LI-ION KESE TİPİ BATARYA HÜCRESİNE AİT ISIL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Berkay TAHİRAĞAOĞLU

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LI-ION KESE TİPİ BATARYA HÜCRESİNE AİT ISIL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Berkay TAHİRAĞAOĞLU
0000-0001-5131-5430

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LI-ION KESE TİPİ BATARYA HÜCRESİNE AİT ISIL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Berkay TAHİRAĞAOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Bu çalışmada, yüksek enerji yoğunluklu lityum-iyon kese tipi batarya hücresinin elektriksel ve ısıl özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Tez kapsamında kullanılan hücrenin kapasitesi 73 Ah olup hacimsel enerji yoğunluğu 642 Wh/L'dir. Hem sabit hem de WLTP sürüş çevrimi ile dinamik koşullar altında hücre davranışının tahmin edilebilmesi için ikinci dereceden eş değer devre modelini referans alan elektro-termal model geliştirilmiştir. Sürüş çevrimi başlangıcında şarj durumu tam dolu olarak kabul edilen hücrenin çevrim sonunda SOC değeri %7 azalmıştır. Bulunan değer deneysel çalışma ile karşılaştırıldığında ±%0,45'lik bir fark ile bu parametrenin tahmin edilebildiği ve modelin yüksek doğrulukla çalıştığı anlaşılmaktadır. Geliştirilen model terminal gerilimini maksimum bağıl hata %2 ve regresyon analizi sonucu R^2 değeri 0,99 olacak şekilde tespit edebilmektedir. Ayrıca, girilen taşıt özellikleri ve batarya konfigürasyonu için geliştirilen matematiksel model sürüş çevriminin akım profilini ve iç direncin dinamik değişimini de hesaplayabilmektedir. Geliştirilen modelde sonlu farklar yöntemi kullanarak oluşturulan ısıl alt model ile batarya hücresinin ürettiği ısı ve entropik terim elde edilebilmektedir. Buna göre 1 C-rate sabit akım deşarjında bataryanın ürettiği ısı 6 W olarak bulunurken WLTP sürüş çevrimi için ısı değerinin ise 0.32 W olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber hücre karakteristikleri modellenerek Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi gerçekleştirilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar da hem deneysel çalışma hem de geliştirilen model sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğu ifade edilebilir. Sonuç olarak hücrenin elektriksel ve ısıl özelliklerinin belirlenmesi için geliştirilen matematiksel model sonuçlarının deneysel sonuçları çok küçük hata oranları ile tahmin edebiliyor olması nedeniyle farklı batarya konfigürasyonlarına sahip bir elektrikli taşıta modelin uyarlanabilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli taşıtlar, kese tipi hücre, HPPC, WLTP
2024, xvi + 77 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF A LI-ION POUCH BATTERY CELL

Berkay TAHİRAĞAOĞLU

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

Supervisor: Prof Dr. Gökhan SEVİLGEN

In this study, the electrical and thermal properties of a lithium-ion pouch-type battery cell were examined through experimental investigation. The cell used in this thesis has a capacity of 73 Ah and a volumetric energy density of 642 Wh/L. An electrothermal model based on a second-order equivalent circuit model has been developed for the purpose of predicting the behaviour of the cell under dynamic conditions with WLTP driving cycles and constant current discharge. The SOC value decreased by 7% at the end of the cycle for the cell whose state of charge was considered as full at the beginning of the driving cycle. A comparison of the calculated value with the experimental study demonstrates that this parameter can be estimated with a difference of ±0.45%, indicating that the model is highly accurate. The developed model is capable of determining the terminal voltage with a maximum relative error of 2% and an R^2 value of 0.99, as a result of regression analysis. Moreover, for the specified vehicle characteristics and battery configuration, the model is capable of calculating the current profile of the driving cycle and the dynamic change of the internal resistance. In the developed model, the heat generated by the battery cell and entropic term can be obtained without the use of a measuring device such as a calorimeter, through the utilisation of a thermal sub-model created using the finite difference method. Accordingly, the heat generated by the battery at 1 C-rate constant current discharge was found to be 6 W, while the heat value for the WLTP driving cycle is 0,32 W. Furthermore, computational fluid dynamics analysis was conducted by modelling the cell characteristics. The results obtained here also demonstrated high consistency with both the experimental study and the results produced by the developed model. As a result, the results of the mathematical model developed to determine the electrical and thermal properties of the cell can predict the experimental results with minimal error rates, allowing for the model to be adapted to an electric vehicle with different battery configurations.

Key words: Electric vehicles, pouch cell, HPPC, WLTP
2024, xvi + 77 pages.

TEŞEKKÜR

Tez sürecimi finansal olarak destekleyen TÜBİTAK 1004 Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı kapsamında desteklenen 22AG001 numaralı Elektrikli Taşıtlar İçin Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu'na ve TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Ülkemize ve üniversitemize batarya teknolojileri alanında çok değerli ve donanımlı bir laboratuvar altyapısını kazandıran ve bu çalışmanın gerçekleştirilmesine büyük katkıları bulunan, desteğini her zaman hissettiğim kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN'e teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar altyapısının kullanımı konusunda destekleri için TÜBİTAK RUTE'ye ve değerli katkıları için Dr. Türev SARIKURT ile Hasan Celal MALKOÇ'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmada kullanılan batarya hücrelerini sağlayan Siro Silk Road Temiz Enerji Depolama Teknolojileri San. ve Tic. A.Ş.'ye ve Doç. Dr. Halil Sadettin HAMUT'a teşekkür ederim.

Büyük fedakarlıklarla büyüten bugünlere gelmemde çok emeği olan canım babamı rahmet ve saygıyla anıyorum. Desteklerini her zaman hissettiğim canım aileme, anneme, ağabeyime ve ablama teşekkürlerimi sunarım.

Berkay TAHİRAĞAOĞLU
09/12/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
2.1. Elektrikli Taşıtlarda Batarya 4
2.2. Lityum İyon Piller 6
2.3. Batarya Elektriksel Davranışı 10
2.4. Batarya Isıl Davranışı 12
3. MATERYAL ve YÖNTEM 15
3.1. Elektrikli Taşıtın Dinamik Modeli 15
3.2. Elektriksel Model 18
3.3. Isıl Model 23
3.4. Deneysel Çalışma 29
3.5. Dinamik Model Hesaplama Prosedürü 33
3.6. Batarya Hücresinin HAD Modeli 39
3.7. Sabit Akım Deşarj Testleri 43
4. BULGULAR 45
4.1. Sabit Akım Deşarj Deneyi Sonuçları 45
4.2. Geliştirilen Elektro-Termal Modelin Sonuçları 53
4.2.1. Elektrikli Taşıt Dinamiği Modeli Sonuçları 53
4.2.2. Elektrik Modeli Sonuçları 54
4.2.3. Isıl Model Sonuçları 60
4.3. Hücre Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modeli Sonuçları 63
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 71
KAYNAKLAR 73
ÖZGEÇMİŞ 77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	Ivme [m/s^2]
A	Alan [m^2]
A_i	Sonlu farklar yönteminde kullanılan her bir yüzeyin alanı [m^2]
A_t	Batarya hücresinin toplam yüzey alanı [m^2]
C	Kapasitans
C_{cell}	Hücrenin kapasitesi [Ah]
c_p	Özgül ısı kapasitesi [J/kg.K]
F_a	Sürüklenme kuvveti [N]
F_g	Eğim direnç kuvveti [N]
F_r	Yuvarlanma direnç kuvveti [N]
f_y	Yuvarlanma direnç katsayısı
g	Yerçekimi ivmesi [m/s^2]
h	Isı taşınım katsayısı [W/m^2.K]
I	Akım [A]
K	Rotor sabiti ve manyetik akının çarpımı [V · s]
k	Isıl iletkenlik [W/m.K]
k_a	Aerodinamik direnç katsayısı [kg/m]
L_c	Karakteristik uzunluk [m]
m	Taşıt ağırlığı [kg]
n	Sonlu farklar yönteminde kullanılan yüzeylerin sayısı
P_d	Diren kuvvetleri nedeniyle güç kaybı [W]
P_i	İvmelenme nedeniyle kazanılan güç [W]
P_m	Elektrik motoru tarafından kaybedilen güç [W]
$Q_{batarya}$	Bataryada üretilen ısı [W]
Q_{ekr}	Elektrokimyasal reaksiyon ısısı [W]
Q_p	Polarizasyon ısısı [W]
Q_{ohm}	Ohmik ısı [W]
Q_{yan}	Yan reaksiyon ısısı [W]
$\dot{q}$	Birim hacim başına ısı üretim hızı [W/m^3]
q	Üretilen toplam ısı [W]
q_{irrev}	Tersinmez ısı [W]
q_{rev}	Tersinir ısı [W]
r	Elektrik motorunun direnci [Ω]
R	Direnç
R_t	Lastik yarıçapı [m]
t	Örnekleme zamanı [s]
t_1	Kısa zaman sabiti [s]
t_2	Uzun zaman sabiti [s]
T	Yerel sıcaklık [°C]
T_{amb}	Ortam sıcaklığı [°C]
T_b	Batarya hücresinin ortalama yüzey sıcaklığı [°C]

T_{i}	Sonlu farklar yönteminde kullanılan her bir yüzeyin merkezindeki sıcaklık değeri
T_s	Yüzey sıcaklığı [°C]
T_∞	Serbest akış hızı [°C]
V	Gerilim [V]
V_{oc}	Açık devre gerilimi [V]
V_t	Terminal gerilimi [v]
v_t	Taşıt hızı [m/s]
η	Güç aktarma verimliliği [%]
θ	Yol eğim açısı [°]
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
ε	Yayma oranı
σ	Stefan boltzmann sabiti
Δ	Fark

Kısaltmalar	**Açıklama**
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
BIYS	Batarya Isıl Yönetim Sistemi
CC	Sabit Akım
CV	Sabit Gerilim
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HPPC	Hibrit Darbe Güç Karakterizasyonu
HWFET	Otoyol Yakıt Ekonomisi Sürüş Çevrimi
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
LMO	Lityum Manganez Oksit
LTO	Lityum Titanat Oksit
NC	Nikel Kadmiyum
NCA	Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NEDC	Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi
NHM	Nikel Metal Hidrür
NMC	Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
OCV	Açık Devre Gerilimi
SOC	Şarj Doluluk Oranı
SOEC	İkinci Dereceden Eş Değer Devre Modeli
WLTP	Küresel Uyumlu Hafif Araç Test Prosedürü

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Lityum-iyon batarya hücresinin çalışma prensibi	7
Şekil 2.2.	Elektrikli araçlarda kullanılan farklı kimyada batarya hücrelerinin çeşitli parametreler açısından kıyaslanması	8
Şekil 2.3.	Elektrikli araçlarda kullanılan farklı tipte batarya hücreleri. A) kese tipi, B) prizmatik, C) silindirik	9
Şekil 3.1.	WLTP sürüş çevriminin hız profili	16
Şekil 3.2.	Batarya hücresinin ikinci dereceden eş değer devre modeli	19
Şekil 3.3.	Batarya hücresinin sonlu farklar yöntemi kullanılarak yüzeylere ayrıklaştırılması	25
Şekil 3.4.	Batarya test düzeneğinin şematik gösterimi	30
Şekil 3.5.	TÜBİTAK RUTE'de yer alan batarya test düzeneği	31
Şekil 3.6.	BATEG Laboratuvarında yer alan batarya test düzeneği	31
Şekil 3.7.	Termal kamera ve ısıl çift ile toplanan sıcaklık değerinin değişimi	32
Şekil 3.8.	Çalışmada kullanılan elektrotermal modelin şematik gösterimi	34
Şekil 3.9.	HPPC akım profili	36
Şekil 3.10.	Deşarj akım darbesi neticesinde terminal gerilimindeki değişim	36
Şekil 3.11.	Şarj akım darbesi neticesinde terminal gerilimindeki değişim	37
Şekil 3.12.	Batarya hücresinin iç yapısı	40
Şekil 3.13.	Batarya hücresi mesh yapısı	41
Şekil 3.14.	Batarya hücresi mesh yapısı	42
Şekil 3.15.	Sıcaklık verisinin toplandığı hücre yüzeyindeki noktaların gösterimi	44
Şekil 4.1.	15 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması	45
Şekil 4.2.	20 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması	46
Şekil 4.3.	25 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması	46
Şekil 4.4.	30 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması	47
Şekil 4.5.	Hücrenin 0,5 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi	48
Şekil 4.6.	Hücrenin 0,75 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi	48
Şekil 4.7.	Hücrenin 1 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi.	49
Şekil 4.8.	Hücrenin 1,5 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi	49
Şekil 4.9.	Hücrenin 2 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi	50
Şekil 4.10.	15 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	51
Şekil 4.11.	20 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	51
Şekil 4.12.	25 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre	52

	yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	
Şekil 4.13.	30 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri	52
Şekil 4.14.	WLTP sürüş çevriminde bataryadan talep edilen gücün değişim eğrisi	53
Şekil 4.15.	Çeşitli SOC değerine karşılık eşdeğer devre modelini oluşturan bileşenlerin değerlerinin değişimi	54
Şekil 4.16.	Çeşitli sıcaklıklarda ve SOC değerlerinde eşdeğer iç direncin değişimi	55
Şekil 4.17.	WLTP sürüş çevrimi sırasında hücre iç direncinin zaman göre değişimi	56
Şekil 4.18.	WLTP sürüş çevrimi sırasında terminal geriliminin zamana göre değişiminin geliştirilen model ve deneysel çalışma için sonuçlarının karşılaştırılması	57
Şekil 4.19.	WLTP sürüş çevrimi için akım profili ve SOC değişimi eğrileri	59
Şekil 4.20.	WLTP sürüş çevrimi boyunca hücre yüzeyinin ortalama sıcaklığındaki değişim grafiği	60
Şekil 4.21.	WLTP sürüş çevrimi sırasında hücre yüzeyi sıcaklık dağılımını gösteren termal kamera görüntüleri. A) çevrim başlangıcı, B) çevrim sonu	61
Şekil 4.22.	WLTP sürüş çevrimi sırasında katot bölgesinde ısı üretiminin değişimi	62
Şekil 3.23.	WLTP sürüş çevrimi boyunca entropik terimdeki değişim	63
Şekil 3.24.	1 C-rate sabit akım deşarjı sıransında terminal gerilimindeki değişimin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	64
Şekil 3.25.	WLTP sürüş çevrimi boyunca terminal gerilimindeki değişimin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	64
Şekil 3.26.	1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında zamana bağlı olarak hücre yüzeyindeki sıcaklık dağılımının değişiminin deneysel çalışma ve sayısal model için karşılaştırılması	65
Şekil 3.27.	1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 1 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	67
Şekil 3.28.	1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 6 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	67
Şekil 3.29.	WLTP sürüş çevrimi sırasında zamana bağlı olarak hücre yüzeyindeki sıcaklık dağılımının değişiminin deneysel çalışma ve sayısal model için karşılaştırılması	68
Şekil 3.30.	WLTP sürüş çevrimi sırasında hücre yüzeyinde bulunan 1 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	69
Şekil 3.31.	WLTP sürüş çevrimi sırasında hücre yüzeyinde bulunan 6 noktasının sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

			Sayfa
Çizelge	2.1.	Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC) bataryanın elektrokimyasal reaksiyonları	9
Çizelge	3.1.	Elektrikli araca ait parametreler	15
Çizelge	3.2.	Çalışmada kullanılan batarya hücresinin özellikleri	20
Çizelge	3.3.	Çalışmada kullanılan batarya hücresinin termofiziksel özellikleri	26
Çizelge	3.4.	Deneysel çalışmada kullanılan cihazlara ait özellikler	33
Çizelge	3.5.	Batarya hücresini oluşturan bileşenlerin termofiziksel özellikleri	42

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlu konvansiyonel taşıtların fosil yakıt tüketimi sebebiyle sürdürülebilir olmaması, zararlı emisyonların çevreye salınımı, enerji verimliliğinin oldukça düşük olması gibi unsurlar nedeniyle dünya ve insan sağlığını etkilediği bilinen bir gerçektir. Bu zararlı etkilerinin en aza indirilmesi amacıyla sıkı regülasyonlar düzenlenmiş olup bu sebeple otomotiv endüstrisinde elektrifikasyon ve ilgili teknolojilerin dönüşümü hızla gerçekleşmiştir ve elektrikli, hidrojen yakıt pilli ve hibrit taşıt teknolojileri içeren taşıtlar araç üreticileri tarafından alternatif olarak tüketicilere sunulmuştur.

Hidrojen yakıt pilli taşıtlarda depolama, taşıma ve sürüş güvenliği açısından çalışmalar devam etmektedir. Bu süreçte hibrit ve elektrikli taşıtlar, yüksek enerji yoğunluklu batarya hücrelerinin üretilmesi, hızlı şarj teknolojisinin geliştirilmesi ve batarya ömrünün artırılması gibi nedenlerden dolayı hızla yaygınlaşmaya devam etmektedir.

Elektrikli taşıtlarda döngü ömrünün yüksek olması ve sürüş güvenliğini sağlayacak nitelikleri karşılaması sebebiyle Lityum-iyon tabanlı hücreler en çok tercih edilen batarya türü olmuştur. Enerji depolama biriminden talep edilen elektriksel, ısıl, ömür ve güvenlik isterlerine bağlı olarak Lityum Demir Fosfat (LFP), Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC), Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA) ve Lityum Titanat Oksit (LTO) gibi farklı kimyada katot malzemesine sahip hücreler geliştirilmiştir. Bir elektrikli taşıtta talep edilen gücü sağlamak amacıyla seri ve paralel bağlanan hücreler modülleri, modüller ise paketi meydana getirmektedir. Son yıllarda hücreden paket oluşturma esasına dayanan batarya taşıyıcı ve komponentleri de geliştirilmiştir.

Elektrikli araç batarya paketleri yapısal, elektriksel ve ısıl olarak optimum verimi sunacak, arıza ve kaza durumlarında güvenlik normlarını sağlayacak nitelikte kapak, çerçeve, kasa, modüller, batarya yönetim sistemi (BYS), batarya ısıl yönetim sistemi (BIYS) gibi alt komponentlerden meydana gelmektedir. Bunlardan biri olan batarya yönetim sistemi, elektriksel olarak denetim ve yönetimi sağlayacak yazılımsal ve donanımsal birimlerden oluşur ve veri toplama, haberleşme, güvenli şarj ve deşarjı

sağlama görevlerini yürütür. Batarya ısıl yönetim sistemi ise elektriksel çıkış ve çevresel etmenlere bağlı olarak batarya sistemini optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutmakla görevlidir.

Batarya paketini meydana getiren bileşenlerin optimum tasarımını gerçekleştirmek için sistemin yapı taşı olan batarya hücresinin dinamik koşullar altındaki davranışının bilinmesi gerekmektedir. Hücrenin elektriksel davranışının modellenerek hücre karakteristiklerinin ortaya çıkarılması için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlardan sabit akım şarj ve deşarj (CC) testi ile Hibrit Darbe Güç Karakterizasyonu (HPPC) testi literatürde başvurulan yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Bu testlerin gerçekleştirilmesi sonucunda terminal gerilimindeki değişimler değerlendirilerek hücrenin elektriksel davranışını temsil edecek eş değer devreyi oluşturan bileşenlerin şarj durumuna ve sıcaklığa bağlı değerleri hesaplanmaktadır. Böylece, hücrenin eş değer devresi kullanılarak bataryadan talep edilen güce bağlı olarak hücre akımı, terminal gerilimi, şarj durumu (SOC) ve hücrenin anlık eş değer iç direnci hesaplanabilmekte bu suretle batarya yönetim sisteminin doğru çalışması sağlanabilmektedir. Hücrenin elektriksel davranışının yanı sıra ısıl davranışının da incelenmesi son derece mühimdir. Zira sürüş güvenliğinin sağlanabilmesi için hücrenin çalışma sıcaklığı aralığında tutulması zaruriyken optimum verimin alınabilmesi için ideal çalışma sıcaklığı aralığında tutulması batarya yönetim sisteminin tasarımında öncelikli hedeftir. Bu tez kapsamında hücrenin ısıl davranışı, ısı iletim genel denkleminin sonlu farklar yöntemi ile ayrıklaştırılması ve deneysel çalışmadan elde edilen sıcaklık değerleri kullanılarak zamana bağlı değişken ısı üretim hızı, tersinir ve tersinmez ısı ile entropik terim değerleri hesaplanmıştır. Isıl ve elektriksel parametreler birbiri ile sıkı ilişki içerisindedir, dolayısıyla hücrenin davranışının değerlendirilebilmesi için bu iki fiziksel durum beraber incelenmelidir.

Bu tez kapsamında, lityum-iyon kese tipi batarya hücresinin ısıl ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi deneysel çalışmalar ile gerçekleştirilmiş ve buradan elde edilen sonuçlar kullanılarak farklı elektriksel bağlantı konfigürasyonuna sahip elektrikli taşıtlar ile farklı tipteki batarya hücreleri için de kullanılabilecek yenilikçi bir elektro-termal matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model kullanılarak hesaplanan hücrenin ısı üretim hızı, şarj durumu ve terminal voltajı değerlerinin deneysel verilerle ve mevcut

literatürde belirtilen verilerle yüksek bir uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Bu tezin literatüre sunacağı bir diğer yenilik ise yüksek enerji yoğunluklu ve kapasiteli lityum iyon kese tipi batarya hücresinin hem sabit akımda hem de WLTP (Küresel Uyumlu Hafif Araç Test Prosedürü) sürüş çevriminde hareket eden bir aracın dinamik koşulları altındaki davranışı ortaya konmuştur. Geliştirilen model sayesinde batarya hücresinin ısı üretim hızı ve entropik terim parametreleri kalorimetre gibi bir ölçüm cihazı kullanmadan sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak hesaplanabilmektedir. Ayrıca batarya hücresinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar kullanılarak gelecek çalışmalarda yüksek enerji yoğunluklu ve kapasiteli lityum-iyon kese tipi batarya hücresinin ısıl yönetimi için yenilikçi bir soğutucu plaka ve batarya yönetim sistemi tasarlanabilecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1.Elektrikli Taşıtlarda Batarya

Elektrikli taşıtlarda batarya sistemi, kimyasal olarak depoladıkları enerjiyi elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik enerjisine dönüştürerek taşıt hareketinin sağlanması ve yardımcı sistemlerin çalışması için aktaran birimdir (Cao vd., 2020). Bu sistem sırasıyla en küçük yapı taşı olan hücreler ve onların bir araya gelerek oluşturduğu modüllerden meydana gelmektedir.

Hücreler, ağırlıklı olarak elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu nitelikte ayrıca diğer komponentlerin de isterlerine cevap verebilecek şekilde elektriksel çıkış üretebilmek için seri ve paralel olarak birbirleriyle bağlanır. Bir hücre yapısı, araç ve üretici isterlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmekle beraber, genel anlamda batarya hücresi, kaset yapısı, sıkıştırma köpüğü ve plastik ara parçalardan meydana gelmektedir. Kaset yapısı, bataryayı optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutmaya yarayan BIYS'nin görevine paralel olarak iletimle ısı transferini sağlar ve hücrenin ısıtılması ya da soğutulması görevini yürütür. Bataryalar çalışmaları sırasında bir miktar genleşmeye uğrar ve boyutlarında değişiklik meydana gelir, bu durum montajlanarak modül haline getirilen hücrelerin dış muhafazaya baskı uygulamasına ve muhafazanın birleştirilen ara yüzeylerinin ayrılmasına ya da hücrelerin birbirlerine bir noktadan baskı uygulamasına neden olur. Bu durum, sistem güvenliğine ciddi etki eden ve büyük riskler barındıran bir olgu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durumun önüne geçmek amacıyla hücreler arasına bir sıkıştırma köpüğü yerleştirilir. Bu köpük üzerine etkiyen kuvveti absorbe ederek sıkışır ve bu riskleri ortadan kaldırır. Bununla beraber hücreler thermal runaway adı verilen ve sıcaklığın artmasına bağlı olarak daha fazla sıcaklık artışına sebep olacak enerjiyi ekzotermik reaksiyonlarla serbest bırakan ve hücrenin tamamen arızalanmasıyla sonuçlanacak bir tehlikeyle de karşı karşıyadır (Shahid ve Agelin-Chaab, 2022). Sıkıştırma köpüklerinin bir diğer görevi de yalıtım görevi görerek ısının komşu hücrelere sirayet etmesini önlemektir. Bununla beraber taşıt hareketi sırasında maruz kalınacak titreşimlerden hücreyi korumaktadır. Kaset ara parçaları, taşıtın hareketi sırasında hücre yapısı ile busbar arasındaki bağlantıyı sabit tutmakla görevlidir. Busbar ise hücrenin seri

ya da paralel bağlanması için kullanılan elektriksel olarak iletken malzemedir. Bunlara ek olarak elektrik ve ısıl parametreleri ölçen sensörler de hücre yapısı içerisinde bulunur. Belirtilen bu bileşenler bir araya gelerek modülleri oluşturmaktadır.

Modüller; en genel anlamda içerisinde hücreleri barındıran ve bu yapıyı dışarıdan etkiyecek yapısal deformasyonlara karşı koruyan birimdir. Modül bünyesinde yer alan BYS, hücre yapısı üzerinde bulunan sensörlerden elektriksel ve ısıl özellikleri toplayarak haberleşme ve denetim görevlerini yürütür. Ayrıca modül dış çerçevesinin bir yüzeyi soğutma plakası ile temas ederek hücrelerin ideal çalışma sıcaklığında tutulmasını sağlar. Modüllerin birbirine bağlanması ile batarya paketi oluşturulur.

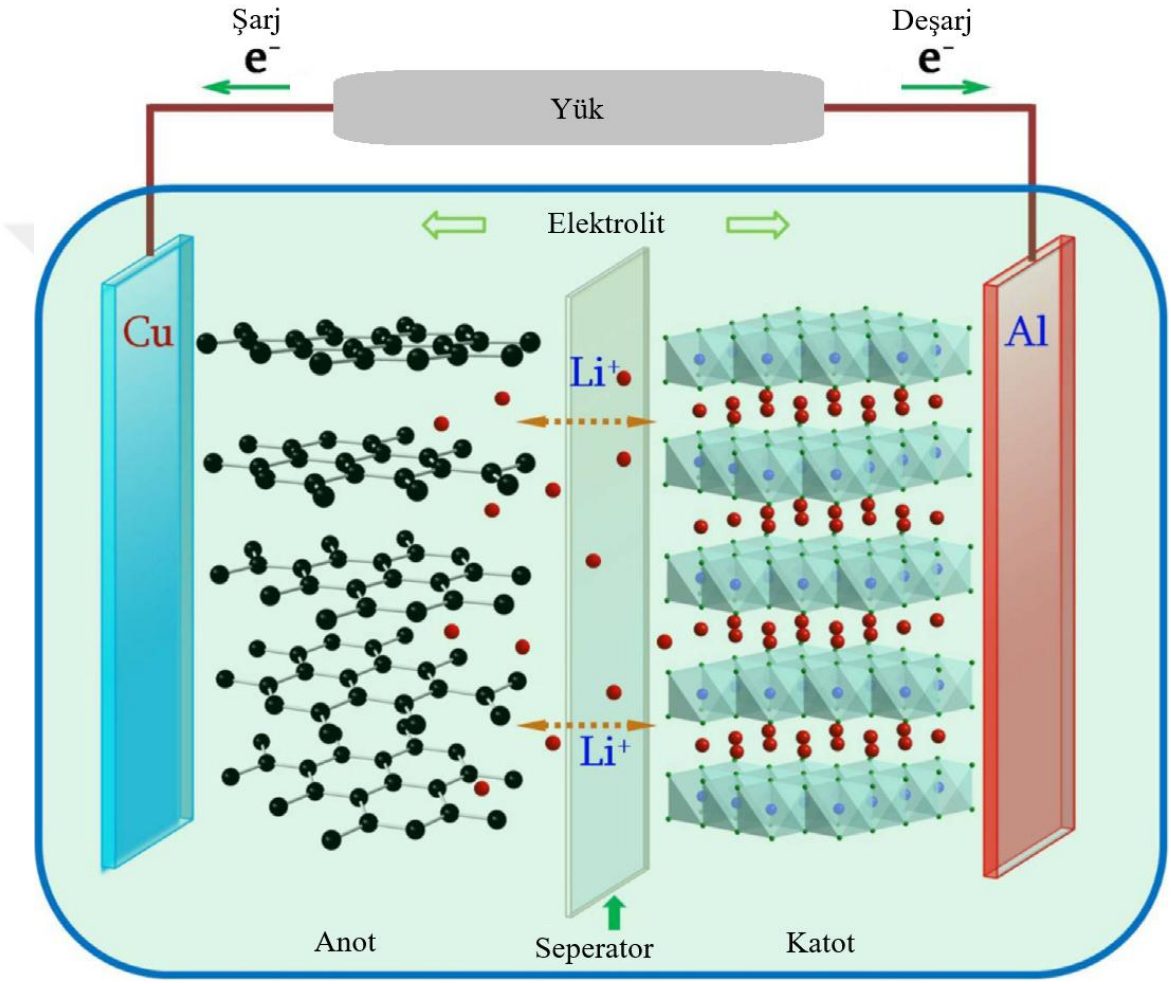
Batarya paketi; modüllerden, gövde, çerçeve, kapak, BIYS ve batarya yönetim birimlerinden meydana gelmektedir. Gövde, çerçeve ve kapak ile yapısal olarak oluşturulan paket içerisine modüller yerleştirilmektedir. Paketi meydana getiren bu bileşenler olası dış etkilere karşı hücrelere yapısal dayanım sağlamakla ve deformasyonların hücre seviyesine sirayet etmesine engel olmakla görevlidir. Batarya hücrelerinde elektriksel ve ısıl özellikler birbiri ile doğrudan bağlantılıdır. Zira terminal gerilimi ve iç direnç gibi değerler sıcaklığa göre değişkenlik gösterirken, akım ve gerilim değerlerinden ise ısı üretim hızı etkilenmektedir. Dolayısıyla, bataryalardan optimum verimin alınabilmesi için sıcaklığının kontrol edilmesi ve belirli bir aralıkta tutulması gerekmektedir. Mevcut literatürde bu aralığın 15 – 35 °C olduğu belirtilmektedir (Ma vd., 2018). BIYS; hücrenin bu çalışma aralığında çalışması için soğutma ya da ısıtma fonksiyonunu yerine getiren birimdir (Zhao, 2023). Bu görevini en düşük basınç kaybı ve maksimum ısı transferi ile gerçekleştirmesi için çeşitli kanal geometrilerinde soğutucu plakalar tasarlanmıştır. Bununla beraber BYS, elektriksel olarak denetim ve yönetimi sağlayacak yazılımsal ve donanımsal birimlerden oluşur ve veri toplama, haberleşme, güvenli şarj ve deşarjı sağlama görevlerini yürütür (Xing vd., 2011)

2.2. Lityum İyon Piller

Lityum iyon bataryalar; yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olmaları dolayısıyla araçlarda ana hedeflerden biri olan ağırlık azaltmaya olan katkıları, yüksek çalışma gerilimlerini sağlamaları ve uzun ömürlü olmaları nedeniyle elektrikli taşıtlarda yaygın olarak kullanılan enerji depolama birimleridir (Liu vd., 2022; Cao vd., 2020; Mishra vd., 2023; Al Ja'farawy vd., 2021). Lityum iyon bataryalar başlıca pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot), seperator ve elektrolitten meydana gelmektedir. Bataryalarda, elektron kaybedenin yükseltgendiği, elektron kazananın indirgendiği, elektrotlar arasında elektron transferini sağlayan indirgenme-yükseltgenme tepkimeleri gerçekleşir. Daha yüksek güç gereksinimlerinin karşılanarak taşıt menzilinin artırılmasına yönelik etkileri nedeniyle batarya hücrelerinin çalışma geriliminin artırılması öncelikli hedeflerden biri olarak yer almaktadır. Hücre gerilimi ise pozitif ve negatif elektrotun indirgenme-yükseltgenme tepkimelerinin enerjileri arasındaki enerji farkı ile belirlenir ve katot için bunun düşürülmesi, anotta yükseltilmesi sağlanarak hücre geriliminin artırılması ve dolayısıyla daha fazla enerji depolanması hedeflenmektedir (Manthiram, 2020). Katot ve anotta yüksek elektriksel iletkenliğe sahip akım toplayıcılar bulunmakta olup, genel olarak katotta alüminyum, anotta ise bakır akım toplayıcı tercih edilmektedir. Bununla beraber katot kimyası hücrenin adlandırılmasında da kullanılmaktadır. Ayrıca lityum iyon bataryalarda anot malzemesi olarak grafit sıkça tercih edilmektedir. Grafit, van der Waals kuvvetleri sayesinde altıgen bağlı karbon levhalar yığını olarak bir arada tutulurken aynı levhada bulunan iki karbon arasındaki kuvvet ile iki plaka arasındaki kuvvet farklıdır ve bu durum grafit anotun interkolasyon olarak bilinen lityumu depolama sürecini açıklar (Al Ja'farawy vd., 2021). Seperator; lityum iyonlarının şarj ve deşarj sırasında iyonik iletimini kolaylaştırırken elektriksel olarak yalıtkandır. Böylece iki elektrot arasına yerleştirilerek kısa devreyi önler. Elektrolit ise iyi bir iyon iletkeni iken elektriksel olarak da iyi bir yalıtkandır (Uyanık, 2023).

