
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

DOĞRUDAN TEMASLI SIVI SOĞUTMALI BİR BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZLERİ

Buğrahan SANCILI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Buğrahan SANCILI
13/05/2022

DOĞRUDAN TEMASLI SIVI SOĞUTMALI BİR BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Buğrahan SANCILI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2022

ÖZET

Bu çalışmada 5 adet prizmatik tip lityum manganez oksit ($LiMn_2O_4$) pil kullanılan bir batarya sisteminin tasarımı ve termal analizleri yapılmıştır. Tasarlanan batarya ünitesinde doğrudan temaslı sıvı soğutma yöntemi kullanılarak, bataryanın optimum çalışma sıcaklıklarında tutulması hedeflenmiştir. Doğrudan temaslı soğutma sisteminde soğutucu akışkan olarak, saf su, %40/60 etilen glikol-su karışımı ve hacimsel olarak %0,01 oranında titanyum dioksit (TiO_2) nano parçacıklı etilen glikol kullanılmıştır. Soğutucu akışkan tipinin, akış hızının ve değişken deşarj döngülerinin batarya ünitesindeki etkileri incelenmiş, en etkili soğutucu akışkan tipi ve hızı belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada pil sayısı 15 adede çıkartılıp en iyi soğutma performansına sahip soğutucu akışkan ve hızı ile analizler gerçekleştirilmiştir. 5 adet pil kullanılarak yapılan analizlerde, 5C deşarj değerinde, bataryada meydana gelen maksimum sıcaklık 314 K olarak elde edilmiştir. 0,01 m/s akış hızında saf su, bataryadaki maksimum sıcaklığı 304 K'de tutarak en iyi soğutma performansını göstermiştir. 15 adet pilden meydana gelen bataryada ise maksimum sıcaklık 325,2 K olarak elde edilmiştir. 15 adet pilden meydana gelen bataryada 0,01 m/s akış hızında saf su ile yapılan analizlerde maksimum batarya sıcaklığı 307 K olarak elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 93002
Anahtar Kelimeler : Batarya soğutma sistemi, elektrikli taşıtlar, prizmatik pil
Sayfa Adedi : 76
Danışman : Prof. Dr. Can ÇINAR

DESIGN AND ANALYSIS OF A DIRECT CONTACT LIQUID COOLED BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEM

(M. Sc. Thesis)

Buğrahan SANCILI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2022

ABSTRACT

In this study, design and thermal analysis of a battery system using 5 prismatic type lithium manganese oxide ($LiMn_2O_4$) batteries were carried out. By using the direct contact liquid cooling method in the designed battery unit, it is aimed to keep the battery at optimum operating temperatures. In the direct contact cooling system, pure water, 40/60% ethylene glycol-water mixture and 0.01% by volume titanium dioxide (TiO_2) nanoparticle ethylene glycol were used as the refrigerant. The effects of refrigerant type, flow rate and variable discharge cycles on the battery unit were examined, and the most effective refrigerant type and speed were determined. In the next stage, the number of batteries was increased to 15 and analyzes were carried out with the refrigerant with the best cooling performance and its flow rate. In the analyzes made using 5 batteries, the maximum temperature occurring in the battery was obtained as 314 K at a discharge value of 5C. Pure water at a flow rate of 0.01 m/s showed the best cooling performance by keeping the maximum temperature in the coil at 304 K. In the battery, which consists of 15 cells, the maximum temperature was obtained as 325.2 K. In the analysis made with pure water at a flow rate of 0.01 m/s in the battery consisting of 15 batteries, the maximum battery temperature was obtained as 307 K.

Science Code : 93002
Key Words : Battery cooling system, electrical vehicle, prissmatic cell
Page Number : 76
Supervisor : Prof. Dr. Can ÇINAR

TEŞEKKÜR

Çocukluk hayalim olan elektrikli taşıtlar üzerine çalışmayı kabul eden, bu uzun ve yorucu süreçte, bilgisiyle ve yönlendirmeleriyle farklı bakış açıları sunan, araştırmalarımın her aşamasında önerilerini ve yardımlarını esirgemeyen, zor koşullar altında bile motivasyonunu azaltmadan arttırarak bana destek olan Sayın Hocam Prof. Dr. Can ÇINAR'a teşekkürü bir borç bilirim. Hayatını Türk toplumunun güvenliği için hiçe sayan başta babam Serkan SANCILI olmak üzere, Nilüfer SANCILI ve kardeşim Nilsu SANCILI'ya bu tez çalışmasında da manevi desteklerini esirgemedikleri için teşekkür ederim. Beni her daim destekleyen ve benden inancını hiçbir zaman kesmeyen sevgili hayat arkadaşım ve en iyi arkadaşım olan Selin BÖLER'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET …… iv

ABSTRACT……... v

TEŞEKKÜR……... vi

İÇİNDEKİLER…….. vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ…… ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ…….. x

SİMGELER VE KISALTMALAR…… xiii

1.GİRİŞ……..... 1

2.ELEKTRİKLİ TAŞITLAR……. 3

2.1 Elektrikli Taşıtların Tarihçesi…….. 3

2.2. Günümüzde Elektrikli Taşıtlar…… 4

3. ELEKTRİKLİ TAŞIT BATARYALARI…… 9

3.1. Bataryaların Tarihsel Gelişimleri……... 9

3.2. Lityum-iyon Piller…….. 10

3.2.1. Lityum kobalt oksit ($LiCoO_2$) piller…….. 12

3.2.2. Lityum manganez oksit ($LiMn_2O_4$) piller……. 12

3.2.3. Lityum nikel manganez kobalt oksit ($LiNiMnCoO_2$) piller…….. 13

3.2.4. Lityum demir fosfat ($LiFePO_4$) piller…… 14

3.2.5. Lityum nikel kobalt alüminyum oksit (LiNiCoAlO2) piller……. 15

3.2.6. Lityum titanat oksit (Li_2TiO_3)……... 15

4. BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ…….. 17

4.1. Batarya Termal Yönetim Sisteminin Gerekliliği…… 17

4.2. Batarya Termal Yönetim Sitemleri……. 18

Sayfa

4.2.1. Hava ile soğutma sistemi……. 18

4.2.2 Sıvı ile soğutma sistemi……..... 20

4.2.3. Faz değiştiren malzemeler (FDM) ile soğutma sistemi…….. 22

4.2.4. Hibrit soğutma sistemleri…… 23

5. LİTERATÜR ÖZETLERİ…….. 25

6. BTYS TASARIMI VE ANALİZLERİ……... 39

6.1 Batarya Termal Yönetim Sisteminin Tasarımı……..... 39

6.2. Batarya Termal Yönetim Sisteminin Analizleri…….. 41

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ……..... 49

7.1. Batarya Soğutma Sistemi ile Elde Edilen Sonuçlar……... 51

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER……..... 67

KAYNAKLAR……..... 69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Lityum-iyon pillerin genelleştirilmiş dört tabakası ve işlevleri ……. 11

Çizelge 5.1. Huo ve arkadaşları tarafından kullanılan akışkan, plaka ve hücrenin özellikleri……. 32

Çizelge 6.1. Tasarımda kullanılan pillerin termo-fiziksel özellikleri ……..... 44

Çizelge 6.2. Soğutucu akışkanların 303 K sıcaklıktaki termo-fiziksel özellikleri ……..……. 46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Jedlik tarafından imal edilen elektrikli taşıt…… 3

Şekil 2.2. Motorlu taşıtların sınıflandırılması……. 5

Şekil 2.3. İçten yanmalı motorlu bir taşıtta enerji kayıpları…..…… 5

Şekil 2.4. Seri hibrit bir taşıtın genel şeması…… 6

Şekil 2.5. Paralel hibrit bir taşıtın genel şeması……... 7

Şekil 2.6. Seri-paralel hibrit taşıtların bağlantı şeması……... 7

Şekil 2.7. Bataryalı elektrikli bir taşıtın genel yapısı…….. 8

Şekil 3.1. Bağdat bataryası…….. 9

Şekil 3.2. Lityum-iyon pillerin çalışma mekanizması……. 10

Şekil 3.3. Lityum-kobalt oksit pillerin özellikleri…….. 12

Şekil 3.4. Lityum manganez oksidin spinel mimarisi…….. 13

Şekil 3.5. Lityum manganez oksit pillerin özellikleri…….. 13

Şekil 3.6. Lityum nikel manganez oksit pillerin özellikleri……. 14

Şekil 3.7. Lityum demir fosfat pillerin özellikleri……..... 15

Şekil 3.8. Lityum nikel kobalt alüminyum oksit pillerinin özellikleri……. 15

Şekil 3.9. Lityum titanat pillerin özellikleri……. 16

Şekil 4.1. Batarya performansı ve sıcaklık arasındaki ilişki……..... 17

Şekil 4.2. Sıcaklık ve çevrim sayılarının, batarya kapasitesine etkisi…….. 18

Şekil 4.3. Hava ile aktif ve pasif soğutma şemaları……. 19

Şekil 4.4. Sıvı ile pasif soğutma sistemi şeması……. 21

Şekil 4.5. Sıvı ile aktif soğutma sistemi şeması…… 21

Şekil 4.6. Sıvı soğutma sistemlerinin çeşitleri……..... 22

Şekil 4.7. FDM'nin çalışma prensibi…….. 23

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.1. Giuliano ve arkadaşları tarafından kullanılan hücre modeli…….. 26

Şekil 5.2. Jilte ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmanın tasarımı…… 33

Şekil 5.3. Rayleigh sayısı ve hacimsel nano akışkan oranın sıcaklık üzerine etkisi……. 34

Şekil 5.4. Rao ve arkadaşları tarafından tasarlanan sistem…….. 38

Şekil 6.1. Tasarımı yapılan prizmatik pilin boyutları…….. 39

Şekil 6.2. Mesh optimizasyon grafiği…….. 42

Şekil 6.3. Tasarlanan batarya termal modelinin ağ yapısı…… 42

Şekil 6.4. Soğutma kanalları ve akış yönleri…… 45

Şekil 6.5. 15 adet pilden oluşan bataryanın görünümü…… 47

Şekil 6.6. Bataryanın kesit görünüşü……... 48

Şekil 7.1. (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya sıcaklık değişimleri……... 50

Şekil 7.2. 15 adet pilden meydana gelen bataryada 5C deşarj değerinde sıcaklık değişimi……. 51

Şekil 7.3. 0,001 m/s akış hızında saf su ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri……..... 53

Şekil 7.4. 0,002 m/s akış hızında saf su ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri…… 54

Şekil 7.5. 0,01 m/s akış hızında saf su ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri……. 55

Şekil 7.6. Farklı debilerdeki saf su ile batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklıklar……. 56

Şekil 7.7. 0,001 m/s akış hızında etilen glikol – su karışımı ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri…….. 57

Şekil 7.8. 0,002 m/s akış hızında etilen glikol- su karışımı ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri…..... 58

Şekil 7.9. 0,01 m/s akış hızında etilen glikol- su karışımı ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri…..... 59

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.10. %40/60 etilen glikol-su karışımı kullanılan sistemde, akış hızının batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklıklara etkisi ……..….. 60

Şekil 7.10. Farklı debilerdeki %40/60 etilen-glikol-su karışımı ile batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklıklar……. 60

Şekil 7.11. 0,001 m/s akış hızında nano parçacıklı etilen glikol ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülündeki sıcaklık değişimleri…… 61

Şekil 7.12. 0,002 m/s akış hızında nano parçacıklı etilen glikol ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülündeki sıcaklık değişimleri……. 62

Şekil 7.13. 0,01 m/s akış hızında nano parçacıklı etilen glikol ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülündeki sıcaklık değişimleri …… 63

Şekil 7.14. Farklı debilerdeki nano-akışkan karışımı ile bataryada oluşan maksimum sıcaklıklar…….. 64

Şekil 7.15. Kullanılan üç farklı soğutucu akışkanın bataryada meydana gelen maksimum sıcaklıklara etkisi…… 64

Şekil 7.16. 0,01 m/s akış hızında saf su ile soğutulan batarya modülünde meydana gelen sıcaklık değişimleri…….. 66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a_n	U ve Y parametrelerinin katsayısı
b_n	U ve Y parametrelerinin katsayısı
C	Bataryadan çekilen akım
C_1	NTGK model sabiti
C_2	NTGK model sabiti
C_p	Özgül ısı (J/kgK)
D_h	Hidrolik çap (m)
J	Hacimsel akım aktarım oranı (A/m^3)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
Q_{Ah}	Bataryanın toplam enerjisi (Ah)
Re	Reynolds sayısı
S	Elektriksel iletkenlik (S/m)
T	Hücre sıcaklığı (K)
T_{ref}	Ortam sıcaklığı (K)
U	NTGK modeli parametresi
V	Gerilim (V)
$V_{akışkan}$	Akışkanın hızı (m/s)
V_{ol}	Batarya hacmi (m^3)
Y	NTGK modeli parametresi
α	Sandviç tabakasının alanı (m^2)
ϕ_+	Pozitif kutup faz potansiyeli
ϕ_-	Negatif kutup faz potansiyeli
μ	Kinematik viskozite (kg/ms)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)

Kısaltmalar	Açıklamalar
BTYS	Batarya termal yönetim sistemi
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
DoD	Deşarj derinliği
DOE	Deney tasarımı
EM	Elektrik motoru
FDM	Faz değiştiren malzemeler
İYM	İçten yanmalı motor
MSMD	Çok ölçekli çok alanlı
NTGK	Newmann, Tideman, Gu, Kim pil modeli
SEI	Katı elektrolit ara yüzü
SoC	Şarj durumu

1. GİRİŞ

Günümüzde artan çevre kirliliği, fosil kökenli yakıtların bir bileşeni olan petrol türevlerinin sınırlı ömrü, gelişen teknoloji ve artan nüfusa bağlı olarak sürekli olarak artan enerji ihtiyacı, enerji verimliliği ve tasarrufunun önemini arttırmaktadır. Çevre kirliliğinin en önemli sebeplerinden biri olan ve dünya enerji tüketiminde çok büyük bir paya sahip olan içten yanmalı motorlu (İYM) taşıtlarda her geçen gün emisyonlar ve çevre kirliliği bakımından yeni kısıtlamalar getirilmekte, kısıtlı petrol kaynakları yüzünden alternatif çözümler geliştirilmektedir.

Artan çevre sorunlarına ve azalan petrol rezervlerine en uygun çözüm yöntemi olarak görülen elektrikli taşıtlar üzerindeki çalışmalar her geçen gün önemini arttırmaktadır. Ancak elektrikli taşıtların menzilleri sınırlı olup, içten yanmalı motorlu bir taşıtın menziline sahip olması için tekrardan şarj edilmesi gereklidir. İYM ile tahrik edilen taşıtların yakıt ikmalleri dakikalar içerisinde gerçekleştirilebilirken, elektrikli taşıtların yeniden şarj edilmesi saatleri bulabilmektedir [1]. Elektrikli taşıtların diğer bir dezavantajı da bataryalarının çok pahalı ve tamir olanaklarının kısıtlı olmasıdır [1]. Elektrikli taşıtların bu dezavantajları, ulaşım sektöründe günümüze kadar İYM'li taşıtların daha çok tercih edilmesinin temel sebepleri olarak görülmektedir.

Elektrikli taşıtlarda tahrik için talep edilen gücü depolayan batarya sisteminin performansı büyük önem taşımaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda, batarya sisteminin güvenli ve verimli çalıştığı kabul edildiği sıcaklık değerleri 20°C-40°C arasındadır [2]. Bu sıcaklıklar dışında kullanılan bataryalarda hem elektriksel hem de fiziksel açıdan olumsuz sonuçlar meydana gelebilmektedir. Bataryaları meydana getiren pillerin iç dirençlerinin artması, kısa devre oluşması gibi elektriksel açıdan olumsuz sonuçlar meydana gelebilmektedir. Fiziksel açıdan meydana gelebilecek olumsuz durumlar ise, şarj-deşarj döngüsü sırasında bataryaların genişlemesi, pillerde genişleme sonucu ısıl kaçışların meydana gelmesi ve batarya paketinin patlaması olarak sıralanabilir.

Birçok araştırmacı ve motorlu taşıt üreticisi tarafından elektrikli taşıtların bu sorunlarına çözüm bulmak amacıyla çeşitli batarya termal yönetim sistemleri (BTYS) geliştirilmiştir. Bu sistemlerin yaygın olarak kullanılanları hava ve sıvı ile soğutma sistemleridir [3]. Hava

soğutmalı sistemlerle karşılaştırıldığında sıvı soğutmalı sistemler daha etkin soğutma performansına sahiptir. Ancak sıvı soğutmalı sistemlerin en büyük dezavantajı sıvı sirkülasyonunu sağlayan pompanın bataryalardan fazladan güç çekmesidir [3]. Ayrıca pompa ve soğutucu akışkan ölü ağırlık olarak tanımlanan faydasız yükü arttırmaktadır. Maliyet açısından sıvı soğutmalı sistemler hava soğutmalı sistemlerle karşılaştırıldığında daha yüksek maliyete sahiptirler.

Farklı bir soğutma yöntemi olarak faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı sistemlerde bataryalar organik veya inorganik köpüklerle kaplanır [4]. Köpükler katı halden sıvı hale geçerken pillerde meydana gelen ısıyı emerek ortamın sıcaklığını sabit tutar. Özgül ısısı yüksek olan köpüklerin tercih edilmesi, bataryalarda meydana gelen maksimum sıcakların artmasını engellemektedir [4].

Bu çalışmada 5 adet prizmatik tip $LiMn_2O_4$ pil kullanılarak bir batarya sistemi tasarlanmış ve batarya sisteminin soğutulması için termal analizleri yapılmıştır. Tasarlanan doğrudan temaslı sıvı soğutma yöntemi ile batarya ünitesinin optimum çalışma sıcaklıklarında tutulması hedeflenmiştir. Doğrudan temaslı sıvı soğutma sisteminde, saf su, %40/60 etilen glikol-su karışımı ve hacimsel olarak %0,01 oranında TiO_2 nano parçacıklı etilen glikol soğutucu akışkanları kullanılmıştır. Soğutucu akışkanların batarya ünitesindeki soğutma performansları incelenmiştir. Çalışmada, soğutucu akışkan türlerinin, soğutucu akışkan hızlarının ve değişken deşarj döngülerinin batarya ünitesindeki maksimum sıcaklığa olan etkileri incelenmiştir.

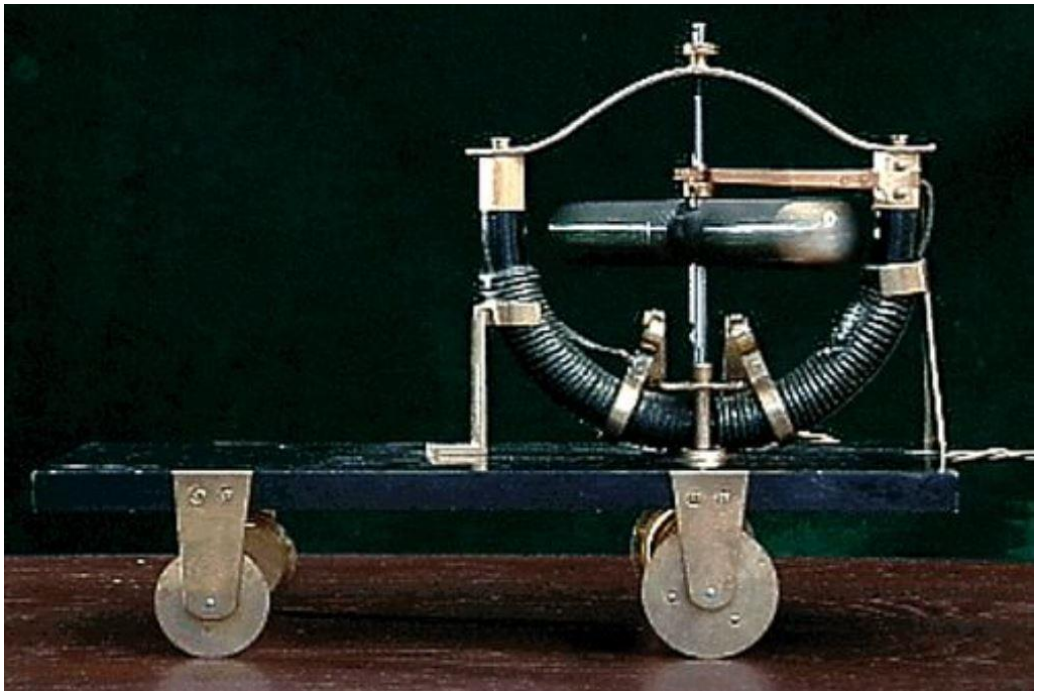
2. ELEKTRİKLİ TAŞITLAR

Fosil yakıtların gün geçtikçe azalması, çevre kirliliğinin artması ve küresel ısınmanın ciddi boyutlara ulaşması, devletleri ve taşıt üreticilerini ulaşım sektöründe alternatif enerji kaynaklarının arayışına itmiştir. Bu çalışmalar sonucunda içten yanmalı motorlara alternatif olarak geliştirilen ve özellikle son yıllarda büyük önem kazanan elektrikli taşıtların tarihsel gelişimi, yapısı ve çeşitleri bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

2.1. Elektrikli Taşıtların Tarihçesi

Elektrikli taşıtların tarihsel gelişimi yaklaşık 200 yıldır süregelmektedir. Bu taşıtlar teknoloji ve bilgi eksikliğinden kaynaklı zamanımıza kadar gelişmelerini tamamlayamamışlardır. Son 20 yıldır içten yanmalı motorlu taşıtlara alternatif olarak teknolojik açıdan büyük ilerleme kaydeden elektrikli taşıtlar özellikle çevre kirliliğine çözüm açısından büyük önem taşımaktadır.

1827 yılında Slovak asıllı rahip olan Jedlik tarafından ilkel bir elektrik motoru imal edilerek küçük bir taşıta entegre etmiştir (Şekil 2.1).



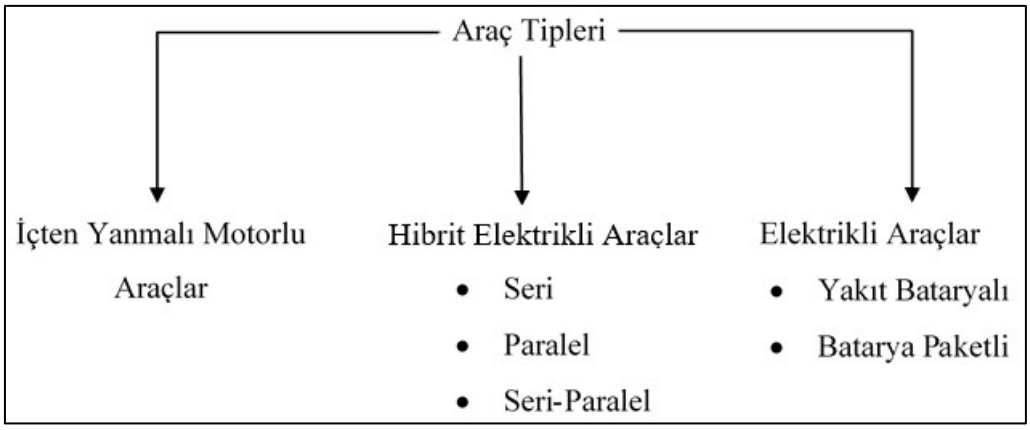
Şekil 2.1. Jedlik tarafından imal edilen elektrikli taşıt [5]

1874 yılında İskoç asıllı Davidson tarafından “Galvani” ismi verilen gerçek boyutlarda elektrikli bir lokomotif imal edilmiştir. Bu lokomotif aynı yıl içerisinde Edinburgh-Glasgow hattında 4 mil/h hızda herhangi bir yük olmadan test edilmiştir. O dönemlerde şarj edilebilir piller keşfedilmediğinden, lokomotif tek kullanımlık pillerle donatılmıştı. Amerikalı Page tarafından taşıyıcı raylara elektrik pillerinden enerji aktarımı keşfedilmiş ve pillerin araç dışına yerleştirilmesi ile lokomotif yükünü azaltmada büyük bir adım atılmıştır. Birincil nesil sayılan bu elektrikli taşıtlar, günlük yaşam ve seri üretim için uygulanabilir bulunmamıştır [5].

İngiliz girişimci Parker, kendisine ait bir pil şirketinde geliştirdiği yeniden şarj edilebilir piller sayesinde 1884 yılında elektrikli taşıtlar için büyük bir ilerleme kaydetmiştir. Thomas Edison elektrikli taşıtlarda kullanılan bu bataryaları geliştirerek, nikel-demir tarzı bataryaları ortaya koymuştur. Sonraki 10 yıl içerisinde elektrikli taşıtlara ilgi artmıştır [5]. 1917 yılında, Century Electric Roadster olarak adlandırılan ve iki kişi taşıma kapasitesine sahip ilk hibrit taşıt satışa sunulmuştur [6]. Süregelen yıllar içerisinde birçok taşıt üreticisi çalışmalarını daha uzun menzile ve gelişmiş bataryalara sahip elektrikli taşıtlar üretmeye yoğunlaştırmıştır. İngiliz Ford Motor Şirketi tarafından 1967 yılında 60 km menzile ve maksimum 40 km/h hıza sahip bir elektrikli taşıt olan Comuta prototip olarak üretilmiştir [6].

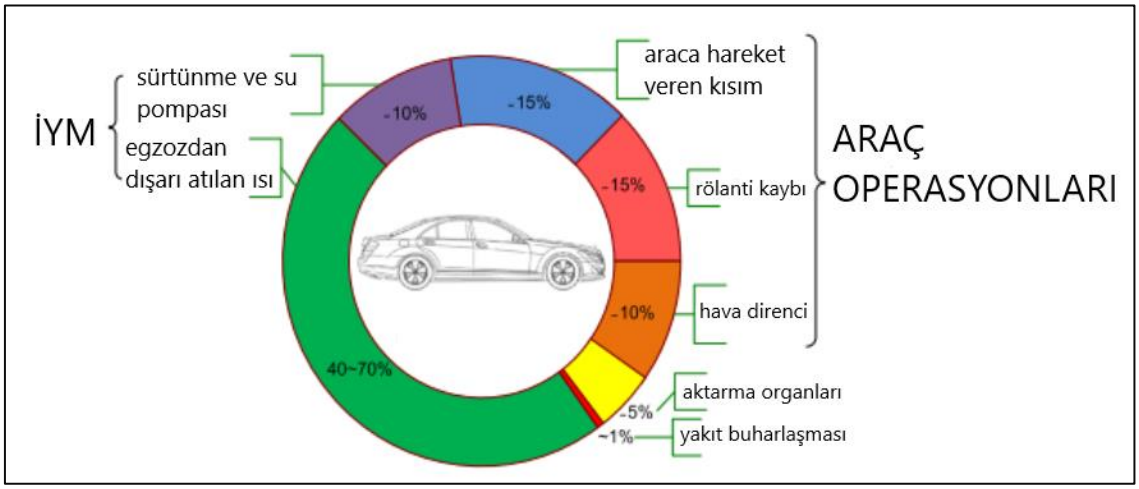
2.2. Günümüzde Elektrikli Taşıtlar

Günümüzde kullanılan motorlu taşıtlar, içten yanmalı motorlu, hibrit elektrikli ve elektrikli olmak üzere üç ana grupta sınıflandırabilir. Hibrit elektrikli taşıtlar kendi içerisinde seri, paralel ve seri-paralel olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Elektrikli taşıtlar ise yakıt hücreli ve batarya paketli olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Motorlu taşıtların sınıflandırılması Şekil 2.2’de gösterilmiştir [7].



Şekil 2.2. Motorlu taşıtların sınıflandırılması [7]

Günümüzde yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motorlu taşıtlar, fosil yakıtları yakarak ürettikleri enerjinin çok az bir kısmını tekerleklere aktarmaktadır. Yakıt enerjisinin yaklaşık %15'lik kısmı tekerleklere aktarılırken, enerjinin büyük bir kısmı atık ısıya ve sürtünmelere harcanmaktadır. Şekil 2.3'te içten yanmalı motora sahip bir taşıtın enerji dönüşüm oranları gösterilmiştir [8].

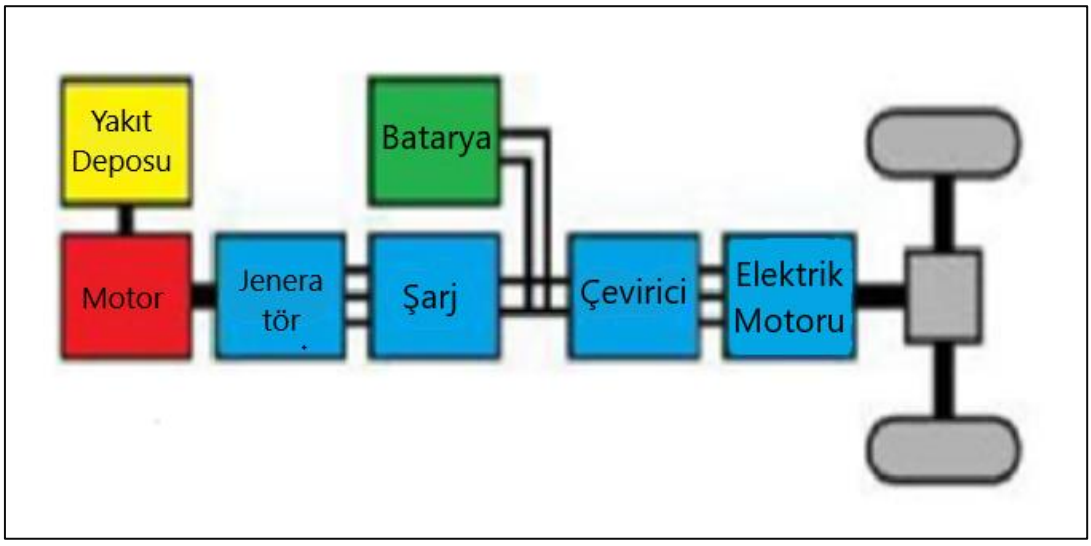


Şekil 2.3. İçten yanmalı motorlu bir taşıtta enerji kayıpları [8]

Günümüzde içten yanmalı motorlu taşıtlarda start-stop (mikro-hibrit) teknolojisi kullanılarak, araç yoğun trafik veya kırmızı ışıkta beklerken içten yanmalı motor durdurularak yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları azaltılmaktadır. Sürücü debriyaj pedalına bastığında veya otomatik vitesli araçlarda ayağını fren pedalından çektiğinde içten yanmalı motor tekrar çalıştırılmaktadır. Şehir içi sürüş şartlarında start-stop sistemi ile yakıt tüketiminde ortalama %5–15 arasında bir azalma sağlanabilmektedir.

