ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİNİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatih Mehmethan NAVGASIN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİNİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatih Mehmethan NAVGASIN
ORC-ID: 0000-0003-2806-9862

Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN
ORC-ID: 0000-0002-7746-2014
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİNİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatih Mehmethan NAVGASIN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan Li-Ion bataryaların ve soğutma sistemlerinin genel bir incelemesi yapılarak dört/on altı hücreden oluşan bir Li-Ion batarya grubunun ısıl davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada deşarj işlemi dikkate alınmıştır. Sayısal hesaplamalarda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi yapılarak deneysel veriler ile soğutma sistemi olmadan karşılaştırma yapılmıştır. Ek olarak, mevcut batarya grubuna sayısal modelde bir serpantin kanallı soğutucu blok eklenerek HAD analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel veriler ile uyum içerisindedir.

Anahtar Kelimeler: Li-Ion, batarya, ısıl yönetim, soğutma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği

ABSTRACT

MSc Thesis

THE INVESTIGATION ON THE IMPROVEMENTS OF BATTERY COOLING SYSTEMS OF ELECTRIC VEHICLES

Fatih Mehmethan NAVGASIN

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

In this study, a general review of Li-Ion batteries and cooling systems used in electric vehicles was made and the thermal behavior of a Li-Ion battery group consisting of four/sixteen cells was investigated experimentally and numerically. In the experimental study, the discharge process was taken into consideration. Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis was performed in numerical calculations and a comparison was made with experimental data without a cooling system. In addition, CFD analysis was carried out by adding a serpentine channel cold plate in the numerical model to the existing battery group. The numerical results obtained are in compliance with the experimental data.

Key words: Lithium-ion, battery, thermal management, cooling, computational fluid Dynamics

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu çalışma 219M475 proje numaralı “Elektrikli taşıtlar için hibrit iklimlendirme sistemi tasarımı ve prototip imalatı” başlıklı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü TÜBİTAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Elektrikli Taşıtlarda Batarya Soğutma Sisteminin İyileştirme Yöntemlerinin Araştırılması adlı yüksek lisans tez çalışmamda verdiği bilgilerle bana yol gösteren ve her konuda yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Sayın Gökhan SEVİLGEN’e, proje boyunca beraber çalıştığımız ve her konuda destek olan Dr. Öğr. Üyesi Sayın Halil BAYRAM’a, Sayın Harun DURSUN’a ve Sayın Enes BAŞAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte gerek maddi gerekse manevi olarak daima yanımda olan anneme, babama, kardeşlerime, hayat arkadaşım değerli eşime ve güzel kızımıza teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca verdiği desteklerden ötürü PILOTCAR Elektrikli Araçlar ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Fatih Mehmethan NAVGASIN

31/01/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…….. i
ABSTRACT…… ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR……..... iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ……..... v
ŞEKİLLER DİZİNİ……. vi
ÇİZELGELER DİZİNİ……..... viii
1. GİRİŞ……... 1
2. KAYNAK ÖZETLERİ (KURAMSAL TEMELLER/GENEL BİLGİLER)…..... 3
2.1. Li-Ion Bataryaların Yapısı……..... 3
2.2. Li-Ion Batarya Çeşitleri……..... 4
2.2.1. Silindirik hücre……..... 6
2.2.2. Pouch (kese) hücre……. 6
2.2.3. Prizmatik hücre……..... 7
2.3. Li-Ion Bataryaların Isıl Davranışı……..... 7
2.4. Bataryaların sayısal modellemesi……. 8
2.4.1. NTGK modeli……..... 9
2.4.2. Eşdeğer devre modeli (ECM)……..... 9
2.4.3. Newman P2D Modeli……..... 10
2.5. Li-Ion Batarya Paketi İçin Uygulanan Soğutma Sistemleri……..... 11
3. MATERYAL VE YÖNTEM……..... 21
3.1. Deneysel Çalışma……..... 21
3.1.1. Deneysel çalışmada kullanılan batarya hücresi ve özellikleri…….. 21
3.1.2. Deneysel çalışmada kullanılan cihazlar…… 23
3.1.3. Deney senaryoları……..... 27
3.2. Sayısal Çalışma……..... 30
3.2.1. Sonlu hacimler yöntemi…… 33
3.2.2. Batarya HAD analizi……..... 34
3.2.3. Batarya CAD modeli……..... 35
3.2.4. Ağ yapısının oluşturulması…….. 35
3.2.5. Çözümlemelerde kullanılan batarya modeli ve ilgili denklemler……..... 36
3.2.6. Batarya HAD analiz sonuçları..... 39
4. BULGULAR (BULGULAR VE TARTIŞMA)..... 45
5. TARTIŞMA VE SONUÇ (SONUÇ)..... 46
KAYNAKLAR..... 47

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ρ_b	Batarya yoğunluğu [kg/m^3]
$c_{p,b}$	Bataryanın özgül ısısı [J/(kgK)]
T	Sıcaklık [K]
k_b	Bataryanın ısıl iletkenliği [W/(mK)]
S_n ve S_p	Negatif ve pozitif elektrotların elektriksel iletkenliği [S/m]
V_n ve V_p	Negatif ve pozitif elektrotların potansiyelleri [V]
$\dot{q}_{\text{gen}}$	Ohmik ısınma ve elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşan toplam hacimsel ısı üretim miktarı [W/m3]
$\dot{q}_{\text{ECh}}$	Elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşan ısı üretim miktarı [W/m3]
j_{ECh}	Hacimsel akım yoğunluğu ile oluşan ısı üretim miktarı [A/m^3]
I	Akım [A]
V	Gerilim [V]
σ_+ve σ_-	Pozitif ve negatif elektrotların efektif elektrik iletkenliği [W/(mK)]
φ_+ ve φ_-	Pozitif ve negatif elektrotların faz gerilimi [V]
j	Hacimsel transfer akımı yoğunluğu
q	Batarya ısı üretim oranı [W/m3]
Y ve U	Batarya model parametreleri

Kısaltmalar	Açıklama
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	Computational Fluid Dynamics
ECM	Eşdeğer Devre Modeli
NTGK	Newman, Tiedemann, Gu ve Kim
LFP	Lityum Demir Fosfat
NMC	Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
NCA	Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
LTO	Lityum Titanat Oksit
BTYS	Batarya Termal Yönetim Sistemi
IR	Kızılötesi
TPG	Termal Pirolitik Grafit
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FVM	Sonlu Hacimler Yöntemi
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
DoD	Depth of Discharge
MSMD	Multi-Scale Multi-Domain
P2D	Pseudo-2D

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Li-Ion bataryaların çalışma prensibi (Chawla, Bharti ve Singh, 2019).	3
Şekil 2.2.	Li-Ion batarya reaksiyonları (Gümüşsu, 2017)…….....	4
Şekil 2.3.	Li-Ion bataryaların yapısı: a) silindirik hücre b) pouch (kese) hücre (Gümüşsu, 2017)……..	4
Şekil 2.4.	Li-Ion bataryaların karşılaştırması (Stecca, Elizondo, Soeiro, Bauer ve Palensky, 2020) …….....	5
Şekil 2.5.	ECM modelinde kullanılan elektrik devreleri (ANSYS, 2013)….....	10
Şekil 2.6.	Newman modelinde elektrot ve parçacık etki alanları (ANSYS, 2013)…….....	11
Şekil 2.7.	Li-Ion batarya soğutma sistemleri karşılaştırması (Ali ve Abdeljawad, 2020)…….....	13
Şekil 3.1.	Deneysel çalışmada kullanılan batarya grubu…….....	21
Şekil 3.2.	Projede belirlenen batarya hücresinin farklı akım/deşarj oranlarında voltaj eğrisi (Toshiba Rechargable Battery SCIB 2020) …….....	22
Şekil 3.3.	Batarya hücresinin sıcaklığa bağlı voltaj/deşarj kapasitesi eğrisi (Toshiba Rechargable Battery SCIB 2020) …….....	23
Şekil 3.4.	Deneysel çalışmada kullanılan cihazlar: (a) şarj cihazı (b) wattmetre (c) motor sürücü (d) hız ayarlayıcı (e) elektrik motoru……	24
Şekil 3.5.	Deneysel çalışmada kullanılan cihazların yerleşimi…….....	25
Şekil 3.6.	Bataryalar üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörleri..……	25
Şekil 3.7.	Fren mekanizması bileşenleri……...	26
Şekil 3.8.	Direnç düzeneği…….....	27
Şekil 3.9.	Senaryo-1 için sıcaklık sensöründen elde edilen sıcaklık değişim eğrileri…….....	28
Şekil 3.10.	Senaryo-2 için sıcaklık sensöründen elde edilen sıcaklık değişim eğrileri…….....	29
Şekil 3.11.	Multizone yöntemi için ayrıklaştırılmış batarya gövdesi…….....	35
Şekil 3.12.	Multizone yöntemi ile oluşturulmuş çözüm ağı yapısı……...	36
Şekil 3.13.	Serpantin kanallı soğutucu blok eklenmiş batarya grubunun çözüm ağı yapısı....…….....	39
Şekil 3.14.	Tekil hücrenin farklı deşarj oranlarında voltaj değişim grafiği.....	39
Şekil 3.15.	Tekil hücrenin 1C deşarj oranında sıcaklık değişimi.....…….....	40
Şekil 3.16.	Tekil hücre için hücre voltaj eğrisi karşılaştırma grafiği (HAD-katalog değerleri).……...	40
Şekil 3.17.	Geçici rejimde ve 1C deşarj oranında T=3600 s için tekil hücre yüzey sıcaklık dağılımı.....	41
Şekil 3.18.	Senaryo 2 için dört hücreli batarya grubunun 1C deşarj oranında sıcaklık değişimi…….....	41
Şekil 3.19.	Geçici rejimde ve 1C deşarj oranında T=3600 s için dört hücreli soğutmasız batarya grubunun yüzey sıcaklık dağılımı.....	42
Şekil 3.20.	Deneysel veriler ile HAD sonuçlarının karşılaştırılması……..	42
Şekil 3.21.	Dört hücreli batarya grubunun soğutmasız ve serpantin kanallı soğutucu blok eklenmiş halinin sıcaklık değişimi karşılaştırma grafiği…….....	43

Şekil 3.22. Geçici rejimde ve 4C deşarj oranında T=900 s için dört hücreli soğutmasız batarya grubunun yüzey sıcaklık dağılımı……..... 43
Şekil 3.23. Geçici rejimde ve 4C deşarj oranında T=900 s için serpantin kanallı soğutucu blok eklenmiş dört hücreli batarya grubunun yüzey sıcaklık dağılımı……..... 44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	Yaygın olarak kullanılan bazı Li-Ion bataryaların karşılaştırması (Miao, Hynan, Von Jouanne ve Yokochi, 2019)…….....	7
Çizelge 3.1.	Tekil bataryanın karakteristikleri…….....	23
Çizelge 3.2.	Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları ve hassasiyeti…….....	26
Çizelge 3.3.	Senaryo-1 deney koşulları…….....	28
Çizelge 3.4.	Senaryo-2 deney koşulları…….....	29
Çizelge 3.5.	Semboller ve tanımları…….....	38

1. GİRİŞ

Enerji kullanımının sınırlı olması ve emisyon yönetmeliklerinde belirtilen zorunlu kısıtlamalar nedeniyle ulaşım endüstrisi, birçok zorlukla karşı karşıyadır. %100 elektrikli ve hibrit araçlar enerji bakımından geleneksel araçlardan daha verimli ve daha temizdir. Elektrikli Araçlar, küresel çevre sorunları ışığında daha düşük CO_2 emisyonları nedeniyle geleneksel araçların en umut verici alternatiflerini temsil ettikleri için otomotiv endüstrisinde geniş çapta kabul görmüştür. Mevcut batarya teknolojileri arasında, Li-Ion bataryalar, yüksek özgül enerji, düşük ağırlık, uzun kullanım ömrü gibi birçok avantajı nedeniyle mevcut elektrikli araçların ve hibrit araçların temel güç kaynağıdır (H. Zhang, Li, R. Zhang, Lin ve Fang, 2020). Li-Ion bataryalar, modern elektrikli araçlarda, cep telefonlarında, dizüstü bilgisayarlarda ve diğer birçok cihazda halihazırda kullanılmaktadır. Ancak geçmişte Li-Ion batarya kullanan sistemlerin çalışması sırasında ısıl davranışları nedeniyle önemli güvenlik sorunlarıyla karşılaşıldığı literatürde belirtilmektedir (Gümüşsu, 2017).

Yapılan araştırmalar, yakın gelecekte bu bataryaların makine ve ekipmanların güç gereksinimlerini karşılamaya yetecek kadar yeterli hale getirilmesi için en az beş kat daha fazla enerji ve güç yoğunluğuna sahip olabileceğini göstermektedir. Öte yandan, günümüzün Li-Ion bataryaları bile tamamen güvenli bir ekipman olarak kullanılamazken, geleceğin daha yüksek performanslı bataryalarının, daha yüksek enerji ve güç yoğunlukları nedeniyle muhtemelen daha fazla güvenlik sorunu yaratacağı öngörülmektedir (Gümüşsu, 2017). Bataryayı, üreticisinin önerdiği sıcaklıktan daha yüksek veya daha düşük bir sıcaklık aralığında çalıştırmak, hücrede hasara ve ısıl etkilere neden olabilir. Bu, bataryaların çalışma performansını, kapasitesini ve ömrünü etkileyebilir veya en kötü durumda hücrenin çok fazla ısınarak alev almasına veya patlamasına neden olabilir. Bu durum literatürde “thermal runaway” olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle, termal yönetim sistemi şarttır. İyi tasarlanmış bir termal yönetim sistemi, bataryanın optimum çalışma sıcaklığı arasında kalmasını sağlar (Ali ve Abdeljawad, 2020).

Literatürde Li-Ion bataryaların çalışma koşulları için dış ortam sıcaklığı −30/60 °C olarak belirtilmektedir. Ayrıca sıcaklığın belirli bir üst limiti(~80 °C) aşması durumunda bir Li-Ion batarya hücresinde termal runaway meydana gelebileceği bilgisi verilmektedir. Bunun sonucunda batarya grubunda bataryaların yanması ve hatta patlamaya neden olabileceği belirtilmektedir (H. Zhang, Li, R. Zhang, Lin ve Fang, 2020). Bu nedenle, Li-Ion bataryaların ve batarya paketlerinin ısıl yönetim sistemleri doğru tasarlanmalıdır. Bilinen en yaygın ısıl yönetim sistemlerinde soğutma sistemi olarak hava/sıvı soğutma ve faz değiştiren materyaller ile soğutma örnek olarak verilebilir.

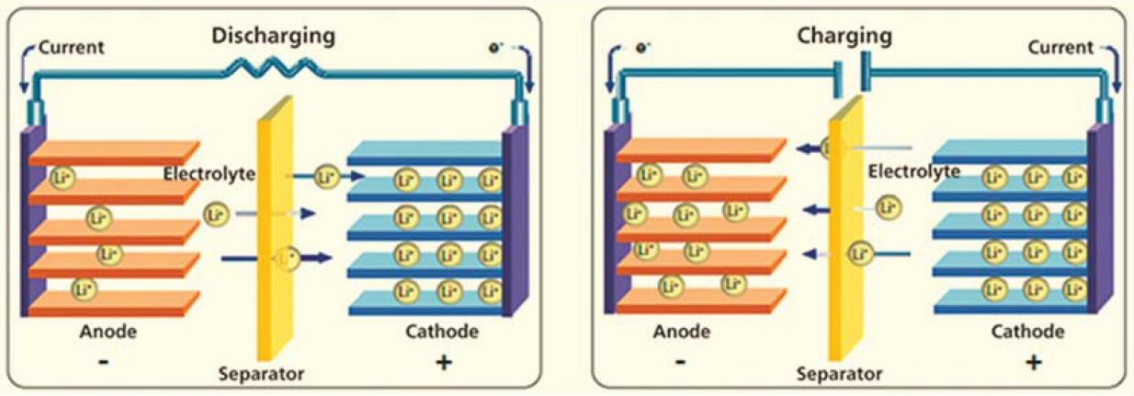
Batarya paketinin ısıl davranışını kontrol altına alabilmek için bataryaların ve batarya paketlerinin sayısal ve deneysel olarak ısıl modellerinin kurulması gerekmektedir. Bu noktada elektrikli araç uygulamaları için sayısal modellemeler yapmak maliyet konusunda da büyük avantaj sağlamaktadır. Deneysel çalışmada ya da prototip testlerinde elde edilemeyen bazı veriler, kontrol kriterlerine göre deneysel çalışma ile doğrulanmış bir sayısal model sayesinde elde edilebilmektedir. Günümüzde bataryalar için çeşitli elektrokimyasal veya elektriksel modeller oluşturulmuştur. Eşdeğer Devre Modeli (ECM), Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK), Newman P2D modelleri bunlardan bazılarıdır. Bazı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) temelli paket yazılımlar, bu modelleri bünyesinde barındırmaktadır.

