmış olsa da; artan enerji yoğunluğu ve talep edilen yüksek hızlı şarj yetenekleri, ısıl yönetim konusunu batarya paket tasarımının en kritik parametresi haline getirmiştir (Miao vd., 2019). Dolayısıyla güncel literatürde odak noktası; enerjinin sadece depolanmasından ziyade, yüksek akım çekilen durumlarda (hızlı şarj/deşarj) oluşan ısının güvenli bir şekilde yönetilmesine ve ısıl kararlılığın sağlanmasına kaymıştır (Ghaeminezhad vd., 2023; Feng vd., 2018).

2.2. Enerji Depolama Sistemleri ve Karakteristikleri

Elektrikli araç tahrik sistemlerinde enerji kaynağının performansı, temel olarak özgül enerji (Wh/kg) ve özgül güç (W/kg) parametreleri ile değerlendirilmektedir (Warner,

2015). Chan (2002) tarafından sunulan ve çeşitli enerji kaynaklarının karşılaştırıldığı diyagram (Şekil 2.1) incelendiğinde; içten yanmalı motorlarda kullanılan benzinin, elektrokimyasal bataryalara kıyasla çok daha yüksek özgül enerjiye sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, bataryalı araçların menzil kısıtlamasının temel fiziksel nedenidir.

Bataryalar, elektrokimya prensiplerini kullanarak enerjiyi depolayan, şarj edilebilir ve bütünleşik yapıda sistemlerdir. Yakıt pilleri enerji üreten karmaşık sistemler iken, bataryalar enerjiyi depolayan birimler olarak sınıflandırılır. Bataryaların, ultrakapasitörlere kıyasla daha düşük özgül güce sahip olmaları, ani güç taleplerinde ve hızlı şarj/deşarj döngülerinde ısıl yönetim ihtiyacını daha kritik hale getirmektedir.

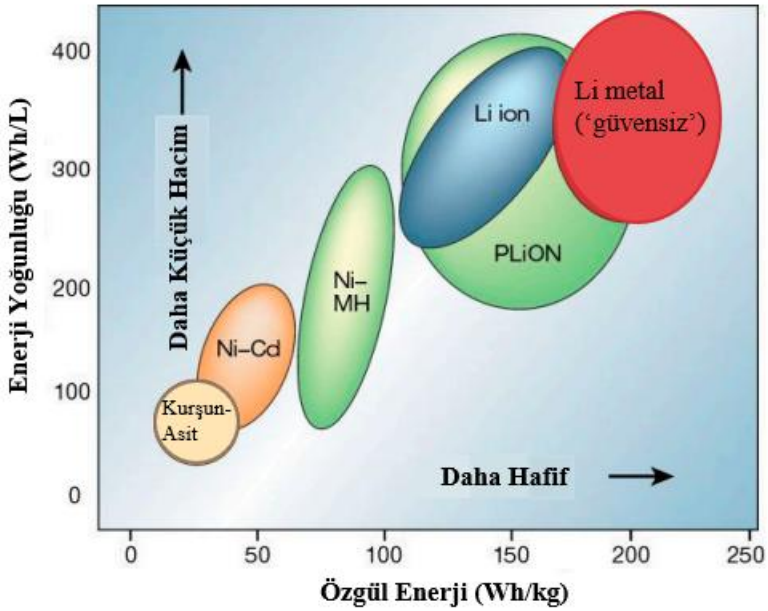


Şekil 2.1. Çeşitli enerji kaynaklarının özgül güç ve özgül enerji karakteristiklerini gösteren Ragone diyagramı (Chan, 2002).

2.3. Batarya Teknolojilerinin Gelişimi ve Karşılaştırmalı Performans Analizi

Elektrikli araç teknolojisinin ticarileşme süreci, enerji depolama sistemlerindeki gelişmelerle doğrudan ilişkilidir. Geçmişte kullanılan Kurşun-Asit ve Nikel-Metal Hidrür (NiMH) bataryaların yerini; sağladıkları yüksek enerji yoğunluğu, hafiflik ve uzun döngü ömrü avantajları sayesinde günümüzde lityum-iyon teknolojisi almıştır (Warner, 2015). Ancak lityum-iyon bataryalar tek bir standart yapıdan ibaret olmayıp, özellikle kullanılan katot aktif malzemesine göre çeşitlenen geniş bir ürün ailesini temsil etmektedir. Her bir kimyasal bileşim; enerji, güç, güvenlik ve maliyet parametreleri arasında farklı bir denge

sunmaktadır (Noh vd., 2013). Bu bölümde, elektrikli araçlarda yaygın olarak tercih edilen batarya kimyalarının performans kriterlerine göre karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.



Şekil 2.2: Elektrikli araç uygulamalarında kullanılan batarya teknolojilerinin gravimetrik ve hacimsel enerji yoğunluklarına göre gelişimi ve güvenlik kıyaslaması (Tarascon ve Armand, 2001).

Elektrikli araç teknolojisinin tarihsel gelişiminde, kullanılan batarya hücrelerinin enerji yoğunluğu en belirleyici faktör olmuştur. Tarascon ve Armand tarafından sunulan ve batarya teknolojilerinin gelişim sürecini özetleyen grafik (Şekil 2.2) incelendiğinde, teknolojinin daha hafif (yüksek gravimetrik enerji yoğunluğu) ve daha kompakt (yüksek hacimsel enerji yoğunluğu) sistemlere doğru evrildiği görülmektedir.

Grafiğin sol alt köşesinde yer alan kurşun-asit bataryalar, ağır ve hacimli yapıları nedeniyle günümüz elektrikli araçlarının menzil gereksinimlerini karşılamaktan uzaktır. Nikel-Metal Hidrür (NiMH) bataryalar bir geçiş teknolojisi olarak daha iyi performans sunsa da, enerji yoğunluğu ve çevrim ömrü açısından lityum tabanlı teknolojilerin gerisinde kalmıştır (Nitta vd., 2015).

Grafikte sağ üst köşede konumlanan lityum-iyon bataryalar, hem ağırlık hem de hacim avantajı sunarak günümüzün endüstri standardı haline gelmiştir. Dikkat çekici bir nokta

olarak; saf lityum metal bataryalar teorik olarak lityum-iyondan daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen, güvenlik riskleri (dendrit oluşumu ve termal kararsızlık) nedeniyle ticari araç uygulamalarında henüz yaygınlaşamamıştır (Choi ve Aurbach, 2016; Miao vd., 2019). Bu durum, batarya tasarımında sadece yüksek enerjinin değil, aynı zamanda güvenlik ve termal kararlılığın da ne kadar kritik olduğunu göstermektedir. Lityum-iyon bataryalar, performans ve güvenliğin en optimum dengesini sunsa da, bu güvenliğin sürdürülebilmesi için etkin bir ısıl yönetim sistemine ihtiyaç duymaktadırlar.

2.3.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum-iyon Batarya Kimyaları

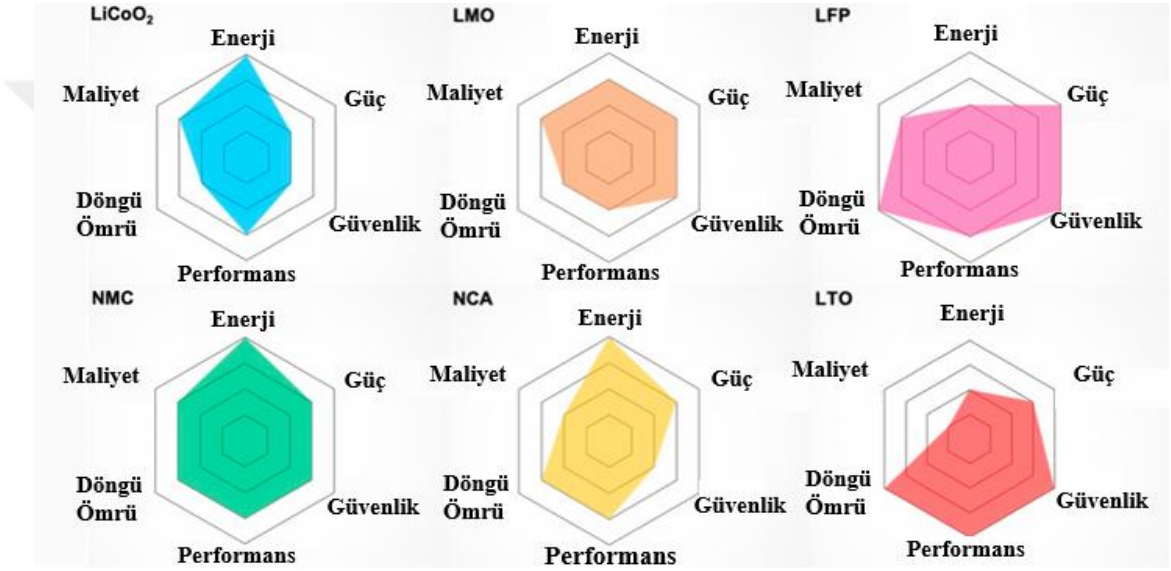
Lityum-iyon bataryalar tek tip bir yapı olmayıp, özellikle katot malzemesinin içeriğine göre farklı elektrokimyasal ve ısıl özellikler gösteren bir ürün ailesini temsil etmektedir. Miao ve ark. tarafından yapılan değerlendirmede, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan temel kimyalar; Lityum Kobalt Oksit (LCO), Lityum Demir Fosfat (LFP) ve Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC) olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Söz konusu temel kimyaların, endüstrideki diğer alternatifleri (LMO, NCA, LTO) ile karşılaştırılabilmesi adına Şekil 2.3'te kapsamlı bir analiz sunulmuştur. Altı farklı kimyanın; özgül enerji, güç, güvenlik ve maliyet gibi kriterlere göre değerlendirildiği bu diyagramlar incelendiğinde, her kimyanın farklı bir kullanım amacına yönelik optimize edildiği görülmektedir.

Lityum Kobalt Oksit (LCO): Şekil 2.3'te görüldüğü üzere yüksek özgül enerjiye sahip olmasına rağmen, güvenlik ve ömür eksenlerinde en düşük performansı sergilemektedir. Bu nedenle termal risklerin yüksek olduğu ve termal kaçak eğiliminin fazla olduğu uygulamalarda tercih edilmemektedir (Nitta vd., 2015).

Lityum Demir Fosfat (LFP): Mükemmel termal kararlılığı ve olivin yapısı sayesinde güvenlik açısından en avantajlı türdür (Padhi vd., 1997). Radar diyagramında güvenlik ve ömür eksenlerinde en dış halkaya ulaşarak mükemmel bir kararlılık sergilemektedir. Ancak diğer türlere göre daha düşük voltajı ve enerji yoğunluğu, menzil kısıtı olan araçlarda kullanımını sınırlandırmaktadır.

Lityum Nikel Manganez Kobalt (NMC): Nikelin yüksek kapasitesi, manganezin kararlı yapısı ve kobaltın kararlı voltaj özelliklerini birleştiren bu yapı; yüksek enerji yoğunluğu ve kabul edilebilir ısıl güvenlik seviyesi sunması nedeniyle günümüz elektrikli araç

pazarında (özellikle kese tipi hücrelerde) en yaygın kullanılan kimyadır (Noh vd., 2013). Özellikle özgül enerjisinin yüksek olması, bu tez çalışmasında incelenen yüksek kapasiteli (73 Ah) hücrelerde NMC kimyasının tercih edilme sebebini açıklamaktadır. Grafikte NMC kimyasının güvenlik puanı kabul edilebilir seviyede olsa da, LFP kadar kusursuz değildir. Bu durum, NMC tabanlı yüksek enerjili hücrelerin güvenli çalışabilmesi için dışarıdan müdahale edilen aktif bir ısıl yönetim sistemine olan ihtiyacı bilimsel olarak doğrulamaktadır.



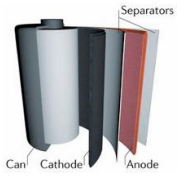
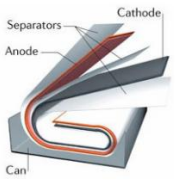
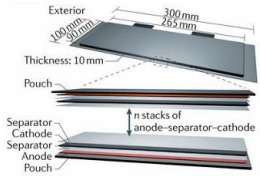
Şekil 2.3. Farklı Lityum-iyon batarya kimyalarının özgül enerji, güç, güvenlik, ömür ve maliyet parametrelerine göre radar diyagramı üzerinde karşılaştırılması (Miao vd., 2019). Not: Dış altıgen en ideal durumu temsil etmektedir.

2.4. Lityum-iyon Batarya Hücre Tasarımları ve Fiziksel Yapılandırma

Ticari uygulamalarda lityum-iyon bataryalar, kullanılacakları sistemin enerji ihtiyacına, paketleme kısıtlarına ve ısıl yönetim gereksinimlerine bağlı olarak temel üç farklı geometrik yapıda üretilmektedir: Silindirik, Prizmatik ve Kese tipi hücreler (Warner, 2015). Silindirik ve prizmatik hücreler sert bir metal kasaya sahipken, kese tipi hücreler esnek bir alüminyum polimer laminat film ile kaplanmıştır. Bu yapısal farklılık, kese tipi hücrelerin ölü hacmi minimize ederek en yüksek paketleme verimliliğine ve ağırlık başına enerji yoğunluğuna ulaşmasını sağlarken, mekanik darbelere karşı diğer türlere göre daha savunmasız kalmasına neden olmaktadır (Saw vd., 2014). Farklı hücre

tasarımlarının yapısal özellikleri, avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Farklı lityum-iyon hücre tasarımlarının yapısal özellikleri, avantajları ve dezavantajlarının karşılaştırılması (Miao vd., 2019).

Şekil	Silindirik	Prizmatik	Kese
Diyagram			
Elektrot Düzeni	Sarılmış	Sarılmış	Yığılmış / Katmanlı
Mekanik Dayanım	++	+	-
Isı Yönetimi	-	+	+
Özgül Enerji (Wh/kg)	+	+	++
Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	+	++	+

Not: (+) sembolü ilgili özelliğin yüksek performans seviyesini, (-) sembolü ise zayıf olduğu alanları temsil etmektedir.

Lityum-iyon bataryalar, kullanım alanının gereksinimlerine göre farklı fiziksel formlarda ve üretim tekniklerinde tasarlanabilmektedir. Literatürde yaygın olarak kabul gören ve Çizelge 2.1'de karşılaştırmalı özellikleri sunulan üç temel hücre tasarımı bulunmaktadır: Silindirik, Prizmatik ve Kese tipi hücreler.

Silindirik ve prizmatik hücreler, genellikle sarılmış elektrot yapısına sahiptir ve dış kısımlarında metal bir koruyucu kılıf bulunur. Bu yapı onlara yüksek mekanik dayanım sağlasa da, ölü hacimlerin oluşmasına neden olmakta ve paketleme verimliliğini düşürmektedir. Ayrıca silindirik hücrelerin ısı yönetimi, çizelgeden de görüleceği üzere zayıf olarak nitelendirilmektedir.

Bu tez çalışmasında, silindirik ve prizmatik tasarımlardan farklı olarak yığılmış elektrot mimarisine ve metal bir gövde yerine esnek alüminyum-polimer kaplamaya sahip olan kese tipi batarya hücresi incelenmiştir. Bu özgün yapısal tasarım, rijit metal kasanın ağırlık yükünü ortadan kaldırarak birim kütle başına depolanan enerjiyi maksimize etmektedir. Enerji yoğunluğu avantajının yanı sıra geometrik açıdan kese tipi hücrelerin sunduğu geniş ve düzlemsel yüzey alanı; ısı transfer mekanizmasını silindirik hücrelere kıyasla çok daha etkin hale getirmekte ve hücre merkezinde üretilen ısının dış ortama tahliyesini kolaylaştırmaktadır. Literatürde bu hücre tipinin temel dezavantajı olarak gösterilen mekanik dayanım eksikliği ise batarya paketleri içerisindeki modül sıkıştırma sistemleri ile teknolojik olarak elimine edilebilmektedir. Sonuç olarak; elektrikli araç uygulamaları için kritik bir parametre olan yüksek enerji yoğunluğu potansiyeli ve geniş yüzey alanının sağladığı ısıl yönetim (soğutma) avantajları, bu tez çalışmasında kese tipi hücrenin temel inceleme objesi olarak seçilmesinde belirleyici olmuştur.

2.5. Batarya Isıl Modelleme Yaklaşımları ve MSMD Metodolojisi

Batarya yönetim sistemlerinin güvenilirliği ve ısıl analiz süreçlerinin maliyet etkinliği, büyük ölçüde tercih edilen simülasyon modellerinin doğruluğuna bağlıdır. Batarya davranışlarının sanal ortama aktarılmasında literatürde genel kabul gören metodolojiler; Elektrokimyasal, Eşdeğer Devre (ECM) ve Yarı-Empirik/Analitik modeller olmak üzere üç temel sınıfta değerlendirilmektedir (Ramadesigan vd., 2012).

Bu tez çalışmasında, hesaplama maliyeti ile doğruluk arasındaki dengeyi optimize etmek ve bataryanın farklı fiziksel ölçeklerini (elektrokimyasal, elektriksel ve termal) tek bir çözüm düzleminde birleştirmek amacıyla Ansys Fluent yazılımının sunduğu MSMD metodolojisi kullanılmıştır.

MSMD metodolojisinde, batarya hücresinin 3 boyutlu sıcaklık dağılımı, elektriksel ve ısıl alanları birbirine bağlayan aşağıdaki enerji korunumu denkleminin çözülmesiyle elde edilir (Ansys Inc., 2024):

$$\frac{\partial(pC_pT)}{\partial t} - \nabla.(k\nabla T) = \sigma_+\left|\nabla_{\varphi+}\right|^2 + \sigma_-\left|\nabla_{\varphi-}\right|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short} + \dot{q}_{abuse} \qquad (2.1)$$

Burada sol taraf bataryanın ısıl enerjisindeki zamana bağlı değişimi ve iletimle ısı transferini ifade ederken, sağ taraf ısı üretim kaynaklarını temsil eder. Denklemde eşitliğin sağ tarafında yer alan ısı kaynağı terimleri incelendiğinde; $\sigma_+ \left|\nabla_{\varphi+}\right|^2$ ve $\sigma_- \left|\nabla_{\varphi-}\right|^2$ ifadelerinin, sırasıyla pozitif ve negatif akım toplayıcılardaki efektif elektriksel iletkenliğe bağlı olarak gelişen Ohmik ısınma mekanizmasını temsil ettiği görülmektedir. Bununla birlikte denklemdeki $\dot{q}_{ECh}$ terimi, NTGK alt modeli vasıtasıyla hesaplanan elektrokimyasal reaksiyon ısısını ifade ederken; $\dot{q}_{short}$ ve $\dot{q}_{abuse}$ terimleri ise kısa devre veya elektriksel suistimal durumlarında açığa çıkan ekstra ısıl yükleri belirtmektedir. Ancak bu tez çalışmasında batarya hücresi, üretici verileriyle uyumlu güvenli çalışma sınırları içerisinde analiz edildiğinden, söz konusu suistimal kaynaklı terimler ihmal edilmiştir.

Enerji denkleminde yer alan potansiyel alanları (φ_+ ve φ_-) çözmek için ise Poisson denklemleri kullanılır (Ansys Inc., 2024):

$$\nabla.\left(\sigma_+ \nabla_{\varphi_+}\right) = -\left(j_{ECh} - j_{short}\right) \tag{2.2}$$

$$\nabla.\left(\sigma_- \nabla_{\varphi_-}\right) = j_{ECh} - j_{short} \tag{2.3}$$

Bu denklemlerde yer alan σ_+ve σ_- terimleri, sırasıyla pozitif ve negatif elektrot bölgelerinin efektif elektriksel iletkenliklerini (*S/m*) ifade ederken; φ_+ ve φ_- ilgili elektrotlardaki elektriksel potansiyel alanlarını temsil etmektedir. Eşitliğin sağ tarafında bulunan j_{short} terimi, batarya içerisinde oluşabilecek bir iç kısa devre durumunda açığa çıkacak kaçak akım yoğunluğunu belirtir. Ancak bu tez çalışmasında batarya hücresi, herhangi bir hasar veya kısa devre durumu olmaksızın sağlıklı koşullarda (SoH: %100) modellendiğinden, analizlerde j_{short} terimi ihmal edilerek sıfır kabul edilmiştir.

Dolayısıyla denklemlerdeki belirleyici ana kaynak terimi, hacimsel elektrokimyasal akım transfer yoğunluğu olan j_{ECh} parametresidir. MSMD yaklaşımı, bu akım yoğunluğunu ve buna bağlı elektrokimyasal ısı üretimini hesaplayabilmek için bir alt modele ihtiyaç duyar. Bu çalışmada, söz konusu terimlerin hesaplanması ve döngüsel test verileriyle kalibre edilmesi için NTGK Modeli tercih edilmiştir.

Elektrokimyasal Modeller: Batarya hücresi içerisindeki iyon transferi, difüzyon mekanizmaları ve reaksiyon kinetiğini (Butler-Volmer denklemleri) fiziksel tabanlı denklemlerle çözen yaklaşımdır. Bu alandaki en temel referans, literatürde P2D (Pseudo-2D) olarak bilinen ve Doyle vd. (1993) tarafından geliştirilen modeldir. Elektrokimyasal modeller, hücre davranışını yüksek hassasiyetle tahmin etmelerine rağmen; çözümledikleri doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin karmaşıklığı ve çok sayıda fiziksel parametreye ihtiyaç duymaları nedeniyle, paket seviyesindeki 3 boyutlu analizlerde yüksek işlemci gücü gerektirmektedir (Schmidt vd., 2021).