Hibrit elektrikli taşıtlarda tahrik için içten yanmalı motor ve elektrik motoru bir arada kullanılmaktadır. Hibrit taşıtlar kendi arasında, geliştirilmiş menzilli hibrit, paralel hibrit, seri hibrit, kompleks hibrit ve plug-in (harici şarj edilebilir) hibrit olmak üzere beş farklı türde sınıflandırabilirler. Geliştirilmiş menzilli hibrit taşıtlar, bataryalı elektrikli taşıtlardaki gibi bir batarya ünitesine sahiptir. Tek farkları bataryalardaki güç azaldığında, şarj edilmesi için İYM'nin jeneratör görevi görmesidir.

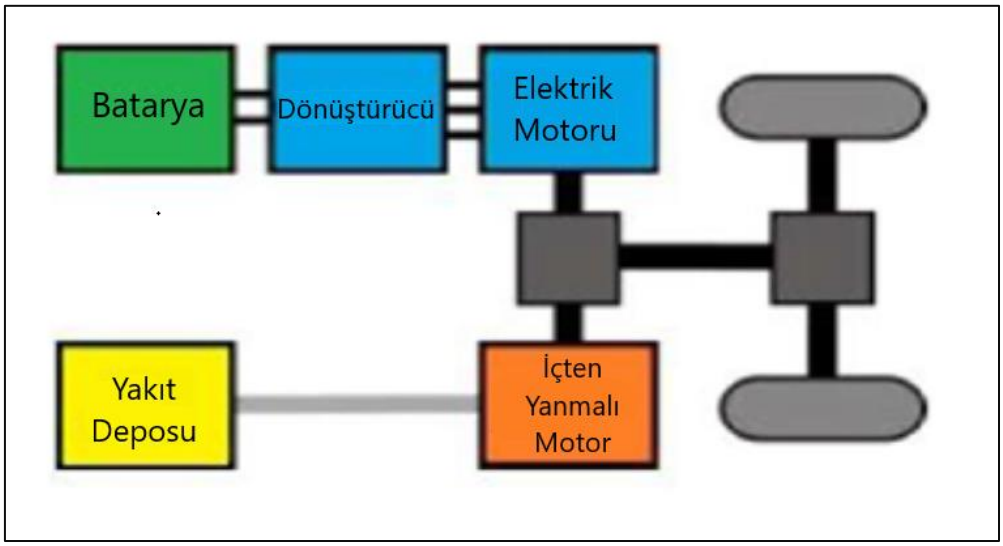
Seri hibrit taşıtlarda, iki adet güç kaynağı bir elektrik motorunu beslemektedir. Bu tarz taşıtlarda, aracı hareket ettirmek için gerekli güç sadece batarya kullanılarak elde edilebilir. Bu tarz kullanım ise içten yanmalı motorun küçültülmesine olanak sağlarken, aracın yüksek hızlara çıkmasında büyük önem taşımaktadır. Seri hibrit taşıtların birçok avantajı olmasına rağmen dezavantajları da vardır. Aynı taşıtta iki farklı motorun olması, taşıt elektrik motorunu kullanırken içten yanmalı motorun ölü ağırlık oluşturması, artan bileşen sayısı, seri hibrit araçların bazı dezavantajlarıdır. Şekil 2.4'te seri hibrit bir taşıtın genel şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Seri hibrit bir taşıtın genel şeması [9]

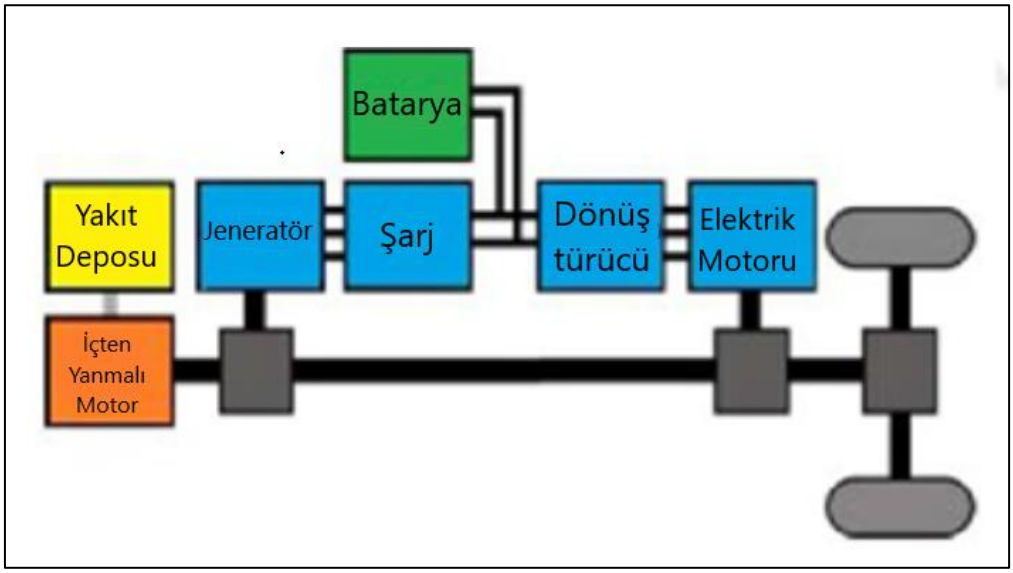
Paralel hibrit tarzı taşıtlarda ise bataryaya bağlı bir elektrik motoru (EM) ve içten yanmalı motor mekanik bir kaplin ile vites kutusuna bağlanmıştır. Bu tarz taşıtlarda batarya kapasitesi, seri paralel taşıtlara göre daha küçük olmasına rağmen, güç kaynaklarının (İYM ve EM) aynı kaplin üzerinde olması sürüş sırasında yakıt ekonomisi sağlamaktadır. Paralel hibrit taşıtlar, seri paralel hibrit taşıtlarda olduğu gibi içten yanmalı motorun küçültülmesine olanak sağlar. Ayrıca paralel hibrit taşıtlar üzerlerinde yapılacak bazı değişikliklerle plug-in

hibrit taşıtlara dönüştürebilir. Ancak tek bir kaplin üzerinde güç kaynakları olduğu için karmaşık bir transmisyon sistemine ihtiyaç duyar. Bu tarz taşıtların kontrol ünitesi de karmaşık yapıdadır. Şekil 2.5'te paralel hibrit taşıtların bağlantı şeması gösterilmiştir.



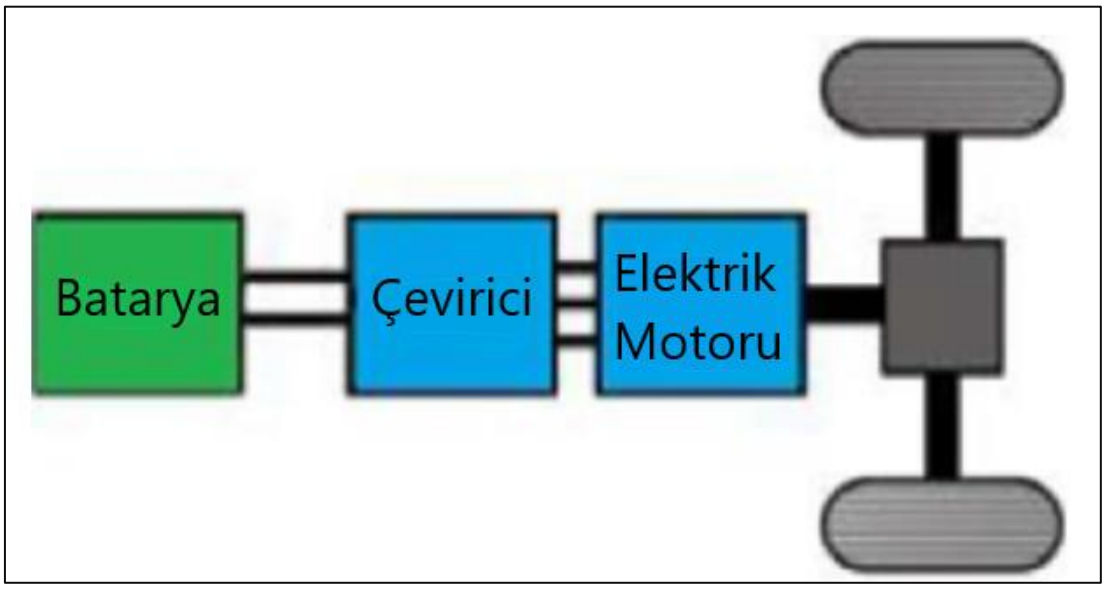
Şekil 2.5. Paralel hibrit bir taşıtın genel şeması [9]

Seri-paralel hibrit taşıtlar bağlantı mekanizmaları ve maliyet olarak diğer hibrit taşıtlara göre çok karmaşıklardır. Bu taşıt türü, yalnızca yakıtla, yalnızca elektrikle ya da her ikisiyle birlikte çalışabilir durumdadırlar. Trafiğin çok yoğun olduğu durumlarda elektrikli motor devreye girer. Şekil 2.5'te seri-paralel hibrit taşıtların bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Seri-paralel hibrit taşıtların bağlantı şeması [9]

Bataryalı elektrikli taşıtlar (BEA) veya tümü elektrikli taşıtlar (EA) olarak tanımlanan taşıt türünde, taşıt hareketi için herhangi bir İYM kullanılmamakta, sadece bataryada depolanan kimyasal enerji mekanik enerjiye dönüştürülerek taşıt hareketi sağlanmaktadır. Bütün enerjiyi bataryalardan karşılayan elektrikli taşıtlarda, batarya kritik bir bileşen haline gelmiştir. İYM'ye sahip olmadıkları için herhangi bir yanma çevrimi söz konusu değildir ve çevreye karşı duyarlıdırlar. Tahrik elektrik motoru tarafından sağlandığı için anlık tork değerleri çok yüksektir. Elektrikli taşıtlarda vites kutusu olmadığından, üretilen güç doğrudan tekerleklere aktarılmaktadır. Bu yapısı sayesinde verimliliği %90'a kadar çıkmaktadır [10]. Standart bir elektrikli taşıt, bir şarjda 250-300 km arası mesafe giderken, geliştirilmiş elektrikli taşıtlar bir şarjda 500-600 km gidebilmektedir. Daha yüksek menzile sahip elektrikli taşıtlar da bulunmaktadır. Şekil 2.6'da bataryalı elektrikli aracın genel yapısı gösterilmiştir.



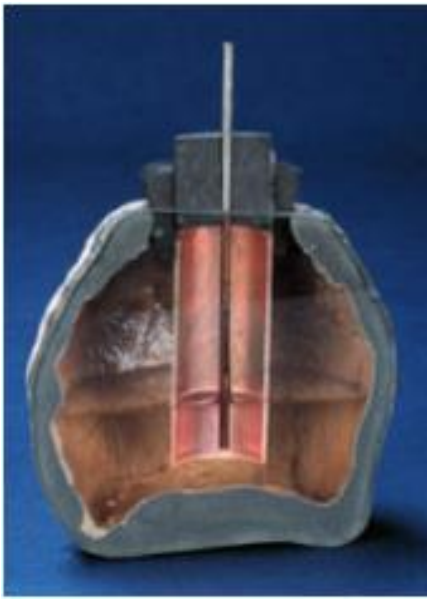
Şekil 2.7. Bataryalı elektrikli bir taşıtın genel yapısı [9]

Elektrikli taşıtların en büyük avantajları, emisyonlarının sıfır olması ve enerji verimliliklerin içten yanmalı motorlara göre daha yüksek olmasıdır. Dezavantajları ise, menzil, batarya şarj süresi ve hem batarya paketinin hem de taşıtın yüksek maliyetidir.

3. ELEKTRİKLİ TAŞIT BATARYALARI

3.1. Bataryaların Tarihsel Gelişimleri

Tarihin bilinen en eski bataryası 1936 yılında Bağdat yakınlarında bir demiryolu kazısı sırasında bulunan Bağdat bataryasıdır (Şekil 3.1). 2000 yıllık bir geçmişe sahip olduğu düşünülen bu batarya, bakır silindir ile çevrili demir bir çubuğun sirke çözeltisi ile çevrelenmesiyle oluşturulmuştur ve yaklaşık 1,1 V üretebilme kapasitesine sahiptir [11].



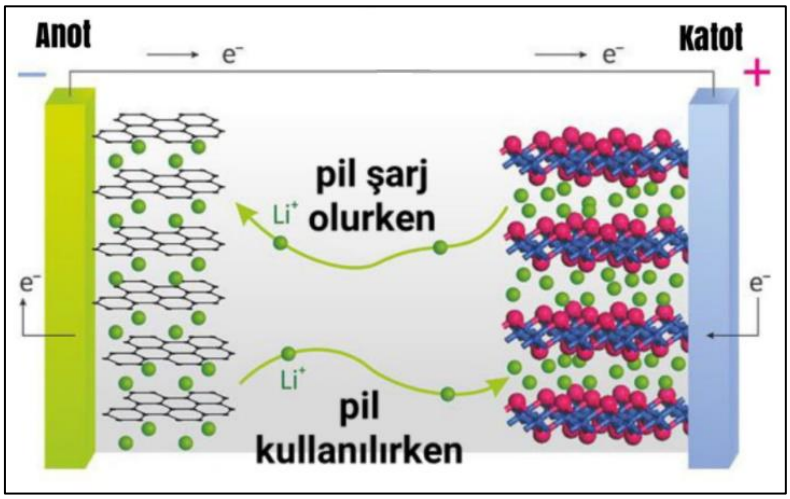
Şekil 3.1. Bağdat bataryası [11]

Günümüzde kullanılan ve sıvıların iletken olarak kullanıldığı ilk elektrik bataryası 1800'lü yıllarda Alessandro Volta tarafından icat edilmiştir. Bu keşif sonrasında pil olarak bilinen ilk voltaik hücre bulunmuş ve çeşitli deneyler sonucunda hücrelerin seri bağlanması ile gerilimin arttırılabileceği keşfedilmiştir. Fransız kimyager John F. Daniell tarafından, günümüzde hala kullanılan kurşun-asit karışımlı ve yeniden şarj edilebilen pil keşfedilmiştir. Bu keşiften yaklaşık 60 yıl sonra Waldmar Junger, katot ve anottaki malzemeleri değiştirerek, katotta nikel anotta kadmiyum elementlerini kullanarak günümüzdeki pillerin temelini oluşturmuştur. Ancak bu pillerin maliyeti çok pahalı olduğu için kullanımı sınırlı kalmıştır. Thomas Edison, Ni elementini Fe ile değiştirerek Ni-Fe olarak adlandırılan pilleri keşfetmiştir. Soğuk hava şartlarında düşük performans göstermesi ve düşük özgül enerji yoğunluğu sebebiyle bu pillerin kullanımı da çok kısa sürmüştür [12].

1991 yılına kadar NiCd pilleri taşınabilir uygulamalarda kullanılan ve yeniden şarj edilebilir tek pil olarak görülmüştür. NiCd pillerin imhası sonucu çevreye çok fazla yeniden dönüştürülemeyen atık oluşturması Avrupa Birliği tarafından 2006/66 EC adlı pil yönetmeliğinin çıkarılmasına sebep olmuştur. 1991 yılında Sony tarafından icat edilen lityum bazlı piller NiCd pillerinin yerini alırken, birçok araştırmacı, lityum bazlı pillerin gelişmesi üzerine çalışmada bulunmuşlardır. Li-ion piller yüksek enerji yoğunluğu, bakım maliyetinin düşük olması ve diğer pillere göre daha kolay şarj edilebilmesi sebebiyle günümüzde neredeyse her alanda kullanılmaktadır. Bölüm 3.2'de günümüz elektrikli taşıtlarında yaygın olarak kullanılan lityum-iyon bazlı pillerin çeşitleri kısaca tanıtılmıştır.

3.2. Lityum-iyon Piller

Lityum-iyon piller tasarımları gereği anot, katot, elektrolit ve ayırıcı olmak üzere dört farklı katmana sahiptirler. Anot malzeme negatif elektrot olarak nitelendirilirken, katot malzeme ise pozitif elektrot olarak nitelendirilir. Katot malzemeleri genelde spinel tarzı yapıda metallerden oluşmaktadır. Anot malzemeleri ise genelde tabakalı yapıya sahiptirler. Bu yapılar sayesinde lityum iyonları şarj/deşarj döngüleri sırasında karşılıklı yer değiştirebilmektedirler [13,14]. Şarj durumunda lityum iyonları katot malzeme tarafında toparlanmaktadır. Deşarj durumunda ise iyonlar anot tarafında toplanmaktadır. Bu yer değiştirme durumuna topotaktik denilmektedir [15]. Şekil 3.2'de lityum-iyon pillerin çalışmasına ait şema gösterilmiştir. Çizelge 3.1'de de günümüzde kullanılan lityum-iyon pillerin genel olarak tabakaları ve işlevleri gösterilmiştir [15].



Şekil 3.2. Lityum-iyon pillerin çalışma mekanizması [14]

Çizelge 3.1. Lityum-iyon pillerin genelleştirilmiş dört tabakası ve işlevleri [15]

Katmanlar	Operasyonlar	Malzeme
Katot	Lityum iyonları deşarj durumunda katot tabakasına doğru hareket ederler	Lityum-metal oksit tozlarından oluşur.
Anot	Lityum iyonları deşarj durumunda anot tabakasından ayrılırlar.	Grafit-karbon tozlarından oluşur
Elektrolit	Lityum iyonların deşarj/şarj durumlarında, geçişleri sağlayan tabaka.	Lityum tuzlarından veya organik çözücülerden oluşur
Ayrıcı	Lityum iyonlarının geçiş sırasında kısa devre yapmasını engeller	Mikro gözenekli membranlardan meydana gelir.

Günümüzde yaygın olarak kullandığımız lityum-ion piller üzerinde ilk çalışmalar 1912'de Lewis tarafından başlatılmıştır. 1970'lere kadar tekrar şarj edilemez olan lityum-ion piller ticari olarak kullanılmaya devam edilmiştir. Ancak teknoloji eksikliği nedeniyle lityumdaki dengesizlikleri stabil hale getiremedikleri için başarısız olunmuştur [15].

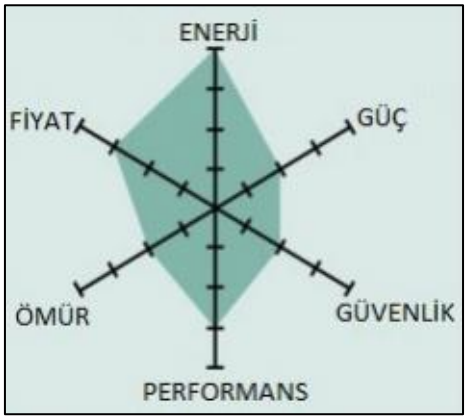
Anot üzerinde kullanılan lityum metali en hafif metal olarak bilinmektedir. Yüksek elektrokimyasal potansiyele sahip olan lityum metalleri yüksek özgül enerji sağlar. 1980'lerin başlarında lityum metalinin anot malzemesi olarak kullanılması çevrim sırasında istenmeyen dendritleri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Dendritler lityum metalinin üzerinden membrana doğru kılcal olarak büyümedir. Büyüyen partiküller membrana nüfuz ederek pile kendi içerisinde kısa devre yaptırır. Hücre sıcaklığı aniden yükselir, lityum metali erime noktasına ulaşır ve ısıl kaçışlara sebep olur. Isıl kaçışlarının sonucunda pil infilak ederek ünitedeki pilleri etkiler ve yangına sebep olabilir. Pazardaki açığı gören Sony şirketi çalışmalarını bu alanda yapmıştır. Lityum-iyon malzemesini kullanan Sony günümüzde kullanılan lityum-iyon pilini keşfetmiştir. Daha güvenli hale getirilen lityum-iyon pilleri günümüzde pek çok uygulamada kullanılmaktadır.

1994 yılında, günümüzde kullanılan 18650 tarz pil üretmenin maliyeti 10 $ iken alınan güç 1,1 mAh civarındaydı. 2000'li yılların başında, gelişen üretim yöntemleri ve çalışmalar sonucu maliyet 3$ dolara kadar indirgenmiş ve alınan güç ise 1,9 mAh'e kadar çıkmıştır.

Günümüzde 18650 tarz pillerden 3,0 mAh üzerinde güç alınır durumuna gelinmiş olup maliyetler yok sayılacak miktarlara kadar indirgenmiştir. Artan enerji yoğunluğu, çevreye zararın git gide düşürülmesi, lityum-iyon pillerin birçok alanda kullanımına yol açmıştır [15].

3.2.1. Lityum kobalt oksit ($LiCoO_2$) piller

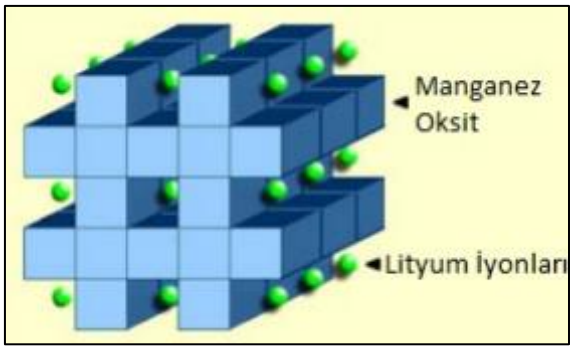
$LiCoO_2$ kimyasal yapısına sahip piller yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu için dizüstü bilgisayarlar, kameralar ve telefonlar için vazgeçilmez bir enerji kaynağı olmuşlardır. Anot malzemesi olarak kobalt oksit kullanılan pilde katot malzemesi olarak grafit karbon kullanılır. Katot tarafında katmanlı yapıya sahip olan pilde, deşarj sırasında lityum iyonları anottan katoda doğru hareket ederler. Lityum-kobalt pillerinin dezavantajları, kısa çevrim döngüsü, termal açıdan dengesizlik ve sınırlı özgül güç kapasitesi olarak sıralanabilir. Çevrim süresini arttırma, maliyeti indirgeme ve güç kapasitesini arttırmak için yapılan çalışmalar üzerine geliştirilen pillerde ise nikel manganez veya alüminyum kullanılmıştır [16]. Şekil 3.3'de lityum kobalt oksit pillerin özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Lityum-kobalt oksit pillerin özellikleri [17]

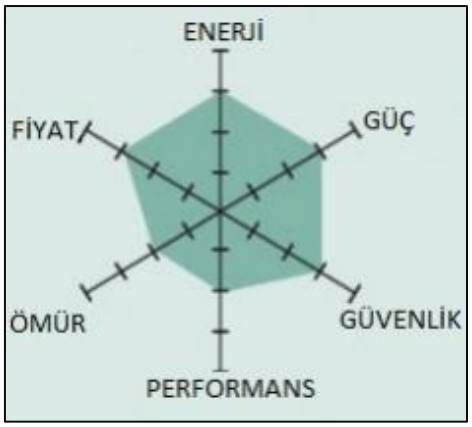
3.2.2. Lityum manganez oksit ($LiMn_2O_4$) piller

İlk olarak 1983 yılında ortaya çıkan bu pil çeşidi, kendisine özgü olan spinel mimarisi elektrottaki akışı hızlandırıp, bataryanın iç direncinin düşürülmesine katkı sağlar. Akım kapasitesi diğer tür pillere göre yüksektir [16]. Şekil 3.4'te pildeki spinel mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Lityum manganez oksidin spinel mimarisi [17]

Spinel mimarisinin tercih edilmesindeki en önemli özelliği termal stabilizesinin yüksek olması ve güvenlik açısından diğer tür pillere göre daha güvenilir olmasıdır. Dezavantajı ise raf ömrünün diğer pil çeşitlerine göre oldukça kısa olmasıdır. Düşük iç dirence sahip olması yüksek akımlarda çalışmasına olanak sağlar. Anlık olarak akım çekimlerinde işlev gösteren bu pil türü elektrikli araçlarda kullanılabilir olarak görülse de raf ömrünün kısa olması dezavantajından kaynaklı tercih edilmemektedir. Şekil 3.5'de bu pillerin özellikleri gösterilmektedir [16].



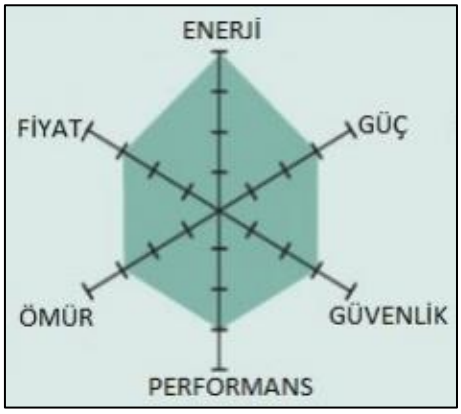
Şekil 3.5. Lityum manganez oksit pillerin özellikleri [17]

3.2.3. Lityum nikel manganez kobalt oksit ($LiNiMnCoO_2$) piller

En iyi lityum pillerden biri olan lityum nikel manganez kobalt oksit pilleri yüksek güç ve termal kararlılık gerektiren durumlar için tasarlanmışlardır. Bu yüzden güç üniteleri ve enerji hücreleri olarak kullanılabilmektedir. Bu pil hücresinin başarılı sayılmasındaki sen önemli etmen nikel ve manganezin bir arada kullanılmasında yatmaktadır. Nikel yüksek özgül enerjiye sahip olmasına rağmen düşük kararlık gösterirken, spinel yapısı ile düşük iç dirence

sahip olabilen manganezin bir arada kullanılması pil açısından optimum özellikler sunmaktadır.

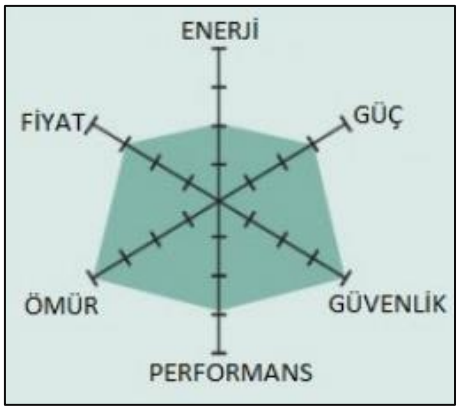
Pil tedarikçileri, kobalt elementinin yüksek maliyete sahip olması nedeniyle nikel bazlı üretilen pilleri tercih etmişlerdir. Nikel bazlı hücrelerin güç yoğunlukları kobalt bazlı hücrelere göre daha yüksek olması, maliyet indirgenmesi ve çevrim ömürlerinin daha uzun olması nikel bazlı pilleri vazgeçilmez konuma getirmiştir [16]. Şekil 3.6'da kobalt bazlı pillerin genel özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Lityum nikel manganez oksit pillerin özellikleri [17]

3.2.4. Lityum demir fosfat ($LiFePO_4$) piller

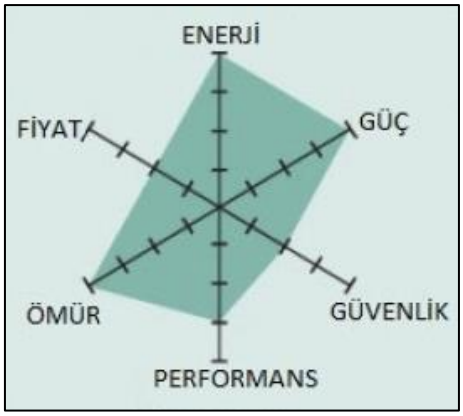
Yeniden şarj edilebilir lityum piller için, katot malzemesinde değişikliğe giden Teksas Üniversitesi araştırmacıları 1996 yılında fosfat elementini katot kısmında kullanmayı denemiştir. Nano ölçekte katot malzemesi olarak fosfat kullanılması düşük iç direnç sağlarken iyi bir kimyasal performans sunmuştur. Piller için en önemli özellik olarak görülen termal kararlılık, bu tarz pillerde yüksektir [16]. Raf ömrünün diğer pillere göre daha yüksek olmasının temel sebebi ise iç direncinin çok düşük olmasıdır. Çoğu pil türü gibi, soğuk ortam sıcaklarında düşük performans gösteren bu tür piller aynı zamanda sıcak ortamlarda saklanması koşulunda servis ömründe düşüşe sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Bu tarz piller genellikle, kurşun asit bazlı akülerin yerini alması için üretilmiştir. Bu tür piller raf ömrü sırasında kendiliğinden deşarj oldukları için zaman içerisinde bataryada eşitsizlikler meydana getirmektedir. Şekil 3.7'de bu pilin özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Lityum demir fosfat pillerin özellikleri [17]

3.2.5. Lityum nikel kobalt alüminyum oksit (LiNiCoAlO2) piller

Günümüzde çok fazla kullanım alanına sahip olmayan bu pil türü NCA olarak da bilinir. Sadece özel uygulamalar için kullanılan pilin piyasaya çıkış tarihi 1999'dur. Özgül enerjisinin ve özgül gücünün yüksek olması, ömrünün diğer bataryalardan daha fazla olmasını sağlar [16]. NMC ile birçok ortak noktası vardır. Kimyasal karışımına alüminyum eklenmesi pilin kararlılığını arttırmıştır. Şekil 3.8'de Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit pillerinin özellikleri gösterilmiştir.

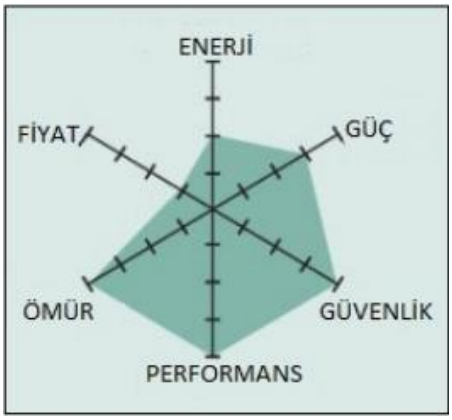


Şekil 3.8. Lityum nikel kobalt alüminyum oksit pillerinin özellikleri [17]

3.2.6. Lityum titanat oksit (Li_2TiO_3)

Bu piller lityum-iyon pillerindeki anot kısmında kullanılan grafit malzemesinin, titanat malzemesi ile değiştirilmesiyle meydana gelmektedir. Titanat, spinel bir yapıda olan pil 1980'lerden beri kullanımda olan pil türüdür. Nominal kapasitesinin 10 katı kadar sürekli

olacak şekilde güç sağlamasının yanında döngü sayısının ise normal lityum iyon pillerine göre daha yüksek olduğu bilinmektedir [16]. Güvenli olarak çalışma imkânı sunan bu tarz pillerde düşük sıcaklıklarda performans kaybı yaşanmaması ve yüksek sıcaklıklarda termal kararlılığı diğer lityum iyon pillerine göre daha iyidir. Bu tarz pillerde maliyetin indirgenememesi ve özgül güç kapasitesinin sadece 65 Wh/kg olması, pillerin yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır. Şekil 3.8'de lityum titanat pilinin özellikleri gösterilmektedir.

