

**BATARYALARIN ISIL ANALİZLERİNİN YAPILMASI VE ISIL
YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN SOĞUTMA YÖNTEMLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CEYDA BERBER

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
TEMMUZ- 2019**

**BATARYALARIN ISIL ANALİZLERİNİN YAPILMASI VE ISIL
YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN SOĞUTMA YÖNTEMLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CEYDA BERBER

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

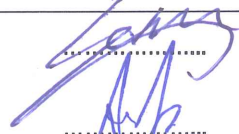
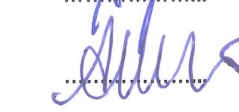
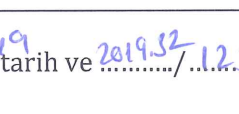
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**Danışman
DOÇ. DR. ALKAN ALKAYA**

**MERSİN
TEMMUZ - 2019**

ONAY

Ceyda BERBER tarafından Alkan ALKAYA danışmanlığında hazırlanan "Bataryaların Isıl Analizlerinin Yapılması Ve Isıl Yönetim Sistemleri İçin Soğutma Yöntemlerinin İncelenmesi" başlıklı çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından 31/07/2019 tarihinde yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda oy birliği ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Doç. Dr. Gamze GEDİZ İLİŞ	
Üye	Doç. Dr. Alkan ALKAYA	
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Naci METE	

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 20/08/2019 tarih ve 2019/32/1255 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Cahit BİLİM
Enstitü Müdürü

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, tablo ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara 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 ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
 - Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
 - Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi
- beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

31 Temmuz 2019 / 31 July 2019

İmza / Signature



Öğrenci Adı ve Soyadı / Student Name and Surname

Ceyda BERBER

ÖZET

BATARYALARIN ISIL ANALİZLERİNİN YAPILMASI VE ISIL YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN SOĞUTMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Elektrikli Araçlar (EA), enerji krizinin ve çevre kirliliğinin tehditlerini azalttığı için günümüzde oldukça popülerdir. Ancak, elektrikli araçlar hala batarya teknolojilerindeki iyileştirmeye ihtiyaç duymaktadır. Lityum iyon bataryalar, kullanılan diğer bataryalar ile karşılaştırıldığında, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu, uzun ömrü ve çevre dostu gibi özelliklere sahip olmasından dolayı EA' larda tercih edilir. Elektrikli araçların düşük menzil problemi, bütün bu avantajlarının yanı sıra bu bataryaların olumsuz özelliklerinden biri haline gelmiştir. Bu problemi gidermenin ve performansını yükseltmenin yollarından biri de lityum iyon bataryaları belirlenen sıcaklık çalışma aralığında tutmaktır. Bu bataryalar yüksek performans ve güvenlik için belirlenen çalışma aralığının dışına çıktığında termal bozunmaya uğrar ve kapasite kaybı yaşar. Performans düşmesine sebep olan nedenlerden biri de; bataryanın içinde biriken ısının düzensiz dağılımıdır. Lityum iyon bataryalarda, şarj/deşarj esnasında kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan ısı bataryanın dış yüzeyinde bataryanın iç yüzeyine oranla daha hızlı yayılır. Bu farklılıklar ısının düzensiz dağılımına neden olur ve bataryanın kapasite kaybetmesine sebebiyet verir. Paket halindeki bataryaların konumlarından dolayı oluşan sıcaklık farkının yanı sıra tek bir hücrede oluşan düzensiz dağılım bile bataryanın ömrünü kısaltır ve performansını düşürür. Bu nedenle; sıcaklığı çalışma aralığında tutmak, düzensiz sıcaklık dağılımını önlemek, bataryanın ömrünü ve güvenliğini arttırmak için batarya ısı yönetim sistemi (BIYS) oldukça önemlidir. Bu çalışmada, sayısal simülasyonlara dayalı olarak hibrit elektrikli (HEA) ve elektrikli (EA) araçlarda kullanılan zarf tipi Lityum-iyon bataryaların farklıdeşarj oranlarındaki termal davranışı ve performansı incelenmiştir. Sayısal simülasyon, hücredeşarj davranışını analiz etmek ve ısı performansını araştırmak için çift potansiyel çok ölçekli- çok boyutlu (MSMD) pil modelini kullanan geleneksel yazılım paketi aracılığıyla yapılmıştır. Bataryanın maruz kaldığı yükler arttıkça sıcaklığın arttığı ve düzensiz ısı dağılımının olduğu gözlenmiştir. Gerçekleştirilen modelin bataryaların homojen ısı dağılımlarının sağlanması için batarya ısı yönetim sistemlerinde kullanılabilecek doğrulukta olduğu görülmüştür. Soğutma sistemlerinin üç metotlarından olan hava, sıvı ve faz değişim materyalleri ile soğutmadeşarj durumundaki bataryaya uygulanmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Ticari olarak da oldukça yaygın olan sıvı ile soğutma sistemi diğerlerinden daha iyi soğutarak gerçeğe uygun olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, zarf tipi lityum iyon batarya, batarya modelleme, batarya ısı yönetim sistemi, ısı dağılımı, batarya soğutma sistemleri

Danışman: Doç. Dr. Alkan ALKAYA, Mersin Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

THERMAL ANALYSIS OF BATTERIES AND INVESTIGATION OF COOLING METHODS FOR THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS

Electric Vehicles (EV) are very popular nowadays because they reduce the threat of energy crisis and environmental pollution. But electric vehicles should still need to improve battery technologies. Lithium ion batteries are preferred in EVs due to their high energy density, high power density, long life and environmentally friendly properties compared to other batteries used. But the low range problem of electric vehicles has become one of the negative features of these batteries besides all these advantages. One of the ways to eliminate this problem and improve its performance is to keep the lithium ion batteries in the specified temperature range. When these batteries go out of the specified operating range for high performance and safety, they are subject to thermal degradation and loss of capacity. One of the reasons that cause performance degradation; the irregular distribution of heat accumulated in the battery. In lithium ion batteries, the heat generated as a result of chemical reactions during charge / discharge spreads faster than the inner surface of the battery on the outer surface of the battery. These differences lead to irregular distribution of heat and cause the battery to lose capacity. In addition to the temperature difference due to the position of the batteries in the package, the irregular distribution in a single cell shortens the life of the battery and decreases its performance. Therefore; In order to keep the temperature in the operating range, to prevent irregular temperature distribution and to increase the life and safety of the battery, the battery thermal management system (BTMS) is very important. In this study, the thermal behavior and performance of envelope type Lithium-ion batteries used in hybrid electric (HEV) and electric (EV) vehicles at different discharge rates were investigated based on numerical simulations. Numerical simulation was performed through a traditional software package using the dual potential multidimensional multi-dimensional (MSMD) battery model to analyze the cell discharge behavior and investigate its thermal performance. When the battery load is increased, irregular thermal distribution and temperature rise has been observed. It has been seen that the model is accurate to be used in battery thermal management systems to ensure homogeneous thermal distribution of batteries. Air, liquid and phase change materials, which are one of the three methods of cooling systems, were applied to the battery in cooling discharge state and their performance was compared. It has been found that the liquid cooling system, which is also quite common in the commercial sector, is more realistic by cooling better than others.

Keywords: Electric vehicles, pouch type lithium ion battery, battery modeling, battery thermal management system, heat distribution, battery cooling system

Advisor: Assist. Prof. Alkan ALKAYA, Department of Electrical-Electronic Engineering, University of Mersin, Mersin.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezimin her aşamasında sahip olduğu bilgi ve tecrübesini hiçbir zaman esirgmeden aktaran, yol gösterici tavır ve üslubu ile ileriki çalışmalarım ve akademik hayatımda bana örnek olacak saygıdeğer hocam Doç. Dr. Alkan ALKAYA 'ya sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

İlk öğretmenim, yanışımda bile yanımda olan, maddi ve manevi desteğini hep hissettiğim, bu zamana kadar benimle birlikte çaba gösteren, en az benim kadar yorulan canım babam Süleyman BERBER 'e, varlığı bile bana güç veren hayatım boyunca muhtaç olduğum sevgisi ile bana destek olan biricik annem Semra BERBER' e, varlıklarına şükrettiğim canım kardeşlerim Av. Adem BERBER ve Yağız BERBER' e, desteklerini ve dualarını hep hissettiğim sevgili BERBER ailesine teşekkür ve sevgilerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca her zaman desteğini hissettiğim, gerek tez gerek diğer akademik çalışmalarım farklı alanlarda çalışmamıza rağmen beni dinleyip bana yol gösteren en az benim kadar çabalayan, emek veren nişanlım Arş. Gör. Onur Eser KÖK' e ve sevgili KÖK ailesine teşekkür ve sevgilerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	ii
ONAY	iii
ETİK BEYAN	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR ve SİMGELER	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM	9
3.1. Elektrikli Araç Çeşitleri	9
3.1.1. Hibrit Elektrikli Araçlar	9
3.1.2. Yarı Şarjlı (Plug-in) Hibrit Elektrikli Araçlar	10
3.1.3. Batarya Paketli Elektrikli Araçlar	11
3.2. Bataryalar	11
3.2.1. Lityum İyon Bataryalar	13
3.3. Lityum İyon Bataryalarda Sıcaklığın Olumsuz Etkileri	15
3.3.1 Performans Düşmesi (Performance Degradation)	15
3.3.2. Isıl Kaçak (Thermal Runaway)	16
3.3.3. Sıcaklığın Düzensiz Dağılımı (Temperature Maldistribution)	17
3.3.4. Düşük Sıcaklık Performansı (Low Temperature Performance)	17
3.4. Batarya Isıl Yönetimi (Battery Thermal Management Systems)	18
3.4.1. Batarya Soğutma (Battery Cooling)	19
3.4.1.1. Hava ile Soğutma (Air Cooling)	20
3.4.1.2. Sıvı ile Soğutma (Liquid Cooling)	23
3.4.1.3. Faz Değişimi (Sıvıdan Gaz) Soğutma (Phase Change (liquid to gas) Cooling)	25
3.4.1.4. Faz Değişimi (Katıdan Sıvıya) Soğutma (Phase Change (solid to liquid) Cooling)	26
3.4.2. Batarya Isıtma (Battery Heating)	27
3.5. Materyal ve Simülasyon Çalışması	30
3.5.1. NTGK Model	31
3.5.2. Model Parametreleri	32
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	34
4.1. Lityum İyon Bataryaların Farklı Yükler Altındaki Isıl Davranışlarının İncelenmesi	34
4.2 Batarya Isıl Yönetim Sistemleri	40
4.2.1. Hava ile Soğutma	40
4.2.2. Sıvı ile Soğutma	43
4.2.3. Faz Değişim Materyali ile Soğutma	45
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	52
KAYNAKLAR	53
EKLER	58
ÖZGEÇMİŞ	61

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3. 1. EA' larda kullanılan farklı bataryaların özellikleri	12
Tablo 3. 2. Farklı tipteki batarya hücrelerinin yapısal özelliklerinin karşılaştırılması	14
Tablo 3. 3. Soğutma sistemlerinin termofiziksel özellikleri	20
Tablo 3. 4. Farklı soğutma sistemlerinin karşılaştırılması	28
Tablo 3. 5. Hibrit elektrikli araçların teknik özellikleri ve ısı yönetim sistemleri	28
Tablo 3. 6. Plug-in elektrikli araçların teknik özellikleri ve ısı yönetim sistemleri	29
Tablo 3. 7. Batarya paketli elektrikli araçların teknik özellikleri ve ısı yönetim sistemleri	29
Tablo 3. 8. MSMD Batarya Modülü Giriş Parametreleri	33
Tablo 4. 1. Faz Değişim Materyali Özellikleri (n-octadecane)	45
Tablo 4. 2. Faz değişim materyallerinde kullanılan hücre malzemeleri	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3. 1. Seri hibrit araç yapısı	9
Şekil 3. 2. Paralel hibrit araç yapısı	10
Şekil 3. 3. Seri-paralel kompleks hibrit araç yapısı	10
Şekil 3. 4. Batarya paketli elektrikli araç yapısı	11
Şekil 3. 5. Lityum iyon bataryalar ile diğer bataryaların karşılaştırılması	12
Şekil 3. 6 . (a) silindirik hücrenin, (b) prizmatik hücrenin ve (c) zarf tipi hücrenin iç yapıları	13
Şekil 3. 7. Lityum iyon bataryaların optimum çalışma aralığı	15
Şekil 3. 8. Batarya ısı yönetim sistemi	18
Şekil 3. 9. Seri soğutma konfigürasyonu a) basit kanal b) kama kanalı c) karşılıklı soğutma ile basit kanal	20
Şekil 3. 10. Seri-paralel konfigürasyonu a) hizalanmış b) sıralı c) yamuk konfigürasyon	21
Şekil 3. 11. U / z-paralel konfigürasyonların şematigi a) z-paralel konfigürasyonu b)u paralel konfigürasyonu	22
Şekil 3. 12. Dolaylı sıvı soğutma için farklı ısı alıcıları silindirik hücreler için: (a) dalgalı tüp (b) soğutucu ceket (c) sıvı soğutmalı silindir prizmatik hücreler için: (d) mini kanallı soğuk plaka (e)mini kanallı fin ve soğuk plaka kombinasyonu	23
Şekil 3. 13. Kılcal ısı borusu	25
Şekil 3. 14. Pil gücü kullanan akü ısıtma yöntemleri: (a) kendi kendine iç ısıtma (b) konvektif ısıtma (c) karşılıklı darbe ısıtma ve harici güç: (d) harici taşınım ile ısıtma ve (e) ac ısıtma	27
Şekil 3. 15. Zarf tipi batarya hücrenin modelleme prosedürünün şematik diyagramı a) Batarya hücre düzeneği b) 2D model c) 3D model	31
Şekil 3. 16. a) 14.6 Ah LiMn ₂ O ₄ LIB boyutları b) tasarlanan modelin ağ görüntüsü	33
Şekil 4. 1. Farklı deşarj hızlarındaki deşarj eğrileri	35
Şekil 4. 2. Farklı deşarj hızlarındaki sıcaklık artışı	35
Şekil 4. 3. a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj hızlarındaki sıcaklık dağılımları	36
Şekil 4. 4. Deşarj esnasındaki a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e)5 C deşarj hızlarındaki akım akış grafiği	38
Şekil 4. 5. a) 0.5C b)1 C c) 2 C d) 3 C e)5 C deşarj hızlarındaki toplam ısı üretimi	39
Şekil 4. 6. Batarya soğutması için tasarlanan hava aralığının batarya ile görüntüsü	40
Şekil 4.7. Hava aralığındaki giriş çıkış tanımlaması	41
Şekil 4.8. 0.5 m/s'deki hava hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği	41
Şekil 4.9. 5C deşarj hızında farklı hızlarda hava soğutmasının karşılaştırılması	42
Şekil 4. 10. Farklı hava hızlarındaki batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	42
Şekil 4. 11. 0.001 m/s' deki sıvı hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği	43
Şekil 4. 12. 5C deşarj hızında farklı hızlarda sıvı soğutmasının karşılaştırılması	44
Şekil 4. 13. Farklı hava hızlarındaki batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	44
Şekil 4. 14. Faz değişim materyalinin batarya hücreindeki görüntüsü	46
Şekil 4. 15. Bataryaya uygulanan fdm malzemesinin mesh(ağ) görüntüsü	46
Şekil 4. 16. a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj hızlarında FDM ile soğutma ve soğutmasız karşılaştırılması	48
Şekil 4. 17. 0.5 C deşarj hızındaki a) fdm'siz b) fdm'li sıcaklık dağılımı	48
Şekil 4. 18. 1 C deşarj hızındaki a) fdm'siz b) fdm'li sıcaklık dağılımı	49
Şekil 4. 19. 2 C deşarj hızındaki a) fdm'siz b) fdm'li sıcaklık dağılımı	49
Şekil 4. 20. 3 C deşarj hızındaki a) fdm'siz b) fdm'li sıcaklık dağılımı	50
Şekil 4. 21. 5 C deşarj hızındaki a) fdm'siz b) fdm'li sıcaklık dağılımı	50
Şekil 4. 22. 5 C deşarj hızındaki soğutmalı ve soğutmasız hallerinin karşılaştırılması	51
Şekil EkA. 1. a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj oranlarındaki sıcaklık dağılımları	59
Şekil EkB. 1. a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj oranlarındaki toplam ısı üretimi	60

KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simgesi	Tanım
AC	Alternatif Akım
BEA	Batarya paketli Elektrikli Araçlar
BIYS	Batarya Isıl Yönetim Sistemi
CFD	Computational Fluid Dynamics
EA	Elektrikli Araç
ECM	Eşdeğer Devre modeli
FDM	Faz Değişim Materyali
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
IYM	İçten Yanmalı Motor
LIB	Lityum İyon Batarya
MSMD	Multi-Scale Multi-Domain Battery Model
NiCd	Nikel Kadmiyum
NiMH	Nikel metal hidrat
NTGK	Newman, Tiedemann, Gu ve Kim ampirik modeli
Pb-asit	Kurşun Asit
PCM	Phase Change Materials
P2D	Newman's Pseudo 2D
SOC	State Of Charge
TEHAD	Türkiye Elektrikli ve Hibrid Araçlar Platformu

1. GİRİŞ

Dünya nüfusuyla orantılı olarak artan ve ulaşım için hayatımızın vazgeçilmez parçası haline gelen motorlu taşıtlar, fosil yakıtları kullanarak çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Öte yandan, fosil yakıt kaynaklarının miktarı sınırlı olmasıyla birlikte ve temel olarak sera gazlarından kaynaklanan sorunlar herkes tarafından kabul edilmektedir. Yenilenebilir enerjiye daha fazla dikkat ederek, bilim adamları bu sorunu hafifletmek ve yayılan toksik gaz miktarını kontrol etmek için Elektrikli Araç (EA), Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA' lar), gibi çevre dostu araçlar geliştirmişlerdir. Bu araçlarda, tekrar şarj edilebilir ikincil bataryalar olarak adlandırılan bataryalardan lityum iyon batarya (LIB) kullanılmaktadır. Yüksek güç ve akım yoğunluğu ile tercih edilen bu bataryalar, şarj/deşarj sırasında ohmik ve entropik reaksiyonlar nedeniyle çok fazla ısı üretmektedirler. Cazip olanaklarına rağmen lityum bataryalardaki sıcaklık kontrolü, uzun süreli performans ve dayanıklılık için hayati öneme sahiptir. Bu bataryalar yüksek performans ve güvenlik için belirlenen çalışma aralığının dışına çıktığında termal bozunmaya uğrar ve kapasite kaybı yaşar. Aynı zamanda, batarya içinde üretilen bu ısı doğru yayılmaz ise pilin içerisinde birikir ve düzensiz bir ısı dağılımına neden olur. Batarya paketindeki hücreler ve modüller arasındaki maksimum sıcaklık farkının 5°C 'den düşük olması istenir. Bu nedenle, Li-ion tabanlı EA' lar, HEA' lar için batarya paketinde üretilen ısıyı hızlı ve etkili bir şekilde dağıtmak için etkili bir Batarya Isıl Yönetim Sistemi (BIYS) gereklidir.

Bataryada çalışma aralığının dışındaki sıcaklıklar (yüksek ya da düşük sıcaklık) performans düşmesine neden olmaktadır. Batarya içerisinde şarj/deşarj esnasında kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan ısının onarılmaz duruma gelene kadar artması ısıl sürüklenmeye neden olurken aynı zamanda doğru dağılmaz ise hücre içinde birikerek sıcaklığın düzensiz dağılımına sebep olmaktadır. Batarya ısıl yönetim sistemlerinin geliştirilmesi, batarya performansı, ömrü ve güvenliği üzerinde büyük öneme sahiptir. Bir BIYS' nin birincil amacı, pilleri, hücre ve pakette eşit sıcaklık dağılımı ile, optimum çalışma sıcaklık aralığında tutmaktır. Bataryayı çalışma aralığında tutmak için yüksek sıcaklıklarda pili soğutmak, düşük sıcaklıklarda pili ısıtmak gerekir. Batarya soğutması geçmiş yıllarda çok dikkat çekmesine rağmen, batarya ısıtma yöntemleri hakkındaki çalışmalar nadiren literatürlerde bulunabilir. Bunun sebebi, yıkıcı bir termal kaçağın aşırı sıcaklıktan kaynaklanabilmesi iken sıfırın altındaki sıcaklığın çoğu zaman yalnızca performans düşüşüne yol açabileceğidir. Bu nedenle daha çok batarya soğutma yöntemleri geliştirilmiştir. Soğutma yöntemleri hava ile soğutma, sıvı ile soğutma ve faz değişimi ile soğutma olarak 3 ana grupta incelenmiştir.

Bu yaklaşımlar arasında, hava ve sıvı soğutma, ticari elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan geleneksel yöntemlerdir. Aktif hava soğutmanın yararları arasında, düşük maliyetli,

basitlik ve soğutma sıvısı malzemelerinin kolay bulunabilirliği sayılabilir. Bataryaları soğutmak için indirgenmiş kabin havasını doğrudan batarya paketine üfler. Hem doğal taşınım (yani pasif) ve zorlanmış taşınım (yani aktif), hava ile soğutma stratejileri olarak kullanılabilir. Sıvı soğutma sistemi, hava soğutmasının zayıf ısı giderme katsayısına kıyasla termal yönetimin verimliliğini büyük ölçüde artırır. Soğutucunun farklı hücreler arasında veya bataryanın etrafındaki bir kap içinde borular ve kanallardan aktığı en çok kullanılan sistemdir. Pasif bir soğutma yöntemi olan faz değişimi ile soğutma (phase change materials) (PCM) termal yönetim sistemleri, basitlik, hafiflik, yüksek verimlilik ve üfleyici gibi ekstra bileşenlere ihtiyaç duymadan soğutma etkisini gösteren özelliğe sahiptir. Sıvı-buhar sistemleri ile karşılaştırıldığında, katı-sıvı faz değişim sistemleri daha kompakt ve pratiktir, bu da araç uygulamalarında daha çekici hale getirir. Bu nedenle, PCM soğutma son birkaç yıldır dikkat çekmiştir.

Bu çalışmada, zarf tipi lityum iyon bataryanın modeli oluşturulmuş ve farklı yükleri temsil etmek amacıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C' deki deşarj oranlarındaki ısıl davranışları analiz edilmiştir. Elde edilen modelin düzensiz ısı dağılımını ortadan kaldıracak hava, sıvı ve faz değişim materyalleri yöntemleri ile soğutma sistemi tasarımı yapılmış ve performansları açısından karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

İklim değişikliği bugün dünyamızda genel kabul görmüş bir gerçektir. Son 100 yılda dünya genelinde 0.74 K olan ortalama bir artış olduğu görülmüş ve bu eğilimin yakın gelecekte azalmasını beklenmemektedir [1]. Sıcaklıktaki artışla birlikte, çevrede gözlenebilir birçok etki vardır. Artan okyanus seviyeleri (yılda 1.7 ila 3 mm) [1], buzulların çekilmesi [2], olan buzullarının azalması [3] ve anormal hava olayları, küresel iklim değişikliğinin şüpheli sonuçlarından bazılarıdır. Bu etkilerin nedeni ve ciddiyeti hakkında tartışma olsa da, genel olarak kabul edilen neden, 20. yüzyılın sonuna kadar sera gazı emisyonlarındaki büyük artıştır [1-5].

20. yüzyılın sonlarından başlayarak ve günümüze kadar devam eden, genel olarak iklim değişikliği ve çevre uygulamaları ile ilgili sosyal farkındalıkta bir artış olmuştur. İnsanlar artık aşırı enerji tüketiminin, özellikle taşımacılığın çevre üzerindeki etkilerini daha iyi anlamaktadır. Büyük metropol şehirlerde hava kalitesinin düşmesi, hem çevresel hem de sağlık sorununu meydana getirmektedir [6]. Tüm bu düşünceler, yakıt kullanmayan sıfır emisyonlu EA' lar için bir pazar alanı yaratmıştır.

Çevresel etkiler 20. yy başında rahatsızlık gösterse de EA tarihçesi 18.yy kadar dayanmaktadır. İlk elektrikli araç modeli 1835 yılında Hollandalı Profesör Straight tarafından yapılmıştır. 1834-1836 yılları arasında Thomas Davenport tarafından batarya ile çalışan (üç tekerlekli bisiklet) ilk araç yapılmıştır [7]. Ancak şarj edilemeyen batarya ile tasarlandığı için 1859 yılından sonra kurşun-asit bataryaları geliştirildikten sonra kullanılmaya başlanmıştır. 1930' lu yıllarda popülerliğini yitirmiş ancak 1970' de yaşanan enerji ve petrol sıkıntısı nedeniyle elektrikli araçlara rağbet artmıştır [8].

Ülkemizde ve dünyada elektrikli araçlara gün geçtikçe ilgi artmaktadır. 2017 yılında elektrikli otomobil satışları rekor miktarla 1 milyon adedi aşmıştır. Bu durum, 2016 yılına göre elektrikli otomobil satışlarında % 54' lük bir büyümeyi göstermiştir. Elektrikli otomobil satışlarında en gelişmiş pazara sahip olan Norveç'te 2017 yılında satılan araçların %39' undan fazlası elektrikli olmuştur. Norveç' i % 11,7 pay ile İzlanda, % 6,3 pay ile İsveç takip etmiştir. 2015 yılında 1 milyon, 2016 yılında 2 milyon sınırını geçen küresel elektrikli otomobil stokları 2017 yılında 3 milyonu aşmıştır. 2016 yılına göre stoklar % 56 artış göstermiştir ve Çin, % 40 pazar payı ile 2017 yılında en büyük elektrikli otomobil stokuna sahip ülke olmuştur. 2017 yılında, elektrikli otobüslerin sayısı 370.000' e yükselirken, elektrikli iki tekerlekli araçların sayısı 250 milyon seviyelerine ulaşmıştır. Dünyadaki elektrikli otobüs ve iki tekerlekli araç stokunun % 99' u Çin'de bulunurken Avrupa ve Hindistan' da da bu oran giderek artmaktadır [9]. Ülkemizde ise, Türkiye Elektrikli ve Hibrid Araçlar Platformu (TEHAD) verilerine göre, 2018 yılının Ocak-Haziran aylarında gerçekleşen 2361 adetlik otomobil satışlarının 98 adetlik bölümünü %100 elektrikli

modeller oluştururken, hibrid motor seçeneğine sahip modellerin satış adeti 2263 olarak gerçekleşmiştir [10].

1990' lı yıllarda büyük araç üreticileri gelişen ve tercih edilen elektrikli araçlarla birlikte batarya teknolojisinin de gelişmesi gerektiğini düşünmüşlerdir. Bu araçlarda kullanılan kurşun-asit ve nikel-kadmiyum bataryaların uzun şarj süresi, düşük menzil problemi, batarya fiyatlarının yüksek oluşu ve şarj istasyonlarının bulunmaması nedeniyle günümüze kadar etkisini gösterememiştir. Ancak; günümüzde diğer pil çeşitleri olan Kurşun asit (Pb-asit), Nikel kadmiyum (NiCd), Nikel metal hidrat (NiMH) daha iyi performans gösteren Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar kullanılmaktadır [7]. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte hayatımıza giren ve yaşamımızı kolaylaştıran taşınabilir elektronik aletler, uzun ve etkili bir şekilde çalışabilmesi için enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar. Bu enerji kaynağı; güvenilir, uzun ömürlü, bakımı kolay, kısa sürede şarj olabilen ve yüksek enerji kaynağına sahip olan lityum-iyon piller olarak karşımıza çıkarlar. Lityum iyon piller, tekrar şarj edilebilir ikincil piller olarak bilinirler. Uzun raf ömrü, geniş çalışma aralığı, yüksek güçlü deşarj kapasitesi, hafıza etkisinin olmayışı lityum-iyon pili diğer piller arasında üst sıralara taşımakla birlikte elektrikli araç üretiminde daha çok tercih edilmesine yardımcı olur [11].

Otomotiv sektöründe HEA' lar ve EA' lar için kullanılan lityum iyon bataryanın üç hücre tipi vardır, bunlar silindirik, zarf tipi ve prizmatik hücrelerdir. Silindirik hücrelerin aktif maddesi naylon mandrel üzerine spiral olarak sarılırken, prizmatik hücreler eliptik ve zarf tipi hücreler ise istiflenmiş plakalar şeklindedir [12]. Silindirik ve prizmatik hücreler genellikle hücrenin en dış yüzeyi için alüminyum ve paslanmaz çelik kasaya sahiptir. Ancak, zarf hücreleri yumuşak metalize plastik ambalajlara sahiptir [13]. Bir zarf tipi hücre, genellikle dikdörtgen ve çok ince, büyük, yassı bir hücredir. Bu, çok sayıda hücrenin çok kompakt bir şekilde istiflenmesine izin verir ve her hücre, ısıtma veya soğutma gerektiğinde termal transfer için geniş bir yüzey alanına sahiptir. Bu aynı zamanda kişisel elektronik cihazlarda kullanım için yaygın bir batarya yapısıdır, çünkü form faktörü kompakt el tipi elektronik cihazlara uygulanabilir. Silindirik hücreler esasen zarf tipi hücreler şeklinde sarılır. Bu, pil hücresinin hacmine göre geniş bir elektrot yüzey alanına sahip olan kompakt bir tek hücre yaratır. Yaygın bir silindirik lityum iyon pil hücresi, birçok laptop batarya paketinde ve LED el fenerlerinde kullanılan 18650 hücredir. 18650 hücresi, hem Tesla Roadster' da hem de Model S' de, Roadster' da 6.831 hücre ve Model S' de 7.000' in üzerinde kullanılır [14]. Silindirik hücreler Tesla Model S, zarf tipi hücreler Chevrolet Volt ve prizmatik hücreler Nissan Leaf, BMW i3 ve Toyota Prius tarafından kullanılmaktadır [15].

Lityum iyon bataryaların en önemli dezavantajı, şarj/deşarj sırasında ohmik ve entropik reaksiyonlar nedeniyle çok fazla ısı üretmeleridir [16]. HEA' ların ve EA' ların şarj / deşarj sırasındaki bu sıcaklık artışı, onarılamaz ve durdurulamaz hale geldiğinde termal kaçaklara, patlamalara ve insanların yaralanmasına sebebiyet verebilmektedir [17].

Li-ion bataryalar için kabul edilebilir çalışma sıcaklığı aralığı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır ve optimum performansını korumak için $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında dar bir sıcaklık aralığı önerilmektedir [18]. Arzu edilen aralık dışındaki sıcaklıklar önemli kapasite kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle, Li-ion tabanlı EA' lar, HEA' lar için batarya paketinde üretilen ısıyı hızlı bir şekilde dağıtmak için etkili bir Batarya Isıl Yönetim Sistemi gerekmektedir. Hücreler arasındaki düzensiz sıcaklık dağılımının yanı sıra bir hücre içindeki sıcaklık dengesizliği de önemli bir problem kaynağıdır. Elektrokimyasal reaksiyonların büyük bir kısmı elektrotlarda gerçekleştiğinden ısı üretme oranı, bir Li-ion hücresi içindeki farklı konumlarda aynı değildir. Bir LiCoO_2 pozitif elektrodun tüm bataryanın dört katı kadar ısı ürettiği belirtilmektedir [19]. Dolayısıyla sıcaklık artışı hücrenin içinde düzgün olmamaktadır. Bu, tüm hücrenin performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip yerel bozulma kaynaklı bataryanın bozulmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, Li-ion bataryanın ısıl davranışını ve deşarj esnasında ısıl performansını anlamak daha da önemli hale gelmektedir.