Batarya modelleri tekil hücre, modül ya da batarya paketi bazında oluşturulabilmektedir. Bunun haricinde, soğutma ya da ısıl optimizasyon amacıyla çeşitli uygulamalar için sayısal analizler yapılarak ısıl yönetim sistemi geliştirilebilmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ (KURAMSAL TEMELLER/GENEL BİLGİLER)

2.1. Li-Ion Bataryaların Yapısı

Li-Ion bataryalar, pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot) ve separatör olarak adlandırılan üç ana bileşen ile aralarında bulunan elektrolit adı verilen bir kimyasaldan oluşur. Pozitif elektrot, lityum kobalt oksit ($LiCoO_2$), lityum nikel oksit ($LiNiO_2$) veya lityum demir fosfat ($LiFePO_4$) gibi metal oksitlerden oluşabilir. Negatif elektrot, karbon(grafit) veya titanattan ($Li_4Ti_5O_{12}$) oluşabilir. Lityum bataryalarda negatif elektrot olarak düşük enerji yoğunluğuna rağmen daha güvenilir olması nedeniyle çoğunlukla karbon kullanılmaktadır. İki elektrot arasında yer alan elektrolitin amacı ise iyon hareketini sağlamaktır (Kul, 2020). Şekil 2.1'de Li-Ion bataryaların çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Li-Ion bataryaların çalışma prensibi (Chawla, Bharti ve Singh, 2019)

Bir batarya üreticisi tarafından yayınlanan teknik dokümana göre, en yaygın olarak kullanılan Li-Ion batarya türlerinden biri olan $LiCoO_2$ (katot) ve grafit (anot) bazlı bataryaların içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar Şekil 2.2'de gösterilmiştir:

$$Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + xe^- \underset{\text{discharge}}{\overset{\text{charge}}{\rightleftharpoons}} LiCoO_2 \quad \text{(cathode)}$$

$$CLi_x \underset{\text{discharge}}{\overset{\text{charge}}{\rightleftharpoons}} C + xLi^+ + xe^- \quad \text{(anode)}$$

$$Li_{1-x}CoO_2 + CLi_x \underset{\text{discharge}}{\overset{\text{charge}}{\rightleftharpoons}} LiCoO_2 + C \quad \text{(overall)}$$

Şekil 2.2. Li-Ion batarya reaksiyonları (Gümüşsu, 2017)

Hemen hemen bütün Li-Ion bataryalarda akım toplayıcı malzemeleri aynıdır. Anot kısmında bakır, katot kısmında alüminyum kullanılır (Gümüşsu, 2017). Ancak, temelde malzeme olarak benzerlik gösterseler de, Li-Ion bataryalar dış yapı olarak farklı geometrik şekillerde olabilirler. Bunun örneği Şekil 2.3' te gösterilmiştir.

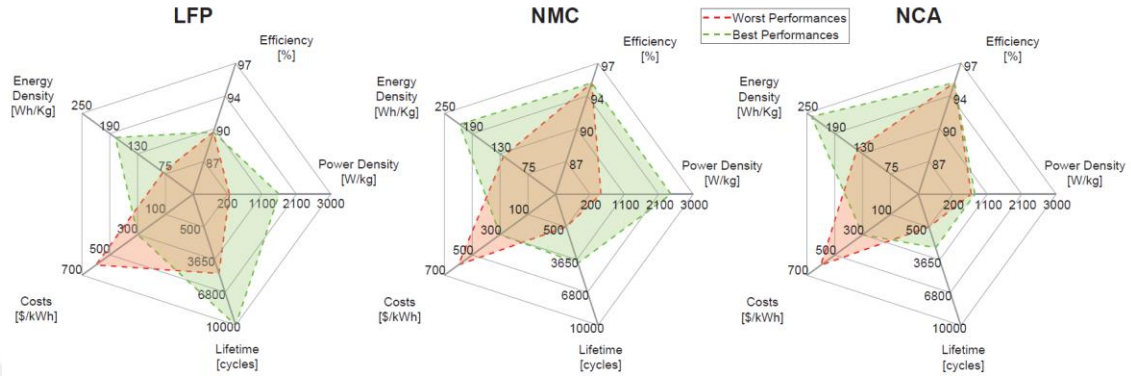


Şekil 2.3. Li-Ion bataryaların yapısı: a) silindirik hücre b) pouch (kese) hücre (Gümüşsu, 2017)

2.2. Li-Ion Batarya Çeşitleri

Li-Ion bataryaların birkaç farklı hücre formatı vardır ve en yaygın olanları silindirik, pouch (kese) ve prizmatik tipi hücrelerdir. Geometrik olarak birbirinden farklı olan bu hücrelerin uygulama alanlarına göre kimyasal yapıları da farklılık göstermektedir. Katot olarak Lityum Demir Fosfat (LFP), Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC) ve

Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA) kullanılan bataryalar bunlardan bazılarıdır. Bu üç farklı bataryanın enerji yoğunluğu, verimlilik, güç yoğunluğu, ömür ve maliyet açısından karşılaştırması Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



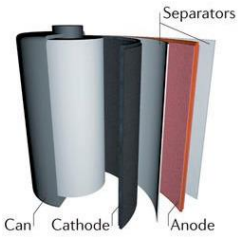
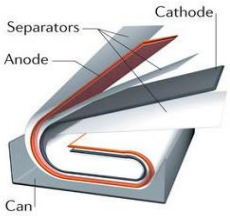
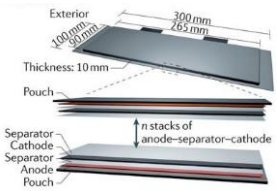
Şekil 2.4. Li-Ion bataryaların karşılaştırması (Stecca, Elizondo, Soeiro, Bauer ve Palensky, 2020)

C-oranı, bir hücrenin maksimum kapasitesine göre şarj veya deşarj olma hızının bir ölçüsüdür. Bir başka ifadeyle hücrenin 1C oranında 1 saatte, 2C oranında 30 dakikada tamamen şarj veya deşarj olacağı anlamına gelir. C-oranı Denklem 2.1'de ifade edilmiştir. Burada I şarj ya da deşarj akımıdır, $C_{kapasite}$ ise bataryanın kapasitesidir.

$$C_{oranı}(h^{-1}) = \frac{I(A)}{C_{kapasite}(Ah)} \tag{2.1}$$

Elektrikli araç uygulamalarında ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan bazı hücre tiplerinin karşılaştırması Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Yaygın olarak kullanılan bazı Li-Ion bataryaların karşılaştırması (Miao, Hynan, Von Jouanne ve Yokochi, 2019)

	Silindirik	**Pouch (Kese)**	**Prizmatik**
Görsel			
Elektrot Yerleşimi	Sarılı Halde	Yığın Halinde	Sarılı Halde
Mekanik Dayanım	++	-	+
Isı Yönetimi	-	+	+
Özgül Enerji	+	++	+
Enerji Yoğunluğu	+	+	++

2.2.1. Silindirik hücre

Silindirik hücre, bataryalar içinde en yaygın kullanılan hücre tiplerinden biridir. Silindirik hücrenin en dış kısmında paslanmaz çelikten bir kasa vardır. Hücrenin avantajı, birim başına düşük maliyet, esnek sistemler için uygun olması, küçük boyut ve kalınlık nedeniyle sıcaklığı kontrol etmenin kolay olmasıdır. Ancak birim başına düşen kapasitenin düşük olması silindirik hücre için bir dezavantajdır (Mekonnen, Sundararajan ve Sarwat, 2016).

2.2.2. Pouch (kese) hücre

Pouch (Kese) hücreler, prizmatik hücrelere benzer şekilde ince bir dikdörtgen yapıya sahiptir. Hücre, içerisindeki bileşenlerin (anot, katot, ayırıcı) dikdörtgen katmanlar halinde üst üste gelerek yığın haline gelmesiyle oluşur. Dış kasa olarak prizmatik hücreden farklı olarak, esnek ve lamine alüminyum veya polimer keseler kullanılır. Prizmatik hücrelerdeki gibi sert metal bir kasa kullanılmadığı için hücre maliyeti ve ağırlığı daha düşüktür. Ancak hücrede şişme sorunu yaşanabilir ve bu durum bataryanın kullanım ömrünü, kapasitesini azaltır ve daha az güvenli hale getirir (Mekonnen, Sundararajan ve Sarwat, 2016).

2.2.3. Prizmatik hücre

Prizmatik hücre, yüksek enerji içeriği ile bilinen ve yapı olarak silindirik hücrelere benzeyen hücrelerdir. Dış kısmında prizmatik yapıda bir alüminyum kullanılır. Elektrotlar ve ayırıcı, silindirik hücrelere benzer şekilde yuvarlanabilir veya dikdörtgen katmanlar olarak bir yığın halinde yerleştirilebilir. Prizmatik hücreler hibrit ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Mekonnen, Sundararajan ve Sarwat, 2016).

2.3. Li-Ion Bataryaların Isıl Davranışı

Li-Ion bataryaların ısıl davranışı, bataryaların çalışmasında önemli bir unsurdur ve hem batarya performansı hem de güvenlik ile yakından ilgilidir. Tüm batarya hücreleri belirli bir sıcaklık aralığında çalışır. Bataryanın çalışması sırasında enerjisinin bir kısmı omik dirençler ve yük transferi gibi bir takım elektriksel ve kimyasal etkiler nedeniyle ısı üretimi yoluyla kaybolur. Bu durum enerji kaybına neden olduğu için bataryanın elektriksel verimini düşürür.

Isı üretildiğinde, bataryada iletim yoluyla dağılır ve taşınım veya iletim yoluyla bulunduğu ortam ile batarya arasında ısı transferi gerçekleşir. Bu nedenle, bir Li-Ion bataryanın ısıl davranışını anlamak için çevresel koşullar da önem arz etmektedir. Batarya, şarj ya da deşarj esnasında kritik çalışma sıcaklığı sınırları içerisinde tutulduğu sürece ısıl açıdan güvenilir olacaktır. Bununla birlikte, ısı üretimi orantısız bir şekilde artarsa bu durum bataryanın kritik sıcaklıklara ulaşmasına neden olabilir. Bu durumda bataryanın termal kararlılığını kaybedeceği ve bataryada termal runaway meydana geleceği söylenebilir. Isı üretimine ek olarak, ortam sıcaklığı, batarya sıcaklığını kritik düzeye çıkaracak kadar yüksek olduğunda, çevre koşulları da bataryada termal runaway olmasına neden olabilir (Gümüşsu, 2017).

2.4. Bataryaların sayısal modellemesi

Farklı amaçlara ve karmaşıklık düzeyine sahip çeşitli batarya sayısal modelleri vardır. Modeller, hücrenin performansını tahmin etmek ve ne kadar ısı üretebileceği hakkında bilgi vermek için kullanılır. Bir batarya modeli seçilirken doğruluk, model için gereken parametre sayısı, hesaplama süresi ve karmaşıklık gibi kriterler dikkate alınmalıdır.

Batarya sayısal modelleri, bataryada yer alan elektriksel ve elektrokimyasal süreçlere dayanmaktadır. Amaç, hücrenin tüm kritik davranışlarını yakalamak ve yüksek doğruluk elde etmektir. Genel olarak bakıldığı zaman batarya sayısal modelleri elektrokimyasal modellerdir. Bataryanın iç davranışı, hücrenin kimyasal özellikleri ve tasarım parametreleri kullanılarak simüle edilir. Elektrokimyasal modeller, bataryanın dahili dinamik karakterlerini tanımlamak için karmaşık, doğrusal olmayan diferansiyel denklemler kullanır. Bununla birlikte, elektrokimyasal modeller genellikle birçok bilinmeyen parametreli kısmi diferansiyel denklemler kurar (Chen, Jiang, Kim, Yang ve Pesaran, 2016).

Literatürde en yaygın olarak kullanılan batarya sayısal modelleri Dual Potential Multi-Scale Multi-Domain (MSMD) Batarya modelinin farklı elektrokimyasal alt modelleridir. Bu modeller Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) ampirik modeli, Eşdeğer Devre modeli (ECM) ve farklı özelliklere sahip Newman Pseudo-2D (P2D) modelidir. Bu modeller çeşitli batarya sistemlerinde birçok uzunluk ölçeğine uygun olarak fiziksel ve elektrokimyasal olayları inceleme esnekliği sağlamaktadır (ANSYS, 2013).

Bataryanın enerji denklemi ve elektrik alanları ile ilgili denklemler aşağıda ifade edilmiştir (ANSYS, 2013):

$$\frac{\partial_\rho C_p T}{\partial_t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \dot{q} \tag{2.2}$$

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \varphi_+) = -j \tag{2.3}$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \varphi_-) = j \tag{2.4}$$

Burada σ_+ ve σ_- pozitif ve negatif elektrotların efektif elektrik iletkenlikleridir, φ_+ ve φ_- pozitif ve negatif elektrotların faz gerilimleridir, j bir elektrokimyasal alt modelden hesaplanan hacimsel transfer akımı yoğunluğudur, q bataryanın şarj/deşarj esnasında elektrokimyasal ve entropik ısıtmayı içeren ısı üretim oranıdır.

2.4.1. NTGK modeli

NTGK modeli, ampirik bir model olup farklı C-oranları altındaki akım-voltaj (I-V) eğrileri ve sonuçları deneysel sonuçlarla oldukça uyumludur. NTGK modelinde belirli bir batarya hücresi için polarizasyon eğrileri deneysel olarak elde edilir ve iki parametre deneysel verilere eğri uydurularak belirlenebilir. Bu nedenle NTGK modeli, özellikle prizmatik Li-Ion batarya hücrelerinin ısıl modellemesi için yaygın olarak kullanılmıştır (H. Zhang, Li, R. Zhang, Lin ve Fang, 2020).

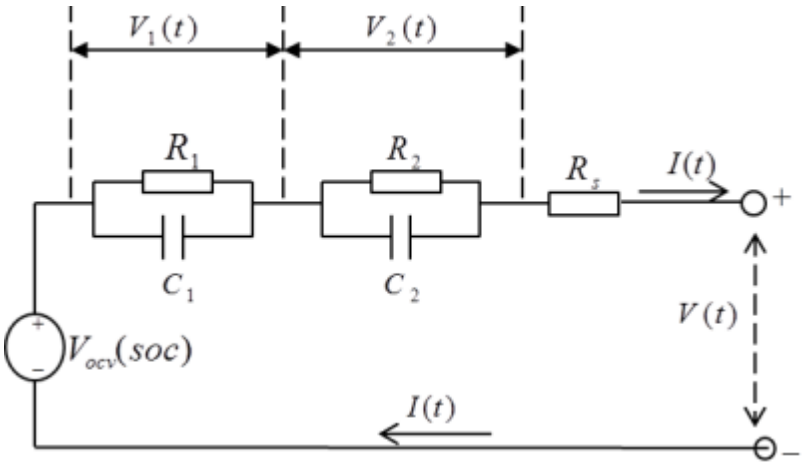
Model formülasyonunda, akım transferi aşağıdaki cebirsel denklemle potansiyel alanla ilişkilidir (ANSYS, 2013):

$$j = \alpha Y[U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \tag{2.5}$$

Burada α bataryanın elektrot sandviç tabakasının belirlenen alanı, Y ve U batarya deşarj derinliğinin fonksiyonları olan model parametreleridir.

2.4.2. Eşdeğer devre modeli (ECM)

Eşdeğer Devre Modelinde bataryanın elektriksel davranışı bir elektrik devresi oluşturularak hesaplanır. Bu modelde devre (Şekil 2.5) üç direnç ve iki kapasitörden oluşmaktadır (ANSYS, 2013).

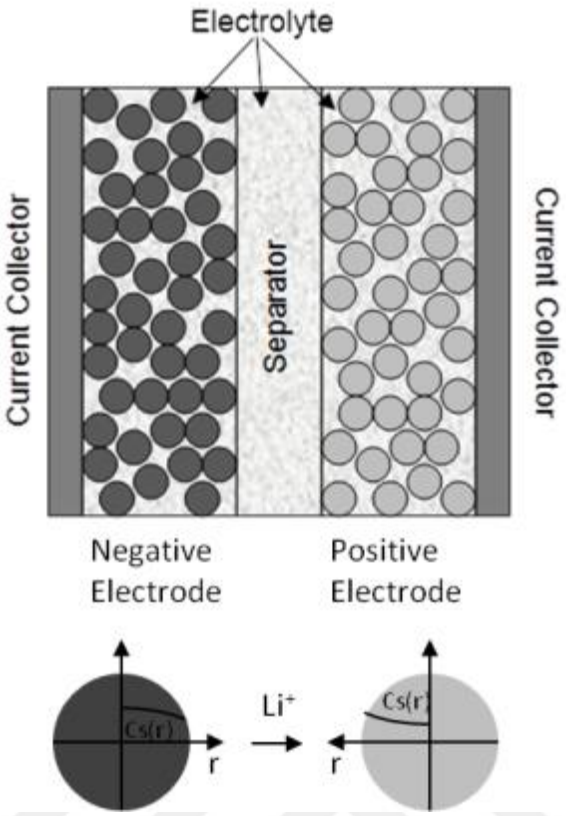


Şekil 2.5. ECM modelinde kullanılan elektrik devreleri (ANSYS, 2013)

2.4.3. Newman P2D Modeli

Newman P2D modeli, gözenekli elektrot ve konsantre çözelti teorilerinin kullanıldığı fizik tabanlı bir modeldir. Model, bataryadaki Li-Ion geçişini doğru bir şekilde yakalayabilmektedir ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelde, hesaplamaların doğru şekilde yapılabilmesi için batarya ile ilgili temel bilgilerin kapsamlı olarak kullanıcı tarafından tanımlanması gerekmektedir (ANSYS, 2013).