Eşdeğer Devre Modelleri (ECM): Karmaşık kimyasal süreçler yerine bataryayı; voltaj kaynağı, seri dirençler ve kapasitör ağlarından oluşan basitleştirilmiş bir elektrik devresi olarak simüle eden yaklaşımdır. Matematiksel işlem yükünün hafif olması sayesinde, özellikle gerçek zamanlı Batarya yönetim sistemi (BYS) uygulamalarında ve sistem mühendisliği çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Rahimi-Eichi vd., 2013). Ancak bu modeller, hücre içindeki elektrokimyasal değişimleri fiziksel olarak takip etmediği için, karmaşık ısıl dağılımları ve bölgesel sıcaklık farklarını yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir (Bairwa vd., 2021).

MSMD ve NTGK Yaklaşımı: Bu tez çalışmasında, bataryanın elektrokimyasal ve ısıl davranışlarını bütünleşik bir yapıda ele alabilmek ve hesaplama maliyeti ile doğruluk arasındaki dengeyi optimize etmek amacıyla Ansys Fluent yazılımının sunduğu MSMD (Multi-Scale Multi-Dimensional) çatısı kullanılmıştır. Batarya fiziğini farklı ölçeklerde çözümleyen bu çatı yapısı sayesinde hücre içerisinde üretilen ısı kaynağı terimleri ile sıcaklık dağılımı arasındaki çift yönlü etkileşim, elektriksel potansiyel denklemleriyle doğrudan ilişkilendirilerek analiz hassasiyeti artırılmıştır.

Bu çatı yapısı içerisinde alt model olarak; Newman, Tiedemann, Gu ve Kim'in öncü çalışmalarına dayanan ve literatürde NTGK olarak adlandırılan yarı-ampirik model tercih edilmiştir (Uzun, 2025; Schmidt vd., 2021). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; NTGK modelinin sunduğu esnek yarı-ampirik altyapı sayesinde, geniş bir çalışma aralığında batarya hücresinin voltaj karakteristiğini, sıcaklık artışını ve ısıl dağılımını yüksek hassasiyetle öngörebildiği görülmektedir (Panchal vd., 2016; Uzun, 2025). Modelin matematiksel formülasyonunda, deneysel deşarj eğrilerinden elde edilen voltaj ve akım karakteristikleri (U ve Y parametreleri) temel alınmaktadır. Ansys Fluent teorik

kılavuzunda belirtildiği üzere; bu parametreler kullanılarak hacimsel elektrokimyasal reaksiyon akım yoğunluğu (j_{ECh}) Eşitlik 2.4'teki gibi modellenmiştir (Ansys Inc., 2024):

$$j_{ECh} = \frac{Q_{nominal}}{Q_{ref}.Vol} \,.Y.[U - V_t] \tag{2.4}$$

Burada $Q_{nominal}$ bataryanın nominal kapasitesini (Ah), Q_{ref} parametre çıkarımı yapılan referans kapasiteyi (Ah), *Vol* bataryanın aktif hacmini (m^3) ve *V* hücre voltajını ifade eder. Bu denklemle elde edilen hacimsel akım yoğunluğu (j_{ECh}), literatürde Bernardi denklemi olarak bilinen genel enerji dengesi yaklaşımında kaynak terimi olarak kullanılarak bataryanın 3 boyutlu ısı üretimi (q) hesaplanır (Bernardi vd., 1985):

$$q = j_{ECh}.\left[U - V_t - T\frac{dU}{dT}\right] \tag{2.5}$$

Burada *j* hacimsel akım transfer yoğunluğunu, *U* açık devre voltajını ve *V* hücre voltajını temsil eder. Bu yöntem, kese tipi hücrelerde akım yoğunluğunun ve sıcaklık dağılımının incelenmesinde, hesaplama hızı ve doğruluk arasındaki en optimum dengeyi sunmaktadır. Bernardi denklemi ile hesaplanan ısı üretimi, bataryanın o anki şarj durumuna ve sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda modelin temel girdileri olan *U* ve *Y* parametreleri, bataryanın deşarj derinliğinin (DoD) ve sıcaklığının (*T*) bir fonksiyonu olarak tanımlanır.

Öncelikle bataryanın deşarj derinliği, çekilen hacimsel akım yoğunluğunun zamana göre integrali alınarak şu şekilde hesaplanır (Ansys Inc., 2024):

$$DoD = \frac{Vol}{3600\,.\,Q_{nominal}} \int_0^t j_{ECh}\, dt \tag{2.6}$$

Burada; *Vol* batarya hücresinin aktif hacmini (m^3), $Q_{nominal}$ bataryanın nominal kapasitesini (Ah) ve *t* geçen süreyi (s) ifade eder. Denklemde yer alan 3600 katsayısı, amper-saat (Ah) cinsinden verilen kapasite değerini, SI birim sistemindeki zaman birimi

olan saniye (s) ile uyumlu hale getirmek (Coulomb dönüşümü) amacıyla kullanılan birim çevirme faktörüdür.

Bu integral işlemi; simülasyon boyunca bataryadan çekilen anlık elektrokimyasal akım yoğunluğunu (j_{ECh}) zamana bağlı olarak toplayarak kümülatif yük miktarını hesaplar ve bunu toplam kapasiteye oranlayarak bataryanın anlık doluluk oranını dinamik olarak günceller.

Hesaplanan anlık DoD değeri ve hücre sıcaklığı (T) kullanılarak; modelin karakteristik parametreleri olan açık devre voltajı (U) ve elektrokimyasal iletkenlik parametresi (Y), beşinci dereceden polinom eğri uydurma yöntemi ve Arrhenius tipi sıcaklık düzeltme terimleriyle şu şekilde formüle edilir (Ansys Inc., 2024):

$$U = \left(\sum_{n=0}^{5} a_n (DoD)^n\right) - C_2\left(T - T_{ref}\right) \tag{2.7}$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^{5} b_n (DoD)^n\right) exp\left[-C_1\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \tag{2.8}$$

Burada a_n ve b_n; farklı deşarj hızlarında gerçekleştirilen deneysel test verilerinin modele tanıtılması sonucu elde edilen polinom katsayılarıdır. C_1 ve C_2, modelin sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetini belirleyen düzeltme katsayıları olup, T o anki hücre sıcaklığını (K) ve T_{ref} ise parametre çıkarımının yapıldığı referans ortam sıcaklığını temsil eder. Böylece model; deneysel verilerden elde edilen bu U ve Y parametrelerini anlık olarak güncelleyerek, enerji ve potansiyel denklemlerindeki (Eşitlik 2.1-2.3) kaynak terimleri olan hacimsel akım yoğunluğunu (j_{ECh}) ve elektrokimyasal ısı üretimini ($\dot{q}_{ECh}$) hesaplar.

Bu denklemler sayesinde NTGK modeli; bataryanın sadece tek bir sıcaklıktaki davranışını değil, değişen çevre koşulları ve kendi ısınmasıyla farklılaşan voltaj karakteristiğini de dinamik olarak simüle edebilmektedir.

Elektrokimyasal modellerin yüksek hesaplama maliyeti ve ECM mekansal çözünürlük eksikliği göz önüne alındığında; bu tez çalışmasında NTGK modelinin tercih edilmesi stratejik bir karardır. Çalışmanın temel amacı, hücre içindeki iyon hareketlerini mikroskobik düzeyde incelemekten ziyade, büyük ölçekli (73 Ah) bir kese tipi hücrenin yüzeyindeki sıcaklık dağılımını ve termal gradyanları 3 boyutlu olarak analiz etmektir. NTGK modeli, deneysel verilerle valide edilebilen yapısı ve makul işlemci yükü ile bu amaca en uygun çözüm olarak belirlenmiştir.

2.6. Deşarj Hızının Isıl Davranışa Etkisi

Lityum-iyon bataryaların ısıl performansı ve güvenlik sınırları, doğrudan çalışma akımı ile ilişkilidir. Bir bataryanın nominal kapasitesine oranla çekilen akım miktarını ifade eden C-rate; batarya yönetim sistemlerinin soğutma stratejilerini belirleyen temel dinamik parametredir.

Literatürdeki temel ısı üretim teorileri incelendiğinde (Bernardi vd., 1985; Chen vd., 2005); deşarj hızı arttıkça batarya iç direnci kaynaklı ısı üretim hızının (Joule Isınması) dramatik şekilde yükseldiği görülmektedir. Bu artışın fiziksel temeli, Joule Yasası ile açıklanır:

$$P = I^2.R \tag{2.9}$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere; akımın iki katına çıkması (örneğin 1C'den 2C'ye geçiş), açığa çıkan ısıl gücün karesel olarak artmasına ve ısıl yükün dört katına ulaşmasına neden olmaktadır.

Ancak bu ısınma, batarya geometrisine bağlı olarak homojen gerçekleşmez. Özellikle geniş yüzey alanına sahip kese tipi hücrelerde, akım yoğunluğu elektronların giriş-çıkış yaptığı kutup başları bölgesinde yoğunlaşma eğilimindedir (Perez Estevez vd., 2021).
Bu durum, batarya yüzeyinde yerel sıcak noktaların oluşmasına ve ısıl dengesizliklere yol açar.

Tez kapsamında özellikle 1C ve 2C deşarj hızlarının karşılaştırılmasının temel nedeni, batarya ısıl davranışının doğrusal olmadığını (non-lineer) ortaya koymaktır. Teorik olarak akım iki katına çıktığında, Joule yasası gereği ısı üretiminin dört kat artması beklenmektedir. Bu çalışmada yapılan analizler, söz konusu teorik artışın, kese tipi hücre geometrisindeki dar kesitli kutup başlarında nasıl bir yerel aşırı ısınmaya dönüştüğünü somutlaştırmayı ve güvenli çalışma sınırlarını bu kritik bölgelere göre belirlemeyi hedeflemektedir.

2.7. Thermal Runaway Mekanizması

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar için en ciddi güvenlik riski, sıcaklığın kontrolsüzce yükselip zincirleme reaksiyonları başlattığı ısıl kaçak olayıdır. Yeterli bir soğutma sistemi olmadığında, bataryadan yüksek akım çekilmesiyle ortaya çıkan aşırı ısı bu süreci başlatabilir (Bandhauer vd., 2011). Literatüre göre bu mekanizma genellikle birbirini izleyen üç temel aşamada gerçekleşir (Feng vd., 2018).

İlk aşama 80°C – 100°C aralığında görülür; burada anot üzerindeki SEI (Katı Elektrolit Arayüzü) tabakası bozulmaya başlar. Bu reaksiyon ekzotermik bir yapıdadır, dolayısıyla sıcaklığı daha da artırır.

Sıcaklık 130 °C – 150 °C seviyelerine tırmandığında ise anot ile katodu ayıran separatör erir. Separatör eridiğinde hücre içinde kısa devre oluşur ve bu da ani bir ısı patlamasına yol açar (Orendorff, 2012).

En tehlikeli olan son aşamada ise katot malzemesi bozularak oksijen salmaya başlar. Açığa çıkan oksijen ortamdaki ısıyla birleşince elektrolit alev alır; bu da yangın veya patlamayla sonuçlanır (Bandhauer vd., 2011).

Bu tez çalışmasında yapılan ısıl analizlerin temel amacı, bataryanın çalışma sıcaklığını bu kritik eşiklerin (özellikle SEI bozunma başlangıcı olan 80 °C'nin) altında tutacak soğutma stratejilerinin belirlenmesi için gerekli veriyi sağlamaktır.

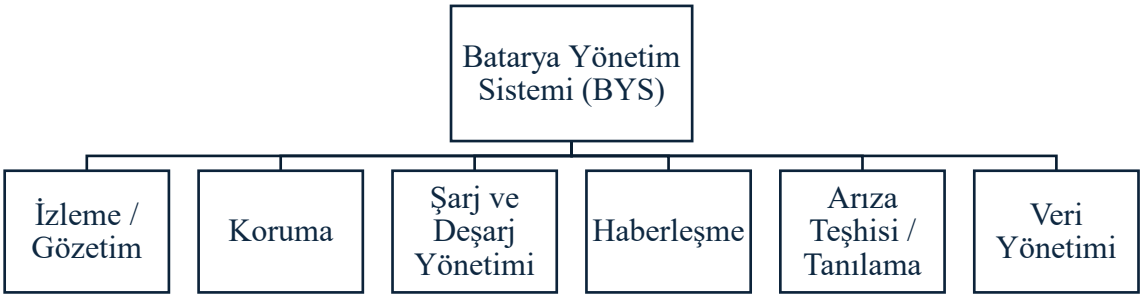
Literatürde belirtilen ve geri döndürülemez hasarlara yol açan bu ısıl kaçak sürecinin, genellikle 80 °C seviyesindeki SEI bozunmasıyla tetiklendiği bilinmektedir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen HAD analizlerinin temel amacı; batarya sıcaklığını henüz bu kritik eşiklere ulaşmadan kontrol altında tutabilecek soğutma stratejilerini geliştirmektir. Dolayısıyla elde edilen veriler, bataryanın güvenli bölge içerisinde kalmasını sağlayan bir erken uyarı sistemi niteliği taşımaktadır.

2.8. Batarya Yönetim Sistemleri (BYS) ve Temel Fonksiyonları

Batarya yönetim sistemi; enerji depolama birimlerinde tekil hücrelerin veya batarya modüllerinin voltaj, akım ve sıcaklık gibi kritik parametrelerini gerçek zamanlı olarak izleyen, kontrol eden ve optimize eden entegre bir elektronik sistem olarak tanımlanmaktadır (Rahimi-Eichi vd., 2013). BYS'nin tanımı ve karmaşıklığı uygulama alanına göre değişkenlik gösterse de; temel amacı bataryanın güvenli çalışma sınırları (SOA) içerisinde kalmasını sağlamak ve kullanım ömrünü maksimize etmektir (Warner, 2015).

Otomotiv endüstrisindeki uygulamalarda BYS, sadece bir enerji yönetim aracı değil, aynı zamanda kritik bir güvenlik donanımıdır. Sistem, batarya parametrelerini sürekli denetleyerek aşırı akım, aşırı voltaj veya yüksek sıcaklık gibi herhangi bir anormal durum tespit ettiğinde; ana kontaktörleri açarak batarya paketini yükten ayırma ve sistemi izole etme yeteneğine sahiptir (Ghaeminezhad vd., 2023).

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen ısıl analizlerin temel motivasyonu; BYS'nin sistemi koruma moduna almasına veya kalıcı hasarların oluşmasına neden olabilecek termal sınırların, özellikle deşarj sırasındaki yerel sıcaklık artışlarının hassas bir şekilde belirlenmesidir.
Genel bir BYS mimarisi donanımsal olarak; sensörler, kontrolcüler, iletişim arayüzleri (CAN Bus) ve güç elektroniği bileşenlerinden oluşur. Bu yapı sayesinde sistem, olası tehlikelere karşı proaktif bir koruma sağlayarak elektrikli aracın operasyonel güvenliğini garanti altına alır (Gabbar vd., 2021).



Şekil 2.4. Batarya Yönetim Sisteminin (BYS) temel fonksiyonel mimarisi ve alt birimleri (Gabbar vd., 2021).

2.8.1. Batarya Yönetim Sisteminin Sağladığı Avantajlar

Batarya yönetim sistemleri, enerji depolama birimlerinde teknik, operasyonel ve ekonomik açılardan kritik faydalar sağlamaktadır.

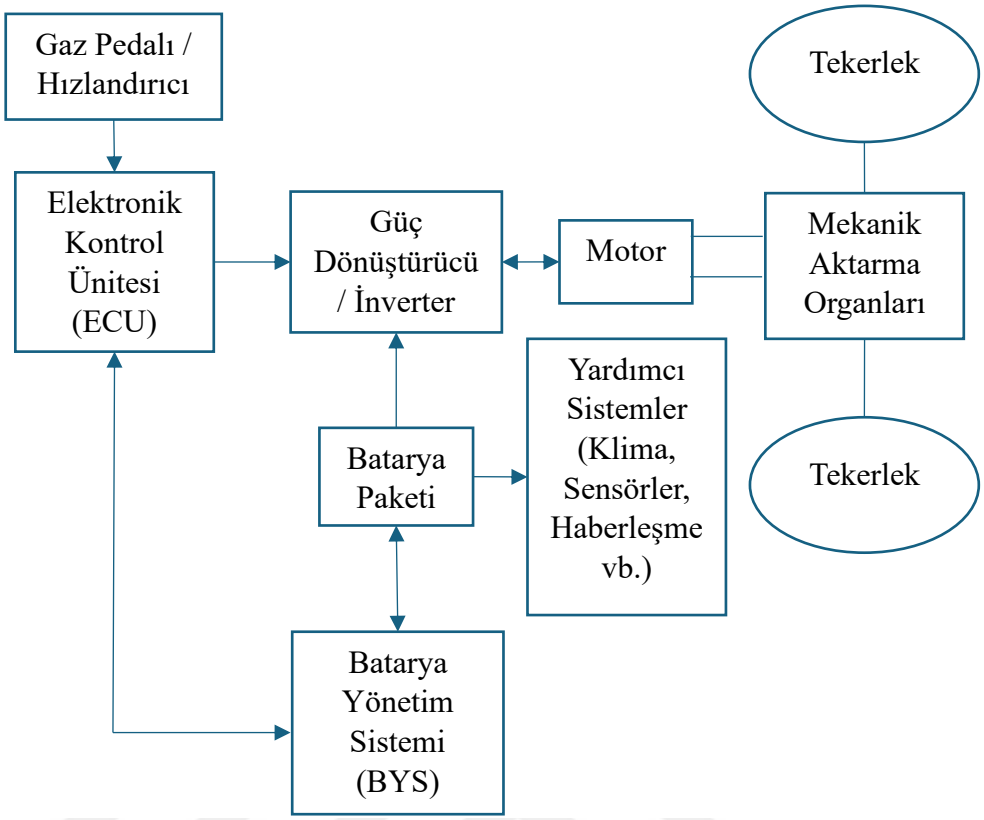
Teknik açıdan değerlendirildiğinde BYS; hücrelerin aşırı gerilim veya düşük gerilim sınırlarına ulaşmasını engelleyerek kalıcı hasar oluşumunun önüne geçer. Ayrıca, şarj akımını sınırlandırarak gerçekleştirdiği hücre dengeleme işlemi sayesinde paket performansını optimize eder.

Operasyonel anlamda en önemli katkısı güvenlik ve güvenilirliktir. BYS, özellikle yüksek voltajlı batarya paketlerinde ısıl kaçak riskini minimize ederek yangın ve patlama tehlikelerini engeller. Sistem ayrıca, seri veya paralel bağlı modüller içerisindeki arızalı hücreleri tespit ederek çift yönlü bir koruma mekanizması sunar.

Ekonomik açıdan ise BYS kullanımı, batarya ömrünün uzatılması ve toplam sahip olma maliyetinin düşürülmesi anlamına gelmektedir. Literatürde yapılan güncel maliyet projeksiyonları incelendiğinde; elektrikli araç batarya paketlerinde BYS ve ilgili elektronik bileşenlerin maliyetinin, toplam paket maliyetinin yaklaşık %10-12'lik kısmını oluşturduğu görülmektedir (Berckmans vd., 2017). Bu oran, BYS'nin sağladığı yüksek güvenlik ve ömür avantajlarıyla kıyaslandığında, sistemin maliyet verimliliği açısından vazgeçilmez bir bileşen olduğunu kanıtlamaktadır.

2.8.2. Elektrikli Ulaşımda BYS'nin Rolü ve Standardizasyon

Dünya genelinde elektrikli mobilite, iklim değişikliği ile mücadele ve karbon emisyonlarının azaltılması hedefleri doğrultusunda, geleceğin ulaşım çözümü olarak kabul görmektedir. Fosil yakıtlı araçların kademeli olarak kullanımdan kaldırılması ve batarya destekli araçların (xEV) yaygınlaşmasıyla birlikte, bu araçların kalbi niteliğindeki batarya yönetim sistemlerinin standardizasyonu kritik bir ihtiyaç haline gelmiştir. Literatürde belirtildiği üzere (Rahimi-Eichi vd., 2013), elektrikli ulaşım uygulamalarında kullanılan BYS ürünlerinin belirli standartlara oturtulması; kamu güvenliğinin sağlanması, ulaşım güvenilirliğinin artırılması ve üretim regülasyonlarına uyum açısından zorunluluktur. BYS standartlarının doğru bir şekilde uygulanması, elektrikli araçlarda batarya kaynaklı riskleri ve tehlikeleri önemli ölçüde azaltarak teknolojinin güvenle yaygınlaşmasına olanak tanıyacaktır. Bu bağlamda, otomotiv endüstrisinde ISO 26262 gibi fonksiyonel güvenlik standartları, BYS tasarımlarında referans alınan temel kriterleri oluşturmaktadır.



Şekil 2.5. Elektrikli araç güç aktarma organları mimarisi ve batarya yönetim sisteminin (BYS) sistem içerisindeki entegrasyonu (Gabbar vd., 2021).

