

**FARKLI NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ SIVILARIN BATARYA  
SİSTEMİNİN SOĞUTMA PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**KEMAL ÇELİK**

**YÜKSEK LİSANS  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. FİKRET POLAT**

**DÜZCE, 2024**

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

**FARKLI NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ SIVILARIN BATARYA SİSTEMİNİN**  
**SOĞUTMA PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Kemal ÇELİK 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**

Doç. Dr. Fikret POLAT

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Fikret POLAT

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Suat SARIDEMİR

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ

Karabük Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 16/01/2024

## 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.

16 Ocak 2024

Kemal ÇELİK



## TEŞEKKÜR

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

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

16 Ocak 2024

Kemal ÇELİK



# 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. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR.....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Elektrikli Araçların Tarihsel Gelişimi .....	2
1.1.2. Elektrikli Araçların Çalışma Prensibi .....	4
1.1.3. Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları.....	5
1.1.4. Elektrikli Araç Türleri .....	6
1.1.4.1. Tamamen Elektrikli Araçlar (TEA).....	6
1.1.4.2. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA).....	7
1.1.4.3. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA) .....	8
1.1.4.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA) .....	9
<b>1.2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PİL TEKNOLOJİLERİ ....</b>	<b>10</b>
<b>1.3. LİTYUM İYON PİLLER.....</b>	<b>13</b>
1.3.1. Lityum İyon Pillerin Avantajları ve Dezavantajları.....	15
1.3.2. Lityum İyon Pilin Yapısı .....	15
1.3.3. Lityum İyon Pilin Çalışma Prensibi .....	17
1.3.4. Lityum İyon Pilde Termal Sorunlar.....	18
1.3.5. Lityum İyon Pile Düşük Sıcaklıkların Etkisi.....	18
1.3.6. Lityum İyon Pile Yüksek Sıcaklıkların Etkisi.....	19
1.3.6.1. Isı Üretimi .....	19
1.3.6.2. Isı İletimi .....	20
1.3.6.3. Isı Dağılımı .....	20
1.3.6.4. Isıl Denge.....	20
1.3.6.5. Yaşlanma.....	21
1.3.6.6. Termal Kaçak.....	22
1.3.6.7. Eşit Sıcaklıkta Çalışma .....	23
<b>2. BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>25</b>
2.1.1. Hava Soğutmalı BTYS.....	25
2.1.2. Faz Değiştiren Malzeme ile BTYS .....	30
2.1.3. Sıvı Soğutmalı BTYS.....	32
2.1.4. Nanoakışkan Bazlı BTYS .....	39
2.1.4.1. Nanoakışkanların Özellikleri .....	40
2.1.4.2. Nanoakışkanların Üretim Yöntemleri .....	41
2.1.4.3. Nanoakışkanların Termodinamik Özellikleri.....	43
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1. DENEYLERDE KULLANILAN BATARYA TERMAL YÖNETİM</b>	

<b>SİSTEMİ .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2. NANOAKIŞKANLARIN HAZIRLANMASI VE TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>53</b>
3.2.1. Nanoakışkanların Hazırlanması.....	53
3.2.2. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri.....	56
<b>3.3. DENEY DÜZENEGİ KURULUMU .....</b>	<b>57</b>
<b>4. DENEY SONUÇLARI .....</b>	<b>66</b>
4.1. ŞARJ DENEYLERİ.....	66
4.2. DEŞARJ DENEYLERİ .....	68
4.2.1. Deşarj Deneyleri (1C Deşarj Hızında).....	68
4.2.2. Deşarj Deneyleri (2C Deşarj Hızında).....	70
4.2.3. Deşarj Deneyleri (3C Deşarj Hızında).....	72
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>75</b>
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>81</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>91</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Stratingh tarafından üretilen ilk elektrikli araç [7].	2
Şekil 1.2. 1900 model hibrit model Porsche “Semper Vivus” [10].	3
Şekil 1.3. 2008 model Tesla Roadster [10].	4
Şekil 1.4. Elektrikli aracın temel bileşenleri [12].	5
Şekil 1.5. Motor iç yapısı a) İçten yanmalı motor b) Elektrik motoru [16], [17].	6
Şekil 1.6. Tamamen elektrikli araç [22].	7
Şekil 1.7. Plug-in hibrit elektrikli araç [24].	8
Şekil 1.8. Hibrit elektrikli araç [24].	9
Şekil 1.9. Yakıt hücreli elektrikli araç [24].	10
Şekil 1.10. Elektrikli araç pilinin gelişimine ait zaman çizelgesi [26].	10
Şekil 1.11. Çeşitli pil teknolojilerinin şarj başına hedef menzillerinin karşılaştırılması. Parantez içindeki rakamlar USD cinsinden pillerin kWh başına fiyatını göstermektedir [33].	13
Şekil 1.12. Periyodik cetvelde lityum [35].	14
Şekil 1.13. Yıllara göre lityum iyon pil talebi [37].	14
Şekil 1.14. Pil çeşitleri ve katmanları a) Düğme b) Silindirik c) Prizmatik d) Kese [45].	16
Şekil 1.15. EA için batarya paketi oluşum adımları [43].	17
Şekil 1.16. Lityum iyon pilin şematik gösterimi [35].	18
Şekil 1.17. Lityum iyon pillerin yüksek sıcaklıkta (B2, 85°C ve B3, 120 °C), C/5 hızında şarj ve deşarj işlemleri ile kapasite ve çevrim ilişkisi testi [56].	21
Şekil 1.18. Sony 18650 lityum iyon pillerin farklı sıcaklıklarda çevrim sayısına bağlı kapasite testi [57].	22
Şekil 2.1. Sıcaklığın pilin boyutu, ömrü ve dolayısıyla maliyeti üzerindeki etkileri [64].	24
Şekil 2.2. Batarya termal yönetim sisteminde kullanılan akışkanların ve uygulama bakımından farklı tasarımların sınıflandırılması [61], [65].	25
Şekil 2.3. Hava soğutmalı sistem (pasif ve aktif) [62].	26
Şekil 2.4. Bakır levhalı ısı borusu soğutma sistemi [68].	27
Şekil 2.5. Hava akış kanallarının geometrik tasarımları; (a) tip 1, (b) tip 2, (c) tip 3, (d) tip 4, (e) tip 5, mavi oklar hava akış yönünü göstermektedir [70].	28
Şekil 2.6. Hava soğutma sistemi tasarımı, (a)'da siyah panel alüminyum köpüğü göstermekte ve kırmızı oklar hava giriş ve akış yönünü göstermektedir, (b)'de ise %8 yoğunluğa sahip alüminyum köpük gösterilmektedir [71].	29
Şekil 2.7. Kademeli olarak tasarlanmış pil takımı [72].	30
Şekil 2.8. Faz değiştiren malzemenin çalışma prensibi [62], [76].	31
Şekil 2.9. Sıvı soğutmalı sistem a) Doğrudan temaslı, b) Dolaylı temaslı [61].	33
Şekil 2.10. Pasif sıvı soğutmalı sistem [81].	34
Şekil 2.11. Aktif sıvı soğutmalı sistem [81].	35
Şekil 2.12. Mini kanallı soğutma sisteminin çeşitli tasarımları: (a) dört kanallı tek şerit, (b) sekiz kanallı tek şerit, (c) dört kanallı iki şerit, (d) dört kanallı dört şerit, (e), kanal tasarımı [83].	36
Şekil 2.13. Sıvı soğutma sistemi modeli [84].	37
Şekil 2.14. Sıvı soğutma modülü ve akış yönü düzenleri [86].	38
Şekil 2.15. Yaygın kullanılan temel sıvılar [90].	41
Şekil 2.16. Araştırmacıların yaygın olarak kullandıkları konsantrasyon aralıkları [90].	

.....	41
Şekil 2.17. İki adım yöntemi [91].	43
Şekil 2.18. Termal iletkenliği etkileyen parametreler [92].	44
Şekil 2.19. Nanoakışkanların üretim yöntemleri ve kullanım alanları [92].	45
Şekil 2.20. Simülasyonda kullanılan model tasarımları [95].	46
Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan soğutma kanalı ve batarya hücreleri.	49
Şekil 3.2. Soğutucu kanalın önden görünüşü.	50
Şekil 3.3. Soğutucu kanalın sağdan görünüşü.	50
Şekil 3.4. Batarya modülünün oluşturulması için pillerin soğutma kanalına yerleştirilmesi.	51
Şekil 3.5. Punta kaynağı ile seri ve paralel bağlantıların yapılma işlemi.	52
Şekil 3.6. Batarya modülü üzerine monte edilmiş BYS kartı.	52
Şekil 3.7. BN (üst) ve TiO <sub>2</sub> (alt) nanopartiküllerinin EDX ve SEM görüntüleri.	53
Şekil 3.8. Nanoakışkanların hazırlanma aşamaları.	54
Şekil 3.9. TiO <sub>2</sub> -su nanoakışkanın hazırlık süreci boyunca kullanılan cihazlar.	55
Şekil 3.10. BN-su nanoakışkanın hazırlık süreci boyunca kullanılan cihazlar.	56
Şekil 3.11. Deney düzeneği.	58
Şekil 3.12. DS18B20 dijital sıcaklık sensörü.	59
Şekil 3.13. DS18B20 sıcaklık sensörlerinin batarya modülü üzerindeki konumları.	59
Şekil 3.14. Arduino ve USB bağlantısı.	60
Şekil 3.15. Röle çıkışlı dijital termostat ve ölçüm probu.	60
Şekil 3.16. Termoelektrik peltier soğutma sistemi.	61
Şekil 3.17. Termoelektrik soğutma sistemi; a) alüminyum soğutma bloğu b) fan c) peltier.	62
Şekil 3.18. Peltier soğutucunun alüminyum bloğa termal macun ile entegre edilmesi.	62
Şekil 3.19. Batarya termal yönetimi için oluşturulan düzenek.	63
Şekil 3.20. Reostaların birbirine paralel bağlantısı.	64
Şekil 3.21. Deşarj işlemi esnasında kullanılan akım koruma şalteri.	64
Şekil 4.1. Şarj deneyleri, (a) saf su, (b) bor nitür, (c) titanyum dioksit, 1C deşarj hızında yapılan şarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.	67
Şekil 4.2. Şarj deneyi (1C) sonunda sensörlerden alınan sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.	68
Şekil 4.3. Deşarj deneyleri, (a) saf su, (b) bor nitür, (c) titanyum dioksit, 1C deşarj hızında yapılan deşarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.	69
Şekil 4.4. Deşarj deneyi (1C) sonunda sensörlerden alınan sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.	70
Şekil 4.5. Deşarj deneyleri, (a) saf su, (b) bor nitür, (c) titanyum dioksit, 2C deşarj hızında yapılan deşarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.	71
Şekil 4.6. Deşarj deneyi (2C) sonunda sensörlerden alınan sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.	72
Şekil 4.7. Deşarj deneyleri, (a) saf su, (b) bor nitür, (c) titanyum dioksit, 3C deşarj hızında yapılan deşarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.	73
Şekil 4.8. Deşarj deneyi (3C) sonunda sensörlerden alınan sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.	74



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Çizelge 1.1. Elektrikli araçlarda mevcut olan pil teknolojileri [22]. .....	11
Çizelge 1.2. Çeşitli pozitif elektrot malzemelerinin özellikleri [38]. .....	16
Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan batarya hücresinin özellikleri .....	51
Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan suyun ve nanopartiküllerin bazı önemli özellikleri. ...	53
Çizelge 3.3. Weightlab WL-6002 hassas terazi özellikleri.....	54
Çizelge 3.4. Termal manyetik karıştırıcı özellikleri. ....	55
Çizelge 3.5. ADC-4830 ultrasonik banyo özellikleri. ....	55
Çizelge 3.6. BN-su ve TiO <sub>2</sub> -su nanoakışkanlarının termofiziksel özellikleri.....	56

## KISALTMALAR

BTYS	Batarya termal yönetim sistemi
BYS	Batarya yönetim sistemi
DA	Doğru akım
EA	Elektrikli araç
FDM	Faz değişim materyali
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HEA	Hibrit elektrikli araç
İYM	İçten yanmalı motor
PHEA	Plug-in hibrit elektrikli araçlar
TEA	Tamamen elektrikli araçlar
YHEA	Yakıt hücreli elektrikli araçlar



## SİMGELER

A	Amper
BN	Bor nitrür
C	Şarj/Deşarj oranı
C <sub>p</sub>	Özgöl ısı kapasitesi
dk	Dakika
Gt	Gigaton
k	Termal iletkenlik
K	Kelvin
kHz	Kilohertz
kW	Kilowatt
mAh	Mili amper saat
ml	Mililitre
mm	Milimetre
Nm	Nano metre
P	Güç (elektrik akımı için)
s	Saniye
t	Zaman
T	Sıcaklık
TiO <sub>2</sub>	Titanyum dioksit
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt saat
°C	Santigrat derece
μ	Viskozite
ρ	Yoğunluk
Φ	Hacim konsantrasyon
Ω	Ohm

## ÖZET

# FARKLI NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ SIVILARIN BATARYA SİSTEMİNİN SOĞUTMA PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Kemal ÇELİK

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Fikret POLAT

Ocak 2024, 90 sayfa

Elektrikli araçlar, ulaşım sektöründe fosil yakıtların yerini almak ve karbon ayak izini azaltmak için çevre dostu bir seçenek olarak önem kazanmaktadır. Elektrikli araçların güç kaynağı olan batarya paketleri, yüksek maliyetli ve termal olarak hassas bileşenlerdir. Batarya paketlerinin, şarj ve deşarj işlemleri sırasında oluşan sıcaklık artışı ve dağılımı, performansını, ömrünü ve güvenliğini etkilemektedir. Bu nedenle, batarya paketlerinin çalışma sıcaklığının optimum aralıkta tutulması ve sıcaklık dağılımının homojen olması için etkin bir soğutma sistemi gerekmektedir. Bu çalışmada, 18 adet silindirik lityum iyon pil içeren bir batarya modülü, labirent tipi bir soğutma kanalına yerleştirilmiştir. Soğutma kanalı bakır malzemeden üretilmiştir. Soğutma kanalından saf su, bor nitrür (BN)-su nanoakışkanı ve titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>)-su nanoakışkanı geçirilerek, soğutma akışkanlarının termal performansları karşılaştırılmıştır. BN-su nanoakışkanının kütlece %0,1 ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanının kütlece %0,1 konsantrasyonları kullanılmıştır. Deneyler, batarya paketini farklı çalışma koşulları altında test etmek amacıyla 1C şarj ve 1C, 2C ve 3C deşarj oranlarında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde, soğutucu akışkanların giriş debisi 790 ml/dk ve giriş sıcaklığı 25 °C olarak sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, BN-su nanoakışkanının diğer akışkanlara göre daha iyi soğutma sağladığı ve batarya modülünün sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiği görülmüştür. Bu çalışma ile elektrikli araçlarda batarya termal yönetim sisteminin geliştirilmesine katkı sağlamak amaçlanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Elektrikli araç, Nanopartikül, Batarya termal yönetim sistemi.

## ABSTRACT

# INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT NANOPARTICLE REINFORCED LIQUIDS ON THE COOLING PERFORMANCE OF THE BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEM

Kemal ÇELİK

Düzce University

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

Master's Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fikret POLAT

January 2024, 90 pages

Electric vehicles are gaining importance in the transportation sector as an environmentally friendly option to replace fossil fuels and reduce carbon footprint. Battery packs, which are the power source of electric vehicles, are high-cost and thermally sensitive components. The temperature rising and temperature distribution of battery packs during charging and discharging processes affect their performance, life, and safety. Therefore, an effective cooling system is required to keep the operating temperature of the battery packs in the optimum range and to ensure homogeneous temperature distribution. In this study, a battery module containing 18 cylindrical lithium-ion batteries was placed in a labyrinth-type cooling channel. The cooling channel is made of copper. Pure water, boron nitride (BN)-water nanofluid, and titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>)-water nanofluid were passed through the cooling channel and the thermal performances of the cooling fluids were compared. Concentrations of 0.1% by mass of BN-water nanofluid and 0.1% by mass of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid were used. Experiments were carried out at 1C charge and 1C, 2C, and 3C discharge rates to test the battery pack under different operating conditions. In all experiments, the inlet flow rate of the refrigerants was kept constant at 790 ml/ min and the inlet temperature at 25 °C. According to the experimental results, it was seen that BN-water nanofluid provides better cooling performance compared to other fluids and makes the temperature distribution of the battery module more homogeneous. This study aims to contribute to the development of battery thermal management systems in electric vehicles.

**Keywords:** Electric vehicle, Nanoparticle, Battery thermal management system.

# 1. GİRİŞ

Çağımızda insanoğlu yaşam döngüsünü devam ettirebilmek için temel ihtiyacı olan hijyenik sulara, yaşam alanlarını ısıtma veya soğutmaya, ulaşım araçlarını kullanabilme gibi birçok enerji çeşidine ihtiyaç duymaktadır [1]. Dünyada küresel ısınma ve iklim değışikliği konusunda bilim adamları her platformda durumun önemini ve çevreci çalışmaların ivediliğini dile getirmektedir. Dünya fosil yakıt rezervi (kömür, petrol, doğalgaz) kullanıma bağlı olarak artan talepleri karşılama konusunda hızla gücünü yitirmektedir. Birleşmiş Milletler tarafından yapılan çalışmalar Dünya nüfusunun 2040 yılında 9 milyar seviyelerine ulaşabileceği tahminini yürütmektedir [2]. Bu tahmin yaklaşık 2 milyar kadar insan için fazladan enerji talebini doğurmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansının yayınladığı verilere göre fosil yakıtların küresel enerji kullanımındaki payı %80 civarındadır [3]. Fosil yakıtların tüketilmesi sonucu ortaya çıkan CO<sub>2</sub> emisyonları 2021 yılında rekor kırarak 36,6 Gt' ye yükseldi [3]. Rekor seviyedeki emisyon artışı Dünyamızı kirletmenin yanı sıra küresel ısınma ve iklim değışikliği gibi tüm canlıların sağlığını olumsuz etkileyebilecek olaylara yol açmaktadır. 2015 yılında yapılan Paris Anlaşmasına göre 2050 yılına kadar Net Sıfır Emisyon senaryosunda, sıcaklık artışını 1,5 °C'nin altında tutma hedefinde kararlılıkla çalışılmaktadır [4]. Tüm ülkelerin çevreci çalışmaları, küresel ısınmaya karşı önlem senaryoları ve fosil enerji kaynaklarının giderek azalması yenilikçi teknoloji çalışmalarıyla beraber elektrikli araçların olumsuz senaryolar karşısında güçlü bir alternatif olarak ön plana çıkmasını sağlamıştır. Elektrikli araçların geleneksel araçların yerini alarak benimsenmesi için ise çalışmalar devam etmektedir.

## 1.1. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Ulaştırma sektörü, küresel nüfusun, gelirlerin ve yaşam tarzlarının artmasıyla birlikte talep edilen konforlu yaşam sonucunda küresel enerji ile ilgili CO<sub>2</sub> emisyonlarının dörtte birini oluşturmaktadır. Karayolu taşımacılığı ulaştırma emisyonlarının dörtte üçüne sebep olmaktadır. Bu emisyonların büyük bir kısmı binek araçlardan gelmektedir. Binek araçlar ulaştırma emisyonlarının %45,1'ini oluşturmaktadır. Bu sektördeki emisyonların

azaltılması, iklim değişikliğiyle mücadele etmek için hayati önem taşımaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Enerji Teknoloji Perspektifleri raporunda, 2070 yılına kadar küresel taşımacılığın iki katına çıkacağını, otomobil sahipliği oranlarının %60 artacağını öngörmektedir. Bu artış, ulaştırma sektöründeki emisyonların da büyük ölçüde artmasına neden olacaktır [5], [6].

Fosil yakıtlar, ulaştırma sektörünün en yaygın enerji kaynağıdır. Ancak, fosil yakıtlar hem sınırlı hem de kirleticidir. Fosil yakıt rezervleri artan kullanım nedeniyle azalmaktadır. Bu da enerji güvenliği sorunlarına yol açmaktadır. Fosil yakıtlar ayrıca ulaştırma sektörünün neden olduğu sera gazlarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu da iklim değişikliğinin hızlanmasına neden olmaktadır. Bu sorunlara çözüm olmak için, 1900'lerin başında içten yanmalı motor (İYM)'li araçlara yenik düşen elektrikli araçlar (EA) çevreci olması nedeniyle ulaşım sektörünün karbondan arındırılması için güçlü bir alternatif olmaya ve üreticileri bu teknoloji üzerine çalışmaya sevk etmektedir [6].

### 1.1.1. Elektrikli Araçların Tarihsel Gelişimi

EA'ların popüleriği günümüzde artsa da teknolojisi eski zamanlara dayanmaktadır. Şekil 1.1' de gösterilen 1835 yılında Hollandalı Profesör Stratingh tarafından üretilen ilk EA üç tekerlekliydi [7]. Yine aynı yıllarda ABD'de Thomas Davenport tarafından üretilen bu araçlar tekrar şarj imkânı olmayan pillerden güç alıyordu [8].



Şekil 1.1. Stratingh tarafından üretilen ilk elektrikli araç [7].

19'uncu yüzyılın ortalarında kurşun-asit bataryalar üretilmiş ve EA'lara entegre edilmiştir [9]. Üreticiler elektrikli otomobillere artan talep karşısında pil üzerine çalışmalarını yoğunlaştırarak EA'ların sürüş menzilini arttırmaktaydı.

1900 yılına gelindiğinde EA'ların pazar payı %30'du. Ancak araç kullanıcıları benzinli araçların daha uzun mesafelere gidebildiğini öğrendiler. Bunun üzerine 1900'de Porsche firması "Semper Vivus" model adıyla Şekil 1.2'de gösterilen aracı üretti. Bu araç bataryası boşaldığında itici gücünü benzinden alıyordu. Halkın hala petrole ulaşmakta sıkıntı yaşaması, yüksek sesle çalışması, benzinli araçların ilk hareketi alması için kullanılan marş krankı ve sürüş devir aralıklarında vites değiştirme mecburiyeti araç kullanıcılarını EA'ya yönlendiriyordu [10].



Şekil 1.2. 1900 model hibrit model Porsche "Semper Vivus" [10].

Ancak 1908 yılında Ford, elektrikli araçların sonunu getirecek içten yanmalı motora sahip benzinli Model T'yi üretti. Yeni petrol kaynaklarının bulunması, elektrikli araçlara marş motorunun monte edilmesi, batarya fiyatlarının oldukça yüksek olması, yetersiz sürüş mesafesi ve düşük hızlar gibi sebepler, kullanıcıların elektrikli araçları tercih etmemesine neden oldu ve satışların neredeyse sıfıra inmesine sebep oldu [8], [10].

1960'larda fosil yakıtlardan kaynaklanan hava kirliliğinin artması elektrikli araçları tekrar gündeme getirmiş ancak çalışmalar sınırlı kalmıştır. 1970'lerin ortasında yaşanan petrol krizi, petrol üretmeyen birçok ülkenin elektrikli araç araştırmalarına hız kazandırmasına neden olmuştur. 1980'lerde, hükümetler elektrikli araçlara olan ilgiyi artırmak için



adımlar atmaya başlamıştır. Elektrikli araçların çevre dostu özellikleri, resmi kaynaklardan ekonomik destek sağlamalarına yardımcı olmuştur. Elektrikli araçların asıl gelişimi 1990'lerden itibaren yeni gelişen batarya teknolojileriyle gerçekleşmiştir. 1997'de Toyota firması, PRIUS adlı hibrit aracını piyasaya tanıtmıştır. Bu araç, tüketicilerin büyük ölçüde beğenisini kazanmış ve böylelikle büyük ölçekli seri üretimde ilk hibrit elektrikli otomobil olma unvanını kazanmıştır.

Elektrikli araçlar, 20. yüzyılın başlarında içten yanmalı motorların rekabetine yenik düşmelerine rağmen, özellikle son 15 yıldır tekrar hayatımıza girdiler ve kara yolu taşımacılığının geleceği olmaları tahmin edilmektedir. Şekil 1.3'te görseli verilen, Tesla Motors tarafından 2008 yılında satışa sunulan ve ilk tamamen elektrikli otomobil olan Roadster beklentilerin üzerinde satış gerçekleştirmiştir. Bu model pahalı olmasına rağmen çok satmış ve lider otomotiv markalarını bu alanda çalışmaya yönlendirmiştir. Günümüzde neredeyse tüm taşıt üreticileri en az bir modelini elektrikli olarak üretmektedir [11].

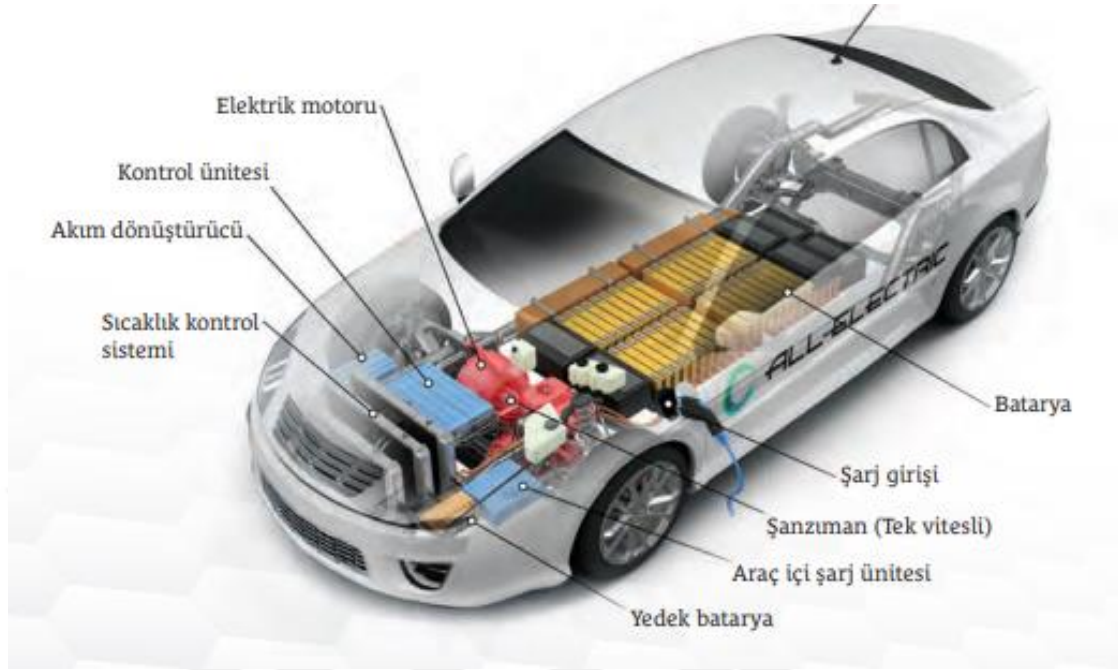


Şekil 1.3. 2008 model Tesla Roadster [10].

### 1.1.2. Elektrikli Araçların Çalışma Prensibi

Elektrikli araçlar içten yanmalı motor yerine bir veya daha fazla elektrik motoru içerirler. Elektrik motorları itici gücü tekerleklere iletecek enerjiyi bataryadan alırlar. Elektrikli araçların temel parçaları enerjinin saklanması için piller, hareket iletimi için elektrik motoru, jeneratör, tek vitesli şanzıman ve elektronik kontrol devreleridir. Elektrikli araçların temel parçaları şekil Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Elektrikli araçlar çevreyi kirletmeyen sıfır emisyonlu araçlar olarak da bilinir. Elektrikli araçlar hareket enerjisini

elektrik motorundan veya bir kısmını elektrik motoru bir kısmını ise içten yanmalı motordan alabilirler [11].

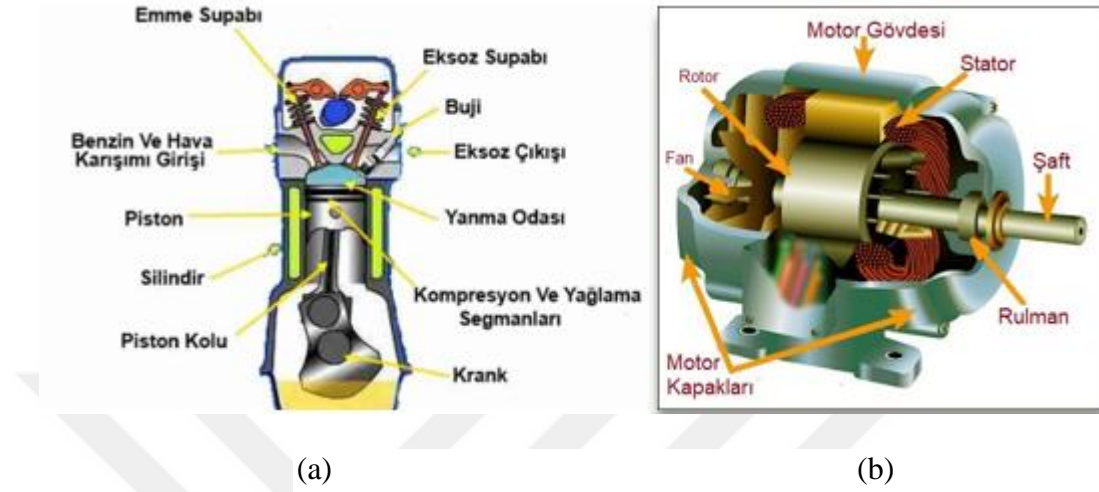


Şekil 1.4. Elektrikli aracın temel bileşenleri [12].