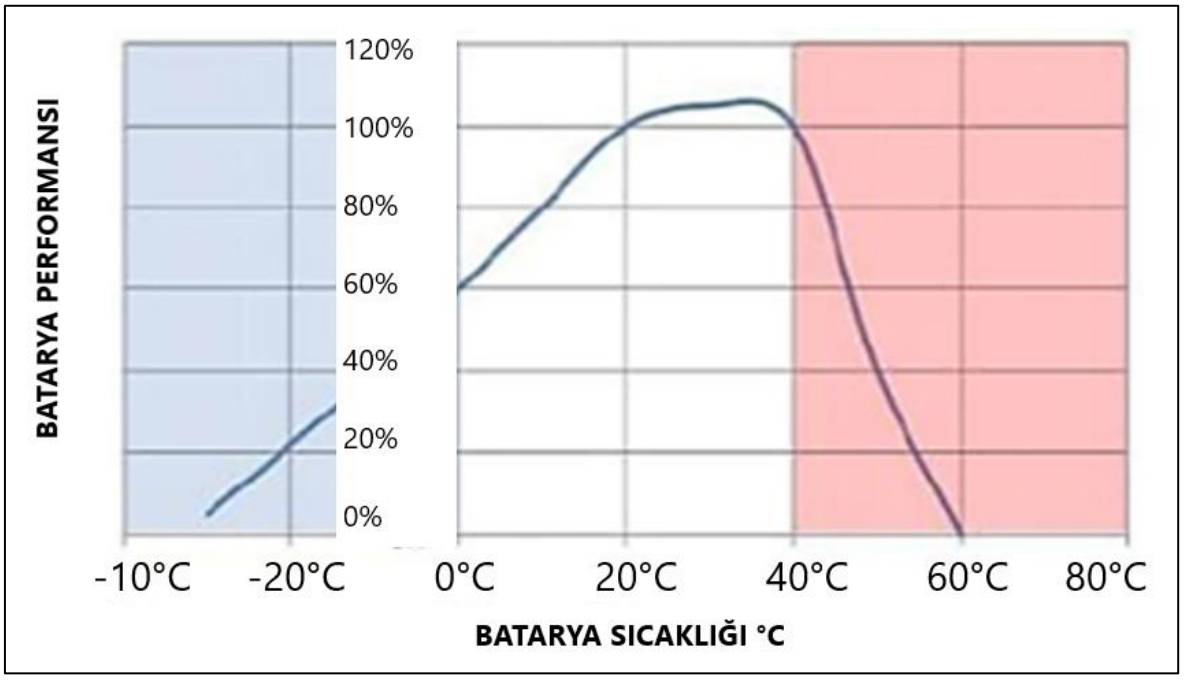


Şekil 3.9. Lityum titanat pillerin özellikleri [17]

4. BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ

4.1. Batarya Termal Yönetim Sisteminin Gerekliliği

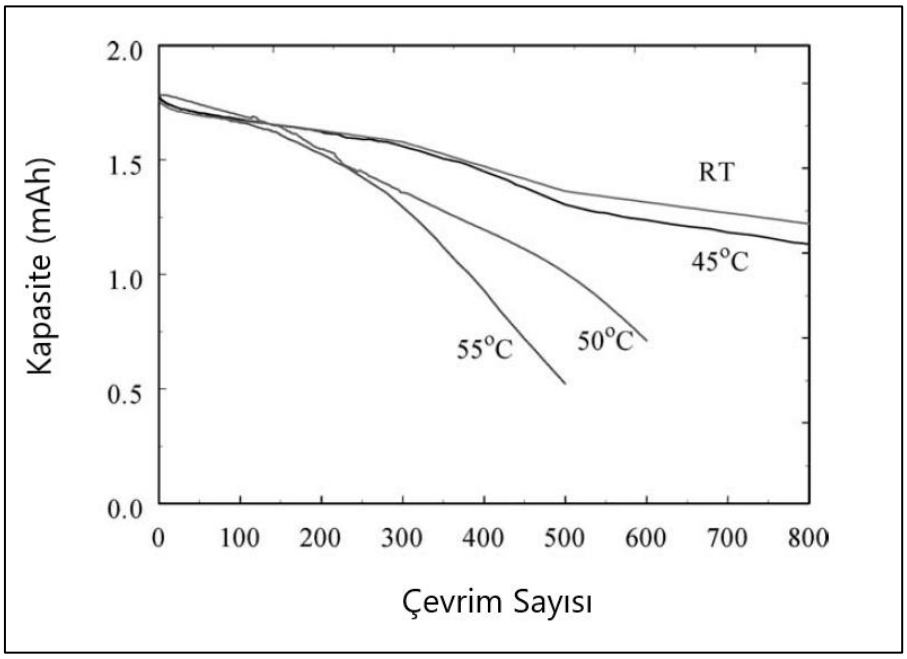
Elektrikli ve hibrit taşıtlar yapıları gereği, lityum-iyon pillerden meydana gelen batarya paketlerini, enerji kaynağı olarak kullanırlar. Lityum-iyon pillerin bireysel performansları aynı zamanda bataryanın ve aracın performansını etkilemektedir. Lityum-iyon pillerin performansı ise hem çevresel sıcaklığa hem de çalışma sıcaklığına bağlıdır. Li ve arkadaşları [18] yaptıkları çalışmada, elektrikli taşıtlarda kullanılan pillerin optimum çalışma sıcaklıklarının 20°C ile 40°C arasında olduğunu belirtmişlerdir. Bu sıcaklıkların altında veya üstünde piller çalışmaya zorlanır ise, piller içerisinden tersinemez tepkimelere sebebiyet verir ve geri dönüşü olmayan sonuçlar meydana gelir. Şekil 4.1'de pilin farklı ortam sıcaklıklarında performans eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Batarya performansı ve sıcaklık arasındaki ilişki [18]

Piller, yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya devam edilirse kapasitelerini çok hızlı kaybedebilirler. Ramadass ve arkadaşları [19] tarafından yapılan kapasite zayıflama analizinde, pil hücresinin 50°C'de 800 döngüden sonra başlangıç kapasitesine göre %60'ından daha fazlasını, 55°C'de 500 döngüden sonra %70'ini kaybettiğini gözlemlemişlerdir. Şekil 4.2'de batarya kapasitesinin sıcaklık ve döngü sayısına bağlı

durumu gösterilmiştir. Batarya soğutma sistemlerinin tasarımlarında dikkat edilmesi gereken iki önemli parametre vardır. Bunlar; ısıl kaçışlar ve pillerin çalıştığı ortam sıcaklıklarıdır. Bu iki parametre bataryanın gücünü, ömrünü ve güvenirliğini belirler. Bataryalarda meydana gelen ısı sistemden çekilmez ise pillerin içerisinde bulunan SEI tabakalar erimeye başlarlar. Erime sonucunda piller içerisinde kısa devre meydana gelir ve bataryanın patlaması söz konusu olabilir.



Şekil 4.2. Sıcaklık ve çevrim sayılarının, batarya kapasitesine etkisi [19]

4.2. Batarya Termal Yönetim Sitemleri

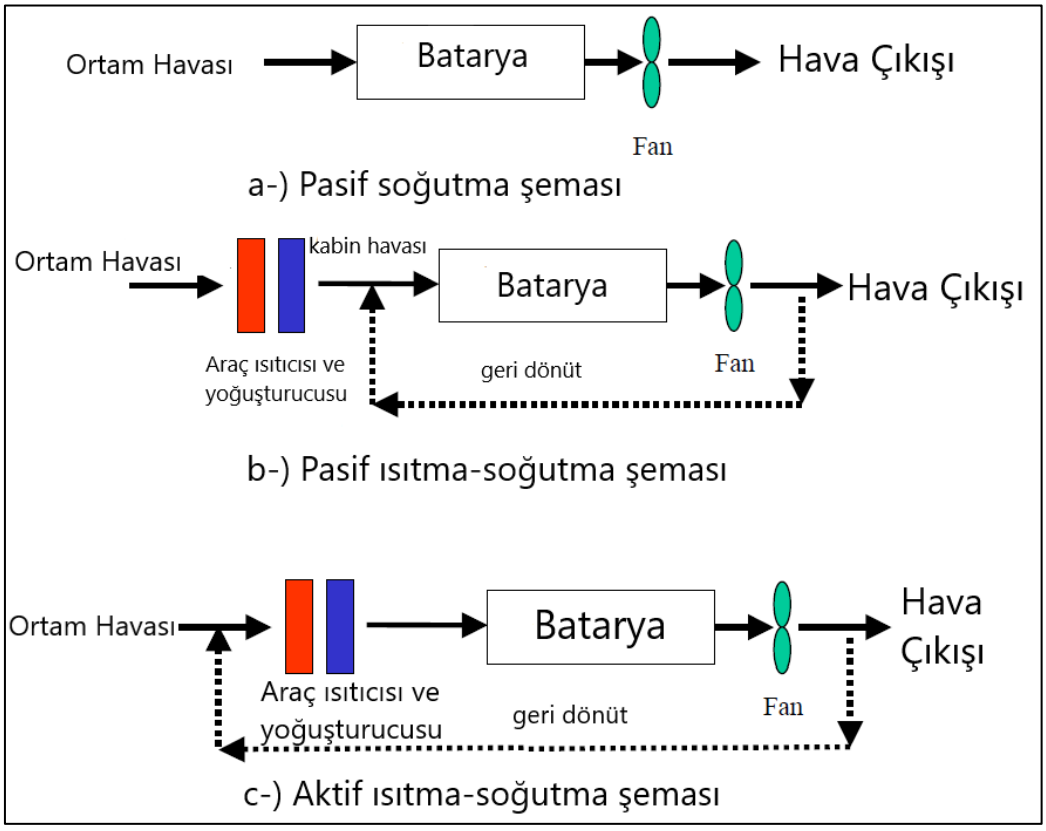
Batarya termal yönetim sistemleri ana yapı olarak, enerji tüketimine, piller ile batarya arasındaki temas yüzeylerine ve ısı transfer ortamına göre sınıflandırırlar [20]. Geleneksel batarya soğutma teknikleri hava ile soğutma, sıvı ile soğutma ve faz değiştiren malzemeler (FDM) kullanılarak soğutma olarak sınıflandırılmaktadır. Bu teknikler dışında soğutma performansını arttırmak için bazı hibrit sistemler de kullanılabilmektedir.

4.2.1. Hava ile soğutma sistemi

Doğal bir soğutma sistemi olan hava ile soğutma sistemi, aktif ve pasif soğutma sistemi olarak iki şekilde sınıflandırabilir. Bu sistemin kullanımındaki en büyük avantajlar; basitlik, düşük maliyet, güvenlik, hafiflik, sızdırmazlık ve kolay bakım yapılabilmesidir. Hava ile

soğutma sistemi, yüksek ortam sıcaklıklarına, büyük batarya paketlerine ve yüksek şarj-deşarj döngülerine uygun bir soğutma sistemi değildir. Hava soğutmalı sistemlerin performansını arttırmak için, fan kullanımı, üfleyici eklentileri, değiştirilmiş hava kanalları ve çeşitli kanatçık yapıları gibi konular birçok araştırmacı tarafından araştırılmaktadır [21].

Aktif soğutma sistemleriyle bataryaların soğuk hava koşullarında da optimum sıcaklıkta çalışması sağlanabilir. Soğuk hava şartlarında, dışardan alınan hava ısıtılarak batarya sistemine iletir. Yani aktif soğutma sistemi, sıcak ve soğuk hava koşullarında bataryayı optimum sıcaklıkta çalıştırmak için tasarlanmıştır. Aktif soğutma sistemin gücü sadece 1 kW ile sınırlıdır [22]. Pasif soğutma sistemleri ise bataryaların sadece sıcak hava koşullarında ve yüksek sıcaklıklarda soğutulması için tasarlanmış sistemlerdir. Soğutma gücü sadece birkaç 100 W ile sınırldır [23]. Şekil 4.3'de aktif ve pasif soğutma sistemine ait çalışma şemaları gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Hava ile aktif ve pasif soğutma şemaları [23]

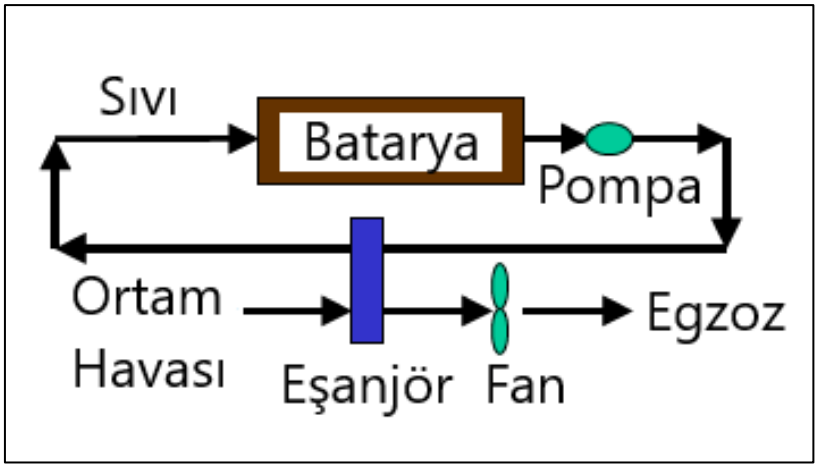
Fan ve arkadaşları [24] hava soğutmalı bir sistemde piller arası mesafenin batarya sıcaklık haritasını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Piller arasındaki mesafeleri 1 mm'den 5 mm'ye kadar değiştirmişlerdir. Çalışma sonucunda 3 mm mesafe aralığı optimum uzaklık olarak

belirlenmiştir. Mohammadian ve arkadaşları [25] tasarladıkları hava soğutmalı batarya sistemini, kendi tasarımları olan kanatçıklı alüminyum plakalarını, kanatçıksız alüminyum plakalar ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak kanatçıklı alüminyum plakalar daha kararlı bir ısıl denge meydana getirmiştir. Park ve arkadaşları [26] ise soğutma kanallarının yönlerini ve şekillerini değiştirerek havalandırmanın etkisini incelemişlerdir. Altı farklı akış çeşidinde gerçekleştirilen çalışmada, zıt yönlü ve havalandırması olan akış şeması en iyi ısıl dengeyi oluşturmuştur. Zhao [27] ve arkadaşları tarafından yapılan derleme çalışmasında pil ısı üretim mekanizmaları ve hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemi mekanizmaları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4.2.2. Sıvı ile soğutma sistemi

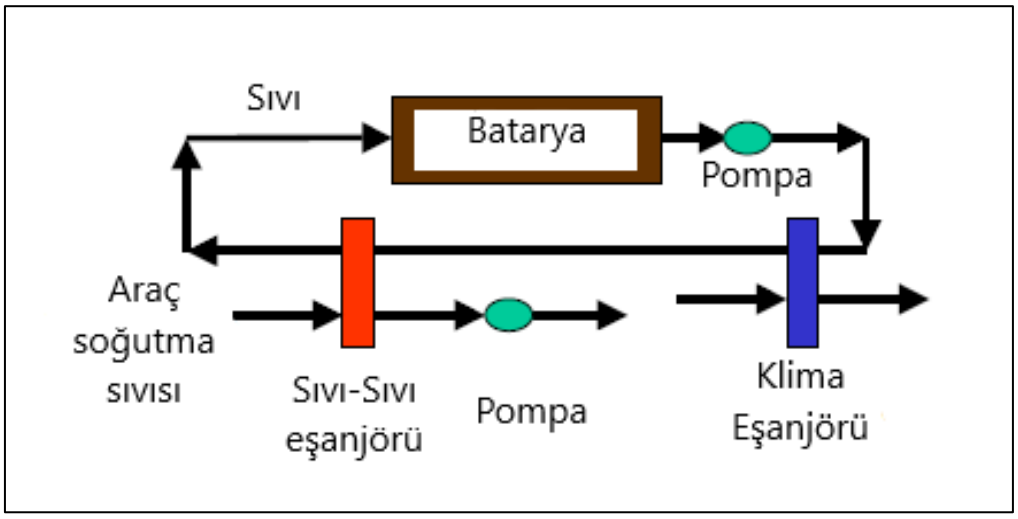
Batarya termal yönetim sistemlerinde temel olarak iki çeşit sıvı soğutma tekniği kullanılmaktadır. Bunlar doğrudan temaslı ve dolaylı temaslı soğutma sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Doğrudan temaslı soğutma sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkan, di-elektrik yani elektrik iletmeyen bir akışkan olmak zorundadır. Bu tür soğutucu akışkanlara örnek olarak mineral yağlar veya çeşitli yöntemlerle geliştirilmiş nano akışkanlar verilebilir. Dolaylı temaslı soğutma sisteminde ise kullanılan soğutucu akışkanın di-elektrik olmasına gerek yoktur. Kullanılan sıvıya bağlı olarak batarya içerisinde soğutucu ceketler, her modül çevresinde dolandırılmış olan borular veya soğutucu, ısıtıcı plakaların içerisinden sıvı geçirilmiş sistemlere literatürde rastlanmaktadır. Dolaylı temas ile tasarlanmış olan sistemlerde nano akışkanlar veya su kullanılmaktadır. Sıvı soğutma sistemi diğer soğutma sistemlerine göre en iyi performansa sahip olan sistem olarak bilinmektedir.

Hava ile soğutma tekniğinde olduğu gibi sıvı ile soğutma sistemleri de aktif ve pasif olarak sınıflandırmaktadır. Pasif sistemlerde sıvıyı soğutan eleman radyatördür. Hava soğutmalı sistemde olduğu gibi bu tarz soğutma sisteminde de soğutucu akışkan sadece bataryadan ısı uzaklaştırmak için kullanılmaktadır. Pasif sistemlerde herhangi bir ısıtma özelliği yoktur. Pasif sistemlerde soğutucu akışkan bir pompa yardımı ile batarya çevresinde sirkülasyona maruz bırakılır. Bu tarz sistemler kapalı devre olarak adlandırılır. Sirkülasyon sırasında batarya içerisinde meydana gelen ısı artışını, soğutucu akışkan absorbe edip radyatör yardımıyla sistemden uzaklaştırır. Pasif sistemlerde soğutma performansı genelde ortam havası ile batarya içerisindeki ortam sıcaklığına bağlıdır. Pasif soğutma sisteminin şeması Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



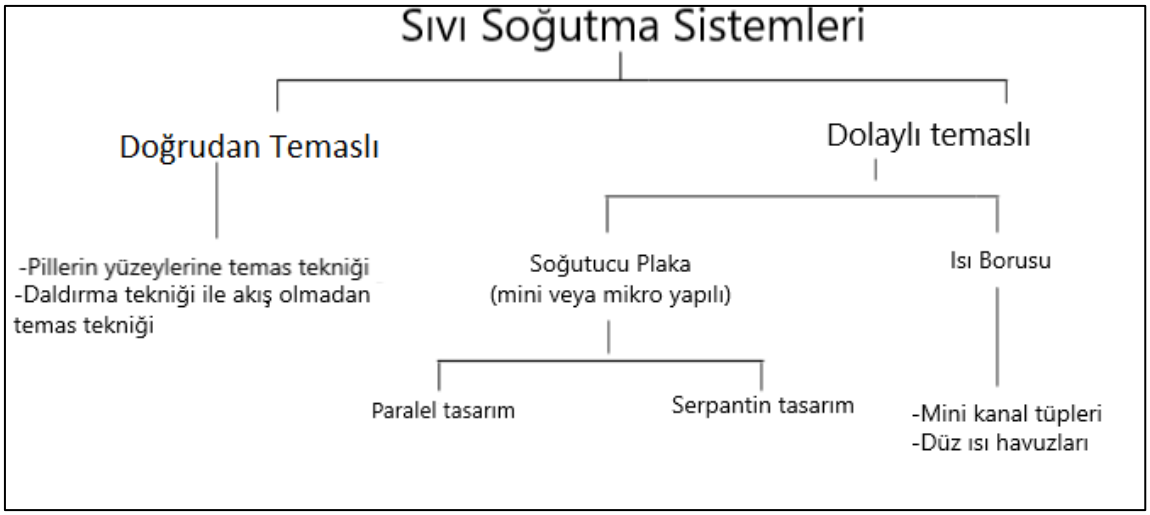
Şekil 4.4. Sıvı ile pasif soğutma sistemi şeması [23]

Aktif soğutma sisteminde ise iki döngü bulunmaktadır. Birincil döngü pasif sistem döngüsüne benzemektedir. İkincil olan ise aslında araç klima çevrimidir. Soğutma sırasında birincil döngüde bulunan radyatör bu döngüde evaporatör olarak görev yapmaktadır. Isıtma sırasında ise dört yollu vana açılarak akış tersine çevrilir ve batarya ısınmaya başlar. Şekil 4.5'de sıvı ile aktif soğutma sisteminin şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Sıvı ile aktif soğutma sistemi şeması [23]

Sıvı soğutma sistemi çeşitleri Şekil 4.6'da detaylı olarak gösterilmiştir.

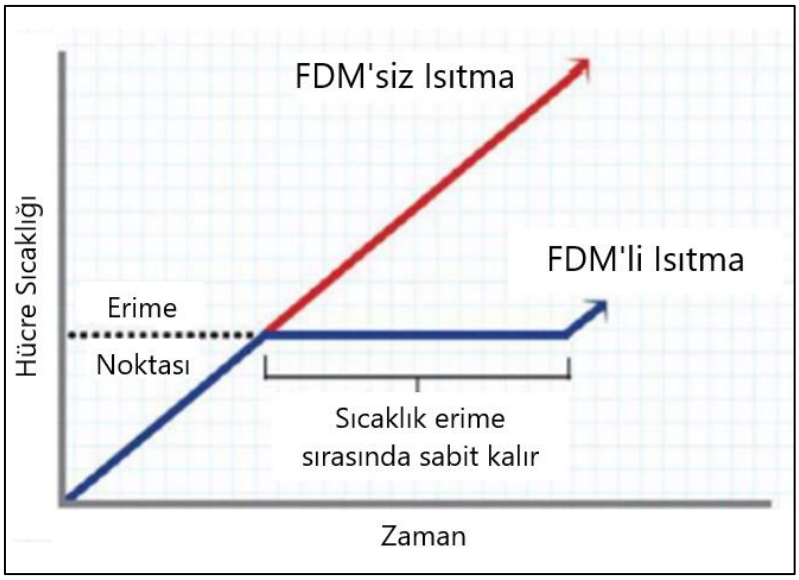


Şekil 4.6. Sıvı soğutma sistemlerinin çeşitleri [28]

Huo ve arkadaşları [29] tarafından tasarımı yapılan batarya sisteminde, dolaylı temas eden sıvı soğutma sistemi kullanılmıştır. Pillerin yüzeylerine temas eden eşanjör yapısına sahip olan sistemde, girişteki soğutucu akışkan hızının ve soğutma kanalı sayısının etkileri araştırılmıştır. Akış kanalı sayısı arttıkça, bataryada daha kararlı bir ısıl dağılım meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Zhao ve arkadaşları [30] tarafından yapılan çalışmada ise dört adet soğutma kanalının batarya sıcaklığını 40 C° altında tutuğu gözlemlenmiştir.

4.2.3. Faz değiştiren malzemeler (FDM) ile soğutma sistemi

Malzeme hal değiştirme sırasında dışarıdan ısı emer ve gizli ısısı maksimum olana kadar bu işlem devam eder. Malzeme dışardan ısı emerken kendi sıcaklığını sabit tutar. Erime noktasında malzeme sabit sıcaklıkta kalır ve aynı zamanda çevreden ciddi miktarda ısı uzaklaştırmış olur. Bu nedenle FDM, batarya termal yönetim sistemlerinde pillerin çevresinde veya ısı iletkeni olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler batarya içerisinde meydana sıcaklık artışlarını kontrol etmede avantajlı bir yöntemdir. Literatürde batarya termal yönetim sistemlerinde FDM kullanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [31-33]. Farid ve arkadaşları [34] PDM malzemelerin herhangi bir kompozit karışımına sahip olmadan ısıl iletkenliklerinin çok düşük olacağını ve soğutma performansı göstermeyeceklerini ortaya koymuşlardır. Şekil 4.7'de FDM'nin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. FDM'nin çalışma prensibi [18]

FDM'ler bazı çalışmalarda, enerji verimliliğini ve soğutma performansını arttırmak için geleneksel hava ve sıvı soğutmalı sistemlere entegre edilmiştir. Parafin ve parafin köpükleri çalışmalarda genel olarak FDM kullanılmaktadır. Parafinlerin ısıl iletim katsayısını arttırmak batarya içerisindeki ısıl dengenin sağlanması hem de maksimum sıcaklığı sabit tutmak için çeşitli kompozit ürünlerin kullanılması gerekmektedir [35].

4.2.4. Hibrit soğutma sistemleri

Geleneksel termal yönetim sistemleri ile batarya paketi istenen sıcaklık aralığında tutulabilmektedir. Ancak tek başına uygulanan soğutma teknikleri ile en iyi sonucu almada bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Bu kısıtlamalar şöyle tanımlanabilir; hava ile soğutma sisteminde yüzeyden olan ısı tanışınım katsayısı çok düşüktür, bu yüzden ısı boruları veya bazı üfleyiciler kullanılmaktadır. Ayrıca ısı transferinin iyileştirilmesi için FDM yöntemi ile birleştirebilir. Sıvı soğutmalı sistemlerde ise kısıtlayıcı etmenler, sıvıların taşıtlar için ölü ağırlık oluşturması, sıvı sirkülasyonu için kullanılacak olan pompanın taşıta parazitik güç oluşturması ve diğer soğutma yöntemlerine göre ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu sebeple araştırmalar sonucunda birden çok tekniğin bir arada kullanıldığı hibrit soğutma sistemleri ortaya çıkmıştır. Hibrit sistemlerde genelde FDM'ler ile sıvı veya hava soğutma tekniği bir arada kullanılmaktadır.

Ling ve arkadaşları tarafından [36] FDM'leri cebri hava soğutma tekniği ile birlikte kullanmıştır. FDM'lerde oluşan ısı toplanmasını hava ile FDM'lerden uzaklaştırmaya çalışmıştır. FDM'ler burada kompozit bir kanatçık olarak işlev görmektedir. Sonuçlar toplam sıcaklığın 50 °C'nin altında ve hücreler arası sıcaklık farkının ise 3 °C'nin altında olduğunu ortaya koymuştur. Buradaki avantaj ise hibrit sistem kullanılıp FDM'lerin ağırlığının azaltılmasıdır.

Zhao ve arkadaşları [37] yaptıkları tasarımda FDM'ler ile sıvı soğutma tekniğini birleştirmişlerdir. Saf kullanılan FDM'ler sıvı soğutmalı sistemlerle kullanılınca bile yeterli soğutmayı gerçekleştirememiştir. Bu yüzden bakır köpüğü kullanarak kompozit FDM'ler üretmişlerdir. Sonuç olarak saf FDM'lerin tekil olarak yeterli soğutma kapasitesine sahip olmadığı ortaya konmuştur.

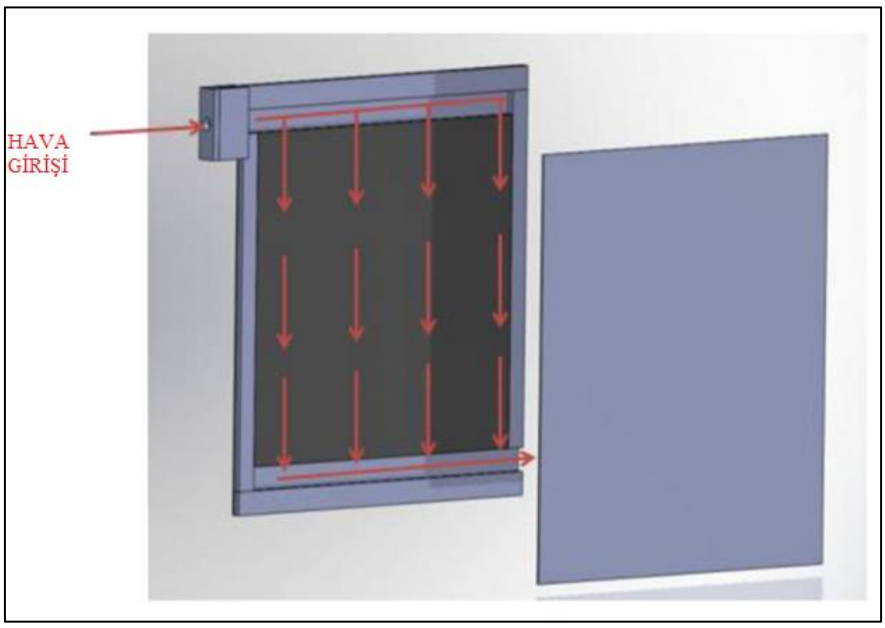
5. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Elektrikli taşıtlarda bataryaların çalışma sıcakları performans açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple batarya sıcaklıklarının belirli bir aralıkta tutulması için kullanılan batarya termal yönetim sistemleri hem batarya hem de elektrikli taşıt performansına etki etmesi sebebiyle özellikle son yıllarda üzerinde en çok çalışılan konulardan biridir. Bataryaların performansı yanında, uzun ömürlü ve güvenilir olması için kullanılan batarya termal yönetim sistemleri üzerinde literatürde yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Sun ve Dixon [38] tarafından yapılan çalışmada, genellikle hibrit taşıtlarda kullanılan ikincil tür olarak adlandırılan, yeniden şarj edilebilir kese tarzı lityum iyon pilleri kullanılarak bir pil paketi tasarlanmıştır. Pilleri basitleştirilmiş elektrot teorisine göre tasarlamış ve kullanılacak olan verileri fiziksel testlerin sonuçlarının regresyon yöntemi kullanarak elde etmişlerdir. Soğutma analizleri sırasında, soğutma kanalı geometrileri de dahil olmak üzere soğutma stratejilerinin etkilerini incelemek için DOE çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalarını gerçekleştirmek için, oluşturdukları simülasyon profilinde, değişken üç boyutlu tasarlanmış pil paketi modeli, kararlı durumda üç boyutlu tasarlanmış pil paketi akış alt modeli ve tek boyutlu tasarlanmış pil paketi ağ alt modeli ile üç simülasyon profilini birleştirerek, gerçeğe uygun bir model tasarlamışladır. Tasarımlarında dikkat ettikleri noktalar ise şöyledir; Soğutma kanalları, soğutma plakası ve batarya paketinin ısıl davranışlarında oluk genişlikleri ve dayanıklılıkları, menzildir. Tasarlanmış olan sistemde, hava giriş kanallarını iki türde, U ve Z olarak incelemişlerdir. Yapılan analiz sonuçlarında, hava kanallarının giriş ve çıkış geometrileri, pillerin toplam sıcaklığındaki önemli bir parametre olduğunu göstermiştir. Akış profillerindeki giriş ve çıkışlarda konik oranı, toplam kararlı bir sıcaklık için önemli bir parametre olarak belirlenmiştir. Pillerin kendileri arasındaki sıcaklık artışı 1,1 °C'ye düşürülüp, toplamda batarya sıcaklığı US06 standardına göre belirtilen maksimum sıcaklığın 8 °C altında tutulmuştur.