2.8.3. Batarya Yönetim Sistemlerinde (BYS) Isıl Kontrol

Elektrikli araçların güvenliği ve çevrim ömrü, batarya paketinin termal kararlılığına doğrudan bağlıdır. Literatürde lityum-iyon bataryalar için optimum çalışma sıcaklığı genellikle 15 °C ile 35 °C aralığı olarak kabul edilmekte; bu aralığın dışına çıkılması durumunda performans kaybı ve yaşlanma etkileri hızlanmaktadır (Ma vd., 2018). BYS'nin ısıl kontrol modülü, sensörlerden aldığı verilerle sistemin bu güvenli çalışma alanı (SOA) içerisinde kalmasını sağlamakla yükümlüdür (Warner, 2015).

BYS, sadece pasif bir izleme organı değil, aynı zamanda soğutma sistemlerini (fan, pompa, valf vb.) aktif olarak yöneten bir karar mekanizmasıdır. Özellikle otomotiv endüstrisinde kritik öneme sahip olan ISO 26262 işlevsel güvenlik standartları; termal kaçak riski algılandığında BYS'nin milisaniyeler içerisinde sistemi kapatma ve

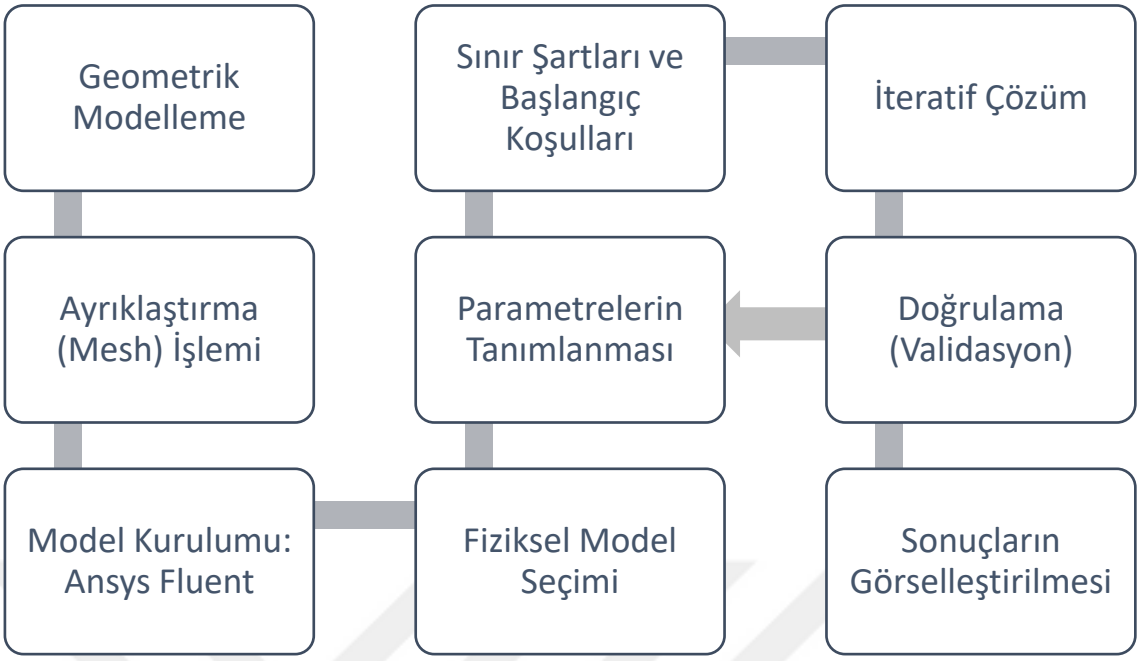
kullanıcıyı uyarma yeteneğine sahip olmasını zorunlu kılmaktadır (Lelie vd., 2018; Gabbar vd., 2021).

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen HAD analizleri; BYS'nin soğutma sistemini hangi sıcaklıkta ve hangi şiddette devreye alması gerektiğini belirleyen kontrol algoritmaları için gerekli kritik eşik değerlerinin tespit edilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Elektrikli araç teknolojilerinin geliştirilme süreçlerinde, batarya paketlerinin ısıl yönetim stratejileri performans ve güvenlik açısından belirleyici rol oynamaktadır. Karmaşık elektrokimyasal reaksiyonlara sahip enerji depolama sistemlerinin ısıl davranışlarının yalnızca deneysel yöntemlerle analiz edilmesi; yüksek maliyet, uzun test süreleri ve güvenlik riskleri barındırmaktadır. Bu kısıtlamalar nedeniyle; batarya içindeki fiziksel fenomenlerin öngörülmesi ve tasarım optimizasyonu süreçlerinde, HAD tabanlı sayısal modelleme teknikleri güvenilir bir endüstri standardı haline gelmiştir (Panchal vd., 2014). Bu tez çalışması kapsamında; 73 Ah kapasiteli, lityum-iyon kimyasına sahip kese tipi bir batarya hücresinin farklı deşarj oranlarındaki ısıl karakteristiği, Ansys Fluent R19.2 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, bataryanın elektrokimyasal tepkimeleri ile ısı üretimi arasındaki çoklu fizik etkileşimini çözümlemek amacıyla, literatürde geçerliliği kanıtlanmış olan MSMD modülü ve yarı-empirik NTGK modeli tercih edilmiştir.

Analitik doğruluğu ve çözüm yakınsama kalitesini maksimize etmek üzere kurgulanan simülasyon metodolojisi, birbirini tamamlayan hiyerarşik bir süreç izlemektedir. Bu sürecin ilk aşamasında; batarya geometrisi matematiksel düzleme aktarılarak sınır şartlarının tanımlanacağı yüzeyler belirlenmiş ve akış hacmi, hesaplama hassasiyetini artırmak adına yüksek kaliteli elemanlardan oluşan bir çözüm ağı (mesh) ile ayrıklaştırılmıştır. Fiziksel modelin çatısı kurulduktan sonra; deneysel verilerle valide edilen NTGK model parametreleri (U ve Y katsayıları) ve malzeme özellikleri sisteme girilmiş; elektriksel potansiyel ve enerjinin korunumu denklemleri iteratif bir döngü içerisinde çözülmüştür. Analiz sürecinin son aşamasında ise; simülasyon sonucu elde edilen sayısal veriler işlenerek sıcaklık dağılım konturları, voltaj-zaman grafikleri ve hücre yüzeyindeki kritik referans noktalarının anlık ısıl değişimleri görselleştirilip detaylı bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur.



Şekil 3.1. Tez çalışması kapsamında izlenen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analiz metodolojisinin akış şeması.

Takip eden alt bölümlerde; oluşturulan geometrik modelin detayları, ağ yapısının bağımsızlık analizi, uygulanan sınır şartları ve simülasyonun yönetim parametreleri detaylı olarak sunulmaktadır.

3.1. İncelenen Batarya Hücresi ve Özellikleri

Bu çalışmada, yüksek enerji yoğunluğu ve tasarım esnekliği nedeniyle elektrikli araç teknolojilerinde yaygın olarak tercih edilen kese tipi lityum iyon batarya hücresi incelenmiştir.

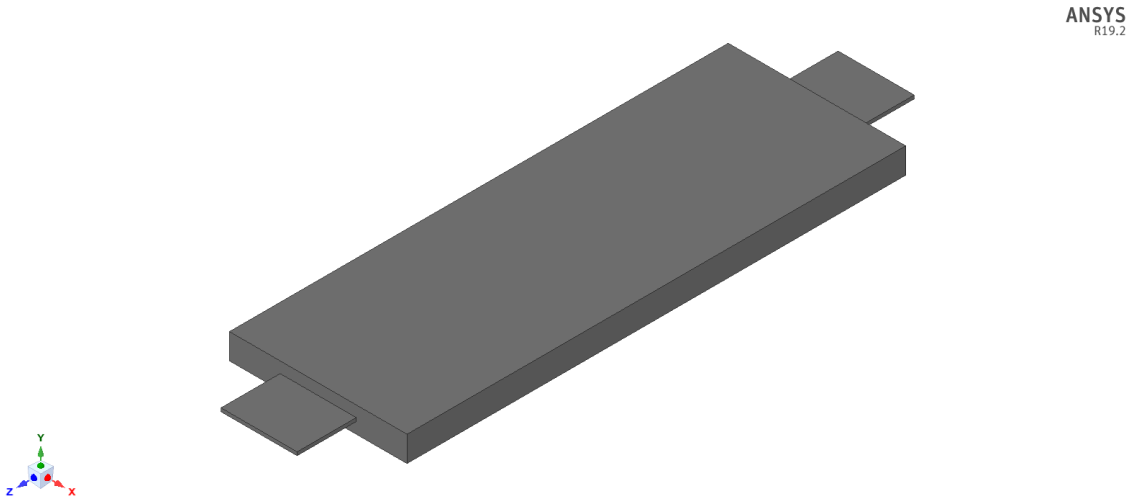
Sayısal modellemede referans alınan batarya hücresine ait detaylı teknik özellikler Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan batarya hücresinin özellikleri (Tahirağaoğlu, 2024).

Parametreler	Değerler
Hücre tipi	Kese tipi
Boyutlar	295 x 105 x 15 mm
Ağırlık	953 g
Enerji yoğunluğu	642 Wh/L
Nominal kapasite	73 Ah
Nominal voltaj	3.65 V
Voltaj aralığı	2.75 – 4.2 V
Katot malzemesi	NMC 811
Anot malzemesi	Grafit

3.2. Geometrik Model ve Sayısal Ağ Yapısı

Analiz çalışmalarının ilk aşamasında, incelenen 73 Ah kapasiteli lityum-iyon kese tipi bataryanın fiziksel geometrisi üç boyutlu olarak modellenmiştir. Geometrik modelleme sürecinde Ansys DesignModeler yazılımı kullanılmıştır. Modelleme işleminin ardından, simülasyon doğruluğunu doğrudan etkileyen hesaplama alanının oluşturulması amacıyla geometri, sayısal ağ yapısı ile ayrıklaştırılmıştır.



Şekil 3.2. Analiz çalışmasında kullanılan 73 Ah kapasiteli kese tipi batarya hücresinin 3 boyutlu geometrik modeli

3.2.1. Çözüm Ağı Oluşturma ve Parametreleri

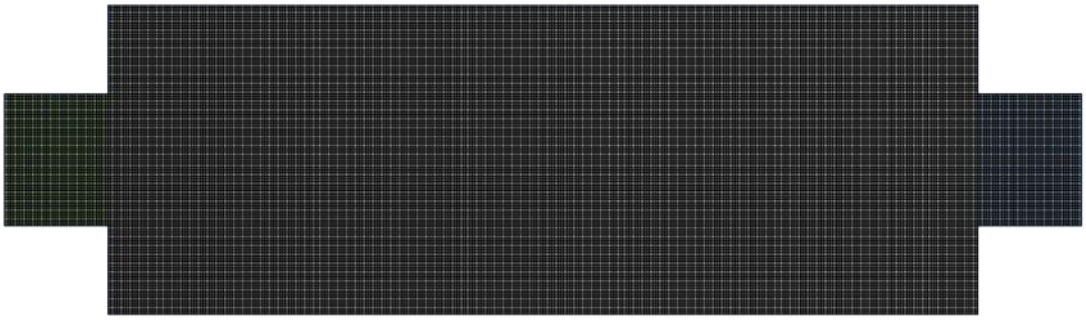
Sayısal analizlerde sonuçların doğruluğu ve yakınsama hızı, doğrudan çözüm ağının kalitesine ve yapısına bağlıdır. Bu çalışmada Ansys Meshing modülü kullanılarak, batarya geometrisi sonlu sayıda kontrol hacmine ayrıklaştırılmıştır.

Kese tipi hücrenin dikdörtgenler prizması şeklindeki yassı geometrisi göz önüne alınarak, hesaplama maliyetini optimize etmek ve sayısal difüzyonu en aza indirmek amacıyla çalışmada Hexahedral (altı yüzlü) eleman yapısı tercih edilmiştir. Çözüm ağının kalitesini artırmak adına; geometrik detaylar ve sıcaklık gradyanları 1 mm'lik genel eleman boyutu ile hassas bir şekilde yakalanırken, elemanların geometrik uyumluluğu ve düşük çarpıklık oranı 'Yüksek' (High) seviyede tutulan yumuşatma ayarı ile optimize edilmiştir. Ayrıca, batarya yüzeylerinden iç hacme doğru gerçekleşen ısı transferi ve sınır tabaka etkilerinin doğru modellenebilmesi için 'Yumuşak Geçiş' (Smooth Transition) yöntemi kullanılarak, yüzeyden merkeze doğru kademeli ve orantılı bir eleman büyümesi sağlanmıştır.

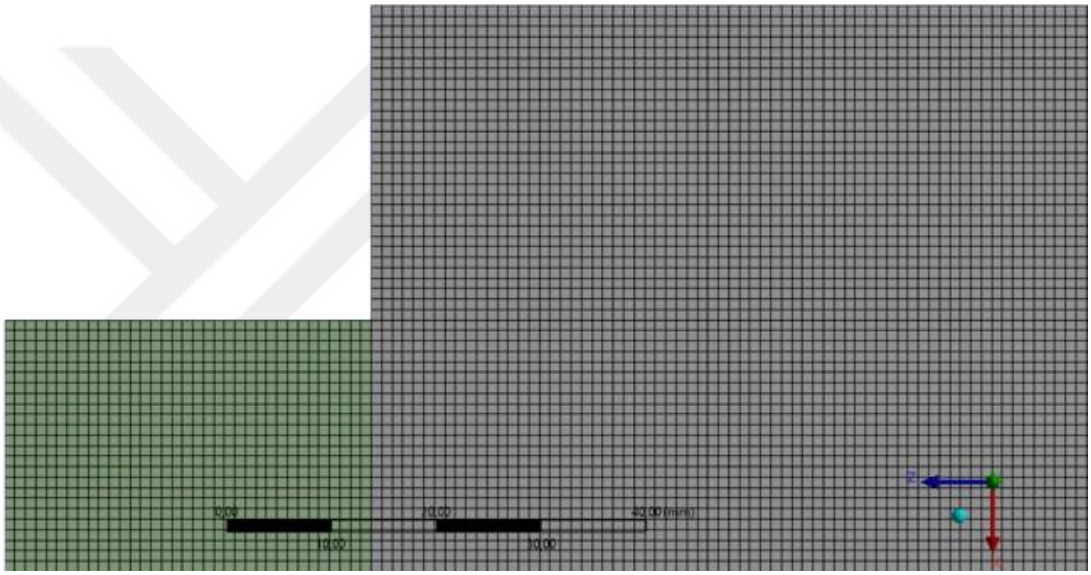
Oluşturulan bu yapı sonucunda elde edilen istatistiksel veriler Çizelge 3.2'de sunulmuştur:

Çizelge 3.2. Mesh istatistikleri ve kalite metrikleri

Parametre	**Değer**
Eleman Tipi	Hekzahedral
Eleman Boyutu	1 mm
Eleman Sayısı	469350
Düğüm Sayısı	510068



Şekil 3.3. Batarya hücresi mesh yapısı



Şekil 3.4. Batarya hücresi mesh yapısı

3.3. Malzeme Özellikleri ve Sınır Şartları

MSMD ve NTGK modelinin doğru çalışabilmesi için, bataryayı oluşturan malzemelerin termofiziksel özelliklerinin (yoğunluk, özgül ısı, ısıl iletkenlik) Fluent ortamına doğru tanımlanması kritik önem taşımaktadır.

3.3.1. Malzeme Özellikleri

Batarya hücresinin ısıl davranışının ve elektrokimyasal performansının sayısal olarak modellenebilmesi için, simülasyon alanını oluşturan bileşenlerin termofiziksel ve elektriksel özelliklerinin doğru tanımlanması kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada kullanılan lityum iyon batarya hücresi; anot, katot, separatör ve elektrolit katmanlarından oluşan aktif malzeme ve akım toplayıcı olarak görev yapan kutup başları olmak üzere iki temel yapı grubu altında incelenmiştir.

3.3.1.1. Aktif Malzeme Özellikleri

Lityum iyon pillerin iç yapısı, mikroskobik ölçekte çok katmanlı ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Ancak HAD analizlerinde, hesaplama maliyetini düşürmek ve makro ölçekteki ısı dağılımını gözlemlemek amacıyla bu çok katmanlı yapı homojenize edilmiş katı yaklaşımı ile modellenmiştir.

Bu yaklaşımda, elektrotlar ve separatörler tek bir malzeme bloğu gibi kabul edilir. Aktif malzemenin yoğunluğu (ρ), özgül ısısı (c_p) ve ısıl iletkenliği (k), bileşenlerin hacimsel ortalaması alınarak efektif değerler olarak modele girilmiştir. MSMD modelinin elektriksel potansiyel denklemlerini çözebilmesi için aktif malzemenin elektriksel iletkenliği (σ), bataryanın iç direncini temsil edecek şekilde efektif bir değer olarak tanımlanmıştır.

3.3.1.2. Akım Toplayıcılar

Batarya hücresinin dış devre ile bağlantısını sağlayan kutup başları, elektron transferinin gerçekleştiği ve akım yoğunluğunun en yüksek olduğu bölgelerdir. Çalışmada kullanılan batarya hücresi farklı elektrokimyasal özelliklere sahip anot ve katot katmanlarından oluştuğu için, her bir bölgenin elektriksel iletkenlik değerleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Yazılım arayüzünde yer alan kullanıcı tanımlı skaler yayınım (UDS Diffusivity) sekmesi üzerinden, pozitif ve negatif elektrotların iletkenlik katsayıları sırasıyla UDS-0 ve UDS-1 parametrelerine işlenmiştir. İlgili parametrelerin türetilmesinde, akım toplayıcılar

ve elektrot materyallerinin efektif özellikleri baz alınmış olup, hesaplama yöntemi Eşitlik 3.1 ve 3.2'de sunulmuştur (Perez Estevez vd., 2021).

$$\sigma_p = \frac{0{,}5\sigma_c^p \delta_c^p + \sigma_e^p \delta_e^p}{\delta_{toplam}} \tag{3.1}$$

$$\sigma_n = \frac{0{,}5\sigma_c^n \delta_c^n + \sigma_e^n \delta_e^n}{\delta_{toplam}} \tag{3.2}$$

Bu denklemlerde σ [S/m] elektriksel iletkenliği ve δ [µm] kalınlığı ifade etmektedir. Alt indis olan c akım toplayıcıyı, e elektrotu temsil etmektedir. Üst indisler olan p pozitif, n negatif anlamını taşımaktadır (Tahirağaoğlu, 2024).

Simülasyonda kullanılan tüm bileşenlere ait termofiziksel özellikler Çizelge 3.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Sayısal modelde kullanılan batarya bileşenlerinin termofiziksel özellikleri (Tahirağaoğlu, 2024).

Malzeme	**Özellik**	**Değer**
Aktif malzeme	Yoğunluk	2500 [kg/m^3]
	Özgül ısı kapasitesi	1050 [J/kgK]
	Isı iletim katsayısı (x-y)	13.5 – 0.74 [W/mK]
Katot malzemesi	Yoğunluk	2705 [kg/m^3]
	Özgül ısı kapasitesi	900 [J/kgK]
	Isı iletim katsayısı (x-y)	231 [W/mK]
Anot malzemesi	Yoğunluk	8940 [kg/m^3]
	Özgül ısı kapasitesi	385 [J/kgK]
	Isı iletim katsayısı (x-y)	391 [W/mK]

3.3.2. Sınır Şartları

Batarya hücresinin dış yüzeylerinde gerçekleşen ısı transferi, test kabini içerisindeki ortam koşullarını ve konvektif ısı etkileşimini simüle etmek amacıyla Newton'un Soğuma Yasası prensibine göre modellenmiştir. Yüzeylerden çevreye taşınım yoluyla atılan ısı akısı (q^n), Eşitlik 3.3 ile ifade edilmektedir:

$$q^n = h\,.\,(T_S - T_\infty) \tag{3.3}$$

Burada; h ısı taşınım katsayısını, T_S yüzey sıcaklığını ve T_∞ ortam sıcaklığını temsil etmektedir.

3.4. Sıcaklık İzleme Noktaları

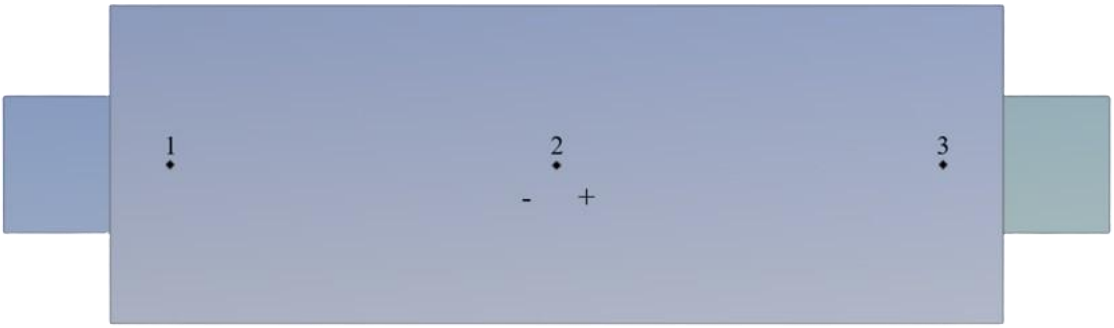
Sayısal analiz süresince batarya hücresinin ısıl davranışını bölgesel olarak incelemek ve elde edilen sonuçları deneysel verilerle karşılaştırarak doğrulamak amacıyla, hücre yüzeyi üzerinde üç farklı referans noktası belirlenmiştir.