Batarya hücrelerinin çalıştığı sıcaklık, performansları ve ömürleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hallaj ve diğ. [20], sıcaklığın, şarj durumuyla ve deşarj oranının, batarya çalışması için önemli faktörler olduğunu göstermiştir. Genel performans, akım çıkışı ve çalışma gerilimi [21], akü hücresinin çalışma sıcaklığına bağlıdır. Li-ion bataryaların (EA' lar için geçerli seçim olan), ideal çalışma sıcaklığının üzerindeki ve altındaki sıcaklıkların önemli olumsuz yan etkileri olabilir. Batarya hücresinin ideal aralığın altında çalışması batarya hücresine ciddi şekilde zarar verebilir, paket ömrünü kısaltabilir ve mevcut enerjiyi azaltabilir [22]. Bu, çekiş motorları tarafından kullanılan elektrik akımını üreten kimyasal reaksiyondaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Çalışma sıcaklığı ideal aralığın altına düştüğü için kimyasal reaksiyon yavaşlar ve tam voltaj ve güç çıkışı sağlayamaz. Bir batarya hücresinde sıcaklıklar çok yükselirse, boşalma için mevcut toplam enerji miktarı, düşük sıcaklık durumunda olduğu gibi hızla düşer. Kaplama oluşabilir ve bir batarya hücresi için enerji deposunu ve faydalı şarj / deşarj döngüsünün sayısını kalıcı olarak azaltır ve tek bir hücrede meydana geldiğinde bile paketin etkinliğini azaltır [23]. Chacko ve Yongmann [24] Li-ion bataryalar için $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik bir batarya sıcaklığının muhafaza edilmesinin en verimli çalışmayı sağladığını göstermiştir. Sıcaklıklar termal kaçak için eşiğe ulaştığında (Li-ion bataryalarda), araç yolcuları için önemli güvenlik kaygıları olan bataryanın patlaması mümkündür. Performansı, depolama kapasitesini ve batarya paketinin ömrünü, ısınmayı etkileyen sıcaklığa duyarlılığı ile EA batarya paketi tasarımında yönetim önemlidir. Toplam çalışma gücündeki azalma, sıcaklıklar çalışma aralığının dışında olduğunda % 20 seviyesinde olabilir ve toplam şarj / deşarj döngüsü sayısı % 75 oranında azaltılabilir [25].

Bataryanın içerisindeki sıcaklığın düzensiz dağılımı da oldukça önemli bir endişe kaynağıdır. Bir Li-ion hücresinin performansı kısmen iki faktörden etkilenebilir: elektrotlarının büyüklüğü ve şekli ile mevcut kolektörlerin büyüklüğü ve yerleşimi. Bir elektrot tasarımı alt

optimal ise, voltaj ve akım yoğunluğu eşit olmayan bir şekilde dağıtılır ve bu da aktif malzemenin kullanımında uzamsal değişikliklere neden olur. Ek olarak, ohmik kayıplar nedeniyle akım toplayıcıları boyunca voltaj düşüşü, terminallerin yakınında daha fazla akım yoğunluğu olan akım yoğunluğu dağılımlarını daha da etkileyecek kadar büyük olabilir [26-27]. Bu lokalize aktif madde kullanımı ve homojen olmayan akım yoğunluğu, özellikle yüksek güç boşalması sırasında, yük aktarımında ve omik dirençlerde uzamsal değişikliklere neden olur. Yüksek lokal empedanslı noktalarda üretilen ısı, reaksiyon bölgeleri üzerinde sıcaklık gradyanları üreten ve homojen olmayan bir dağılım oluşturan hücre içinden daha düşük yerel sıcaklık alanlarına iletilir [28]. Sıcaklık dağılımları ve altta yatan mekanizmalarıyla ilgili çalışmalar, 0.25 C - 25 C arası deşarj oranları için -2 - 25 ° C arasındaki ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Keyser ve diğ. [29], ortam sıcaklığını belirtmemiş olsa da, 6 C deşarj oranında prizmatik hücrelerde 13.5 ° C sıcaklık derecelerini bildirdiler. Yerel sıcaklık, batarya terminallerinin yanında, özellikle pozitif elektrot terminalinin yakınında en yüksek seviyededir. Bu termal düzensizlik, terminallerin yakınında yüksek akım yoğunluğu ile sonuçlanan prizmatik hücrelerin kenar akımı toplama tasarımına bağlanır ve bu nedenle önemli yerel ohm direnci ve joule ısıtması ile sonuçlanır. Alüminyum pozitif elektrotun bakır negatif elektroda göre yüksek omik direnci nedeniyle, pozitif elektrot terminalinin yakınında en büyük hücre ısınması gözlemlenir. Fleckenstein ve diğ. [30] bu çalışma üzerinde genişleyerek, daha yüksek akım yoğunluğu ve daha düşük şarj durumu sergileyen daha yüksek sıcaklık alanlarına sahip sıcaklık gradyanlarının mevcudiyeti nedeniyle silindirik hücreler içindeki yerel akım yoğunluğu ve yerel şarj durumundaki farklılıkları belirledi. Bir hücredeki en sıcak ve en soğuk yerler arasındaki maksimum 20 ° C sıcaklık farkı için, yerel akım yoğunluğu % 29 ve yerel şarj durumu % 9 arasında değişmiştir. Lokal termal ve elektrokimyasal davranıştaki bu homojen olmayan özellikler, çalışmaların sıcaklık gradyanlarının varlığının hızlandırılmış hücre yaşlanmasına ve azalmış hücre ömrüne yol açtığını gösterdiğinden, hücre operasyonu üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir [27-31]. Bu, EA' lar için üretilen büyük prizmatik hücreler için Kim ve diğ. [27], sayısal olarak mevcut yoğunluğun ve sıcaklığın, hücrenin elektrot boyutu ve dolayısıyla hücre boyutunun artmasıyla üniform hale geldiğini gösterdi. Bu nedenle, geniş formatlı prizmatik hücrelerin termal davranışı ilgi çekicidir.

Bataryadaki arzu edilen çalışma aralığındaki sıcaklığın ve düzensiz dağılımın etkisi performansı etkilemek ile birlikte sıcaklığın onarılmaz bir şekilde artışı can ve mal kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle BIYS batarya performansı için oldukça önemlidir. BIYS' nin temel işlevleri, kullanım sırasında bataryanın sıcaklık artışını sınırlamak olduğu için genellikle soğutma sistemleri olarak adlandırılan batarya termal yönetim sistemleri vardır ve batarya tipine ve kullanım amacına uygun olmalıdır. Bunlar, tam bir termal yönetim eksikliğinden, koşullara uygun olarak değişken işleme sahip aktif olarak kontrol edilen, güçlü sistemlere kadar değişebilir. İyi tasarlanmış bir termal yönetim sistemi, bataryanın performansını etkin bir şekilde artırabilen

çalışma sıcaklığı penceresinde bataryayı koruyacaktır. Sistem ayrıca, çoklu hücrelerin kullanıldığını varsayarak hem tek tek hücrelerin içinde hem de tüm paket boyunca mümkün olan bir sıcaklığı korumalıdır. EA' larda batarya termal yönetimine en yaygın yaklaşımlar üç ana grupta incelenmiştir. Bunlar hava ile, sıvı ile, faz değişim materyalleri (FDM) ile soğutma sistemleridir.

Havayı ısı transfer aracı olarak kullanmak en basit yaklaşımdır. Hava soğutma, her ikisi de Li ve diğ. tarafından incelenen doğal hava soğutma ve zorlamalı hava soğutma olmak üzere iki kategoriye ayrılır [32]. Yazarlar, basınçlı hava soğutmasını doğal hava taşınımı ile karşılaştırmak için bir LiMn_2O_4 batarya kullanılmıştır. Bulguları, hücrenin maksimum sıcaklığının, doğal konveksiyona kıyasla $3.5\text{ }^\circ\text{C}$ azaldığı, dolayısıyla zorla soğutmanın daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak, LiFePO_4 silindirik hücreleri üzerinde parametrik bir çalışma Zhao ve diğ. tarafından ve çeşitli havalandırma tiplerinin ve zorla hava hızlarının etkileri incelenmiştir. Ayrıca, bitişik hücreler arasındaki boşluk ve ortam sıcaklığının ve giriş havası sıcaklığının etkileri de incelenmiştir. Çalışmalarının sonuçları, hava akış hızındaki artışla, yerel sıcaklık farklılıklarının başlangıçta arttığını ve ardından azaldığını göstermiştir. Ayrıca, yazarlar tarafından, hücrelerin bitişik sıraları arasında bir karşı hava akışı olduğunda, batarya paketinin soğutulmasının etkisini incelemek için bir simülasyon yapılmıştır. Karşı akışın etkili bir soğutma yöntemi olmadığı sonucuna varılmıştır. Ortam sıcaklığı yüksek olduğunda ve hücre çapındaki artış ile hücre arasındaki boşluk azaldığında, pil takımı termal kaçaklara karşı hassastır. Bir 18650 pil takımı için, optimum S / D değerleri (bitişik hücre çapına olan mesafenin oranı) 0,3 ile 0,35 arasındadır [33]. Ortam sıcaklığının sıcaklık homojenliği üzerindeki etkileri Cho ve ark. tarafından araştırılmıştır. Düşük ortam sıcaklıklarında hücreler arasındaki sıcaklık farkının arttığı, ancak yüksek ortam sıcaklıklarında hücreler arasındaki sıcaklık farkının azaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca ortam sıcaklığından bağımsız olarak, girişe daha yakın olan hücrelerin, çıkışa doğru hücrelere kıyasla düşük maksimum sıcaklıklara sahip oldukları gözlenmiştir [34]. Fan ve diğ. sayısal olarak, hava akışı hızının ve boşluk aralığının, eşit aralıklarla yerleştirilmiş sekiz adet 15 Ah lityum manganez oksit zarf tipi hücreden oluşan bir hava soğutmalı batarya takımının performansı üzerindeki geçici etkisi incelenmiştir. Sabit bir $20.4\text{ h}/3$ akış debisi için, boşluk aralığı 1 mm' den 5 mm' ye yükselirken, batarya paketi içindeki sıcaklık homojenliğinde $0,41\text{ }^\circ\text{C}$ lik bir iyileşme gözlemlendiğini bildirdiler. Ek olarak, 3 mm' lik sabit bir aralık için, pakette ölçülen maksimum sıcaklık artışı hava soğutmalı bir bataryadaki akış hızı $20,4\text{ m}^3\text{h}'$ 'den $40,8\text{ m}^3\text{h}'$ 'ye iki katına çıkınca $1,8\text{ }^\circ\text{C}$ azalmıştır [35].

Sıvı soğutmalı BIYS, FDM soğutması ve hava soğutması ile karşılaştırıldığında karmaşık bir sistemdir. Sıvı soğutmada, ısı, bataryanın yüzeyinden, bataryalar etrafındaki ayrı bir boru ile sıvıya aktarılır. Bataryada kısa devreleri önlemek için doğrudan temaslı soğutma yöntemleri için silikon bazlı sıvılar veya mineral yağlar gibi dielektrik sıvılar kullanılır veya soğuk plakalar

yerleştirerek (ısı emiciler) soğutulur [36]. Hava soğutması ile karşılaştırıldığında, doğrudan soğutma yönteminin performansı, yüksek termal iletkenliği nedeniyle daha yüksektir, ancak dielektrik yağların daha yüksek viskozitesi, akış hızlarını sınırlandırır ve daha yüksek pompalama gücü gerektirir. Pesaran ve diğ. deneyler yaparak sıvı soğutmalı BIYS ve hava soğutmalı BIYS performanslarını karşılaştırmış ve sıvı soğutmanın hava soğutmasından daha karmaşık olmasına rağmen, bataryaların soğutulması için oldukça verimli olduğunu ileri sürmüştür. HEA'lar için hava soğutması yeterlidir ancak EA' lar için sıvı soğutma gerekli olabilir [37]. Karimi ve Dehghen LiCoO₂ prizmatik hücreleri kullanarak sıvı soğutmayı hava soğutması ile karşılaştırmıştır. İki farklı tipte pil konfigürasyonu modellenmiştir; Soğutma ortamının akü grubunun aynı tarafına girip çıktığı U tipi konfigürasyon ve soğutma ortamının akü grubunun karşıt uçlarından giren ve çıkan Z tipi konfigürasyon. Kullanılan soğutma ortamı, sırasıyla hava ve sıvı soğutma için hava ve silikon yağıdır. Sonuçlar, Z tipi konfigürasyonun, hem hava hem de sıvı soğutma için batarya paketinin daha iyi bir sıcaklık homojenliği ile sonuçlandığını göstermiştir [38].

Termal depolama malzemeleri olarak adlandırılan Faz Değişim Malzemeleri (FDM' ler), ısıyı depolamak ve serbest bırakmak için kimyasal bağlar kullanır. Parafin balmumu yaygın olarak kullanılan bir FDM malzemesidir. FDM kullanmanın avantajlarından biri, güç kullanılabilirliğini geliştirmeleri ve pompa ve fan gibi yardımcı soğutma sistemlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmalarıdır. FDM' ler az bakım gerektirir ve bu nedenle birkaç araştırma grubunun ilgisini çekmiştir. Örneğin, Khateeb ve diğ. onsekiz 18650 Li-ion hücreden oluşan ve FDM ve alüminyum köpük karışımı ile doldurulmuş bir Li-ion batarya paketi üzerinde çalışmışlardır. Bu paketin ısıl davranışını sonraki bir aşamada yapılan deneylerle doğrulanan sayısal bir model yardımıyla incelemişlerdir. Ayrıca, batarya paketindeki sıcaklık artışının, PCM ve alüminyum köpüğü olan bir BIYS kullanılarak yarıya düşürülebildiği deneyleriyle gösterilmiştir [39]. Mills ve diğ. altı adet 2,2 Ah Li-ion hücreli bir dizüstü bilgisayar batarya paketini simüle etmiş ve termal yönetim çözümü olarak FDM' ye doymuş genleşmiş grafit kullandıktan sonra eşit bir termal dağılım gerçekleştirmişlerdir [40]. Sabbah ve diğ. FDM' nin performansını, sayısal yöntemler ve deneyler kullanarak hava soğutmalı bir sistemin performansı ile karşılaştırdı. Bir Li-ion batarya hücresinin sıcaklığını, 6.67C'lik sabit bir deşarj oranında bile 55 ° C'nin altında tutabildiğini göstermişlerdir [41]. Kızılel ve diğ. FDM ile doldurulmuş yüksek enerjili Li-ion batarya paketleri ile denenmiş ve hem normal hem de kötü test koşulları altında eşit bir termal dağılım elde edildiğini belirtmişlerdir [42]. Rao ve diğ. FDM'leri 8 Ah prizmatik *LiFePO₄* batarya hücresi için test etmişlerdir. Sayısız deney simülasyonunun sonuçları, FDM' lerin EA batarya paketlerini etkileyen termal sorunlara pratik bir çözüm olabileceğini göstermektedir [43].

3. MATERYAL ve YÖNTEM

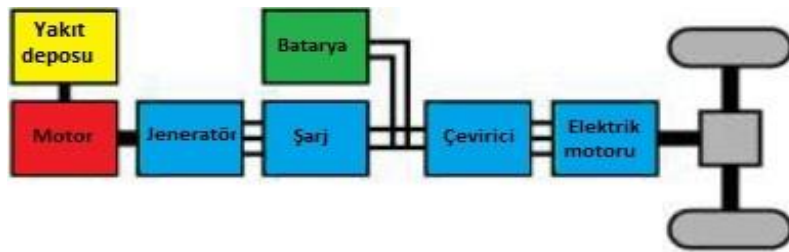
Bu bölümde elektrikli araç çeşitleri, bu araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların özellikleri ve lityum iyon bataryalardaki düzensiz sıcaklık dağılımını ortadan kaldıracak soğutma sistemleri anlatılmıştır.

3.1. Elektrikli Araç Çeşitleri

3.1.1. Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA), otomotiv sektörünün gelecekte tamamen elektrifikasyonuna geçişi mümkün kılan ilk adımdır. Prensipinde, HEA' lar da iki enerji kaynağı vardır: çoğunlukla benzinli veya dizel kullanan geleneksel içten yanmalı motor (IYM), genellikle bataryayla çalışan bir elektrikli motorla veya bataryayla çalışan bir çift katmanlı kapasitör kombinasyonu ile çalışır. HEA' lar yakıt tüketimini ve emisyonları azaltma avantajına sahiptir. Elektrik motoru, frenleme sırasında akü sistemine enerji geri kazanımı sağlar, toplama gücü talebi sırasında IYM' a yardımcı olmak için ek güç sağlar ve ardından IYM' un boyutunu ve gücünü azaltır.

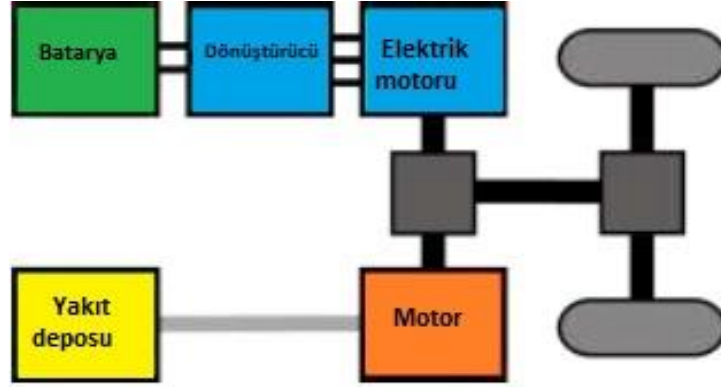
Ana hibrit topolojileri seri hibrit, paralel hibrit ve seri-paralel kompleks hibrittir. Seri topolojide, çekiş sadece elektrik motoru ile elde edilir ve bir IYM elektrik motorunu çalıştırmak veya bataryayı şarj etmek için bir jeneratör olarak çalışır. Farklı enerji kaynakları ayrıştırıldığında, seri hibrit IYM' yı yalnızca gerektiğinde kullanma avantajına sahiptir. Böylece optimum hız ve verimlilikte çalışabilir [44]. Bununla birlikte, seri hibrit topolojisinin dezavantajı, çift enerji dönüşümü nedeniyle daha yüksek kayıplara neden olmasıdır. Bu topoloji genellikle ağır taşıtlarda (otobüs, lokomotif, askeri taşıt vb.) kullanılır. Seri hibrit araç yapısı Şekil 3.1.' de verilmiştir.



Şekil 3. 1. Seri hibrit araç yapısı [44].

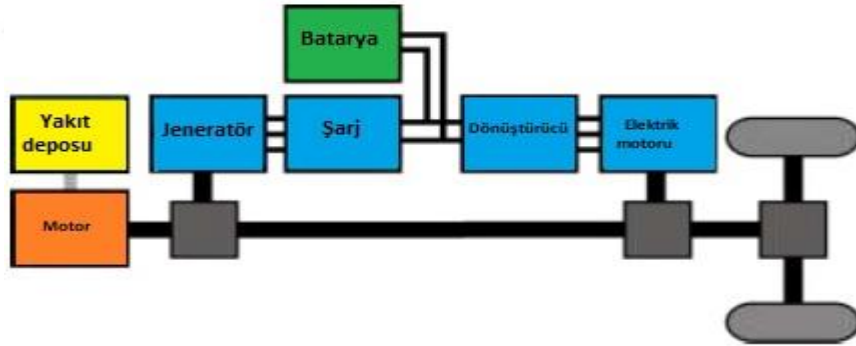
Paralel hibrit teknolojisinde, çekiş IYM ve elektrik motoru mekanik bir bağlantı yoluyla elde edilir. Araç çekiş gücünü bireysel olarak veya birlikte sağlayabilir. Bu topolojinin büyük

avantajı, dönüşüm nedeniyle enerji kaybının küçük olmasıdır. Ana dezavantaj, IYM işleminin aracın hızına bağlı olarak değişmesidir. Binek otomobilleri genellikle paralel konfigürasyonu kullanır. Paralel hibrit araç yapısı Şekil 3. 2.' de verilmiştir.



Şekil 3. 2. Paralel hibrit araç yapısı [44].

Seri-paralel kompleks topolojide, önceki iki topolojinin avantajları birleştirilmiştir. Genellikle IYM' yi ve iki elektrikli makineyi taşıtların tekerleklerine bağlamak için planet dişli kullanır. Seri- paralel hibrit araç yapısı Şekil 3. 3.' de verilmiştir.



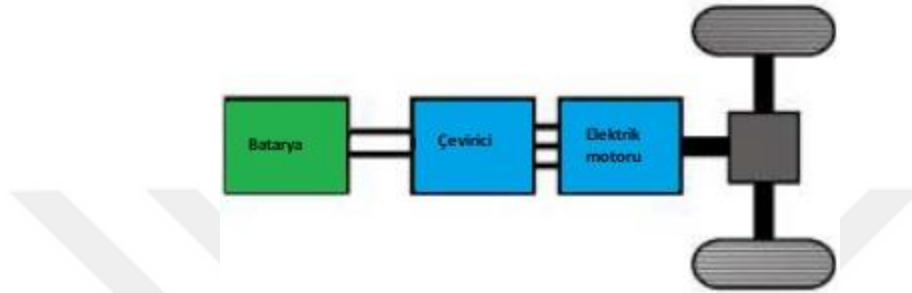
Şekil 3. 3. Seri-paralel kompleks hibrit araç yapısı [44].

3.1.2. Yarı Şarjlı (Plug-in) Hibrit Elektrikli Araçlar

Yarı sarjlı hibrit elektrikli araçlar yukarıda açıklanan üç temel hibrit topolojiye dayanmaktadır. Genellikle elektrik şebekesinden harici olarak şarj edilebilen binek otomobiller için tipik olarak 15 kWh' ye kadar enerji içeriğine sahip yüksek kapasiteli bataryalarla kullanılırlar. Petrol tüketimini önemli ölçüde azaltmak için yeterli elektrik depolayabilirler. Bu, tüm elektrik aralığının 15 ila 100 km'nin üzerinde olmasına izin verir [45].

3.1.3. Batarya Paketli Elektrikli Araçlar

Batarya paketli Elektrikli Araçlar (BEA), çekiş için batarya paketleriyle çalışan bir elektrik motorunu kullanır. Lityum iyon batarya gibi yeni batarya teknolojisinin gelişmesiyle BEA' lar daha çekici hale gelmiştir. Tesla gibi en üst seviye ticari BEA ile 200 km / saate kadar hızlanarak daha fazla hızlanma ve birkaç yüz kilometre mesafeye ulaşmaları beklenmektedir [46]. Batarya paketli elektrikli araç yapısı Şekil 3. 4.' de verilmiştir.



Şekil 3. 4. Batarya paketli elektrikli araç yapısı [44].

3.2. Bataryalar

Geçmişte EA' larda ve HEA' larda kullanılan bir dizi batarya kimyası olmuştur. Bunların arasında kurşun asit, nikel-metal-hidrid (NiMH) ve lityum-iyon (Li- ion) bataryalar bulunmaktadır.

Kurşun-asit bataryalar çok yaygındır ve bugün yoldaki hemen hemen tüm araçlarda başlangıç sisteminin bir parçası olarak kullanılmaktadır. Düşük maliyet ve teknolojik olgunluk nedeniyle birçok uygulamada tercih edilen batarya kimyasıdır. Her ne kadar kurşun-asit bataryalar düşük spesifik enerjiye ve düşük enerji yoğunluğuna sahip olsalar da, onlar büyük bir anlık akım üretebilirler. Ayrıca, üretilmeleri ucuz, bu da onları başlangıçtaki yatırımların yanı sıra değiştirilecek maliyetler açısından cazip kılmaktadır.

Nikel-metal-hidrit bataryalar, nikel kadmiyum batarya kimyasının bir başka düzeltmesidir. Kurşun asit bataryalarla karşılaştırıldığında çok daha gelişmiş spesifik enerji ve enerji yoğunluğu özelliği gösterir ve aynı zamanda yüksek bir özel güce sahiptir. NiMH bataryalar, ilk günde % 20' ye ve her gün % 4' e kadar kullanımda olmadıklarında enerji kaybettikleri hızda yüksek deşarj oranına sahiptir [47].

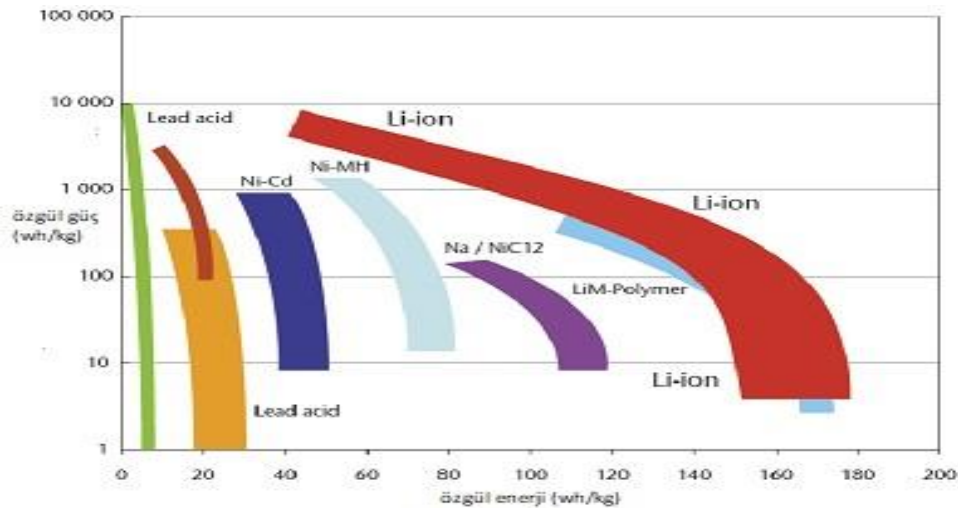
EA' larda ZEBRA veya erimiş tuz bataryaları da aynı şekilde kullanılmaktadır. Bu bataryaların maliyeti düşük ve güvenliği yüksektir, ancak çalışma sıcaklığı çok yüksek (270-350°C) ve güç yoğunluğu çok düşük olduğu için EA uygulamalarında çok popüler değildir [48].

Tablo 3.1. 'de EA' larda kullanılan farklı bataryaların özellikleri Şekil 3. 5.' te gösterilmiştir.

Tablo 3. 1. EA' larda kullanılan farklı bataryaların özellikleri [49].

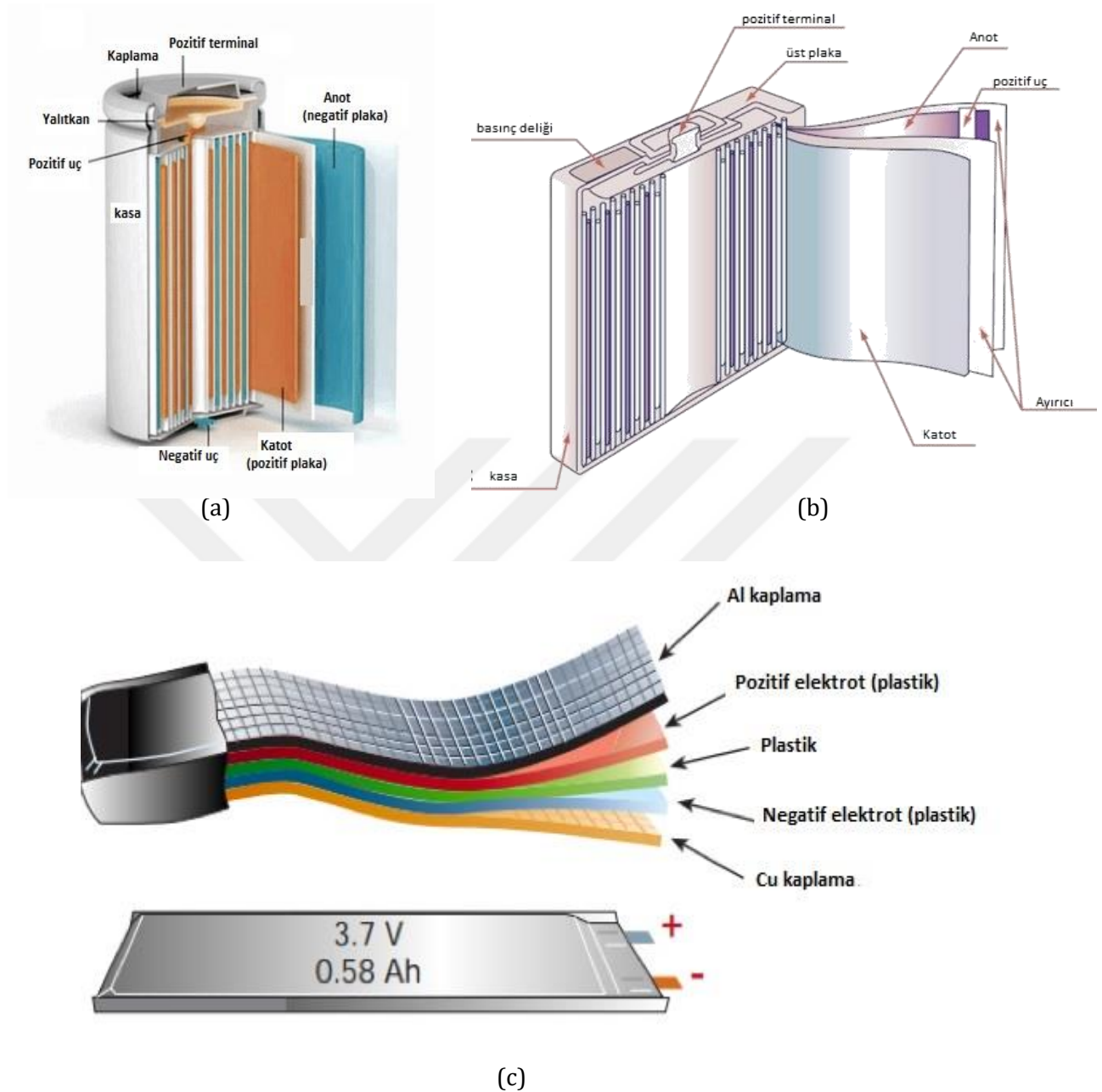
ÖZELLİKLER	PB-ACID	NIMH	NICD	ZEBRA	LI-ION
Nominal Voltaj (V)	2	1.2	1.2	2.58	3.6
Özgül Enerji (Wh/Kg)	30-45	30-80	45-80	90-100	90-220
Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	60-75	140-300	150	160	280-400
ÖZGÜL GÜÇ (Wh/Kg)	180	250-1000	200	150	600-3400
Çevrim Ömrü	500-800	500-1000	500-1000	1000	1000-8000
Kendi Kendine Deşarj	%2-4/ay	%20-30/ay	%25-30/ay	%0/ay	%2-5/ay
Sıcaklık Aralığı (C)	-20,+60	-20,+60	-20,+50	270,350	-20,+60
Maliyet	Düşük	Orta	Düşük	Düşük	Yüksek
Hafıza Etkisi	Yok	Var	Var	Yok	Yok

Şekil 3.5., belirli gravimetrik güç ve bataryaların enerji yoğunluğuna genel bir bakış sunmaktadır. Teorik gravimetrik enerji yoğunluğu, ana elektrokimyasal reaksiyondan hesaplanabilir. Hücre seviyesinin gerçekçi değeri genellikle teorik değerın % 25-50'sidir. Lityum-iyon batarya, daha yüksek enerji yoğunluğu (70-170 Wh / kg), güç yetenekleri, düşük standart redüksiyon gerilimi ($E_0 = -3.04V$) ve düşük atomik kütle nedeniyle diğer bataryalardan daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 3. 5. Lityum iyon bataryalar ile diğer bataryaların karşılaştırılması [49].