### 1.1.3. Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları

Geçmişten bugüne, araçlarda hareket enerjisini sağlamak için içten yanmalı motorlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlar kompleks ve etkileyici bir mekanizmadır. Motor içine yakıt ve hava karışımını püskürtmek için valfler uyumlu bir şekilde açılır ve kapanır, hava-yakıt karışımını, piston yukarı doğru hareket ederek sıkıştırır ve basıncı yükseltir. Bujiler yeterli basınçta ateşleme yapar ve yanma oluşur. Oluşan yanmanın meydana getirdiği enerji ise pistonları aşağı doğru hareket ettirir, piston tekrar yukarı doğru hareket ederek egzoz gazını valfler vasıtasıyla dışarı atar. Pistonun aşağı ve yukarı hareketleri krank milini döndürür. Krank mili pistonların bu hareketini dönme hareketine çevirerek tekerleklere iletilmesini sağlar. Fakat bu kompleks yapı nedeniyle içten yanmalı motorlarda verim düşüktür. Yakıttan elde edilen enerjinin en fazla %30'u aracın hareket enerjisinde kullanılırken elektrikli araçlarda bu değer %100'e yaklaşmaktadır. Bununla birlikte, elektrik motorları çok yalın bir yapıdadır. Mekanik kuvvet elektrik enerjisinden sağlanır. Hatta bir jeneratör görevi ile mekanik kuvvetten elektrik elde edebilir. İçten yanmalı motorlardaki gibi çok sayıda parçası yoktur ve rotor tek hareketli parçasıdır. Doğrusaldan dairesel hareket dönüşümü veya piston ve valf mekanizmasının çalışma zamanlaması gibi karışıklıklara gerek yoktur [13]–[15].

EA'lar, İçten yanmalı motorlu araçlara oranla sıfır emisyon veya çok düşük emisyonla çalışır, ayrıca sürüş esnasında çok daha gürültüsüz ve konforlu yolculuk imkânı sunarlar. Şekil 1.5 (a)'da içten yanmalı motorun ve (b)'de elektrik motorunun iç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Motor iç yapısı a) İçten yanmalı motor b) Elektrik motoru [16], [17].

Yukarıda belirtilen avantajların yanı sıra elektrikli araçların çözülmesi gereken dezavantajları da bulunmaktadır. Şarj altyapısı yaygınlaşmadığı için uzak mesafelere yolculuk planlamalarının sınırlanmasına neden olabilir. Ayrıca şarj olma süreleri içten yanmalı motorlu araçlara göre çok uzun sürmektedir. Batarya maliyetlerinin yüksek olması aracın gelecek yıllardaki bakım maliyetlerini çok yüksek yapabilir. Elektrikli araç model çeşitliliği geleneksel araçlara göre çok sınırlı durumdadır.

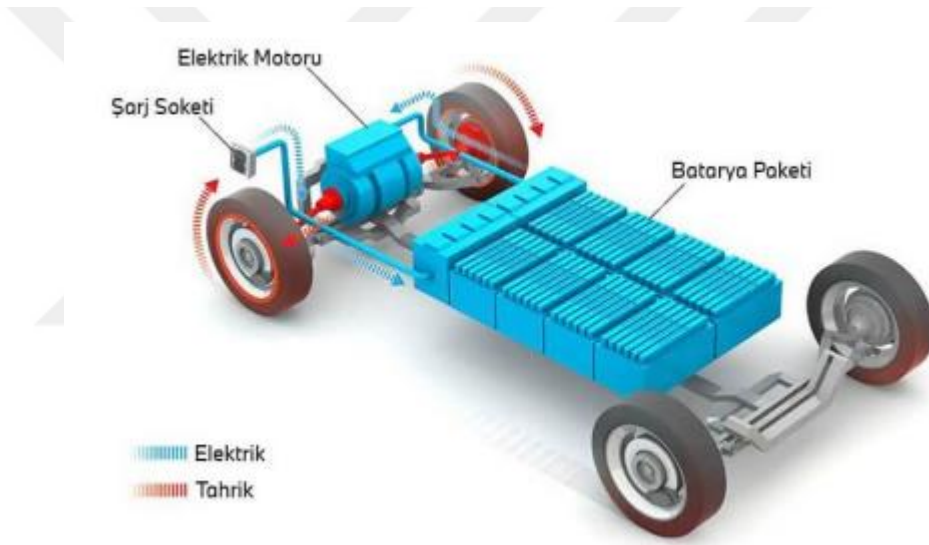
#### 1.1.4. Elektrikli Araç Türleri

Elektrikli araçlar, farklı türlerde mevcuttur. Tamamen elektrikli araçlar (TEA), sadece elektrik motoru ile çalışır ve enerjisini bataryadan alır. Plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEA), hem içten yanmalı motoru olan hem de şarj edilebilen bataryalara sahip elektrik motoru olan araçlardır. Hibrit elektrikli araçlar (HEA), bu araçlarda hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru mevcuttur ancak şarj edilemezler. Yakıt hücreli elektrikli araçlar (YHEA), elektrik enerjisini hidrojen yakıt hücreleri aracılığı ile üreten araçlardır. Bu elektrikli araç çeşitleri, farklı sürüş menzilleri, şarj altyapıları ve teknolojileriyle kullanıcı taleplerini karşılamak adına üretilmişlerdir.

##### 1.1.4.1. Tamamen Elektrikli Araçlar (TEA)

Araç hareket enerjisini Şekil 1.6'da görüldüğü gibi, sadece bir veya birden fazla elektrik

motoruyla sağlamaktadır. Elektrik motoru yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum-iyon veya lityum-polimer gibi bataryalar tarafından beslenir. Elektrik motoru, bataryadan aldığı elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek tekerlere güç iletir. Araçta bulunan kontrol sistemi, pillerin seviyesini takip eder, enerji iletimini kontrol altında tutar ve araç performansını en iyi seviyede tutar. TEA'lar sıfır emisyon ile çalıştıkları için havayı kirletmez ve sera gazı salınımının önüne geçer. Enerji maliyetleri İYM'li araçlara göre daha ekonomiktir. İYM'li araçlardaki karışık ve çok sayıda parçaya sahip olmadıkları için bakım maliyetleri daha düşüktür. Ancak TEA'ların çözülmesi gereken bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Mevcut batarya teknolojisi, İYM'li araçlara kıyasla daha sınırlı menzil mesafesi sunmaktadır. Şarj istasyonlarının sınırlı sayıda olması uzun yolculuk planlarını kısıtlamaktadır. Aracın şarj olma süresi İYM'li aracın yakıt alma süresine göre çok daha uzun sürmektedir [18]–[21].

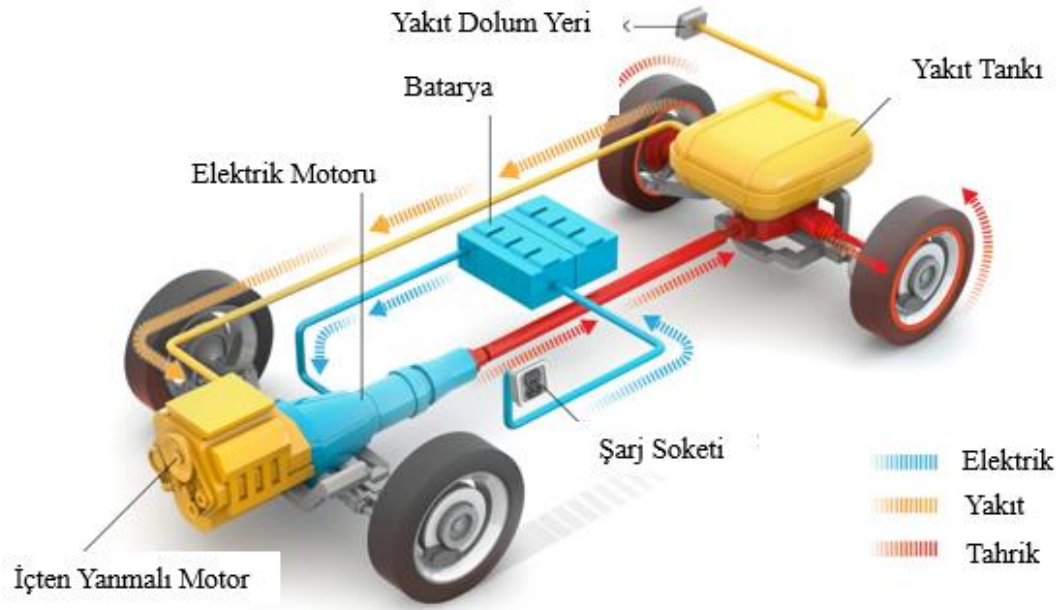


Şekil 1.6. Tamamen elektrikli araç [22].

#### 1.1.4.2. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA)

PHEA'lar Şekil 1.7'de görüldüğü gibi, bir içten yanmalı motor ve bir elektrik motorunun birlikte kullanıldığı araçlardır. Bu araca tahrik gücünü hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru verebilir. Bu araçlarda elektrik motoru enerjisini lityum-iyon bataryalardan alır. Düşük hızlar ve kısa mesafeler için elektrik motoru yeterli gelebilir. Ancak zayıf pil seviyelerinde ve yüksek hızlarda içten yanmalı motora ihtiyaç vardır. Aynı zamanda İYM'ler bataryayı şarj etmek içinde devreye girerler. PHEA'lar harici bir güç kaynağından da bataryalarını tam dolu hale getirebilirler. Evlerdeki prizlerle veya şarj istasyonlarında dolumu yapılabilir. PHEA'lar, TEA'lara kıyasla çok daha uzun

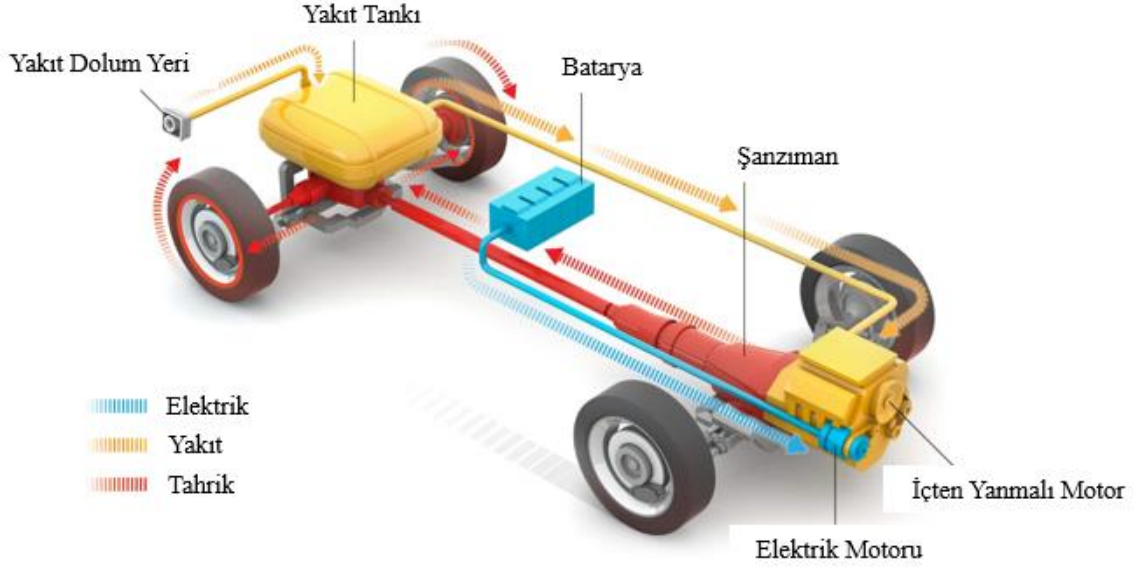
mesafelere yolculuk yapabilir. İYM, bataryaları şarj ederek bu mesafeleri arttırabilir. Elektrik motoru kullanıldığından, geleneksel araçlara kıyasla daha az emisyon üretir ve çevre dostudur. Ayrıca elektrik motorunun kullanımı, yakıt tüketimini azaltacağından daha ekonomik bir sürüş sağlar. Ancak PHEA'ların dezavantajları da mevcuttur. İki motorun varlığı aracı karmaşık bir yapıya sevk etmektedir. Elektrik motorunu besleyen bataryalar aracın ağırlığını arttırmaktadır. Bataryaların şarj edilebilmesi için geniş bir altyapıya ihtiyaç duyulmaktadır [23].



Şekil 1.7. Plug-in hibrit elektrikli araç [24].

#### 1.1.4.3. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA)

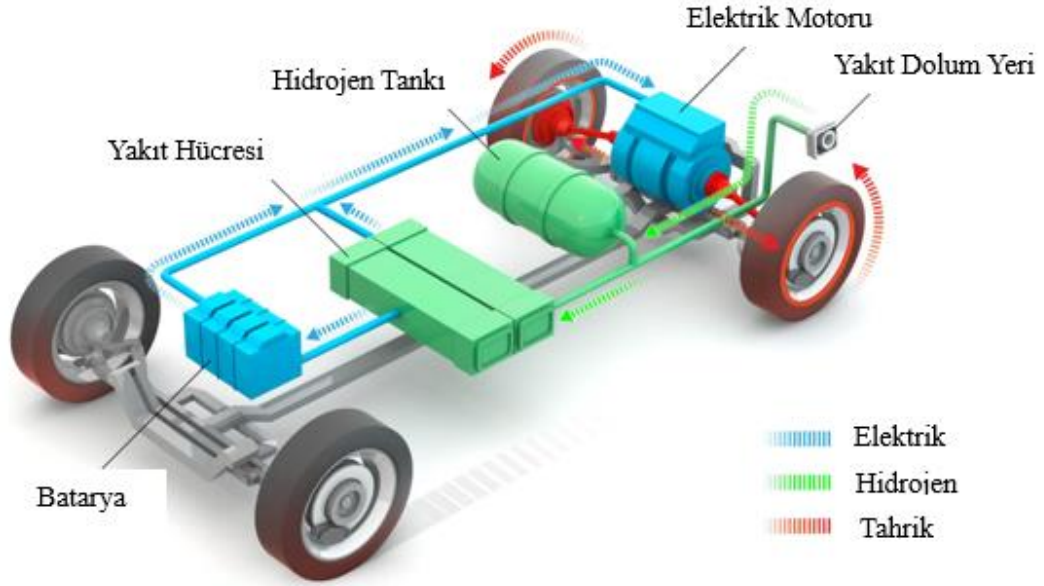
HEA'lar Şekil 1.8'de görüldüğü gibi, aynı anda içten yanmalı motor ve elektrik motoru bulundurlar. Bu araçlar hem sürüş maliyetlerini düşürmek hem de çevreyi daha az kirletmek için tasarlanmıştır. Bu iki motor beraber veya bağımsız çalışarak aracı hareket ettirirler. Düşük hızlar veya yoğun trafiklerde elektrik motoru devredeyken, yüksek hızlar veya daha fazla güç isteyen durumlarda İYM devreye girer. Bu araçlarda genelde lityum-iyon veya nikel-metal hidrit gibi piller kullanılmaktadır. Bu piller elektrik motoruna gereken enerjiyi sağlarlar. Elektrik motoru, aracın frenlemesi sırasında ortaya çıkan enerjiyi geri kazanabilir ve pilleri şarj edebilir. Bu araçların avantajları, yakıt verimliliği, azaltılmış emisyon ve daha uzun sürüş mesafeleri olurken, karmaşık mekanik yapı sonucunda bakım maliyetleri ve iki farklı motorun yanı sıra batarya paketlerinin araca kattığı ağırlık sonucunda performans verimliliğin düşüşü ise dezavantajlarıdır.



Şekil 1.8. Hibrit elektrikli araç [24].

#### 1.1.4.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA)

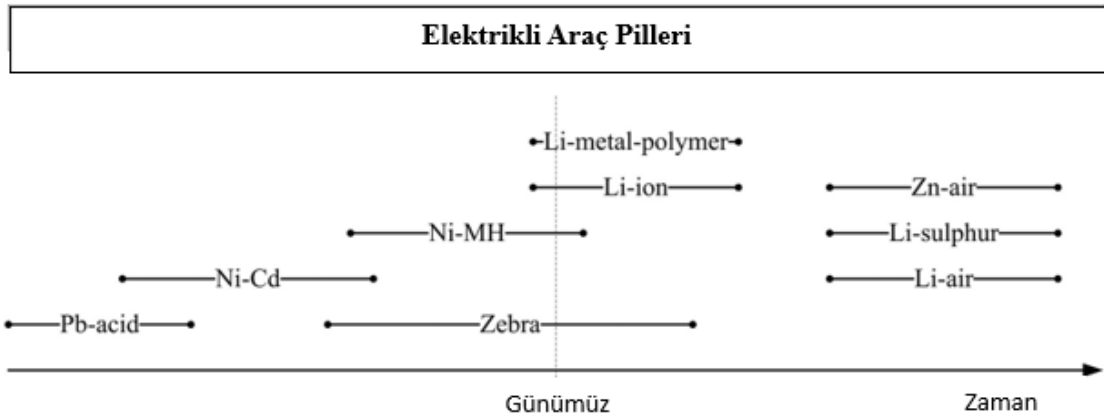
Yakıt hücreli elektrikli araçlar (YHEA), Şekil 1.9’da görüldüğü gibi, kendi elektrik enerjisini araç içinde üretir. Yakıt hücresinde bulunan hidrojen, havadaki oksijenle tepkimeye girerek elektrik üretir. Bu elektrik, aracın elektrik motoruna bataryalı elektrikli araçta olduğu gibi güç sağlamak için kullanılır. YHEA’lar emisyon olarak sadece ılık hava ve su buharı yayarlar. Ancak, hidrojenin üretimi büyük miktarlarda elektrik gerektirmesi sebebiyle çevresel açıdan dezavantajlıdır. Ayrıca, hidrojen tesiste üretildikten sonra benzin istasyonlarına taşınması gerekmektedir. YHEA’ların sürüş mesafesi, bataryalı elektrikli araçlara bezemektedir. YHEA’ların önemli bir avantajı, yakıt deposunun dolumunun, benzinli veya dizel araçlarda olduğu gibi hızlı bir şekilde olmasıdır. Ancak, dolum tesisleri sayısı oldukça sınırlı ve yeni istasyonların eklenmesi konusunda ilerleme oldukça yavaş olmaktadır. Ayrıca, yakıt hücresi sistemlerinin üretim maliyeti oldukça yüksektir. Bunun gözle görülür en önemli sebebi ise katalitik dönüştürücü için platin gibi pahalı malzemelerin kullanılmasıdır [24], [25].



Şekil 1.9. Yakıt hücreli elektrikli araç [24].

## 1.2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PİL TEKNOLOJİLERİ

EA için pil, temel bir bileşendir ve TEA'lar için tümüyle ve PHEA'lar için iki hareket kaynağından biridir. Ancak mevcut pil teknolojisi hala bazı kısıtlamalara sahiptir, bu da EA'ların daha geniş kitlelere ulaşmasının önüne geçmektedir. Şu anda kullanılan pillerin enerji yoğunluğu beklenenden düşüktür ve bu durum EA'ların maksimum sürüş menzilini doğrudan etkilemektedir. Son on yılda EA pilleri büyük ilerlemeler kaydetti. Yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek güç yoğunluğuna, ekonomikliğe, güvenliğe ve dayanıklılığa sahip piller icat etmek amacıyla araç pil teknolojisi çeşitli gelişim aşamalarından geçti [22]. Şekil 1.10, EA pil teknolojisinin gelişiminin zaman çizelgesini gösteriyor.



Şekil 1.10. Elektrikli araç pilinin gelişimine ait zaman çizelgesi [26].

Şu anda mevcut olan pil teknolojileri, farklı gerilim seviyeleri ve enerji depolama kapasiteleriyle mevcuttur. EA'larda sıkça kullanılan bazı pil teknolojileri, Çizelge 1.1'de listelenmiştir [22].

Çizelge 1.1. Elektrikli araçlarda mevcut olan pil teknolojileri [22].

Batarya Çeşitleri	Nominal Gerilim (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü (#)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı Aralığı (°C)
Pb-acid	2	35	1000	Yok	-15 - +50
NiCd	1.2	50-80	2000	Var	-20 - +50
NiMH	1.2	70-95	< 3000	Nadir	-20 - +60
Zebra	2.6	90-120	> 1200	Yok	+245 - +350
Li-ion	3.6	118-250	2000	Yok	-20 - +60
LiPo	3.7	130-225	> 1200	Yok	-20 - +60
LiFePO <sub>4</sub>	3.2	120	> 2000	Yok	-45 - +75
Zn-air	1.65	460	200	Yok	-10 - +55
Li-S	2.5	350-650	300	Yok	-60 - +60
Li-air	2.9	1300-2000	100	Yok	-10 - +70

İYM'li araçlara rakip olacak EA'larda kullanılan ilk pil teknolojisi kurşun-asit pillerdi. Bu pillerin, üzerinde oldukça ilerlemiş çalışmalar yapılmasına ve aynı zamanda ucuz olmalarına rağmen, düşük enerji yoğunluğu, ağırlığı, elektrolit seviyesinin kontrol mecburiyeti ve çevre dostu olmaması gibi tercih edilmesine engel dezavantajları bulunmaktadır [26].

Nikel piller, örneğin nikel-çinko pili, çevreye daha az zarar veren bir seçenek olsa da kısa bir kullanım ömrüne sahiptir. Nikel-demir pili hala ağır, bakım maliyeti yüksek ve kendiliğinden boşalma oranı yüksek olması gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Nikel-kadmiyum pili, otomobil uygulamaları gibi yüksek şarj ve deşarj hızları için uygun olmayan bir bellek etkisine sahiptir, ancak zorlu çalışma şartlarında güçlü performans gösterirler. Ayrıca toksik malzemeler içerir ve ekonomik sayılmayacak maliyetlere sahiptirler. Nikel-metal hidrit piller de çevre dostu pillerdendir. Nikel-metal hidrit pil, Nikel-kadmiyum pillere göre kendiliğinden boşalma oranı %50 daha yüksektir. Bu pilin bir diğer eksikliği ise kurşun-asit ve nikel-kadmiyum pillerden daha uzun sürede şarj olması ve şarj esnasında yüksek miktarda ısı ortaya çıkarmasıdır. Dolayısıyla nikel-metal hidrit piller EA'larda yaygın olarak kullanılsalar da karmaşık şarj algoritmaları ve maliyeti yüksek şarj cihazları gerektirirler [27].

ZEBRA pili veya sodyum-nikel klorür (Na-NiCl) pili, elektrolit olarak sodyum tuzunu kullanır ve çalışma sıcaklık aralığı 300-350 °C arasındadır. Optimum seviyede ve güvenli



bir şekilde çalışabilmesi için termal güvenlik üst seviyede olmalıdır. ZEBRA pilleri, kurşun-asit pillere oranla daha düşük ömür maliyetine sahiptir. Bu pilin öne çıkan avantajları arasında, lityum pillere eşit veya daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, günümüz EA'larında kullanılan modern pil teknolojileri içerisinde en ucuz maliyete sahip olması, uzun ömürlü, dayanıklı ve aşırı şarj veya deşarj durumunda güvenilirliğinin devam etmesi bulunmaktadır. Ancak, aşırı çalışma sıcaklığı ve termal yönetim konuları pilin kullanımını konusunda önemli bir zorluk oluşturmaktadır [28], [29].

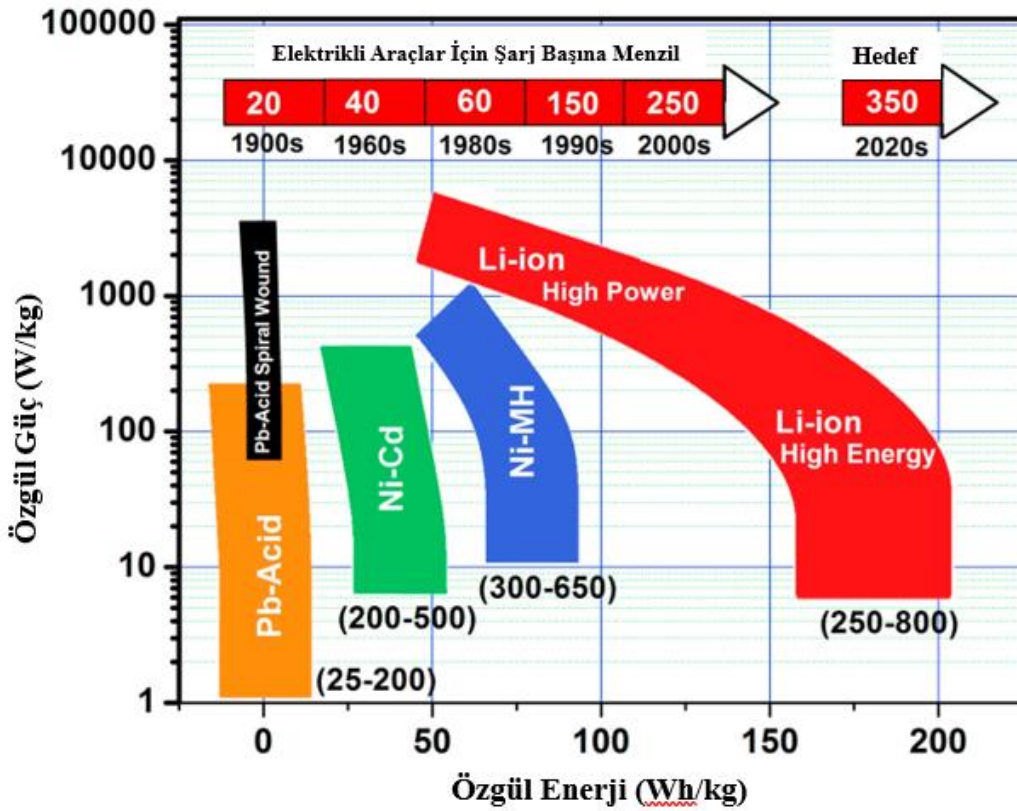
Lityum bazlı piller, EA'lar ve enerji, depolama sistemleri gibi birçok alanda umut vaat eden bir teknolojidir. Bu pillerin özellikleri arasında hafif yapıları, yüksek özgül enerjileri, yüksek özgül güçleri ve yüksek enerji yoğunlukları bulunur. Lityum pillerin ayrıca hafıza etkileri yoktur ve kurşun, civa veya kadmiyum gibi zehirli metaller içermezler. Bu da çevre dostu bir pil olarak sürdürülebilir seçenek olduğunu gösterir. Lityum pillerin güvenli olarak çalışmasını sağlamak için her bir batarya paketinde koruma devresi olmalıdır. Bu koruma devresi, aşırı şarj, aşırı deşarj ve aşırı ısınma gibi istenmeyen durumlara müdahale ederek pilin güvenliğini sağlar. Ancak, lityum pillerin üretim maliyetleri, nikel-kadmiyum (NiCad) ve Nikel-metal hidrit (Ni-MH) pillere kıyasla daha yüksektir. Bunun nedeni ise lityum metalinin diğer malzemelere kıyasla daha pahalı ve üretim prosesinin daha karmaşık olmasıdır [30].

Lityum pillerin farklı çeşitleri mevcuttur. Bunlar arasında en yaygın kullanılan lityum iyon (Li-ion) pillerdir. Nissan Leaf, Tesla Model S, Chevrolet Volt gibi popüler araçlarda kullanılmaktadır. Bu piller yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarının yanı sıra uzun ömürlüdür ve hızlı şarj olma özelliği sunmaktadırlar. Lityum iyon polimer (LiPo) piller ise daha esnek yapıya sahip olduklarından farklı ambalajlama imkanları sunarlar. Bunun yanı sıra, LiPo pillerin iletkenlikleri ve güç yoğunlukları, lityum iyon piller karşısında daha düşüktür. Lityum demir fosfat (LiFePO<sub>4</sub>) piller, güç yoğunluğu yüksek ve güvenli çalışma özelliği ile tercih edilen pil seçeneğidir. Bu piller uzun döngü ömürleri, termal ve kimyasal olarak daha tutarlı olmaları sebebiyle tatmin edici bir performans sunarlar. Lityum iyon piller karşısında daha düşük maliyete ve çevre dostu özelliklere de sahiptirler. Ancak, lityum iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğu karşısında zayıf kalmaktadırlar. Bu sebeple pil kapasitesine ihtiyaç duyan, güç isteyen uygulamalarda lityum iyon piller avantajlı bir seçim olmaktadır [22], [30], [31].