Şekil 2.6'da Newman modelindeki elektrot ve parçacık alanları şematik olarak gösterilmektedir. Deşarj işlemi sırasında lityum, negatif elektrot parçacıklarının yüzeyine yayılır ve bir elektrokimyasal reaksiyona girer. Bu reaksiyon bir elektronu serbest bırakır ve lityumu elektrolit fazına aktarır. Lityum iyonları, elektrolit çözeltisi boyunca pozitif elektrota yayılır ve iletilir, burada benzer bir reaksiyon lityumu pozitif katı faza aktarır. Lityum, hücre daha sonra yeniden şarj olana kadar pozitif elektrot parçacıklarının içinde depolanır (ANSYS, 2013).



Şekil 2.6. Newman modelinde elektrot ve parçacık etki alanları (ANSYS, 2013)

2.5. Li-Ion Batarya Paketi İçin Uygulanan Soğutma Sistemleri

Li-Ion bataryalar şarj ve deşarj akımının yüksek olduğu farklı koşullar için optimum çalışma sıcaklığında kullanılır. Bu tür uygulamalarda batarya ısı üretim oranları çok yüksektir ve batarya çalışma sıcaklığında artışa neden olur. Bunlar bataryanın güvenlik tehlikelerini artırabilir. Bu nedenle elektrikli araçlarda Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTYS) için farklı soğutma sistemleri bulunmaktadır.

Hava bazlı BTYS için, doğal taşınım ve zorlanmış taşınım olmak üzere iki ana kategori vardır. Pasif ve aktif hava soğutması olarak da bilinmektedir. Zorlanmış (aktif) hava soğutması için, yüksek güçlü fan/üfleyici gibi enerji tüketen bir kaynak kullanılarak ısı transferini artırmak için hava akışı batarya paketine yönlendirilir. Doğal (pasif) hava soğutması için, ek olarak enerji tüketmeden batarya paketi soğutulur. Pasif hava soğutmayı kullanmanın tek avantajı, aktif hava soğutmaya kıyasla daha düşük maliyettir (Patel ve Rathod, 2020).

Li-Ion bataryalar için hava soğutma sistemi genellikle endüstriyel uygulamalarda, nadiren elektrikli araçlarda kullanılmaktadır. Li-Ion bataryalar için kullanılan hava bazlı BTYS'lerin çoğu, zorlanmış (aktif) taşınım sistemleridir. Bunun nedeni, zorlanmış taşınımın doğal taşınımdan daha yüksek bir ısı transfer katsayısına sahip olmasıdır. Ayrıca endüstriyel uygulamalarda kullanılan Li-Ion bataryalar farklı koşullar altında çalışır, bu da bataryaların yüksek şarj/deşarj oranında çalıştığı, güvenlik tehlikelerini önlemek için daha verimli bir soğutma sistemine ihtiyaç duyduğu anlamına gelir. Hava soğutma sistemi için hava akış hızı, akış yolu ve bataryaların paket içindeki geometrik yerleşimi olmak üzere üç ana değişken vardır. Bu değişkenler sistemin verimliliğini iyileştirebilir veya azaltabilir (Patel ve Rathod, 2020).

Hava soğutmada olduğu gibi, sıvı bazlı BTYS, pasif ve aktif sıvı soğutma olmak üzere iki ana kategoriden oluşur. Aktif sıvı soğutma için birincil döngü ve ikincil döngü olmak üzere iki döngü vardır. Birincil döngü, ısı transfer sıvısının bir pompa tarafından sirküle edildiği sistemdir. İkincil döngü, bir klima döngüsü olabilir. Üst ısı eşanjörü radyatör yerine soğutma işlemi için evaporatör görevi görür ve her iki çevrimi birbirine bağlar. Pasif sıvı soğutma sisteminde, soğutma için soğutucu ise bir radyatördür. Isı transfer akışkanı, pompa tarafından kapalı bir sistemde dolaştırılır. Dolaşan sıvı, batarya paketinden ısıyı emer ve bir soğutucu aracılığıyla ısıyı serbest bırakır. Soğutma gücü, büyük ölçüde ortam havası ile batarya arasındaki sıcaklığa bağlıdır. Radyatörün arkasındaki fanlar soğutma performansını iyileştirebilir ancak ortam havası batarya sıcaklığından yüksekse veya aralarındaki fark çok küçükse pasif sıvı sistemi etkisiz hale gelir (Ding, Ji, Wei ve Liu, 2022).

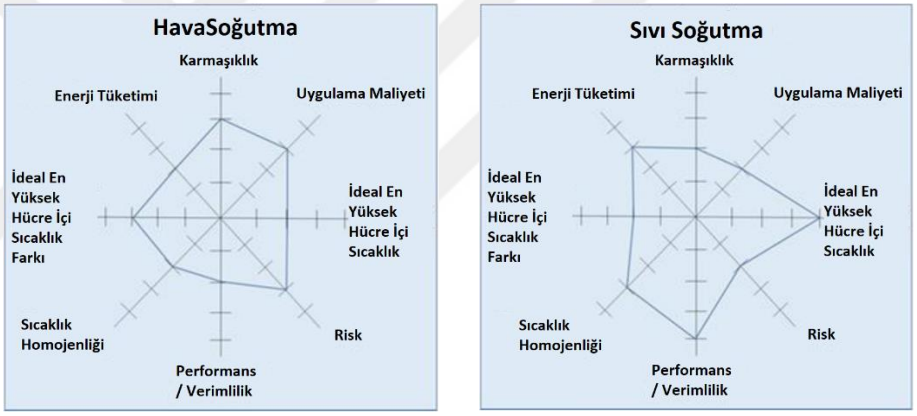
Sıvı soğutma, hava soğutmaya kıyasla daha fazla avantaja sahiptir. Soğutma sıvısı kullanmanın avantajları, yüksek güç uygulamaları ve yüksek ortam sıcaklıkları gibi senaryolarda büyük soğutma yüklerinin üstesinden gelebilmesidir. Sıvı soğutmayı kullanmanın ana dezavantajı, karmaşık olması, sızıntı potansiyeline sahip olması ve maliyetinin daha yüksek olmasıdır (Ding, Ji, Wei ve Liu, 2022).

BTYS için sıvı soğutma, çoğunlukla elektrikli araç uygulamalarında kullanılmaktadır. Elektrikli Araçlarda sıvı soğutma kullanmanın avantajı, daha kompakt olması ve batarya

paketinin hava soğutma sistemine kıyasla elektrikli araçlarda daha az yer kaplamasını sağlamasıdır. Ek olarak, soğutma sıvısının yüksek ısı iletkenliği ve yüksek ısı transfer katsayısı nedeniyle, büyük elektrikli araç üreticileri bataryalarını optimum çalışma aralığında tutmak için sıvı soğutma sistemlerini kullanmaktadır.

Sıvı soğutma sistemi için kanal sayısı, giriş kütle akış hızı, akış yönü ve kanal genişliği olmak üzere dört ana değişken vardır. Hava soğutmada olduğu gibi, bu değişkenler sistemin verimliliğini arttırabilir veya azaltabilir (Chen, Jiang, Kim, Yang ve Pesaran, 2016).

Şekil 2.7'de Li-Ion batarya paketleri için kullanılan soğutma sistemlerinin karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Li-Ion batarya soğutma sistemleri karşılaştırması (Ali ve Abdeljawad, 2020)

Li-Ion bataryalar için kullanılan sıvı soğutma sistemlerinin avantajları şöyledir (Ali ve Abdeljawad, 2020):

- Hava soğutmaya göre daha fazla ısı absorbe etme özelliği sayesinde yüksek ısı iletkenliği ve yüksek ısı transfer katsayısına sahip olması nedeniyle hava soğutmaya göre daha etkili olabilir.
- Farklı senaryolarda, büyük soğutma yüklerinde yeterli soğutma sağlama (yüksek güç uygulamaları, yüksek ortam sıcaklıkları).

- Daha geniş bir soğutma kanalı oluşturarak enerji tüketimini azaltabilmeye ve bu da daha düşük basınç düşüşüne yol açar. Kanal genişliği 3 mm'den 6 mm'ye değiştiğinde basınç düşüşü %55'e kadar çıkabilir.
- Sıvı soğutma kullanılarak daha iyi bir ısıl denge ve homojenlik sağlanabilir.

Li-Ion bataryalar için kullanılan sıvı soğutma sistemlerinin dezavantajları şöyledir (Ali ve Abdeljawad, 2020):

- Sıvı soğutma sistemi, ısı eşanjörleri ve devrelerin eklenmesi nedeniyle hava soğutmaya göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir.
- Hava soğutmaya kıyasla maliyeti daha yüksektir.
- Soğutma sisteminin özgül ağırlığının ve sıvının yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle soğutucu grubu ağırlığı yüksektir.
- Soğutucu hızındaki artış, enerji tüketimindeki artışa karşılık gelir.
- Hava soğutmadan daha sık bakım gerektirir
- Sızıntı potansiyeli vardır.

Li-Ion bataryalar için kullanılan hava soğutma sistemlerinin avantajları şöyledir (Ali ve Abdeljawad, 2020):

- Soğutma sıvısı tekrar geri dönüştürülmediği için hava soğutma elektrikli araç içinde daha az yer kaplar.
- Basit yapı, kolay bakım, düşük maliyet ve düşük hava viskozitesi nedeniyle sistem işletim sürecinde parazit enerji tüketimi düşüktür.
- Prizmatik hücre için, paralel hibrit araçlar gibi bazı durumlarda hava soğutması yeterlidir.
- Prizmatik hücreler için, 55 °C sınırının altındaki maksimum sıcaklığı ve hücredeki 5 °C'den fazla olmayan sıcaklık farkını kontrol edebilen standart sürüş döngüleri sırasında hibrit araçlarda hava soğutma sistemi çok iyi çalışır.

Li-Ion bataryalar için kullanılan hava soğutma sistemlerinin dezavantajları şöyledir (Ali ve Abdeljawad, 2020):

- Havanın düşük ısı kapasitesi, batarya paketi boyunca ısıl farklılığa yol açar.

- Havanın düşük ısı kapasitesi ve hissedilir ısı yoluyla soğutmanın doğası, sınırlı bir soğutma yeteneği ile sonuçlanır ve ayrıca batarya paketinin konumu üzerinde bazı kısıtlamalar getirir.
- Isı yükü, araç kabin hava sıcaklığına bağlı olarak yaklaşık 325–800 W ile sınırlıdır.
- Batarya paketi ölçeği büyük olduğunda, sistem yüksek güç çıkışı gerektirdiğinde ve ortam sıcaklığı çok yüksek veya çok düşük olduğunda, hava soğutma sistemi ısıl yönetim gereksinimlerini karşılamayabilir.
- Agresif sürüş döngüleri sırasında ve yüksek çalışma sıcaklıklarında prizmatik bataryanın kullanılması, kaçınılmaz olarak bataryada büyük ve homojen olmayan bir sıcaklık dağılımına neden olacaktır.
- Agresif bir çevrimde maksimum sıcaklık istenen sınırdan daha yüksek olabilir.

Goutam ve arkadaşları (2015), yaptıkları deneysel çalışmada, üç pouch hücrenin yüzey sıcaklığı dağılımının gelişimini kontak termistörü ve kızılötesi (IR) termografi kullanarak belirlemeye çalışmıştır: Nikel Manganez Kobalt oksit (NMC) bazlı 20 Ah hücre, Lityum Demir Fosfat (LFP) 14 Ah ve Lityum Titanat Oksit (LTO) 5 Ah batarya hücresi. Hücrelere yüksek akım (100 A'ya kadar) sürekli şarj / deşarj ve yüksek akım (80 A) mikro darbe döngü profili uygulanmıştır. Deneyler sonucunda Termistör bazlı sıcaklık profilinin hücreden hücreye, özellikle LTO hücresinde değiştiğini tespit etmişlerdir. İncelenen hücreler arasında NMC hücresi en yüksek sıcaklık artışını ve LTO hücresi en düşük artışı göstermiştir. IR (Kızılötesi) görüntüler, yüzey sıcaklığının uzamsal dağılımını ortaya çıkarmış, özellikle en sıcak bölgenin konumu, yalnızca hücrenin geometrik ve malzeme özelliklerine değil, aynı zamanda hücrelere uygulanan yüklerin türüne de bağlı olarak değişmiştir. Sonuç olarak batarya hücrelerinin termal davranışının modellenmesinin, hücre sıcaklığının izlenmesinde hayati bir rol oynayabileceği ve aynı zamanda sadece tek bir batarya hücresinin değil, daha iyi termal yönetim ve iyileştirilmiş termal güvenlik için batarya paketlerinin geliştirilmesi için fayda sağlayabileceği iyi bir şekilde kanıtlanmıştır.

Yi ve arkadaşları (2013) yaptıkları çalışmada, düşük çevre sıcaklığında bir Li-Ion bataryanın deşarj davranışının sıcaklığa bağımlılığına ilişkin bir modelleme metodolojisini oluşturmuşlardır. Potansiyelin ve Sabit akım deşarjı sırasında deşarj süresinin bir fonksiyonu olarak bir Li-Ion batarya hücresinin elektrotları üzerindeki akım yoğunluğu dağılımlarının iki boyutlu modellemesini doğrulamak için 20, 10 ve 0 °C düşük çevre sıcaklıkları altında 0.5-5 C arasında değişen deşarj oranı için modellemeden gelen deşarj eğrilerini deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Elektrokimyasal reaksiyonların ve omik direnç ısıtmanın bir sonucu olarak ısı üretim oranlarını, deşarj süresinin bir fonksiyonu olarak Li-Ion bataryanın sıcaklık değişimlerini tahmin etmek için hesaplamışlardır. Modellemeden elde edilen sıcaklık değişimlerinin deneysel ölçümlerle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

Yeow ve Teng (2013) yaptıkları çalışmada, büyük kapasitelere sahip hücreler için sıcaklık dağılımındaki homojenliği artırmak için yeni bir soğutma plakası önermiştir. Bu yeni soğutma plakası, termal pirolitik grafitten (TPG) yapılmış stratejik olarak yerleştirilmiş ısı yayıcılara sahip bir alüminyum taban plakasından oluşmaktadır. TPG düşük yoğunluklu ve ultra yüksek düzlem içi termal iletkenliğe sahiptir. Yeni kompozit soğutma plakasının performansı, dolaylı olarak sıvı ile soğutulmuş 70Ah Li-Ion batarya hücreleri ile istiflenmiş bir batarya grubu için bir 3 boyutlu sonlu eleman analiz modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Batarya sisteminin elektro-ısıl davranışı,% 100 ila % 20 şarj durumunda 210A sürekli deşarj altında simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, gömülü TPG ısı yayıcılara sahip kompozit soğutma plakasının, hücre ısısını hızlı bir şekilde soğutma ortamına iletebildiğini, yaydığını ve dağıtabildiğini göstermektedir. Elde edilen tek tip hücre sıcaklığı dağılımları, hücrelerin yanı sıra batarya paketinin güvenliğini ve dayanıklılığını arttırmıştır; ayrıca hücre terminali tırnaklarının ve baraların ayrı bir soğutma sistemi ile soğutulması ihtiyacını da ortadan kaldırılabileceğini göstermiştir.

Yeow ve Teng (2013) yaptıkları bir diğer çalışmada Li-Ion batarya modülünün hibrid araç uygulamalarına karşılık gelen kullanıcı tanımlı bir döngü altında termal davranışını analiz etmişlerdir. Modül, elektriksel olarak seri bağlanmış 12 yüksek güçlü 8Ah pouch tipi Li-Ion batarya hücresi ile istiflenmiştir. Hücreler, her bir hücre çifti arasına

sıkıştırılmış alüminyum soğutma plakası yoluyla dolaylı olarak hava ile soğutulmuştur. Soğutma plakası, soğutucu hava akış kanalında açığa çıkan genişletilmiş soğutma yüzeylerine sahiptir. Hedef hibrit araç için kullanıcı tarafından belirlenen bir elektrik yükü döngüsü altında batarya sisteminin termal davranışı, batarya soğutması için 3-boyutlu sonlu elemanlar analizi (SEA) modeli kullanılarak eşdeğer sürekli yük profili ile karakterize edilmiştir. Analiz sonuçları ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Simüle edilmiş ve ölçülen hücre sıcaklıkları arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Soğutma sistemi tasarımının iyileştirilmesi de batarya yardımı ile incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, yapılan çalışmada geliştirilen 3D Sonlu elemanlar analizi batarya soğutma modelinin, dinamik deşarj-şarj döngüsü altında Li-Ion batarya sistemlerinin termal davranışını makul bir şekilde karakterize edebileceğini göstermiştir. Yapılan çalışma, ilişkili SEA modelinin, dolaylı hava soğutmalı batarya sistemleri için soğutma sistemi tasarımlarını değerlendirmek ve / veya optimize etmek için kullanılabileceğini göstermiştir.