3.2.1. Lityum İyon Bataryalar



Şekil 3.6 . (a) silindirik hücrenin, (b) prizmatik hücrenin ve (c) zarf tipi hücrenin iç yapıları [50].

Enerji ve güç yoğunlukları, depolama ve çevrim ömrü, güvenlik özellikleri vb. gibi Li-ion batarya performansı sadece malzemelerinin özelliklerine bağlı değildir, aynı zamanda hücre tasarımı tarafından da belirlenir. Çeşitli Li- ion batarya konfigürasyonlarının şekilleri ve bileşenleri Şekil 3.6.' da özetlenmiştir.

Silindirik hücre ambalajı olarak dış paslanmaz çelik bir teneke kutuya sahiptir ve günümüzde kullanılan en yaygın lityum-iyon hücre ambalajıdır. Bu hücre tasarımının üretilmesi daha kolaydır ve sızdırmaz bir teneke kutu dış kısmı ile yüksek iç basınçlara dayanma kabiliyetine

sahiptir. Silindirik hücre paketi ayrıca aşırı şarj altında basıncı serbest bırakmak için tekrar kapatılabilir bir havalandırma deliği ile donatılmıştır. Silindirik hücrelerin tipik uygulamaları arasında kablosuz iletişim, biyomedikal aletler, elektrikli aletler ve ultra kompakt boyut gerektirmeyen uygulamalar bulunur. 18650 hücre adı verilen standart silindirik (W: 18 mm, L: 65 mm) en yaygın kullanılanlardır [51].

Prizmatik hücreler ilk olarak 1990' ların başında tanıtılmıştır. Elektrotlar, katman istifleme veya jöle haddeleme yaklaşımları ile birleştirilebilir. Birleştirilen hücre daha sonra stabilite için bir metal veya sert plastik mahfaza ile kaplanır. Prizmatik bir hücrenin kapasitesi, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar vb. için birkaç amper saatten elektrikli araçlar için yüz amper saate kadar değişmektedir. Prizmatik hücre alan kullanımını artırır ve esnek tasarıma izin verir, ancak üretim için daha pahalı olabilir.

Zarf tipi hücreler ilk kez 1995 yılında piyasaya sürüldüğünde, pil dünyasını radikal bir yeni tasarım yaklaşımıyla şaşırtmıştır. Metalik bir mahfaza ve camdan metale elektrik geçişi kullanmak yerine, iletken folyo tırnakları elektrotlara kaynaklandı ve getirilmiştir. Bu nedenle, zarf tipi hücre, batarya tasarımına basit, esnek ve hafif bir çözüm sunar. Ayrıca, kese hücresi alandan en verimli şekilde yararlanır ve batarya paketleri arasında en yüksek olan % 90-95 oranında ambalaj verimi sağlar. Metal mahfazanın ortadan kaldırılması, toplam hücre ağırlığını azaltır, ancak şişme için ilave destek ve izin verilmelidir. Farklı tipteki batarya hücrelerinin yapısal özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 3.2.' de gösterilmiştir.

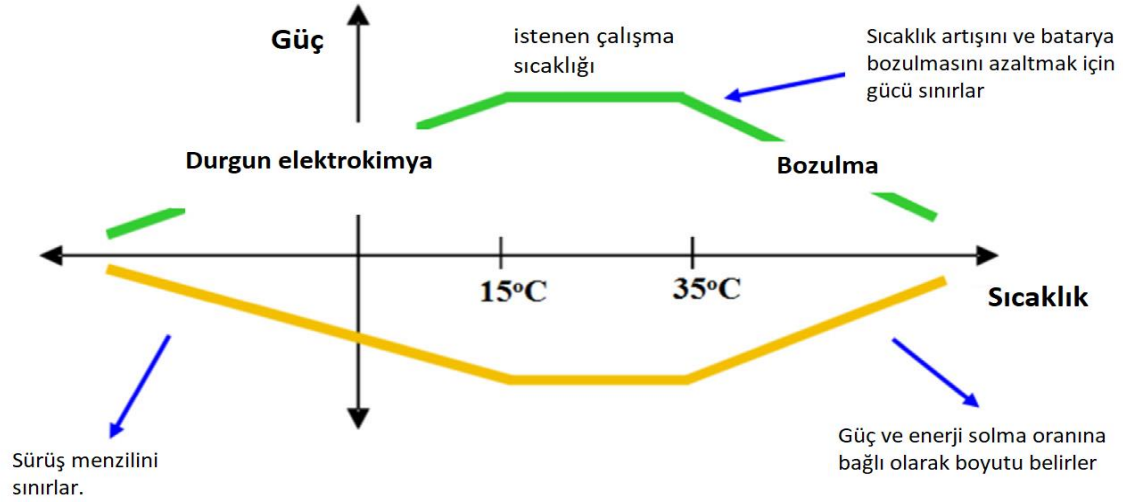
Tablo 3. 2. Farklı tipteki batarya hücrelerinin yapısal özelliklerinin karşılaştırılması [49].

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

3.3. Lityum İyon Bataryalarda Sıcaklığın Olumsuz Etkileri

Li-ion bataryalar ile ilgili iki temel sıcaklık endişesi vardır:

- 1: Çalışma sıcaklığı kabul edilebilir kapsamı aşması;
- 2: Düşük sıcaklıktaki tekdüzelik pil süresinin ömrünü kısaltan lokal bir bozulmaya neden olmasıdır.



Şekil 3. 7. Lityum iyon bataryaların optimum çalışma aralığı [52].

Optimum performans elde etmek için Li-ion bataryanın çalışma sıcaklığı Şekil 3.7.' de gösterildiği gibi dar bir aralıkta (15 °C - 35 ° C) tutulmalıdır. Bu ölçeğin dışındaki sıcaklıklarda çalışırken, Li- ion bataryaların performansı, ömrü ve güvenliği bozulacaktır. Bununla birlikte, pratik uygulamalarda kötü çevre koşulları (yani yükseltilmiş veya son derece soğuk sıcaklıklar) kaçınılmazdır. Bu olumsuz koşullar altında, batarya uygun olmayan çalışma veya saklama sıcaklığına bağlı olarak performansını önemli derecede kötüleştirecektir. Bataryanın aşırı ısınması bazı koşullar altında tetiklenebilir. Bu bölümde, BIYS' lerin önemini vurgulamak için uygun olmayan sıcaklıkların Li- ion bataryalar üzerindeki olumsuz etkileri kısaca özetlenmektedir.

3.3.1 Performans Düşmesi (Performance Degradation)

Buradaki Li- ion bataryaların performans düşüşü, yüksek sıcaklıklarda kapasite zayıflaması ve güç kaybına işaret etmektedir. Çeşitli elektrot malzemelerinin ve elektrolit kompozitlerinin yoğun kombinasyonlarını göz önüne alındığında, bu elektrokimyasal pillerin performans düşüş mekanizmalarını anlamak kolay değildir. Bununla birlikte, kapasitenin zayıflaması, genel olarak, pilin içindeki lityum kaybına ve aktif maddenin azalmasına [53], artan sıcaklığa bağlı olarak artan hücre iç direncine bağlanır.

Batarya performans bozulması, pilin çalıştırılıp çalıştırılmadığına bağlı olarak çevrim performans kaybı ve ömür kaybı olarak da sınıflandırılabilir [54]. Çevrim performans kaybı, pil devri olduğunda oluşur (yani şarj / deşarj olduğunda). Ramadass ve ark.LiCoO₂ pozitif elektrot ve karbon negatif elektrot ile Sony 18650 hücrelerinin kapasite düşüşünü, 2.0 - 4.2 V' luk hücre voltajı aralığını kullanarak test etmiştir. Deneyler oda sıcaklığı, 45 ° C, 50 ° C Ve 55 ° C dahil olmak üzere farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında ve 45 ° C' de çevrilen hücreler, 500 döngüden sonra sırasıyla % 22.5 ve % 26.46 kapasite azalması göstermiştir; bu değer, 55 ° C'de % 70.56'ya ulaşmıştır [55]. Shim ve ark.'nın çalışmasında, 25 ° C ve 60 ° C sıcaklık altında % 100 DOD' da (boşaltma derinliği) LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ / grafit lityum-iyon poşet hücrelerinin çevrim performansı deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar aynı zamanda yüksek sıcaklık nedeniyle kapasite kaybının önemli ölçüde arttığını göstermiştir [56].

Li-ion bataryalar kullanılmadan depolandığında kapasite / güç azalması ömür kaybı olarak adlandırılır. Wu ve ark. oda sıcaklığında 650 mAh olan bir Li-ion pil kapasitesinin, 60 gün boyunca 60 ° C' de depolandıktan sonra 20 mAh' ye düştüğünü bildirmiştir [57], Jiang ve Zhang [58] lityum-iyon bataryaların depolanması için gereksinimleri şöyle sıralamışlardır:

- a) Depolama ortamı iyi havalandırma ve istenen ortam sıcaklığı ile kuru ve temiz olmalıdır.
- (b) Güneş ışığına doğrudan maruz bırakılmamalıdır.
- (c) Pilin herhangi bir ısı kaynağına olan mesafesi en az 2 m olmalıdır.

Kaplama pozitif elektrot malzemeleri [59] ve uygun elektrolit kompozitler [60], yükseltilmiş sıcaklıktaki batarya performansını artırabilir, ancak olumsuz etkiler tamamen ortadan kaldırılamaz. Bu nedenle, pil sıcaklığını iyi kontrol edebilen bir BIYS çok önemlidir.

3.3.2. Isıl Kaçak (Thermal Runaway)

Isıl sürüklenme; ekzotermik reaksiyonlar indüklendiğinde sıcaklık onarılmaz bir duruma gelene kadar arttığında istenmeyen bir durumdur. Feng ve ark. prizmatik Li-ion bataryanın ısı sürüklenme davranışını araştırmışlardır. Onlar, ısı sürüklenme meydana geldiğinde, 25 Ah' lık bir bataryanın iç sıcaklığı 870 °C' ye kadar yükselebileceğini bulmuşlardır [61].

Li-ion bataryanın içindeki reaksiyonların oluşumu, batarya tasarımı, batarya kimyası ve şarj durumuna (SOC) göre değişir. Isı kaçığının potansiyel tehlikelerini azaltmak için emniyet delikleri (havalandırma), termal sigortalar, kendi kendine sıfırlama cihazları, kapatma ayırıcıları, kimyasal servisler, kaplamalar ve termal geciktirici elektrolitler ve elektrotlar gibi Li-ion bataryalarda çeşitli emniyet mekanizmaları kullanılır [62].

3.3.3. Sıcaklığın Düzensiz Dağılımı (Temperature Maldistribution)

Yeterli sürüş mesafesinin ve batarya tabanlı araçların hızlı ivmelendirilmesinin beklentileri, büyük ölçekli batarya paketlerinin geliştirilmesini gerektirir. Bununla birlikte, ısı, şarj / deşarj işlemi sırasında, elektrokimyasal reaksiyonlar ve iç dirençlerin bir sonucu olarak üretilir. Batarya sistemlerinin genişlemesi, özellikle hızlı şarj / deşarj senaryosunda, pakette kaçınılmaz olarak çok daha fazla ısı üretme getirir. Isı etkili bir şekilde dağılmazsa paketin içinde birikir. Ayrıca, bataryanın dış yüzeylerinde iç yüzeyine oranla taşınım ısı katsayısı daha yüksektir, böylece paket içindeki iç hücrelere göre daha iyi dağılım koşulları sağlar. Bu nedenle, ortadaki piller ile kenarların yakınındaki piller arasında büyük bir sıcaklık farkı vardır. Tek bir hücrenin performansı, sıcaklığının güçlü bir fonksiyonudur; bu da, hücreden hücreye büyük bir kapasite değişimi anlamına gelir. Dahası, Li-ion bataryalar aşırı şarja karşı düşük toleransa sahiptir. Hafif fazla şarj bile kapasitesinin kaybına neden olur ve aşırı yük nedeniyle oluşan lityum iyon bataryanın termal raydan çıkmasına neden olabilir [63]. Dolayısıyla, pil takımının toplam şarj kapasitesi, en kötü performansa sahip olan hücre ile sınırlandırılmıştır [64].

Hücreler arasındaki düzensiz sıcaklık dağılımının yanı sıra bir hücre içindeki sıcaklık dengesizliği de önemli bir endişe kaynağıdır. Elektrokimyasal reaksiyonların büyük bir kısmı elektrotlarda gerçekleştiğinden ısı üretme oranı, bir Li-ion hücresi içindeki farklı konumlarda aynı değildir. Bir LiCoO₂ pozitif elektrodun tüm pilin dört katı kadar ısı ürettiği bildirilmektedir [65]. Dolayısıyla sıcaklık artışı hücrenin içinde düzgün değildir. Bu, tüm hücrenin performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip yerel bozulmaya neden olur ve pilin bozulmasına neden olabilir.

Özetle, hem hücreden hücreye hem de hücrelerdeki sıcaklık eşitsizliği, batarya paketinin genel performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratacaktır. Bu nedenle, aşırı sıcaklık dağılımından kaçınılmalı ve batarya paketinin içindeki maksimum sıcaklık sapmasının genellikle 5 ° C'nin altında olması beklenmektedir [66].

3.3.4. Düşük Sıcaklık Performansı (Low Temperature Performance)

Yüksek sıcaklığın Li-ion pillerin performans düşüşüne yol açtığı daha önce belirtilmiştir. Birçok çalışma düşük sıcaklıkta hücre performansının da zayıf olduğunu ima etmiştir. Sıcaklık düşük olduğunda, özellikle de -20 ° C'nin altında, pilin hem enerjisi hem de gücü belirgin şekilde azalır [67,68].

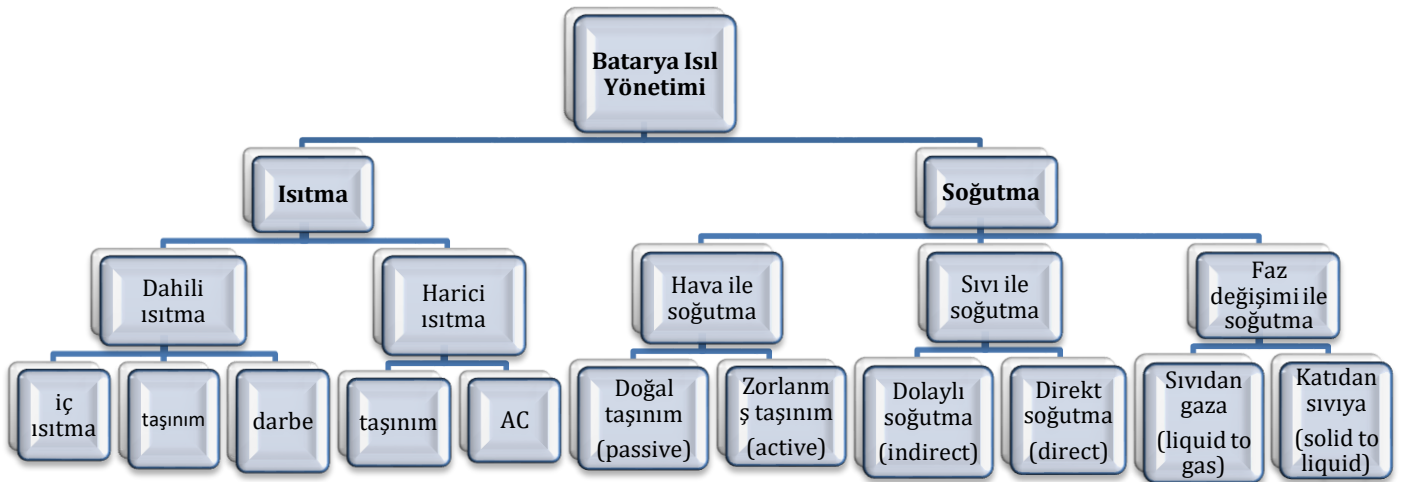
Örneğin, Nagasubramanian farklı sıcaklıklarda 18.650 Li-ion pillerin özelliklerini 25 ° C'de ve -40 ° C'de karşılaştırmıştır [63]. Sonuçlar, Panasonic hücrelerinin -40 ° C'deki güç ve enerji yoğunluklarının % 1.25, 25 ° C' % 5'e düştüğünü göstermiştir. Düşük sıcaklıkta kötü

performans ile ilgili kesin mekanizmalar hala tartışılmakta ve iyice incelenmektedir. Düşük sıcaklıklarda elektrolitin daha yavaş iyonik iletkenliğinin, Li-ion hücrelerinin performansını kötüleştirilen başlıca neden olduğu düşünülmektedir [69]. Bu nedenle, düşük donma noktaları ve yüksek iyonik iletkenlikleri olan elektrolit karışımlarının geliştirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmıştır [70]. Elektrolit karışımları, bazı durumlarda düşük sıcaklık performansını gerçekten iyileştirmiştir.

Soğuk ortamlarda (örneğin yüksek enlem bölgelerinde) yaşayan tüketicilerin talepleri ışığında düşük sıcaklıkta Li-ion pillerin kullanılmasını önlemek açıkçası pratik değildir. Düşük sıcaklık etkilerini hafifletmek için, piller kabul edilebilir bir performans elde etmek için ön ısıtma yapılabilir [71]. Yine de, batarya paketinin genel verimliliğini düşüren ek enerjiyi tüketir.

3.4. Batarya Isıl Yönetimi (Battery Thermal Management Systems)

Uygun olmayan sıcaklık, Li-ion bataryaların beklenmedik performans düşüşüne neden olur ve hatta ısınarak tükenmesine neden olabilir. Bu nedenle, batarya paketleri için BIYS gereklidir. Bir BIYS' nin birincil amacı, pilleri, hücre ve pakette eşit sıcaklık dağılımı ile, optimum çalışma sıcaklık aralığında tutmaktır. Bundan ayrı olarak, sistemin kompaktlığı, ağırlığı, maliyeti, karmaşıklığı ve güvenilirliği gibi pratik araç uygulamaları için bu faktörlerin düşünülmesi gerekir [71].



Şekil 3. 8. Batarya ısı yönetim sistemi.

3.4.1. Batarya Soğutma (Battery Cooling)

BIYS' de soğutma pasif (sadece ortam ortamı kullanılır) veya aktif olabilir (soğutma ortamı yerleşik cihazlar tarafından zorlanır). Isı giderme pozisyonuna göre, soğutma sistemleri iç veya dış sistemlere ayrılır. Günümüzde, çoğu soğutma sistemlerinde dıştan soğutma tekniği kullanılır, bu da ısının batarya yüzeyinden alındığı anlamına gelir. Bununla birlikte, hemen hemen tüm durumlarda, maksimum sıcaklık, batarya merkezi ve soğutma ortamı arasındaki termal direnç nedeniyle hücrenin iç kısmında bulunur. Konveksiyon hızını yükseltebilir, hücre içindeki sıcaklık farkını daha da artırabilir [72]. Mohammadian ve ark. Li-iyon hücrelerin elektrot alanına mikrokanallar gömmüşlerdir. Kanallarda akan sıvı elektrolit, akünün içinde oluşan ısının giderilmesi için soğutucu olarak kullanılmıştır [73]. Elektrotların yakınındaki ısı üretimi oranı diğer alanlardan daha yüksek olduğundan önerilen iç soğutma yönteminin dış soğutma yöntemi ile karşılaştırıldığında sıcaklık dağılımının daha iyi olduğu gözlenmiştir [74]. Ancak; iç soğutma tekniği uygulanmasının zor olması nedeniyle nadiren kullanılır.

İyi tasarlanmış bir batarya modülü, batarya sıcaklığını istenen aralıkta (örn. + 15 °C + 35 °C) sınırlayıp her bir hücre arasındaki sıcaklık farkını en aza indirebilmelidir. Bu iki görev ısı transferi arttırmayı gerektirir. Bununla birlikte, ısı transferi iyileştirmesi sıcaklık eşitsizlik problemini çözmek için her zaman en iyi seçim olmayabilir. Örneğin, aktif ısı transferi geliştirme teknikleri, hücreler tarafından sağlanan daha fazla parazit enerjinin tüketileceği anlamına gelir. Soğutma yapılandırma tasarımı, pasif bir optimizasyon tekniği olarak çok dikkat çekmiştir.

Dahası, batarya modülünün soğutma konfigürasyonunu tasarlamak için, soğutucu türü, boyut, geometri, hücrelerin termal özellik ve elektrokimyasal özellikleri gibi faktörleri kapsamlı bir şekilde düşünmelidir. Normal soğutma ortamı hava, sıvı ve faz değişim materyali (PCM) ve termofiziksel özellikleri Tablo 3.3.' de gösterilmektedir. Bir soğutma ortamı seçilmeden önce, bir dengeleme analizi yapılması önerilir. Farklı soğutma ortamlarına dayalı BIYS'leri, kullanım kolaylığı, uyarlanabilirlik, ısı transferi verimliliği, bakım, ömür, ilk maliyet ve yıllık maliyet vb. bakımından geniş çapta değişiklik gösterebilir. Prizmatik hücre, zarf hücresi ve silindirik hücre en popüler üç tiptir. EA' larda kullanılan hücrelerin farklı türde hücreler, farklı ambalaj yoğunluğuna, dolayısıyla farklı soğutma yapılandırmasına neden olacaktır. Örneğin, silindirin özel geometrisi nedeniyle, silindirik pil modülleri, prizmatik veya zarf tip (pouch type) modülüne kıyasla daha az kompakttır. Hücrenin boyutu, hücredeki sıcaklık dağılımını etkileyebilir. Boyut arttıkça, yüzey alanı / hacim oranı düşer ve bataryada daha fazla ısı tutulur ve böylece daha büyük sıcaklık gradyanına yol açar. Bununla birlikte, boyutu uygun bir şekilde arttırmak, daha yüksek enerji yoğunluğu sağlayabilir ve maliyeti düşürebilir.

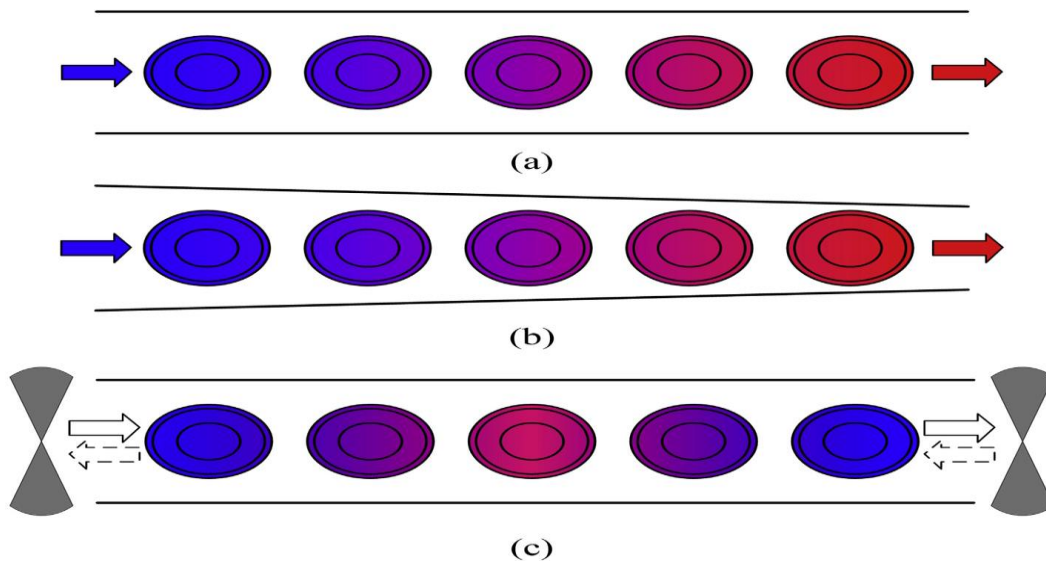
Tablo 3. 3. Soğutma sistemlerinin termofiziksel özellikleri [52].

Özellik	Hava	Mineral yağ	Silikon yağ	Su/glikol	Pcm
Hacim	1.225	924	920	1069	866
Özgül ısı kapasitesi	1006	1900	1370	3323	1980
Termal iletkenlik	0.0242	0.13	0.15	0.3892	16.6
Kinematik vizkozite	1.46×10^{-5}	5.60×10^{-5}	-	2.58×10^{-6}	-

Soğutma ortamı açısından, ısı yönetim sistemleri, hava soğutması, sıvı soğutma, faz değişimi (sıvıdan gaza) soğutma, faz değişimi (katıdan sıvıya) soğutmasına ve bunların kombinasyonuna sınıflandırılabilir.

3.4.1.1. Hava ile Soğutma (Air Cooling)

En geleneksel yaklaşım olarak, hava ile soğutma yoğun ilgi görmüş ve ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır. Örneğin, Honda Insight ve Toyota Prius HEA' lar, bataryaları soğutmak için indirgenmiş kabin havasını doğrudan batarya paketine üfler [75]. Hem doğal taşınım (yani pasif) ve zorlanmış taşınım (yani aktif), hava ile soğutma stratejileri olarak kullanılabilir. Genel olarak, doğal hava soğutmasının taşınım ısı transfer katsayısı, zorlamalı hava soğutmasından çok daha düşüktür. Böylece, doğal taşınım soğutması sadece düşük enerji yoğunluğu olan bataryalar için etkilidir [76]. Sade, hafif ve düşük maliyet avantajlarına rağmen az çalışılmıştır [77].



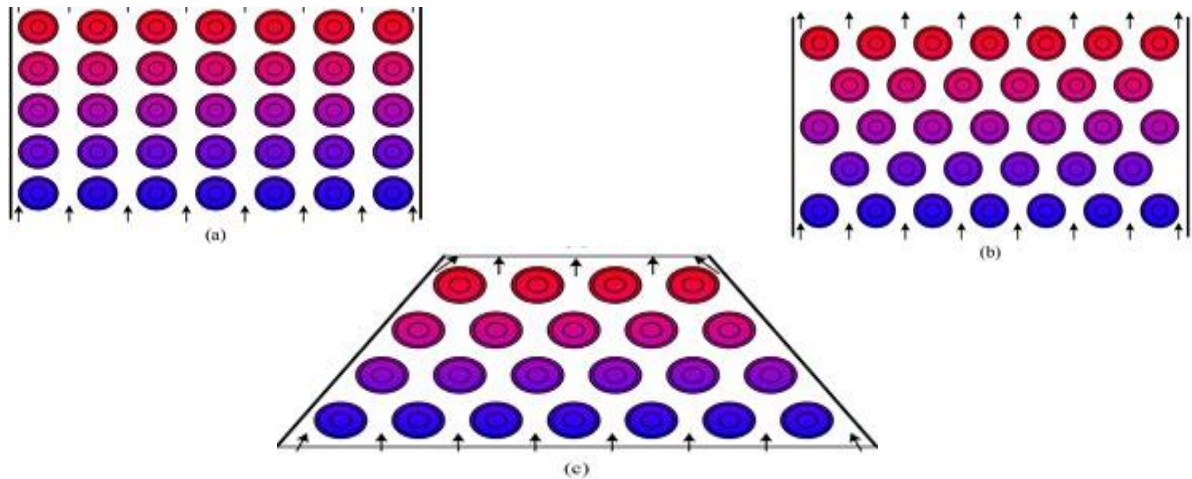
Şekil 3. 9. Seri soğutma konfigürasyonu a) basit kanal b) kama kanalı c) karşılıklı soğutma ile basit kanal [52].

Şekil 3.9. (a)' da gösterilen seri soğutma konfigürasyonu için, soğutucu bir dizi hücrenin üzerinden akarken ısı soğurması nedeniyle soğutucu sıcaklığı önemli ölçüde artabilir ve bu, çıkış yakınındaki hücre sıcaklığının açıkça ortaya çıkmasına neden olacaktır.

Şekil 3.9. (b)' de gösterilen optimize edilmiş bir soğutma konfigürasyonu ise kanal kesit alanı girişten çıkışa kademeli olarak daralmaktadır. Soğutma girişten çıkışa akarken, akış hızı kademeli olarak artar, bu da akış yolu boyunca artan yüzey ısı transferi katsayısı anlamına gelir.

Şekil 3.9. (a)' da gösterilen basit kanala kıyasla, aynı akış hızında, giriş yakınındaki hücre daha düşük yüzey ısı transfer katsayısına sahipken, çıkış yakınındaki hücre daha yüksek bir yüzey ısı transfer katsayısına sahiptir, böylece hücreler arasındaki maksimum sıcaklık farkı azalır. Bununla birlikte, kama kanalının soğutucuyu hızlandırmak için daha fazla parazitli güç tüketimini ödemesi gerekmektedir.

Şekil 3.9. (c)' de gösterilen bir başka soğutma konfigürasyonu [78] tasarımda, iki özdeş fanlar tünelin giriş ve çıkışına yerleştirilmiştir ve sırayla aktive edilerek devre dışı bırakarak karşılıklı akış üretilmiştir. Hücrelerin üst / alt yüzeyleri mahfazanın üst / alt duvarlarına monte edilmiştir, böylece sadece hücrelerin yan duvarları soğutulmuştur. Çalışmada her biri 2.5 Ah kapasiteli 26650 silindir hücresi kullanılmıştır ve karşılıklı soğutma akışı kombine kullanımıyla, parazit gücü % 84 azaltılmıştır. Ayrıca, kontrollü olmayan ve tek yönlü soğutma akışı olan Şekil 3.9 (a)' da gösterilen seri soğutma konfigürasyonuna kıyasla, hücreler arasındaki sıcaklık farkı $1.3^{\circ}C$ den $0.6^{\circ}C$ ye düşürülmüştür ve maksimum hücre sıcaklığı, $4.4^{\circ}C$ ile $4.9^{\circ}C$ arasında hafifçe artmıştır.



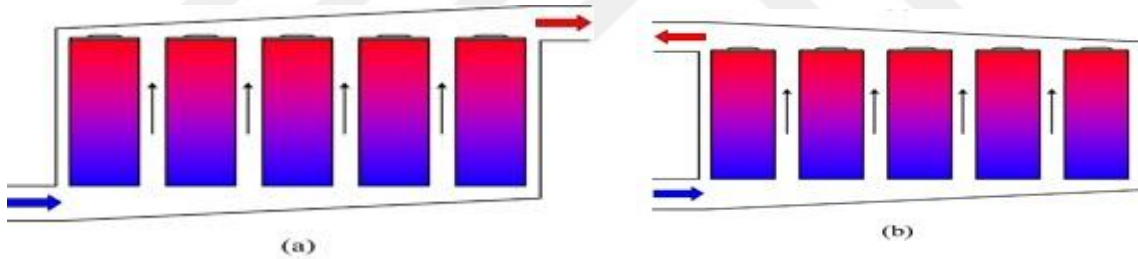
Şekil 3. 10. Seri-paralel konfigürasyonu a) hizalanmış b) sıralı c) yamuk konfigürasyon [52].