Lityum hava (Li-air) piller ve lityum sülfür (Li-S) piller gibi diğer lityum bazlı pil teknolojileri de araştırma ve geliştirme aşamasındadır. Li-air piller, teorik olarak dikkat

çekici bir enerji yoğunluğuna sahip olmaları nedeniyle gelecek EA'lar için cazip bir seçenek olabilirler. Ancak, bu teknolojinin kullanıma geçmesi henüz gerçekleşmemiştir. Li-S piller de çok yüksek enerji yoğunluğu sunmaktadır, fakat bu pillerin yaşam döngü ömürleri kısadır. Bu da pratik uygulamalarda bazı zorluklar yaratmaktadır [32].

Şekil 1.11'deki grafikte lityum iyon pillerin diğer pillerden daha pahalı olmasına rağmen yüksek özgül enerji ve yüksek özgül güce sahip oldukları görülmektedir. Bu da lityum iyon pillerin EA'larda sıklıkla tercih edilen bir pil çeşidi olmasına neden olmaktadır. Bu piller diğer pil teknolojilerine kıyasla birçok avantaja sahiptir [22].



Şekil 1.11. Çeşitli pil teknolojilerinin şarj başına hedef menzillerinin karşılaştırılması. Parantez içindeki rakamlar USD cinsinden pillerin kWh başına fiyatını göstermektedir [33].

### 1.3. LİTYUM İYON PİLLER

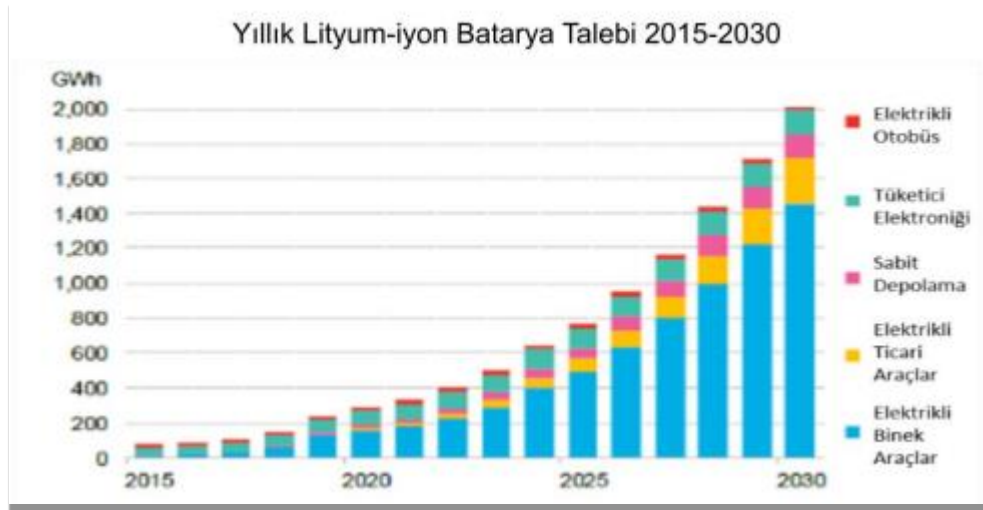
Lityum, Şekil 1.12'de görüldüğü gibi, periyodik cetvelde atom numarası 3 olan, alkali metallerin 1A grubunda konumlanan ve sadece 0,53 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip olan bir elementtir. 1A grubunun öne çıkan özellikleri, elektronlarını verme ve pozitif yüklü hale dönüşme eğilimindedir. Bu da onları yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek

gerilimli pil hücreleri için uyumlu hale getirir [34], [35].

1 H		
3 Li	4 Be	
11 Na	12 Mg	
19 K	20 Ca	21 Sc
37 Rb	38 Sr	39 Y

Şekil 1.12. Periyodik cetvelde lityum [35].

Son yıllarda, portatif elektronik cihazlara olan talebin artması ve EA'ların ulaşım sektöründe önem kazanmasıyla birlikte, ikincil (tekrar doldurulabilen) lityum iyon piller üzerinde yenilikçi ve geliştirici çalışmalar önem kazanmıştır. Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu ve çevre dostu özellikleri sayesinde cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, portatif ev aletleri gibi cihazlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, temiz çevre için çalışan üreticilerin ve tüketicilerin tercihlerinin de önemli bir parçasıdır. Özellikle düşük CO<sub>2</sub> gazı salınımıyla çevre dostu bir seçenek olarak desteklenmektedir. Portatif ev aletlerinde yaygın olarak kullanılan lityum iyon piller, fosil yakıtların azalması ve enerji depolama sistemlerine olan ihtiyacın artmasıyla önemini daha da arttırmıştır. Şekil 1.13'te görüldüğü gibi, EA üretiminin her geçen gün artan üretim sayıları ile, lityum iyon pillerin gereksinimi daha da artacak ve enerji depolama alanında büyük bir rol oynayacaktır [36].



Şekil 1.13. Yıllara göre lityum iyon pil talebi [37].

### 1.3.1. Lityum İyon Pillerin Avantajları ve Dezavantajları

Lityum-iyon piller, hafif ve taşınabilir özellikleri ile bilinir. Bu özellikleri sayesinde mobil cihazlar ve portatif elektronik eşyalar için ideal bir güç kaynağıdır. Ayrıca, EA'larda hafifliğe katkı sağladığından aracın performansını ve sürüş menzilini arttırmaktadır. Hızlı şarj ve deşarj yeteneğine sahip olduklarından kullanıcılarına daha konforlu bir cihaz kullanım imkânı sunmaktadır. Düşük kendi kendine deşarj oranına sahip olduğundan, enerjisini uzun süre korur. Bu, kullanıcılara cihazlarını daha uzun süre kullanma ve şarj etme sıklığını azaltma imkânı verir.

Bu piller dezavantajlara da sahiptir. Pillerin ömrü sınırlıdır. Şarj ve deşarj döngüleri arttıkça pilin performans ve kapasitesinde azalmalar görülür. Bu da pillerin zamanla yenisi ile değiştirileceği anlamına gelir. Bu piller doğru şekilde kullanılmaması durumunda güvenlik riski taşıyabilir. Yanma ve patlama gibi istenmeyen olaylara sebebiyet verebilir. Üretim süreçleri ve hammadde maliyeti nedeni ile pahalı pillerdir. Ancak, yenilikçi çalışmalar ile maliyetinin düşmesi beklenmektedir [34], [36].

### 1.3.2. Lityum İyon Pilin Yapısı

Lityum-iyon pil genellikle pozitif elektrot, negatif elektrot, elektrolit, ayırıcı, akım toplayıcı ve çerçeveden oluşmaktadır. Yapının en önemli parçaları, pilin enerji yoğunluğunu ve kapasitesini belirleyen elektrotlardır. Pozitif elektrotlar, tabakalı, spinel ve olivin gibi farklı yapılarda üç gruba ayrılırlar. Lityum-kobalt oksit ( $\text{LiCoO}_2$ ), bu grup içinde, tabakalı yapıda olan ve lityum-iyon pilinin kullanılmasından bu yana en çok tercih edilen pozitif elektrot malzemesidir.

Çizelge 1.2'de çeşitli yapıdaki pozitif elektrot malzemelerin kıyaslanması ve özellikleri listelenmiştir.  $\text{LiCoO}_2$ , yüksek depolama kapasitesi ve uygun üretim süreci gibi üstünlüklere sahiptir. Ancak, toksik madde, yüksek malzeme maliyeti ve düşük termal dayanıklılık gibi kısıtlamaları vardır. Lityum-demir fosfat ( $\text{LiFePO}_4$ ), termal dayanıklılığı daha iyi olsa da kapasite olarak yeterli seviyede değildir [38]–[43].

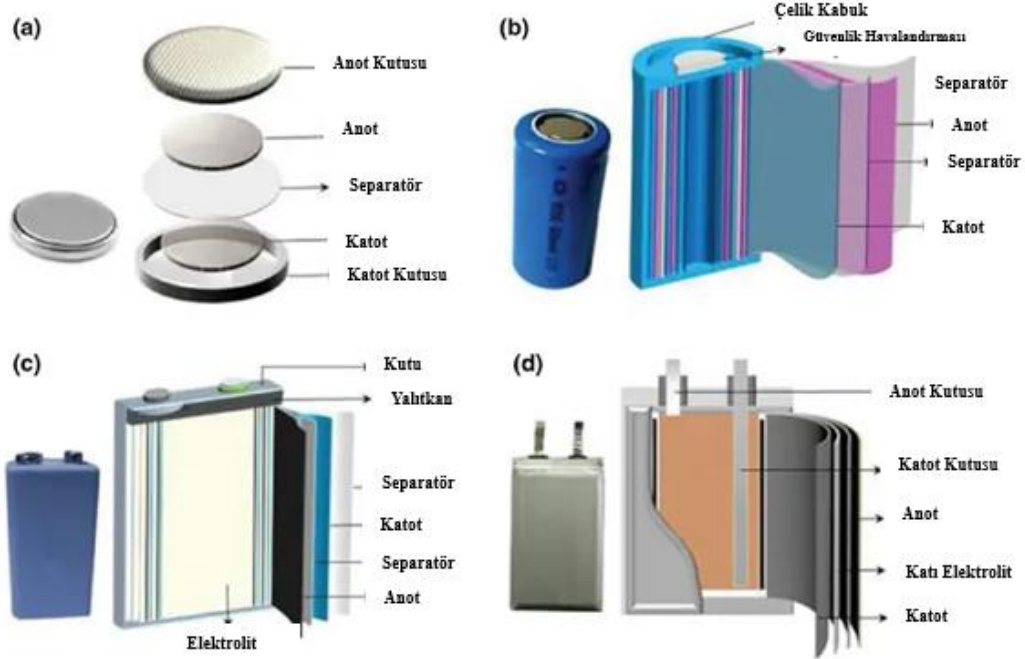
Çizelge 1.2. Çeşitli pozitif elektrot malzemelerinin özellikleri [38].

Pozitif Elektrot	LCO	LNO	NCA	NMC	LMO	LFP
Hücre Gerilimi (V)	3,7 – 3,9	3,6	3,65	3,8 – 4,0	4,0	3,3
Spesifik Enerji	III	III	IV	IV	II	II
Güç	II	II	III	II	III	III
Emniyet	I	II	II	II	III	IV
Ömür	II	II	III	II	II	III
Maliyet	I	III	II	II	III	III

Mükemmel: IV, İyi: III, Orta: II, Kötü: I

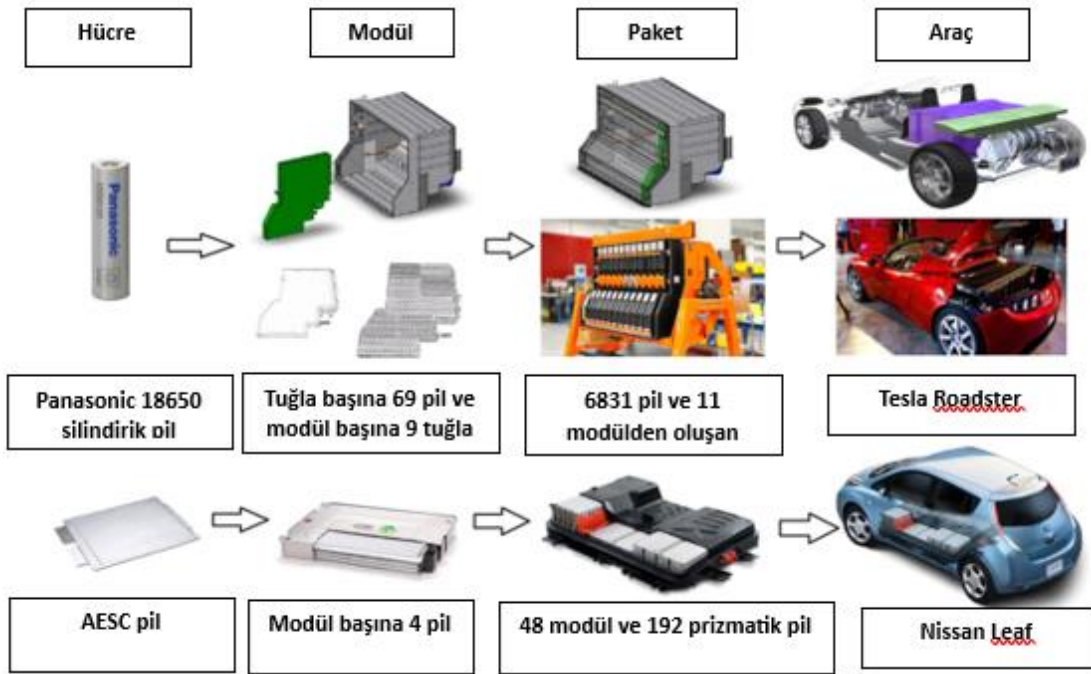
Sıklıkla kullanılan negatif elektrot malzemesi ise grafit bazlı karbondur. Çalışmalar, pil performansını arttırmak için yeni malzemeler üzerinde devam etmektedir. Sülfür, grafit karbonun yerini alma konusunda, etkileyici bir seçenek olarak ön plana çıkmaktadır.

Lityum-iyon pillerin elektrolitleri, organik sıvı karışımlarında çözünen lityum içeren tuzlardan oluşur. Ayırıcı, kısa devre gibi istenmeyen durumlarda koruma sağlar, pozitif ve negatif elektrotları birbirinden ayırır. Ayırıcı, lityum iyonlarının kolayca geçmesine izin verir, elektriksel olarak yalıtkandır ve normal koşullarda elektronların geçişine izin vermez. Yüksek sıcaklıklarda pili korumak adına termal bir sigorta görevi görür ve pilin aşırı ısınmasının önüne geçer. Pilin ürettiği akımları toplamak ve iletmek, akım toplayıcıların görevidir. Genellikle negatif taraf bakır ve pozitif tarafta alüminyum malzeme kullanılır. Pilin dış kabı ise çelik veya alüminyum malzemeden yapılan koruyucu bir kılıftır [44]. Şekil 1.14’te pil çeşitleri ve yapıları verilmiştir.



Şekil 1.14. Pil çeşitleri ve katmanları a) Düğme b) Silindirik c) Prizmatik d) Kese [45].

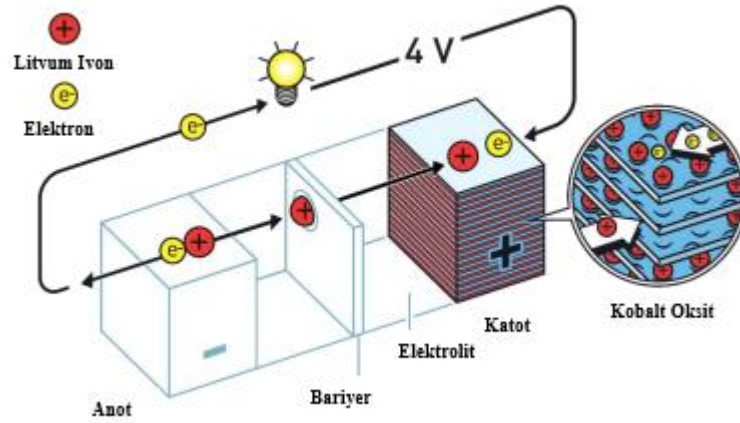
Elektrikli araç üreticileri, üretim metotlarına göre farklı batarya tiplerini tercih etmektedirler. Ayrıca, üretim uygulamalarında tek bir pil, aracın hareket enerjisi için yeterli değildir. Bu sebeple, birçok pil seri veya paralel bağlantılarla bir araya gelerek modüller oluşturulur. Daha sonra, modüllerin birbirleriyle elektriksel bağlantıları yapılarak batarya paketleri oluşturulur [38]. Şekil 1.15'te EA için silindirik ve prizmatik lityum iyon pillerin kullanıldığı sırasıyla hücre, modül ve paket adımları gösterilmiştir.



Şekil 1.15. EA için batarya paketi oluşum adımları [43].

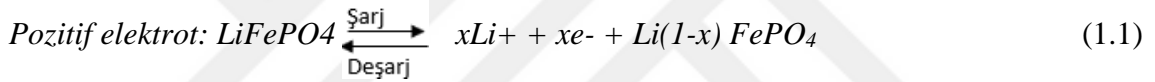
### 1.3.3. Lityum İyon Pilin Çalışma Prensibi

Lityum iyonlarının şarj ve deşarj esnasında anot ve katot arasında hareket etmesi ile gerçekleşir. Şarj esnasında, katotta depolanan lityum iyonları, katottan anota doğru elektrolit ve ayırıcı vasıtasıyla hareket eder. Ayırıcı bu esnada anot ile katot arasında bariyer görevi görür, elektrolit ise elektronların geçişini engeller. Denge korunması için eşit miktarda elektron katotta serbest kalır. Serbest kalan elektronlar, akım toplayıcı aracılığı ile dış devre üzerinden anota geçiş sağlayarak şarj süreci için gereken akımı oluşturur. Lityum iyonları elektronlar ile reaksiyona girer ve bu reaksiyon sonucunda katot malzemesine yerleşirler. Deşarj esnasında ise, bu sürecin tam tersi gerçekleşir. Şekil 1.16'da katot olarak lityum-kobalt oksit kullanılan lityum iyon pilin şematik gösterimi verilmiştir [38].



Şekil 1.16. Lityum iyon pilin şematik gösterimi [35].

Lityum iyon pilde şarj ve deşarj esnasında, Denklem (1.1)'de katot için ve Denklem (1.2)'de anot için ortaya çıkan elektrokimyasal tepkimeler aşağıdaki formüllerle gösterilebilir.



#### 1.3.4. Lityum İyon Pilde Termal Sorunlar

Lityum iyon pillerde sıcaklık endişesi iki temel nedene dayanır. Bunlar, pilin çalışma sıcaklığının belirlenen çalışma sıcaklığı aralığının üzerine çıkması ya da altına düşmesidir. Bu istenmeyen durumlar pilin çevrim ömrünü kısaltacağı gibi performansını da düşürecektir. Pillerden maksimum performansı elde etmek için çalışma sıcaklığının (15–35°C) arasında tutulması gerekmektedir. Bu aralığın dışındaki sıcaklıklarda çalışmakta olan lityum iyon pillerde, performans düşüklüğü, çevrim ömrünün azalması ve güvenlik problemleri gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkacaktır [38].

Yüksek sıcaklıklar, pillin yapısında gerçekleşen kimyasal tepkimeleri hızlandırarak enerji verimliliğini düşürebilir. Yüksek sıcaklık termal kaçışa yol açarak pilde patlamalara sebebiyet verebilir. Aynı zamanda, düşük sıcaklıklarda pilin elektriksel direncinde artışa neden olur, bu da şarj ve deşarj hızını yavaşlatabilir ve pilin kapasitesini düşürür.

#### 1.3.5. Lityum İyon Pile Düşük Sıcaklıkların Etkisi

Lityum iyon pillerin performansları 0 °C'nin altındaki çalışma sıcaklıklarında olumsuz

etkilenecektir. Günümüzde, EA ve HEA'ların, dondurucu soğukların hâkim olduğu ülkelerde (Kanada, Rusya ve İskandinav ülkeleri) genel kullanıcı kitlesine ulaşamamasının nedeni, lityum iyon pillerin düşük sıcaklıklarda performanslarının azalmasıdır. Temelde, pilin düşük sıcaklığa sahip olması, kimyasal tepkimelerin yavaşlamasına, şarj aktarım kinetiğinin etkilenmesine, elektrolit iletkenliğinde azalmaya ve anot içerisinde lityum iyonlarının geçiş hareketlerinde azalmaya sebep olur. Bu olumsuzluklar, pilin gerçek enerji ve gücünü eksiltirken, çalışma performansında da başarısızlığa sebep olur [46].

### 1.3.6. Lityum İyon Pile Yüksek Sıcaklıkların Etkisi

Lityum iyon pillerin yüksek çalışma sıcaklığında performansına etki eden olumsuz etkiler, düşük çalışma sıcaklığındaki olumsuzluklara oranla çok daha karmaşık ve hassas öneme sahiptir. Lityum iyon piller çalışma esnasında ısıyı kendi içinde üretir ve bu durumun kontrol altında tutulması gerekir [47].

#### 1.3.6.1. Isı Üretimi

Tekrar eden şarj ve deşarj döngülerinde lityum iyon pillerin terminallerinde meydana gelen potansiyel fark, belirli bir şarj kapasitesinde (SoC) pil tarafından oluşturulan potansiyel farktan (EMK) sapar. Bu fark, pil aşırı gerilimi olarak bilinir ve Denklem (1.3)'te aşağıdaki şekilde gösterilir [48]–[51].

$$\eta_{pil} = E_{pil} - E_{pil}^{EMK} \quad (1.3)$$

Burada  $E_{pil}$ , pilin terminallerindeki potansiyel farkı temsil ederken,  $E_{pil}^{EMK}$  elektromotor kuvvetini (EMK) temsil eder.

Toplam aşırı gerilim farkı, bir pilde meydana gelen farklı süreçler tarafından indüklenir. Bu faktörler, elektrot ve elektrolit arayüzeyinde meydana gelen yük transferi aşırı potansiyeli ( $\eta_{yp}$ ), elektrolit üzerindeki lityum iyonlarının difüzyon aşırı potansiyeli ( $\eta_{edp}$ ), elektrotlardaki lityum iyonlarının difüzyon aşırı potansiyeli ( $\eta_{dp}$ ) ve ohm kayıpları ( $\eta_{\Omega}$ ) yer almaktadır. Bu faktörlerle beraber toplam pil aşırı potansiyeli Denklem (1.4) ile gösterilir.

$$\eta_{pil} = \eta_{yp} + \eta_{edp} + \eta_{dp} + \eta_{\Omega} \quad (1.4)$$

Hem katotta hem de anotta şarj iletim süreçleri, difüzyon ve ohm kayıpları yaşanır. Pil



aşırı gerilim farkı ile çarpılan akımın sonucunda artık geri döndürülemez bir ısı potansiyeli ( $Q_\eta$ ) ortaya çıkar, bu da aşağıdaki Denklem (1.5) ile gösterilebilir [52]–[55].

$$Q_\eta = \eta_{pil} I (t) \quad (1.5)$$

### 1.3.6.2. Isı İletimi

Bir önceki başlıkta ifade edilen formüllerle ortaya çıkan ısı, pilin malzemelerinden iletim yoluyla geçiş yapar. Bu durum oluşabilmesi için pilin malzemeleri arasında sıcaklık farklılığının olması şarttır. Isı taşıma özelliklerinden dolayı izotropik malzemelerdeki ilgili ısı iletimi ( $\vec{q}$ kondüksiyon) Denklem (1.6) ile gösterilebilir [48].

$$\vec{q}_{kond} = -k \nabla T \quad (1.6)$$

Bu denklem Fourier'in ısı iletimi kanunu olarak ta bilinir, burada,  $k = k(x,y,z)$  ısı iletkenliğini,  $T$  ise sıcaklık gradyanını temsil eder. Isı iletkenliğinin ( $k$ ) önündeki eksi (-) işareti ise ısının yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru geçiş yaptığını gösterir.

### 1.3.6.3. Isı Dağılımı

Pil, gaz veya sıvı içerisinde çalışıyorsa, pilin yüzeyi ile çevresi arasında meydana gelen ısı alışverişi konveksiyon ( $Q_{kon}$ ) ile olur. Ayrıca, pil yüzeyinin soğutma işlemi ise radyasyon ( $Q_{rad}$ ) yolu ile olur ve aşağıdaki Denklem (1.7) ve (1.8)'de sırası ile gösterilir [48].

$$Q_{kon} = hA(T - T_o) \quad (1.7)$$

$$Q_{rad} = \sigma \varepsilon A(T^4 - T_o^4) \quad (1.8)$$

Burada sırasıyla,  $h$  ısı transfer katsayısını,  $A$  pilin yüzey alanını,  $T$  pilin yüzey sıcaklığını,  $T_o$  ortam sıcaklığını,  $\sigma$  Stefan- Boltzmann sabitini ve  $\varepsilon$  ise yüzey malzemesi yayılma katsayısını ifade eder.

### 1.3.6.4. Isıl Denge

Pillerde meydana gelen sıcaklık değişkenliğini bulmak için ısı dengesi denklemi kullanılabilir. Aşağıda, bir pil için ısıl denge, Denklem (1.9)'da gösterilmiştir [48].

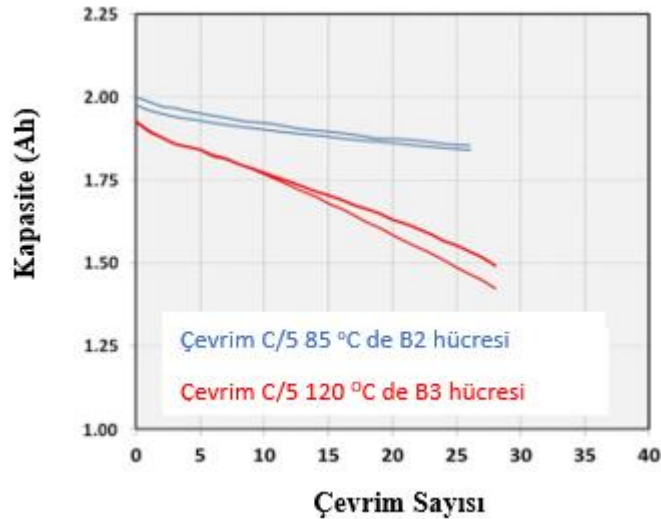
$$m c_p \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1.9)$$

Burada, m kütleyi,  $C_p$  pilin özgül ısısını,  $Q_{in}$  meydana gelen tüm ısı üretim adımlarını ve  $Q_{out}$  ise pilin yüzeyinden ortama yayılan ısıyı ifade eder.

### 1.3.6.5. Yaşlanma

Lityum iyon pillerin yüksek çalışma sıcaklıklarında kullanımı neticesinde yaşlanma problemi oluşur. Bu yaşlanma, pillerin performansı üzerinde olumsuz etki göstermesinin yanı sıra, ömür süresini de kısaltır. Pillerin yaşlanması çevrim yaşlanması ve ömür yaşlanması olmak üzere iki türden oluşur. Fakat, bu yaşlanma türleri pilin karmaşık yapısı ve çalışma prosesi sebebiyle aynı anda gerçekleşir. Lityum iyon pilleri belirlenen çalışma sıcaklığı aralığının üzerinde çalıştırmak yaşlanmayı hızlandırır ve pillerin kullanılamaz hale gelmesine sebebiyet verir [47].

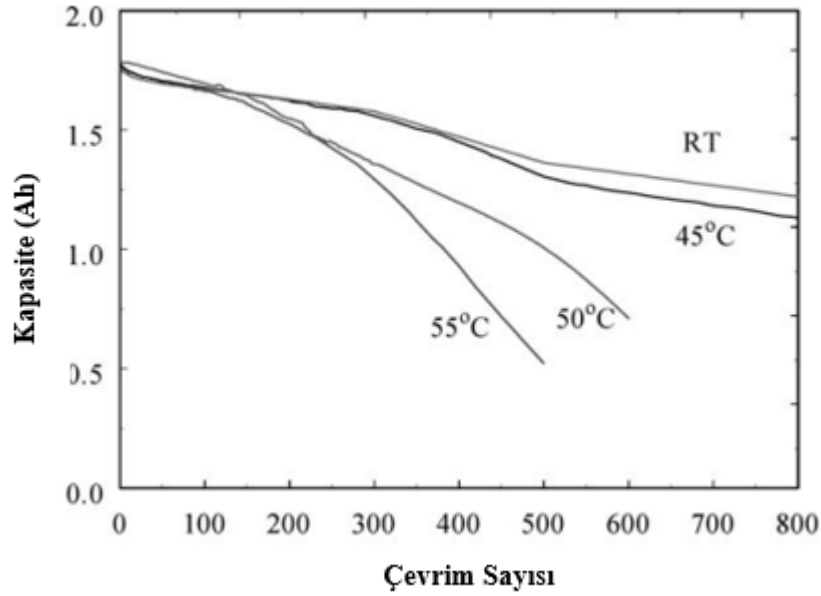
Bodenes ve arkadaşları, tasarımı yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyetine sahip  $Li(Ni,Mn,Co)O_2$  / karbon lityum iyon hücrelerinin, yüksek sıcaklıklarda kapasite ve çevrim ilişkisini, şarj ve deşarj döngüleriyle test ettiler. Şekil 1.17’de grafiği verilen test sonucunda, 85 °C’ de 26 çevrim sonunda %7,5’lik bir kapasite kaybı yaşanırken, 120 °C de ise 29 çevrim sonunda %22’lik bir kayıp yaşanmıştır [56].



Şekil 1.17. Lityum iyon pillerin yüksek sıcaklıkta (B2, 85°C ve B3, 120 °C), C/5 hızında şarj ve deşarj işlemleri ile kapasite ve çevrim ilişkisi testi [56].