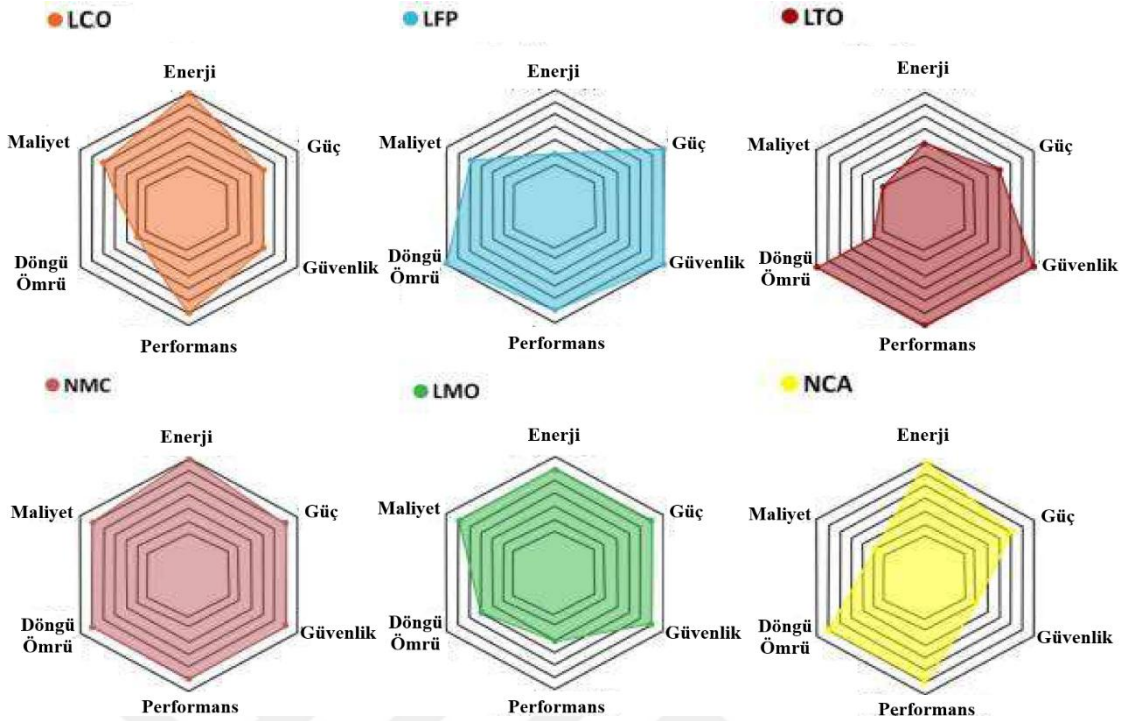
Lityum iyon bataryanın çalışma prensibini açıklayan diyagram Şekil 2.1'de sunulmuştur. Bataryanın deşarj edilmesi sırasında lityum iyonları, yüksek kimyasal potansiyelde oldukları anottan elektrolit aracılığıyla daha düşük kimyasal potansiyelde oldukları katot içerisine yerleşmek üzere difüzyon süreciyle iletilir. Ayrıca anottan koparılan elektron dış

devreden geçerek katota iletilir (Ceder vd., 2011). Meydana gelen yük transfer süreci lityum iyonunun difüzyon sürecinden daha hızlı gerçekleşir. Bataryanın şarj edilmesinde ise bu proses tam tersi şekilde işler. Bir dış potansiyelin etkisiyle lityum iyonları katottan ayrılarak ve seperatorden geçerek anottaki tabakalar arasına yerleştirilir. Ayrıca katottan kopan elektron anota transfer edilir.



Şekil 2.1. Lityum-iyon batarya hücresinin çalışma prensibi (Liu vd., 2016)

Elektrikli araçlarda her biri farklı avantaj ve dezavantajlara sahip LFP, LCO, LMO, LTO, NMC ve NCA gibi farklı kimyalarda batarya hücrelerinin kullanımına rastlamak mümkündür. Şekil 2.2'de belirtilen kimyalardaki batarya hücreleri için maliyet, enerji, güç, güvenlik, performans ve döngü ömrü açısından bir kıyaslama gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.2. Elektrikli araçlarda kullanılan farklı kimyada batarya hücrelerinin çeşitli parametreler açısından kıyaslanması (Koech vd., 2024)

Şekil 2.2 incelendiğinde NMC bataryaların tüm metriklerde başarılı performans gösterdiği açıktır dolayısıyla NMC bataryaların elektrikli taşıtlardaki kullanımının artarak devam edeceği öngörülmektedir. LFP bataryalar da yüksek döngü ömrü, güvenlik ve güç yoğunluğuna sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. LTO bataryalar ise en uygun maliyetli seçenek olarak öne çıkmaktadır. NCA bataryalar ile düşük maliyete karşılık yüksek enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve performans almak mümkündür. Dolayısıyla uygulamaya bağlı olarak ve teknik isterler doğrultusunda belirtilen metrikler göz önüne alınarak batarya hücresi seçimi yapılabilmektedir. Bir tasarım uzayında en yüksek gücün sağlanabilmesi yüksek hacimsel enerji yoğunluğuna sahip bataryaların kullanılması ile mümkündür. Bu çalışmada yüksek hacimsel enerji yoğunluğuna sahip NMC katot kimyasında batarya hücresi kullanılmıştır. Bu kimyaya sahip bataryada gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC) bataryanın elektrokimyasal reaksiyonları (Tran vd., 2021)

Elektrot	Elektrokimyasal Reaksiyonlar
Anot	$Li_nC_6 \rightleftharpoons Li_0C_6 + nLi^+ + ne^-$
Katot	$Li_{m-n}(Ni_xMn_yCo_z)O_2 + nLi^+ + ne^- \rightleftharpoons Li_m(Ni_xMn_yCo_z)O_2$
Net reaksiyon	$Li_nC_6 + Li_{m-n}(Ni_xMn_yCo_z)O_2 \rightleftharpoons Li_0C_6 + Li_m(Ni_xMn_yCo_z)O_2$

Elektrikli araçlarda prizmatik, silindirik ve kese tipi olmak üzere çeşitli tiplerde hücrelere rastlamak mümkündür. Şekil 2.3'te farklı tipteki batarya hücrelerine ait görsel yer almaktadır.



(A) **(B)** **(C)**

Şekil 2.3. Elektrikli araçlarda kullanılan farklı tipte batarya hücreleri. **A)** kese tipi, **B)** prizmatik, **C)** silindirik

Silindirik hücreler, silindir bir metal kasa içerisine birbiri üzerine sarılarak yerleştirilen elektrotlar, seperator ve elektrolitten oluşmaktadır. Bu hücrenin en önemli avantajı olarak düşük maliyete sahip olması gösterilmesine rağmen batarya paketi oluşturulurken çok sayıda kullanılması nedeniyle gruplama maliyeti fazladır ve nispeten daha kısa döngü ömrüne sahiptir. Prizmatik hücreler ise sert bir dış kasaya sahiptir ve hücre yapısı yığın halinde ya da önce sarılıp sonra düzleştirilerek bu muhafazaya yerleştirilir. Prizmatik hücreler yüksek yapısal dayanıma ve uzun döngü ömrüne sahiptir. Ancak bu bataryalar düşük enerji yoğunluğuna ve dış kasasının yarattığı ağırlık artışı gibi dezavantajlara sahiptir. Kese tipi hücreler ise elektrotlar, elektrolit ve seperator yapısının birbiri üzerine katlanarak eklenmesi ve bu yapının genel olarak polimer lamine alüminyum folyo ile

kaplanması ile oluşturulur. Bu hücrelerin en önemli avantajı olarak yüksek kütlesel ve hacimsel enerji yoğunluğuna sahip olması gösterilebilir. Ancak bu hücrelerin zayıf mekaniksel özellikleri dış bir modül yapısı ile korunmasını gerektirmektedir (Li, 2022). Bu çalışma kapsamında kese tipi batarya hücresinin elektriksel ve ısıl özellikleri araştırılacaktır.

2.3. Batarya Elektriksel Davranışı

Bataryaların taşıtlar üzerinde kullanımında sürüş güvenliğinin sağlanması öncelikli hedefler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, çalışması sırasında hücreler arasındaki gerilim dengesinin sağlanması, şarj doluluk oranının takibi ve hücrelerden çekilen veya hücreye verilen akımların denetiminin gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Araştırmacılar, çeşitli ortam koşullarında bu parametrelerin değişiminin hücrenin elektriksel özelliklerine etkisini incelemek için testler gerçekleştirmekte ve sayısal modeller geliştirmektedir.

Li (2022) düşük dış ortam sıcaklığının elektriksel parametreler üzerine etkisini araştırmak amacıyla -40, -30, -20, -10, 0 ve 20 °C sıcaklıklarda ve 10, 35, 70 ve 140 A akım aralığında testler gerçekleştirmiştir. Buna göre; belirlenen sıcaklık aralığının iki uç değeri için terminal geriliminde yaklaşık 1 V fark olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca deşarj akımının da önemli bir faktör olduğu, iki uç akım değeri için akımın artması neticesinde batarya kapasitesinin %78 oranında azaldığı belirtilmiştir.

Madani vd. (2019) 13 Ah kapasiteye sahip LTO batarya hücresi için ikinci dereceden eş değer devre modelini temel alarak hücrenin elektriksel davranışının tahmin edilmesi üzerine çalışmışlardır. Model parametrelerinin belirlenebilmesi için akım darbeleri uygulayarak gerilim değişimini incelemişlerdir. Ayrıca deneysel çalışma ile model sonuçlarını kıyaslamışlardır. Sonuçlar ikinci dereceden eş değer devre modelinin hücrenin elektriksel özelliklerini tespit etmede başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Low vd. (2013) 18 Ah kapasiteli LFP batarya hücresinin elektriksel özelliklerinin modellenebilmesi için akım darbeleri ve sabit akım deşarjı uygulayarak model

parametrelerini yüksek doğrulukla tahmin etmeyi başarmışlardır. Shamim vd. (2022) kurşun asit batarya için farklı büyüklüklerde akım darbeleri uygulayarak buna karşılık iç direnç değerlerinin değişimini tespit etmişlerdir.

Xia vd. (2017) 2200 mAh kapasiteli silindir tip batarya hücresinin şarj doluluk oranının tahmin edilmesi için ikinci dereceden eş değer devre modeline başvurmuşlardır. Geliştirdikleri modeli çeşitli sürüş çevrimleri için performans tahmininde kullanmışlar ve şarj doluluk oranını %3 hata ile tespit etmeyi başarmışlardır.

Chiang vd. (2011) elektrikli taşıtlarda kullanılan lityum iyon bataryaların açık devre gerilimi ve iç dirençlerini tahmin etmek için birinci dereceden eş değer devre modelini kullanmışlardır. Böylece model parametrelerinin hesaplanmasında daha basit bir yaklaşım kullanarak deneysel çalışmalardaki sonuçlara yakın değerler elde etmişlerdir.

Xiang vd. (2023) sodyum-iyon batarya hücresinin şarj doluluk oranını tahmin etmek için üçüncü dereceden eş değer devre modelini kullanmışlardır. Bununla beraber bu parametrenin tahmini için genişletilmiş kalman filtresi, kokusuz kalman filtresi, parçacık filtresi algoritmalarını kullanmışlardır. Buna göre kokusuz kalman filtresinin SOC tahmininde en başarılı sonucu veren algoritma olduğunu tespit etmişlerdir.

Singirikonda ve Pedda (2023) farklı sürüş çevrimlerinde aynı elektrikli taşıt özellikleri için üç farklı batarya hücresinin elektriksel ve ısıl performansını kıyaslamışlardır. LFP, NC (Nikel Kadmiyum) ve NHM (Nikel Metal Hidrür) kimyasına sahip bataryalardan LFP olanın şarj doluluk oranının düşüşü, terminal gerilimi değişimi ve batarya sıcaklık artışı durumları için en iyi sonucu verdiğini belirtmişlerdir.

Micari vd. (2022) prizmatik bir batarya hücresi için taşıt modeli kullanarak WLTP sürüş çevrimi sırasındaki akım profilini elde etmişlerdir. Batarya yaşlanma sürecinin gelişimini anlayabilmek için bu akım profilini 4184 çevrim ile tekrarlamışlar ve hücre kapasitesinin %11 azaldığını tespit etmişlerdir.

2.4. Batarya Isıl Davranışı

Batarya hücresinin performansı sıcaklık ile doğrudan bağlantılı olup sürekli olarak denetlenmesi gereken bir parametre olarak ele alınmaktadır. Akım ve gerilim gibi elektriksel özelliklerin hesaplanmasında ana unsurlardan biri olan iç direnç değerleri sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterirken hücrelerin güvenli olarak çalışması amacıyla önerilen çalışma sıcaklığı aralığı da sürüş güvenliğini temin etmek için mühimdir.

Batarya hücresi içerisinde çalışması sırasında ısı üretimi meydana gelmektedir. Üretilen ısı; elektrokimyasal reaksiyon ısısı, ohmik ısı ve polarizasyon ısısı olmak üzere üç başlık altında incelenebilmektedir (Li, 2022). Elektrokimyasal reaksiyon ısısı, lityum iyonlarının pozitif ve negatif elektrota eklenmesi ve çıkartılması neticesinde yapısı değişen anot ve katotta bir denge durumundan diğerine geçiş nedeniyle gerçekleşen entropi değişimini yansıtır (Zhang vd, 2023). Bu durum, reaksiyon enerji bariyerinin aşılması için ısının çekildiği ya da serbest bırakıldığı anlamına gelir (Li, 2022). Dolayısıyla elektrokimyasal reaksiyon ısısı tersinirdir ve endotermik ya da ekzotermik olabilmektedir. Ohmik ısı, hücreyi oluşturan bileşenlerin ohmik dirençleri nedeniyle geri dönüşümsüz olarak ürettiği ısıyı ifade etmektedir. Hücrenin terminal gerilimi ile açık devre gerilimi arasındaki fark aşırı potansiyel olarak isimlendirilmektedir. Aşırı potansiyel; ohmik kayıplar, yük aktarım aşırı potansiyelleri ve kütle aktarım sınırlamaları gibi tersinmezliklerin belirteci olup, bu değerin akım ile çarpımı polarizasyon ısısını vermektedir (Bernardi vd., 1985). Ohmik ısı ile polarizasyon ısısı, hücre ısı üretimi açısından tersinmez bileşenleri oluşturmaktadır. Hücre ısı üretiminde düşük akımlar için tersinir ısı etkili olurken, akım değerinin artmasına bağlı olarak tersinmez ısı baskın hale gelmektedir (Du vd., 2017). Ohmik ısı elektrotlarda, elektrolitte ve seperatörde ortaya çıkabilirken elektrokimyasal reaksiyon ısısı ve polarizasyon ısısı sadece elektrot bölgesinde görülür (Chen vd., 2022). Bunlara ek olarak, hücrede üretilen ısının uzaklaştırılamaması durumunda sıcaklık artışına bağlı olarak yan reaksiyon ısısı da ısı üretimine katkı sağlayacaktır. En genel halde batarya hücresinde üretilen ısı Eşitlik 2.1'deki gibi ifade edilebilmektedir (Li, 2022).

$$Q_{batarya} = Q_{ekr} + Q_p + Q_{ohm} + Q_{yan} = I\,T\left(\frac{dV_{oc}}{dT}\right) + Q_p + Q_{ohm} + Q_{yan} \quad (2.1)$$

Burada $Q_{batarya}$ bataryada üretilen ısıyı ifade ederken, Q_{ekr}, Q_p, Q_{ohm} ve Q_{yan} sırasıyla elektrokimyasal reaksiyon ısısını, polarizasyon ısısını, ohmik ısıyı ve yan reaksiyon ısısını belirtmektedir. Eşitliğin diğer tarafında ise tersinir ısıyı temsil eden elektrokimyasal reaksiyon ısısının matematiksel gösterimi yer almaktadır. Burada I akımı, T sıcaklığı ve $\frac{dV_{oc}}{dT}$ entropik terimi göstermektedir. Entropik terim, açık devre geriliminin sıcaklığa bağlı değişiminin hızıdır ve negatif değerleri ekzotermik reaksiyonları, pozitif değerleri ise endotermik reaksiyonları belirtir.

Hücre ısı üretimi ve sıcaklığının tespit edilmesi BIYS'nin geliştirilmesinde önemli rol almaktadır. Ayrıca thermal runaway olarak bilinen ve paket içerisinde yangın ile sonuçlanarak sürüş güvenliğini tehdit eden sürecin önüne geçmek için hücrenin ısıl davranışının kestirimi ve etkili bir soğutma-ısıtma sisteminin tasarımı elzemdir. Bu kapsamda mevcut literatürde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Zhang vd. (2003) düşük dış ortam koşullarının lityum-iyon batarya üzerine etkilerini araştırmışlardır. Buna göre -40°C ile 20 °C aralığındaki her on derecelik sıcaklık artışı için kapasite ve gerilim değişimini incelemişler ve en düşük sıcaklık için bağıl kapasitenin 0,3'e gerilediğini tespit etmişlerdir.

Wang vd. (2013) hücre iç sıcaklık değişimini tahmin etmek için elektrot reaksiyonları ve Joule ısısı ile ısı transfer mekanizmaları olan taşınım ve iletimi dahil ettikleri ısıl-elektrokimyasal model geliştirmişlerdir. Model sonuçlarını deneysel çalışma ile kıyaslayarak doğrulamışlardır.

Vashisht vd. (2023) 20 Ah kapasiteli $LiFePO_4$ kese tipi bataryanın ısıl ve elektriksel özelliklerini tahmin etmek üzere iki boyutlu elektro-termal model geliştirmişlerdir. Sonlu farklar yöntemi kullanarak ve ısı üretiminden yola çıkarak hücre ortalama sıcaklık değerinin değişimini modellemişlerdir.

Li (2022) sabit akım deşarjı sırasında deşarj voltajının batarya gücünü belirlediğine dikkat çekmiş sıcaklığın aşırı düşmesine bağlı olarak batarya gücünün de azalacağını belirtmiştir.

Bulut (2022) iki farklı batarya modülü için sıvı soğutmalı optimum soğutucu plaka tasarımı gerçekleştirmiştir. Serpantin kanallı plaka geometrisi için paralel kanal sayısı ve soğutucu akışkan kütlesel debisinin soğutma performansına etkisini araştırmak üzere hesaplamalı akışkan dinamiği modeline başvurmuştur. Ayrıca dört farklı genetik algoritma yöntemi kullanarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır.

Zhao vd. (2023) elektrikli taşıtlar için sıvı soğutmalı batarya ısıl yönetim sistemi geliştirilmesi ve tasarımın optimize edilmesine yönelik olarak incelemelerde bulunmuşlardır.

Hwang vd. (2024) batarya hücresinde ısı üretiminin meydana geliş şeklini ele almış ve elektrikli taşıtlar için geliştirilen BIYS'leri kıyaslamışlardır. Buna göre hava soğutma, sıvı soğutma ve faz değiştiren malzeme tabanlı soğutma sistemlerinin güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymuşlardır. Hava soğutmalı batarya ısıl yönetim sistemlerinin kısa mesafeli sürüşlerde kullanıma uygun olduğunu, uzun mesafeli sürüşlerde sıvı soğutmalı BIYS tercih edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bir elektrikli taşıtın batarya paketi; modüller, gövde, çerçeve, kapak, BYS ve BIYS gibi birçok alt bileşenden oluşmaktadır. Modüller; batarya hücrelerinden, hücrelerin seri ve paralel bağlantısının yapılmasını sağlayan busbarlardan, hücreleri diğer hücrenin sıcaklığından izole eden, modülün oluşturulması sırasında hücrelerin sıkıştırılmasının güvenle gerçekleşmesini sağlayan ayrıca darbe ve titreşimlere karşı koruma görevi yürüten sıkıştırma köpüğünden, hücrenin soğutulması için soğutucu plakadan iletimle ısı transferini sağlayan kaset yapısından ve kaset yapısı ile busbarın bir arada kalmasını sağlayan ara parçalardan meydana gelmektedir. Bu tez kapsamında, geliştirilen modelde montajlanmış hücreyi meydana getiren bu bileşenler ihmal edilmiş ve sadece birbiri ile elektriksel olarak bağlı hücrelerden meydana gelen bir sistem olduğu kabul edilmiştir. Böylece hesaplama zamanı açısından bir avantaj elde edilmiş olup ayrıca bu varsayımın ideal koşullara karşılık gelmesi sayesinde gerçek koşullarla kıyaslanabilmesi sağlanmıştır. Sırasıyla (i) elektrikli taşıtın dinamik modeli, (ii) elektriksel model, (iii) ısıl model olarak isimlendirilen üç alt modelden oluşan elektrikli taşıtlar için elektro-termal model Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen batarya karakteristikleri ve toplanan veriler modelde ilgili bloklara gömülmüştür. Ayrıca batarya hücresinin elektrokimyasal olarak modellenmesi için Ansys Fluent yazılımı da kullanılmış ve hücrenin davranışı geliştirilen model ve deneysel çalışmalarla kıyaslanmıştır.

3.1. Elektrikli Taşıtın Dinamik Modeli

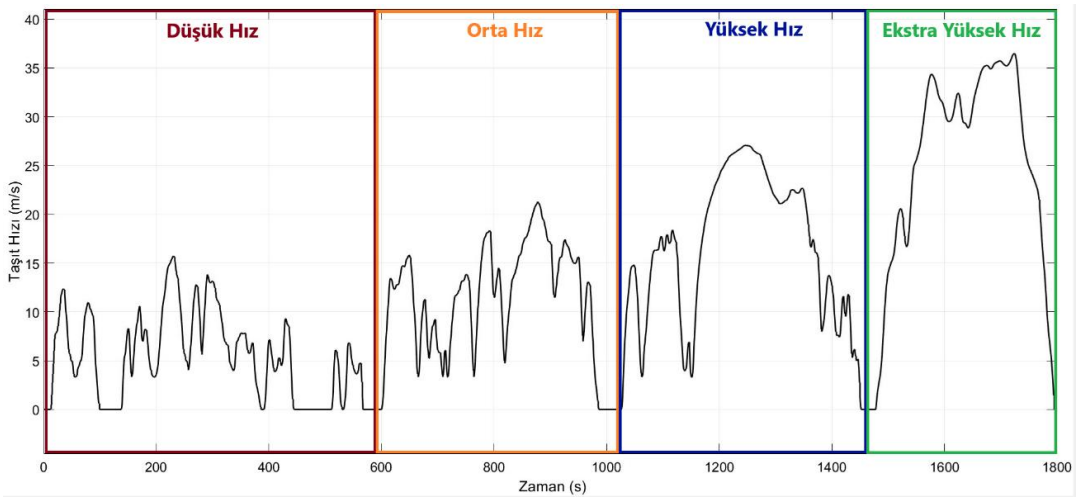
Değişken dış ortam sıcaklığı ve yol koşullarında batarya elektriksel ve ısıl özelliklerinin değişiminin modellenebilmesi için elektrikli araç parametreleri mevcut literatürden Wu vd. (2015) çalışmasındakine benzer olarak seçilmiş ve Çizelge 3.1.'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Elektrikli araca ait parametreler (Wu vd., 2015)

Parametreler	**Değerler**
Taşıt ağırlığı $[m]$	1266 [kg]
Batarya paketi kapasitesi	88 [kWh]
Lastik yarıçapı $[R_t]$	0,5 [m]

Güç aktarma verimliliği $[\eta]$	95 %
Yuvarlanma direnç katsayısı $[f_y]$	0,006
Aerodinamik direnç katsayısı $[k_a]$	1,3 [kg/m]
Motor direnci $[r]$	0,11 [Ω]
Rotor sabiti ve manyetik akının çarpımı	10,08 [V· s]

Yol koşullarının ve sürüş özelliklerinin bir standart çerçevesinde düzenleniyor olması mevcut çalışmanın tekrar edilebilirliği ve diğer çalışmalarla kıyaslanabilmesi açısından önemlidir. Bu kapsamda taşıt testlerinde kullanılan ve egzoz emisyonlarının ve taşıt menzillerinin belirlenmesinde başvurulan Küresel Uyumlu Hafif Araç Test Prosedürü (WLTP), Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC), Otoyol Yakıt Ekonomisi Sürüş Programı (HWFET) gibi çok sayıda küresel ve yerel bazda sürüş çevrimi mevcuttur. Bunlar arasında WLTP hız profili diğerlerine göre yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından gerçek araç performansına daha yakın sonuçlar sunmakta, ayrıca Şekil 3.1.'de belirtildiği üzere dört farklı sürüş karakteristiğini temsil etmektedir. Hız profilinin ilk fazında meskûn mahalde ya da okul bölgelerindeki gibi düşük hızda sürüş temsil edilirken sonrasında sırasıyla şehir içi sürüşü temsil eden ikinci faz, şehirler arası sürüş profilini belirten üçüncü faz ve son olarak otoyol sürüşü karakteristiğine uygun dördüncü faz bulunmaktadır. Bu çalışmada dinamik koşulların araştırılmasında taşıtın WLTP sürüş çevriminde hareket ettiği kabul edilmiştir böylece elektriksel ve ısıl özelliklerin değişimi sırasında bu çevrimin temsil ettiği dört farklı sürüş profilinin etkileri de ortaya konulabilecektir.



Şekil 3.1. WLTP sürüş çevriminin hız profili

Elektrikli taşıt dinamiği modelinin amacı araç özelliklerine, ortam şartlarına ve sürüş çevrimine bağlı olarak bataryadan talep edilen gücün hesaplanmasıdır. Buna göre temel taşıt dinamiği formülleri kullanılarak teorik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Toplam çekiş kuvveti Eşitlik 3.1. kullanılarak hesaplanabilmektedir (Wu vd., 2015).

$$\vec{F} = \vec{F_r} + \overrightarrow{F_a} + \overrightarrow{F_g} + m\vec{a} \tag{3.1}$$

Burada; $\vec{F_r}$, $\overrightarrow{F_a}$ ve $\overrightarrow{F_g}$ sırasıyla taşıta etkiyen direnç kuvvetleri olan yuvarlanma, aerodinamik ve eğim direnç kuvvetini temsil etmektedir. Bu kuvvetler Eşitlik 3.2 – 3.4'te belirtilen matematiksel ifadeler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\overrightarrow{F_r} = f_y\, m\, \vec{g} \tag{3.2}$$

$$\overrightarrow{F_a} = k_a\, \overrightarrow{v_t^2} \tag{3.3}$$

$$\vec{F_g} = m\, \vec{g}\, \sin\theta \tag{3.4}$$

Eşitlik 3.2.'de f_y yuvarlanma direnç katsayısını, m taşıt ağırlığını ve g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Eşitlik 3.3.'de k_a havanın yoğunluğu, sürükleme katsayısı ve taşıtın akış yönüne dik yani ön kesit alanına bağlı olarak tanımlanan aerodinamik direnç katsayısını ifade ederken v_t taşıtın anlık hız değerini temsil etmektedir. Eşitlik 3.4.'te ise yolun eğim açısı θ ile belirtilmiştir. Eğim açısının belirlenmesi için WLTP sürüş çevriminin mesafesine, süresine ve temsil ettiği dört hız profiline uygun rota Google Earth Pro yazılımı kullanılarak belirlenmiş ve bu rotanın ortalama eğimi olan %1,6 değeri hesaplamalarda kullanılmıştır.

