BİR BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİNİN BİR BOYUTLU MODELLENMESİ VE SOĞUTMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Ersel DÖNMEZ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİNİN BİR BOYUTLU MODELLENMESİ VE SOĞUTMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Ersel DÖNMEZ
0009-0003-6343-4447

Dr. Öğr. Üyesi. Emre BULUT
0000-0001-9159-5000
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Ersel DÖNMEZ tarafından hazırlanan "BİR BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİNİN BİR BOYUTLU MODELLENMESİ VE SOĞUTMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emre BULUT

Başkan	**:**	Dr. Öğr. Üyesi Emre BULUT 0000-0001-9159-5000 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Doç. Dr. Emre İsa ALBAK 0000-0001-9215-0775 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Doç. Dr. Halil BAYRAM 0000-0002-4664-3883 Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
../../….

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20/06/2024

Ersel DÖNMEZ

TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı Tarih	Öğrencinin Adı-Soyadı Tarih
Dr. Ögr. Üyesi. Emre BULUT	Ersel Dönmez
İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.	İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ TEZ TANITIMI
ÖĞRENCİ VE DANIŞMAN FORMU

FR 3.4.6_27

ÖĞRENCİ
Adı SOYADI: Ersel DÖNMEZ
ÜNVANI : Öğrenci
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : erseldonmez96@gmail.com
PROGRAMI: **YÜKSEK LİSANS**
ORCID : 0009-0003-6343-4447
TÜBİTAK ID : TBTK-0159-2796
WOS RESEARCHER ID :KVA-5354-2024
SCOPUS AUTHOR ID : -
Google Scholar ID : Zwi5LyAAAAAJ

DANIŞMAN
Adı SOYADI: Emre BULUT
ÜNVANI : Dr. Öğr .Üyesi
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA: ebulut@uludag.edu.tr
YÖKSİS ARAŞTIRMACI ID : 196951
ORCID :0000-0001-9159-5000
TÜBİTAK ID : TBTK-0039-1748
WOS RESEARCHER ID : AAG-8907-2021
SCOPUS AUTHOR ID : 57219975361
Google Scholar ID : NeIlZnQAAAAJ

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS EĞİTİMİ BOYUNCA BİLİMSEL ÇALIŞMALARI VE FAALİYETLERİ*

1. 6.ULUSLARARASI DİCLE BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR VE İNOVASYON KONGRESİ- BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİ BİR BOYUTLU ANALİZİ
2. ……
3. ……
4. ……
5. ……
6. ……
7. ……
8. ……
9. ……
10. ……
11. ……
12. ……
13. ……

***Makaleler, Bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler, patentler, projeler, eğitimler vb. faaliyetler sıralanmalıdır.

BİRLEŞMİŞ MİLLETLER SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA HEDEFLERİ

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Mixed Methods Research

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Phase Change Material

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Lithium-Ion Battery Electric Vehicles

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

ÖZET

Yüksek Lisans

BİR BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİNİN BİR BOYUTLU MODELLENMESİ VE SOĞUTMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Ersel DÖNMEZ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emre BULUT

Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan Lityum Demir Fosfat (LFP- $LiFePO_4$) kimyasına sahip bir pil seçilmiştir. Bu çalışmada bir 30 adet kese (pouch) tipi LFP hücreden oluşan (AMP20M1 HD) bir Li-Ion batarya modülü ve soğutma sisteminin bir boyutlu modeli oluşturulmuş ve sıvı soğutma performansı incelenmiştir. Bir boyutlu modelleme için Matlab Simscape Battery ve Simulink yazılımlarından faydalanılmıştır. Farklı deşarj oranlarında (2C, 3C, 4C) bataryanın ürettiği ısı miktarı ve sıcaklık değişimi literatürdeki sonuçlarla doğrulanmıştır. Batarya modülü için ise paralel kanallardan oluşan, batarya modülünü alttan soğutacak sıvı soğutma sistemi tasarlanmıştır. Elektrikli araçlarda verimliliği yüksek tutabilmek adına pompalama kayıplarını mümkün olduğunca düşük tutmak önemlidir. Bu sebeple sıvı soğutma sisteminde kayıpların daha az olduğu düşük Reynolds sayılarında laminer akış tercih edilmiştir. Farklı deşarj oranlarında, farklı Reynolds Sayıları baz alınarak farklı soğutma sıvısı debilerinde ve farklı paralel kanal sayılarında analizler gerçekleştirilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça batarya sıcaklık değerlerinde düşüş olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Batarya, Soğutma Sistemi, C oranı, Modelleme
2024, xv + 61 sayfa.

ABSTRACT

MSc

ONE-DIMENSIONAL MODELING OF A BATTERY COOLING SYSTEM AND INVESTIGATION OF THE COOLING PERFORMANCE

Ersel DÖNMEZ

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

Supervisor: Asst. Dr. Emre BULUT

In this study a battery with Lithium Iron Phosphate (LFP- LiFePO4) chemistry used in electric vehicles was selected. In this study, a one-dimensional model of a lithium-ion battery module consisting of 30 pouch-type LFP cells (AMP20M1 HD) and a cooling system has been designed, and the liquid cooling performance has been investigated. In this study, a one-dimensional model of a lithium-ion battery module consisting of 30 pouch-type LFP cells (AMP20M1 HD) and a cooling system has been designed, and the liquid cooling performance has been investigated. A one-dimensional modeling approach was employed using Matlab Simscape Battery and Simulink software. The amount of heat generated by the battery and the temperature change at different discharge rates (2C, 3C, 4C) were validated against results in the literatüre. For the battery module, a liquid cooling system consisting of parallel channels designed to cool the battery module from the bottom of the module. Minimizing pumping losses is crucial to maintaining high efficiency in electric vehicles. Therefore, laminar flow was preferred in the liquid cooling system, where pressure losses are lower, especially at low Reynolds numbers. Analyses were conducted with different cooling fluid flow rates and different numbers of parallel channels based on different Reynolds numbers at various discharge rates. It was observed that as the Reynolds number increased, there was a decrease in battery temperature values.

Key words: Battery, Cooling System, C rate, Modeling
2024, xv + 61 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca benimle bilgi birikimi ve deneyimlerini esirgemeyen yanımda olan hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Emre BULUT teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Bu süreçte desteklerini esirgemeyen şirketime teşekkür ederim.

Tüm süreç boyunca beni destekleyen, motive eden, her daim yanımda olan, moral veren sevgili eşime ve anne, babama sonsuz şükranlarımı sunar, teşekkür ederim.

Ersel DÖNMEZ
20/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....viii
ABSTRACT.....ix
TEŞEKKÜR.....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....xii
1. GİRİŞ
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....3
2.1 Li-Ion Bataryalar.....3
2.2 Li-Ion Batarya Çeşitleri.....7
2.2.1. Kese(pouch) piller.....8
2.2.2. Silindirik piller.....10
2.2.3. Prizmatik piller.....11
2.3. Yüksek ve Düzgün Olmayan Sıcaklık Dağılımının Batarya Performansına Etkisi.....13
2.4. Batarya Sayısal Modellemesi.....16
2.4.1. Elektrokimyasal termal model.....17
2.4.2. Elektriksel termal model.....18
2.5. Batarya Soğutma Sistemleri.....19
2.5.1. Hava ile soğutma.....24
2.5.2. Sıvı ile soğutma.....26
2.5.3. Faz değiştiren malzeme ile soğutma.....30
2.5.4. Batarya termal yönetim sistemi zorlukları.....32
2.5.5. Batarya soğutma sistemi geliştirme önerileri.....34
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....37
3.1. Kullanılan Li-Ion Batarya ve Özellikleri.....37
4. BULGULAR.....45
4.1. Paralel Kanallı Bir Boyutlu Batarya Soğutma Sistemi.....45
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....56
KAYNAKLAR.....57
ÖZGEÇMİŞ.....61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
Pb-asit	Kurşun asit
NiMH	Nikel metal hidrat
NiCd	Nikel kadmiyum
$LiCoO_2$	Lityum kobalt oksit
$LiNiO_2$	Lityum nikel oksit
$LiMn_2O_2$	Lityum manganez oksit
$LiFePO_4$	Lityum demir fosfat
CuF_2	Bakır florür
TiS	Titanyum sülfür
$LiMO_2$	Lityum molibden oksit
Q	Isı akış oranı [W]
K	Termal iletkenlik katsayısı [W/m.K]
T	Sıcaklık [K]
x	Mesafe [m]
$\dot{m}$	Kütlesel debi [m/s]
V	Hacim [m^3]
ρ	Termal sıvı yoğunluğu [kg/m^3]
β	Kütle modülü [GPa]
α	İzobarik termal genişleme katsayısı [10^{-6}/K]
P	Basınç [Pa]
D	Boru çapı değeri [m]
υ	Kinematik viskozite [$m^2.s^{-1}$]
v	Hız [m/s]
L	Uzunluk [m]
$\dot{Q}$	Hacimsel debi [m^3/s]

Kısaltmalar	**Açıklama**
Li-Ion	Lityum iyon
PTC	Pozitif termal katsayı
BTYS	Batarya termal yönetim sistemi
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
NTGK	Newman, Tiedemann, Gu ve Kim
P2D	Pseudo-2D
LHS	Latin Hypercube Sampling
GRA	Grey Relational Analysis
$LiFePO_4$	Lityum demir fosfat
Nu	Nusselt sayısı
Re	Reynolds sayısı
f	Darcy faktörü
C rate	Deşarj oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Li-Ion bataryaların çalışma prensibi (Ghiji vd., 2020) ……	5
Şekil 2.2.	Li-Ion bataryalar a) silindirik b) prizmatik c) kese (pouch) (Camargos, Santos vd., 2022) ……	8
Şekil 2.3.	Deformasyona uğrayan kese tipi hücre (EPEC, 2024) ……	10
Şekil 2.4.	Silindirik batarya modülü (Anonim, 2024) …….	11
Şekil 2.5.	Prizmatik batarya sistemi (Anonim, 2024) …….	12
Şekil 2.6.	Dört aşamalı termal kaçak önleme aşamaları (Shadid ve Martin, 2022)……	15
Şekil 2.7.	a) Lityum iyon pilin kesiti b) İki boyutlu elektrokimyasal model (Fu, Zhao vd., 2023)……..	18
Şekil 2.8.	Şematik diyagram a) Batarya modeli b) Batarya elektriksel modeli (Fu, Zhao vd., 2023)	19
Şekil 2.9.	Şematik diyagram a) Tip1 batarya modülü b) Tip2 batarya modülü……..	20
Şekil 2.10.	Prototip modelin blok diyagramı (Sagar vd., 2022) ……	22
Şekil 2.11.	6 farklı kanal tipi (Monika vd., 2022)……..	23
Şekil 2.12.	a) Pasif hava soğutma b) Aktif hava soğutma (Andrea,2010).	25
Şekil 2.13.	Nissan LEAF hava soğutma sistemi (Joel, 2023)……	26
Şekil 2.14.	Dolaylı soğutma: a) Tüp tabakaları b) Soğutma plakası (Fu, Zhao vd., 2023)……	27
Şekil 2.15.	Tesla Model 3 sıvı soğutma sistemi (Joel, 2023) ……	28
Şekil 2.16.	Chevrolet Volt sıvı soğutma sistemi (Joel, 2023) ……...	29
Şekil 2.17.	a) Hava soğutma sistemi, b) Sıvı soğutma sistemi (Celen ve Kaba, 2021) …….	30
Şekil 2.18.	Faz değiştiren malzeme ile soğutma (Wazeer, Abeykoon vd., 2019) ……	31
Şekil 2.19.	Batarya yangından koruma seviyeleri (Ghiji vd., 2020) …….	34
Şekil 2.20.	Elektrikli araç batarya paketleri (Güngör, Göçmen ve Cetkin,2023)…….	35
Şekil 3.1.	Matlab batarya hücresi gösterimi…….	38
Şekil 3.2.	Matlab deşarj butonu gösterimi……	38
Şekil 3.3.	a) Adım fonksiyonu b) Simulink-ps dönüştürücüsü c) Topraklama……...	38
Şekil 3.4.	Batarya bir boyutlu modellemesi…….	39
Şekil 3.5.	30 adet bataryadan oluşan batarya modulü …….	40
Şekil 3.6.	Alttan soğutmalı batarya modülü (Matlab, 2024)……	41
Şekil 3.7.	Hücreden batarya paketlerine doğru gelişim (Matlab,2024)……..	41
Şekil 3.8.	a) Akış kaynağı b) Paralel kanallı soğutma plakası c) Rezervuar…….	42
Şekil 4.1.	a) Laminer akış b) Türbülanslı akış (White, 2011)……..	45
Şekil 4.2	Farklı deşarj oranlarında analiz sonuçları……	46
Şekil 4.3.	Paralel kanal soğutma sistemli bir boyutlu batarya	50

modellemesi……..……...
Şekil 4.4. Analiz ve hesaplama sonucundaki basınç değerleri……. 54
Şekil 4.5. Analiz sonucundaki sıcaklık değerleri…….. 55

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Farklı tip batarya hücrelerinin yapısal özellik karşılaştırılması. (Andrea, 2020)……...	13
Çizelge 3.1.	Seçilen pilin teknik özellikleri (A123, AMP20M1HD-A, 2011)	37
Çizelge 4.1.	Reynolds 200 kütlesel debi değerleri…….	47
Çizelge 4.2.	Reynolds 300 kütlesel debi değerleri…….	48
Çizelge 4.3.	Reynolds 400 kütlesel debi değerleri…….	48
Çizelge 4.4.	Reynolds 1000 kütlesel debi değerleri……	49
Çizelge 4.5.	Reynolds 1500 kütlesel debi değerleri……	49
Çizelge 4.6.	Reynolds 2000 kütlesel debi değerleri……	50
Çizelge 4.7.	Reynolds 200’e göre sonuçlar……	51
Çizelge 4.8.	Reynolds 300’e göre sonuçlar……	51
Çizelge 4.9.	Reynolds 400’e göre sonuçlar……	52
Çizelge 4.10.	Reynolds 1000’e göre sonuçlar……	52
Çizelge 4.11.	Reynolds 1500’e göre sonuçlar……	53
Çizelge 4.12.	Reynolds 2000’e göre sonuçlar……	53

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların çevreye ve insan sağlığına verdiği zararlar fosil yakıtlara alternatif arayışına itmiştir. Özellikle emisyon ve çevre standartları bu yakıtların kullanımını zorlaştırmıştır. Tükenebilir yakıt olmaları da bu noktada önemlidir. Alternatif olarak elektrikli, hidrojen ve hibrit araçlar gündeme gelmiştir. Bu araçlar yaydıkları daha düşük zararlı gazlar, düşük yakıt maliyeti, daha konforlu bir sürüş ile geleneksel araçlara alternatif olacakları düşünülmektedir. Fakat günümüz piyasa koşullarında elektrikli araçların uzun şarj süreleri, batarya güvenlik ve soğutma sistemleri önemli bir tartışma konusu olmaya devam etmektedir.

Elektrikli araçlarda enerji kaynağı bataryalardır. Birden fazla pilin bir araya gelmesiyle, bu pillerin enerji üretmesiyle çalışırlar. Kullanım alanları oldukça geniş olmakla beraber elektronik cihazlarda, savunma sistemlerinde ve birçok elektronik cihaz bataryaya ihtiyaç duymaktadır. Bataryalarda genellikle kullanılan pil teknolojileri Li-Ion(Lityum İyon), Pb-asit(kurşun-asit), NiMH(Nikel Metal Hidrat), NiCd(Nikel Kadmiyum) pilleridir (Khaligh vd., 2010).

Li-Ion bataryalar anot (negatif elektrot), katot (pozitif elektrot) ve kısa devre önleyici olarak ayırıcıdan oluşmaktadır. Li-Ion bataryalarda kullanılan oksitler lityum kobalt oksit (LiCoO2), lityum nikel oksit (LiNiO2), lityum manganez oksit(LiMn2O2). Bu bataryalar yüksek kapasite, ucuz olması, düşük toksit özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar (Yong, Jia vd., 2015).

Bu bataryalarda eğer belirlenen çalışma koşullarının dışına çıkılırsa termal bozuntu gibi istenmeyen sonuçlar olabilmektedir. Bu nedenle batarya ısıl yönetim sistemleri önem teşkil etmektedir. Batarya ısıl yönetiminde ısı borusu ile soğutma, sıvı ile soğutma, faz değiştiren malzeme ile soğutma, hava ile soğutma, termoelektrik malzeme ile soğutma gibi farklı yöntemler bulunmaktadır. Genellikle hava ve sıvı ile soğutma kullanılmaktadır. Sıvı ile soğutma yüksek özgül ısınma ısısı, yüksek verim gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır (Siddique, Mahmud ve Van, 2018).

Sıvı soğutma sistemleri doğrudan ve dolaylı soğutma olacak şekilde sınıflandırılabilmektedir. Dolaylı soğutma, bataryanın temas ettiği bir plaka içinden geçirilen akışkan vasıtasıyla gerçekleştirilir. Doğrudan soğutmada batarya modülü doğrudan minarel yağları diaelektrik soğutucunun içine daldırılarak sağlanır (Pesaran, Vlahinos ve Stuart, 2003).

Batarya termal yönetim sisteminde eğer ki yüksek sıcaklık kullanılırsa bataryanın eskimesi hızlandırabilir, güvenlik riskleri oluşturabilir. Düşük sıcaklıklarda kullanılırsa batarya kapasitesinin düşmesine, zayıf deşarj ve şarj durumlarına yol açabilmektedir. Batarya soğutma sistemi geliştirilirken hücre voltajı, sıcaklığı, şarj durumu ve sağlık durumları düşünülmelidir (Figes, 2024).