Bu noktaların konumlandırılmasında, deneysel çalışmada kullanılan ısıl çiftlerin (T1, T2 ve T3) yerleşim bölgeleri esas alınmıştır. Böylece simülasyondan elde edilen zamana bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ile laboratuvar ölçümleri arasında birebir kıyaslama yapılması hedeflenmiştir. Noktalar; bataryanın geometrik merkezi, anot (negatif) kutup başı yakını ve katot (pozitif) kutup başı yakını olmak üzere ısıl gradyanın en belirgin gözlemlenebileceği stratejik bölgelere atanmıştır.

Belirlenen izleme noktalarının batarya geometrisi üzerindeki koordinat bilgileri Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Sıcaklık izleme noktalarının koordinatları

İzleme Noktası	Açıklama	Koordinatlar (x,y,z) [mm]
Point-1 (T1)	Negatif kutup yakını	(52.5, 15, 20)
Point-2 (T2)	Batarya yüzey merkezi	(52.5, 15, 147.5)
Point-3 (T3)	Pozitif kutup yakını	(52.5, 15, 275)



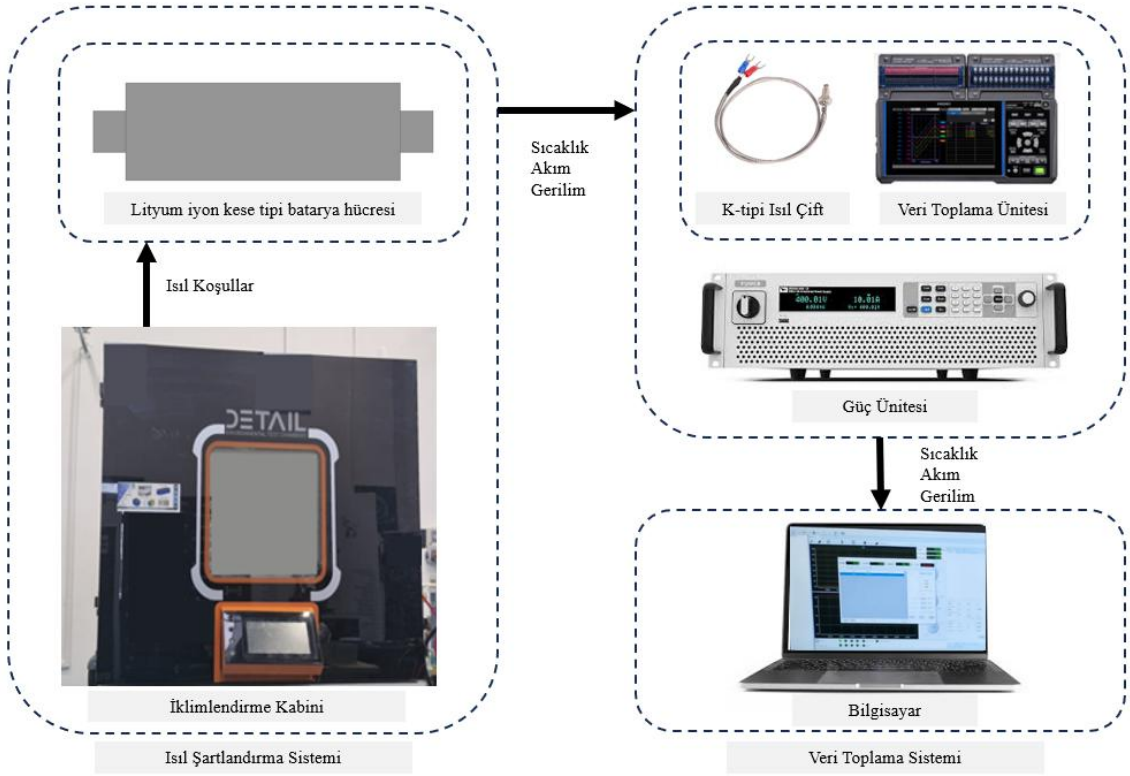
Şekil 3.5. Sayısal analizde referans alınan sıcaklık izleme noktalarının batarya yüzeyindeki konumları

3.5. Deneysel Çalışma

Bu bölümde, önceki kısımlarda detayları verilen sayısal modelin geçerliliğini test etmek ve batarya hücresinin gerçek çalışma koşullarındaki ısıl davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları anlatılmaktadır.

Sayısal analizlerden elde edilen sıcaklık ve voltaj verilerinin doğruluğunu kanıtlamak adına, batarya hücresi kontrollü bir iklimlendirme kabini içerisinde farklı ortam sıcaklıklarında (0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C) ve farklı deşarj hızlarında (1C ve 2C) test edilmiştir. Deneysel süreç boyunca, sonuçların tekrarlanabilirliğini ve doğruluğunu garanti altına almak adına, her bir test senaryosu öncesinde batarya hücresi standart koşullara getirilmiş ve ısıl denge durumu titizlikle kontrol edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, sadece sayısal modelin validasyonu için değil, aynı zamanda bataryanın dinamik yükler altındaki elektro-termal davranışının karakterize edilmesi açısından da kritik bir veri seti oluşturmaktadır. Aşağıdaki alt başlıklarda; kurulan deney düzeneği, kullanılan donanımların teknik özellikleri, izlenen test prosedürü ve ölçüm sisteminin güvenilirliğine dair belirsizlik analizi detaylandırılmıştır.

3.5.1. Deneysel Test Düzeneği ve Kullanılan Ekipmanlar



Şekil 3.6. Batarya test düzeneğinin şematik gösterimi

Şekil 3.6'da, deneysel çalışmalarda kullanılan test düzeneğinin genel şematik görünümü ve sistem bileşenleri arasındaki veri akış diyagramı sunulmuştur. Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm deneysel testler, BATEG Laboratuvarı altyapısında bulunan test istasyonlarında yürütülmüştür. Batarya hücresinin farklı ortam sıcaklıklarındaki performansını incelemek ve simülasyon sınır şartlarına uygun termal koşulları sağlamak amacıyla Detail ISN1000 model iklimlendirme kabini kullanılmıştır. Söz konusu cihaz, dış ortam sıcaklığını -40 °C ile +180 °C aralığında hassas bir şekilde kontrol edebilme yeteneğine sahiptir. İklimlendirme kabini, batarya hücresinin dış ortam sıcaklık dalgalanmalarından yalıtılarak, belirlenen sabit ortam sıcaklığında test edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu düzenek sayesinde, simülasyon çalışmalarında sınır şartı olarak tanımlanan ortam sıcaklığı (T_{amb}) deneysel olarak kontrol altında tutulmuş; bataryanın ısıl davranışının, ağırlıklı olarak iç direnç kaynaklı ısı üretimi ve batarya yüzeyinden gerçekleşen ısı taşınımı etkileşimi ile şekillenmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.7. BATEG Laboratuvarında yer alan batarya test düzeneği.

Hücrenin elektriksel yükleme testlerinin ve şarj-deşarj döngülerinin gerçekleştirilmesinde ise ITECH 6000C serisi çift yönlü programlanabilir DC güç ünitesi kullanılmıştır. Bu güç kaynağı, maksimum 80 V gerilim ve 300 A akım çıkışı sağlayarak batarya hücresinin ihtiyaç duyduğu elektriksel yük profillerini oluşturmaktadır.

Deney süresince akım profilinin sisteme tanımlanması, testlerin otomatik olarak yürütülmesi ve hücreye ait akım, terminal gerilimi ve kapasite gibi kritik elektriksel parametrelerin anlık olarak ölçülüp kaydedilmesi işlemi, güç ünitesinin kendi arayüz yazılımı olan IT9000 üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Batarya yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin zamana bağlı olarak hassas bir şekilde ölçülebilmesi amacıyla, laboratuvar standartlarına uygun K-tipi ısıl çiftler kullanılmıştır. Bu sensörler; sayısal analiz bölümünde koordinatları verilen (Bkz. Çizelge 3.4) ve

validasyon çalışması için referans alınan negatif kutup yakını (T1), geometrik merkez (T2) ve pozitif kutup yakını (T3) olmak üzere üç stratejik noktaya yerleştirilmiştir.

Isıl çiftlerden alınan analog voltaj sinyalleri, veri toplama ünitesi tarafından işlenerek dijital sıcaklık verisine dönüştürülmüş ve eş zamanlı olarak bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Ölçüm hassasiyetini artırmak ve dış ortam etkilerini minimize etmek adına, sensör uçlarının batarya yüzeyi ile tam teması sağlanmıştır.

Deneyde kullanılan cihazlara ait ölçüm aralıkları ve doğruluk değerleri ise Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.5. Deneysel çalışmada kullanılan cihazlara ait özellikler

Deney Cihazları		**Ölçüm Aralığı**	**Değerler**
DC güç ünitesi	Gerilim	2.75 V / 4.2 V	± 0.02 %
	Akım	-146 A / 146 A	± 0.1 %
K tipi ısıl çift	Sıcaklık	-25 °C / +200 °C	± 0.01 °C

Kurulan deney düzeneğinden alınan verilerin doğruluğunu teyit etmek adına, ölçüm cihazlarından kaynaklanabilecek potansiyel hatalar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Moffat (1988) tarafından önerilen belirsizlik analizi yöntemi kullanılarak, sistemdeki toplam hata payı hesaplanmıştır.

Hesaplamada; güç kaynağı, veri toplama ünitesi ve ısıl çiftlerden kaynaklanan bireysel ölçüm belirsizlikleri (akım, voltaj, sıcaklık ve zaman) Eşitlik 3.5 yardımıyla toplam hataya dönüştürülmüştür. Analiz sonucunda sistemin toplam bağıl hatası yaklaşık ± %1 olarak bulunmuştur. Bu düşük hata oranı, deneysel verilerin sayısal model validasyonu için yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu ispatlamaktadır.

$$Total\ error\ (\%) = \left[\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3.5)$$

3.5.2. Deney Prosedürü

Batarya hücresinin termal ve elektriksel karakterizasyonunu sağlamak amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, belirli bir standart prosedür izlenmiştir. Test süreci, öncelikle batarya hücresinin iklimlendirme kabini içerisinde hedeflenen ortam sıcaklığına getirilmesi ve test öncesinde hücre iç sıcaklığının ortamla tamamen eşitlenerek ısıl dengenin sağlanmasıyla başlatılmıştır. Isıl denge koşullarının sağlanmasının ardından, batarya hücresine sırasıyla 1C ve 2C akım hızlarında sabit akım (CC) deşarj testleri uygulanmış ve bu işlem, hücre voltajı alt kesme sınırı olan 2.75 V değerine düşene kadar sürdürülmüştür. Her bir deşarj veya şarj testinin tamamlanmasını takiben hücreye 60 dakikalık bir bekleme süresi tanınmıştır. Her test aşamasının ardından uygulanan bu bekleme süresi, hücrenin termal ve elektrokimyasal dengeye (OCV stabilizasyonu) ulaşmasını sağlar. Bu sayede, her deneyin bir öncekinin ısıl etkilerinden bağımsız, standart ve eşit başlangıç şartlarında gerçekleştirilmesi temin edilmiştir. Tüm bu prosedür boyunca akım, gerilim ve yüzey sıcaklık verileri, veri toplama ünitesi aracılığıyla saniyelik çözünürlükte kaydedilmiştir.

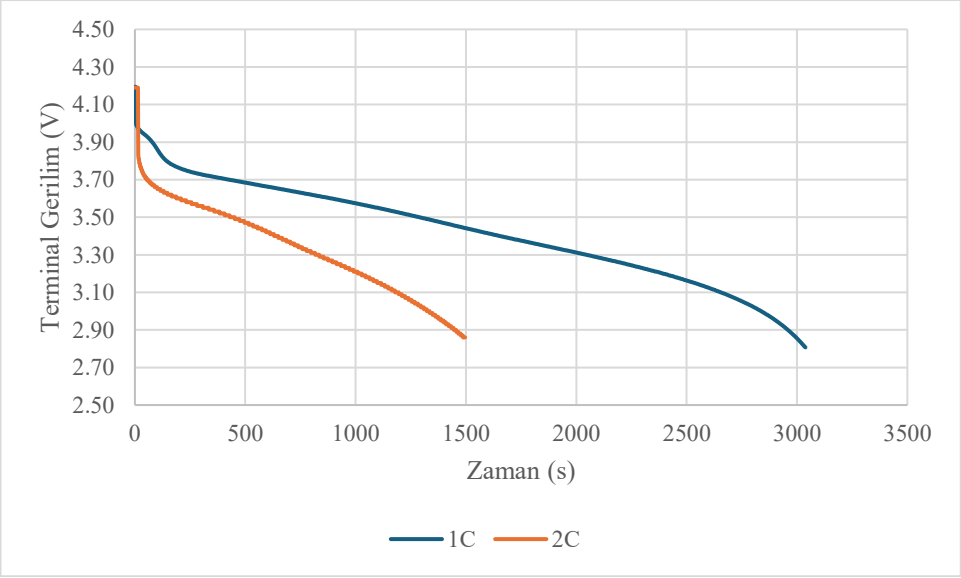
4. BULGULAR

Bu bölümde, lityum iyon kese tipi batarya hücresi üzerinde gerçekleştirilen deneysel testlerden ve bu testleri simüle eden üç boyutlu HAD analizlerinden elde edilen sayısal sonuçlar sunulmuştur.

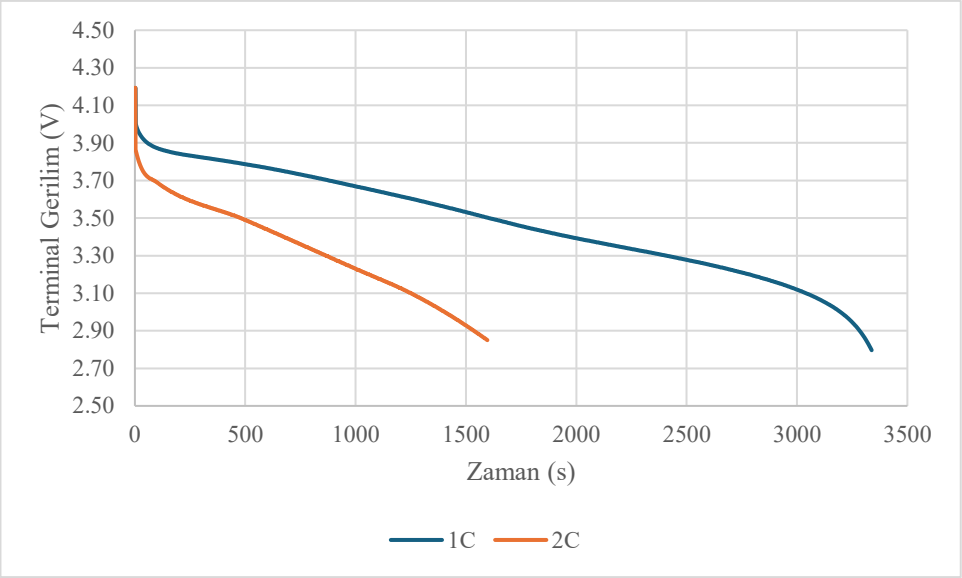
Çalışma kapsamında elde edilen veriler; bataryanın farklı ortam sıcaklıklarındaki (0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C) ve farklı deşarj hızlarındaki (1C ve 2C) elektriksel performansını ve ısıl davranışını ortaya koymaktadır. Deney ve simülasyon sonuçları, ilgili grafikler ve çizelgeler halinde verilmiş; elde edilen bulgular nicel olarak ifade edilmiştir.

4.1. Sabit Akım Deşarj Deneyi Sonuçları

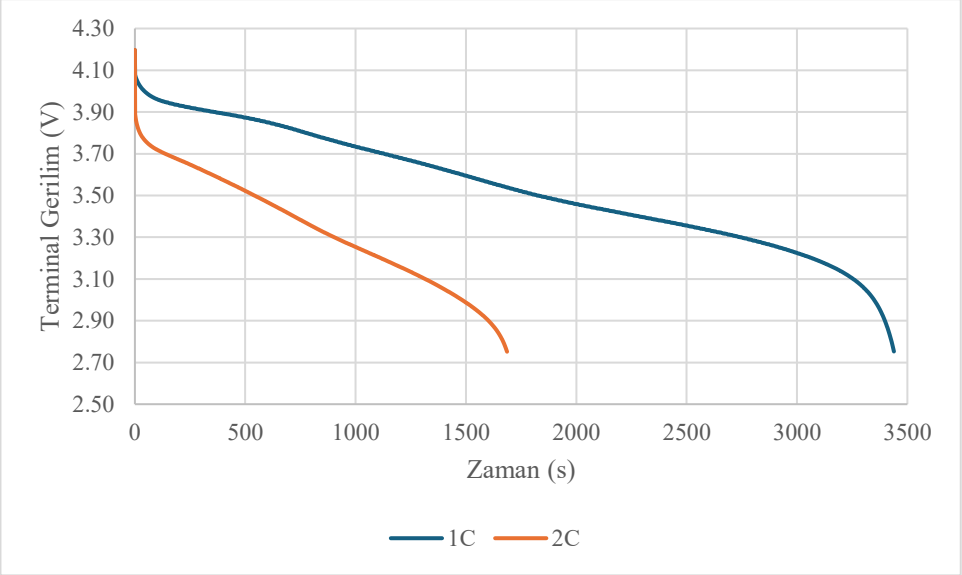
Batarya hücresinin enerji kapasitesi ve elektrokimyasal performansı, deşarj süresince sergilediği terminal gerilimi değişimi üzerinden analiz edilmiştir. Bu başlık altında, belirlenen test koşullarında zamanla değişen voltaj verileri sunulmuştur.
Çalışma parametrelerinin (sıcaklık ve akım) batarya voltajı üzerindeki etkilerini ayrı ayrı gözlemleyebilmek amacıyla parametrik bir yaklaşım izlenmiş ve sonuçlar incelenmiştir.



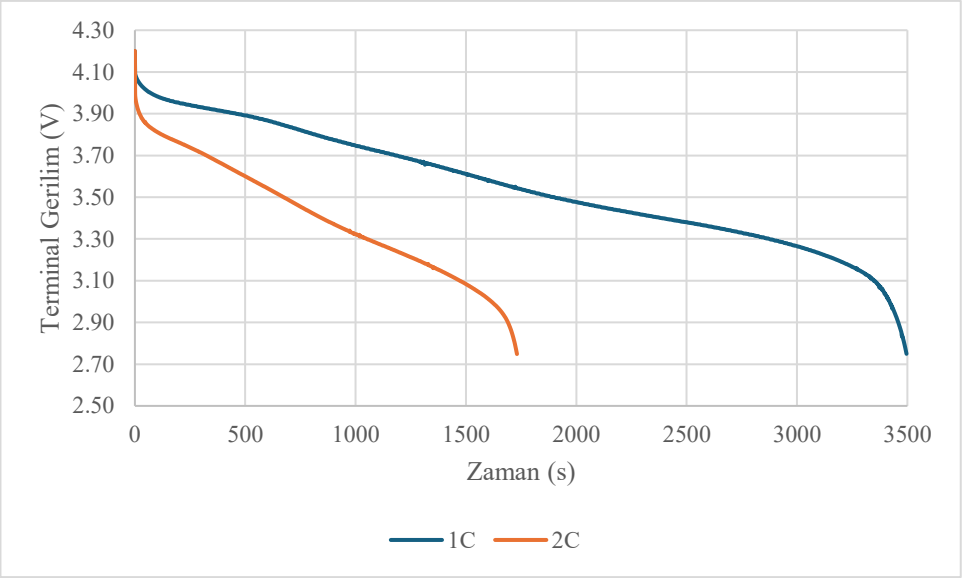
Şekil 4.1. 0 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması



Şekil 4.2. 10 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması



Şekil 4.3. 20 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması



Şekil 4.4. 30 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması

Bataryanın farklı çevresel ve operasyonel koşullar altındaki performans karakteristiklerini belirlemek amacıyla; 0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C ortam sıcaklıklarında, 1C ve 2C deşarj hızları için gerçekleştirilen deneylere ait voltaj-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur.

Grafikler incelendiğinde, deşarj süresi ve voltaj profilinin hem ortam sıcaklığından hem de çekilen akım miktarından doğrudan etkilendiği görülmektedir. Deneylerden elde edilen deşarj süreleri şu şekilde özetlenebilir:

0 °C ortam koşullarında: Batarya hücresi 1C akım hızında 3038 saniyede deşarj olurken, akım 2C seviyesine çıkarıldığında bu süre 1496 saniyeye düşmüştür.