Hareket halindeki elektrikli taşıtın batarya paketinden talep edilen güç Eşitlik 3.5 ile hesaplanmaktadır.

$$P = P_m + P_d + P_i \tag{3.5}$$

Burada; P_m motor güç kayıplarını, P_d araç seyir halindeyken meydana gelen direnç kuvvetlerinden kaynaklanan güç kayıplarını, P_i ise ivmelenme ya da yavaşlama nedeniyle kazanılan gücü ifade etmektedir. Belirtilen güç ifadelerinin her biri ise Eşitlik 3.6. – 3.8. kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$P_m = \frac{r}{K^2}\left(m\vec{a} + k_a\overrightarrow{v_t^2} + f_y m\vec{g} + m\vec{g}\sin\theta\right)^2 \tag{3.6}$$

$$P_d = \overrightarrow{v_t}\left(k_a\overrightarrow{v_t^2} + f_y m\vec{g} + m\vec{g}\sin\theta\right) \tag{3.7}$$

$$P_i = m\overrightarrow{a}\overrightarrow{v_t} \tag{3.8}$$

Bu denklemlerde r ve K sırasıyla lastik yarıçapını ve rotor sabiti ile manyetik akının çarpımını ifade ederken a ise taşıt ivmesini belirtmektedir.

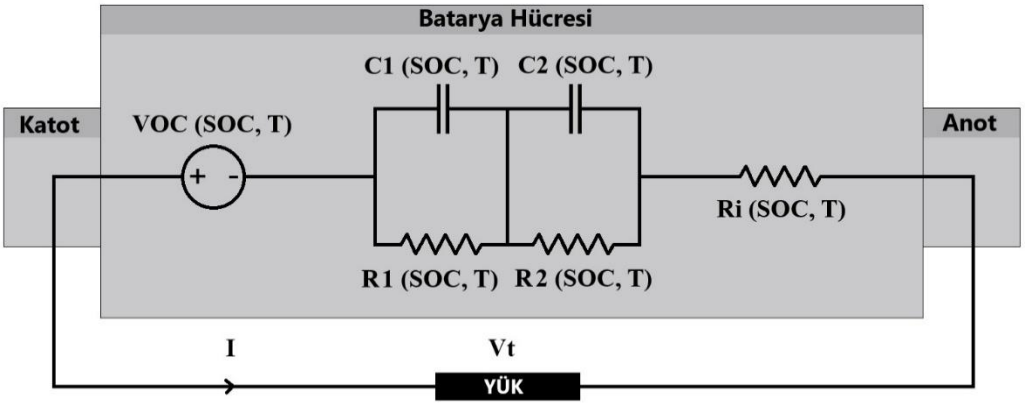
Eşitlik 3.6. – 3.8.'de belirtilen güç ifadeleri Eşitlik 3.5.'te yerine konularak en genel halde batarya paketinden talep edilen anlık güç ifadesi Eşitlik 3.9.'da olduğu gibi elde edilmektedir.

$$P = \frac{r}{K^2}\left(m\vec{a} + k_a\overrightarrow{v_t^2} + f_y m\vec{g} + m\vec{g}\sin\theta\right)^2 + \overrightarrow{v_t}\left(k_a\overrightarrow{v_t^2} + f_y m\vec{g} + m\vec{g}\sin\theta\right) + m\vec{a}\overrightarrow{v_t} \tag{3.9}$$

3.2. Elektriksel Model

Elektriksel model bloğu ile WLTP sürüş çevrimi hız profiline uygun olarak hareket eden taşıtın bataryasından talep edilen güce, dış ortam koşullarına ve hücre sıcaklığına bağlı olarak elektriksel parametreler olan akım, terminal gerilimi, SOC değeri ve eş değer iç direncin hesaplanması gerçekleştirilmektedir. Hücrenin elektriksel modelinin kurulmasında mevcut literatürde çeşitli yaklaşımlar bulunmakta olup eş değer devre modeli (ECM) yöntemi bunlardan biridir. ECM modeli, bataryanın direnç ve kapasite elemanlarından oluşan bir elektrik devresi ile davranışının modellenmesini esas alır. Bu

devrede paralel bağlı direnç ve kapasite elemanlarından oluşan RC dalının sayısına bağlı olarak eş değer devre modelinin mertebesi isimlendirilmektedir. Yüksek mertebeli ECM modeli daha doğru sonuçlar sunarken devreyi oluşturan bileşenlerin tanımlanması daha kompleks hale gelmektedir (Bairwa vd., 2020). Dolayısıyla bu çalışmada düşük mertebedekine göre daha doğru sonuç veren, yüksek mertebedekine göre devre bileşenlerinin daha basit bir şekilde tanımlandığı ve Şekil 3.2.'de şematik olarak gösterilen ikinci dereceden eş değer devre modeli (SOEC) kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Batarya hücresinin ikinci dereceden eş değer devre modeli

Şekil 3.2.'de görüleceği üzere bu model, bir güç kaynağı, bir direnç ve seri olarak bağlanmış iki RC devresinden oluşmaktadır. Burada R_i ile temsil edilen ohmik direnç olup akım toplayıcı ile SEI filmi arasındaki arayüzeydeki direnci ifade etmektedir. Ohmik direnç, hücre gerilimindeki ani azalış ve artışların sebebidir ve bataryanın eş değer iç direncinde dominant etkiye sahip parametredir (Tahirağaoğlu vd., 2024). Devreyi oluşturan $R_1 - C_1$ dalı yük transfer sürecini, $R_2 - C_2$ dalı ise difüzyon sürecini temsil etmektedir. Dai vd. (2016) frekansın düşük olduğu akımlarda difüzyon sürecinin empedansı daha fazla etkilediğini tespit etmişlerdir bu da devredeki RC dallarının farklı zaman dinamiklerine karşılık geldiği anlamını taşımaktadır. Yük transferi birkaç saniyede gerçekleşirken difüzyon süreci daha uzun sürmektedir. Bu da $R_1 - C_1$ dalının hızlı dinamikleri, $R_2 - C_2$ dalının ise yavaş dinamikleri temsil ettiğini göstermektedir. Şekil 3.2.'de şematik olarak gösterilen ikinci dereceden eş değer devre modelini oluşturan her bir bileşenin değeri detayları Bölüm 3.5'te verilen HPPC testi gerçekleştirilerek

hesaplanmaktadır. Ancak bu parametrelerin değerleri sıcaklığa ve SOC değerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışmada HPPC testi dış ortam sıcaklığının 15, 20, 25 ve 30 °C durumları için gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında yüksek enerji yoğunluklu ve kapasiteli lityum-iyon kese tipi batarya hücresinin WLTP gibi dinamik bir sürüş profili koşulu altındaki elektriksel davranışı sayısal model kurularak araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan batarya hücresinin özellikleri Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan batarya hücresinin özellikleri

Parametreler	**Değerler**
Hücre tipi	Kese tipi
Boyutlar	294 x 103 x 14,5 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

Çizelge 3.2.'de belirtilen hücre kullanılarak çeşitli sıcaklıklarda HPPC testi gerçekleştirilmiş ve SOC değerlerine karşılık eş değer devre bileşenlerinin deşarj ve şarj durumları için değerleri okunabilir tablo formatında model bloklarına aktarılmıştır. Hücrenin başlangıç şarj durumunun %100 olduğu kabul edilmiştir. Şarj durumunun zamana bağlı değişimi Eşitlik 3.10 aracılığıyla hesaplanmaktadır (Li vd., 2017)

$$SOC = SOC(0) \mp \frac{1}{C_{cell}} \int_0^t i_b(t)dt \tag{3.10}$$

Burada $SOC(0)$ ve C_{cell} sırasıyla hücrenin başlangıçtaki şarj değerini ve kapasitesini belirtmektedir. Hücrenin kapasitesi ise sıcaklık ve akım parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple 15, 20, 25 ve 30 °C ortam koşullarında ve C/3, C/2, 1C, 1,5C ve 2 C-rate akımlarında hücre testleri gerçekleştirilmiş ve kapasite değeri

her bir koşul için hesaplanarak okunabilir tablo formatında modele aktarılmıştır. Buradaki C-rate ifadesi bataryanın deşarj olma hızının bir ölçüsüdür ve nominal kapasiteye göre şarj ya da deşarj akımı olarak tanımlanmaktadır (Tahirağaoğlu vd., 2024). Bir diğer deyişle 1 C-rate çalışmada kullanılan hücre için 73 A anlamına gelmektedir. Hücre akımı ve sıcaklığına bağlı olarak deneysel olarak elde edilen kapasite değerlerinin yer aldığı okunabilir tablo formatındaki blok kullanılarak hücre kapasitesi tespit edilmekte ve SOC değerinin hesaplama bloğuna bu bilgi gönderilmektedir. Blok içerisine aktarılan deneysel verilerde sıcaklık ve akımın ara değerlerine karşılık gelen SOC bilgisi interpolasyon ya da ekstrapolasyon yöntemleri uygulanarak blok tarafından hesaplanmaktadır.

Dinamik sürüş koşulları altında taşıt hareketini sağlayabilmek ve yol koşullarına bağlı olarak ivmelenmeyi gerçekleştirebilmek için bataryadan akım çekilebildiği gibi, rejeneratif frenleme sebebiyle batarya şarj da edilebilmektedir. Dolayısıyla WLTP sürüş çevrimindeki hızlanmalar ve yavaşlamalar nedeniyle hücrede çevrim boyunca şarj ve deşarj süreçleri gerçekleşmektedir. Taşıt dinamiği bloğu aracılığıyla bataryadan talep edilen güç; hız profiline, araç özellikleri ve sürüş koşullarına bağlı olarak hesaplanmakta ve elektrik modeline aktarılmaktadır. Hücrenin eş değer direnci ve açık devre gerilimi değerleri ise HPPC testi sonucunda elde edilen deneysel verilerin tablo halinde yer aldığı bloklar tarafından girişlerine uygun şekilde hesaplanmaktadır. Bataryadan talep edilen güç sıfırdan büyük ise hücre deşarj olmaktadır ve deşarj akımı Eşitlik 3.11'deki gibi hesaplanmaktadır (Amini vd., 2021)

$$I_{dis} = \frac{V_{oc} - \sqrt{{V_{oc}}^2 - 4R_{eq}P_{dis}(t)}}{2R_{eq}} \tag{3.11}$$

Eğer bataryadan talep edilen güç negatif değerler alıyorsa hücre şarj olmaktadır ve şarj akımı Eşitlik 3.12.'de olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$I_{chg} = \frac{-V_{oc} + \sqrt{{V_{oc}}^2 + 4R_{eq}P_{chg}(t)}}{2R_{eq}} \tag{3.12}$$

Burada V_{oc} açık devre gerilimini, R_{eq} eş değer direnci, P_{dis} ve P_{chg} ise sırasıyla deşarj ve şarj koşullarındaki bataryadan talep edilen gücü ifade etmektedir.

Elektrikli taşıtların enerji depolama sistemlerinin en küçük yapı taşı hücrelerdir. Belirlenen güç ihtiyacını karşılayacak şekilde seçilen maliyet, güvenlik, tedarik ve diğer koşulların oluşturduğu isterleri karşılayacak nitelikte kimyaya, elektriksel ve yapısal özelliklere sahip olan hücre, seri ve paralel bağlanarak modülleri oluşturur. Modüller hücreleri yapısal deformasyonlara karşı korurken, BIYS aracılığıyla ideal çalışma sıcaklığında tutulmasını sağlamakta ve BYS ile denetim ve veri toplama görevleri yürütmektedir. Modüller de bir araya gelerek batarya paketini oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında WLTP sürüş çevirimi koşulu altında dinamik davranışın incelenmesi hücre seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Yani akım ve gerilim değerleri hesaplanırken hücre ve modül konfigürasyonları göz önüne alınarak paket seviyesinden hücre düzeyine inilmektedir.

Elektriksel model kullanarak hesaplanan bir diğer önemli parametre terminal gerilimidir. Terminal gerilimi, elektrotlar arasındaki potansiyel fark olarak tanımlanmaktadır. SOEC modeli kullanarak hücrenin terminal gerilimi Eşitlik 3.13.'teki gibi hesaplanmaktadır (Thanagasundram vd., 2012).

$$V_t(t) = V_{oc} + I(t)R_i + I(t)R_1\left(1 - e^{-\frac{t}{t_1}}\right) + I(t)R_2(1 - e^{-\frac{t}{t_2}}) \tag{3.13}$$

Burada yer alan iç direnç terimleri ikinci dereceden devre modeli kullanılarak sıcaklık ve SOC değerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.13'te yer alan t örnekleme zaman adımını, t_1 hızlı dinamikleri temsil eden kısa zaman sabitini, t_2 yavaş dinamikleri temsil

eden uzun zaman sabitini ifade etmektedir. Bu zaman sabitlerinin hesaplaması Bölüm 3.5.'te detaylıca aktarılmıştır.

Bu bölümde verilen denklemler ve zamana bağlı olarak deneysel veriler kullanılarak bir boyutlu dinamik elektriksel model geliştirilmiştir. Bu modelin çıktıları olan direnç değerleri, akım, gerilim ve SOC değeri ısıl model hesaplamalarında kullanılmak üzere bu bloğa aktarılmaktadır.

3.3. Isıl Model

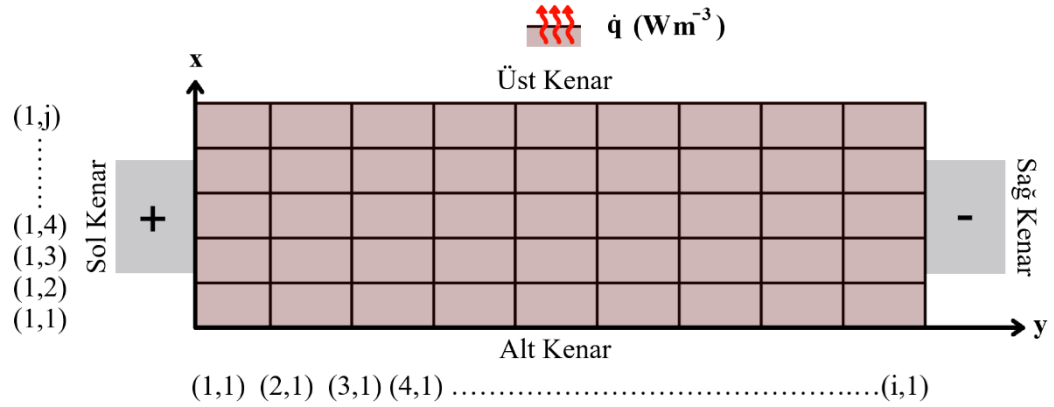
Bataryanın çalışması sırasındaki davranışı ortam sıcaklığından, sürüş koşullarından, elektrokimyasal reaksiyonlardan, hücreyi meydana getiren malzemelerden, iç dirençlerden önemli derecede etkilenmektedir (Rezvanizaniani vd., 2014). Düşük dış ortam sıcaklığı koşullarında elektrokimyasal reaksiyonlar yavaşlar, iyonik iletkenlik azalır ve elektrolitteki aktif malzemelerden tam olarak faydalanılamaz. Bu durumun tersi olarak yüksek dış ortam sıcaklığı koşullarında ise thermal runaway riski artmaktadır (Ali vd., 2024). Bu sebeple elektriksel parametrelerin değerleri sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmalıdır. WLTP sürüş çevrimi ile hareket eden bir araçta batarya akımı hız profilinin temsil ettiği sürüş fazlarına ve şarj ile deşarj durumlarına bağlı olarak değişkenlik gösterecek bu da hücre sıcaklığının değişken olmasına sebep olacaktır. Lityum-iyon hücreler için ideal çalışma sıcaklığı aralığı 15-35 °C olarak ifade edilmektedir (Schuster vd., 2015). BIYS ise farklı ortam koşullarında dahi hücreyi ideal çalışma sıcaklığı aralığında tutmakla görevlidir (Zhao vd., 2023). Batarya ısıl yönetim sistemini etkili bir şekilde tasarlayabilmek için ısı üretim hızını ve sıcaklık dağılımını bilmek gerekmektedir. Sonuç olarak, batarya paketinin ısıl davranışını araştırmak ve soğutucu plakayı modelleyebilmek için geliştirilen ısıl model bu parametrelerin incelenmesine odaklanmıştır.

Bernardi vd. (1985) tarafından önerilen ve Eşitlik 3.14'te ifade edilen ısı üretimi ifadesi tersinir ve tersinmez olmak üzere iki terimden oluşmaktadır.

$$q = q_{irrev} + q_{rev} = I(V_{oc} - V_t) - IT_b \frac{dV_{oc}}{dT} \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.14'te q , q_{irrev} ve q_{rev} sırasıyla batarya tarafından üretilen toplam ısıyı, tersinmez ısı üretimini ve tersinir ısı üretimini ifade etmektedir. Eşitliğin sol tarafı tersinmez ısıyı, sağ tarafı ise tersinir ısıyı belirtmektedir. Tersinmez ısı; akım, açık devre gerilimi ve terminal gerilimi yani hücrenin elektriksel modelinden hesaplanan parametreler kullanılarak hesaplanmaktadır. Tersinmez ısı; ohmik direnç nedeniyle açığa çıkan ısı ile polarizasyon ve yan reaksiyon ısılarından oluşmaktadır. Tersinir ısı ise akım, hücre sıcaklığı ve entropik terimden meydana gelmektedir. Entropik terim, açık devre geriliminin sıcaklığa bağlı değişiminin hızıdır ve negatif değerleri ekzotermik reaksiyonları, pozitif değerleri ise endotermik reaksiyonları belirtir. Buradan anlaşılacağı üzere elektriksel ve ısıl model birbiri ile ayrılmaz bir ilişki içerisindedir.

Mevcut literatürde batarya hücresi tarafından üretilen ısı kalorimetre cihazı kullanarak hesaplanmaktadır (Madani ve Ziebert, 2023). Ancak bu çalışma ile batarya hücresindeki ısı üretiminin, kalorimetreye ihtiyaç duyulmadan, hücre üzerinden sıcaklık verisinin toplanması sayesinde sayısal olarak tespit edileceği ısıl model önerilmektedir. Bu modelde, ısı iletimi genel denkleminin sonlu farklar yöntemi kullanılarak cebirsel hale getirilmesi ve başlangıç ile sınır koşullarının da tanımlanmasıyla hesaplanması amaçlanmıştır. Hücre yüzeyi sonlu elemanlara ayrılmış ve geçerli olan her bir ısı transfer mekanizması için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Hücrenin ayrıklaştırılmasına yönelik şematik gösterim Şekil 3.3.'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Batarya hücresinin sonlu farklar yöntemi kullanılarak yüzeylere ayrıklaştırılması

Isı üretimi değerinin hesaplanması için Eşitlik 3.15'te yer alan ısı iletimi genel denklemi kullanılmıştır. Burada k , $\dot{q}$, ρ ve c_p sırasıyla ısıl iletim katsayısını, birim hacim başına ısı üretim hızını, yoğunluk ve özgül ısı kapasitesini ifade etmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) \tag{3.15}$$

Batarya hücresinin kalınlığının diğer boyutlara göre ihmal edilebilir olması nedeniyle Eşitlik 3.15'te belirtilen ısı iletimi genel denklemi Eşitlik 3.16'da olduğu gibi iki boyutlu olarak yeniden düzenlenmiştir. Yani hücre düzlemsel olarak kabul edilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \dot{q} = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) \tag{3.16}$$

Eşitlik 3.16'da yer alan ifade sonlu farklar yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılacak ve cebirsel olarak çözülebilecektir. Hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi için başlangıç ve sınır şartlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada hücrenin başlangıçtaki sıcaklığının 17,5 °C'de olduğu ve ısıl dengede bulunduğu kabul edilmiştir. Sınır koşul olarak ise iletim, doğal taşınım ve ışınım ısı transfer mekanizmalarının hücre üzerinde etkili olmasından dolayı Eşitlik 3.17'de belirtilen ifade kullanılmaktadır.

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) = h\left(T_{amb} - {T_{i,j}}^{n}\right) + \varepsilon\sigma\left({T_{amb}}^{4} - \left({T_{i,j}}^{n}\right)^{4}\right) \tag{3.17}$$

Burada; h ısı taşınım katsayısını, ε yayma oranını, σ Stefan-Boltzmann sabitini, T_{amb} ve $T_{i,j}$ ise sırasıyla ortam sıcaklığı ile hücre yüzeyindeki belirli bir noktanın sıcaklığını temsil etmektedir.

Isıl modelde, deneysel olarak elde edilen sıcaklık verileri sonlu farklar yöntemiyle ayrıklaştırılan ve cebirsel hale getirilen denklemlerde yerine yazılarak ısı üretimi, tersinir ve tersinmez ısı ile entropik terim hesaplanabilmektedir. Çalışmada kullanılan batarya hücresinin termofiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan batarya hücresinin termofiziksel özellikleri

Parametreler	**Değerler**
Yoğunluk	2500 [kg/m^3]
Özgül ısı kapasitesi	1050 [J/kgK]
Isıl iletkenlik (x-y)	13,5 – 0,74 [W/mK]
Yayma oranı	0,9

Sonlu farklar yöntemi kullanılarak ısı iletim genel denklemi, sınır şartların her bir sonlu elemana uygulanması ile yazılmıştır. Batarya hücresinin merkezinde yer alan hücreler için bu denklem Eşitlik 3.18 kullanılarak hesaplanabilmektedir (Tahirağaoğlu vd., 2024).

$$k_x\left(\frac{{T_{i,j+1}}^{n} - 2\,{T_{i,j}}^{n} + {T_{i,j-1}}^{n}}{\Delta x^2}\right) + k_y\left(\frac{{T_{i+1,j}}^{n} - 2\,{T_{i,j}}^{n} + {T_{i-1,j}}^{n}}{\Delta y^2}\right) + \dot{q} + h\left(T_{amb} - {T_{i,j}}^{n}\right)\left(\frac{1}{\Delta x}\right) + \varepsilon\sigma\left({T_{amb}}^{4} - \left({T_{i,j}}^{n}\right)^{4}\right)\left(\frac{1}{\Delta x}\right) = \rho c_p\left(\frac{{T_{i,j}}^{n+1} - {T_{i,j}}^{n}}{\Delta t}\right) \tag{3.18}$$

Batarya hücresinin üst kenarında bulunan hücreler için Eşitlik 3.19 kullanılmaktadır (Vashisht vd., 2023).

$$k_x\,\Delta y\left(\frac{{T_{i,j-1}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right)+\ k_y\ \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i-1,j}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right)+k_y\ \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i+1,j}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right)+$$
$$h\,\Delta y\left(T_{amb}-{T_{i,j}}^n\right)+\varepsilon\sigma\Delta y\left({T_{amb}}^4-\ \left({T_{i,j}}^n\right)^4\right)+\ \dot{q}\,\Delta y\left(\frac{\Delta x}{2}\right)= \tag{3.19}$$
$$\rho c_p\Delta y\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j}}^{n+1}-{T_{i,j}}^n}{\Delta t}\right)$$

Batarya hücresinin sağ kenarında yer alan hücreler için Eşitlik 3.20 kullanılmaktadır.

$$k_x\ \left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j-1}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right)+\ k_x\ \left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j+1}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right)+k_y\,\Delta x\ \left(\frac{{T_{i-1,j}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right)+$$
$$h\,\Delta x\left(T_{amb}-{T_{i,j}}^n\right)+\varepsilon\sigma\Delta x\left({T_{amb}}^4-\ \left({T_{i,j}}^n\right)^4\right)+\ \dot{q}\,\Delta x\left(\frac{\Delta y}{2}\right)= \tag{3.20}$$
$$\rho c_p\Delta x\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j}}^{n+1}-{T_{i,j}}^n}{\Delta t}\right)$$

Batarya hücresinin alt kenarında bulunan hücreler için Eşitlik 3.21 kullanılmaktadır.

$$k_x\,\Delta y\left(\frac{{T_{i,j+1}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right)+\ k_y\ \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i-1,j}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right)+k_y\ \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i+1,j}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right)+$$
$$h\,\Delta y\left(T_{amb}-{T_{i,j}}^n\right)+\varepsilon\sigma\Delta y\left({T_{amb}}^4-\ \left({T_{i,j}}^n\right)^4\right)+\ \dot{q}\,\Delta y\left(\frac{\Delta x}{2}\right)= \tag{3.21}$$
$$\rho c_p\Delta y\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j}}^{n+1}-{T_{i,j}}^n}{\Delta t}\right)$$

Batarya hücresinin sol kenarında yer alan hücreler için Eşitlik 3.22 kullanılmaktadır.

$$k_x\ \left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j-1}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right)+\ k_x\ \left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j+1}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right)+k_y\,\Delta x\ \left(\frac{{T_{i+1,j}}^n-{T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right)+$$
$$h\,\Delta x\left(T_{amb}-{T_{i,j}}^n\right)+\varepsilon\sigma\Delta x\left({T_{amb}}^4-\ \left({T_{i,j}}^n\right)^4\right)+\ \dot{q}\,\Delta x\left(\frac{\Delta y}{2}\right)= \tag{3.22}$$
$$\rho c_p\Delta x\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j}}^{n+1}-{T_{i,j}}^n}{\Delta t}\right)$$

Batarya hücresinin sol üst köşesinde bulunan hücre için Eşitlik 3.23 kullanılmaktadır.

$$k_x \left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j-1}}^n - {T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right) + k_y \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i+1,j}}^n - {T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right) + h \left(\frac{\Delta x+\Delta y}{2}\right)\left(T_{amb} - {T_{i,j}}^n\right) + \varepsilon\sigma\left(\frac{\Delta x+\Delta y}{2}\right)\left({T_{amb}}^4 - \left({T_{i,j}}^n\right)^4\right) + \dot{q}\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{\Delta y}{2}\right) = \rho c_p \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j}}^{n+1} - {T_{i,j}}^n}{\Delta t}\right) \quad (3.23)$$

Batarya hücresinin sağ üst köşesinde yer alan hücre için Eşitlik 3.24 kullanılmaktadır.

$$k_x \left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j-1}}^n - {T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right) + k_y \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i-1,j}}^n - {T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right) + h \left(\frac{\Delta x+\Delta y}{2}\right)\left(T_{amb} - {T_{i,j}}^n\right) + \varepsilon\sigma\left(\frac{\Delta x+\Delta y}{2}\right)\left({T_{amb}}^4 - \left({T_{i,j}}^n\right)^4\right) + \dot{q}\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{\Delta y}{2}\right) = \rho c_p \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j}}^{n+1} - {T_{i,j}}^n}{\Delta t}\right) \quad (3.24)$$

Batarya hücresinin sol alt köşesinde bulunan hücre için Eşitlik 3.25 kullanılmaktadır.

$$k_x \left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j+1}}^n - {T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right) + k_y \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i+1,j}}^n - {T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right) + h \left(\frac{\Delta x+\Delta y}{2}\right)\left(T_{amb} - {T_{i,j}}^n\right) + \varepsilon\sigma\left(\frac{\Delta x+\Delta y}{2}\right)\left({T_{amb}}^4 - \left({T_{i,j}}^n\right)^4\right) + \dot{q}\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{\Delta y}{2}\right) = \rho c_p \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j}}^{n+1} - {T_{i,j}}^n}{\Delta t}\right) \quad (3.25)$$

Batarya hücresinin sağ alt köşesinde yer alan hücre için Eşitlik 3.26 kullanılmaktadır.

$$k_x \left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j+1}}^n - {T_{i,j}}^n}{\Delta x}\right) + k_y \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{{T_{i-1,j}}^n - {T_{i,j}}^n}{\Delta y}\right) + h \left(\frac{\Delta x+\Delta y}{2}\right)\left(T_{amb} - {T_{i,j}}^n\right) + \varepsilon\sigma\left(\frac{\Delta x+\Delta y}{2}\right)\left({T_{amb}}^4 - \left({T_{i,j}}^n\right)^4\right) + \dot{q}\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{\Delta y}{2}\right) = \rho c_p \left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{{T_{i,j}}^{n+1} - {T_{i,j}}^n}{\Delta t}\right) \quad (3.26)$$

Yukarıda yer alan eşitliklerde her bir ayrık yüzeyde doğal taşınım sınır şartı geçerli olup ısı taşınım katsayısı Eşitlik 3.27 kullanılarak hesaplanmaktadır (Chen vd., 2005)

$$h = f_1 \left(\frac{|T_s - T_\infty|}{L_c} \right)^n \tag{3.27}$$

Burada; T_s , T_∞ ve L_c sırasıyla hücre yüzey sıcaklığını, serbest akım sıcaklığını ve yüzeyin karakteristik uzunluğunu ifade etmektedir. Bu eşitlikteki f_1 ve n terimleri Chen vd. (2005) çalışmasına uygun olarak sırasıyla 1,36133 ve 0,25 olarak kabul edilmiştir.

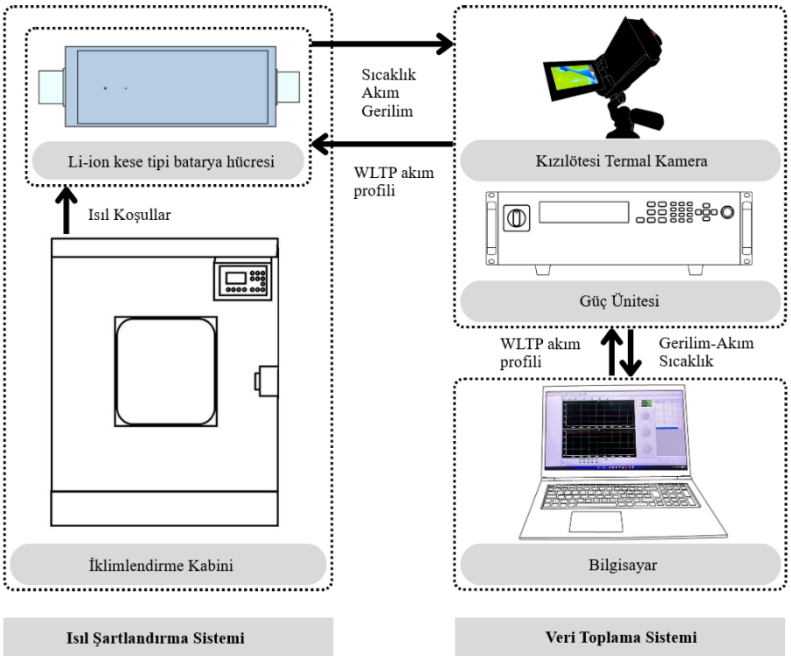
Sonuç olarak ısıl modelde yer alan ve yukarıda sunulan denklemler, deneysel çalışma kapsamında toplanan sıcaklık verileriyle birleştirilerek hücrenin toplam ısı üretimi hesaplanmaktadır. Ardından elektriksel modelden gelen parametreler ve Eşitlik 3.14 kullanılarak tersinir ısı, tersinmez ısı ve entropik terim belirlenebilmektedir.