Son yıllarda ısı transfer süreçlerini bilgisayar destekli batarya termal yazılımları ile modeller oluşturmak vasıtasıyla simüle edip, çıktıların analizlerini yapmak belirli programlarla oldukça yaygınlaşmıştır. Bu programlar çıktılarında iki boyutlu sıcaklık dağılımları, sıcaklık, basınç değişim grafiklerini vermektedirler. Bu sonuçlarla deneysel karşılaştırmalar yapılıp gelişim süreçleri oldukça verimli ve hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.

Bu çalışmada da prizmatik pouch(kese) tipi Li-ion bir bataryanın bilgisayar destekli batarya termal yazılım programında bir boyutlu batarya soğutma sistemi analizi gerçekleştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Li-Ion Bataryalar

Şarj edilebilir Li-Ion pillere ilişkin araştırmalar 1960 yılına kadar uzanmaktadır. En eski örneklerinden biri 1965 yılında NASA tarafından geliştirilen CuF_2 pilidir. Kristal yapısında bir değişiklik olmadan lityum iyonlarını alabilen katmanlı bir yapıya sahip katot malzemesi kullanan TiS(titanyum sülfür) yapısındaki pili ticarileştirmeye çalışan Exxon sentezin pahalı ve karmaşık olduğunu gördü. Titanyum sülfür iki türlü neme ihtiyaç duyar zehirli hidrojen gazı açığa çıkarabilir. Daha da önemlisi piller, hücrelerdeki metalik lityumun varlığı nedeniyle kendiliğinden alev almaya eğimliydi (Li, Matthew vd., 2018)

Şarj edilebilir Li-Ion piller geliştirmeye yönelik bu ilk girişimlerde, lityum metal anotlar kullanıldı. Ancak lityum metali kararsız olduğundan ve kısa devreye neden olabilecek dendrit oluşumuna yatkın olduğundan güvenlik endişeleri nedeniyle vazgeçildi. Sonrasında lityum metal oluşumunu önleyen, katot için kullanılana benzer bir ara katman anotu kullanmaktı. Çeşitli anot malzemeleri üzerine çalışıldı. 1980'de Rachid Yazami, grafit içinde lityumun tersinir elektrokimyasal interkalasyonunu gösterdi, bu ilk olarak 1974'te Jürgen Otto Besenhard tarafından önerilen ancak o sırada kullanımda olan elektrolitlerle çözülmemiş uyumsuzluklar nedeniyle mümkün olmadığı düşünülen bir kavramdı. Aslında Yazami'nin çalışması katı bir elektrolitle (polietilen oksit) sınırlıydı, çünkü kendisi tarafından test edilen ve daha önce Li^+ iyonlarıyla birlikte grafite dönüştürülen sıvı solventler, grafitin parçalanmasına neden oluyordu (Basenhard ve Eichinger, 1976)

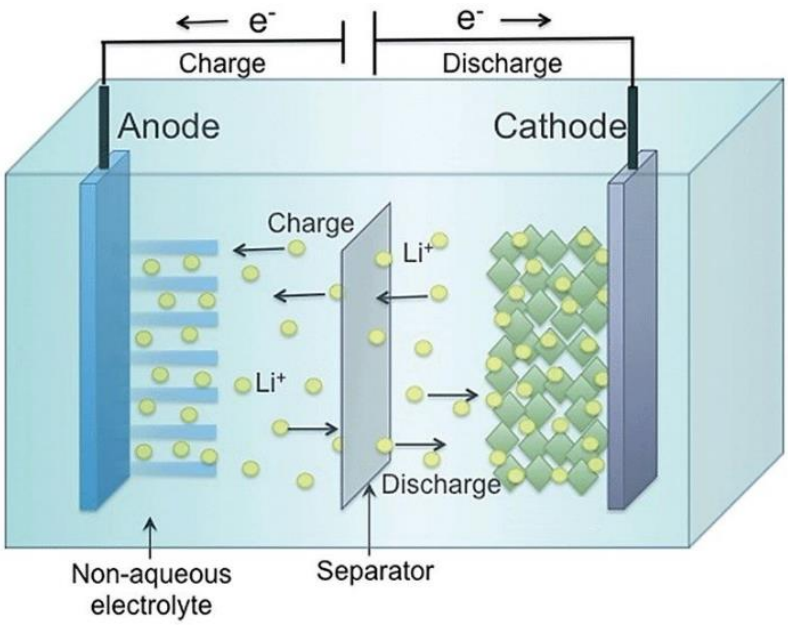
Akira Yashino 1987'de daha önce bildirilen $LiCoO_2$ katodu ve karbonat ester bazlı elektrolit ile yumuşak karbon (kömür benzeri bir malzeme) anotunu kullanan ilk ticari lityum iyon pilin patentini aldı. Bu pil boş bir pil şeklindedir, bu da üretimini daha güvenli ve daha ucuz hale getirir. 1991 yılında Sony şirketi, Yoshino'nun tasarımını kullanarak dünyanın ilk şarj edilebilir lityum iyon pillerini üretmeye ve satmaya başladı. Ertesi yıl

Toshiba ve Asashi Kasei şirketi arasındaki ortak girişimle birlikte lityum iyon pillerini piyasaya sürdü (Li, Matthew vd., 2018).

1990'lı yıllarda yumuşak karbon anotun önce sert karbonla ve daha sonra grafitle değiştirilmesiyle enerji yoğunluğunda önemli iyileştirmeler sağlandı. 1990 yılında Jeff Dahn ve arkadaşları, etilen karbonat çözücünün (oda sıcaklığında katı olan ve sıvı yapmak için diğer çözücülerle karıştırılan) varlığında lityum iyonlarının grafite geri dönüşümlü bir şekilde katıldığını bildirdiler (Fong, Sacken vd., 1990)

2023 yılının Nisan ayında CATL şirketi o zamanlarda rekor olan 500 Wh/kg üretilen yarı katı yoğunlaştırılmış pilinin artan üretimine başlayacağını duyurmuştur. Bu pil, daha az bağlayıcı madde gerektiren, jelleşmiş bir malzemeden yapılmış elektrotlar kullanırlar. Bu da üretim döngüsünü kısaltır. Potansiyel bir uygulama, pille çalışan uçaklarda uygulanmıştır. Lityum iyon pillerdeki başka yeni bir gelişme, hiçbir bağlayıcı veya elektron ileten katkı maddesi kullanmayan, enerji ve gücün tamamen bağımsız ölçeklendirilmesine izin veren, redoks hedefli katılara sahip akış pilleridir (Hanley ve Steve, 2023)

Li-Ion bataryalar, anot elektrot (negatif), katot elektrot (pozitif), separatör ve elektrolit olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır. Anot veya negatif elektrot, dış devreden elektronları vererek kimyasal reaksiyonlarla okside olur. Katot veya pozitif elektrot da dış devreden elektronları alarak kimyasal reaksiyonlar sonucunda indirgenmektedir. İyonik iletken ya da elektrolit pozitif ve negatif elektrot arasında elektron transfer ortamı oluşturmaktadır. Separatörün görevi de pozitif ve negatif elektrotu ayırıp güvenliği sağlamaktır. Eğer ki pil fazla ısınırsa polimer separatör eriyerek, pil içerisinden geçen akımı keser. Şekil 2.1'de Li-Ion bataryaların çalışma prensibi gösterilmektedir (Zhong, 2010).



Şekil 2.1. Li-Ion bataryaların çalışma prensibi (Ghiji vd., 2020)

Hücre deşarjı sırasında negatif elektrot anottur ve pozitif elektrot katottur. Elektron harici devre aracılığıyla anottan katota akar. Anottaki bir oksidasyon yarı reaksiyonu, pozitif yüklü lityum iyonları ve negatif yüklü elektronlar üretir. Oksidasyon yarı reaksiyonu ayrıca anotta kalan yüksüz malzeme de üretebilir. Lityum iyonları elektrolit içerisinde hareket eder, elektronlar dış devreden katota doğru hareket eder ve burada bir indirgeme yarı reaksiyonunda katot malzemesi ile yeniden birleşirler. Elektrolit, lityum iyonları için iletken bir ortam sağlar ancak elektrokimyasal reaksiyona katılmaz. Deşarj sırasındaki reaksiyonlar hücrenin kimyasal potansiyelini azaltır, dolayısıyla deşarj, hücreden elektrik akımının dağıttığı her yere, çoğunlukla da dış devredeki enerjiye aktarır.

Tek bir şekilde olan Li-Ion piller ve komple Li-Ion pillerin şarj prosedürleri biraz farklıdır.

Tekli şarj prosedürü aşağıdaki gibi iki aşamadadır:

- Sabit akım
- Sabit voltaj

Komple bir şekilde olan Li-Ion pillerin şarjı üç aşamadadır:

- Sabit akım
- Denge (yalnızca kullanım sırasında hücre grupları dengesiz hale geldiğinde gereklidir).
- Sabit voltaj

Sabit akım sırasında şarj cihazı, hücre başına şarjın tepe voltajı sınırına ulaşılıncaya kadar aküye sürekli artan bir voltajda sabit bir akım uygulanır.

Dengeleme aşamasında, şarj cihazı şarj akımını azaltır (veya ortalama akımı azaltmak için şarjı açıp kapatır), bu sırada bireysel hücrelerin şarj durumu, batarya dengelenene kadar bir dengeleme devresi tarafından aynı seviyeye getirilir. Dengeleme tipik olarak bir veya daha fazla hücrenin en yüksek şarj voltajına diğerlerinden önce ulaşması durumunda gerçekleşir, çünkü şarj döngüsünün diğer aşamalarında bunu yapmak genellikle yanlıştır. Bu en yaygın olarak, dengelenecek hücrelere anlık olarak bağlanan dirençler yoluyla aşırı yükü dağıtan pasif dengeleme ile yapılır (Chung, 2021).

Aktif dengeleme daha az yaygındır, daha pahalıdır, ancak daha verimlidir. Fazla enerjiyi bir doğru akım dönüştürücüsü veya başka devre aracılığıyla diğer hücrelere (veya paketin tamamına) geri gönderir. Bazı hızlı şarj cihazları bu aşamayı atlar, bazıları da her hücreyi bağımsız olarak şarj ederek dengeyi sağlar (Chung, 2021).

Batarya içerisinde anot ve katot elektrotlarda gerçekleşen şarj etme ve boşaltma işlemleri, aşağıda 2.1 ve 2.2'de yer alan reaksiyonlarla gerçekleşir. Toplam reaksiyon ise 2.3'te yer alan reaksiyonlarla gerçekleşir.

Negatif elektrot:

$$LiMO_2 \quad \frac{şarj}{deşarj} \quad Li_{1-x}MO_2 + xLi^+xe^- \tag{2.1}$$

Pozitif elektrot:

$$C + xLi^{+} + xe^{-} \quad \frac{şarj}{deşarj} \quad Li_xC \tag{2.2}$$

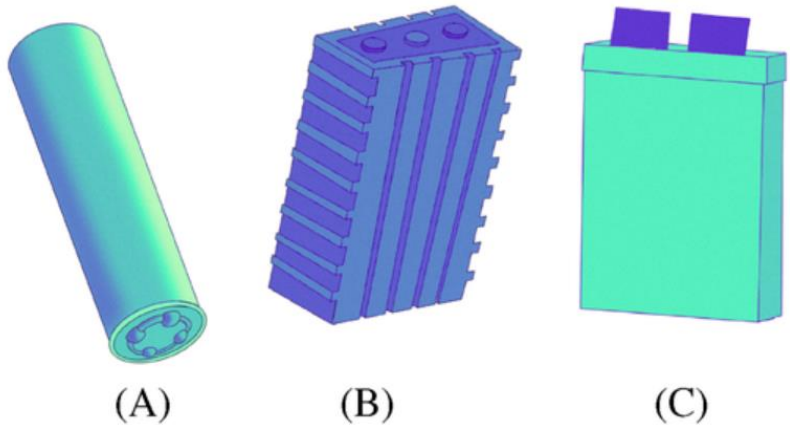
Toplam reaksiyon:

$$LiMO_2 + C \quad \frac{şarj}{deşarj} \quad Li_xC + Li_{1-x}MO_2 \tag{2.3}$$

Denklemdeki C grafit gibi negatif elektrodun ham maddesidir. LiMO2 pozitif metal oksittir (Sezer ve Basmacı, 2022).

2.2 Li-Ion Batarya Çeşitleri

Li-Ion bataryalar, piyasada yaygın olarak kullanılmaktadır ve sayısız faydaları göz önüne alındığında sürekli olarak yeni gelişmeler olmaktadır. Li-Ion bataryalar fiziksel ve kimyasal açısından farklılıklar gösterirler. Fiziksel olarak kese(pouch), silindirik ve prizmatik şeklinde sınıflandırma yapılabilmektedir. Örneğin piyasada Tesla şirketi silindirik hücreler kullanırken, LG şirketi kese(pouch) tipi hücre, Samsung ve Panasonic de prizmatik hücreler kullanmaktadır. Kullanım alanları ve avantajları değerlendirilerek üç tip de kullanılabilmektedir. Şekil 2.2'de bataryalar fiziksel özellik olarak gösterilmiştir (Camargos, Santos vd., 2022).



Şekil 2.2. Li-Ion bataryalar a) silindirik b) prizmatik c) kese (pouch) (Camargos, Santos vd., 2022)

2.2.1. Kese(pouch) piller

Kese(pouch) piller, elektrotlara bağlı metal bir tabaka ile hücrenin içini kapatan esnek plastik muhafazalara sahiptir. Metalik muhafazanın ortadan kaldırılması, pil kütlesinin azalmasına, daha hafif ve daha az hacimli olan daha küçük elektrolit kalınlıklarına olanak tanıdı. Kompakt ve hafif tasarımlarının olması onları taşınabilir elektronik cihazlarda ve elektrikli araçlarda kullanımı için olanak sağlamıştır. Ek olarak esnek tasarım, daha fazla tasarım esnekliği sağlar ve düzensiz boyutlara uyum sağlayabilir.

Kese piller ayrıca diğer pil türlerine göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir bu da birim hacim veya ağırlık başına daha fazla enerji depolayabilecekleri anlamına gelir. Kese(pouch) tipi piller, elektrikli araçlar, tüketici elektroniği ve enerji depolama sistemleri dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Tüketici elektroniği endüstrisinde kese tipi hücreler, kompakt boyutları ve yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle akıllı telefonlarda, tabletlerde ve dizüstü bilgisayarlarda kullanılmaktadır.

Elektrikli ve hibrit araçlarda hafif ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması sebebiyle güç kaynağı olarak kullanılabilmektedir. Elektrikli araçlar için en yaygın kullanılan 10 ila 40 Ah kapasite aralığıdır. Bu bataryaların elektrikli tahrik sistemlerine montajı yapılırken hücrelerin uygun aralıklarla dikey olarak konumlandırılması gerekmektedir. Bu şekilde

yapılmazsa piller plastik muhafazayı kırabilir ve çalışma güvenliğini tehlikeye atabilir (Camargos, Santos vd., 2022).

Kese tipi pillerde bataryaların şişmesi önemli sorunlardandır. Şarj veya deşarj sırasında gaz oluşumundan kaynaklanan şişme veya şişkinlik endişe vericidir. Pil üreticileri, bu pillerin şişmeye yol açabilecek fazla gaz üretmediği konusunda ısrar etmektedir. Bu durum çoğunlukla hatalı kullanımdan değil, hatalı üretimden kaynaklanmaktadır. Şişmeden kaynaklanan basınç pil kapağını kırabilir ve bazı durumlardan ekran, elektrik devre kartını kırabilir.

Şişmiş bir hücre eğer patlarsa yangına sebep verebilir. Şişmeyi önlemek amacıyla üretici, hücrenin dışına bir gaz torbası oluşturmak amacıyla fazla film ekler. İlk şarj sırasında gazlar gaz torbasına doğru gider, daha sonra torba kesilir ve bitirme işleminin bir parçası olarak paket yeniden kapatılır. Kese tipi hücreler, elektrot ve katı elektrolit genellikle katmanlar halinde istiflenir. Katı elektrolit daha güvenli, sızdırmaz hücrelere izin verir.

Folyo yapısı, yüksek güç uygulamalarına uygun, çok ince ve hafif hücre tasarımlarına olanak tanır ancak muhafazanın sağlam olmaması nedeniyle sıcaklık arttıkça hücreler şişme eğilimindedir. Pil bölmesi için belirlenen belli bir boşluğa uyacak şekilde hücreleri seçerken şişme olasılığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Hücreler ayrıca harici mekanik hasarlara karşı da hassastır ve pil paketi tasarımları bu tür olasılıkları önleyecek şekilde tasarlanmalıdır. Şekil 2.3’te şişen bir kese tipi hücre görülmektedir (EPEC, 2024).

Şekil 2.3. Deformasyona uğrayan kese tipi hücre (EPEC, 2024)

2.2.2. Silindirik piller

Silindirik piller, hücrenin iç kimyasal yapısını mekanik olarak sabitleyen metalik bir kasaya sahiptir. Yaygın ve çok yönlü şarj edilebilir pil türüdür. Kendine özgü boru şeklinde bir forma sahiptir. Üretim kolaylığı, soğutma sistemleriyle basitleştirilmiş entegrasyonu ve iyi mekanik stabilizasyon gibi avantajlara sahiptir. Kaplama malzemesini deforme etmeden yüksek iç ve dış basınçlara dayanabilmektedirler.

Silindirik piller, elektrikli aletlerde, tıbbi aletlerde ve elektrikli bisikletlerde kullanılır. Prizmatik hücrelere benzer şekilde ince bir dikdörtgen yapıya sahiptir. Silindirik pillerin üretimi geleneksel yöntemlere dayanmaktadır ve standardizasyonu yüksektir. Silindirik hücreler bir araya getirildiklerinde tek tek hücreler arasında daha fazla boşluğa sahip olduklarından, ısı dağıtımı açısından büyük bir avantaja sahiptir.

