



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN HAVA SOĞUTMALI BATARYA  
TERMAL YÖNETİM SİSTEMİNİN TASARIMI VE DENEYSEL  
İNCELENMESİ**

**EKREM SEZİCİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DR. ÖĞR. ÜYESİ FİKRET POLAT**

**DÜZCE, 2022**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN HAVA SOĞUTMALI BATARYA**  
**TERMAL YÖNETİM SİSTEMİNİN TASARIMI VE DENEYSEL**  
**İNCELENMESİ**

Ekrem SEZİCİ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Dr. Öğr. Üyesi Fikret POLAT

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Fikret POLAT

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. .... (jüri üyesinin ismi yazılmalıdır)

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi .... (jüri üyesinin ismi yazılmalıdır)

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi .... (jüri üyesinin ismi yazılmalıdır)

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi .... (jüri üyesinin ismi yazılmalıdır)

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: .../.../2022

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

2022

Ekrem SEZİCİ



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Fikret POLAT'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Emre AVCI'ya da şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

2022

Ekrem SEZİCİ

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. BATARYA PAKETİ.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.1. Lityum İyon Pil Hücresi .....</b>	<b>2</b>
1.1.1.1. Anot.....	14
1.1.1.2. Katot.....	16
1.1.1.3. Yüksek Nikel Katmanına Sahip Oksitler.....	17
<b>1.1.2. Lityum İyonun Tarihçesi.....</b>	<b>20</b>
<b>2. BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1. HAVA SOĞUTMALI BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.1. Fanlar .....</b>	<b>26</b>
2.1.1.1. Süreklilik Eşitliği.....	27
2.1.1.2. Bernoulli Eşitliği.....	27
2.1.1.3. Gürültü.....	27
2.1.1.4. Titreşim .....	28
2.1.1.5. Fan Kanunları.....	28
<b>2.2. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME KULLANILAN BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3. SIVI SOĞUTMALI BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4. HİBRİT SOĞUTMALI BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ .....</b>	<b>33</b>
<b>3. MATERYAL VE METOD.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1. BATARYA PAKETİNİN TASARIMI .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2. SICAKLIK SENSÖRLERİ .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. BATARYA PAKETİ İMALATI .....</b>	<b>41</b>
3.3.1. Üç Boyutlu Yazıcı.....	41
3.3.2. Tek Kutuda Üç Farklı Model.....	46
<b>3.4. DENEY DÜZENEGİ .....</b>	<b>48</b>
<b>4. DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1. ŞARJ DENEYLERİ.....</b>	<b>51</b>
4.1.1. Fan Güç Tüketiminin 3,68 Watt Olduğu Şarj Deneyleri .....	52
4.1.2. Fan Güç Tüketiminin 1,98 Watt Olduğu Şarj Deneyleri .....	54
<b>4.2. DEŞARJ DENEYLERİ .....</b>	<b>56</b>
4.2.1. Fan Güç Tüketiminin 3,68 Watt Olduğu Deşarj Deneyleri .....	56
4.2.2. Fan Güç Tüketiminin 1,98 Watt Olduğu Deşarj Deneyleri .....	58

<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>62</b>
<b>6. KAYNAKÇA.....</b>	<b>64</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>69</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa No

Şekil 1.1 Elektrikli Motor ve İçten Yanmalı Motor [2].	2
Şekil 1.2 Alessandro Volta'nın İlk Elektrik Hücresi [6].	4
Şekil 1.3 Lityum İyon Pil Hücresinin Kesit Görünümü [3].	5
Şekil 1.4 Elementlerin Elektrokimyasal Serileri [3].	6
Şekil 1.5. Lityum pil hücresinin iç yapısı [7].	7
Şekil 1.6. Katı elektrolit ara fazı oluşumu [7].	9
Şekil 1.7. Lityum pil hücresinin şarj-deşarj mekanizması [7].	10
Şekil 1.8. NMC (Lityum-nikel-mangan-kobalt) ve katkılı NMC ile eşleştirilmiş iki grafit anot üzerindeki metal iyonları ve lityum miktarları karşılaştırılması [30].	19
Şekil 1.9. Katkısız NMC ve katkılı grafit anot ile iki nikel katot hücredeki yoğunluğun püskürtme derinliğine bağlı gösterimi [30].	20
Şekil 2.1. Pasif Hava Soğutma Sistemi [32].	23
Şekil 2.2. Aktif Hava Soğutma Sistemi [32].	23
Şekil 2.3 Z Tipi Hava Soğutmalı BTYS [37].	25
Şekil 2.4 Titreşim kesiciler [33].	28
Şekil 3.1 Pil Tutucu.	36
Şekil 3.2 Isı Sensörlerinin Giriş Noktaları.	36
Şekil 3.3 Batarya Paketi Tasarımı İzometrik Görünümü.	36
Şekil 3.4 Batarya Kutusu Ön Kesit Görünümü.	37
Şekil 3.5 Delikli Yapıya Sahip Arka Kapak.	38
Şekil 3.6 Delikli Yapıya Sahip Yan Kapak.	38
Şekil 3.7 Üst Kapak Tasarımı.	39
Şekil 3.8 Fan Yuvası.	39
Şekil 3.9 Sıcaklık Sensörleri Üst Görünüm.	40
Şekil 3.10 Sıcaklık Sensörlerinin Üstten Kesit Görünümü.	41
Şekil 3.11 Üç Boyutlu Yazıcı [55].	42
Şekil 3.12 Batarya Paketinin Üç Boyutlu Yazıcıda İmalat Aşamaları.	42
Şekil 3.13 Batarya Pil Paketi.	43
Şekil 3.14 6 Seri 3 Paralel 12 Amper Batarya Yönetim Sistemi Bağlantıları [56].	44
Şekil 3.15 Pil Paketinin Batarya Kutusuna Yerleşimi.	44
Şekil 3.16 Fan ve Arduino.	45
Şekil 3.17 Arduino ve USB Bağlantı Kablosu.	45
Şekil 3.18 Üst Kapağın Yerleşimi.	46
Şekil 3.19 Arka Taraf ve Yanlar Açık Batarya Kutusu.	47
Şekil 3.20 Arka Taraf Açık ve Yan Taraflar Kapalı Batarya Kutusu.	47
Şekil 3.21 Arka Taraf Kapalı ve Yan Taraflar Açık Batarya Kutusu.	48
Şekil 3.22 Deney Düzenegi.	48
Şekil 4.1 Soğutma sisteminin kullanılmadığı 60 dakikalık şarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi.	51
Şekil 4.2 Arka taraf ve yan tarafların açık olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi.	52
Şekil 4.3 Arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi.	53

Şekil 4.4 Arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi. ....	53
Şekil 4.5 Arka taraf ve yan tarafların açık olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi. ....	54
Şekil 4.6 Arka tarafın açık yan tarafların kapalı olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi. ....	55
Şekil 4.7 Arka tarafın kapalı yan tarafların açık olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi. ....	55
Şekil 4.8 Soğutma sistemi kullanılmadan deşarj deneyinde 6 sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi. ....	56
Şekil 4.9 Arka taraf ve yan tarafların açık olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi. ....	57
Şekil 4.10 Arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi. ....	57
Şekil 4.11 Arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi. ....	58
Şekil 4.12 Arka taraf ve yan tarafların açık olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi. ....	59
Şekil 4.13 Arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi. ....	59
Şekil 4.14 Arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi. ....	60

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Çizelge 1.1. İçten Yanmalı Motor ve Elektrik Motoru Karşılaştırma [3].....	3
Çizelge 1.2. Anot Malzemeleri İçin Alaşımlara Bağlı Olarak Gravimetrik ve Hacimsel Kapasite Değerleri [21]. .....	14
Çizelge 3.1. 60x60x15 mm Fanın Teknik Özellikleri [47].....	40
Çizelge 3.2 18650 Sony VTC 6 Pilin Teknik Özellikleri.....	43
Çizelge 3.3 Deneyler.....	49



## KISALTMALAR

BTYS	Batarya termal yönetim sistemi
EA	Elektrikli araç
FDM	Faz değiştiren malzeme
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HEA	Hibrit elektrikli araç
KEAF	Katı elektrolit ara fazı
MIBD	Mikro ısı borusu dizisi



## SİMGELER

A	Amper
C	Celcius
CFM	Dakikada fit küp
mAh	Mili amper saat
K	Kelvin
$m^3/dk$	Dakikada metre küp
RPM	Dakikada dönüş
V	Volt
W	Watt



## ÖZET

# ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN HAVA SOĞUTMALI BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMİNİN TASARIMI VE DENEYSEL İNCELENMESİ

EKREM SEZİCİ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fikret POLAT

Ekim 2022, 68 sayfa

Çevre kirliliğinin azaltılması ve çevrenin korunması ile birlikte iklim değişikliğinin en büyük sorunları hafifletilmeye çalışılmaktadır. Çevre kirliliğinin %23'lük kısmı otomotiv sektörüne aittir ve otomotiv sektörü neden olduğu bu kirliliği içten yanmalı motorlar yüzünden gerçekleştirmektedir. Bu sebeple de hem otomotiv üreticileri hem de bilim adamları zararlı emisyonlardan kurtulmak için elektrikli araçların (EA) ve hibrit elektrikli araçların (HEA) geliştirilmesi için büyük çabalar harcamaktadırlar. Batarya paketi elektrikli araç ve hibrit elektrikli araçların en önemli aksamını oluşturmaktadır. Hibrit elektrikli araçların bir kısmı ya da tamamı elektrikle çalışırken elektrikli araçlar tamamen batarya paketi ile çalışır. Enerji ve güç yoğunluğunun yüksek olduğu lityum iyon piller, uzun ömürlü ve çevre dostu olmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinde performansın düşmesi, pil hücrelerinin dayanıklılığının ve ömrünün tükenmesi, termal kaçaklar nedeniyle oluşan güvenlik riskleri pil paketi için batarya termal yönetim sistemini zorunlu kılmaktadır. Bu tez çalışmasında, silindirik yapıdaki 18 adet lityum iyon pil hücresinden oluşan pil takımı ve üç farklı modelin (arka ve yan tarafların açık olduğu model, arka tarafın açık yan tarafların kapalı olduğu model ve arka tarafın kapalı yan tarafların açık olduğu model) bir arada olduğu hava soğutmalı batarya kutusu tasarlanıp imal edilmiştir. İmal edilen bu yapı ile hava soğutmalı batarya termal yönetim sisteminin soğutma deneyleri yapılmıştır. Fanın iki farklı hız değerinde (1,088 m<sup>3</sup>/dk ve 0,812 m<sup>3</sup>/dk hava akış debisi) kullanıldığı deneylerde pil paketinin şarj ve deşarj durumundaki sıcaklık değerleri incelenmiştir. Batarya kutusunun tasarımında hava deliklerinin portatif yapıda tasarlanması, tek batarya kutusunda farklı modellerin bir arada olmasını sağlamıştır. 25 °C'da koşullarında gerçekleştirilen deneylerde; hava akış hızının artması, pil paketinin sıcaklık dağılımının daha homojenik bir yapıda olmasını, hava giriş alanının artması ise soğutma performansını artırmıştır. Batarya paketinin ortasında yer alan pil hücrelerinin daha çok ısındığı gözlemlenmiştir. Ayrıca hava akışının doğrusal olması batarya paketi içerisindeki sıcaklık dağılımının daha homojen bir yapıda olmasını sağlamıştır. Bu çalışma ile hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemi alanında yapılan çalışmalara katkı sağlamak amaçlanmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Elektrikli araç, Lityum iyon pil, Hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemi.

## ABSTRACT

### DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AIR-COOLED BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES

Ekrem SEZİCİ

Düzce niversity

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical  
Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fikret POLAT

October 2022, 68 pages

With the reduction of environmental pollution and protection of the environment, the biggest problems of climate change are tried to be alleviated. 23% of environmental pollution belongs to the automotive industry and the automotive industry carries out this pollution caused by internal combustion engines. For this reason, both automotive manufacturers and scientists are making great efforts to develop electric vehicles (EA) and hybrid electric vehicles (HEA) in order to get rid of harmful emissions. The battery pack is the most important component of electric vehicles and hybrid electric vehicles. While some or all of the hybrid electric vehicles are powered by electricity, electric vehicles are completely powered by the battery pack. Lithium-ion batteries, which have high energy and power density, are widely used because of their long life and environmental friendliness. However, the decrease in performance at low and high temperatures, the depletion of the durability and life of the battery cells, and the safety risks caused by thermal leaks necessitate the battery thermal management system for the battery pack. In this thesis, the battery pack consisting of 18 lithium-ion battery cells in a cylindrical structure and three different models (the model with the back and sides open, the model with the back side open, the sides closed, and the model with the back side closed and the sides open) are used. The cooled battery box is designed and manufactured. With this manufactured structure, cooling experiments of the air-cooled battery thermal management system were carried out. In the experiments where the fan was used at two different speeds ( $1,088 \text{ m}^3/\text{min}$  and  $0.812 \text{ m}^3/\text{min}$ ), the temperature values of the battery pack in charge and discharge conditions were examined. The portable design of the air holes in the design of the battery box enabled different models to be combined in a single battery box. In the experiments carried out in 25 room conditions; The increase in air flow rate increased the temperature distribution of the battery pack to be more homogeneous, and the increase in the air intake area increased the cooling performance. It has been observed that the battery cells in the middle of the battery pack get hotter. In addition, the linearity of the air flow has ensured a more homogeneous temperature distribution in the battery pack. With this study, it is aimed to contribute to the studies in the field of air-cooled battery thermal management system.

**Keywords:** Electric vehicle, Li-ion battery, Air cooled battery thermal management system.

# 1. GİRİŞ

Her geçen yıl dünya üzerinde ölçülen ortalama sıcaklık değerleri artmaktadır. Bu durumun başlıca sebebi ısıyı tutan gazların atmosferde artması gösterilmektedir. Karbondioksit ve sera gazları ısıyı tutan gazlardandır. Bu duruma küresel ısınma denilmektedir. Fosil yakıtların tüketimi, endüstriyel ve tarımsal faaliyetler sonucu ortaya çıkan gazlar küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Kuraklık, sel felaketleri, yağışlardaki dengesizlik durumu, tayfun, fırtına gibi doğal afetler küresel ısınmanın belirtileridir. Küresel ısınmanın önüne geçmek bu sebeplerden dolayı gereklidir. İçten yanmalı motorların artık ürünü olan karbondioksidin etkisinin azaltılması amacıyla elektrikli araç teknolojilerine yönelim artmaktadır.

1886 yılında Benz Patent Motorwagen isimli otomobil, devrim niteliğinde olan içten yanmalı motoru kullanan ilk araç olmuştur. Günümüzde de kullanılan içten yanmalı motorlar, çıkardıkları atık gazlar ile küresel ısınmayı artırmaktadır. Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve artan enerji ihtiyacının karşılanamaması gibi sebepler alternatif enerji arayışını artırmıştır. Bu arayışlar ile birlikte yenilenebilir enerji kaynakları gündeme gelmektedir. Bu konuda yapılan araştırmalara elektrikli araçlar ve hibrit elektrikli araçlar üzerinde yapılan çalışmalar örnek olarak gösterilmektedir.

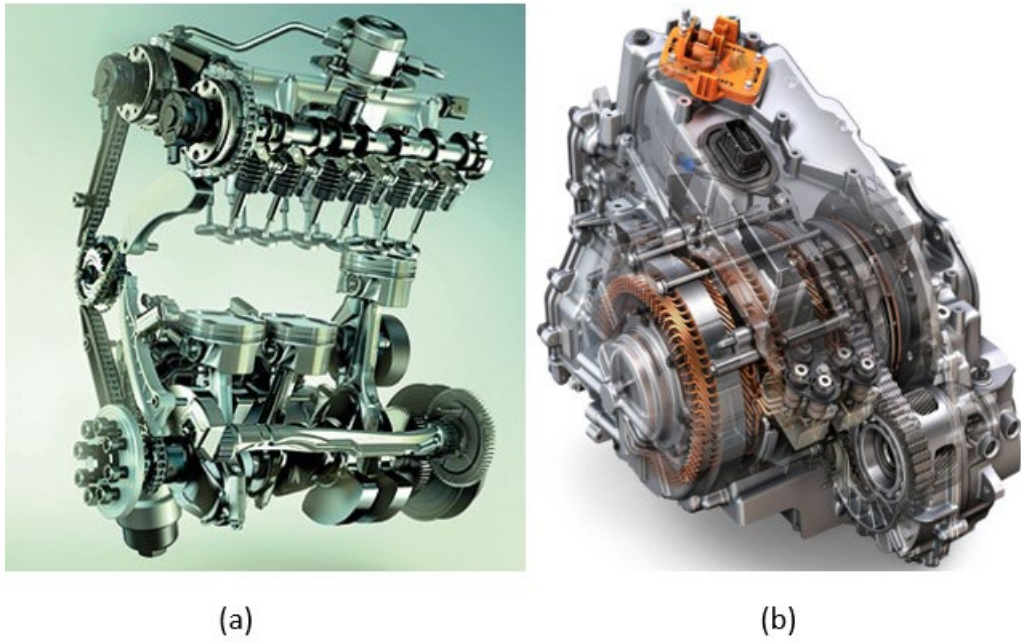
Elektrikli araçlar elektrik enerjisi tüketerek çalışır. Elektrik enerjisini depolamak için batarya paketine ihtiyaç duyar. Elektrikli araçların çevre kirliliğini azaltması, tasarruflu yakıtta sahip olması, kullanımının kolay olması, petrol ithalatına olan bağımlılığını azaltması gibi avantajları da bulunmaktadır.

Batarya üzerinde yapılan iyileştirme çalışmaları doğrudan aracın performansını etkilemektedir. Bu özelliği ile batarya, elektrikli araçlarda ve hibrit elektrikli araçlarda en önemli aksamdır. Bununla birlikte, batarya paketi için şarj/deşarj durumunda ortaya çıkan ısı büyük sorunlara neden olmaktadır. Paket içerisinde aşırı ısınan pil hücrelerinin çalışması bozulabilmekte hatta bazı hücreler işlevini yitirebilmektedir. Bu sebeple batarya paketinde pil hücrelerinin optimum sıcaklık seviyeleri içerisinde muhafaza etmek araştırmacıların üzerine yoğunlaştıkları en önemli konulardan biridir.

## 1.1. Batarya Paketi

### 1.1.1. Lityum İyon Pil Hücresi

Modern dünyanın yaşam çizgisi haline gelen taşınabilir güç kaynağının başta gelen teknolojisi lityum iyondur. Elektrikli ve hibrit araçların en önemli parçasını oluşturan batarya paketi, pil hücrelerinden meydana gelir. Daha sağlam ve ucuz olmasının yanı sıra elektrikli motorlar içten yanmalı motorlar ile karşılaştırıldığında mühendislik yönleriyle daha üstündür. Yalnızca bir motor dönüş bandında kullanılabilir tork üretmeleri içten yanmalı motorların dezavantajıdır. Bu faktörler ele alındığında otomobil için elektrikli motor daha iyi bir seçim olmaktadır. Bunun yanında elektrikli motorlar için güç kaynağı, otomobil endüstrisinde büyük bir paya sahiptir [1]. Şekil 1.1 (a)'da içten yanmalı motor ve şekil 1.1 (b)'de elektrik motoru gösterilmiştir [2].



Şekil 1.1. Elektrikli Motor ve İçten Yanmalı Motor [2].

Çizelge 1.1'de içten yanmalı motor ve elektrik motoru karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 1.1. İçten Yanmalı Motor ve Elektrik Motoru Karşılaştırma [3].

<b>İçten Yanmalı Motorlar</b>	<b>Elektrikli Motorlar</b>
Sera gazı emisyonu vardır.	Emisyon yoktur.
Kısa sürede enerji depolar.	Enerji depolaması uzun vakit alır.
Yakıt deposu az yer kaplar.	Batarya büyük yer kaplar.
Yüksek bakım maliyeti	Düşük bakım maliyeti
Frenleme enerjisi geri kazanılmaz.	Rejeneratif fren ile enerji depolama sağlanabilir.
%30 enerji verimine sahiptir.	Verim %90'a varmaktadır.
Gürültülü çalışır.	Gürültü çıkarmadan çalışır.

Lityum iyon pilini artı ve eksi yönleriyle ele aldığımızda; enerji yoğunluğunun yüksek olması, kendiliğinden deşarjın düşük olması, bakım maliyetinin düşük olması, yüksek akım sağlayabilmesi gibi özellikleri avantajları arasında sayılabilmektedir. Bunun yanında dezavantajları şu şekilde sıralanabilir: gerilim ve akım değerlerinin optimum düzeyde tutmak için koruma devresi gereklidir, üretim maliyetinin yüksek olması ve kullanılan malzeme rezervlerinin sınırlı olması [2].

Lityum iyon teknolojisinde enerji yoğunluğunu belirleyen, katot ve anotlara dayanan yapının mevcut kristal bölge sayısının derin şarj esnasındaki yapısal ve kimyasal kararsızlıklara rağmen yakın gelecekte devam etmesi öngörülmektedir. Dönüştürme reaksiyon anot ve katotları, ekleme reaksiyon anot ve katotları ile karşılaştırıldığında çok daha yüksek kapasiteye sahiptir. Bu nedenle yapılan çalışmalarda ekleme reaksiyon anot ve katotları üzerinde daha çok durulmuştur. Pratikte uygulanabilirliğinin daha zor olması dezavantajdır. Daha yüksek seviyede voltaj değerleri ve depolama kapasitesine ulaşma isteği üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, lityum metalinin anot olarak kullanımı ve sıvı elektrolit yerine katı elektrolit kullanımı artış göstermektedir. Bu çalışmalar ışığında pratik uygulanabilirlik de zamanla belirlenecektir. Yüksek nikel katmanlı oksit katotlar, anot ile uyumlu olan ve kararlı yapıdaki katı elektrolit ara fazı oluşturabilen sıvı elektrolitler; alternatif olarak kullanılan dönüşüm reaksiyon elektrotları, lityum ve katı

elektrolitlere göre uygulanabilirlik düzeyleri daha yüksek seviyededir [1].

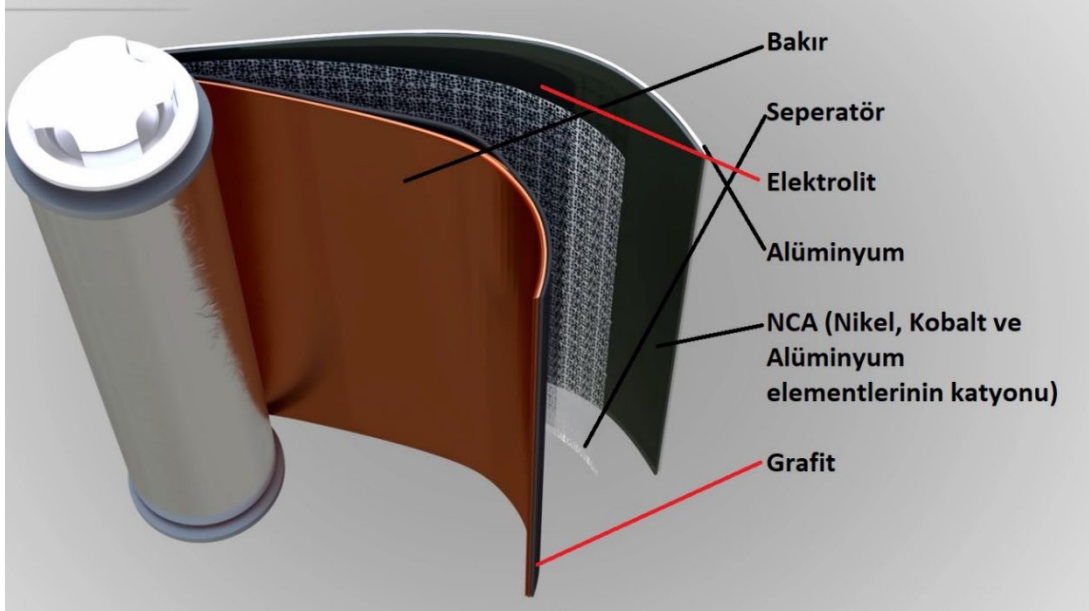
Batarya paketi içerisinde yer alan bir pil hücresi içerisinde farklı kimyasal bileşik katmanların varlığı, kompleks bir yapı oluşturmaktadır. Lityum iyon pili, elektrokimyasal potansiyel adı verilen yapıya sahiptir. Bir metalin elektron kaybetme eğilimine elektrokimyasal potansiyel adı verilir [4].

Alessandro Volta tarafından geliştirilen ilk pil hücresi, elektrokimyasal potansiyel kavramına dayanmaktadır. Volta, çinko ve gümüş gibi farklı elektrokimyasal potansiyele sahip iki metal ile harici bir elektrik akışı oluşturdu [5]. Şekil 1.2’de Alessandro Volta’nın ürettiği elektrik hücresi verilmiştir.



Şekil 1.2. Alessandro Volta'nın İlk Elektrik Hücresi [6].

Şekil 1.3'te lityum iyon pilin iç yapısı verilmiştir.



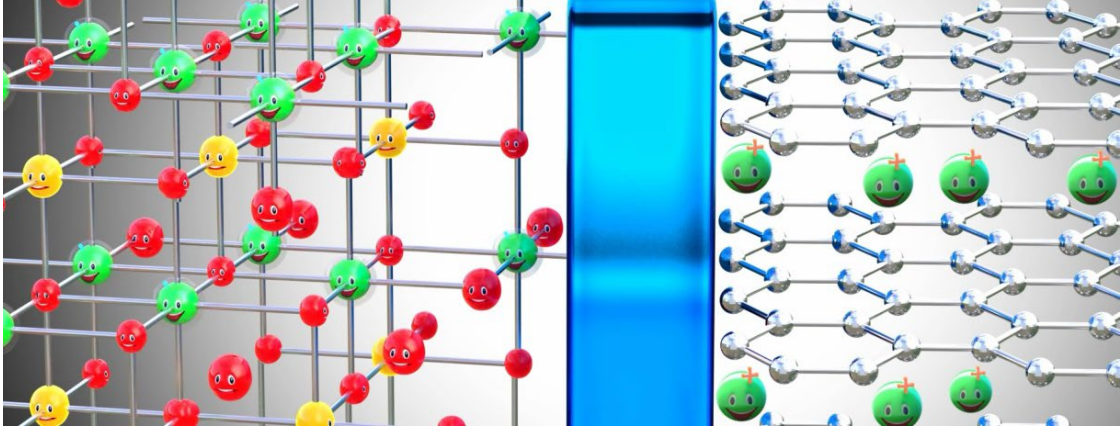
Şekil 1.3. Lityum İyon Pil Hücresinin Kesit Görünümü [3].