Panchal ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada 1C, 2C, 3C ve 4C deşarj oranlarında ve 5 °C, 15 °C, 25 °C ve 35 °C sınır koşullarında prizmatik bir Li-Ion batarya için ısı üretim hızının yerinde ölçümlerini sunmuşlardır. Bu iş için, deşarj kapasitesinin bir fonksiyonu olarak ısı üretim oranındaki değişimi araştırmak için 20 Ah kapasiteli $LiFePO_4$ katot malzemesinden oluşan alüminyum lamine bir batarya seçilmiştir. Batarya yüzeyine dağıtılmış konumlarda on sıcaklık sensörü ve üç ısı akısı sensörü uygulanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, en yüksek ısı üretimi oranının 4C deşarj oranı ve 5°C için 91W olduğunu, minimum değerin 1C deşarj oranında ve 35°C'de ölçülen 13W olduğunu göstermiştir. Ayrıca, deşarj oranındaki artışın ve dolayısıyla deşarj akımının, deşarj noktalarının eşit derinliği için ısı üretim hızında tutarlı bir artışa neden olduğu bulunmuştur. Daha sonra sinir ağı yaklaşımı kullanılarak bir model geliştirilmiştir ve model tarafından öngörülen ısı üretim oranı, deneysel sonuçlarla özdeş bir davranış sergilemiştir.

Panchal ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada, büyük boyutlu 20Ah-LFP prizmatik bataryanın farklı C oranlarında geçici sıcaklık dağılımlarını tahmin etmek için matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Bu bağlamda, Li-Ion batarya, ortam havası soğutmalı laboratuvarın içindeki bir stant üzerinde dikey bir konuma yerleştirilmiş ve

batarya, nicel veriler sağlamak için 1C, 2C, 3C ve 4C sabit akım hızlarında deşarj edilmiştir. Ek olarak, deşarj sırasında aynı batarya hücresi için kızılötesi görüntüleri alınmıştır. Mevcut model tahminleri, deneysel verilerle ve ayrıca sıcaklık profilleri için bir kızılötesi görüntüleme sonuçları ile çok iyi bir uyum içindedir. Mevcut sonuçlar, artan C oranlarının bataryanın ana yüzeyinde sıcaklıkların artmasına neden olduğunu göstermiştir.

Panchal ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada, prizmatik Li-Ion batarya hücresine yerleştirilen mini-kanallı soğuk plakalar içindeki sıcaklık ve hız dağılımlarının deneysel ve sayısal teknikler kullanılarak karşılaştırmalı bir çalışmasını sunmuştur. Çalışma, 1C ve 2C deşarj oranlarında ve 5 °C, 15 °C ve 25 °C'lik farklı çalışma sıcaklıklarında su soğutma yöntemleri için gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışma için toplam on dokuz adet sıcaklık sensörü kullanmışlardır ve bilerek farklı yerlere yerleştirmişlerdir. On dokuzdan, bataryanın ana yüzeyine on adet T tipi sıcaklık sensörü yerleştirmişlerdir ve su giriş-çıkış sıcaklığını ölçmek için dört adet K tipi sıcaklık sensörü kullanmışlardır. Hesaplamalı olarak, ANSYS Fluent'teki k-e modelini, mini kanallı bir soğutucu plakadaki akışı simüle etmek için kullanmışlardır ve veriler, sıcaklık profilleri için deneysel verilerle doğrulanmıştır. Mevcut sonuçlar, artan deşarj oranlarının ve artan çalışma sıcaklığının, soğutucu plakaların sıcaklığının artmasına neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, elektrotlara (anot ve katot) en yakın sıcaklık sensörleri, batarya yüzeyinin merkezinde bulunan sensörlerden daha yüksek sıcaklıkları ölçmüştür.

Zhao ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada, Maksimum sıcaklık ve yerel sıcaklık farkını uygun aralıkta tutmak için mini kanallı sıvı soğutmalı silindire dayanan silindirik bataryalar için yeni bir soğutma yöntemi önermiştir. Yapılan çalışmada kanal miktarı, kütle akış hızı, akış yönü ve giriş büyüklüğünün ısı yayılım performansı üzerine etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, 42.110 silindirik batarya hücresi için mini kanal sayısı dörtten az olmadığında ve giriş debisi $1x10^{-3}$ kg/s olduğunda, maksimum sıcaklığın 40° C'nin altında kontrol edilebileceğini göstermiştir. Hem maksimum sıcaklık hem de yerel sıcaklık farkı göz önüne alındığında, sıvı soğutmalı silindir ile soğutma tipinin, sadece kanal sayısı sekizden büyük olduğunda doğal taşınım soğutmasına kıyasla avantajlar gösterebileceği tespit edilmiştir.

Saw ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada, 38.120 silindirik hücreli bir batarya paketi için hava soğutma sistemini araştırmak için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi yapmışlardır. Batarya paketinde 38.120 silindirik hücre, bakır baralar, emme ve egzoz plenumu ve havalandırma delikli tutma plakaları vardır. Şarj sırasında hücre tarafından üretilen ısı, kalorimetre kullanılarak ölçülmüştür. Batarya paketinin termal performansları, kararlı durum simülasyonu kullanılarak çeşitli soğutma havası debileri ile analiz edilmiştir. Nu sayısı ile Re sayısı arasındaki korelasyon sayısal modelleme sonuçlarından çıkarılmış ve literatürle karşılaştırılmıştır. Ek olarak, korelasyonu doğrulamak için batarya paketinin farklı şarj oranlarında deneysel testi yapılmıştır. Bu yöntem, batarya paketi büyük olduğunda ve tam geçici simülasyon uygulanamadığı zaman batarya paketinin ısıl performansını tahmin etmenin basit bir yolunu ortaya koymuştur.

Suman Basu ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada 18.650 silindirik hücreli batarya paketi için yeni bir sıvı soğutucu bazlı termal yönetim sistemi tanıtmıştır. Bu sistem, güvenlikten ödün vermeden kompakt ve ekonomik olacak şekilde tasarlanmıştır. Önerilen Li-Ion batarya takımı için birleştirilmiş üç boyutlu elektrokimyasal termal model oluşturulmuştur. Model, soğutucu akış hızı ve deşarj akımı gibi farklı çalışma koşullarının paket sıcaklığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Temas direncinin, paketin termal performansı üzerinde en güçlü etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Sayısal çözümden, bir hücrenin sıcaklık ölçümü göz önüne alındığında, tüm ayrı hücrelerin sıcaklıklarını tahmin etmek için basit ve yeni bir sıcaklık korelasyonu tasarlanmıştır ve deney sonuçları doğrulanmıştır. Bu katsayılar, elektrikli bir araca özgü büyük bir Li-Ion batarya paketinde sensör gereksinimini ve karmaşıklığını azaltma konusunda büyük bir potansiyele sahiptir.

Li ve arkadaşları (2018) yaptıkları çalışmada, tek bir Li-Ion batarya hücresi ve 14 prizmatik bataryadan oluşan 50 V Li-Ion batarya paketinin üç boyutlu (3D) termal modellemesini yapmışlardır. Alt ölçekli elektrokimyasal modelleme için eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Modelleme, hızlı deşarj ve kötüye kullanım koşulları altında ısıl ve batarya dinamikleri hakkında yüksek düzeyde çözümlenmiş geçici 3B izleme sağlar. Düşük soğutucu hızı ile hücre sıcaklığının kolaylıkla 40 °C'yi aştığı ve sıcaklık

homojenliğinin 5C deşarj oranında 5 °C'lik sınır değerini aştığı tespit edilmiştir ve harici kısa devre koşullarında, sıcaklık hızla yükselip 80 ° C noktasına hızlı bir şekilde ulaşarak, bu durumun termal runaway ihtimalini daha da tetikleyebileceği öngörülmüştür.

Zhang ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada, Li-Ion batarya hücrelerinin ve 24 prizmatik bataryadan oluşan 6s4p (6 seri - 4 paralel batarya) batarya paketinin üç boyutlu analizini çok alanlı bir modelleme çerçevesi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Alt ölçekli elektrokimyasal modelleme için yaygın olarak kullanılan Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) modeli kullanılmış ve hücre alanında elektrik direnci, elektrokimyasal reaksiyonlar ve sıcaklıktan kaynaklanan ısı üretimi sorunu çözülmüştür. Yüksek deşarj oranında ve dış kısa devre sırasında sıcaklık değişimlerini elde etmişlerdir. Çalışan bataryanın sıcaklığının hızlı bir şekilde 80 ° C'ye yükselmesine rağmen, hücre sıcaklığı ve sıcaklık gradyanlarının, uygun bir soğutucu giriş hızı ve sıcaklığında, 5 ° C'de bile tolere edilebilir bir seviyede tutulduğu tespit edilmiştir.

Liu ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada, seri bağlı dört Li-Ion polimer batarya hücresinden oluşan bir batarya grubundaki geçici sıcaklık dağılımlarını, çeşitli şarj ve deşarj akımları altında ölçmüşlerdir. Deneysel verilerle ilişkilendirilmiş bir batarya ısıl modeli, ANSYS / Fluent platformunda modül seviyesinde oluşturulmuştur. Bu doğrulanmış modül ısıl modeli daha sonra paralel bağlanmış dört modül içeren bir paket ısıl modele genişletilmiştir. Batarya paketi modelindeki sıcaklık dağılımları 40 A, 60 A ve 80 A sabit deşarj akımları altında simüle edilmiştir. Optimum aralıkta çalışma sıcaklığı ve sıcaklık gradyanını sağlamak için batarya paketi modeline bir hava soğutmalı termal yönetim sistemi entegre edilmiştir.

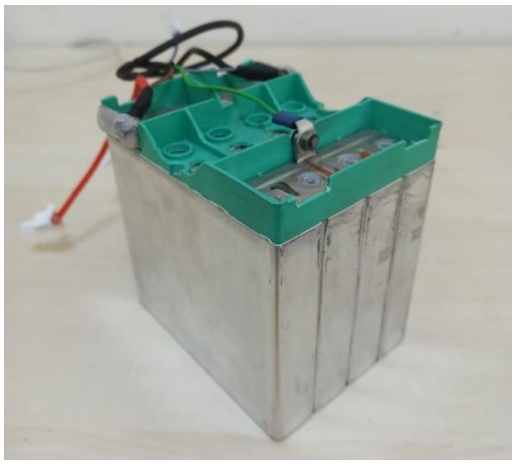
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmada, farklı senaryolar için soğutma olmadığı durumlarda deneyler yapılmıştır. Bu senaryolardan dört hücreli bir Li-Ion batarya grubu için 1C deşarj oranında bataryanın sergilediği sıcaklık değişimleri sayısal model ile karşılaştırılmıştır. Doğrulanan sayısal model kullanılarak yüksek deşarj oranında soğutma plakası analizi yapılmıştır ve soğutmasız durum ile karşılaştırılmıştır.

3.1.1. Deneysel çalışmada kullanılan batarya hücresi ve özellikleri

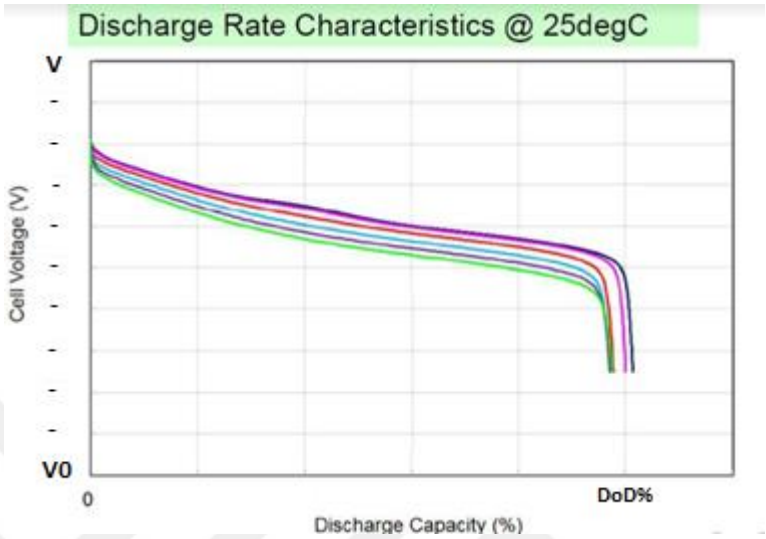
Çalışmalarda kullanılacak batarya hücresi olarak 23 Ah nominal kapasiteye sahip ve nominal voltajı 2.3V olup 1.5V-2.7V arasında çalışabilen Toshiba SCIB 23Ah batarya hücresi seçilmiştir. Çalışmada ana konulardan biri olan farklı sıcaklıklarda çalışma karakteristiğinin tespit edilmesi adına, kullanılan bu hücre geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahip olduğu için ön plana çıkmaktadır. Şekil 3.1.'de deneysel çalışmalarda kullanılan batarya grubu gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan batarya grubu

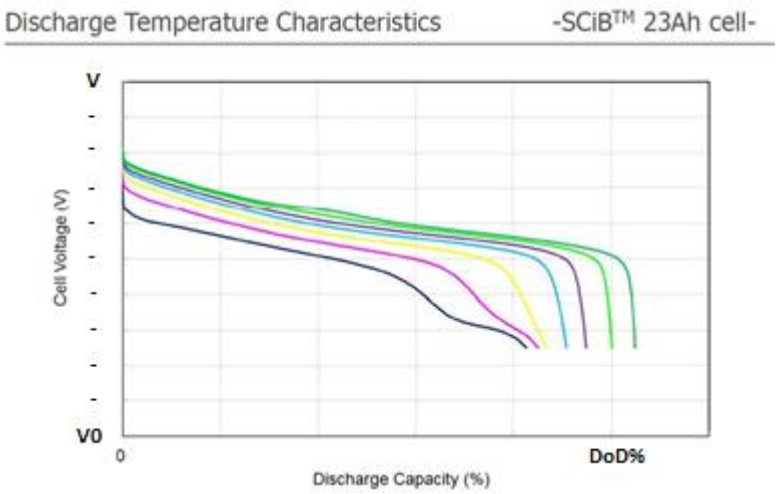
Batarya kapasitelerinin kullanımı sıcaklığa ve çekilen akıma (deşarj oranı) göre değişiklik göstermektedir. Sistemden daha düşük bir voltaj çekiliyorsa, bu kapasitenin daha verimli şekilde kullanıldığı anlamına gelmektedir. Şekil 3.2 bu çalışmada

kullanılacak olan batarya hücresinden çekilen akıma bağlı deşarj kapasitesinin kullanım oranını göstermektedir. Aşağıdaki şekilde görüleceği gibi akıma bağlı olarak (1C, 2C, 3C, 4C) akım arttıkça deşarj kapasitesinin kullanım oranı düşmektedir.



Şekil 3.2. Projede belirlenen batarya hücresinin farklı akım/deşarj oranlarında voltaj eğrisi (Toshiba Rechargable Battery SCIB 2020)

Deşarj kapasitesini etkileyen bir diğer ana faktör ise çalışma sıcaklığıdır. Batarya hücresi elektrokimyasal reaksiyonların verimli şekilde gerçekleşmesi için belirli bir çalışma sıcaklık aralığında çalışmalıdır. Literatür araştırmalarında Li-Ion batarya hücreleri için en uygun çalışma sıcaklık aralığı genel olarak 25-50 °C olarak belirtilmiştir. Şekil 3.3'te bu çalışmada kullanılan batarya hücresinin 1C deşarj oranında çalışırken sıcaklığa bağlı deşarj kapasitesi kullanımı görülmektedir. Grafikten de rahatlıkla görülebileceği gibi deşarj kapasitesi kullanım oranı, sıcaklığa bağlı olarak ciddi derecede değişmektedir. Bu çalışmanın ana amaçlarından biri de batarya hücresinin çalışma sıcaklığını optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutarak bataryadan en iyi verimi almaktır. Böylece, deşarj kapasitesi kullanımını maksimuma çıkararak, aracın menzilini yükseltmek hedeflenmektedir.



Şekil 3.3. Batarya hücresinin sıcaklığa bağlı voltaj/deşarj kapasitesi eğrisi (Toshiba Rechargable Battery SCIB 2020)

Tekil batarya hücresine ait teknik özellikler Çizelge 3.1'de belirtilmiştir (Toshiba Rechargable Battery SCIB 2020).