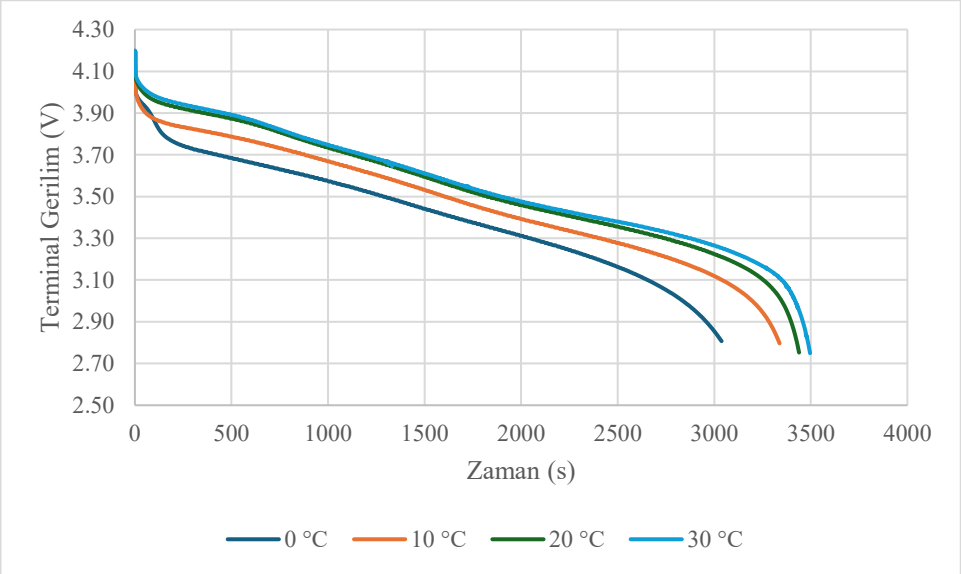
10 °C ortam koşullarında: Sıcaklığın artmasıyla birlikte performans iyileşmiş; deşarj süreleri 1C için 3338 saniye, 2C için ise 1597 saniye olarak ölçülmüştür.

20 °C ortam koşullarında: Artan sıcaklık trendine paralel olarak, bataryanın 1C akımdaki deşarj süresi 3439 saniye, 2C akımdaki süresi ise 1686 saniye olarak kaydedilmiştir.

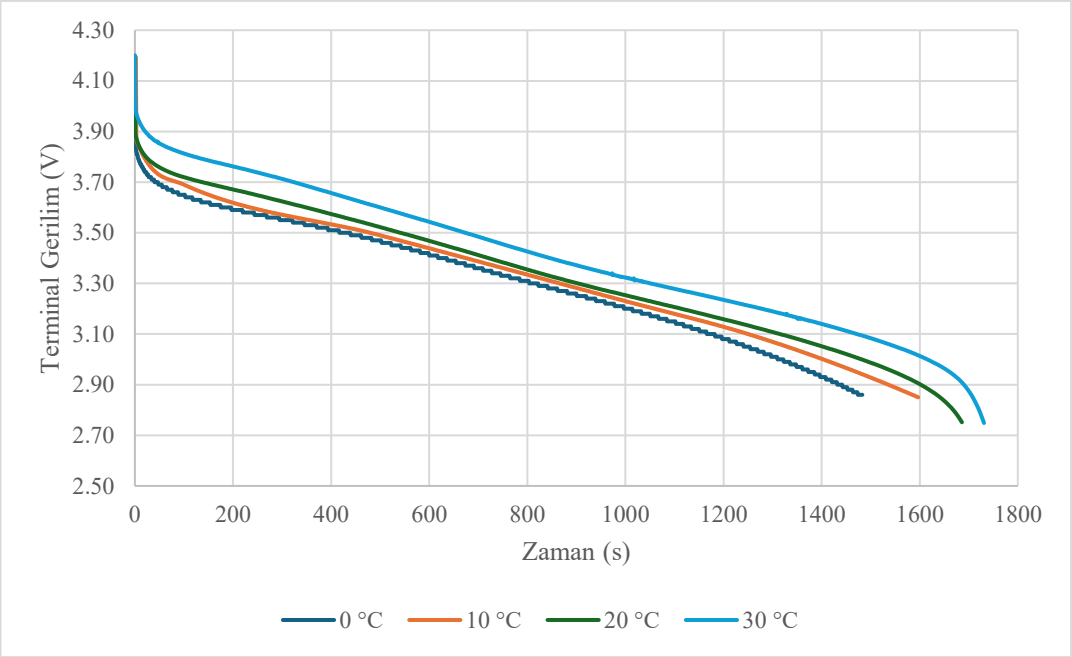
30 °C ortam koşullarında: En yüksek çalışma sıcaklığı olan bu koşulda ise batarya 1C hızında 3496 saniye, 2C hızında ise 1731 saniye boyunca enerji sağlayabilmiştir.

Elde edilen veriler ışığında sıcaklığın batarya performansı üzerindeki etkisi incelendiğinde; 0 °C'den 30 °C'ye doğru gerçekleşen sıcaklık artışının, batarya kapasitesini ve deşarj süresini pozitif yönde etkilediği açıkça görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda iyon hareketliliğinin yavaşlaması, bataryanın kesme gerilimine daha erken ulaşmasına neden olmuştur. 20 °C ve 30 °C verileri de bu ısıl iyileşme trendini destekler niteliktedir.

Deşarj akım hızının etkisi değerlendirildiğinde ise; tüm sıcaklık koşullarında akım değerinin 1C'den 2C'ye çıkarılmasının, deşarj süresini teorik beklentilerle uyumlu olarak yarı yarıya veya daha fazla azalttığı tespit edilmiştir. Grafikler dikkatle incelendiğinde, 2C deşarj eğrilerinin başlangıç anında (t=0), 1C eğrilerine kıyasla çok daha sert bir ani voltaj düşüşü sergilediği görülmektedir. Bu durum, Ohm yasası gereği, çekilen akımın artmasıyla batarya iç direncinde oluşan gerilim kaybının artmasından kaynaklanmaktadır. Deşarj süreci boyunca artan polarizasyon etkileri, yüksek akım çekildiğinde terminal geriliminin sürekli olarak daha düşük seviyelerde seyretmesine ve bataryanın kapasitesini tam olarak kullanamadan alt voltaj sınırına ulaşmasına neden olmuştur.



Şekil 4.5. Hücrenin 1 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi



Şekil 4.6. Hücrenin 2 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi

Sabit deşarj hızlarında, ortam sıcaklığındaki değişimin batarya terminal gerilimi ve deşarj süresi üzerindeki etkisi Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

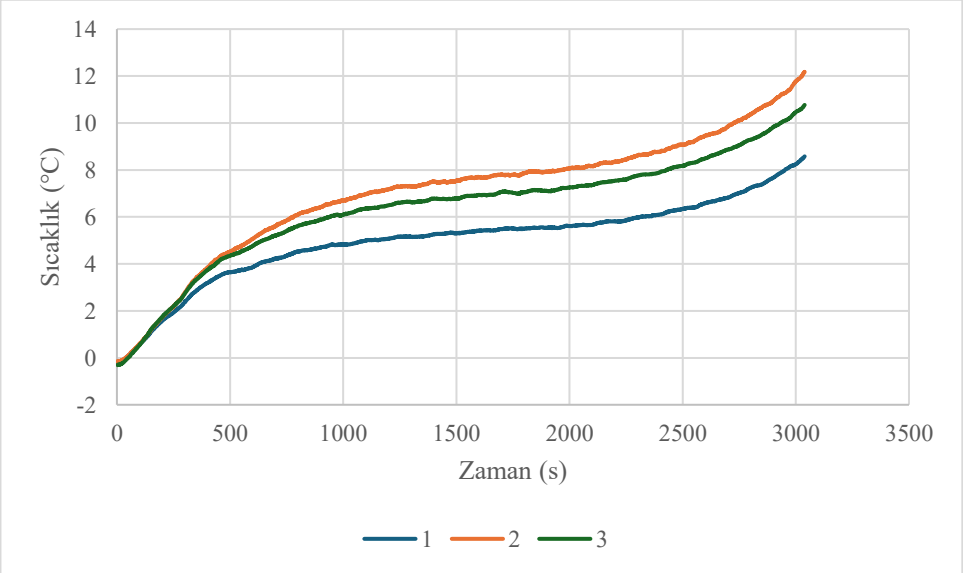
Şekil 4.5'te verilen 1C sabit akım deşarj eğrileri incelendiğinde; ortam sıcaklığının 0 °C'den 30 °C'ye yükselmesiyle birlikte deşarj eğrisinin belirgin şekilde yukarı doğru ötelendiği (voltaj seviyesinin arttığı) ve deşarj süresinin uzadığı görülmektedir. Düşük sıcaklık koşullarında, batarya iç direncinin yüksek olması nedeniyle deşarj başlangıcında daha derin bir voltaj düşümü yaşanmış ve batarya, kesme gerilimi olan 2.75 V seviyesine diğer sıcaklıklara kıyasla daha erken ulaşmıştır. Buna karşılık, 30 °C sıcaklıkta elektrokimyasal reaksiyon kinetiğinin hızlanması ve iç direncin azalması sayesinde, batarya daha stabil ve yüksek bir voltaj platosu sergilemiş, bu da kullanılabilir kapasitenin artmasını sağlamıştır.

Benzer bir eğilim, deşarj akımının iki katına çıkarıldığı Şekil 4.6'daki grafiklerde de gözlemlenmiştir. Ancak burada sıcaklığın etkisi çok daha kritiktir. Yüksek akım çekildiğinde, 0 °C ortam sıcaklığındaki ani voltaj düşüşü, 30 °C'deki duruma göre çok

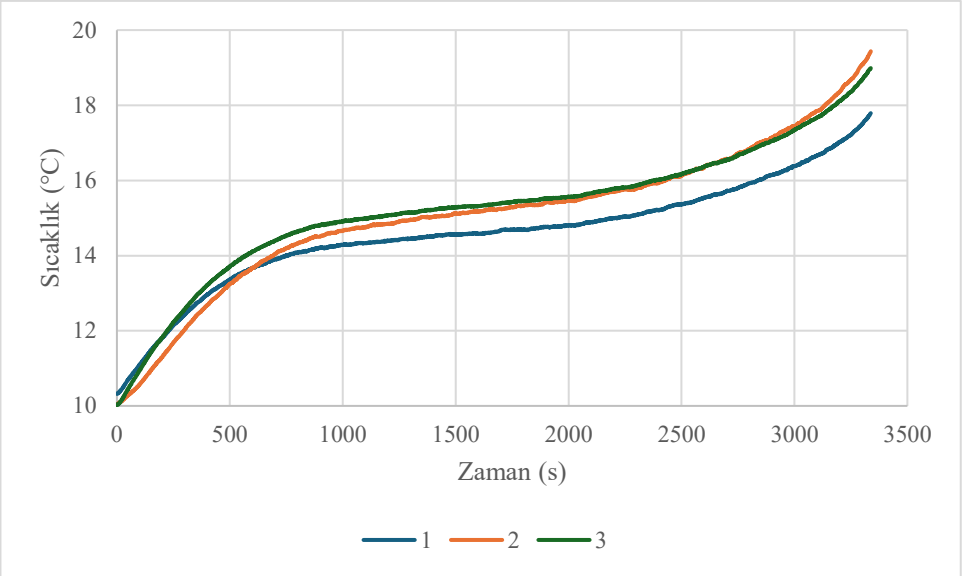
daha şiddetlidir. Grafikte görüldüğü üzere, 0 °C eğrisi deşarjın hemen başında 3.7 V seviyelerinin altına hızla inerken, 30 °C eğrisi 3.85 V seviyelerinde tutunabilmiştir.
Bu durum, batarya performansının düşük sıcaklıklarda ve yüksek akım taleplerinde ciddi oranda sınırlandığını kanıtlamaktadır. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 bir arada değerlendirildiğinde; sıcaklık artışının, bataryanın iç empedansını düşürerek Joule ısınmasından kaynaklı enerji kayıplarını azalttığı ve bataryanın teorik kapasitesine daha yakın bir performans sergilemesine olanak tanıdığı sonucuna varılmıştır. Özellikle 20 °C ve 30 °C eğrilerinin birbirine yakın seyretmesi, bataryanın optimum çalışma aralığının oda sıcaklığı ve üzeri olduğunu işaret etmektedir.

4.2. Deneysel Karakterizasyon Sonuçları ve Isıl Davranış Analizi

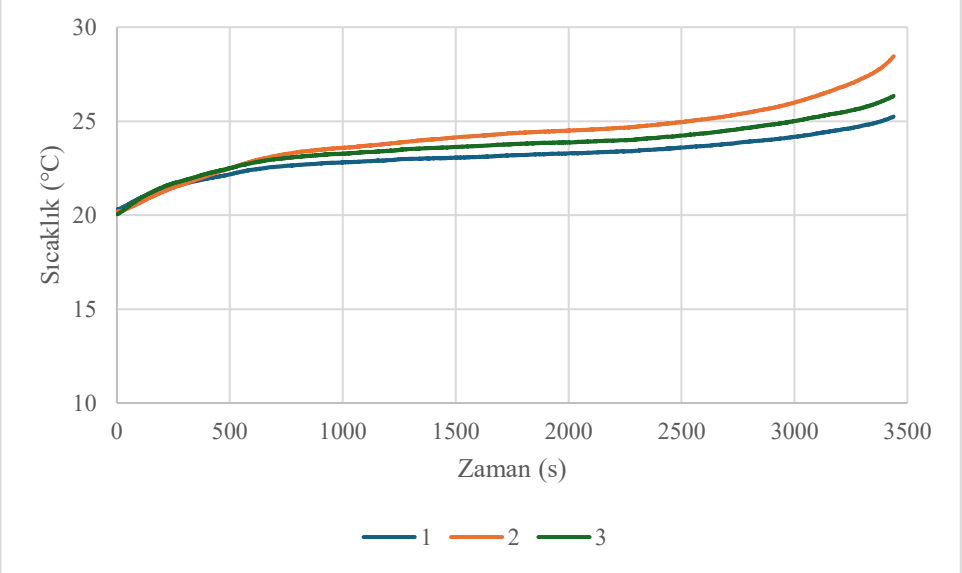
Deneysel çalışma sırasında hücre sıcaklığındaki değişimler de ısıl çift aracılığıyla kayıt altına alınmıştır. Bu çalışmada çeşitli ortam sıcaklıklarındaki hücre yüzeyindeki noktaların sıcaklıkları aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Her bir grafikte 1 ile 3 arasında isimlendirilen eğriler Şekil 3.5'te belirtilen hücre yüzeyindeki noktaların sıcaklık değişimlerini ifade etmektedir.



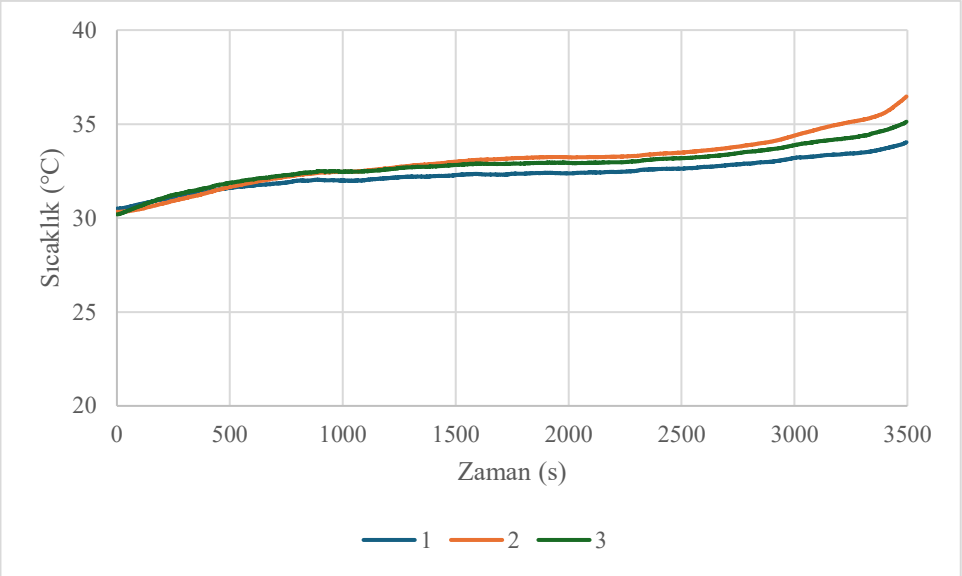
Şekil 4.7. 0 °C dış ortam koşulunda 1 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



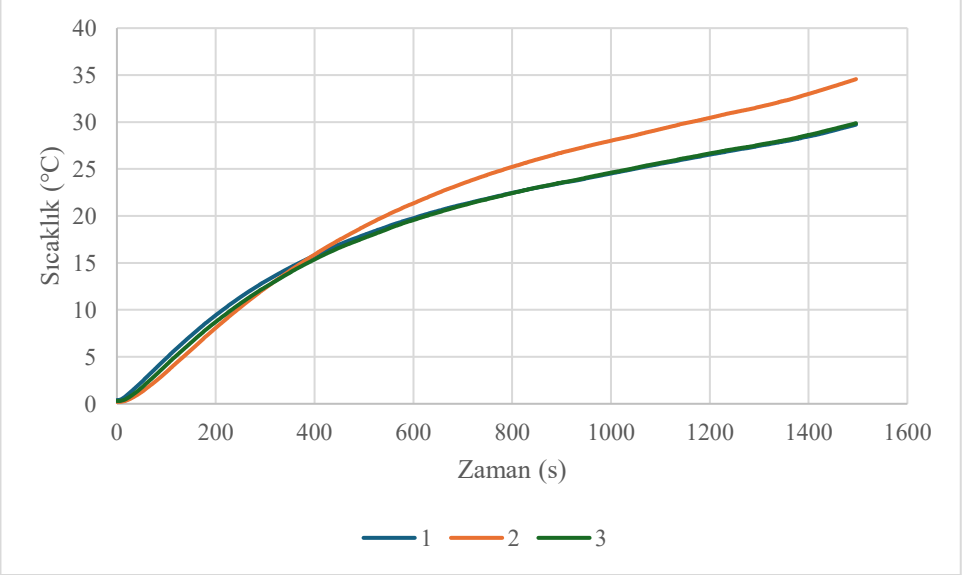
Şekil 4.8. 10 °C dış ortam koşulunda 1 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



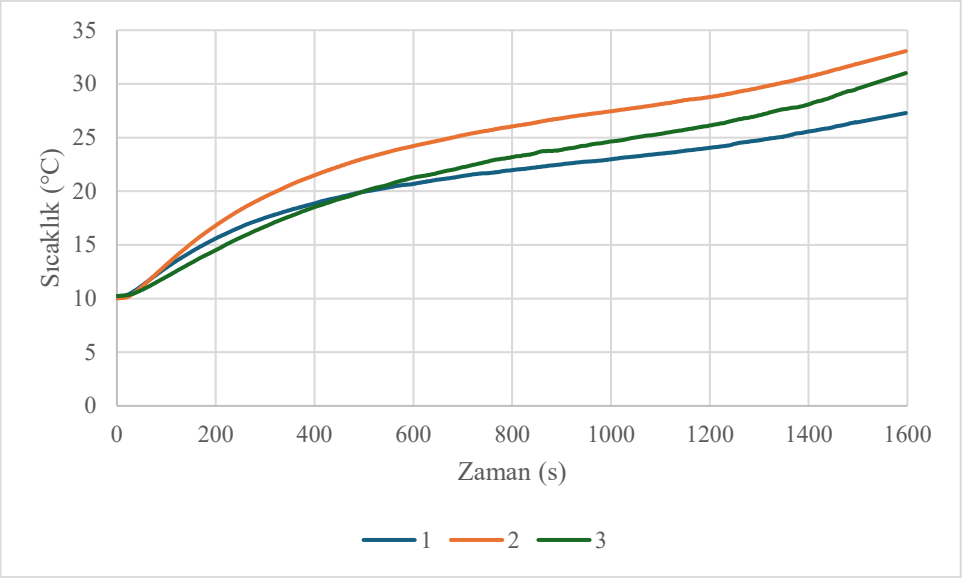
Şekil 4.9. 20 °C dış ortam koşulunda 1 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



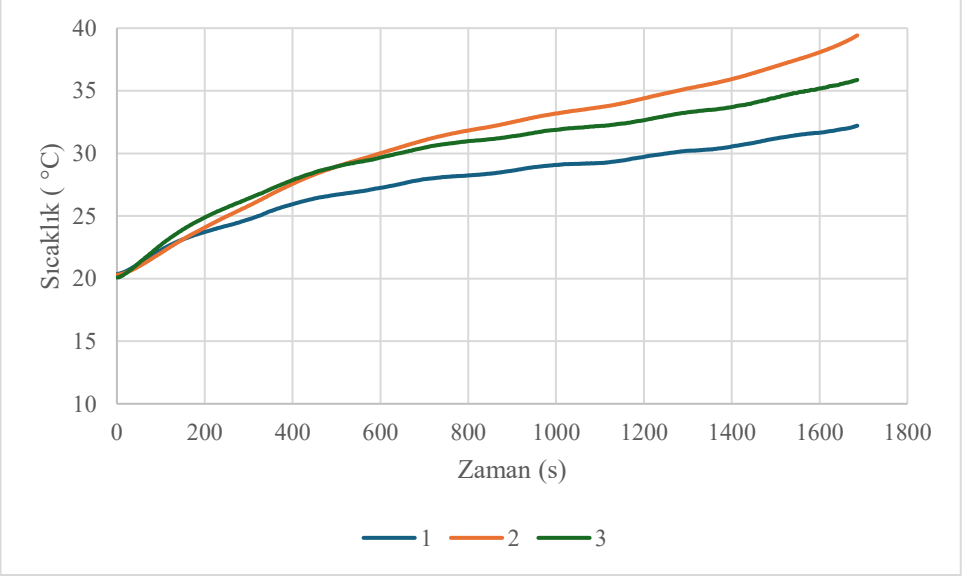
Şekil 4.10. 30 °C dış ortam koşulunda 1 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



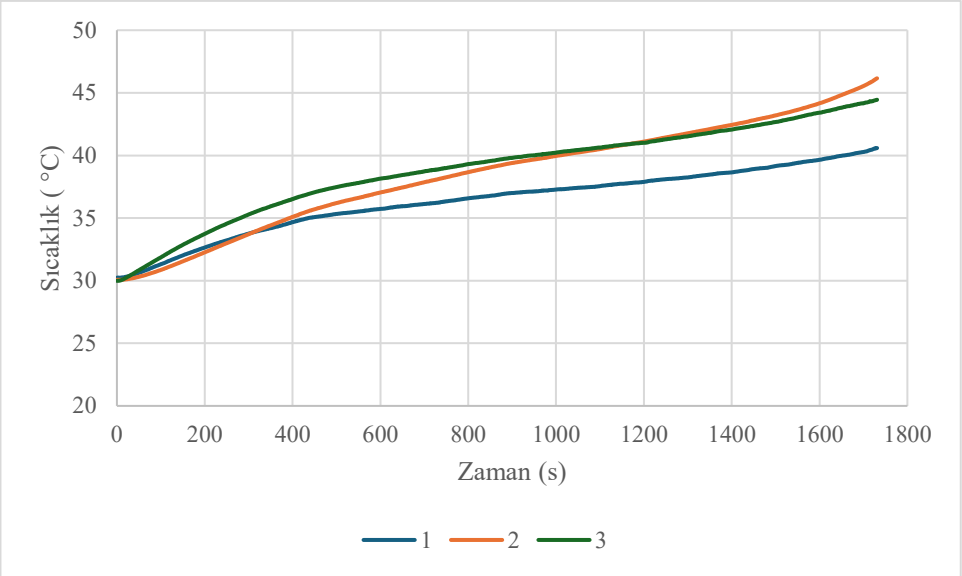
Şekil 4.11. 0 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



Şekil 4.12. 10 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



Şekil 4.13. 20 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



Şekil 4.14. 30 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri

Farklı ortam sıcaklıklarında ve farklı deşarj hızlarında bu üç noktadan elde edilen sıcaklık-zaman değişim grafikleri Şekil 4.7 ile Şekil 4.14 arasında sunulmuştur. Farklı ortam sıcaklıklarında ve farklı deşarj hızlarında elde edilen sıcaklık-zaman değişim grafikleri Şekil 4.7 ile Şekil 4.14 arasında sunulmuştur.