Diğer elementler ile karşılaştırıldığında lityum metalinin elektron kaybetme isteği en yüksek seviyededir. Bu nedenle lityum iyon pil hücrelerinin yaygınlaşması sağlanmıştır. Kimyasal yapısına baktığımızda lityum elementinin dış kabuğunda 1 elektron bulundurduğu için bu elektronu verme eğilimindedir. Saf lityum elementinin reaktif olmasının sebebi de budur. Hatta o kadar reaktiftir ki su ve hava ile bile tepkimeye girmektedir. Lityum iyon pil ile çalışmanın püf noktası da reaktif bir metal olmasıdır. Bunun yanında lityum elementi, bir lityum oksidin parçası olduğunda oldukça kararlı yapıya sahiptir. Şekil 1.4'te elementlerin elektrokimyasal serileri verilmiştir [3].

Li	→	3.04 V
Mg	→	2.37 V
Al	→	1.66 V
Zn	→	0.76 V
Fe	→	0.44 V
H	→	0 V
Hg	→	-0.24 V
Cu	→	-0.34 V
Ag	→	-1.69 V
F	→	-2.8 V

Şekil 1.4. Elementlerin Elektrokimyasal Serileri [3].

Metal oksitten lityum atomu ayrıldığında bu lityum atomu oldukça kararsız yapı sergilemektedir. Hızlıca bir lityum iyonu ve bir elektron oluşturmak istemektedir. Metal oksidin parçası olan lityum, iyon haline göre çok daha kararlı yapı sergiler. Lityum ve metal oksit arasında elektron ve lityum iyon akışı sağlandığında elektrik akımı geçmeye başlar. Lityum atomlarını metal oksitten ayırdıktan sonra lityumdan ayrılan elektronları harici bir devre yardımıyla yönlendirilmesi elektrik üretimi sağlar. Şekil 1.5'te lityum iyon pilinin iç yapısı verilmiştir.

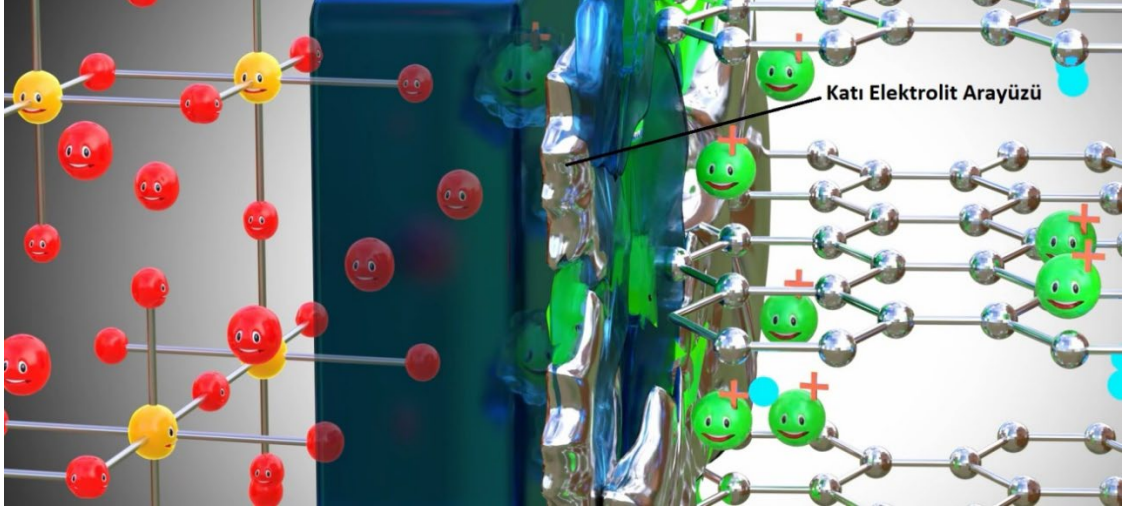


Şekil 1.5. Lityum pil hücresinin iç yapısı [7].

Pratik yapıdaki lityum iyon pil hücresinde elektrolit ve grafit yapı bulunur. Grafit katmanlı yapıya sahiptir. Ayrılan lityum iyonları kolayca grafit içerisinde durabilmesi için grafitin katmanları arasındaki bağlantı gevşek yapıdadır. Grafit ve metal oksit arasında elektrolit vardır ve yalnızca lityum iyonlarının geçmesine izin vermektedir. Bu elektrolit, elektronların grafit tarafına geçmesine engel olur. Bu düzeneğe bir güç kaynağı bağlandığında güç kaynağının pozitif tarafı, metal oksidin lityum atomlarından elektronları kendine çeker. Bu elektronlar, elektrolitten geçemedikleri için dış devreden geçecektir. Pozitif yüklü olan lityum iyonları, elektrolitten geçerek negatif tarafa doğru geçer. Lityum iyonları da grafit katman boşluğunda kalır. Tüm lityum atomlarının grafit levhaya ulaşması durumunda pil hücresi tamamen şarjı dolmuş olur. Bu sayede metal oksitten ayrılan lityum iyonları ve elektronları ilk hedefe ulaşmış sayılır. Düzenekteki güç kaynağı yerine bir yük bağlandığında ise lityum iyonları metal oksidin bir parçası olarak kararlı durumlarına geri dönmek ister. Bu geri dönme isteği ile birlikte lityum iyonları yük aracılığıyla elektrolit ve elektronlar arasında hareket eder. Bu durumda yükten elektrik akımı geçer. Grafit, lityum iyon pil hücrelerinin kimyasal reaksiyonunda bir rolü olmamasına rağmen lityum iyonları için bir depolama ortamı oluşturur. Beklenmeyen bir durum neticesinde sıvı elektrolit kurursa anot ile katot arasında kısa devre olur. Bu da yangına veya patlamaya neden olur. Bu durumun önüne geçmek için elektrotlar arasına yalıtkan yapıda seperatör konulur. Seperatör gözenekli yapısı ile lityum iyonlarının geçişine olanak sağlar. Lityum pil hücresinde grafit ve metal oksit, bakır ve alüminyum folyoların üzerine kaplanır. Folyonun görevi akım toplamaktır. Pozitif ve negatif kısımlar akım toplayıcıdan kolayca çıkarılabilir. Organik yapıdaki lityum tuzu elektrolit olarak kullanılıp seperatör levha üzerine kaplanır. Bu üç tabakalı yapı, merkezi çelik çekirdeğin etrafına silindirik yapıda sarılır ve pil hücresinin yapısı tamamlanır [8].

İhtiyaç duyulan gücü sağlamak için birçok pil hücresi seri ve paralel şekilde birbirine bağlanarak batarya paketi oluşturulur. Lityum iyon pil hücreleri şarj ve deşarj durumunda fazla ısı üretimi gerçekleştirir. Yüksek sıcaklık hücrelerin performansını düşürür. Bu yüzden de çok sayıda hücrenin sıcaklığını, şarj durumunu, voltaj korumasını ve hücre sağlığını gözlemlemek için bir batarya yönetim sistemine ihtiyaç duyulmuştur. Gerilim koruması, batarya yönetim sisteminin en büyük faaliyetlerindedir. Şarj esnasında batarya paketi içerisinde yer alan daha yüksek kapasitedeki bir pil hücresi diğerlerinden daha fazla şarj olacaktır. Hücre dengelemesi adı verilen yöntem ile batarya yönetim sistemi bu durumu önler. Tüm hücrelerin eşit olarak şarj ve deşarj olmasını temin eden sisteme hücre dengeleme sistemi denir. Bu sayede aşırı veya düşük voltaj değerinden pil hücresi korunmuş olur. Yüksek güç ihtiyacı durumlarında şarj gerilimini tüm pil hücrelerinin arasında eşit olarak dağılması birden fazla pil hücrelerinden oluşan batarya paketinin diğer bir avantajıdır. Çok sayıda pil hücresi yerine büyük tek bir hücre yapısı kullanılsaydı çok fazla zorlanmaya maruz kalarak pil hücresinin ölümü gerçekleşebilirdi. Lityum iyon pil hücrelerinde kullanılan bir yöntem ile piller ani ölümden korunur. Bu yöntem şöyledir:

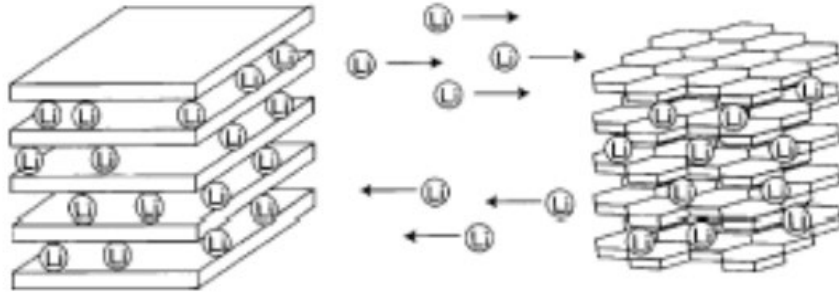
Katı elektrolit ara fazı (KEAF) adı verilen bu yöntem tesadüfen keşfedilmiştir. Pil hücresi ilk kez şarj edildiğinde lityum iyonları elektrolit içerisinde hareket eder. Bu esnada elektrolitte bulunan çözücü moleküller lityum iyonlarını kaplar. Lityum iyonları grafitte ulaştıkları zaman bu çözücü moleküller ile reaksiyona girerek katı elektrolit ara fazı adı verilen tabaka oluşturur. Bu katı elektrolit ara fazı büyük bir avantaj sağlar. Elektronlar ve elektrolit arasında doğrudan teması önleyerek elektrolitin bozulmasını önler. Yaklaşık olarak pil hücresinin %5'ini tüketen bu sistemde geriye kalan %95'lik kısım pilin ana çalışmasına katkıda bulunur. Yapılan çalışmalar ile pilin performansının artırılması amacıyla katı elektrolit ara fazının kalınlığı ve kimyasal yapısı optimize edilmeye çalışılmaktadır. Şekil 1.6'da katı elektrolit ara fazı oluşumu gösterilmiştir [9].



Şekil 1.6. Katı elektrolit ara fazı oluşumu [7].

Lityum iyon pil hücrelerinin şarj-deşarj döngü ömrü yaklaşık olarak 3.000'dir. Dünyanın dört bir yanında yapılan çalışmalar ile döngü sayısının 10.000 olması hedeflenmektedir. Bu da elektrikli araçlar için 25 yıl boyunca pilin değişim ihtiyacının olmaması anlamına gelmektedir. Depolama ortamının grafit yerine silikon olması için yapılan çalışmalara milyonlarca dolar yatırımlar yapılmıştır. Bu yatırımların başarı ile sonuçlanması lityum iyon pil hücresinin enerji yoğunluğunun beş kattan daha fazla artması anlamına gelmektedir [10].

Lityum iyon piller,deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilebilirler. Diğer tekrar şarj edilebilen pillerle karşılaştırıldığında birkaç avantajı vardır. Bunlardan bazıları şöyledir: uzun ömürlüdürler, çalışma sıcaklık aralığı geniştir, yüksek verimlidirler, yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler, bakım gerektirmezler. Bu özelliklerinin yanında yüksek fiyatlı olması, koruyucu devreye ihtiyaç duyması ve aşırı şarj durumunda termal bozulmaya uğraması gibi dezavantajları da vardır. Lityum iyon piller; anot, katot ve elektrolit olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Diğer pil sistemlerinde olduğu gibi elektrolit, enerjiyi depolamaktan sorumludur. Negatif elektrot anot, pozitif elektrot ise katot kısımdır. Pozitif elektrotlar genellikle tünel ve tabakalı yapıya sahiptir ( $LiMo_x$ ). Negatif elektrot da tabakalı yapılıdır. Pil hücresinin şarj/deşarj durumunda Li iyonları pozitif ve negatif elektrotlar arasında karşılıklı olarak yer değiştirmektedir [1, 2]. Elektronların karşılıklı olarak yer değiştirdiği bu reaksiyona topotaktik reaksiyonu denir. Lityum anot ve katottan bir diğerine geçmesiyle bu reaksiyon gerçekleşir. Şekil 1.7'de lityum pilin şarj-deşarj mekanizması verilmiştir.



Şekil 1.7. Lityum pil hücrelerinin şarj-deşarj mekanizması [7].

Denklem 1.1’de katot, Denklem 1.2’de anot reaksiyonlarının formülleri verilmiştir.

Katot Reaksiyonu:



Anot Reaksiyonu:



Pil hücrelerinde elektrot malzemenin elektrik iletkenliği sağlandığında bu reaksiyonlar gerçekleşir. Bu yüzden elektrot malzemeler yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. Hücre içinde elektrotlar arasında oluşabilecek kısa devreyi önlemek için mikro gözenekli seperatörler kullanılır. Ayrıca elektrotlar arasında iletkenliği sağlamak amacıyla sıvı/katı halde elektrolitler kullanılır ve bu yapı hücre içerisinde lityum iyonlarının yer değiştirmesini sağlar. Lityum iyon pillerin kapasitesi verimi belirler. Tam olarak şarj edilmiş pil hücrelerinin kapasitesi, farklı koşullardakideşarj durumunda elde edilen toplam amper (Ah) değeri olarak belirlenir. Güvenli ve uzun ömürlü olmasının yanında lityum iyon pillerin yüksek kapasitede olması istenen özellikleri arasındadır [11].

Lityum iyon pil hücrelerinde anot, katot ve elektrolit üzerinde yapılan çalışmaların yanı sıra tüm sistemi bütün olarak ele alan çalışmalar da mevcuttur [3, 4, 5]. US patent ofisinde yapılan araştırma sonucunda lityum iyon üzerine 10.000’e yakın sayıda patent olduğu görülmüştür [11].

Lityum iyon pil teknolojisinde yapılan birçok çalışmada göz önünde tutulan birkaç parametre vardır. Bunlardan bazıları şöyledir; çalışma voltajı, depolama kapasitesi ve lityum iyon pillerin enerji yoğunluğu ve bu enerji yoğunluğunun artırılması. Katodun çalışma voltajını yükseltmek hücre voltajını artırmanın tek yoludur. Bunun sebebi mevcut

anot olan Li'nin çalışma voltajının Li<sup>+</sup> çalışma voltajına yakın olmasıdır [27]. Günümüzde kullanılmakta olan 4,3 V ile karşılaştırıldığında üç katot yapısı (katmanlı, spinel ve olivin) daha yüksek voltaj aralıklarında çalışabilmektedir. Ancak bu yüksek voltajlarda katot, temas halinde kararlı yapısını muhafaza edememektedir. 4,3 V'un üstünde katot redoks enerjisi kararlı yapıda olmamasına karşın katot yüzeyinde uygun bir katı elektrolit ara fazı oluşturarak kararlı yapı oluşturmasına katkı sağlar. Yapılan birçok araştırma neticesinde grafit anotu oldukça iyileştirmiştir. Buna karşın katot katı ara fazı üzerinde pek az çalışma yapılmıştır. Şu anda kullanılmakta olan pil hücrelerindeki katkı maddeleri ve bileşimler ile anotu çalışır hale getirmeye uyarlanmaktadır. Katot-elektrolitin daha yüksek voltajlarda çalıştırılabilmesi için yapılan çalışmanın anot ile uyumlu olması gerekmektedir. Bu da katkı maddeleri ve bileşimler üzerinde yapılan çalışmalar için zorluk meydana getirmektedir. Yani anot ve elektrolit arasındaki arayüz kararsız hale gelmemesi gerekir. Bu arayüzün mevcut kararlılığa da zarar vermesi önlenmelidir [12].

Elektrokimyasal kararlılığı daha geniş aralıkta olan ve yüksek voltaj değerlerinde çalışabilen uyumlu lityum pillere organik çözücü eklendiğinde çalışma voltajı artırılabilmektedir. Bu konudaki elverişli olan katı elektrolitlerin iyi takip edilmesi gerekir. Yapılan takip esnasında elektrolit ve elektrot arasındaki arayüzün yük transfer direnci ve elektrolitlerin mekanik stabilitesi ve maliyeti, üretim kolaylığı gibi parametreler göz önüne alınmalıdır. Granat, LISICON, NASICON, sülfür ve POE (polietilen oksit) takibi yapılan bazı katı elektrolit örnekleridir. 4,3 V üzeri katotların kullanımına olanak sağlayacak elektrolitlerin geliştirilmesi bu çalışmalar ile sağlanabilir [13].

Anodun depolama kapasitesini artırmak için çalışmalar devam etmektedir. Buna karşın katot çalışma voltajını artırmak için pratik olarak uygulanabilir bir yöntem henüz yok. Mevcut olan kristalografik bölgelerin miktarı lityumun tersinir şekilde eklenmesi veya çıkarılması için sınırlıdır. Son zamanlarda yapılan yerleştirme reaksiyonlarının kapasitesi de aynı şekilde sınırlıdır. Fakat dönüştürme reaksiyonlarında elektrotların kapasitesinde böyle sınırlama olmadığı gözlemlenmiştir. Daha yüksek kapasiteye bir seviyeye kadar çıkmaktadır. Silisyum, kalay, antimon, germanyum, fosfor vb. anotlar grafitten daha yüksek kapasiteye sahip anotlardır. Çalışma voltajları yine grafitten daha yüksek seviyededir. Böylece hücre voltajı düşük olur. Hacim değişikliği, reaksiyon anotları ile ilgili en büyük sorundur. Lityum içeriğine bağlı olarak %400'e kadar hacim büyümesi görülmektedir. Bu sorunun giderilmesi için yapılan yöntemlerden biri de partikül

boyutunu nano boyuta düşürülmesidir. Diğer yöntem de yapı içinde boşluk bırakma yöntemidir. Fakat bu iki yöntem de uygulamada başarılı olmamıştır. Şarj/deşarj işlemi esnasında hacim değişikliği sürekli olarak yeni yüzey oluşumuna sebep olur. Bu da KEA (katı elektrolit ara fazı) oluşumunu kötüleştirir. Enerji kapasitesini marjinal olarak artırmak için silisyumun yüzdesini grafitte eklemek ile ilerleme sağlanabilir. Yeterli miktarda çevrim ömrüne sahip pil hücrelerinde saf alaşım anodunun kullanılması oldukça zor bir işlemdir. Lityum metalinin anot olarak kullanılması alternatif bir yöntemdir. Fakat çoklu döngü boyunca kullanılan lityum metalinin tersinir olarak kaplanması ve soyulması durumunda büyük hacim değişiklikleri ve katı elektrolit ara fazı oluşumu tehlikeli durum ortaya çıkarmaktadır [14].

S,  $\text{Li}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$  ve  $\text{Li}_2\text{O}_2$ ; dönüşüm reaksiyonu katodu olan katmanlı, spinel ve olivin katotlarından çok daha yüksek kapasiteye sahiptir. Havadaki nem, çevrim ömrünün düşük olması, katalitik olarak elektrolitin ayrışması ve çözünmemiş ürünlerin oluşturduğu tıkanma durumu oksijen bazlı katotlarda görülen sorunlardan bazılarıdır. Bu sorunlar uygulanabilirliği oldukça zor hale getirmektedir. Oksijen bazlı katotlar ile karşılaştırıldığında sülfür bazlı katotlarda daha az sorun çıkmaktadır. Bu da daha kolay uygulanabilirlik sağlamaktadır. Son yıllarda katot ve anot arasındaki çözünen polisülfid göçünün durdurulması ve elektrolit miktarının azaltılması için birçok çalışma yapılmıştır. Aktif malzeme içeriği ve bu aktif malzemenin yüklenmesi de artırılmıştır. Lityum anodunu kükürt veya oksijen katodu ile eşleştirmek zordur. Ayrıca  $\text{Li}_2\text{S}$  ve  $\text{Li}_2\text{O}_2$  katotlarını silisyum ya da grafit bir anotla eşleştirilmesi pratik yöntemde zor bir yöntemdir [15].

Elektrotlarla ilgili bu kadar zorluklar göz önüne alındığında yerleştirme reaksiyonu katotlarının kapasitesini artırmak son zamanlarda yapılan çalışmaların odak noktası olmuştur.  $\text{Li}_{1+x}(\text{Ni}_{1-y-z}\text{Mn}_y\text{Co}_z)_{1-x}\text{O}_2$  oksitleri lityum açısından zengindir ve 250 – 300  $\text{A h kg}^{-1}$  oranında yüksek kapasiteye sahiptir. Bu özellikleriyle geçmiş yıllarda kullanılması cazip hale gelmiştir. Lityum açısından zengin olan oksitler, metal iyonlarının  $4^+$  oksidasyonu ve oksit iyonlarının oksidasyonu oksijen evrimine sahiptir.  $\text{Li}_{1+x}(\text{Ni}_{1-y-z}\text{Mn}_y\text{Co}_z)_{1-x}\text{O}_2$  oksidi lityum açısından zengin olmasına rağmen katmanlı fazdan spinel faz geçişi ve döngü esnasında gerçekleşen voltaj düşüşünden dolayı sorun yaşamaktadır. Fazladan  $\text{Mn}^{4+}$  varlığı ve yetersiz döngü ömrü de yine istenmeyen durumlardandır. Sistemden çıkarılan lityum miktarı ile doğru orantılı olarakdeşarj kapasitesi, mangan göçü geçiş metali olarak lityum katmanına oranda fazla olmaktadır ve

sistemin voltajı düşmektedir. Oksijen redoksunun uygulanabilirliği ve lityum açısından zengin yapıya sahip olan oksitlerin potansiyeli göz önüne alındığında tam olarak değerlendirildiği söylenemez. Uzun çevrim ömrünü sağlamak şebeke depolaması için gereklidir. Yüksek ölçüde reaktif peroksit ve süperoksit oluşumuna sebep olan elektrolit oksidasyonu olan  $O^{2-}:2p$  bandı çevrim ömrünü azaltabildiği söylenmektedir [16].

Katmanlı, spinel ve olivin katotlardan daha yüksek kapasiteye sahip olan katotlardan bazıları kükürt,  $Li_2S$ , oksijen,  $Li_2O_2$  veya  $Li_2O$ 'dur. Bu özelliklerinin yanında birçok dezavantajları da vardır. Katalitik olarak ayrışan elektrolitler, havadaki nem, çevrim ömrünün zayıf olması ve çözünmeyen ürünlerin oluşturduğu tıkanma gibi durumlar oksijen bazlı katotlar için olumsuz durum oluşturmaktadır. Bu zorlu durumlar uygulanabilirliği de oldukça zor hale getirmektedir. Öte yandan sülfür bazlı katotlara bakıldığında karşılaşılan zorlu durumlar daha azdır. Aktif malzeme içeriğinin ve yük seviyesinin artırılması ile katot ve anot arasındaki çözünmüş maddenin transferinin azaltılması sağlanmıştır. Bu sayede elektrolit miktarında büyük bir azalma görülmüştür.  $Li_2S$  ve  $Li_2O_2$  katotlarının pratik lityum içeren anotlar ile eşleştirilmesi büyük avantaj sağlamaktadır [16].

Elektrotlar ile ilgili göz korkutucu bu zorlukların bilincinde olarak yapılan çalışmalara bakıldığında, yerleştirme reaksiyonu katotlarının kapasitesi artırılmıştır.  $Li_{1+x}(Ni_{1-y-z}Mn_yCo_z)_{1-x}O_2$  oksitleri  $250 - 300 A \cdot h \cdot kg^{-1}$  arasında yüksek bir kapasiteye sahip ve lityum açısından zengin olan oksitlerdendir. Bu özelliği sayesinde yaklaşık 15 yıl kadar önce cazip hale geldi. Lityum açısından zengin olan oksitler sırasıyla; geçiş metal iyonlarının 4+ durumuna göre oksidasyonu, oksit iyonlarının oksidasyonunu ve ilk şarj esnasında oksijen çevrimini içermektedir. Oksijenin tersine çevrilebilir redoks tepkimelerine ve lityum açısından zengin olan materyallere potansiyel olarak katılabiliyor olması çalışmalara yeni boyut kazandırmıştır. Yetersiz döngü ömrü ve fazlaca  $Mn^{4+}$  varlığının neden olduğu düşük oran yeteneği, döngü sırasında katmanlı fazdan spinel faza geçiş sağladığından lityum açısından zengin oksitlerde sürekli bir voltaj düşüşüne neden olmaktadır. Lityum açısından zengin oksitlerine potansiyeli ve oksijenin pratik olarak uygulanabilirliği tam olarak göz önüne alınmalıdır.  $O^{2-}:2p$  bandındaki delikler ile uzun çevrim ömrünü sağlamak oldukça zordur.  $O^{2-}:2p$  bandı yüksek oranda reaktif peroksit ve süperoksit türlerinin oluşmasıdır ve bu türler elektrolit oksidasyonuna neden olabilmektedir. Bu da çevrim ömrünü azaltır. Yapılan çalışmalar ile bu çıkmaz içinden çıkılır hale gelecektir [17].

#### 1.1.1.1. Anot

İlk olarak 1970 yılında lityum metali anot malzeme kullanılmıştır. Lityum metali; yüksek enerji yoğunluğuna sahip ve su ile tepkimesinde ani yanıcı etkiye sahip alkali bir metaldir. Lityum iyon pilin kullanımı esnasında oluşan ekzotermik tepkime sonucunda aniden ısınması büyük sorun teşkil etmektedir [18]. Lityum metalinden sonra karbon elementi anot malzeme olarak kullanılmıştır [19]. Karbon elementinin düşük kapasiteli olması alternatif anot malzemesi arayışını hızlandırmıştır. Daha sonra yapılan araştırmalarda göz önüne alınan parametreler şöyledir; malzemenin kapasitesi, elde edilebilirliği, güvenlik, pilin çevreye etkisi (çevre kirliliği ve geri dönüşüm parametreleri), maliyet ve üretim yöntemleri [20].

Daha sonraki yıllarda lityum metalinin alaşım yaptığı keşfedilmiştir. Alaşım yapılan bazı metaller şöyledir: Mg, Ca, Si, Ge, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Pt, Ag, Au, Zn, Cd v.b. Lityum ile yapılan alaşımların gravimetrik ve hacimsel kapasitesi Çizelge 1.2’de gösterilmiştir [21].

Çizelge 1.2. Anot Malzemeleri İçin Alaşımlara Bağlı Olarak Gravimetrik ve Hacimsel Kapasite Değerleri [21].