Ramadass ve arkadaşları, lityum iyon pillerin çalışma sıcaklığına bağlı olarak kapasite değişimlerini araştırdılar. Sony 18650 lityum iyon pilleri, 2,0 V – 4,2 V gerilim

aralığında, RT (oda sıcaklığı), 45, 50 ve 55 °C' de şarj ve deşarj döngülerine tabi tutarak 800 çevrime kadar test ettiler. Şekil 1.18'de görülen grafik test sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, 800 çevrim sonunda oda sıcaklığındaki hücre %30, 45 °C'deki hücre %36 kapasite kaybına uğradılar. 50 °C'deki hücre 600 çevrim sonunda %60 kapasite kaybına uğradı. 55 °C'deki hücre ise daha fazla kapasite kaybına uğrayarak çevrim gerçekleştirilemez duruma geldi [57].



Şekil 1.18. Sony 18650 lityum iyon pillerin farklı sıcaklıklarda çevrim sayısına bağlı kapasite testi [57].

#### 1.3.6.6. Termal Kaçak

Lityum iyon pillerin, yüksek kapasite isteyen uygulamalarda kullanımına engel temel problem, yangın ve patlamalara neden olan termal kaçak sorunudur [58]. Termal kaçağı ortaya çıkarabilecek birkaç unsur bulunmaktadır. Termal kaçak, üretimsel hatalar ya da termal bozulmalarla başlayabilir. Hücreye uygulanacak aşırı şarj veya deşarj durumu da termal kaçağı tetikleyebilir. Bununla birlikte, hücre içerisinde meydana gelebilecek kısa devreler de termal kaçağa sebebiyet verebilir. Bu istenmeyen durumlardan herhangi biri, hücre yapısını oluşturan malzemelerin çok hızlı bir şekilde ekzotermik bir tepkimeyle ayrışmasına neden olabilir. Bu da çok yüksek sıcaklıklara ve potansiyel olarak tehlikeli sonuçlara yol açabilir [59].

Lityum iyon pildeki termal sorunlar, hücrelerin performansını olumsuz yönde etkilediği gibi yangın ve patlamalara yol açabilecek termal kaçağa da sebebiyet verebilir. Bu

olumsuz etkenler, lityum iyon bataryaların sıcaklık ile ilişkisinin önemini göstermektedir. Bu sebeple, lityum iyon pillerin sıcaklığının kontrol altında tutulması ve sıcaklık etkenli olumsuzlukların en düşük seviyede tutulması önemli bir süreçtir [47].

#### *1.3.6.7. Eşit Sıcaklıkta Çalışma*

Batarya performansını optimum seviyede tutmak için hücrelerin, modüllerin ve paketlerin sıcaklıkları homojen bir şekilde dağıtılmalıdır. Hücre, modül veya paket içindeki sıcaklık farklılığı, çeşitli elektrokimyasal verimlere ve şarj/deşarj tepkilerine neden olabilir. Hücre yapısındaki bileşenlerin ayrı termal fiziksel özelliklere sahip olmaları nedeniyle, hücre içerisindeki yapıda ısı transferi ve ısı üretimi farklılıklar gösterir. Elektrot çevresindeki ısı, hücredeki diğer bölgelere oranla daha fazladır. Bu homojen olmayan sıcaklık dağılımı, elektrot tepkime hızlarını ve hücrenin çevrim ömrü ile performansını olumsuz etkiler [58], [60].

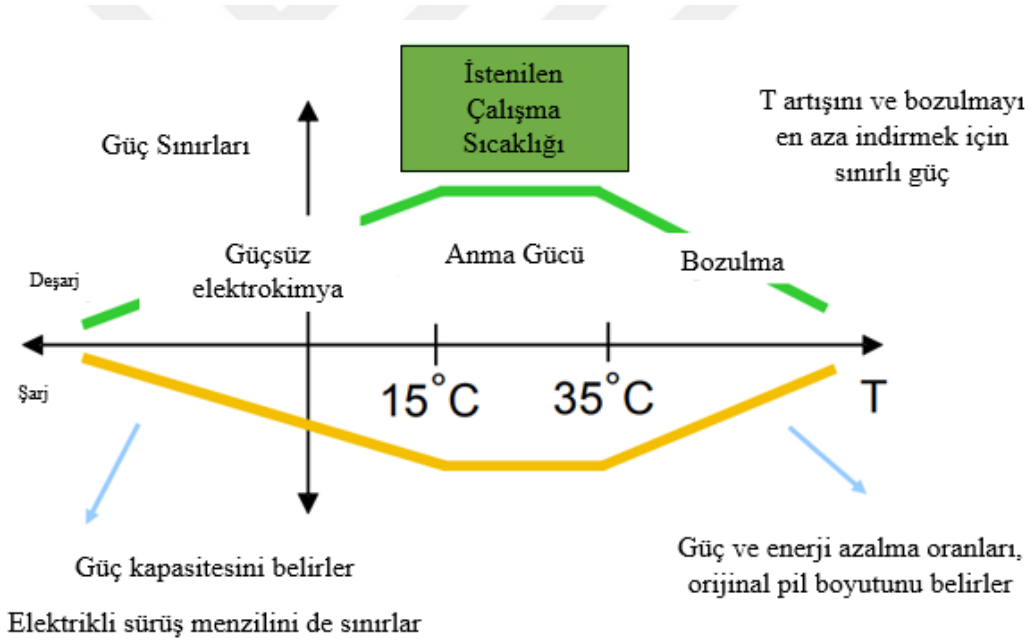
Birkaç hücrenin bir araya gelmesiyle modüller oluşur. Ancak, her hücre arasında iç direnç, kapasite ve potansiyel fark gibi değişkenlikler bulunması kaçınılmazdır. Bu değişkenlikler, hücrelerin şarj veyadeşarj anında farklı tepkiler göstermesine neden olacaktır. Bu durum, modül içerisinde sıcaklık dağılımının homojen olmamasına sebebiyet verecektir [61], [62].

Feng ve arkadaşları, batarya paketini oluşturan hücrelerin homojen olmayan sıcaklıklarının batarya performansı üzerindeki etkisini incelemek adına yaptıkları çalışmada, hücreler arasında, 5 °C'lik bir sıcaklık farkı oluştuğunda batarya kapasitesinin %1,5-2 oranında düşeceğini belirttiler [60].

Lityum iyon pillerin kapasitesi, çalışma sıcaklığının çok düşük veya çok yüksek olmasından veya hücreler arası sıcaklık farklılıklarından olumsuz etkilenirler. Bu sebeple, Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTYS)'ye ihtiyaç duyulmaktadır. BTYS'nin asıl görevi, araçta bulunan tüm hücreleri kabul görülen sıcaklık referansında tutmaktır.

## 2. BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ

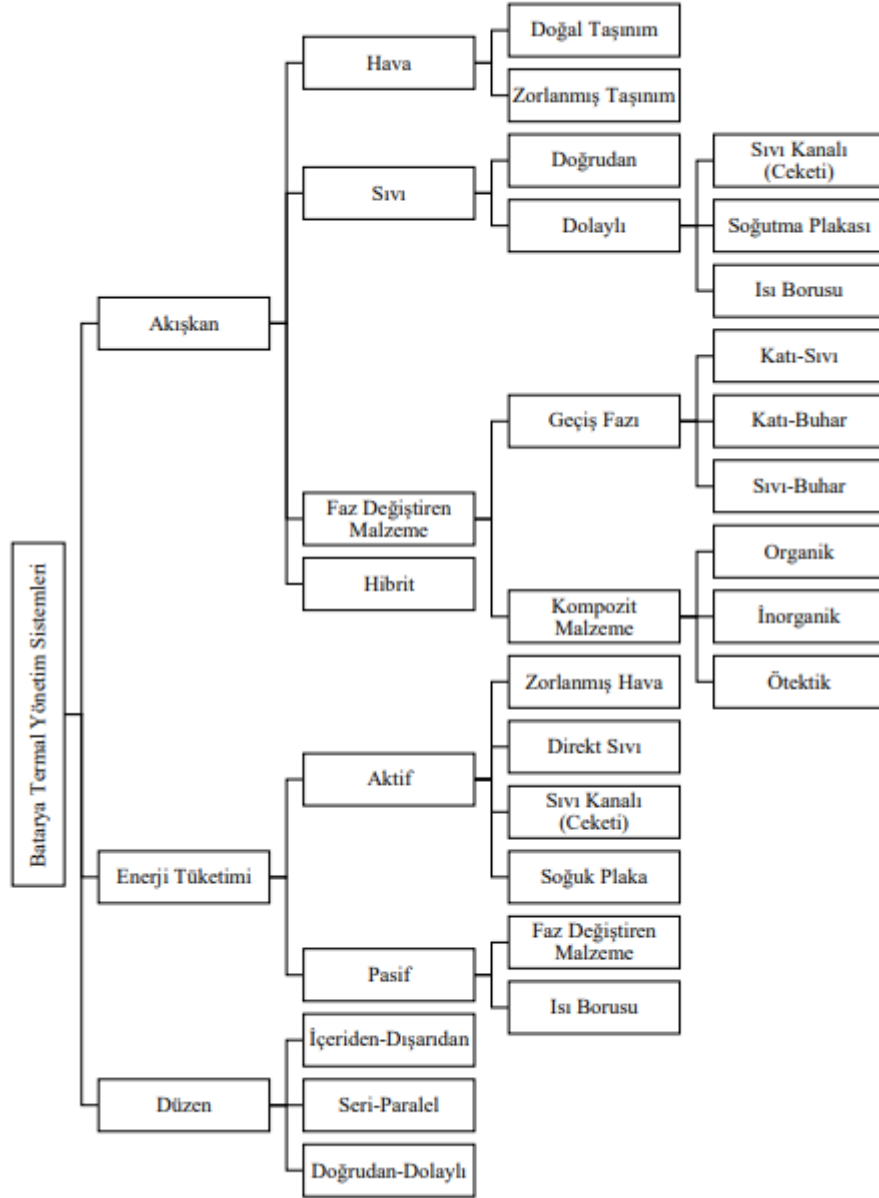
EA ve HEA'lar, lityum iyon hücrelerden oluşan batarya paketlerinden elde ettiği enerji ile çalışırlar. Her bir hücrenin performansı, batarya paketinin ve dolayısıyla aracın genel performansını doğrudan etkiler. Lityum iyon hücrelerin performansı, çevresel sıcaklığa ve çalışma sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Batarya paketinden verimli bir performans almak için, BTYS yüksek sıcaklıklarda maksimum sıcaklığı 40 °C'nin altında tutmalı ve en ideali ise 35 °C'nin altında tutmalıdır. Düşük sıcaklıklarda ise batarya paketinin sıcaklığı minimum 15 °C'nin üzerinde olmalıdır. Ayrıca, batarya modülleri ve hücreleri arasındaki sıcaklık farkı 5 °C'den az olacak şekilde tutulmalıdır [63]. Şekil 2.1'de çalışma sıcaklığının pil performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir [64].



Şekil 2.1. Sıcaklığın pilin boyutu, ömrü ve dolayısıyla maliyeti üzerindeki etkileri [64].

BTYS'nin temel amacı, batarya paketinin çalışma sıcaklığını istenilen aralıkta tutmaktır. Ayrıca, hücreler arasındaki sıcaklık dağılımını eşit tutarak farklı elektrokimyasal performans ve şarj/deşarj tepkilerine engel olur. BTYS değişken sıcaklıkların görüldüğü iklimlerde aracın performansını korur ve bataryanın güvenli kullanımını sağlar. EA ve HEA'ların bataryalarının sıcaklığını kontrol etmek ve batarya paketlerinde performans, ömür ve güvenlik açısından oluşabilecek olumsuz durumları gidermek amacıyla farklı

termal yönetim sistemleri geliştirilmiştir. BTYS, Şekil 2.2’de detaylı olarak gösterildiği üzere, soğutma sisteminde kullanılan akışkan, soğutma sistemi tasarımı ve tüketilen enerji çeşidine göre sınıflandırılır [61], [65].



Şekil 2.2. Batarya termal yönetim sisteminde kullanılan akışkanların ve uygulama bakımından farklı tasarımların sınıflandırılması [61], [65].

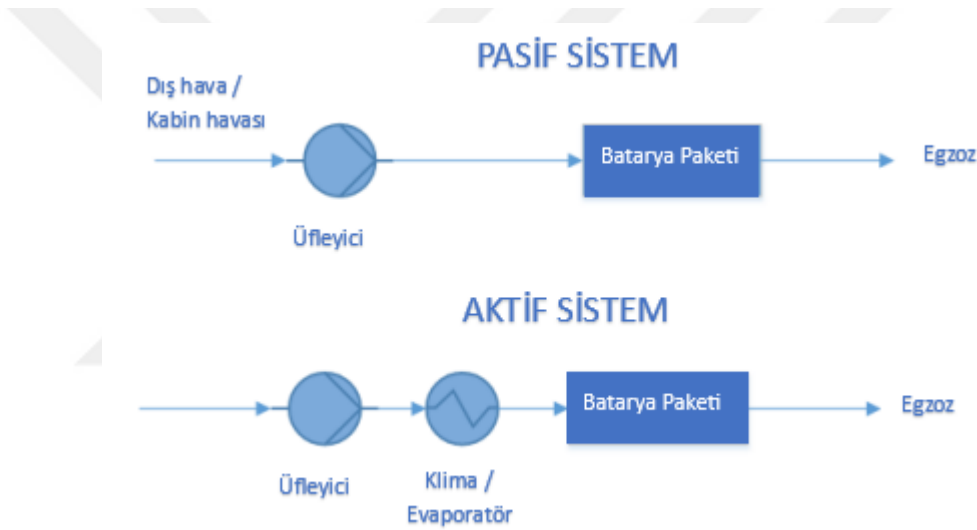
## 2.1. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1.1. Hava Soğutmalı BTYS

Hava ile soğutma sisteminin, soğutma çevrimine gerek duymaması, montaj kolaylığı ile

üretim sürecini kolaylaştırması, bakım maliyetinin az olması, hafif yapısı ile düşük enerji tüketimine sahip olması ve sızıntı gibi riskleri olmadığından güvenli bir seçenek olması gibi üstünlükleri bulunmaktadır. Ancak, hava ile soğutma sistemi, havanın ısı kapasitesinin düşük olması nedeniyle bazı sınırlamalara sahiptir. Hücrenin ısısını hızla arttıran uzun süreli veya yüksek şarj/deşarj işlemleri, sıcaklığın çok yüksek olduğu iklimler ve tahmin edilemeyen hücre arızası veya termal kaçak gibi zorlu şartlar sistemin kullanımını sınırlandırmaktadır [66].

Bu sistemde, ısı aktarımı hava ile sağlanır. Pasif sistemde, atmosferden alınan hava fan vasıtasıyla batarya paketine gönderileceği gibi, aktif sistemde hava, araç iklimlendirme sisteminin parçası olan evaporatöre yönlendirilir ve burada işlendikten sonra batarya paketine gönderilir [62].



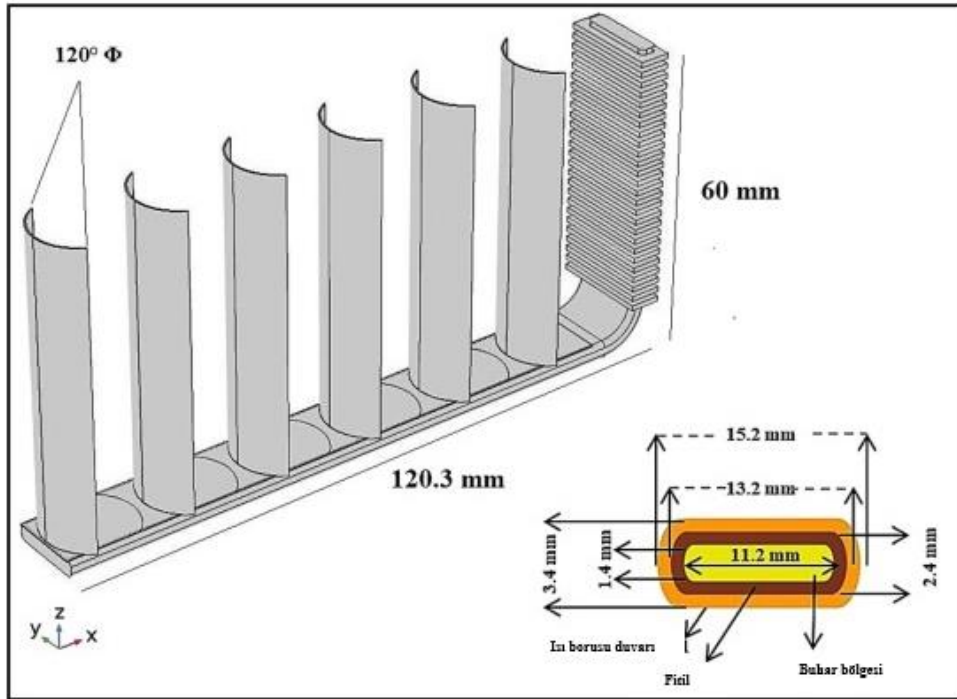
Şekil 2.3. Hava soğutmalı sistem (pasif ve aktif) [62].

Wang ve arkadaşları, farklı soğutma tekniklerini ve özellikle hava soğutma yöntemini incelediler. Üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile değişkendeşarj oranları ve sıcaklıklarda bataryaların termal davranışlarını simüle edip karşılaştırmışlardır. 18650 model 5x5 lityum iyon pilin kullanıldığı analizlerde, ortam sıcaklığının 35 °C'nin üzerinde olduğu durumlarda, hava soğutma sisteminin hücreyi 40 °C'nin altına düşüremediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, ortam sıcaklığı fark etmeksizindeşarj oranının 3C'nin üzerinde olduğu durumlarda cebri hava soğutma sisteminin etkisiz kaldığını ve yüksek enerji tüketimi gerektiren hava akışına ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir [67].

Zhao ve arkadaşları, EA ve HEA'larda uygulanan yenilikçi hava soğutmalı BTYS

tasarımlarını incelemişlerdir. Hava soğutmalı BTYS'den en iyi verimi alabilmek için en çok tercih edilen yöntemin soğutma kanalı tasarımında yapılan yenilikler olduğunu belirtmişlerdir. Fin soğutucu ve kanatçıklarda yapılacak iyileştirmelerin yerel türbülansa artış sağlayacağı, ayrıca geliştirilmiş termal malzemelerinde kullanılmasıyla soğutma veriminin artacağını belirtmişlerdir. Ancak, çok sıcak iklimlerde, aşırı şarj veya deşarj durumlarında veya tahmin edilemeyen ve pilde aşırı ısınmaya neden olan pil arızalarında hava soğutmalı BTYS'nin tek başına yeterli olamayacağı ve hibrit BTYS kullanımının gerekli olduğu sonucuna varmışlardır [66].

Behi ve arkadaşları, hava soğutma sisteminin performansını test etmek için 24 adet silindirik lityum iyon hücrenin oluşturduğu batarya modülünü hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile simüle etmişlerdir. Pasif hava soğutma sistemi ile karşılaştırıldığında, bakır levhalı ısı borusu, ısı borusu ve aktif hava soğutma sisteminin termal kapasiteyi sırasıyla %73,4, %66,5 ve %39,2 iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, hücre modülünün maksimum sıcaklığının, pasif hava soğutma sistemi ile karşılaştırıldığında bakır levhalı ısı borusu, ısı borusu ve aktif soğutma sistemi için sırasıyla %42,7, %42,1 ve %34,5 azaldığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada Şekil 2.4'te şematik gösterimi verilen bakır levhalı ısı borusu yönteminin en iyi sonucu verdiği kanaatine varmışlardır [68].

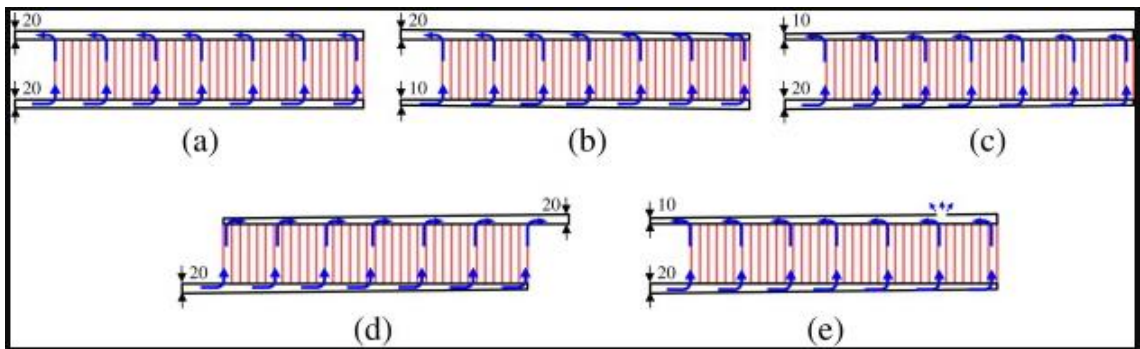


Şekil 2.4. Bakır levhalı ısı borusu soğutma sistemi [68].



Zhao ve arkadaşları, hava soğutma sisteminin BTYS performansını araştırmışlardır. Hücrelerde oluşacak en yüksek sıcaklık ve hücreler arası sıcaklık farklılıkları üzerine detaylı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Batarya paketinin soğutulması için, hücreler arası levhali ve levhasız farklı havalandırma çeşitleri, değişken hücreler arası boşluk ölçüleri ve farklı ortam sıcaklıklarını hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paketi olan FLUENT 14.0 ile simüle etmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, komşu hücreler arası levhali soğutma tipi, hava akış hızı yükseldikçe komşu hücrelerde ortaya çıkan ters hava akışını oluşturmuş ve bu durumun performansı olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Hücreler arası boşluk çok küçük olduğunda maksimum sıcaklıkta ve hücreler arası sıcaklık farkında yüksek artış gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Ortam sıcaklığı çok yüksek olduğunda ve giriş sisteminin bu sıcak havayı kullanması durumunda, hücrelerde sıcaklık artışının çok hızlı gerçekleşeceğini ve termal kaçak eğiliminin artacağını bildirmişleridir [69].

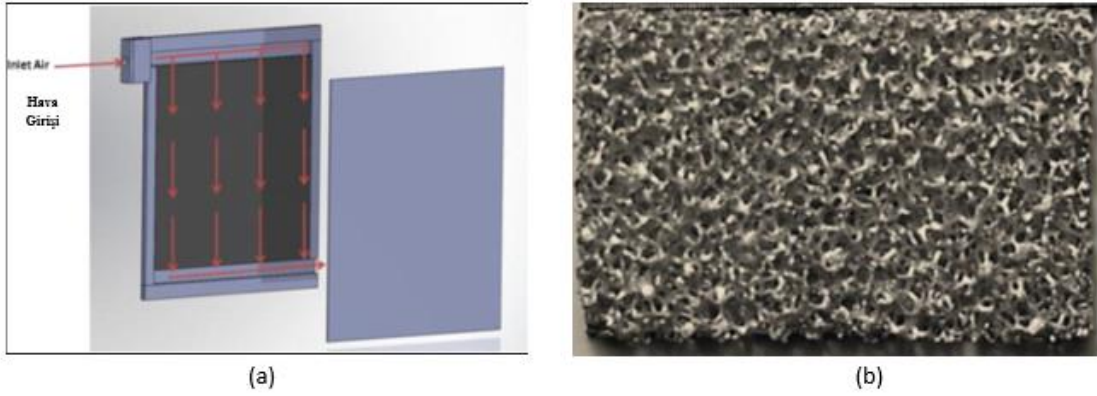
Park, HEA'larda lityum iyon pillerin soğutulması için farklı hava akış tasarımlarını incelemiştir. Pillerin soğutulması için sayısal yöntemlerle analiz ve çözümlenmiştir. Park, simülasyon için 270 V ve 1400 Wh kapasiteye sahip iki sıralı olacak şekilde 72 hücre kullanmıştır. Şekil 2.5'te gösterilen beş çeşit hava akış tasarımı için aynı şartlarda olacak şekilde analizler gerçekleştirmiştir. Yapılan analizler sonucunda konik hava kanalı tasarımı ve basınç düşürme havalandırma çıkışının kullanıldığı Şekil 2.5 (e) tasarımının en iyi performansı verdiğini gözlemlemiştir. Tasarım üzerindeki havalandırma deliğinin, giriş borusundaki girdapları belirgin miktarda azalttığı sonucuna varmıştır. [70].



Şekil 2.5. Hava akış kanallarının geometrik tasarımları; (a) tip 1, (b) tip 2, (c) tip 3, (d) tip 4, (e) tip 5, mavi oklar hava akış yönünü göstermektedir [70].

Giuliano ve arkadaşları, hava soğutmalı sistemin BTYS performansını arttırmak üzere alüminyum köpük bazlı ısı eşanjör plakaların kullanıldığı bir sistemi tasarlamışlardır. Bu sistemi yüksek kapasiteli lityum-titanat pilleri soğutmak için kullanmışlardır. Şekil 2.6'da

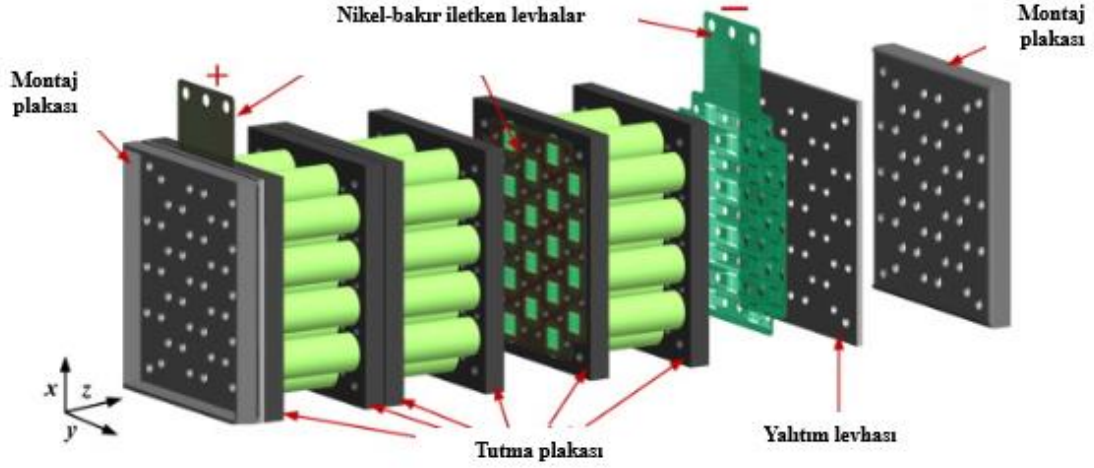
görseli verilen tasarımda hava akış yönünü kontrol etmek, pili hasarlara karşı korumak ve alüminyum köpüğün muhafazası için alüminyum kaplama üretmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, 50 Ah kapasiteye sahip lityum-titanat hücrelerin, 200 A'da şarj ve deşarj çevrimleri etkisinde bile ortam sıcaklığının sadece 10 °C üzerinde sınırlandırıldığını tespit etmişlerdir. Bu çalışma sonucunda tasarladıkları soğutma sisteminin, bu hücrelerin termal yönetimi için yeterli geleceği kanaatine varmışlardır [71].



Şekil 2.6. Hava soğutma sistemi tasarımı, (a)'da siyah panel alüminyum köpüğü göstermekte ve kırmızı oklar hava giriş ve akış yönünü göstermektedir, (b)'de ise %8 yoğunluğa sahip alüminyum köpük gösterilmektedir [71].

Yu ve arkadaşları, hava soğutma sistemi ile Şekil 2.7'de gösterilen kademeli tasarıma sahip lityum-iyon pil paketinin termal davranışlarını incelemek için deneysel çalışma yapmışlardır. Kademelerle ayrılmış pil paketlerinin, doğal ve zorunlu hava soğutma işlemleri ile şarj ve deşarj anında gösterdikleri termal davranışlarını gözlemlemişlerdir. Doğal hava soğutma yönteminde 1C deşarj hızında hücrede maksimum sıcaklığın yaklaşık 49 °C olduğu ve bu sıcaklığın lityum-iyon pilin normal çalışma sıcaklığı aralığından yüksek olduğunu belirtmişlerdir. 1C deşarj hızında zorunlu hava soğutma yöntemi ile yapılan deneyi, üç farklı hava akış hızı ( $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ve  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ile gerçekleştirmişlerdir. Deney sonucunda hücrede meydana gelen sıcaklıkları hava akış hızlarına göre sırasıyla 31,8 °C, 30,5 °C ve 30,1 °C olarak ölçmüşlerdir. Hava akış hızının daha da artırılmasının soğutma yönünden hücre üzerinde etkili bir metot olmayacağını belirtmişlerdir. Hücreler arasındaki maksimum sıcaklık farkları ise sırasıyla 2,7 °C, 2,0 °C ve 2,2 °C olarak ölçülmüş ve en iyi sonucu  $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 'lik hava akış hızının sağladığını gözlemlemişlerdir. Bu deneysel çalışma sonucunda en uygun termal soğutma yönteminin  $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 'lik hava akış hızına sahip zorlamalı hava soğutma sistemi olduğu kanaatine

varmışlardır [72].