Elde edilen veriler incelendiğinde, 1C sabit akım deşarj hızında yüzey sıcaklıklarının tüm noktalarda düzenli ve birbirine paralel bir artış eğilimi sergilediği görülmektedir. Özellikle 0 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilen testlerde, deşarj sonu yüzey sıcaklıkları yaklaşık 12 °C seviyelerine ulaşarak, başlangıç sıcaklığına kıyasla belirgin bir artış ($\Delta T \approx 12\,°C$) kaydetmiştir.

Buna karşın, ortam sıcaklığı 30 °C'ye yükseltildiğinde deşarj sonu sıcaklıklar 36 °C bandında ölçülmüş, ancak toplam sıcaklık artışı yaklaşık 6 °C ile sınırlı kalmıştır. Gözlemlenen bu termal davranış farkı; düşük ortam sıcaklıklarında iyonik iletkenliğin azalmasına bağlı olarak batarya iç direncinin yükselmesi ve Joule yasası prensibi gereği iç ısı üretiminin artması ile açıklanmaktadır. Yüksek ortam sıcaklıklarında ise iç direncin düşmesi, ısı üretim mekanizmasını zayıflatarak sıcaklık artışını sınırlandırmıştır.

Deşarj akım hızının 2C seviyesine yükseltilmesiyle birlikte, artan ısı üretim hızına paralel olarak tüm ölçüm noktalarındaki sıcaklık değişim gradyanlarında belirgin bir ivmelenme kaydedilmiştir. Yüksek akımın tetiklediği bu yoğun ısı üretimi, özellikle 0 °C ortam koşullarında çarpıcı sonuçlar doğurmuş ve yüzey sıcaklıklarının 35 °C seviyelerine kadar tırmanmasına neden olmuştur. Soğuk bir ortamda çalışılmasına rağmen bataryanın yaklaşık 35 °C'lik yüksek bir sıcaklık farkı oluşturması, düşük sıcaklıklarda iç direncin etkisiyle devreye giren kendi kendini ısıtma mekanizmasının şiddetini açıkça ortaya koymaktadır. Buna karşılık, 30 °C ortam koşullarında gerçekleştirilen 2C deşarj testlerinde batarya sıcaklığı mutlak değer olarak daha yüksek bir seviye olan 46 °C'ye ulaşmış olsa da, gerçekleşen toplam sıcaklık artışı yaklaşık 16 °C ile sınırlı kalmıştır.

Grafikler bölgesel olarak incelendiğinde; akım toplayıcıların bulunduğu pozitif kutup bölgesinin (Point 1) ve merkez noktasının (Point 2), negatif kutup bölgesine (Point 3) kıyasla ısıl değişimlere daha hızlı tepki verdiği, ancak genel itibarıyla batarya yüzeyinde aşırı bir bölgesel ısınma oluşmadığı ve sıcaklığın yüzeye nispeten homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Bu homojenlik, lityum-iyon bataryaların güvenli çalışma sınırları açısından olumlu bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

4.3. Sayısal Model Sonuçları ve Deneysel Doğrulama

Bu bölümde, lityum iyon batarya hücresinin elektrokimyasal ve ısıl davranışlarını öngörmek amacıyla Ansys Fluent yazılımında oluşturulan MSMD / NTGK modelinden elde edilen analiz sonuçları sunulmuştur. Geliştirilen sayısal modelin geçerliliğini test etmek adına; simülasyon sonuçları, 0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C ortam sıcaklıkları ile 1C ve 2C deşarj hızlarını kapsayan deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sayısal analizlerde, iklimlendirme kabini içerisindeki hava sirkülasyonuna bağlı zorlanmış taşınım mekanizması esas alınmıştır.

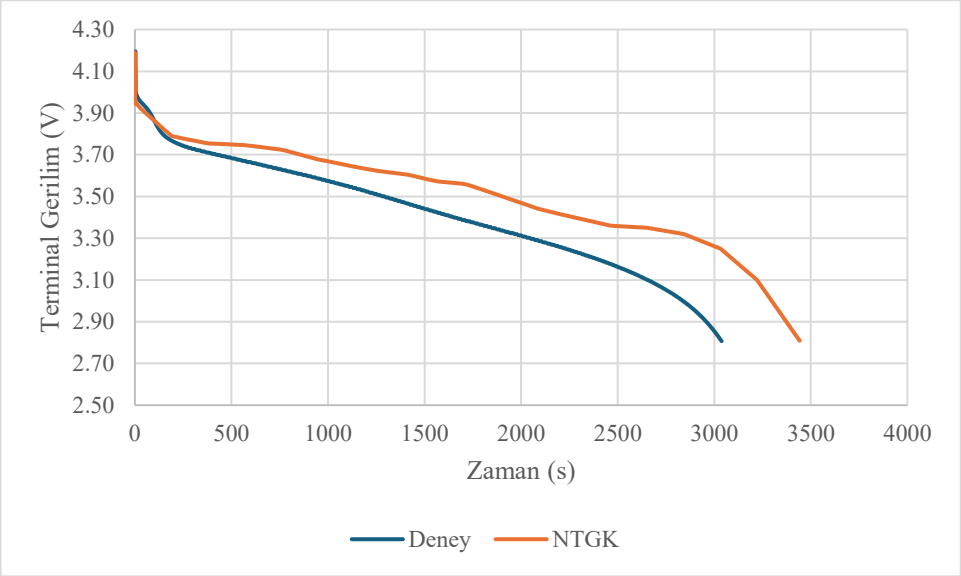
Aşağıdaki alt başlıklarda, batarya voltaj karakteristikleri ve zamana bağlı sıcaklık değişim profillerinin deneysel ve sayısal uyumu incelenmiştir.

4.3.1. Deşarj Voltaj Karakteristiklerinin Doğrulanması

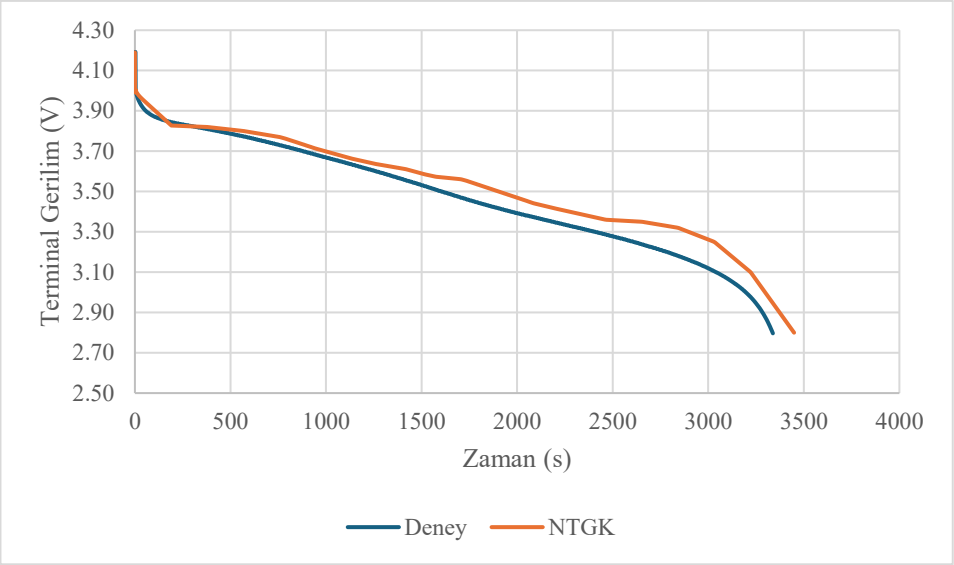
Sayısal modelin elektrokimyasal tahmin yeteneğini doğrulamak amacıyla, öncelikli olarak zamana bağlı voltaj değişimleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen deşarj eğrileri ile NTGK modelinden alınan sayısal sonuçların karşılaştırması, farklı sıcaklık ve akım koşulları için Şekil 4.15 ile Şekil 4.18 arasında sunulmuştur.

Grafikler incelendiğinde, simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle yüksek bir uyum sergilediği görülmektedir. Özellikle deşarjın plato bölgesi (nominal voltaj aralığı) ve kesme gerilimine yaklaşırken yaşanan ani voltaj düşüşleri, model tarafından yüksek hassasiyetle yakalanmıştır. Deneysel ve sayısal veriler arasındaki bu örtüşme; modelde kullanılan NTGK parametrelerinin (U ve Y katsayıları) bataryanın gerçek elektrokimyasal davranışını temsil etmede başarılı olduğunu ve modelin enerji kapasitesi tahminlerinde güvenilir olduğunu kanıtlamaktadır.

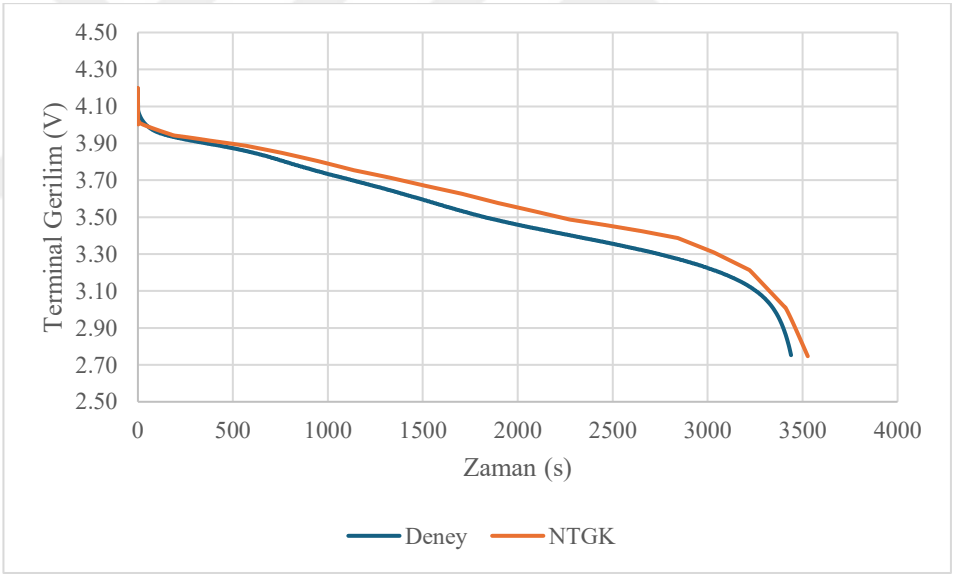
4.3.1.1. 1C Deşarj Hızı Sonuçları



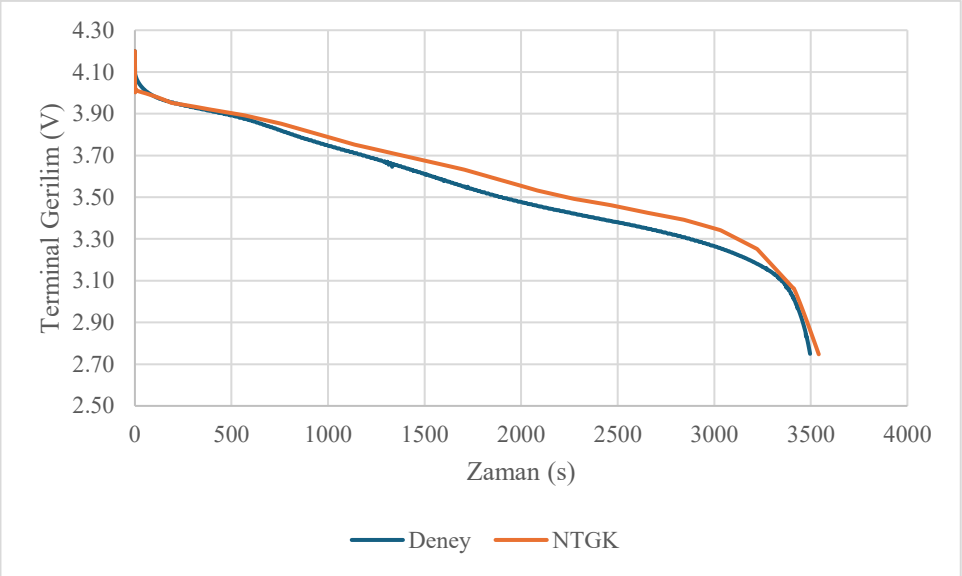
Şekil 4.15. 0 °C ortam sıcaklığında ve 1C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 4.16. 10 °C ortam sıcaklığında ve 1C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 4.17. 20 °C ortam sıcaklığında ve 1C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması

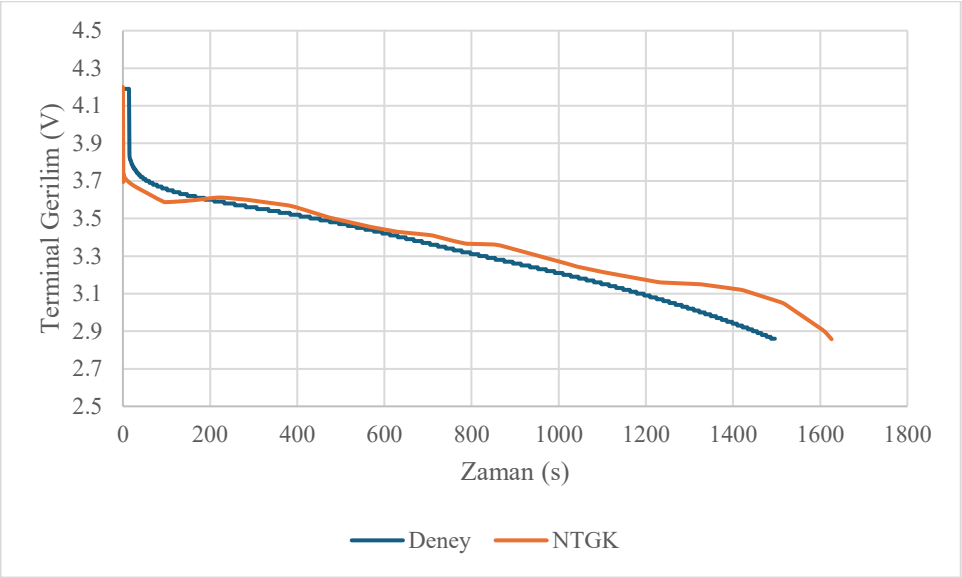


Şekil 4.18. 30 °C ortam sıcaklığında ve 1C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması

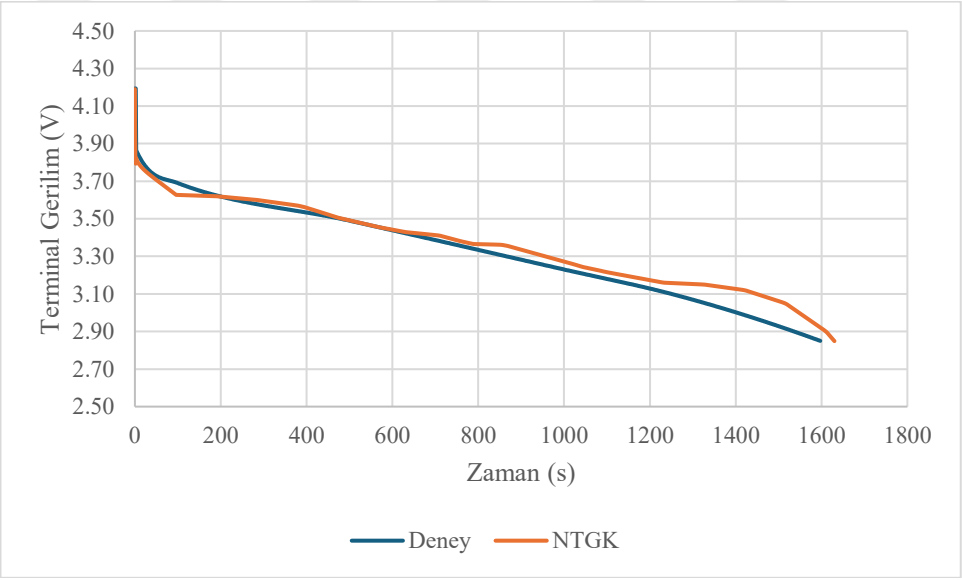
Şekil 4.15 ile Şekil 4.18 arasında sunulan 1C deşarj hızına ait voltaj-zaman grafikleri incelendiğinde, ortam sıcaklığının artmasıyla birlikte sayısal modelin tahmin doğruluğunun belirgin şekilde iyileştiği görülmektedir.

Düşük sıcaklık koşulunda (0 °C, Şekil 4.15), deşarjın son aşamasına doğru deneysel ve sayısal veriler arasında bir miktar sapma gözlemlenmiştir. NTGK modeli, bu düşük sıcaklıkta batarya iç direncinin ani artışını simüle ederken, deşarj süresini deneysel veriye kıyasla bir miktar daha iyimser tahmin etmiştir. Ancak ortam sıcaklığı 20 °C ve 30 °C seviyelerine ulaştığında (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18), model ile deney eğrilerinin neredeyse mükemmel bir örtüşme sergilediği tespit edilmiştir. Model, hem voltaj platosunu hem de kesme gerilimine düşüş anını yüksek hassasiyetle yakalamıştır. Bu sonuçlar, kalibre edilen NTGK modelinin geniş bir sıcaklık aralığında batarya voltaj karakteristiğini başarıyla temsil ettiğini doğrulamaktadır.