Bileşik	Gravimetrik Kapasite (mAhg <sup>-1</sup> )	Hacimsel Kapasite (mAhL <sup>-1</sup> )
Li <sub>4,4</sub> Si	4199	9784
Li <sub>4,4</sub> Sn	994	7266
Li <sub>4,4</sub> Pb	569	6458
Li <sub>3</sub> As	1073	6148
Li <sub>3</sub> Sb	660	4416
LiAl	993	2680
LiC <sub>6</sub>	372	818
Li	3861	2062

2001 yılında Beaulieu ve arkadaşları kapasitesi 4200 mAhg<sup>-1</sup> (Si) ve kapasitesi 996

mAhg-1 (Sn) anotların malzeme yapısını bozmadan lityum girişini ( $Li_{4,4}Si$  ve  $Li_{4,4}Sn$ ) sağlamışlardır. Fakat reaksiyon sonucunda oluşan yapının %400'e kadar büyümesiyle oluşan çatlaklar neticesinde verimin hızla düştüğünü kanıtlamışlardır. Lityumun oluşturduğu alaşımlarda genleşme ve daralmanın en küçük oranda olması istenen özelliktir. Hacimsel değişim kontrol edilemediği zaman yapıda çatlaklar oluşabilmektedir. Oluşan bu çatlaklar elektrotun elektrik iletimini bozabilmektedir. Bu da verimin düşmesine sebep olmaktadır [22].

Günümüzde anot malzemesi olarak Si ve Sn üzerinde birçok araştırmalar devam etmektedir. Diğer bir araştırma konusu olarak da; Si ve Sn içeren elektrotların şarj/deşarj işlemi esnasında gerçekleşen hacimsel değişimin en aza indirilmesi için mekanik kararlılıkta, boşluklu yapıda üretim için çalışmalar devam etmektedir [23].

1990'lı yılların ikinci yarısından sonra grafit anotların yerine metal esaslı anot üretimi başlamıştır. Bu anotlar genellikle iletkenlik sağlayan karbon ve bağlayıcı polimerler ile kullanılmıştır. Lityum elementinden daha az aktif olan metal ile lityumun alaşım oluşturması ya da oluşturulan yapının içinde aktif olmayan malzemenin homojen olarak dağıtılması da anot üretim yöntemi olarak kullanılan yöntemlerdendir [24].

Genel olarak nanokompozit uygulamalarında ince film; nanofiber, nanotüp, nanotel ve toz olarak üretilmektedir. Nano yapıdaki malzemeler kullanılarak aktif yüzey alanı artırılmıştır. Lityum iyonları, nano yapılar içerisinde rahatça yayılmaktadır. Böylece elektrokimyasal özelliklerin iyileştirildiği yapılan çalışmalar ile gözlemlenmiştir. İnce film anotlar, nano yapıya sahip alaşımlı anot malzemeleri üretiminde pil verimini artırmak için sıkça kullanılmıştır [25].

Alaşımlı anot malzemelerin yüzey alanını artırmak için kullanılan diğer yöntemler de şöyledir: nanofiber, nanotüp, nanotel ve toz esaslı kompozitler. Platin yüzeyinde üretilen 110nm çapında  $SnO_2$  nanofiberleri Sn-%20Ag alaşımının oksijen ortamında ısıl işleme tabi tutulması ile üretilen 30-70 nm çapında  $SnO_2$  nanotelleri ve  $CH_4$ 'ün parçalanması sonucu elde edilen nanoteller yüksek verimlilik göstermektedir. Nanofiberden üretilen anot malzemenin ince filmlerden üretilmiş anot malzemedan daha yüksek kapasiteye sahip olduğu ve mekanik kararlılığının daha iyi olduğu yapılan çalışmalar ile gözlemlenmiştir [26].

Toz esaslı kompozitler, aktif olan elemente başka element eklenmesiyle oluşur. Bu tür çalışmalarda hacimsel büyümenin en az olması ve daha yüksek kapasite hedeflenmiştir.

Lityum iyonu alüminyum elementi içerisinde hızlı olarak yayılmaktadır. Bu yüzden alüminyum alaşımlı nanokompozit malzemeler de günümüzde alternatif olarak kullanılan anot malzemeler arasında yerini almıştır [27].

#### 1.1.1.2. Katot

Katmanlı, spinel ve olivin olmak üzere katot malzeme üç şekildedir. Her bir şeklin avantajları ve dezavantajları vardır. Katmanlı yapı ( $\text{LiMO}_2$ ) en yüksek kapasiteye sahiptir. Kimyasal özelliğine ve şarj durumuna bağlı olarak yapısal ve kimyasal kararsızlığa sahiptir. Geçiş metali tabakasının ve lityum tabakasının komşu bölgeye metal iyonlarının geçmesiyle yapısal kararsızlık meydana gelmektedir. Düşük stabilizasyon enerjisine sahip bölgelerdeki kristal alan kolayca göç etmektedir. Bu döngü sırasında spinel ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) faza yapısal geçiş gerçekleşir. Bu bir dezavantajdır.  $\text{Co}^{3+}$  yüksek yapısal stabiliteye sahiptir. Fakat  $\text{LiCoO}_2$ 'den lityumun yarısı çıkarıldığı zaman kimyasal stabilite de yarı yarıya düşmektedir. Düşük spinli yapıdaki  $\text{Co}^{3+/4+}: 2t_g$  bandı ile  $\text{O}^{2-}: 2p$  bandı örtüştüğü zaman kimyasal kararsızlık meydana gelir. Bu kimyasal kararsızlık  $\text{O}^{2-}: 2p$  bandından elektron çıkmasına sebep olur. Mangan,  $\text{Mn}^{3+/4+}: e_g$  bandı üst sınırın çok üzerinde bulunduğu için çok iyi bir kimyasal kararlılığa sahiptir. Düşük dönüşlü  $\text{Ni}^{3+/4+}: e_g$  bandı,  $\text{O}^{2-}: 2p$  bandında zar zor temas sağlamaktadır. Bu yüzden yapısal ve kimyasal stabilitelede nikel; mangan ve kobalt arasındadır. Paylaşılan oktahedral boşluklar boyunca Co-Co etkileşimi olur ve kısmi olarak dolu haldeki  $t_{2g}$  bandıyla  $\text{Co}^{3+/4+}: t_{2g}^{6-x}$  ve  $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$  ( $x > 0.1$  için) metalik yapı sergiler ve elektriksel olarak iletkenlik gösterir. Yüksek çekim kuvvetinde olan Ni-O bağıyla  $\text{Li}_{1-x}\text{NiO}_2$ 'nin oluşturduğu elektronik iletkenlik yeterli seviyede olur. Mangan, kobalt ve nikelin üçü de iki boyuttaki lityum iyon difüzyonu ile iyi iletim sağlamaktadır. Ayrıca mangan, kobalt ve nikel arasında mangan en pahalı ve toksik olanıdır. Mümkün olan en iyiye ulaşmak için avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurulduğunda endüstride  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  (NMC-333) bileşimleri kullanılmaktadır [17].

$\text{LiMn}_2\text{O}_4$  spinel katodunda lityum iyon difüzyonu vardır ve üç boyutlu yapıya sahiptir. Bu katot faz dönüşümleri olmadan yüksek hız kapasitesine sahiptir. Ayrıca iyi yapısal stabilitede yapısı vardır.  $\text{Mn}^{3+}$  iyonlarının  $\text{Mn}^{2+}$  ve  $\text{Mn}^{4+}$  iyonları arasındaki orantısızlık mangan çözünmesine yol açmaktadır. Ayrıca lityum tepkimelerinden açığa çıkan protonlar da mangan çözünmesine neden olmaktadır. Olivin  $\text{LiFePO}_4$  katodu  $\text{PO}_4$  grubu elementlerle kurduğu kovalent bağlı yapılarda oksijeni kuvvetlice tutmaktadır.

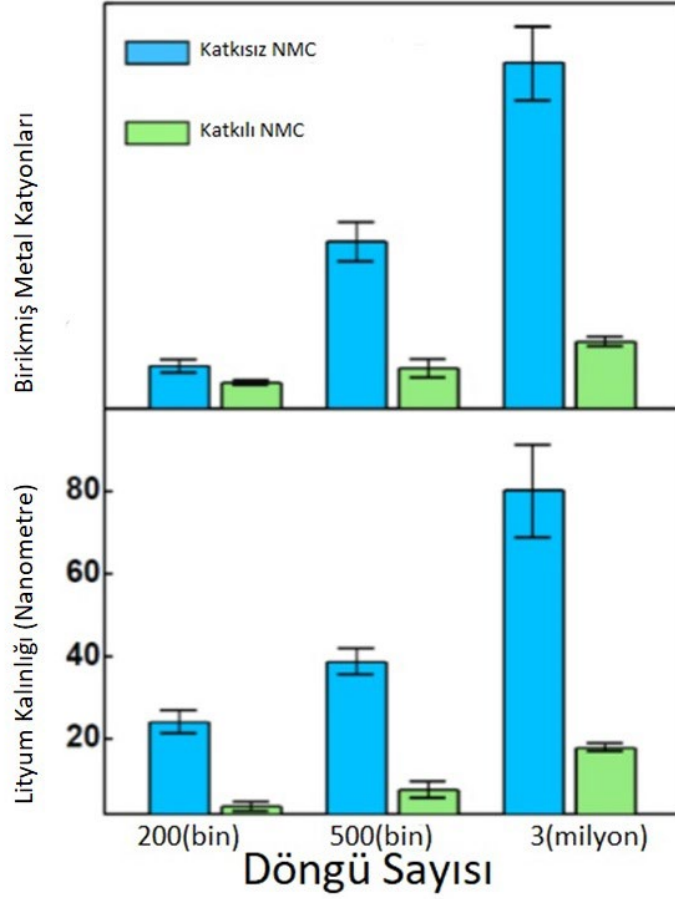
Oksijen salınımı olmadığı için termal stabilitesi iyidir ve daha güvenlidir. Ancak pratik kapasitesi sınırlıdır. 1980’li yıllarda Manthiram ve Goodenough endüktif etkiyi polianyon katotlarıyla tanıdı.  $Fe^{2+/3+}$  çifti,  $M^{3+/4+}$  ( $M = Mn, Co$  ve  $Ni$ ) çiftlerinden daha çok enerjiye sahiptir.  $Fe^{2+/3+}$  çalışma enerjisini artırdığında çalışma voltajı da 3.4 V’a yükselmektedir. Sınırlı olan elektronik ve iyonik iletkenlik şu şekilde iyileştirilebilir; daha küçük boyutta parçacık kullanarak ve hali hazırda düşük olan hacimsel yoğunluğu azaltmak için iletken karbon ile kaplama yaparak. Kristalografik yoğunluk hacimsel enerji yoğunluğunu etkiler. Katmanlı, olivin ve spinel yapıların kristalografik yoğunluklarının sıralaması şu şekildedir; katmanlı > spinel > olivin. Bu yüzden üç katot bileşik arasında, katmanlı oksit olanlar en yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadır [28].

#### 1.1.1.3. Yüksek Nikel Katmanına Sahip Oksitler

Katmanlı yapıya sahip olan  $LiNi_{1-y-z}Mn_yCo_zO_2$ ’deki nikelin miktarını artırarak kapasitenin artırılması için çalışmalar yapılmıştır. Öte yandan zengin lityum oranına sahip  $Li_{1+x}(Ni_{1-y-z}Mn_yCo_z)_{1-x}O_2$  katotları ile yapılan çalışmalarda birçok zorluklar ile karşılaşmıştır. Yüksek nikelde sahip katotlar gelecekteki teknolojide kullanılacak teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır. Toksik yapı, kimyasal ve yapısal olarak kararlılık, maliyet, iletkenlik gibi gerekli olan yönlerden incelendiğinde nikel elementi, kobalt ve mangan ile benzer özellikler göstermektedir. Hatta  $Co^{3+}$ ’ün aksine  $Ni^{3+}$  elementi oksijen kaybı yaşamadan  $Ni^{4+}$ ’e oksitlenebilmektedir.  $LiNiO_2$  katmanlı yapıya sahip olan oksidin tercih edilmesinin en büyük sebebi de budur. Buna karşın 973 °K ve daha üzeri sıcaklık değerlerinde yapılan sentez işlemlerinde nikel elementini  $Ni^{3+}$  iyonu olarak tutmak çok zordur. Bir miktar nikel elementinin  $Ni^{2+}$  olarak varlığı ile lityum elementi uçucu hale gelmektedir. Bu durum lityum açısından oldukça zayıf  $Li_{1-x}Ni_{1+x}O_2$  oluşumuna ve lityum eksikliğine neden olur. Lityum ve nikel elementleri arasında oluşan kation bozukluğu hız kapasitesini engelleyebilir. Şarj ve deşarj sırasında  $LiNiO_2$  lityumun çıkarılmasıyla bir dizi faz geçişine uğrar. Son iki durum hız kapasitesinin bozulması anlamına gelir. Yüksek oranda oksitleyici özelliği olan  $Ni^{4+}$  organik elektrolitlerle reaksiyona girer. Bu reaksiyon ile empedans artar, hız kapasitesi bozulur ve aktif lityum tabakası azalır. Ayrıca  $Ni^{4+}$  iyonunun kimyasal kararsızlığı katmanlı oksidin kaya tuzuna dönüşmesine neden olmaktadır. Termal kaçaklar da istenmeyen durumlar arasında yer alır. Yukarıda sayılan dezavantajları  $LiNiO_2$ ’nin yıllarca katot olarak kullanılmasına engel olmuştur [17].

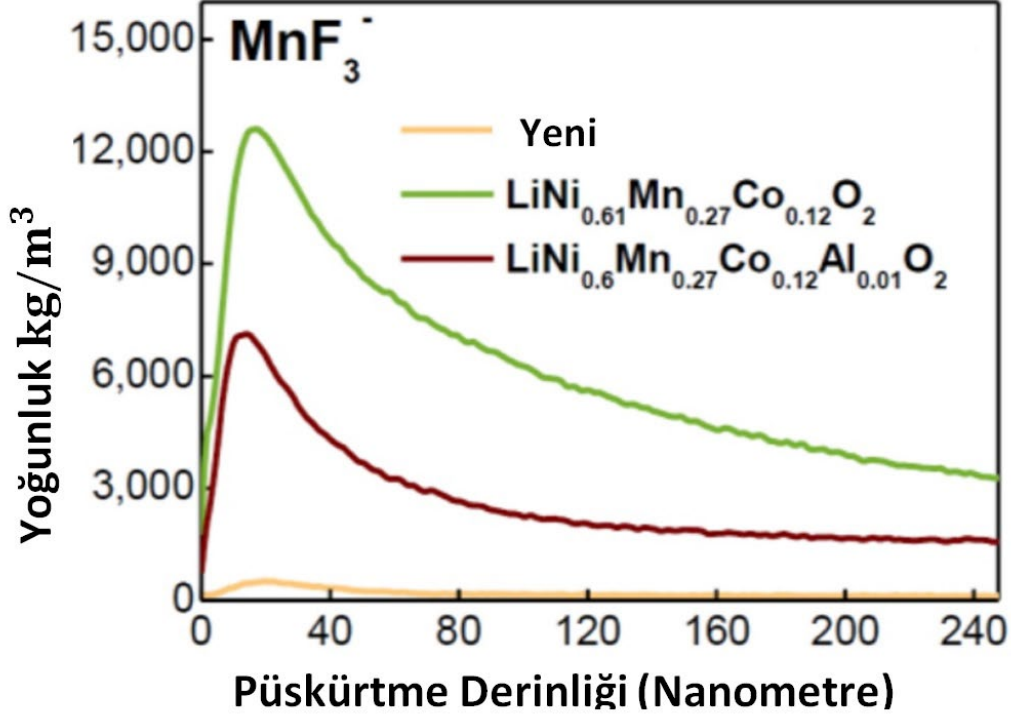
Lityuma artan ilgiyle birlikte endüstriyel çalışmalarda nikel içeriğini artırmak için çalışmalar sürdürülmektedir.  $\text{LiNi}_{1-y-z}\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ 'deki nikel miktarını artırmak için  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  üzerinde yapılan çalışmalar revaçtadır. Kapasite, akım yoğunluğu ve hacimsel enerji yoğunluğu gibi maddeler nikel içeriğini artırmada itici güç haline gelmiştir. Yaklaşık olarak 0.9 nikel içeriği ile  $230 \text{ A} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 'a kadar yüksek kapasitelere ulaşılmaktadır. Bunun yanında elektrikli ve hibrit araç teknolojisindeki uygulamalarda NMC-622'nin (lityum-nikel-mangan-kobalt) kararlılığının uzun vadede oluşturulması gerekli olan döngüler için önemli bir ilerleme olacaktır. Ticari olarak kullanılan NCA ( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ ), yüksek miktarda alüminyum içerdiğinden kapasitesi  $180 \text{ A} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 'a kadar düşmektedir. Bu da NCA için gaz oluşumu sorununa neden olmaktadır [17].

Zengin miktarda lityuma sahip katmanlı oksitlerle ilgili çözülemeyen voltaj düşüş sorunu ve nikelin  $3^+$  iyonundan  $4^+$  iyonuna kadar oksitlenebilmesi yüksek nikel içerikli oksitlere olan ilgiyi artırmıştır. Enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla nikel oranı yüksek olan katmanlı oksitlerin kullanımına yönelim son yıllarda yaygınlaşmıştır. 1 mol  $\text{LiPF}_6$ 'da döngüden önceki ve sonraki XPS (X ışını fotoelektron spektroskopisi), TOF-SIMS (uçuş esnasında ikincil iyon kütle spektroskopisi) ve yüksek kombinasyon yapısına sahip EC-DEC elektrolitinde NMC-71515 ( $\text{LiNi}_{0.7}\text{Mn}_{0.15}\text{Co}_{0.15}\text{O}_2$ )'in derinlemesine karakterizasyonu HR-TEM (transmisyon elektron mikroskobu), katot yüzeyinden dışarı doğru gidildikçe kaya tuzu ( $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ ), metal iyonları tarafından oluşturulan metal florürleri ve organik sıvı elektrolit bozunma ürünlerinin oluştuğu öngörülmektedir. Bununla birlikte katı elektrolit ara fazı da genişlemektedir [29]. Şekil 1.8'de iki grafit anot üzerindeki metal iyonları ve lityum miktarları Şekil 1.8. NMC (Lityum-nikel-mangan-kobalt) ve katkılı NMC ile eşleştirilmiş iki grafit anot üzerindeki metal iyonları ve lityum miktarları karşılaştırılması [30]. verilmiştir.



Şekil 1.8. NMC (Lityum-nikel-mangan-kobalt) ve katkılı NMC ile eşleştirilmiş iki grafit anot üzerindeki metal iyonları ve lityum miktarları karşılaştırılması [30].

Alüminyum içermeyen katkısız NMC (Lityum-nikel-mangan-kobalt) ve %1 mol alüminyum katkılı olan NMC ile eşleştirilmiş iki grafit anot üzerindeki metal iyonları ve lityum miktarları karşılaştırılmıştır. Katkılı olan hücrenin metal iyonları ve lityum kalınlığı çok azdır [30]. Şekil 1.9'da iki nikel katot hücredeki yoğunluğun püskürtme derinliğine bağlı gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.9. Katkısız NMC ve katkılı grafit anot ile iki nikel katot hücredeki yoğunluğun püskürtme derinliğine bağlı gösterimi [30].

Daha yüksek performans elde etmek amacıyla bileşim kontrolü yoluyla stabilize edilen nikel katmanlı oksit katotlar kullanılmaktadır. Alüminyum içermeyen katkısız NMC ve %1 mol alüminyum katkılı  $\text{LiNi}_{0.61}\text{Mn}_{0.27}\text{Co}_{0.12}\text{O}_2$  grafit anot ile iki nikel katot hücrede 3.000 devirden önceki ve sonraki %1 VC (vinilen karbonat) elektrolitli EC-EMC'de 1.2 mol  $\text{LiPF}_6$  katkı maddesi ekleyerek alüminyum ve oksijen arasındaki kovalent bağı oksijeni sıkıca tutması ve asit özelliği göstererek metal iyonlarının çözünmesini engellemiştir. Bu da katottan metal iyonlarının çözünmesinin engellenmesidir. Katot yüzey reaktivitesi, katı elektrolit ara fazı oluşumu, metal iyon çözünmesi, hız kapasitesi ve enerji yoğunluğu gibi özellikleri elektrolitte bulunan tuz ve çözücü maddeler belirlemektedir. Anot ve katodun her ikisinde katı elektrolit ara fazı oluşumunu destekleyen ve uyumlu olan elektrolit bileşimleri 4,3 volt ve üzerindeki voltaj değerlerinde çevrim ömrünü artırır. Bununla birlikte katmanlı oksit katotların daha yüksek voltajlarında da çalışabilmektedir. Spinel yapıdaki  $\text{MnMn}_{1.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_4$  ve olivin yapıdaki  $\text{LiCoPO}_4$  katotları buna örnek olarak verilebilir [30].

### 1.1.2. Lityum İyonun Tarihçesi

1912 yılında Gilbert Lewis tarafından ilk lityum pil keşfedilmiştir. Yeniden

doldurulamayan pil hücreleri 1970'lerin ilk yıllarında bulunmuştur. Lityum iyon pillerin yeniden doldurulabilir versiyonlarının ortaya çıkması 20 yıllık bir çalışmanın ardından gerçekleşmiştir. Lityum iyon pilin ilk ticari versiyonunu John Goodnogh yönetimindeki Sony çalışma grubu 1991 yılında bulmuştur [31].

Lityum piller ortaya çıktığı ilk yıllarda mevcut kullanılan pillerden daha pahalı olmasına rağmen üstün performans göstermiştir. Elektrikli araç teknolojisinde kullanılan lityum pil örneklerinden bazıları şu şekildedir:

- 1- Tesla, Model 3 Standart Range versiyonunda 2976 lityum iyon pil hücresi kullanmıştır.
- 2- Honda, E Urban EV versiyonu aracında lityum iyon pilleri tanıtmıştır.
- 3- Gelly Auto of China, Emgrand EV adlı modelinde BTYS ile üçlü lityum iyon pili kullanmıştır.
- 4- Renault, son modellerinden olan ZOE'de lityum iyon pilleri kullanmıştır.
- 5- Hyundai, 2019 EV Kona Electric Elite'e 64 kWh gücünde lityum iyon pil paketi tasarlamıştır.
- 6- FCA grubu içten yanmalı motorlardan elektrikli araçlara geçmeye başlamıştır. Şirket bu proje için 9 milyar Euro yatırım yapmayı planlamaktadır [32].

Sera gazları ve çevre kirliliğinin artmasıyla paralel olarak artan küresel ısınmaya karşı önlemlerin başında gelen karbondioksit emisyonunu düşürmek amacıyla içten yanmalı motorlar yerine elektrikli araçlara yönelim son yıllarda artmaktadır. Elektrikli araçlarda güç kaynağı olan batarya paketi için lityum metalinin yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, düşük bakım ihtiyacına sahip olması, yüksek akım değerlerinde çalışabiliyor olması gibi özellikleri tercih konusunda lityum metalini öne çıkarmaktadır [33].

Üstün performansı nedeniyle lityum iyon piller elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar, elektrik şebekeleri ve tamamen elektrikli uçaklar için güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte ihmal durumları karşısında (mekanik, elektriksel ve termal ihmaller) kısa devre nedeniyle termal kaçak durumuna kolayca düşebilmektedir. Isı yayma hızının ısı üretim hızından fazla olması termal kaçağı oluşturur. Pilin içinde ısı birikmesiyle birlikte basınç da artar. Bu durumda genleşme, sızıntı, yangın veya patlama gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu noktada önlem olarak soğutma işlemi gerekmektedir [34].

## 2. BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ

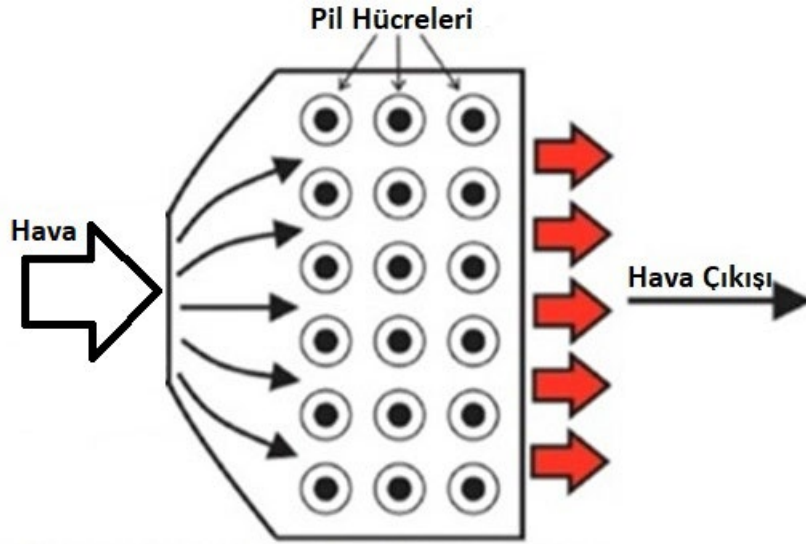
Elektriğin kullanıldığı bütün sistemlerde güç kaynağında yapılan iyileştirmeler performansa doğrudan etki etmektedir. Lityum metali üzerinde yapılan çalışmalar da bunlara örnek olarak verilebilir. Şarj ve deşarj esnasında çalışmaya bağlı olarak ısınan batarya paketini soğutmak, daha doğrusu çalışması için optimum sıcaklık değerlerinde tutabilmek daha iyi performans elde etmeyi sağlamaktadır [34].