Şekil 3.10. (a)' da, seri soğutma konfigürasyonunun bir optimizasyonudur. 5S7P olarak yapılandırılan 35 hücre, 5 S' nin seri ve 7 P' deki her 5 hücrenin 7 paralel satır oluşturduğunu

gösterdiğini belirtir. Saf seri soğutma konfigürasyonuna kıyasla S-P karışık soğutma konfigürasyonunun üç avantajı vardır.

İlk olarak, bir EA' da normal olarak yüzlerce hücre yüklendiğinden, bir satırda çok fazla hücrenin yapılandırılmasını önler. İkinci olarak, soğutucu akış yolu büyük ölçüde kısaldığı için sıcaklıkta düzenli olmayan bir sorun giderilebilir. Üçüncüsü, basınç düşüşü, akış yolunun kısılması ve kanalın enine kesit alanının çarpılmasından dolayı büyük ölçüde azalır, bu da daha az parazitli güç tüketimi anlamına gelir.

Tüm soğutucuların özgül ısı kapasitesi sınırlı olduğundan, her türlü ısı eşanjöründe, özellikle yüksek ısı akışı veya büyük ısı transfer hızına sahip cihazlarda, soğutucu akışkanın sıcaklık artışından kaynaklanan ısı transferi bozulması kaçınılmazdır. Bu, batarya modülünde düzenli olmayan sıcaklık dağılımına yol açan temel nedendir. Şekil 3.10. (b) ve Şekil 3.10. (c) 'de gösterilen konfigürasyonlar ortak bir ısasal karakteristiğe işaret eder (spesifik olması için, yüzey ısı transfer katsayısı girişten çıkışa kadar arttırılır). Akış yolu boyunca ısı transferinin arttırılması, soğutucu akışkanın hücrelerden geçmesiyle birlikte soğutucu akışkanın sıcaklık artışına bağlı olarak ısı transferi bozulmasını telafi edebilir. İlk birkaç hücrenin termal direncini arttırmak veya son birkaç hücrenin sıcaklığını dağıtmak için sıcaklık dağılımını homojenize etmek gibi akış yolu boyunca yapay bir ısı transferi yapmak için başka yöntemler de vardır.



Şekil 3. 11. U / z-paralel konfigürasyonların şematığı a) z-paralel konfigürasyonu b) u paralel konfigürasyonu [52].

Yukarıdaki konfigürasyonlara ve analizlere dayanarak, Şekil 3.11.' de gösterilen saf paralel soğutma konfigürasyonları, batarya modülündeki sıcaklık farkını en aza indirmek için en iyi seçenek olabilir. Bu tür soğutma konfigürasyonu prizmatik batarya modülü için Toyota'nın Prius hibrid tarafından uygulanmıştır. Tipik olarak, toplam soğutucu önce dağıtıcıya akar, sonra eşit dallara bölünür, daha sonra soğutucu akışkan dallarının tümü hücreleri alttan üste doğru akar ve tekrar kollektörde birleşir [79].

Hava ile soğutma yönteminin maliyet, karmaşıklık, bakım ve ağırlık gibi birçok açıdan avantajları olmasına rağmen, havanın zayıf ısıl iletkenliği ve kötü koşullar (örneğin, yüksek ortam sıcaklığı ve / veya yüksek deşarj oranı) bu uygulamaların düzgün çalışmasını engeller. Bu durumda, uygulanacak sıvı ile soğutma gibi daha etkili soğutma stratejileri önerilir.

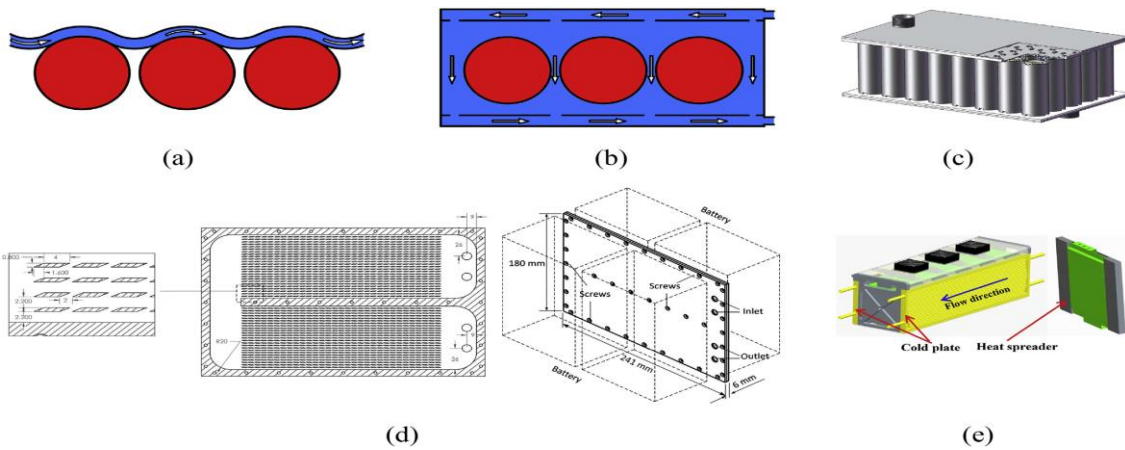
3.4.1.2. Sıvı ile Soğutma (Liquid Cooling)

Sıvı BIYS' leri doğrudan soğutma ve dolaylı soğutma olarak sınıflandırılabilir.

Direkt temas ile sıvı soğutma, söz konusu soğutucu maddenin, hücrenin yüzeyiyle temas halinde olduğu ve hücre kısa devresinden kaçınmak için bir dielektrik soğutucu (silikon bazlı veya mineral yağlar kullanılabilir) özelliğine sahip olduğu anlamına gelir. Akışkanlarla doğrudan temasın avantajı, yüksek ısı transfer katsayısı oranıdır. Bu akışkanların yüksek viskozitesi nedeniyle, pompalama için daha fazla enerji gereklidir, bu da daha yüksek bir toplam enerji tüketimine yol açar. Sıvı soğutma, havadan 1,5 ila 3 kat daha büyük bir ısı transfer katsayısını göstermektedir.

Dolaylı sıvı soğutma, soğutucunun farklı hücreler arasında veya bataryanın etrafındaki bir kap içinde borular ve kanallardan aktığı en çok kullanılan sistemdir. Bu gibi konfigürasyonlar, tüm hücrelerin sıvıyla soğutulmuş bir plakaya termal olarak bağlandığı yerlerde bulunur. Su / glikol; direkt temasta kullanılan yağlardan daha düşük viskoziteye ve daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir bu nedenle dolaylı sıvı soğutma sisteminde en çok kullanılan soğutma sıvılarıdır.

Genel olarak, dolaylı sıvı soğutma, tüp soğutma, mini / mikro kanallar (veya yüzgeçler) ile soğuk plaka soğutma ve ceket soğutması olarak daha da sınıflandırılabilir. Hücrelerin geometrisine göre, örn. silindirik hücreler veya prizmatik hücreler için farklı soğutucu konfigürasyonları büyük ölçüde değişebilir. Dolaylı sıvı soğutması için tipik soğutucular Şekil 3.12. 'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 12. Dolaylı sıvı soğutma için farklı ısı alıcıları silindirik hücreler için: (a) dalgalı tüp (b) soğutucu ceket (c) sıvı soğutmalı silindirik prizmatik hücreler için: (d) mini kanallı soğuk plaka (e) mini kanallı fin ve soğuk plaka kombinasyonu [52].

EA üreticisi Tesla, pil soğutması için Şekil 3.12. (a)' da gösterilen dalgalı tüpleri [80,81] kabul etmiştir. Hücrelerin boruyla kısmen temas etmesi ısı transferi açısından termal olarak etkili bir tasarım değil gibi görünmektedir. Ve aslında, bu bir dizi soğutma yapılandırmasıdır. Bununla birlikte, mekanik ve elektriksel değerlendirmeye dayalı olarak daha güvenlidir. Soğutma sıvısı ceket tasarımıyla karşılaştırıldığında, kaynak noktaları sayısı büyük ölçüde azaltılacaktır. Dahası, dağıtıcı ve boru arasındaki tüm sıvı bağlantıları, batarya modülünün muhafazasının dışında yapılabilir, böylece batarya modülünde olası kaçak noktaları ortadan kaldırılabilir. Buna ek olarak, batarya modülünün alanı ve ağırlığı azaltılabilir. Hücreler ile soğutma tüpü arasındaki ısı transferini arttırmak için, hücreler ve tüp arasındaki boşluk alanı doldurmak için termal olarak iletken ve yine de elektriksel izolasyon maddeleri düzenlenmelidir.

Şekil 3.12. (b)' de gösterilen şematik, soğutucu ceket kesit görünüşüdür. Soğutma sıvısı ceket, içi boş bir muhafaza, giriş, çıkış, ayırma duvarları, çok sayıda hücre açıklığı ve aynı sayıda hücre içerir. Sıvı soğutucu girişten içeri girer ve çıkıştan çıkar. Ayırma duvarları muhafaza içine entegre edilmiş ve muhafaza içerisinden akması için sıvı soğutucu akışkanı yönlendirmiştir. Aslında, hücre açıklıkları içi boş silindirlere ve hücrelere uyacak şekilde boyutlandırılmışlardır. Bu tasarım, Şekil 3.12. (a)' da gösterilen tasarımdan termal olarak daha etkilidir; çünkü her hücrenin tüm yan yüzeyi batarya modülünün muhafazası ile temas halindedir. Buna ek olarak, soğutucu ceket bir seri paralel soğutma konfigürasyonudur. Böylece, sıcaklık eşitliği geliştirilecektir.

Paralel soğutma konfigürasyonunun sıcaklık eşitliliğini iyileştirmek için en uygun bir konfigürasyon olduğu tartışılmıştır. Zhao ve ark. [82], Şekil 3.12. (c)' de gösterilen mini kanal sıvı soğutmalı silindir temelli yeni bir paralel soğutma konfigürasyonu önermiştir. Kanal miktarı, kütle akış hızı, akış yönü ve giriş büyüklüğünün ısı dağılımı performansı üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç, azami sıcaklığın 40 °C' de 5 C deşarj hızında kontrol edilebileceğini göstermiştir.

Şekil 3.12. (d)' de gösterilen mini kanallı soğuk plak, birkaç sıvı kanalı olan ince bir metal plak kullanarak Li- ion pilden ısıyı giderir. Levha yüzeyi düz olduğundan, prizmatik hücrenin alınması için uygundur ve Chevrolet Volt' un BIYS' inde başarıyla kullanılmıştır. Kanal biçimleri düz, serpantinli veya diğer kompleks biçimlerde [83].

Şekil 3.12. (e)' de gösterilen fin ve soğuk plakanın kombinasyonu, başka bir soğutucu çeşididir. Kanatçıklar hücreler arasına yerleştirilir ve kanatçık tabanları, entegre bir ısı emici oluşturmak için soğuk plakaya bağlanır. Metal yüzgeçler hücrelerden soğuk plakalara ısı dağılımını kolaylaştırır.

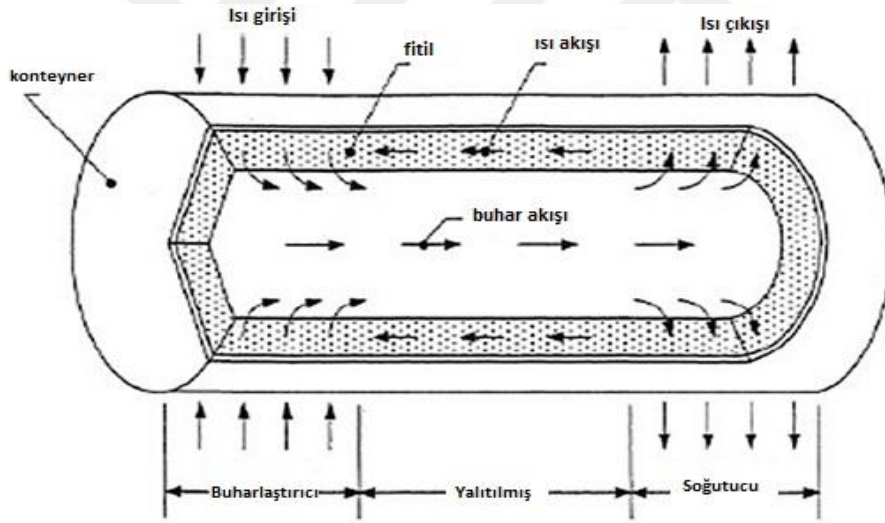
EA' ların büyük batarya paketlerinden dolayı sıvı soğutma sisteminin kullanılan BIYS için daha uygun olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, sıvı soğutma, batarya soğutması için daha etkilidir, ancak hava ile soğutmaya kıyasla yapısı karmaşıktır. Ayrıca, potansiyel soğutma sıvısı

problemi de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, sıvı ile soğutma, lityum iyon pillerin hızlı şarj ve kötü şartlar altında (yüksek ısı veya düşük sıcaklık) kullanımı için artan talepler ışığında ümit vericidir.

3.4.1.3. Faz Değişimi (Sıvıdan Gaz) Soğutma (Phase Change (liquid to gas) Cooling)

Aktif hava ve sıvı termal yönetim yöntemleri, üretilen ısıyı iletim yoluyla transfer eder. Soğutma sıvılarının sirkülasyonu, ekstra ağırlık ve alan tüketimine neden olan kanalların, vanaların, fanların veya pompaların kurulmasını gerektirir. Ayrıca, parazitik güç maliyetlerini de artırır, böylece soğutma verimliliği düşer. Bu nedenle, geçtiğimiz yıllarda, maddelerin faz değişim sürecinde gizli ısıyı kullanan pasif soğutma yöntemleri büyük ölçüde araştırılmaktadır.

Maddelerin üç aşamada var olduğu iyi bilinir: katı, sıvı ve gaz. Bir madde katı halden sıvı haline veya sıvı halden gaz haline dönüştürüldüğünde, büyük miktarda enerji emilir ve bunun tersi de geçerlidir. Burada, batarya içindeki ısıyı gidermek ve ısı yayılım kapasitesini arttırmak için ısı boruları kullanılabilir.



Şekil 3. 13. Kılcal ısı borusu [52].

Şekil 3.13.' de görülebileceği gibi, tipik bir kılcal ısı borusu iki bileşenden, yani çalışma sıvısından ve iç yüzeyde fitil yapı bir kaptan oluşur. Isı borularında benimsenen fitil yapıları katılaştırılmış metal tozu, elek, oluklu veya ağ tasarımı olabilir. Bir ısı borusu da buharlaştırıcı bölümü, yalıtılmış bölüm ve soğutucu bölümü olarak üç bölgeye ayrılabilir. Isı borusunda, ısı akışı öncelikle çalışma akışkanını buhar fazına buharlaştırmak için konteynerden buharlaştırıcıya taşınır. Daha sonra buhar, soğutulduğu yerdeki kondansatöre kendiliğinden geçer ve borudaki basınç farkından dolayı gizli ısıyı serbest bırakır. Buhar daha sonra tekrar kılcal kuvvetin etkisi

altında fitil yapısının içinden buharlaştırıcı bölümüne geri hareket eden sıvı duruma dönüştürülür.

Hafif, düşük maliyetli, bakım gerektirmeyen, esneklik ve özellikle yüksek ısı iletkenliği gibi ısı borusu soğutma sistemlerinin avantajları söz konusudur. Isı boruları elektronikte ,uzay aracında ,güneş enerjisi kollektörlerinde ve nükleer santrallerde yaygın olarak kullanılmaktadır [84].

Özetlemek gerekirse, faz değişikliğinin (sıvıdan gaza) soğutma bazlı BIYS'nin geliştirilmesi araştırmaya değer. Gizli ısının etkisine bağlı olarak, sıvı-buhar soğutması, tek fazlı sıvı konveksiyon soğutmasına kıyasla daha yüksek ısı dağılımı katsayıları elde edebilir. Kaynama ısı transferi yöntemi ümit vaat eden bir alternatiftir, ancak pratikliği daha da iyileştirilmelidir. Isı borusu bazlı BIYS'ler için olduğu gibi, geliştirme yönleri ısı transfer verimliliğini daha da iyileştirmek (örneğin çalışma akışkanına nano partikülleri eklemek) ve uygulamasını gerçek batarya paketlerine genişletmek olabilir. Ayrıca, etkili ve basit bir sayısal model geliştirilmesi de büyük önem taşımaktadır.

3.4.1.4. Faz Değişimi (Katıdan Sıvıya) Soğutma (Phase Change (solid to liquid) Cooling)

Sıvı-buharlı soğutma sisteminden ayrı olarak, katı halden sıvı haline faz değişim süreci de bir termal yönetim stratejisi olarak benimsenmiştir. Kaynama ve ısı borusu soğutması, birçok araştırmacı tarafından pasif sıvı termal yönetiminde sınıflandırıldığı için, katı-sıvı BIYS' leri normal olarak faz değişim materyali (PCM) soğutma yöntemi olarak adlandırılır. Kolaylık açısından, PCM, katı fazdan sıvı faza dönüştürülen malzemeleri temsil etmek için kullanılır.

Pasif bir soğutma yöntemi olarak, PCM termal yönetim sistemleri, basitlik, hafiflik, yüksek verimlilik ve üfleyci gibi ekstra bileşenlere ihtiyaç duyulmadan birçok özelliğe sahiptir. Sıvı-buhar sistemleri ile karşılaştırıldığında, katı-sıvı faz değişim sistemleri daha kompakt ve pratiktir, bu da araç uygulamalarında daha çekici hale getirir.

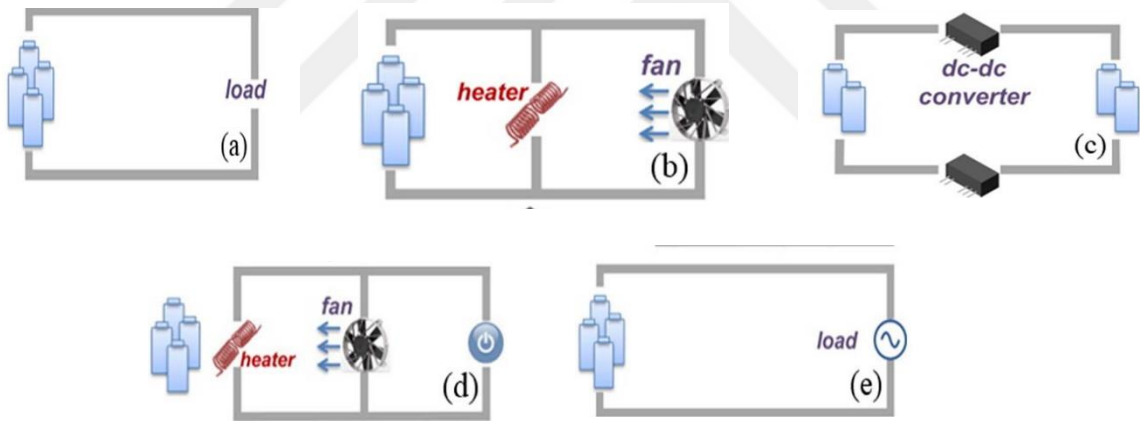
Batarya deşarjı sırasında PCM, bir ısı emici görevi görür. Tersine, PCM bekleme sırasında hücreleri ısıtmak için enerjiyi serbest bırakabilir. Ancak, sıcak yaz günlerinde veya birkaç sürekli şarj / deşarj döngüsünden sonra, PCM tamamen eriyebilir ve düşük ısıl iletkenliğe sahip bir ısı transfer bariyeri haline gelir. Bu nedenle, genel batarya termal yönetim çözümü, yüksek sıcaklıklardan kaçınmak için aktif soğutmaya veya bataryanın güç çıkışını (veya her ikisini de) sınırlamaya dayanmalıdır. Soğuk kış aylarında, PCM, PCM ile batarya modülünü ısıtmak için önemli miktarda elektrik enerjisi tüketimi anlamına gelen büyük termal ataleti ekler.

Özetle, PCM tabanlı BIYS' lerin ilerlemesi odak haline getirilmiş ve son birkaç yıl içinde kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. En büyük zorluk, termal iletkenliğini geliştirmek iken, gizli ısı geri kazanımı problemi olmuştur.

3.4.2. Batarya Isıtma (Battery Heating)

Batarya soğutması geçmiş yıllarda çok dikkat çekmesine rağmen, batarya ısıtma yöntemleri hakkındaki çalışmalar nadiren literatürlerde bulunabilir. Bunun sebebi, yıkıcı bir termal kaçığın aşırı sıcaklıktan kaynaklanabilmesi iken sıfırın altındaki sıcaklığın çoğu zaman yalnızca performans düşüşüne yol açabileceğidir. Bununla birlikte, daha önce anlatıldığı gibi, Li-ion batarya performansı, sıfırın altındaki sıcaklıklarda önemli ölçüde azalmıştır. Batarya bazı araçların özellikle saf EA' ların yaygınlaşmasıyla, araçların kapasitesi bataryaların güç performansına daha fazla bağımlıdır. Bu nedenle, soğuk ortamdaki zayıf batarya performansı sorununun ele alınması gerekmektedir. Başka bir deyişle, bataryalar, kullanılmadan önce verimli bir şekilde ısıtılmalıdır. Uygun ısıtma sisteminin seçiminde ana kriterler aşağıda sıralanmıştır:

- (a) Isıtma zamanı;
- (b) Isıtma için güç tüketimi;
- (c) Sistem, enerji gideri ve bakım masraflarını içeren toplam maliyet;
- (d) Isıtma sisteminin entegrasyonu nedeniyle ihtiyaç duyulan ekstra cihazlar, ağırlık ve alan gibi karmaşıklık ilaveleri.



Şekil 3. 14. Pil gücü kullanan akü ısıtma yöntemleri: (a) kendi kendine iç ısıtma (b) konvektif ısıtma (c) karşılıklı darbe ısıtma ve harici güç: (d) harici taşınım ile ısıtma ve (e) ac ısıtma [52].

Ji ve Wang [85], Şekil 3.14.' de gösterildiği gibi, enerji kaynaklarına göre farklı batarya ısıtma tekniklerini ayırt etmişlerdir. Dahili batarya gücü kullanan batarya ısıtma yaklaşımları, kendi kendine iç ısıtma, taşınım ile ısıtma ve karşılıklı darbe ile ısıtmayı içerir. Harici güç kaynağından yararlanan yöntemler harici konvektif ısıtma ve AC ısıtmadır. Daha öncede belirtildiği gibi, batarya iç direnci düşük sıcaklıklarda büyük ölçüde artmıştır. Bu nedenle, kendi kendine ısınmanın ısı üretimi daha yüksek olur. Batarya gücü ile konvektif ısıtma, bataryanın gücünü elektrikli ısıtıcıya ve fana iletir. Hava, fan tarafından havaya uçurulur ve daha sonra elektrikli ısıtıcı tarafından ısıtılarak, Şekil 3.14. (b)' de gösterildiği gibi, konvektif şekilde pili

ısıtmak için ısıtılır. Karşılıklı darbe ısıtma, bataryayı aynı kapasiteye sahip iki gruba ayırdı. Bir grup diğer grubu şarj etmek için güç sağlamak üzere deşarj olur. Şarj deşarj döngüleri, iki batarya grubunda dönüşümlü olarak gerçekleştirilir. Bu durumda, dahili ısıtmadan daha kısa ısıtma süresi ve daha yüksek enerji verimliliği ve iç konvektif ısınmaya göre daha homojen sıcaklık ve daha yüksek güvenilirlik elde edilir. Bununla birlikte, sistem karmaşıklığını ve maliyetini artıran özel kontrol sistemi ve devre gereklidir.

Isıtma gücü harici kaynaklardan temin edilebiliyorsa batarya gücünün tüketimi önlenir ve böylece sürüş menzili uzatılabilir. Harici konvektif ısıtma yalnızca Şekil 3.14. (d)' de gösterildiği gibi batarya gücünü kullanan konvektif ısıtma ile karşılaştırıldığında enerji kaynağını harici kaynağa değiştirir. Stuart ve Hande [86], Şekil 3.14. (e) 'de gösterilen alternatif akımı (AC) kullanan aküleri ısıtmaya ve 2004 yılında kurşun asit ve nikel metal hibrit bataryaları için fizibilitesini araştırmaya öncülük etmişlerdir.

Tablo 3.4.' de farklı soğutma sistemlerinin kalite karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3. 4. Farklı soğutma sistemlerinin karşılaştırılması [87].

Kriter	Hava	Ceket	Soğuk plaka	Isı borusu	FDM
Kullanım kolaylığı	Yüksek	Düşük	Orta	Orta	Yüksek
Bütünleşme	Kolay	Zor	Orta	Orta	Kolay
Enerji verimliliği	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Termal gradyan	Yüksek	Düşük	Orta	Orta	Yüksek
Soğutma seviyesi	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Bakım	Düşük	Yüksek	Orta	Orta	Düşük
Üretim maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta
Teknik risk	Düşük	Orta	Orta	Orta	Düşük
Gelişme durumu	Ticari	Prototip	Ticari	Prototip	Prototip

Hibrit elektrikli araçların teknik özellikleri ve ısı yönetim sistemleri Tablo 3.5.' te özetlenmiştir.

Tablo 3. 5. Hibrit elektrikli araçların teknik özellikleri ve ısı yönetim sistemleri [46].

Model	Batarya tipi	Enerji içeriği (kWh)	Elektrik motor gücü (kW)	Elektrik aralığı (km)	Saf elektrikte maksimum araç hızı [km / s]	Batarya ısı yönetim sistemi
Audi Q5 Hybrid	Li- ion (266 V/5 Ah)	1.3	40	3	100	Hava
BMW ActiveHybrid 3	Li- ion (317 V/2 Ah)	0.675	41	4	70	Hava
BMW ActiveHybrid 5	Li- ion (317 V/2 Ah)	0.675	40.5	4	60	Hava
BMW ActiveHybrid 7	Li- ion (120 V/6.6 Ah)	0.8	15	4	60	Sıvı
Nissan	Li- ion	1.4	50	Veri yok	80	Hava

Infiniti M35h	(346 V/3.7 Ah)						
Mercedes S400 Class Hybrid	Li- ion	0.8	20	Veri yok	Veri yok	Hava	

Yarı- şarjlı (Plug-in) elektrikli araçların teknik özellikleri ve ısı yönetim sistemleri Tablo 3.6.' da özetlenmiştir.

Tablo 3. 6. Plug-in elektrikli araçların teknik özellikleri ve ısı yönetim sistemleri [46].

Model	Batarya tipi	Enerji içeriği (kWh)	Elektrik motor gücü (kW)	Elektrik aralığı (km)	Saf elektrikte maksimum araç hızı [km / s]	Batarya ısı yönetim sistemi
Mercedes Vision S500 Plug-in HYBRID	Li- ion	10	85	33	140	Sıvı
Toyota Prius Plug-in	NiMH	4.4	60	22	100	Hava
Volvo V60 Plug-in Hybrid	Li- ion	11.2	51	49	112	Sıvı

Batarya paketli elektrikli araçların teknik özellikleri ve ısı yönetim sistemleri Tablo 3.7.' de özetlenmiştir.

Tablo 3. 7. Batarya paketli elektrikli araçların teknik özellikleri ve ısı yönetim sistemleri [46].

Model	Batarya tipi	Enerji içeriği (kWh)	Elektrik motor gücü (kW)	Elektrik aralığı (km)	Saf elektrikte maksimum araç hızı [km / s]	Batarya ısı yönetim sistemi
BMW i3	Li- ion	23	126	225	150	Hava
Chevrolet Spark EV 2014	Li- ion	21	110	130	193	Sıvı
Chevrolet Volt	Li- ion	16.5	110	60	160	Sıvı
Citroën C-Zero	Li- ion	16	47	150	130	Hava
Fiat 500e	Li- ion	24	83	140	115	Sıvı
Ford Focus EV	Li- ion	23	108	160	136	Sıvı

Honda FIT EV	Li- ion	20	92	130	70	Hava
Mini E	Li- ion	35	150	200	152	Hava
Nissan Leaf	Li- ion	24	80	175	93	Hava
Peugeot iOn	Li- ion	16	47	150	130	Hava
Renault Fluence Z.E.	Li- ion	22	70	160	135	Hava
Renault Kangoo Z.E.	Li- ion	22	44	160	135	Hava
Renault Zoe Z.E.	Li- ion	22	65	160	140	Hava
Toyota eQ	Li- ion	12	46	100	125	Sıvı
Volvo C30	Li- ion	21.5	40	150	130	Sıvı
Tesla Model s 70D	Li- ion	70		450		Sıvı

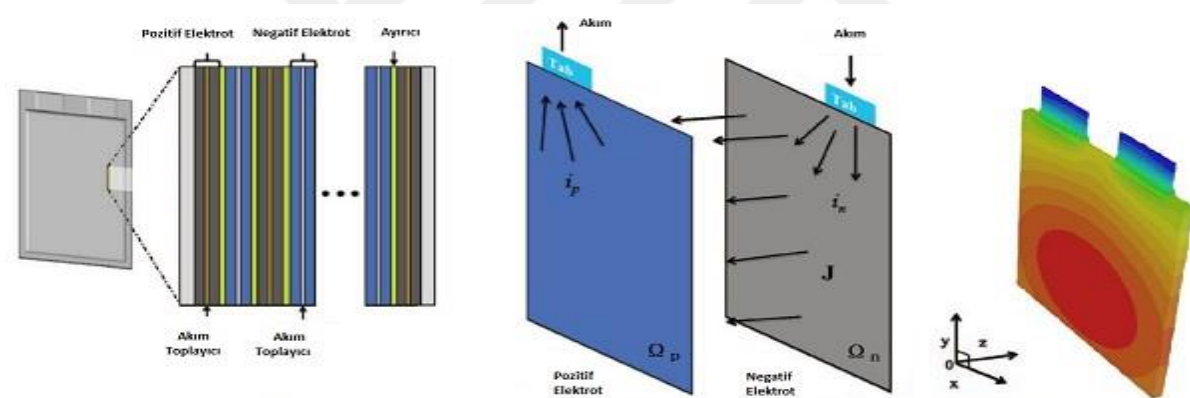
3.5. Materyal ve Simülasyon Çalışması

Bir lityum-iyon bataryada anot ve katot, metal folyoların yüzeyi üzerine kaplanmış aktif malzemelerden yapılmaktadır. Elektronların aralarından geçmesini önlemek için karşı kutup folyoları arasına bir polimer ayırıcı yerleştirilmektedir. Bir bataryadaki kimyasal, termal ve elektriksel işlemlerin gelişimini tahmin etmek için iki model kullanılır: 1) Tek Potansiyel Ampirik Batarya Modeli (*Single-Potential Empirical Battery Model*) 2) İkili Potansiyel Çok Ölçekli Çok Alanlı (MSMD) Batarya Modeli (*Dual-Potential Multi-Scale Multi-Domain (MSMD) Battery Model*). Tek Potansiyel Ampirik Akü Modeli, mevcut toplayıcı, elektrotlar ve ayırıcının geometrileri tam olarak çözülebiliyorsa faydalıdır. Bu model, tek bir pil hücresindeki elektrot ölçeği tahminleri için en uygundur. Bununla birlikte, model, batarya sistemlerinde, özellikle karmaşık geometrili sistemlerdeki tüm elektrokimyasal olayları inceleme sınırlı yeteneğine sahiptir. Tek bir pil hücresi için bile tüm katmanları açıkça çözmek çok pahalı olacaktır. Ayrıca, birçok endüstriyel uygulama, seri veya paralel bağlanmış çok sayıda hücreden oluşan bir pil takımı kullanır. (MSMD) Batarya modeli, çok ölçekli çok boyutlu bir yaklaşıma dayanan homojen bir model kullanarak bu sınırlamaları aşar. Bu yaklaşımda, bütün batarya ortotropik bir süreklilik olarak kabul edilir; bu nedenle, ağ artık pilin mikro yapısı tarafından sınırlandırılmamaktadır. Çeşitli analiz gereksinimlerine uyacak şekilde, modelde üç elektrokimyasal alt model bulunur, 1) Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) ampirik modeli, 2) Eşdeğer Devre modeli (ECM) ve 3) Newman's Pseudo 2D (P2D) modeli karmaşıklık düzeyi [88]. Modeller, çeşitli düzenlemelerdeki batarya sistemlerinde birçok uzunluk skalasına yayılan fiziksel ve elektrokimyasal olayları inceleme esnekliği sunar[88].