Silindirik hücreli bataryalar genellikle daha düşük maliyetli hava soğutma sistemlerini tercih etmektedirler. Silindirik pillerde de diğer kimyasal pillere benzer şekilde pil performansının en önemli parametrelerinden biri sıcaklıktır. Bu nedenle performansı ve güvenliği garanti etmek için uygun bir sıcaklık aralığının korunması gereklidir. Bu da genellikle 15 ila 35 ^{o}C aralığındadır. Şekil 2.4'te Toyota Prius marka araca ait silindirik batarya modülü gösterilmiştir.

Şekil 2.4. Silindirik batarya modülü (Anonim, 2024)

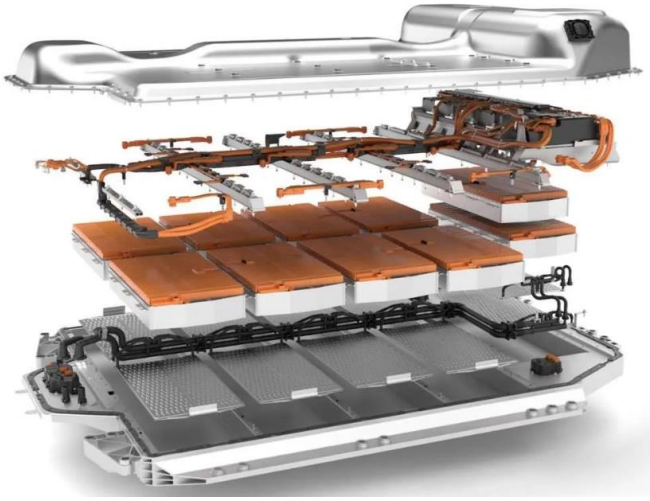
Çoğu silindirik hücre, dahili bir basınç tahliye mekanizması ve pozitif termal katsayı (PTC) adı verilen ek bir yerleşik koruma içerir. Hücre, aşırı akımla boşaldığında pozitif termal katsayının polimer tabakası ısınır, elektrik direncini yükseltiyor ve şarj akışını kesiyor. Bu sayede kısa devrelere karşı koruma görevi görmektedir (Camargos, Santos vd., 2022).

Silindirik şekle sahip hücreler karakteristik bir İsviçre makarası denen tarzda yapılır. Bu sistemde pozitif elektrot, ayırıcı, negatif elektrot ve ayırıcıdan oluşan tek bir uzun sandviç anlamına gelen makaraya yuvarlanır. Silindirik hücrelerin bir avantajı daha hızlı üretim hızıdır. Bir dezavantajı yüksek deşarj hızlarında büyük radyal sıcaklık gradyanı olabilir.

2.2.3. Prizmatik piller

Prizmatik piller, çelik veya alüminyumdan yapılmış tipik olarak dikdörtgen metalik bir kasadan yapılmıştır. Prizmatik pillerin standart şekilleri yoktur. Bu nedenle özellikleri ve kapasiteleri üreticilere göre değişiklik gösterir. Tipik olarak 1 Ah ile 1000 Ah arasında değişen özelliklerde tasarlanmaktadır. Elektrikli araçlarda 20 ila 50 Ah aralığındadır. Pil hücrelerinin iç katmanlarını bir arada tutmak için gereken sıkıştırmayı elde etmek amacıyla prizmatik pillerin sağlam ve dayanıklı bir plakaya ihtiyacı vardır. BMW

markasının ix3 modelinde kullanılan prizmatik hücreli batarya sistemi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Prizmatik batarya sistemi (Anonim, 2024)

Prizmatik depolama sistemleri silindirik hücrelere göre daha kırılgandır. Büyük deformasyonlar iç kısımlara zarar verebilmektedir. Prizmatik pilin patlaması durumunda termal çığ olgusu olabilmektedir. Küçük deformasyonlar tespit edilemeyen iç kırıklara, katmanlar arasında mikro kısa devrelere yol açabilmektedir.

Prizmatik hücrelerin önemli dezavantajlardan biri, birçok boyutu mevcut olmasına rağmen bunların hazır ürünler olmamasıdır. Bu, çoğu üreticinin üretimi değerli kılmak için yeterli hammaddeyi hazır halde tutması gerekmektedir. Aynı zamanda test için numune ihtiyacı olduğunda bunların genellikle bir numune laboratuvarında yapılması gerektiği ve üretim modellerinden farklı olacağı unutulmamalıdır.

Gazların birikmesi nedeniyle kalınlıkta hafif artışlar görülebilmektedir. Örnek olarak 5 mm kalınlığındaki bir pilin kalınlığı, 500 şarj döngüsünden sonra 8 mm kalınlığa çıkabilir. Koruma plakasının artan kalınlığı nedeniyle akü kaplarında hücre sıkışması gözlemlenirse o pil kullanılmamalıdır. Bu koşullar altında aküler ekipmana zarar verebilir

ve çalışma güvenliğini tehlikeye atabilir (Camargos, Santos vd., 2022). Kese tipi piller, silindirik piller ve prizmatik pillerin karşılaştırılması Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı tip batarya hücrelerinin yapısal özellik karşılaştırılması (Andrea, 2010)

Kriter	Kese tipi hücre	Silindirik hücre	Prizmatik hücre
Kaplama	Alüminyum	Metal	Yarı sert plastik veya metal
Isıyla daralma	Yok	Yok	Metale göre değişir
Üretim çalışmalarına uygunluk	Mükemmel	İyi	Mükemmel
Güvenlik	Zayıf	İyi	İyi
Genişlemeye karşı tutma	Akünün ucunda tutma plakası gerekir.	Silindirik şekle özgün	Akünün ucunda tutma plakası gerekir.
Bağlantı	Kelepçeli, kaynaklı veya lehimli tırnaklar	Cıvata için dişli saplama veya dişli delik	Cıvata için dişli delik
Basınç kuvveti tutma	Oldukça zayıf	Mükemmel	Zayıf
Yerel gerilme	Var	Yok	Yok

2.3. Yüksek ve Düzgün Olmayan Sıcaklık Dağılımının Batarya Performansına Etkisi

Yüksek hızda şarj edilen bir batarya eğer uygun bir soğutma sistemi yoksa aşırı ısınabilir. Sıcaklık artışları iç dirençte bir azalmaya neden olur, bataryanın içinde geri döndürülemez reaksiyonlar meydana gelir ve bu durum da pilin kapasitesini ve çıkış gücünü azaltır. Elektrokimyasal reaksiyonların büyük bir bölümü eletrotlarda gerçekleştiğinden ısı üretme oranı, bir Li-Ion hücresi içerisindeki farklı konumlarda aynı olmamaktadır. Sıcaklık artışı hücrenin içinde düzgün değildir. Bu durum, hücrenin performansı üzerinde kötü bir etkiye sahip olabilir ve yerel bozulmaya neden olarak, pilin ömrünün tükenmesine ya da kullanılamaz hale gelmesine sebep verebilir. Aşırı sıcaklık dağılımından kaçınılmalıdır ve hücredeki maksimum sıcaklık sapmasının 5 ^{o}C' den fazla olmaması beklenmelidir.

Çalışma sıcaklığı 50 ºC sıcaklıkta ve 500 şarj ve deşarj döngüsünden sonra pil kapasitesi %60 azalır. Genel olarak pil sıcaklığındaki her 10 ºC artış, kimyasal miktarını iki katına çıkararak pilin ömrünü azaltır. Ölü bölgelerin oluşması ve lityum oluşumu olgusu nedeniyle yüksek sıcaklıkların lityum içindeki aktif maddelerde hasar oluşturduğu açıktır. Li-Ion piller genellikle 25-40 ºC optimum sıcaklık aralığında çalışırlar ve bu sıcaklığın dışına çıkıldığında batarya performansı olumsuz etkilenmektedir.

Yeni enerji araçları, genellikle birden fazla batarya hücresine sahip bir pil paketi kullanır. Hem seri hem de paralel bağlı olabilirler. Sıcaklık dağılımı eğer uniform(düzgün) değilse bataryanın kapasitesini, ömrünü etkiler. Kullanım sırasında tutarsız ısı dağılımı nedeniyle akım, deşarj derinliği ve pil takımındaki sıcaklık dağılımı etkilenir. Tekil bataryaların yapısal karakteristiklerinden dolayı termal iletimlerinde farklılık vardır (Fu, Zhao vd., 2023)

Lityum iyon pillerde ekzotermik elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda termal kaçak (thermal runaway) durumu meydana gelebilmektedir. Bu pil sıcaklığında keskin bir artışa, pilin iç yapılarının dengesizleşmesine ve bozulmasına neden olur. Mekanik, elektriksel ve termal kötüye kullanım mekanizmaları nedeniyle termal kaçak meydana gelebilmektedir.

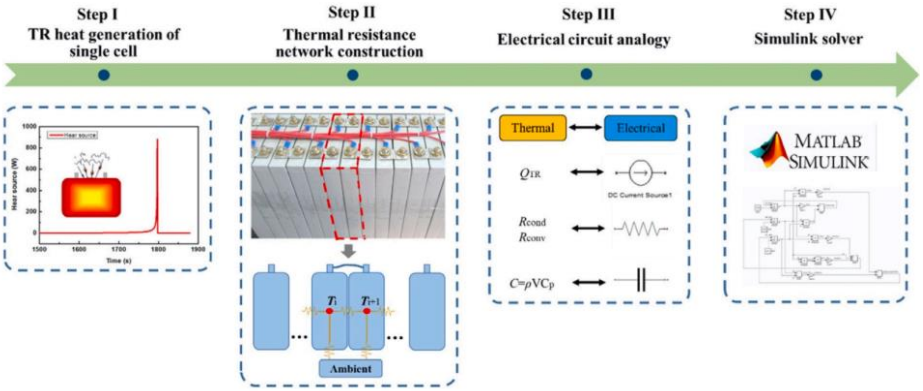
Kim ve arkadaşları, silindirik bir lityum iyon pil içindeki gaz tahliyesini, iç basıncı ve gaz dinamiği davranışını incelemek için sayısal bir model geliştirdi. Daha yüksek deşarj oranlarına sahip pillerde sıcaklıktaki keskin artış, daha düşük deşarj oranındaki pillerde daha erken meydana gelme eğilimindedir. Daha yüksek deşarj oranlarında iç basınç artma eğilimi gösterir ve patlama durumu oluşur.

Liao ve arkadaşları (2020), silindirik bir lityum iyon pilde yapmış oldukları deneyde pilin maksimum sıcaklığının deşarj oranı arttıkça arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Pilin deşarj oranı arttıkça açığa çıkan gazların da sayısının arttığı sonucuna ulaşmışlardır. %5 deşarj oranında altı adet gaz bileşeni termal kaçak durumunda serbest bırakılırken, %100 deşarj oranında yirmi beş adet gaz bileşeni serbest duruma geçtiğini gözlemlediler.

Chen ve arkadaşları (2019), termal analiz için deneysel bir çalışma yürüttüler. Silindirik pillerden oluşan iki batarya paketi meydana getirdiler. İlk batarya paketinde 35 bataryadan ve 6x6 konfigürasyonda ve termal kaçağı tetikleyecek bir ısıtıcıdan oluşmaktaydı. İkinci batarya paketi 99 bataryadan ve 10x10 şeklinde oluşmaktaydı. Birinci batarya paketinde, en fazla 6 pilin, ikinci batarya paketinde ise 32 pilin aynı anda ateşlendiği görülmüştür. Daha fazla sayıda pil kullanılmasının büyük bir ortalama kütle kaybına sebep olduğu sonucuna varıldı.

Termal kaçak sırasında mevcut olan havalandırılmış gazlar ve bunlara karşılık gelen gazlar potansiyel bir sağlık ve güvenlik tehlikesi oluşturabilmektedir. Termal kaçak önemli bir güvenlik sorunu olduğundan matematiksel ve sayısal modeller üzerinde çalışılabilmektedir (Shadid ve Martin, 2022).

Termal kaçak durumunu önlemek için soğutma sistemleri (BTYS), ısıyı ortamdan uzaklaştırmak için tasarlanmıştır. Pilin çalışması sırasında ve termal kaçakların önlenmesi için pilin sıcaklığı 25 ºC ila 40 ºC arasında optimum sıcaklıkta tutmak önemlidir. Şekil 2.6'da termal kaçak durumunu önleme aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Dört aşamalı termal kaçak önleme aşamaları (Shadid ve Martin, 2022).

Yeni enerji araçları, genellikle birden fazla batarya hücresine sahip bir pil paketi kullanır. Hem seri hem de paralel bağlı olabilirler. Sıcaklık dağılımı eğer uniform(düzgün) değilse

bataryanın kapasitesini, ömrünü etkiler. Kullanım sırasında tutarsız ısı dağılımı nedeniyle akım, deşarj derinliği ve pil takımındaki sıcaklık dağılımı etkilenir. Tekil bataryaların yapısal karakteristiklerinden dolayı termal iletimlerinde farklılık vardır (Fu, Zhao vd., 2023)

2.4. Batarya Sayısal Modellemesi

Batarya sayısal modellemesi, bataryanın sıcaklık davranışını tahmin etmek için önemli olmaktadır. Batarya modeli belirlenirken, model için gereken parametre sayısı, karmaşıklık gibi etkenler dikkate alınmalıdır.

Pil sıcaklığının incelenebilmesi için lityum iyon pillerin ısı üretim modelleri önem teşkil etmektedir. Isı üretim modellerinin kurulabilmesi için elektrokimyasal termal modeller, elektriksel termal modeller ve fiziksel mekanizmalara dayalı termal kaçak modelleri kurulabilmektedir.

Diao ve arkadaşları (2021), 25 farklı Li-Ion batarya tipini 11 farklı büyük üreticilerin verilerini incelemişlerdir. Bu incelemeyle müşterilerin sorunlarını tartışıp, önerilerde bulunarak doğru bataryayı seçmelerini amaçlamışlardır. Müşteriler en uygun pili seçmek için bu verileri kullanıyorlar. Aynı zamanda şirketlere de pil geliştirme konusunda rehberlik etmektedir. Bu çalışmada Panasonic ve Samsung şirketlerinin daha çok silindirik hücre, GMB, Toshiba ve Johnson Control firmalarının daha çok prizmatik hücre, A123 ve Routejade firmalarının da kese tipi hücre kullandıkları görüşmüştür.

Veri sayfası, müşterilerin üretim partisi değişimini değerlendirmeleri için fiziksel parametreler ve kapasite için ortalama aralık sağlamalıdır. Pilin gömülü olduğu ürüne zarar vermesi halinde, veri sayfası hücre bozulmasının üzerinden kese hücresindeki kalınlık değişimini sağlar. Ayrıca güvenlik parametreleri için veri sayfaları pil davranışını tüm koşullar altında rapor etmelidir. Taşıma, depolama ve kullanım sırasında ya da gerekli uyum standartlarına göre meydana gelebilecek kötü niyetli termal,

elektriksel veya mekanik koşullar dikkate alınmalıdır. Her güvenlik testi ya da güvenlik testini yürüten spesifik standarttan bahsedilmelidir.

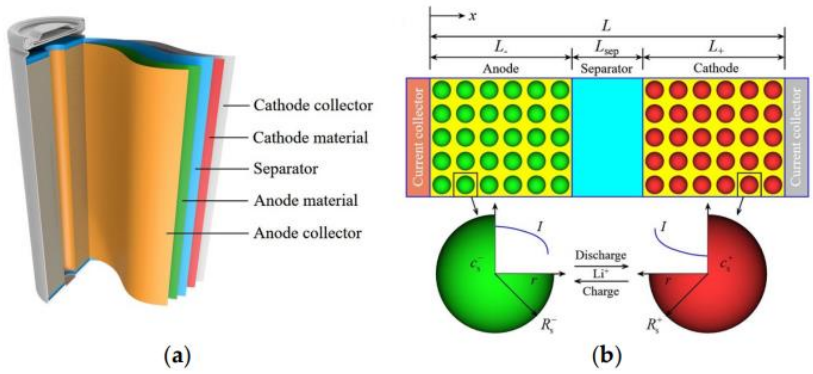
Araştırma yöntemlerine göre bu modeller teorik, deneysel araştırma ve sayısal simülasyon olarak sınıflandırılabilir. Ek olarak, tek boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) modeller kurulabilmektedir.

Günümüzde batarya ısı üretimi için yaygın olarak kullanılan modeller elektrokimyasal termal modeller ve elektrik termal modelleridir. Elektrokimyasal termal model şu temellere dayanır, ısı üretimindeki iç kimyasal reaksiyonlarla, batarya içerisinde elektrokimyasal proses meydana gelir. Elektrik termal model ise akım pilin iç direncinden geçtiğinde üretilen ısı, enerji kaybı hesaba katılır ve bu daha sonra termal enerjiye dönüştürülür.

Aynı zamanda iki boyutlu ve üç boyutlu modeller pilin dış parametreler ve sınır koşulları gibi önemli özellikleriyle ısı üretiminin daha kapsamlı ve sistematik analizini sağlar (Fu, Zhao vd., 2023).

2.4.1. Elektrokimyasal termal model

Lityum iyon pillerin ısı üretimini doğru bir şekilde yansıtan ana modellerden Newman ve arkadaşlarının P2D modelidir. Bu model eş zamanlı olarak pozitif ve negatif katı kürelerde lityum iyon pillerinin taşıma denkleminin çözümünü içerir. Deşarj sırasında lityum negatif elektroların yüzeyine yayılarak reaksiyona girer. Elektron serbest kalarak lityumu elektrolit fazına aktarır. Lityum şarj olana kadar pozitif elektrolit içinde depolanır. Şekil 2.7’de bir lityum iyon pil hücresinin uzunlama kesiti ve iki boyutlu elektrokimyasal model gösterilmiştir.