3.4. Deneysel Çalışma

WLTP sürüş çevriminde hareket eden bir taşıt koşulu için batarya hücresinin dinamik davranışının tespit edilmesini sağlayacak sayısal modelin kurulmasında gerçek zamanlı sıcaklık verisine, hücre eşdeğer devresinin oluşturulması için hücre testlerine ve model ile gerçek durumun kıyaslanması için deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Batarya test ekipmanları ve deney düzeneği Şekil 3.4'te şematik olarak görselleştirilmiştir. Buna göre, modellenecek yüksek enerji yoğunluklu lityum-iyon kese tipi batarya hücresi iklimlendirme kabini içerisine yerleştirilmektedir. İklimlendirme kabini dış ortam sıcaklığının şartlandırılmasını sağlayarak hücrenin çalışması esnasında bulunabileceği sıcaklıklar için davranışının tespit edilmesini sağlamaktadır. Hücre üzerinden gerçek zamanlı sıcaklık verisinin toplanması amacıyla kızılötesi termal kamera iklimlendirme kabini içerisine hücre yüzeyine dik şekilde konumlandırılmıştır. Hücre testlerinin gerçekleştirilmesi, akım profilinin programlanarak sürüş çevriminin simüle edilebilmesi ve elektriksel parametrelere ait verilerin toplanabilmesi için DC güç ünitesi kullanılmıştır. DC güç ünitesi ve termal kamera, USB kablo aracılığıyla veri toplama ve

izleme sistemi olarak kullanılan bilgisayara bağlanmaktadır. Bu sayede anlık veriler izlenmekte, cihazlar kontrol edilmekte ve sonuçlar kayıt altına alınabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında hem TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü (RUTE) laboratuvarında hem de Bursa Uludağ Üniversitesi'nde bulunan Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu (BATEG) laboratuvarında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



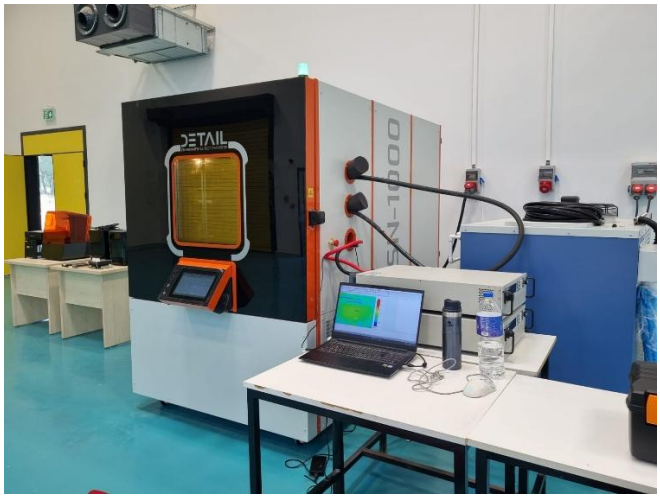
Şekil 3.4. Batarya test düzeneğinin şematik gösterimi

TÜBİTAK RUTE altyapısında iklimlendirme kabini olarak Nüve ID300 cihazı kullanılmakta olup ortam sıcaklığı -40 °C ile 150 °C aralığında şartlandırılabilmektedir. BATEG Laboratuvarı altyapısında ise Detail ISN1000 iklimlendirme kabini bulunmakta olup dış ortam sıcaklığı -40 °C ile 180 °C aralığında şartlandırılabilmektedir. Elektriksel ve ısıl modeli kurulan lityum-iyon kese tipi batarya hücresi 73 Ah kapasiteye sahiptir. Çalışmalarda hücre yüzeyinden sıcaklık verisinin toplanması için Testo 890 kızılötesi termal kamera kullanılmıştır. Bu ölçüm cihazı -20 °C ile 100 °C aralığında ölçüm yapma kabiliyetine sahiptir. Ayrıca hücrenin anlık termal görüntüsü IRSoft yazılımı ile gözlemlenebilmekte ve noktasal bazda sıcaklık verisi toplanabilmektedir. Hücrenin

elektriksel testlerinin gerçekleştirilmesi için ITECH 6000C çift yönlü programlanabilir DC güç ünitesi kullanılmıştır. Bu cihaz 80 V ve 300 A'e kadar elektriksel çıkış sağlayabilmektedir. Akım profilinin programlanması, elektriksel parametreler olan akım, terminal gerilimi ve kapasite değerlerinin ölçülüp kaydedilebilmesi için cihazın kendi yazılımı olan IT9000 kullanılmıştır. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da sırasıyla TÜBİTAK RUTE ve BATEG Laboratuvarlarındaki test düzeneklerinin görselleri yer almaktadır.



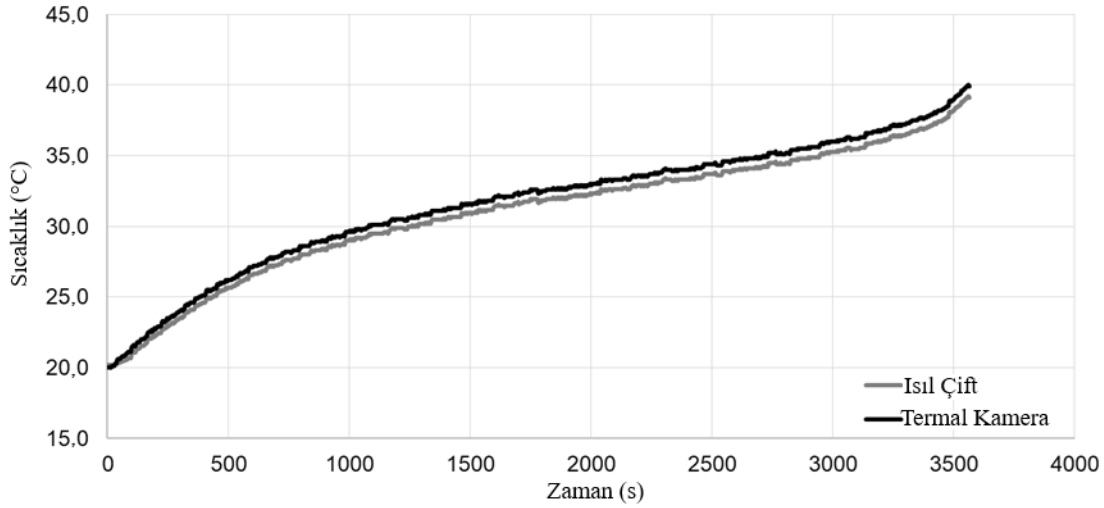
Şekil 3.5. TÜBİTAK RUTE'de yer alan batarya test düzeneği



Şekil 3.6. BATEG Laboratuvarında yer alan batarya test düzeneği

Sıcaklık ölçümü için kullanılan termal kameranın kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi amacıyla hücre üzerine K-tipi ısıl çift yerleştirilmiş ve batarya hücresi 1 C-rate akım ile

deşarj edilmiştir. Her iki cihaz ile katot bölgesindeki noktada ölçülen sıcaklık değişimi Şekil 3.7'de sunulmuştur.



Şekil 3.7. Termal kamera ve ısıl çift ile toplanan sıcaklık değerinin değişimi

Termal kamera ile sıcaklık ölçümünde hücrenin dış yüzeyi, yansımalara sebebiyet vermesinin önüne geçilmesi ve ölçüm doğruluğunun artırılması için siyah renge boyanmıştır. Şekil 3.7'de gri renkli eğri ısıl çiftin sıcaklık ölçümünü gösterirken siyah renkli eğri termal kamera tarafından okunan veriyi belirtmektedir. Buna göre iki cihaz arasındaki ölçüm farkının %2'den bile az olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel verinin belirsizlik analizi, toplanan verinin güvenilirliğini sağlamak için önemlidir. Bu çalışma kapsamında Moffat (1988) tarafından önerilen ve Eşitlik 3.28'de belirtilen denklem kullanılarak deney sırasında ölçülen her bir büyüklük dahil edilerek toplam deney hatası tespit edilmiştir. Buna göre en yüksek hata ±1% mertebesinde bulunmuştur.

$$Total\ error\ (\%) = \left[\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3.28)$$

Deneyde kullanılan cihazlara ait ölçüm aralıkları ve doğruluk değerleri ise Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

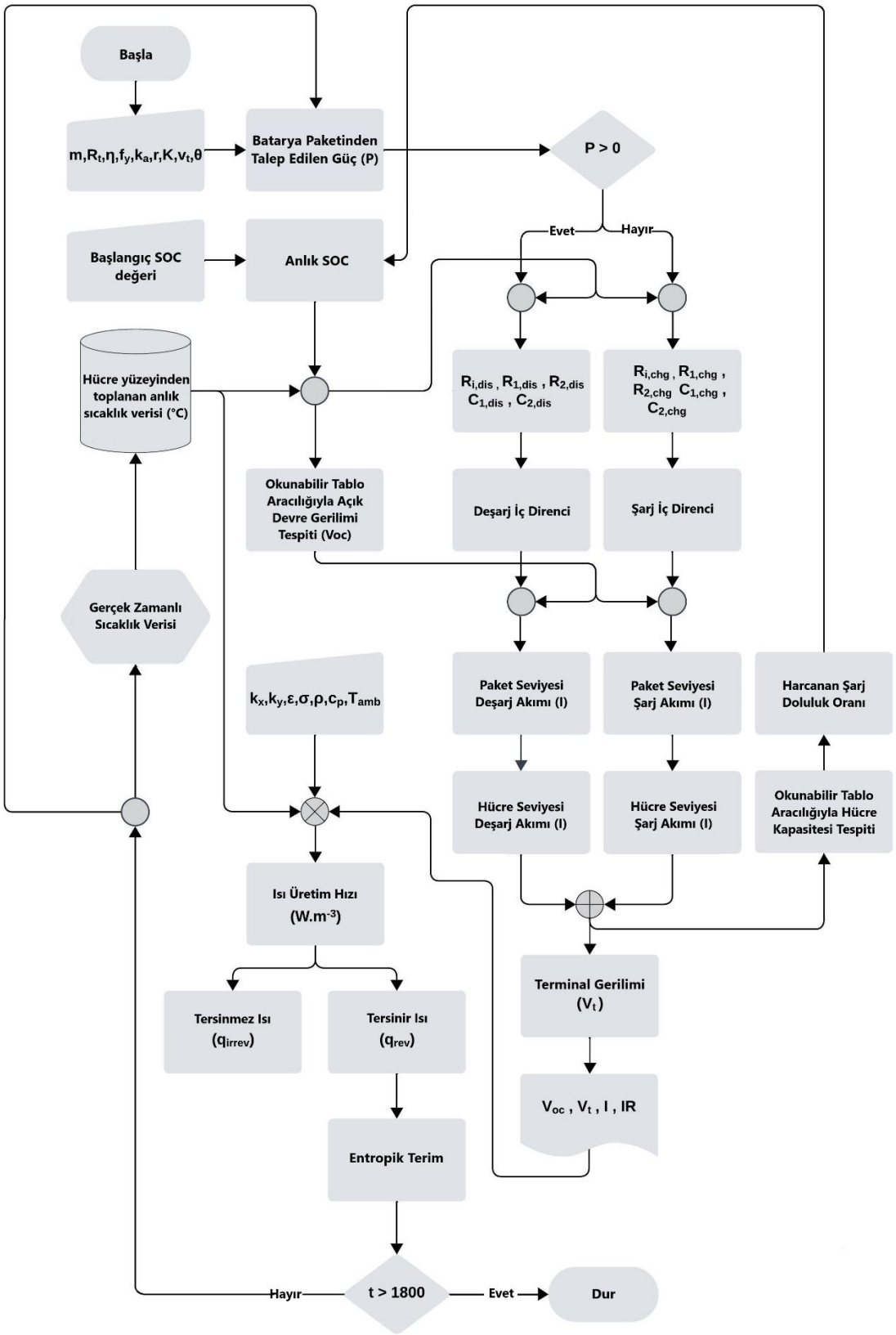
Çizelge 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan cihazlara ait özellikler

Deney Cihazları		Ölçüm Aralığı	Değerler
DC güç ünitesi	Gerilim	2,7 V / 4,2 V	± 0,02 %
	Akım	-73 A / 73 A	± 0,1 %
Termal kamera	Sıcaklık	-20 °C / +100 °C	± 2 °C
K tipi ısıl çift	Sıcaklık	-25°C / +200 °C	± 0,01 °C

3.5. Dinamik Model Hesaplama Prosedürü

Elektrikli taşıtın dinamik koşullar altındaki davranışını hesaplamak için geliştirilen sayısal modelin taşıt dinamiği, elektriksel ve ısıl model olarak adlandırılan alt bloklarına ait detaylar yukarıdaki bölümlerde sunulmuştur. Bu bölümde, ilgili bloklar arasındaki bağlantılar, hesaplama aşamaları ve modelin çalışma prosedürü açıklanmaya çalışılacaktır.

Elektro-termal modelin işleyişi Şekil 3.8'de yer alan akış diyagramı ile sunulmuştur. Buna göre hesaplamalara Çizelge 3.1'de yer alan taşıt özelliklerinin belirlenmesiyle başlanmaktadır. Elektrikli aracın yapısal, elektriksel ve aerodinamik özellikleri kullanılarak taşıt dinamiği alt modelinde bataryadan talep edilen güç hesaplanmaktadır. Bu parametrenin hesaplanmasına taşıt özelliklerine ek olarak sürüş ve ortam koşulları da dahil edilmelidir. Buna göre WLTP sürüş çevrimi ile hareket eden araçta bataryadan talep edilen güç Eşitlik 3.9 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bulunan değerin pozitif ya da negatif olması hücrenin şarj veya deşarj durumunda olmasını bu da ilgili sürece ait direnç değerlerinin kullanılmasını sağlamaktadır. Eğer talep edilen güç pozitif ise deşarj için geçerli olan direnç değerleri kullanılırken, negatif olması durumunda şarj için geçerli olan direnç değerlerinden faydalanılmaktadır.

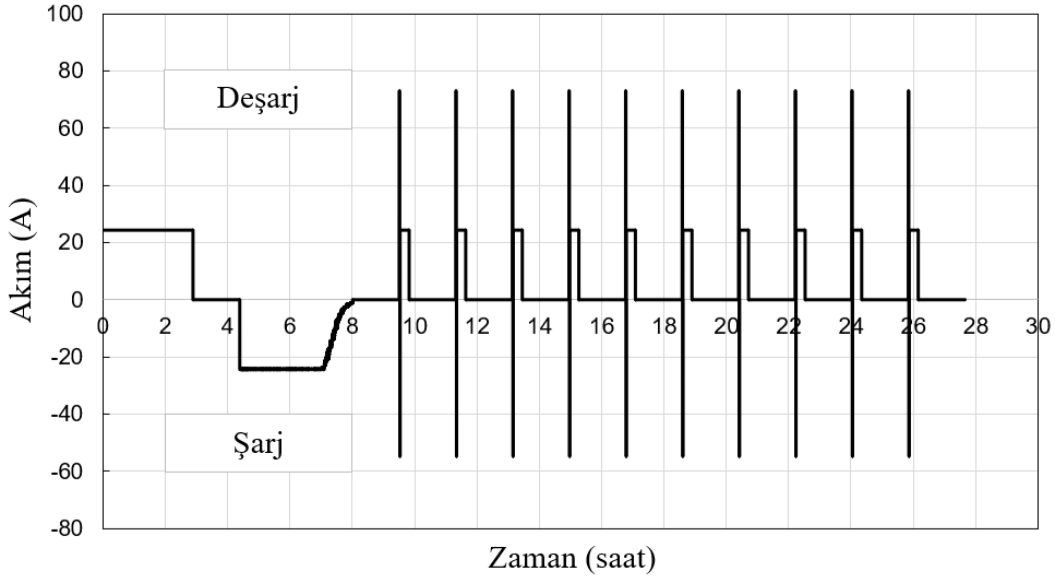


Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan elektro-termal modelin şematik gösterimi

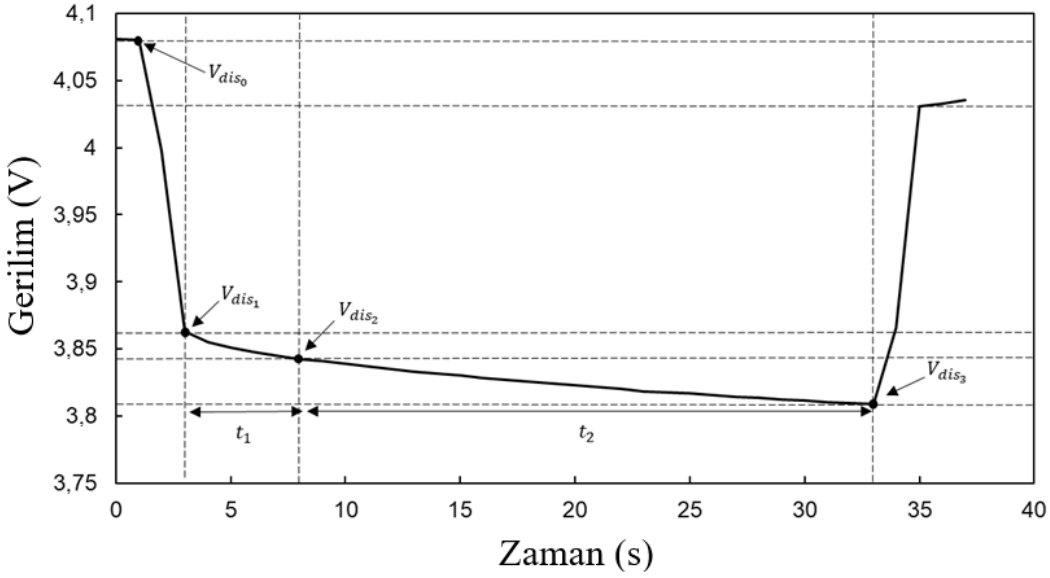
Bölüm 3.2'de bahsedilen ikinci dereceden eş değer devre modelini oluşturan bileşenlerin değerlerini hesaplayabilmek için HPPC testinin uygulanması gerekmektedir. Hücrenin çalışması sırasında ısı üretiminin gerçekleşmesi ve sıcaklığının değişimi hücre iç direncinde değişime sebep olmaktadır. Dolayısıyla modelin diğer sürüş çevrimleri ve farklı akım profilleri için de kullanılabilirliğini sağlamak amacıyla 15, 20, 25 ve 30 °C sıcaklıkları için hücre iç dirençlerinin belirlenmesine karar verilmiştir.

HPPC testine ait akım profili Şekil 3.9'da sunulmuştur. Buna göre ilk olarak 1/3 C-rate ile hücre deşarj edilmiştir. Sonrasında elektriksel ve ısıl dengeye ulaşması için hücre yaklaşık olarak 1,5 saat dinlenmeye bırakılmıştır. Ardından şarj prosesi başlatılmış ve ilk aşamada 1/3 C-rate ile hücrenin maksimum çalışma gerilimi olan 4,2 V'a ulaşılana kadar sabit akım şarjı gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında sürece sabit gerilimde şarj ile akım 1 A'in altına düşene kadar devam edilmiştir. HPPC'nin ön aşamasında gerçekleştirilen şarj ve deşarj süreçlerinin ardından akım darbeleri, sabit akımda deşarj ve dinlenme aşamalarından oluşan döngü fazına geçilmektedir. İlk olarak hücreye 30 saniye boyunca 1 C-rate deşarj akım darbesi uygulanmaktadır. Ardından 40 saniyelik bir dinlenme süreci gerçekleştirilmekte ve sonrasında 10 saniye boyunca 0.75 C-rate şarj akım darbesi hücreye uygulanmaktadır. Akım darbeleri sonunda hücre SOC'unu %10 azaltacak şekilde 1/3 C-rate ile deşarj süreci gerçekleştirilmektedir. Her bir döngü fazındaki dinlenme aşamasının sonunda açık devre gerilimi okunarak kayıt altına alınmaktadır. Ayrıca döngü fazı 10 kez tekrarlanarak SOC'daki her %10'luk düşüşe karşılık iç direnç ve açık devre gerilimindeki değişim tespit edilebilmektedir.

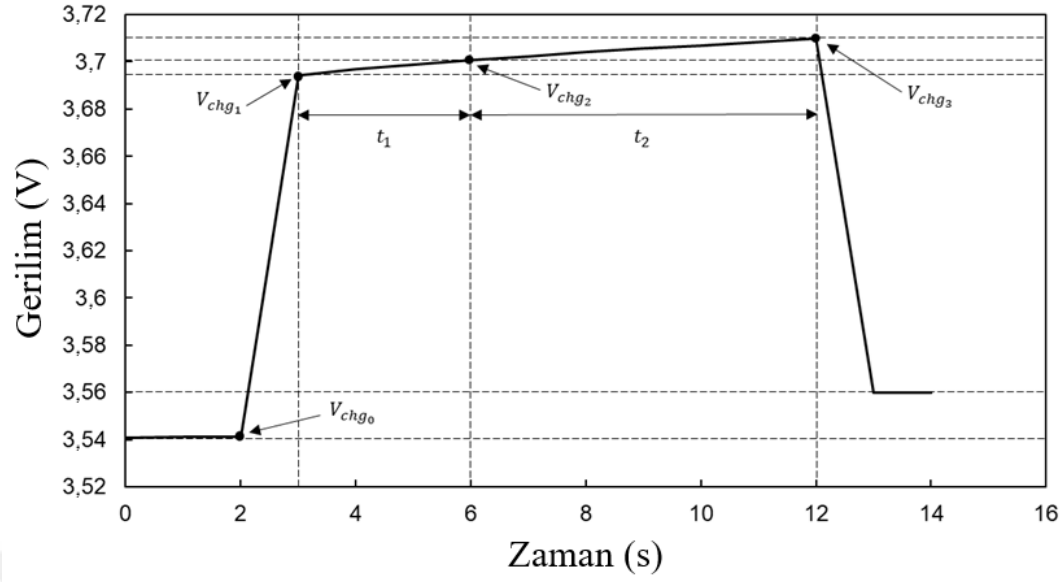
HPPC testi boyunca uygulanan akım darbelerine karşılık hücre gerilimindeki değişim takip edilerek ikinci dereceden eş değer devreyi oluşturan bileşenlerin SOC ve sıcaklığa bağlı değerleri hesaplanabilmektedir. Deşarj ve şarj iç dirençlerinin tayin edilmesi için kullanılacak akım darbelerine karşılık gelen gerilim değişimi eğrileri sırasıyla Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de sunulmuştur.



Şekil 3.9. HPPC akım profili



Şekil 3.10. Deşarj akım darbesi neticesinde terminal gerilimindeki değişim



Şekil 3.11. Şarj akım darbesi neticesinde terminal gerilimindeki değişim

Şekil 3.10 ve 3.11'deki gerilim değişim grafiklerinden görülebileceği üzere ohmik direncin etkisi sebebiyle gerilimde ani artış ve azalışlar gerçekleşmektedir. Ayrıca grafiklerde yer alan t_1 ve t_2 ifadeleri ile sırasıyla hızlı ve yavaş zaman sabitleri temsil edilmektedir.

Şekil 3.10 üzerinde belirtilen V_{dis_0}ile deşarj akım darbesi uygulanmadan önceki hücre gerilimi, V_{dis_1}ile deşarj akım darbesinin uygulanması sırasında gerilimdeki ani düşüşün bittiği noktadaki gerilim değeri, V_{dis_2} ile gerilim değişim eğrisinin eğiminin değiştiği noktadaki gerilim değeri, V_{dis_3} ile ise akım darbesinin sonundaki gerilim değeri tanımlanmıştır. Şekil 3.11'de şarj akım darbesinin uygulanması sırasındaki gerilim değişim eğrisindeki noktalar deşarjdakine benzer yaklaşımla isimlendirilmiştir. Eş değer devre modelini oluşturan bileşenlerin değerleri akım darbeleri sonucundaki gerilim değişim eğrileri incelenerek ve Eşitlik 3.29'dan Eşitlik 3.33'e kadar olan denklemler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$R_{i_{dis}} = \left|V_{dis_0} - V_{dis_1}\right| / i_{dis} \tag{3.29}$$

$$R_{1_{dis}} = \left|V_{dis_1} - V_{dis_2}\right| / i_{dis} \tag{3.30}$$

$$R_{2_{dis}} = \left|V_{dis_2} - V_{dis_3}\right| / i_{dis} \tag{3.31}$$

$$C_{1_{dis}} = (t_1) / R_{1_{dis}} \tag{3.32}$$

$$C_{2_{dis}} = (t_2) / R_{2_{dis}} \tag{3.33}$$

Bu denklemlerde yer alan 0, 1, 2 ve 3 indisleri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de belirtilen noktalara karşılık gelirken i , 1 ve 2 indisleri ise eş değer devre modelindeki direnç ve kapasite elemanlarını ifade etmede kullanılmaktadır. Hücrenin şarjı ve deşarjı sırasındaki iç dirençler birbirinden farklıdır. Dolayısıyla elektriksel parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanmasını gerçekleştirebilmek amacıyla HPPC'nin her bir döngüsü için deşarj akım darbeleri kullanılarak deşarj iç dirençleri, şarj akım darbelerinden faydalanarak şarj iç dirençleri hesaplanmaktadır.

Hücre iç dirençleri sıcaklık parametresinden etkilenmekte olup bu etkinin çalışmaya yansıtılması amacıyla HPPC testi 15, 20, 25 ve 30 °C ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bulunan iç direnç ve açık devre gerilimi değerleri okunabilir tablo formatında model içerisindeki ilgili bloklara aktarılmıştır. Ancak taşıtın dinamik koşullar altındaki hareketi sırasında sıcaklık ve SOC değerinin belirtilen değerleri ile beraber ara değerlerine karşılık gelen açık devre gerilimi ve iç direnç değerlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu kapsamda Matlab/Simulink platformu kullanarak geliştirilen modelde, ilgili okunabilir tablo formatındaki bloklar eğer girişe karşılık çıkış verisi tablolar arasında yer alıyorsa bunu çıkışa aktarmaktadır. Aksi takdirde, ara değerlere karşılık gelen değerlerde olduğu gibi blok tarafından interpolasyon ya da ekstrapolasyon yöntemlerine başvurularak çıkış değerleri üretilmektedir.

Sonuç olarak, bataryadan talep edilen gücün tanımlanması, eşdeğer direnç ve açık devre geriliminin belirlenmesi ile paket ve modül konfigürasyonuna bağlı olarak hücreden çekilen ya da hücreye verilen akımlar sırasıyla Eşitlik 3.11 ve Eşitlik 3.12 kullanılarak hesaplanmaktadır.

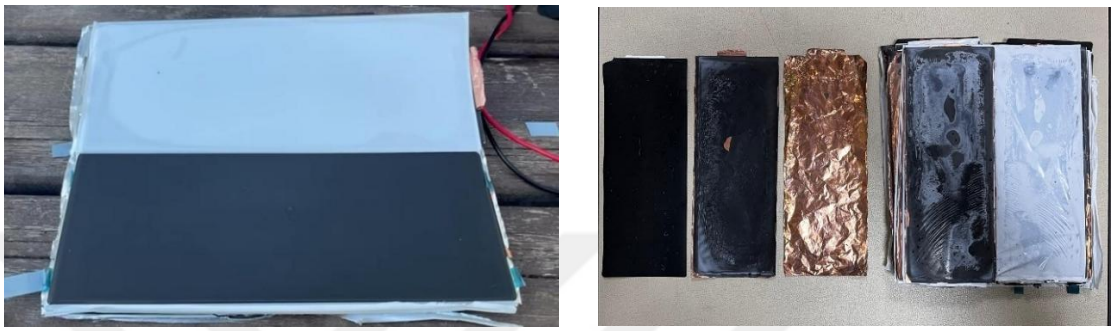
Geliştirilen sayısal modelde elektriksel ve ısıl modelin çıktıları birbirlerine giriş olarak aktarılmaktadır. Deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek sıcaklık verisi toplanmıştır. Bu veriler, sonlu farklar yöntemi ile ayrıklaştırılarak cebirsel hale getirilen ve sınır koşulları bulunduran ısı iletim genel denklemine eklenmiştir. Her bir ayrıklaştırılmış yüzey için ısı üretimi Çizelge 3.3'te bulunan hücrenin termofiziksel özellikleri ve Eşitlik 3.18 ile Eşitlik 3.26 arasında bulunan denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan ısı üretimi ifadesinin Eşitlik 3.14'te belirtildiği üzere tersinir ve tersinmez ısı olmak üzere iki bileşeni bulunmaktadır. Tersinmez ısı elektriksel modelden elde edilen sonuçlar ile hesaplanırken, tersinir ısı hücre akımı, hücre sıcaklığı ve entropik terim ifadesi kullanılarak bulunmaktadır. Burada yer alan entropik terim, hesaplanan değerlerin yerine yazılması ile ortaya çıkarılmaktadır. WLTP sürüş çevrimi 1800 saniye sürmektedir. Dolayısıyla model her hesaplama adımı sonunda geçen zamana göre hesaplamaya devam edip etmeyeceğine karar vermektedir. Ayrıca hücre kapasitesi sıcaklık ve akım değerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden her döngü sonunda tüketilen SOC değerinin hesaplanmasında bu bilgiler geri besleme ile bildirilmekte, anlık SOC değeri buna uygun olarak hesaplanmaktadır.

3.6. Batarya Hücresinin HAD Modeli

Bu tez kapsamında, yüksek enerji yoğunluklu ve kapasiteli lityum-iyon kese tipi batarya hücresinin dinamik davranışını araştırmak üzere bütün elektrikli araçlar için kullanılabilecek, farklı sürüş çevrimleri, modül konfigürasyonları ve hücre tiplerinin tamamının simüle edilebileceği bir matematiksel model geliştirilmiştir. Buna ek olarak batarya hücresinin Ansys Fluent yazılımı kullanarak HAD modeli kurulmuştur.