Bu çalışmada, NTGK modeli, hesaplama açısından ucuz olduğu ve en az sayıda model girişi gerektirdiği için seçildi [88]. Bunun, pil hücresi tedarikçisinden teknik bilgi elde etmenin zorluğu nedeniyle bir avantaj olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, NTGK modeli yarı deneyseldir ve

montaj parametrelerinin polinom katsayılarını belirlemek için batarya deşarj performans verilerini gerektirir.

Zarf tipi bataryanın iç yapısı, aynı şekil ve yapılarla ayrı ayrı yapılmış, çoklu pozitif ve negatif elektrot katmanları, ayırıcılar, pozitif ve negatif elektrot akım toplayıcıları ve katı-hal polimer elektrolit içermektedir. Batarya hücrenin dış tabakası alüminyum plastik kompozit film ile kaplanmıştır. Şekil 3.15. (a)' da gösterildiği gibi pozitif ve negatif elektrotların arasına gözenekli bir ayırıcı yerleştirilmiştir. Batarya hücrenin iç şekli 3D bir yapıya sahip olmasına rağmen, her bir elektrot çiftinin akımlarının boşalma akışı bir 2D sandviç yapı olarak ortaya çıkmaktadır. Tekrarlanan tam yapıya sahip elektriksel alanın matematiksel bir modelinin oluşturulması zaman alıcıdır, bu nedenle, bütün batarya hücresi, Şekil 3.15. (b)' de gösterildiği gibi, sadece bir çift pozitif ve negatif elektrottan oluşturularak basitleştirilmiştir [89]. Ayrıca, elektrik alan parametreleri, yük koruma denklemi ile elde edilmiştir. Son olarak, bir CFD (Computational Fluid Dynamics) (*Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği*) yöntemi kullanılarak, sıcaklık alanının 3D matematiksel modeli, Şekil 3.15. (c)' de gösterildiği gibi elektrik ve sıcaklık alanlarını birleştirerek elde edilmiştir.



Şekil 3. 15. Zarf tipi batarya hücrenin modelleme prosedürünün şematik diyagramı a) Batarya hücre düzeni b) 2D model c) 3D model [89].

3.5.1. NTGK Model

Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) modeli, Kwon tarafından önerilen basit bir empirik elektrokimyasal modeldir [90]. Model formülasyonunda, Denklem 1' deki hacimsel akım transfer hızı, aşağıdaki cebirsel denklem ile potansiyel alanla ilgilidir:

$$j_{Ech} = aY[U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \quad (1)$$

Burada, a : Elektrot levhasının spesifik alanını, φ_+ , φ_- pozitif ve negatif elektrotlar için faz potansiyellerini j_{ECh} hacimsel akımı temsil etmektedir. U ve Y ise bataryanın boşalma derinliğinin (DoD) fonksiyonlarını gösteren model parametreleridir:

$$DoD = \frac{Vol}{3600Q_{Ah}} \left(\int_0^t j dt \right) \quad (2)$$

Vol, akü hacmi ve Q_{Ah} akü toplam elektrik kapasitesidir.

Belirli bir batarya için, gerilim akımı tepki eğrisi deney yoluyla elde edilebilir ve daha sonra veriye uyan eğri ile belirlenebilir. Kwon [90] 'de önerilen fonksiyonlar için aşağıdaki formülasyonu benimsemiştir:

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DoD)^n \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (3)$$

$$U = \left(\sum_{n=0}^3 b_n (DoD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref})$$

Burada, C_1 ve C_2 NTGK modele özgü parametrelerdir. Elektrokimyasal reaksiyon ısı şu şekilde bulunur;

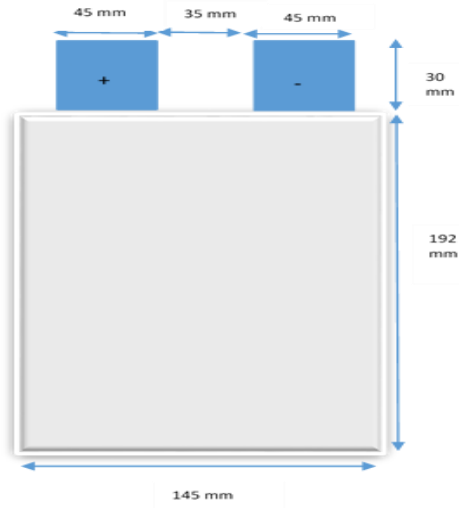
$$q_{ECh} = j_{ECh} \left[U - (\varphi_+ - \varphi_-) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (4)$$

Burada ilk terim aşırı gerilimden kaynaklanan ısı; ikinci terim ise entropik ısıdan kaynaklanan ısıdır.

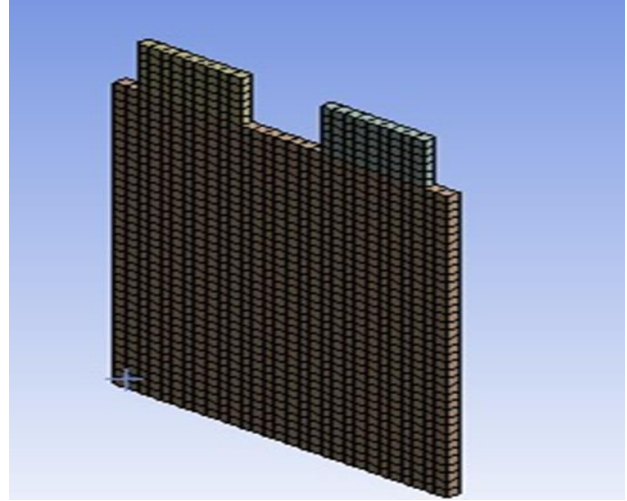
3.5.2. Model Parametreleri

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket yazılım programında 3D modellenen 14.6 Ah LiMn_2O_4 LIB boyutları ve bu 3D geometrinin ağ boyutunun 0.005 m olacak şekilde tasarlanan görüntüsü Şekil 3.16.' da gösterilmiştir.

Tablo 3.8.' de gösterilen NTGK modelinde kullanılan varsayılan parametreler [91]' de yer alan araştırmalardan alınmıştır. Parametreleri elde etmek için kullanılan deşarj eğrileri [92]' den elde edilir ve bir 3.7 V Lityum-iyon bataryanın tipik halidir. NTGK modelinin modellenmekte olan pil hücresinin kapasitesini ayarladığı göz önüne alındığında, varsayılan parametrelerin bu araştırma için yeterli olduğu görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 3. 16. a) 14.6 Ah LiMn₂O₄ LIB boyutları b) tasarlanan modelin ağ (mesh) görüntüsü.

Tablo 3. 8. MSMD Batarya Modülü Giriş Parametreleri [92].

MSMD batarya modül parametreleri		
Parametre	Değer	Birim
Elektriksel parametreler		
Nominal Hücre Kapasitesi	14.6	Ah
C-hızı	0.5,1,2,3,5	-
Min. durdurma gerilimi	3	V
Max durdurma gerilimi	4	V
NTGK model polarizasyon parametreleri		
İlk DoD	0	-
Kapasite referansı	14.6	Ah
a0,a1,a2,a3,a4,a5	U sabitleri: 4.12,-0.804,1.075,-1.177,0,0	
b0,b1,b2,b3,b4,b5	Y sabitleri: 1168.59, -8928, 52504.6, -136231, 158531.7, -67578.5	
C1,C2	Sıcaklık düzeltmeleri: 1800, -0.00095	
Hücre Malzemeleri		
Yoğunluk	2092	Kg/m ³
Özgül Isı (Cp)	678	J/kg-K
Termal iletkenlik	18.2	w/m-K
UDS-0	1.19e+06	Kg/m-s
UDS-1	9.83e+05	Kg/m-s
Elektriksel iletkenlik	3.541e+07	Siemens/m
Kutup malzemeleri		
Yoğunluk	8978	Kg/m ³
Özgül Isı (Cp)	381	J/kg-K
Termal iletkenlik	387.6	w/m-K
UDS-0	Model parametresi	Kg/m-s
Elektriksel iletkenlik	1e+07	Siemens/m

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

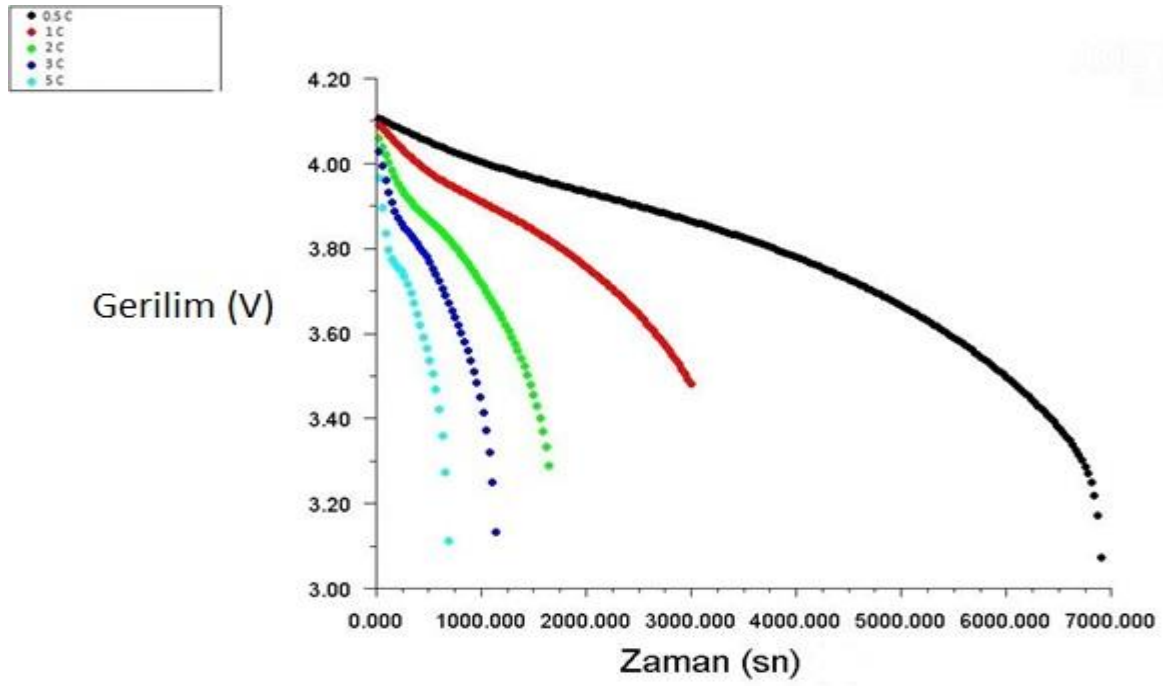
Simülasyonlar, bölüm 3.5.' de gösterilen matematiksel yöntemler ve parametreler kullanılarak sonlu elemanlar yöntemini içeren analiz programı ile elde edilmiştir. Bu çalışmada öncelikle zart tipi bir bataryanın farklı deşarj yükleri altındaki ısıl davranışları gözlemlenmiştir. Daha sonra bölüm 3.4.' de anlatılan BIYS' lerindeki soğutma yöntemlerinden olan hava, sıvı ve faz değişim materyalleri yöntemleri ile soğutulmuştur.

4.1. Lityum İyon Bataryaların Farklı Yükler Altındaki Isıl Davranışlarının İncelenmesi

Bu çalışmada, MSMD batarya elektriksel parametreler 14.6 Ah' lık LIB bataryanın verilerine uygun seçilmiştir. Burada minimum ve maksimum durdurma gerilimleri sırasıyla 3 V ve 4 V olarak gösterilmiştir. Bunun sebebi; bataryanın şarj veya deşarj esnasında potansiyel farkın bataryaya zarar vermemesini sağlamaktır. Sistemden deşarj esnasında 3 V' un altına düşmemesi, şarj esnasında 4 V' un üstüne çıkmaması kontrol altına alınmaktadır.

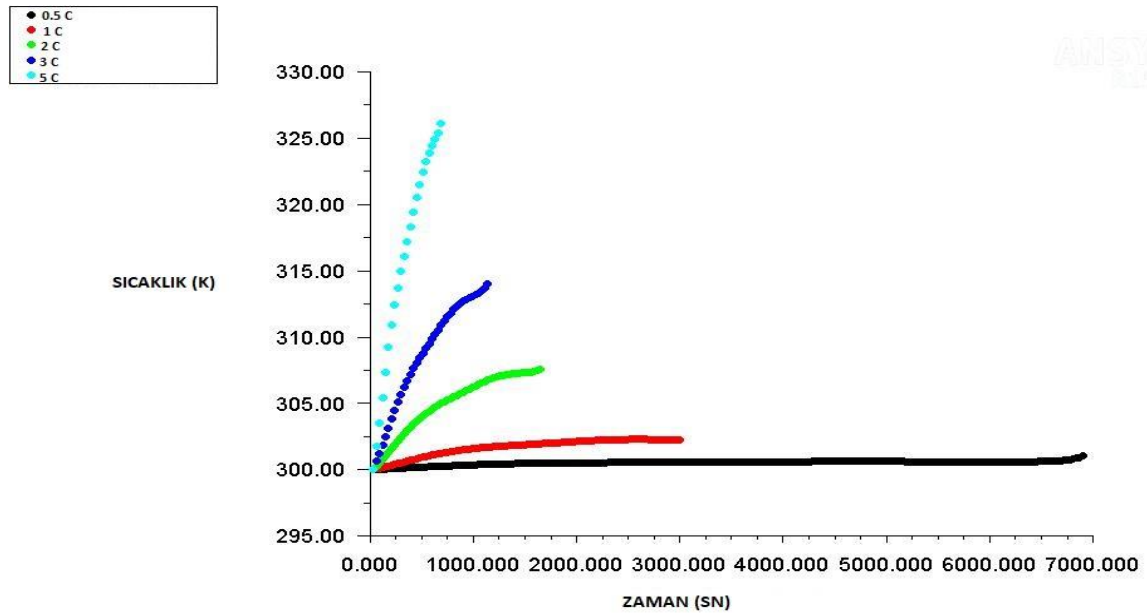
Deşarj hız parametreleri ise sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C olarak uygulanmıştır. NTGK model polarizasyon parametreleri, yazılım paketinin modele uygun varsayılan parametreleridir. Malzeme bilgileri hücre malzemesi ve kutup malzemesi olarak sisteme girilmiştir. Kutup malzemeleri pozitif ve negatif malzemeler için bazı çalışmalarda farklı seçilse de bu çalışmada büyük fark yaratmadığı için aynı seçilmiştir. Sınır şartları kutupların uç kısımlarındaki alan çok küçük olduğu için ısı kaybı olmadığı farz edilmiştir. Kutuplar ve hücre için sınır şartları ortam sıcaklığı 300 K ve ısı taşınım katsayısı (h) 5 w/m² K alınmıştır.

Şekil 4.1'de sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C 'de simülasyon sonucundan elde edilen deşarj eğrileri, Şekil 4.2' de deşarj esnasındaki bataryadaki sıcaklık artış eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.3.' te ise farklı deşarj oranlarında ısıl düzensizliği göstermek için farklı sıcaklık aralıklarındaki sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Farklı yükler altında akımların artışından dolayı etkilenen sabit sıcaklık aralığında sıcaklık dağılımları ve toplam ısı üretimleri ise EkA ve EkB' de gösterilmiştir.



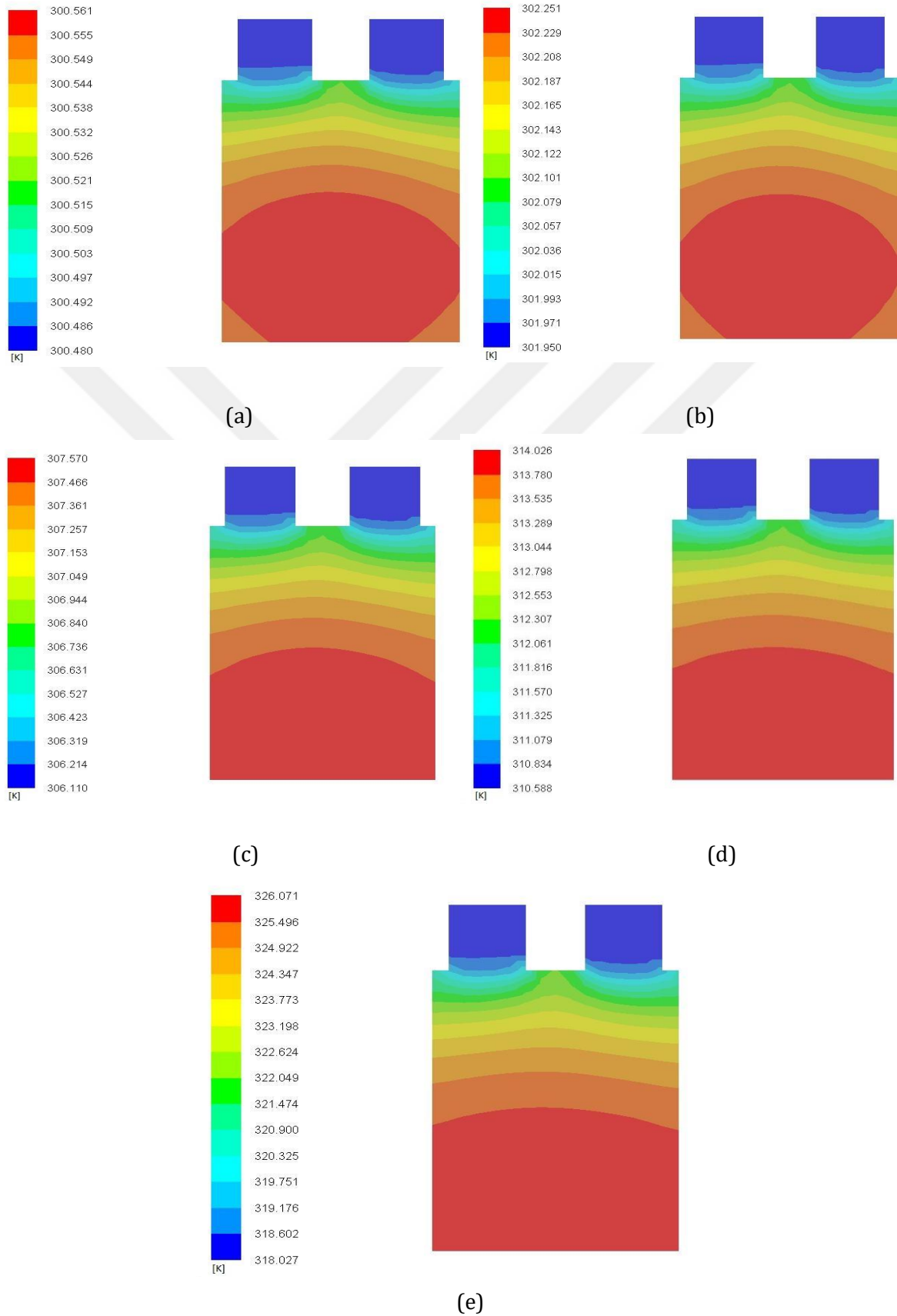
Şekil 4. 1. Farklı deşarj hızlarındaki deşarj eğrileri.

Şekil 4.1.' de sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C deşarj hızlarındaki deşarj eğimleri gösterilmiştir. Deşarj hızı arttıkça bataryadaki deşarj süresini kısalttığı görülmüştür.



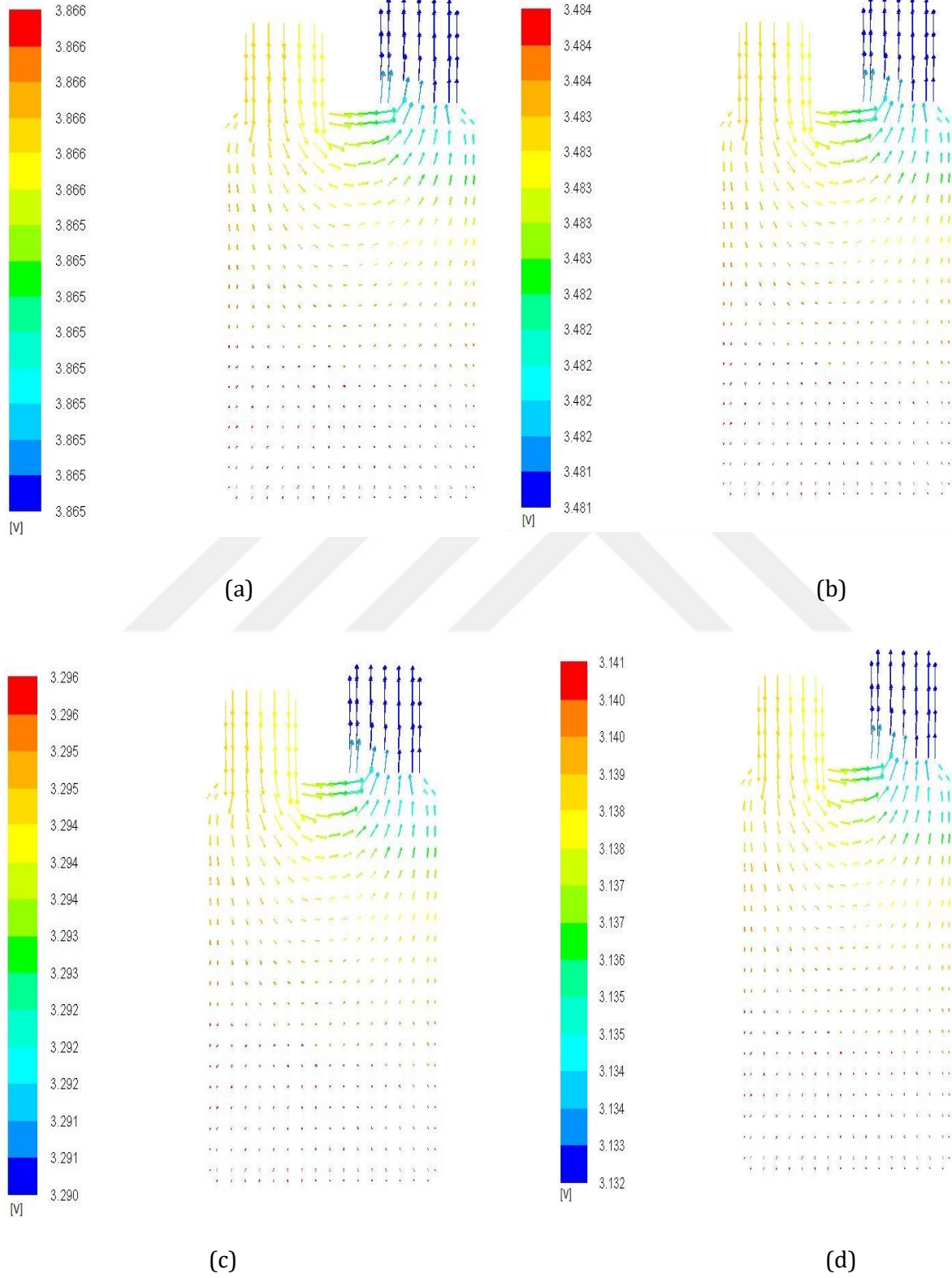
Şekil 4. 2. Farklı deşarj hızlarındaki sıcaklık artışı.

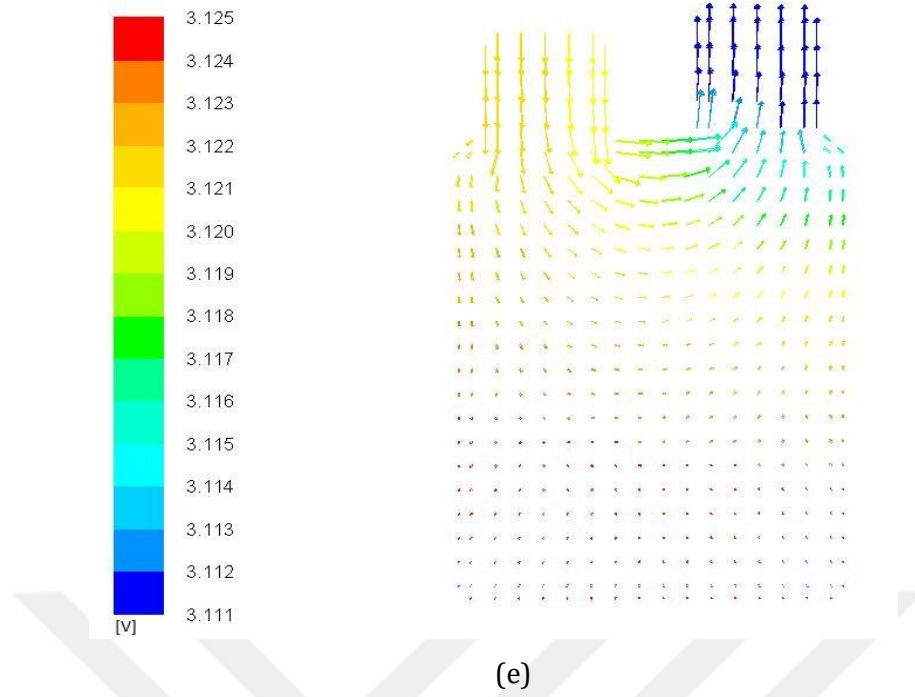
Şekil 4.2.' de sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C deşarj hızlarındaki sıcaklık artışı gösterilmiştir. Deşarj hızı arttıkça bataryadaki sıcaklığın arttığı görülmüştür.



Şekil 4. 3. a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj hızlarındaki sıcaklık dağılımları.

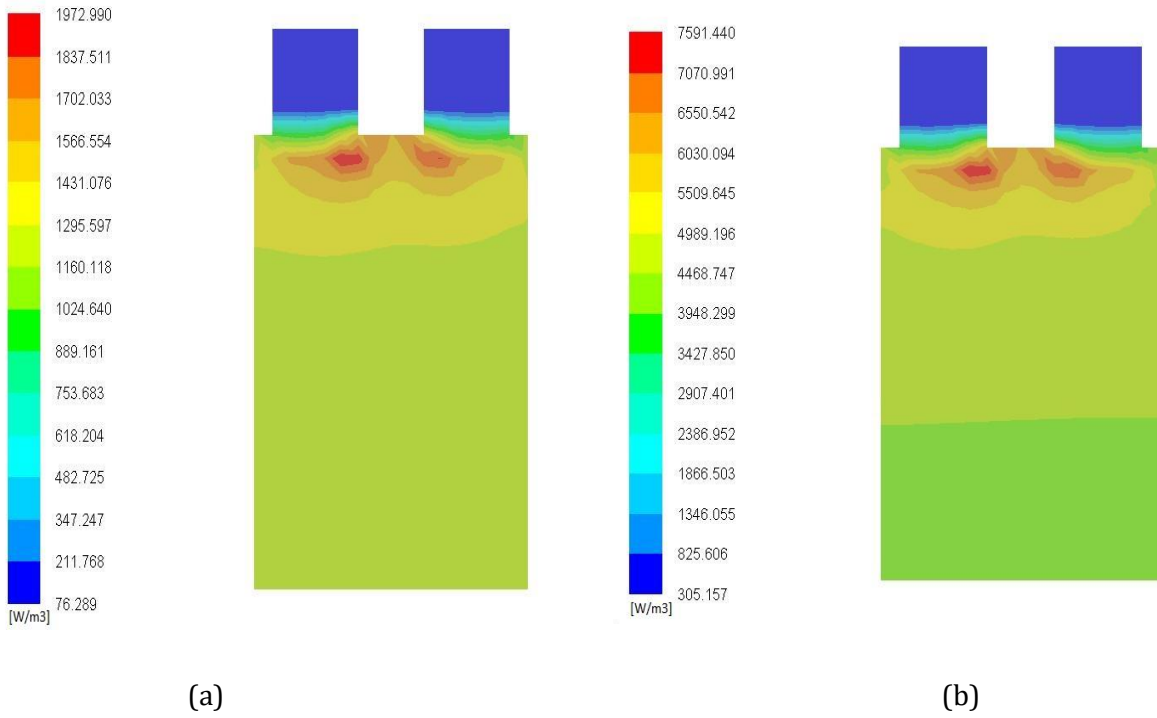
Şekil 4.3.' te sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C deşarj hızlarındaki sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Sıcaklığın deşarj hızına bağlı olarak giderek yükseldiği görülmüştür. Sıcaklık hücrenin merkezinde daha yüksek iken kutuplara doğru sıcaklık azalmıştır.