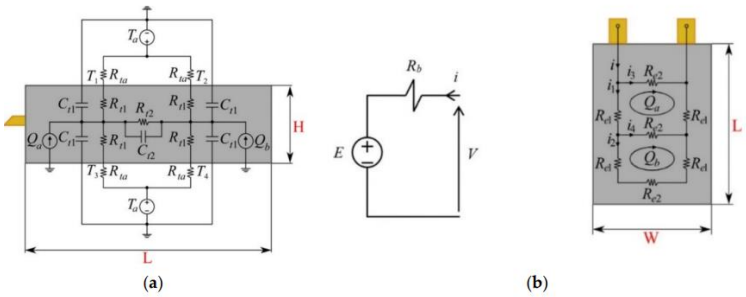


Şekil 2.7. a) Lityum iyon pilin kesiti b) İki boyutlu elektrokimyasal model (Fu, Zhao vd., 2023)

2.4.2. Elektriksel termal model

Kim ve arkadaşları (2009), sonlu elemanlar yöntemi iki boyutlu elektriksel termal eşleşmeyi içeren polimer lityum bataryalar için bir model geliştirdiler. Deşarj performansını ve sıcaklık dağılımını analiz ederek modelin etkinliğini doğrulamak için kızılötesi termal görüntüleme kullandılar.

Pilin eşdeğer devresi, pilin termal modeliyle birleştirilmiş elektrik termal modelindeki voltaj, kapasitans ve direnç kullanılarak oluşturulabilir. Eşdeğer devrenin bir sonucu olarak termal model, terminal voltaj simülasyonunu alır ve pilin ısı üretme hızını hesaplar. Termal modelin bir sonucu olarak eşdeğer devre, ortalama sıcaklığa bağlı olarak direnç ve kapasitans verilerini günceller ve böylece devreler arasında karşılıklı bağlantı sağlanır. Şekil 2.8’ de batarya termal modeli ve elektriksel modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Şematik diyagram a) Batarya modeli b) Batarya elektriksel modeli (Fu, Zhao vd., 2023)

2.5. Batarya Soğutma Sistemleri

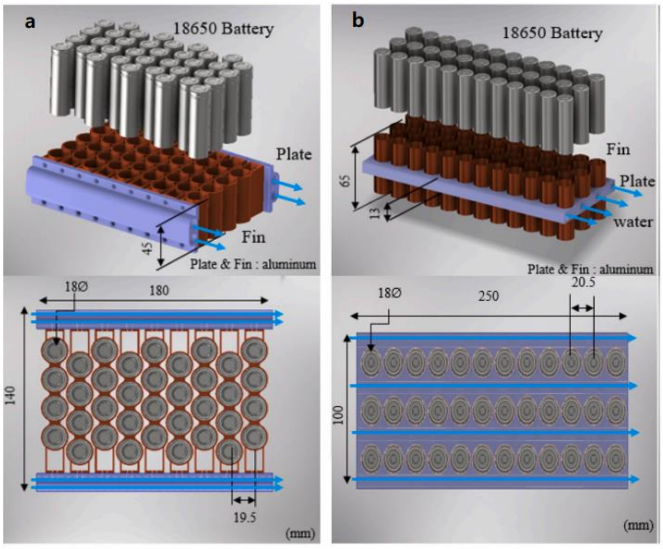
Bataryalar, yüksek performansta çalıştıklarında yüksek sıcaklık noktalarına ulaşırlar ve eğer ki yeterli bir şekilde soğutulmazlarsa bataryanın yapısında hasarlar meydana gelebilir ve batarya kullanılamaz hale gelebilir. Bu nedenle batarya termal yönetim sistemi (BTYS) gereklidir. BTYS'nin amacı pilleri ve batarya oluşumunu optimum sıcaklıkta tutmaktır. BTYS' de sadece ortam sıcaklığını kullanarak yani pasif soğutma ya da soğutma ortamına yerleşik cihazlarla yani aktif soğutma tipleri kullanılabilmektedir.

Çoğu soğutma sistemleri dıştan soğutma tekniği kullanır, bu da batarya yüzeyinden ısının alındığı anlamına gelmektedir. Bu sebeplerden dolayı bataryaların soğutulması, belirli bir sıcaklık aralığında tutulması oldukça önemlidir. Batarya soğutma sistemleri sıvı soğutma, hava ile soğutma, faz değiştiren malzeme ile soğutma ile sınıflandırılabilmektedir (Fu, Zhao vd., 2023).

Byung ve arkadaşları (2023), Li-Ion piller için termal yönetim sisteminin soğutma performansını iki tipte plakada Matlab Simulink ortamında incelemişlerdir. Batarya soğutma sistemi performansı sıvı soğutma yönteminin çeşitli tipleriyle kullanılarak simüle edilmiştir. Bu çalışmada tek pil simülasyonu ve batarya modülü simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Farklı tiplerdeki soğutma plakalarının değerlendirilmesi amacıyla, iki soğutma plakası tasarlanmıştır. Bunlara da Tip 1 ve Tip 2 adları verilmiştir.

Tip 1, soğuk plakanın iki kenar tarafında iki kanal içerir ve Tip 2'de her akü sırasına serpiştirilmiş dört soğutma kanalı bulunmaktadır. Bu çalışmada piller 60 ºC ila 80 ºC arasında sıcaklıkları yükseldiğinde pilin çalışma performansında azalma ve iç direncinde artış meydana geldiğini görüldü. Deneysel çalışmayla, Simulink performansı arasında benzer sonuçlar olduğu görüldü. Simulink simülasyonu hem ısıtma hem de soğutma modunda çalıştırıldı.

Deney ve simülasyon arasında 4C oranı hesaplanırken hafif bir fark olduğu görüldü. Değiştirme noktaları soğutma ve ısıtma modlarında sırasıyla 50 ºC ve 30 ºC değerindedir. Bu araştırma soğutma performansının optimizasyonunu ifade etmektedir. Pil soğutma performansını karşılaştırmak için Tip 1 ve Tip 2 iki tip soğutma plakası soğutma performansını karşılaştırmak için geliştirildi. Li-Ion bataryayı değiştirmek için karşılaştırma aynı koşullar altında yapıldı. Deneyin güvenliğini sağlamak için ısıtıcılı hücre kullanılmıştır. Tip 1 ve Tip 2 batarya modülleri Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Şematik diyagram a) Tip1 batarya modulü b) Tip2 batarya modülü

Bu çalışmadaki ısıtıcının sıcaklığı %10 oranında ısıtıcının sıcaklığı bataryadan daha yüksektir. Buna göre soğutma verimliliği performans özellikleri ısıtıcı sayesinde daha yüksek soğutma verimliliği olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tip 2, aynı C oranında Tip

1’den daha yüksek bir soğutma verimliliğine sahipti. Tip 1, yüksek C oranında yüksek pil sıcaklığı gösterirken, Tip 2 pil sıcaklığını optimum aralıkta kontrol etmiştir. Yüksek C oranında batarya sıcaklığı hızla 50 ºC değerine ulaştı ve iki tip soğutma tipinde yavaş yavaş bir şekilde 30 ºC’ ye düşürülmüştür.

Tip 1 ve Tip 2 soğutma plakaları kullanılarak BTMS modeli Matlab Simulink ile modellenmiştir. Sistemin batarya soğutma performansları ve bir hücrenin iç sıcaklığı simüle edilmiş ve iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur. Tip 2’nin termal direnç değeri 0,001’dir sabit ve Tip 1’den daha düşüktür. Burada C oranının artmasıyla direnç azalmıştır. Tip 2’deki soğutma kanallarının kullanılması ısı transfer alanını arttırmıştır.

Bhagat ve arkadaşları (2022), çalışmalarında Li-Ion pilin Matlab Simulink ortamında şarj ve deşarj durumunu incelemişlerdir. Bu modellemede farklı şarj durumlarında lityum iyon pilin deşarj oranı için bir devre tasarlanmıştır. Yüksek verim elde etmek için çoklu durum şarj işlemi uygulanır. Sabit voltajı 20 V olan 8 bitlik bir mikrokontrolör takılıp tanıtılmıştır. Pil ömrünün arttırılması ve bozulması, %85 şarj ve %15 deşarj durumunda gösterilmiştir.

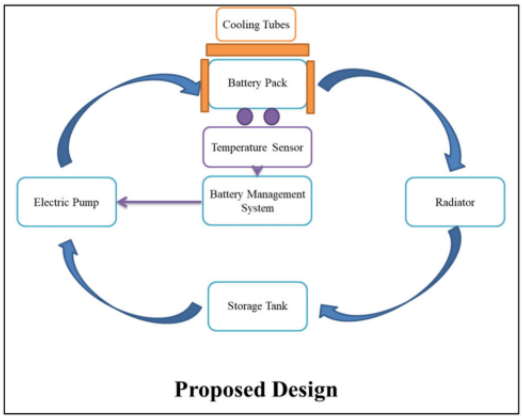
Simülasyon sonuçlarında 12 V ve 6 Ah ile çalıştırıldığında dolum zaman aralığı %30 oranında düşmektedir ve çalışma sıcaklığı 35 ºC olmaktadır. Bu çalışmada, yüksek ortam sıcaklığında pilin kullanılmaması, pilin doğrudan güneş ışığına maruz kalmaması, pilin çok sık şarj edilmemesi gibi öneriler verilmektedir. Bataryanın ömrünün artması için de bataryanın her zaman %100 şarj edilmemesi gerektiğinden bahsedilmektedir. Eğer batarya %100’ e kadar şarj edilirse bataryada daha yüksek sabit voltaj oluşacaktır. Bu hem bataryaya zarar verir hem de performansı düşürür. Bazen %100’den sonra bataryayı durdurma yöntemi yoksa aşırı şarj durumu meydana gelir ve bu durum pillerin yaşlanma sürecini hızlandırır.

Pilin çalışma sıcaklığı sınırlandığında pil ömrü ve pil performansı artar. Soğuk havada ya da yüksek sıcaklıklarda akünün boşaltılmaması gerekmektedir. 0 ºC’nin altında anotta metal kaplama durumu oluşur, bu da kısa devreye sebep verir ve ısı üretimiyle sonuçlanır.

Daha yüksek bir akım oranı, pillerde daha yüksek oluşturarak, pillerdeki gerilimiyle doğru orantılı bir şekilde incelenmektedir.

Sagar ve arkadaşları (2022), nanoakışkanları kullanarak yeni bir soğutma sisteminin analizini Matlab Simulink ortamında gerçekleştirmişlerdir. Bu sistem pil takımını soğutmak ve aynı zamanda pil takımının verimli çalışmasını sağlayarak ısı kaybını azaltmak için tasarlanmıştır. Matlab Simulink programını kullanarak yapılan modelde pompa, radyatör, elektrik motoru, akü paketi, soğutma tüpleri, depolama tankı ve soğutucu olarak nanoakışkan kullanılmıştır.

Bu sanal simülasyon modeli, elektrik ve mekanik üniteler arasında arayüz oluşturulmasına olanak sağlıyor ve çok yönlü analiz yapılmasına imkân sağlıyor. Sistemde akış için kullanılan akışkanın seçimi termal sıvı özellikleri bloğu kullanılarak elde edilmiştir. Bu simülasyon iki farklı tipte akışkanı incelemiştir. Bunlar etilen glikol ve nanoakışkanlardır. İlk test için hacim oranı %0,5 olan etilen glikol kullanılmıştır. İkinci test durumu için (gliserol ve su karışımı) kütle oranı %0,039 olan nanoakışkanlar kullanılmıştır. Oluşturulan prototip model Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

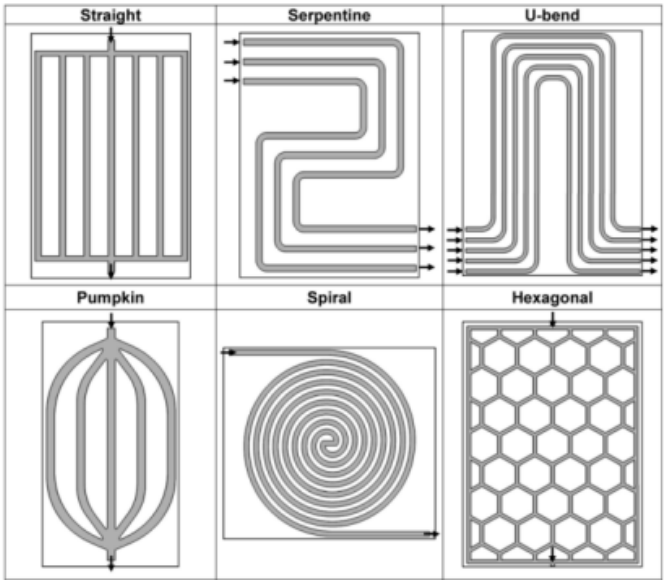


Şekil 2.10. Prototip modelin blok diyagramı (Sagar vd., 2022)

Çalışmada daha önce tartışıldığı gibi akışkanın ısıl iletkenliği arttıkça soğutma performansı da artmaktadır. Daha iyi performans için, baz akışkandaki nano partikül konsantrasyonu arttırılarak sıvının termal iletkenliği yükseltilmiştir. Nano partikül bazlı

sıvı kullanımıyla etilen glikolün değiştirilmesi mevcut menzil endişesi sorunlarının üstesinden gelmek için ve hücrelere güven sağlaması için yapılmıştır. Aracın menzili aynı zamanda sürüş durumuna da bağlıdır. Menzil arttırımı için yol durumu ve uygun trafik sinyalizasyonu sağlanmalıdır.

Monika ve arkadaşları (2022), yaptıkları çalışmada tipik kanal yapısına göre paralel kanallar ve serpantin kanallar yavaş yavaş daha iyi soğutma etkisine sahip kanallarla değiştirdi. Aynı kanal hacmine sahip altı soğuk plaka tasarımı yaptılar. Bunlar düz kanal, serpantin kanal, U şeklinde kanal, kabak şeklinde kanal, spiral kanal ve altıgen yapıda kanaldır. Yapılan nümerik analizlerde yüksek basınç düşüşüne rağmen yılan kanalı ve heksagonal kanalının iyi soğutma özelliğine sahip olduğu ve batarya sisteminde sıcaklık dağılımını önemli şekilde geliştirdiği görülmüştür. Buna karşılık kabak şeklindeki kanalın basıncı ve pompalama gücünü düşürmek için uygun olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Şekil 2.11'de bu kanal tipleri gösterilmiştir.



Şekil 2.11. 6 farklı kanal tipi (Monika vd., 2022)

Uzal ve arkadaşları (2023), yaptıkları çalışmada hava giriş hızının ve konumunun, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), simülasyonu kullanmasıyla elektrikli araçlardaki nikel metal hidrür (Ni-MH) batarya paketinin soğutma performansı

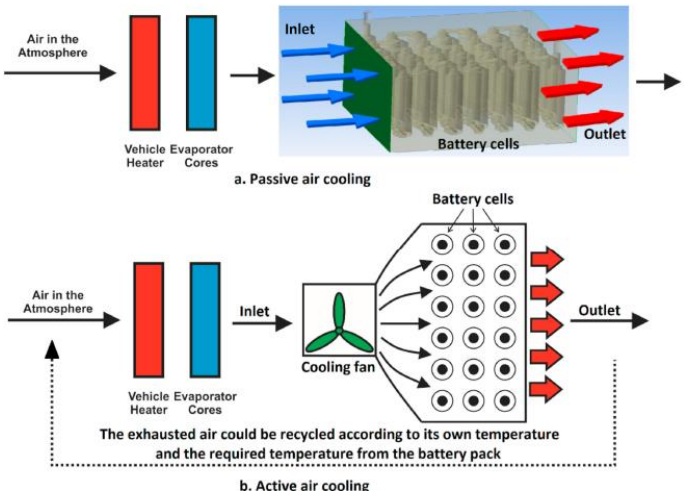
üzerindeki etkisi incelenmiştir. Batarya takımının 0 ila 60 mm arasındaki değişen giriş konumlarında ve çıkış konumlarında U ve Z geometrilerinde analiz edilmiştir. Sonuçlarda hava giriş konumu arttıkça sıcaklığın düştüğü, 30 mm'lik giriş konumundan sonra düşüş önemsiz hale geldiği görülmüştür. Ayrıca, hava daha düşük hızlarda yönlendirilerek, soğutma sisteminin enerji tüketimi azaltılabilmektedir, böylelikle soğutma performansı korunabilir. Yaptıkları çalışmada etkili verim için soğutma performansının ideal şartlarda ayarlanması gerekmektedir. Daha sonraki çalışmalar için hava çıkış konumunun soğutma performansına etkisinin incelenmesi ve optimizasyonun yapılabilmesi düşünülebilmektedir.

Simülasyon sonuçlarına göre etilen glikol ve nanoakışkan kullanımı değerlendirilmiştir. Sonuçlarda, pilin soğuması için gereken sürenin olduğu sonucuna varılıyor. Nanoakışkan kullanılarak yapılan analizlerin daha verimli soğutma sağladığı sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda batarya ömrünün de artabileceği sonucuna varılmıştır. Bu tekniği dünyadaki otomobil üreticileri için de kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Nanoakışkan bazlı soğutucu kullanılmasının bir dezavantajı depolama tankında çökelme meydana gelmektedir. Bir diğer dezavantajı da nanoakışkanın fiyatının yüksek olması potansiyel araştırmacıları uzaklaştırabilir. Ancak artan teknolojik gelişmeler ve Endüstri 4.0'ın benimsenmesiyle nanoakışkan fiyatlarında düşme görülebilir. Düşük maliyetle verimli bir performans elde etmek için bu soğutma tekniklerini geliştirmek ve daha güvenli sistemler geliştirmek için bu çalışmalara odaklanmalıdır.