Şekil 3.12'de belirtildiği üzere batarya hücresinin katotu, alüminyum akım toplayıcı ile çevresine hücrenin isimlendirilmesinde de kullanılan kimyanın kaplanmasından meydana

gelmektedir. Hücrenin anotu ise bakır folyodan oluşan akım toplayıcı ile çevresine kaplanan grafitten oluşmaktadır. Anot ve katotun arasında bunların birbirine temas etmesini engelleyerek kısa devreyi önleyen ve gözenekli yapıya sahip olan seperator bulunmaktadır. Bu yapının birbiri üzerine katmanlar halinde katlanması sonucu hücre meydana gelmektedir.



Şekil 3.12. Batarya hücresinin iç yapısı

Batarya hücresinin elektrokimyasal olarak modellenmesinde, çok katmanlı hücre yapısını meydana getiren akım toplayıcılar, gözenekli yapıya sahip anot, katot ve seperator gibi bileşenlerin özelliklerinin süperpozisyonu ile tümünün hücre üzerindeki tüm noktalarda temsil edildiği ve hücrenin çok fizikli yapısı göz önüne alınarak farklı boyutta çözüm alanlarında hesaplamaların gerçekleştirildiği Multi Scale - Multi Domain (MSMD) yaklaşımı sıkça tercih edilmektedir (Schmidt vd., 2021). Bu çözüm metodunu temel alan Newman, Tiedemann, Gu, Kim (NTGK) modeli ve Eş Değer Devre Modeli (ECM) gibi yarı-ampirik elektrokimyasal alt modeller; parçacık seviyesindeki aktif malzeme difüzyonunu, elektrokimyasal reaksiyonları, hücrenin elektriksel ve ısıl performansını farklı çözüm alanlarında hesaplamaktadır.

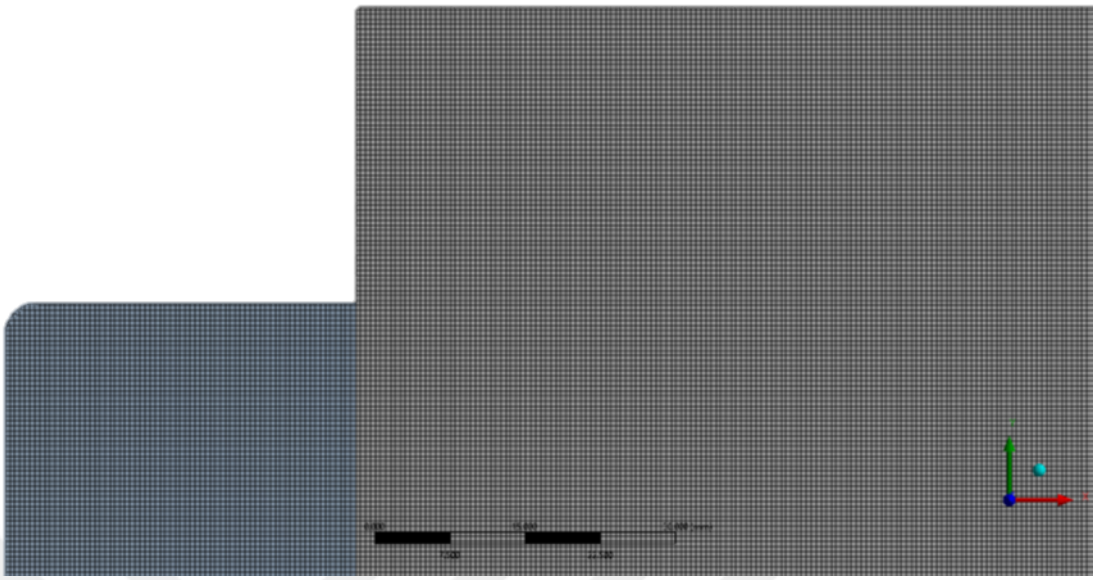
NTGK modeli; deneysel olarak elde edilen deşarj eğrilerinden eğri uydurma yöntemiyle belirlenen modele özgü parametreleri kullanarak bataryanın elektriksel ve ısıl çözüm alanını ilişkilendirir ve bu parametreler ile enerji korunumu denklemini çözerek bataryadaki ısı üretiminin ve sıcaklık dağılımının hesaplanmasını sağlar. ECM modeli ise bataryanın direnç ve kapasite elemanlarından oluşan bir elektrik devresi ile davranışının modellenmesini esas alır.

Bu tez kapsamında, batarya hücresinin elektro-kimyasal olarak modellenerek sabit akım deşarjı ve sürüş çevrimi dinamik akım profilindeki davranışının incelenmesi için Ansys Fluent R19.2 yazılımında bulunan ECM modeli kullanılmıştır. Eş değer devre modelini oluşturan bileşenlerin değeri, Bölüm 3.4'te açıklanan HPPC test yöntemi ile SOC'un her %10'luk değişimine ve 15, 20, 25 ve 30°C sıcaklıklarına karşılık olarak hesaplanmış ve program içerisine aktarılmıştır. Böylece belirtilen sıcaklıklar ile bunların ara değerlerine karşılık gelen devre bileşenine ait değerler hücre sıcaklığındaki değişime bağlı olarak hesaplamalarda kullanılabilecektir. WLTP sürüş çevrimi sırasında taşıt bataryasında hem şarj hem de deşarj süreçleri gerçekleşmektedir. Dolayısıyla şarj ve deşarj için hesaplanan model bileşenlerinin değeri ayrı ayrı olarak yazılımda ilgili bloklara aktarılmıştır.

Çizelge 3.2'de belirtilen boyutlardaki hücrenin tasarımı gerçekleştirilmiş ve ANSYS yazılımı içerisinde bulunan Mesh modülü kullanılarak sonlu hacimlere Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te sunulduğu gibi ayrılmıştır.



Şekil 3.13. Batarya hücresi mesh yapısı



Şekil 3.14. Batarya hücresi mesh yapısı

Batarya hücresi HAD analizi geçici rejim koşullarında gerçekleştirilmiş olup pozitif ve negatif tab ile elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği aktif malzemenin özellikleri Çizelge 3.5'teki gibi tanımlanmıştır.

Çizelge 3.5. Batarya hücresini oluşturan bileşenlerin termofiziksel özellikleri

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]

Bu çalışmada kullanılan batarya hücresinin elektrotları farklı malzeme özelliklerine sahip olduğundan elektriksel iletkenlik değerlerinin tanımlanması gerekmektedir. Bunun için programda yer alan uds diffusivity seçeneği içerisinde birimleri (1/Ωm) olan pozitif ve

negatif elektrotun elektriksel iletkenlik değerleri sırasıyla uds-0 ve uds-1 olarak tanımlanır. Elektriksel iletkenlik parametreleri akım toplayıcılar ile elektrot malzemelerinin özellikleri kullanılarak Eşitlik 3.34 ve Eşitlik 3.35 ile hesaplanabilmektedir (Perez Estevez vd., 2021)

$$\sigma_p = \frac{0{,}5\ {\sigma_c}^p\ {\delta_c}^p + {\sigma_e}^p\ {\delta_e}^p}{\delta_{toplam}} \tag{3.34}$$

$$\sigma_n = \frac{0{,}5\ {\sigma_c}^n\ {\delta_c}^n + {\sigma_e}^n\ {\delta_e}^n}{\delta_{toplam}} \tag{3.35}$$

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.

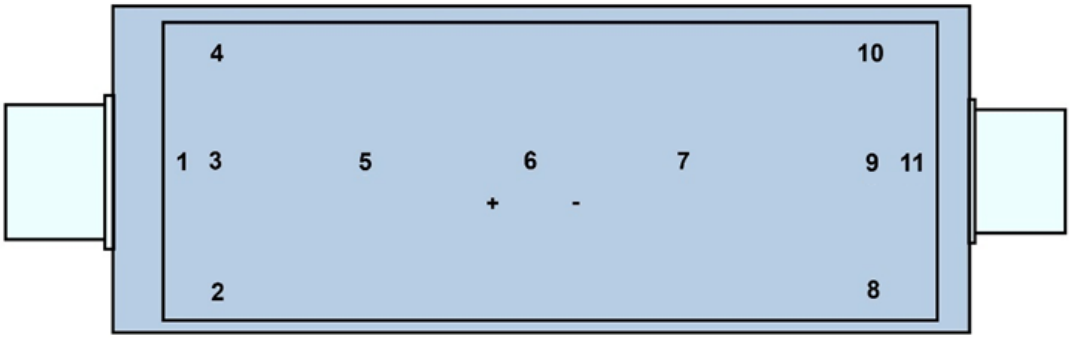
Ansys Fluent içerisinde bulunan ECM modeli kullanılarak hücrenin elektriksel ve ısıl davranışının sabit ve dinamik akım profillerinde araştırılması amacıyla gerçekleştirilen analizlerde dış ortam sıcaklığı 15 °C olarak kabul edilmiştir. Sabit akım deşarjı için çözüm seçeneği olarak belirlenen C-rate değeri girilirken, WLTP sürüş çevriminde analizin gerçekleştirilmesi için akım profili metin dosyası olarak programa aktarılmaktadır.

3.7. Sabit Akım Deşarj Testleri

Batarya hücresi performansı ve karakteristikleri uygulama sırasında dinamik bir değişim göstermekte ve birçok parametreden etkilenmektedir. Bunlar arasında taşıtın özellikleri, sürüş profili, yol şartları, araç yardımcı sistemlerinin durumu ve ortam şartları önemli bir yer tutmaktadır. Bahsedilen koşulların etkilerinin incelenebilmesi amacıyla akım ve sıcaklık değerleri kontrol edilebilir parametreler olarak öne çıkmaktadır.

Batarya hücresinin elektriksel ve ısıl özelliklerinin açıklanmasında sıkça başvurulan bir yöntem olan sabit akım deşarj testleri önerilen çalışma sıcaklığı ve akımı aralığında

gerçekleştirilmiştir. Deney planı; 15 °C, 20 °C, 25 °C ve 30 °C dış ortam koşullarında ve her bir sıcaklık için 0,5 C, 0,75 C, 1 C, 1,5 C ve 2 C-rate akım değerlerinde 20 hücre testi ile oluşturulmuştur. Tüm testlerin başlangıcında hücre şarj durumu tam dolu hale getirilmiş ve ısıl denge koşulunun sağlanabilmesi için termal kamera kullanarak hücre yüzeyinden sıcaklık verisi toplanmıştır. Hücre yüzeyindeki sıcaklık dağılımı BIYS tasarımında referans çalışma olarak ele alınabilecektir. Gerçekleştirilen tüm deneylerde Şekil 3.15'te görselleştirilen ve numaralandırılan hücre yüzeyindeki noktalardan sıcaklık verisi toplanmıştır. Noktaların belirlenmesi aşamasında deşarjın ilk sürecinde en yüksek sıcaklığın katot çevresinde meydana gelmesi sonrasında ise hücre merkezinde bu değerin ölçülmesi etkili olmuştur.



Şekil 3.15. Sıcaklık verisinin toplandığı hücre yüzeyindeki noktaların gösterimi

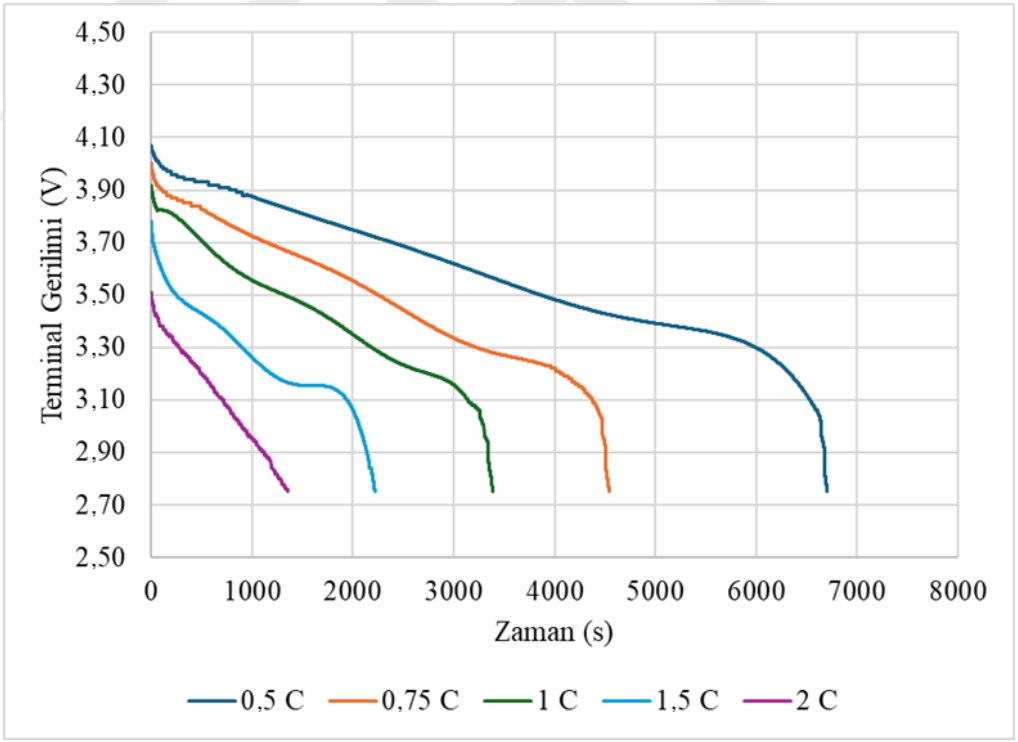
Hücre kapasitesi de sıcaklık ve akım değerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple Matlab / Simulink yazılımı kullanılarak geliştirilen elektro-termal modelde bu iki parametre her zaman adımında okunabilir tablo formatındaki bloğa giriş olarak aktarılmakta ve deneysel olarak elde edilen sonuçlardan interpolasyon ya da ekstrapolasyon yöntemi kullanılarak hücre kapasitesi çıkışa aktarılmaktadır. Böylece hücre doluluk oranının hesaplanmasında daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Sabit akım deşarj deneyleri gerçekleştirilerek aynı zamanda sıcaklık ve akım değişkenlerine karşılık hücrenin kapasite ölçümü de incelenmiştir.

4. BULGULAR

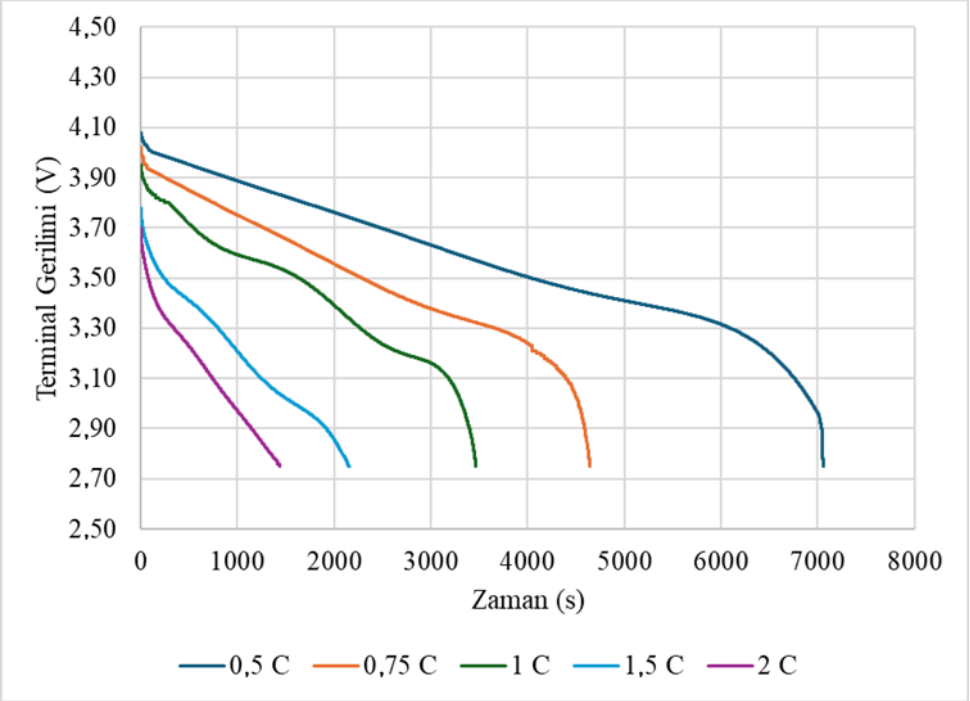
Bu bölümde yüksek kapasiteli ve enerji yoğunluklu lityum-iyon kese tipi batarya hücresinin elektriksel ve ısıl davranışının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile geliştirilen elektro-termal modelin ve HAD modelinin sonuçları sunulmuştur. Hücrenin sabit akım deşarjı ve dinamik akım profillerindeki özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

4.1. Sabit Akım Deşarj Deneyi Sonuçları

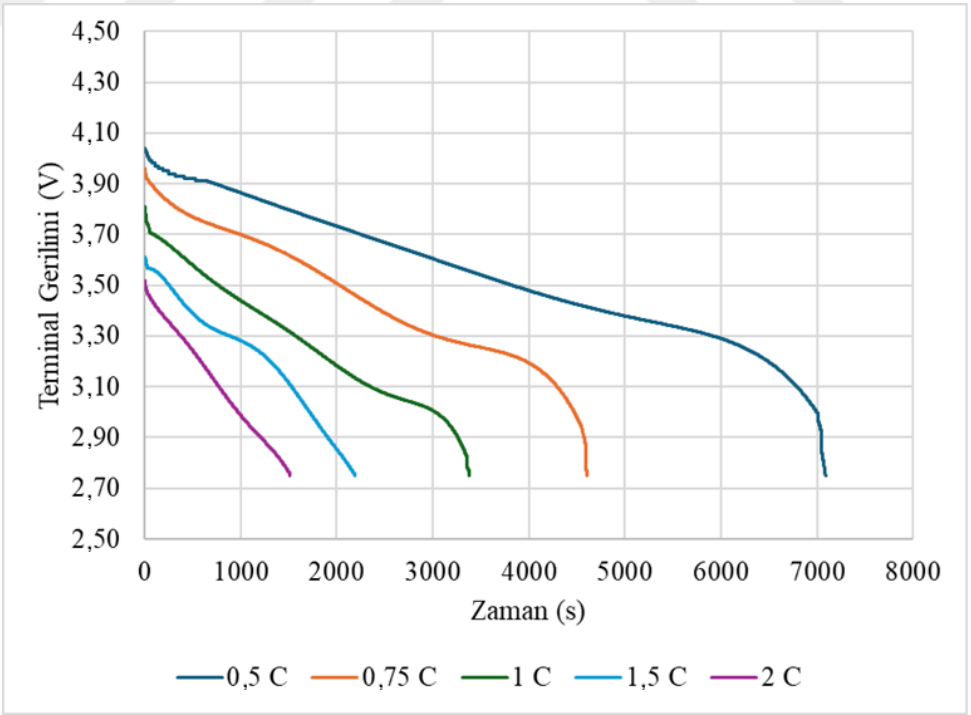
Sabit akımlarda ve çeşitli sıcaklıklarda deşarj edilen batarya hücresinin terminal geriliminin değişim eğrileri aşağıdaki şekillerde sunulmuştur. Buna göre sıcaklık ve akımın etkilerini ayrı ayrı gözlemleyebilmek amacıyla bu parametrelerden biri sabit tutularak sonuçlar incelenmiştir.



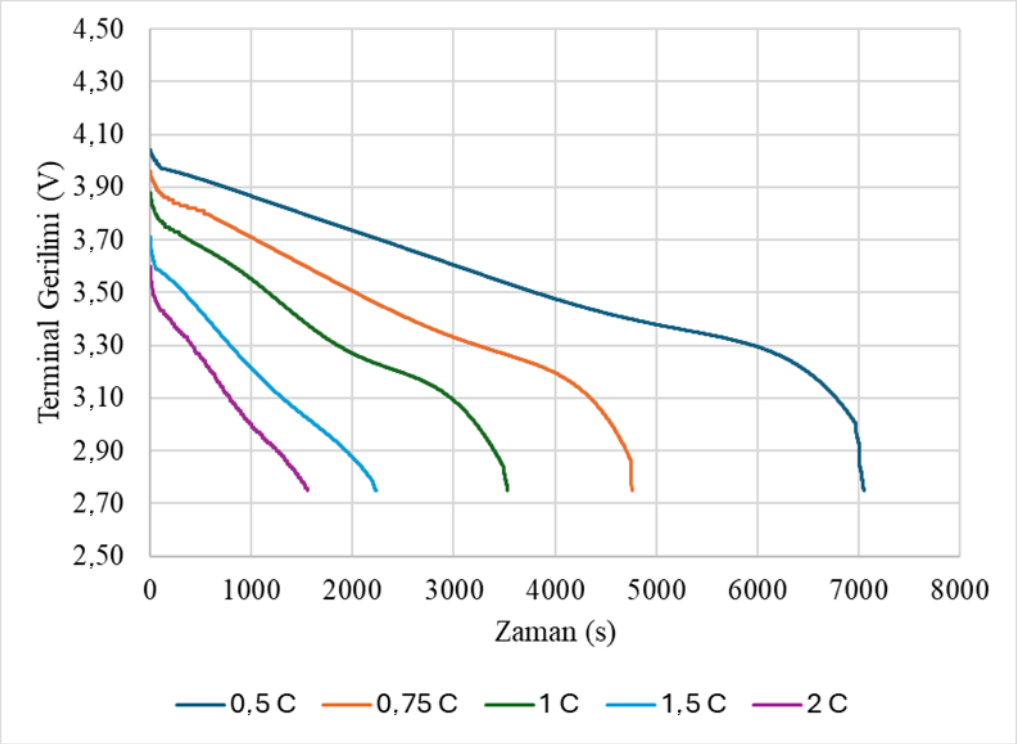
Şekil 4.1. 15 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması



Şekil 4.2. 20 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması



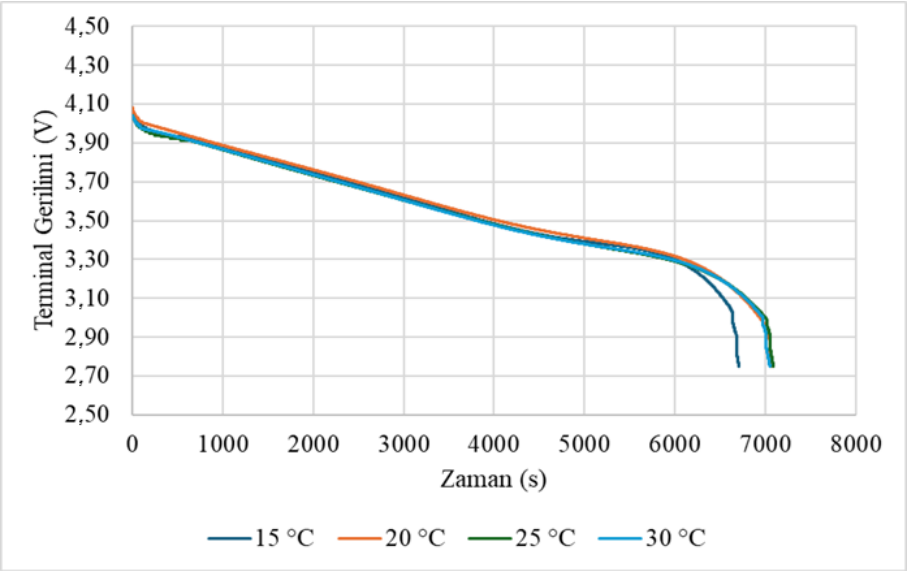
Şekil 4.3. 25 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması



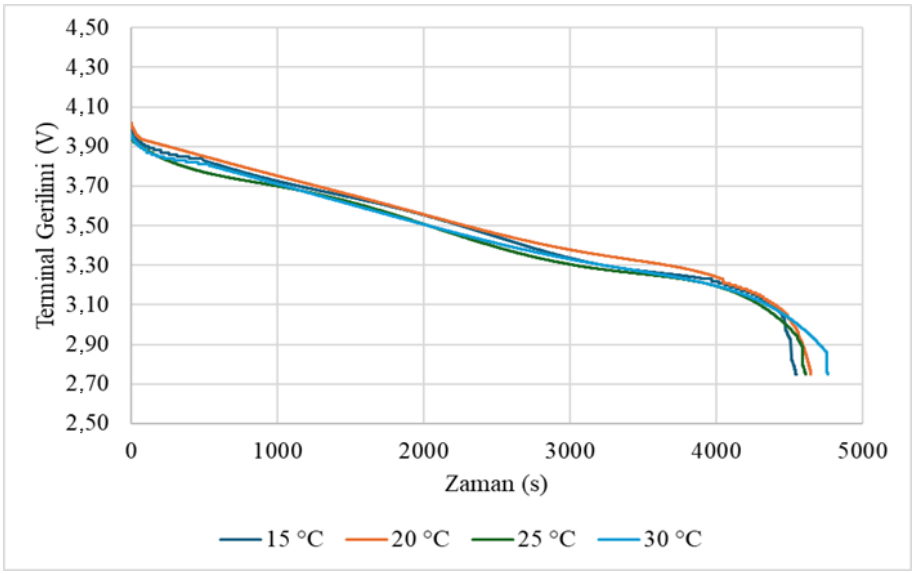
Şekil 4.4. 30 °C ortam koşullarında farklı akım değerleri için terminal geriliminin değişiminin karşılaştırılması

Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'ten görülebileceği üzere dış ortam sıcaklığının aynı değeri için deşarj akımının artması terminal gerilimindeki değişimin çok daha hızlı olmasına neden olmaktadır. Hücre şarj doluluk oranının azalmasına bağlı olarak eş değer devre gerilimini oluşturan bileşenlerin HPPC testi ile tespit edilen değerleri önemli derecede artış gösterir. Buna bağlı olarak hücrenin tam deşarjına yakın olduğu süreç içerisinde geriliminde ani bir düşüş meydana gelmektedir. Şekil 4.1'te yer alan 15 °C dış ortam sıcaklığında akıma bağlı gerilim değişimi grafiğinde, hücre 0,5 C-rate akımda 6706 saniye sonunda tam deşarj olurken 0,75 C-rate'de bu süre 4545 saniye, 1 C-rate'de 3390 saniye, 1,5 C-rate'de 2220 saniye ve 2 C-rate'de 1352 saniye olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan akımın hücre kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve akımın artmasına bağlı olarak kapasitenin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'te sunulan 30 °C dış ortam sıcaklığı koşulu için ise hücrenin tam deşarj olma süresi 0,5 C-rate sabit akım için 7049 saniye, 0,75 C-rate için 4761 saniye, 1 C -rate için 3531 saniye, 1,5 C-rate'de 2233 saniye ve 2 C-rate için 1551 saniye olarak bulunmuştur. Dolayısıyla aynı akım değerinde dış ortam sıcaklığındaki artış deşarj süresini artıran bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Bu

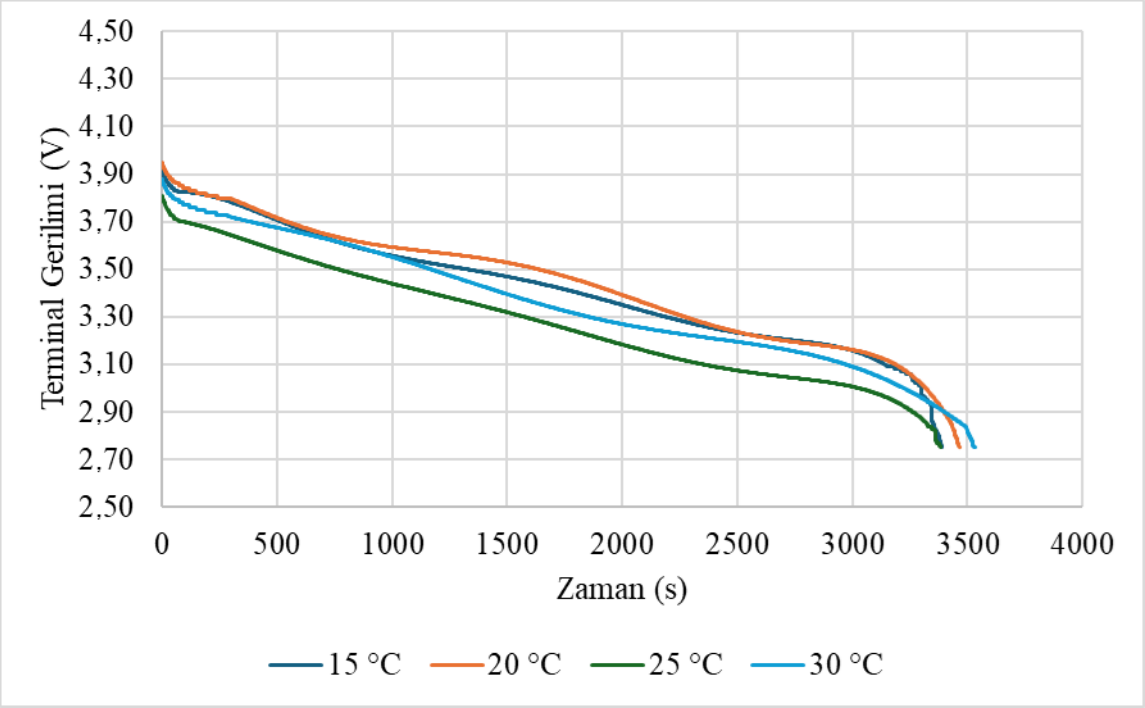
durum ise sıcaklık parametresinin hücrenin elektriksel özellikleri üzerindekini etkisini gözler önüne sermektedir. Ayrıca dış ortam sıcaklığındaki artışa bağlı olarak deşarj akımının uygulandığı ilk zaman adımlarındaki gerilim düşümü daha az olmaktadır. Ancak bu testlerin hücrenin ideal çalışma sıcaklığı aralığında gerçekleştirildiğine dikkat edilmelidir. Yani bu aralıktan uzaklaşıldıkça hücre karakteristiği değişecektir.