Lityum iyon piller çalışırken oluşan ısı birikimleri, sıcaklık yükselmelerine neden olarak kapsamlı bozulmaya ve pil ömrünün kısılmasına neden olmaktadır. Elektrotların ve elektrolitin bağlantı noktalarında pil yaşlanması denilen pilin ömrünü kısaltacak bozulmalar yaşanmaktadır. Bu durum pilin kapasitesinin azalmasına da neden olmaktadır. Araştırmalar ışığında söyleyebiliriz ki, her 10 °C'lik sıcaklık artışında pilin bozulma oranını neredeyse iki katına çıkardığı söylenebilmektedir. Pil hücrelerinin yüksek sıcaklığa çıkması yangın veya patlama kazalarına neden olabilmektedir. İstenmeyen ısı bir şekilde giderilmezse pil hücrelerinin iç yapısını bozarak hücre sıcaklığını saniyeler içinde birkaç yüz dereceye çıkarabilmektedir. Küçük bir pil hücrelerinde bulunan seperatör eriyerek yüksek basınçlı gazların açığa çıkmasına neden olmaktadır. Bu gazlar ölümcül patlama ve yanmaya neden olabilmektedir. Ayrıca pil hücrelerindeki elektrolitlerin ani patlaması, araba kabini gibi kapalı alanlarda insan sağlığı için toksik özelliğindedir. Bu kadar yıkıcı etkiye sahip termal kazaların önüne geçmek için uygun ekipman ve mekanizmaya sahip güvenilir, etkili bir soğutma sistemi çok önemlidir [35]. Burada da batarya termal yönetim sistemi ortaya çıkmaktadır. Batarya termal yönetim sistemi, güç kaynağı olan bataryanın sıcaklık değerlerini anlık olarak görebilen, ihtiyaç halinde mevcut soğutma sistemini devreye sokan, soğutma sisteminin çalışmasını kontrol eden sistemdir. Batarya termal yönetim sistemlerini 4 ana başlık altında toplayabiliriz: hava soğutmalı sistemler, sıvı soğutmalı sistemler, faz değiştiren malzeme kullanılan sistemler ve hibrit soğutmalı sistemler [34].

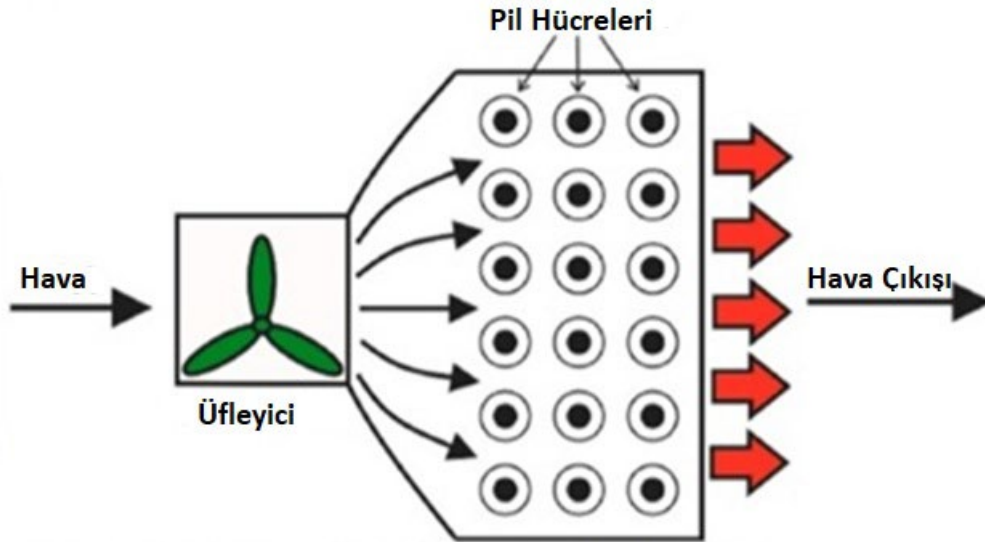
### 2.1. Hava Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Basit yapıya sahip hava soğutma sistemlerinde soğutma döngülerine ihtiyaç yoktur ve

paketlenmesi kolaydır. Düşük bakım maliyetine sahip hava soğutma sistemlerinde batarya kutusuna veya elektronik kısımlara sıvı sızması gibi risk yoktur. Daha az ağırlık ve daha düşük enerji tüketimi de en büyük avantajlarındandır. Hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri aktif soğutmalı ve pasif soğutmalı sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır [36]. Şekil 2.1’de pasif hava soğutmalı sistem ve şekil 2.2’de aktif hava soğutmalı sistem gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Pasif Hava Soğutma Sistemi [32].



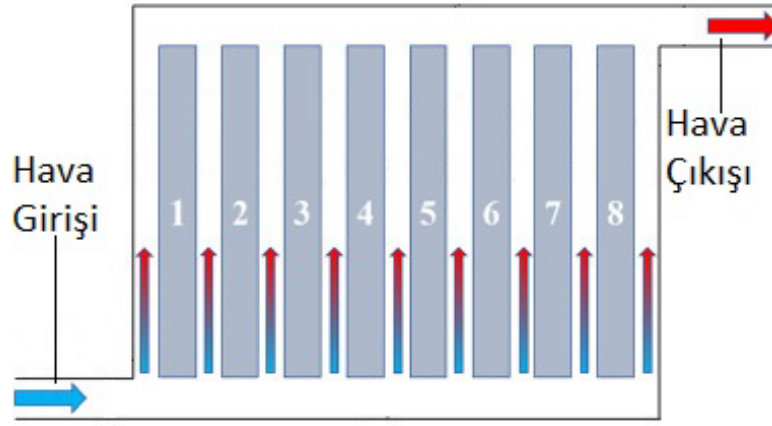
Şekil 2.2. Aktif Hava Soğutma Sistemi [32].

Elektrikli araç ve hibrit elektrikli araç gibi modellerde aracın hareketiyle hava, pil paketine doğru akar, pil hücreleri arasından geçerek pil kutusunu terk eder. Pil hücreleri tarafından üretilen ısı enerjisi hava akımı ile taşınmış olur. Aracın yavaş hareket etmesi veya dış ortam sıcaklığının yüksek olması gibi durumlarda pasif hava soğutma sistemi

yetersiz kalmaktadır. Hava akışını artırmak için fan ekleyerek aktif soğutma işlemi yapılır. Giriş veya çıkışta yer alan fanlar aşırı ısıyı taşımak ve sıcaklık dağılımını daha düzenli hale getirmek için kullanılmaktadır. Hava soğutmalı sistemlerde bir miktar da olsa maliyetin artması, fanın çıkardığı gürültü ve ekstra enerji tüketimi dezavantajları oluşturur. Buna karşın, aktif hava soğutmalı BTYS (batarya termal yönetim sistemi) güvenilir performansı ve genel termal yönetimi ile ana soğutma stratejisi olarak birçok sistemler için kullanılmaktadır.

Hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerinde yapılan çalışmalar genel olarak batarya kutusu tasarımında, soğutma kanalında, havanın giriş ve çıkış noktalarında ve ikincil soğutma kanalında yapılan iyileştirmeler noktasında yoğunlaşmaktadır. Literatürde hava soğutmalı BTYS üzerinde birçok çalışma yer almaktadır.

Zhang ve arkadaşları BTYS'nin soğutma performansını iyileştirmek için ikincil çıkışlar ve bölme ekleyen kapsamlı bir optimizasyon şeması önermişlerdir. BTYS'nin soğutma performansı üzerindeki ikincil çıkışların ve bölmelerin sayısı ve genişliğinin etkilerini araştırmak için HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) yöntemini kullanmışlardır. HAD yönteminin gerçekliği, pil takımının hava soğutmalı ısı dağılımı deneyi ile doğrulanmıştır. İlk olarak, ikincil çıkışların sayısı ve genişliğinin etkileri tartışmış ve optimize etmişlerdir. Sonuçlar, başlangıçtaki Z-tipi BTYS ile karşılaştırıldığında, optimizasyondan sonra maksimum sıcaklık ( $T_{max}$ ) ve maksimum sıcaklık farkının ( $\Delta T_{max}$ ) sırasıyla 1,84 °C (%4,20) ve 3,66 °C (%75) azaldığını göstermiştir. Ardından, yukarıdaki optimizasyon modeline dayalı olarak, hava hacmi dağılımını daha da iyileştirmek ve soğutma performansını artırmak için soğutma kanalına bir bölme eklemiştir. İlk Z tipi BTYS ile karşılaştırıldığında, optimum modelin  $T_{max}$ 'ı 2,17 °C (%4,95) ve  $\Delta T_{max}$ 'ı 4,49 °C (%91,89) azaldığını görmüşlerdir. Önerilen optimizasyon yöntemi elektrikli araçlarda BTYS tasarlamak için kullanılabilir [37]. Şekil 2.3'te Z tipi hava soğutmalı sistem verilmiştir.



Şekil 2.3. Z Tipi Hava Soğutmalı BTYS [37].

Li ve arkadaşları U-tipi hava soğutmalı BTYS için, optimize edilmiş bir tasarımı belirlemek üzere on sekiz hava akışı konfigürasyonunun etkisi sayısal olarak incelemişlerdir. Pil hücrelerini üç gruba ayırmak ve her grubu ayrı ayrı soğutmak, giriş ve çıkış manifoldlarına bölmeler ekleyerek kolayca gerçekleştirilebilen, homojen olmayan sıcaklık dağılımını ve hava akış hızını etkili bir şekilde iyileştirebilmektedir. Soğutucu geçişleri için Reynolds sayısı, geçişlerde tahmin edilen maksimum sıcaklıkla güçlü bir şekilde ilişkilidir. Giriş sıcaklığı, soğutucu geçişlerindeki maksimum sıcaklığı doğrudan etkiler, ancak geçişler arasındaki sıcaklık farkı üzerinde daha az etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir [38].

Alharbi ve arkadaşları 45 lityum iyon pil hücreli bir pil paketini simüle etmişlerdir. Laminer akış aralığında soğutucu olarak, hava sıvısı bu silindirik pillerin soğutulmasını sağlamıştır. Pil hücrelerini baklava dilimi, dikdörtgen ve üçgen olmak üzere üç farklı şekilde düzenlemişlerdir. Re değeri 500 ile 2000 aralığında değiştirilerek pil hücrelerinin ve havanın sıcaklık değerleri, pil paketindeki hava basıncındaki düşüş ve pil hücreleri ile hava arasındaki ısı transfer katsayısını değiştirmişlerdir. Pil hücresi düzenlemesi bu üç farklı modeli üzerinde çalıştırmışlardır. Araştırmalar, Re'yi artırmanın, incelenen her üç model için pil hücrelerinin maksimum ve ortalama sıcaklığını azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte, üç yerleşim modeli için Re'nin artmasıyla basınç düşüşü miktarının ( $\Delta P_a$ ) arttığını gözlemlemişlerdir. Pillerin birlikte üçgen dizilimi pil hücrelerinin maksimum ve ortalama sıcaklığını diğer modellere göre daha düşük hale getirirken baklava deseni ise tam tersi etki yapmaktadır. Üçgen model, pil takımında en yüksek  $\Delta P_a$  değerine ve pastil düzeni en düşük havaya sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Üçgen,

dikdörtgen ve eşkenar dörtgen dizilim modelleri sırasıyla daha yüksek ısı transfer katsayısı değerlerine sahiptir. Re'nin artırılması bu katsayıyı artırır ancak çıkıştaki ( $T^{Out}$ ) hava sıcaklığını düşürmektedir. Dikdörtgen model, çeşitli modeller arasında en yüksek hava  $T^{Out}$  değerine sahiptir [39].

Ren ve arkadaşları pil hücrelerinin sıcaklık artışını azaltmak ve tüm şarj ve deşarj süreci boyunca pil modülünün sıcaklık homojenliğini iyileştirmek için U-şekilli mikro ısı borusu dizisine (MIBD) dayalı yeni bir aktif hava soğutma TMS türü geliştirmişlerdir. Karşılaştırmalı deneyler için U-şekilli MIBD'lı ve MIBD'sız modüller oluşturmuşlardır. Isıyı U-şekilli MIBD ile aktif hava soğutması, U-şekilli MIBD ile pasif hava soğutması ve U-şekilli MIBD'sız pasif hava soğutması olmak üzere üç yöntemle ayırmışlardır. Sonuçlar, 2C sabit akım şarjı ve 3C sabit akım deşarj koşulları altında, aktif hava soğutma ile MIBD ve pasif hava soğutma ile MIBD'nin maksimum anlık en yüksek sıcaklıklarının sırasıyla 51,70°C ve 57,83°C olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, MIBD ile aktif hava soğutmanın termal yönetim performansının en iyisi olduğunu göstermektedir. Bu soğutma yöntemi, yüksek şarj ve deşarj oranları koşullarında bile iyi bir termal yönetim performansına sahiptir [40].

Diğer soğutma sistemleri ile karşılaştırıldığında hava soğutmalı BTYS'lerde verim düşüktür. Ayrıca ihtiyacı karşılamayan pasif hava soğutmalı sistem yerine aktif sistem kullanımı daha çöktür. Aktif hava soğutmalı BTYS uygulamalarında fan kullanılmaktadır.

### **2.1.1. Fanlar**

Fanın görevi cebri olarak hava akışını sağlamaktır. Çalışma sırasında sistemde oluşan ısının başka ortama transfer edilmesini sağlamaktadır. İyi bir performans, az enerji tüketimi, mümkün olduğunca az gürültü ve az maliyet üfleyicilerden beklenen özelliklerdir. Fanların tahrik sisteminde genellikle elektrik motoru kullanılmaktadır. Kullanıldığı sistemde enerjinin önemli miktarını fanlar tüketmektedir. Fanın seçimi, imalat ve kullanım süreci göz önünde bulundurulduğunda optimum çalışma düzeyi belirlenir. Uzun vadede fanların tükettiği enerjinin maliyeti, üretim maliyetlerinin çok üst seviyelerinde olabilmektedir [41].

Fanlar, havanın basıncını yükselterek belli bir debide havanın bir yerden başka bir yere naklini sağlar. Fandaki hava akımı akışkanlar dinamiğinin genel ilkeleri ile açıklanabilir [41].

#### 2.1.1.1. Süreklilik Eşitliği

Kayıp yaşanmadıkça; Denklem 2.1’de görüldüğü gibi akış yolu boyunca havanın debisi sabit olur.

$$\text{Debi (Q)} = \text{Hız(V)} \times \text{Kesit Alanı(A)} \quad (2.1)$$

#### 2.1.1.2. Bernoulli Eşitliği

Sürtünme kaybı göz ardı edilerek; basınç, kinetik enerji ve potansiyel enerji toplamının ideal bir akışta sabit olduğu kabul edilir. Denklem 2.2’de Bernoulli eşitliği verilmiştir.

$$P_1/\rho + V_1^2/2g + z_1 = P_2/\rho + V_2^2/2g + z_2 \quad (2.2)$$

Burada;

P: Basınç (Pa)

$\rho$ : Özgür Ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ )

V: Hız (m/s)

z: Referans çizgisinden olan uzaklık (m)

Yukarıdaki Bernoulli eşitliğine göre bir noktada basınç yüksek ve hız düşük iken diğer noktada hız yüksek ve basınç düşük olabilir. Her iki noktada enerjinin toplamı sabittir. Bernoulli eşitliği mekanik enerjinin korunumunu ifade eder. Akış yolu boyunca bir akışkanın bütün noktadaki mekanik enerjisinin toplamının sabit olduğu anlamına gelmektedir [41].

#### 2.1.1.3. Gürültü

Dönüş nedeniyle ortaya çıkan gürültü enerjisi fanın çapına ve dönme hızına bağlı olarak farklılık gösterir. Seçilen yatak türü ve yağlamanın fan gürültüsünü azaltmada etkisi vardır. Genellikle düşük fan hızlarında gürültü seviyesi daha azdır. Denklem 2.3’te kanat aralık frekansı hesaplaması verilmiştir.

$$\text{Kanat Aralık Frekansı} = \frac{n \times z_{\text{kanat}}}{60} \text{ (Hz)} \quad (2.3)$$

Burada;

n: Devir Sayısı

$z_{\text{kanat}}$ : Kanat Sayısı

Denklem 2.4'te fan gürültü düzeyinin hesaplanması verilmiştir.

$$L_{fan} = K_w + 10\log_{10} \left( \frac{\dot{Q}}{0,472} \right) + 20\log_{10} \left( \frac{\Delta P}{249} \right) + BFI + C_N \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

Burada;

$K_w$ : Fan Özgül Ses Düzeyi

Q: Fan Çıkış Debisi (L/s)

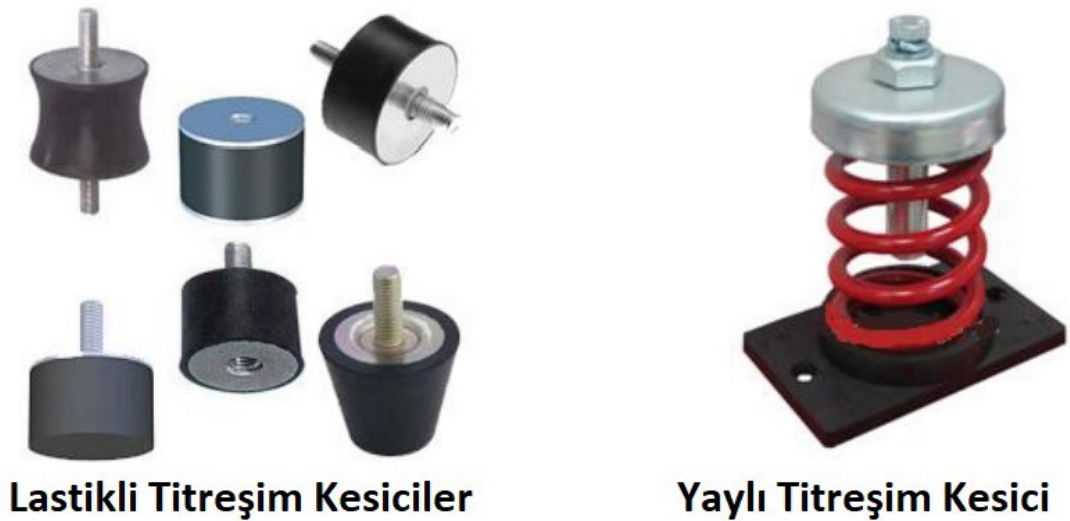
$\Delta P_t$ : Toplam Fan Basıncı (Pa)

BFI: En verimli çalışma bölgesinden sapmayı ifade eden katsayı

$C_N$ : Verim düzeltme katsayısı (%90 verimde bu katsayı 0, %75 verimde 5,2 ve %40 verimde 12,2 alınır [41].

#### 2.1.1.4. Titreşim

Fanlar da diğer dönme hareketi yapan makineler gibi sadece ses değil aynı zamanda titreşim de meydana getirir. Titreşimler zamanla malzemenin yorulmasına neden olur. Bu da yapısal yıpranmaları meydana getirir. Aşırı yıpranma sonucu gürültü de artar. Titreşimin en aza indirilmesi için titreşim kesiciler kullanılır [41]. Şekil 2.4'te titreşim kesiciler gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Titreşim kesiciler [33].

#### 2.1.1.5. Fan Kanunları

Dinamik yapı olarak benzerlik gösteren fanların karakteristik değişkenlikler gösteren

denklemlerine fan kanunları denir.

1. Kanun: Benzer yapıdaki fanların debi ve devir oranları eşittir. Denklem 2.5'te benzer yapıdaki fanların debi ve devir oranlarının hesaplaması verilmiştir.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (2.5)$$

2. Kanun: Benzer yapıdaki fanların basınç oranları, devir oranlarının karesine eşittir. Denklem 2.6'da benzer yapıdaki fanların basınç ve devir oranlarının hesaplaması verilmiştir.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \times \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \quad (2.6)$$

3. Kanun: Benzer yapıdaki fanların güç oranları, devir oranlarının küpü ile doğru orantılıdır. Denklem 2.7'de benzer yapıdaki fanların güç ve devir oranlarının hesaplaması verilmiştir.

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \times \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \quad (2.7)$$

4. Denklem 2.8'de fanın gürültü seviyesindeki değişimin hesaplanması verilmiştir.

$$L_1 - L_2 = 50 \log_{10} \left(\frac{D_1}{D_2}\right) + 50 \log_{10} \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (2.8)$$

Yukarıda verilen 4 kanun tüm fanlar için kabul edilmektedir [56].

## 2.2. Faz Değiştiren Malzeme Kullanılan Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Pildeki fazla ısının alınması ile faz değişimi gerçekleşir. Batarya pil paketinin çalışma koşullarına göre değişerek, pilin ürettiği fazla ısı, pil takımına yakın FDM (faz değiştiren malzeme) tarafından emilir ve pilin sıcaklığı, faz değiştiren malzeme erime sıcaklığına ulaştığında, ısı gizli ısı şeklinde depolanır. Pil paketindeki sıcaklık artışı düşürülmeye çalışılır. Böylece FDM soğutma sistemindeki pil paketi uygun bir sıcaklık aralığında kalır. Pompa veya üfleyici gerektirmeyen yapısı nedeniyle diğer soğutma sistemlerinden daha az maliyet ve tasarıma sahiptir [42]. Faz değiştiren malzeme kullanılan batarya termal yönetim sistemi çalışmalarından örnekler aşağıda verilmiştir.

Sun ve arkadaşları ısı transferini iyileştirmek için boyuna kanatçıklar ve silindirik halkalardan oluşan yeni kanat yapıları önermişlerdir. Öncelikle deneyleri farklı BTYS'lerin termal performansını karşılaştırmak için tasarlamışlardır. Sonuçlar, FDM-Fin sisteminin saf pil sistemi ve FDM sistemine göre üstün performans gösterdiğini göstermektedir. Altta yatan mekanizmaları ortaya çıkarmak için deneysel verilerle model doğrulamasına dayalı olarak sayısal simülasyonlar da yürütmüşlerdir. Kanat yapılarının sadece ısı transfer alanını arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda FDM içinde pilin termal performansının iyileştirilmesine olumlu katkıda bulunan bir termal iletken ağ oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, halkaların konumu, halka ve kanat sayısı ve ısı üretim hızının termal yönetim performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, halkalar ve kanatçıklar için en uygun sayıların sırasıyla 1 ve 8 olduğunu ve halka ile pil arasında önerilen boyutsuz mesafenin 0,2 olduğunu göstermiştir. Ayrıca FDM-Fin sisteminin, 20W'lık ısı üretim hızında bile pilin sıcaklık artışını kontrol edebildiği bulunmuştur [43].

Li ve arkadaşları bir otonom su altı araçları BTM'si için bir nanoparçacık/faz değiştiren malzeme (nano-FDM) kompoziti önermişlerdir. Nanoparçacık yükleme yüzdesinin ( $\varphi = \%5, \%10$  ve  $\%15$ ) ve nanoparçacık doldurma aralığının ( $\alpha = 30, 60, 90$  ve  $120^\circ$ ) pil sıcaklığı ve FDM erimesi üzerindeki etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Çeşitli değişkenlerin BTM performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için boyutsuz sıcaklık kontrol performansı faktörü ve boyutsuz ısı depolama performansı faktörü için iki kriter kullanmışlardır. Sonuçlar, nanoparçacık yükleme yüzdesinin artırılmasının, FDM'nin etkin termal iletkenliğini iyileştirdiğini, ancak toplam etkin gizli ısıyı azalttığını göstermiştir. FDM'nin genel erime hızını hızlandırmak için optimal bir nanoparçacık doldurma aralığı  $\alpha = 60^\circ$  önermişlerdir. Saf FDM tabanlı BTY ile karşılaştırıldığında, boyutsuz sıcaklık kontrol performans hızı ve boyutsuz sıcaklık kontrol performans yoğunluğu,  $\alpha = 60^\circ$ 'de sırasıyla  $\%14,56$  ve  $\%26,75$  oranında artmıştır.  $\alpha = 60^\circ$ 'de boyutsuz ısı depolama performans oranı  $\%2,84$  arttığını ancak boyutsuz ısı depolama performans yoğunluğu  $\%11,85$  azaldığını tespit etmişlerdir. Bu bulgular, otonom sualtı araçların BTY'si için nano-FDM kompozitlerinin doğru tasarımı için bir referans sağlayabilmektedir [44].

Verma ve arkadaşları farklı güç koşulları için yüksek ortam sıcaklığında lityum iyon pil takımının termal davranışının parametrik bir araştırmasını yapmışlardır. Pasif bir çözüm olarak kanatçıkların ve faz değiştiren malzemenin (FDM) yeni bir pasif soğutma

düzenlemesi önermişlerdir. FDM katmanları piller arasına sıkıştırmışlardır ve parametrik çalışma için 7 mm, 9 mm ve 12 mm olmak üzere üç farklı kalınlıktaki FDM katmanları belirlemişlerdir. Tasarımda ilave iyileştirme, hücrelerin dikey enine kesiti boyunca sekiz adet alüminyum boyuna kanatçık yerleştirmişlerdir. Analiz, 30 mm uzunluğunda uzunlamasına kanatçıklar kullanıldığında, önerilen pil takımının maksimum sıcaklığının 7 mm, 9 mm ve 12 mm FDM kalınlıkları için sırasıyla 16 °C, 22 °C ve 26 °C düştüğünü ortaya koymuştur. Minimum sıvı fraksiyonunun, FDM malzemesine maksimum ısı absorpsiyonu için ekstra bir zaman penceresi verebilen, FDM kalınlığını ve kanat uzunluğunu artırarak %91,7 oranında iyileştiği de gözlemlenmiştir. Ek bir soğutucu olarak kullanılan uzunlamasına kanatçıklar, hücreler arasındaki sıcaklık dağılımını iyileştirmiştir ve 5 °C'ye yakın sıcaklık dağılımındaki eşitsizlikleri kapatmıştır [45].

### **2.3. Sıvı Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri**

Doğrudan ve dolaylı olmak üzere sıvı soğutma işlemi ikiye ayrılır: soğutma sıvısını batarya sisteminden ayırmak için boru, soğuk plaka veya ceket kullanılan sistem dolaylı sistemdir. Bu dolaylı sistemde sıvı sızıntısına bağlı olarak yaşanan kısa devre önemli bir güvenlik riski oluşturmaktadır. Dielektrik soğutucuya daldırılmış pil paketi ile doğrudan sıvı soğutma işlemi yapılmaktadır. Sıcaklık dağılımının homojen olması ve yüksek ısı iletkenliği büyük bir avantajdır [34].