2.5.1. Hava ile soğutma

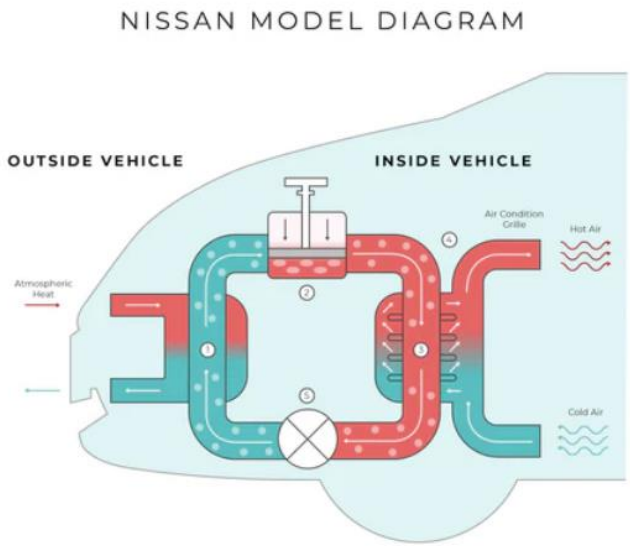
Hava soğutma sistemleri, basitlikleri, doğrudan ve güvenli ortam erişimi, düşük viskoziteleri, küçük boyutları, yüksek kompaktlığa sahip olmaları, hafiflik, düşük bakım maliyeti ve düşük yatırım maliyeti gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır.
İki farklı hava soğutma sistemi vardır. Bunlar pasif ve aktif hava soğutma sistemleridir. Şekil 2.12'de gösterilmiştir (Fu, Zhao vd., 2023).



Şekil 2.12. a) Pasif hava soğutma b) Aktif hava soğutma (Andrea, 2010)

Aralarındaki fark aktif hava soğutma sisteminde fan, motor gibi güçlü soğutma sistemi elemanı olup olmamasıdır.

Nissan LEAF aracı zamanla etkinliğini arttırmak üzere geliştirilen bir hava soğutma sistemi kullanıyor. LEAF'in son sürümü, potansiyel termal sorunları azaltmak için daha gelişmiş bir hava soğutma sistemi kullanıyor. Şekil 2.13'te Nissan LEAF aracının soğutma sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Nissan LEAF hava soğutma sistemi (Joel, 2023)

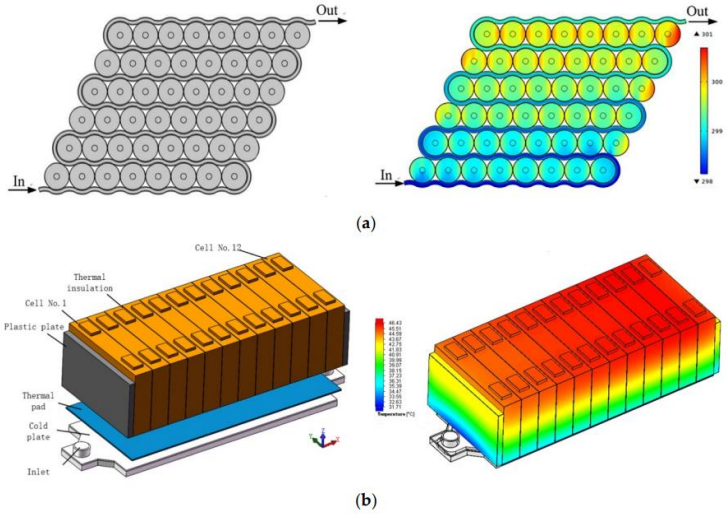
Pasif hava soğutma sistemi, havanın bataryanın dışından içine doğru akmasını ve bağıl hareket nedeniyle pillerin soğutulmasını içerir. Araç hareket ettikçe batarya grubundaki ısı, bataryadaki boşluktan geçen hava tarafından uzaklaştırılır ve karşı taraftan dışarıya atılır. Yüksek ortam sıcaklığı ve artan batarya paketi ısı dağıtımı gereksinimleriyle karşı karşıya kalındığında pasif hava soğutma teknolojisi etkili değildir.

Hava hızını arttırmak ve ısıyı iyileştirmek için fanlar gibi ekipmanların eklenmesi gereklidir. Yeterli miktarda pil varsa, pil takımından daha fazla ısıyı çıkarmak mümkündür. Fanlar hava soğutma sisteminin maliyetini arttırsa da aktif hava soğutma sistemi genel ısı dağıtım performansını ve güvenilirliğini arttırır, aktif soğutma sistemi maliyeti yüksek olmasına karşın üstün özellikleri ön plana çıkmaktadır (Fu, Zhao vd., 2023).

2.5.2. Sıvı ile soğutma

Sıvıların ısı iletkenliği daha yüksek olduğundan ve ısıyı daha iyi dağıttıklarından, sıvı soğutma teknolojisi büyük pil paketlerini soğutmak için daha uygundur. Sıvının pillerle doğrudan temas halinde olup olmamasına bağlı olarak soğutma sıvısı dolaylı (temassız) soğutma sıvısı doğrudan(temaslı) soğutma olarak sınıflandırılabilir.

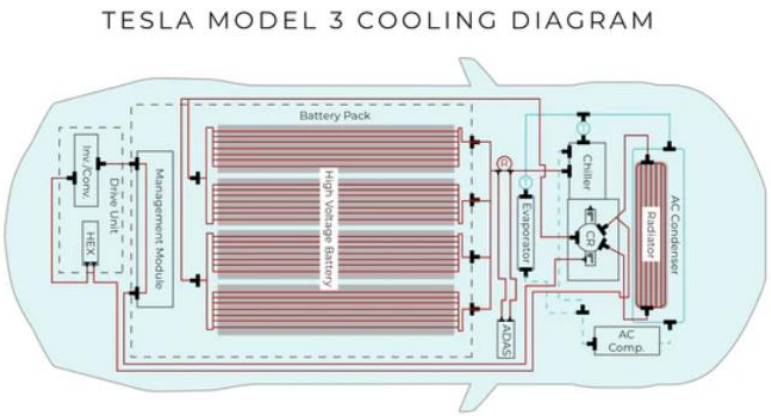
Dolaylı sıvı soğutma yönteminde iki ana uygulama yöntemi vardır. Birincisi ısının pil paketindeki tüpler veya tüp tabakaları aracılığıyla dağıtılması, ikincisi ise pillerin sıvı soğutma tabakasına takılması şeklindedir. Şekil 2.14'te bu yöntemler gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Dolaylı soğutma: a) Tüp tabakaları b) Soğutma plakası (Fu, Zhao vd., 2023).

Aynı zamanda yüksek ısı kapasitesi nedeniyle sıvı soğutucuların akış hızı çok daha düşüktür. Isıyı aynı oranda uzaklaştırması özelliğiyle diğer sistemlerden daha iyidir. Elektrikli su pompası, aynı miktarda elektrikle çalıştırıldığında elektrikli fandan daha sessizdir.

Tesla aracının, tutarlı akü sıcaklığını korumak için soğutucu dolu tüplerden oluşan bir ağ kullanan bir sıvı soğutma sistemine sahiptir. Bu yaklaşım, pil takımının verimli bir şekilde soğutulmasını ve ısıtılmasını sağlayarak optimum performans ve uzun ömür sağlar. Şekil 2.15'te Tesla Model 3 aracının soğutma sistemi gösterilmiştir.

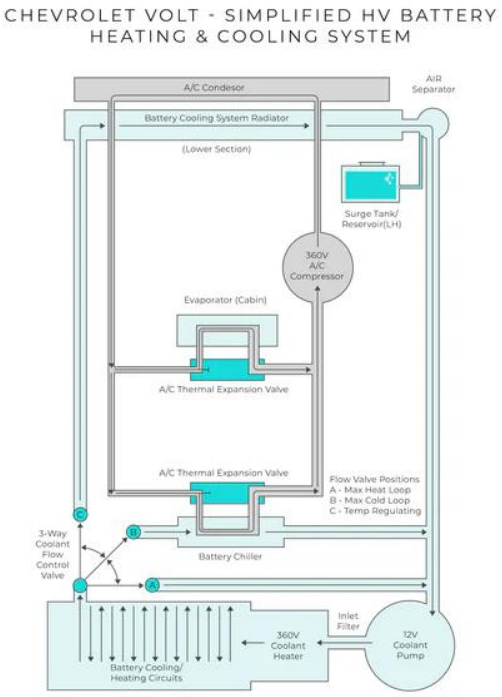


Şekil 2.15. Tesla Model 3 sıvı soğutma sistemi (Joel, 2023)

Bir yandan da dolaylı soğutma sistemi daha fazla termal dirence sahiptir çünkü pilin ürettiği ısı başka bir yere aktarılmadan ilk önce sıvı soğutmalı tüp duvarından geçmelidir. Soğutucu sıvılar aktıkça soğutucunun sıcaklığı yükselmeye devam ederek pil takımı içindeki sıcaklık dengesinin azalmasına neden olur (Fu, Zhao vd., 2023).

Doğrudan sıvı soğutma sisteminde, soğutucu ve batarya doğrudan temas halindedir, bu da ısı transfer sürecini daha etkili hale getirir, sistemin yapısını basitleştirir ve temas termal direncini azaltır. Direkt soğutma sistemlerinde soğutucunun iyi yalıtılmış, yanmaz ve çevre dostu olması gerekmektedir. Yaygın olarak kullanılan sıvılar arasında silikon yağı, transformatör yağı, hidrofloroeter eter yer alır.

Chevrolet Volt aracının, pil sıcaklığını yönetmek için Tesla'nın yaklaşımına benzer bir sıvı soğutma sistemi kullanılıyor. Bu istikrarlı çalışma koşullarının korunmasına yardımcı olur ve pilin verimliliğini ve dayanıklılığını garanti eder. Şekil 2.16'da Chevrolet Volt aracının soğutma sistemi gösterilmiştir.

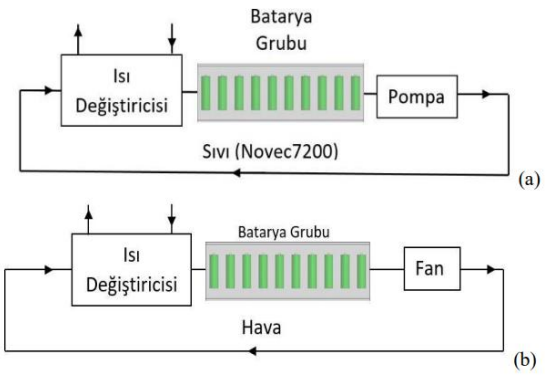


Şekil 2.16. Chevrolet Volt sıvı soğutma sistemi (Joel, 2023)

Dolaylı sıvı soğutmayla karşılaştırıldığında yerden ve maliyetten daha tasarruf sağlayabilir ve toplam ağırlığı azaltılabilir, enerji tüketimi açısından bakıldığında doğrudan sıvı soğutma sistemlerinde soğutucunun daha fazla enerjiye ihtiyacı vardır. Daha yüksek viskoziteye sahiptir. Doğrudan soğutma için kullanılan tipik bir soğutucu yağdır. Yağ, hava ve sudan daha yüksek ısı iletkenliğine ve elektrik yalıtımına sahiptir. Pilin sıcaklığı, tamamen yağa batırılarak makul şekilde kontrol edilebilir.

Doğrudan sıvı soğutmada sıklıkla kullanılan tek fazlı yağlar silikon yağı ve madeni yağlardır. Geleneksel soğutuculara göre yüksek dielektrik mukavemeti, mükemmel ısı iletkenliği, iyi yaygın direnci, düşük korozyon direnci ve yanma zorluğu gibi bazı avantajları vardır (Li, Huang vd., 2023).

Hava soğutma ve sıvı soğutma sistemlerinin şematik gösterimi Şekil 2.17'de yapılmıştır.

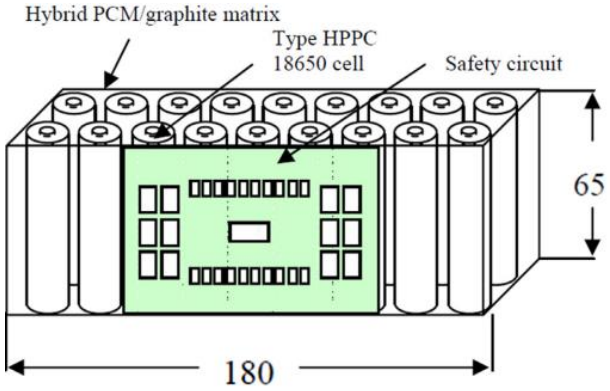


Şekil 2.17. a) Hava soğutma sistemi, b) Sıvı soğutma sistemi (Celen ve Kaba, 2021)

2.5.3. Faz değiştiren malzeme ile soğutma

Faz değiştiren malzemeler iyi bir alternatiftir çünkü elektrikli araçlarda pasif termal yönetimine izin verilir. Faz değiştiren malzemeler termal enerjiyi hem gizli hem de duyulur olarak depolayabilir ve sonra ters yönde boşaltır. Sıcaklık yükseldiğinde, bu malzemeler enerjiyi başta enerji şeklinde yakalar ve depolar. Algılanabilir ısı, faz geçiş sıcaklığına ulaştığında gizli formdadır. Sıcaklık düştükçe depolanan enerji açığa çıkar. Faz geçiş sıcaklığının altına düşerse malzeme başlangıç durumuna geri döner. Faz değiştiren malzemeler, elektrikli araçlarda kullanıldığında pilin iç sıcaklığının çalışma aralıklarında tutulması için kullanılabilir. Erime noktası faz değiştiren malzemeler için izotermal faz değişimi sürecinde önemli bir tehdittir.

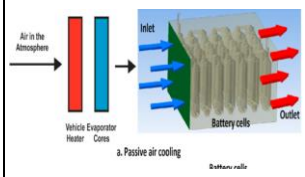
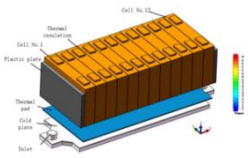
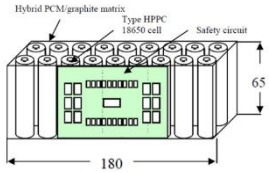
Cihazın çalışma sıcaklığı hangi faz değiştirme malzemesi kullanılacağına karar verilmesi için önemlidir. Sıcaklık aralığı neredeyse erime noktasına eşit olmalıdır. Li-ion bataryalarda 40 ºC'nin altında olmalıdır. Düşük erime sıcaklığına sahip faz değiştiren malzemeler Li-Ion batarya soğutma sistemlerinde geniş kullanımları nedeniyle kullanılır. Şekil 2.18'te Li-Ion bataryada faz değiştiren malzeme kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Faz değiştiren malzeme ile soğutma (Wazeer, Abeykoon vd., 2019)

Batarya termal yönetiminde, bataryanın içinde meydana gelen elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlar tehlikeli olabilmektedir. Sıcaklıktaki aşırı yükseltmenin önüne geçmek için, Li-ion pillerden boşaltılan ısının azaltılması için belirli çözümler gündeme gelmiştir. Bunlardan biri üretilen ısıyı azaltmak için bir iç düzenleme ya da iyileştirme için bir dış termal yönetim sistemidir. Harici olanlar hava, sıvı soğutma ve faz değiştiren malzeme ile soğutmadır (Wazeer, Abeykoon vd., 2019). Sıvı soğutma, hava soğutma ve faz değiştiren malzeme ile soğutma tiplerinin karşılaştırılması Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Batarya soğutma tipleri karşılaştırması (Li, Huang, vd., 2023)

	Hava soğutma	Sıvı soğutma	Faz değiştiren malzeme soğutma
Görsel			
Termal İletkenlik	Orta	Yüksek	Düşük
Düzgün Sıcaklık Dağılımı	Düşük	Orta	Yüksek
Ücret	Düşük	Orta	Yüksek
Yapı Karmaşıklığı	Düşük	Orta	Yüksek
Ağırlık	Düşük	Yüksek	Yüksek

Bu batarya soğutma tiplerinin haricinde de daha az kullanımda olan ısı pompalı soğutma sistemi, evaporatif soğutma sistemi gibi tipler de bulunmaktadır.

2.5.4. Batarya termal yönetim sistemi zorlukları

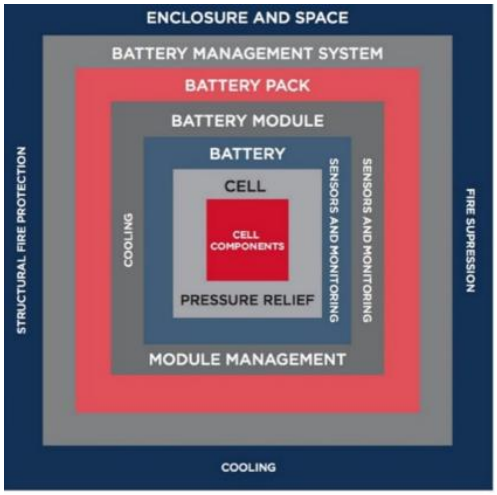
Elektrikli araç bataryalarında birçok termal yönetim zorlukları olmaktadır. Bunlar sızıntı, korozyon, tıkanma, iklim ve eskimedir. Sızıntılar sadece boru bağlantılarında sızıntı riski bulunan sıvı soğutma sistemlerinde meydana gelir. Herhangi bir sızıntı, pil performansını ve ömrünü hızla azaltır. Nemin bataryanın elektrik yalıtımına zarar vermesi durumunda elektrikli aracın çalışmasının durmasına bile neden olabilirler. Batarya modülleri, ara bağlantılar, pompalar ve valflerin tümü sağlam kalmalıdır.