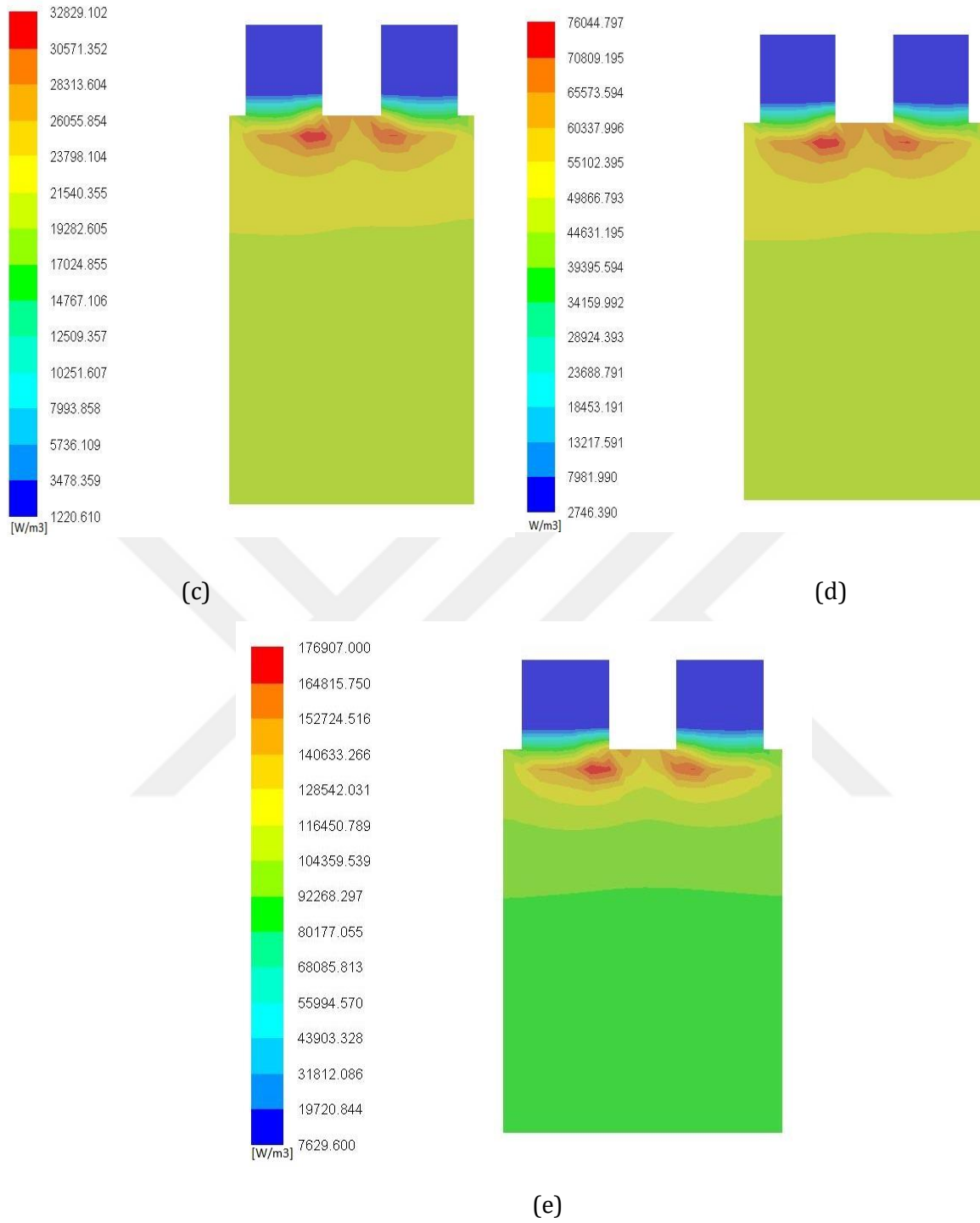




Şekil 4. 4. Deşarj esnasındaki a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj hızlarındaki akım akış grafiği.

Sırasıyla 0.5, C 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C deşarj hızlarındaki akım akış grafiği Şekil 4.4.' de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kutuplara doğru akım yoğunluğu artmıştır.





Şekil 4. 5. a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj hızlarındaki toplam ısı üretimi.

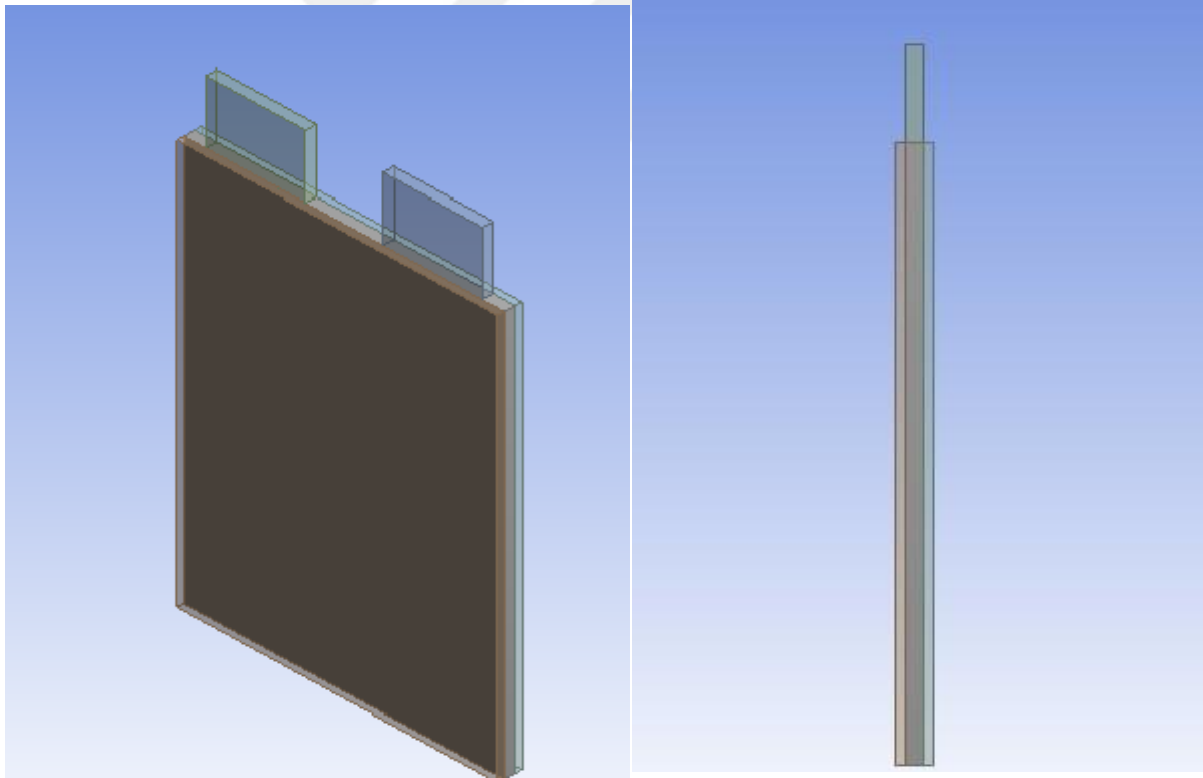
Şekil 4.5.' te sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C deşarj hızlarındaki toplam ısı üretimi gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi toplam ısı üretim kaynağının hücrenin altından hücrenin üst tabakasına doğru olduğu görülmüştür. Bunun sebebi şarj ve deşarj esnasında (Şekil 4.4.' te görüldüğü gibi) toplam akı yoğunluğunun hücrenin kutuplara doğru olan kısmında yoğunlaşmasıdır. Deşarj hız oranları arttıkça toplam ısı üretiminin arttığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada 14.6 Ah zarf tipi LIB' nın 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C deşarj hızlarındaki ısı davranışı analiz edilmiştir. Yüksek deşarj hızlarında deşarj süresi azaldıkça üretilen toplam ısı ve sıcaklığın arttığı görülmüştür. Bu sıcaklık hücrenin merkezinde daha yüksek iken kutuplara doğru azalmıştır. Sıcaklığın düzensiz dağılımı da hücrenin kapasite kaybını meydana getirdiğinden bu düzensizliği ortadan kaldıracak bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

4.2 Batarya Isıl Yönetim Sistemleri

4.2.1. Hava ile Soğutma

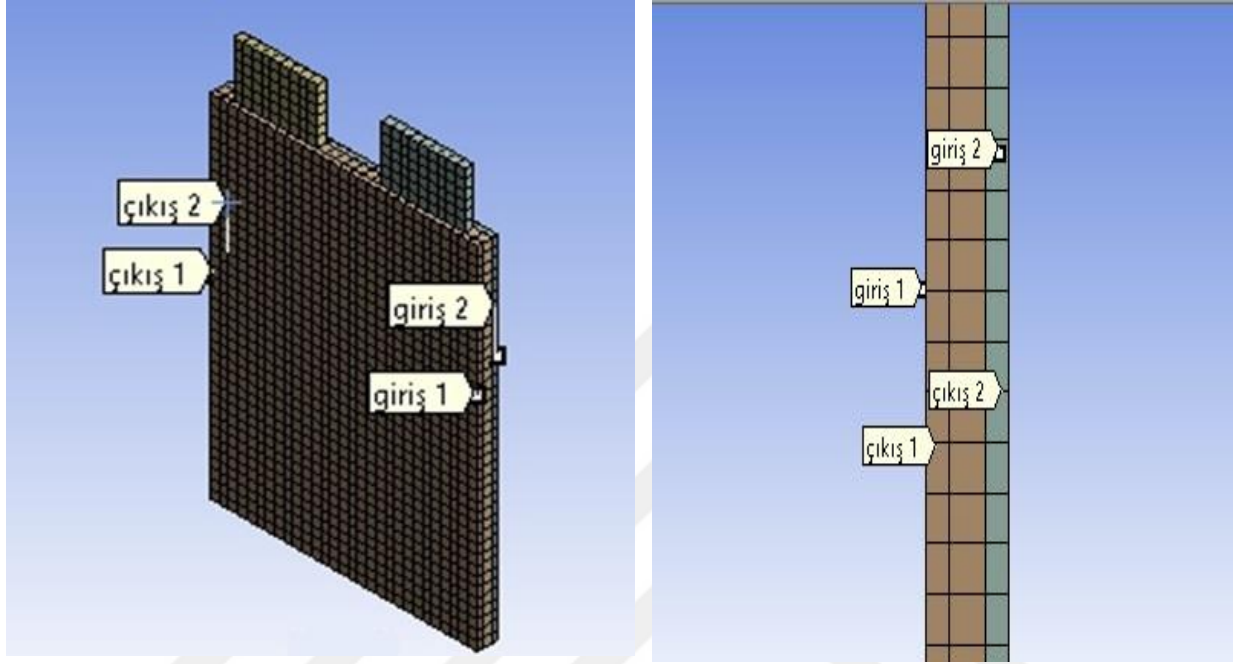
Batarya soğutma sistemlerindeki en geleneksel yöntem olan hava ile soğutma sistemi sonlu elemanlar yöntemini kullanan analiz programı ile tasarlanmıştır. Burada bataryanın her iki yüzeyini kapsayacak şekilde 3 mm boyutunda hava aralığı (air gap) oluşturulmuştur. Hava her iki taraf içinde tek yönlü uygulanmıştır. Şekil 4.6.' da oluşturulan hava aralığının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4. 6. Batarya soğutması için tasarlanan hava aralığının batarya ile görüntüsü.

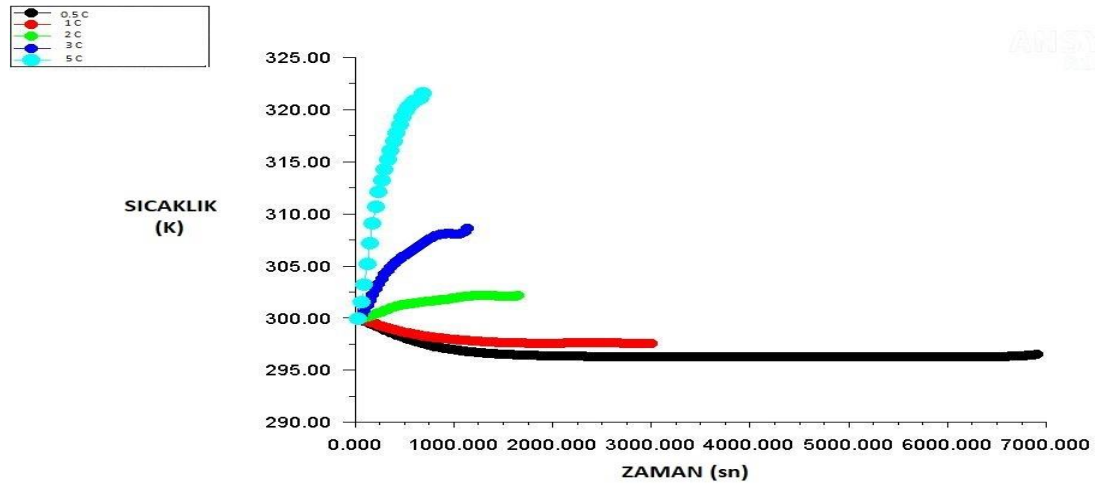
Mesh atma fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Buradaki amaç, modeli oluşturan bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Ne kadar sık mesh atılırsa o kadar gerçeğe yakın analiz elde edilir.

Bu çalışmada 5 mm boyutunda mesh atılmıştır. Şekil 4.7.' de hava akımının giriş ve çıkış yerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Hava aralığındaki giriş çıkış tanımlaması.

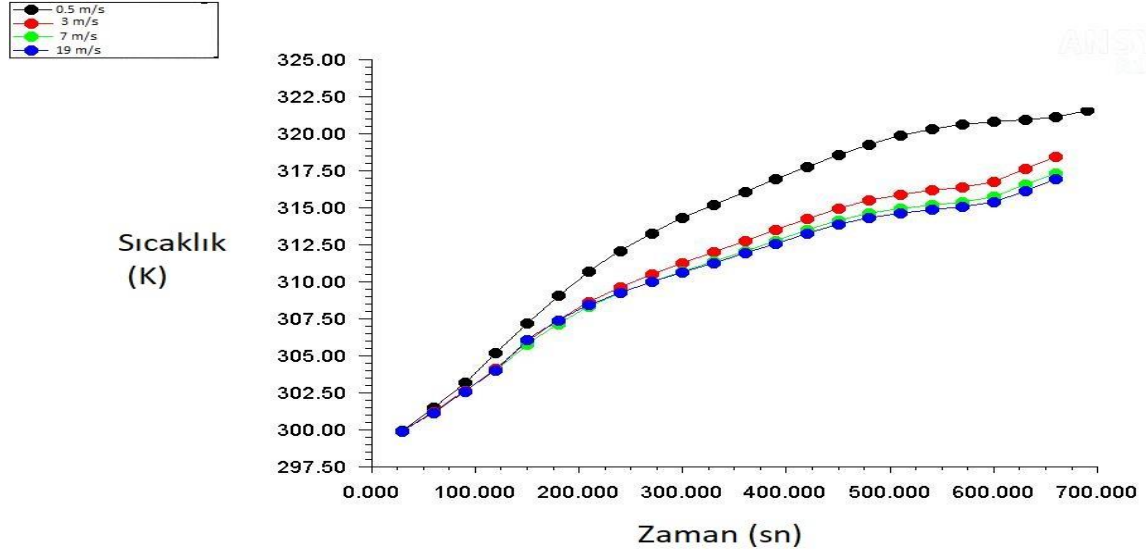
Elektriksel parametreler ve kutup malzeme bilgileri Tablo 3. 8.' de belirtilmiştir. Sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C deşarj hızlarında deşarj olurken batarya hava ile soğutulmuştur. 0.5 m/s, 3 m/s, 7 m/s ve 19 m/s giriş hızlarında 300 K sıcaklığında (ortam sıcaklığı) hava üflenmiştir. Şekil 4.8' de 0.5 m/s' deki hava hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4. 8. 0.5 m/s' deki hava hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği.

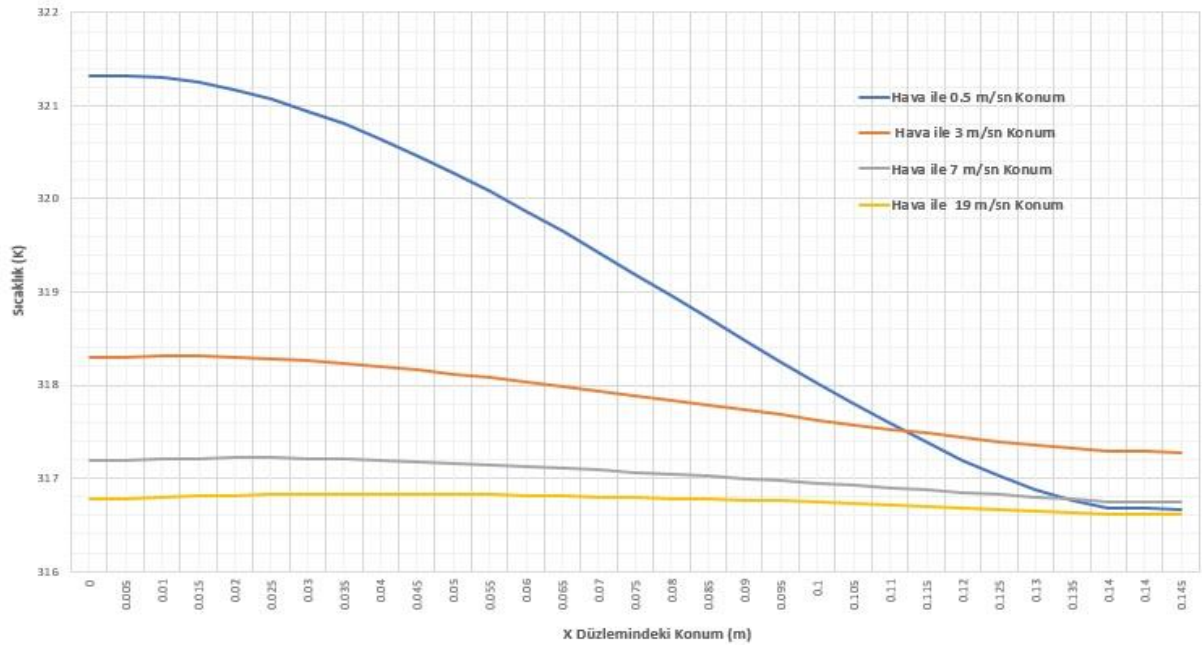
Şekil 4.8.'deki hava ile soğutulmuş grafik ile Şekil 4.3.'deki soğutmasız grafik karşılaştırıldığında yaklaşık 5 K sıcaklık düşüşü olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.9.'da farklı hızlardaki hava ile soğutmanın 5 C deşarj hızlarındaki karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4. 9. 5 C deşarj hızında farklı hızlarda hava soğutmasının karşılaştırılması.

0.5 m/s, 3 m/s, 7 m/s ve 19 m/s farklı giriş hava hızlarında 5 C deşarj hızlarında karşılaştırılması yapıldığında hızın arttıkça sıcaklığın azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi hızın arttıkça düzensiz sıcaklık dağılımının ortadan kalktığı gözlemlenmiştir.

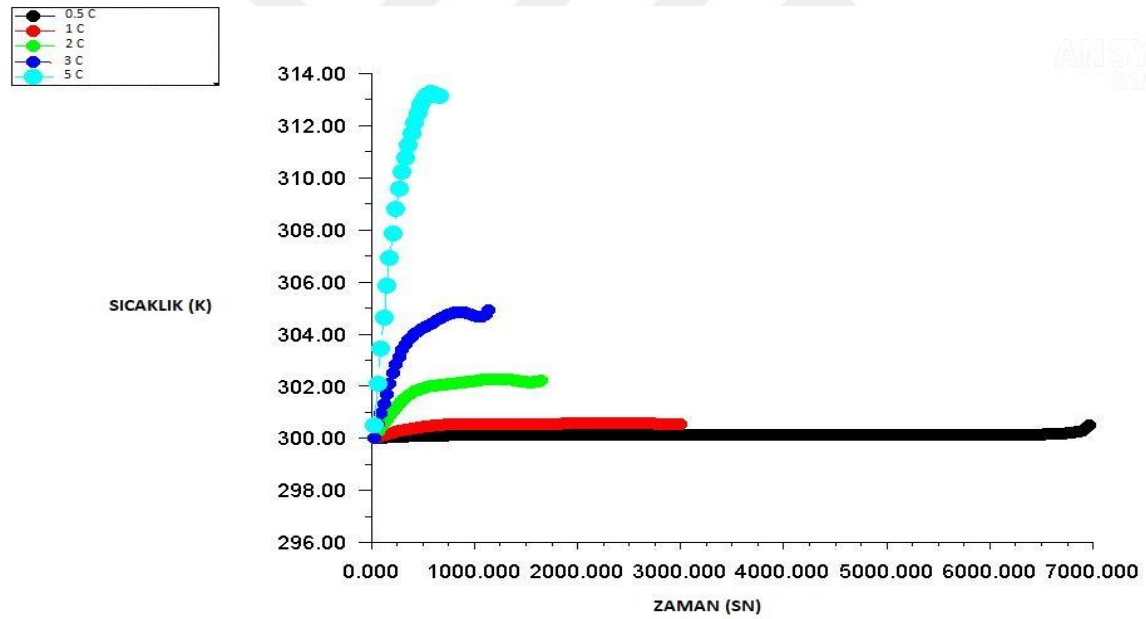


Şekil 4. 10. Farklı hava hızlarındaki batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.

Şekil 4. 10.' da batarya x düzlemindeki farklı konumlardaki sıcaklıklar ölçülmüştür. Alınan değerlere göre, havanın hızı arttıkça düzlem üzerindeki sıcaklıklar neredeyse eşitlenmiştir. Hava ile soğutma sistemi ile bataryada hem sıcaklık düşüşü hem de düzenli sıcaklık dağılımı sağlanmıştır.

4.2.2. Sıvı ile Soğutma

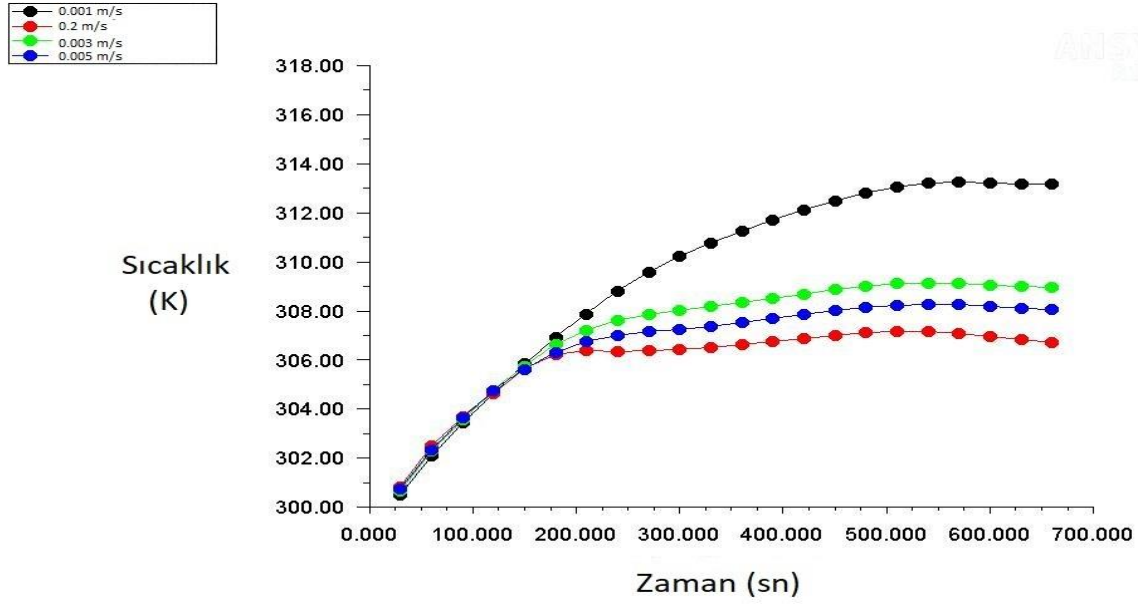
Ticari olarak oldukça yaygınlaşmış olan sıvı ile soğutma yönteminde hava ile soğutma yönteminde de Şekil 4. 6. ve Şekil 4. 7.' de gösterildiği üzere hava aralığı ve giriş çıkış tanımlaması kullanılmıştır. Sıvı ile soğutmada bataryayla herhangi bir kısa devre oluşturmaması için su/glikol yerine mineral yağ kullanılmıştır. Sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C deşarj hızlarında deşarj olurken batarya sıvı ile soğutulmuştur. 0.001 m/s, 0.003 m/s, 0.005 m/s, 0.2 m/s giriş (laminar) hızlarıyla 300 K sıcaklığında sıvı gönderilip bataryanın soğuması sağlanmıştır. Şekil 4.11.' de 0.001 m/s' deki hava hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4. 11. 0.001 m/s' deki sıvı hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği.

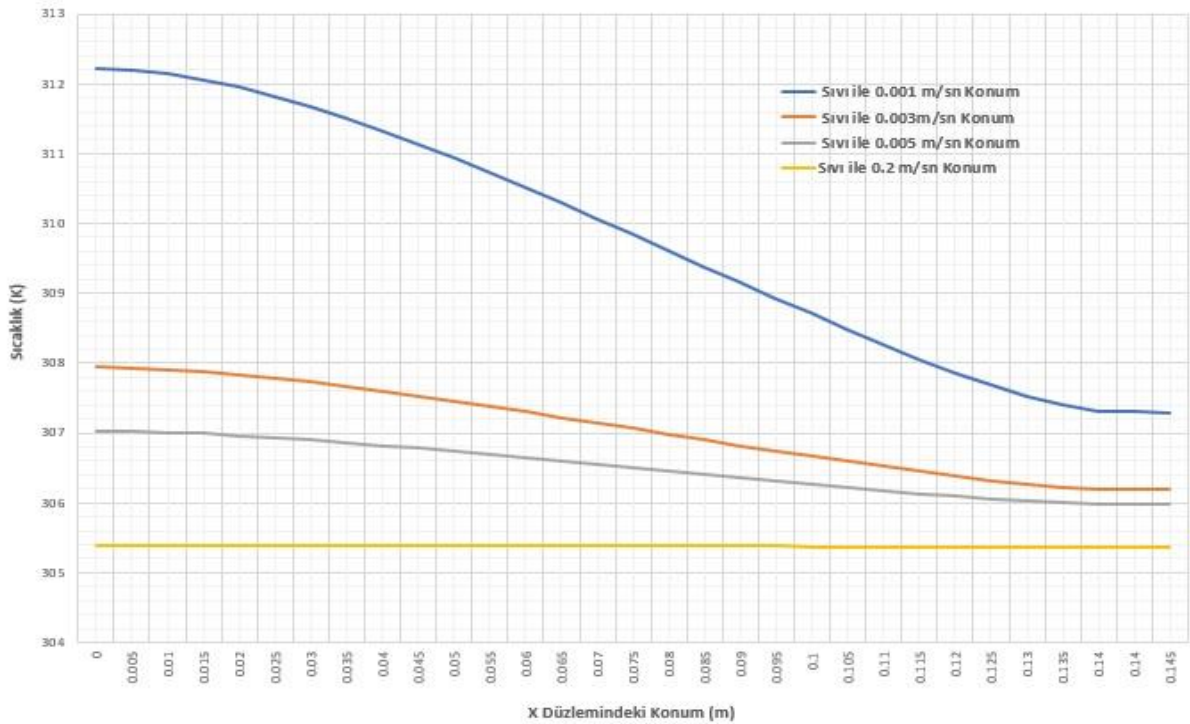
Şekil 4.11.' e bakıldığında sıvı ile soğutma sisteminin hava ile soğutma sistemine göre daha etkili olduğu görülmüştür.

Şekil 4.12.' de 5 C deşarj hızındaki sıvı soğutma karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 4.12. 5 C deşarj hızında farklı hızlarda sıvı soğutmasının karşılaştırılması.

0.001 m/s, 0.003 m/s, 0.005 m/s, 0.2 m/s farklı sıvı hızlarında 5 C deşarj hızlarında karşılaştırılması yapıldığında hızın arttıkça sıcaklığın azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda şekil 4.13.' de görüldüğü gibi hızın arttıkça düzensiz sıcaklık dağılımının ortadan kalktığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13. Farklı hava hızlarındaki batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.

Şekil 4. 13.' de batarya x düzlemindeki farklı konumlardaki sıcaklıklar ölçülmüştür. Alınan değerlere göre, sıvının hızı arttıkça düzlem üzerindeki sıcaklıklar neredeyse eşitlenmiştir. Sıvı ile soğutma sistemi ile bataryada hem sıcaklık düşüşü hem de düzenli sıcaklık dağılımı sağlanmıştır.

4.2.3. Faz Değişim Materyali ile Soğutma

Çeşitli BIYS stratejileri arasında pasif ve aktif tipler göz önünde bulundurulur. Aktif soğutma sistemlerinin ana dezavantajı, BIYS' nin karmaşıklığını artıran ilave donanım, fanlar, kanallar veya sıvı sirkülasyon pompaları, ısı eşanjörleri ve kompresörlerdir. Hava ve sıvı soğutmadaki bu ekstra ağırlıklar FDM ile soğutma da bulunmadığından avantaj olarak değerlendirilir. FDM' nin kullanımına dayanan verimli ve basit termal yönetim sistemleri vardır. FDM kullanılması, havadan ve sıvılardan belirli avantajlar sağlar. Avantajları temel olarak sıcaklık eşitliği, düşük bakım maliyetleri ve düşük parazitik enerji tüketiminin yanı sıra düşük sistem hacminin korunmasına yardımcı olan basitleştirme anlamındadır.

Faz değişim materyalleri erime esnasında gizli ısını ortaya çıkarır ve ısının artmasını bir süreliğine geciktirir. Bu çalışmada, faz geçişlerinde sıvı faz için akış durumu yoktur.

Bu çalışmada, batarya çevresine n-octadecane malzemesinde 7mm boyutunda faz değişim materyali tanımlanmıştır. Kutuplar ve hücre için sınır şartları ortam sıcaklığı 294 K ve ısı taşınım katsayısı (h) 7 w/m²K alınmıştır. Malzeme bilgileri Tablo 4.1.' de gösterilmiştir. Hücre bilgisi Tablo 4.2.' de gösterilmiştir.

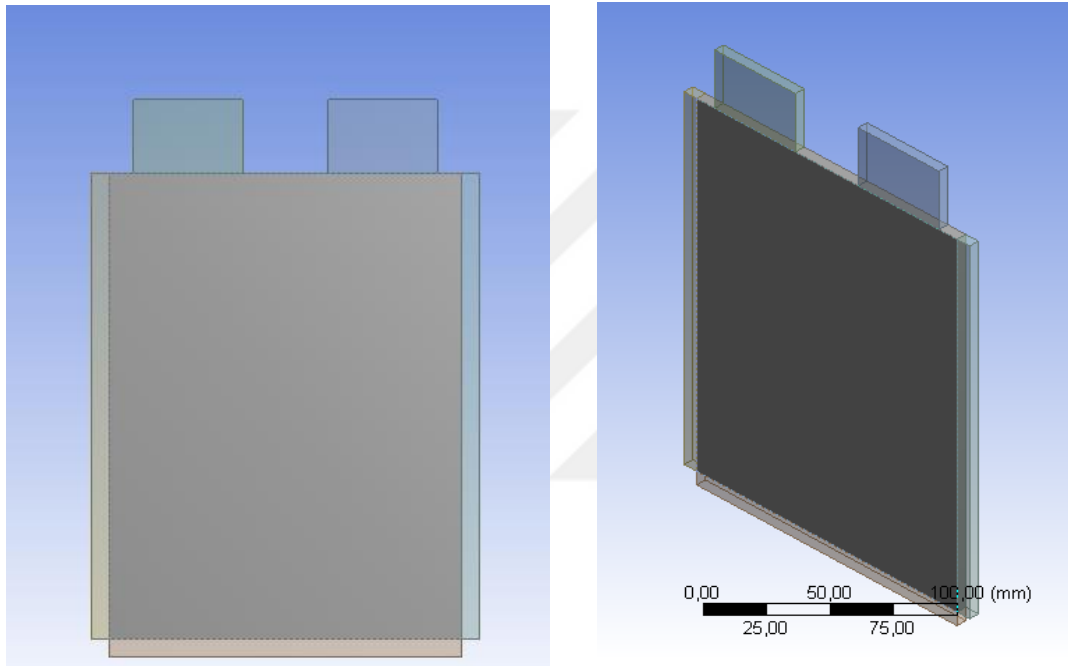
Tablo 4. 1. Faz Değişim Materyali Özellikleri (n-octadecane).