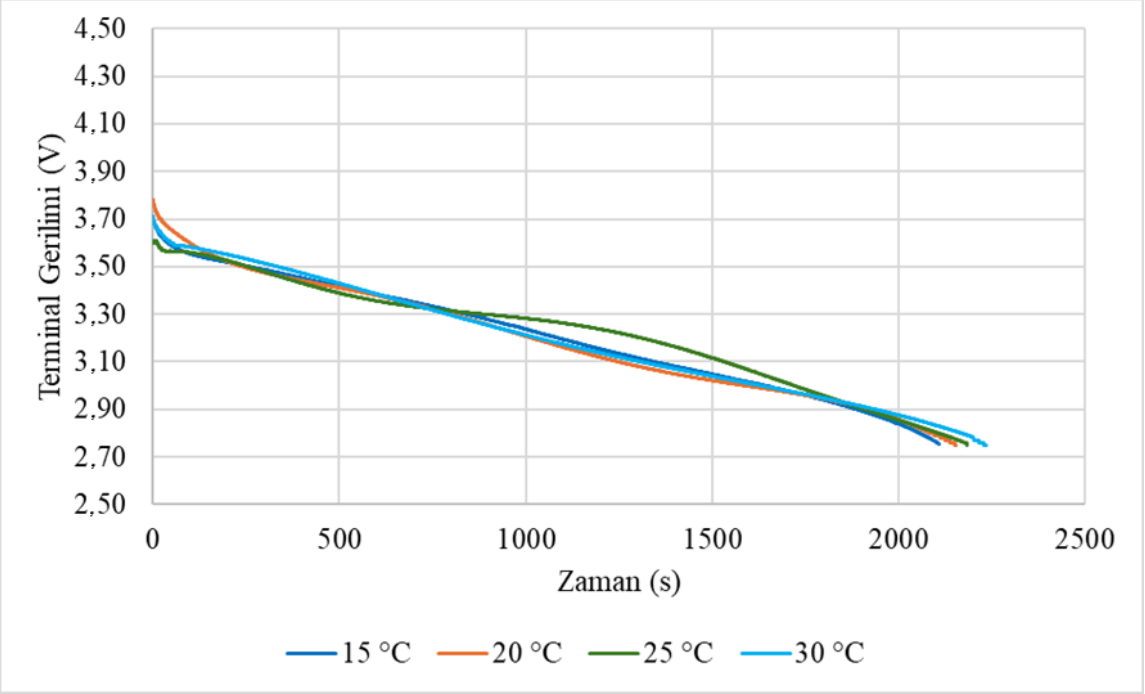
Şekil 4.5. Hücrenin 0,5 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi



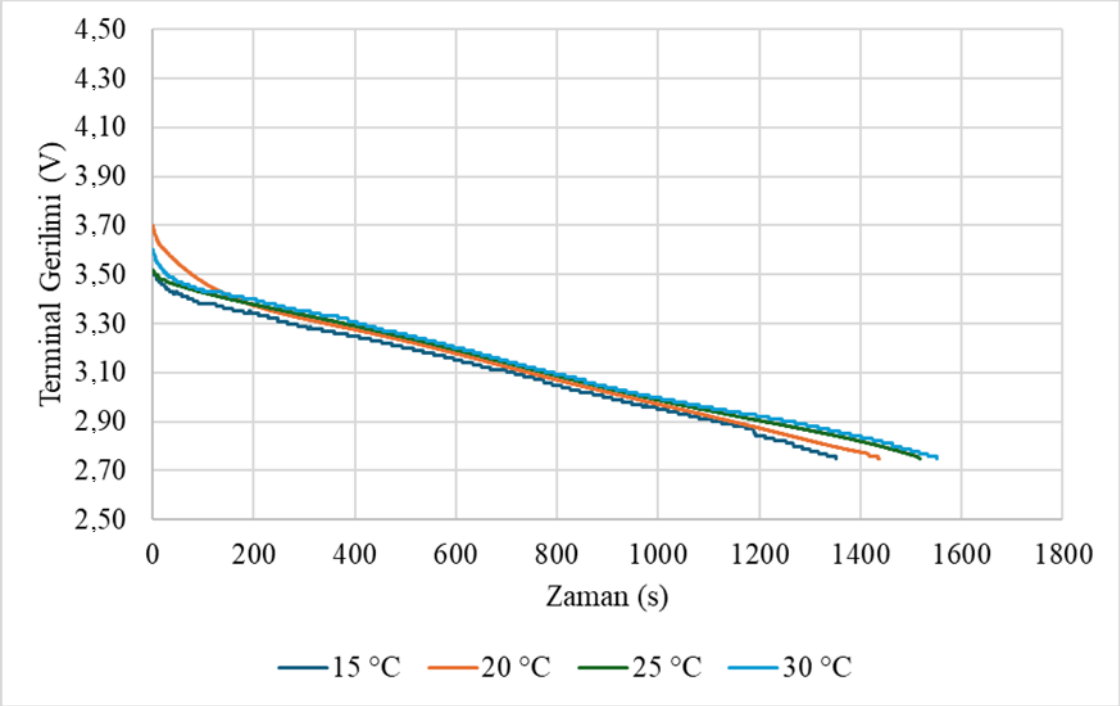
Şekil 4.6. Hücrenin 0,75 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi



Şekil 4.7. Hücrenin 1 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi



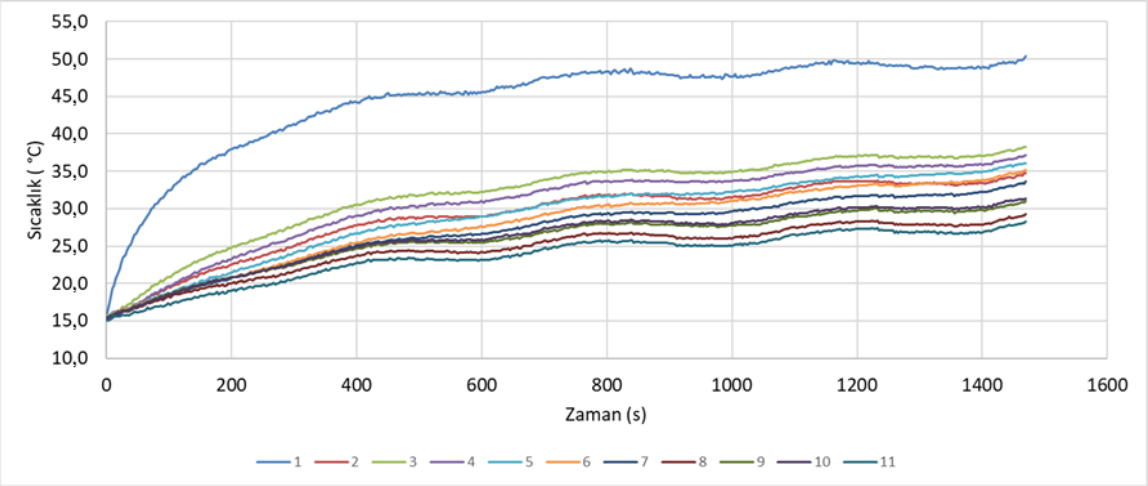
Şekil 4.8. Hücrenin 1,5 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi



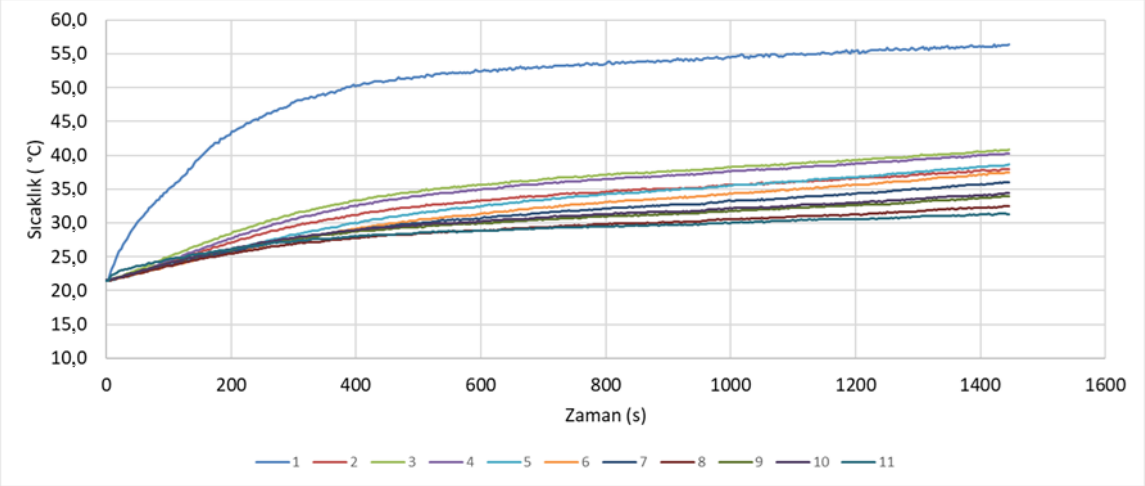
Şekil 4.9. Hücrenin 2 C-rate sabit akım deşarjında sıcaklık değişiminin hücre terminal gerilimine etkisi

Şekil 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9'da deşarj akımının sabit değeri için sıcaklık değişiminin terminal gerilimine etkisi araştırılmıştır. Buna göre aynı deşarj akımı için sıcaklığın artışına bağlı olarak hücrenin tam deşarj olma süresi artmaktadır. Bu durum hücre kapasitesini artıran bir unsurdur. Şekil 4.9 incelendiğinde deşarj akımının sabit değeri için terminal gerilimi bataryanın elektriksel gücünü belirlemektedir, böylece dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda bu değerin en yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Hücrenin düşük SOC değerine karşılık sıcaklıktaki artış iç direncin azalmasına neden olmaktadır. Böylece deşarjın son aşamasında gerilim düşüşü sıcaklığın daha yüksek değerinde daha az gerçekleşmektedir. Ancak bu sonuçların belirlenen sıcaklık aralığı için geçerli olduğu, daha yüksek sıcaklıklara çıkılmasının hücre çalışma sıcaklığı aralığından uzaklaşılması anlamına geldiği bunun da batarya sisteminin güvenliğini etkilediği unutulmamalıdır. Tüm akım değerleri için belirlenen sıcaklık aralığının ideal koşullar arasında bulunması nedeniyle gerilimin yakın değerler alması beklenen bir durumdur. Genel itibariyle sıcaklık etkisinin anlamlı olduğu aralık deşarjın son aşamasıdır. Dolayısıyla batarya yönetim sistemi tasarımında deşarj akımının yüksek, hücre şarj doluluk oranının düşük olduğu aralık en kötü koşulların belirlenmesinde kullanılabilir.

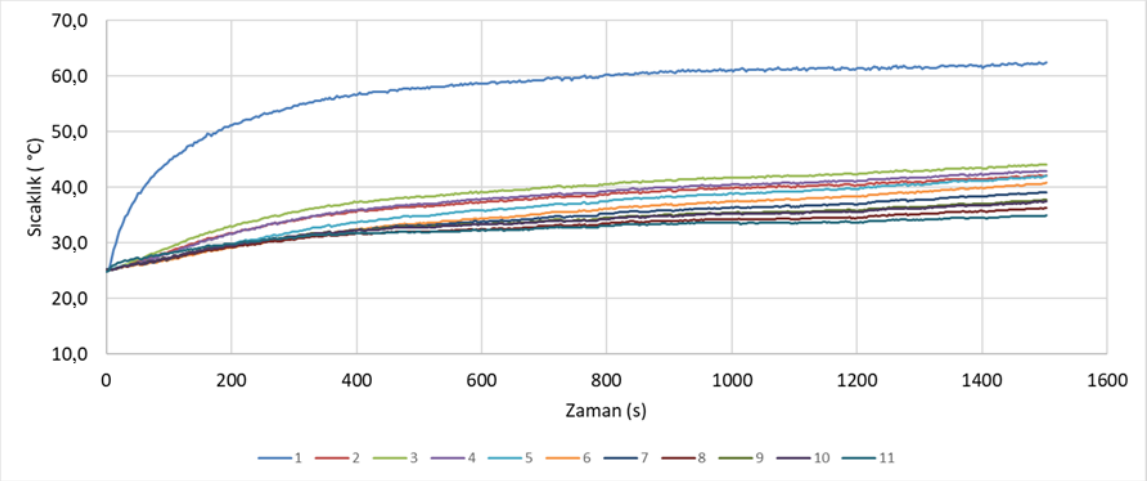
Deneysel çalışma sırasında hücre sıcaklığındaki değişimler de termal kamera aracılığıyla kayıt altına alınmıştır. Bu çalışmada hücrenin en zorlu koşulu olarak görülebilecek 2 C-rate akım için çeşitli ortam sıcaklıklarındaki hücre yüzeyindeki noktaların sıcaklıkları aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Her bir grafikte 1'den 11'e kadar isimlendirilen eğriler Şekil 3.15'te belirtilen hücre yüzeyindeki noktaların sıcaklık değişimlerini ifade etmektedir.



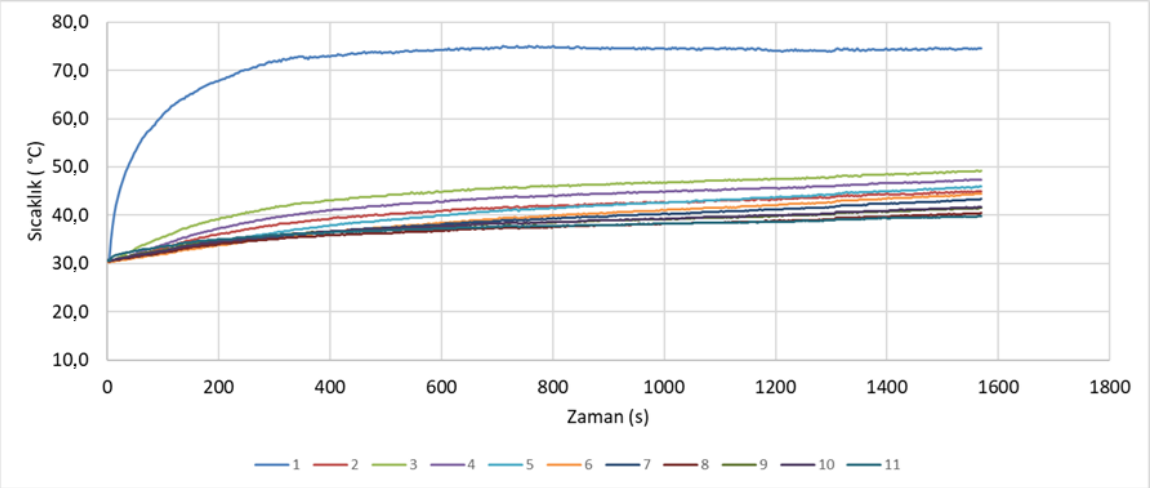
Şekil 4.10. 15 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



Şekil 4.11. 20 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



Şekil 4.12. 25 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri



Şekil 4.13. 30 °C dış ortam koşulunda 2 C-rate akım uygulandığında hücre yüzeyindeki noktalarda sıcaklık değişim eğrileri

Şekil 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13 incelendiğinde en yüksek sıcaklık değerinin katot tabının yer aldığı 1 noktası çevresinde olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak diğer noktalardaki sıcaklık değerleri birbirine yakın sonuçlar alırken, en düşük değer anot tabı bölgesinde yer alan 11 numaralı noktada gözlemlenmiştir. 30 °C ortam sıcaklığında 1 numaralı noktada sıcaklık 70 °C değerini geçmiştir. Ayrıca hücre yüzeyindeki sıcaklığın maksimum ve minimum değerleri arasında yaklaşık 35 °C'lik bir fark oluşmuştur. Bu

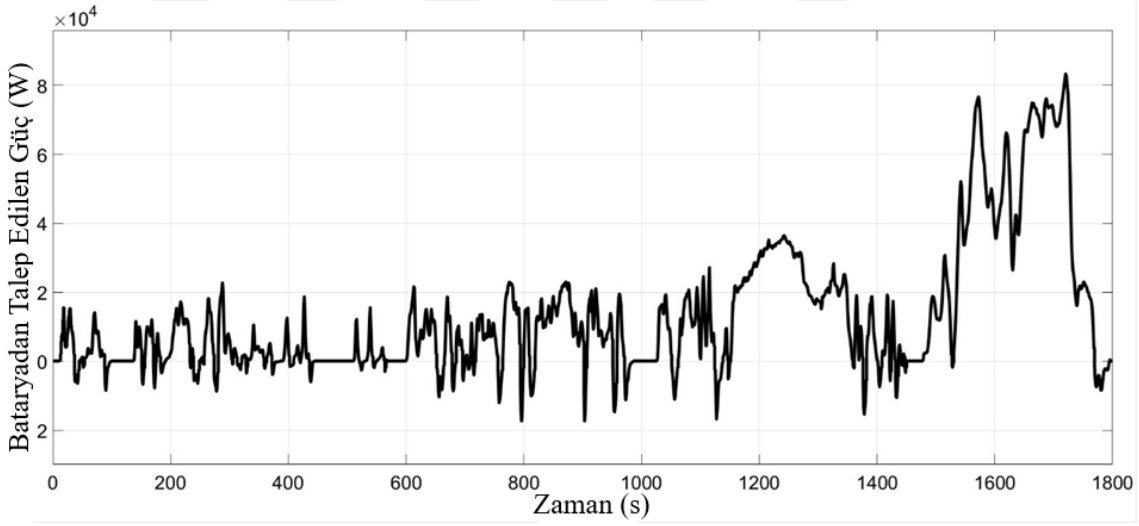
sebeple batarya soğutma sistemi tasarımlarında katot tabı ve çevresi performans araştırması bakımından dikkate alınmalıdır.

4.2. Geliştirilen Elektro-Termal Modelin Sonuçları

Bu bölümde hücrenin dinamik davranışını incelemek üzere geliştirilen elektro-termal modelin WLTP sürüş çeviriminde hareket eden araç için taşıt dinamiği, elektriksel ve ısıl alt modellerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

4.2.1. Elektrikli Taşıt Dinamiği Modeli Sonuçları

Elektrikli taşıt dinamiği alt modeli tarafından Çizelge 3.1'de özellikleri paylaşılan taşıt için WLTP sürüş çevriminde bataryadan talep edilen güç Şekil 4.14'teki gibi değişim göstermektedir.



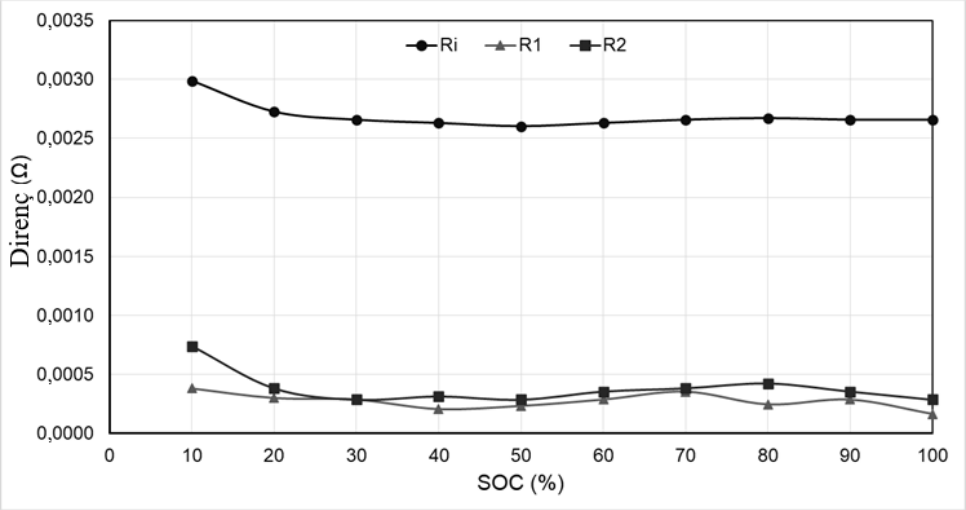
Şekil 4.14. WLTP sürüş çevriminde bataryadan talep edilen gücün değişim eğrisi

Bataryadan talep edilen gücün pozitif değerleri için hücreden akım çekilirken, negatif değerler rejeneratif frenleme sebebiyle bataryanın şarj edilmesini sağlamaktadır. Değişim eğrisi bu parametrenin hesaplanmasında dinamik değişken olan WLTP sürüş çevriminin hız profili ile uyum halindedir. Düşük hız bölgesinde hızlanma ve yavaşlamalar fazla olup bu durum grafiğe güçteki salınımlar olarak yansımıştır. Ayrıca bu bölümde aracın

hareketsiz olarak durduğu zaman aralıkları da bulunmaktadır. Orta hız bölgesinde de hızlanma ve yavaşlama sıkça gerçekleşmiş olup düşük hız bölgesine göre daha yüksek hızlara çıkıldığından rejeneratif frenlemenin etkisi bu bölümde daha fazla olmuştur. Yüksek hız bölgesinde önceki iki bölüme göre hızda artış gerçekleşirken geçen zamanın çoğunda araç hızlanma eğiliminde olmuştur. WLTP sürüş çevriminde belirtilen dört hız bölgesine karşılık talep edilen güç, en yüksek değerlerini otoyol sürüşünün temsil edildiği son zaman adımlarında almıştır. Bu durum, güce bağlı olarak elektriksel ve ısıl özelliklerin en büyük değişiminin bu aralıkta olacağını göstermektedir.

4.2.2. Elektrik Modeli Sonuçları

Elektriksel model, dinamik sürüş çevrimi ve koşulları altında elektriksel parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için ikinci dereceden eş değer devre modeli temel alınarak geliştirilmiştir. Bu modelin bileşenlerinin değerleri çeşitli sıcaklıklarda gerçekleştirilen HPPC testleri ile hesaplanmıştır. Şekil 4.15'te direnç elemanlarından R_i, R_1 ve R_2'nin SOC'a bağlı olarak aldığı değerler ifade edilmiştir.

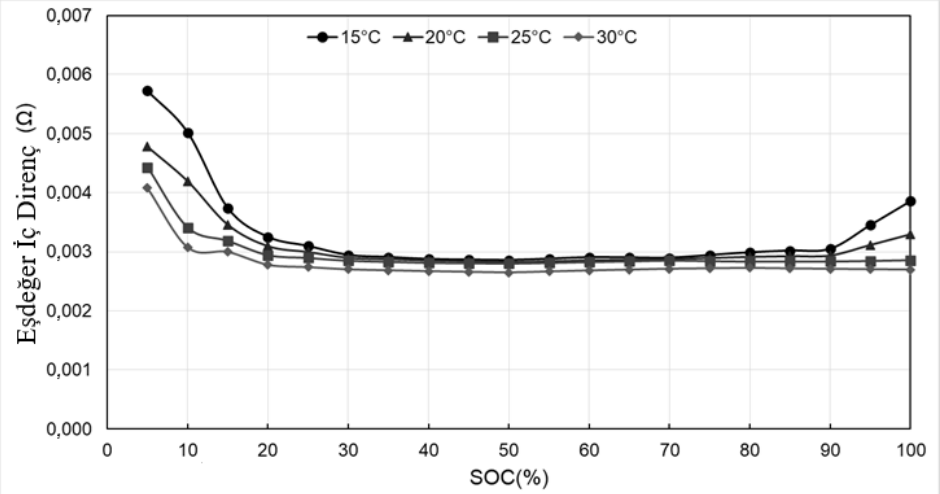


Şekil 4.15. Çeşitli SOC değerine karşılık eşdeğer devre modelini oluşturan bileşenlerin değerlerinin değişimi

Buna göre, hücre eş değer iç direncine en büyük etkinin ohmik direnç olarak ifade edilen R_i tarafından sağlandığı anlaşılmıştır. Hızlı ve yavaş dinamiklerin temsil edildiği RC

kollarında yer alan R_1 ve R_2 dirençlerinin ise birbirine yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu değerler hücre şarj doluluk oranına bağlı olarak değişkenlik göstermekte olup en büyük direnç değerlerinin tam deşarj durumuna yakın olan %10 SOC'da gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum sabit akım deşarj testlerinde, tam deşarja yakın zaman adımlarında terminal gerilimindeki ani azalışların gerçekleşmesini açıklayan bir olgudur.

Batarya hücresinin elektriksel davranışını etkileyen parametrelerin başında sıcaklık gelmektedir. Hücrenin eş değer iç direncinin sıcaklık ve SOC'a bağlı değişim eğrileri Şekil 4.16'de sunulmuştur.

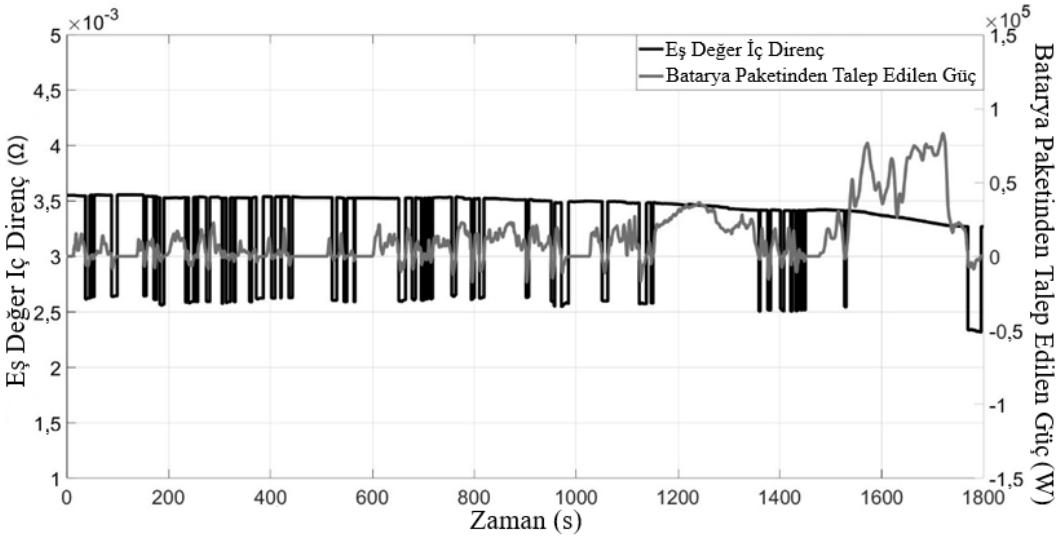


Şekil 4.16. Çeşitli sıcaklıklarda ve SOC değerlerinde eşdeğer iç direncin değişimi

Buna göre yukarıdaki grafikten, sıcaklıktaki artışın eş değer iç direnci azaltan bir unsur olduğu ve bunun etkisinin düşük şarj doluluk oranında çok daha belirgin hale geldiği anlaşılmaktadır. Bu durum, sıcaklığın elektrolit ve elektrotların iyonik iletkenliği ve hücre içindeki kimyasal reaksiyon hızı üzerindeki güçlü etkisi ile açıklanabilir. Buna ek olarak, sıcaklığın sabit değeri için SOC'daki değişimlere bağlı olarak eş değer iç direncin tespit edilen maksimum ve minimum değerleri arasında yaklaşık 2 katlık bir fark bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, %5'in altındaki SOC değerleri hesaplamalara dahil edilmemiştir. İlgili grafik incelendiğinde, her bir sıcaklık değeri için eş değer

direncin maksimum değeri %5 SOC durumunda, en küçük değeri ise %50 SOC'da kaydedilmiştir. Şekil 4.15 ve 4.16'daki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, 30 °C'de elde edilen verilerde eş değer iç direnç ile ohmik direncin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, ohmik direnç hücrenin elektriksel davranışını tanımlayan en önemli parametrelerin başında gelmektedir ve bilindiği üzere bu parametre hücre terminal gerilimindeki ani artış ve azalışları temsil etmektedir.

Eş değer iç direnç değerinin SOC ve sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterdiği belirtilmiştir. Dolayısıyla taşıtın WLTP sürüş çevrimi ile seyri sırasında bu değerin dinamik olarak değişeceği anlaşılmaktadır. Şekil 4.17'de taşıtın sürüş esnasında iç direncindeki değişim grafiği bulunmaktadır. Buna göre grafiğin sol ekseni eş değer iç direnç için skalayı belirtmekte olup bu parametrenin değişimi siyah renkli eğri ile temsil edilmiştir. Grafiğin sağ ekseni ise bataryadan talep edilen gücün skalası olup bu değerin değişimi gri renkli eğri ile açıklanmıştır.

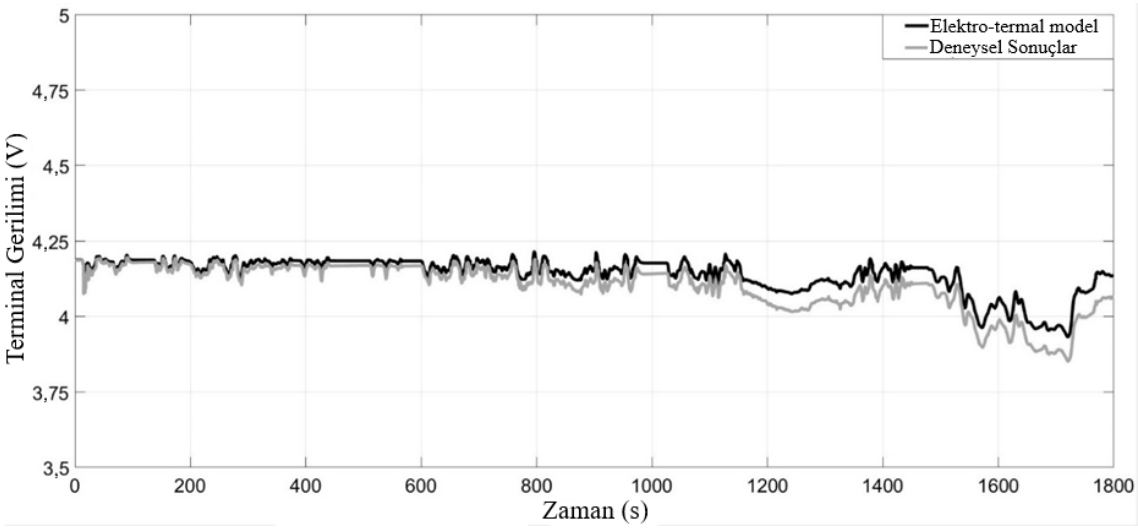


Şekil 4.17. WLTP sürüş çevrimi sırasında hücre iç direncinin zaman göre değişimi

Bu çalışma kapsamında şarj ve deşarj durumları için eş değer devre modelini oluşturan bileşenlerin değerleri şarj ve deşarj süreçleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ayrıca bataryadan talep edilen gücün negatif değerlerinin şarj sürecini, pozitif değerlerinin deşarj sürecini ifade ettiği önceki bölümlerde belirtilmiştir. Dolayısıyla eş değer iç direnç

değerinin değişimi incelendiğinde aniden gerçekleşen artış ve azalışların sürüş çevriminin hız profiline bağlı olarak şarj ve deşarj iç dirençlerine dinamik olarak geçişi gösterdiği anlaşılmaktadır. Yüksek enerji yoğunluklu ve kapasiteli kese tipi lityum-iyon batarya hücresinin deşarj direnci değerlerinin şarj iç direnci değerlerine göre yaklaşık olarak %40 daha büyük olduğu bu çalışmadan çıkarılan bir diğer sonuçtur. Eş değer iç direnç değerinin değişimi WLTP sürüş çevrimi sırasında talep edilen güçle orantılı olarak değişmekte olup, çevrimin yavaş ve orta hız bölümlerinde bu parametrede önemli bir değişikliğin gözlemlenmediği, yüksek hız bölgesinde iç dirençte düşüşün yaşandığı, ekstra yüksek hız bölgesinde ise düşüşün artarak devam ettiği görülmüştür. Taşıtın çevrime başlangıç anında şarjının tam dolu olduğu kabul edildiğinden ve hareketi sırasında SOC değeri azalacağından Şekil 4.16'de verilen sonuçlara paralel olarak çevrim boyunca eş değer iç dirençte düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca hücrenin çalışması sırasında ısı üretimi meydana gelmekte ve sıcaklıkta artış gerçekleşmektedir. Dolayısıyla bu durum eş değer iç dirençte düşüşe sebep olmuştur.