Giuliano ve arkadaşları [39] tarafından yapılan çalışmada, lityum titanat kimyasal bileşimine sahip olan yeniden şarj edilebilir piller için bir batarya termal yönetim sisteminin tasarımı yapılmıştır. Ortam havasını batarya ünitesi içerisinde dolaştırıp, ısınan akışkanın ünite dışına atılmasını amaçlayan bir sistem tasarlamışlardır. Isı eşanjörü olarak metal köpük bazlı malzemeler kullanmışlardır. 50 Ah'lik güce sahip batarya ünitelerine standartlara uygun

olarak şarj-deşarj döngülerini elde edebilmek için test uygulamışlardır. Her hücre başına 1100 m/s akışta, 200 A'lik bataryalar için bile sıcaklık artışını 10°C'nin altında tutuğu gözlemlemişlerdir. Şekil 5.1'de Giuliano ve arkadaşları tarafından tasarlanan bir hücre modeli gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Giuliano ve arkadaşları tarafından kullanılan hücre modeli [39]

Fan ve arkadaşları [40] tarafından yapılan çalışmada, elektrikli taşıtlarda kullanılan batarya ünitelerinden yüksek güç istenildiği durumlarda, bataryada kararlı bir ısıl dağılım elde etmeye çalışmışlardır. Tasarlanan modülde, her bir hücresinin iki tarafına eşit mesafede hava kanalları oluşturularak paket program ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılmıştır. 15Ah'lik sekiz adet prizmatik pillerin kimyasal yapısı katot kısmında manganez-oksit, anot tarafında ise grafit olarak belirlenmiştir. 8 adet pil barındıran ünitede, pillerin arasındaki mesafe farkı eşit şekilde olmak üzere ayarlanmıştır. Batarya ünitesinin yanında, sistemde akışı oluşturmak için fan konumlandırılmıştır. Kullanılan prizmatik pillerin termo-fiziksel özellikleri sırasıyla; yoğunluk olarak 2335 kg/m^3, özgül ısı kapasitesi 745 J/kgK ve ısı taşınım katsayısı 27 W/m^{2}K olarak belirlenmiştir. ANSYS 12.0 kullanılan çalışmada 100 000 adet mesh elemanı bulunmaktadır. Piller öncelikle soğutmasız bir ortamda analiz edilmiştir. Toplam sıcaklık farkı 6,53 °C olarak elde edilmiştir. Piller arası mesafenin ve akış hızının, toplam sıcaklık farkına etkisini görmek için 1 mm'den 5 mm'ye kadar piller arası mesafeleri değiştirmişlerdir. Toplamda 20 farklı kombinasyonda analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak; piller arası mesafenin azaltılması ve/veya akış hızının

arttırılması, toplam sıcaklığın düşmesinde önemli bir rol oynamıştır. En uygun birleşim ise piller arası mesafenin 3 mm olarak kabul edildiği ve akış hızının 40,8 m^3/h olduğu durum olarak gözlemlenmiştir.

Afzal ve arkadaşları [41] tarafından yapılan çalışmada, hava soğutmalı sisteme sahip olan bir batarya ünitesinin termal modellemesi ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, sonlu hacim metodu ile gerçekçi akış ve ısı süreçlerinin birleştirilerek, daha kararlı yapıda nümerik bir sistem tasarlamaktır. Çalışmada, Reynolds sayısı, batarya iç ısı üretimi, batarya uzunluk ve genişlik oranı ve batarya ile hava ara yüzündeki taşınım dikkate alınmıştır. Maksimum sıcaklık oluşumu, Nusselt sayısı değişimi, ısı akısı değişimleri, soğutucu sıcaklığı gibi parametreler analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, pillerin uzunluk ve genişlik oranlarının termal performanslarını etkilemediği görülmüştür. Düşük Reynolds sayılarında, pil yüzeyindeki sıcaklıkların düşürülmesi daha kolay olmuştur. Bunun yanında termal gerilmelerden kaçınılması konusunda önemli bir parametre olduğu kanıtlanmıştır. Piller arası soğutucu akışkan hacmi, batarya ve soğutma sıvısı sıcaklığının değişmesinde büyük bir etken olarak görülmüştür. Taşıtlarda kullanılacak olan bataryalar da piller arası mesafe önemli bir hacim parametresi olduğu için, daha yüksek konveksiyon katsayısına sahip bir soğutucu akışkanın kullanılmasının önemli bir etken olduğu gözlemlenmiştir

Wang ve arkadaşları [42] tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklıklarda bataryalarda meydana gelen termal kaçakları en aza indirmek ve termal yönetim sistemlerinin aşırı hacimlerden meydana gelen maliyet artışlarını ortadan kaldırmak için hava soğutmalı bir sistem tasarlamışlardır. Tasarlanan sistemde piller arası boşluklara kanatçık olarak tabir edilen spoilerler yerleştirmişlerdir. İlk aşamada kanatçıkların sayılarının, şekillerinin ve uzunluklarının, bataryada oluşan maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda 16 adet kanatçığa sahip olan tasarım tercih edilmiştir. Kanatçıklı soğutma sistemi, kanatçıklı yapıya sahip olmayan sisteme göre toplam batarya sıcaklığında 3,52 K'lik düşüş sağlamıştır. Çalışmada ayrıca kanatçık şekilleri, piller arası mesafeler ve kanatçıkların uzunlukları incelenmiştir. Soğutma performansı açısından en iyi kanatçık türü parabolik olarak belirtilmiştir. Sonuç olarak, ilk aşamada tasarladıkları sistemi optimize edip, toplamda 6 K'lik düşüş elde etmişlerdir. Batarya hacmi ise 646750 mm^3 azaltılmıştır

Ye ve arkadaşları [43] tarafından yapılan çalışmada, iki adet soğutucu plaka kullanılarak sıvı soğutma sistemine sahip bir batarya termal yönetim sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. 15 adet prizmatik lityum-iyon pil kullanılan tasarımda, pillerin üstlerine ve altlarına temas edecek şekilde soğutucu plakalar yerleştirilmiştir. Soğutucu akışkan olarak su bazlı etilen glikol karışımı kullanılmıştır. Çalışmada piller öncelikli olarak soğutma sistemi olmadan deşarj edilmiş ve doğal konveksiyon ortamına bırakılmıştır. Sıcaklıklar 52 °C olarak ölçülmüştür. Soğutucu plakalardaki akışkanın giriş hızı 0,5 m/s olarak kabul edilip, giriş sıcaklığını ise 25 °C olarak varsaymışlardır. İki farklı soğutucu akışkan yolu tasarlanan sistemde, ortogonal ve ortogonal olmayan sistem karşılaştırılmıştır. Ortogonal test metodolojisi tekniği kullanılan çalışmayla ortogonal olmayan çalışma kıyaslandığında, ortogonal sistemde %16,88'lik basınç düşüşü ve toplam sıcaklıkta %5,24'lik bir düşüş gözlemlenmiştir.

Mbulu ve arkadaşları [44] tarafından yapılan çalışmada, ısı borulu bir soğutma sistemi ile batarya termal yönetim sisteminin tasarımı ve analizleri yapılmıştır. Batarya sistemi iki farklı ısı borusu kombinasyonu ile (L ve I şekilli ısı boruları) 30 W'tan 60 W'a kadar deşarj değerlerinde test edilmiştir. Test sisteminde sırasıyla; pompa, eşanjör, batarya sistemi ve sıvı tankı bulunmaktadır. Isı borularının eşanjör kısımları sırasıyla 0,0167, 0,0333 ve 0,05 kg/s akış hızlarında soğutulmuştur. Sonuç olarak maksimum sıcaklık, akış hızından bağımsız olarak giriş gücünün artmasıyla kademeli olarak yükselmiştir. 60 W giriş gücüne rağmen, tasarlanan sistem maksimum sıcaklığı 60°C'nin altında 55°C'de tutmayı başarmıştır. Giriş gücü arttıkça, piller arası meydana gelen sıcaklık farklılıkları da artmıştır. Tasarlanan sistemde ise bu sıcaklık farklılıkları 5°C'nin altında tutulmuştur. Sonuç olarak, 60 W'ta 2 saat süresince çalıştırılan test düzeneğinde pillerde meydana gelen sıcaklığın %92,18'i ısı boruları sayesinde soğutucu akışkan tarafından uzaklaştırılmıştır.

Buidin ve Mariasiu [45] tarafından çalışmada, batarya paketlerinin sıcaklıklarının sayısal analizlerle elde edilen verilerin doğrulunu arttırmak için bir matematiksel model önerilmektedir. Matematiksel metodun araştırma metodolojisi ise, bir lityum iyon pilin temel davranış parametrelerini gözlemek için karalı halde hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarına ve geçici 1D simülasyonlarına dayandırılmaktadır. Kullanılan sistemde soğutucu akışkan olarak cebri hava kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, sunulan matematiksel modelin yerel sıcaklık değişimlerini daha doğru hesapladığını ve tasarım değişiklerine daha elverişli olduğu kanıtlanmıştır.

Yang ve arkadaşları [46] tarafından yapılan çalışmada, silindirik pillerin batarya içerisindeki konumlandırılması ele alınmıştır. Batarya ünitesi için termal model geliştirilmiş olup, sayısal denklemlerle ve simülasyonlarla birlikte termal model desteklenmiştir. Pillerin boylarına ve enlerine göre aralıklarının soğutma performansları üzerindeki sonuçları, hizalanmış ve kademeli konumlandırmalara sahip pil takımı için analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sabit soğutucu akışkan hızında, bataryada görülen maksimum sıcaklık artışı kademeli konumlandırmalar için boylamsal aralıklarla doğru orantılı olarak gözlemlenmiştir. Analizlerde soğutucu olarak kullanılan havanın giriş sıcaklığı 25°C olarak kabul edilip, giriş hızı ise 0,01326 m^3/s olarak varsayılmıştır. Analizlerini COMSOL 4.2 paket programında gerçekleştiren ekip, türbülans modeli olarak k-e modelini kullanmışlardır. Yapılan analizler sonucunda pillerin boyuna aralığının 34 mm ve enine aralığının 32 mm olduğu durumda soğutma performansının en yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Wang ve arkadaşları [47] yaptıkları çalışmada, geçmişte yapılan cebri hava soğutmalı çalışmaları inceleyerek bataryaların analizlerinde kullanılan termal modelleme yöntemini geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Çalışma termal modelleme yönetimi, CFD analizleri ve pilin hem termal hem de fiziksel özelliklerinin ölçülmesine dayanmaktadır. Geliştirdikleri modelin doğruluğunu ise gerçekleştirmiş oldukları ısı yalıtım deneyleri ile doğrulamışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda hava soğutmalı sistemin, bataryadaki toplam sıcaklığı 40°C'nin altında tutabilmesi için ortam sıcaklığının 20°C ile 35°C arasında olması gerektiğini öne sürmüşlerdir. 35°C üstünde ortam sıcaklıklarında çalışan bataryaları soğutmak için hava akış hızının 1 m/s olması gerekmektedir. Bu durumda sirkülasyon pompası tarafından çok fazla parazit yük oluşacağı için hava ile soğutma sistemi 35°C üstünde uygun bir soğutma performansı sağlamamaktadır. Zorlanmış hava akışı yok ise bataryaların merkezlerinde ısı yoğunlaşması gerçekleşebileceğini yaptıkları çalışmalarda göstermişlerdir.

Zhao ve arkadaşları [48] tarafından yapılan çalışmada, hava soğutma sisteminin ısı transferi açısından detaylı olarak incelemek için silindirik pillerden meydana gelen bir batarya modeli tasarlanmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Çeşitli hava kanalları ve hızları, piller arası mesafeler, hava giriş ve ortam sıcaklıkları, düz bir hattaki pil sayısı ve pillerin fiziksel boyutları çalışmada incelenen parametrelerdir. 18650, 26650 ve 42110 olmak üzere üç farklı silindirik pil ile çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı akışkan yolu tasarlanmış ve çalışmaların sonucunda kendi adlandırmalarına göre tip 2 ve tip 3 soğutucu yolları, hava hızı

düşük iken tip1'e göre daha iyi soğutma performansı göstermişlerdir. Ancak bu fark çok fazla bir fark olmadığı için soğutucu yolu farklılığının bir önem arz etmediğini ortaya koymuşlardır. Piller arası mesafesinin ne çok düşük ve ne çok fazla olması gerektiğine karar vermişlerdir. Optimum piller arası mesafe en fazla 5 mm ve 6 mm olarak gözlemlenmiştir. Hava giriş hızının artması başta bataryanın merkezinde sıcaklık artışına sebebiyet verip sonrasında sıcaklığı düşürdüğünü gözlemlemişlerdir.

Mohammadian ve arkadaşları [49] tarafından yapılan çalışmada, hava soğutmalı bir sistemde akış kanallarının içerisine alüminyum köpükler entegre edilmiştir. Çalışmada üç boyutlu geçici durum simülasyonları gerçekleştirilmiş olup, gözenekli ortamın geçirgenliği ve pillerin şarj durumları gibi parametreler dikkate alınmıştır. Dört farklı metal köpük hacminde değerlendirilen çalışmada, analizlerde ikinci mertebeden geçici akış modeli kullanılmıştır. Çözüm yöntemi olarak ise SIMPLE yöntemi yerine PISO yönetimi kullanılmıştır. PISO çözüm yöntemi SIMPLE'a göre daha hızlı yakınsama kabiliyetine sahiptir. Hava giriş sıcaklığı olarak 27°C olarak kabul edilmiştir. Bataryadan alınabilecek en fazla yük olan 5C değerinde akım çekilmesi sağlanmıştır. Çalışma sonucunda en uygun soğutma performansı, hava kanallarının %70'inin metal köpük ile kaplanıp metal köpüklerin gözenekli yapısının 10^{-7} m olduğu ve geçirgenliğinin 0,85 olduğu durumda elde edilmiştir.

He ve Ma [50] tarafından yapılan çalışmada, aktif olarak sıcaklık kontrolünü sağlayabilecek ve karşılıklı soğutma kanallarına sahip bir batarya modülünün çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle pillerin termal durumlarının incelenmesi için ROM modeli kullanılmış ve pillerin yüzeylerinde ve merkezlerinde meydana çıkan sıcaklıklar elde edilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarını doğrulamak için birtakım deneyler gerçekleştirmişlerdir. Doğrulanan analiz sonuçlarını, pratikte zor veya mümkün olmayan çekirdek merkezlerinin sıcaklıklarını ölçebilecek bir yazılım ortaya çıkarmışlardır. Çalışmalar sonucunda, ortaya çıkan yazılım ve karşılıklı soğutma kanallarına sahip olan bir batarya modülünde sıcaklık dengesizlikleri en aza indirilmiştir.

Lu ve arkadaşları [51] tarafından yapılan çalışmada, gerçek paketleme boyutlarına sahip bir bataryada sıcaklık homojenliğini ve sıcak noktalarının sayısının azaltılması gibi konuları ele almışlardır. Batarya çeşitli hava akış kanalları ile farklı hava giriş hızlarında test edilmiştir. Pillerin üstlerinde ve altlarında 15 mm ve piller arası mesafede 1 mm olacak şekilde akış hacmi oluşturulmuştur. Batarya hava giriş çapı ise 12 mm olarak belirlenmiştir. Hava akış

yolları ise 15 adet ve 59 adet olmak üzere iki farklı çeşitte tasarlanmıştır. İki faklı tasarımın analizleri sonucunda, maksimum sıcaklığın akış kanalı sayısı arttıkça düştüğü gözlemlenmiştir.

Saw ve arkadaşları [52] tarafından yapılan çalışmada, 24 adet 38120 kodlu pilden meydana gelen bir batarya sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan bataryada 24 adet pil, bakır baralar, giriş ve çıkış manifoldları ve 2 adet soğutma kanallarına sahip delikli plakalar bulunmaktadır. Şarj sırasında meydana gelen ısıyı ölçmek için bir kalorimetrede bulunmaktadır. Batarya karalı bir yapıda kabul edilip, değişken hava giriş hızlarında simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Nusselt ve Reynolds sayıları ile geliştirilen korelasyon, literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Geliştirdikleri korelasyon literatürdeki diğer korelasyonlarla aynı eğilimi göstermiştir. Geliştirilmiş olan korelasyon, pillerin geçici durumlarda farklı deşarj hızlarında termal performanslarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Sayısal model, hava soğutma deneyleri ile doğrulanmıştır. 5C akım değerinde şarj edilen bataryayı soğutmak için hava ile soğutma sisteminin yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

Chen ve arkadaşları [53] tarafından yapılan çalışmada, hava akışının birbirine paralel olan batarya, hava ile soğutma performansını iyileştirmek için piller arası mesafe parametresini incelemişlerdir. Havanın soğutucu kanallardaki hızlarını hesaplamak için akış direnci ağ modeli sunulmuştur. Isı transferi modeli ile akış direnci ağ modeli birlikte kullanılarak, termal modelin optimizasyon stratejisi ortaya çıkartılmıştır. Optimizasyon stratejisi sayesinde piller arası mesafenin birkaç kez ayarlanması ile kesin sonuçların elde edilebileceği kanıtlamıştır. Optimizasyon batarya karalı haldeyken yapılmış olsa bile geçici durumlar içinde çözüm sunabileceğini yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkartılmıştır. 4C ve 5C deşarj değerlerinde optimizasyon ile 1,5 K ve 1,8 K kadar daha düşük sıcaklığa ulaşılmıştır. Sonuçlar optimizasyondan sonra iyileştirme oranlarının %39 ve %37 olarak göstermiştir.

Huo ve arkadaşları [29] tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan yeniden şarj edilebilir bir adet prizmatik hücre kullanarak, üç boyutlu soğutma sistemi tasarlanmıştır. Çalışmada; kanal sayısı, akış yönü, kütlesel akış hızı ve ortam sıcaklığı parametrelerini değiştirerek, deşarj sırasında hücrede meydana gelen sıcaklık artışı ve sıcaklık dağılımı araştırılmıştır. Pil kapasitesi 7000 mAh olarak kabul edilmiştir. Çalışmada kullanılan soğutucu plaka, hücre ile temas edecek şekilde hücrenin aktif bölgesi boyutunda

oluşturulmuştur. Çözüm kolaylığı açısından soğutucu plaka ve hücre, homojen ve izotropik olarak kabul edilmiş olup, hücreyi 5C değerinde ve 720 s deşarj edilmiştir. Maksimum kütlesel akış hızı 10-3 olan çalışmada, hesaplanan 419,79 Reynolds sayısı doğrultusunda, akış modeli laminar olarak kabul edilmiştir. Kullanılan akışkanın, soğutucu plakanın ve hücrenin özellikleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Huo ve arkadaşları tarafından kullanılan akışkan, plaka ve hücrenin özellikleri [29]

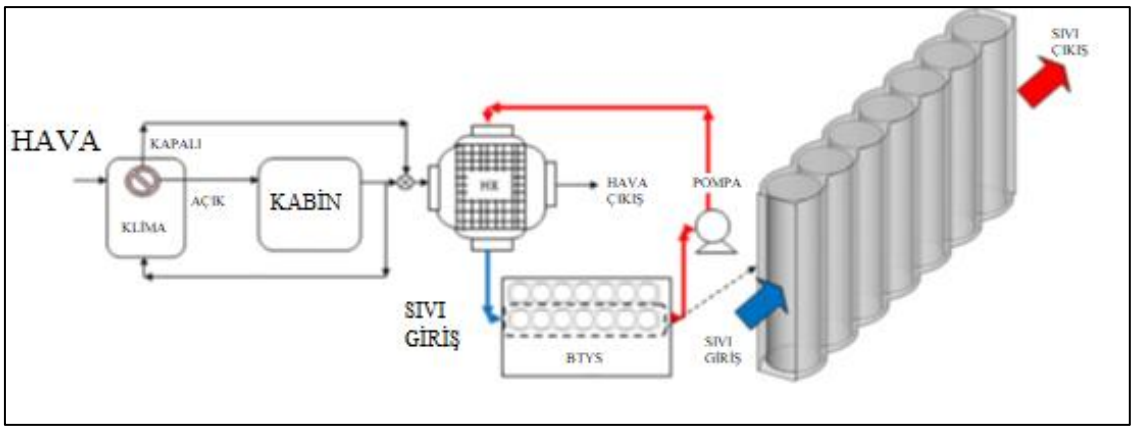
Malzeme	ρ (kg/m^3)	C_p (J/kgK)	k (W/mK)	μ (kg/ms)
Su	998,2	4182	0,6	0,001003
Alüminyum	2719	871	202,4	-
Hücre	2500	1000	3	

Çalışmada soğutucu kanalların sayısı, soğutucu akışkan yönü ve kütlesel akış debisinin etkileri incelenmiştir. Yeniden şarj edilebilir pil hücresi öncellikle doğal taşınım ortamında 5C deşarj değerinde 720 boyunca çalıştırılmıştır. Deşarj süresi sonunda pilde meydana gelen maksimum sıcaklık ve bölgesel sıcaklık farkları sırasıyla 77,33 °C ve 13,9 °C olarak gözlemlenmiştir. Sonrasında yapılan çalışmalar, bu sonuçlar ile kıyaslanmıştır. İlk çalışma olan, soğutucu kanalların 1 adet kanaldan 6 adet kanala arttırılıp, pil üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, sabit kütlesel akış debisinde ve 25°C'lik giriş sıcaklığında, 6 adet kanala sahip olan soğutucu plaka en iyi soğutma performansı göstermiştir. Sonraki aşamada inceleme amaçlı 6 adet kanallı soğutucu plaka tercih edilmiştir. Bu aşamada soğutucu kanalların sayısı sabit tutulup, akışların yönleri değiştirilmiştir. Sonuç olarak, sabit kütlesel akış debisinde ve soğutucu kanal sayısında, akışların yönlerinin değiştirilmesi önemli ölçüde değişikliğe sebep vermediği için, sonraki aşama için akış yönü aynı yöne doğru olan sistem seçilmiştir. Kütlesel akış debisinin arttırıldığı ve diğer parametrelerin sabit tutulduğu aşamada, kütlesel akış debisinin arttırılması belirli bir noktaya kadar soğutma performansını olumlu etkilese de pillerin çalışma verimliliklerini düşürdüğü için olumsuz etki yaratmıştır. Optimum akış hızı 5.10^{-4} m/s olarak hesaplamışladır.

Cao ve arkadaşları [54] tarafından, elektrikli taşıtlarda batarya soğutma sistemi performansını iyileştirmeye yönelik bir çalışma yapılmıştır. Tam ölçekli elektrikli araç bataryasını (5664 adet 18650 tip lityum iyon batarya), yeni bir termal modelin geliştirilmesi için, şarj/deşarj oranları ve soğutucu akışkan hızları açısından ele almışlardır. Batarya

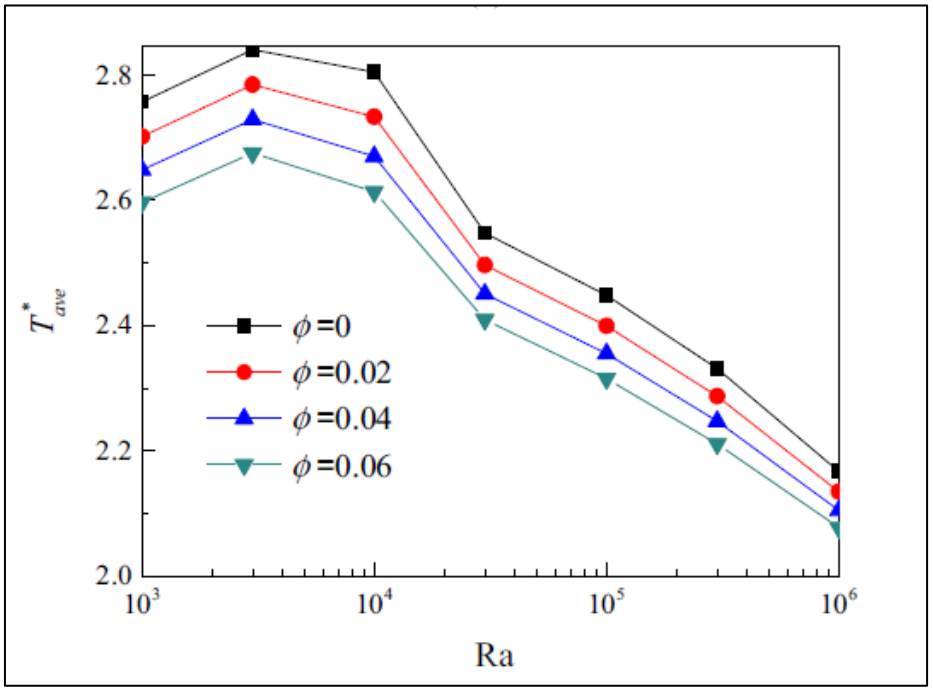
tarafından oluşturulan ısı, deneysel ölçümlere dayandırılarak modellenmiştir. Batarya modeline benzer tasarlanan deney düzeneğinde 180 adet lityum iyon pil bulunmaktadır. Sabit akış debisinde, farklı C katsayılarında şarj ve deşarj döngüleri gözlemlenmiştir. Çalışmada kullanılan batarya sistemi 22 adet modül içermektedir. Her bir modül 96S59P şeklinde oluşturulmuştur. Değişken şarj ve deşarj C katsayılarında denenmiş olan sistem 1C deşarj / 0,5C şarj işlemi sırasında 18 L/dak akış debisinde, ısıl dağılım açısından iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Yüksek şarj ve deşarj oranları batarya ısıl dağılımını kötü etkilediği bulunmuştur.

Jilte ve arkadaşları [55] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki farklı soğutma sistemi tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Sıvı dolu batarya soğutma sistemi ve sıvı sirkülasyonlu batarya soğutma sistemleri tasarlanmıştır. Analize elektrikli taşıtlarda bulunan klima ünitesi de dahil edilip 2C ve 4C akım çekim değerlerinde yükler uygulanmıştır. Soğutma sistemlerinde kullanılan sıvılar hem su hem de nano-akışkan olarak seçilmiştir. Tasarlanan iki farklı batarya soğutma sistemi için hava beslemeleri iki başlık altında incelenmiştir. İlk olarak klima kapalı konumda iken ortam sıcaklığı 35 °C, ikinci olarak ise klima açık konumda iken ortam sıcaklığı 30°C olarak alınmıştır. Çalışma sonuçları batarya soğutma sistemlerinde nano-akışkan olarak Al_2O_3 kullanmanın, batarya toplam sıcaklığında düşüşe sebep olup ve hücreler arası sıcaklık farkını 5-6°C arasında düşürdüğünü göstermektedir. Sistemin dezavantajı ise batarya sistemden çıkan soğutma sıvısının araç içindeki hava ile soğutulmasıdır.



Şekil 5.2. Jilte ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmanın tasarımı [55]

Wu ve Rao [56] tarafından yapılan çalışmada, batarya soğutma sistemlerinde kullanılan soğutma yöntemlerini geliştirmek için su bazlı Cu karışımına sahip nano-akışkan sıvısı kullanılmıştır. Nümerik olarak incelenen sistemde çözüm yöntemi olarak Lattice Boltzman kullanılmıştır. Sıradan HAD çözüm tekniklerine göre Lattice Boltzman çözüm yöntemi karmaşık sınır koşulları ve yüksek düzeyde paralel hesaplama açısından daha ileri bir teknik olduğu için tercih edilmiştir. Tasarlanan sistemin doğruluğunu kanıtlamak amaçlı, içi boş bir silindirin yüzeyine eşit şekilde dağılmış bir ısı sınıra sahip modelin çözümlemesi yapılmıştır. Farklı hacim fraksiyonlarında (%0'dan 6%'ya kadar) ve farklı Rayleigh sayılarında (103'ten 106'ya kadar) soğutma sistemin soğutma performansı incelenmiştir. Nano akışkanın sisteme karıştırılması durumunda %6,5 oranında sistemin sıcaklığını düşürdüğü bulunmuştur.



Şekil 5.3. Rayleigh sayısı ve hacimsel nano akışkan oranın sıcaklık üzerine etkisi [56]

Qian ve arkadaşları [57] tarafından yapılan çalışmada, mikro kanallara sahip soğutucu plakalar kullanılarak sıvı ile soğutma sistemi tasarlamışlardır. Çalışmada, bataryanın maksimum sıcaklığını kontrol altında tutmak için kanal sayısı, giriş kütle akış hızı, akış yönü, kanallarının genişliği gibi parametreler değerlendirilmiştir. Batarya paketinden çekilen akım değerini ise 5C olarak kabul etmişlerdir. İlk etapta sabit 0,001 kg/s akış hızında kanal sayılarının batarya içerisindeki maksimum sıcaklığa olan etkisini incelemek için 2 kanallı yapıdan 7 kanallı yapıya kadar analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analizler sonucu 5

kanaldan sonrasında sistem sıcaklığı sabit sabit kalmıştır. 5 kanallı yapı sabit giriş kütle akış hızında optimum kabul edilmiştir. 5 kanallı yapıdaki sistemde farklı giriş kütle akış hızlarında (0,0001 kg/s, 0,0002 kg/s, 0,001 kg/s ve 0,002 kg/s) analizler gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlar 0,002 kg/s giriş kütle hızının daha kararlı bir yapıda olduğunu göstermiştir. Son olarak, akış yönlerinin değiştirilmesi ile çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmaların sonucunda 5 mikro kanallı yapıda, 0,002 kg/s'deki giriş kütle hızıyla ve çapraz akış yöntemleri birleştirilince optimum batarya soğutma sistemi elde edilebileceğini kanıtlamışlardır.