Çizelge 3.1. Tekil bataryanın karakteristikleri

Nominal Kapasite	23Ah
Nominal Gerilim	2.3V
Çıkış Gücü	1000W
Giriş Gücü	1000W
Hacimsel Enerji Yoğunluğu	202Wh/L
Kütlesel Enerji Yoğunluğu	96Wh/kg
Boyutlar	116x22x106mm
Kütle	Yaklaşık 550g

3.1.2. Deneysel çalışmada kullanılan cihazlar

Deneysel çalışmada kullanılan ana ekipmanlar Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bataryalar haricinde bu ekipmanlar, sistemin deşarj akımını ve gerilimini görebilmek için bir adet wattmetre, başlangıç senaryosunda düşünülen karşı yük olarak bir adet elektrik motoru, elektrik motoru için motor sürücü ve hız ayarlayıcıdır. Şekil 3.5'te bu cihazların yerleşimi gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

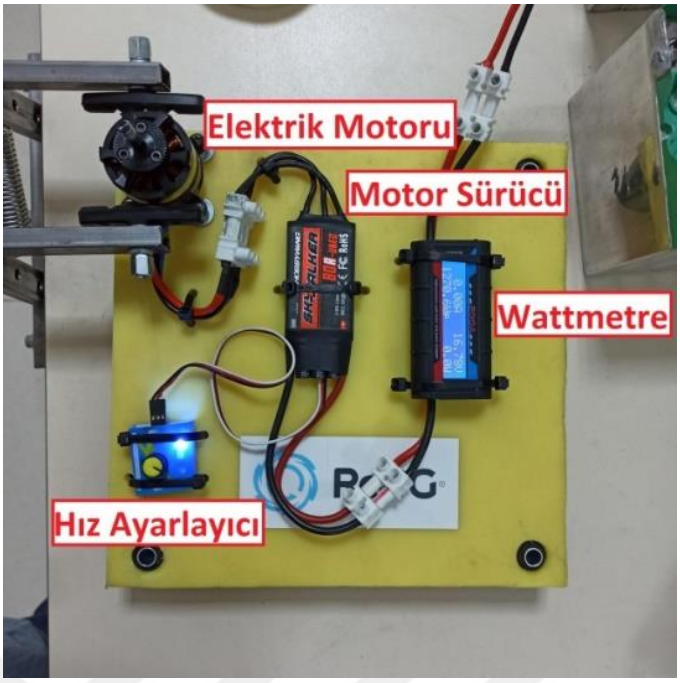


(d)

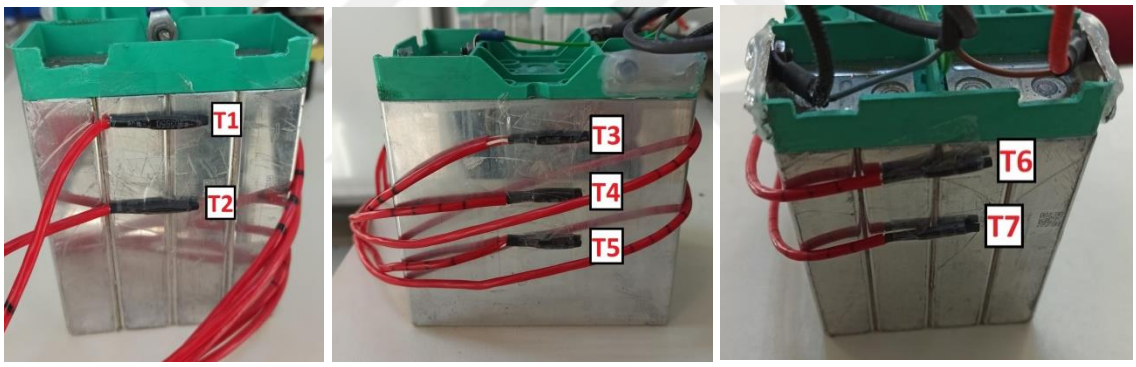


(e)

Şekil 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan cihazlar: (a) şarj cihazı (b) wattmetre (c) motor sürücü (d) hız ayarlayıcı (e) elektrik motoru



Şekil 3.5. Deneysel çalışmada kullanılan cihazların yerleşimi



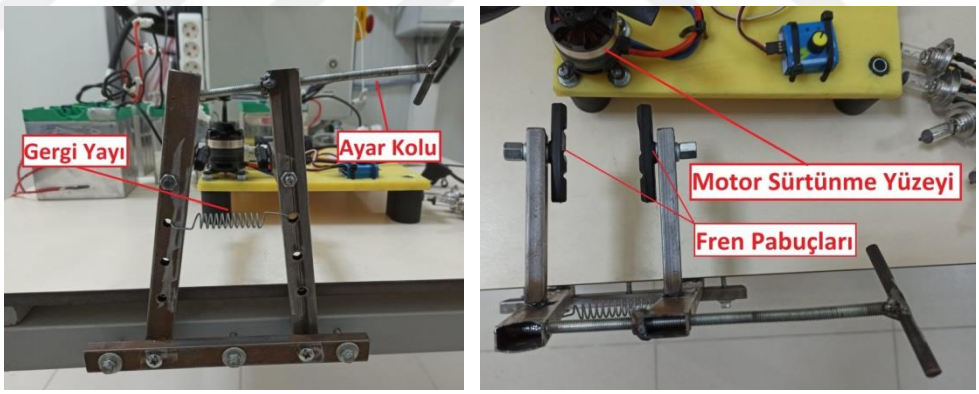
Şekil 3.6. Bataryalar üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörleri

Yapılan deneyde, batarya grubu üzerinde yedi farklı noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler sıcaklık sensörleri vasıtasıyla yapılmıştır. Şekil 3.6'da deneyde kullanılan sıcaklık sensörlerinin batarya grubu üzerindeki yerleşimi gösterilmiştir. Çizelge 3.2'de deneyde kullanılan sıcaklık sensörü ve wattmetrenin ölçüm hassasiyeti belirtilmiştir.

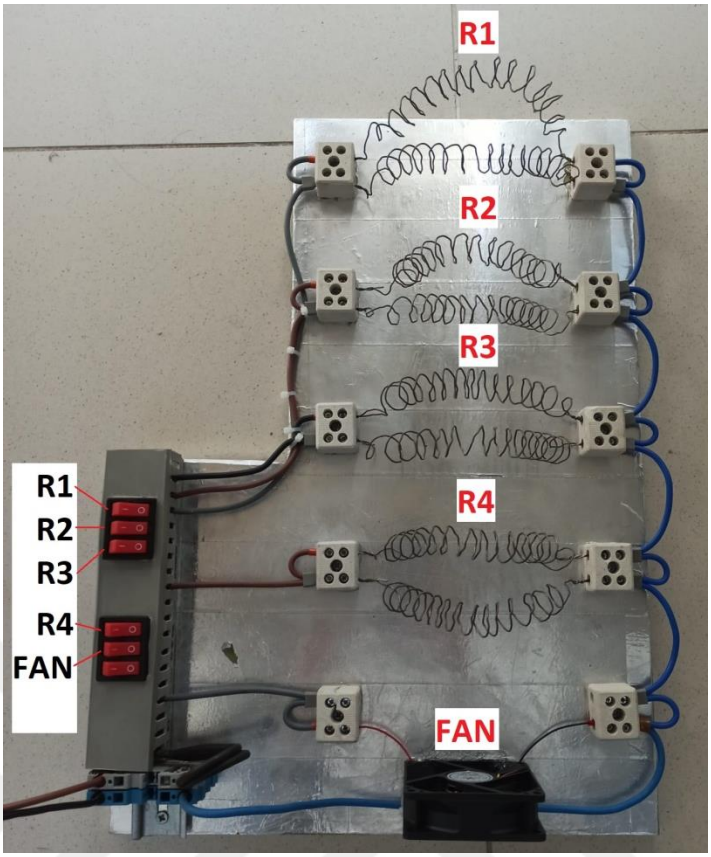
Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları ve hassasiyeti

Ölçüm cihazı	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
Sıcaklık sensörü	(RTR) Rekorlu Tip (PT100) / -50 /+400°C	± 0.01
Wattmetre	150A Yüksek Hassasiyetli Watt Ölçer ve Güç Analizörü	± 0.1 A ± 0.01 V ± 0.1 W

Başlangıç senaryosunda elektrik motorunun çektiği akım (yaklaşık 3-5 A) çok düşük olduğu için mekanik olarak motoru frenleyerek akım değerini yükseltmek için bir fren mekanizması kurulmuştur. Şekil 3.7'de bu mekanizmanın bileşenleri belirtilmiştir. Ancak bu mekanizma ile gerçekleştirilen deneylerde, sistemde pabuçların yapısından kaynaklı bir titreşim meydana geldiği için kararlı bir şekilde sabit akım ile deşarj işlemi gerçekleştirilememiştir ve yük kontrolünde stabilite sağlanamamıştır. Bu nedenle, deşarj işleminin daha sağlıklı gerçekleştirilebilmesi için karşı yük olarak sisteme dört dirençli bir düzenek entegre edilmiştir. Bu dört dirençten her biri yaklaşık olarak 1C (23A) akımına tekabül etmektedir. Dirençler Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Fren mekanizması bileşenleri



Şekil 3.8. Direnç düzeneği

Şekil 3.8'de gösterilen butonlar ile dirençler ayrı ayrı aktifleştirilebilmektedir. Ayrıca dirençlerin ortaya çıkardığı ısıyı dağıtmak için de bir adet fan eklenmiştir.

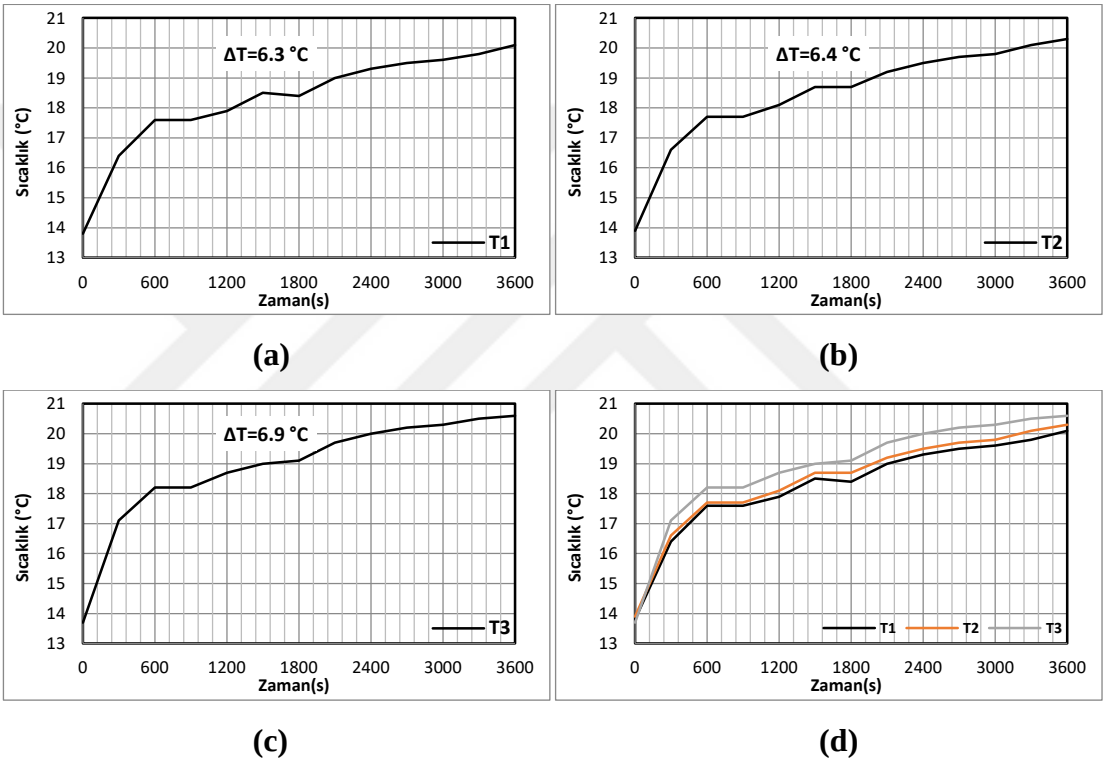
3.1.3. Deney senaryoları

Kullanılan bataryaların performansını tam olarak belirleyebilmek için farklı akım değerlerinde ve farklı sürelerde deşarj deneyleri yapılmıştır. Bu deney senaryolarının koşulları ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki tablolarda ve grafiklerde belirtilmiştir. Grafiklerde ΔT ile belirtilen değer, batarya hücrelerinin belirtilen süre içerisindeki yüzey sıcaklık değişimidir.

Senaryo-1 deney koşulları ve sıcaklık değişim grafikleri Çizelge 3.3 ve Şekil 3.9'da belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Senaryo-1 deney koşulları

DEŞARJ YÖNTEMİ	DEŞARJ AKIMI (A)	SÜRE (s)	GRUP SAYISI	HÜCRE SAYISI
ELEKTRİK MOTORU	15-65 Ort: 40	3600	4	16

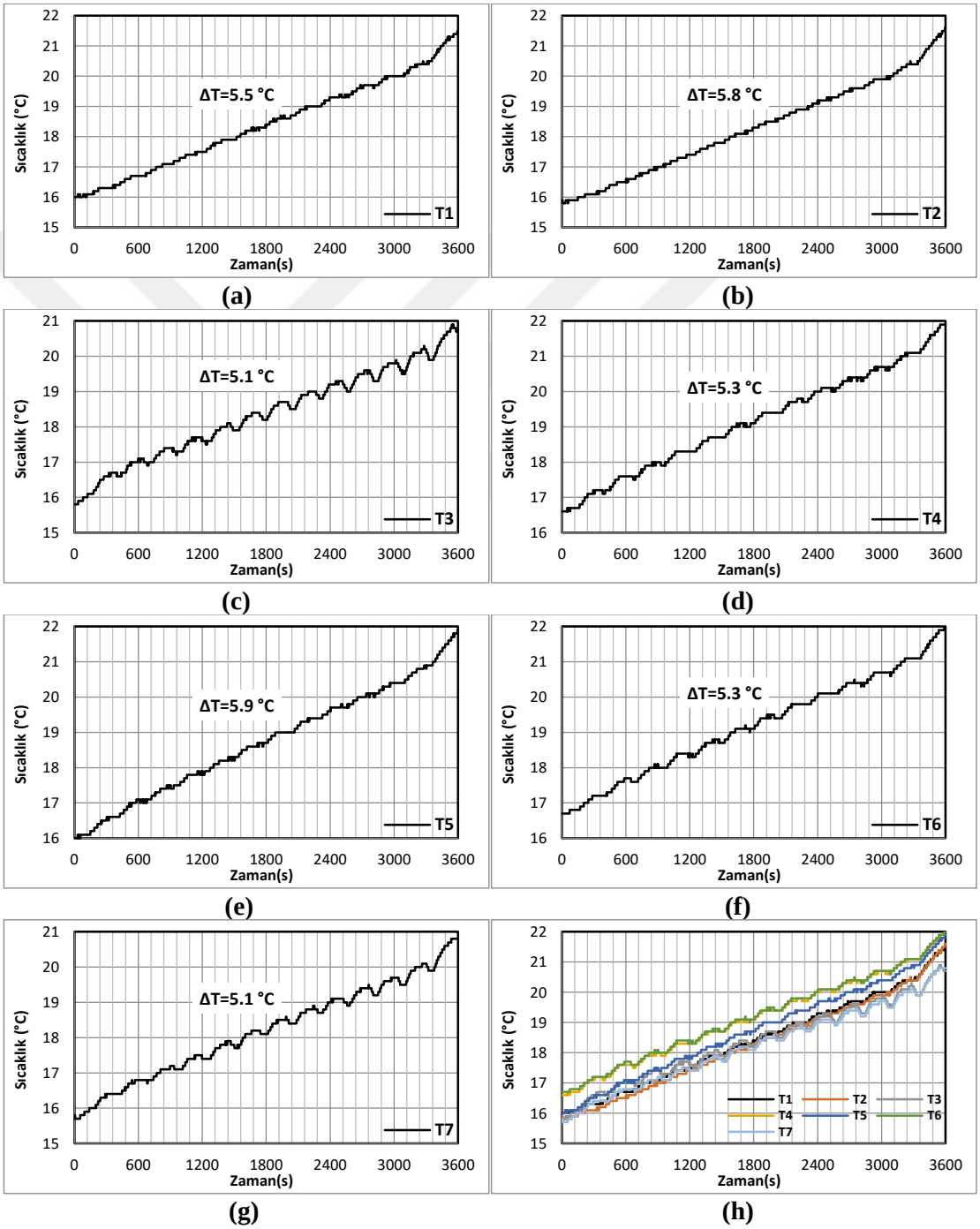


Şekil 3.9. Senaryo-1 için sıcaklık sensöründen elde edilen sıcaklık değişim eğrileri

Elektrik motoru ile yapılan deneyde deşarj akımının fren mekanizması kaynaklı anlık yükselmesi/düşmesi nedeniyle daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için direnç düzeneği ile deney yapılmıştır. Direnç düzeneği ile yapılan deneyin deney koşulları ve elde edilen sıcaklık değişim eğrileri aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Senaryo-2 deney koşulları

DEŞARJ YÖNTEMİ	DEŞARJ AKIMI (A)	SÜRE (s)	GRUP SAYISI	HÜCRE SAYISI
DİRENÇ	20-80 Ort: 50	3600	1	4



Şekil 3.10. Senaryo-2 için sıcaklık sensöründen elde edilen sıcaklık değişim eğrileri

Direnç düzeneği kullanılarak 20-80A (Ort: 50A) deşarj akımı ile yapılan deneyde, akım değeri yaklaşık olarak 1C deşarj oranına tekabül etmektedir ve deney sonucunda batarya yüzeyinde yaklaşık olarak 6 °C sıcaklık değişimi gözlemlenmiştir.