İç direnç değerlerinin yanı sıra geliştirilen modelden elde edilebilen bir diğer önemli elektriksel parametre terminal gerilimidir. Şekil 4.18'te WLTP sürüş çevrimi sırasında terminal geriliminin zamana bağlı değişiminin geliştirilen elektro-termal model ve deneysel çalışma sonucu elde edilen değerleri yer almaktadır.



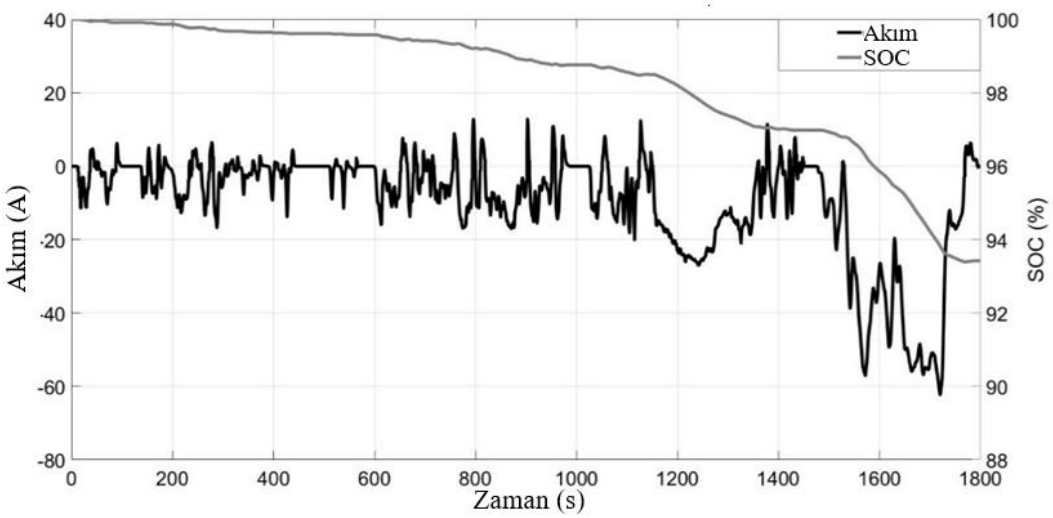
Şekil 4.18. WLTP sürüş çevrimi sırasında terminal geriliminin zamana göre değişiminin geliştirilen model ve deneysel çalışma için sonuçlarının karşılaştırılması

İlgili grafikte siyah renkli eğri elektro-termal model sonucunu, gri renkli eğri deneysel çalışma verisini temsil etmektedir. Sonuçlar, geliştirilen modelin batarya hücresinin gerçek şartlardaki terminal gerilimi değişim karakteristiğini ve değerlerini başarılı bir şekilde yansıttığını kanıtlamaktadır. Dahası, bu iki verinin karşılaştırılması ve matematiksel model verisinin doğrulanması için regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve R^2 değeri 0,99 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, elektro-termal modelin yüksek doğrulukla hücrenin terminal gerilimini tahmin edebildiğini göstermektedir. Ayrıca, geliştirilen model en kötü durum olarak WLTP sürüş çevrimi sırasında bu parametreyi %2 hata ile tespit edebilmeyi başarmıştır.

Bu modelin önemli bir katkısı da verilen taşıt özellikleri, batarya elektriksel bağlantı konfigürasyonu, sürüş çevrimi hız profili ve ortam şartları için hücreye uygulanan akım profilini hesaplamasıdır. Şekil 4.19'da siyah renkli eğri ile WLTP sürüş çevrimi boyunca batarya hücresine uygulanan akım profili yer almaktadır. Grafiğin sol ekseni akım skalasını belirtmektedir. Buna göre sürüş çevrimi boyunca hız profiline de bağlı olarak şarj ve deşarj süreçleri arasında dinamik olarak değişen akım değeri, bataryadan talep edilen güce paralel sonuçlar göstermiştir. Çevrimin sonuna doğru açık devre gerilimindeki ve eş değer iç direnç değerindeki düşüş ile talep edilen güçteki artış akımın en yüksek değerlerinin bu bölümde görülmesini sağlamıştır. Ancak WLTP sürüş çevrimi sırasında akımın maksimum değerinin 1 C-rate'e yakın olduğu, dolayısıyla bu çevrim boyunca düşük akım seviyelerinde aracın çalıştığı gözlemlenmiştir.

Batarya hücresinin elektriksel davranışının araştırılmasında incelenen bir diğer önemli parametre şarj doluluk oranı olan SOC'dur. WLTP sürüş çevrimi boyunca SOC'daki değişim eğrisi Şekil 4.19'da sunulmuştur. Grafiğin sağ ekseni bu parametrenin skalasını göstermektedir. Şarj doluluk oranı doğrudan akım ile orantılı olduğundan bu iki elektriksel özelliğin değişimi bir arada verilmiştir. Hücrenin SOC durumu model tarafından, HPPC testi gerçekleştirilerek elde edilen SOC-Açık devre gerilimi diyagramı kullanılarak hesaplanmaktadır. Buna göre, başlangıçta hücre şarjının tam dolu olduğu yani SOC'un %100 olduğu kabul edilmiştir. WLTP sürüş çevrimi sonunda ise şarj doluluk oranı %93,42 olarak kaydedilmiştir. İlgili grafik incelendiğinde SOC değerindeki düşüşün WLTP çevriminin sonunda gerçekleştiği görülmektedir. Bu da hücreden çekilen

akımın ekstra yüksek hız bölümünde en yüksek değerlere ulaşması ve çekilen akımın sürekli olması ile açıklanabilir. Ayrıca SOC'u etkileyen bir diğer unsur hücre kapasitesindeki değişimdir. Hücre kapasitesi, sıcaklık ve çekilen akıma bağlı olarak değişkenlik arz etmektedir. WLTP sürüş çevrimi sırasında hücre sıcaklığındaki artış Bölüm 4.2.3'te bahsedileceği üzere düşük seviyelerde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla çevrimin son kısmında gerçekleşen hücreden çekilen akımdaki artış SOC'daki bu düşüşün asıl sebebi olmuştur. Geliştirilen model sonucunun doğruluğunun araştırılması amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışma WLTP sürüş çevrimi sonunda SOC değerinin %93 olduğunu göstermiştir. Bu durum elektro-termal modelin, dinamik koşullar altında hareket eden taşıtın bataryasının yüksek doğrulukla SOC tahminini gerçekleştirebildiğini kanıtlar niteliktedir.



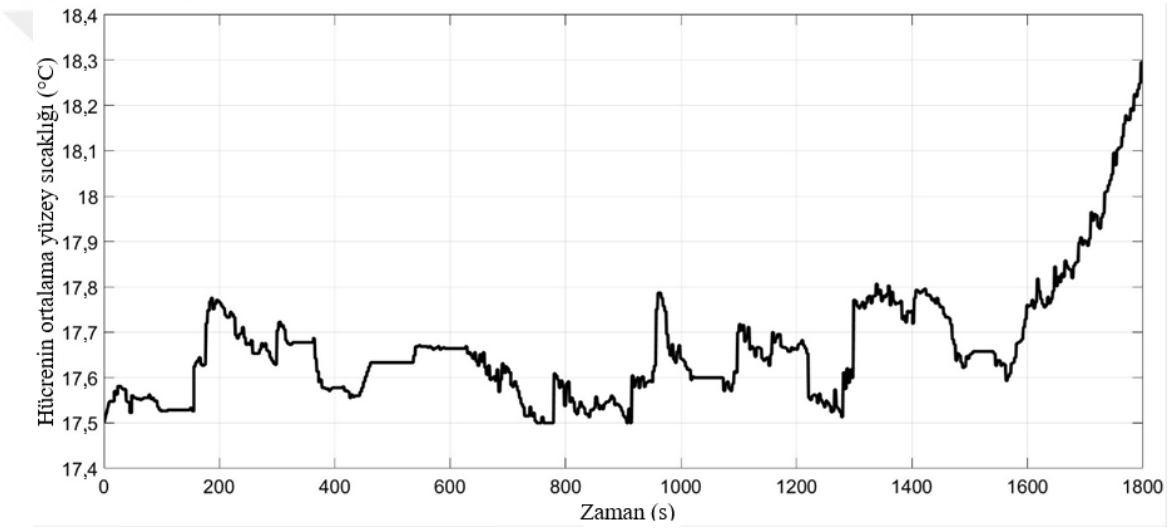
Şekil 4.19. WLTP sürüş çevrimi için akım profili ve SOC değişimi eğrileri

Sonuç olarak, geliştirilen elektrotermal modelin çıktıları gözlemlendiğinde WLTP sürüş çevriminde elektriksel parametrelerdeki en büyük değişimlerin yüksek hız bölgesinin temsil edildiği son bölümde gerçekleştiği anlaşılmıştır. Ayrıca incelenen tüm parametreler deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmış ve yüksek doğrulukla model tarafından hesaplanabildiği ortaya çıkarılmıştır.

4.2.3. Isıl Model Sonuçları

Bu bölümde, WLTP sürüş çevrimi sırasında batarya hücresinin dinamik değişen ısıl özellikleri geliştirilen modelin sonuçları olarak sunulmuştur.

Batarya hücresinin sıcaklığı, bir önceki bölümde aktarılan elektriksel davranış incelendiğinde etkisi mühim olan bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Termal kamera kullanılarak deneysel çalışma ile ölçülen WLTP sürüş koşullarında ortalama hücre yüzeyi sıcaklığının zamana bağlı değişimi Şekil 4.20'daki gibi olmuştur.

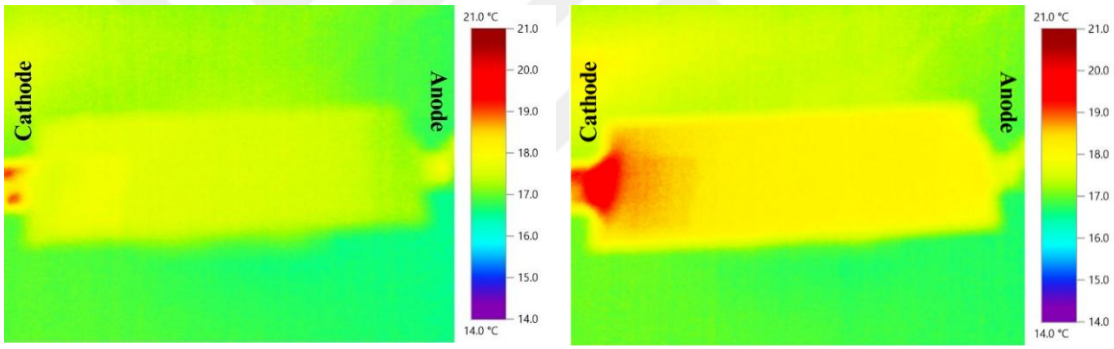


Şekil 4.20. WLTP sürüş çevrimi boyunca hücre yüzeyinin ortalama sıcaklığındaki değişim grafiği

Bu çalışmada hücre yüzeyinde belirlenen tüm noktalardaki sıcaklık değerinin aynı ve dış ortam sıcaklığı olan 17,5 °C'ye eşit olduğu termal denge durumunda teste başlanmıştır. Ortalama sıcaklık değişim grafiği incelendiğinde sonuçların WLTP akım profili ile yakın bir ilişkisi olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda, sıcaklığın en yüksek değerinin bataryadan çekilen akımın en büyük değerinin gözlemlendiği çevrimin son aşamasında gerçekleştiği ifade edilebilir. Ayrıca akımın düşük değerlerinin sıcaklık üzerindeki etkisinin zayıf olduğu anlaşılmaktadır. Buna ek olarak akımdaki salınımların sıcaklığa etkisi minimal düzeyde olup, sıcaklık artışına sebep olan asıl unsurların akımın büyüklüğü ve sürekliliği olduğu tespit edilmiştir. WLTP sürüş çevrimi başlangıcında 17,5

°C olan ortalama hücre yüzeyi sıcaklığı çevrimin sonunda 18,3 °C'ye ulaşabilmiştir. Bu durumda belirtilen kabul ve koşullar için sıcaklık artışı sadece 0,8 °C olmuştur. Ancak sıcaklık artışının hücre SOC durumu ve dış ortam sıcaklığı parametrelerine bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Yani WLTP sürüş çevriminin başlangıcında şarj doluluk oranı düşük seviyelerde olsaydı iç direnç değerlerinde artış gözlemlenecektir ki bu durum sıcaklıkta artışa sebep olacaktır.

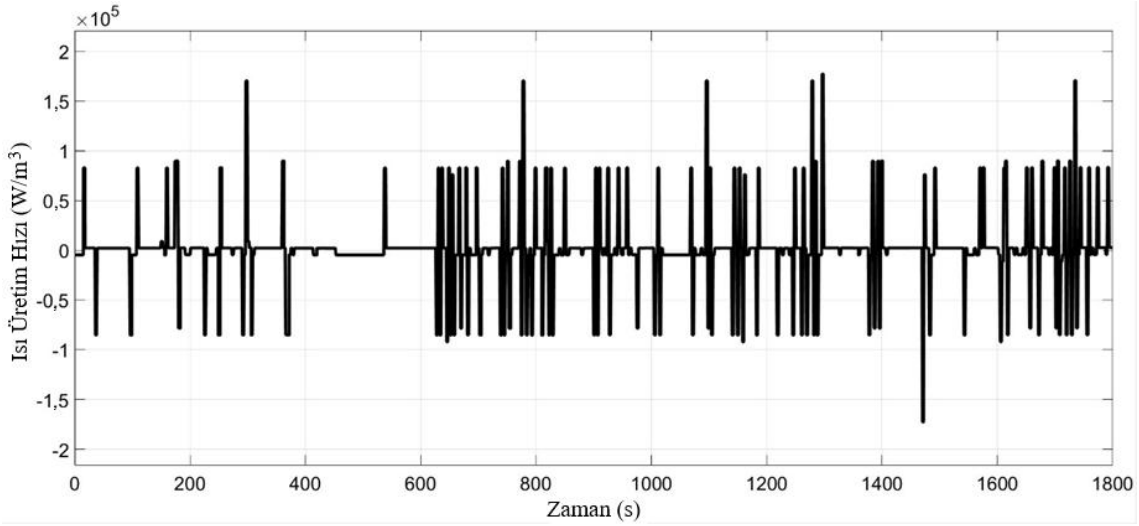
Hücre ortalama yüzey sıcaklığına ek olarak hücrede sıcaklık artışının gerçekleştiği bölgeler termal kamera aracılığıyla gözlemlenmiştir. Şekil 4.21'de WLTP sürüş çevriminin başlangıç ve sonu için hücre yüzeyinin sıcaklık dağılımını gösteren termal kamera görüntüleri paylaşılmıştır. Termal kamera görüntüleri bağlamında hücre yüzeyindeki en yüksek sıcaklık çevrim sonunda katot bölgesi yakınında gözlemlenmiştir.



(A) **(B)**

Şekil 4.21. WLTP sürüş çevrimi sırasında hücre yüzeyi sıcaklık dağılımını gösteren termal kamera görüntüleri. **A)** çevrim başlangıcı, **B)** çevrim sonu

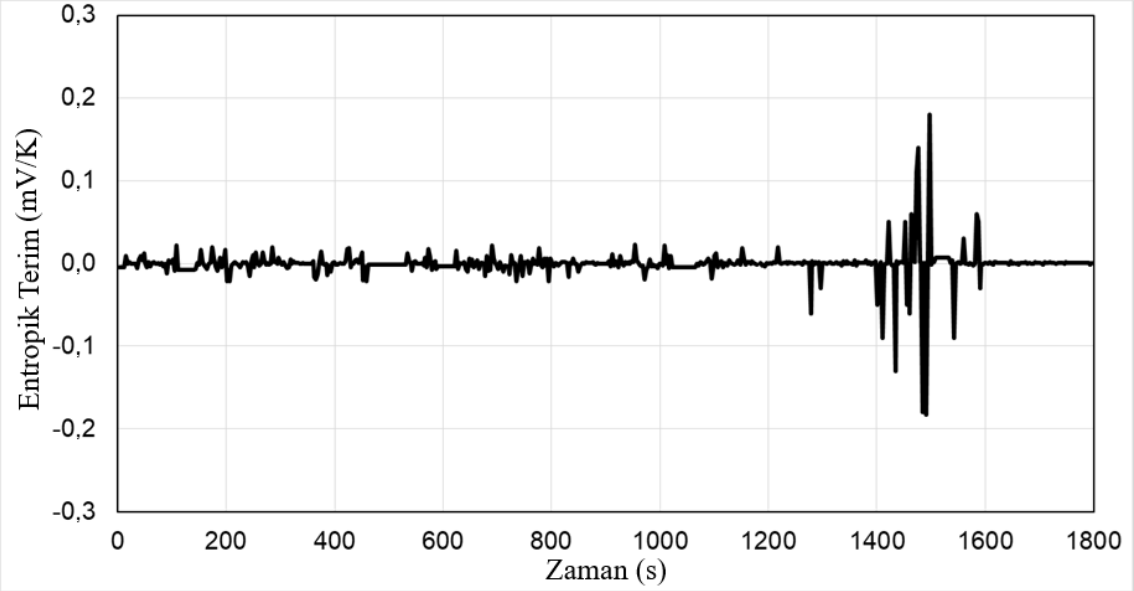
Bilindiği üzere hücrenin çalışması sırasında ısı üretimi meydana gelmekte olup, bu parametrenin sonlu farklar yöntemi ile hesaplanması sonucu zamana göre değişimi Şekil 4.22'de sunulmuştur. Sürüş çevrimi sırasında en yüksek sıcaklık katot bölgesinde olduğundan ilgili grafikte bu konum için ısı üretimi değerleri yer almaktadır.



Şekil 4.22. WLTP sürüş çevrimi sırasında katot bölgesinde ısı üretiminin değişimi

Hücre ısı üretimi; elektriksel parametreler, hücre sıcaklığı ve entropik terim gibi koşullardan etkilenmektedir. Buna göre, grafikteki ani artış ve azalışlar akım ve sıcaklıktaki dalgalanmalar sebebiyle gerçekleşmektedir. WLTP sürüş çevrimi boyunca katot bölgesinde ısı üretiminin aldığı tepe değerler ± 1,75 10^5 W/m^3 olmuştur. Her bir ayrık yüzeydeki ısı üretim değerinin alan ağırlıklı ortalaması alındığında ise hücre yüzeyinin ortalama ısı üretimi değeri 0,32 W olarak hesaplanmıştır. Bu sonucu doğrulamak amacıyla 1 C-rate deşarjda hücre ısıl davranışı araştırılmıştır. Sonuç olarak 73 A sabit akım deşarj durumunda hücrenin ortalama ısı üretim değeri 6 W olarak bulunmuştur. Elde edilen verilerin literatürdeki mevcut çalışmalar ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır.

WLTP sürüş çevrimi boyunca entropik terimde gerçekleşen değişim Şekil 4.23'te yer almaktadır. Çevrim sırasında salınım yaparak değişen bu parametrenin aldığı maksimum değer 0,2 iken minimum değer -0,2 olmuştur. Bilindiği üzere bu değişken şarj doluluk oranı ile doğrudan bağlantılı olup SOC'un düşük değerlerinde sıfırdan uzaklaşma eğilimi göstermektedir. Ancak bu çalışmada seçilen taşıt özelliklerinde WLTP sürüş çevrimi için şarj doluluk oranı sadece %7 azalmıştır. Ayrıca bu düşüş çevrimin son aşamasında etkili olabilmiştir. Dolayısıyla entropik terim çevrimin son aşamasında tepe değerlerini almıştır.

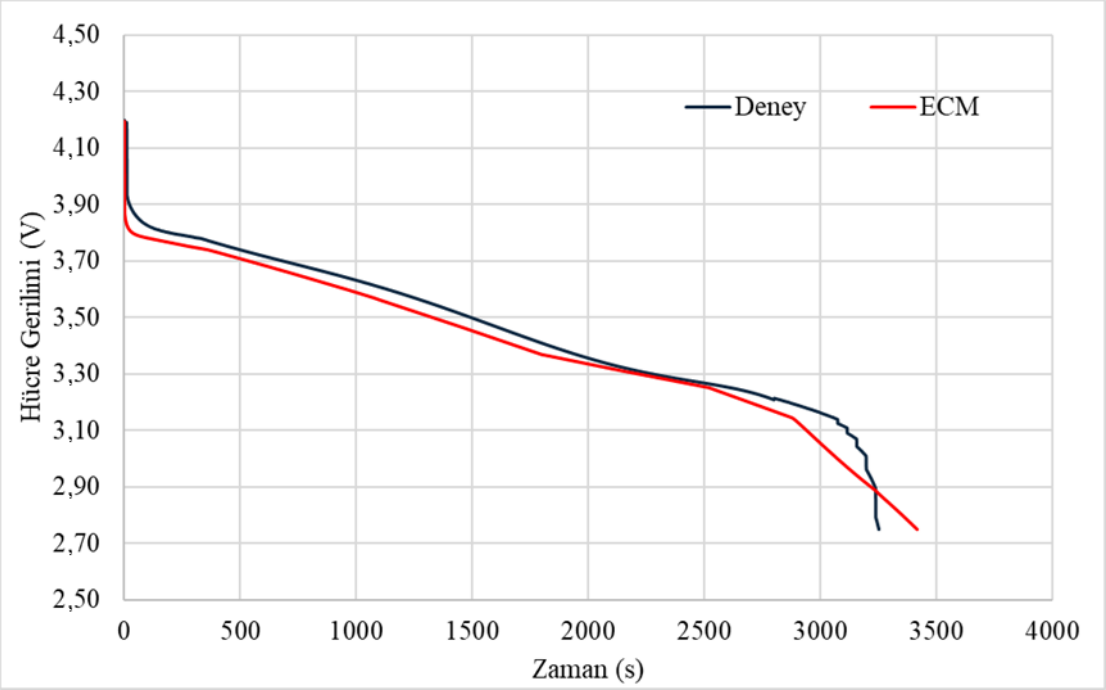


Şekil 4.23. WLTP sürüş çevrimi boyunca entropik terimdeki değişim

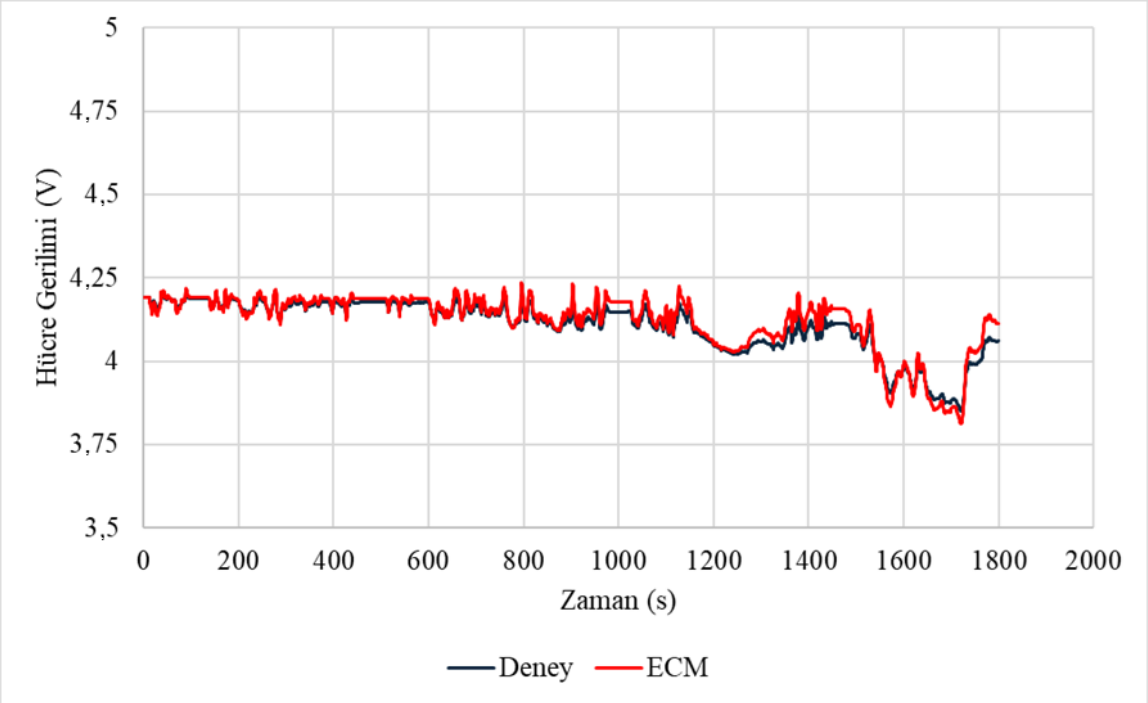
4.3. Hücre Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modeli Sonuçları

Bu bölümde Ansys Fluent yazılımı kullanarak modellenen batarya hücresinin elektriksel ve ısıl özelliklerinin analiz sonuçları sunulmuştur.

Şekil 4.24'te 15°C dış ortam sıcaklığında 1 C-rate sabit akım ile deşarj edilen batarya hücresinin analizi ile deneysel çalışma sonucu elde edilen terminal gerilimindeki değişim eğrileri yer almaktadır. Grafikte kırmızı eğri ECM model tabanlı analizin sonuçlarını, lacivert eğri ise deney sonuçlarını temsil etmektedir. Buna göre, hücre sayısal modelinin gerçek şartlardaki terminal gerilimi değişim karakteristiğini ve değerlerini başarılı bir şekilde yansıttığı anlaşılmaktadır. Sonuçlar, deşarj sürecinin son aşamasına kadar %2'den daha az bir hata ile voltaj değerinin tahmin edilebilir olduğunu göstermektedir. Ancak, son bölümde bu hata oranı %4'lere ulaşmıştır. Ayrıca, hücre deneysel çalışmada modele göre 4 dakika daha erken tam deşarj durumuna ulaşmıştır.



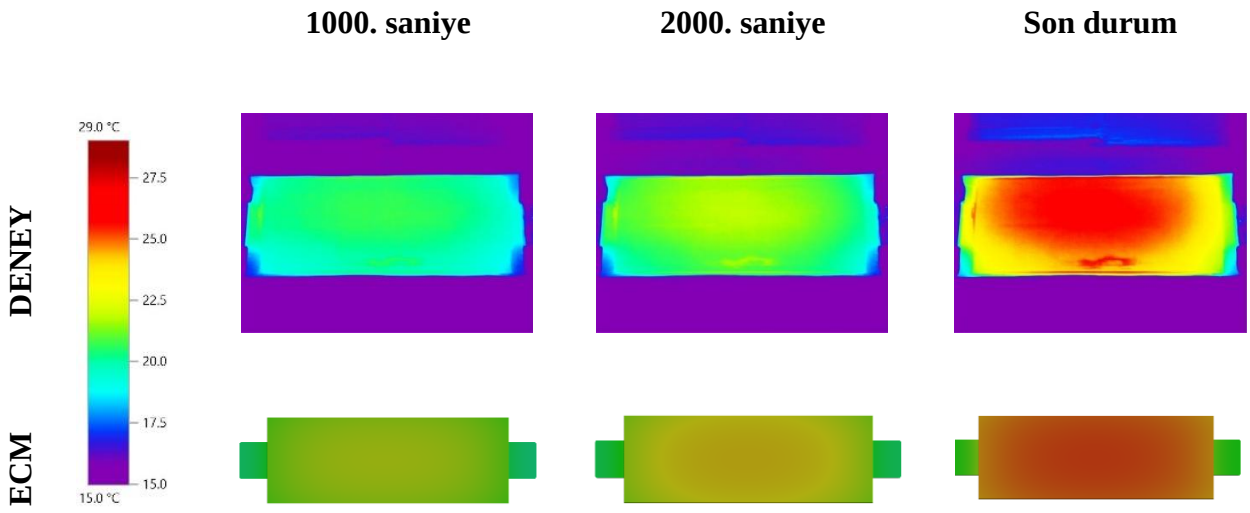
Şekil 4.24. 1 C-rate sabit akım deşarjı sıransında terminal gerilimindeki değişimin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları



Şekil 4.25. WLTP sürüş çevrimi boyunca terminal gerilimindeki değişimin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları

WLTP sürüş çevrimi koşullarında hareket eden aracın terminal gerilimindeki değişimin analiz sonucu ile deneysel çalışma verisi Şekil 4.25'te olduğu gibi kıyaslanmıştır. Grafikte kırmızı eğri ile ECM tabanlı sayısal model sonucu, lacivert eğri ile deneysel çalışma verisi temsil edilmiştir. Sayısal model verisinin doğrulanması için regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve R^2 değeri 0,99 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, HAD modelinin yüksek doğrulukla hücre terminal gerilimini tahmin edebildiğini göstermektedir. Bununla beraber yapılan analiz ile WLTP sürüş çevrimi sırasında voltaj değerinin en kötü durum olarak %2 hata ile tespit edilebildiği anlaşılmıştır.

Batarya sisteminin güvenliğinin sağlanması, performans açısından elektriksel parametrelerin istenilen değerlerde elde edilmesi amacıyla hücre ısıl davranışının doğru bir şekilde kestirimi önem arz etmektedir. Şekil 4.26'da deneysel çalışma sonucunda 1 C-rate sabit akım değeri ile deşarj edilen hücrenin sıcaklık dağılımını gösteren termal kamera görüntüsü ile analiz sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı görseli bir arada sunulmuştur. Kıyaslamanın doğru bir şekilde yapılabilmesi için şekilde yer alan tüm görüntülerin skalası aynı olarak alınmıştır.