Korozyon yalnızca, sıvı glikol yaşlandıkça soğuk plakaların paslanabileceği sıvı soğutma sistemlerinde meydana gelebilir. Bu nedenle araç bakımının bir parçası olarak soğutma sıvısının değiştirilmesi gereklidir. Tıkanma, sıvının pil içinde dolaştığı yüzlerce küçük kanalda mevcut olan bir risktir.

Dünyanın dört bir yanındaki iklim koşulları piller için farklı termal zorluklara neden olabilmektedir. Arabayı uzun süre şiddetli güneş altında bırakmak veya kışın sıcaklığın çok düşük olduğu yerde yaşamak buna örnek olarak gösterilebilir. Piller her zaman geniş sıcaklık aralığına dayanabilmelidirler. Bunun için batarya soğutma sisteminin araç kullanılmadığında dahi aktif olması gerekmektedir.

Yaşlanma, planlaması gereken termal yönetim sorunlarına neden olur. Bataryalar yaşlandıkça enerjinin büyük bir kısmı ısı olarak kaybolur. Termal yönetim sistemi, yalnızca ilk yıllardaki tipik koşullar için değil, akü ömrünün ilerleyen zamanlarında ortaya çıkan zorlu koşullar içinde oluşturulmalıdır.

Termal kaçak durumu özellikle kapalı alanlarda ciddi yangın tehlikesi oluşturmaktadır. Son 20 yılda 300'den fazla Li-Ion bataryalarıyla alakalı yangın olduğu görülmüştür. Bu çok sayıda kaza bu bataryalarda ciddi güvenlik sorunu olabildiğini gösterdi. Bu kazalar bataryaların fazla ısınması, içeride olan kısa devre, şarj olurken kısa devre, ani batarya yanması, bataryanın aşırı ısınmasına neden olan gevşek bağlantı, suya girildiğinde kısa devre, çarpışma sırasında batarya modülündeki kısa devre, gaz çıkışı ve ateşlenme durumu, pozitif ve negatif kutuplar arasında kısa devre gibi nedenlerden dolayı olmuştur. Bunları önlemek için hücre, batarya, modül, paket, sistem ve muhafazada yangından korunma önlemleri dikkate alınır. Yangından korunma planı akü sisteminin dışından gelen tehlikeleri dikkate almalıdır. Hücre bileşenlerinden sistem ve bölme tasarımlarına kadar yangından korunma durumları dikkate alınmalıdır. Şekil 2.19'da batarya koruma seviyeleri gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Batarya yangından koruma seviyeleri (Ghiji vd., 2020)

2.5.5. Batarya soğutma sistemi geliştirme önerileri

Batarya soğutma sistemlerinde geliştirme önerileri gündemdedir. Hava soğutma sistemi için hava hacminin arttırılması, soğutucu akışkan performansının iyileştirilmesi, kanal boyutunun arttırılması, akış hızının arttırılması, batarya hücresinin konumunun optimizasyonu, aşırı ısınmanın çözülmesi, yangından korunma durumlarının iyileştirilmesi, yüksek enerji yoğunluğu ve güç gereksinimleri yerine düşük enerji yoğunluğu ve güç gereksinimleri olan batarya paketleri için daha uygun gibi geliştirme önerileri bulunmaktadır. Şekil 2.20'de farklı batarya soğutma sistemi kullanan otomotiv firmaları örnek olarak gösterilmiştir. Buradaki s ve p sırasıyla seri ve paralel bağlı anlamına gelmektedir.

Marka ve Model	Batarya Kapasitesi (kWh)	Batarya Konfigürasyonu	Isıl Yönetim Sistemi	Toplam Nominal Voltaj (V)
Audi e-Tron	71/95	108s3p/ 108s4p	Sıvı Soğutma	396
Mercedes EQC	80	96s4p	Sıvı Soğutma	405
Tesla Model S	60/100	96s74p	Sıvı Soğutma	375
Jaguar I-Pace	90	108s4p	Sıvı Soğutma	389
Hyundai Kona	64	98s3p	Sıvı Soğutma	356
Renault ZOE ZE50	52	96s2p	Hava Soğutma	400
Chevy Bolt - EV	66	96s3p	Sıvı Soğutma	350

Şekil 2.20. Elektrikli araç batarya paketleri (Güngör, Göçmen ve Cetkin, 2023)

Sıvı soğutma sistemi için sıvı akış hızının kontrol edilerek verimliliğin artması, kaçak ve sızıntıları aza indirgenmesi, tüketilen enerjinin minimuma indirilmesi, nanoakışkan, sıvı metaller ve kaynayan sıvı gibi malzemeler kullanarak maliyeti azaltma gibi öneriler bulunmaktadır. Faz değiştiren malzeme için yüksek yapı karmaşıklığının aza indirgenmesi, ücretlerin daha ulaşılabilir düzeye getirilmesi, termal iletkenliğin daha da arttırılması geliştirme önerisi olarak değerlendirilebilir (Akkuş ve Işık, 2023).

Sevilgen ve arkadaşları (2021), the Newman, Tiedemann, Gu, and Kim (NTGK), modelini kullanarak geçici davranışı simüle etmişlerdir. Pil modülü daha az parametre gerektirdiğinden daha büyük uzunluk ölçekleri için uygundur ve mevcut akü modülü sisteminden gelen verilerin alınabildiği yarı deneysel bir modeldir. NTGK modelinin seçilmesi ve yapılan deneylerden elde edilen verilerin kullanılması simülasyon modelinin güvenilirliğini arttırmıştır. Bu çalışmada çok kanallı, serpantin kanallı ve alttan soğutma kanallı olmak üzere üç tip soğutma kanal tipi karşılaştırılmıştır.

En kolay erişilebilir olan sıvı soğutma ürünü su, dolaylı sıvı soğutmada geniş bir uygulama alanına sahiptir. Her ne kadar glikol ilavesi uygulanabilir sıcaklığı genişletebilse de batarya termal yönetim sistemi pilin ısı yayılımı gereksinimlerini karşılamak zordur. Nanopartiküller ve sıvı metaller önemli ölçüde gelişebilir, termal iletkenlik ve BTYS sistemi için ideal aday malzemeler haline gelir. Su soğutma sistemi bunlara kıyasla daha iyi soğutma performansı gösterir. Batarya sisteminin ağırlığı her zaman endişe konusu olmuştur. Ancak sıvı soğutma ek entegrasyon zorluklarını da beraberinde getirir. Gelecekte nanoakışkanlar kullanılarak ve bunları gelişmesiyle soğutma verimliliğinin artması amacıyla çalışmalar yapılacaktır (Li, Huang vd., 2023).

Paralel su akış kanallarına sahip yeni, yüksek performanslı bir soğuk plaka geliştirildi. Günümüzdeki prizmatik Li-Ion hücrelerinin termal gelişimi için tasarlandı. Geliştirilen çok kanallı soğuk plaka kullanılarak sıcaklık daha yüksek deşarj oranlarında önemli ölçüde azaltılmıştır. Akış ve ısı transferini içeren üç boyutlu bir elektrotermal model üç farklı sıvı soğuk plakanın performansını değerlendirmek için geliştirilmiştir.

Sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu görüldü ve NTGK alt modeline sahip pil modülü için akış ve ısı transferi geçici sayısal hesaplamalardaki analizler eş zamanlı olarak gerçekleştirildi. Soğutma performansı ve sıcaklık homojenliği göz önünde bulundurularak prizmatik Li-Ion'un termal yönetimi için daha yüksek performanslı yeni bir soğuk plaka tasarlanmıştır (Sevilgen, Dursun ve Kılıç, 2023).

Yapılan bir çalışmada dört hücreden oluşan batarya paketi için basınç düşüşünü ve maksimum sıcaklığı minimuma indirmek ve konvektif ısı transfer katsayısını maksimuma çıkarma için soğutma sisteminin tasarım optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada yeni bir yaklaşım olan LHS (Latin Hypercube Sampling) ve GRA (Grey Relational Analysis), parametrelerin optimal aralıklarını belirlemek için verimli bir batarya soğutma sistemi tasarlamak üzere önerilmiştir. Sonuçta konvektif ısıda %11,6'lık azalma ile uyum sağlanarak basınç düşüşünde %40,3'e kadar azalma elde edilmiştir. Sonuçlar önerilen yaklaşımın kullanılabileceğini göstermektedir. Pilleri güvenli bir çalışma sıcaklığında tutmak için daha iyi soğutma plakaları tasarlamak ve optimize ederek güç tüketimini azaltmak yollarına gidilebilir (Bulut, Albak, Sevilgen ve Öztürk, 2021).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu kısımda bir boyutlu modelleme için Matlab Simscape Battery ve Simulink yazılımlarından faydalanılmıştır. Farklı deşarj oranlarında (2C, 3C, 4C) bataryanın ürettiği ısı miktarı ve sıcaklık değişimi literatürdeki sonuçlarla doğrulanmıştır. Batarya modülü için ise paralel kanallardan oluşan, batarya modülünü alttan soğutacak sıvı soğutma sistemi tasarlanmıştır.

3.1. Kullanılan Li-Ion Batarya ve Özellikleri

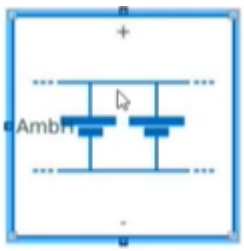
Bu çalışmada Lityum Demir Fosfat (LFP- $LiFePO_4$) kimyasına sahip bir pil seçilmiştir. 30 adet kese (pouch) tipi LFP hücreden oluşan A123 markasına ait AMP20M1 HD bir Li-Ion batarya modülü oluşturulmuştur. Çizelge 3.1'de kullanılan pilin özellikleri yer almıştır.

Çizelge 3.1. Seçilen pilin teknik özellikleri (A123, AMP20M1HD-A, 2011)

Markası	A123 system
Model	AMP20
Kimyası	LFP - LiFePO4
Voltajı	3.3V (nominal)
Kapasite	19.6 mAh
Boyutu	7.25 x 160 x 227
Ağırlık	496 g
Çalışma Sıcaklığı	-30 ºC - 55 ºC
Depolama Sıcaklığı	-40 ºC - 60 ºC

Modelleme Matlab Simulink Simscape Battery ortamında gerçekleştirilmiştir. Programdaki batarya modülü interaktif bir şekilde farklı batarya takımı mimarilerinin geliştirilerek performanslarının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Figes, 2024).

Öncelikle soğutma sistemini dikkate almadan model kurulmuştur. Model kurulurken ilk olarak batarya hücresi oluşturulmuştur. Batarya hücresi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Matlab batarya hücresi gösterimi

Sonrasında bataryayı deşarj edebilmek için deşarj(discharger) butonu eklenmiştir. Bu deşarj butonu sabit deşarj akımı parametresinde sabit bir şekilde deşarj işlemini gerçekleştirir. Şekil 3.2 deşarj butonu gösterilmiştir.

Şekil 3.2. Matlab deşarj butonu gösterimi

Sonrasında adım(step) fonksiyonu eklenmiştir. Bu fonksiyon, bir saniye sonra bir değerini üreterek deşarj butonunu tetiklemektedir. Adım fonksiyonu ile deşarj butonunu bağlayabilmek için aralarına Simulink-ps dönüştürücüsü konulması gerekmektedir. Bunun nedeni step fonksiyon Simulink programının, deşarj butonu Simscape programına ait olduğu içindir. Deşarj butonunun artı kutubu batarya hücresine bağlanır, eksi kutubu için de topraklama butonuna ihtiyaç vardır. Şekil 3.3'te adım fonksiyonu, Simulink- ps dönüştürücüsü ve topraklama butonu gösterilmiştir.

Şekil 3.3. a) Adım fonksiyonu b) Simulink-ps dönüştürücüsü c) Topraklama

Hesaplamalarda deşarj oranının hesaplanması gerekmektedir. Hücrenin kapasitesi 20 Ah olarak bilinmektedir. 20 Ah ifadesi, hücrenin kapasitesinden 20A çekilirse bir saatte tamamen deşarj olur anlamına gelmektedir. C rate değeri iki alınırsa pilin nominal kapasitesi 20 Ah olduğu için deşarj akımı 40 gelmektedir. C rate denklemi Denklem 3.1'de, pilin beklenen kullanılabilir süresinin denklemi Denklem 3.2'de gösterilmiştir.

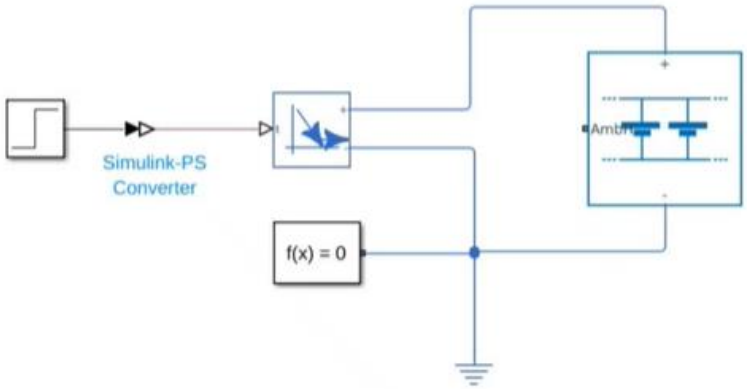
$$C\ oranı = \frac{Şarj\ veya\ deşarj\ akımı}{Pilin\ nominal\ kapasitesi} \tag{3.1}$$

Burada C oranı şarj veya deşarj oranı, şarj veya deşarj akımının(A), pilin nominal kapasitesine (Ah) bölünmesiyle elde edilir.

$$Saat = \frac{Deşarj\ kapasitesi}{Deşarj\ akımı} \tag{3.2}$$

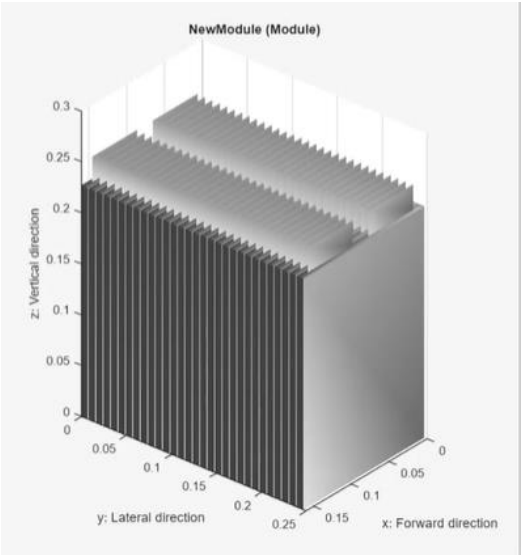
Akünün kullanım saati deşarj kapasitesinin deşarj akımına bölünmesiyle elde edilmektedir.

Gerekli Simulink Simscape araçları bir araya getirilerek soğutma sistemi olmadan bir boyutlu modellenen sistem Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



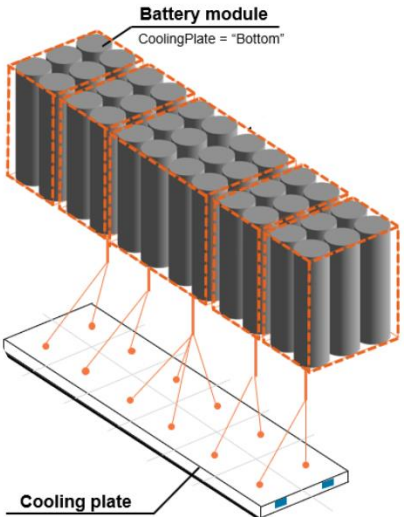
Şekil 3.4. Batarya bir boyutlu modellemesi

Model kurulup farklı deşarj oranlarında önce soğutma sistemi olmadan çalıştırılıp, sonuçları incelenmiştir. 30 adet bataryadan oluşan batarya modülü Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



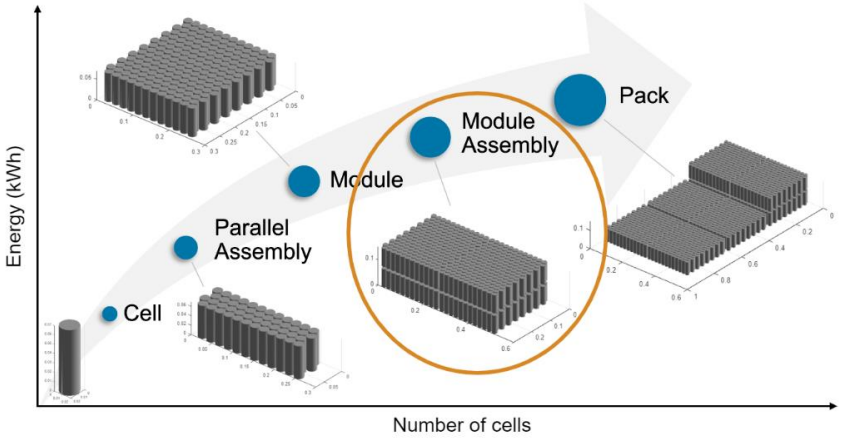
Şekil 3.5. 30 adet bataryadan oluşan batarya modülü

Elektrikli araçlarda verimliliği yüksek tutabilmek adına pompalama kayıplarını mümkün olduğunca düşük tutmak önemlidir. Bu sebeple sıvı soğutma sisteminde kayıpların daha az olduğu düşük Reynolds sayılarında laminer akış tercih edilmiştir. Soğutma sistemi batarya modülünü alttan soğutacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.6'da Matlab programında alttan soğutma şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.6. Alttan soğutmalı batarya modülü (Matlab, 2024)

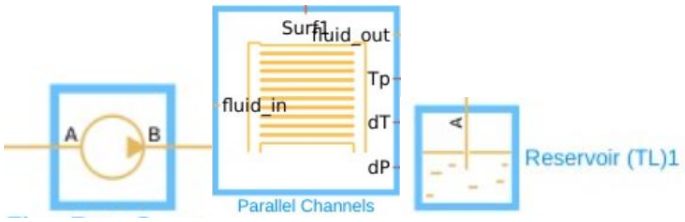
Öncelikle Matlab Simulink Simscape Batarya modülünde, cell(hücre) kısmına gelinir, ardından bağlantının paralel bağlantı olduğu seçilir, sonrasında da batarya modülü oluşturulur. Hücre sayısı ve enerji arttıkça sistem daha karmaşık bir hale doğru gitmektedir. Hücreden daha büyük batarya paketlerine doğru gelişim Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Hücreden batarya paketlerine doğru gelişim (Matlab, 2024)

Farklı deşarj oranlarında, farklı Reynolds sayıları baz alınarak farklı soğutma sıvısı debilerinde ve farklı paralel kanal sayılarında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için ilk modellemeye ek olarak paralel kanallı soğutma plakası, akış kaynağı ve rezervuar

eklenmiştir. Şekil 3.5'te bu bloklar gösterilmiştir. Soğutma plakası batarya modulünü soğutmak için kullanılır. Akış kaynağı belirli kütlesel debilerde akışkan akmasını sağlar ve rezervuar da plaka için gerekli akışkanın sisteme sağlar. Şekil 3.8'de bu bloklar gösterilmiştir.