3.2. Sayısal Çalışma

Deneysel çalışmadan elde edilen verilerin karşılaştırılması ve bataryalar üzerindeki ısıl davranışları detaylı olarak gözlemleyebilmek için sayısal çalışma yapılmıştır. Bu aşamada Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılmıştır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, bilgisayar tabanlı simülasyon yoluyla sıvı akışı, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonlar gibi ilgili fenomenleri içeren sistemlerin analizidir. Teknik çok güçlüdür ve çok çeşitli endüstriyel veya endüstriyel olmayan uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bazı örnekler (Sevilgen (2010):

- Uçak ve Araçların Aerodinamiği: Kaldırma ve sürükleme
- Gemilerin Hidrodinamiği
- Enerji Santrali: İçten yanmalı motorlarda yanma ve gaz türbinleri
- Turbo Makineler: Dönen pervane içi akış, difüzörler vb.
- Elektrik ve Elektronik Mühendisliği: Mikro devreler içeren ekipmanın soğutulması, batarya termal yönetim sistemleri
- Kimyasal Proses Mühendisliği: Karıştırma ve ayırma, polimer kalıplama
- Binaların Dış ve İç ortamı: Rüzgar yüklemesi ve ısıtma/havalandırma
- Deniz Mühendisliği: Açık deniz yapılarındaki yükler
- Çevre Mühendisliği: Kirleticilerin ve atık suların dağıtımı
- Hidroloji ve Oşinografi: Nehirlerdeki, haliçlerdeki, okyanuslardaki akışlar
- Meteoroloji: Hava tahmini
- Biyomedikal Mühendisliği: Atardamarlar ve damarlardaki kan akışı

Ticari HAD yazılımlarının yatırım maliyetleri küçük değildir, ancak toplam masraf normalde yüksek kaliteli bir deneysel tesisinki kadar büyük değildir. Ayrıca, akışkan sistemleri tasarımına yönelik deneye dayalı yaklaşımlara göre HAD'nin birkaç benzersiz avantajı vardır (Versteeg ve Malalasekera, 2007):

- Yeni tasarımların tedarik sürelerinde ve maliyetlerinde önemli azalma
- Kontrollü deneylerin gerçekleştirilmesinin zor veya imkansız olduğu sistemleri inceleme yeteneği (örneğin çok büyük sistemler)
- Normal performans limitlerinde ve ötesinde tehlikeli koşullar altında sistemleri inceleme yeteneği (ör. güvenlik çalışmaları ve kaza senaryoları)
- Sonuçların pratikte sınırsız ayrıntı düzeyi

HAD kodları, sıvı akışı problemlerini çözebilen sayısal algoritmalar etrafında yapılandırılmıştır. Çözme gücüne kolay erişim sağlamak için tüm ticari HAD paketleri, problem parametrelerini girmek ve sonuçları incelemek için gelişmiş kullanıcı arayüzleri içerir. Dolayısıyla tüm kodlar üç ana unsur içerir (Sevilgen (2010):

- Hazırlık
- Çözümleme
- Görüntüleme

Bir HAD kodu bağlamında bu öğelerin her birinin işlevi kısaca aşağıda açıklanmıştır:

Hazırlık, arayüz aracılığıyla problemin bir HAD programına girilmesi ve ardından bu girdinin çözücü tarafından kullanıma uygun bir forma dönüştürülmesinden oluşur. Hazırlık aşamasındaki kullanıcı faaliyetleri şunları içerir (Versteeg ve Malalasekera, 2007):

- İlgili bölgenin geometrisinin tanımlanması: Hesaplama alanı
- Çözüm ağı oluşturma – Etki alanının bir dizi daha küçük, birbiriyle örtüşmeyen alt alanlara bölünmesi: Hücrelerden (veya kontrol hacimleri veya elemanlar) oluşan bir ağ
- Modellenmesi gereken fiziksel ve kimyasal olayların seçimi
- Akışkan özelliklerinin tanımı
- Etki alanı sınırıyla çakışan veya ona temas eden hücrelerde uygun sınır koşullarının belirlenmesi

Bir akış probleminin (hız, basınç, sıcaklık vb.) çözümü her hücrenin içindeki düğümlerde tanımlanır. Bir HAD çözümünün doğruluğu, çözüm ağındaki hücre sayısı tarafından yönetilir. Bu özelliklerin hızlı değişiklik gösterdiği yerlerde ince elemanlar kullanılır. Hem bir çözümün doğruluğu hem de gerekli bilgisayar donanımı ve hesaplama süresi açısından maliyeti, çözüm ağının inceliğine bağlıdır. Optimal ağlar genellikle tek tip değildir: noktadan noktaya büyük değişikliklerin meydana geldiği alanlarda daha ince, nispeten az değişikliğin olduğu bölgelerde daha kalındır (Sevilgen (2010)

Bir HAD projesinde endüstride harcanan zamanın %50'den fazlası, alan/hacim geometrisinin tanımlanmasına ve çözüm ağı oluşturmaya ayrılmıştır. Mevcut hazırlık ara yüzleri ayrıca kullanıcıya ortak akışkanlar için malzeme özelliği kitaplıklarına erişim ve temel akışkan akış denklemlerinin yanı sıra özel fiziksel ve kimyasal süreç modellerini (örn. türbülans modelleri, ışınımla ısı transferi, yanma modelleri) çağırma olanağı sağlamaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007).

Üç farklı sayısal çözüm tekniği vardır: Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Spektral Yöntemler. HAD kodlarının merkezinde özel bir sonlu fark formülasyonu olan sonlu hacim yöntemi yer almaktadır. Sayısal algoritma ana hatlarıyla aşağıdaki adımlardan oluşur (Versteeg ve Malalasekera, 2007):

- Alanın tüm (sonlu) kontrol hacimleri üzerinde akışkan akışını yöneten denklemlerin entegrasyonu
- Ayrıklaştırma – elde edilen integral denklemlerin bir cebirsel denklem sistemine dönüştürülmesi
- Cebirsel denklemlerin yinelemeli bir yöntemle çözümü

İlk adım olan kontrol hacmi entegrasyonu, sonlu hacim yöntemini diğer tüm HAD tekniklerinden ayırır. Ortaya çıkan ifadeler, her bir sonlu hacimli hücre için ilgili özelliklerin (tam) korunumunu ifade eder. Sayısal algoritma ile temeldeki fiziksel koruma ilkesi arasındaki bu açık ilişki, sonlu hacim yönteminin temel avantajlarından birini oluşturur ve kavramlarını sonlu elemanlar ile spektral yöntemlerden çok daha anlaşılır hale getirir. Genel bir φ akış değişkeninin korunumu, örn. Sonlu bir kontrol

hacmi içindeki bir hız bileşeni veya entalpi, onu artırmaya veya azaltmaya yönelik çeşitli süreçler arasındaki bir denge olarak ifade edilebilir.

HAD kodları, temel taşıma fenomeni, taşınım (akışkan akışından dolayı taşıma), difüzyon (noktadan noktaya φ değişimlerinden dolayı taşıma) ve ayrıca kaynak terimlerin çözümü (φ'nin oluşturulması veya yok edilmesiyle ilişkili) ve zamana göre değişim oranı için uygun ayrıklaştırma teknikleri içerir. Altta yatan fiziksel fenomenler karmaşıktır ve doğrusal değildir, bu nedenle yinelemeli bir çözüm yaklaşımı gereklidir (Versteeg ve Malalasekera, 2007).

Hazırlık işleminde olduğu gibi, görüntüleme alanında da son zamanlarda büyük miktarda geliştirme çalışması yapılmıştır. Birçoğu olağanüstü grafik özelliklerine sahip olan mühendislik iş istasyonlarının giderek yaygınlaşması sayesinde, önde gelen HAD paketleri artık çok yönlü veri görselleştirme araçlarıyla donatılmıştır. Bunlar şunları içerir (Versteeg ve Malalasekera, 2007):

- Etki alanı/hacmi geometrisi ve ağ ekranı
- Vektör çizimleri
- Çizgi ve gölgeli düzey eğrileri
- 2B ve 3B yüzey çizimleri
- Parçacık takibi
- Renkli analiz sonuncu çıktısı
- Dinamik sonuç gösterimi için animasyon

3.2.1. Sonlu hacimler yöntemi

Sonlu Hacimler Yöntemi (FVM), diferansiyel hacimler üzerindeki koruma yasalarını temsil eden kısmi diferansiyel denklemleri, sonlu hacimler (veya elemanlar veya hücreler) üzerinde ayrık cebirsel denklemlere dönüştüren sayısal bir tekniktir. Sonlu fark veya sonlu eleman yöntemine benzer bir şekilde, çözüm sürecindeki ilk adım, FVM'de örtüşmeyen elemanlara veya sonlu hacimlere ayrılan geometrik alanın ayrıklaştırılmasıdır. Kısmi diferansiyel denklemler daha sonra her bir ayrık eleman

üzerinde entegre edilerek ayrıklaştırılır/cebirsel denklemlere dönüştürülür. Cebirsel denklemler sistemi daha sonra her bir eleman için bağımlı değişkenin değerlerini hesaplamak için çözülür.

Sonlu hacim yönteminde, korunum denklemindeki bazı terimler yüzey akılarına dönüştürülerek sonlu hacimli yüzeylerde değerlendirilir. Son olarak, FVM'de bilinmeyen değişkenler sınır yüzeylerinde değil, hücre bazlı kontrol hacminde hacim elemanlarının merkezlerinde; düğüm noktası bazlı kontrol hacimlerinde birleşim noktalarında değerlendirildiği için, çeşitli sınır koşullarını müdahale etmeden uygulamak oldukça kolaydır (Moukalled, Mangani ve Darwish, 2016).

3.2.2. Batarya HAD analizi

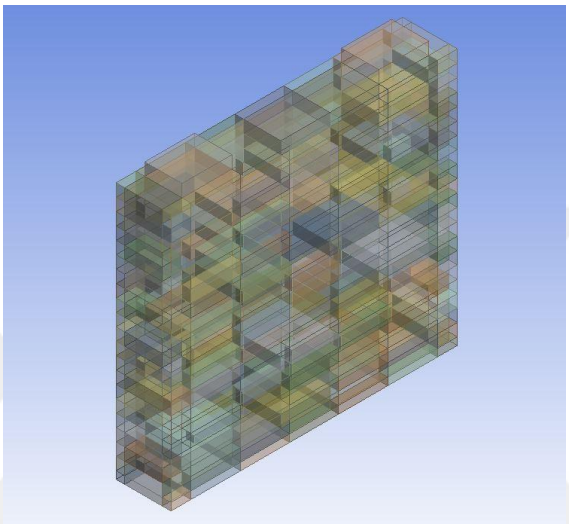
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri zaman ve maliyet gibi parametreler açısından deneysel yöntemlere göre çok daha avantajlı olduğu için, günümüzde birçok ısı transferi ve akışkanlar mekaniği analizleri HAD yöntemi ile yapılmaktadır. Henüz tasarım ve geliştirme aşamasında olan bir sistemin HAD analizleri yapılarak, gerekiyorsa tasarımda düzeltmelerin yapılması sağlanabilmektedir. Bu yöntem, sistemin ısıl karakteristiklerinin belirlenmesini sağlar. Bu işlem yapılırken, oluşturulan modellerin ve simülasyonların gerçek fiziki model ile aynı olabilmesi için yapılan çalışmaların hassas olması gerekmektedir.

HAD işleminin yapılması için ilk olarak bilgisayar ortamında tekil batarya hücresinin ve dört hücreli batarya grubunun Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) modelinin oluşturulması gerekmektedir. Daha sonra HAD yazılımının hesaplamaları yapabilmesi için geometrik modelin sonlu hacimlere bölünmesi ve ağ yapısının(mesh) oluşturulması gerekmektedir. Ağ yapısı oluşturulduktan sonra sınır şartları ve analiz sonucunda alacağımız veriler tanımlanır ve model çözdürülür. Çözüm işleminden sonra sistemde meydana gelen ısı transferleri ve sıcaklık değişimleri incelenir.

Bu çalışmada öncelikle tekil batarya hücresi için daha sonra dört hücreli batarya grubu için soğutmasız ve soğutmalı durumun HAD analizi yapılmıştır.

3.2.3. Batarya CAD modeli

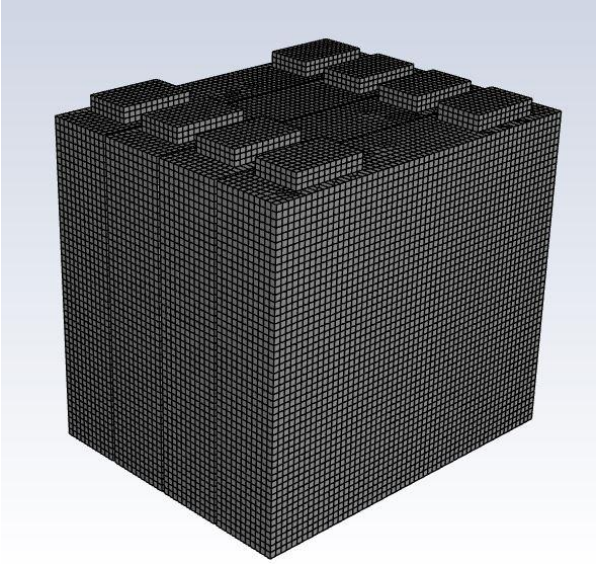
Batarya hücresinin Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) modeli oluşturulurken, mesh yapısının kontrol edilebilirliğini arttırmak ve daha doğru sonuçlar elde etmek için bloklar halinde gövdelere bölünmüştür (Şekil 3.11). Bu yöntem literatürde yaygın olarak kullanılmakta olup ilgili modelin alt modellere ayrılması şeklinde özetlenebilir.



Şekil 3.11. Multizone yöntemi için ayrıklaştırılmış batarya gövdesi

3.2.4. Ağ yapısının oluşturulması

Hesaplamaların yapılabilmesi için geometrinin küçük elemanlara bölünmesi gerekmektedir. Her bir eleman için "Multizone" metodu ile hücrenin her bölgesinde homojen mesh elemanı kullanma imkânı mevcuttur. Ancak daha fazla sayıda batarya paketi içeren sistemlerde çözümleme zamanlarında oldukça uzun sürelerle karşılaşıldığından dolayı tekil hücre için Multizone yöntemi, dört hücreli batarya grubu için "cut_cell" olarak adlandırılan ve mümkün olduğunca hexahedral elemanlardan oluşan çözüm ağı yapısı tercih edilmiştir. Dört hücreli batarya grubunun çözüm ağı (mesh) yapısı Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Multizone yöntemi ile oluşturulmuş çözüm ağı yapısı

3.2.5. Çözümlemelerde kullanılan batarya modeli ve ilgili denklemler

Fluent'in başlangıç modülleri içerisinde batarya hücresi için herhangi bir model bulunmamaktadır. Bu yüzden batarya grubunun komut ekranından komut yazılarak aktif hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için Duel-Potential MSMD Battery Model aktifleştirilerek seçilmiştir. Batarya hücresinin Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri geçici rejimde gerçekleştirilmiştir.

HAD analizlerinde literatürde yaygın olarak kullanılan NTGK Emprical Model seçilerek gerekli parametreler istenilen deşarj oranında, akımda, voltajda, güçte ve dirençte tanımlanabilmektedir.