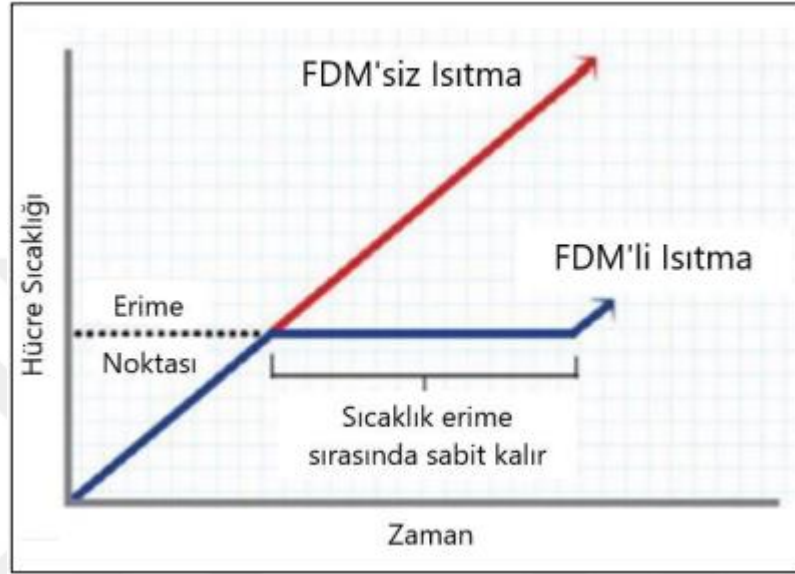
Şekil 2.7. Kademeli olarak tasarlanmış pil takımı [72].

Hava tarafından soğutma sağlanılan BTYS, basit bir tasarıma sahiptir ve batarya paketine pilin montajı kolay bir şekilde tasarlanabilir. Ancak, havanın termal iletkenliğinin sınırlayıcı etkisi nedeniyle pil hücrelerinden ısı emilimi daha yavaş gerçekleşir. Bununla birlikte şarj/deşarj hızının yüksek seviyelerde olması durumunda (5C-10C), hücreleri soğutmak için çok daha yüksek hava akış hızına gereksinim duyulur ki bu da BTYS'nin maliyetinin önemli ölçüde artmasına neden olur [73].

### 2.1.2. Faz Değiştiren Malzeme ile BTYS

Aktif BTYS'ler, pil paketinden soğutucu akışkanın akışını sağlamak için güç gerektiren cihazlar olan fanlar, kompresörler ve pompalar kullanırlar. Pasif BTYS'ler ise, sistemin parametrelerini değiştirerek gerekli soğutma yükünü sağlayan ve güç gerektiren cihazlara veya kontrol sistemlerine ihtiyaç duymayan başka bir yönetim sistemi türüdür. FDM (faz değiştiren malzeme) tabanlı BTYS, pasif soğutma sistemlerinin bir çeşididir. Malzeme faz değişimi gerçekleştirirken çevreden ısı alır ve gizli ısı maksimum değere ulaşana kadar bu süreç sürer. Malzeme ısı alırken kendi sıcaklığı değişmez. Malzeme erime noktasında sabit sıcaklıkta iken çevreye büyük miktarda ısı transfer eder. Hava ve sıvı bazlı sistemler pil soğutma yöntemleri arasında en etkin olanlar olarak görülse de yüksek enerji tüketimi ve sistem karmaşıklığı gibi olumsuz yönleri vardır. Buna karşılık, pasif FDM tabanlı sistemler, büyük miktarda termal enerji depolama ve enerji tüketmeme gibi avantajlara sahiptir. Son yıllarda FDM tabanlı BTYS üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, bu tür sistemlerin performansı deneyler ve simülasyonlar ile

incelenmiştir. FDM tabanlı BTYS'nin olumlu yönlerine rağmen, faz değişimi esnasında termal iletkenliğin düşük olması ve hacim değişiklikleri gibi sorunları vardır. FDM'nin termal iletkenliğini artırmak için birçok çalışmada, FDM'ye yüksek termal iletkenliğe sahip bir malzeme katılmıştır. Bu malzemeler arasında karbon fiberler, karbon nanotüpler, grafen, metalik köpük/ağ ve metal parçacıklar bulunur [74], [75]. Şekil 2.8'de FDM'nin nasıl çalıştığı gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Faz değiştiren malzemenin çalışma prensibi [62], [76].

Organik malzemeler, özellikle parafin mumu, batarya termal enerjisi yönetiminde sıklıkla tercih edilen FDM türlerindedir. Bunun sebebi, yüksek gizli ısı kapasitesine, düşük maliyete, kimyasal kararlılığa ve korozyona karşı dirence sahip olmalarıdır. Ancak bu malzemelerin ısı iletkenliğinin düşüklüğü, sızdırma riski ve yanma tehlikesi gibi dezavantajları da vardır [63].

Zhang ve arkadaşları, kompozit (parafin, geliştirilmiş grafit ve epoksi reçine) FDM'lere ısı transferini arttırmak için farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %25) alüminyum nitrit katmışlardır. 18650 LiFEPO<sub>4</sub> pil modülü üzerinde yapılan deneylerde kompozit FDM'lere %20 alüminyum nitrit katmanın en iyi seçim olduğu kanısına varmışlardır. Ayrıca, hava soğutmalı bir pil modülüne göre, 3C gibi yüksek deşarj oranında maksimum sıcaklığın %19,4 düştüğünü ve sıcaklık farkının 1 °C'nin altına indiğini belirtmişlerdir [77].

Zhang ve arkadaşları, 1965140 dikdörtgen pil modülünün termal yönetimi için, kaolin, geliştirilmiş grafit ve parafin karışımından oluşan bir batarya termal yönetim sistemi

geliştirmişlerdir. Çeşitli oranlarda üretilen üçlü karışımların termal özellikleri incelenerek, %10 ağırlıkta geliştirilmiş grafit ve %10 ağırlıkta kaolin içeren karışım termal yönetim sistemi için seçilmiştir. Deney sonucunda 4C deşarj oranında bile batarya paketinin sıcaklığını %25,77 oranında düşürdüğünü ve hücreler arasındaki sıcaklık farkının faz değişiminin başlamasıyla büyük ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir [78].

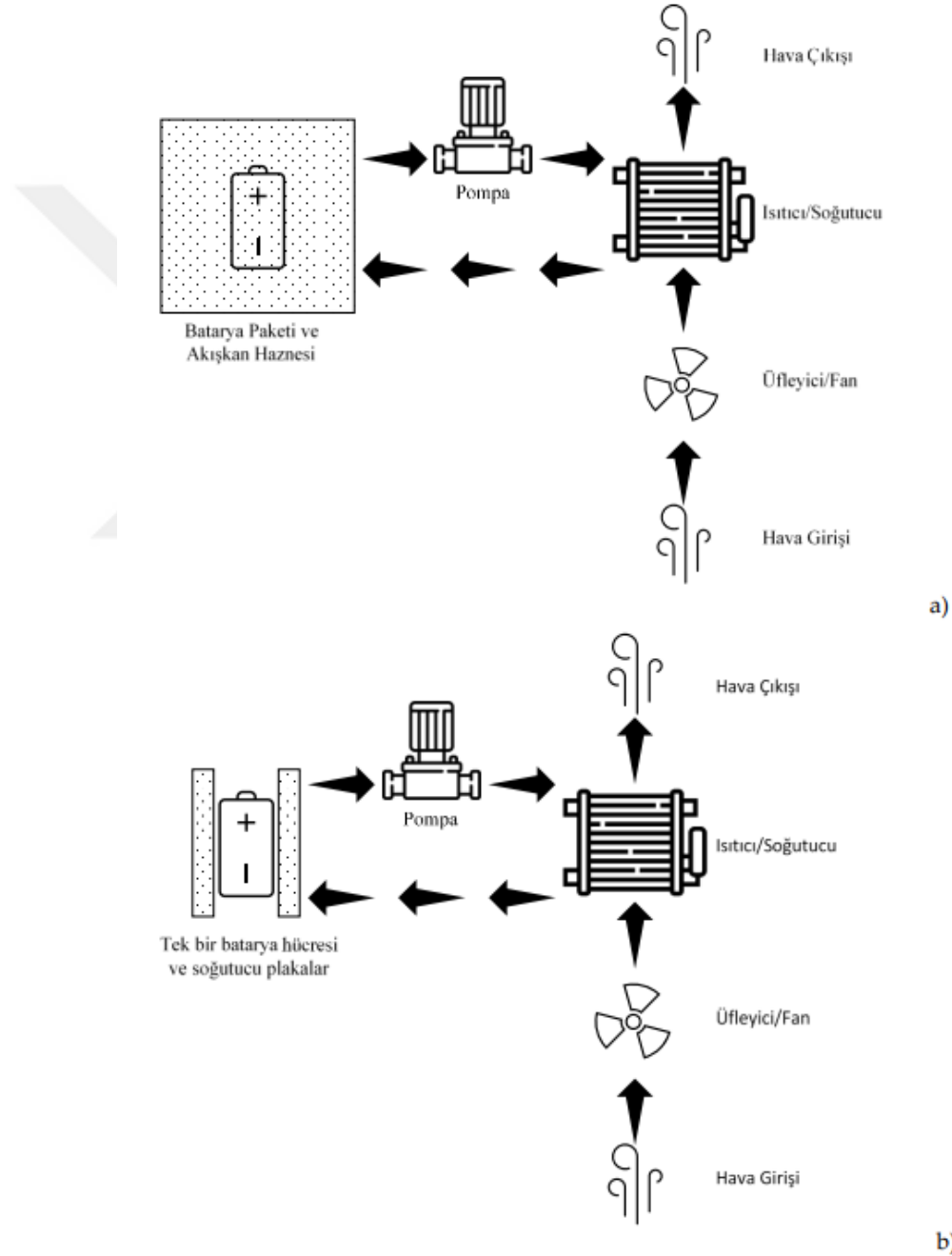
Zhang ve arkadaşları, pil modülü için yeni bir alev geciktirici kompozit FDM geliştirmişlerdir. Bu FDM'ler parafin, geliştirilmiş grafit, amonyum polifosfat, kırmızı fosfor ve epoksi reçine gibi malzemelerden oluşmuştur. Bu FDM'lerin alev geciktirici özelliklerini makro ve mikro ölçekte incelemişlerdir. Amonyum polifosfat/kırmızı fosfor oranı 23/10 olan FDM'lerin en yüksek alev geciktirme kapasitesine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca geliştirilen bu FDM ile 18650 pil modülü için hava soğutmalı ve saf parafin ile termal kapasite karşılaştırması yapmışlardır. Deney sonucunda, geliştirdikleri FDM sisteminin, 25 °C'de ve 3C deşarj oranında, tepe sıcaklığını hava soğutmalı sistem ve saf parafine göre sırasıyla %44,7 ve %30,1 oranında düşürdüğünü ve sıcaklık farkını 1,36 °C'ye indirdiğini belirtmişlerdir [79].

Ling ve arkadaşları, FDM'nin termal iletkenliğini arttırmak ve sıvı sızıntısını önlemek için inorganik bir FDM içeren pil termal yönetim sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde genişletilmiş grafit ile mikro ölçekte kapsülleme yöntemi ile sodyum asetat trihidrat adı verilen bir inorganik FDM kullanmışlardır. Makro ölçekli kapsülleme için organosilikon dolgu macunu olarak kullanılmış ve bu sayede tuz hidratın uzun vadeli kararlılığı artırılmıştır. Bu inorganik FDM'yi yangına dayanıklılık ve soğutma performansı açısından organik bir FDM ile karşılaştırmışlardır. İnorganik FDM'nin yanıcı olmadığı ve organik FDM'ye kıyasla termal kaçak gibi yangına neden olan durumlarda daha iyi koruma sağlayacağı sonucuna varmışlardır. Soğutma performansı karşılatırmasında ise 20 hücreli bir pil paketinde maksimum hücre sıcaklığını 52,3 °C'nin altında tuttuğunu ve hücreler arası sıcaklık farkını 4,0 °C'nin altında sınırladığı sonucunu elde etmişlerdir [80].

### **2.1.3. Sıvı Soğutmalı BTYS**

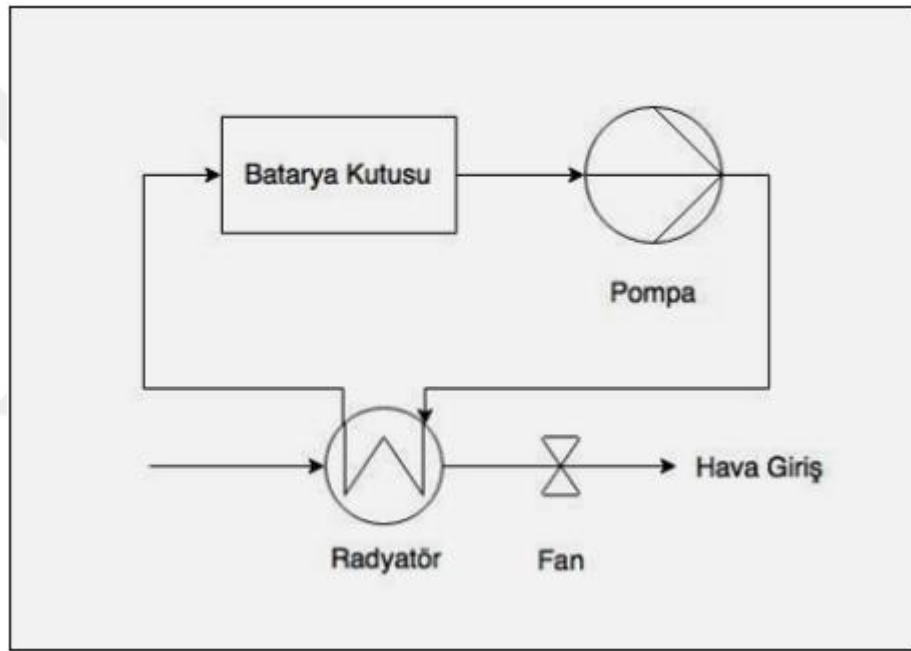
BTYS'de hava dışında, ısı transferini sağlamak için kullanılan bir diğer akışkan sıvıdır. Soğutma sisteminde kullanılan sıvı, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, uygulama yöntemine göre iki gruba ayrılır. Bu yöntemlerden birincisi pil hücrelerinin doğrudan temas ettiği dielektrik sıvılardır. İkinci yöntem ise pil hücreleri ile dolaylı olarak temas sağlayan iletken sıvılardır. Kullanılan sıvı çeşitlerine bağlı olarak soğutma sistemi tasarımları da

farklılıklar gösterir. Doğrudan temaslı sıvı yönteminde en yaygın kullanılan yöntem modülleri mineral yağ içine batırmaktır. Dolaylı temaslı sıvı yönteminde ise, modülü çevreleyen ceket, pillerin yerleştirileceği soğutma veya ısıtma amaçlı su kanalları gibi pek çok farklı tasarımlara sahiptir. Bu iki yöntem arasında, dolaylı temaslı sıvı sisteminin doğrudan temaslı sıvı sistemine göre daha çok tercih edilmesinin sebebi, pil modülünün çevresi ile arasında çok daha iyi izolasyon sağlaması ve bunun sonucunda güvenlik performansını istenilen düzeyde sağlaması nedeniyledir [62].



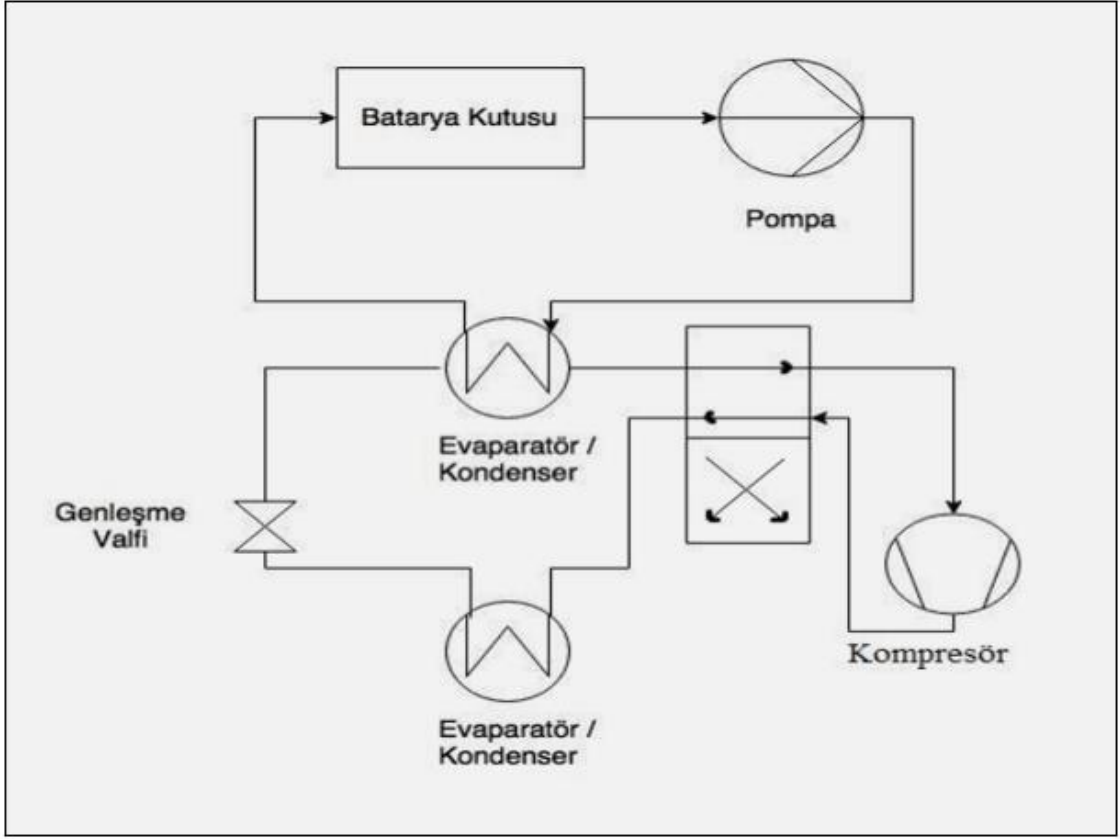
Şekil 2.9. Sıvı soğutmalı sistem a) Doğrudan temaslı, b) Dolaylı temaslı [61].

Sıvı soğutmalı sistem, soğutma amaçlı kullanılan ısı emicilerin çalışma şartlarına göre aktif veya pasif sistemler olarak sınıflandırılmaktadır. Pasif sıvı soğutma sisteminde soğutma amaçlı ısı emici olarak radyatör kullanılır ve bu sistemde ısıtma özelliği bulunmaz. Şekil 2.10'da pasif sıvı soğutma sistemi gösterilmektedir. Isı transferini gerçekleştiren sıvı, bir pompa vasıtasıyla kapalı bir sistem içerisinde dolaştırılır. Pil yüzeyinde ortaya çıkan ısı, sistem içerisinde sürekli döngü halinde olan sıvı tarafından emilir ve radyatör tarafından çevreye salınır. Ortam sıcaklığı ile pil arasındaki sıcaklık farkı soğutma performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Fan vasıtasıyla ısı salınımını gerçekleştiren radyatör, ortam sıcaklığının pilin sahip olduğu sıcaklığa göre çok daha yüksek olması durumunda pasif soğutma performansı yeterli olmayacaktır [62].



Şekil 2.10. Pasif sıvı soğutmalı sistem [81].

Şekil 2.11'de gösterilen aktif sıvı soğutmalı sistemde ise, iki farklı çevrim bulunur. Birincisi, soğutucu akışkanın pompa yardımıyla dolaştığı pasif sıvı soğutmalı sisteme benzerdir. İkincisi ise klima çevrimidir. Üstte yer alan ısı eşanjörü, soğutma işlemi sırasında radyatör yerine buharlaştırıcı olarak çalışır ve iki çevrimi birbirine bağlar. Isıtma işlemi sırasında ise 4 yollu valf devreye girer. Bu durumda üstteki ısı eşanjörü yoğuşturucu, alttaki ısı eşanjörü ise buharlaştırıcı olarak görev yapar [81].

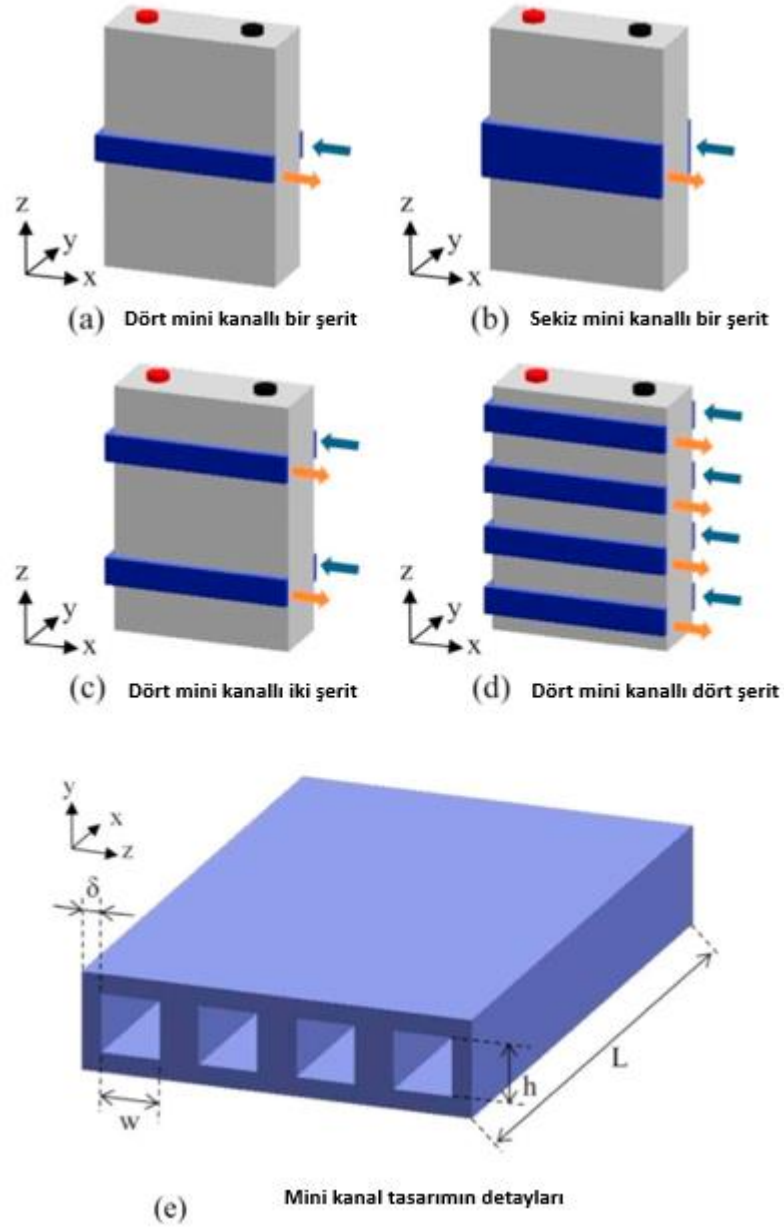


Şekil 2.11. Aktif sıvı soğutmalı sistem [81].

Sıvı soğutmalı BTYS'yi inceleyen Park ve Jung, pil hücrelerinin çevresinde doğrudan temaslı mineral yağ akışını sağladıkları bir BTYS tasarımı geliştirdiler. Bu tasarım, hava soğutmalı BTYS ile karşılaştırıldığında, pil performansında bir fark olmadığı halde, sıvı soğutmalı BTYS'nin daha az güç harcadığını gördüler. Hücre başına 7 W'lık ısı üretiminde, hava soğutmalı BTYS'nin 908 W, sıvı soğutmalı BTYS'nin ise 445 W güç tükettiğini gözlemlediler. Bu sonuçla, sıvı soğutmalı BTYS'nin daha verimli bir yöntem olduğunu belirttiler. [82].

Lan ve arkadaşları, Şekil 2.12'de gösterilen, alüminyum mini kanal tüpleri kullanarak prizmatik lityum iyon pil hücrelerinin soğutulmasını sağlayan bir tasarım geliştirdiler. Pil performansını deşarj oranlarını değiştirerek test ettiler ve 1C deşarj oranı için pil sıcaklığının en fazla 27,8 °C, hücreler arasındaki sıcaklık farkının ise 0,80 °C olduğu sonucuna vardılar. Deşarj oranını yükselttiklerinde ise pompa gücünü arttırarak maksimum sıcaklık artışını ve hücreler arasındaki sıcaklık farkını azaltabileceklerini belirttiler [83].

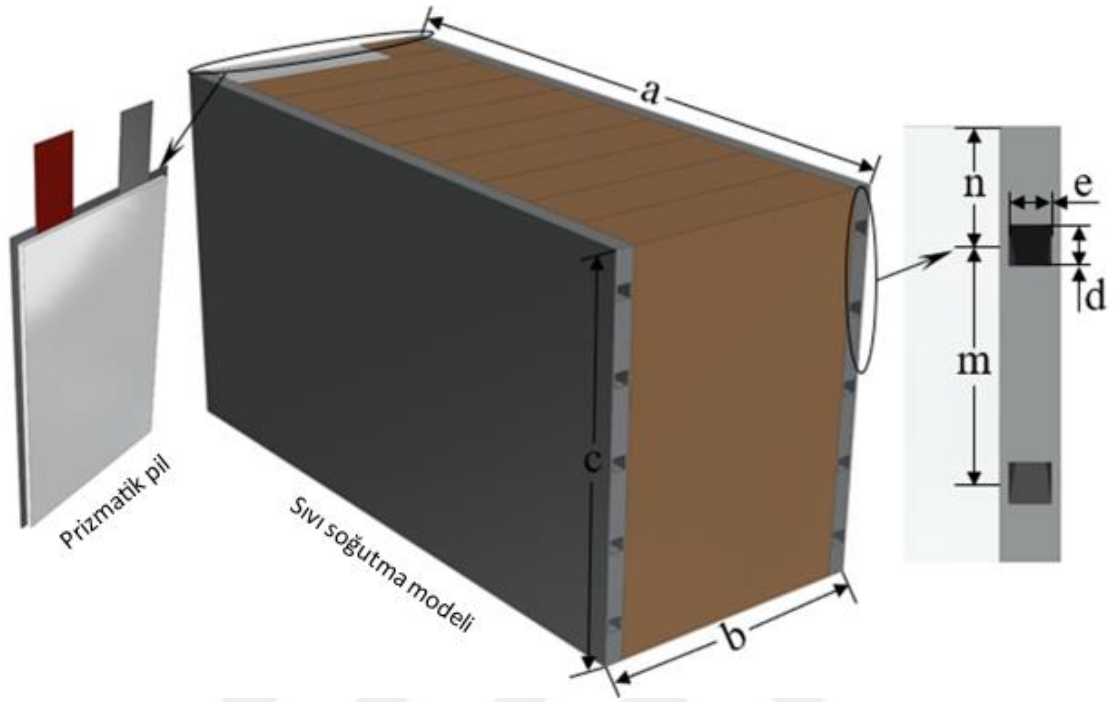




Şekil 2.12. Mini kanallı soğutma sisteminin çeşitli tasarımları: (a) dört kanallı tek şerit, (b) sekiz kanallı tek şerit, (c) dört kanallı iki şerit, (d) dört kanallı dört şerit, (e), kanal tasarımı [83].

Ding ve arkadaşları, sıvı soğutma sisteminin soğutma kabiliyetini etkileyen yapısal parametreleri belirlemek ve ölçmek için Şekil 2.13'te gösterilen değişken olarak kanal sayısı, kanal en-boy oranı ve kanal girişlerine sahip 10 mm kalınlığında kare kanallı bir soğutma modeli geliştirdiler. Kanal sayısını arttırmanın hücrelerdeki maksimum sıcaklık ve hücreler arasındaki sıcaklık farkı üzerinde çok etkili olduğunu ancak bu durumun kısıtlı olduğunu belirttiler. Kanalın en-boy oranını yükseltmek, hücrelerdeki maksimum sıcaklığı ve sıcaklık farkını düşürerek en yüksek sıcaklığı çıkış bölgesine

kaydırabileceğini belirttiler. Fakat en-boy oranını çok fazla arttırmamanın hücreler arasındaki sıcaklık farkını büyütebileceği sonucuna vardılar [84].