Chen ve arkadaşları hızlı şarj altında en kısa şarj aralığını ve termal güvenliği sağlamak için prizmatik bir pil modülü için paralel bir sıvı soğutma sistemi önermişlerdir. Ayrıca, termal performans ve enerji maliyeti hedeflerine sahip bir vekil model oluşturmuşlardır. Bazı etkili tasarım parametrelerinin etkisi, duyarlılık analizi ve tepki yüzey analizi yoluyla araştırmışlardır. Ayrıca optimal tasarım seçimi için çok amaçlı optimizasyon tasarımı yapmışlardır. Son olarak, optimum tasarım, 2,5 C hızlı şarj altında yapılan deneylerle doğrulamışlardır. Sonuçlar, mini kanal derinliğinin soğutma etkisi (%70,8), sıcaklık dağılım homojenliği (%75,7) ve enerji maliyeti (%86,1) üzerinde en etkili tasarım parametresi olduğunu göstermektedir. Sistemin hacim enerji yoğunluğu, maksimum sıcaklık ( $T_{max}$ ), sıcaklık standart sapması ve enerji maliyeti sırasıyla %9, %2,1, %23,7 ve %26,9 oranında artırılmıştır. Deneysel doğrulama, pil modülünün  $T_{max}$ , sıcaklık standart sapması ve enerji maliyeti değerlerinin sırasıyla 33,1°C, 0,9°C ve 17,29 J aralığında tutulabileceğini kanıtlamaktadır. Yapılan bu çalışma özellikle zorlu işlemler sırasında gelişmiş verimlilik ve enerji maliyeti ile pil termal yönetim sistemi tasarımı için

kılavuzluk yapmaktadır [46].

Zhang ve arkadaşları akış çizgisi kanallarına sahip mevcut bir sıvı soğutma plakasını kullanarak büyük ölçekli bir kese hücresi için bir termal kontrol yöntemi tasarlamışlardır. Sayısal olarak, hücre termal dağılımı üzerindeki kütle akış hızları, soğutma tetikleme süresi ve glikol çözeltisi konsantrasyonunun etkileri ayrıntılı olarak analiz etmişlerdir. Deneysel olarak, simülasyon etkinliği, inşa edilmiş bir termal test sistemi ile doğrulanmıştır. Artan kütle akış hızının, hücre sıcaklık artışını ve farkını felce uğratmada olumlu bir rol oynadığını göstermişlerdir. Ancak bu durumda marjinal bir etkiye sahiptir. Soğutma tetikleme süresinin ertelenmesinin hücre termal homojenliğini artırma üzerindeki etkisi, soğutma 31 °C'de başladığında, son hücre sıcaklığı ve sıcaklık farkı sırasıyla 32 °C ve 5 °C'nin üzerindeyken negatiftir. Maksimum hücre sıcaklığı ve kanal basıncı düşüşü, %0'dan %80'e artan glikol çözeltisi konsantrasyonuyla artmaktadır. Deneysel doğrulama, test ve simülasyon sonuçlarının birbiriyle örtüştüğünü (2,5 °C içinde) göstermektedir. Bu da hücre sıcaklık alanını istenen bir aralıkta yönetmek için mevcut termal yönetimde umut verici bir kullanılabilirliğini göstermektedir. Büyük ölçekli kese hücreleriyle yığılmış bir pil takımı için güvenilir bir soğutma çözümü geliştirmek bu çalışma ile gösterilmiştir [47].

Li ve arkadaşları 18650 lityum iyon pilin soğutulması için yeni bir soğutma şeması olarak florlu sıvı daldırma soğutmasını test etmişlerdir. 33,4 °C kaynama noktasına sahip SF33, daldırma soğutması için sıvı olarak seçmişlerdir. 18650 lityum iyon pil için 2C, 4C ve dinamik yük koşullarında SF33 daldırma soğutma ve cebri hava soğutma karşılaştırmasını yapmışlardır. Daldırma soğutmanın tüm bu koşullar altında pili daha iyi soğuttuğunu tespit etmişlerdir. 4C yük altında, maksimum hücre sıcaklık artışı cebri hava soğutma için 14,06 °C iken SF33 daldırma soğutması için 4,97 °C'dir. SF33'ün sıcaklığı temel olarak hücre sıcaklığını yönettiğinden, SF33 sıcaklığı çok düşük olmaması gerekmektedir. Lityum iyon pilin 20 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarla karşılaştırıldığında, 10 °C ve 15 °C SF33 sıcaklığında ihmal edilemez güç kayıplarına sahiptir. Son olarak, daldırma soğutma ile ilişkili iki fazlı kaynama ısı transfer mekanizmaları kabarcık dinamiği analizi ile araştırmışlardır. Daha yüksek bir C oranı altında bulunur, daha agresif kaynama ısı transferi ayarlanmıştır. 7C deşarj durumunda bile pil sıcaklığı 34,5 °C'nin altında olacak şekilde kontrol edilmiştir [48].

## 2.4. Hibrit Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Kullanılan soğutma sisteminin yetersiz olması veya daha iyi bir soğutma performansı amacıyla birden fazla soğutma yöntemi bir arada kullanılabilir. Bu tür sistemlere hibrit sistemler denir. Literatür araştırması sonucunda aşağıda bazı hibrit çalışmalara örnekler verilmiştir.

Chen ve arkadaşları sıvı soğutma ve faz değiştiren malzemenin kullanıldığı sistem üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada hücre aralığının ve sıvı kanalının çapının artmasıyla maksimum sıcaklık düzeyi ve sıcaklık farkının azaldığını gözlemlemişlerdir. Faz değiştiren malzemenin yerleşiminde uzunluk dağılımı ve batarya paketinin yapı parametreleri ve soğutma yöntemi üzerindeki etkilerini araştırmak için 4°C sıcaklığında deşarj durumundaki batarya paketinin 35°C ortam sıcaklığında hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak araştırmışlardır. Sırasıyla 110 mm, 120 mm ve 120 mm olan segmentli yerleşimlerden 3.sü 1.sine kıyaslandığında maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı % 30 ve % 40 oranında azaldığını görmüşlerdir [49].

Chen ve arkadaşları pil hücrelerinin sıcaklığını simüle etmek için tek boyutlu elektrokimyasal ve iki boyutlu termal modeller kullanmışlardır. Bu çalışmada aktif hava soğutmalı sisteme sadece faz değiştiren malzeme kullanarak yapılan soğutma işleminden daha verimli olduğu görmüşlerdir. Hava giriş hızının düşük olduğu durumlarda sıcaklık dağılımının daha düzensiz olduğu da dezavantaj olarak belirlemişlerdir. Kullanılan bu iki soğutma yöntemi döngüsel maliyeti karşılaştırıldığında hava soğutmanın döngüsel maliyeti daha düşüktür. Çevrimsel maliyet, hava giriş hızı artırıldığında ilk olarak azalır, daha sonradan artan bir eğilim göstermektedir [50].

Grafen oksidin ilave edildiği silika jel yardımı ile pil hücreleri ve sıvı soğutma kanalı arasında kalan boşlukların doldurulduğu hibrit soğutmalı sistemde; grafen oksit yardımı ile termal iletkenlik artırılmış olduğundan soğutma performansının da arttığı görülmüştür. Yapılan deneyler ile sıcaklığın 4 – 5 °C düştüğü gözlemlenmiştir [51].

Faz değiştiren malzeme ve ısı borusu kullanarak yapılan sistemin performansına bakıldığında, güç tüketimi olmadan soğutma işlemi yapıldığı için oldukça kullanışlı bir sistem olduğu tespit edilmiştir. Aktif/pasif olarak kullanılan sistemlerde hibrit olan sistemlerin tek soğutma yöntemi kullanan sistemlere göre daha verimli olduğu öne sürülmüştür. İstatiksel olarak maksimum hücre sıcaklığı ve sıcaklık dağılımı gözden geçirildiğinde sınırlı güç tüketimi, ağırlık ve hacimdeki kısıtlamalar için en uygun

soğutma sisteminin geliştirilmesine katkı sağlanılmıştır [52].

Minik yapıda kanallı soğutma sistemine ek olarak hava soğutma entegreli yapılan birleşik sistemde soğutucu sıvının akış hızı, soğutma tüpü, kanal miktarı, soğutucu akış yönü parametreleri göz önüne alınarak silindir yapıdaki lityum iyon pil hücrelerinin üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sıvı akışkanın debisi artırıldığında sıcaklığın düştüğü tespit edilmiştir. Debi  $3 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  olduğunda, kanal miktarı artırıldığında soğutma performansı biraz daha iyi duruma gelmektedir.  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  hızındaki hava ile yapılan soğutmada sıcaklığın düştüğü ve sıcaklık farkının %80'e kadar düşürüldüğü görülmüştür [53].

Pil hücrelerinin arasına düz olarak tasarlanmış bir kanal tabaka yerleştirilmiştir. Bu tabakanın içinden soğutucu akışkan geçmesi sağlanmıştır. Kanal genişliği, kanal miktarı soğutma için kullanılan sıvının özellikleri, akış hızı ve sıvının sıcaklığı göz önüne alınarak elektrokimyasal ve termal olaylar incelendikten sonra kanal sayısı arttıkça akış direnci nedeniyle basınç düşüşü görülmüştür. Akış hızı artırıldığında ortalama sıcaklık ve basınç düşüşü ile güç tüketimi artmaktadır. 6 mm genişliğe sahip 5 adet kanal,  $3 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  debi ile 298 °K sıcaklıktaki sıvı girişi ile 20 Ah kapasitedeki  $\text{LiFePO}_4$  batarya paketini herhangi bir iklim koşulunda 298 – 313 °K aralığında tutmak mümkün olduğu tespit edilmiştir [54].

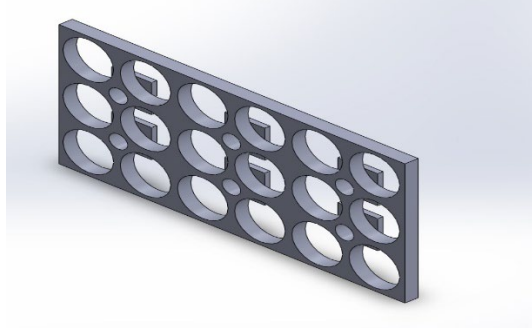
### 3. MATERYAL VE METOD

Literatür taramasının ardından pil hücreleri ve batarya paketi için maliyet, uygulanabilirlik, bakım ve kullanım kolaylığı gibi parametreler göz önüne alındığında hava soğutmalı sistemin yaygın olarak tercih edilen batarya termal yönetim sistemi olduğu söylenebilmektedir. Gelişen elektrikli araç teknolojisinde büyük öneme sahip olan pil sistemleri üzerinde yapılan iyileştirme çalışmaları, batarya paketinin kullanılacağı sistem üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Hava soğutmalı sistemlerin; sıvı soğutma, faz değiştiren malzeme ile yapılan soğutma sistemleri ile karşılaştırıldığında en büyük dezavantajı düşük verimliliğidir. Buna karşın sıvı sistemlerdeki sıvı sızıntısı, batarya paketi için güvenlik tehdidi oluşturmaktadır. Faz değiştiren malzeme ile karşılaştırıldığında maliyeti ve uygulama alanı konusunda hava soğutmalı sistemin daha uygun olduğu literatürdeki birçok çalışmada ortaya konulmuştur.

Oluşturulan deney düzeneğinde batarya paketi üç farklı tasarıma imkân verecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Batarya paketinin arka ve yan tarafından hava girişine imkân veren bu üç tasarım şu şekildedir; arka taraf ve yan tarafların açık olduğu model, arka tarafın açık, yan tarafların kapalı olduğu model ve arka tarafın kapalı, yan tarafların açık olduğu model. Pil hücrelerinin özellikleri, batarya paketinin oluşturulması ve deney şartları ayrıntılı olarak bu bölümde anlatılmıştır.

#### 3.1. Batarya Paketinin Tasarımı

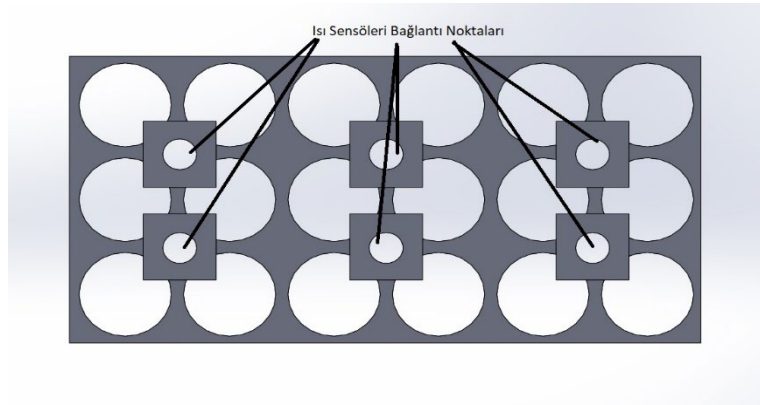
Bu tez çalışmasında pil hücrelerini bir arada tutacak pil tutucu ve batarya paketi için uygun tasarım SolidWorks yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Pil hücrelerini bir arada tutmak için pil tutucu tasarlanmıştır. Şekil 3.1’de pil tutucunun tasarımı görülmektedir. Üç boyutlu yazıcı kullanılarak, tasarımı yapılan pil tutucu ve batarya paketinin konulacağı kutunun üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Pil Tutucu.

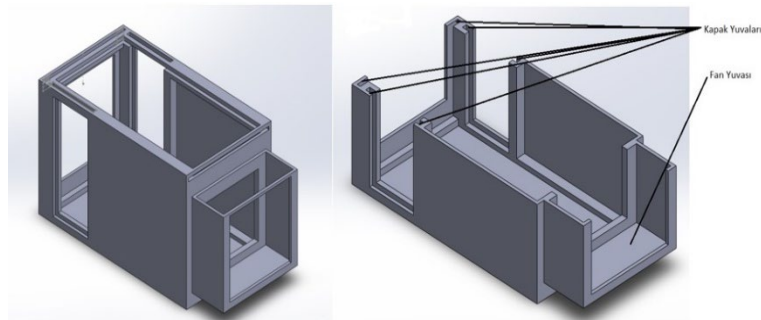
Silindirik yapıdaki pil hücrelerinden oluşturulan pil paketini bir arada tutmak için pil tutucular, pil hücrelerinin alt ve üst kısmında konumlandırılmıştır. Pil tutucunun ölçüleri; 130 mm x 65 mm x 5 mm ve yuva çapı 19 mm'dir.

Isı sensörleri ile Arduino arasındaki bağlantıyı sağlayacak kablolar için Şekil 3.2'de görüldüğü gibi sensör giriş noktaları belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Isı Sensörlerinin Giriş Noktaları.

Batarya kutusunda fan için yuva tasarlanmıştır. Batarya kutusunun ölçüleri; 140 mm x 80 mm x 98 mm ve cidar 3 mm'dir. Şekil 3.3'te batarya kutusunun izometrik kapak yuvaları ve fan için tasarlanan yuva verilmiştir.

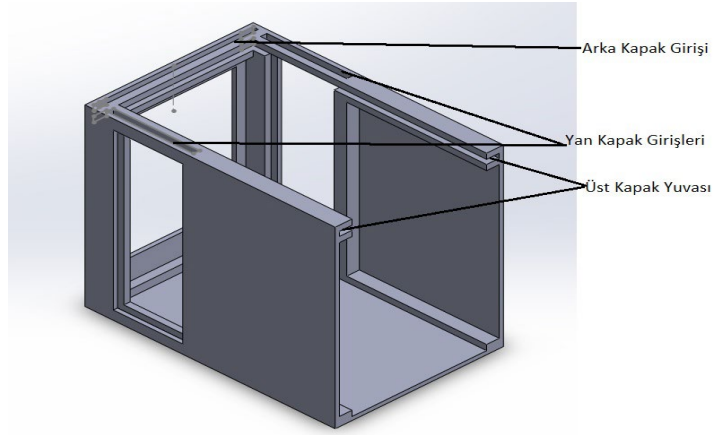


Şekil 3.3. Batarya Paketi Tasarımı İzometrik Görünümü.

Üç farklı modelin tek batarya kutusu üzerinde değiştirilerek uygulanabilmesi için portatif bir iskelet tasarımı yapılmıştır. Bu modeller şu şekildedir:

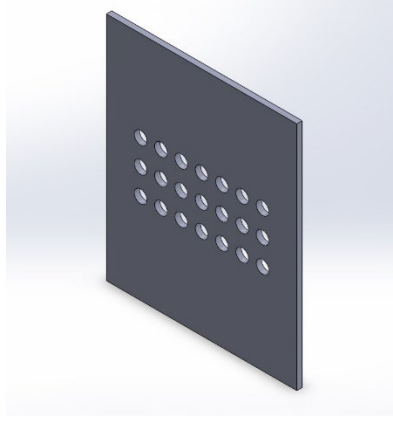
- Arka tarafın açık, yan tarafların kapalı olduğu model
- Arka tarafın kapalı, yan tarafların açık olduğu model
- Arka taraf ve yan tarafların açık olduğu model

Üç farklı modeli elde etmek için tasarlanan kapakların yerleşimi üst konumda belirlenmiştir. Arka ve yan kapaklar yerleştirildikten sonra üst kapak kapatılmıştır. Böylece batarya paketi tamamlanmıştır. Şekil 3.4'te kullanılan kapakların giriş noktaları ve üst kapağın yuvası görülmektedir.



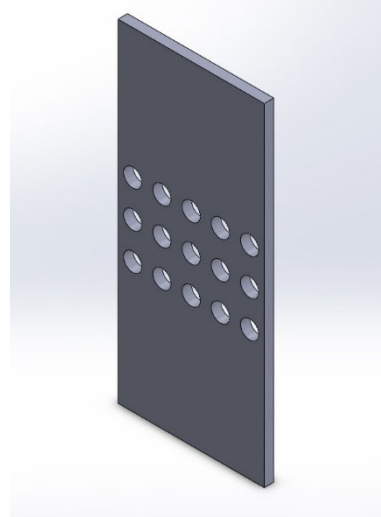
Şekil 3.4. Batarya Kutusu Ön Kesit Görünümü.

Silindirik yapıdaki pil hücrelerinin orta kısmı en çok ısınan kısımdır. En iyi soğutma performansını elde etmek için kapaklar üzerindeki delikler, pil hücrelerinin orta noktası referans alınarak tasarlanmış ve hava akışı, pil hücrelerinin orta noktasına yönlendirilmeye çalışılmıştır. Şekil 3.5'te açık modeli elde etmek için delikli yapıdaki arka kapak gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Delikli Yapıya Sahip Arka Kapak.

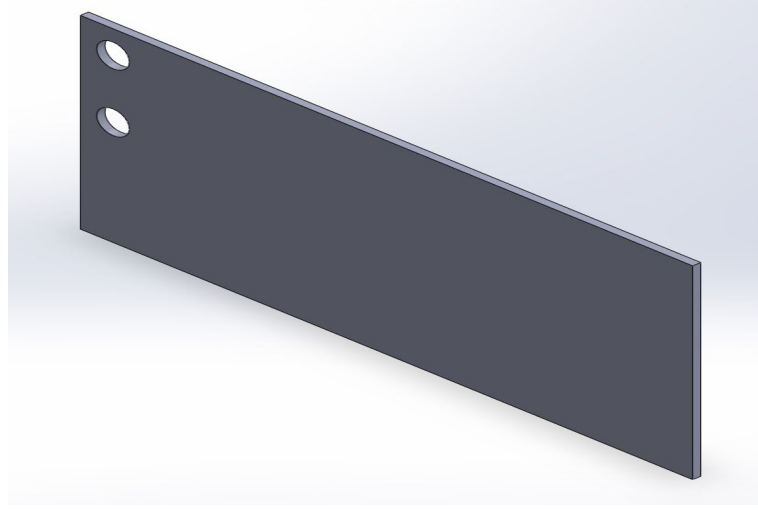
Batarya paketi tasarlanırken arka kapağın gireceği uygun ölçüde yuva tasarlanmıştır. Kapağın yuvasında sıkıca durması ve istenmeyen hava sızıntısını önlemek için uygun tolerans belirlenmiştir. Arka kapak girişi 2,5 mm x 76,5 mm olarak belirlenmiştir. Arka tarafın kapalı olduğu modelde kullanmak üzere deliksiz yapıda bir kapak daha imal edilmiştir. Arka kapağın ölçüleri 75,5 mm x 91,5 mm x 2,1 mm şeklindedir. Daha sıkı ve sızdırmaz bir yapı elde etmek için tolerans 1 mm x 0,4 mm olarak belirlenmiştir. Arka kapaktaki delik çapı 5 mm'dir. Batarya paketinin yan tarafları için ikişer adet delikli ve deliksiz yapıda yan kapaklar tasarlanmıştır. Şekil 3.6'da delikli yapıya sahip yan kapak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Delikli Yapıya Sahip Yan Kapak.

Yan taraftaki kapakların ölçüleri ve yan kapak yuvalarının ölçüleri aynıdır. Yuva girişi 41,55 mm x 3,5 mm şeklindedir. Yan kapakların ölçüleri şu şekildedir; 40,5 mm x 91,5 mm x 3,1 mm'dir. Yan kapaklar ve yuvaları ele alındığında daha sıkı ve hava sızdırmayan yapı elde etmek için 0,4 mm x 1 mm tolerans ölçüsü olarak belirlenmiştir.

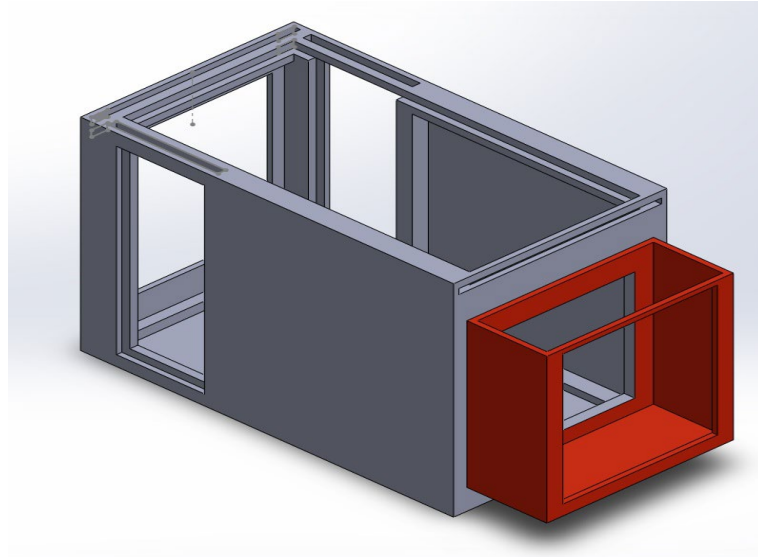
Üst kapağında yerine yerleştirilmesi ile batarya paketi tamamlanmıştır. Şekil 3.7’de üst kapağın görünümü verilmiştir.



Şekil 3.7. Üst Kapak Tasarımı.

Batarya paketindeki kablolar için üst kapakta iki adet çıkış noktası belirlenmiştir. Üst kapak için yapılan yuvanın girişi, 76 mm x 3 mm ölçülerindedir. Üst kapağın ölçüleri şu şekildedir; 150 mm x 75 mm x 2,5 mm ve kablo için delik çapı 8 mm. Üst kapak ve kapağın yuvası daha sıkı birbirine geçmesi ve hava sızıntısını önlemek için en 1 mm x 0,5 mm tolerans olarak belirlenmiştir.

Fan yuvası batarya paketinde yer alacak şekilde tasarlanmıştır. Fan ölçüleri 60 mm x 60 mm x 15 mm’dir. Şekil 3.8’de kırmızı renkli alan soğutma işlemi için kullanılacak fanın yuvasını göstermektedir.



Şekil 3.8. Fan Yuvası.

Bu projede, Çizelge 3.1’de teknik özellikleri verilen DC özellikteki Sunon marka fan kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Projede Kullanılan Fanın Teknik Özellikleri [47].

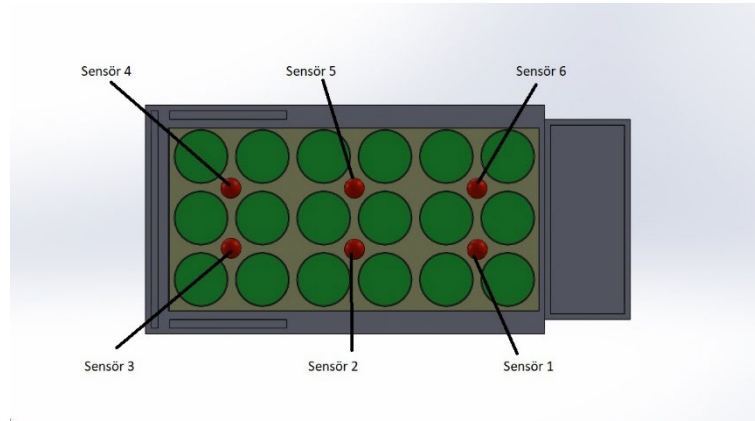
■ Specification

MAGLEV SUNON	Bearing	Rated Voltage	Power Current	Power Consumption	Speed	Airflow	Static Pressure	Noise	Weight	Curve
	● VAPO	(VDC)	(mA)	(WATTS)	(RPM)	(CFM)	(inch-H <sub>2</sub> O)	(dB(A))	(g)	
MF60151VX-1000U-A99	●	12	185	2.22	5400	30.4	0.22	36.2	35.5	1
MF60151V1-1000U-A99	●	12	127	1.53	4700	26.4	0.18	34.2	35.5	2
MF60151V2-1000U-A99	●	12	68	0.82	3900	22.8	0.14	29.2	35.5	3
MF60151V3-1000U-A99	●	12	48	0.58	3000	17.6	0.12	21.3	35.5	4
MF60152VX-1000U-A99	●	24	85	2.04	5400	30.4	0.22	36.2	35.5	1
MF60152V1-1000U-A99	●	24	75	1.80	4700	26.4	0.18	34.2	35.5	2
MF60152V2-1000U-A99	●	24	40	0.96	3900	22.8	0.14	29.2	35.5	3

■ Function R Type : F99 / F Type : G99

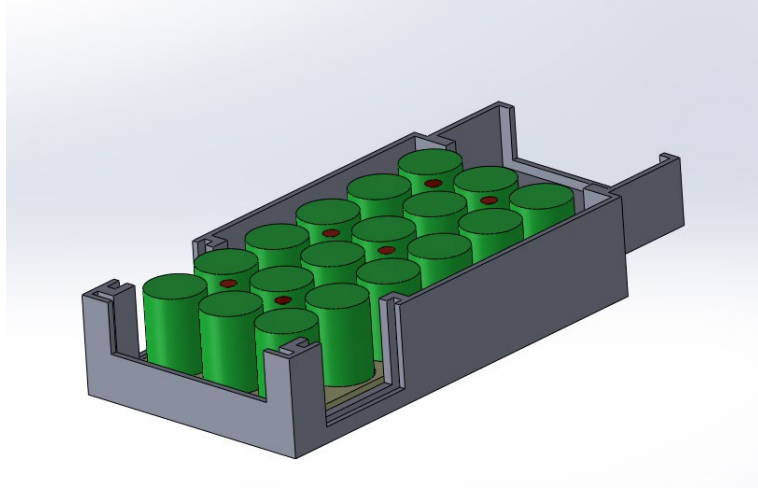
### 3.2. Sıcaklık Sensörleri

Deney esnasında ds18b20 tipi sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Sıcaklık sensörlerinden elde edilen veriler Arduino aracılığı ile bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Sıcaklık sensörünün çalışma aralığı -55 °C ile 125 °C’dir. -10 °C ile 85 °C değerleri arasında ±0,5 °C doğruluk değerine sahiptir. Sıcaklık sensörlerinin konumu Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Sıcaklık Sensörleri Üst Görünüm.