Batarya hücresine ait HAD çözümlemelerinde kullanılan modele ait denklemler aşağıda yer almaktadır. Batarya hücresinin elektrokimyasal reaksiyonlara bağlı ohmik ısınma ve ısı üretim miktarı için, literatürde Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'deki yaklaşım benimsenmiştir (Bulut, Albak, Sevilgen ve Öztürk, 2022).

$$\frac{\partial\left(\rho_b c_{p,b} T_b\right)}{\partial \mathrm{t}} = \nabla.\left(\mathrm{k}_b \nabla \mathrm{T}\right) + \dot{q}_{gen} \tag{3.1}$$

$$\dot{q}_{gen} = S_p|\nabla \mathrm{V}_p|^2 + S_n|\nabla \mathrm{V}_n|^2 + \dot{q}_{ECh}$$
$$\nabla \cdot (S_p \nabla \mathrm{V}_p) = -j_{ECh} \tag{3.2}$$
$$\nabla \cdot (S_n \nabla \mathrm{V}_n) = j_{ECh}$$

Akım yoğunluğu olan j_{ECh}, V_n ve V_p arasındaki potansiyel farkın bir fonksiyonudur ve elektrotların karakteristiklerinin polarizasyonuna bağlıdır. Aşağıda görülen Denklem 3.3, polarizasyon kullanılarak j_{ECh} değerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Bulut, Albak, Sevilgen ve Öztürk, 2022).

$$j_{ECh} = \frac{\mathrm{Y}}{V_{olume}}[U - (V_p - V_n)] \tag{3.3}$$

U ve Y değerleri, bataryaya özgü parametre değerleridir ve Denklem 3.4 ve Denklem 3.5'te verilen denklemler yardımıyla, Deşarj Derinliğinin (Depth of Discharge - DoD) bir fonksiyonu olarak hesaplanabilmektedir (Bulut, Albak, Sevilgen ve Öztürk, 2021).

$$\mathrm{U} = \left(\sum_{n=0}^{5} \mathrm{a}_n (DoD)^n\right) \tag{3.4}$$

$$\mathrm{Y} = \left(\sum_{n=0}^{5} \mathrm{b}_n (DoD)^n\right) \tag{3.5}$$

$\dot{q}_{\mathrm{ECh}}$ ise Denklem 3.6'da verilen ifade ile hesaplanmaktadır (Bulut, Albak, Sevilgen ve Öztürk, 2021).

$$\dot{q}_{ECh} = j_{ECh}\left[U - (V_p - V_n) - T\frac{dU}{dT}\right] \tag{3.6}$$

Denklem 3.7'deki batarya hücresinin parametrelerini belirlemek için başka bir ısı üretim modeli kullanılmaktadır (Bulut, Albak, Sevilgen ve Öztürk, 2021).

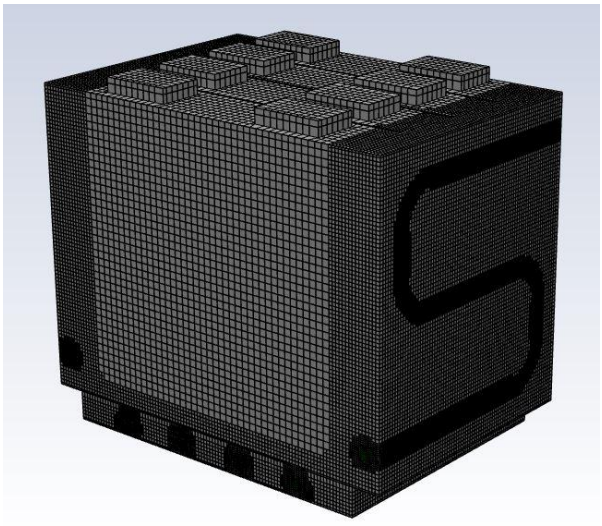
$$\left(\frac{1}{I}\right)\left(\frac{dT_b}{dt}\right) = \frac{R_J}{m_b c_{p,b}}.I + \frac{\dot{q}_{ECh}}{m_b c_{p,b}} \quad (3.7)$$

$\dot{q}_{\mathrm{ECh}}$ sabit bir değer olarak kabul edilebilir. Böylece *1/I(dT$_b$/dt)* fonksiyonu, Denklem 3.7'deki I akımının doğrusal bir fonksiyonu olarak düşünülebilir. Bu denklemler için sembol, tanım ve birimler Çizelge 3.5'te yer almaktadır.

Çizelge 3.5. Semboller ve tanımları

Sembol	Birim	Tanım
ρ_b	[kg/m^3]	Batarya yoğunluğu
$c_{p,b}$	[J/(kgK)]	Bataryanın özgül ısısı
T	[K]	Sıcaklık
k_b	[W/(mK)]	Bataryanın ısıl iletkenliği
S_n ve S_p	[S/m]	Negatif ve pozitif elektrotların elektriksel iletkenliği
V_n ve V_p	[V]	Negatif ve pozitif elektrotların potansiyelleri
$\dot{q}_{\mathrm{gen}}$	[W/m^3]	Ohmik ısınma ve elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşan toplam hacimsel ısı üretim miktarı
$\dot{q}_{\mathrm{ECh}}$	[W/m^3]	Elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşan ısı üretim miktarı
j_{ECh}	[A/m^3]	Hacimsel akım yoğunluğu

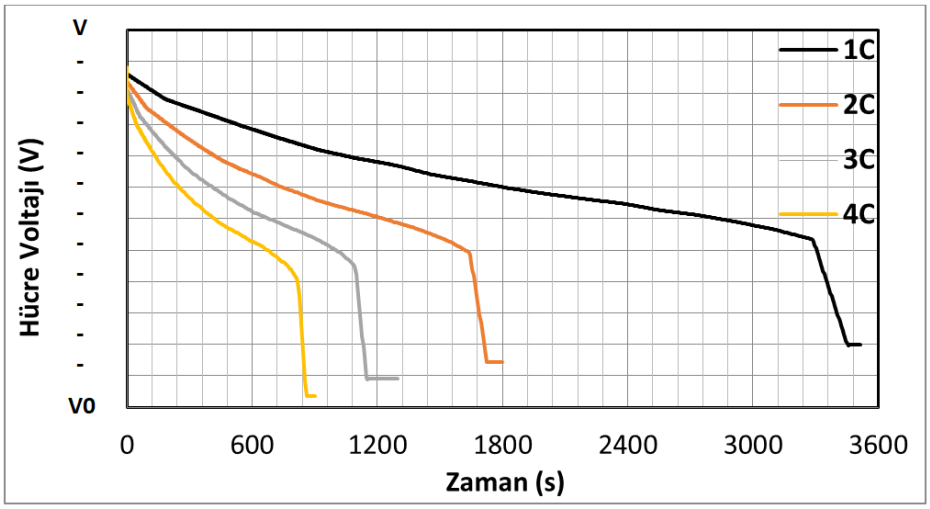
Dört hücreli batarya grubunun mevcut koşullarda HAD analizi yapıldıktan sonra serpantin kanallı soğutucu bir blok eklenerek de soğutma performansı değerlendirilmiştir. Hesaplamalar ANSYS Fluent Yazılımı ile geçici rejim koşullarında gerçekleştirilmiştir. Soğutma plakalarında soğutma sıvısı olarak saf su ve akışın laminer olduğu kabul edilmiştir. Akışkan giriş hızı 0,01 m/s olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.13'te soğutucu bloklu batarya grubunun çözüm ağı yapısı gösterilmiştir.



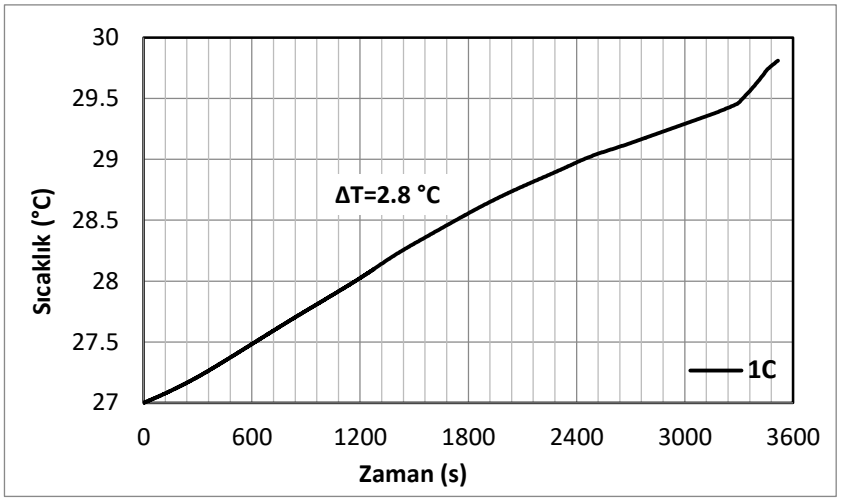
Şekil 3.13. Serpantin kanallı soğutucu blok eklenmiş batarya grubunun çözüm ağı yapısı

3.2.6. Batarya HAD analiz sonuçları

Şekil 3.14'te tekil batarya hücresi için farklı deşarj oranlarında yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen hücre voltajı grafiği gösterilmiştir. Şekil 3.15'te tekil hücre için 1C deşarj oranında meydana gelen sıcaklık değişim grafiği gösterilmiştir. Şekil 3.17'de tekil hücrenin bir saat deşarj sonundaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.

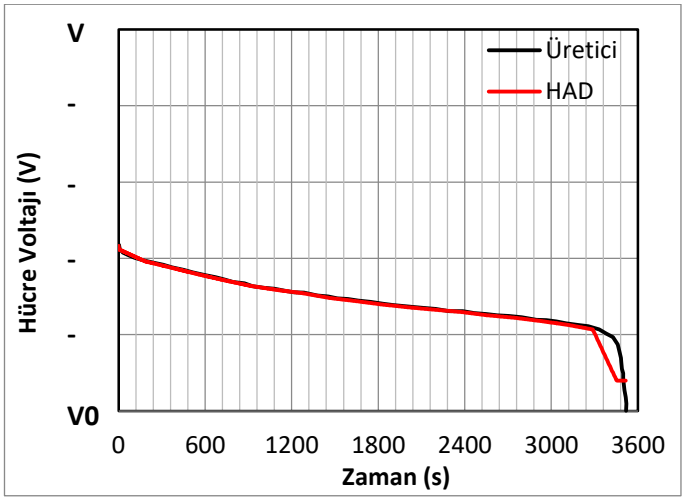


Şekil 3.14. Tekil hücrenin farklı deşarj oranlarında voltaj değişim grafiği

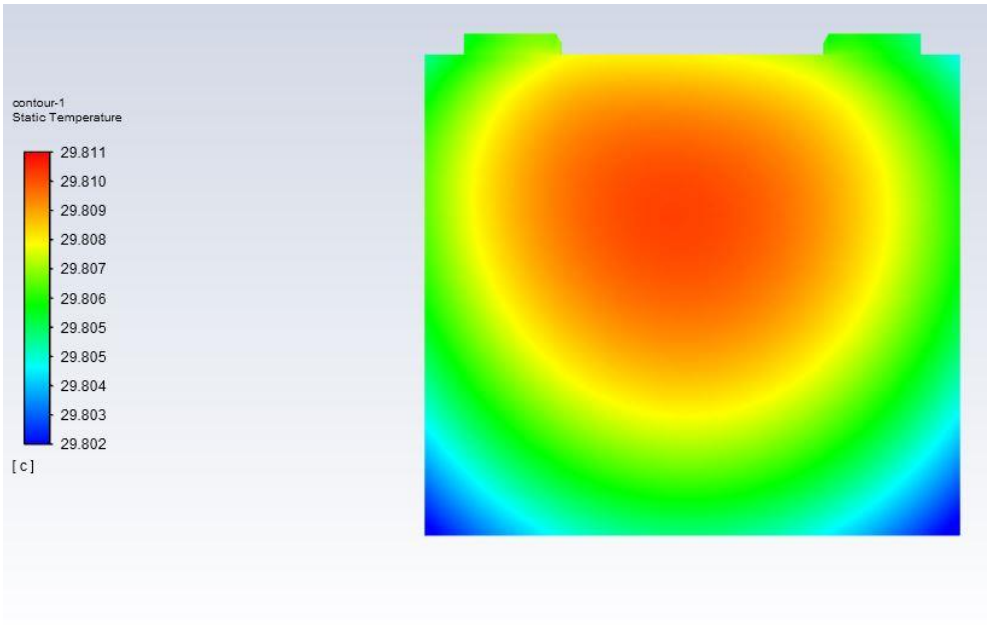


Şekil 3.15. Tekil hücrenin 1C deşarj oranında sıcaklık değişimi

İlk yapılan HAD analizinde 1C deşarj oranında tekil batarya hücresi için 27°C başlangıç hücre sıcaklığı koşulu kabul edilmiştir. Bu deşarj senaryosunda gerçekleşen maksimum sıcaklık değişimi 2,8 °C olarak gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen hücre voltajı eğrilerinin üretici verileri ile örtüştüğü tespit edilmiştir. İki eğrinin karşılaştırması Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

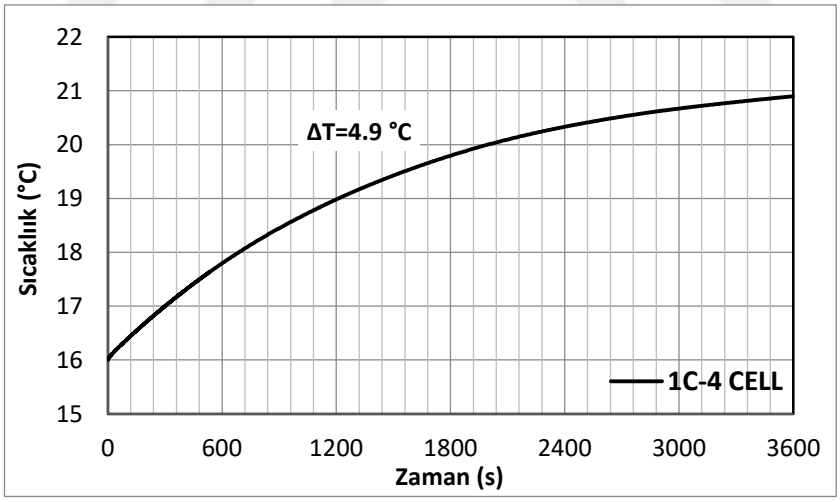


Şekil 3.16. Tekil hücre için hücre voltaj eğrisi karşılaştırma grafiği (HAD-katalog değerleri)



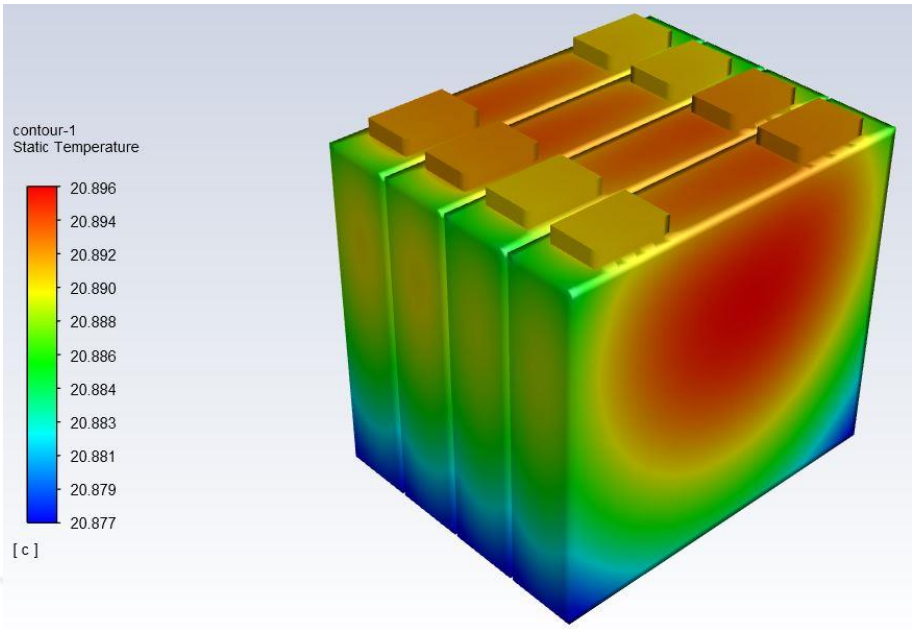
Şekil 3.17. Geçici rejimde ve 1C deşarj oranında T=3600 s için tekil hücre yüzey sıcaklık dağılımı

Şekil 3.18'de dört hücreli batarya grubunun 1C deşarj oranında meydana gelen sıcaklık değişim grafiği gösterilmiştir.