Yang ve arkadaşları [58] tarafından yapılan çalışmada, sıvı soğutmalı bir batarya sisteminde, akışkan olarak sıvı metal kullanılmış ve sonuçlar su ile karşılaştırılmıştır. Sıvı metal kullanılan sistemin soğutma kapasitesini, pompadan çektiği gücü ve batarya içi maksimum sıcaklığa olan etkilerini görmek için matematiksel analiz ve sayısal simülasyonlar yapmışladır. Sıvı metal soğutucu, normal su soğutmalı sisteme göre 3C deşarj değerinde, 0,1 m/s giriş hızında 2,3°C daha iyi soğutma performansı göstermiştir. Kullanılan soğutucunun dezavantajı ise yoğunluğunun, suyun yoğunluğundan 6 kat daha fazla olmasıdır. Yoğunluktan kaynaklı meydana gelen pompa gücünün artışı da dikkate alınmalıdır

Tong ve arkadaşları [59] bi-polar yapıda olan bataryanın sıvı soğutma sistemi ile aktif termal yönetim sisteminin çalışma ve tasarım parametreleri üzerine çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında şarj değerleri ve enerji korunumu gibi parametreleri göz önünde bulundurmuşlardır. Çalışmalarına soğutmalı ve soğutmasız sistemin analizlerini yaparak başlamışlardır. Pil sayıları 45,22 ve 7 batarya paketlerini 1C, 2C, 5C deşarj değerlerinde analizlerini koşmuşlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda bataryadaki pil sayısı arttıkça, batarya üzerindeki ortalama sıcaklıkta da artış görülmüştür. Soğutma sıvısının hızının arttırılması ve soğutma sıvı plaka kalınlığının arttırılması batarya üzerindeki ortalama sıcaklığın ve yerel sıcakların düzensizliğini en aza indirebileceğini bulmuşlardır. Ancak bu parametrelerin değiştirilmesi pompa tarafından kullanılan güçte de artış yaratacağını ortaya çıkarmışlardır

Basu ve arkadaşları [60] tarafından yapılan çalışmada, tasarlamış oldukları sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sisteminde farklı soğutucu akış hızlarının ve farklı deşarj akımlarının batarya paketinin maksimum sıcaklığına olan etkileri incelenmiştir. Tasarladıkları sistemde pillere doğrudan temaslı halde bulunan alüminyumdan yapılmış baralar montajlanmıştır.

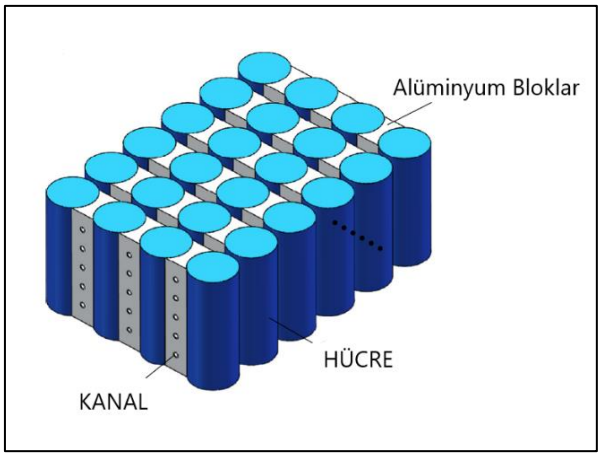
Alüminyum baralardan ısıyı uzaklaştırmak için iki taraflarında soğutucu plakalar bulunmaktadır. Piller ve bakır baralar arasındaki temas direncini de göz önünde bulundurmuşlardır. Çalışmalarını deneysel yöntem ile de valide etmişlerdir. Akışkan olarak su kullanılan sistemde, batarya deşarj oranı 0,9C olarak kabul edilmiştir. Soğutucu akışkan hızları 0,2 m/s, 0,02 ve 0,01 m/s olarak belirlenmiştir. Tasarlanan sistemin 0,01 m/s gibi çok düşük akış hızlarında bile batarya maksimum sıcaklığının 40°C'nin altında tutulduğu görülmüştür. Alüminyum baralar ile piller arasındaki temas yüzeyi dikkate alınmış olan çalışmada, yüzeyler arasında direnç olmayan, yüzeyler arası yarı direnç olan ve yüzeyler arası direnç varsayılarak üç durum göz önüne alınmıştır. Gerçek koşullarda yani yüzeyler arası temas direncinin varsayıldığı sistemde, toplam batarya sıcaklığı 4 K daha fazla bulunmuştur. Elde ettikleri teorik analiz sonuçlarını, hazırlamış oldukları test düzenekleri ile karşılaştırıp %90 oranında doğruluk elde etmişlerdir. Tasarlanan sistemin elektrikli bir taşıt için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Zhao ve arkadaşları [61] mikro kanallı yapıya sahip soğutucu plakalar kullanılarak bir batarya termal yönetim sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan batarya termal yönetim sisteminde 42210 türü piller kullanılmış olup, soğutma sıvısı olarak su kullanılmıştır. Çalışmalarında mikro kanal sayılarının, kütle akış hızlarının, akış doğrultularının ve sıvı girişindeki boyut farklılıklarının termal performansa etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, 4 kanallı yapıda bile 10^{-3} kg/s kütlesel akış hızında, bataryadaki maksimum sıcaklık 40°C'nin altında tutulmuştur. Kanal sayılarının artışı, maksimum sıcaklığın düşüşüne katkı sağlamıştır. Ancak 8 kanaldan fazla yapıya sahip olan tasarımlarda maksimum sıcaklık farkı 1°C olduğu için, 8 kanallı yapı optimum tasarım olarak seçilmiştir. Giriş kütle hızı sabit tutulduğunda, sıvı girişindeki boyutların arttırılması, başlangıçta sıcaklığı düşürse de batarya boyunca soğutma performansı azalmıştır. Akış hızının attırılması ise, kutuplardaki sıcaklık farklılıkları çok fazla olan silindirik pillerde, yerel sıcaklık farklılıklarını 5°C'nin altında tutmayı başaramamıştır.

Lan ve arkadaşları [62] mikro kanallı yapıya sahip olan tasarladıkları sistemi, farklı deşarj değerlerinde, tek bir prizmatik lityum-iyon hücresi üzerinde kullanılmıştır. Çeşitli akış hızlarında ve konfigürasyonlarında termal yönetim sisteminin performansını araştırmak için parametrik çalışmalar yapmışlardır. 1C deşarj değerinde, 4 farklı mikro kanallı yapıya sahip olan termal yönetim sistemi, farklı sıvı akış yönlerindeki analizleri yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda, 1C deşarj değerinde 0,20 L/dak'da maksimum sıcaklığın 27,81°C'de tutulduğu

gözlemlenmiştir. 1,5C deşarj akım değerinde 0,80 L/dak'da maksimum sıcaklığın 27,94°C olduğu gözlemlenmiştir. Akım değeri 2C olduğunda ise, akış hızını 1 L/dak'ya çıkarmak bataryadaki maksimum sıcaklığın 28,27°C'de tutulmasını sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan sistemin bir elektrikli taşıtta kullanabileceğini ortaya koymuştur.

Rao ve arkadaşları [63] tarafından yapılan çalışmada, sıvı soğutmalı sisteme sahip batarya ünitesinin ANSYS programı kullanılarak termal karakteristikleri incelenmiştir. Tasarladıkları sistemde, mikro kanallı yapıda alüminyum blokları bulunmaktadır (Şekil 5.4). Bu bloklar piller arasına yerleştirilmiştir. Alüminyum bloklar farklı uzunluklarda tasarlanıp, blokların uzunluklarının ve farklı akışkan giriş hızlarında bataryadaki maksimum sıcaklığın nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Alüminyum blokların piller ile temas yüzeylerini iki farklı türde; sabit ve değişken olmak üzere incelemişlerdir. Çalışmada 26650 tür pil kullanmış olup 3C deşarj değerinde analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Temas yüzeyleri sırasıyla 9, 12, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23 ve 24 mm olarak kabul edilmiştir. Çalışmada verilen formüle göre analizler K=1, K=2 ve K=3 olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. K=1 iken, batarya temas yüzeyi uzunlukları 19, 20, 21, 22, 23 ve 24 mm olarak hesaplanmıştır. K=2 iken, batarya temas yüzeyi uzunlukları 14, 16, 18, 20, 22 ve 24 mm olarak kabul edilmiştir. K=3 iken, batarya temas yüzeyi uzunlukları 9, 12, 15, 18, 21 ve 24 mm olarak kabul edilmiştir. İlk aşama olarak piller ile alüminyum bloklar arasındaki temas yüzeyleri her pil için sabit kabul edilmiş ve 0,5 m/s, 0,1 m/s, 0,2 m/s giriş hızlarına sahip soğutucu akışkanlarla analizlerini koşmuşlardır. İkinci aşama olarak, piller ile alüminyum bloklar arasındaki temas yüzeyleri her pil için farklı kabul edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, maksimum sıcaklığın temas yüzeylerinin uzunlukları ile ve aynı zamanda akışkanın giriş hızı ile doğrudan bağlantılı olduğu bulunmuştur. Toplam sistem ağırlığı ve pompa gücü hesaba katıldığında, değişken temaslı yüzeye sahip batarya sistemi en az sıcaklık artışına maruz kalmıştır. Uzunluğun 24 mm olarak kabul edildiği durumda, K=3 iken, toplam sıcaklık %28 daha az ölçülmüş olup sistem ağırlığında ise %47'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. K=3 olduğu durumun optimum durum olduğu kanıtlanmıştır.

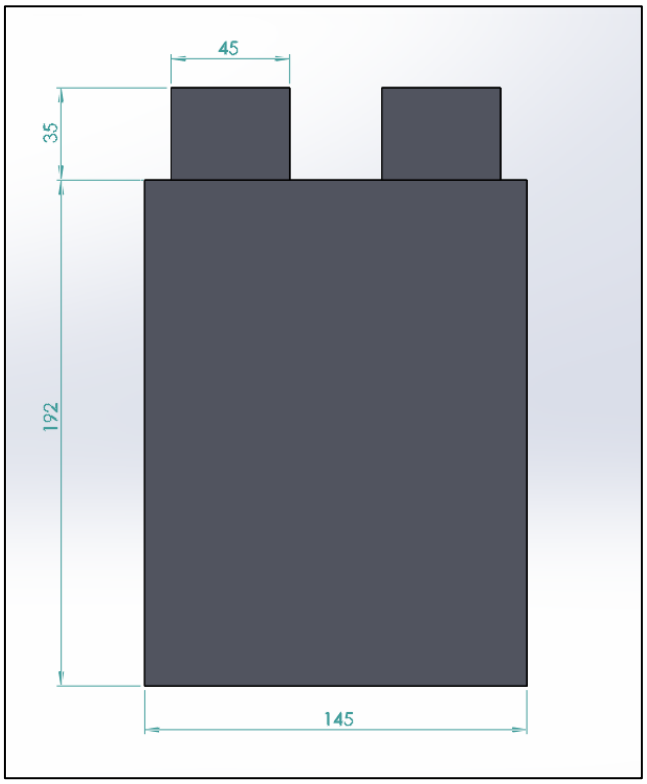


Şekil 5.4 Rao ve arkadaşları tarafından tasarlanan sistem [63]

6. BTYS TASARIMI VE ANALİZLERİ

6.1. Batarya Termal Yönetim Sisteminin Tasarımı

Bu tez çalışmasında, 5 adet prizmatik tip $LiMn_2O_4$ pilden meydana gelen bir batarya modülü sisteminin tasarımı ve termal yönetimi için analizleri yapılmıştır. Batarya modülünü oluşturan prizmatik pillerin tekil olarak boyutları 192 mm x 145 mm x 5 mm olarak tasarlanmış ve her bir pilin nominal voltaj değeri 3,7 V olarak kabul edilmiştir. Batarya modülünün üç boyutlu çizimleri SOLIDWORKS 2017 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Batarya modülünün termal analizlerini gerçekleştirmek için ANSYS 19 R3 programının FLUENT paketi kullanılmıştır. Şekil 6.1'de tekil bir pilin şekli ve boyutları görülmektedir. Tasarlanan batarya modülünde koruma kasası kullanılmamış olup, spiral yapıda olan pil içi geometrileri yerine düz bir membran gibi tasarım yapılmıştır [64-66].



Şekil 6.1. Tasarımı yapılan prizmatik pilin boyutları

ANSYS programında batarya termal yönetim sistemi analizleri için üç modül bulunmaktadır. Bunlar, Newman 2D, NTGK ve ECM modelleridir. Newman 2D modeli, Newman ve arkadaşları [67] tarafından geliştirilmiştir. Gözenekli elektrot ve konsantre

çözelti teorileri ile tabanı fiziğe dayanan bir batarya çözüm modelidir. Geliştirilen model Li-ion geçişlerini gerçek koşullara çok yakın olacak şekilde simüle edebilmektedir. Bu model diğer modellere göre en kapsamlı fizik tabanına sahip modeldir. Çalışmada bu modelin tercih edilmemesindeki temel sebep ise literatüre deki bazı parametrelerin verilmemesi ve aynı tür pilin kullanılmamasıdır.

ECM modeli, eşdeğer devre modeli olarak adlandırılmaktadır. ECM, batarya içerisinde bulunan pillerin elektriksel davranışlarını bir elektrik devresine dönüştürerek çözümlemelerini gerçekleştirmektedir. Devrede üç direnç ve iki kapasitör bulunmaktadır [68]. Yarı deneysel bir modeldir. Pillerin dinamik davranışını çözümlemesi sınırlıdır.

NTGK modeli, Newman ve arkadaşları [67,69] tarafından geliştirilmiş ampirik bir modeldir. NTGK modeli diğer modellere göre daha basit ve maliyet açısından daha ucuz olup, yarı deneysel elektrokimyasal çözümleme modeli olarak piyasaya çıkmıştır. Model girdisi, diğer modellere göre en az olan çözümleme yöntemidir. Pillerin iç yapılarındaki katmanlardan kaynaklı atlamalı çözüm yeteneği yerine, pili tek bir katman olarak görüp çözümlerini bu yönde gerçekleştirmektedir. NTGK modeli, dinamik koşullarda çok az hata payı ile sistemin ataletini yakalayabilir. Bu modül çalışma kolaylığı ve maliyet açısından ele alındığında en uygun modül olarak Kwon ve arkadaşları [70] tarafından kullanımı önerilmiş ve literatürde birçok çalışmada [71-74] kullanılmıştır. NTGK modelinde pil içerisinde meydana gelen termal değişiklikleri ve elektrik alanlarını çözmede Eşitlik (6.1) kullanılmaktadır.

$$J = aY[U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \tag{6.1}$$

Burada; J hacimsel akım aktarım oranını (A/m^3), α belirli bir sandviç tabakasının alanını (m^2), φ_+ ve φ_- sırasıyla pozitif ve negatif kutuplardaki faz potansiyellerini göstermektedir. Y ve U parametreleri ise deşarj derinliğinin fonksiyonlarıdır [75]. Y ve U parametreleri NTGK modelinin çalıştırılması için gerekli parametrelerdir. Test edilen belirli bir pilin voltaj-akım grafiklerine göre regresyon yöntemi kullanılarak bu parametreler elde edilebilir. Y ve U değerleri sırasıyla Eşitlik (6.2) ve (6.3) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Y = (\sum_{n=0}^{5} a_n (DoD)^n)\, exp(-C_1(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}) \tag{6.2}$$

$$U = (\sum_{n=0}^{5} b_n (DoD)^n) - C_2(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}) \quad (6.3)$$

Bu eşitliklerde, C_1 ve C_2 NTGK model sabitleridir. a_n ve b_n katsayıları pillerin şarj-deşarj döngülerinin elde edilmesinin ardından sonuçların regresyon yöntemi ile çözülmesi sonucu bulunur. a_n ve b_n değerleri her pil için farklı olup deneysel çalışmaların sonucunda bulunmaktadır [76]. T hücre sıcaklığını ifade ederken, T_{ref} ise ortam sıcaklığı olarak tanımlanmıştır (303 K). DoD bataryanın deşarj derinliğini temsil etmektedir ve Eşitlik (6.4)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Deşarj derinliği pilin maksimum kapasitesine göre o anki yüzdesel deşarj olma durumudur. Eğer şarj derinliği 0 ise pil tamamen deşarj olma kapasitesine sahiptir. *DoD=1-SoC* eşitliğinden, deşarj derinliği ile şarj durumu arasındaki bağıntı hesaplanabilmektedir [77].

$$DoD = \frac{V_{ol}}{3600 Q_{Ah}} (\int_0^t j dt) \quad (6.4)$$

Bu eşitlikte; V_{ol} batarya hacmini (m^3), Q_{Ah} ise bataryanın toplam enerjisini (Ah) temsil etmektedir [78].

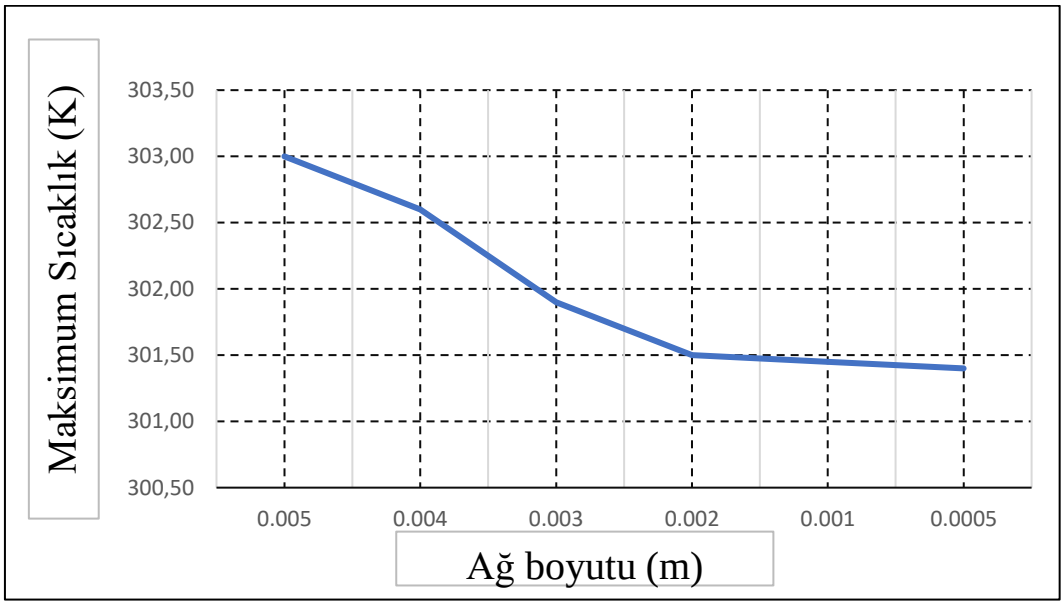
Çalışmada yapılacak olan analizlerin doğruluğunun test edilmesi için 1C deşarj değerinde, Berber [9] ve Kök ve Alkaya [79] tarafından yapılan çalışmalarla aynı parametreler kullanılarak NTGK modeli ile %2 doğrulukta sonuçlar elde edildikten sonra, diğer analizlere devam edilmiştir.

6.2. Batarya Termal Yönetim Sisteminin Analizleri

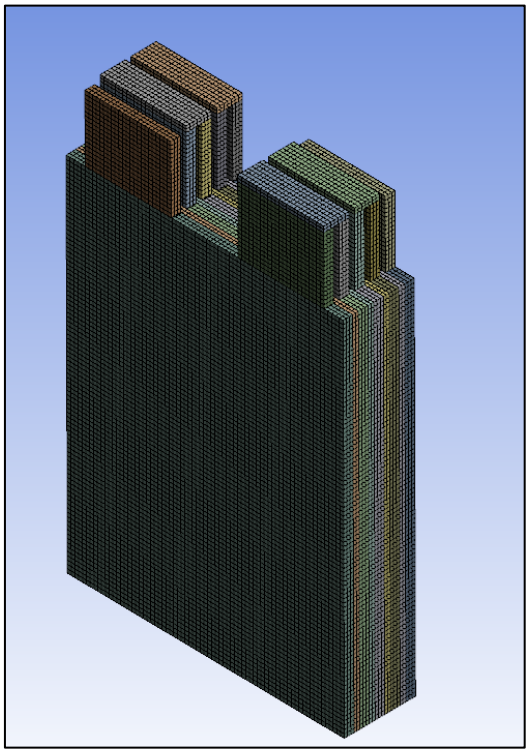
Bu çalışmada batarya termal yönetim sisteminin analizleri için NTGK modeli kullanılmıştır. Öncelikle tasarımı yapılan batarya modeli ANSYS Fluent paket programına aktarılmıştır. Soğutma analizleri için pillerin arasına 192 mm x 145 mm x 3 mm boyutlarında akış hacimleri oluşturulmuştur.

0,002 m boyutunda geometri üzerine ağ yapısı oluşturulmuştur. Isı transferi ve akış hacimleri göz önünde bulundurulduğunda dörtgen şeklindeki ağ yapılarının kullanılması uygun bulunmuştur. Çalışmalarda kullanılan modelde soğutucu akışkanın olmadığı ve 1 C'de deşarj edilen batarya modülü kullanılmıştır. Optimizasyonu sağlamak için ağ yapıları sırasıyla; 0,0005 m, 0,001, 0,002, 0,003, 0,004 ve 0,005 boyutlarında oluşturulmuştur. Şekil

6.2'de optimizasyona ait sonuçları gösterilmiştir. Kıyaslamalar ve optimizasyon sonucunda 0,002 m ağ boyutu tercih edilmiştir. Tasarımı yapılan batarya termal modelinin ağ yapısı Şekil 6.3'de görülmektedir.



Şekil 6.2. Mesh optimizasyon grafiği



Şekil 6.3. Tasarlanan batarya termal modelinin ağ yapısı

Tasarlanan batarya modülünde, analiz öncesi mesh işlemleri tamamlanmıştır. Batarya modülü üç boyutlu olduğu ve çözümlemesi zor olan bir akış analizi olduğu için paralel çekirdekler kullanılmıştır. Analizler zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir.
Çalışmada çok ölçekli çok alanlı batarya modeli (MSMD) aktif hale getirildikten sonra NTGK empirical modeli seçilmiştir. Kullanılan pillerin elektriksel özelliklerine göre nominal hücre kapasitesini 14,6 Ah olarak girilmiştir. Elektrikli taşıtlarda kullanılan lityum-iyon piller tanımlanırken genelleştirme açısından C oranı kullanılır. C oranı olarak tanımlanan parametre pilin azami kapasitesine göre deşarj olma hızını tanımlar. Örneğin 1C'lik deşarj akımı pili 1 saatte boşaltacağı anlamına gelir. Minimum durdurma voltajı pilin özelliğine göre 3 V olarak girilmiştir. Maksimum şarj olma voltajı ise 4,3 V olarak sisteme girilmiştir.

Başlangıç DoD olarak ise 0 tanımlanmıştır. DoD batarya modülünün deşarj derinliğini temsil etmektedir. Deşarj derinliği pilin maksimum şarj kapasitesine göre o anki yüzdesel deşarj olma durumudur. Eğer şarj derinliği 0 ise pil tamamen deşarj olma kapasitesine sahiptir. NTGK modelinin en önemli parametreleri olan U ve Y katsayıları, pillerin testlerinden elde edilen sonuçların regresyon yöntemi ile çözülerek bulunur. Bu çalışmada U ve Y katsayıları ANSYS'in veri bankasından alınmıştır. Sonraki aşamada, elektriksel kontak sekmesi altında ise spesifik olarak hücrelerin temas eden yüzeylerinde hem iç kısımlarda hem de kutup ve busbar kısımlarındaki direnç katsayıları girebilir. Bu çalışmada bu kısımlarda direnç olmadığı kabul edilmiştir. Bu yüzden herhangi bir direnç katsayısı yazılmamıştır.

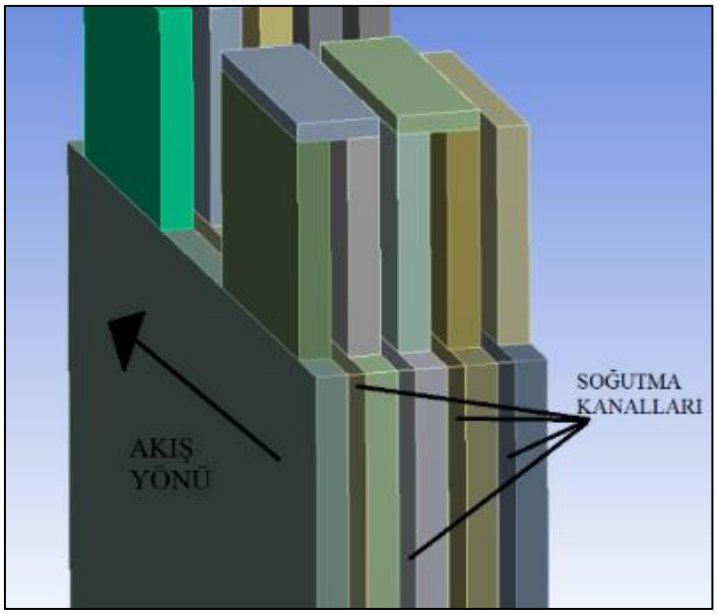
MSMD kurulum aşamaları tamamlandıktan sonra, pillerin malzeme tanımlamaları gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.1'de tasarımda kullanılan pillerin termo-fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Kutup malzemeleri ile busbar malzemeleri aynı seçilmiştir. Bunun sebebi literatürde farklı malzemelerin tercih edilmesinin sonuçlara fark yaratacak kadar etki etmediğinin ortaya konulmasıdır [80-81].

Çizelge 6.1. Tasarımda kullanılan pillerin termo-fiziksel özellikleri [81]

	Hücre Malzemesi	Kutup Malzemesi	Busbar Malzemesi
Yoğunluk (kg/m^3)	2719	8978	8978
Özgül ısı (Cp) (J/kgK)	871	381	381
Isı iletim katsayısı (W/mK)	20	387,6	387,6
UDS-0 (kg/ms)	10^6	ANSYS veri bankası	ANSYS veri bankası
UDS-1 (kg/ms)	$9,83.10^5$	---	---
Elektriksel iletkenlik (S/m)	$3,541.10^7$	1.10^7	1.10^7

Sınır şartlarının belirlenmesinde, öncelikli olarak busbar ve kutup malzemelerinde direncin olmadığı kabul edilmiştir. Elektrik akısının herhangi bir dirençle karşılaşmadan piller arası aktarıldığı kabul edilmiştir. Hücrelerin, kutup malzemeleri ile temas eden yüzeylerinde ısı taşınım katsayısı h=5 W/m^2K olarak tanımlanmıştır [79]. Termal analizlerde ışınım yoluyla ısı transferi ihmal edilmiştir. Batarya modülünün başlangıç sıcaklıkları 303 K olarak kabul edilmiştir. Sistemin çözüm yöntemi olarak SIMPLE kullanılmıştır. Standart başlangıç metodu ile başlatılan sistemde, analiz zamanı 60 s olarak belirlenmiştir. Zaman adım sayısı ise değişken C katsayılarına göre belirlenmiştir. Buradaki temel kriter pillerin akım kesme voltajı olan 3,7 V değerine geldiğinde analizi bitirmektir.

Analizin ikinci kısmında ise, 1 C'den 5 C'ye kadar olan farklı deşarj değerlerinde maksimum sıcaklıkları elde edilen bataryaların, soğutma sistemi kullanılarak sıcaklıkları düşürülmeye çalışılmıştır. Piller arası 195 mm x 145 mm x 3 mm olacak şekilde soğutma kanalları oluşturulmuştur. Soğutucu akışkanların pillerin aktif bölgeleri ile temas halinde olduğu kabul edilmiş olup, kutup bölgelerine herhangi bir sızıntı veya kaçak olmadığı kabul edilmiştir. Şekil 6.3'te soğutma kanalları ve akış yönleri gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Soğutma kanalları ve akış yönleri

Soğutma analizlerini gerçekleştirmek için, pillerin yan duvarları, alt ve üst duvarları adyabatik olarak kabul edilmiştir. Akışkanda meydana gelecek olan basınç kayıpları ise yok sayılmıştır. Akışkanın içerisindeki geri akım ve radyasyon ile oluşabilecek ısı transferleri yok sayılmıştır. Akışın türünü belirlemek için, 0,001 m/s, 0,002 m/s ve 0,01 m/s akışkan hızlarında Re sayıları Eşitlik (6.5)'ten hesaplanmıştır.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V L}{\mu} \tag{6.5}$$

Burada;

ρ : Akışkanın yoğunluğu $\left(kg/m^3\right)$

$V_{akışkan}$: Akışkanın hızı $\left(m/s\right)$

L : Karakteristik uzunluk $\left(m\right)$

μ : Dinamik viskozite $\left(kg/ms\right)$ 'dir.

Akış dikdörtgen prizmasında oluşacağı için Eşitlik (6.5)'teki L karakteristik uzunluk yerine hidrolik çap $\left(D_h\right)$ kullanılırsa,

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho D_h L}{\mu} \tag{6.6}$$

elde edilir. Bu eşitlikte, hidrolik çap,

$$D_h = \frac{4A}{L} \tag{6.7}$$

olarak yazılabilir. Burada;

A : Kesit alan $\left(m^2\right)$

L : Kesit çevresi $\left(m\right)$ 'dir.