Dört adet pilin arasına bir tane sensör gelecek şekilde toplamda altı adet sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Şekil 3.9’da yeşil renkler pil hücrelerini, kırmızı renkler sıcaklık sensörlerini temsil etmektedir. Silindirik yapıdaki pil hücrelerinde çalışma esnasında en çok ısınan nokta orta noktalardır. Bu yüzden sıcaklık sensörleri, pil hücrelerinin orta noktasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 3.10’da sıcaklık sensörlerinin batarya paketindeki izometrik görünümü verilmiştir.



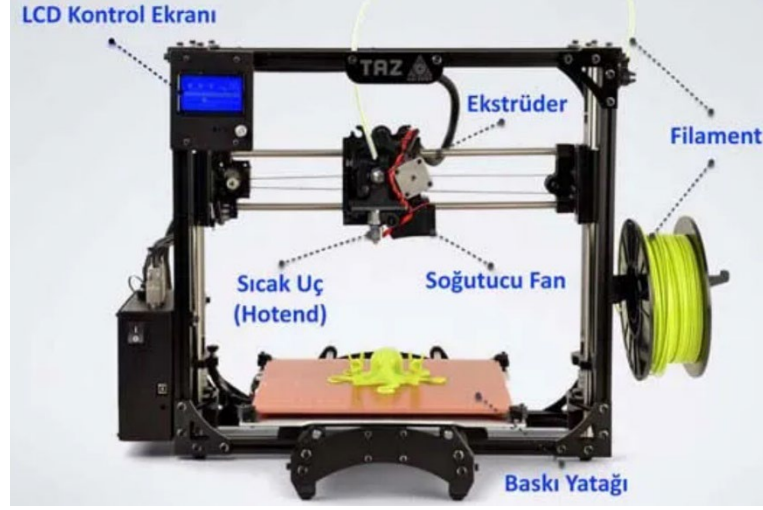
Şekil 3.10. Sıcaklık Sensörlerinin Üstten Kesit Görünümü.

### 3.3. Batarya Paketi İmalatı

Ölçüleri verilmiş olan tasarımların üç boyutlu yazıcıdan imalatının yapılması için UltimakerCura programı kullanılmıştır. SolidWorks programında yapılan tasarımlar, UltimakerCura programına alınarak burada yazdırılmaya hazır hale getirilmek üzere dilimleme işlemi yapılmıştır. Yazıcıdaki baskı işlemi için PLA filament kullanılmıştır.

#### 3.3.1. Üç Boyutlu Yazıcı

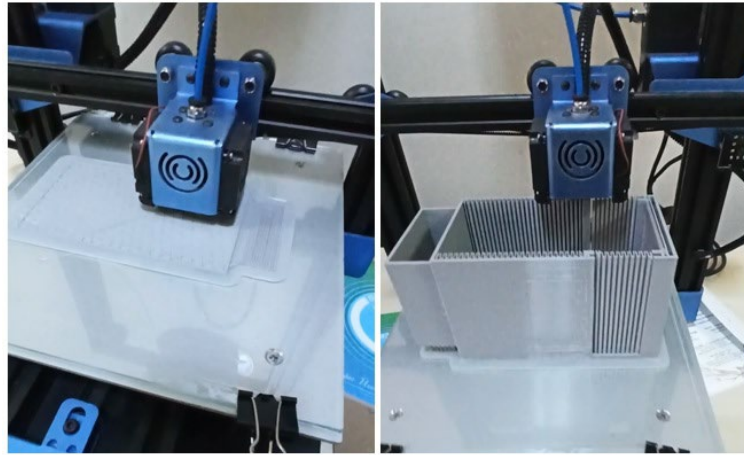
Dijital ortamlarda elde edilen model ve tasarımların plastik, metal vb. maddelerin eritilerek iki boyutlu düzlemde üst üste katmanlar oluşturularak üç boyutlu hale getirilmesini üç boyutlu yazıcılar sağlar. Günümüzde birçok alanda kullanılmakta olan üç boyutlu yazıcılar ufak ve işlevsel parçaların üretiminde büyük kolaylık sağlamaktadır. Şekil 3.11’de üç boyutlu yazıcı ve parçaları verilmiştir.



Şekil 3.11. Üç Boyutlu Yazıcı [55].

Tasarlanacak model tarandıktan sonra yazıcının anlayabilmesi için baskı yazılımına gönderilir. Baskı yazılımında tasarımın kesişim yerleri belirlenir. Yazıcının eritip şekil verdiği malzemenin adı filamenttir ve genellikle plastik bazlı bir malzemedir. Düzlem üzerinde herhangi bir noktaya hareket edebilen baskı kafasının bağlı olduğu baskı plakası yukarı ve aşağı yönde hareket edebilmektedir. Baskı kafasındaki ısıtma elemanı filamenti eriyik hale getirir. Eriyik haldeki filament ile baskı plakası üzerine tasarım çizilir.

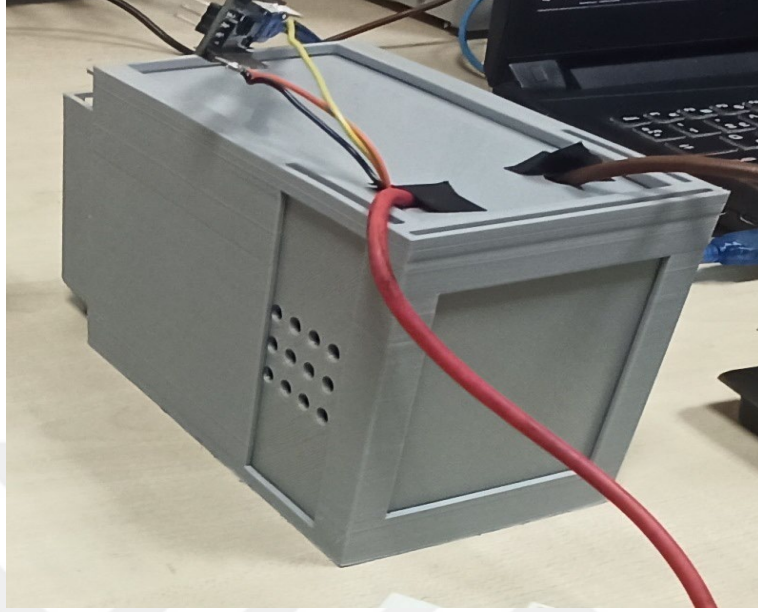
Batarya paketi içerisindeki hava akışının farklı yönde olmasının soğutma performansı üzerindeki etkisi gözlemlenmek istenmiştir. Bunun için farklı modelde batarya kutusu yerine tek kutuda üç farklı model kullanılmıştır. Şekil 3.12’de batarya kutusunun imalat aşaması verilmiştir.



Şekil 3.12. Batarya Paketinin Üç Boyutlu Yazıcıda İmalat Aşamaları.

Pil tutucu sayesinde sabit hale getirilen pil hücreleri arasındaki elektrik akımını sağlamak için nikel şerit kullanılmıştır. Kaçak akımı önlemek ve daha güvenli bir yapı elde etmek için bağlantılar izolasyon bandı ile kapatılmıştır.

Toplamda 18 adet pil kullanılan batarya paketinde 6s3p (6 seri 3 paralel) bağlantı kurulmuştur. Batarya paketinin nominal gerilim değeri 22,2 voltttur. Maksimum gerilim değeri 25.3 voltttur. Şekil 3.13'te pil paketi gösterilmiştir.



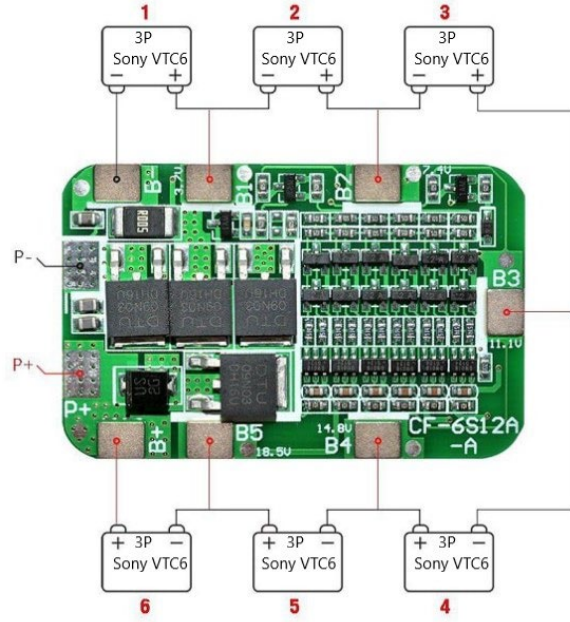
Şekil 3.13. Batarya Pil Paketi.

Batarya paketini oluşturmak için 18650 Sony VTC 6 lityum iyon pil hücreleri kullanılmıştır. Bu pillerin teknik özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. 18650 Sony VTC 6 Pilin Teknik Özellikleri.

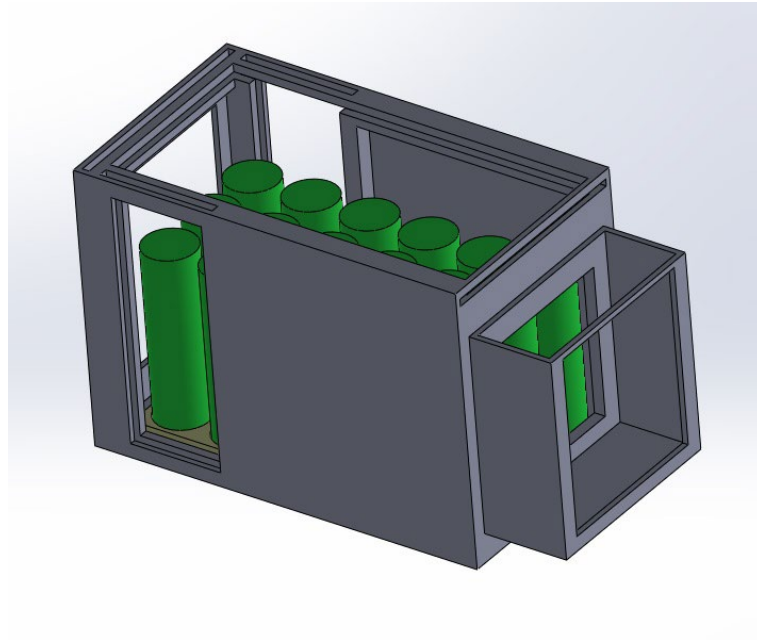
Gerilim	3,7 V
Kapasite	3000 mAh
Güç	13,69 Wh
Anlık Deşarj	30 Amper
Ağırlık	48,5 gr
Ölçüler	18,25x65 mm

Pil hücrelerinin güvenli değerler arasında çalışmasını sağlamak için 6s3p 12 amper batarya yönetim sistemi (BYS) kartı kullanılmıştır. Şekilde 3.14'te 6s3p 12A BYS kartının bağlantı devresi verilmiştir.



Şekil 3.14. 6 Seri 3 Paralel 12 Amper Batarya Yönetim Sistemi Bağlantıları [56].

Batarya paketi, batarya kutusuna üst taraftan yerleştirilmiştir. Şekil 3.15'teki yerleşimde yeşil renkler pil hücrelerini temsil etmektedir.

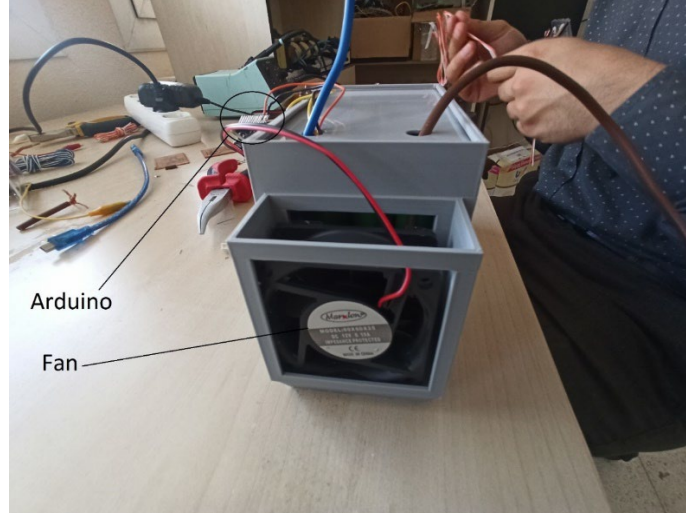


Şekil 3.15. Pil Paketinin Batarya Kutusuna Yerleşimi.

Batarya paketindeki havanın dışarı atılması ile soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

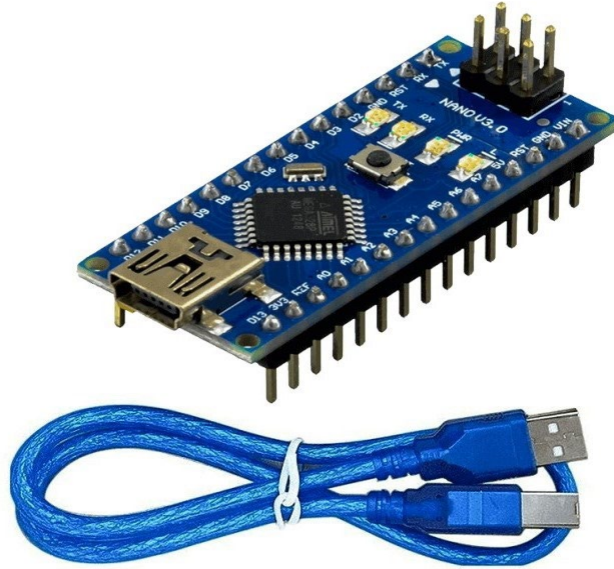
Hava soğutmalı batarya termal yönetim sisteminde hava akışı öne olacak şekilde tasarlanarak, fan ön tarafta konumlandırılmıştır. Havanın girişi arka ve yan taraflardan

sağlanmıştır. Şekil 3.16’da fan ve Arduino gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Fan ve Arduino.

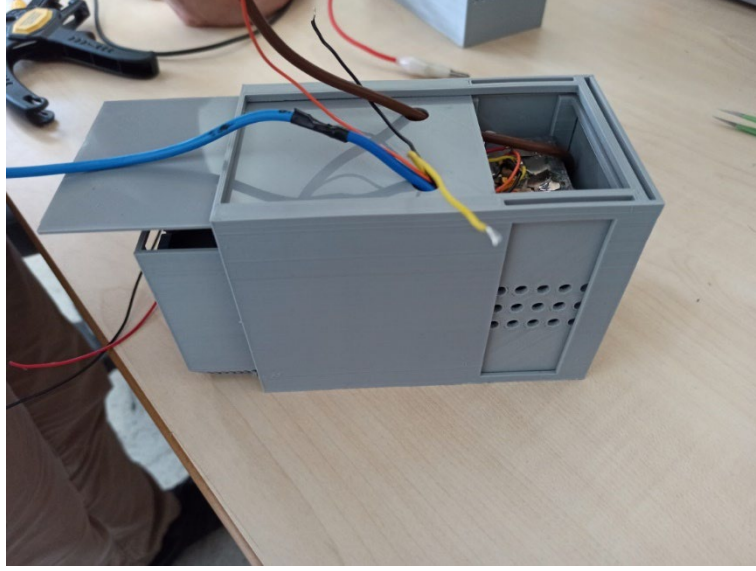
Batarya paketi içerisindeki sıcaklık sensörleri Arduino’ya bağlanmıştır. Arduino ile bilgisayar arasındaki bağlantı USB kablo ile sağlanmıştır. Şekil 3.17’de USB bağlantı kablosu ve Arduino gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Arduino ve USB Bağlantı Kablosu.

Batarya paketine yerleştirilen sıcaklık sensörlerinden elde edilen veriler Arduino bağlantısı ile bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Arka ve yan kapakların yerleştirilmesinden sonra üst kapak kapatılmıştır. Gerekli olan kablo bağlantıları için üst

kapakta iki adet giriş noktası belirlenmiştir. Şekil 3.18’de üst kapağın yerleşimi verilmiştir.

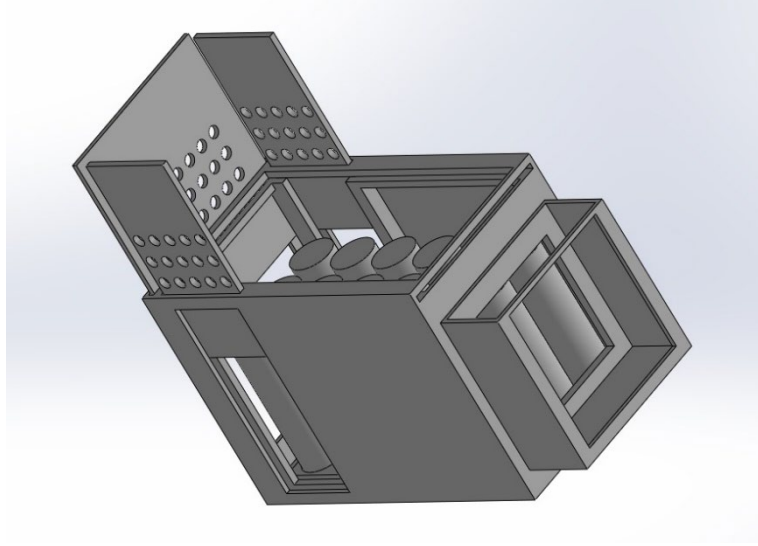


Şekil 3.18. Üst Kapağın Yerleşimi.

### 3.3.2. Tek Kutuda Üç Farklı Model

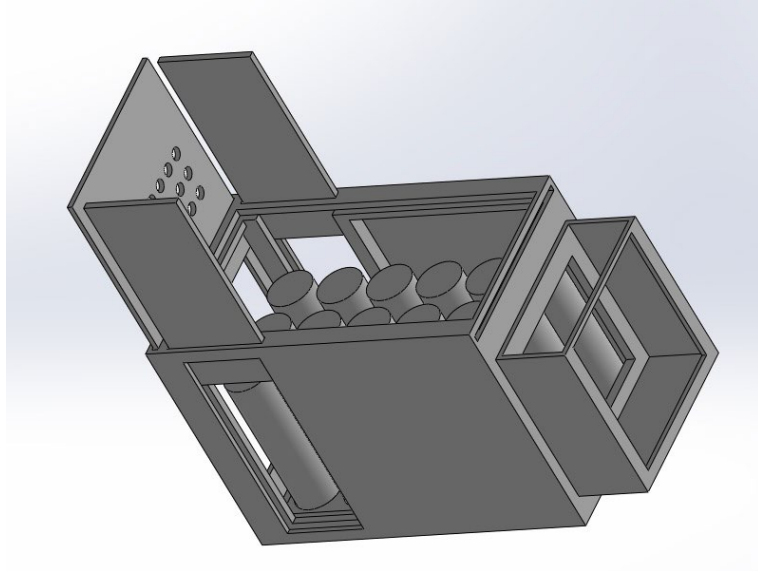
Hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerinde hava, sistemde dolaştıktan sonra dışarıya atılır. İmal edilen pil paketine uygun kutu tasarımının ardından hava akışının yönü belirlenmelidir. Doğrudan pil hücreleri arasından geçen hava akımı ve pil paketinin yan taraflarından giriş yaparak sistemde dolaşan hava akımın sıcaklığa olan etkisini araştırmak için birden fazla batarya kutusunun kullanılması gerekmektedir. Farklı kutu modelleri yerine kutu üzerinde belirlenen yüzeylerin portatif olmasının daha kullanışlı ve kolay olacağı tespit edilmiştir. Ayrı ayrı batarya kutusu yerine hava girişlerinin portatif yapıda olması imalat ve kullanımda kolaylık sağlamıştır.

Bir batarya kutusu üzerinde hava giriş yerlerinin değişmesi ile farklı modeller elde edilmiştir. Şekil 3.20’de arka taraf ve yan tarafların açık olduğu batarya kutusu modeli verilmiştir.



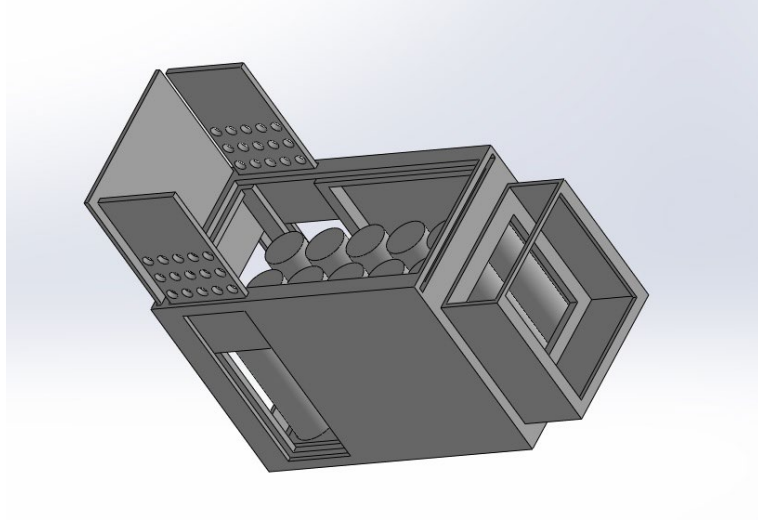
Şekil 3.19. Arka Taraf ve Yanlar Açık Batarya Kutusu.

Arka ve yan taraflar delikli ve deliksiz olmak üzere ikişer tane imal edilmiştir. Delikli yapılar ile hava giriş yönü belirlenmiştir. Şekil 3.21’de arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu model gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Arka Taraf Açık ve Yan Taraflar Kapalı Batarya Kutusu.

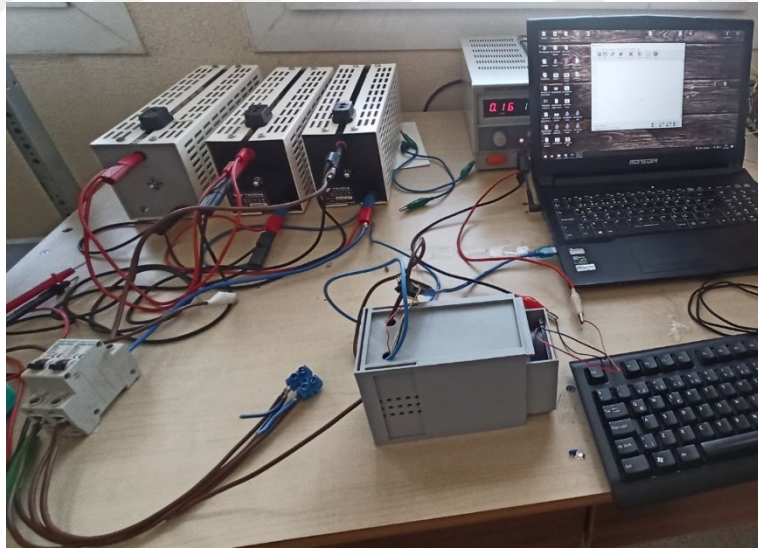
Şekil 3.22’de arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu model görülmektedir.



Şekil 3.21. Arka Taraf Kapalı ve Yan Taraflar Açık Batarya Kutusu.

### 3.4. Deney Düzenegi

Paketlenmiş yapıdaki pil hücreleri batarya kutusuna yerleştirilmiştir. Deney düzenegi pil hücreleri, batarya yönetim sistemi, DA güç kaynağı, reostalar, şalter, pensampermetre, sıcaklık sensörleri, Arduino, bilgisayar, fan ve kablolardan meydana gelmektedir.



Şekil 3.22. Deney Düzenegi.

Farklı üç tasarımın bir arada olduğu bu tez çalışmasında 12 V'luk fan iki farklı hız değerinde kullanılmıştır. Birinci durumda fan 16 V 230 mA akımda, ikinci durumda ise 12,4 V ve 160 mA akımda çalıştırılmıştır. Bu akım ve voltaj değerlerinde fanın:

- Güç tüketiminin 3,68 Watt olduğu birinci durumda; 6881 devir/dakika dönüşle, 38,86 dakika başına fit küp (CFM) değerine sahiptir ki bu da 1,088 m<sup>3</sup>/dk debisine eşittir.
- Güç tüketiminin 1,98 Watt olduğu ikinci durumda; 5160 devir/dakika dönüşle, 29,03

dakika başına fit küp (CFM) değerine sahip 0,812 m<sup>3</sup>/dk debisine eşittir.

Toplamda 14 adet deney yapılmıştır. Çizelge 3.3'te soğutma sisteminin kullanıldığı 12 adet deney gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Deney Parametreleri.

FAN TÜKETİMİ	GÜÇ	3,68 WATT	1,98 WATT
ŞARJ DENEYLERİ	ARKA TARAF AÇIK YAN TARAFLAR KAPALI MODEL	ARKA TARAF KAPALI YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF AÇIK YAN TARAFLAR KAPALI MODEL
	ARKA TARAF KAPALI YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF KAPALI YAN TARAFLAR AÇIK MODEL
	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL
DEŞARJ DENEYLERİ	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL
	ARKA TARAF KAPALI YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF KAPALI YAN TARAFLAR AÇIK MODEL
	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL	ARKA TARAF VE YAN TARAFLAR AÇIK MODEL

12 adet deneyden ayrı olarak soğutma sisteminin kullanılmadığı şarj ve deşarj durumunda 2 adet deney daha yapılmıştır. Bu 2 deney ile birlikte toplamda 14 adet deney tamamlanmıştır.

Şarj ve deşarj işlemlerinin yapıldığı bu çalışmada batarya pil paketinin şarj edilmesi için DA güç kaynağı kullanılmıştır. Yapılan tüm şarj deneylerinde şarj süresi 60 dk olarak belirlenmiştir. 500 W gücündeki 3 adet reostanın paralel bağlanması ile deşarj işlemi için kullanılacak yükün üç reostada eşit dağılması sağlanmıştır. 2,2 Ohm'luk yük ile yirmişer

dakika deşarj deneyleri yapılmıştır. Reosta ve batarya paketi arasındaki bağlantıdan pensampermetre ile alınan 11,45 amperlik akımın yirmi dakikalık süre sonunda 10 ampere kadar düştüğü gözlenmiştir. Pil hücrelerinin sağlığı ve güvenliği için uygun görülen bu akım ve gerilim değerleri arasında gerçekleştirilen deneyler bilgisayar ortamında toplanmıştır.