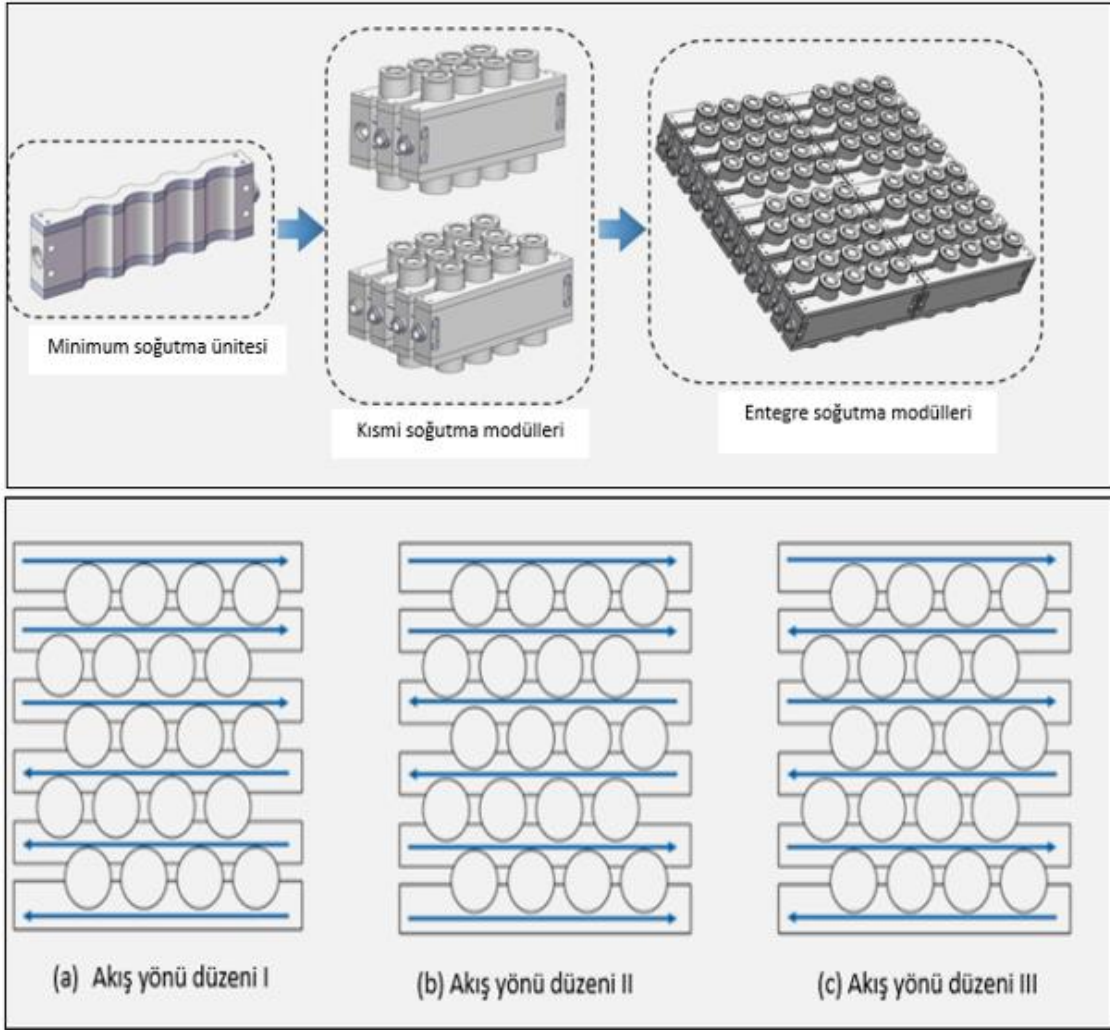


Şekil 2.13. Sıvı soğutma sistemi modeli [84].

Youfu ve arkadaşları, silindirik pillerin eğimli yüzeyi ile soğutma tüpleri arasındaki ısı aktarım kapasitesini arttırmaya yönelik çalışmada, grafen oksit (GO) ile güçlendirilmiş silika jel (GO-SG) hazırlamışlardır. Hazırladıkları jeli silindirik hücreler ile su soğutma tüpleri arasındaki boşluğa yerleştirmişlerdir. 2C ve 3C'lik hızlı şarj işlemleri sonunda, GO-SG içeren su soğutma tasarımının, maksimum sıcaklığı sırasıyla 37,7 ve 42,0 °C'ye düşürdüğünü ve sıcaklık farkını 4 ve 5 °C'nin altında tuttuğunu belirtmişlerdir [85].

Wang ve arkadaşları, Şekil 2.14'te gösterilen, piller için yeni bir modüler sıvı soğutmalı sistem tasarlamışlardır. Bu modüler tasarımda soğutucu akış hızı ve soğutma sıvısı akış modu (seri ve paralel) değişkenlerinin, pil hücrelerinin termal davranışına etkisini hem sayısal simülasyon hem de deneysel çalışma ile incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, soğutucu akışkanın hızının arttırmanın belli bir akış aralığında pil hücrelerinin maksimum sıcaklığını ve hücreler arasındaki sıcaklık farkını önemli ölçüde iyileştirebildiğini gözlemlemişlerdir. Ancak, soğutucu akışkan hızının belli bir değere ulaştığında soğutma etkisi üzerinde etkisini yitirdiğini belirtmişlerdir. Akış modu çalışmalarında ise seri soğutmaya göre, paralel soğutmanın pil hücrelerinin sıcaklık düzgünlüğünü iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca en iyi sonucu akış yönü düzeni III ile aldıklarını ve

maksimum sıcaklığın 35,74 °C'ye sıcaklık farkının ise 4,217 °C'ye düştüğünü belirtmişlerdir [86].



Şekil 2.14. Sıvı soğutma modülü ve akış yönü düzenleri [86].

Panchal ve arkadaşları, prizmatik lityum-iyon pil hücresi üzerine konumlandırılan mini kanal soğutma plakalarında su soğutma yöntemleri için sıcaklık ve hız dağılımlarını hem deneysel hem de sayısal (ANSYS-RANS yöntemini kullanarak) tekniklerle karşılaştırmışlardır. 1C ve 2C deşarj oranlarında ve 5 °C, 15 °C ve 25 °C gibi farklı çalışma sıcaklıklarında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda, C oranları arttıkça mini kanal soğutma plakalarındaki sıcaklık dağılımlarının arttığını, deşarj oranlarını (1C ile 2C arasında) yükselttikçe pil yüzeyindeki ölçülen sıcaklıkların arttığını ve elektrotlara daha yakın olan ölçüm sensörlerinin pilin merkezindeki sensörlere oranla daha yüksek sıcaklık verileri verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca simülasyondan elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır [87].

Zhao ve arkadaşları, bir EA pil paketinin termal yönetimi için kanallı sıvı soğutma sisteminin performansını değerlendirmek üzere, 71 adet 18650 tipi NMC pil içeren pil modülü için termal bir model geliştirmişlerdir. Bu model ile her bir hücrenin ısı üretimini deneysel olarak belirlenen bir orana göre yayarak hücreler arasındaki ısı iletimini ve hücrelerden kanal duvarına olan ısı transferini detaylı bir şekilde hesaplamışlardır. Pil modülünün termal performansının deşarj/şarj C oranına, sıvı akış hızına, pil ve kanal arasındaki temas alanına ve komşu piller arasındaki temas alanına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Deşarj/şarj C oranının artması pil modülünde sıcaklık artışına ve düzensizliğine neden olurken sıvı akış hızının artırılmasının bu olumsuzluğu azalttığını belirtmişlerdir. Pil ve kanal arasındaki temas alanını arttırmanın maksimum sıcaklığı düşürdüğünü, ancak sıcaklık düzensizliğini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Komşu piller arasındaki temas alanını arttırmanın etkisinin yetersiz kaldığı sonucuna varmışlardır. Kanallı sıvı soğutma sistemimin uygun akışkan akış koşulları altında çalışması ile (örneğin giriş hızı 0,5 m/s ve sıvı giriş sıcaklığı 25 °C), pil modülündeki maksimum sıcaklığı ve sıcaklık düzensizliğini 5C deşarj/şarj işlemleri altında bile sırasıyla 35 °C ve 1 °C'nin altında tutulabileceğini belirtmişlerdir [88].

Pil soğutma performansını arttırmak, su ve etilen glikol gibi sıvı temelli soğutucu akışkanların, metallere kıyasla zayıf ısıl iletkenliği sahip olması nedeniyle sınırlıdır. Bu nedenle, bilim insanları, pil sıcaklıklarını istenen aralıklara getirmek için çeşitli deneyler yapmışlardır. Bunlardan biri, sıvı soğutuculara mikro veya nano boyutlu metal parçacıklar katmak ve böylece ısı iletkenliğini arttırmaktır. Ancak, bu yöntem bakım zorluğu, yüksek kurulum maliyetleri ve karmaşık sistem dizaynları gibi dezavantajlara sahiptir. Bu, bilim insanlarının ısyı daha iyi kontrol etmek için yeni yöntemler aramalarına neden oldu. Araştırmacılar, nano boyutlu parçacıkları sıvı soğutucularla, uygun karıştırma yöntemleri kullanarak birleştirmiş ve elde ettikleri homojen karışım (nanoakışkan) ile ısı transfer performansını iyileştirmeyi önermişlerdir [63].

#### **2.1.4. Nanoakışkan Bazlı BTYS**

Metal ve ametallerin ısı aktarımında daha yüksek iletkenlik katsayısına sahip olmaları, ısı aktarım yöntemlerinde sıvı akışkanların yerine metal veya ametal sıvı karışımları kullanılması ihtiyacını doğurmuştur. Ancak yapılan araştırmalar, belirli bir süre sonunda katı parçacıkların yer çekimi etkisiyle dibe çökme eğiliminde olması istenmeyen durumlara sebebiyet vermiş ve sistemde istenilen performansı olumsuz yönde

etkilemiştir. Sonrasında yapılan çalışmalar neticesinde, parçacık boyutlarının nanometre düzeyine indirgenmesi çökeltme problemini sonlandırmıştır. Nanometrik boyutlardaki partiküllerin ısı aktarım katsayısı yüksek bir temel akışkan içerisinde dağıtılmasıyla elde edilen yenilikçi malzemeler nanoakışkan olarak adlandırılmaktadır [89].

#### 2.1.4.1. Nanoakışkanların Özellikleri

Isı aktarım sistemlerinde performansı arttırmak adına çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Isı aktarım yöntemlerinin iyileştirilmesi için geleneksel ısı aktarım sıvılarının ısı iletkenliğini yükseltme yoluyla da arzu edilen gelişmeler elde edilebilir. Geleneksel baz sıvıların ısı aktarım katsayıları katı parçacıklardan daha düşük seviyededir. Baz sıvıların içerisine karıştırılacak küçük ebatlardaki katı parçacıklar ile elde edilen yeni karışımın ısı iletim katsayısı, geleneksel baz sıvıdan daha yüksek olacaktır. Mili ve makro ebatlardaki bu parçacıklar ile elde edilen karışım çok eski çalışmalardan beri bilinse de sahip olduğu dezavantajlar sebebi ile araştırmacıların tercih etmediği yöntem olmuştur [89]. Bu dezavantajlar;

- Nanoakışkan için kullanılan katı parçacıkların büyüklüğü nedeniyle zaman içinde daha ağır olduklarından dolayı sıvının dibine çökerek bir topak oluşturur ve bu da performansı düşürür.
- Katı parçacıklar makro ebatlarda olduğundan sistemde tıkanmalara neden olabilir.
- Sistemde akış hızını ve basıncı sağlamak için pompa kapasitesi artırılmalıdır, bu da ek maliyete sebebiyet verir.
- Sistemde kullanılan borularda deformasyon oluşabilir.

Teknolojik gelişmeler ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesiyle, 100 nm'den küçük ebatlarda elde edilen katı parçacıkların baz sıvılarla karıştırılmasıyla oluşturulan nanoakışkanlar, ısı aktarım sistemlerinde performansı yükselten etkileyici bir karışım haline gelmiştir. Nanoakışkanların ısı aktarım sistemlerine sağladığı avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

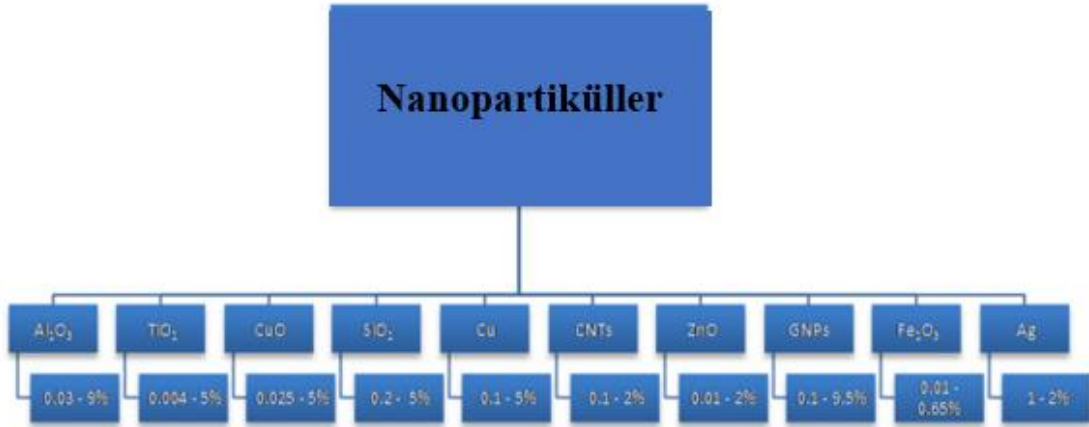
- Nanoakışkanların ısı iletkenliği baz sıvılardan yüksek olduğundan sistemin ısı aktarım performansını belirgin bir şekilde artırır.
- Sistemde ısı aktarım ve ısı iletim performansı artacağından, daha ekonomik maliyetlerle üretilebilecek sistemler tasarlanabilir.

- Katı parçacıkların nanometre ebatlarında olması dibe çökme hareketini önemli ölçüde azaltacaktır.
- Katı parçacıkların nanometre ebatlarında olması sistem yüzeyinde oluşacak deformasyonları azaltacaktır.
- Ayrıca katı parçacıkların nanometre ebatlarında olması kılcal kanallarda meydana gelebilecek tıkanıklık ihtimallerinin de önüne geçecektir.

Yapılan yenilikçi çalışmalarda, araştırmacıların sıklıkla kullandığı temel akışkanlar ve nanopartiküllerin yoğunluk aralıkları Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da gösterilmiştir [90].



Şekil 2.15. Yaygın kullanılan temel sıvılar [90].



Şekil 2.16. Araştırmacıların yaygın olarak kullandıkları konsantrasyon aralıkları [90].

#### 2.1.4.2. Nanoakışkanların Üretim Yöntemleri

Katı parçacıkların baz sıvılar ile karıştırılmasıyla nanoakışkan elde edilir. Fakat bu karışım tipik bir katı-sıvı karışımına benzemez. Nano ebatlardaki katı tozlar, kütlelerine kıyasla oldukça büyük yüzey alanına sahiptirler ve bu nedenle yüzeye

uygulayabilecekleri enerjileri yüksektir. Bu enerjiyi ortaya çıkaran yüzey gerilmeleri, katı toz parçacıkların suda tutunmama kabiliyetlerini arttıracığından baz sıvı ile karışımı zor hale gelir. Nano akışkan karışımında, katı parçacıkların baz sıvı içerisinde istenen dağılımı göstermesi ve birbirleri ile kümeleşme oluşturmadan eşit bir şekilde sıvı içerisinde dağılımı istenir. Tek adım ve iki adım yöntemleri nanoakışkanları elde etmek için kabul gören yöntemlerdir [91].

#### **2.1.4.2.1. Tek Adım Yöntemi**

Bu yöntemde katı parçacıkların bir araya getirilmesi ve baz akışkan içinde dağılım işlemi aynı anda gerçekleştirilir [92].

Tek adım yönteminin avantajları;

- Nanopartiküllerin saklanmasına, kurutulmasına ve taşınmasına ihtiyaç olmayacağından nanopartiküllerin birikme ihtimalini azaltacaktır.
- Nanoakışkanın kararlılık ve dayanıklılığı için ek kimyasallar gerekmez.
- Nanopartiküllerin ebatları ve geometrisi birleşim anında önemli seviyede kontrol altında tutulabilir.
- Bu yöntemle elde edilen nanoakışkanlar, iki adımlı yöntemle göre doğal olarak daha kararlıdır.
- Düşük buhar basınç özelliği gösteren sıvılar için uygundur.

Tek adım yöntemini dezavantajları;

- Elde edilen nanoakışkan miktarı az olduğundan, seri üretimler için uygun olmayacaktır.
- Maliyet yüksektir.
- Elde edilen nanoakışkanlardaki reaktanlar tepkimeye girebilir ve bu da sorunlara yol açabilir.

#### **2.1.4.2.2. İki Adım Yöntemi**

Bu yöntem, nanoakışkanların elde edilmesinde yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde ilk aşama olarak, çeşitli yöntemlerle (fiziksel veya kimyasal) nanometre ölçeğinde partiküller üretilir. İkinci aşamada ise nano boyuttaki partiküller baz sıvılar ile karıştırılır. Karışım içerisinde nanoparçacıklar kümelenme eğiliminde olurlar, bu

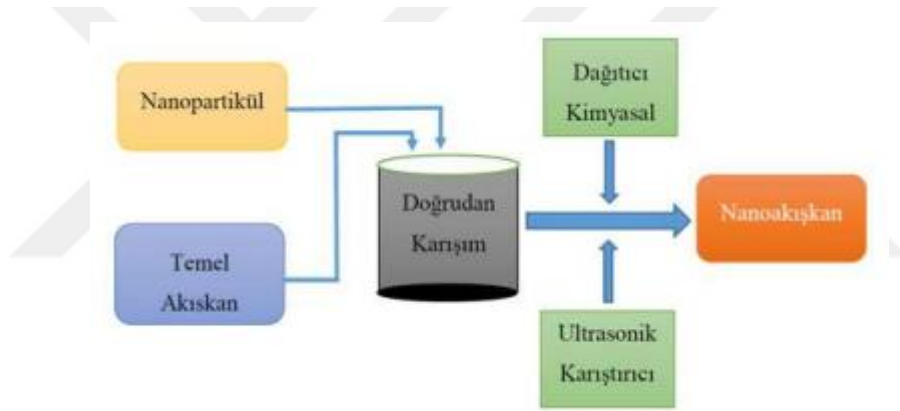
durumun ortadan kaldırılması için Şekil 2.17’de gösterildiği gibi, nanoakışkanın hazırlanması esnasında kimyasal dağıtıcılar ve ultrasonik karıştırıcılardan faydalanılır. Bu aşamada reaksiyon süresi ve şartları, hazırlanmak istenen nanoakışkanın özelliklerine göre belirlenir [92].

Avantajları;

- Düşük maliyetle seri üretim için uygundur.
- Oksit nanopartiküller için uygundur.

Dezavantajları;

- Elde edilen nanoakışkanlar kümelenme eğilimindedirler.
- Nanopartiküllerin ebat ve geometrisi üzerinde kontrol sınırlıdır.
- Nanopartiküller depolama ve kurutma işlemleri esnasında birikme gösterirler.

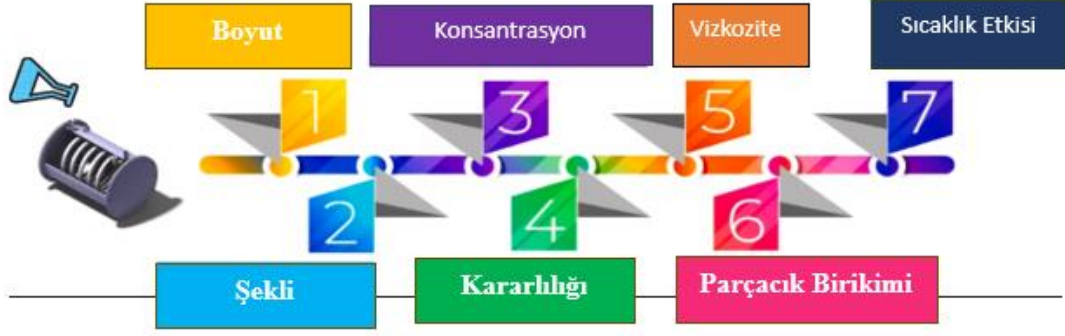


Şekil 2.17. İki adım yöntemi [91].

#### 2.1.4.3. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

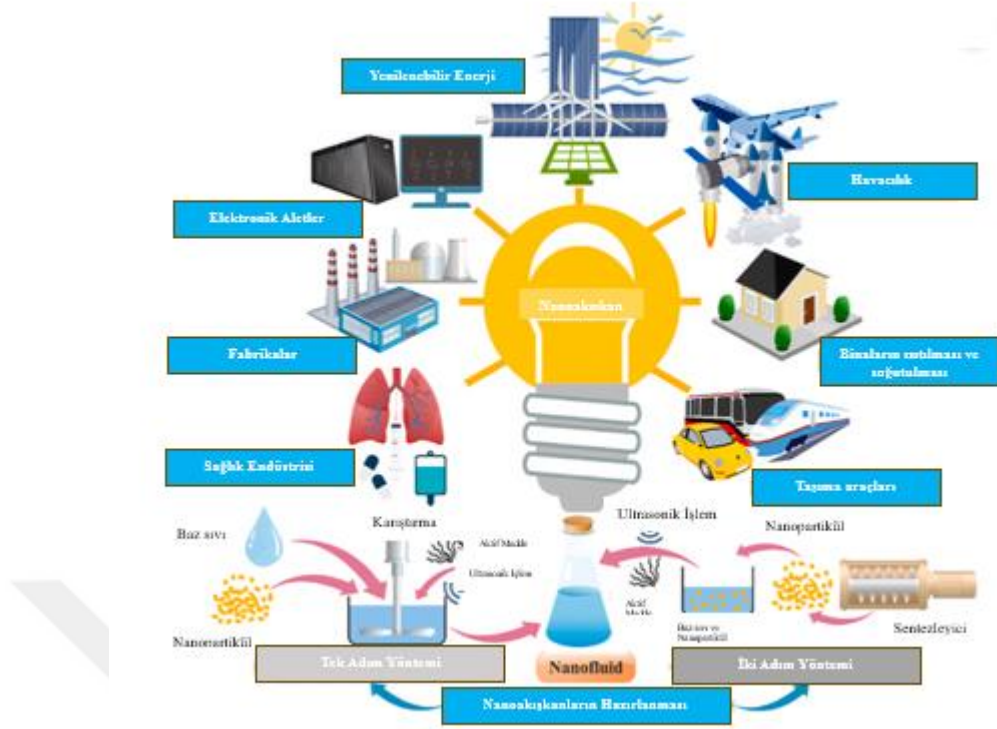
Nanoakışkanlar, termofiziksel özellikler açısından klasik akışkanlardan farklılık gösterir. Bu özellikler, Şekil 2.18’de gösterildiği üzere, kullanılan nanopartikülün malzemesi, boyutu, şekli ve baz akışkanın özellikleri tarafından belirlenir. Nanoakışkanların termal iletkenlikleri genelde yüksektir ve termal iletkenlikleri, nanopartikül türüne bağlı olarak farklılık gösterir. Ayrıca, nanoakışkanların viskoziteleri, nanopartiküllerin dağılımı ve etkileşimleri nedeniyle etkilenebilir.





Şekil 2.18. Termal iletkenliği etkileyen parametreler [92].

Nanoakışkanların Reynolds ( $Re$ ), Prandtl ( $Pr$ ) ve Nusselt ( $Nu$ ) sayıları da termofiziksel özelliklerine bağlı olarak değişir. Reynolds sayısı, akışkanın hızı, yoğunluğu ve viskozitesine bağlıdır ve akışkanın taşınım sayısını etkiler. Prandtl sayısı, akışkanın kinematik viskozitesi ve termal difüzyon katsayısı arasındaki oranı ifade eder. Nusselt sayısı ise termal taşınım yoğunluğu ve hızı ile ilişkilidir. Nanoakışkanlar, termofiziksel özelliklerinin özenle analiz edilmesini gerektirir. Bunun nedeni ise nanopartikül içeriği, dağılımı ve boyutu gibi faktörler, ısı transferi ve akışkan davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Şekil 2.19’da gösterildiği gibi, nano akışkanlar, termofiziksel özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin termal yönetim sistemlerinde kullanıldığında, nanoakışkanların yüksek termal iletkenlikleri, daha etkili bir ısı transferi sağlayarak cihazların soğutma performansını arttırabilir [93].

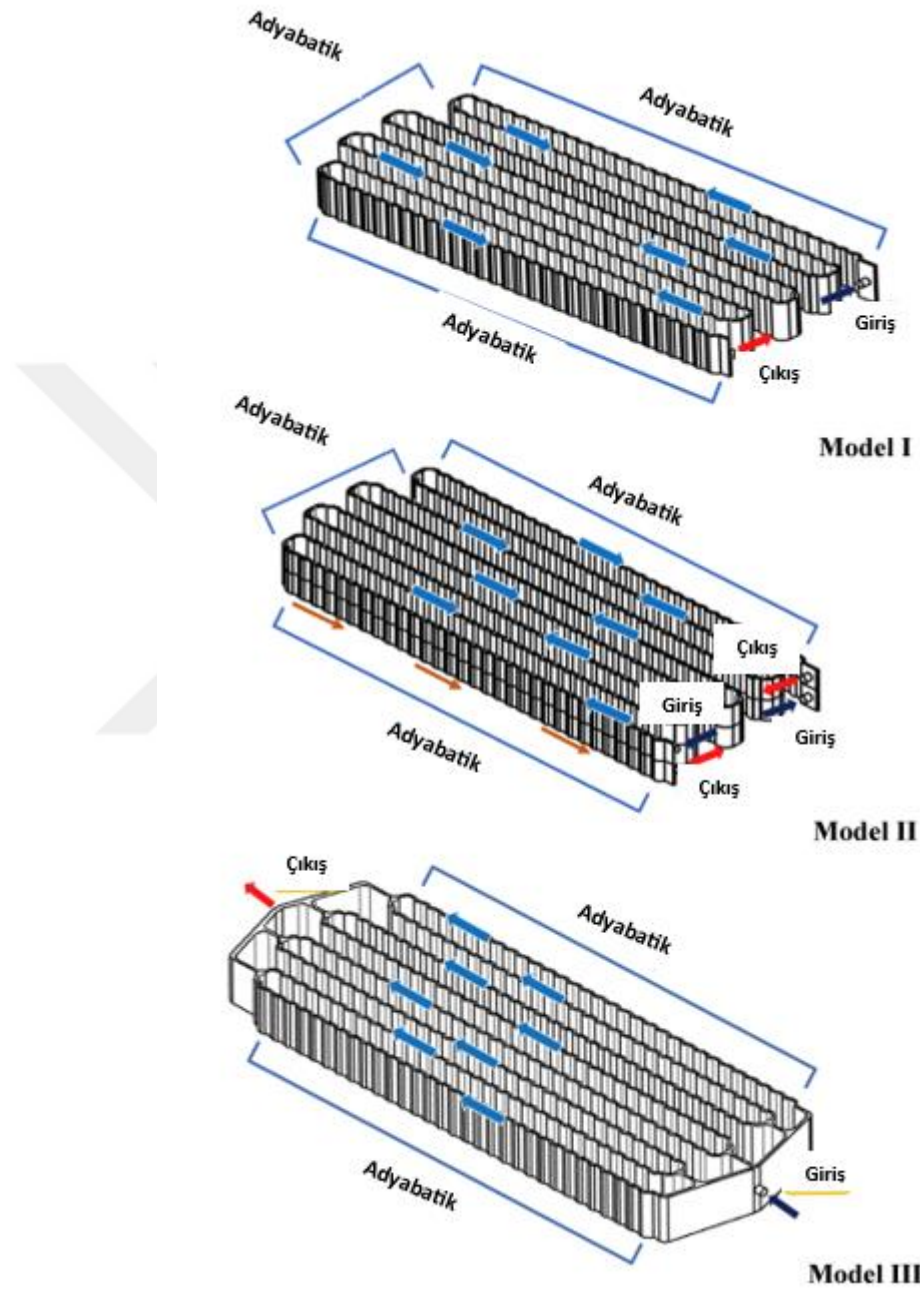


Şekil 2.19. Nanoakışkanların üretim yöntemleri ve kullanım alanları [92].

Sarchami ve arkadaşları, silindirik lityum iyon pillerin sıcaklığını istenen referans aralığında tutmak için dalgalı/merdiven kanalı sıvı soğutma ve bakır kılıf kullanarak yeni bir termal yönetim sistemi tasarlamışlardır. Bu sistem ile şarj/deşarj sırasında çeşitli faktörlerin (C oranı, alümina nanoparçacık yoğunluğu, giriş akış hızı ve merdiven kanalı şekli) etkisini değerlendirmişlerdir. Deneyle iki farklı hacim yüzdesi (%1 ve %2) ile yapmışlardır. Alümina nano parçacıkların deiyonize su içindeki yoğunluğunun artırılmasının, maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkını belirgin şekilde düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca merdiven kanalının, düz kanala göre 5C deşarj durumunda batarya paketinin maksimum sıcaklığını ve hücreler arası sıcaklık farkını sırasıyla 3,59 K ve 0,65 K düşürdüğünü belirtmişlerdir. Hem Merdiven kanalı hem de %2 alümina nano parçacıklı deiyonize suyu birlikte kullanmanın, 5C deşarj işlemi sonunda batarya paketinin maksimum sıcaklığını ve hücreler arası sıcaklık farkını 305,13 K ve 2,01 K'nin altına indirebildiğini belirtmişlerdir [94].