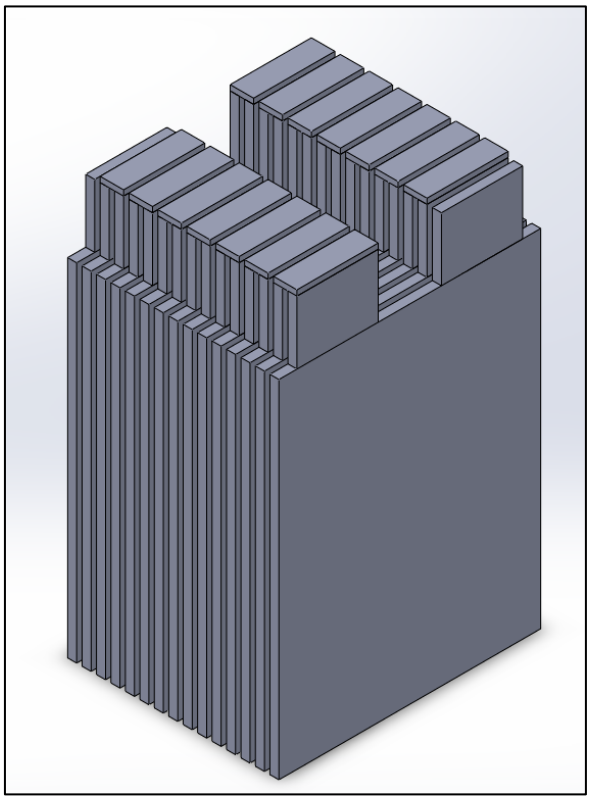
Reynolds sayısı hesabına göre akış laminer olarak kabul edilmiştir. Analizlerde saf su, %40/60 etilen glikol-su karışımı ve %0,01 titanyum dioksit (TiO_2) nano parçacıklı etilen glikol olmak üzere 3 farklı soğutucu akışkan kullanılmıştır. Kullanılan soğutucu akışkanların giriş sıcaklıkları 303 K olarak kabul edilmiştir. Analizlerde kullanılan soğutucu akışkanların 303 K sıcaklıktaki termo-fiziksel özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Soğutucu akışkanların 303 K sıcaklıktaki termo-fiziksel özellikleri [82-84]

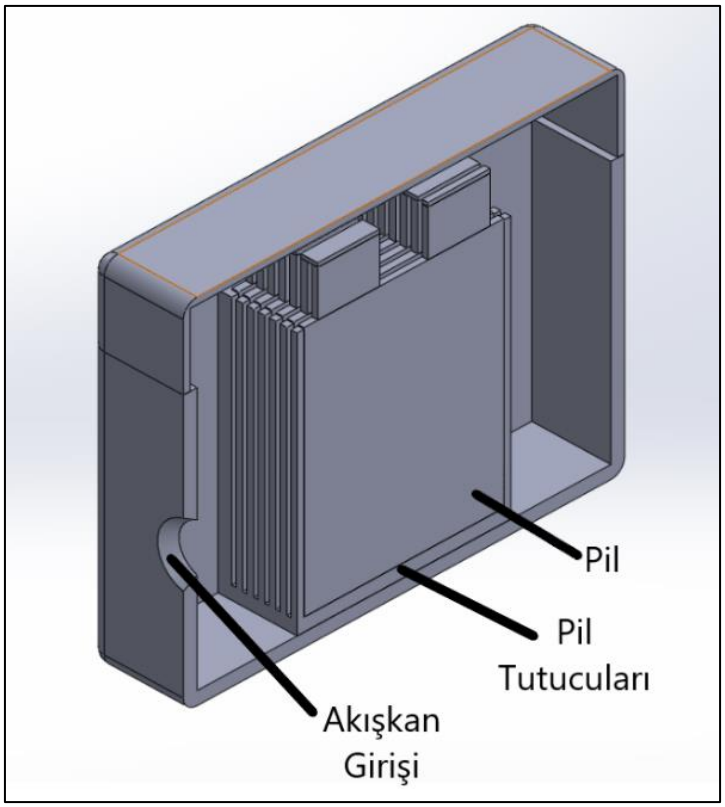
	Saf su	%40/%60 Etilen glikol-su	%0,01 TiO_2 nano parçacıklı etilen glikol
Yoğunluk (kg/m^3)	995,7	1040,3	1087,14
Özgül ısı (J/kgK)	4183	3609,9	3392,7
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0,603	0,3813	0,433
Dinamik viskozite (kg/ms)	0,000797	0,00235	0,00265

Çalışmanın üçüncü aşamasında, en yüksek soğutma performansına sahip soğutucu akışkan kullanılarak 15 adet pilden meydana gelen bir batarya ünitesinin termal analizleri yapılmıştır. Bu analizde de önceki analizlerde kullanılan piller ile aynı özellikteki piller kullanılmıştır. 15 adet pilden meydana gelen batarya Şekil 6.4'te görülmektedir. Bu batarya ünitesi 5C deşarj değerinde, soğutmasız bir ortamda maksimum sıcaklığının belirlenmesi için analiz edilmiştir. Sonraki aşamada batarya ünitesinde bulunan pillerin arasında Şekil 6.5'de görüldüğü gibi 192 mm x 145 mm x 3 mm boyutlarında akış hacimleri oluşturulmuştur.

Soğutma analizlerini gerçekleştirmek için, pillerin yan, alt ve üst duvarları adyabatik olarak kabul edilmiştir. Akışkanda meydana gelecek olan basınç kayıpları yok sayılmıştır. Termal analizlerde ışınım yoluyla ısı transferi ihmal edilmiştir. Bataryaların başlangıç sıcaklıkları 303 K olarak kabul edilmiştir. Standart başlangıç metodu ile başlatılan sistemde, analiz zamanı 60 s olarak belirlenmiştir. Piller arası akış hacmi bir önceki analizler ile aynı tutulduğundan, akış türü laminer olarak kabul edilmiştir.



Şekil 6.3. 15 adet pilden oluşan bataryanın görünümü



Şekil 6.4. Bataryanın kesit görünüşü

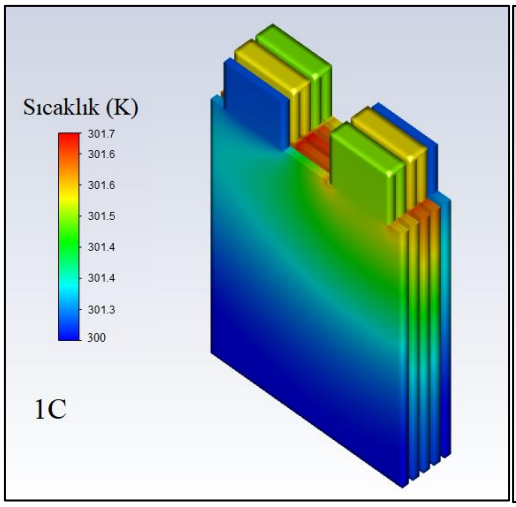
7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmada 5 adet prizmatik tip lityum manganez oksit ($LiMn_2O_4$) pilden meydana gelen bir bataryanın farklı deşarj değerlerinde sıcaklık değişimleri analiz edilmiştir. Sonrasında bu batarya için sıvı soğutmalı bir soğutma sistemi tasarlanarak, faklı soğutucu akışkanların farklı akış hızlarında batarya modülü sıcaklığına etkileri analiz edilmiştir. 1C-5C arasında farklı deşarj değerlerinde, sıcaklık değişimleri elde edilen batarya modülü, saf su, %40/60 etilen-glikol – su karışımı ve %0,01 TiO_2 nano parçacıklı etilen glikol akışkanları kullanılarak, optimum çalışma sıcaklığı arasında tutulmaya çalışılmıştır. Sonrasında en iyi soğutma performansı elde edilen soğutucu akışkan ve akış hızı kullanılarak 15 adet pilden meydana gelen bir batarya modülünün termal analizleri yapılmıştır.

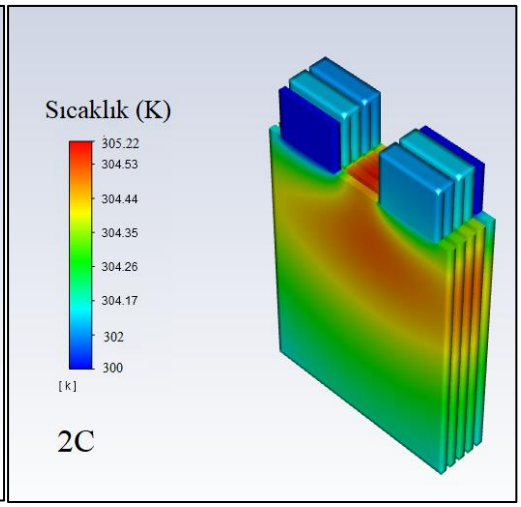
Elektrikli taşıt bataryalarında ve literatürde yaygın olarak kullanılması sebebiyle, bu çalışmada 14,6 Ah'lik $LiMn_2O_4$ piller kullanılmıştır. Pillerin maksimum ve minimum voltaj değerleri sırasıyla 4,3 V ve 3 V olarak kabul edilmiştir. Analizlerde NTGK batarya çözüm modülü kullanılmıştır. Bölüm 6.1'de bu modelin ayrıntıları verilmiştir. Batarya 1C, 2C, 3C, 4C ve 5C farklı deşarj değerlerinde analiz edilmiştir.

Şekil 7.1'de soğutma sistemi kullanılmadan farklı deşarj değerlerinde bataryada elde edilen sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Bataryadan istenilen güç arttığında, maksimum sıcaklığın da arttığı görülmüştür. Sıcaklık artışları kutuplarda düşük olmasına rağmen, pillerin ortalarına doğru yükselmiştir. Bunun sebebi şarj döngüsünde, elektrik akılarının pillerin kutuplarında yoğunlaşmasıdır.

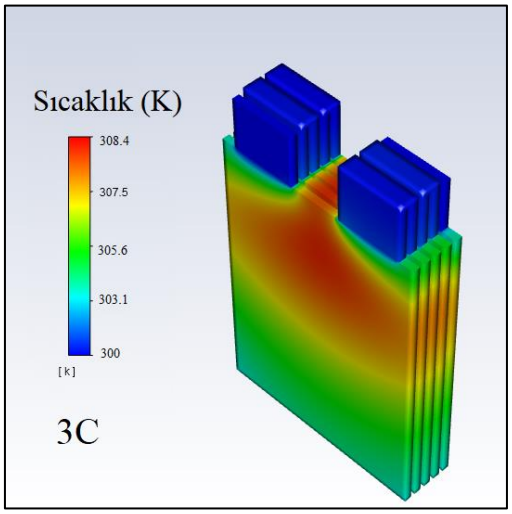
Çalışmada, bataryanın deşarj olma süresinin istenilen güç ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. 1C deşarj değerinde pilin tamamen deşarj olma süresi 60 s iken, 5C deşarj değerinde bu süre 12 s'ye kadar inmektedir. Pillerden istenilen akım miktarı arttıça pillerin deşarj olmaları doğru orantılı olarak yükselmektedir. Buradan çıkarılan sonuç, batarya optimum çalışma sıcaklığında tutulmadığı sürece, bataryanın kullanım ömrünün azalacağıdır. C katsayısı arttıkça bataryadan çekilen akımın hızı artmaktadır. Elektronların çok hızlı bir şekilde membran bölgelerinden geçmesi sonucu ısı artışı gittikçe artmaktadır. Bu bağlamda C oranı arttıkça bataryada daha yüksek sıcaklıklar açığa çıkmaktadır.



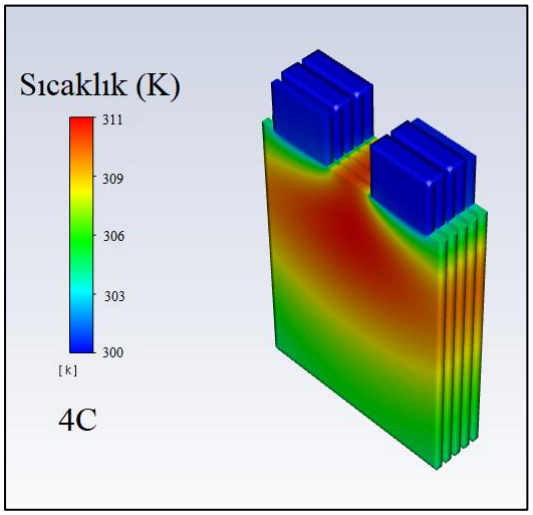
a)



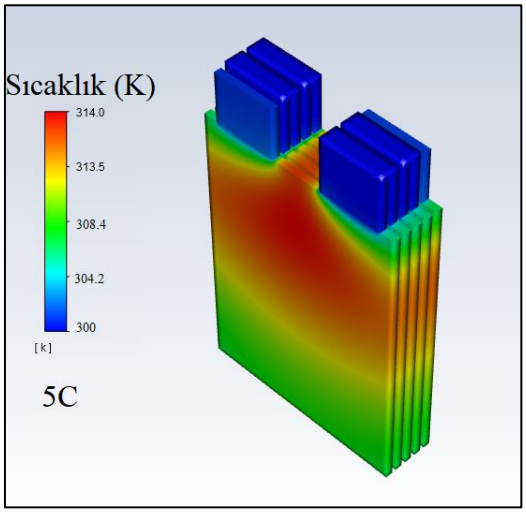
b)



c)



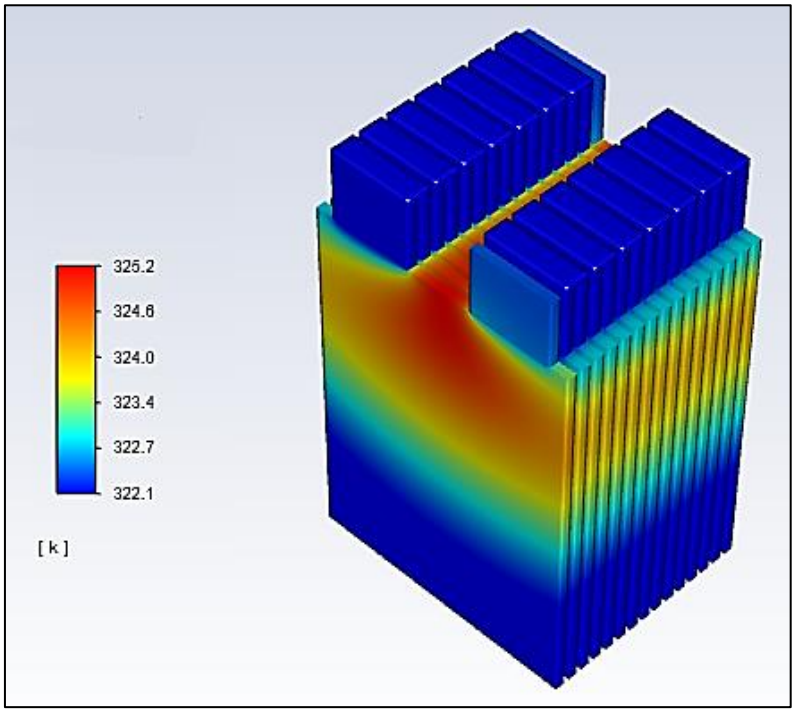
d)



e)

Şekil 7.1. (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya sıcaklık değişimleri

Şekil 7.2'de 5C deşarj değerinde 15 adet pilden meydana gelen bataryadaki sıcaklık değişimleri görülmektedir. 15 adet pilden meydana gelen bataryada ise maksimum sıcaklık 325,2 K olarak elde edilmiştir. Li ve arkadaşları tarafından [85] yapılan çalışmada kullanılan piller ve pil sayısına göre bataryadaki maksimum sıcaklıkların değişebileceği belirtilmiştir. 36 adet prizmatik pilden meydana getirilen bir bataryada 5C deşarj değerinde, maksimum sıcaklık 47,9 °C olarak elde edilmiştir. Mondal ve arkadaşları [86], 20 adet 20,6 Ah'lik güce sahip prizmatik piller kullanarak bir batarya sistemi tasarlamışlardır. Bataryada 5C deşarj değerinde maksimum sıcaklık 47°C olarak elde edilmiştir.

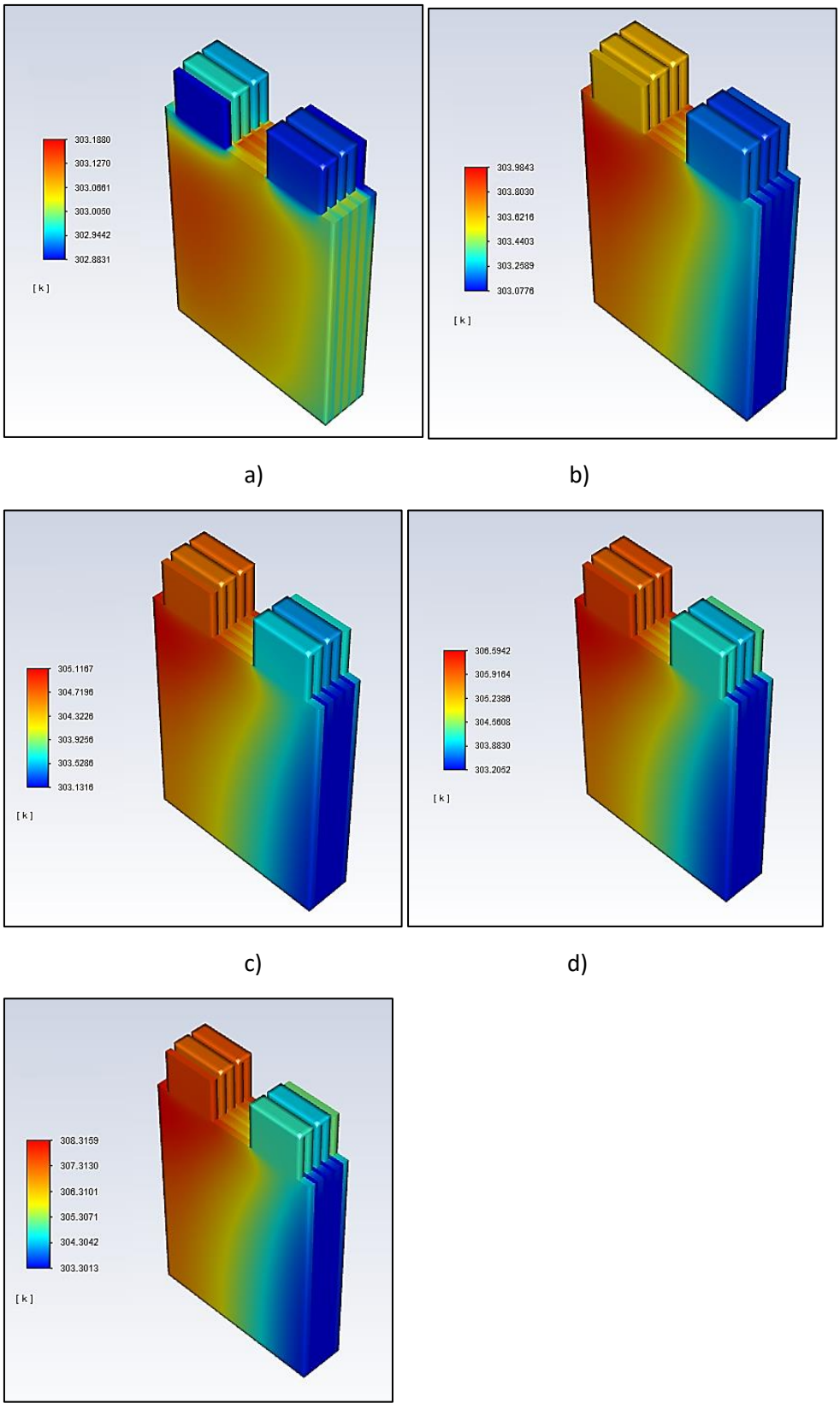


Şekil 7.2. 15 adet pilden meydana gelen bataryada 5C deşarj değerinde sıcaklık değişimi

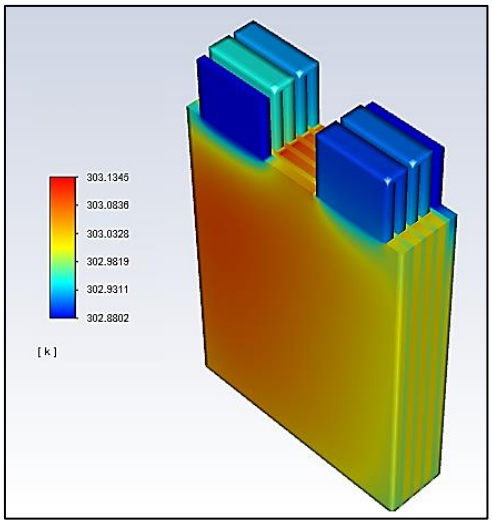
7.1. Batarya Soğutma Sistemi ile Elde Edilen Sonuçlar

Tasarlanan bataryada, piller arasında 195 mm x 145 mm x 3 mm boyutlarında soğutma kanalları açılmıştır. Bataryanın kaçak ve sızıntının olmadığı kabul edilen, soğutucu akışkan dolu tankın içinde sabitlendiği varsayılmıştır. Doğrudan temaslı soğutma sistemi olarak adlandırılan yöntem, elektronik devre elemanlarının soğutulmasında ve birçok soğutma uygulamasında kullanılmaktadır. Bu soğutma yönteminde dikkat edilmesi gerek en önemli husus, soğutucu akışkanların elektrik iletmez olmalarıdır. Bu sebeple yapılan çalışmada saf su ve yalıtkan özellikteki iki farklı soğutucu akışkan kullanılmıştır. Batarya ünitesi üç farklı soğutucu akışkan ile analiz edilmiştir. Kullanılan soğutucu akışkanların termo-fiziksel

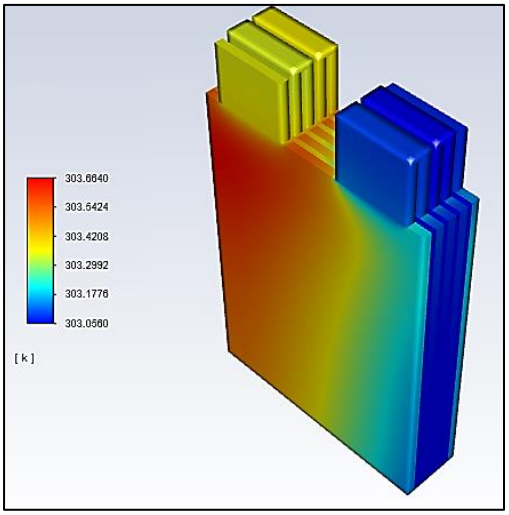
özellikleri Bölüm 6.2'de verilmiştir. Analizlerde soğutucu akışkan hızı değişiminin batarya sıcaklığına etkisini incelemek için, 0,001 m/s, 0,002 m/s ve 0,01 m/s olmak üzere üç farklı akış hızı alınmıştır. Şekil 7.3'de 0,001 m/s akış hızında saf su kullanılarak yapılan analizlerde batarya sıcaklık değişimi görülmektedir. Soğutma sistemi olmadan yapılan analizlerde maksimum sıcaklık 314 K iken, bu değer soğutucu akışkan olarak 0,001 m/s akış hızında saf su kullanıldığında 308,3 K'e düşmüştür. Şekil 7.4'te 0,002 m/s akış hızında saf su kullanılarak bataryada meydana gelen sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Akışkan hızı iki katına çıkarılarak yapılan sonraki analizde, batarya maksimum sıcaklığı 306,6 K olarak elde edilmiştir. Akışkan hızının ilk analizdeki çalışmaya göre on katına çıkarıldığı durumda (0,01 m/s) saf suyun, bataryada oluşan maksimum sıcaklığı 304,8 K'de sabit tuttuğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.5'te 0,01 m/s akış hızında saf su için bataryadaki sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Akış hızındaki artışa bağlı olarak bataryada meydana gelen maksimum sıcaklık düşmüştür. Xu ve arkadaşları [87] tarafından yapılan benzer bir çalışmada, 15 adet $LiFePO_4$ kimyasal yapıya sahip prizmatik piller kullanılmıştır. Mikro kanallı yapıda soğutucu plakalar ile farklı akış hızlarında yapılan analizlerde akış hızı arttıkça bataryada meydana gelen maksimum sıcaklığın düştüğü görülmüştür. 2 g/s akış hızı için, bataryada oluşan maksimum sıcaklığın 32,5°C'yi aşmadığını görülmüştür. Şekil 7.6'da soğutma sisteminde saf su kullanılan sistemde, akış hızının bataryada oluşan maksimum sıcaklıklara etkisi gösterilmiştir.



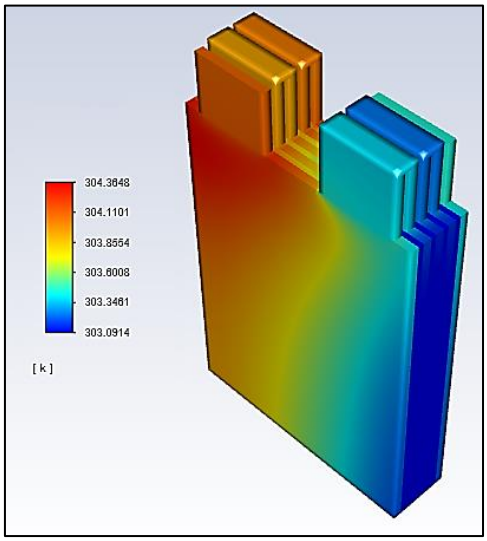
Şekil 7.3. 0,001 m/s akış hızında saf su ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri



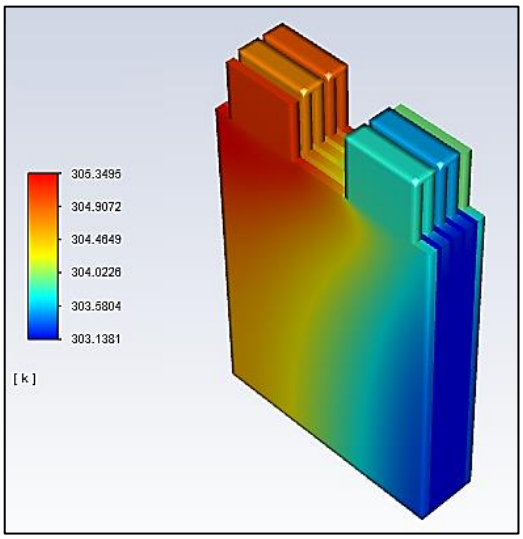
(a)



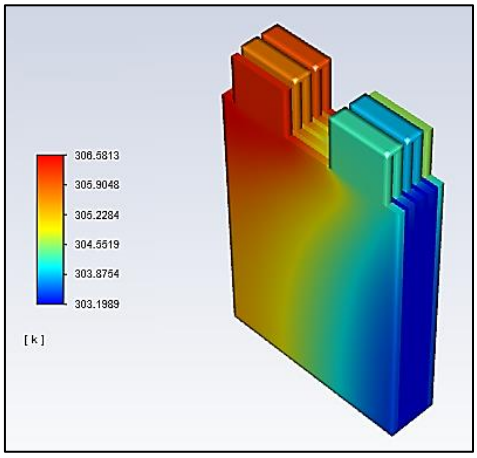
(b)



(c)

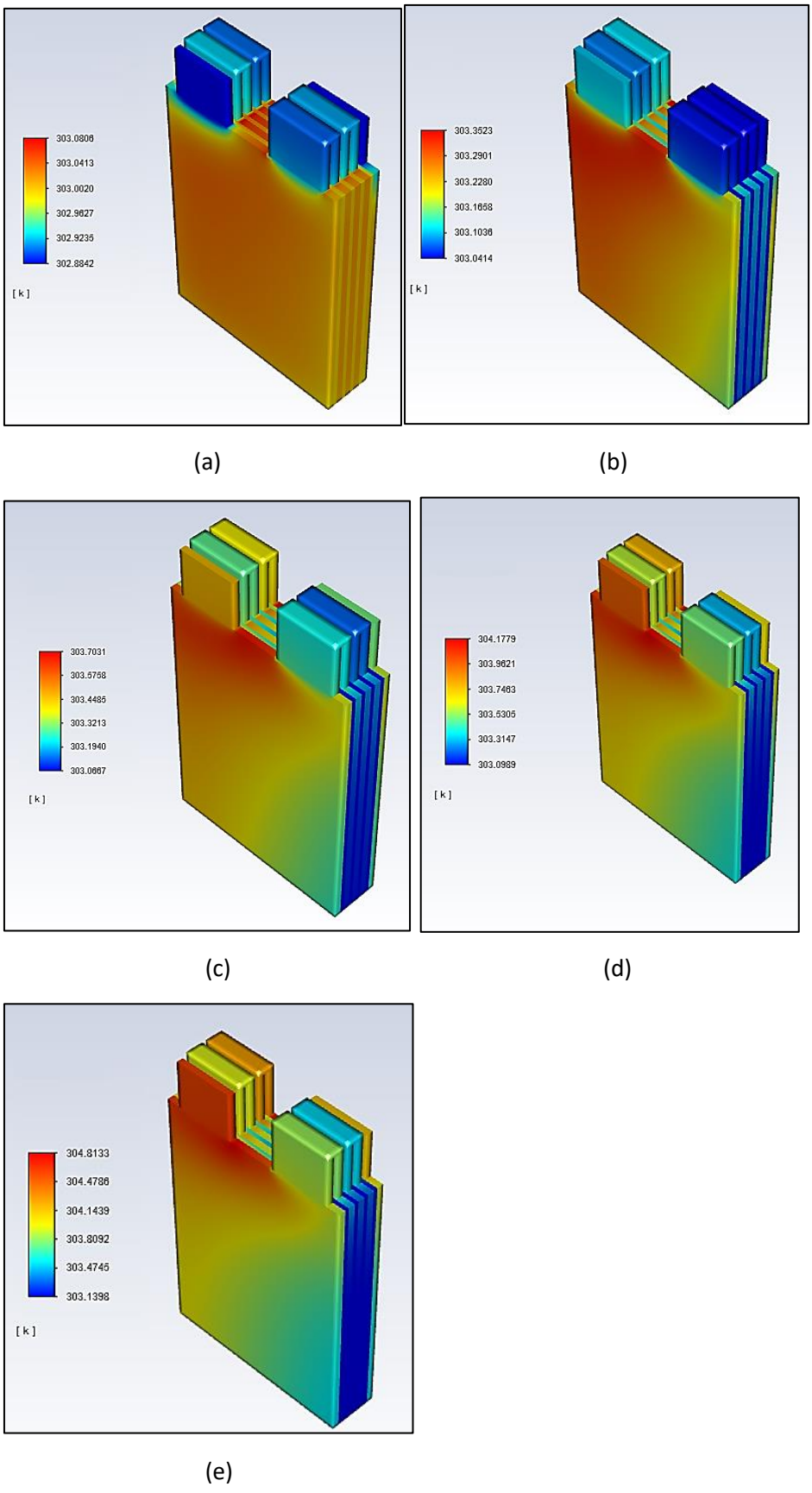


(d)