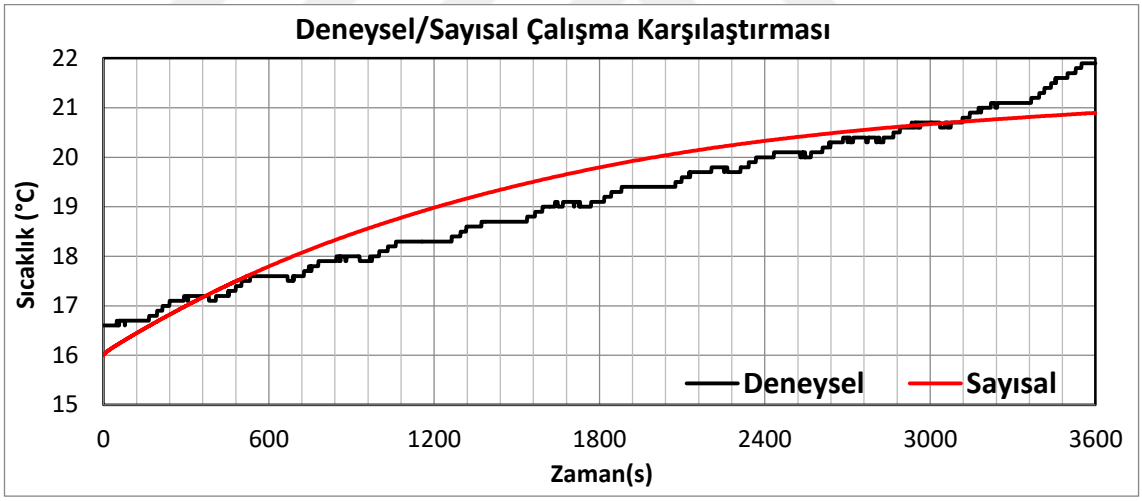


Şekil 3.18. Senaryo 2 için dört hücreli batarya grubunun 1C deşarj oranında sıcaklık değişimi

Şekil 3.19'da dört hücreli batarya grubunun bir saat deşarj sonundaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



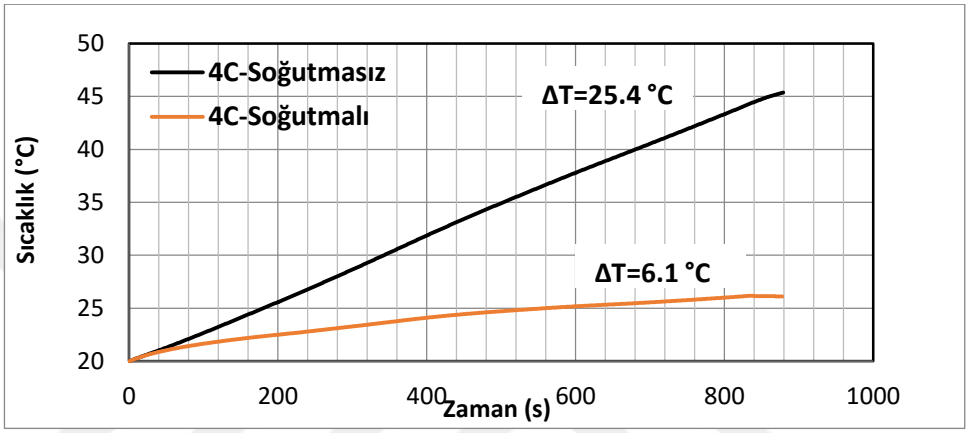
Şekil 3.19. Geçici rejimde ve 1C deşarj oranında T=3600 s için dört hücreli soğutmasız batarya grubunun yüzey sıcaklık dağılımı



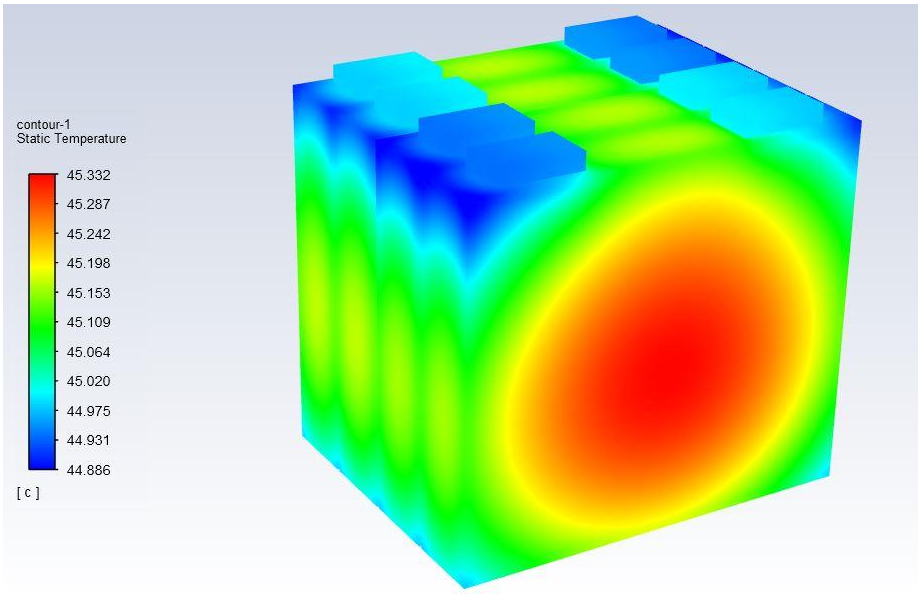
Şekil 3.20. Deneysel veriler ile HAD sonuçlarının karşılaştırılması

Dört hücreli batarya grubu için 1C deşarj oranı ve 16 °C başlangıç hücre sıcaklığı koşulları altında HAD analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda 4,9 °C sıcaklık artışı gözlemlenmiştir ve bu değer ile deşarj işlemi boyunca elde edilen sıcaklık değişim eğrisinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçların ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırma grafiği Şekil 3.20'de gösterilmiştir.

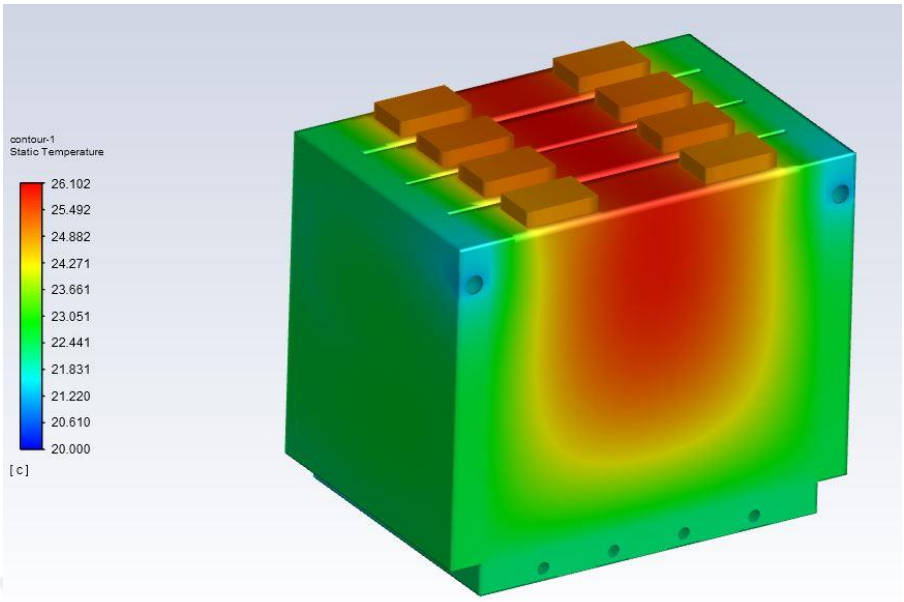
Şekil 3.21'de dört hücreli batarya grubunun soğutmasız ve serpantin kanallı soğutucu blok eklenmiş halinin 1C deşarj oranında elde edilen sıcaklık değişimi karşılaştırma grafiği gösterilmiştir. Şekil 3.22'de soğutmasız batarya grubunun, Şekil 3.23'te serpantin kanallı soğutucu blok eklenmiş batarya grubunun 4C deşarj oranında deşarj işlemi sonundaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Serpantin kanallı soğutucu blok eklenmiş batarya grubu ile yapılan HAD analiz sonucunda soğutmasız duruma göre sıcaklıkta 19,3 °C düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 3.21. Dört hücreli batarya grubunun soğutmasız ve serpantin kanallı soğutucu blok eklenmiş halinin sıcaklık değişimi karşılaştırma grafiği



Şekil 3.22. Geçici rejimde ve 4C deşarj oranında T=900 s için dört hücreli soğutmasız batarya grubunun yüzey sıcaklık dağılımı



Şekil 3.23. Geçici rejimde ve 4C deşarj oranında T=900 s için serpantin kanallı soğutucu blok eklenmiş dört hücreli batarya grubunun yüzey sıcaklık dağılımı

4. BULGULAR (BULGULAR VE TARTIŞMA)

Mevcut cihazların kullanımıyla on altı hücreli seri bağlanmış dörtlü batarya grubu ile ve dört hücreli tekil batarya grubu ile deneyler yapılmıştır.

Bataryanın deşarj olması için ilk olarak elektrik motoru kullanılarak deney yapılmıştır ancak deney esnasında titreşim nedeniyle deşarj akımında kararsız değişiklikler ve ani artışlar meydana geldiği için sağlıklı sonuç elde edilememiştir.

Dört hücreli batarya grubu ile yapılan deneylerde birbirinden farklı başlangıç batarya yüzey sıcaklıkları ile deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde deşarj akımı batarya kapasitesinin bir miktar altında olduğu için hücrelerin tam olarak deşarj olmadığı tespit edilmiştir. Batarya, simülasyonda sabit akım ile deşarj edilmektedir ancak deney esnasında direnç ile yapılan deşarj işleminde deşarj akımının giderek düştüğü tespit edilmiştir. Bu iki durumun da önüne geçmek için batarya deşarj süreleri uzatılmıştır. Bu işlem farklı deşarj akımları ve hızları için tekrarlanmıştır ve sonuçların birbiri ile tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

Tekil batarya hücresi, dört hücreli batarya grubu ve soğutucu blok ilave edilmiş dört hücreli batarya grubu için NTGK yarı ampirik batarya modeli kullanılarak HAD analizleri yapılmıştır. Dört hücreli batarya grubunun 1C deşarj oranında yapılan HAD analizi ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır ve sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Aynı model kullanılarak soğutucu blok eklenmeden 4C deşarj oranında HAD analizi yapılmıştır ve 25,4 °C sıcaklık değişimi gözlemlenmiştir. Dört hücreli batarya grubuna soğutucu blok ilave edilerek 4C deşarj oranı, 10 °C soğutucu akışkan sıcaklığı ve 0,01 m/s soğutucu akışkan hızı koşulları altında HAD analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda 6,1 °C sıcaklık değişimi gözlemlenmiştir ve soğutucu blok sayesinde 19,3 °C sıcaklık düşüşü sağlanmıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ (SONUÇ)

Elde edilen veriler göz önünde bulundurulduğunda, deneysel çalışma sonuçları ile sayısal çalışma sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Deneylerde karşılaşılan zorluklara karşı, elde edilen veriler ile sayısal çalışma sonuçlarının tutarlı olması için deney ve sayısal modelleme koşulları arasında bazı benzeşimler yapılmıştır.

Dört hücreli batarya grubu ile yapılan deney ve dört gruplu (16 hücreli) batarya paketi ile yapılan deney süreçleri birlikte değerlendirildiğinde hem süre hem de kararlı sonuçlar elde edilmesi bakımından dört hücreli batarya grubu ile yapılması daha avantajlıdır. Buna ek olarak deneysel veriler ile karşılaştırıldığında HAD analiz sonuçlarının tutarlı olması sayesinde tekil hücre ve soğutucu blok etkisi deney yapılmadan gözlemlenebilmiştir. Nihai tasarımın doğrulanması için deneysel çalışma yapılması gerekmektedir ancak mevcut koşullarda tasarım sürecinin kısalması ve deneysel maliyetlerin en aza indirgenmesi açısından HAD analizleri avantaj taşımaktadır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan Li-Ion batarya paketlerinde aktif sıvı soğutma sistemi kullanılarak ısıl yönetim konusunda ciddi bir iyileştirme sağlanabileceği tespit edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, bu çalışmada yapılmış olan serpantin kanal geometrisi geliştirilerek, farklı geometrilere sahip kanal yapıları kullanılarak, farklı bir soğutucu akışkan kullanılarak ya da akışkan debisi optimize edilerek sistemin soğutma performansı iyileştirilebilir. Ayrıca uluslararası sürüş çevrimi standartlarının tüketim verileri ile deşarj akımı profili oluşturularak batarya paketinde meydana gelecek ısıl davranışların daha gerçekçi incelemesi ve iyileştirmesi yapılabilir.

KAYNAKLAR

Ali, H. A. A., & Abdeljawad, Z. N. (2020). Thermal Management Technologies of Lithium-Ion Batteries Applied for Stationary Energy Storage Systems: Investigation on the Thermal Behavior of Lithium-Ion Batteries.

ANSYS Fluent Battery Module Manual, Release 15.0, 2013.

Basu, S., Hariharan, K. S., Kolake, S. M., Song, T., Sohn, D. K., & Yeo, T. (2016). Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-Ion battery pack thermal management system. Applied Energy, 181, 1-13.

Beyzanur, K. U. L. Geçmişten Günümüze Piller. Takvim-i Vekayi, 8(1), 104-115.

Bulut, E., Albak, E. I., Sevilgen, G., & Öztürk, F. (2021). A new approach for battery thermal management system design based on Grey Relational Analysis and Latin Hypercube Sampling. Case Studies in Thermal Engineering, 28, 101452.

Bulut, E., Albak, E. İ., Sevilgen, G., & Öztürk, F. (2022). Prediction and optimization of the design decisions of liquid cooling systems of battery modules using artificial neural networks. International Journal of Energy Research.

Chawla, N., Bharti, N., & Singh, S. (2019). Recent advances in non-flammable electrolytes for safer lithium-ion batteries. Batteries, 5(1), 19.

Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., & Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. Applied Thermal Engineering, 94, 846-854.

Ding, Y., Ji, H., Wei, M., & Liu, R. (2022). Effect of liquid cooling system structure on lithium-ion battery pack temperature fields. International Journal of Heat and Mass Transfer, 183, 122178.

Goutam, S., Timmermans, J. M., Omar, N., Bossche, P. V. D., & Van Mierlo, J. (2015). Comparative study of surface temperature behavior of commercial Li-Ion pouch cells of different chemistries and capacities by infrared thermography. Energies, 8(8), 8175-8192.

Gümüşsu, E. (2017). Thermal Modeling of Lithium Ion Batteries.

Li, Y., Zhou, Z., & Wu, W. T. (2019). Three-dimensional thermal modeling of Li-Ion battery cell and 50 V Li-Ion battery pack cooled by mini-channel cold plate. Applied Thermal Engineering, 147, 829-840.

Liu, Y., Liao, Y., & Lai, M. C. (2019). Transient temperature distributions on lithium-Ion polymer SLI Battery. Vehicles, 1(1), 127-137.

Mekonnen, Y., Sundararajan, A., & Sarwat, A. I. (2016, March). A review of cathode and anode materials for lithium-ion batteries. In SoutheastCon 2016 (pp. 1-6). IEEE.

Miao, Y., Hynan, P., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. Energies, 12(6), 1074.

Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). The finite volume method in computational fluid dynamics (Vol. 113, pp. 10-1007). Berlin, Germany:: Springer.

Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2016). Experimental and theoretical investigations of heat generation rates for a water cooled LiFePO4 battery. International Journal of Heat and Mass Transfer, 101, 1093-1102.

Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2017). Transient electrochemical heat transfer modeling and experimental validation of a large sized LiFePO4/graphite battery. International Journal of Heat and Mass Transfer, 109, 1239-1251.

Panchal, S., Khasow, R., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2017). Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery. Applied Thermal Engineering, 122, 80-90.

Patel, J. R., & Rathod, M. K. (2020). Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries. Journal of Power Sources, 480, 228820.

Saw, L. H., Ye, Y., Tay, A. A., Chong, W. T., Kuan, S. H., & Yew, M. C. (2016). Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling. Applied energy, 177, 783-792.

Sevilgen, G. (2010). Otomobil kabininde hız ve sıcaklık dağılımının üç boyutlu sayısal analizi (Doctoral dissertation, Bursa Uludag University).

Stecca, M., Elizondo, L. R., Soeiro, T. B., Bauer, P., & Palensky, P. (2020). A comprehensive review of the integration of battery energy storage systems into distribution networks. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 1, 46-65.

Toshiba Rechargable Battery SCIB 2020

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson education.

Yeow, K. F., & Teng, H. (2013). Characterizing Thermal Behavior of an Air-Cooled Lithium-Ion Battery System for Hybrid Electrical Vehicle Applications Using Finite Element Analysis Approach (No. 2013-01-1520). SAE Technical Paper.

Yeow, K. F., & Teng, H. (2013). Reducing temperature gradients in high-power, large-capacity lithium-ion cells through ultra-high thermal conductivity heat spreaders embedded in cooling plates for battery systems with indirect liquid cooling (No. 2013-01-0234). SAE Technical Paper.
Yi, J., Kim, U. S., Shin, C. B., Han, T., & Park, S. (2013). Modeling the temperature dependence of the discharge behavior of a lithium-ion battery in low environmental temperature. Journal of Power Sources, 244, 143-148.

Zhang, H., Li, C., Zhang, R., Lin, Y., & Fang, H. (2020). Thermal analysis of a 6s4p Lithium-ion battery pack cooled by cold plates based on a multi-domain modeling framework. Applied Thermal Engineering, 173, 115216.

Zhao, J., Rao, Z., & Li, Y. (2015). Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery. Energy conversion and management, 103, 157-165.