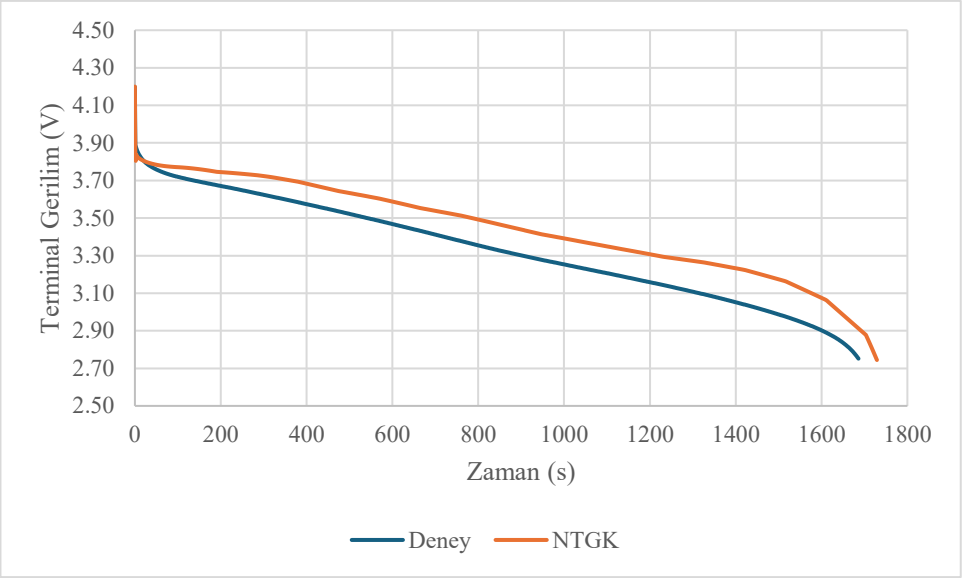
4.3.1.2. 2C Deşarj Hızı Sonuçları



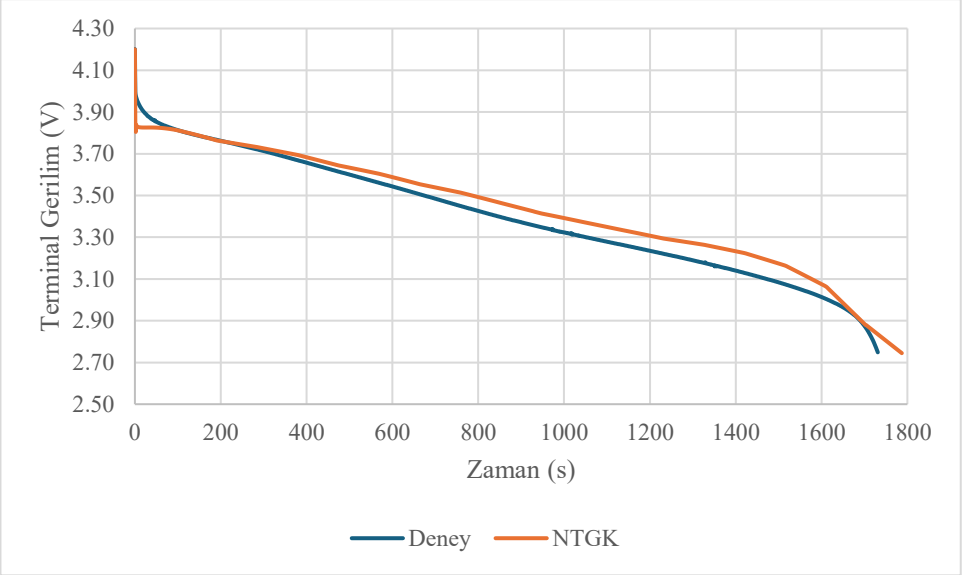
Şekil 4.19. 0 °C ortam sıcaklığında ve 2C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 4.20. 10 °C ortam sıcaklığında ve 2C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 4.21. 20 °C ortam sıcaklığında ve 2C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 4.22. 30 °C ortam sıcaklığında ve 2C sabit deşarj hızında hücre geriliminin zamana bağlı değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırması

2C deşarj hızı gibi bataryanın hem elektriksel hem de termal açıdan sınırlarının zorlandığı dinamik bir koşulda dahi, sayısal modelin deneysel verilerle yüksek bir uyum sergilediği görülmektedir.

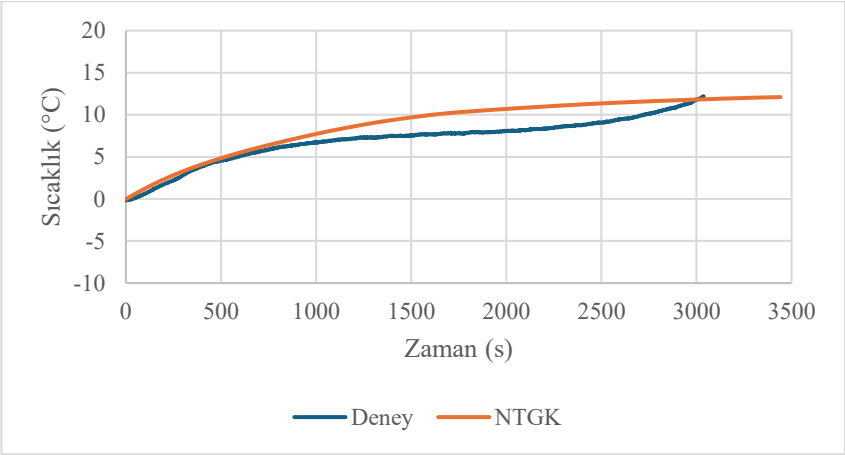
Özellikle 0 °C ortam koşulunda, düşük sıcaklığın ve yüksek akımın yarattığı yüksek iç direnç nedeniyle deşarjın başlangıcında sert bir voltaj düşüşü meydana gelmiştir. Sayısal model, bu lineer olmayan davranışı trend olarak yakalamakla birlikte, plato bölgesinde deneysel veriye kıyasla kabul edilebilir sınırlar içinde küçük sapmalar göstermiştir. Ancak ortam sıcaklığı 20 °C ve 30 °C seviyelerine ulaştığında, iyonik iletkenliğin artması ve elektrokimyasal kararlılığın sağlanmasıyla birlikte, model ve deney eğrilerinin neredeyse birebir örtüştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, kalibre edilen NTGK modelinin geniş bir çalışma aralığında batarya gerilim karakteristiğini başarıyla temsil ettiğini kanıtlamaktadır.

4.3.2. Zamana Bağlı Sıcaklık Değişiminin Doğrulanması

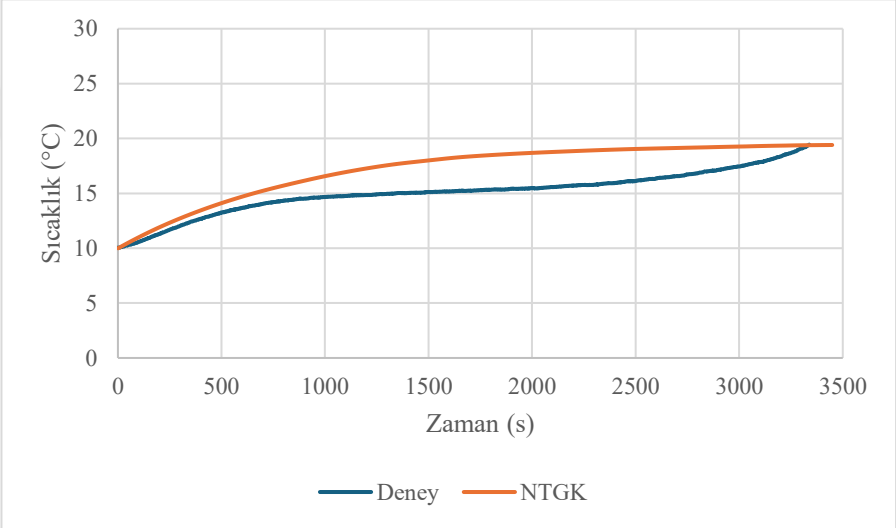
Geliştirilen NTGK modelinin ısıl tahmin yeteneğini doğrulamak amacıyla, batarya yüzey sıcaklıklarının deşarj süresi boyunca değişimi incelenmiştir. Karşılaştırmalı analizlerde; bataryanın geometrik merkezinde bulunması ve ısı transferinin en kararlı gerçekleştiği bölge olması nedeniyle, bataryanın genel ısıl karakteristiğini en iyi temsil eden 2 numaralı merkez noktası (Point 2) verileri referans alınmıştır.

0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C ortam sıcaklıklarında, 1C ve 2C deşarj hızları için bu noktadan alınan deneysel ölçümler ile sayısal modelden elde edilen sonuçların karşılaştırması aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.

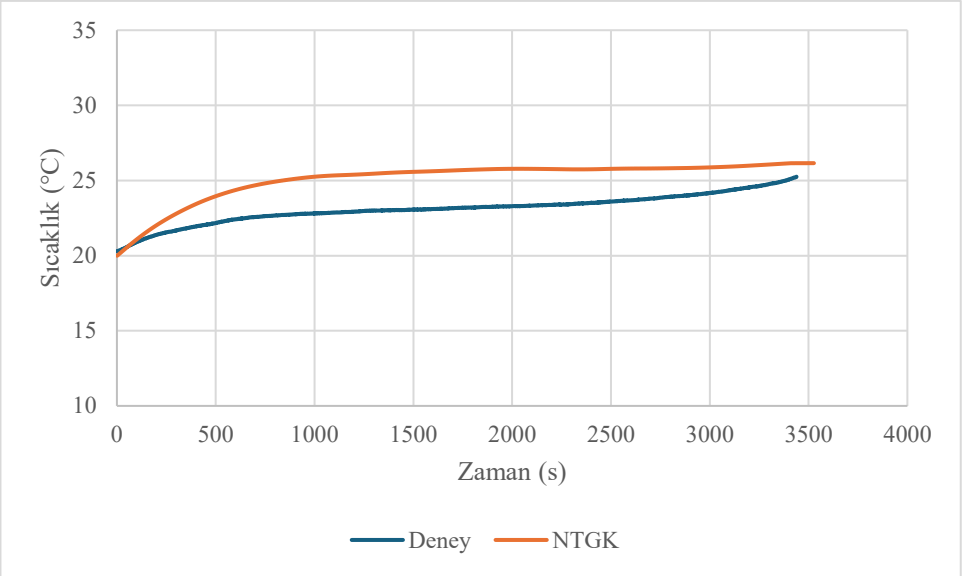
4.3.2.1. 1C Deşarj Hızında Isıl Davranış



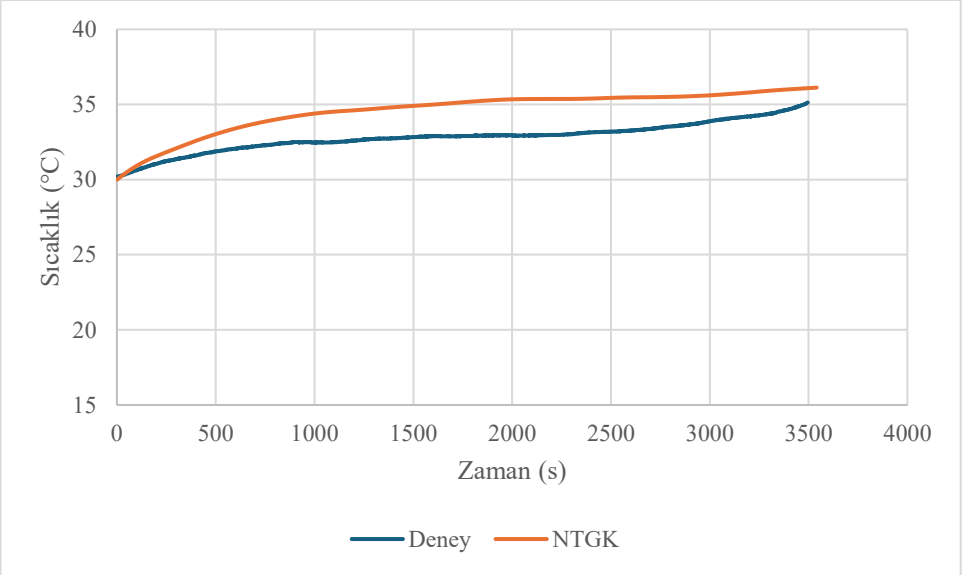
Şekil 4.23. 0 °C ortam sıcaklığında ve 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları



Şekil 4.24. 10 °C ortam sıcaklığında ve 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları



Şekil 4.25. 20 °C ortam sıcaklığında ve 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları



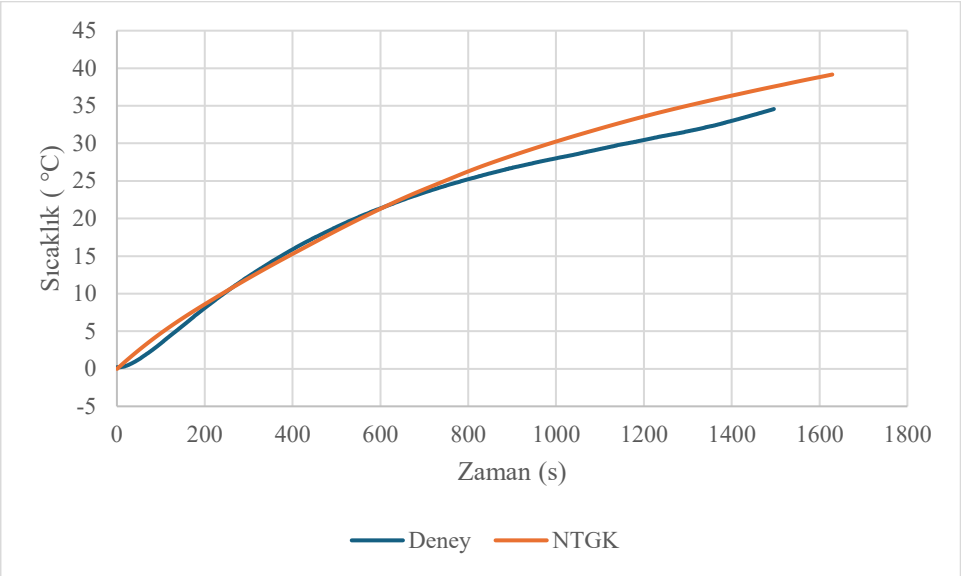
Şekil 4.26. 30 °C ortam sıcaklığında ve 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları

1C sabit deşarj akımı altında, farklı ortam sıcaklıkları için batarya merkez noktasındaki (Point 2) sıcaklık değişim profilleri Şekil 4.23 ile Şekil 4.26 arasında sunulmuştur.

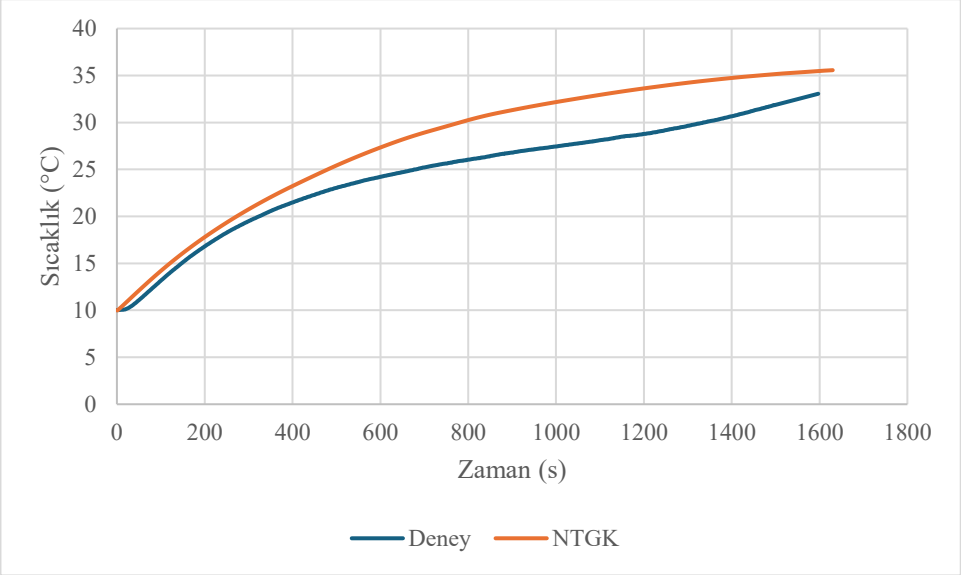
Elde edilen grafikler bütüncül olarak değerlendirildiğinde, genel trend açısından sayısal modelin deneysel verilerle uyumlu bir sıcaklık artış eğilimi sergilediği görülmektedir. Ancak sıcaklık koşullarına bağlı olarak model hassasiyetinde karakteristik farklılıklar tespit edilmiştir. Özellikle düşük sıcaklık koşullarında (Şekil 4.23 ve Şekil 4.24), deşarj sürecinin orta bölgelerinde sayısal modelin, deneysel verilere kıyasla bir miktar daha yüksek sıcaklık değerleri öngördüğü dikkati çekmektedir. Deneysel ölçümlerde batarya kütlesinin yarattığı ısıl atalet ve düşük sıcaklıktaki kompleks elektrokimyasal tepkiler nedeniyle sıcaklık artışı daha yavaş bir ivmeyle başlarken, NTGK modeli ısı üretimini daha lineer bir karakterde simüle etmiştir. Modelin sıcaklığı fiziksel gerçekleşmeden daha yüksek tahmin etmesi; termal yönetim sistemlerinin tasarımında en kötü senaryoya göre boyutlandırma yapılması ve güvenli tarafta kalma prensibiyle örtüşmesi nedeniyle güvenlik analizleri açısından kabul edilebilir bir yaklaşımdır. Ortam sıcaklığının oda sıcaklığı ve üzerine çıkarılmasıyla birlikte ise modelin tahmin doğruluğunun belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. İyonik iletkenliğin ve reaksiyon kinetiğinin daha kararlı hale geldiği bu sıcaklıklarda, sayısal model ile deneysel veriler arasındaki fark kapanmış ve eğriler neredeyse birebir örtüşen bir tutarlılık sergilemiştir.

Sonuç olarak; 1C deşarj hızında modelin, özellikle bataryanın ulaştığı son sıcaklık değerini tüm ortam koşullarında yüksek doğrulukla tahmin ettiği (±1 °C mertebesinde) ve bataryanın ısıl karakteristiğini başarıyla temsil ettiği doğrulanmıştır.

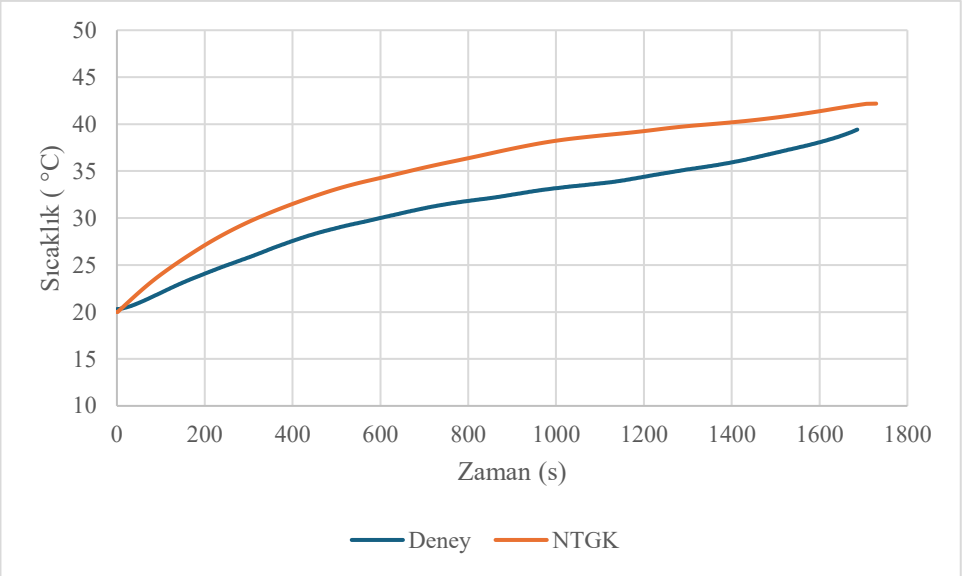
4.3.2.2. 2C Deşarj Hızında Isıl Davranış



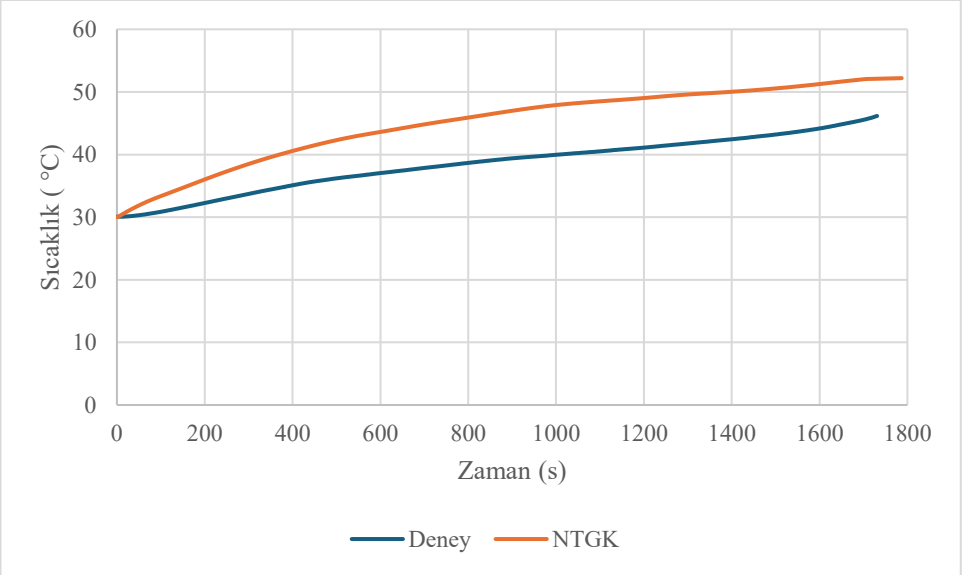
Şekil 4.27. 0 °C ortam sıcaklığında ve 2 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları



Şekil 4.28. 10 °C ortam sıcaklığında ve 2 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları



Şekil 4.29. 20 °C ortam sıcaklığında ve 2 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları



Şekil 4.30. 30 °C ortam sıcaklığında ve 2 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 2 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları

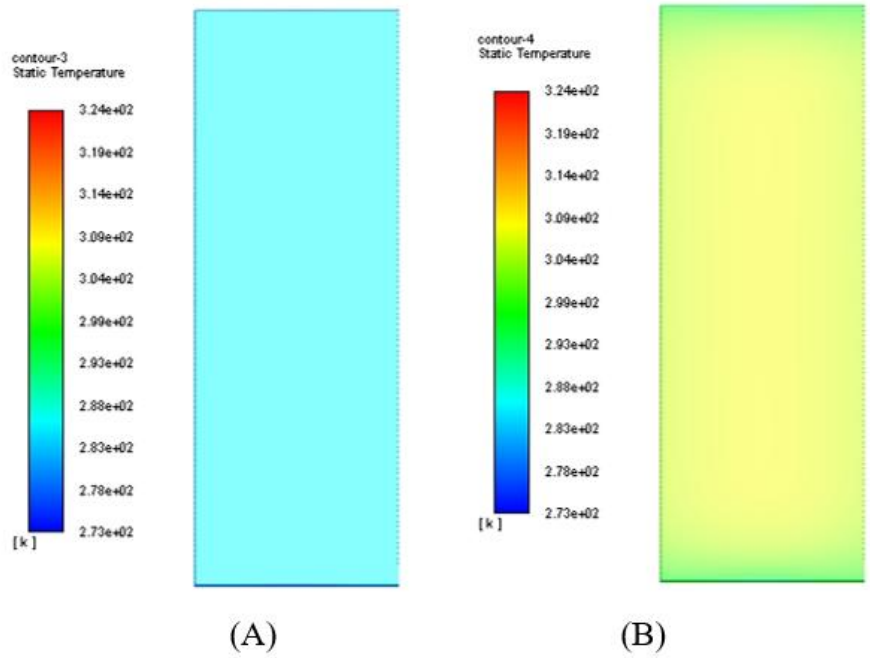
Bataryanın termal sınırlarının zorlandığı 2C sabit deşarj akımı altında; 0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C ortam koşulları için merkez noktası sıcaklık değişimleri Şekil 4.27 ile Şekil 4.30 arasında sunulmuştur.