Şekil 3.8. a) Akış kaynağı b) Paralel kanallı soğutma plakası c) Rezervuar

Paralel kanallı soğutma plakası olarak alüminyum alınmıştır ve kalınlığı 10 mm'dir. Termal iletim katsayısı 237 W/K*m'dir. Soğutma plakasının yoğunluğu 2700 kg/m^3'tür. Soğutma plakasının spesifik ısı değeri 903 J/K*kg olarak alınmıştır. Sıvı soğutmada kullanılan sıvının da Reynolds, Nusselt ve laminar sürtünme katsayısı gibi değerlerin girilmesi gerekmektedir.

Soğutma plakasının termal kütleleri, Denklem 3.4'teki eşitliği kullanarak ısı iletimi yoluyla birbirleriyle ısı alışverişinde bulunurlar (Matlab 2024).

$$Q = kA\frac{dT}{dX} \tag{3.3}$$

Bu denklemde Q değeri ısı akış oranı anlamına gelmektedir. Birimi W(watt) olarak ifade edilir. K termal iletkenlik katsayıdır. Birim olarak (W/m.K) olarak ifade edilir. T ifadesi sıcaklık anlamına gelip, K cinsinden hesaplanır. X ifadesi de mesafe anlamına gelir ve metre birimidir. Aynı zamanda Simulink Simscape programı gereken sonuçları verebilmek için kütlenin korunumu denklemini de çözmektedir. Bu denklem 3.5'te gösterilmiştir (Matlab, 2024).

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B = \begin{cases} 0, \\ V_\rho\left(\frac{1}{\beta}\frac{d\rho}{dt} - \alpha\frac{dT}{dt}\right) \end{cases} \tag{3.4}$$

Denklemin sol tarafında yer alan ifadeler A ve B noktalarından geçen kütlesel debi anlamına gelmektedir. Birim olarak kg/s olarak ifade edilir. V boru sıvı hacmidir ve m^3 olarak ifade edilir. ρ Termal sıvı yoğunluğu olarak ifade edilir, birimi kg/m^3'tür. β *borudaki* kütle modülüdür ve GPa olarak ifade edilir. α izobarik termal genişleme katsayısıdır. Birimi 10^{-6}/K'dir. P borudaki termal sıvı basıncıdır ve birimi Pascal'dır. T sıcaklık olarak ifade edilir ve birimi kelvindir.

Aynı zamanda Simulink Simscape programı enerjinin korunma denklemini de arka planda çözmektedir. Bu denklem 3.6'da gösterilmiştir.

$$V\frac{d(\rho u)}{dt} = \phi_A + \phi_B + Q_H \tag{3.5}$$

Φ_A ve Φ_B ifadeleri A ve B noktalarından geçen toplam enerji akış oranı anlamına gelmektedir. Q_h ifadesi boru ile boru duvarları arasındaki ısı akış oranı ifadesidir.

Borudaki ve duvardaki ısı akış oranı Denklem 3.7 ile ifade edilmiştir.

$$Q_H = Q_{conv} + \frac{kS_H}{D}(T_h - T) \tag{3.6}$$

Buradaki k sabitinin bulunabilmesi için de Denklem 3.8 kullanılmaktadır.

$$h_{coeff} = Nu\frac{k_{avg}}{D} \tag{3.7}$$

Buradaki k_{avg} sabiti değeri ortalama sıcaklıktaki termal iletim katsayısı olarak ifade edilmektedir. Nu ifadesi Nusselt sayısı olarak bilinmektedir. Laminer akış olduğunda sabit ve laminer akış ısı transfer parametre değerine eşit olarak kabul edilmektedir.

Simulink Simscape batarya modülünde, soğutma plaka blokları, soğutucunun iç kanallara sahip düz soğutma plakalarıdır. Bu bloklar üç ana tiptedir. Paralel kanallı soğutma tipi, bu çalışmada da bu tip kullanılmıştır. Bu tipte giriş ve çıkış akışı için birden fazla kanala

ve bir çift dağıtıcı kanala sahip bir akü soğutma plakası modellenebilir. U şekilli kanallarda, U tipinde düz kanallara sahip bir akü soğutma plakası modellenebilir. Kenar soğutma tipinde, soğutucu düz plakanın bir ucundan akar ve akü hücrelerinden gelen tüm ısı, soğutma plakası malzemesi içindeki iletim yoluyla aktarılır (Matlab, 2024).

Batarya eşdeğer bloğu, aşağıdaki ifadeleri toplayarak toplam batarya ısı üretim oranını hesaplar. Bu ifadeler:

- İlk terim olarak eşdeğer devre topolojisindeki tüm dirençlerin güç kaybı terimidir. Bu terimi aynı zamanda geri dönüşü olmayan ısı üretimi olarak da adlandırılır.
- İkinci terim entropiden tersinir ısı üretimidir.
- Üçüncü terim arızalı hücre davranışından gelen kısa devre, açık devre direnci ve termal kaçak reaksiyon ısısı kavramlarıdır.

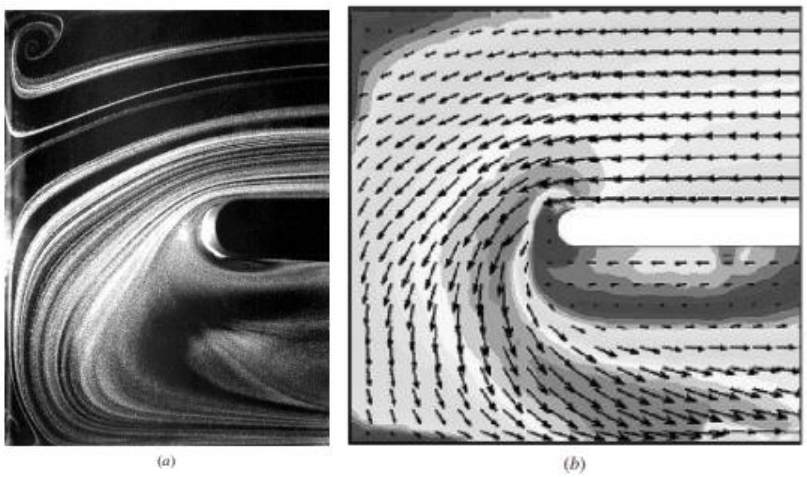
Toplam batarya ısı üretim oranı, Denklem 3.8'de gösterilmiştir.

$$\dot{Q}_{gen} = P_{diss} + \dot{Q}_{rev} + \dot{Q}_{flow,exr} \tag{3.8}$$

4. BULGULAR

4.1. Paralel Kanallı Bir Boyutlu Batarya Soğutma Sistemi

Elektrikli araçlarda verimliliği yüksek tutabilmek adına pompalama kayıplarını mümkün olduğunca düşük tutmak önemlidir. Bu sebeple sıvı soğutma sisteminde kayıpların daha az olduğu düşük Reynolds sayılarında laminer akış tercih edilmiştir. Reynolds sayısı, akışkanın atalet kuvvetlerinin viskozite kuvvetlerine oranı olarak ifade edilir. Reynolds sayısı laminer akış ve türbülanslı akış gibi değişik akış rejimlerini ifade etmek için kullanılır. Reynolds sayısı 2300 değerinden küçük olduğunda laminer akış, büyük olduğunda türbülanslı akış olarak kabul edilir. Şekil 4.1'de laminer akış ve türbülanslı akış örneği gösterilmiştir.

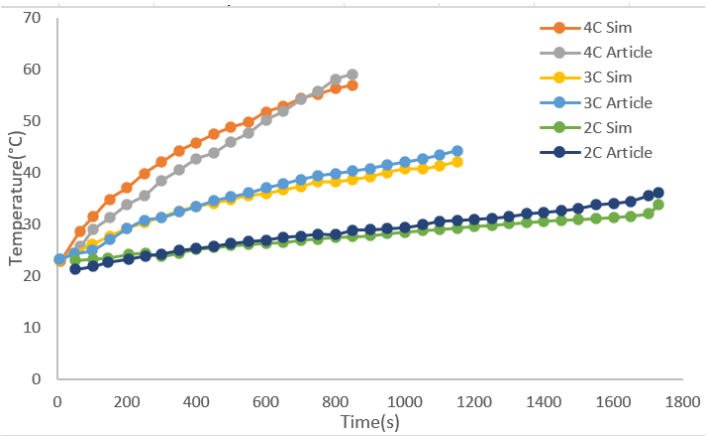


Şekil 4.1. a) Laminer akış b) Türbülanlı akış (White, 2011)

Bazı akışlar oldukça çalkantılıyken bazıları düzenli ve düzgün olabilmektedir. Düzgün akım çizgileriyle belirtilen çok düzenli akış hareketine laminer akış denmektedir. Düşük hızlarda yağ gibi yüksek viskoziteli akışkanların hareketi genellikle laminerdir. Laminer akış, akışkanın birbirine paralel ve düzgün tabakalar halinde akış biçimidir. Yüksek derecede düzenli olmayan akışkanlar genellikle yüksek hızlarda meydana gelir. Türbülanslı akış, akışkanın düzensiz, çapraz akışlar ve girdaplar halindeki akışıdır. Yüksek hızlarda genellikle hava gibi düşük viskoziteli akışkanların hareketi genellikle

türbülanslıdır. Laminer akıştan, türbülanslı akışa geçiş aniden olmamaktadır. Bazı yerlerde akışın laminer ve türbülanslı akış arasında değiştiği bölgelerde geçiş bölgesi meydana gelmektedir.

Modelleme ilk olarak soğutma sistemi olmadan 2C, 3C ve 4C oranlarında yapılıp, literatürle sonuçlar karşılaştırılmıştır. Başlangıç sıcaklığı 22 ºC olarak alınmıştır. Deşarj oranı yükseldikçe bataryanın sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda deşarj oranı arttıkça bataryanın çalışma süresi kısalmaktadır. Şekil 4.2'de farklı deşarj oranlarında çalıştırılan analizin sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Farklı deşarj oranlarında analiz sonuçları

Bu analiz sonuçları literatürle karşılaştırılıp deşarj oranı arttıkça sıcaklığın arttığı ve batarya çalışma süresinin azaldığı sonucuna varan S. Panchal ve arkadaşlarının sonucuna ulaşılmıştır.

Soğutma sistemi eklenerek yapılan modellemede, hesaplamaların doğru şekilde yapılabilmesi için kütlesel debi değeri dört, beş, altı, yedi ve sekiz kanal için Reynolds 200, 300, 400, 1000, 1500 ve 2000 değerlerinde analiz çözdürülmüştür. Öncelikle Reynolds değerinden hız hesabı yapılmıştır. Reynolds değeri, Denklem 4.1'de gösterilmiştir.

$$Re = \frac{vd}{\upsilon} \tag{4.1}$$

Burada v ifadesi akışkanın hızı (m/s), d boru çapı (m) ve υ kinematik viskozite ($m^2.s^{-1}$)anlamına gelmektedir. Reynolds 200 değeri alınıp, boru çapının 0,005 m alınarak yapılan hesaplamada hız değeri 0,04 m/s değerine ulaşılmıştır. Hız değeri kullanarak Denklem 4.2'de hacimsel debi değerine ulaşılmıştır.

$$Q = V \; x \; A \tag{4.2}$$

Burada hız değeriyle alan değeri çarpılarak Reynolds 200 için hacimsel debi değeri $1{,}21x10^{-6}$ m^3/s cinsinden bulunmuştur. Bu değerden de kütlesel debi değerine gidilmiştir. Denklem 4.3'te kütlesel debi gösterilmiştir.

$$\dot{m} = Q \; x \; \rho \tag{4.3}$$

Hacimsel debi değeri suyun yoğunluk değeri olan 1000 değeriyle çarpılarak tek kanal için kütlesel debi değeri 0, 012 kg/s değerine ulaşılmıştır. Bu değeri sırasıyla kanal sayısı olan dört, beş, altı, yedi ve sekiz değeriyle çarparak bu kanal değerlerindeki kütlesel debi değerine ulaşılmıştır. Çizelge 4.1'de Reynolds 200 değeri için kanal sayılarına göre hesaplama sonucundaki değerler gösterilmiştir. Kanal sayısı arttıkça kütlesel debi değeri artmıştır.

Çizelge 4.1. Reynolds 200 kütlesel debi değerleri

Reynolds	Kanal Sayısı	Kütlesel debi değeri (kg/s)
200	4	0,004865694
200	5	0,006082117
200	6	0,007298541
200	7	0,008515
200	8	0,009731

Çizelge 4.2'de Reynolds 300 değeri için kanal sayılarına göre hesaplama sonucundaki değerler gösterilmiştir. Kanal sayısı ve Reynolds sayısı arttıkça kütlesel debi değeri artmıştır.

Çizelge 4.2. Reynolds 300 kütlesel debi değerleri

Reynolds	Kanal Sayısı	Kütlesel debi değeri (kg/s)
300	4	0,006922796
300	5	0,008653495
300	6	0,010384194
300	7	0,012115
300	8	0,013846

Çizelge 4.3'te Reynolds 400 değeri için kanal sayılarına göre hesaplama sonucundaki değerler gösterilmiştir. Kanal sayısı ve Reynolds sayısı arttıkça kütlesel debi değeri artmıştır.

Çizelge 4.3. Reynolds 400 kütlesel debi değerleri

Reynolds	Kanal Sayısı	Kütlesel debi değeri (kg/s)
400	4	0,009230394
400	5	0,011537993
400	6	0,013845591
400	7	0,016153
400	8	0,018461

Çizelge 4.4'te Reynolds 1000 değeri için kanal sayılarına göre hesaplama sonucundaki değerler gösterilmiştir. Kanal sayısı ve Reynolds sayısı arttıkça kütlesel debi değeri artmıştır.

Çizelge 4.4. Reynolds 1000 kütlesel debi değerleri

Reynolds	Kanal Sayısı	Kütlesel debi değeri (kg/s)
1000	4	0,02306016
1000	5	0,0288252
1000	6	0,03459024
1000	7	0,040355
1000	8	0,04612

Çizelge 4.5'te Reynolds 1500 değeri için kanal sayılarına göre hesaplama sonucundaki değerler gösterilmiştir. Kanal sayısı ve Reynolds sayısı arttıkça kütlesel debi değeri artmıştır.

Çizelge 4.5. Reynolds 1500 kütlesel debi değerleri

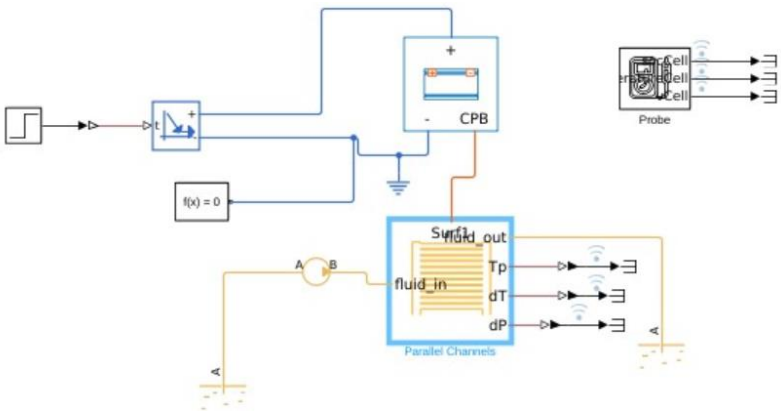
Reynolds	Kanal Sayısı	Kütlesel debi değeri (kg/s)
1500	4	0,048178778
1500	5	0,060223473
1500	6	0,072268168
1500	7	0,084313
1500	8	0,096358

Çizelge 4.6'da Reynolds 2000 değeri için kanal sayılarına göre hesaplama sonucundaki değerler gösterilmiştir. Kanal sayısı ve Reynolds sayısı arttıkça kütlesel debi değeri artmıştır.