Özellik	Katı faz T _s >T	Peltemsi faz T _s < T<T _L	Sıvı faz T _L >T
$\rho(kg/m^3)$	814	869	724
$k(w/mk)$	0.358	0.255	0.152
$c_p(\frac{J}{kgK})$	2150	225000	2180
$\mu(\frac{kg}{mS})$	2.68x10 ⁻³	-	-
$\beta(\frac{1}{K})$	0.0033	-	-
$L(\frac{J}{kg})$	225000	-	-
T _s (K)	301.15	-	-
T _L (K)	303.15	-	-

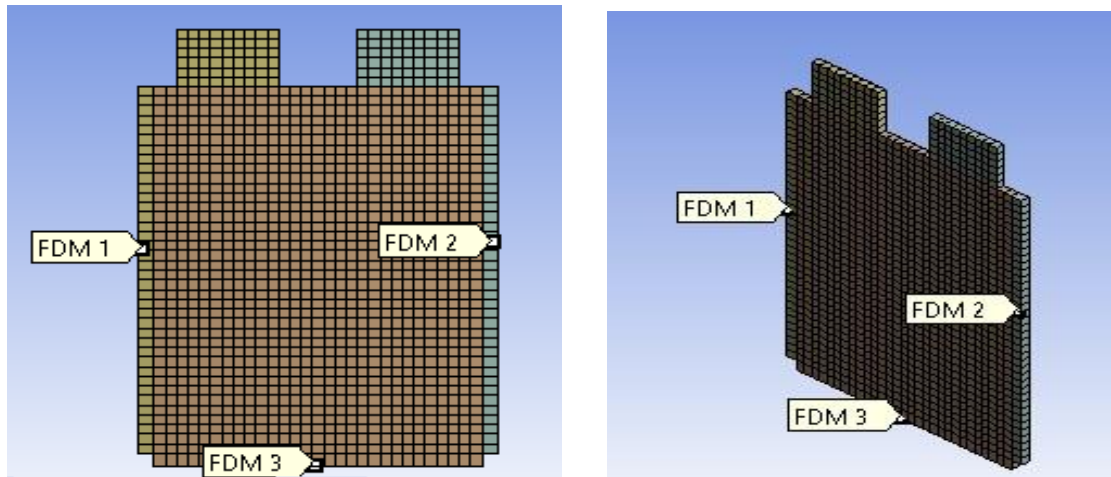
Tablo 4. 2. Faz değişim materyallerinde kullanılan hücre malzemeleri.

Hücre Malzemeleri		
Yoğunluk	2092	Kg/m ³
Özgöl Isı (Cp)	678	J/kg-K
Termal iletkenlik	18.2	w/m-K
UDS-0	1.19e+06	Kg/m-s
UDS-1	9.83e+05	Kg/m-s
Elektriksel iletkenlik	3.541e+07	Siemens/m

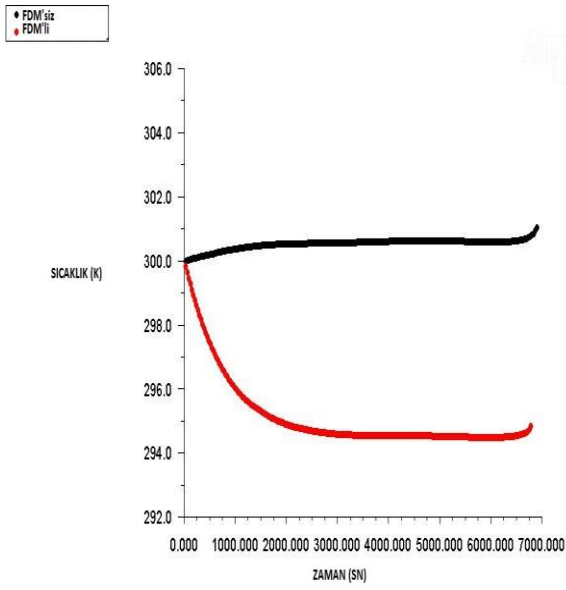
Faz değişim materyali batarya hücresinin çevresine Şekil 4.14.' te gösterildiği gibi 7 mm boyutunda olacak şekilde dizayn edilmiştir.

**Şekil 4. 14.** Faz değişim materyalinin batarya hücresindeki görüntüsü.

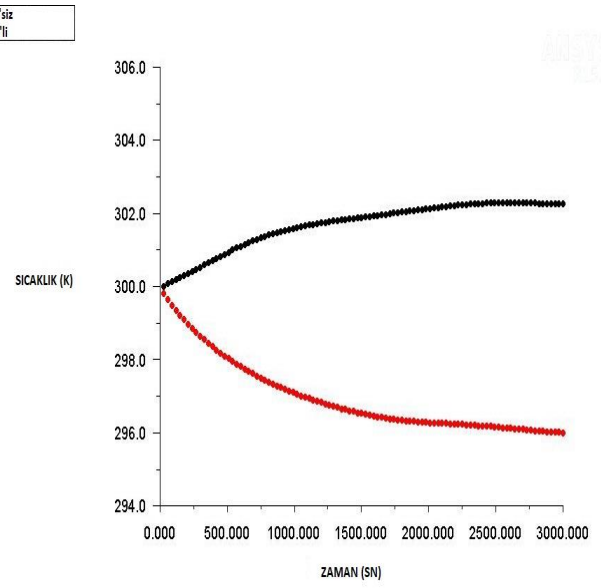
Şekil 4.15.' te bataryaya uygulanan fdm malzemesinin mesh (aę) görüntüsü verilmiştir.

**Şekil 4. 15.** Bataryaya uygulanan fdm malzemesinin mesh(aę) görüntüsü.

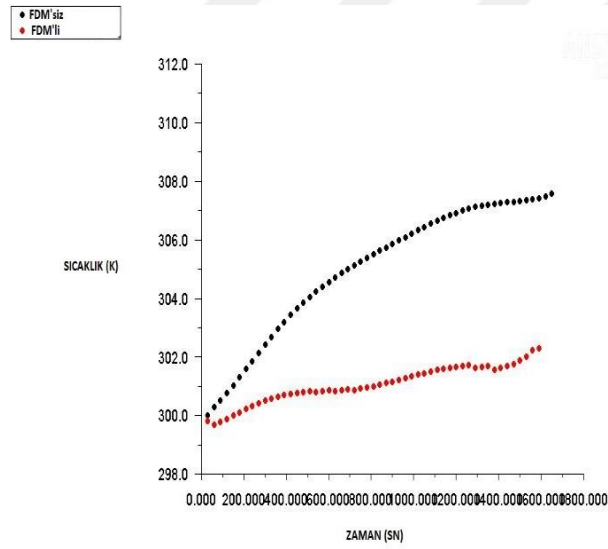
Şekil 4.16.' da sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C, 5 C deşarj hızlarındaki FDM ile soğutmalı ve soğutmasız halleri karşılaştırılmıştır.



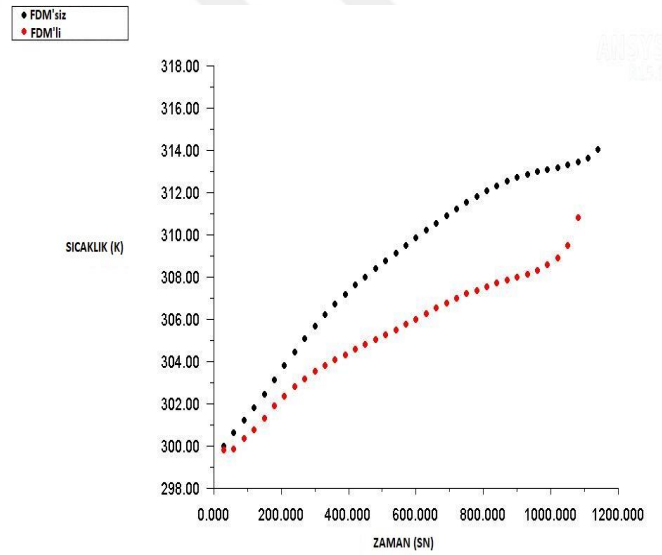
(a)



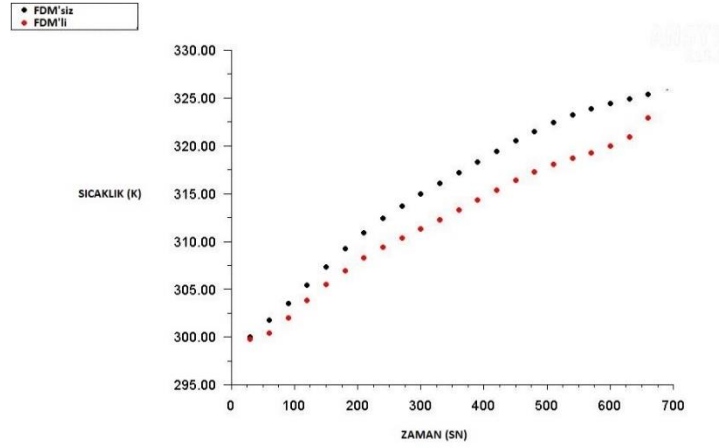
(b)



(c)



(d)

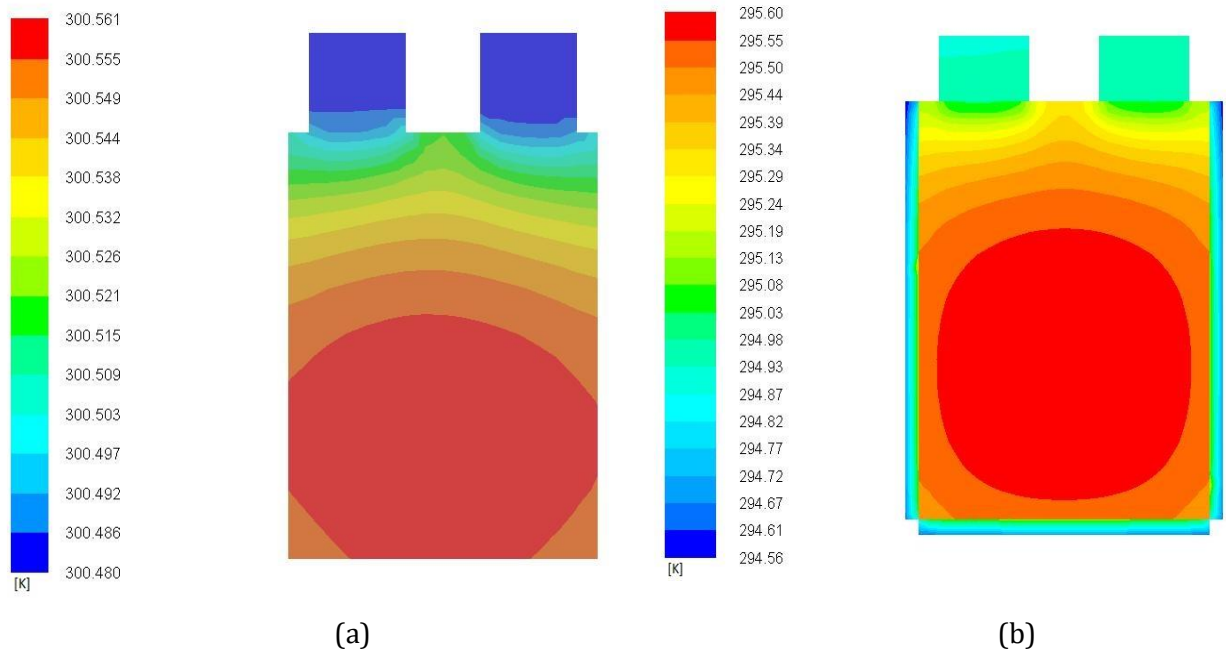


(e)

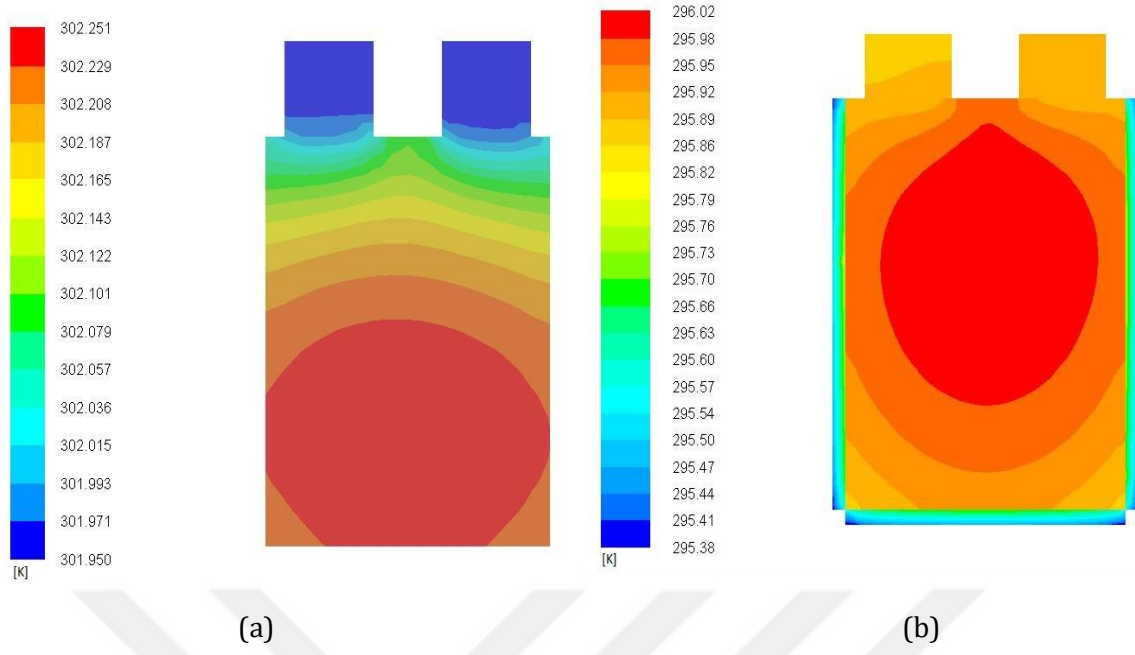
Şekil 4. 16. a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj hızlarında FDM ile soğutma ve soğutmasız karşılaştırılması.

Fdm ile soğutmada 0.5 C ve 1 C' de ortam sıcaklığına düşerken 2 C' de yaklaşık 5 K, 3 C ve 5 C de yaklaşık 4 K düşüş gözlemlenmiştir. Grafiklerdeki deşarj sonunda anlık sıcaklık artışının seçilen n-octadecane malzemesinin deşarj durumunda sıcaklık artışından dolayı katı halden sıvı hale geçiş esnasındaki erimesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

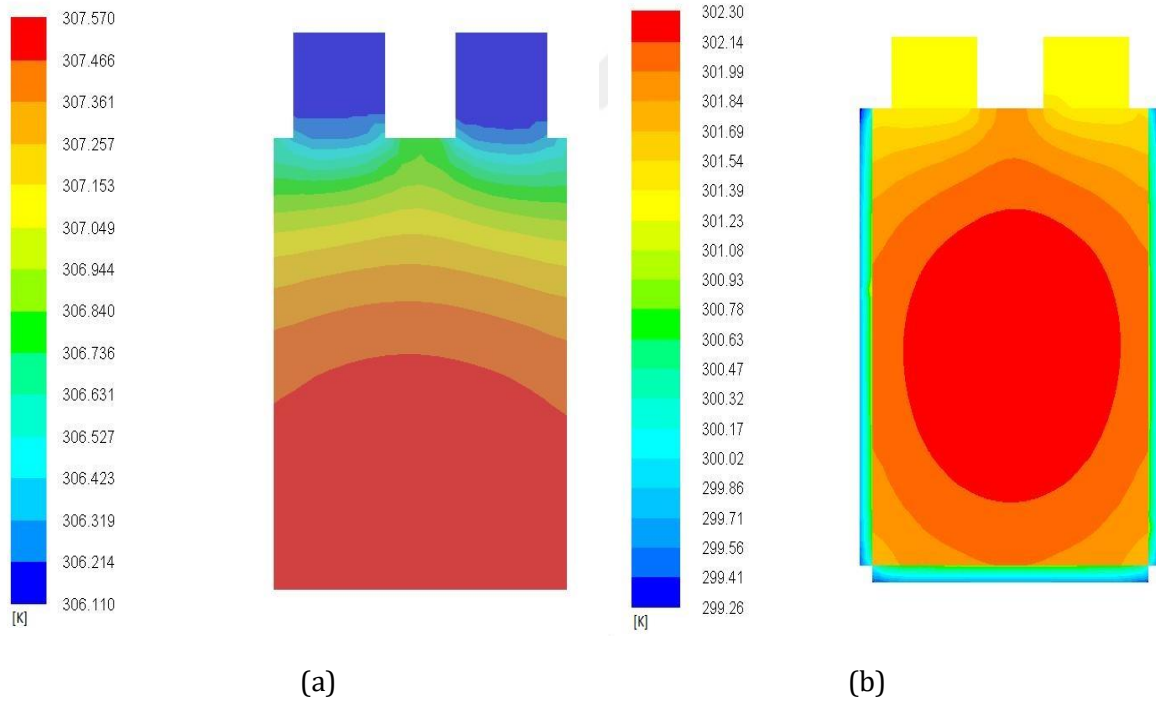
Şekil 4. 17. , Şekil 4. 18. , Şekil 4. 19. , Şekil 4. 20. , Şekil 4. 21.' de sırasıyla 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C, 5 C deşarj hızlarındaki fdm' sız ve fdm' li sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



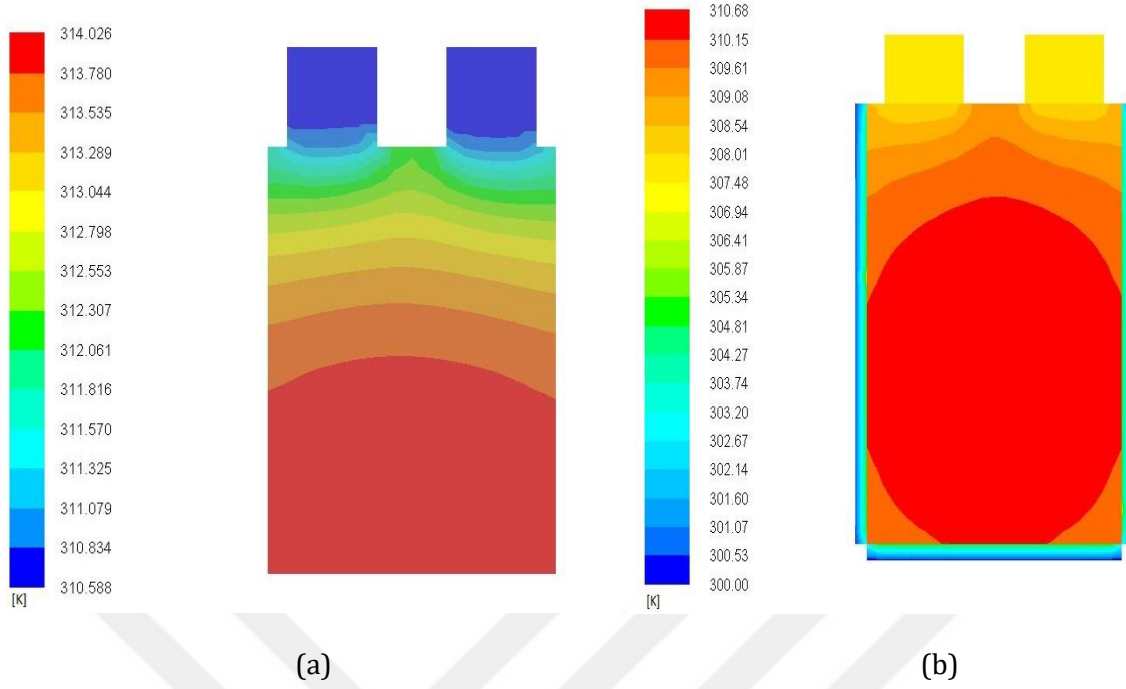
Şekil 4. 17. 0.5 C deşarj hızındaki a) fdm' sız b) fdm' li sıcaklık dağılımı.



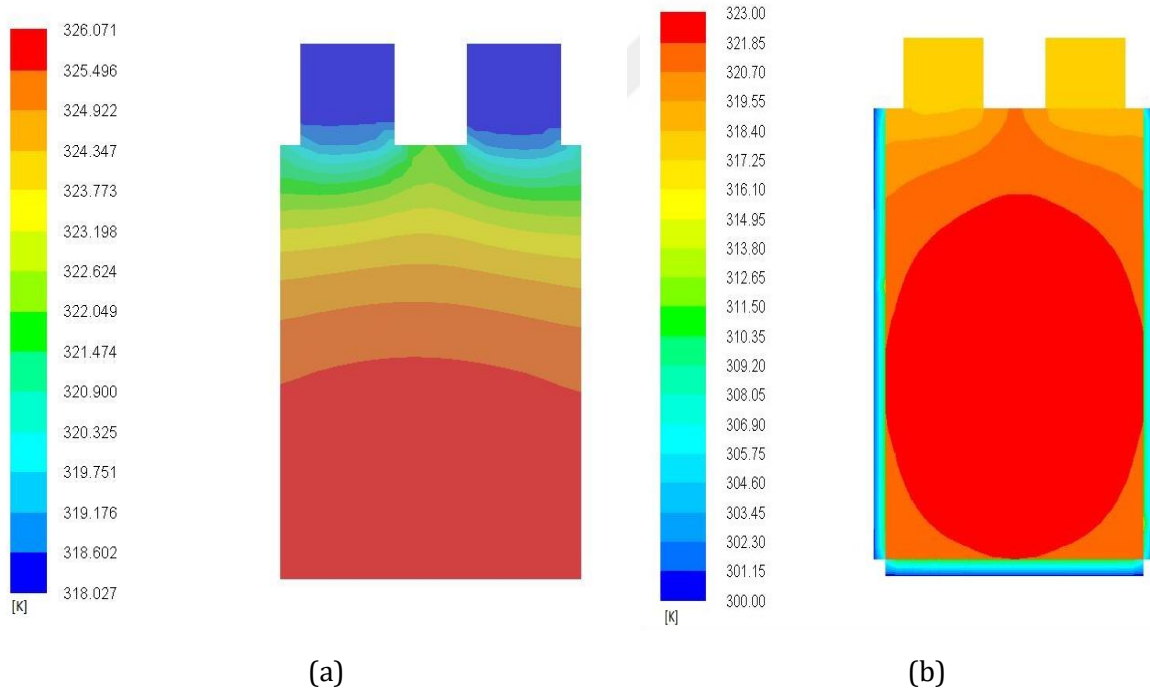
Şekil 4. 18. 1 C deşarj hızındaki a) fdm' sız b) fdm' li sıcaklık dağılımı.



Şekil 4. 19. 2 C deşarj hızındaki a) fdm' sız b) fdm' li sıcaklık dağılımı.

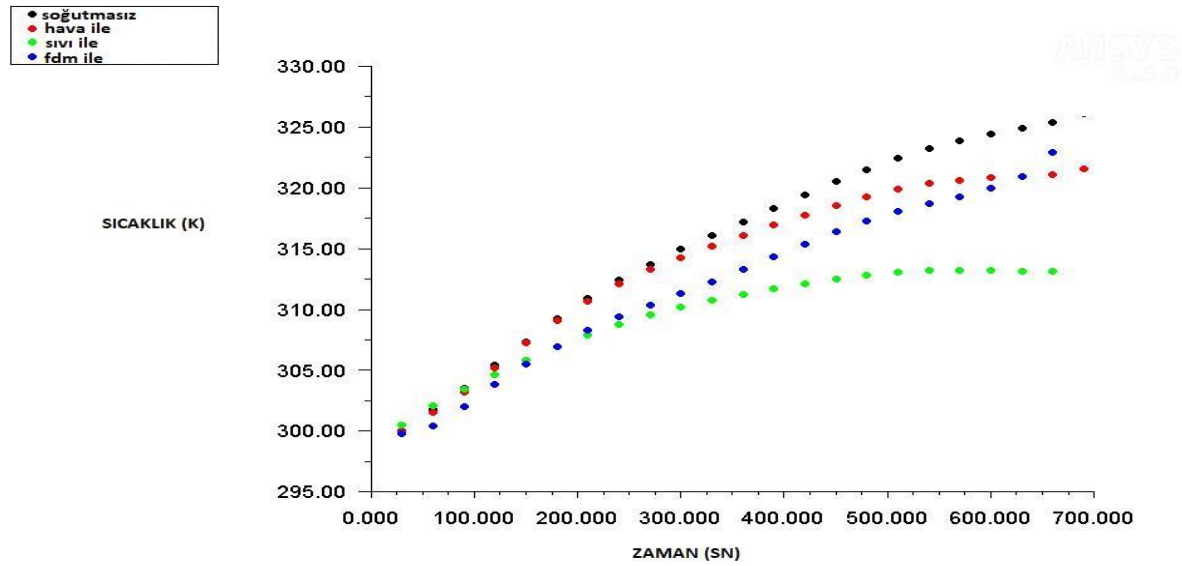


Şekil 4. 20. 3 C deşarj hızındaki a) fdm' sız b) fdm' li sıcaklık dağılımı.



Şekil 4. 21. 5 C deşarj hızındaki a) fdm' sız b) fdm' li sıcaklık dağılımı.

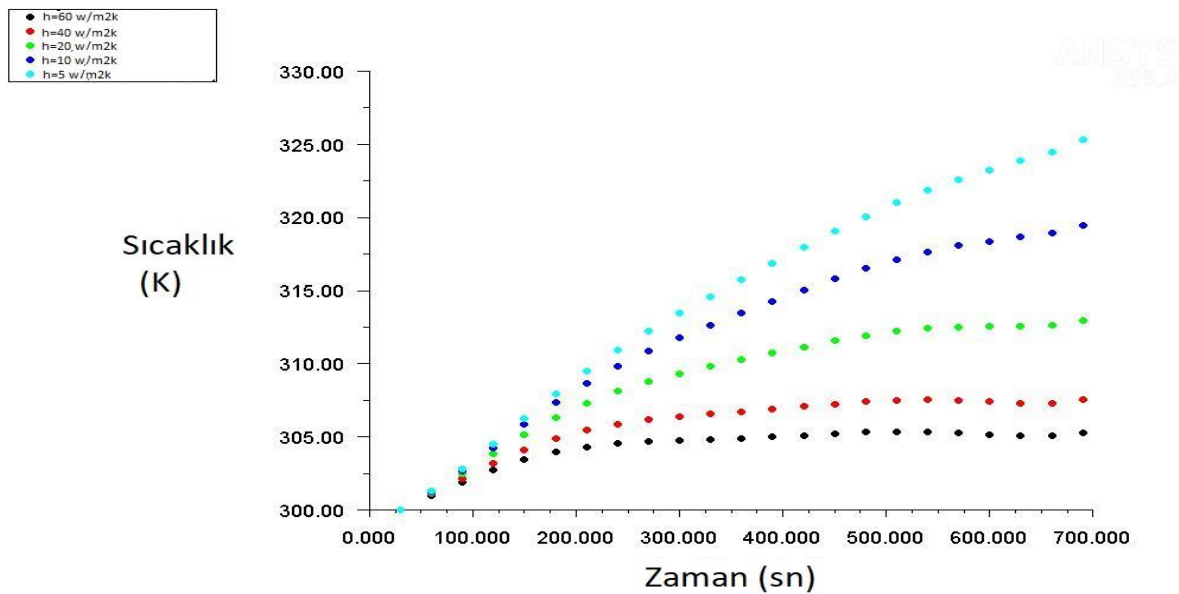
Fdm' siz sıcaklık dağılımına göre fdm' li sıcaklık dağılımının kısmen de olsa daha düzenli olduğu görülmüştür. Sıcaklığı düşürmede etkili olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4. 22.' de 5 C deşarj hızında hava, sıvı ve faz değişimi ve soğutmasız halinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4. 22. 5 C deşarj hızındaki soğutmalı ve soğutmasız hallerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.22.'de görüldüğü gibi sıvı ile soğutma, hava ve fdm ile soğutma sistemlerinden daha etkili olmuştur. Sıvı ile soğutma, ticari olarak EA soğutma sistemlerinde diğer soğutma sistemlerine oranla daha çok tercih ediliyor olması bu simülasyon çalışması ile doğrulanmıştır.

Ayrıca bu soğutma stratejilerinin yanı sıra ısı taşınım katsayısını değiştirerek 5 C deşarj hızındaki sıcaklık düşüşü Şekil 4. 23.' te gösterilmiştir.



Şekil 4. 23. Isı taşınım katsayısının değiştirilmesi

Şekil 4. 23.' te görüldüğü gibi ısı taşınım katsayısı arttıkça sıcaklığın azaldığı gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında EA' larda tercih edilen lityum iyon bataryaların, batarya ısı performansını anlamak için farklı yükler altında davranışları sonlu elemanlar yöntemini kullanan simülasyon programı ile gözlemlendi. 14.6 Ah zarf tipi LIB' nin 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C ve 5 C deşarj oranlarında ısıl davranışı analiz edildi. Yüksek deşarj oranlarında deşarj süresi azalmakta ve üretilen toplam ısı ve bataryadaki sıcaklığın arttığı görüldü. Bu sıcaklık hücrenin merkezinde daha yüksek iken kutuplara doğru azaldı. Bataryalar farklı sıcaklık aralığında incelendiğinde düzensiz ısı dağılımına sahip olduğu görülmüştür. Bu düzensizliği ortadan kaldırmak için 3 farklı soğutma sistemi ile soğutularak performansları incelendi.

Bataryaya hava, sıvı ve faz değişim materyalleri soğutma sistemlerinin hepsi deşarj esnasında iken uygulandı ve soğutma performansları gözlemlendi. Hava ve sıvı soğutma sisteminde hava kanalları oluşturularak bataryaya aktif soğutma gerçekleştirildi. Bu yöntemlerle batarya ısısını düşürmekle birlikte akışkanın hızı arttırıldığında düzensiz dağılımın ortadan kaldırıldığı görüldü. Faz değişim materyali gibi pasif bir yöntem kullanarak malzemenin sıcaklıkla birlikte eriyerek bataryaya bir sıcaklık bariyeri oluşturduğu ve batarya yüzeyindeki sıcaklığı kısmen de olsa düzenli hale getirdiği tespit edildi. Bu soğutma sistemlerinin performansları karşılaştırıldığında bataryayı hava ile % 1, 11, sıvı ile % 3, FDM ile % 1, 33 oranında soğutmuştur. Oranlara bakıldığında sıvı ile soğutmanın diğer soğutmalardan daha etkili olduğu ve EA soğutmalarında en çok sıvı tercih edilmesini doğrular nitelikte olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, yüksek doğrulukta ve etkili bir termal yönetim sistemi ile verimli bir batarya modeli oldukça arzu edilmektedir. BIYS' ler, pratik uygulamalara daha benzer olan dinamik çevrim ile batarya paketi seviyesine uzatılmalıdır, böylece şarj / deşarj döngüleri sırasında ısı birikimi daha iyi düşünülmelidir. Etkili bir ısıl yönetim sistemi batarya performansını arttırır, performansı artan batarya düşük menzil problemini giderir ve çevre dostu elektrikli araçların hayat kalitemizi arttırmasını sağlar.