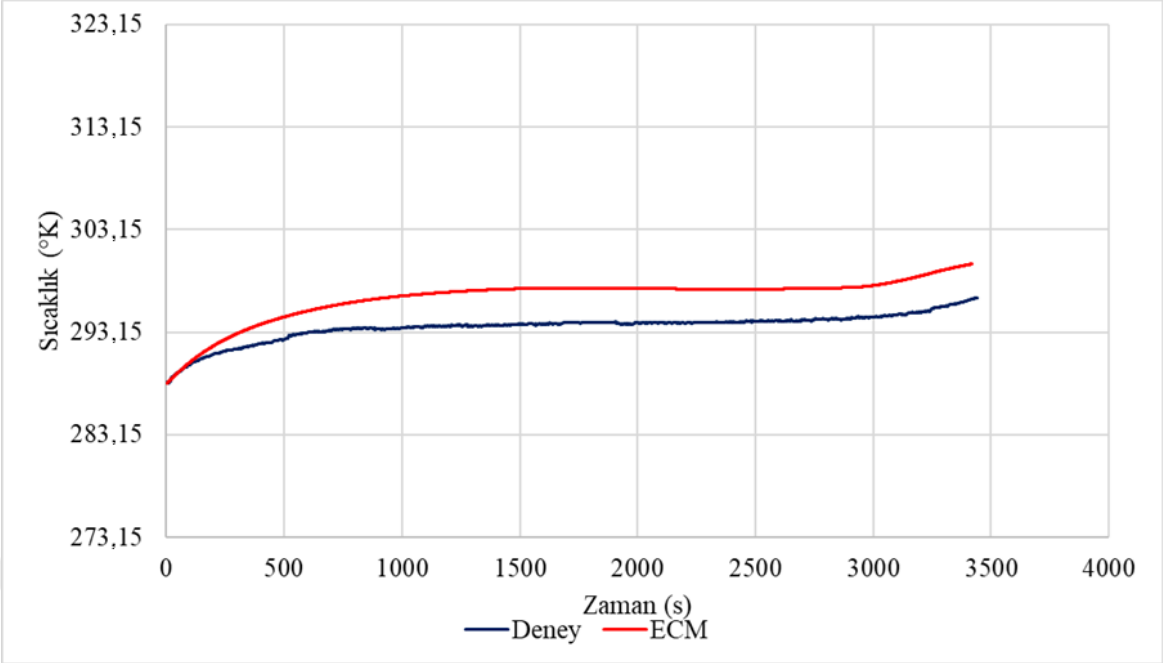


Şekil 4.26. 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında zamana bağlı olarak hücre yüzeyindeki sıcaklık dağılımının değişiminin deneysel çalışma ve sayısal model için karşılaştırılması

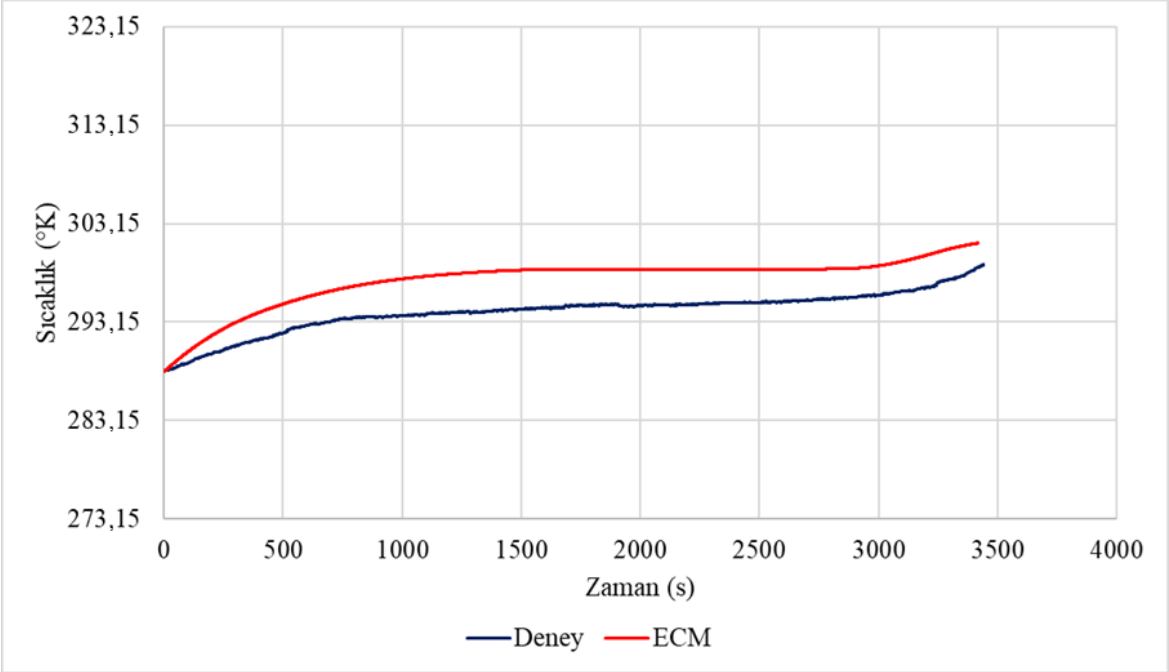
Şekil 4.26'da yer alan hücre yüzeyi sıcaklık dağılımı incelendiğinde HAD modeli ile batarya hücresinin ısıl özelliklerinin doğru bir şekilde tahmin edilebildiği anlaşılmaktadır.

Buna göre deşarj sürecinin 1000. saniyesinde hücre sıcaklığının en yüksek değeri 24,53 °C bulunurken, 2000. saniyede bu değer yaklaşık 1 °C'lik bir artışla 25,33 °C'ye yükselmiş ve deşarjın sonunda 28 °C'ye çıkmıştır. Önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere SOC'un en düşük değerlerinde batarya hücresinin eş değer iç direnci en yüksek değerlerini almaktadır. Bu sonuca paralel olarak en yüksek sıcaklık değerleri hücrenin tam deşarj olma durumuna geçişi sırasında açığa çıkmıştır.

Batarya hücresinin sıcaklık dağılımı noktasal bazda da incelenmiştir. Şekil 3.15'te belirtilen noktalar dikkate alındığında en yüksek sıcaklık değerleri 1 ve 6 numaralı noktalarda meydana gelmektedir. Bu nedenle deneysel çalışma ile sayısal model sonuçlarının kıyaslanmasında bu iki noktadaki durumlar dikkate alınmıştır. Şekil 4.27'de 1 C-rate sabit akımı ile deşarj sürecinde katot tabının olduğu yere yakın bölgeyi temsil eden 1 noktasındaki sıcaklık değerinin değişiminin sonuçları yer almaktadır. Buna göre sayısal model ile deneysel çalışmadan elde edilen verinin karakteristikleri doğru bir şekilde tespit edilebilmiştir. Her iki eğride de deşarjın başlangıcında sıcaklıkta artış gözlemlenmiş, 1000. saniyeden sonra bu parametre neredeyse sabit kalmış, 3000. saniyeden sonra ise yeniden artışa geçmiştir. Sıcaklığın maksimum değerine ulaştığı deşarjın son aşamasında sayısal modelde 299,79 °K değeri okunurken, deneysel veriden 296,45 °K sonucuna ulaşılmıştır. Bu iki eğri arasında maksimum 3,5 °C'lik bir fark ölçülmüştür. Aynı zamanda sıcaklığın değişimini gösteren bu eğri, araç üreticilerinin batarya ömrünü artırdığı için önerdiği %20-%80 SOC aralığında bataryanın çalıştırılması tavsiyesinin arkasındaki bir gerçeği de gözler önüne sermektedir. Grafik incelendiğinde bu aralıkta hücre yüzeyindeki sıcaklığın neredeyse değişmediği anlaşılmaktadır. Bu durum elektriksel parametrelerdeki sonuçlar incelendiğinde de gerek iç dirençlerin en küçük değerlerini alması, gerekse de hücre terminal geriliminin bu aralıkta yatay seyretmesi gibi durumlarda kendini göstermektedir. Dolayısıyla hücrenin belirtilen şarj doluluk oranı aralığında daha güvenli çalışacağı anlaşılmaktadır.



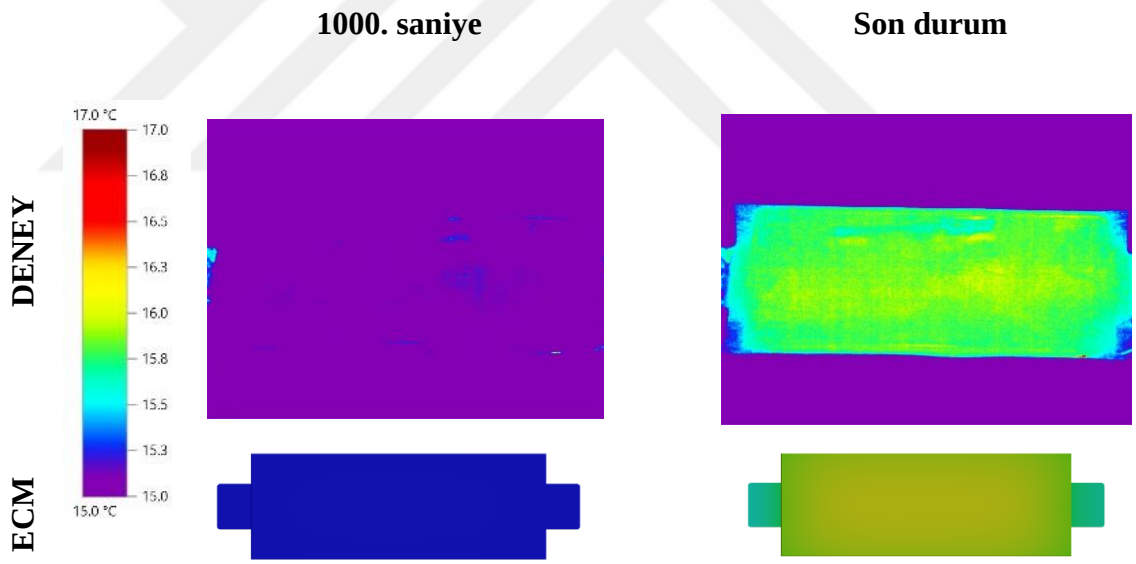
Şekil 4.27. 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 1 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları



Şekil 4.28. 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre yüzeyindeki 6 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları

Şekil 4.28'de 1 C-rate sabit akım deşarjı sırasında hücre merkezinde bulunan 6 numaralı noktadaki sıcaklık değişimi HAD modeli ve deneysel çalışma için karşılaştırılarak sunulmuştur. Buna göre deşarj süreci sonunda bu noktadaki sıcaklık değeri sayısal model aracılığıyla 301.15 °K olarak bulunurken, deneysel çalışma ile 299,05 °K sonucu elde edilmiştir. Tüm süreç düşünüldüğünde ise bu noktadaki sıcaklık maksimum 4 °C'lik bir fark ile hesaplanabilmiştir.

Sabit akım deşarj çalışmalarına ek olarak WLTP sürüş çevrimi için de HAD modeli kullanarak analizler gerçekleştirilmiş ve ısıl özelliklerin değişimi araştırılmıştır. Şekil 4.29'da deneysel çalışma sonucunda WLTP sürüş çevrimi koşullarında hücrenin sıcaklık dağılımını gösteren termal kamera görüntüsü ile analiz sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı görseli bir arada sunulmuştur. Kıyaslamanın doğru bir şekilde yapılabilmesi için şekilde yer alan tüm görüntülerin skalası aynı olarak alınmıştır.

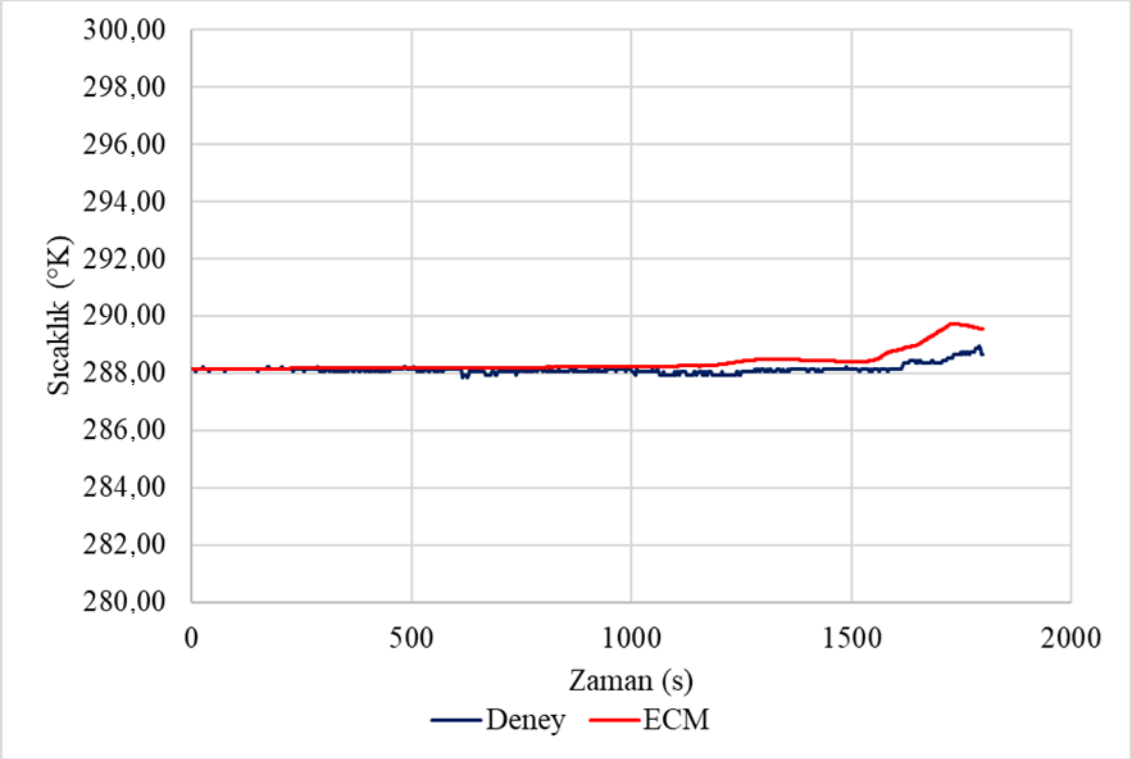


Şekil 4.29. WLTP sürüş çevrimi sırasında zamana bağlı olarak hücre yüzeyindeki sıcaklık dağılımının değişiminin deneysel çalışma ve sayısal model için karşılaştırılması

Şekil 4.29'da yer alan hücre yüzeyi sıcaklık dağılımı incelendiğinde sayısal model ile WLTP gibi dinamik sürüş profillerinde bile batarya hücresinin ısıl özelliklerinin doğru bir şekilde tahmin edilebildiği anlaşılmaktadır. Buna göre çevrimin 1000. saniyesinde hücre sıcaklığı hemen hemen başlangıçtaki değeri kadardır. Önceki bölümlerde ifade

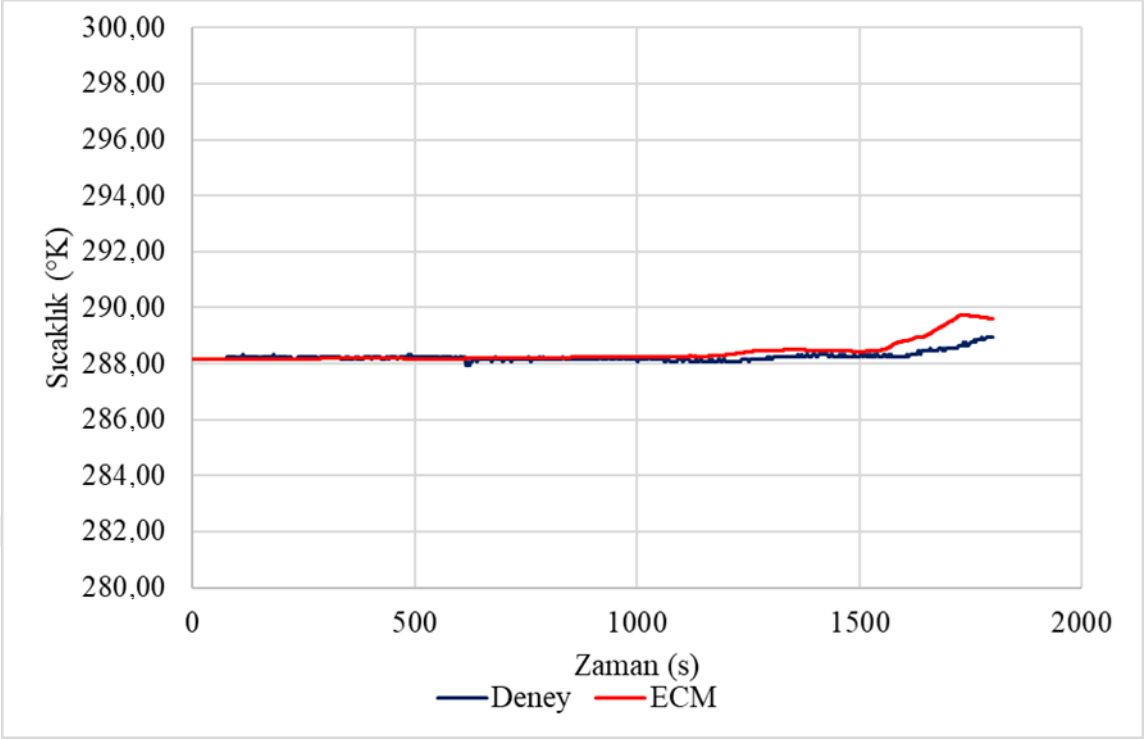
edildiği üzere belirtilen süre içerisinde bataryadan talep edilen güç ve dolayısıyla akım değerleri düşüktür. Çevrimin sonunda ise sıcaklıkta bir artış meydana gelmiştir. Ancak bu artışın mertebesi maksimum 1,7 °C olmuştur. Hücre yüzeyindeki ortalama sıcaklık artışı ise 0,8 °C düzeyindedir. Sayısal modelden elde edilen termal görüntü deney sonucu ile karşılaştırıldığında WLTP sürüş çevrimi gibi koşulların dinamik olarak değiştiği durum için bile doğruluğu yüksek sonuçlar elde edilebilmektedir.

WLTP sürüş çevrimi için sıcaklık değerinin değişimi noktasal bazda incelendiğinde de model sonuçlarının deneysel çalışma ile yakın değerler aldığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.30'da katot tabı bölgesinde yer alan 1 numaralı nokta için sıcaklığın değişimi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.30. WLTP sürüş çevrimi sırasında hücre yüzeyinde bulunan 1 noktasındaki sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları

Belirtilen nokta için sıcaklık değeri değişiminin yüksek tutarlılıkla hesaplanabildiği görülmektedir. Hücre merkezinde bulunan 6 numaralı nokta için sıcaklıktaki değişim deney ve sayısal model sonuçları verilerek Şekil 4.31'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.31. WLTP sürüş çevrimi sırasında hücre yüzeyinde bulunan 6 noktasının sıcaklık değişiminin sayısal model ve deneysel çalışma için karşılaştırmalı sonuçları

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma kapsamında yüksek enerji yoğunluklu ve kapasiteli lityum-iyon kese tipi batarya hücresinin elektriksel ve ısıl özellikleri incelenmiştir. Bunun için elektrikli taşıt dinamiği, elektriksel ve ısıl alt modellerden oluşan elektro-termal matematiksel model geliştirilmiştir. Ayrıca aynı hücre Ansys Fluent yazılımında ECM tabanlı batarya modülü kullanılarak modellenmiştir. Hücrenin hem sabit akım deşarjı hem de WLTP sürüş çevrimi gibi dinamik koşullar altındaki davranışı incelenmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmalar da gerçekleştirilmiş olup modeller ve gerçek durum verileri kıyaslanmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Geliştirilen elektrotermal model, batarya hücresinin terminal gerilimini maksimum % 2 bağıl hata ile tahmin edebilmekte olup regresyon analizi sonucunda R^2 değeri 0,99 olarak elde edilebilmiştir.
- Geliştirilen model kullanılarak WLTP sürüş çevrimi sırasında hücrenin şarj doluluk oranı % 0,45 bağıl hata ile tahmin edilebilmektedir. Buna göre, SOC değeri verilen araç özellikleri için çevrim sonunda % 7 azalmıştır.
- Önerilen model ile ısı üretim hızı ve entropik terim sayısal olarak hesaplanabilmektedir. Buna göre, WLTP sürüş koşullarında batarya hücresinin ısı üretimi 0,32 W olarak bulunmuştur. Ayrıca 1 C-rate sabit akım deşarjı sonucunda 6 W'lık bir ısı üretimi öngörülmektedir.
- HAD modeli kullanılarak terminal gerilimi ve sıcaklık parametreleri gerçek durum karakteristiğine uygun olarak elde edilebilmektedir. Buna göre terminal gerilimi WLTP sürüş çevrimi için en yüksek % 2 bağıl hata ile tahmin edilebilmiştir. Ayrıca regresyon analizi sonucu R^2 değeri 0,99 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, geliştirilen elektrotermal model ile sayısal modelin aynı doğrulukla çalıştığı anlaşılmaktadır. Ancak geliştirilen model ile sonuçlar birkaç dakika içerisinde elde edilebilirken sayısal modelin analizi çok daha uzun vakit almaktadır. Bu durumda elektriksel ve ısıl özelliklerin tahmininde geliştirilen elektrotermal modelin kullanımı tavsiye edilmektedir.
- Eş değer iç direncin en düşük değerlerini alması, sıcaklık değerinin neredeyse sabit kalması nedeniyle hücrenin % 20 - % 80 SOC aralığında güvenle ve optimum performansla çalışabileceği anlaşılmaktadır.

- Bu çalışmada, zıt kutuplu terminallere sahip yüksek enerji yoğunluklu ve kapasiteli lityum-iyon kese tipi batarya hücresinin sabit akım ve dinamik koşullar altındaki elektriksel ve ısıl özellikleri araştırılarak mevcut literatüre katkıda bulunulmuştur.

Sonuç olarak bu çalışma ile hücrenin dinamik ve sabit koşullar altındaki davranışı incelenmiş ve yüksek doğruluğa sahip sonuçlar veren elektro-termal model ve HAD modeli oluşturulmuştur. Böylece gelecek çalışmalarda ısı üretimi verisi kullanılarak bataryanın optimum verimlilikte ve güvenle çalışmasını sağlayacak etkili bir batarya soğutma kanalı geometrisi tasarlanabilecektir. Ayrıca hücre seviyesinde gerçekleştirilen bu çalışma batarya sistemini oluşturan diğer bileşenlerin de dahil edilmesiyle batarya paketi tam modeli olarak geliştirilebilecektir.

KAYNAKLAR

A. Amini, T. ¨Ozdemir, ¨O. Ekici, S.Ç. Bas¸lamıs¸lı, M. K¨oksal, A thermal model for Li-ion batteries operating under dynamic conditions, Appl. Therm. Eng. 185 (2021), https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116338.

Al Ja'farawy, M. S., Hikmah, D. N., Riyadi, U., Purwanto, A., & Widiyandari, H. (2021). A Review: The Development of SiO2/C Anode Materials for Lithium-Ion Batteries. In Journal of Electronic Materials (Vol. 50, Issue 12, pp. 6667–6687). Springer. https://doi.org/10.1007/s11664-021-09187-x

Ali, H., Khan, H. A., & Pecht, M. (2024). Evaluation of manufacturer's low-temperature lithium-ion battery datasheet specifications. Journal of Energy Storage, 91. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112063

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

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

Bulut, E. (2022). Elektrikli araçlarda batarya termal yönetim sistemlerinin optimum tasarımı (Doktora tezi). BUÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa

Cao, W., Zhang, J., & Li, H. (2020). Batteries with high theoretical energy densities. Energy Storage Materials, 26, 46–55. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.12.024

Ceder, G., Hautier, G., Jain, A., & Ong, S. P. (2011). Recharging lithium battery research with first-principles methods. MRS Bulletin, 36(3), 185–191. https://doi.org/10.1557/mrs.2011.31

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

Chen, Z., Qin, Y., Dong, Z., Zheng, J., & Liu, Y. (2023). Numerical study on the heat generation and thermal control of lithium-ion battery. Applied Thermal Engineering, 221. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119852

Du, S., Lai, Y., Ai, L., Ai, L., Cheng, Y., Tang, Y., & Jia, M. (2017). An investigation of irreversible heat generation in lithium ion batteries based on a thermo-electrochemical coupling method. Applied Thermal Engineering, 121, 501–510. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.077

Hwang, F. S., Confrey, T., Reidy, C., Picovici, D., Callaghan, D., Culliton, D., & Nolan, C. (2024). Review of battery thermal management systems in electric vehicles. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 192). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114171

Koech, A. K., Mwandila, G., Mulolani, F., & Mwaanga, P. (2024). Lithium-ion battery fundamentals and exploration of cathode materials: A review. In South African Journal of Chemical Engineering (Vol. 50, pp. 321–339). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.09.008

Li, Z., Huang, J., Liaw, B. Y., & Zhang, J. (2017). On state-of-charge determination for lithium-ion batteries. In Journal of Power Sources (Vol. 348, pp. 281–301). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.001

Li, J. (2022). Modeling and Simulation of Lithium-ion Power Battery Thermal Management Key Technologies on New Energy Vehicles, https://doi.org/10.1007/978-981-19-0844-6_2

Liu, C., Neale, Z. G., & Cao, G. (2016). Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. In Materials Today (Vol. 19, Issue 2, pp. 109–123). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.10.009

Liu, W., Placke, T., & Chau, K. T. (2022). Overview of batteries and battery management for electric vehicles. In Energy Reports (Vol. 8, pp. 4058–4084). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016

Low, W. Y., Aziz, J. A., Idris, N. R. N., & Saidur, R. (2013). Electrical model to predict current-voltage behaviours of lithium ferro phosphate batteries using a transient response correction method. Journal of Power Sources, 221, 201–209. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.140

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

Madani, S. S., Schaltz, E., & Kær, S. K. (2019). An electrical equivalent circuit model of a lithium titanate oxide battery. Batteries, 5(1). https://doi.org/10.3390/batteries5010031

Madani, S. S., Ziebert, C. (2023). Calorimetric methods and thermal management of lithium-ion batteries: A mini-review. Journal of Physics: Conference Series, 2454(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2454/1/012006

Manthiram, A. (2020). A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. In Nature Communications (Vol. 11, Issue 1). Nature Research. https://doi.org/10.1038/s41467-020-15355-0

Micari, S., Foti, S., Testa, A., de Caro, S., Sergi, F., Andaloro, L., Aloisio, D., Leonardi, S. G., & Napoli, G. (2022). Effect of WLTP CLASS 3B Driving Cycle on Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles. Energies, 15(18). https://doi.org/10.3390/en15186703

Mishra, G. K., Gautam, M., Bhawana, K., Ghosh, J., & Mitra, S. (2023). High energy density lithium-ion pouch cell with modified high voltage lithium cobalt oxide cathode and graphite anode: Prototype stabilization, electrochemical and thermal study. Journal of Power Sources, 580. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233395

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

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. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123809003

Rezvanizaniani, S. M., Liu, Z., Chen, Y., Lee, J. (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. Journal of Power Sources, 256, 110–124. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.085

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. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139046

Schuster, E., Ziebert, C., Melcher, A., Rohde, M., Seifert, H. J. (2015). Thermal behavior and electrochemical heat generation in a commercial 40 Ah Lithium Ion pouch cell. Journal of Power Sources, 286, 580–589. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.170

Tahirağaoğlu, B., Sevilgen, G., & Hamut, H. S. (2024). The numerical and experimental investigation of the transient behaviours of a lithium-ion pouch battery cell under dynamic conditions. Case Studies in Thermal Engineering, 62, 105169. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105169

Thanagasundram, S., Arunachala, R., Makinejad, K., Teutsch, T., Jossen, A., (2012). A cell level model for battery simulation, in: European Electric Vehicle Congress, pp. 1–13.

Tran, M. K., Dacosta, A., Mevawalla, A., Panchal, S., & Fowler, M. (2021). Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA. Batteries, 7(3). https://doi.org/10.3390/batteries7030051

Uyanık, M.S. (2023). Development of novel electrode materials for li-ion batteries. (Yüksek Lisans Tezi). Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze

Vashisht, S., Rakshit, D., Panchal, S., Fowler, M., Fraser, R. (2023). Thermal behaviour of Li-ion battery: An improved electrothermal model considering the effects of depth of discharge and temperature. Journal of Energy Storage, 70. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107797

Wang, T., Tseng, K. J., Yin, S., & Hu, X. (2013, November). Development of a one-dimensional thermal-electrochemical model of lithium ion battery. In IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 6709-6714). IEEE.

Wu, X., Freese, D., Cabrera, A., & Kitch, W. A. (2015). Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 34, 52–67. https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.007

Xia, B., Zheng, W., Zhang, R., Lao, Z., & Sun, Z. (2017). A novel observer for lithium-ion battery state of charge estimation in electric vehicles based on a second-order equivalent circuit model. Energies, 10(8). https://doi.org/10.3390/en10081150

Xing, Y., Ma, E. W. M., Tsui, K. L., & Pecht, M. (2011). Battery management systems in electric and hybrid vehicles. In Energies (Vol. 4, Issue 11, pp. 1840–1857). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/en4111840

Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M., & Li, C. (2023). An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles. In Applied Thermal Engineering (Vol. 219). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626

Z. Li, J. Huang, B.Y. Liaw, J. Zhang, On state-of-charge determination for lithium-ion batteries, J. Power Sources 348 (2017) 281–301, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.001.

Zhang, S. S., Xu, K., & Jow, T. R. (2003). The low temperature performance of Li-ion batteries. Journal of Power Sources, 115(1), 137–140. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00618-3

Zhang, Q., Wei, F., Zhang, P., Dong, R., Li, J., Li, P., Jia, Q., Liu, Y., Mao, J., & Shao, G. (2023). Research on the Reversible and Irreversible Heat Generation of LiNi1−x−yCoxMnyO2-Based Lithium-Ion Batteries. Fire Technology, 59(3), 1029–1049. https://doi.org/10.1007/s10694-022-01220-7

Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M., & Li, C. (2023). An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles. In Applied Thermal Engineering (Vol. 219). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626