Çizelge 4.6. Reynolds 2000 kütlesel debi değerleri

Reynolds	Kanal Sayısı	Kütlesel debi değeri (kg/s)
2000	4	0,080297964
2000	5	0,100372455
2000	6	0,120446946
2000	7	0,140521
2000	8	0,160596

Hesaplanan bu kütlesel debi değerleri bir boyutlu modelleme sisteminde Şekil 2.5a' da gösterilen akış kaynağı butonunun içine girilerek sistem çözdürülmüştür. Şekil 4.3'de paralel kanal soğutma sistemli bir boyutlu batarya modellemesi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Paralel kanal soğutma sistemli bir boyutlu batarya modellemesi

Modelleme soğutma sistemi olmadan çözdürüldüğünde sıcaklık değeri 312 K ve basınç değeri 0 Pa gelmektedir. Modelleme sonucunda elde edilen basınç değeriyle, hesaplanan basınç değerlerinin de karşılaştırılması gerekmektedir. Denklem 4.4'te basınç hesaplama formülü gösterilmiştir.

$$p = f2\frac{L\rho v^2}{D} \tag{4.4}$$

Burada p basınç birimi Pascaldır. f laminer akıştaki Darcy factorüdür. L metre cinsinden uzunluktur. ρ kg/m^3 cinsinden yoğunluk ifadesidir. V hız olup m/s olarak ifade edilir. D metre cinsinden çap olarak ifade edilir.

Çizelge 4.7'de yapılan analizler sonucunda Reynolds 200 değerinde ve farklı soğutma kanal sayılarında Matlab Simulink sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Reynolds 200'e göre sonuçlar

Kanal sayısı	Maksimum sıcaklık	Matlab Basınç Değeri (Pa)	Hesaplanan basınç değeri (Pa)
4	331,85	141	75
5	331,53	174	81
6	331,21	206	87
7	331	225	95
8	330,89	270	103

Çizelge 4.8'de yapılan analizler sonucunda Reynolds 300 değerinde ve farklı soğutma kanal sayılarında Matlab Simulink sonuçları gösterilmiştir. Sıcaklık değeri soğutma sistemi olmadan 332 K gelirken Reynolds 200 değerinde soğutma başlamıştır ve basınç değerlerinin hesaplananla yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.8. Reynolds 300'e göre sonuçlar

Kanal sayısı	Maksimum sıcaklık	Matlab Basınç Değeri (Pa)	Hesaplanan basınç değeri (Pa)
4	331,85	165	231
5	331,53	197	181
6	331,21	227	195
7	330,89	272	212
8	330,78	270	231

Reynolds 300 değerinde sıcaklıklar düşmeye devam edip, basınçların hesaplanan ile yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.9'da yapılan analizler sonucunda Reynolds 400 değerinde ve farklı soğutma kanal sayılarında Matlab Simulink sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Reynolds 400'e göre sonuçlar

Kanal sayısı	Maksimum sıcaklık	Matlab Basınç Değeri (Pa)	Hesaplanan basınç değeri (Pa)
4	331,75	219	302
5	331,43	254	323
6	331,10	320	348
7	330,89	364	377
8	330,68	435	411

Reynolds 400 değerinde sıcaklıklar düşmeye devam edip, basınçların hesaplanan ile yakın olduğu ve artmaya başladığı görülmüştür.

Çizelge 4.10'da yapılan analizler sonucunda Reynolds 1000 değerinde ve farklı soğutma kanal sayılarında Matlab Simulink sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Reynolds 1000'e göre sonuçlar

Kanal sayısı	Maksimum sıcaklık	Matlab Basınç Değeri (Pa)	Hesaplanan basınç değeri (Pa)
4	330,78	640	1800
5	330,78	1153	2000
6	330,25	1467	2100
7	329,61	2067	2360
8	329,28	2712	2580

Reynolds 1000 değerinde sıcaklıklar düşmeye devam edip, basınçların hesaplanan ile yakın olduğu ve artmaya başladığı görülmüştür.

Çizelge 4.11'de yapılan analizler sonucunda Reynolds 1500 değerinde ve farklı soğutma kanal sayılarında Matlab Simulink sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Reynolds 1500'e göre sonuçlar

Kanal sayısı	Maksimum sıcaklık	Matlab Basınç Değeri (Pa)	Hesaplanan basınç değeri (Pa)
4	328,21	3350	4250
5	328,11	4673	4540
6	328,11	6300	4900
7	328,05	8200	5311
8	328,03	10000	5800

Reynolds 1500 değerinde sıcaklıklar düşmeye devam edip, basınçların hesaplanan ile farklılaşmaya başladığı ve artmaya devam ettiği görülmüştür.

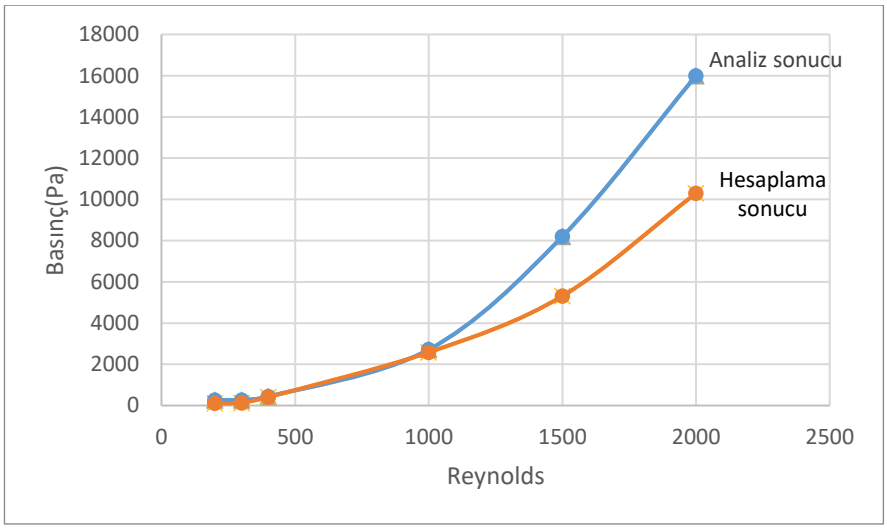
Çizelge 4.12'de yapılan analizler sonucunda Reynolds 2000 değerinde ve farklı soğutma kanal sayılarında Matlab Simulink sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Reynolds 2000'e göre sonuçlar

Kanal sayısı	Maksimum sıcaklık	Matlab Basınç Değeri (Pa)	Hesaplanan basınç değeri (Pa)
4	327,36	8500	7600
5	327,25	11000	8100
6	327,14	16000	8700
7	327,14	20000	9450
8	327,04	26000	10300

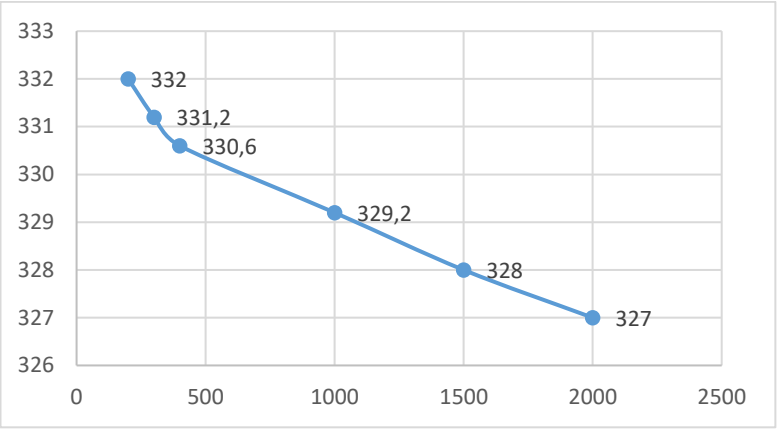
Reynolds 2000 değerinde sıcaklıklar belirli seviyeye kadar düşüp , basınçların hesaplanan ile türbülanslı akım geçiş bölgesine yaklaşıldığı için farklılaştığı görülmüştür.

Şekil 4.4'te farklı Reynolds sayılarındaki analiz sonucundaki basınç değerleri ve hesaplanan basınç değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Analiz ve hesaplama sonucundaki basınç değerleri

Grafikte görüldüğü gibi düşük Reynolds sayılarında hesaplanan basınç değerleri birbirine yakın gelirken, yüksek Reynolds sayılarında laminer akımdan türbülanslı akışa yaklaşıldıkça analiz sonucundaki basınç değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Sıcaklık değerlerinin de Reynolds sayılarına göre değişimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Yapılan soğutmayla sıcaklığın 327 K'e kadar düşürüldüğü görülmüştür.



Şekil 4.5. Analiz sonucundaki sıcaklık değerleri

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada bir 30 adet kese (pouch) tipi LFP hücreden oluşan (AMP20M1 HD) bir Li-Ion batarya modülü ve soğutma sisteminin bir boyutlu modeli oluşturulmuş ve sıvı soğutma performansı incelenmiştir.

- Öncelikle batarya bir boyutlu modellemesi soğutma sistemi olmadan yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda sıcaklık 334 K değerinde gelmiştir.

- Yapılan analizler sonucunda soğutma plakası olmadan yapılan analizde deşarj oranı arttıkça sıcaklığın arttığı ve batarya çalışma süresinin azaldığı görülmüştür.

- Reynolds 200, 300, 400, 1000, 1500 ve 2000 değerlerinde yapılan soğutma sistemi analizlerinde Reynolds 200' de 332 K sıcaklığında olan sistem, Reynolds 2000 değerinde 327 K değerine kadar düşmüştür. Laminer akış bölgesi için soğutma kapasitesi yeterli seviyeye ulaşmıştır.

- Hesaplanan basınç değerleri ve analiz sonucundaki basınç değerleri arasından yakın sonuçlar elde edilmiştir. Sadece Reynolds 2000 değerinde basınç değerlerinde farklılıklar artış göstermiştir, bunun sebebi de laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş bölgesine yaklaşıldığı içindir.

- Kanal sayısı artsa da kanal genişliğinin etkisi de sonraki çalışmalarda incelenecektir çünkü laminer akışta yüksek deşarj oranlarında incelenmiştir. Laminer akışta tutmak için kanal genişliği arttırılabilir.

- Sıvı soğutmanın ısı iletkenliği yüksek olduğundan, ısıyı daha iyi dağıtma özelliğinden dolayı büyük batarya paketlerini soğutmak için uygun olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Khaligh, Alireza ve Zhihao Li. (2010). Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. Vehicular Technology, IEEE Transactions on 59.6, 2806-2814. https://ieeexplore.ieee.org/document/5446335

Yong, Jia Ying vd. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews 49: 365-385. https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v49y2015icp365-385.html

Siddique ARM, Mahmud S, Van Heyst B. (2018). A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations. J. Power Sources 2018; 401: 224-237. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018JPS...401..224S/abstract

Pesaran A, Vlahinos A, Stuart T. (2003). Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles.6th ASME-JSME therm eng jt conf. p. 1-7. http://www.aes.nu/publications/2003-CoolingPreheating-JSME.pdf

Figes. (2024). Batarya termal yönetim sistemi. https://figes.com.tr/matlab-simulink/probleminizi-nasil-cozeceginizi-kesfedin/batarya-termal-yonetim-sistemi,2024

Zhong. (2010). Development of new electrode materials for lithium ion batteries (Publication No. 3126) [Master of Engineering, University of Wollongong]. https://ro.uow.edu.au/theses/3126

Ghiji, Vasily, Khalid, Paul, Ian, Brigitta and Grant (2020). A review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression *13*(19), 5117; https://doi.org/10.3390/en13195117

Kadir C. Sezer, Gültekin Basmacı. (2022). Şarj edilebilir pillere genel bakış, Cilt: 10 Sayı: 1, 297- 309, https://doi.org/10.21923/jesd.946769

Pedro H. Camargos, Pedro H. J. dos Santos, Igor R. dos Santos, Gabriel S. Ribeiro, Ricardo E. Caetano. (2022). Perspectives on Li-ion battery categories for electric vehicle applications. 46:19258–19268 https://doi.org/10.1002/er.7993

EPEC. (2024). EPEC verileri prizmatik ve kese tipi batarya hücrelerini karşılaştırmıştır. https://www.epectec.com/batteries/prismatic-pouch-packs.html,2024

Andrea D., (2010). Battery management systems for large lithium ion battery packs. Artech house. https://books.google.at/books/about/Battery_Management_Systems_for_Large_Lit.html?id=o-QpFOR0PTcC&redir_esc=y

Ping Fu, Lan Zhao, Xuguang Wang, Jian Sun and Zhickeng Xin. (2023) A review of Cooling Technologies in Lithium-Ion Power Battery Thermal Management Systems for New Energy Vehicles. *11*(12), 3450; https://doi.org/10.3390/pr11123450

Li, J., Chen, H., Huang S., Jiao Y., & Chen M. (2023). Recent Progress and Prospects in Liquid Cooling Thermal Management System for Lithium-Ion Batteries. *9*(8), 400; https://doi.org/10.3390/batteries9080400

Wazeer A., Das A., Abeykoon C., Sinha A., Karmakar A, (2019). Phase change materials for battery management of electric and hybrid vehicles https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100131

Akkuş F., Işık M. Z. (2023). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum İyon Bataryaların Hava, Sıvı ve Isı Borulu Termal Yönetim Sistemlerinin İncelenmesi. Cilt: 13 Sayı: 2, 36-54, https://doi.org/10.55024/buyasambid.1339607

Bhagat S., Archana C., Virendra T., Khade K., Budukh A., Mathew VK. (2022). Simulation of Li-ion Battery Using Matlab-Simulink for Charging and Discharging. 353, 03001 https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235303001

Sagar W., Laxman V. (2022). A novel battery cooling system using nanofluids on Matlab Simulink https://doi.org/10.1002/est2.418

Byung K., Thi N., Chan W. (2023). Cooling performance of thermal management system for lithium-ion batteries using two types of cold plate: Experiment and Matlab/Simulink-Simscape simulation Volume 145, id.106816
https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106816

Li, Matthew, Lu, Jun, Chen, Zhongwei, Amine, Khalil (2018). 30 Years of Lithium-Ion Batteries https://doi.org/10.1002/adma.201800561

Besenhard, J. O.; Eichinger, G. (1976). "High energy density lithium cells". Journal Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry. 68: 1–18. doi:10.1016/S0022-0728(76)80298-7

Fong, R.; von Sacken, U.; Dahn, Jeff (1990). "Studies of lithium intercalation into carbons using nonaqueous electrochemical cells". J. Electrochem. Soc. 137 (7): 2009–2013. Bibcode:1990 JElS.137.2009F. doi:10.1149/1.2086855

Hanley, Steve (2023). Condensed Matter Battery From CATL Targets Electric Airplanes. CleanTechnica. https://cleantechnica.com/2023/04/21/condensed-matter-battery-from-catl-targets-electric-airplanes/

Chung, H. C. (2021). Charge and discharge profiles of repurposed LiFePO4 batteries based on the UL 1974 standard. Scientific Data. 8 (1): 165. Bibcode:2021NatSD...8..165C. doi:10.1038/s41597-021-00954-3.

Anonim, (2024). https://electronhybridsolution.com/product/toyota-prius-2004-2009-hybrid-battery-with-brand-new-cylindirical-cells/

Anonim, (2024). https://www.batterydesign.net/bmw-gen5-battery-system/

Shahid, Chaab. (2022). A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100310

Kim J, Mallarapu A, Finegan DP, Santhanagopalan S. (2022). Modeling cell venting and gas-phase reactions in 18650 lithium ion batteries during thermal runaway. J Power Sources ; 489:229496

Liao Z, Zhang S, Li K, Zhao M, Qiu Z, Han D, et al. Hazard. (2020). analysis of thermally abused lithium-ion batteries at different state of charges. J Energy Storage; 27:101065. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101065

Chen M, Dongxu O, Liu J, Wang J. (2019). Investigation on thermal and fire propagation behaviors of multiple lithium-ion batteries within the package. Appl Therm Eng; 157:113750. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113750

Kim, U.S.; Shin, C.B.; Kim, C.S. (2019). Modeling for the scale-up of a lithium-ion polymer battery. J. Power Source, 189, 841–846. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.10.019

Gungor, Gocmen ve Cetkin. (2017). A review on battery thermal management strategies In lithium-ion and post-lithium batteries for electric vehicles. https://doi.org/10.18186/thermal.1334238

Anonim, (2011). A123, AMP20M1HD-A. https://www.buya123products.com/uploads/vipcase/468623916e3ecc5b8a5f3d20825eb98d.pdf

Celen ve Kaba. (2020). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1074802

Bulut, E., Albak, E. İ., Sevilgen, G., & Öztürk, F. (2022). A new approach for battery thermal management system design based on Grey Relational Analysis and Latin Hypercube Sampling. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101452

Diao, Kulkarni, Pecht. (2021). Development of an Informative Lithium-Ion Battery Datasheet *14*(17), 5434; https://doi.org/10.3390/en14175434

Sevilgen, Dursun, Kılıc. (2023). Experimental and Numerical Investigations on the Thermal Performance of Three Different Cold Plates Designed for the Electrical Vehicle Battery. *15*(19), 14162; https://doi.org/10.3390/su151914162

Joel (2023). EV Battery Cooling- How does it work?
https://ev-lectron.com/blogs/blog/ev-battery-cooling-how-does-it-work

Uzal, Sener ve Oktay (2023). Elektrikli Araçlarda Hava Giriş Konumu ve Hızının Batarya Soğutma Performansına Etkisinin Araştırılması. Cilt: 35 Sayı: 1, 116 – 124
https://doi.org/10.7240/jeps.1239910

Monika, K.; Datta, S.P. (2022). Comparative assessment among several channel designs with constant volume for cooling of pouch-type battery module.
https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114936

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Ersel DÖNMEZ
Doğum Yeri ve Tarihi	: Osmangazi/BURSA – 05/06/1996
Yabancı Dil	: İngilizce
Eğitim Durumu	
Lise	: Nuri Nihat Aslanoba Anadolu Lisesi-2014
Lisans	: Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği-2020
Yüksek Lisans	: Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği
Çalıştığı Kurum/Kurumlar	: Biltim Ltd. Şti. (2021-2023) Oyak-Renault(2023-Halen)
İletişim (e-posta)	: erseldonmez96@gmail.com
Yayınları	: 6. Uluslararası Dicle Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi- Batarya Soğutma Sistemi Bir Boyutlu Analizi