KAYNAKLAR

- [1]. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Miller, H. L. (2007). Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- [2]. Oerlemans, J. (1994). Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*, 264(5156), 243-245.
- [3]. Pritchard, H., Ligtenberg, S. R. M., Fricker, H. A., Vaughan, D. G., Van den Broeke, M. R., & Padman, L. (2012). Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, 484(7395), 502.
- [4]. Boden, T. A., Marland, G., & Andres, R. J. (2009). Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions. *Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA doi, 10*.
- [5]. Ring, M. J., Lindner, D., Cross, E. F., & Schlesinger, M. E. (2012). Causes of the global warming observed since the 19th century. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2(04), 401.
- [6]. Smith, K. R., Jerrett, M., Anderson, H. R., Burnett, R. T., Stone, V., Derwent, R., ... & Pope III, C. A. (2009). Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: health implications of short-lived greenhouse pollutants. *The lancet*, 374(9707), 2091-2103.
- [7]. Şenlik İ. (2015). Uyuyan devrim; Elektrikli araçlar, Elektrik mühendisliği dergisi, sayı 455, 64-67.
- [8]. Keskin A. (2009). Hibrid Taşıt Teknolojileri ve Uygulamaları, Mühendis ve Makina, cilt 50, sayı 597.
- [9]. Dünya enerji komitesi <https://www.dunyaenerji.org.tr/kuresel-elektrikli-arac-gorunumu-2018/>
- [10]. Türkiye elektrikli ve hibrit araç derneği <http://tehad.org/2018/07/06/elektrikli-ve-hibrid-otomobil-satis-rakamlari-aciklandi/>
- [11]. Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). *Handbook of batteries*. McGraw-Hill Professional.
- [12]. Huat, B.S.L., (2014). Thermal management of electric vehicle battery packs (Doctoral dissertation). National University of Singapore.
- [13]. Van Schalkwijk, W., & Scrosati, B. (2002). Advances in lithium ion batteries introduction. In *Advances in Lithium-Ion Batteries* (pp. 1-5). Springer, Boston, MA.
- [14]. Tesla Motors, "Roadster Technology – Battery" url: <http://www.teslamotors.com/roadster/technology/battery>. Retrieved 2013-9-12.
- [15]. Arcus, C., 2017. Tesla Model S Battery vs Nissan LEAF Battery vs Chevy Volt Battery.
- [16]. Chen S. C., Wan C. C., Wang Y. Y., (2005). Thermal Analysis of Lithium-Ion Batteries, *Journal of Power Sources*, v140, pp 111-124.
- [17]. Gu, W. B., & Wang, C. Y. (2000). Thermal-electrochemical modeling of battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(8), 2910-2922.
- [18]. Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102.
- [19]. Huang, Q., Yan, M., & Jiang, Z. (2006). Thermal study on single electrodes in lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 156(2), 541-546.
- [20]. Al Hallaj, S., Maleki, H., Hong, J. S., & Selman, J. R. (1999). Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 83(1-2), 1-8.
- [21]. Johnson, V. H., Pesaran, A. A., & Sack, T. (2001). *Temperature-dependent battery models for high-power lithium-ion batteries* (No. NREL/CP-540-28716). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).
- [22]. Shidore, N., & Bohn, T. (2008). *Evaluation of cold temperature performance of the JCS-VL41M PHEV battery using Battery HIL* (No. 2008-01-1333). SAE Technical Paper.
- [23]. Shim, J., Kosteki, R., Richardson, T., Song, X., & Striebel, K. A. (2002). Electrochemical analysis for cycle performance and capacity fading of a lithium-ion battery cycled at elevated temperature. *Journal of power sources*, 112(1), 222-230.

- [24]. Chacko, S., & Chung, Y. M. (2012). Thermal modelling of Li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles. *Journal of Power Sources*, 213, 296-303.
- [25]. Wang, Z. P., Lu, C., & Liu, P. (2011). Reviews of studying on thermal management system in EV/HEV battery pack. In *Advanced Materials Research* (Vol. 291, pp. 1674-1678). Trans Tech Publications.
- [26]. Yang, K., An, J. J., & Chen, S. (2010). Temperature characterization analysis of LiFePO₄/C power battery during charging and discharging. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 99(2), 515-521.
- [27]. Kim, U. S., Shin, C. B., & Kim, C. S. (2009). Modeling for the scale-up of a lithium-ion polymer battery. *Journal of Power Sources*, 189(1), 841-846.
- [28]. Chen, S. C., Wan, C. C., & Wang, Y. Y. (2005). Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 140(1), 111-124.
- [29]. Keyser, M.A. (2003). Thermal characterization of advanced Lithium-ion polymer cells, in Third Advanced Automotive Battery Conference.
- [30]. Fleckenstein, M., Bohlen, O., Roscher, M. A., & Bäker, B. (2011). Current density and state of charge inhomogeneities in Li-ion battery cells with LiFePO₄ as cathode material due to temperature gradients. *Journal of Power Sources*, 196(10), 4769-4778.
- [31]. Inui, Y., Kobayashi, Y., Watanabe, Y., Watase, Y., & Kitamura, Y. (2007). Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries. *Energy Conversion and Management*, 48(7), 2103-2109.
- [32]. Li, X., He, F., & Ma, L. (2013). Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation. *Journal of Power Sources*, 238, 395-402.
- [33]. Zhao, J., Rao, Z., Huo, Y., Liu, X., & Li, Y. (2015). Thermal management of cylindrical power battery module for extending the life of new energy electric vehicles. *Applied thermal engineering*, 85, 33-43.
- [34]. Cho, G. Y., Choi, J. W., Park, J. H., & Cha, S. W. (2014). Transient modeling and validation of lithium ion battery pack with air cooled thermal management system for electric vehicles. *International journal of automotive technology*, 15(5), 795-803.
- [35]. Fan, L., Khodadadi, J. M., & Pesaran, A. A. (2013). A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 238, 301-312.
- [36]. Rao, Z., & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571.
- [37]. Pesaran, A.A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of power sources*, 110(2), pp.377-382.
- [38]. Karimi, G., & Dehghan, A. R. (2014). Thermal analysis of high-power lithium-ion battery packs using flow network approach. *International Journal of Energy Research*, 38(14), 1793-1811.
- [39]. Khateeb, S. A., Farid, M. M., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2004). Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter. *Journal of Power Sources*, 128(2), 292-307.
- [40]. Mills, A. and Al-Hallaj S. (2005) Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs, *Journal of Power Sources*, 141(2): p. 307-315. 254
- [41]. Sabbah, R., Kizilel, R., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2008). Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution. *Journal of Power Sources*, 182(2), 630-638.
- [42]. Kizilel, R., Lateef, A., Sabbah, R., Farid, M. M., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2008). Passive control of temperature excursion and uniformity in high-energy Li-ion battery packs at high current and ambient temperature. *Journal of Power Sources*, 183(1), 370-375.
- [43]. Rao, Z., Wang, S., & Zhang, G. (2011). Simulation and experiment of thermal energy management with phase change material for ageing LiFePO₄ power battery. *Energy Conversion and Management*, 52(12), 3408-3414.

- [44]. Van Mierlo J. (2000) Simulation software for comparison and design of electric, hybrid electric and internal combustion vehicles with respect to respect to energy, emissions and performances, PHD thesis. Vrije Universiteit Brussel.
- [45]. Warner J. (2014). *Lithium-Ion Batteries*. Elsevier, pp. 127–150.
- [46]. Orecchini F., Santiangeli A., and Dell’Era A. (2014) *Lithium-Ion Batteries*. Elsevier, pp. 205–248.
- [47]. Energizer, “Nickel Metal Hydride (NiMH) Handbook and Application Manual” url: http://data.energizer.com/PDFs/nickelmetalhydride_appman.pdf. Retrieved 2013-9-13.
- [48]. Kalhammer, F. R., Kopf, B. M., Swan, D. H., Roan, V. P., & Walsh, M. P. (2007). Status and prospects for zero emissions vehicle technology. *Report of the ARB Independent Expert Panel, 1*(1), 12-36.
- [49]. Andrea, D. (2010). *Battery management systems for large lithium ion battery packs*. Artech house.
- [50]. Taracson, J. M., Armand, M. (2001). Issues and challenges facing lithium ion batteries. *nature, 414*, 359-367.
- [52]. Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews, 20*, 82-102.
- [53]. Ning, G., Haran, B., & Popov, B. N. (2003). Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates. *Journal of power sources, 117*(1-2), 160-169.
- [54]. Nunotani, K., Yoshida, F., Kamiya, Y., Daisho, Y., Abe, K., Kono, M., & Matsuo, H. (2011, September). Development and performance evaluation of lithium iron phosphate battery with superior rapid charging performance—Second report: Evaluation of battery capacity loss characteristics. In *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1-4). IEEE.
- [55]. Ramadass, P., Haran, B., White, R., & Popov, B. N. (2002). Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: Part I. Cycling performance. *Journal of power sources, 112*(2), 606-613.
- [56]. Shim, J., Kostecky, R., Richardson, T., Song, X., & Striebel, K. A. (2002). Electrochemical analysis for cycle performance and capacity fading of a lithium-ion battery cycled at elevated temperature. *Journal of power sources, 112*(1), 222-230.
- [57]. Wu, M. S., & Chiang, P. C. J. (2007). High-rate capability of lithium-ion batteries after storing at elevated temperature. *Electrochimica acta, 52*(11), 3719-3725.
- [58]. Jiang, J., & Zhang, C. (2015). *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*. John Wiley & Sons.
- [59]. Xiao, X., Ahn, D., Liu, Z., Kim, J. H., & Lu, P. (2013). Atomic layer coating to mitigate capacity fading associated with manganese dissolution in lithium ion batteries. *Electrochemistry Communications, 32*, 31-34.
- [60]. Zhou, Z., Ma, Y., Wang, L., Zuo, P., Cheng, X., Du, C., ... & Gao, Y. (2016). Triphenyl phosphite as an electrolyte additive to improve the cyclic stability of lithium-rich layered oxide cathode for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta, 216*, 44-50.
- [61]. Shah, K., Chalise, D., & Jain, A. (2016). Experimental and theoretical analysis of a method to predict thermal runaway in Li-ion cells. *Journal of power sources, 330*, 167-174.
- [62]. Balakrishnan, P. G., Ramesh, R., & Kumar, T. P. (2006). Safety mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources, 155*(2), 401-414.
- [63]. Yuan, Q., Zhao, F., Wang, W., Zhao, Y., Liang, Z., & Yan, D. (2015). Overcharge failure investigation of lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta, 178*, 682-688.
- [64]. Chiu, K. C., Lin, C. H., Yeh, S. F., Lin, Y. H., Huang, C. S., & Chen, K. C. (2014). Cycle life analysis of series connected lithium-ion batteries with temperature difference. *Journal of Power Sources, 263*, 75-84.
- [65]. Huang, Q., Yan, M., & Jiang, Z. (2006). Thermal study on single electrodes in lithium-ion battery. *Journal of Power Sources, 156*(2), 541-546.
- [66]. Park, C., & Jaura, A. K. (2003). *Dynamic thermal model of li-ion battery for predictive behavior in hybrid and fuel cell vehicles* (No. 2003-01-2286). SAE Technical Paper.
- [67]. Lin, H. P., Chua, D., Salomon, M., Shiao, H. C., Hendrickson, M., Plichta, E., & Slane, S. (2001). Low-temperature behavior of Li-ion cells. *Electrochemical and Solid-State Letters, 4*(6), A71-A73.

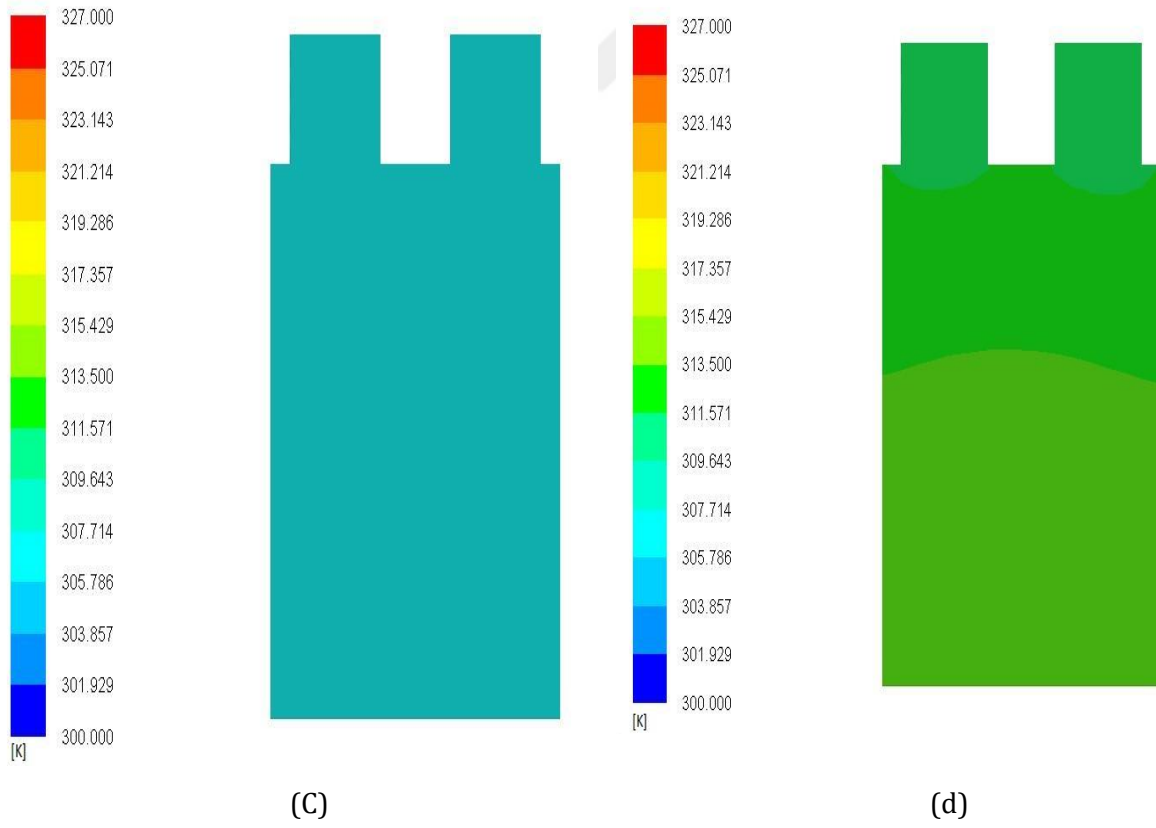
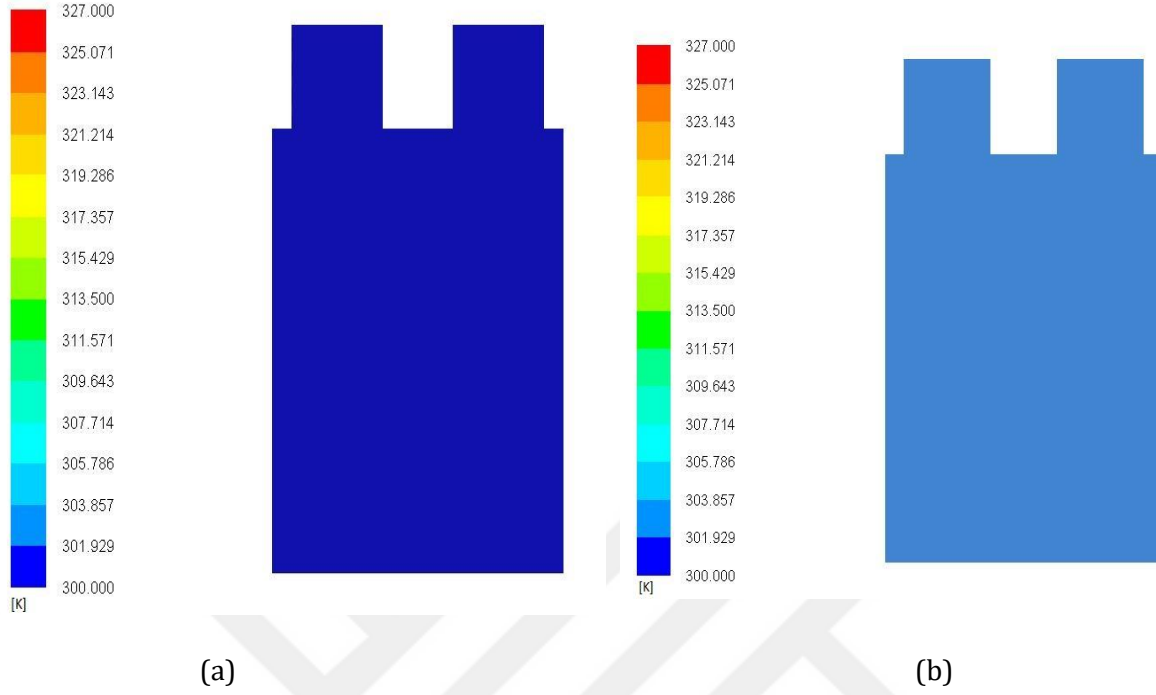
- [68]. Fan, J. (2003). On the discharge capability and its limiting factors of commercial 18650 Li-ion cell at low temperatures. *Journal of Power Sources*, 117(1-2), 170-178.
- [69]. Nagasubramanian, G. (2001). Electrical characteristics of 18650 Li-ion cells at low temperatures. *Journal of applied electrochemistry*, 31(1), 99-104.
- [70]. Jaguemont, J., Boulon, L., & Dubé, Y. (2016). A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied Energy*, 164, 99-114.
- [71]. Pesaran, A., Vlahinos, A., & Stuart, T. (2003, March). Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles. In *6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference* (pp. 1-7). Citeseer.
- [72]. Chen, Y., & Evans, J. W. (1996). Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 143(9), 2708-2712.
- [73]. Mohammadian, S. K., He, Y. L., & Zhang, Y. (2015). Internal cooling of a lithium-ion battery using electrolyte as coolant through microchannels embedded inside the electrodes. *Journal of Power Sources*, 293, 458-466.
- [74]. Giuliano, M. R., Advani, S. G., & Prasad, A. K. (2011). Thermal analysis and management of lithium-titanate batteries. *Journal of Power Sources*, 196(15), 6517-6524.
- [75]. Kelly, K. J., Mihalic, M., & Zolot, M. (2002). Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing. In *Seventeenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of Conference (Cat. No. 02TH8576)* (pp. 247-252). IEEE.
- [76]. Kim, G. H., & Pesaran, A. (2007). Battery thermal management design modeling. *World Electric Vehicle Journal*, 1(1), 126-133.
- [77]. Westbrook, M. H. (2001). *The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars*.
- [78]. He, F., Wang, H., & Ma, L. (2015). Experimental demonstration of active thermal control of a battery module consisting of multiple Li-ion cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 630-639.
- [79]. Yang, N., Zhang, X., Li, G., & Hua, D. (2015). Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Applied thermal engineering*, 80, 55-65.
- [80]. Hermann, W. A. (2012). *U.S. Patent No. 8,263,250*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [81]. Yi J., Kim U. S., Shin C. B., Han T., Park S. (2013) Three-dimensional thermal modeling of a lithium-ion battery considering the combined effects of the electrical and thermal contact resistances between current collecting tab and lead wire, *Journal of the Electrochemical Society*, v160, pp A434-A443.
- [82]. Zhao, J., Rao, Z., & Li, Y. (2015). Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery. *Energy conversion and management*, 103, 157-165.
- [83]. Parrish, R., Elankumaran, K., Gandhi, M., Nance, B., Meehan, P., Milburn, D., Brenz, A. (2011). *Voltec battery design and manufacturing* (No. 2011-01-1360). SAE Technical Paper.
- [84]. Wang, C., Chen, J., Qiu, S., Tian, W., Zhang, D., & Su, G. H. (2017). Performance analysis of heat pipe radiator unit for space nuclear power reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 103, 74-84.
- [85]. Ji Y., Wang C.Y., Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures, *Electrochim Acta*, 2013.
- [86]. Stuart, T. A., & Hande, A. (2004). HEV battery heating using AC currents. *Journal of Power Sources*, 129(2), 368-378.
- [87]. Arora, S. (2017). Design of a modular battery pack for electric vehicles.
- [88]. ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules Manual (2015), ANSYS®, Inc. Canonsburg, PA: SAS IP Inc.
- [89]. Yi, J., Kim, U. S., Shin, C. B., Han, T., & Park, S. (2013). Three-dimensional thermal modeling of a lithium-ion battery considering the combined effects of the electrical and thermal contact resistances between current collecting tab and lead wire. *Journal of the Electrochemical Society*, 160(3), A437-A443.

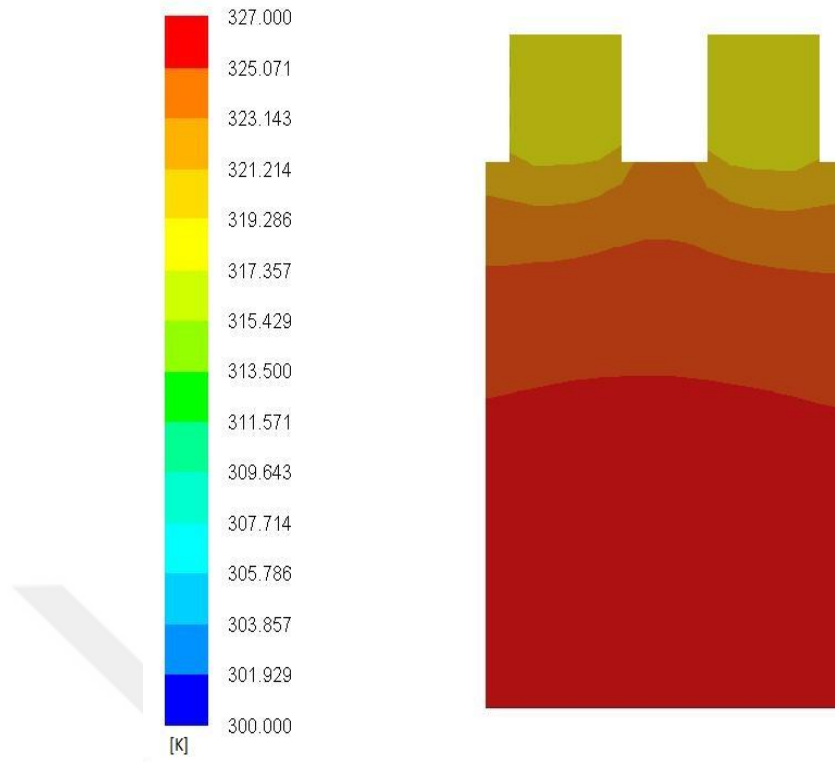
- [90]. Kwon, K. H., Shin, C. B., Kang, T. H., & Kim, C. S. (2006). A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, 163(1), 151-157.
- [91]. Kim, U. S., Yi, J., Shin, C. B., Han, T., & Park, S. (2011). Modeling the dependence of the discharge behavior of a lithium-ion battery on the environmental temperature. *Journal of The Electrochemical Society*, 158(5), A611-A618.
- [92]. XALT 75Ah High Power (HP) Lithium Ion Cell – 75 Ah (HP) Model F900-001. (2017, Ağustos 08). XALT Energy®, Retrieved from: https://www.xaltenergy.com/wp-content/uploads/2017/10/XE_Data_75HP.pdf



EKLER

EKA. Sabit Sıcaklık Aralığında Farklı Deşarj Yüklerinde Isıl Dağılımın İncelenmesi

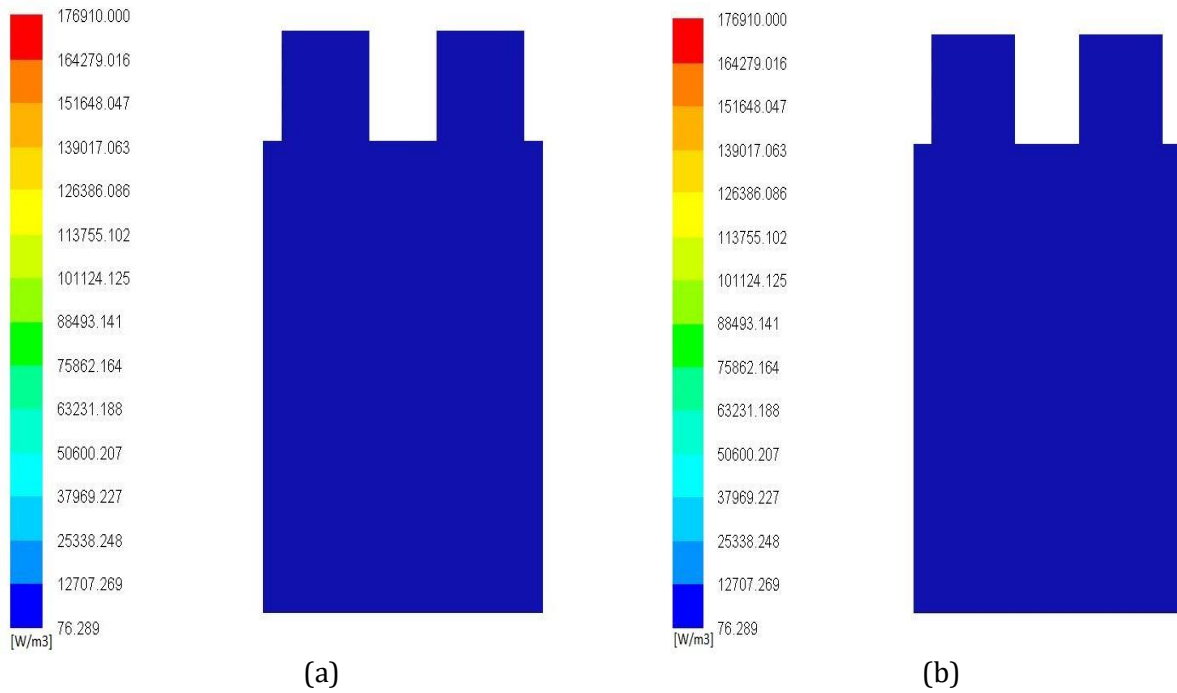


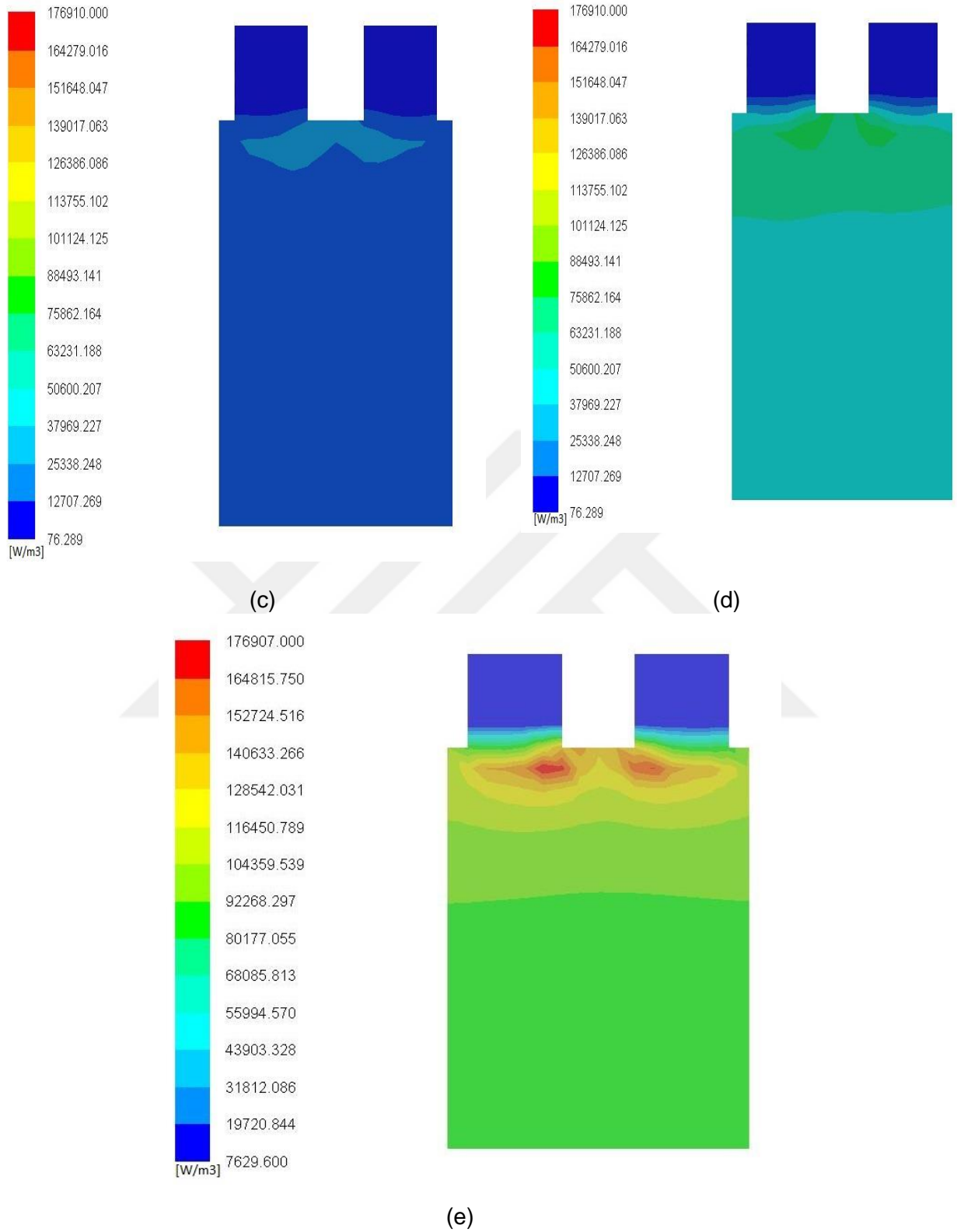


(e)

Şekil Eka 2. a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj oranlarındaki sıcaklık dağılımları

EkB. Sabit Sıcaklık Aralığında Farklı Deşarj Yüklerinde Toplam Isı Üretiminin İncelenmesi





Şekil EkB 2. a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj oranlarındaki toplam ısı üretimi

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : CEYDA BERBER
Doğum Tarihi : 18.05.1993
E-mail : ceydaberber@windowslive.com
Öğrenim Durumu : Lisans

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Sayısal	Mersin Ticaret ve Sanayi Odası Anadolu Lisesi	2007-2011
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Makine Mühendisliği	Okan Üniversitesi	2011-2016
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2017- 2019

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Berber, C., Alkaya, A., Investigation of Thermal Behavior of Lithium Ion Batteries under Different Loads, 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2019) April 25-27, Antalya/Turkey, 2019.
2. Berber, C., Alkaya, A., Batarya Yönetim Sistemlerinde SOC Kestirim Yöntemleri-İnceleme. 9. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, 2017-11-03, 2017-11-05, Antalya, Türkiye, 2017.