Wiriyasart ve arkadaşları, 444 adet 18650 tip silindirik lityum iyon pil içeren EA akü soğutma modülünü, Şekil 2.20'de görüldüğü üzere, üç farklı modelde tasarlamışlardır. Oluklu mini kanalda nanoakışkanlarla gerçekleştirilen soğutma işleminin sıcaklık dağılımı ve basınç kaybını hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle analiz etmişlerdir.

En iyi sonucu hacimce %0,25 ve %0,50 oranlarında Titanyum Dioksit nanopartiküllerin (TiO<sub>2</sub>) baz akışkana karıştırılarak kullanıldığı model II ile elde etmişlerdir. Geliştirilen modül (model II) ile geleneksel modül (model I) kıyaslandığında maksimum sıcaklığı %28,65 oranında düşürdüğü sonucunu elde etmişlerdir [95].



Şekil 2.20. Simülasyonda kullanılan model tasarımları [95].

Wu ve Rao, BTYS'nin soğutma performansını iyileştirmek için, doğal konveksiyonu simüle eden bir kafes Boltzmann modelini Cu-su nanoakışkan içeren BTYS'ye uygulamışlardır. Nanoakışkanın Cu nanoparçacıkları ile zenginleştirilmesinin soğutma

performansını yükseltebildiği ve hücreler arası sıcaklık farkını düşürebildiği sonucunu elde etmişlerdir. En iyi sonucu %6 hacim fraksiyonlu nanoakışkan ile maksimum sıcaklığı %6,5 oranında düşürerek elde etmişlerdir [96].

Huo ve Rao,  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı kullanarak BTYS'nin soğutma performansını iyileştirmek adına silindir BTYS için kafes Boltzmann modeli geliştirmişlerdir. Tek pilli ve 5 pilli sistemlerin soğutma performansları, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve nanoakışkan kullanımının BTYS'nin soğutma performansını koruduğu sonucunu elde etmişlerdir. 5 pilli sistemde nanopartiküllerin katılmasıyla, soğutma performansının arttığı ve pilin ortalama sıcaklığının önemli ölçüde düştüğünü gözlemlemişlerdir. %4 hacim fraksiyonlu  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı kullanıldığında, su bazlı BTYS'ye göre bataryanın ortalama sıcaklığının %7 oranında azaldığı sonucunu elde etmişlerdir [97].

Türkbay, bir batarya modülünün termal yönetimi için ANSYS-Fluent 18.2 yazılımı ile üç boyutlu olarak bir çalışma yapmıştır. Soğutma akışkanı olarak hava, su ve %1, %3 ve %5 hacim fraksiyonlu  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanını seçmiştir. Çeşitli Reynolds sayıları ( $Re=10$ ,  $Re=100$ ,  $Re=500$ ) ve batarya dizilimleri (2S5P, 2S10P, 3S10P) ile yapılan çalışmada termal yönetim sürecini analiz etmiştir. Analizler sonucu elde ettiği bulgularda, su akışkanına nano parçacık katılmasının, suyun nanosuz haline göre niteliksel olarak benzer sonuçlar verdiğini ve nano parçacıkların ısı iletkenliği arttırmasına rağmen sıcaklık değişimleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını gözlemlemiştir [74].

Tousi ve arkadaşları, 18650/21700 tipi lityum-iyon piller için pil paketinin maksimum sıcaklığını ve hücreler arası sıcaklık farkını optimum seviyede tutmak için, %1, %2 ve %4 AgO içeren AgO-su nano akışkanını kullanarak, deşarj C hızı, nanoakışkan hacim fraksiyonu ve giriş hızı gibi parametrelerin batarya paketinin termal performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Yüksek deşarj hızlarında (3C, 5C ve 7C) 18650 ve 21700 pil paketleri arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapmışlardır. Karşılaştırma sonucunda, giriş hızı ve nanoakışkan hacim fraksiyonu arttıkça maksimum sıcaklığın ve hücreler arası sıcaklık farkının önemli derecede düştüğü sonucuna varmışlardır. Soğutma sistemi olarak, optimum sıvı giriş hızı (0,24 m/s) ve soğutucu olarak %4 hacim fraksiyonlu AgO-su nanoakışkanı kullanıldığında 7C deşarj işlemi sonunda, batarya paketinin maksimum sıcaklığı ve hücreler arası sıcaklık farkının sırasıyla 305,59 K ve 1,07 K değerlerinin altında tutulduğu sonucunu elde etmişlerdir [98].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Nanoakışkan, temel akışkan içine nano boyutundaki partiküllerin katılmasıyla oluşan süspansiyonlardır. Literatür çalışmalarında, nanoakışkanlar, elektrikli araçların enerji depolama sistemlerinin termal yönetimi için önemli bir gelişme olarak görülmektedir. Geleneksel sıvı soğutma sistemleri, bataryaların yüksek deşarj hızları ve yoğun kullanımı sırasında oluşan ısının etkili bir şekilde dağıtılmasında sınırlamalar yaşayabilmektedir. Nanoakışkanlar, geleneksel baz sıvılara göre ısı iletim yetenekleri çok daha yüksek olduğundan bataryaların daha hızlı ve homojen bir şekilde soğutulmasını sağlayarak bu zorlukları aşmak adına büyük bir potansiyele sahiptir.

Bu çalışmada, 6 seri (6S) – 3 paralel (3P) olarak düzenlenmiş Sony 18650 tip lityum iyon pil modülünün termal yönetimi üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışmanın ana materyali olan 18650 Sony lityum iyon piller, yüksek enerji depolama kapasiteleri ile yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bu piller, yüksek şarj/deşarj hızlarına maruz kaldıklarında aşırı ısınma eğilimindedirler, bu da pil ömrünü kısaltabilir ve hatta güvenlik risklerine neden olabilir. Bu nedenle, bu çalışma, pillerin termal yönetimini iyileştirmek amacıyla, Bor-nitrür (BN)-su ve Titanyum-dioksit (TiO<sub>2</sub>)-su nanoakışkanlarının saf su ile karşılaştırılmasını amaçlamaktadır. Bu nanoakışkanlar, pillerin içerisine yerleştirildiği bakır malzemeden oluşan pil modülü tasarımının sıvı soğutma kanallarından akıtılmıştır. Bu şekilde, nanoakışkanların termal performansları ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Deneyler, pil modülünü farklı çalışma koşulları altında test etmek adına 1C şarj ve 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deney süresince tüm sıvıların giriş sıcaklığı (25 °C) ve akış debisi (790 ml/dk) olacak şekilde sabit tutulmuştur. Bu çalışmanın amacı, nanoakışkanların suya göre termal üstünlüklerini ortaya koyarak, batarya termal yönetim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktır. Bu bağlamda, bu tezde kullanılan materyal ve metotlar ayrıntılı olarak bu bölümde açıklanmıştır.

#### 3.1. DENEYLERDE KULLANILAN BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMİ

Şekil 3.1’de Lityum iyon batarya modülünde kullanılan sıvı soğutma sisteminin tasarımı gösterilmektedir. Modül, 6 seri ve 3 paralel bağlantının yapıldığı 18 adet 18650 tip Sony

marka Lityum-iyon batarya ve bakır malzemeye sahip sıvı soğutma kanalından oluşmaktadır.

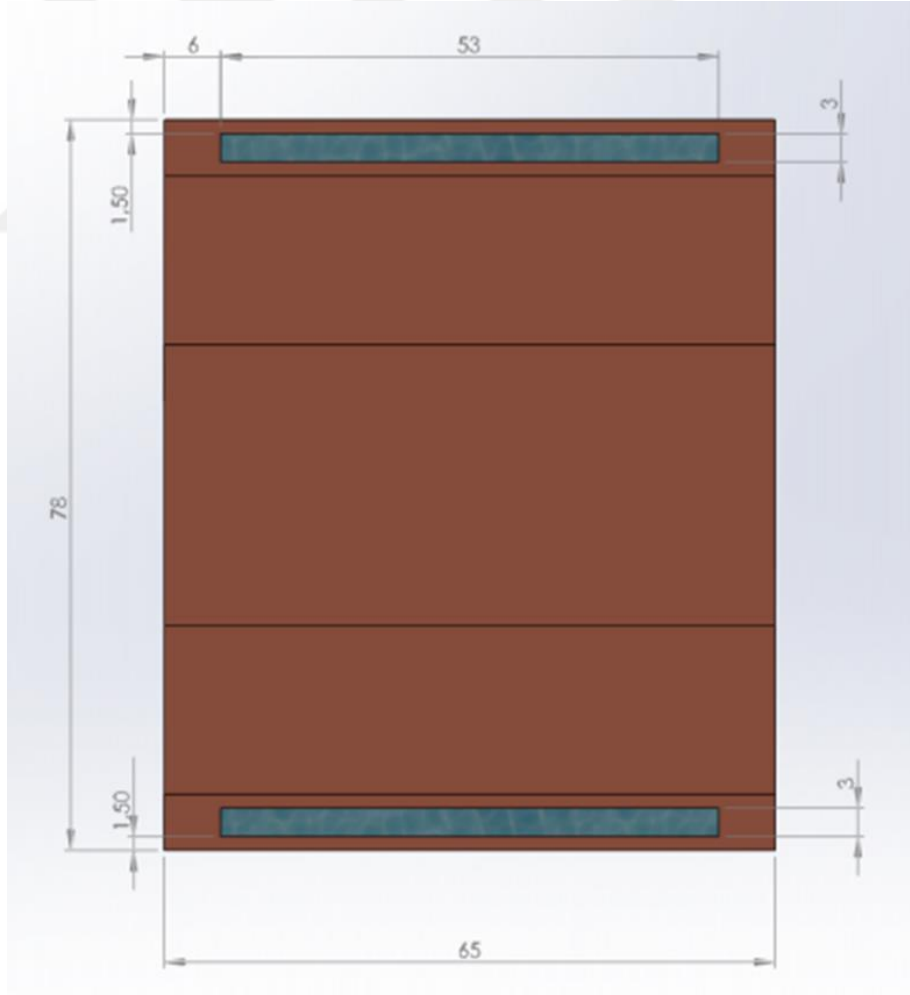


Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan soğutma kanalı ve batarya hücreleri.

Sıvı soğutma kanal aralıkları, 18650 tipi pil hücreleri ile direkt olarak temasın sağlanması için 18 mm genişliğe sahiptir. Et kalınlığı 1,5 mm olan kanalın yüksekliği 78 mm, dış kanalların uzunluğu 147,5 mm ve orta kanal 132,5 mm uzunluğundadır. Kanalın sıvı girişi noktası ile çıkış noktası arasındaki uzunluk yani akışkanın kanal içerisindeki akış mesafesi 650 mm'dir. Soğutma kanalı içerisinde sıvının akış ölçüleri ise tüm kanal boyunca eşit olup, genişliği 53 mm, yüksekliği ise 3mm'dir. Pil hücreleri, farklı çalışma koşullarında yüksek ısı üretmektedir. Bu ısı, pillerin direkt olarak temas ettiği bakır plakalar tarafından emilmektedir. Bakır plakalar, soğutma kanalında dolaşan su veya nanoakışkan ile soğutulmaktadır. Böylece, pil modülünün termal yönetimi, soğutma kanalı içerisinde dolaşan soğutucu akışkanın pil hücrelerini dolaylı olarak soğutması ile sağlanmaktadır. Dolaylı soğutma sistemi, akışkanın hücrelerle temas etmesini veya kısa devreye yol açabilecek sızıntılar oluşmasını önlemektedir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te Solidworks programında çizilen Soğutma kanalına ait detaylı ölçülendirmeler gösterilmektedir.




Şekil 3.2. Soğutucu kanalın önden görünüşü.



Şekil 3.3. Soğutucu kanalın sağdan görünüşü.

Deneylerde kullanılan pil, lityum iyon teknolojisi ile üretilen ve 3,6 V nominal voltaj ile 3000 mAh nominal kapasiteye sahip Sony 18650 VTC6 batarya hücresidir. Batarya hücresi, şarj edildiğinde maksimum voltajı 4,2 volta ulaşırken, deşarj kesme voltajı ise 2,5 voltur. Bu çalışmada kullanılan 18650 lityum iyon tekil batarya hücresinin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan batarya hücresinin özellikleri

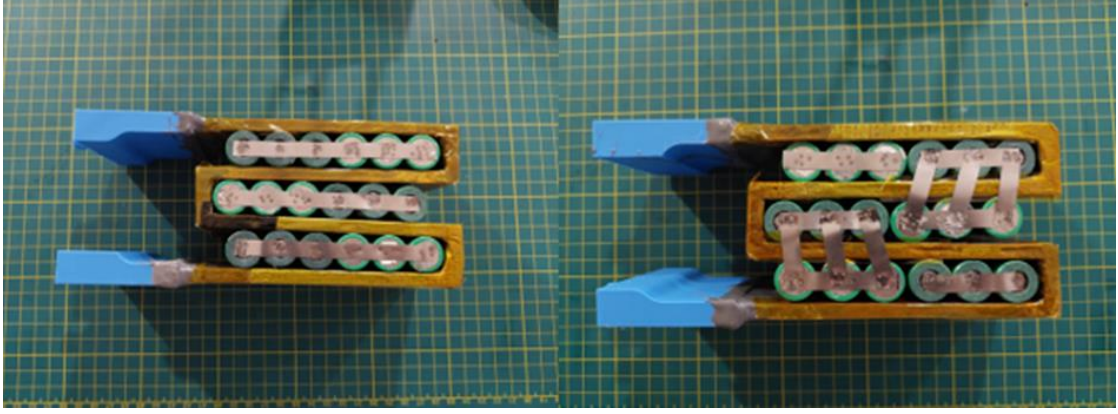
	Model	Sony US18650VTC6
	Kapasite	3000 mAh
	Nominal Voltaj	3,6 V
	Standart Şarj Akımı	3A (1C)
	Şarj Sonu Voltajı	4,2 V
	Maksimum Şarj Akımı	5A
	Deşarj Kesme Voltajı	2,0 V / 2,5 V
	1kHz’de AC Empedansı	8-18 mΩ
	Ağırlık	46,6 ± 1,5 g
	Boyutlar	18,50 mm x 65,00 mm

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’te gösterildiği üzere, deneylerde kullanılacak olan batarya modülü, nikel şeritlerle punta kaynağı yapılarak, 6 seri ve 3paralel (6S ve 3P) konfigürasyonundaki toplam 18 lityum iyon pilin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur.



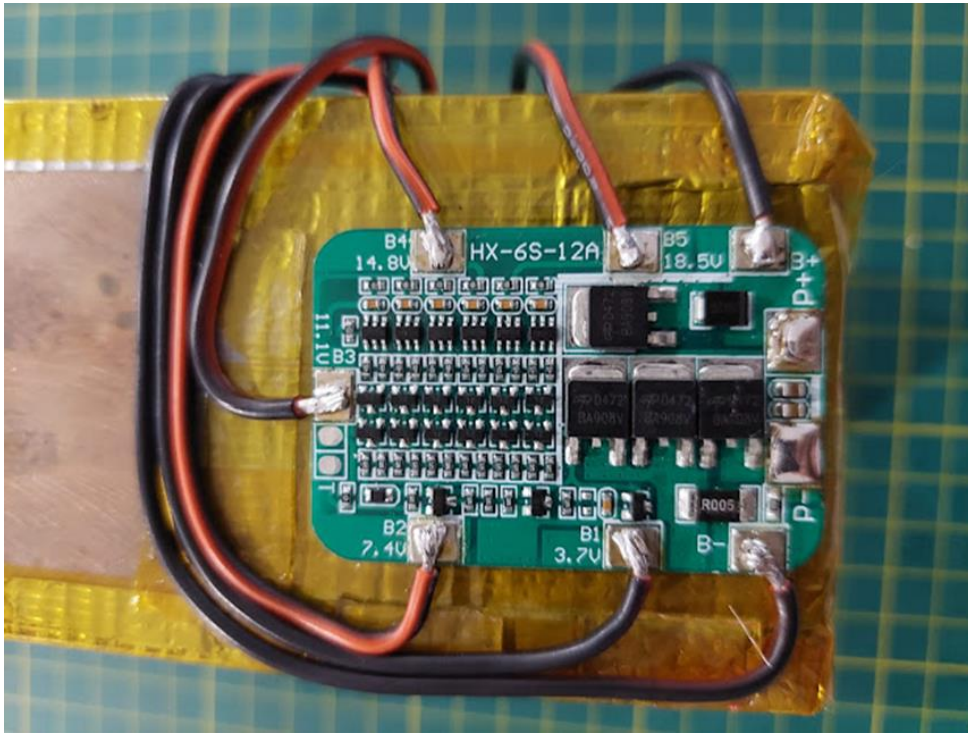
Şekil 3.4. Batarya modülünün oluşturulması için pillerin soğutma kanalına yerleştirilmesi.





Şekil 3.5. Punta kaynağı ile seri ve paralel bağlantıların yapılma işlemi.

Nikel şeritler ile seri ve paralel bağlantıları tamamlanan lityum iyon pillerin, güvenli ve verimli bir şekilde kullanılması için elektronik kontrol sistemi olan, batarya yönetim sistemi (BYS) kartı batarya modülü üzerine monte edilmiştir. BYS bataryaların performansını optimize ederken güvenliğini de sağlamaya yardımcı olur. Her pil hücresinin durumunu izler ve aşırı ısınma, aşırı akım veya hücre dengesizliği gibi kritik durumlarda hemen müdahale eder. EA'lar dahil birçok enerji depolama sistemlerinde kullanılan bu sistem bataryaların uzun çevrim ömrü ve güvenliği için kritik bir bileşendir. Şekil 3.6'da BYS'nin batarya modülü üzerine monte edilmiş hali gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Batarya modülü üzerine monte edilmiş BYS kartı.

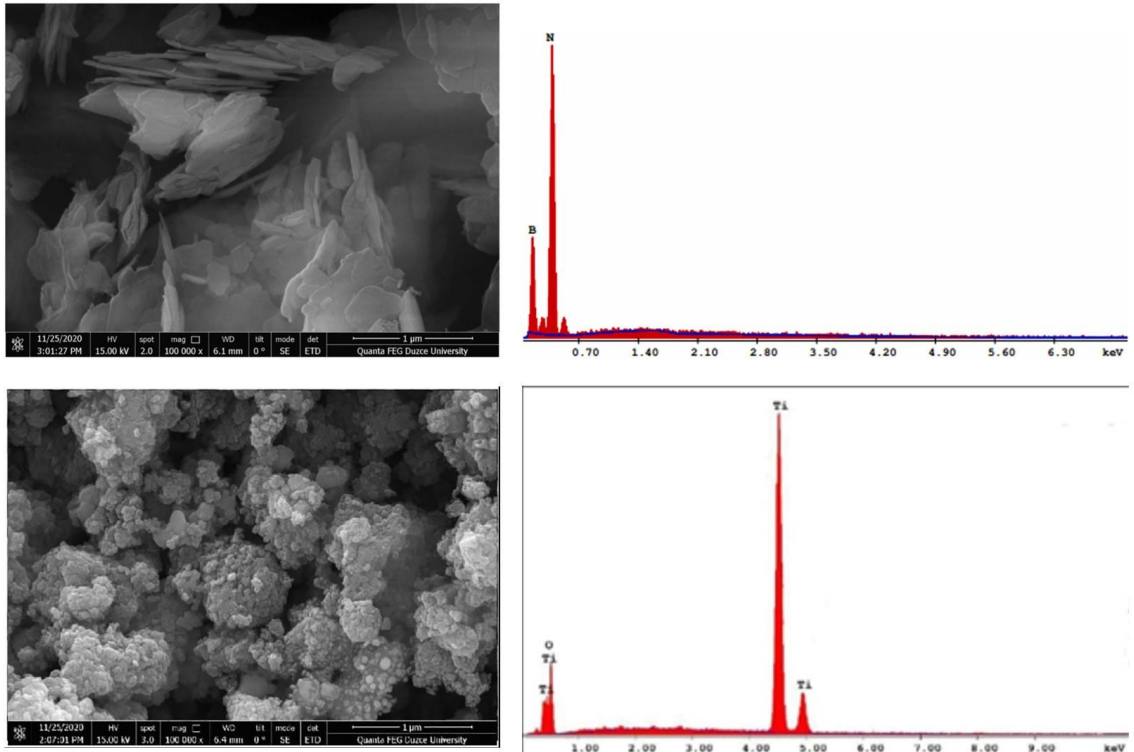
## 3.2. NANOAKIŞKANLARIN HAZIRLANMASI VE TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

### 3.2.1. Nanoakışkanların Hazırlanması

Nanoakışkanlar iki adım yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan TiO<sub>2</sub>-su ve BN-su nanoakışkanlarında ölçüm olarak %0,1 kütle fraksiyonlarında nanopartikül kullanılmıştır. Kullanılan nanopartiküller ODTÜ Teknokente bulunan Nanografi firmasından tedarik edilmiştir. Kullanılan nanopartiküllerin özellikleri ile SEM ve EDX görüntüleri Çizelge 3.2 ve Şekil 3.7’de gösterilmektedir.

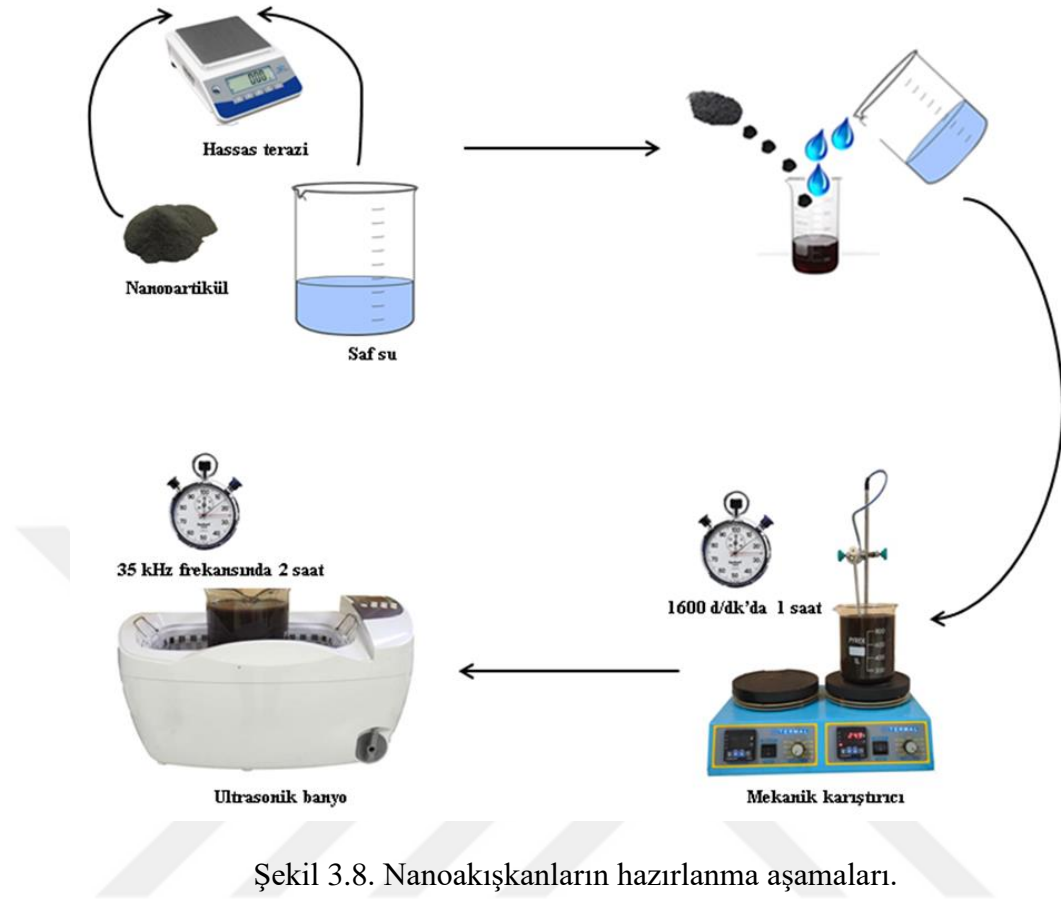
Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan suyun ve nanopartiküllerin bazı önemli özellikleri.

Temel Özellikler	Baz Akışkan	Nanopartikül	
	Su	TiO <sub>2</sub>	BN
Ortalama parçacık boyutu (nm)	-	28	75
Yoğunluk ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	997,20	4500	2300
Isıl iletkenlik (k) (W/m.K)	0,616	8	33,5
Isıl kapasite (C <sub>p</sub> ) (J/kg.K)	4178	689	489
Viskozite ( $\mu$ ) (mPa.s)	0,876	-	-
Safılık (%)	-	99,99	99,95
Rengi	-	Beyaz	Siyah



Şekil 3.7. BN (üst) ve TiO<sub>2</sub> (alt) nanopartiküllerinin EDX ve SEM görüntüleri.


Nanoakışkanların hazırlanma aşamaları Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Nanoakışkanların hazırlanma aşamaları.


Nanoakışkanlarda homojen bir karışım elde edilmesi ve nanopartiküllerin baz akışkan içerisinde çökme veya kümelenme gibi dezavantajlar oluşturmaması için  $TiO_2$ -su nanoakışkanı deneyleri gerçekleştirilmesinden sonra BN-su nanoakışkanı hazırlanarak deneyler tamamlanmıştır. Saf suya eklenecek nanopartiküllerin miktarları, özellikleri Çizelge 3.3’te verilen Weightlab marka WL-6002 model hassas terazi ile ölçülmüştür.

Çizelge 3.3. Weightlab WL-6002 hassas terazi özellikleri.

	Kapasite	6000 g
	Hassasiyet	0,01 g
	Çalışma sıcaklığı	10-35 °C
	Kefe boyutu	168 x 168 mm
	Ölçüler	305 x 203 x 80 mm
	Güç kaynağı	12 V 600 mA adaptör

Hassas terazi ile istenilen miktarda elde edilen nanopartiküller cam beher içerisindeki saf suya eklenerek Termolab manyetik karıştırıcıda 1 saat boyunca 1600 d/dk’da karıştırıldı. Manyetik karıştırıcıya ait özellikler Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Termal manyetik karıştırıcı özellikleri.

	Karıştırma kapasitesi	10 litre
	Sıcaklık çalışma aralığı	0 – 400 °C
	Karıştırma hız aralığı	0 – 1600 devir/dakika
	Sıcaklık okuma hassasiyeti	±2 °C
	Üst plaka çapı	160 mm
	Dış ölçüler (tek tabla)	175x230x145 mm
	Motor	DC 12V fırçasız
	Besleme gerilim	220 – 230 V / 50- 60 Hz

Manyetik karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra nanoakışkan, cam beher içerisinde ADC-4830 model ultrasonik banyo içerisindeki saf suya bırakıldı ve burada 2 saat süresince 35 kHz frekansında, tam dalga boyunda ses dalgalarına maruz bırakılarak homojen bir çözülme sağlandı. Ultrasonik banyoya ait teknik özellikler Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. ADC-4830 ultrasonik banyo özellikleri.

	Kap kapasitesi	3 Litre
	Ultrasonik güç	150 W
	Ultrasonik frekans	35 Khz
	Isıtma kapasitesi	40-60 °C
	Ağırlık	3,6 Kg
	Ölçüler	385x234x193 mm
	Gerilim	AC 220 – 240 V / 50 Hz

Nanoakışkanların hazırlanma süresince kullanılan cihazlar Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9. TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanın hazırlık süreci boyunca kullanılan cihazlar.



Şekil 3.10. BN-su nanoakışkanın hazırlık süreci boyunca kullanılan cihazlar.

### 3.2.2. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan nanoakışkanlar, su içerisine %0,1 oranında titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) ve bor nitrür (BN), nanopartiküllerinin ayrı ayrı eklenmesiyle oluşturulmuştur. Baz akışkan olarak ise saf su kullanılmıştır. Deneylerde kullanılacak olan tüm akışkanların termofiziksel özellikleri laboratuvar ortamında ölçülmüş ve Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. BN-su ve  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanlarının termofiziksel özellikleri.

Nanoakışkan	Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	Isıl iletkenlik ( $\text{W/m.K}$ )	Isıl kapasite ( $\text{J/kg.K}$ )	Viskozite ( $\text{mPa.s}$ )
%0,1 BN-Su	999,50	0,690	4105	0,875
%0,1 $\text{TiO}_2$ -Su	1005	0,645	4160	0,905

Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri belirlenirken faydalanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

#### Nanoakışkan Yoğunluğu:

Nanoakışkanın yoğunluğunun hesaplanmasında denklem (3.2) kullanılmaktadır.