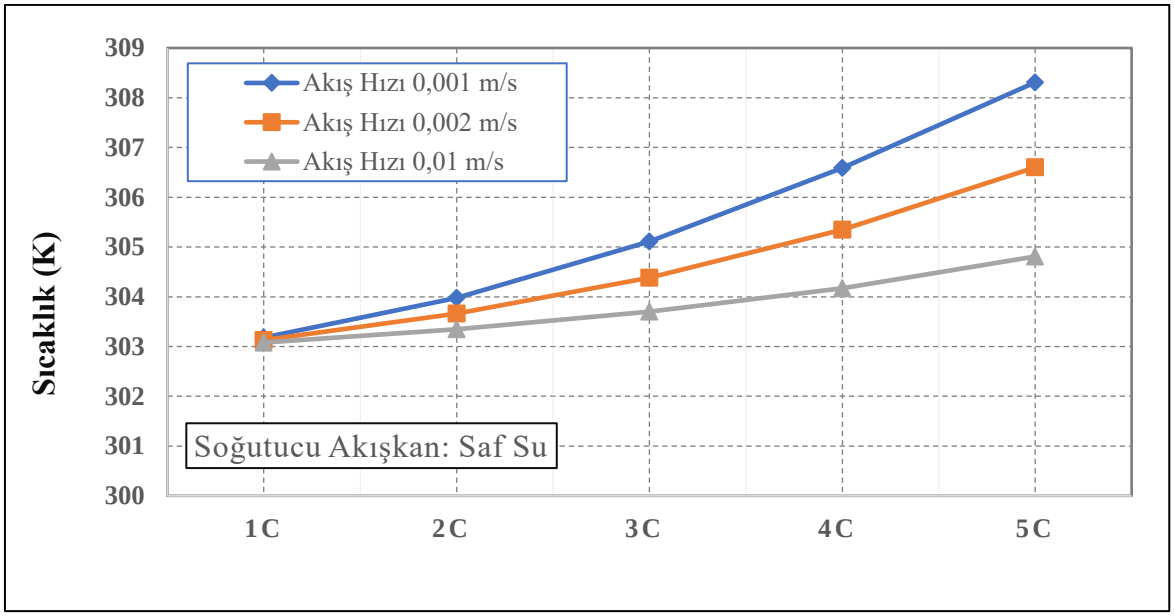


(e)

Şekil 7.4. 0,002 m/s akış hızında saf su ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri



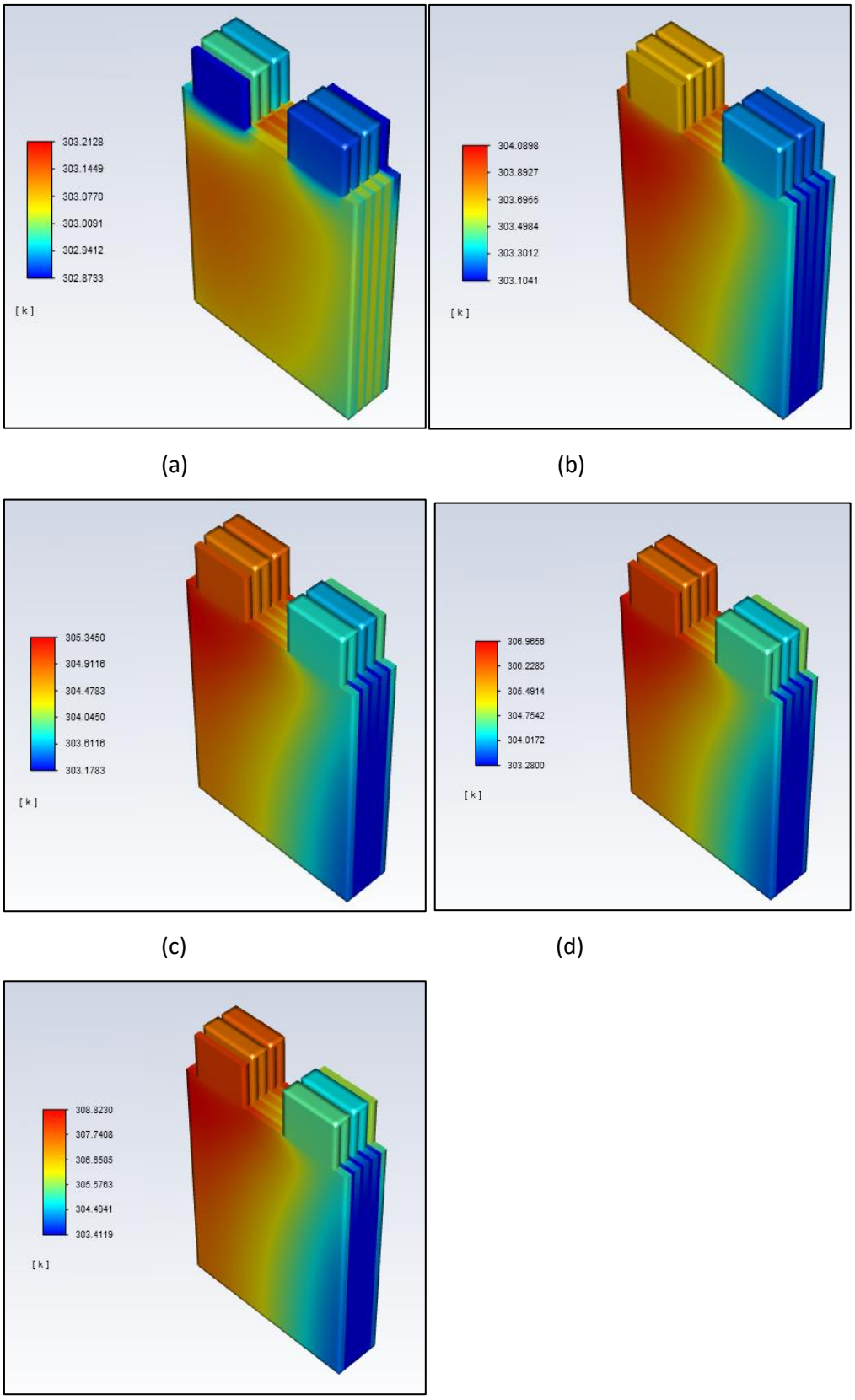
Şekil 7.5. 0,01 m/s akış hızında saf su ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri



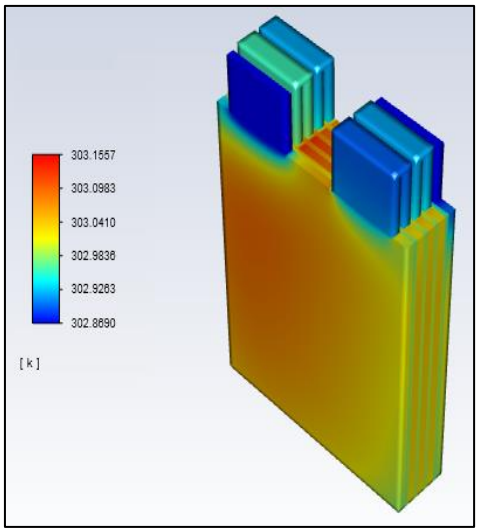
Şekil 7.6. Farklı debilerdeki saf su ile batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklıklar

Sonraki aşamada, soğutucu akışkan türünün, maksimum sıcaklığa etkisini görmek için soğutucu akışkan olarak %40/60 oranlarında hazırlanmış etilen glikol-su karışımı kullanılmıştır. Etilen glikol tedarikinin ve üretiminin kolay olması ve maliyet açısından diğer soğutucu akışkanlara göre ucuz olması sebebiyle bu tez çalışmasında soğutucu akışkan olarak seçilmiştir. Şekil 7.7'de 0,001 m/s akış hızında %40/60 oranlarında hazırlanmış etilen glikol-su karışımı kullanılan sistemde batarya modülündeki sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. 0,001 m/s akışkan hızındaki etilen glikol-su karışımı bataryayı 5C deşarj değerinde optimum sıcaklıkta tutmayı başarmıştır.

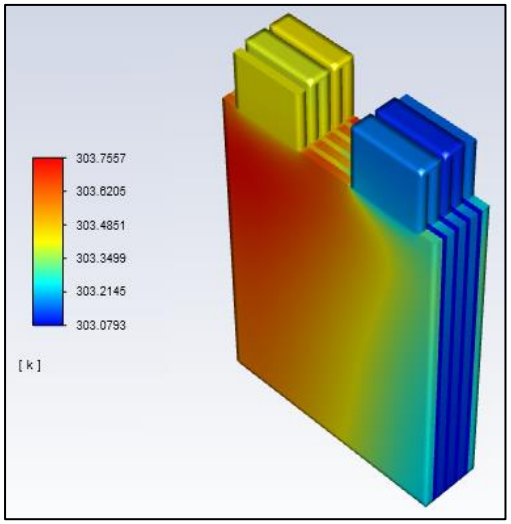
Soğutma sistemi olmadan yapılan analizde batarya modülündeki maksimum sıcaklık 314 K iken, bu değer 0,001 m/s akış hızında etilen glikol-su karışımında 308,8 K'e düşürülmüştür. Şekil 7.8'de 0,002 m/s akış hızında soğutucu akışkan olarak etilen glikol-su karışımı kullanılarak elde edilen batarya modülündeki sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Akışkan hızı iki katına çıkarılarak yapılan sonraki analizde, batarya modülü maksimum sıcaklığının 307,1 K'de sabit tutulduğu gözlemlenmiştir. Akışkan hızının ilk analizdeki çalışmaya göre on katına çıkarıldığı durumda etilen glikol-su karışımının, batarya modülündeki maksimum sıcaklığı 305,3 K'de stabil tuttuğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.9'da 0,01 m/s akış hızında etilen glikol-su karışımı kullanılarak elde edilen batarya modülü sıcaklık değişimleri gösterilmiştir.



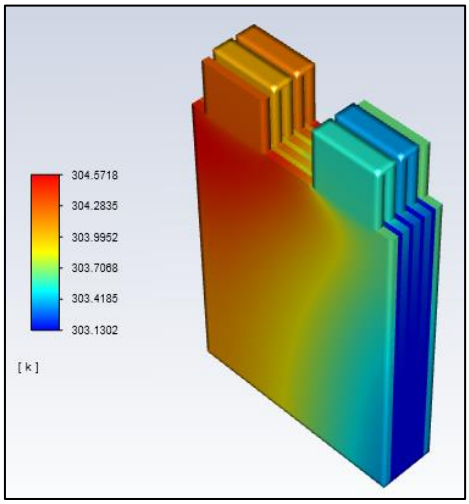
Şekil 7.7. 0,001 m/s akış hızında etilen glikol – su karışımı ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri



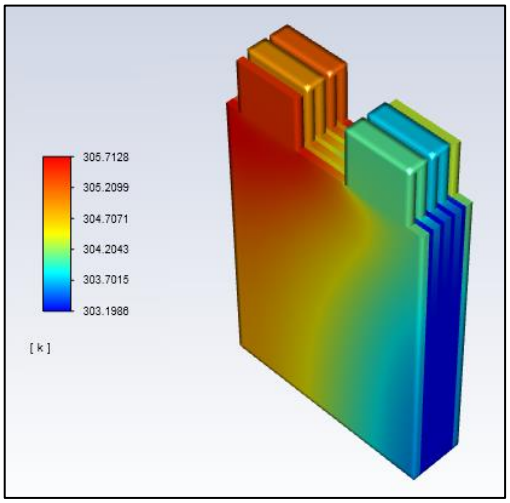
(a)



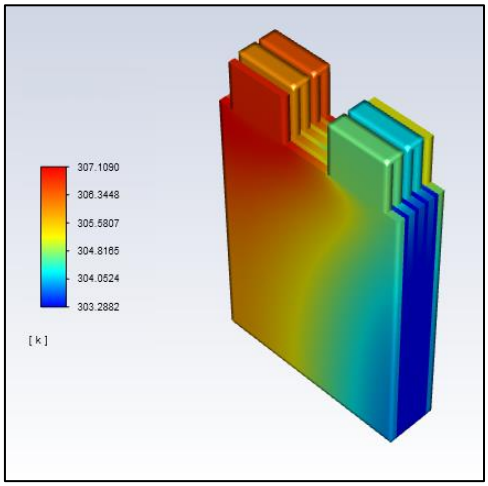
(b)



(c)

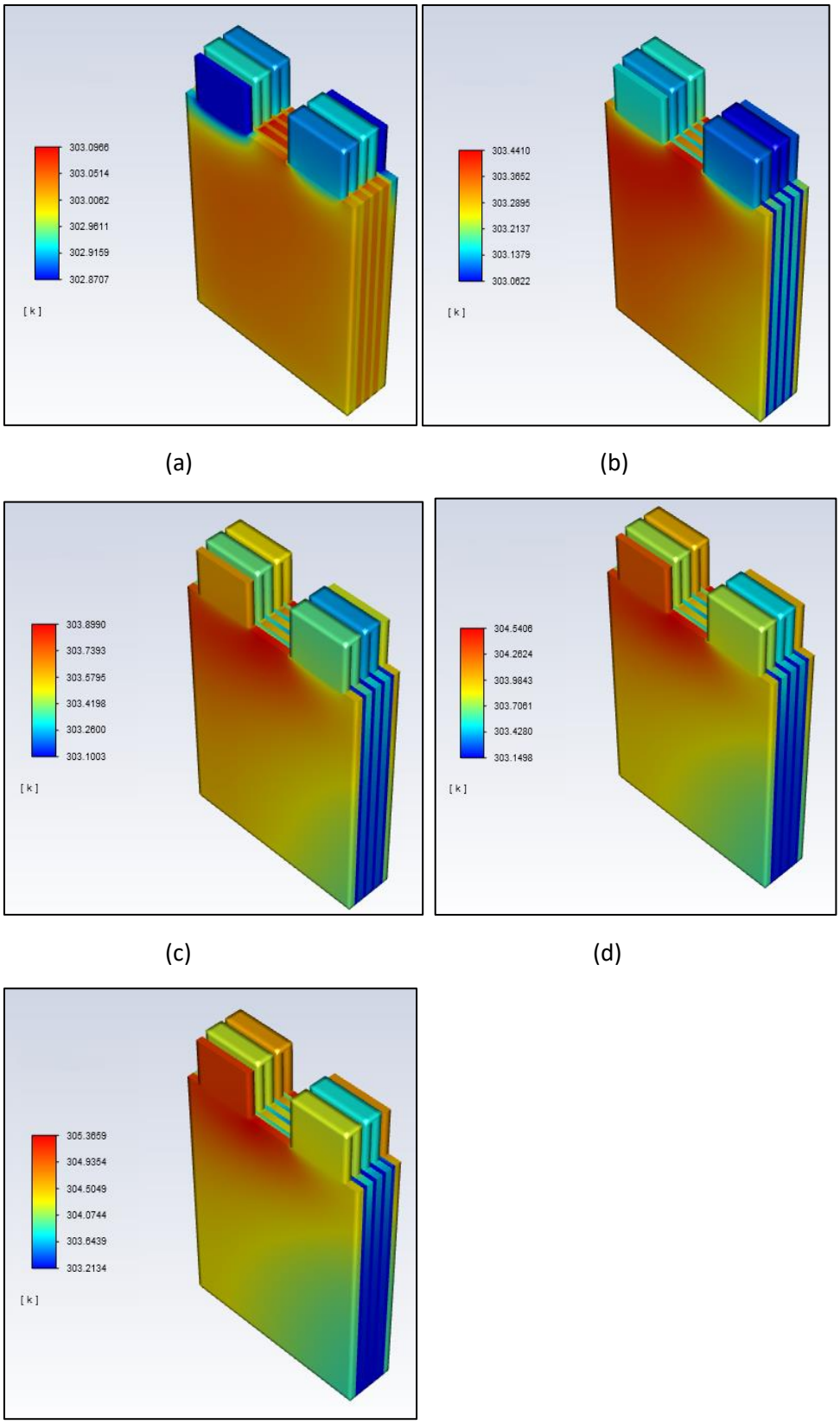


(d)



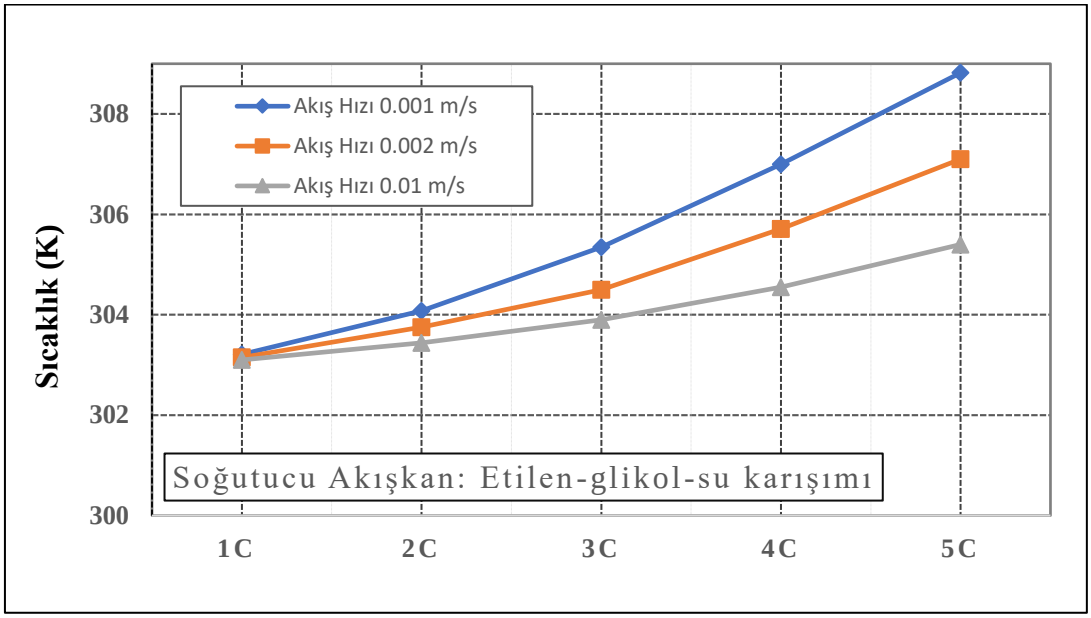
(e)

Şekil 7.8. 0,002 m/s akış hızında etilen glikol- su karışımı ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri



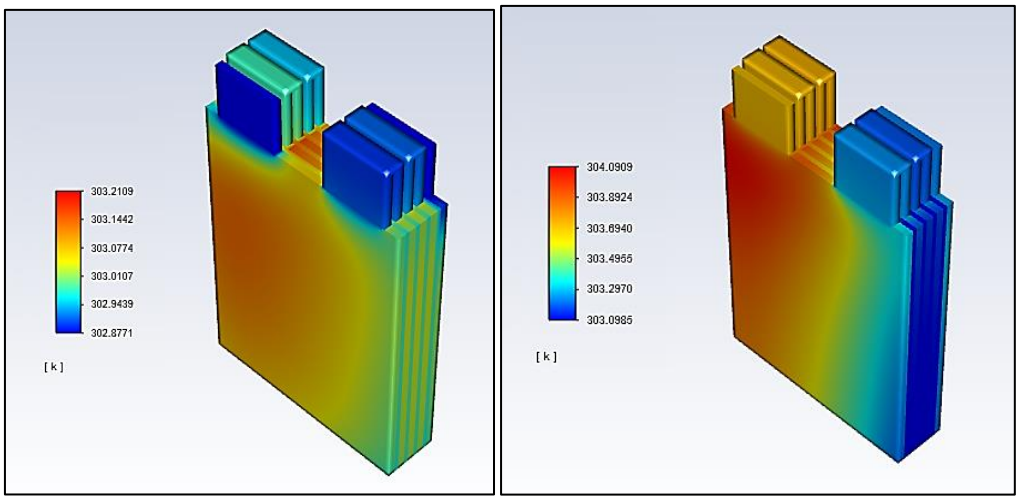
Şekil 7.9. 0,01 m/s akış hızında etilen glikol- su karışımı ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülü sıcaklık değişimleri

Şekil 7.10'da %40/60 etilen glikol-su karışımı kullanılan sistemde, akış hızının batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklıklara etkisi gösterilmiştir.

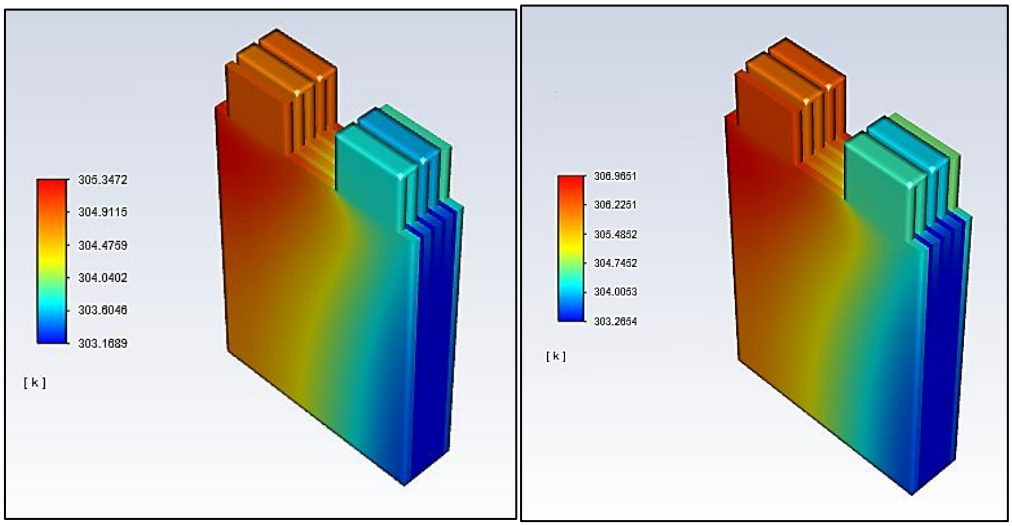


Şekil 7.10. Farklı debilerdeki %40/60 etilen-glikol-su karışımı ile batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklıklar

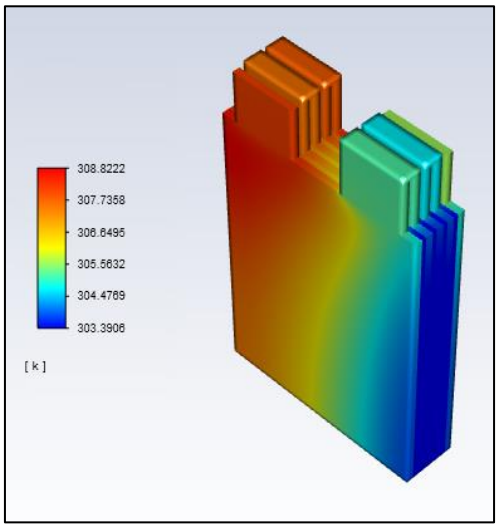
Nano akışkan katkısının batarya modülünde meydana gelen maksimum sıcaklığa etkisini görmek için hacimsel olarak %0,01 oranında TiO_2 karıştırılmış etilen glikol-nano akışkan karışımı kullanılmıştır. Birçok alanda kullanılan titanyum dioksit nano parçacıkları laboratuvar şartlarında elde edilebilmekte olup, maliyeti diğer nano parçacıklara göre düşüktür. Şekil 7.11'de 0,001 m/s akış hızında %0,01 oranında TiO_2 karıştırılmış nano parçacıklı etilen glikol karışımı kullanılan sistemdeki batarya modülü sıcaklık değişimleri gösterilmiştir.0,001 m/s akışkan hızındaki nano akışkan-etilen glikol karışımı batarya modülünü 5C deşarj değerinde optimum sıcaklıkta tutmayı başarmıştır. Soğutma sistemi olmadan yapılan analizde maksimum sıcaklık 314 K iken, bu değer 0,001 m/s akış hızındaki nano akışkan karışımında 308,8 K'e düşürülmüştür. Şekil 7.12'de 0,002 m/s akış hızında nano parçacıklı etilen glikol kullanılarak batarya modülünde meydana gelen sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Akışkan hızı iki katına çıkarılarak yapılan analizde, batarya modülünün maksimum sıcaklığı 307,1 K'de sabit tuttulmuştur. Akışkan hızının ilk analizdeki çalışmaya göre on katına çıkarıldığı durumda nano parçacıklı etilen glikol karışımı ile batarya modülündeki maksimum sıcaklık 305,2 K olarak elde edilmiştir. Şekil 7.13'te 0,01 m/s akış hızında nano parçacıklı etilen glikol kullanılarak elde edilen batarya modülündeki sıcaklık değişimleri gösterilmiştir.



(a) (b)

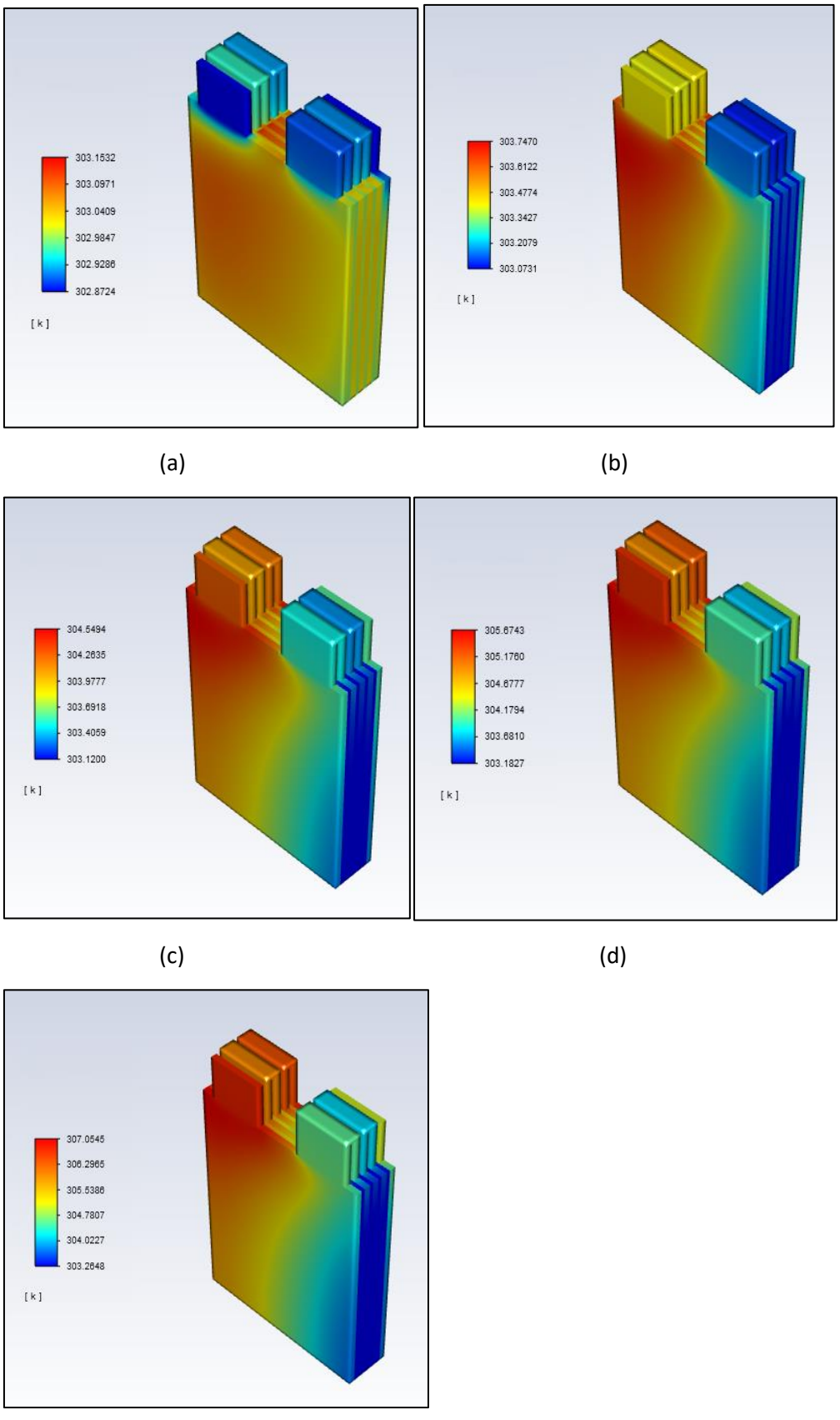


(c) (d)

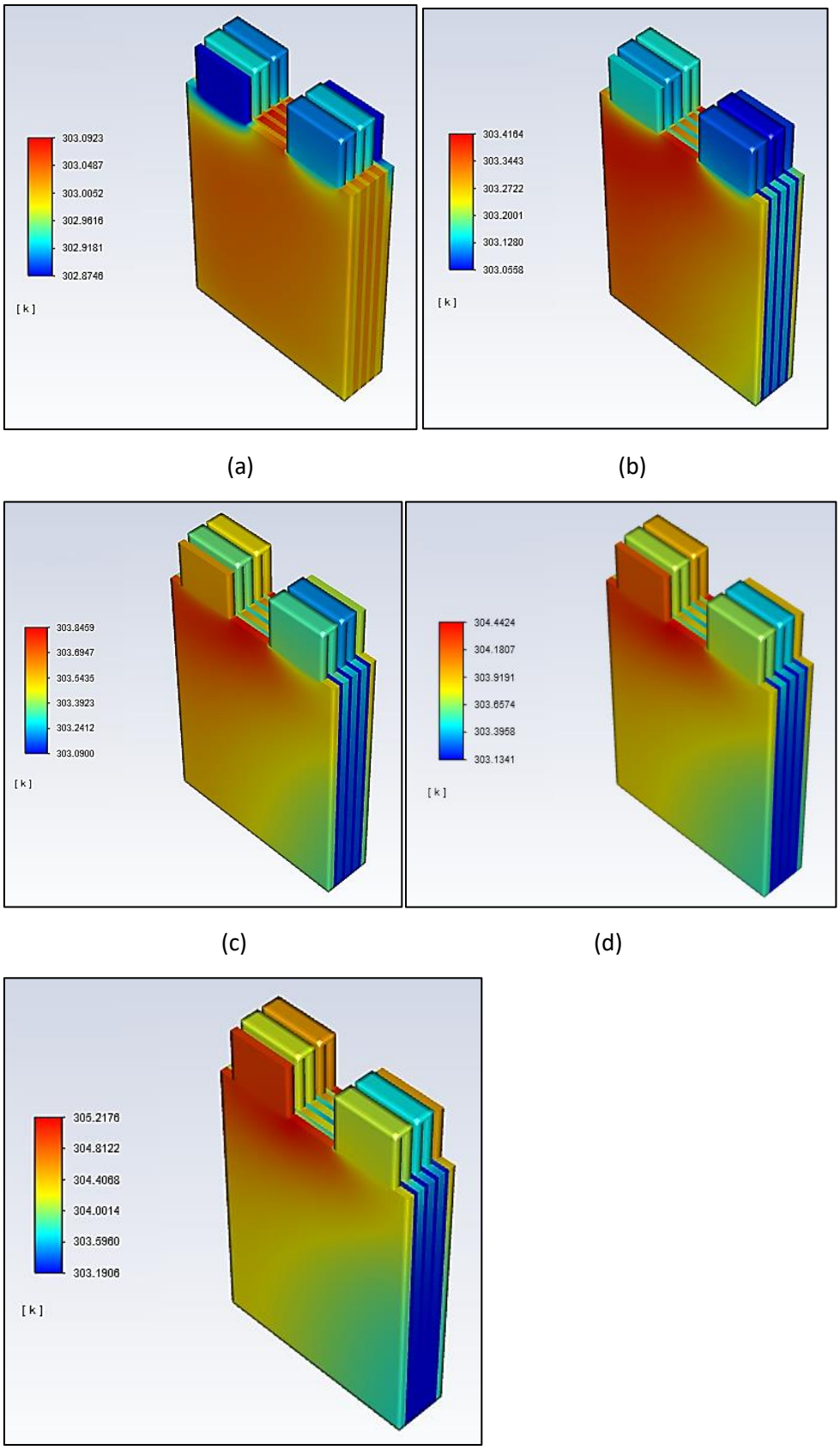


(e)