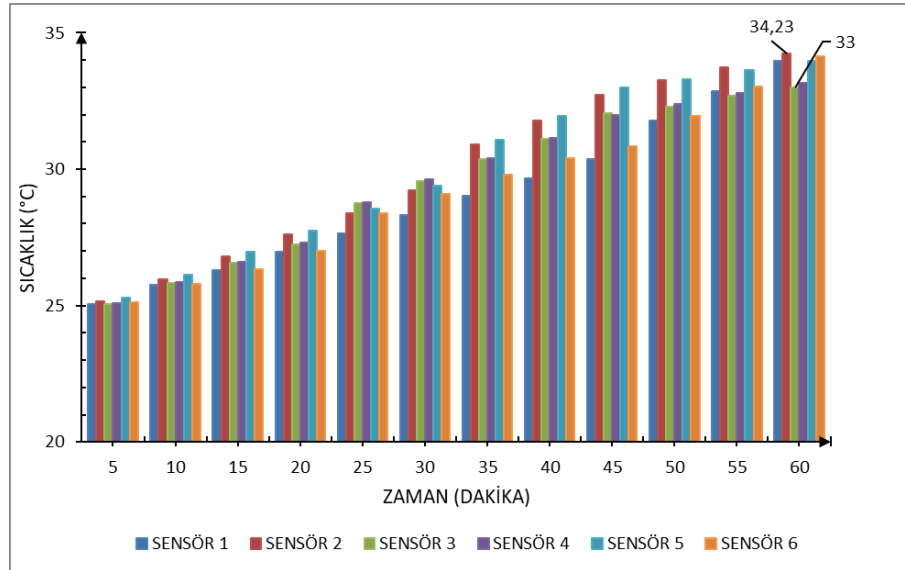
## 4. DENEY SONUÇLARI

Deneylere ilk olarak soğutma sistemi kullanılmadan başlanmıştır. Pil paketini şarj etmek için 60 dakika boyunca 3 amper akımda 25,2 volt değerine kadar dolun sağlanmıştır. 20 dakika sürdürülen deşarj deneyleri 327,6 Watt yük altında gerçekleştirilmiştir.

Havanın akış hızının soğutmaya olan etkisini görebilmek için fan iki ayrı hız değerinde kullanılmıştır. Üç tasarımda şarj ve deşarj durumlarını ele aldığımızda; 6 adet deney fanın güç tüketiminin 3,68 watt olduğu durumda yapılmıştır. 6 deney de fanın 1,98 watt güç tüketiminde çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Soğutma sistemi kullanılmadan yapılan şarj ve deşarj deneyleri ile 14 deney tamamlanmıştır. Tüm deneyler oda şartlarında (25 °C) yapılmıştır. Batarya kutusundaki sıcaklık homojenliğini görebilmek için en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri incelenmiştir.

### 4.1. Şarj Deneyleri

İlk yapılan şarj deneyinde hava soğutma sistemi kullanılmadan veriler kaydedilmiştir. Şekil 4.1’de soğutma sisteminin kullanılmadığı 60 dakikalık şarj deneyinde elde edilen veriler gösterilmiştir.

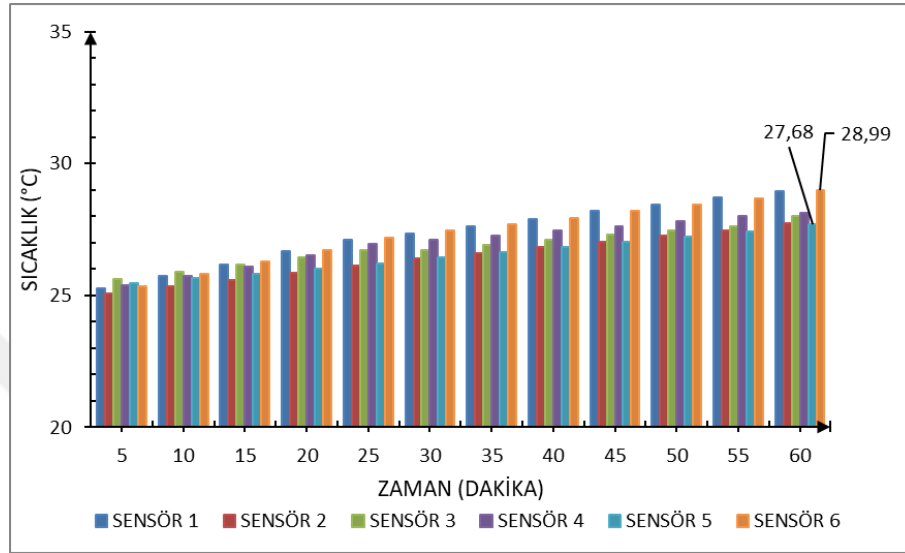


Şekil 4.1. Soğutma sisteminin kullanılmadığı 60 dakikalık şarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi.

Yapılan 60 dakikalık deney sonunda pil hücrelerinin en düşük sıcaklık değeri 33 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 34,23 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı( $\Delta T$ ) 1,23 °C'dir.

#### 4.1.1. Fan Güç Tüketiminin 3,68 Watt Olduğu Şarj Deneyleri

Şekil 4.2'de fanın 3,68 watt gücünde çalıştırılması ile arka ve yan tarafların açık olduğu modeldeki 60 dakikalık şarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.

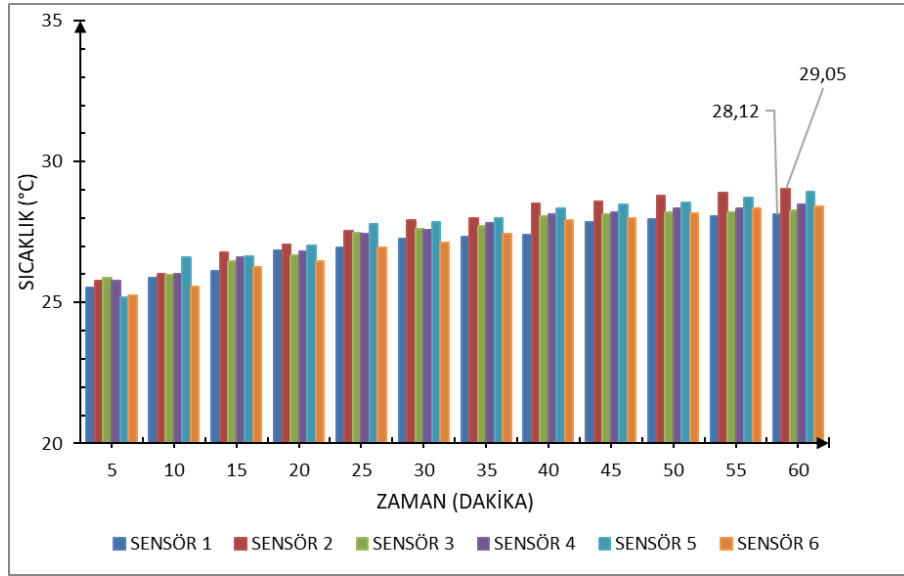


Şekil 4.2. Arka taraf ve yan tarafların açık olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

Yapılan 60 dakikalık deney sonunda pil hücrelerinin en düşük sıcaklık değeri 27,68 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 28,99 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 1,31 °C'dir.

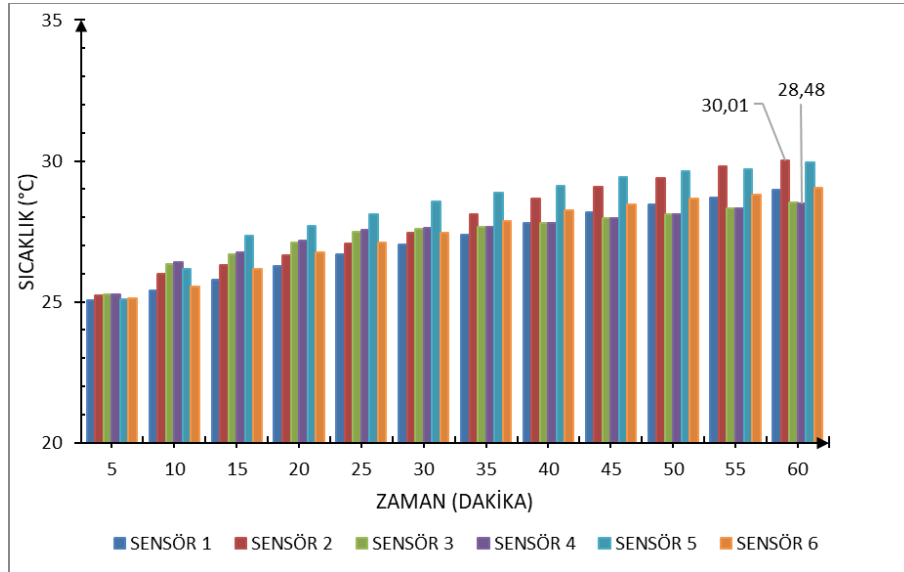
Şekil 4.3'te fanın 3,68 watt gücünde çalıştırılması ile arka tarafın açık ve yan tarafların

kapalı olduğu modeldeki 60 dakikalık şarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modelde 3,68 Watt fan gücü tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

Yapılan 60 dakikalık deney sonunda pil hücrelerinin en düşük sıcaklık değeri 28,12 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 29,05 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 0,93 °C'dir. Şekil 4.4'te fanın 3,68 watt gücünde çalıştırılması ile arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modeldeki 60 dakikalık şarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.

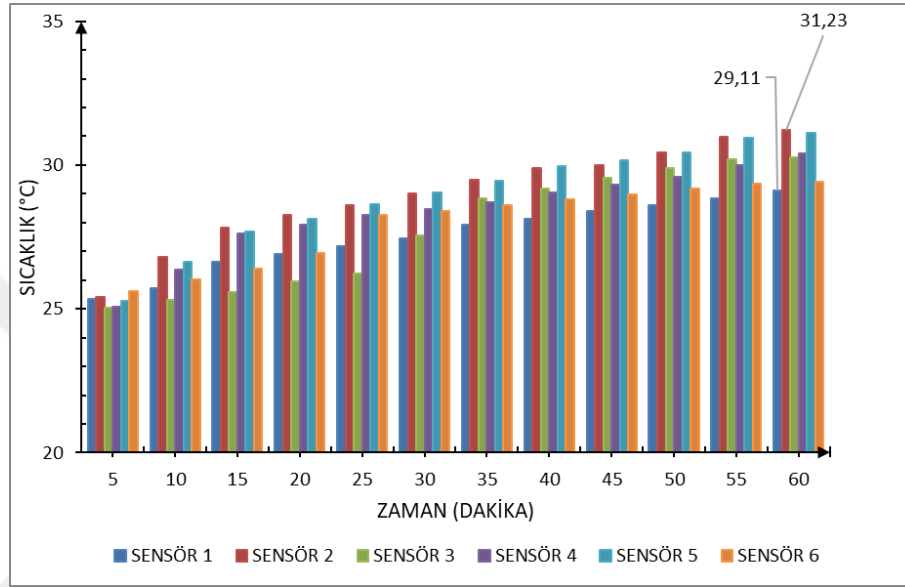


Şekil 4.4. Arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modelde 3,68 Watt fan gücü tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

Yapılan 60 dakikalık deney sonunda pil hücrelerinin en düşük sıcaklık değeri 28,48 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 30,01 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 1,53 °C'dir.

#### 4.1.2. Fan Güç Tüketiminin 1,98 Watt Olduğu Şarj Deneyleri

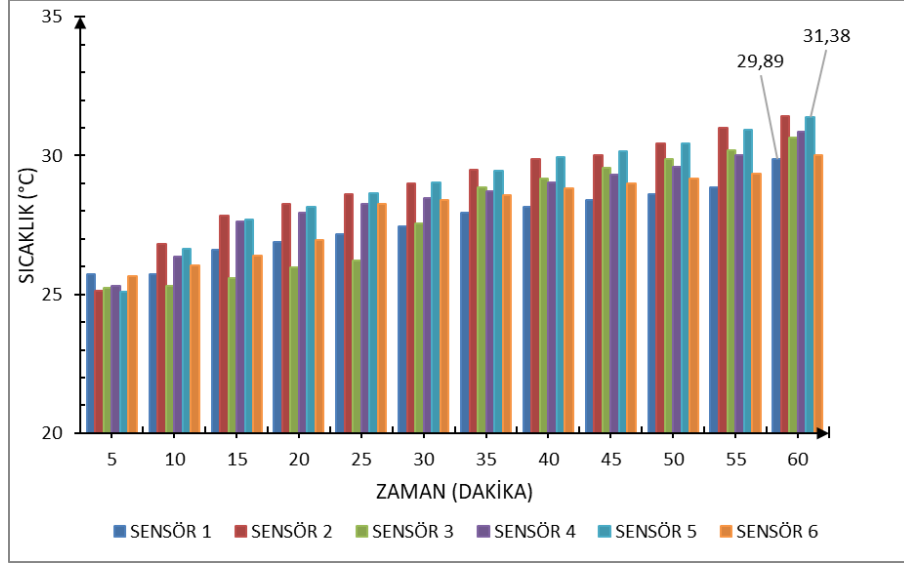
Şekil 4.5'te fanın 1,98 watt gücünde çalıştırılması ile arka taraf ve yan tarafların açık olduğu modeldeki 60 dakikalık şarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Arka taraf ve yan tarafların açık olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

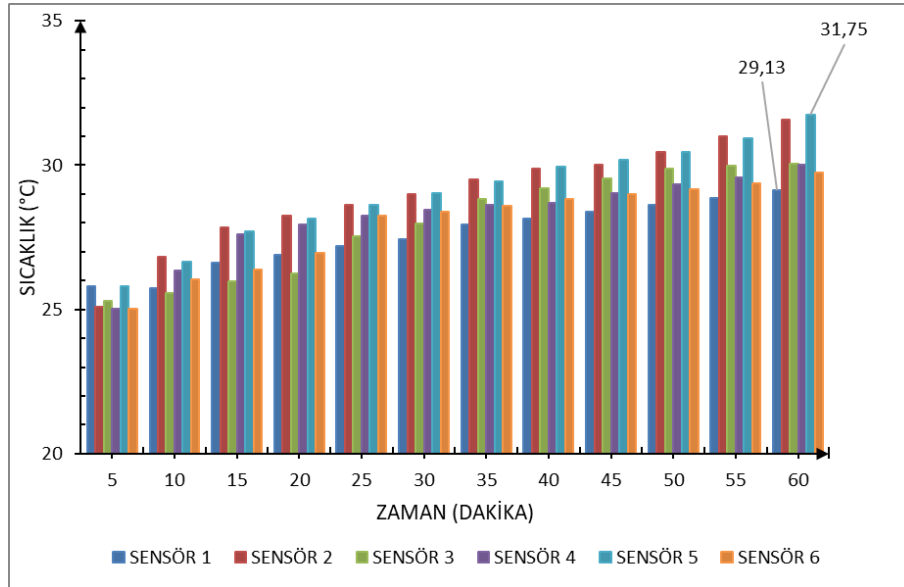
Yapılan 60 dakikalık deney sonunda pil hücrelerinin en düşük sıcaklık değeri 29,11 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 31,23 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 2,12 °C'dir.

Şekil 4.6'da fanın 1,98 watt gücünde çalıştırılması ile arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modeldeki 60 dakikalık şarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Arka tarafın açık yan tarafların kapalı olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

Yapılan 60 dakikalık deney sonunda pil hücrelerinin en düşük sıcaklık değeri 29,89 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 31,38 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 1,49 °C'dir. Şekil 4.7'de fanın 1,98 watt gücünde çalıştırılması ile arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modeldeki 60 dakikalık şarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.



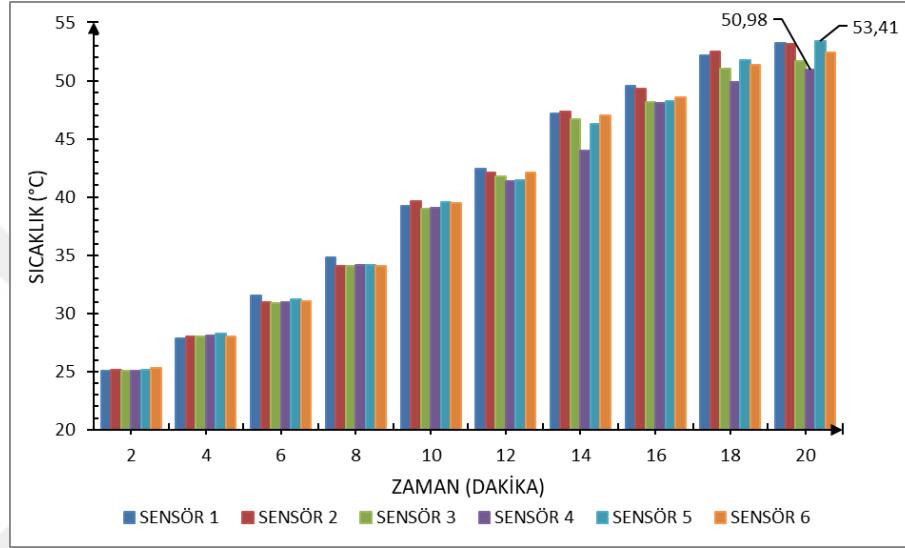
Şekil 4.7. Arka tarafın kapalı yan tarafların açık olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 60 dakikalık şarj deneyinin 6 sensördeki sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

Yapılan 60 dakikalık deney sonunda pil hücrelerinin en düşük sıcaklık değeri 29,13 °C

ve en yüksek sıcaklık değeri 31,75 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 2,62 °C'dir.

## 4.2. Deşarj Deneyleri

Şarj ve deşarj durumları karşılaştırıldığında lityum iyon piller deşarj durumunda daha çok ısı enerjisi üretmektedir. Yapılan ilk deşarj deneyinde soğutma sistemi kullanılmamıştır. Şekil 4.8'de soğutma sisteminin kullanılmadığı 20 dakikalık deşarj deneyinde elde edilen veriler gösterilmiştir.

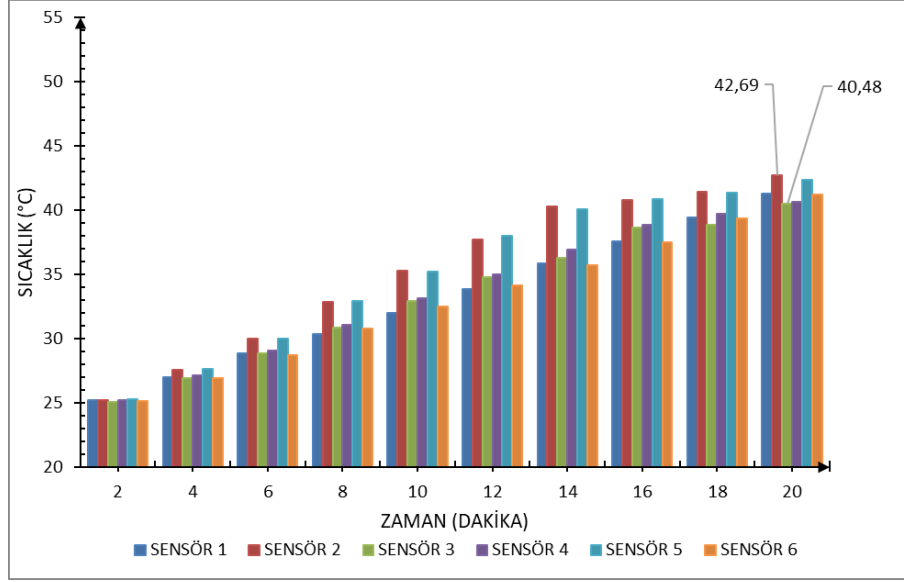


Şekil 4.8. Soğutma sistemi kullanılmadan deşarj deneyinde 6 sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.

Yapılan 20 dakikalık deney sonunda pil hücrelerinin en düşük sıcaklık değeri 50,98 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 53,41 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 2,43 °C'dir.

### 4.2.1. Fan Güç Tüketiminin 3,68 Watt Olduğu Deşarj Deneyleri

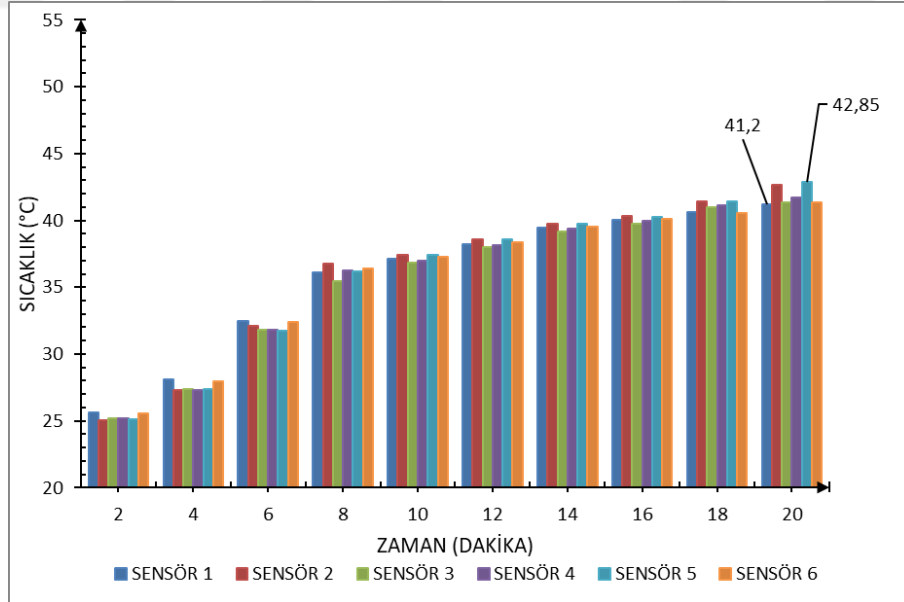
Şekil 4.9'da fanın 3,68 watt gücünde çalıştırılması ile arka ve yan tarafların açık olduğu modeldeki deşarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Arka taraf ve yan tarafların açık olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi.

Yapılan deney sonunda en düşük sıcaklık değeri 40,48 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 42,69 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 2,21 °C'dir.

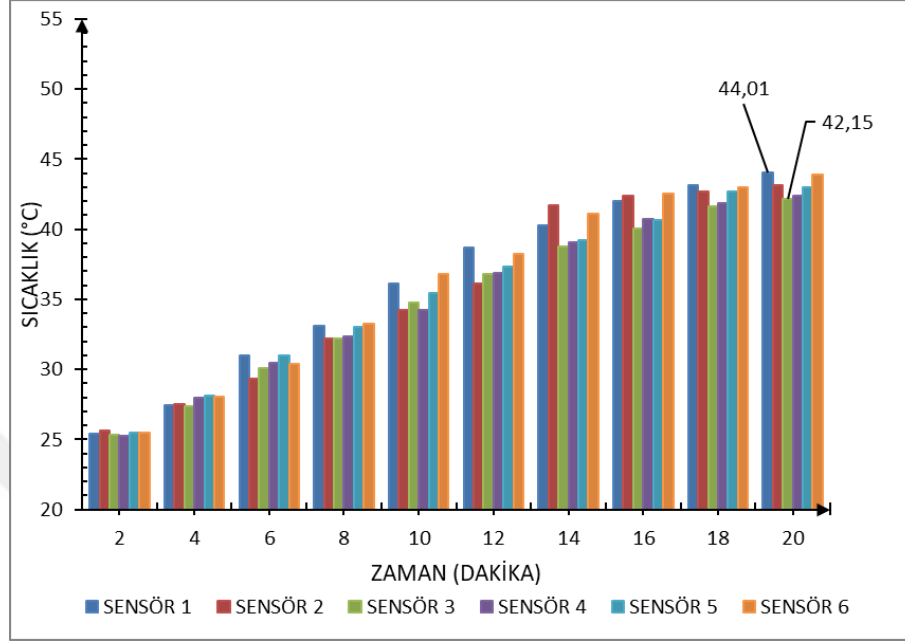
Şekil 4.10'da fanın 3,68 watt gücünde çalıştırılması ile arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modeldeki deşarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi.

Yapılan deney sonunda en düşük sıcaklık değeri 41,2 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 42,85 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 1,65 °C'dir.

Şekil 4.11'de fanın 3,68 watt gücünde çalıştırılması ile arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modeldeki deşarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.

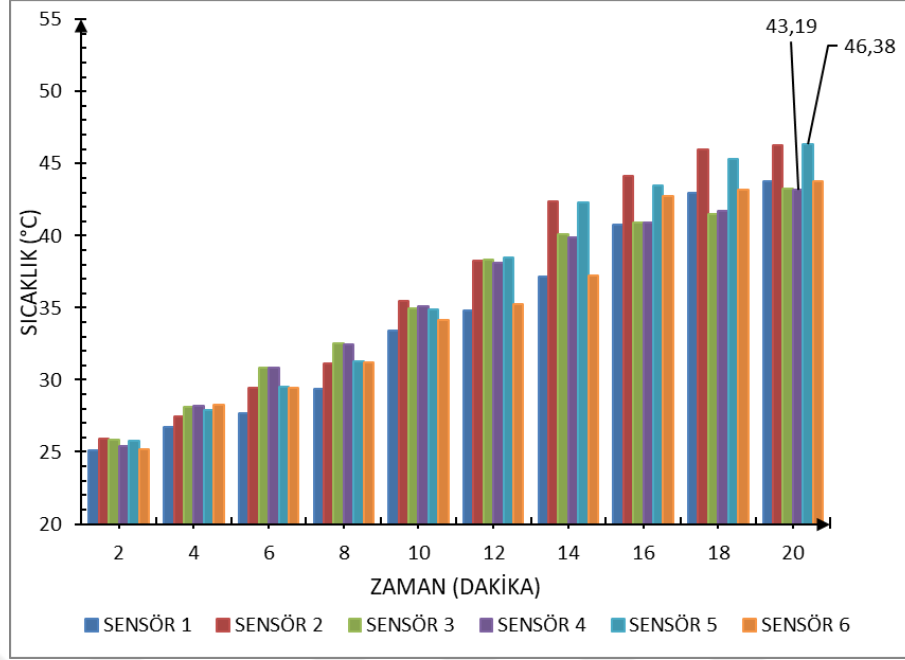


Şekil 4.11. Arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modelde 3,68 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi.