Yüksek akım hızlarında batarya içerisindeki elektrokimyasal reaksiyonların hızlanması ve iç direnç kaynaklı Joule ısınmasının artması, sıcaklık profillerinde dik bir yükselişe neden olmaktadır. Grafikler incelendiğinde, NTGK modelinin bu hızlı sıcaklık artış trendini başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir.

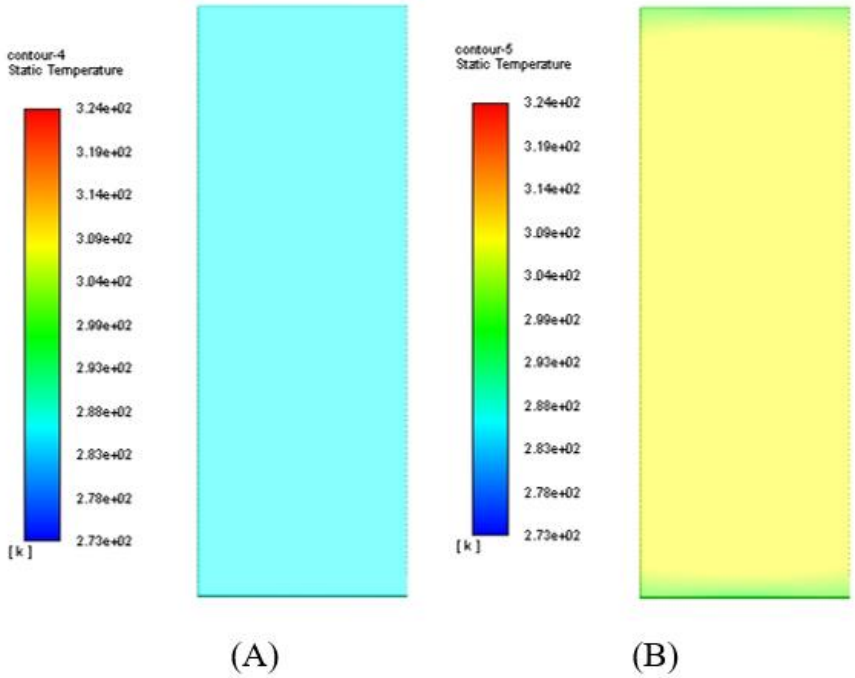
1C deşarj hızından farklı olarak, 2C koşullarında sayısal model sonuçlarının deneysel verilere kıyasla sıcaklığı sistematik olarak bir miktar daha yüksek tahmin ettiği tespit edilmiştir. Tüm ortam sıcaklıklarında gözlemlenen bu durumun temel nedeni; NTGK modelinin ısı üretim katsayılarını hesaplarken en kötü durum senaryosuna yakınsamasıdır. Modelin gerçek batarya sıcaklığından yaklaşık 3-5 °C daha yüksek değerler öngörmesi, bu model baz alınarak tasarlanacak bir batarya ısıl yönetim sisteminin gerçek operasyonda daha güvenli ve toleranslı çalışmasını garanti altına alan güvenli tasarım yaklaşımıyla örtüşmektedir. Ayrıca deney ortamındaki (iklimlendirme kabini) konvektif ısı transferinin, simülasyon sınır şartlarına kıyasla daha etkin gerçekleşmesi de deneysel eğrinin bir miktar daha aşağıda kalmasına katkıda bulunmuştur.

Sonuç olarak; sayısal ve deneysel veriler arasında mutlak değer bazında bir fark bulunsa da, karakteristik eğilim ve ısınma hızı açısından birebir uyum sağlanmıştır. Modelin sıcaklığı olduğundan yüksek tahmin etmesi, ısıl güvenlik analizleri açısından kabul edilebilir bir güvenli taraf yaklaşımı olarak değerlendirilmiş ve modelin geçerliliği doğrulanmıştır.

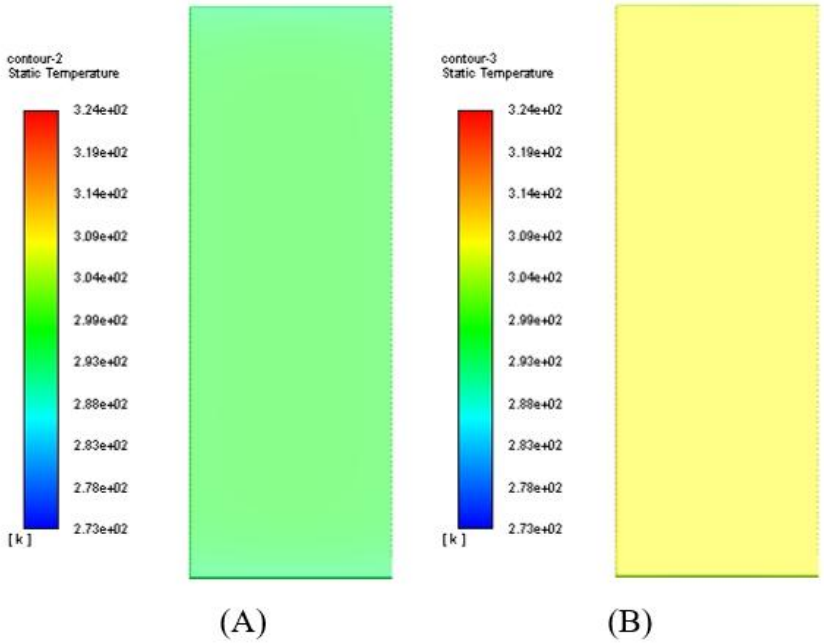
4.3.3. Yüzey Sıcaklık Dağılımlarının Karşılaştırmalı Görsel Analizi



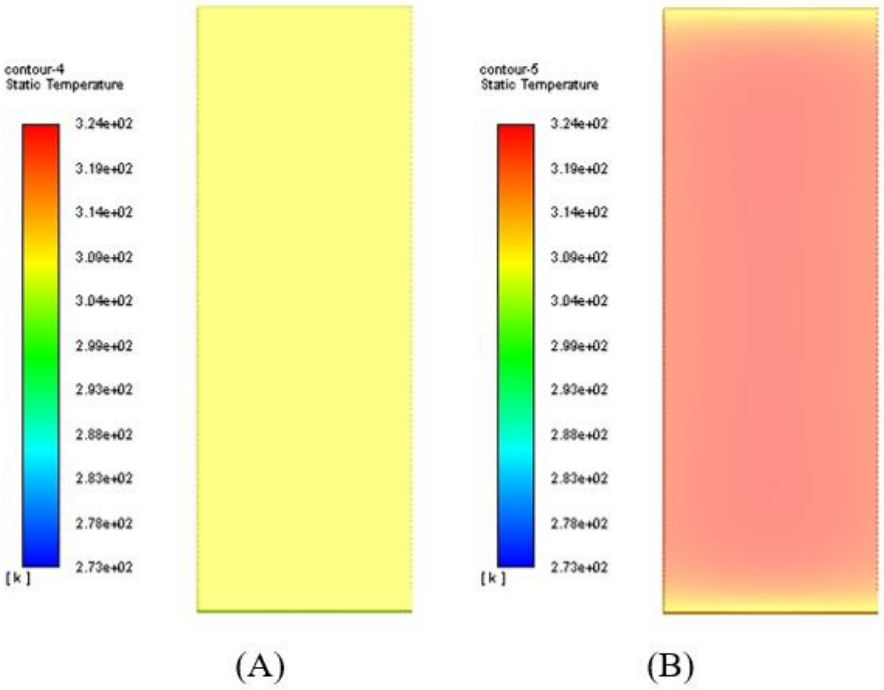
Şekil 4.31. Farklı deşarj hızlarında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılım konturları: A) 0 °C - 1C, B) 0 °C - 2C.



Şekil 4.32. Farklı deşarj hızlarında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılım konturları: A) 10 °C - 1C, B) 10 °C - 2C.



Şekil 4.33. Farklı deşarj hızlarında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılım konturları: A) 20 °C - 1C, B) 20 °C - 2C.



Şekil 4.34. Farklı deşarj hızlarında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılım konturları: A) 30 °C - 1C, B) 30 °C - 2C.

Sayısal modelden elde edilen sıcaklık dağılım konturları, batarya yüzeyindeki ısıl homojenliği ve sıcaklık gradyanlarını görselleştirmek amacıyla Şekil 4.31 – Şekil 4.34 arasında sunulmuştur.

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilen düşük sıcaklık koşulları incelendiğinde; özellikle yüksek deşarj hızlarında bataryanın merkez bölgesinde yoğunlaşan ısının, kenarlara doğru azaldığı ve belirgin bir sıcak bölge oluşturma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda artan iç direnç, ısının merkezde hapsolmasına ve yüzey genelinde daha dik bir sıcaklık gradyanı oluşmasına neden olmuştur.

Buna karşın, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te sunulan 20 °C ve 30 °C ortam koşullarına ait analizlerde; elektrokimyasal reaksiyonların daha verimli gerçekleşmesi ve iç direncin azalması sayesinde yüzey sıcaklığının çok daha homojen bir dağılım sergilediği tespit edilmiştir. Renk skalasındaki geçişlerin yumuşaklığı, batarya yüzeyinde ısıl stres yaratacak keskin sıcaklık farklarının oluşmadığını görsel olarak doğrulamaktadır.

Bu görsel analizler, sadece noktasal verilerin (Point 2 gibi) değil, batarya geometrisi üzerindeki genel ısıl davranışın da model tarafından başarıyla simüle edildiğini ve lityum iyon pillerin oda sıcaklığı ve üzerinde termal açıdan daha kararlı bir profil çizdiğini kanıtlar niteliktedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, elektrikli araç teknolojilerinin en kritik bileşenlerinden biri olan lityum-iyon kese tipi batarya hücresinin, farklı çalışma koşullarındaki elektrokimyasal ve ısıl davranışları deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Çalışma kapsamında; bataryanın geniş bir sıcaklık aralığında (0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C) ve farklı deşarj hızlarında (1C ve 2C) sergilediği performans, Ansys Fluent yazılımı ve NTGK elektrokimyasal modeli kullanılarak analiz edilmiş; elde edilen sayısal veriler, deneysel test sonuçlarıyla karşılaştırılarak modelin geçerliliği doğrulanmıştır.

Gerçekleştirilen kapsamlı analizler neticesinde, geliştirilen NTGK modelinin bataryanın voltaj düşüş karakteristiğini ve ısı üretim dinamiklerini yüksek hassasiyetle tahmin edebildiği görülmüştür. Özellikle düşük sıcaklık koşullarında (0 °C ve 10 °C) gerçekleştirilen 1C deşarj analizlerinde, deşarj sonu ulaşılan maksimum yüzey sıcaklık değerleri arasındaki farkın, deneysel verilere kıyasla 0,10 °C ve 0,04 °C gibi ihmal edilebilir seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, modelin bataryanın nihai ısıl davranışını simüle etme kabiliyetinin son derece yüksek olduğunu kanıtlamaktadır.

Isıl karakteristik açısından yapılan incelemelerde ise; en yüksek sıcaklıkların ısı transferinin geometrik olarak en kısıtlı olduğu merkez bölgesinde yoğunlaştığı, buna karşın yüksek ısıl iletkenliğe sahip akım toplayıcıların birer soğutma kanatçığı gibi davranarak ısıyı etkin bir şekilde tahliye ettiği ortaya konmuştur. Ayrıca ortam sıcaklığının 20 °C ve üzerine çıkmasıyla birlikte yüzey sıcaklık dağılımının daha homojen bir yapı sergilediği tespit edilmiştir.

Deşarj hızı 2C seviyesine çıkarılarak batarya termal sınırlarının zorlandığı senaryolarda ise; modelin sıcaklık artış trendini doğru yakalamakla birlikte, nihai sıcaklık değerini deneysel veriye kıyasla bir miktar daha yüksek tahmin ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin kötü durum senaryosuna yakınsayarak ısıl güvenlik analizlerinde güvenli tarafta kalan bir yaklaşım sergilediğini ve batarya ısıl yönetim sistemlerinin boyutlandırılmasında emniyetli bir referans oluşturduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak; bu çalışmada geliştirilen HAD modeli, lityum-iyon bataryaların performans ve ısıl risklerinin, pahalı ve zaman alıcı deneysel süreçlere gerek kalmadan yüksek doğrulukla öngörülebileceğini kanıtlamıştır.

Elde edilen bulgular ışığında, ileride yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1. Mevcut çalışma ağırlıklı olarak düşük ve orta sıcaklık koşullarına odaklanmıştır; gelecekteki çalışmalarda yüksek sıcaklık (40 °C ve üzeri) ve hızlı şarj/deşarj (3C - 4C) senaryolarının NTGK modeline dahil edilerek modelin geçerlilik sınırlarının genişletilmesi ve bataryanın termal kaçak sınırlarına yaklaşırken göstereceği davranışın incelenmesi önerilmektedir.
2. Tez bulguları, yüksek akım hızlarında batarya yüzey sıcaklığının kritik seviyelere ulaşabildiğini göstermiştir. Doğrulanan bu ısıl model üzerine; sıvı soğutma, faz değiştiren malzeme (PCM) veya daldırma tipi soğutma gibi aktif termal yönetim stratejileri entegre edilerek, farklı soğutma senaryolarının batarya performansına ve ömrüne etkileri karşılaştırmalı olarak incelenebilir.
3. Batarya yaşlanmasının iç direnç artışı ve ısı üretimi üzerindeki etkisi, uzun dönemli döngü testleri ile analiz edilmelidir. Elde edilecek verilerle NTGK model parametrelerine bir SOH katsayısı eklenerek, yaşlanmış bataryaların termal davranışını tahmin edebilen daha kapsamlı ömür modelleri geliştirilebilir.
4. Tekil hücre seviyesinde doğrulanan bu model, batarya modülü ve paketi seviyesine ölçeklendirilerek; paket içi sıcaklık homojenliği ve soğutma kanalı optimizasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir.
5. Bu tezde batarya davranışı sabit akım profilleri altında analiz edilmiştir. Ancak gerçek yol koşullarında elektrikli araçlar değişken yük profillerine maruz kalmaktadır. İleriki çalışmalarda; UDDS ve WLTP gibi standart dinamik sürüş döngülerinin modele entegre edilerek, bataryanın anlık yük değişimlerine vereceği ısıl tepkinin analiz edilmesi çalışmanın gerçekçiliğini artıracaktır.

KAYNAKLAR

ANSYS Inc, ANSYS fluent theory guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=////Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html

Bairwa, B. L., Pareek, K., & Hampannavar, S. K. (2021). Investigation on lithium ion battery equivalent circuit models for dynamic load profiles. Energy Storage, 3(2), e231. https://doi.org/10.1002/est2.231

Bandhauer, T. M., Garimella, S., & Fuller, T. F. (2011). A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. Journal of the Electrochemical Society, 158(3), R1. https://doi.org/10.1149/1.3515880

Berckmans, G., Messagie, M., Smekens, J., Omar, N., Van Mierlo, J., & Vanhaverbeke, L. (2017). Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. Energies, 10(9), 1314. https://doi.org/10.3390/en10091314

Bernardi, D., Pawlikowski, E., & Newman, J. (1985). A general energy balance for battery systems. Journal of the Electrochemical Society, 132(1), 5. https://doi.org/10.1149/1.2113792

Chan, C. C. (2002). The state of the art of electric and hybrid vehicles. Proceedings of the IEEE, 90(2), 247-275. https://doi.org/10.1109/5.989873

Chen, S. C., Wan, C. C., & Wang, Y. Y. (2005). Thermal analysis of lithium-ion batteries. Journal of Power Sources, 140(1), 111–124. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.05.064

Chio, C. P., Liao, C. M., Tsai, Y. I., Cheng, M. T., & Chou, W. C. (2014). Health risk assessment for residents exposed to atmospheric diesel exhaust particles in southern region of Taiwan. Atmospheric Environment, 85, 64–72. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.072

Choi, J. W., & Aurbach, D. (2016). Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities. Nature Reviews Materials, 1(4), 16013. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.13

Doyle, M., Fuller, T. F., & Newman, J. (1993). Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium polymer/insertion cell. Journal of the Electrochemical Society, 140(6), 1526-1533. https://doi.org/10.1149/1.2221597

Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. Energy Storage Materials, 10, 246-267. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013

Fussell, J. C., Franklin, M., Green, D. C., Gustafsson, M., Harrison, R. M., Hicks, W., ... & Zhu, Y. F. (2022). A review of road traffic-derived non-exhaust particles: emissions, physicochemical characteristics, health risks, and mitigation measures. Environmental Science & Technology, 56(11), 6813–6835. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01072

Gabbar, H. A., Othman, A. M., & Abdussami, M. R. (2021). Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards. Technologies, 9(2), 28. https://doi.org/10.3390/technologies9020028

Ghaeminezhad, N., Wang, Z., & Ouyang, Q. (2023). A review on lithium-ion battery thermal management system techniques: A control-oriented analysis. Applied Thermal Engineering, 219, 119497. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119497

Gilpin, G., Hanssen, O. J., & Czerwinski, J. (2014). Biodiesel's and advanced exhaust aftertreatment's combined effect on global warming and air pollution in EU road-freight transport. Journal of Cleaner Production, 78, 84–93. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.011

Lelie, M., Braun, T., Knips, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Zappen, H., & Sauer, D. U. (2018). Battery management system hardware concepts: An overview. Applied Sciences, 8(4), 534. https://doi.org/10.3390/app8040534

Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., ... & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. Progress in Natural Science: Materials International, 28(6), 653-666. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002

Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. Energies, 12(6), 1074. https://doi.org/10.3390/en12061074

Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. Experimental Thermal and Fluid Science, 1(1), 3–17. https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X

Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. Materials Today, 18(5), 252-264. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040

Noh, H.-J., Youn, S., Yoon, C. S., & Sun, Y.-K. (2013). Comparison of the structural and electrochemical properties of layered $Li[Ni_xCo_yMn_z]O_2$ (x= 1/3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 and 0.85) cathode material for lithium-ion batteries. Journal of Power Sources, 233, 121-130. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.01.063

Orendorff, C. P. (2012). The role of separators in lithium-ion cell safety. The Electrochemical Society Interface, 21(2), 61. https://doi.org/10.1149/2.F07122if

Padhi, A. K., Nanjundaswamy, K. S., & Goodenough, J. B. (1997). Phospho-olivines as Positive-Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries. Journal of the Electrochemical Society, 144(4), 1188. https://doi.org/10.1149/1.1837571

Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2016). Thermal modeling and validation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at different discharge rates and varying boundary conditions. Applied Thermal Engineering, 96, 190-199. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.019

Perez Estevez, M. A., Caligiuri, C., & Renzi, M. (2021). A CFD thermal analysis and validation of a Li-ion pouch cell under different temperatures conditions. E3S Web of Conferences, 238, 09003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123809003

Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F., & Chow, M.-Y. (2013). Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles. IEEE Industrial Electronics Magazine, 7(2), 4–16. https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2250351

Ramadesigan, V., Northrop, P. W., De, S., Santhanagopalan, S., Braatz, R. D., & Subramanian, V. R. (2012). Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective. Journal of the Electrochemical Society, 159(3), R31. https://doi.org/10.1149/2.018203jes

Saw, L. H., Ye, Y., & Tay, A. A. O. (2014). Electro-thermal analysis and integration issues of lithium ion battery for electric vehicles. *Applied Energy*, 131, 97-107. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.016

Schmidt, A., Oehler, D., Weber, A., Wetzel, T., & Ivers-Tiffée, E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. Electrochimica Acta, 393, 139046. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139046

Tahirağaoğlu, B. (2019). Li-ion kese tipi batarya hücresine ait ısıl ve elektriksel özelliklerin deneysel incelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erişim adresi: https://acikerisim.uludag.edu.tr/items/d5b59363-89f5-4c5e-95ea-d89546b40cdc

Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature, 414(6861), 359-367. https://doi.org/10.1038/35104644

Uzun, M. (2025). Thermal and electrical analysis of 26650 li-ion batteries in series connection using the NTGK model and virtual simulations. European Mechanical Science, 9(1), 46-58. https://doi.org/10.26701/ems.1600894

Warner, J. T. (2015). The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/book/9780128014561