Şekil 7.11. 0,001 m/s akış hızında nano parçacıklı etilen glikol ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülündeki sıcaklık değişimleri

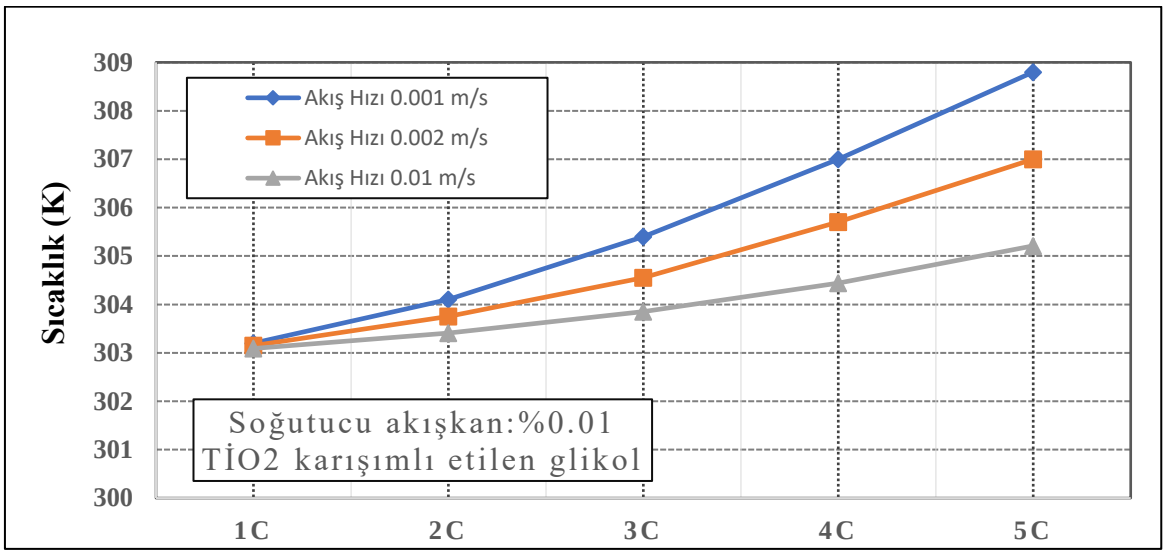


Şekil 7.12. 0,002 m/s akış hızında nano parçacıklı etilen glikol ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülündeki sıcaklık değişimleri



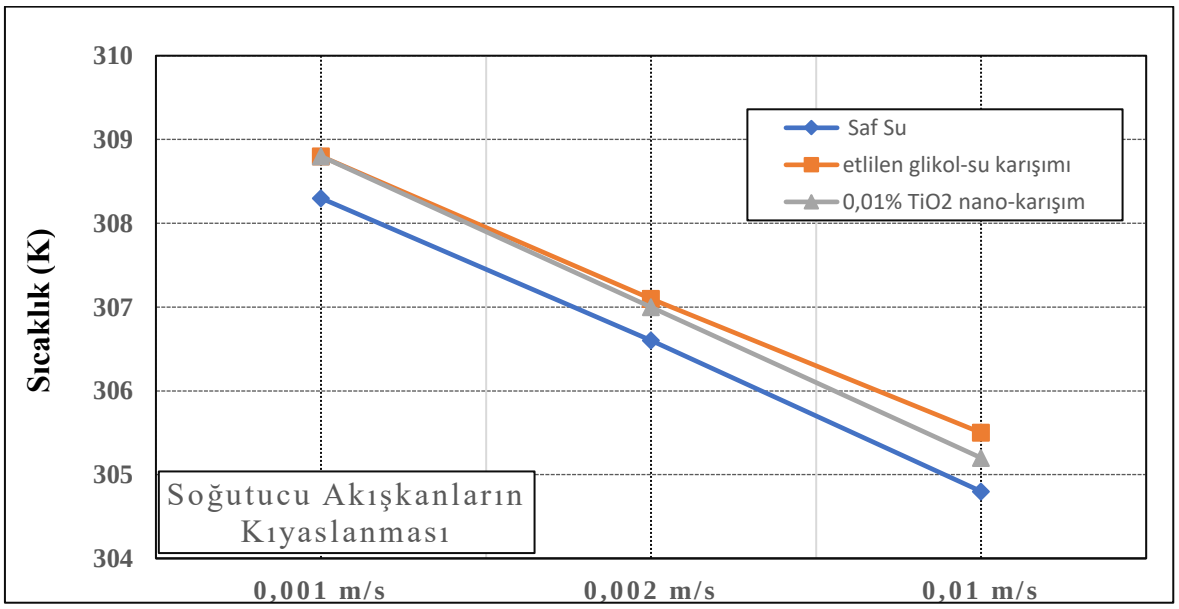
Şekil 7.13. 0,01 m/s akış hızında nano parçacıklı etilen glikol ile (a) 1C (b) 2C (c) 3C (d) 4C (e) 5C deşarj değerlerinde batarya modülündeki sıcaklık değişimleri

Şekil 7.14'de nano parçacıklı etilen glikol kullanılan sistemde, akış hızının batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklıklara etkisi gösterilmiştir.



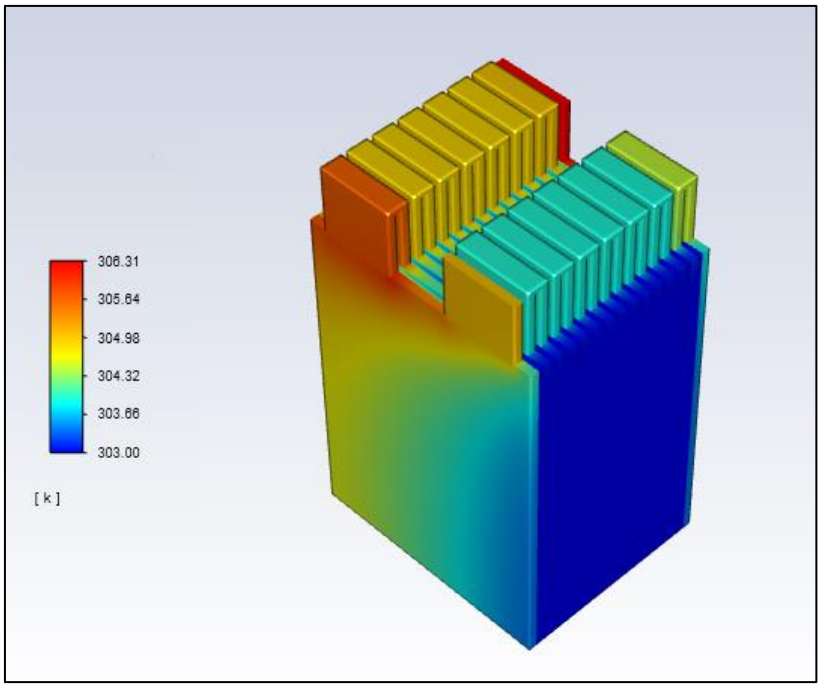
Şekil 7.14. Farklı debilerdeki nano-akışkan karışımı ile bataryada oluşan maksimum sıcaklıklar

Soğutma sisteminde farklı soğutucu akışkanların kullanılmasının, batarya modülündeki maksimum sıcaklığa etkisini görmek için, farklı akış hızlarında soğutucu akışkanlar karşılaştırılmıştır. Şekil 7.15'te çalışmada kullanılan üç farklı soğutucu akışkanın batarya modülünde meydana gelen maksimum sıcaklıklara etkisi gösterilmiştir.



Şekil 7.15. Kullanılan üç farklı soğutucu akışkanın bataryada meydana gelen maksimum sıcaklıklara etkisi

Saf suyun özgül ısı kapasitesi çalışmada kullanılan diğer soğutucu akışkanlara göre daha fazla olduğu için, soğutma sırasında sistemden daha çok ısı enerjisi uzaklaştırılmıştır. Isı iletim katsayısının bu çalışmada kullanılan etilen glikole göre daha fazla olması ise ısı transfer ortamının daha verimli olduğunu göstermiştir. Bu sebeple yapılan çalışmada en iyi soğutma performansı saf su ile elde edilmiştir. Literatürde Liu ve arkadaşları [88] tarafından yapılan çalışmada da kullandıkları diğer soğutucu akışkanlara göre saf suyun en iyi soğutma performansını gösterdiği belirtilmiştir. Nano parçacıklı soğutucu akışkan kullanılan çalışmalarda soğutma performanslarının düşük olmasının temel sebebi olarak kullanılan nano akışkanların ortak özellikleri ise etilen glikol bazlı olmaları verilebilir [89-92]. Literatürde nano parçacıklar belirli hacimsel veya kütlesel yüzdelerde saf suyun termal iletkenliğini arttırmak için eklenmektedir. Nano parçacıkların hacimsel veya kütlesel yüzdeleri arttıkça, termal iletkenlik değerinin de doğru orantılı arttığı ve bataryada meydana gelen sıcaklığın düştüğü görülmektedir. Ancak nano parçacıkların yüzdesel değerlerinin arttırılması, belirli bir yüzdesel değer sonrasında, bataryadaki maksimum sıcaklığı arttırdığını ortaya koymuştur. Bunun sebebi ise, nano parçacıklarının birbirleri üzerinde kayması sonucu ısıyı tek bir noktada toplamalarıdır. Bu durumda bataryada homojen bir sıcaklık dağılımı gözlenememektedir. Çalışmanın üçüncü aşamasında, 15 adet pilden meydana gelen batarya modülündeki sıcaklık değişimi, en iyi soğutma performansını gösteren saf su kullanılarak incelenmiştir (Şekil 7.16). Doğal konveksiyon ortamında batarya modülünde meydana gelen maksimum sıcaklık 325 K olarak elde edilmiştir. Tasarlanan soğutma sistemi ile 0,01 m/s akış hızında saf su ile bataryadaki maksimum sıcaklık 306,31 K olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.16. 0,01 m/s akış hızında saf su ile soğutulan batarya modülünde meydana gelen sıcaklık değişimleri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elektrikli taşıtlarda yaygın olarak kullanılan lityum-iyon bazlı bir batarya modülünün farklı deşarj değerlerinde termal performansları analiz edilmiştir. Batarya modülü, 14,6 Ah gücünde ve lityum manganez oksit ($LiMn_2O_4$) kimyasal yapısında olmak üzere 5 adet prizmatik pilden meydana gelmektedir. Çalışmada pillerin doğal konveksiyon ortamındaki maksimum sıcaklıklarını görmek için soğutmasız sistemde, 1C, 2C, 3C, 4C ve 5C deşarj değerlerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde pillerin bulunduğu ortam sıcaklığı 303 K olarak kabul edilmiştir. Analiz sonucunda batarya modülünde meydan gelen maksimum sıcaklıklar, optimum çalışma sıcaklığının üstüne çıktığı için, batarya modülünde soğutma sisteminin kullanılması uygun görülmüştür.

Soğutma yöntemi olarak direkt temaslı sıvı ile soğutma sistemi kullanılmıştır. Bu soğutma yönteminin tercih edilmesindeki temel sebep soğutucu akışkan ile piller arasındaki ısı transferi yüzey alanının daha fazla olmasıdır. Tasarlanan batarya modülünü, 1 C, 2 C, 3 C, 4 C ve 5 C deşarj değerlerinde optimum çalışma sıcaklığında tutmak için, saf su, %40/60 oranında etilen-glikol su karışımı ve %0,01 oranında TiO_2 nano parçacıklı etilen-glikol olmak üzere üç farklı soğutucu akışkan kullanılmıştır. Çalışmada, farklı soğutucu akışkan hızlarının, batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklığa etkisini görmek için, 0,001 m/s, 0,002 m/s ve 0,01 m/s hızlarındaki soğutucu akışkanlar analiz edilmiştir. 0,01 m/s akışkan hızında saf suyun, %40/60 oranında etilen-glikol su karışımının ve %0,01 oranında TiO_2 nano parçacıklı etilen-glikol nano akışkanın soğutma performansları sırasıyla; %3,03, %2,8 ve %2,9 olarak hesaplanmıştır. Soğutma performansı en iyi olan soğutucu akışkan saf su olarak belirlenmiştir. Diğer soğutucu akışkanlarında performansları her ne kadarda saf suyun performansına yakın olsa da seri üretimdeki maliyetleri ve araçta meydana getirdikleri parazittik güçleri dikkate alındığında kullanımı uygun görülmemiştir.

En iyi soğutma performansına sahip olan saf suyun, 40°C üstündeki batarya modülündeki maksimum sıcaklıklarında performansını görmek için 15 adet pilden meydana gelen batarya modülü tasarlanmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu batarya modülünde 5C deşarj değerinde maksimum sıcaklık 325 K olarak gözlemlenmiştir. 0,01 m/s hızda saf su kullanılarak batarya modülünün optimum sıcaklıklar içerisinde tutulmaya çalışılmıştır. 0,01 m/s hızda saf su kullanılan soğutma sisteminde maksimum sıcaklık 306,3 K olarak

gözlemlenmiştir. Ayrıca, çalışmada soğutucu akışkan hızı arttıkça, soğutucu akışkan türünden bağımsız olarak, batarya modülünde oluşan maksimum sıcaklıkların azaldığı görülmüştür.

Çalışmanın sonuçları çeşitli grafikler ve görsellerle açıklanmıştır. Literatüre daha fazla çalışmanın yapılması ve bataryaların geliştirilmesi için aşağıdaki öneriler yapılmaktadır.

- Pillerin çözümlenmesinde kullanılan katsayıların belirlenmesi için test düzeneği kurulup, pillerin U ve Y katsayıları bu test düzeneğinden hesaplanabilir.
- Tasarlanmış olan bataryada pillerin tasarım kolaylığı ve analiz süresi göz önünde bulundurulup, koruma kasaları ve spinel yapıdaki mimarisi göz önünde bulundurulmamıştır. Gerçek şartlarda meydana gelecek sıcaklıkları gözlemlemek için bu tasarımlar yapılabilir.
- Soğutucu akışkan olarak farklı hacimsel yüzdelerde veya farklı nano-parçacıklar kullanılarak soğutma performansları incelenebilir.
- Akışın tek yönde olduğu bu tez çalışmasında, farklı geometrik yapılarda kanatçıklar kullanılarak analizler gerçekleştirilebilir. Böylece pillerin arasındaki boşluklardaki ısı taşınım ortamı arttırabilir.

Sonuç olarak, günümüzde yaygınlaşan elektrikli taşıtlarda kullanılan lityum-iyon bazlı bataryalarının performansları ve ömürlerinin arttırılması, yolcu güvenliğinin sağlanması için batarya termal yönetim sisteminin gerekliliği ortaya konmuştur. Farklı soğutma yöntemleri ile bataryaların termal yönetim sistemlerinin geliştirilebileceği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Shi, J., Min, T., Han, S., Wu, T. and Tang, Y. (2022). Electric vehicle battery remaining charging time estimation considering charging accuracy and charging profile prediction, *Journal of Energy Source*, 49, 104132.

2. Goutam, S., Timmermans, J., Omar, N., Bossche, P. and Mierlo, J. (2015). Comparative study of surface temperature behavior of commercial Li-ion pouch cells of different chemistries and capacities by ınfrared thermography, *Energies*, 8, 8175-8192.

3. Wang, X., Liu, S., Zhang, Y., Lv, S., Ni, H., Deng, Y. and Yuan, Y. (2022). A review of the power battery thermal management system with different cooling, heating and coupling system, *Energies*,15, 1963.

4. Wang, Z., Li, X., Zhang, G., Lv, Y., He, J., Luo, J., Yang, C. and Yang, C. (2017). Experimental study of a passive thermal management system for three types of battery using copper foam saturated with phase change materials, *RSC Advances*, 44, 27441-27448.

5. Westbrook, M. H., Institution of Electrical Engineers., & Society of Automotive Engineers. (2001). The electric car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars. London: Institution of Electrical Engineers.

6. Hoyer, K. G. (2008). The history of alternative fuels in transportaion: The case of electric and hybrid cars, *Utilities Policy*, 16, 63-71

7. Baygüneş, B. (2019). *Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi*, Yüksek Lisans Tezi, On Dokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 21-22.

8. Tie, F. S., Tan, W. C. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 80-102.

9. Berber, C. (2019). *Bataryaların ısıl analizlerin yapılması ve ısıl yönetim sistemleri için soğutma yöntemlerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 21-22.

10. Kuper, C., Hoh, M., Houchin-Miller, G. and Fuhr, J. (2009). Thermal management of hybrid vehicle battery systems. *Material Science*, 24, 1-10.

11. İnternet: https://www.smith.edu/hsc/museum/ancient_inventions/battery2.html Son erişim tarihi: 16.05.2022.

12. Ozawa. K., (Editör), (2009) *Lithium Ion Rechargeable Batteries* Almanya: Wiley-VCH, 8-10.

13. Nazri. G., Pistoia. G. (2004), Lithium Batteries: Science and Technology, Amerika: Kluwer Academic Publishers, 8-11.

14. Keleş. Ö., Polat, B. D. (2012), Lityum-iyon pil teknolojisi, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalürji Mühendisleri Odası Dergisi*, 43-44.

15. Miller, T. J. (2002). Lithium-ion battery automotive applications and requirements, *Proc. Seventeenth Annu. Battery Conf. Applications and Advances*, 113–118.

16. İnternet: https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion, Son erişim tarihi: 09.02.2022.

17. Baykal, T. (2013). *Lityum Polimer Bataryalar için Batarya Yönetim Sistemi geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 18-23.

18. Li, J., Zhu, Z. (2014). *Battery thermal management systems of electric vehicles*, Yüksek Lisans Tezi, Chalmers Teknoloji Üniversitesi, İsveç, 17-18.

19. Ramadass, P., Haran, B., White, R. and Popov, B. N. (2002). Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: Part I. Cycling performance, *Journal of Power Sources*, 112, 606–613.

20. Wu, W., Wang, S., W., Wu, Chen, K., Hong, S. and Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management *Energy Conversion Management*, 182, 262–281.

21. Jaguemont, J., Boulon, L. and Dub´e, Y. (2016). A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperature, *Applied Energy*,164 99–114.

22. Yenigün, M., Utlu, Z. (2016). *Elektrikli araçlarda kullanılan soğutma sistemlerini enerji ve ekserji verimliliği açısından incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 37-38.

23. Pesaran, A, A. (2001). Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions, *Advanced Automotive Battery Conference*, 5-6.

24. Fan, L., Khodadadi, J. M. and 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.

25. Mohammadian, S., Zhang, Y. (2015). Thermal management optimization of an air-cooled Li-ion battery module using pin-fin heat sinks for hybrid electric vehicles, *Journal of Power Sources*, 273, 431-439.

26. Park, H. (2013). A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles, *Journal of Power Sources*, 239, 30-36.

27. Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M. and Zhang, H. (2021). A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles, *Journal of Power Sources*, 501, 230001.

28. Tete, P. R., Gupta, M. M. and Joshi, S. S. (2021). Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review, *Journal of Energy Storage*, 35, 102255.

29. Huo, Y., Rao, Z., Liu, X. and Zhao, J. (2015). Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate, *Energy Conversion and Management*, 89, 387–395.

30. Zhao, J., Rao, Z. and 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.

31. Al-Hallaj, S., Selman, J. R. (2000). A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material, *Journal of the Electrochemical Society*, 147, 31-32.

32. Kizilel, R., Lateef, Sabbah, A. R., Farid, M. M., Selman, J. R. and 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.

33. Khateeb, S. A., Amiruddin, S., Farid, M., Selman, J. R. and Al-Hallaj, S. (2005). Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation, *Journal of Power Sources*, 142(1), 345-353.

34. Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K. and Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, 45, 1597–1615.

35. Samimi, F., Babapoor, A., Azizi, M. and Karimi, G. (2016). Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers, *Energy*, 96, 355-371.

36. Ling, Z., Wang, F., Fang, X., Gao, X. and Zhang, Z. (2015). A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling, *Applied Energy*, 148, 403–409.

37. Zhao, Y., Zou, B., Li, C. and Ding, Y. (2019). Active cooling based battery thermal management using composite phase change materials, *Energy Procedia*, 158, 4933–4940.

38. Sun, H., Dixon, R. (2014). Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack, *Journal of Power Sources*, 272, 404-414.

39. Giuliano, M. R., Prasad, A. K. and Advani, S. G. (2012). Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium-titanate batteries, *Journal of Power Sources*, 216, 345-352.

40. Fan, L., Khodadadi, J. M. and 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.

41. Afzal, A., Kaladgi, A. R., Jilte, R. D., Ibrahim, M., Kumar, R., Mujtaba, M. A., Alshahrani, S. and Saleel, C. A. (2021). Thermal modelling and characteristic evaluation of electric vehicle battery system, *Case Studies in Termal Engineering*, 26, 101058.

42. Wang, N., Li, C., Li, W., Huang, M. and Qi, D. (2021). Effect analysis on performance enhancement of novel air cooling battery thermal management system with spoilers, *Applied Thermal Engineering*, 192, 116932.

43. Ye, B., Rubel, MRH. and Li, H. (2019). Design and optimization of cooling plate for battery module of an electric vehicle, *Applied Science*, 9(4), 754.

44. Mbulu, H., Laoonual, Y. and Wongwises, S. (2021). Experimental study on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe, *Case Studies in Termal Engineering*, 26, 101029.

45. Buidin, T. I. C., Mariasiu, F. (2021). Modeling approach of an air based battery thermal management system for an electric vehicle, *Applied Science*, 11(15), 7089.

46. Yang, N., Zhang, X., Li, G. and Hua, D. (2015). Assesment of the forced air cooling performance for cylindrical lithuim-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements, *Applied Thermal Engineering*, 80, 55-65.

47. Wang, T., Tseng, K. J. and Zhao, J. (2015). Development of efficient air cooling strategies for lithum-ion battery module based on empirical heat source model, *Applied Thermal Engineering*, 90, 521-529.

48. Zhao, J., Rao, Z., Huo, Y., Liu, X. and 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.

49. Mohammadian, S. K., Rassoulinejad-Mousavi, S. M. and Zhang, Y. (2015). Thermal management improvement of an air cooled high-power lithum-ion battery by embedding metal foam, *Jounal of Power Sources*, 296, 305-313.

50. He, F., Ma, L. (2015), Thermal management of batteries employing active temperature control and reciprocating cooling flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 164-172.

51. Lu, Z., Meng, X. Z., Wei, L. C., Hu, W. Y., Zhang, L. Y. and Jin, L. W. (2016), Thermal management of densely packed ev battery with forced air cooling strategies, *Energy Procedia*, 88, 682-688.

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

53. Chen, K., Wang, S., Song, M. and Chen, L. (2017). Configuration optimization of battery pack in parallel air cooled battery thermal management system using an optimization strategy, *Applied Thermal Engineering*, 123, 177-186.

54. Cao, W., Zhao, C., Wang Y., Dong, T. and Jiang, F. (2019). Thermal modeling of full-size-scale cylindrical battery pack cooled by channeled liquid flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 138, 1778-1187.

55. Jilte, R. D., Kumar, R. and Ahmadi M. M. (2019). Cooling performance of nanofluid submerged vs. nanofluid circulated battery thermal management systems, *Journal of Cleaner Production,* 240, 118-131.

56. Wu, F., Rao Z. (2017). The Lattice Boltzmann investigation of natural convection for nanofluid based battery thermal management, *Applied Thermal Engineering,* 115, 659-669.

57. Qian, Z., Li, Y. and Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithuim-ion battery thermal managemet system by using mini-channel cooling, *Energy Conversion and Management*, 126, 662-631.

58. Yang, X.H., Tan, S. C. and Liu, J. (2016). Thermal management of Li-ion battery with liquid metal, *Energy Conversion and Management*, 117, 577-585.

59. Tong, W., Somasundaram, K., Birgerrson, E., Mujumdar, A. S. and Yap, C. (2015). Numerical investigation of water cooling for a lithum-ion bipolar battery pack, *International Journal of Thermal Sciences,* 94, 259-269.

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

61. Zhao, J., Rao, Z. and Li, Y. (2015). Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindirical lithuim-ion power battery, *Energy Conversion and Management*, 103, 157-165.

62. Lan, C., Xu, J., Qiao, Y. and Ma, Y. (2016). Thermal management for high power lithum-ion battery by minichannel aluminum tubes, *Applied Thermal Engineering*, 101, 284-292.

63. Rao, Z., Qian, Z., Y, Kuang. and Li, Y. (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithuim-ion battery module with variable contact surface, *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514-1522.

64. Javani, N., Dinçer, I., Naterer, G. F. ve Yilbas, B. S. (2014). Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 72, 690-703.

65. Lin, C., Xu, S., Chang, G. and Liu, J. (2015). Experiment and simulation of a LiFePO4 battery pack with a passive thermal management system using composite phase change material and graphite sheets, *Journal of Power Sources*, 275, 742-749.

66. Jarrett, A., Kim, I. Y. (2011). Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance, *Journal of Power Sources*, 196, 10359-10368.

67. Pals, C.R., Newman, J., (1995), Thermal modeling of the lithium-polymer battery: I. Discharge behavoir of a single cell, *Journal of The Electrochemical Society*, 142, 10.

68. ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules,107, 2018.

69. Kim, U. S., Shin, C. B. and Kim, C. S. (2009). Modeling for the scale-up of a lithium-ion polymer battery, *Journal Power Sources*, 189, 841–846.

70. Kwon, K. H., Shin, C.B., Kang, T. H. and Kim, C.S. (2006). A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery, *Journal of Power Sources*, 163,151-157.

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

72. Kalkan, O., Celen, A., Bakirci, K. ve Dalkilic, A. S. (2021). Experimental investigation of thermal performance of novel cold plate design used in a Li-ion pouch-type battery, *Applied Thermal Engineering*, 191, 116885.

73. Gocmen, S., Cetkin, E. (2022). Emergence of elevated battery positioning in air cooled battery packs for temperature uniformity in ultra-fast dis/charging applications, *Journal of Energy Storage*, 45, 103516.

74. Kalkan, O., Gelen, A. ve Bakirci, K. (2021). Experimental and numerical investigation of the LiFePO4 battery cooling by natural convection, *Journal of Energy Storage*, 40, 102796.

75. Kim, U. S., Shin, C. B. and Kim, C. S. (2008). Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery, *Journal of Power Sources*, 180, 909-916.

76. Gu, H. (1983). Mathematical analysis of a Zn/NiOOH cell, *Journal of the Electrochemical Society*, 130(7),1459.

77. Immmonen, E., Hurri, J. (2021). Incremental thermo-electric CFD modeling of a high-energy Lithium-Titanate Oxide battery cell in different temperatures: A comparative study, *Applied Thermal Engineering*, 197, 117260.

78. Kim, U. S., Yi, J., Shin, C. B., Han, T. and 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. 611-618.

79. Kök, C., Alkaya, A. (2020). Investigation of thermal behavior of lithium-ıon batteries under differend loads, *European Mechanical Science*, 4, 96-102.

80. Liu, Y., Liao, Y.G. and Lai, M. C. (2019). Transient temperature distributions on lithuim-ion polymer SLI battery, *Vehicles*, 1(1), 127-137.

81. Patil, M. S., Seo, J. H. and Lee, M. Y. (2021). A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management, *Energy Conversion and Management*, 229, 113715.

82. Dinçer, İ., Zamfirescu, C. (2016), Drying Phenomena: Theory and Applications (First Edition), New Jersey, John Wiley & Sons, 457.

83. Keklikcioglu, O., Ozceyhan, V. (2022). Heat transfer augmentation in a tube with conical wire coils using a mixture of ethylene glycol/water as a fluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 171, 107204.

84. Hamid, A.K., Azmi, W.H., Mamat, R., Usri, N.A. and Najafi, G. (2015). Effect of temperature on heat transfer coefficient of titanium dioxide in ethylene glycol-based nanofluid, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 8, 1367-1375.

85. Li, M., Liu, Y., Wang, X. and Zhang, J. (2019). Modeling and optimization of an enhanced battery thermal management system in electric vehicles, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(1), 65-75.

86. Mondal, B., Lopez, F. C., Verma, A. and Mukherjee, P. P. (2018). Vortex generators for active thermal management in lithuim-ion battery systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 800-815.

87. Xu, X., Li, W., Xu, B. and Qin, J. (2019). Numerical study on water cooling system for prismatic LiFePO4 batteries at abused operating conditions, *Applied Energy*, 250, 404-412.

88. Liu, H., Chika, E. and Zhao, J. (2018). Investigation into the effectiveness of nanofluids on the minichannel thermal management for high power lithuim-ion battery, *Applied Thermal Engineering*, 142, 511-523.

89. Mashayekhi, M., Houshfar, E. and Ashjaee, M. (2020). Development of hybrid cooling method with PCM and Al_2O_3 nanofluid in aluminium minichannels using heat source model of Li-ion batteries, *Applied Thermal Engineering*, 178, 115543.

90. Kiani, M., Ansari, M., Arshadi, A. A. and Houshfar, E., (2020). Hybrid thermal management of lithuium-ion batteries using nanofluid, metal foam, and phase change material: an integrated numerical-experimental approach, *Journal of Thermal Anaylsis And Calorimetry*, 141, 1703-1715.

91. Nasir, F., M., Abdullah, M., Z., Majid, M., F., M., A. and Ismail, M. A. (2019). Nanofluid -filled heat pipes in managing the temperature of EV lithium-ion batteries, *Journal of Physics: Conference Series*, 1349, 012123.

92. Kiani, M., Omiddezyani, S., Houshfar, E., Miremadi, S. R., Ashjaee, M. and Nejad, A. M. (2020). Lithium-ion battery thermal management system with Al_2O_3/AgO/CuO nanofluids and phase change material, *Applied Thermal Engineering*, 180, 1158



GAZİ GELECEKTİR..