Yapılan deney sonunda en düşük sıcaklık değeri 42,15 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 44,01 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 1,86 °C'dir.

#### 4.2.2. Fan Güç Tüketiminin 1,98 Watt Olduğu Deşarj Deneyleri

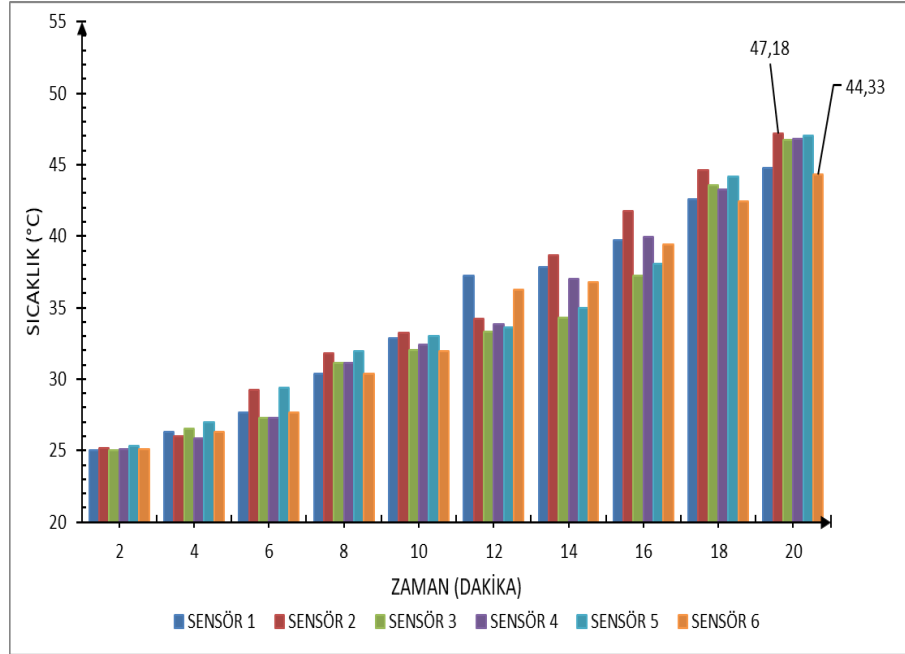
Şekil 4.12'de fanın 1,98 watt gücünde çalıştırılması ile arka ve yan tarafların açık olduğu modeldeki deşarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Arka taraf ve yan tarafların açık olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi.

Yapılan deney sonunda en düşük sıcaklık değeri 43,19 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 46,38 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 3,19 °C'dir.

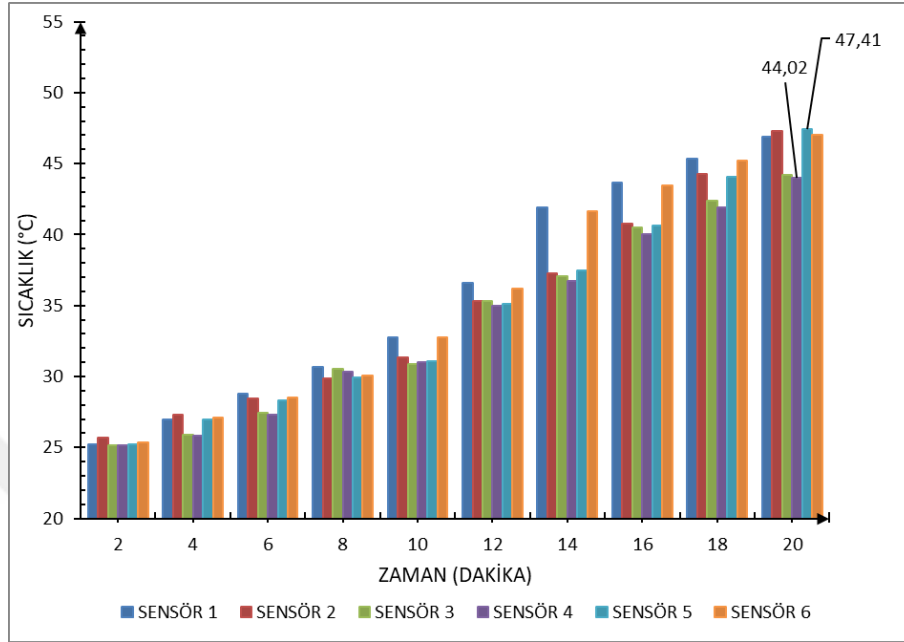
Şekil 4.13'te fanın 1,98 watt gücünde çalıştırılması ile arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modeldeki deşarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi.

Yapılan deney sonunda en düşük sıcaklık değeri 44,33 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 47,18 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 2,85°C'dir.

Şekil 4.14'te fanın 1,98 watt gücünde çalıştırılması ile arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modeldeki deşarj deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu modelde 1,98 Watt fan güç tüketimi altında 20 dakikalık deşarj deneyinin zamana bağlı sıcaklık değerlerinin değişimi.

Yapılan deney sonunda en düşük sıcaklık değeri 44,02 °C ve en yüksek sıcaklık değeri 47,41 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 3,39 °C'dir.

25 °C oda koşullarında yapılan şarj deneylerinde;

İlk yapılan soğutmasız 60 dakika şarj deneyi sonunda en yüksek sıcaklık değeri 34,23 °C'dir. En düşük sıcaklık değeri 33 °C olan deneyin maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 1,23 °C'dir. Fanın 3,68 watt ve 1,98 watt değerinde çalıştırıldığı 60 dakikalık şarj deneylerinde sırasıyla kullanılan modeller şu şekildedir; arka ve yan tarafların açık olduğu model, arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu model, arka tarafın kapalı ve yan tarafların açık olduğu model.

Fan güç tüketimi 3,68 watt olduğu 60 dakika şarj deneylerinde sırasıyla; en yüksek sıcaklık değerleri 28,99 °C, 29,05 °C ve 30,01 °C'dir. En düşük sıcaklık değerleri de sırasıyla 27,68 °C, 28,12 °C ve 28,48 °C'dir. Bu üç deneyin maksimum sıcaklık değerleri farkı sırasıyla şöyledir; 1,31 °C, 0,93 °C ve 1,53 °C'dir.

Fan güç tüketimi 1,98 watt olduğu 60 dakika şarj deneylerinde sırasıyla; en yüksek

sıcaklık değerleri 31,23 °C, 31,88 °C ve 31,75 °C'dir. En düşük sıcaklık değerleri de sırasıyla şöyledir; 29,11 °C, 29,89 °C ve 29,13 °C'dir. Bu üç deneyin maksimum sıcaklık değerleri farkı sırasıyla şöyledir; 2,12 °C, 1,99 °C ve 2,62 °C'dir.

20 dakika sürdürülen deşarj deneylerine ilk olarak soğutma sistemi kullanılmadan başlanmıştır. Soğutma sistemi kullanılmayan deney sonunda elde edilen; en yüksek sıcaklık değeri 53,41 °C ve en düşük sıcaklık değeri 50,98 °C'dir. Maksimum sıcaklık farkı 2,43 °C'dir. Üç model ve iki farklı fan hızında gerçekleştirilen diğer deşarj deneyleri şu şekildedir:

Fan güç tüketiminin 3,68 watt olduğu 20 dakika deşarj deneylerinde sırasıyla; en yüksek sıcaklık değerleri 42,69 °C, 42,85 °C ve 44,01 °C'dir. En düşük sıcaklık değerleri sırasıyla 40,48 °C, 41,2 °C ve 42,15 °C'dir. Bu üç deneyin maksimum sıcaklık değerleri farkı sırasıyla şu şekildedir; 2,21 °C, 1,65 °C ve 1,86 °C'dir.

Fan güç tüketiminin 1,98 watt olduğu 20 dakika deşarj deneylerinde sırasıyla; en yüksek sıcaklık değerleri 46,38 °C, 47,18 °C ve 47,41 °C'dir. En düşük sıcaklık değerleri sırasıyla 43,19 °C, 44,33 °C ve 44,02 °C'dir. Üç deneyin maksimum sıcaklık değerleri farkı sırasıyla 3,19 °C, 2,85 °C ve 3,39 °C'dir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması ile geliştirmekte olan elektrikli araç teknolojisinde büyük öneme sahip olan batarya pil paketlerinin termal sorunları üzerinde araştırma yapılmıştır. Batarya pil paketinde yer alan lityum iyon pil hücrelerinin kimyasal yapıları ve çalışma mekanizması incelenmiştir. Diğer pil türleri ile karşılaştırıldığında çok daha iyi performans sergileyen lityum iyon piller batarya paketinin kullanıldığı hemen hemen bütün elektronik yapıların içerisinde yer almaktadır.

Batarya paketini meydana getiren lityum iyon pil hücrelerine yapılan iyileştirme çalışmaları kullanılan yapının performans, maliyet gibi özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Elektrikli ve hibrit araçların batarya paketinde yer alan lityum iyon pillerin en büyük sorunu termal düzensizliktir. Kullanım esnasında pil hücreleri ısı enerjisi de ortaya çıkarmaktadır. Bu ısı enerjisi kontrol altında tutulmazsa ciddi problemlere yol açmaktadır. Bununla birlikte batarya pil paketi soğuk iklim şartlarında düşük sıcaklıktan da olumsuz yönde etkilenmektedir. Batarya pil paketlerinin optimum sıcaklık değerlerinde çalışmasını sürdürebilmesi için batarya termal yönetim sistemine ihtiyacı olduğu tespit edilmiştir.

Batarya termal yönetim sistemleri hakkında yapılan literatür çalışmasının ardından yaygın olarak kullanılan yöntemler şöyledir; hava soğutmalı BTYS, sıvı soğutmalı BTYS, faz değiştiren malzeme kullanılan BTYS ve birden fazla soğutma sisteminin bir arada kullanıldığı hibrit soğutmalı BTYS. Her sistemin kendi içerisinde barındırdığı avantajları ve dezavantajlı durumların olduğu görülmüştür. Batarya termal yönetim sistemi tasarlanırken batarya paketinden beklenen performans göz önünde bulundurularak pil paketinin kullanacak sistemin özellikleri belirlenmelidir. Elektrikli ve hibrit araçlarda maliyet, performans, kurulum ve bakım kolaylığı ile güvenlik durumları göz önünde bulundurularak uygun BTYS'nin belirlenmesi gerekir.

Batarya termal yönetim sistemleri hakkında yapılan literatür taraması neticesinde hava soğutmalı BTYS'nin daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında hava soğutmalı batarya termal yönetim sisteminin soğutma performansı deneysel çalışma ile yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile prototip aşamasındaki uygulamalar ve literatüre katkı

sağlamak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada üç boyutlu yazıcı teknolojisinin sağladığı olanak ile tasarlanan modelde üç farklı tasarım bir batarya kutusunda birleştirilmiştir. Portatif yapıda olan hava giriş noktaları farklı model batarya kutusunu olanaklı hale getirmiştir. Fan için batarya kutusunda yer alan yuva tasarımı da yine üç boyutlu teknolojinin sağladığı imkanlardandır. Hava soğutma sistemi ve batarya paketinin bir arada bulunması daha sade bir yapı elde etmeyi sağlamıştır.

Literatürdeki araştırmalara baktığımızda, hava soğutmalı sistemlerde Z tipi, T tipi ve U tipi modeller kullanılmıştır. Silindirik yapıdaki lityum pillerin çalışma esnasında en çok ısınan yeri orta noktalarıdır. Soğutma işleminde orta kısma yönelmek daha iyi bir soğutma performansı sağlamaktadır. Yaptığımız batarya kutusunda bu durum göz önüne alınmıştır. Hava giriş noktaları pil hücrelerinin orta noktasına gelecek şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir.

Pil paketi 6 seri 3 paralel bağlantıya sahip 18 adet 18650 Sony VTC 6 silindirik lityum iyon pil hücrelerinden oluşturulmuştur. Pil paketinin nominal voltaj değeri 22,2 V'dir. Maksimum voltaj değeri 25,2 V'dir. Pil paketi, batarya kutusuna üst konumda yerleştirilmiştir.

Oda şartlarında yapılan deneylerde üç batarya paketi modeli ve iki farklı fan hızı belirlenmiştir. 6 farklı sıcaklık sensöründen alınan veriler ile;

- Hava akış hızının artması batarya paketinin sıcaklık dağılımının daha homojenik bir yapıda olmasını sağlamaktadır,
- Batarya pil paketinin ortasında yer alan pil hücreleri daha çok ısı enerjisi üretmektedir,
- Hava giriş kesitinin artması, pil paketinin daha iyi soğutulmasını sağlamaktadır,
- Havanın doğrusal olarak aktığı, arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modelde pil hücreleri daha homojenik sıcaklık dağılımına sahiptir,
- Hava akış hızının artması, soğuma işlemini hızlandırır. Daha iyi soğuma performansı sağlar,

çıkarımları yapılmıştır.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] M. Gómez ve B. José, “Thermal comfort in conventional vehicles (ICE) and electric (EV)–Evaluation Methods”, *Transportation Research Procedia*, c. 58, ss. 662-669, 2021.
- [2] J. Scoltock, (2022, 17 Nisan). [Online]. Erişim: <https://www.imeche.org/news/news-article/companies-work-to-improve-the-internal-combustion-engine-during-shift-to-electric>
- [3] S. Melito, (2022, 8 Haziran). [Online]. Erişim: <https://www.elastoproxy.com/ice-vehicles-vs-electric-vehicles/>
- [4] M. Parhizi, M. Pathak, J. Ostanek ve A. Jain, “An iterative analytical model for aging analysis of Li-ion cells”, *Journal of Power Sources*, c. 517, sayı 230667, 2022.
- [5] T. Sergio, “1799-1999: Alessandro Volta's' electric pile'-Two hundred years, but it doesn't seem like it”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, c. 460, sayı 1-4, 1999.
- [6] Anonim, (2022, 22 Haziran). [Online]. Erişim: <https://www.quora.com/Who-was-Alessandro-Volta-What-was-he-famous-for>
- [7] Anonim, (2022, 25 Haziran). [Online]. Erişim: <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U/>.
- [8] M. Raić, L. Mikac, M. Gotić, M. Škrabić, N. Baran ve M. Ivanda, “Ag decorated porous Si structure as potential high-capacity anode material for Li-ion cells”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, c. 922, sayı 116743, 2022.
- [9] H. W. Yang, W. S. Kang ve S. J. Kim, “A significant enhancement of cycling stability at fast charging rate through incorporation of Li<sub>3</sub>N into LiF-based SEI in SiO<sub>x</sub> anode for Li-ion batteries”, *Electrochimica Acta*, c. 412, sayı 140107, 2022.
- [10] S. P. Beltran ve P. B. Balbuena, “SEI formation mechanisms and Li<sup>+</sup> dissolution in lithium metal anodes: Impact of the electrolyte composition and the electrolyte-to-anode ratio”, *Journal of Power Sources*, c. 551, sayı 232203, 2022.
- [11] Anonim, (2022, 27 Haziran). [Online]. Erişim: <https://www.usaid.gov/energy/powering-health/technical-standards/lithium-ion-batteries>
- [12] W. Li, B. Song ve A. Manthiram, “High-voltage positive electrode materials for lithium-ion batteries”, *Chemical Society Reviews*, c. 46, sayı 10, ss. 3006-3059, 2017.

- [13] A. Manthiram, X. Yu ve S. Wang, “Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes”, *Nature Reviews Materials*, c. 2, sayı 4, ss. 1-16, 2017.
- [14] C. J. Hall, R. H. Boyle, X. Sun, S. M. Wicker, J. P. Misa, G. W. Krissansen, ... ve P. S. Crosier, “Epidermal cells help coordinate leukocyte migration during inflammation through fatty acid-fuelled matrix metalloproteinase production”, *Nature Communications*, c. 5, sayı 1, ss. 1-17, 2014.
- [15] A. Manthiram, Y. Fu, S. H. Chung, C. Zu, ve Y. S. Su, “Rechargeable lithium–sulfur batteries”, *Chemical Reviews*, c. 114, sayı 23, ss. 11751-11787, 2014.
- [16] B. Qui, M. Zhang, Y. Xia, Z. Liu ve Y. S. Meng, “Understanding and controlling anionic electrochemical activity in high-capacity oxides for next generation Li-ion batteries”, *Chemistry of Materials*, c. 29, sayı 3, ss. 908-915, 2017.
- [17] A. Manthiram, “An outlook on lithium ion battery technology”, *ACS Central Science*, c. 3, sayı 10, ss. 1063-1069, 2017.
- [18] M. Uysal, R. Karshoğlu, M. O. Guler, A. Alp ve H. Akbulut, “Rod-and wire-like morphologies of tin oxide developed with plasma oxidation after electrodeposition”, *Materials Letters*, c. 63, sayı 3-4, ss. 422-424, 2009.
- [19] M. Noh, Y. Kwon, H. Lee, J. Cho, Y. Kim ve M. G. Kim, “Amorphous carbon-coated tin anode material for lithium secondary battery”, *Chemistry of Materials*, c. 17, sayı 8, ss. 1926-1929, 2005.
- [20] I. M. Ward, H. V. St. A. Hubbard, S. C. Wellings, G. P. Thompson, J. Kaschmitter ve H. Wang, “Separator-free rechargeable lithium ion cells produced by the extrusion lamination of polymer gel electrolytes”, *Journal of Power Sources*, c. 162, sayı 2, ss. 818-822, 2006.
- [21] I. A. Courtney, “The physics and chemistry of metal oxide composites as anode materials for lithium-ion batteries”, 1999.
- [22] L. Y. Beaulieu, K. W. Eberman, R. L. Turner, L. J. Krause ve J. R. Dahn, “Colossal reversible volume changes in lithium alloys”, *Electrochemical and Solid-State Letters*, c. 4, sayı 9, ss. A137, 2001.
- [23] S. Bourderau, T. Brousse ve D. M. Schleich, “Amorphous silicon as a possible anode material for Li-ion batteries”, *Journal of Power Sources*, c. 81, ss. 233-236, 1999.
- [24] J. L. Arias, “Bipolar battery construction”, A.B.D. Patent 5,618,641, 8 Nisan 1997.
- [25] T. Takamura, S. Ohara, M. Uehara, J. Suzuki ve K. Sekine, “A vacuum deposited Si film having a Li extraction capacity over 2000 mAh/g with a long cycle life”, *Journal of Power Sources*, c. 129, sayı 1, ss. 96-100, 2004.
- [26] J. H. Ahn, Y. J. Kim ve G. Wang, “Electrochemical properties of SnO<sub>2</sub> nanowires prepared by a simple heat treatment of Sn–Ag alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, c. 483, sayı 1-2, ss. 422-424, 2009.

- [27] R. A. Huggins, "Lithium alloy negative electrodes", *Journal of Power Sources*, c. 81, ss. 13-19, 1999.
- [28] A. Manthiram ve J. B. Goodenough, "Lithium insertion into  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  frameworks", *Journal of Power Sources*, c. 26, sayı 3-4, ss. 403-408, 1989.
- [29] W. Li, A. Dolocan, P. Oh, H. Celio, S. Park, J. Cho ve A. Manthiram, "Dynamic behaviour of interphases and its implication on high-energy-density cathode materials in lithium-ion batteries", *Nature Communications*, c. 8, sayı 1, ss. 1-10, 2017.
- [30] W. Li, U. H. Kim, A. Dolocan, Y. K. Sun, A. Manthiram, "Formation and inhibition of metallic lithium microstructures in lithium batteries driven by chemical crossover", *ACS Nano*, c. 11, sayı 6, ss. 5853-5863, 2017.
- [31] M. Chen, J. Liu, Y. He, R. Yuen ve J. Wang, "Study of the fire hazards of lithium-ion batteries at different pressures", *Applied Thermal Engineering*, c. 125, ss. 1061-1074, 2017.
- [32] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky ve H. Zhang, "A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles", *Journal of Power Sources*, c. 501, sayı 230001, 2021.
- [33] M. A. Özel, "Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketinin termal modeli ve analizi", Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2019.
- [34] X. Li, Z. Zhou, M. Zhang, F. Zhang ve X. Zhou, "A liquid cooling technology based on fluorocarbons for lithium-ion battery thermal safety", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, c. 78, sayı 104818, 2022.
- [35] A. Pfrang, A. Kriston, V. Ruiz, N. Lebedeva ve F. Di Persio, "Safety of rechargeable energy storage systems with a focus on Li-ion technology", In *Emerging Nanotechnologies in Rechargeable Energy Storage Systems*, ss. 253-290, 2017.
- [36] R. D. Jilte ve R. Kumar, "Numerical investigation on cooling performance of Li-ion battery thermal management system at high galvanostatic discharge", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, c. 21, sayı 5, ss. 957-969, 2018.
- [37] F. Zhang, P. Liu, Y. He ve S. Li, "Cooling performance optimization of air cooling lithium-ion battery thermal management system based on multiple secondary outlets and baffle", *Journal of Energy Storage*, c. 52, sayı 104678, 2022.
- [38] X. Li, J. Zhao, J. Yuan, J. Duan, ve C. Liang, "Simulation and analysis of air cooling configurations for a lithium-ion battery pack", *Journal of Energy Storage*, c. 35, sayı 102270, 2021.
- [39] K. A. M. Alharbi, G. F. Smaism, S. M. Sajadi, M. A. Fagiy, H. Ş. Aybar ve S. E. Elkhatib, "Numerical study of lozenge, triangular and rectangular arrangements of lithium-ion batteries in their thermal management in a cooled-air cooling

- system”, Journal of Energy Storage, c. 52, sayı 104786, 2022.
- [40] R. Ren, Y. Zhao, Y. Diao, L. Liang, ve H. Jing, “Active air cooling thermal management system based on U-shaped micro heat pipe array for lithium-ion battery”, Journal of Power Sources, c. 507, sayı 230314, 2021.
- [41] H. Bulgurcu, (2022, 28 Ağustos). [Online]. Erişim: [http://deneysan.com/Content/images/documents/havalandirma-4\\_39143832.pdf](http://deneysan.com/Content/images/documents/havalandirma-4_39143832.pdf)
- [42] J. Luo, D. Zou, Y. Wang, S. Wang ve L. Huang, “Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review”, Chemical Engineering Journal, c. 430, sayı 132741, 2022.
- [43] Z. Sun, R. Fan, F. Yan, T. Zhou ve N. Zheng, “Thermal management of the lithium-ion battery by the composite PCM-Fin structures”, International Journal of Heat and Mass Transfer, c. 145, sayı 118739, 2019.
- [44] B. Li, Z. Mao, B. Song, P. Chen, H. Wang, B. Sundén ve Y. F. Wang, “Enhancement of phase change materials by nanoparticles to improve battery thermal management for autonomous underwater vehicles”, International Communications in Heat and Mass Transfer, c. 137, sayı 106301, 2022.
- [45] A. Verma ve D. Rakshit, “Performance analysis of PCM-fin combination for heat abatement of Li-ion battery pack in electric vehicles at high ambient temperature”, Thermal Science and Engineering Progress, c. 32, sayı 101314, 2022.
- [46] S. Chen, G. Zhang, J. Zhu, X. Feng, X. Wei, M. Ouyang ve H. Dai, “Multi-objective optimization design and experimental investigation for a parallel liquid cooling-based Lithium-ion battery module under fast charging”, Applied Thermal Engineering, c. 211, sayı 118503, 2022.
- [47] Z. Zhang, L. Fu, L. Sheng, W. Ye ve Y. Sun, “Method of liquid-cooled thermal control for a large-scale pouch lithium-ion battery”, Applied Thermal Engineering, c. 211, sayı 118417, 2022.
- [48] Y. Li, Z. Zhou, L. Hu, M. Bai, L. Gao, Y. Li, ... ve Y. Song, “Experimental studies of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery under different discharging conditions”, Case Studies in Thermal Engineering, c. 34, sayı 102034, 2022.
- [49] X. Chen, F. Zhou, W. Yang, Y. Gui ve Y. Zhang, “A hybrid thermal management system with liquid cooling and composite phase change materials containing various expanded graphite contents for cylindrical lithium-ion batteries”, Applied Thermal Engineering, c. 200, sayı 117702, 2022.
- [50] F. Chen, R. Huang, C. Wang, X. Yu, H. Liu, Q. Wu, ... ve R. Bhagat, “Air and PCM cooling for battery thermal management considering battery cycle life”, Applied Thermal Engineering, c. 173, sayı 115154, 2020.
- [51] Y. Lv, D. Zhou, X. Yang, X. Liu, X. Li ve G. Zhang, “Experimental investigation

on a novel liquid-cooling strategy by coupling with graphene-modified silica gel for the thermal management of cylindrical battery”, Applied Thermal Engineering, c. 159, sayı 113885, 2019.

- [52] J. R. Patel ve M. K. Rathod, “Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries”, Journal of Power Sources, c. 480, sayı 228820, 2020.
- [53] H. Zhou, F. Zhou, L. Xu ve J. Kong, “Thermal performance of cylindrical Lithium-ion battery thermal management system based on air distribution pipe”, International Journal of Heat and Mass Transfer, c. 131, ss. 984-998, 2019.
- [54] K. Monika, C. Chakraborty, S. Roy, S. Dinda, S. A. Singh ve S. P. Datta, “Parametric investigation to optimize the thermal management of pouch type lithium-ion batteries with mini-channel cold plates”, International Journal of Heat and Mass Transfer, c. 164, sayı 120568, 2021.
- [55] Anonim, (2022, 3 Eylül). [Online]. Erişim: <https://www.boyutkat.com/bilgi-bankasi/3d-baski-ipuclari/3d-baski-almadan-once-nelere-dikkat-etmeli/>
- [56] Anonim, (2022, 3 Eylül). [Online]. Erişim: <https://www.robotlinkmarket.com/6s-15a-bms-18650-lityum-pil-sarj-koruma-devresi>

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ekrem SEZİCİ

Yabancı Dili : İngilizce

## ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2022
Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2019
Lise		Gürlek & Nakipoğlu Anadolu Lisesi	2013

## YAYINLAR

E. Sezici, İ. Çetin, F. Polat, ‘‘Design and experimental investigation of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles’’, *Journal of Engineering Research and Applied Science*, Kabul alındı.

İ. Çetin, E. Sezici, M. Karabulut, E. Avcı ve F. Polat, ‘‘ A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles’’, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 09544089221123975, Basımda.