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (3.1)$$

$\rho_{nf}$ : nanoakışkanın yoğunluğu

$\rho_p$  : partikülün yoğunluğu

$\rho_f$  : suyun yoğunluğu

$\phi$  : hacim konsantrasyonu

### **Nanoakışkanın Özgül Isısı:**

Nanoakışkanın özgül ısısının hesaplanmasında denklem (3.2) kullanılmaktadır.

$$(\rho C_p)_{n_f} = \phi(\rho C_p)_p + (1 - \phi)(\rho C_p)_f \quad (3.2)$$

$C_{n_f}$  : nanoakışkanın özgül ısısı

$C_p$  : nanopartikülün özgül ısısı

$C_f$  : suyun özgül ısısı

### **Nanoakışkanın Isıl İletkenliği:**

Nanoakışkanın ısı iletkenliğinin hesaplanmasında denklem (3.3) kullanılmaktadır.

$$k_{n_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} k_f \quad (3.3)$$

$k_{n_f}$ ,  $k_p$ ,  $k_f$  sembolleri sırasıyla, nanoakışkanın ısı iletkenliği, nanopartikülün ısı iletkenliği ve suyun ısı iletkenliğini göstermektedir.

### **Nanoakışkanın Viskozitesi:**

Nanoakışkanın viskozitesinin hesaplanmasında denklem (3.4) kullanılmaktadır.

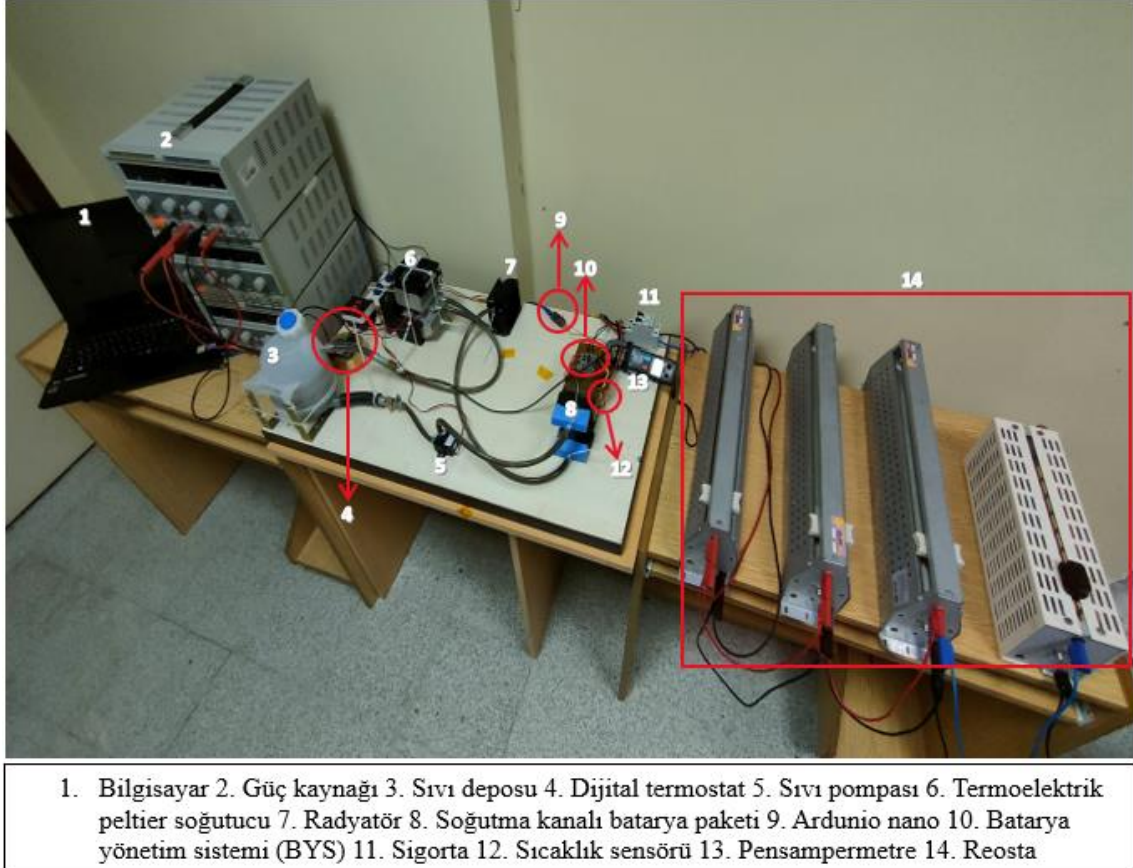
$$\mu_{n_f} = (1 + 2.5 \phi) \mu_f \quad (3.4)$$

$\mu_{n_f}$  ve  $\mu_f$  Sırasıyla nanoakışkanın viskozitesi ve suyun viskozitesidir.

## **3.3. DENEY DÜZENEĞİ KURULUMU**

Bu çalışma, batarya modülünün termal performansını incelemek, pil hücrelerinin sıcaklığını kontrol etmek ve optimize etmek için farklı sıvıların termal yönetim üzerindeki

etkilerini karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11’de gösterilen deney düzeneği; pil hücrelerinin yerleştirildiği bakır soğutma kanalı, 12A-6S batarya yönetim sistemi (BYS), DA güç kaynakları, reostalar, kaçak akım koruma şalteri, pensampermetre, Arduino, DS18B20 sıcaklık sensörleri, bilgisayar, sıvı deposu, dijital termostat, sıvı pompası, radyatör, termoelektrik peltier soğutucu (alüminyum soğutma bloğu, peltier ve fan) ve sıvı akış hortumlarından oluşmaktadır.



Şekil 3.11. Deney düzeneği.

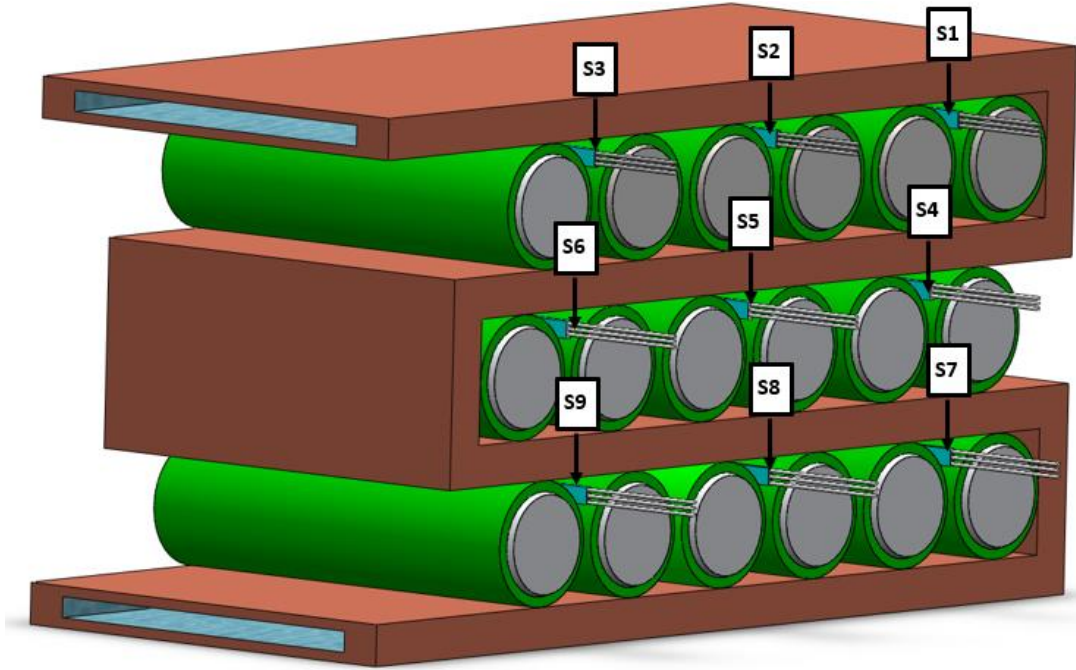
Deney düzeneğinde, şarj ve deşarj işlemleri sırasında pil hücrelerinde artan sıcaklığın kontrolü ve izlenmesi için Şekil 3.12’de gösterilen 9 adet DS18B20 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Bu sensörler, her iki pil arasına bir adet yerleştirilmiş ve pil hücrelerinin sıcaklığını sürekli izlemek amacıyla kullanılmıştır. DS18B20 sıcaklık sensörleri, -55 °C ile 125 °C arasındaki sıcaklığı ölçme ve  $\pm 0,5$  °C hassasiyetle -10 °C – 80 °C arasında sıcaklık verisini iletebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca, sensörler, deney sırasında pil hücrelerinin sıcaklık değişimlerini dakikada 30 kez ölçme ve kaydetme özelliğine sahiptir. Her bir sensör, pil hücrelerinin farklı noktalarından gelen sıcaklık verilerini anlık olarak yakalar ve dijital bir sinyal oluşturur. Bu dijital sinyaller, Arduino

mikrodenetleyici tarafından toplanarak bilgisayar arayüzüne aktarılmıştır. Bu sürekli veri akışı, deney süresince pil hücrelerinin sıcaklık değişimlerinin anlık olarak izlenmesine ve herhangi bir aşırı ısınma durumunda hızlı bir şekilde müdahale edilmesine imkân tanımıştır.



Şekil 3.12. DS18B20 dijital sıcaklık sensörü.

Sensörlerin pil hücreleri arasına yerleştirildikleri noktalar Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Soğutma kanalı içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanmasının takip edilebilmesi için sensörler eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Böylece pil hücreleri arasındaki sıcaklık farklarının hassas bir şekilde izlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.13. DS18B20 sıcaklık sensörlerinin batarya modülü üzerindeki konumları.



Sensörlerden alınan verilerin, Şekil 3.14'te gösterilen Arduino ve USB bağlantısı ile bilgisayara aktarılmasının ardından, her bir sıcaklık sensöründen dakikada 30 veri alınmıştır. Bu verilerin anlamlı bir şekilde görselleştirilmesi ve analiz edilmesi amacıyla her sensör için ölçülen değerlerin ortalaması alınmış ve zaman serisi grafiği oluşturmak için kullanılmıştır. Dakika bazında elde edilen bu grafikler, pil hücrelerinin termal davranışının zaman içinde nasıl değiştiğinin gözlemlenmesine ve deneyin sonuçlarının yorumlanmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 3.14. Arduino ve USB bağlantısı.

Soğutma kanalına sıvı giriş sıcaklığı, deney boyunca 25 °C'de sabit tutulmuştur. Bu sıcaklık kontrolü, sıvı deposu içerisine yerleştirilen prob vasıtasıyla sürekli ölçüm gerçekleştiren, röle çıkışlı dijital termostat ile sağlanmıştır. Şekil 3.15'te gösterilen bu dijital termostat, 0,1 °C hassasiyetinde, -50 °C ile 110 °C arasında ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 3.15. Röle çıkışlı dijital termostat ve ölçüm probu.

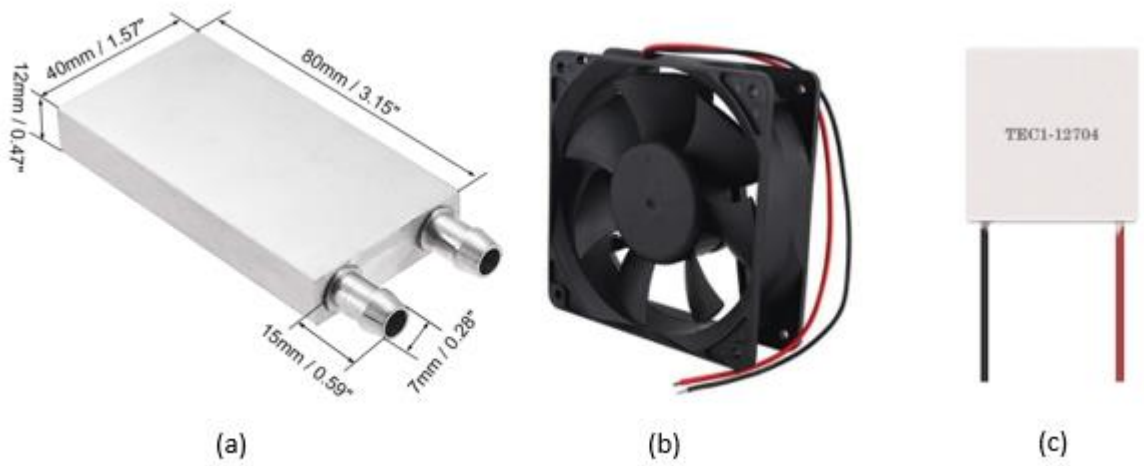
Sıvıların giriş sıcaklığı, dijital termostat ile 25 °C olarak ayarlanmıştır. Dijital termostat, verilerin doğruluğu açısından ve deneyin sonuçlarını güvenilir kılmak adına kritik bir öneme sahiptir. Bu termostat, sıvı sıcaklığı 25 °C'nin üzerine çıktığında, Şekil 3.16'da gösterilen termoelektrik peltier soğutma sistemini çalıştırarak sıvıların soğutulmasını ve soğutma kanalına istenen sıcaklıkta girmesini sağlamıştır. Bu şekilde, tüm sıvılar için eşit ve güvenli bir çalışma ortamı sağlanmıştır.



Şekil 3.16. Termoelektrik peltier soğutma sistemi.

Termoelektrik peltier soğutma sistemi, Şekil 3.17'de gösterilen 40 X 80 mm ölçülerinde alüminyum soğutucu blok, bloğun her iki yüzeyine monte edilen 2 adet TEC1-12704 tip peltier soğutucu ve peltierlerin sıcak yüzeyine entegre edilen 2 adet 12 V soğutma fanından oluşmaktadır. Alüminyum sıvı soğutma bloğu içerisinde dolaşan sıvı, Şekil 3.18'de gösterildiği üzere, alüminyum bloğa termal macun ile entegre edilen peltier

soğutucunun soğuk yüzeyine temas eder ve bu da sıvının soğutulmasını sağlar. Peltier soğutucular, elektriksel bir akım uygulandığında sıcak ve soğuk yüzeyleri arasında ısı transferini kolaylaştıran termoelektrik etkiyi kullanır. Bu cihazların verimli çalışabilmesi için ısıyı emen soğuk yüzeylerinin ısıyı dağıtması için etkili bir şekilde soğutulması gerekir. Alüminyum soğutucu blok üzerine monte edilen fanlar, peltier soğutucunun sıcak yüzeyini etkili bir şekilde soğutarak, cihazın verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

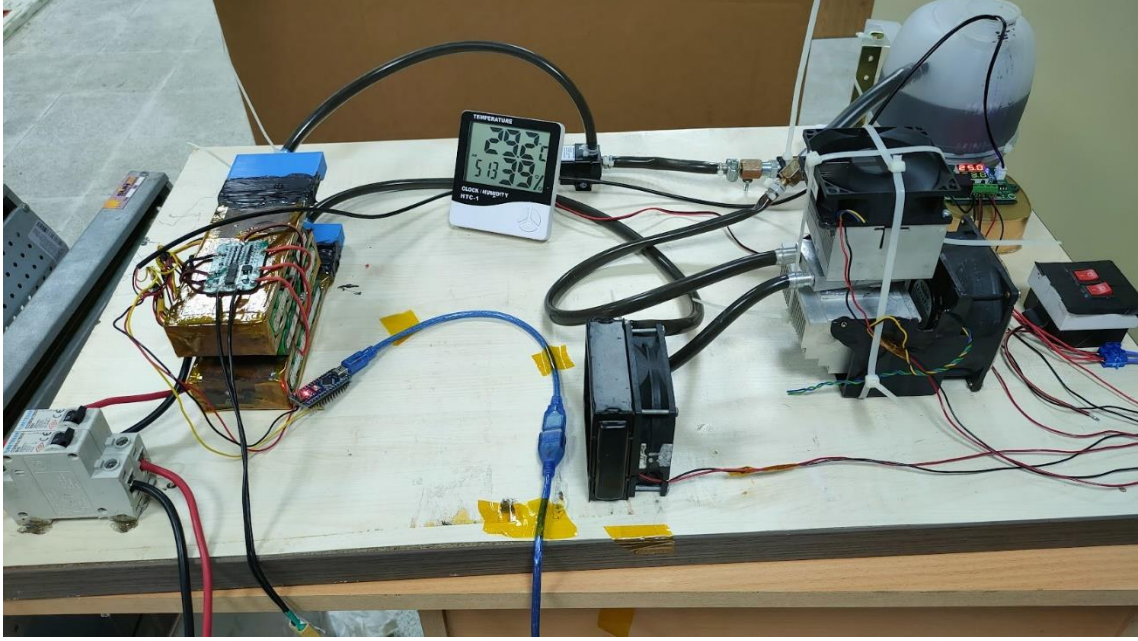


Şekil 3.17. Termoelektrik soğutma sistemi; a) alüminyum soğutma bloğu b) fan c) peltier.



Şekil 3.18. Peltier soğutucunun alüminyum bloğa termal macun ile entegre edilmesi.

Sıvı deposundan soğutma kanalına akışkanın düzenli bir şekilde taşınması için su pompası kullanılmıştır. Soğutma kanalı çıkışında termoelektrik peltier soğutma sistemi öncesindeki ilk soğutma aşaması için fan destekli bir radyatör kullanılmıştır. Deney düzeneğini oluşturmak için, tüm bileşenler, iç çapı 8mm ve et kalınlığı 2 mm olan plastik hortumlar ile birbirine bağlanmıştır. Deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19. Batarya termal yönetimi için oluşturulan düzenek.

Bu tez çalışmasında, üç farklı akışkanın (saf su,  $TiO_2$ -su ve BN-su) termal özelliklerini karşılaştırmak amacıyla şarj ve deşarj deneyleri gerçekleştirildi. İlk aşamada saf su için 1C şarj hızında şarj deneyi ve 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarında deşarj deneyleri tamamlandı. Bu deneylerin ardından, aynı deney protokolü  $TiO_2$ -su nanoakışkanı için ve son olarak BN-su nanoakışkanı için gerçekleştirildi. Tüm deneylerde sıvı giriş sıcaklığı 25 °C ve akış debisi 790 ml/dk olacak şekilde sabit tutuldu. Tüm şarj ve deşarj işlemleri sonucunda toplam 12 deney gerçekleştirildi.

Batarya modülünün şarj işlemleri DA güç kaynağı kullanılarak gerçekleştirildi. Şarj işlemi, 1C şarj hızında gerçekleştirilmek için güç kaynağı 25,2 volta ayarlanarak 9 A akım ile başlatıldı. Yaklaşık 1 saat süren bu şarj işlemi, şarj akımı 0,02 A’ya düştüğünde sonlandırıldı.

Batarya modülünün termal yönetimi için yapılan deşarj işlemleri, 500 W gücünde 4 adet reosta kullanılarak gerçekleştirildi. Şekil 3.20’de gösterildiği gibi, toplam yük direncini

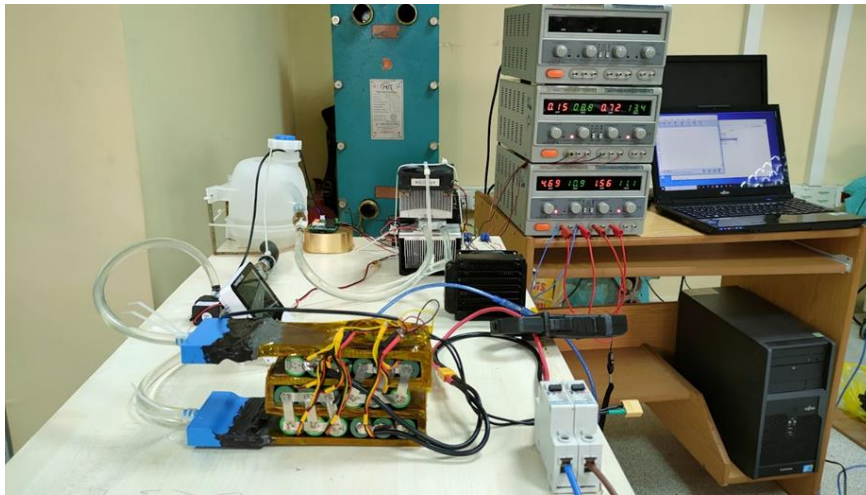
azaltmak ve deşarj işlemi sırasında daha fazla akımın geçmesini sağlamak amacıyla 4 adet reosta, birbirine paralel olarak bağlandı.



Şekil 3.20. Reostaların birbirine paralel bağlantısı.

1C, 2C ve 3C deşarj hızlarına göre reostaların direnci sırasıyla 2,8 ohm, 1,4 ohm ve 0,9 ohm olarak ayarlandı. Bu deneyler ise 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarında gerçekleştirilen deşarj deneyleri için sırasıyla yaklaşık 60, 30 ve 20 dakika sürmüştür.

Deşarj sırasında olası hataları veya kısa devre gibi istenmeyen durumları önlemek için batarya ve reostalar arasında Şekil 3.21’de gösterilen akım koruma şalteri kullanıldı. Ayrıca, deşarj boyunca batarya ve reostalar arasındaki akım değerleri sürekli olarak pensampermetre ile kontrol edildi.



Şekil 3.21. Deşarj işlemi esnasında kullanılan akım koruma şalteri.

Deney sayısının fazla olması ve tekrar eden şarj ve deşarj işlemleri nedeniyle hücrelerde aşırı deşarjdan kaynaklanan zararları önlemek ve deney sonuçlarının güvenilirliğini arttırmak amacıyla tek bir hücre için deşarj kesme voltajı 2,5 volt yerine 3 volt olarak belirlendi. Batarya modülü için ise bu değer 18 volt olarak hesaplandı. Tüm şarj ve deşarj işlemleri titizlikle gerçekleştirildi. Elde edilen sonuçlar bilgisayar ortamına aktarıldı ve karşılaştırılıp yorumlandı.

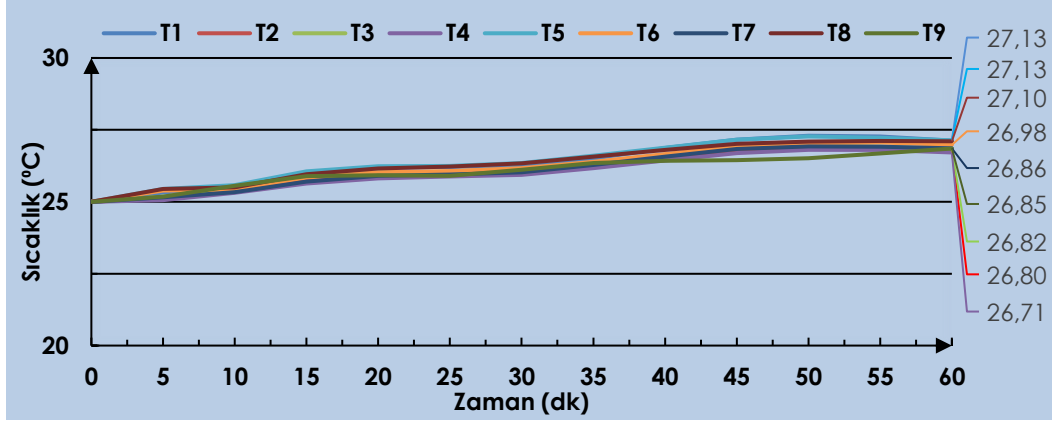


## 4. DENEY SONUÇLARI

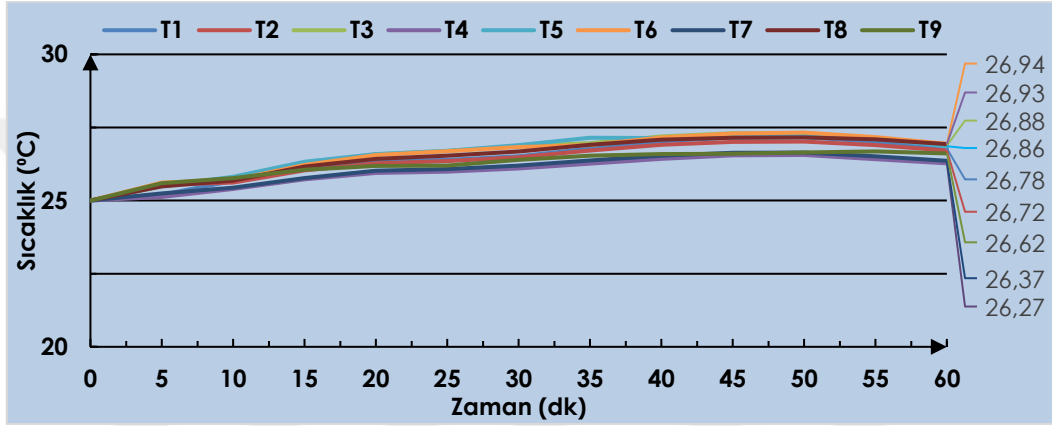
Bu çalışma kapsamında, batarya modülünün soğutma performansı üzerine etkilerini incelemek amacıyla saf su, TiO<sub>2</sub>-su ve BN-su nanoakışkanlarının kullanıldığı deney düzeneğinde, şarj ve deşarj deneyleri sonucunda toplam 12 farklı deney gerçekleştirildi. Deneyler esnasında, hücreler arasına yerleştirilen sensörler vasıtasıyla batarya modülünün maksimum sıcaklığı ve hücreler arası sıcaklık dağılımı sürekli olarak izlendi.

### 4.1. ŞARJ DENEYLERİ

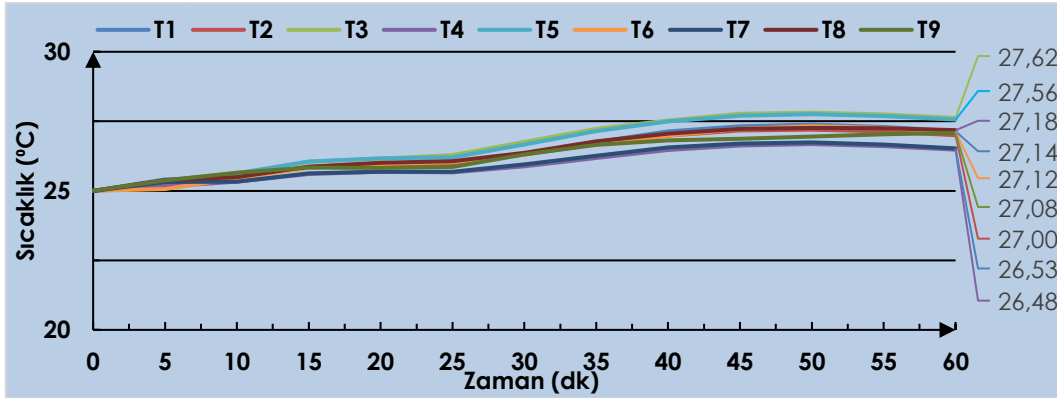
Soğutma sıvısı olarak saf su, TiO<sub>2</sub>-su ve BN-su nanoakışkanlarının kullanıldığı, sıvı giriş debisinin 790 ml/dk ve sıvı giriş sıcaklığının 25 °C’de sabit tutulduğu şarj deneyleri yapılmıştır. İlk olarak gerilim sınırının 25,2 volt olarak ayarlandığı ve 9 amperlik akım ile başlatılan ve yaklaşık 60 dakika süren şarj deneyleri sonunda batarya modülünün termal performansı değerlendirilmiştir. Şarj deneyleri sırasında, saf su, TiO<sub>2</sub>-su ve BN-su nanoakışkanları ile ayrı ayrı gerçekleştirilen şarj işlemlerinin batarya modülünün termal davranışı üzerindeki etkilerinin zaman içindeki değişimi verilmiştir. Bu deneylerde, batarya modülünün içine yerleştirilen sensörlerden elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim grafikleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu verilerden her bir soğutma sıvısı için ayrı ayrı elde edilen, batarya modülünün ortalama sıcaklığı, maksimum sıcaklığı ve hücreler arasındaki sıcaklık farkı değerleri hesaplanarak, soğutma sıvılarının batarya modülü üzerindeki termal etkileri karşılaştırılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.1. Şarj deneyleri, (a) saf su, (b) bor nitrür, (c) titanyum dioksit, 1C deşarj hızında yapılan şarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.1 incelendiğinde şarj deneyleri sonucunda pillerde oluşan maksimum sıcaklıkların saf su, bor nitrür ve titanyum dioksit katkılı soğutma sıvılarının kullanıldığı batarya termal yönetim sistemlerinde sırasıyla 27,13; 26,94 ve 27,62 °C olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle şarj esnasında en iyi soğutma performansı bor nitrür katkılı termal yönetim



sisteminde elde edilmiştir. Maksimum sıcaklıklar bakımından bor nitrür nanopartikül katkılı soğutma sıvısının saf suya göre maksimum sıcaklığı %0,7 düşürdüğü, titanyum dioksit nanopartikülünün katıldığı soğutma sıvısının ise yine saf suya göre maksimum sıcaklığı %1,8 oranında artırdığı görülmüştür. Tüm sensörlerden alınan verilere göre ise şarj deneyleri sonucunda batarya modülünde meydana gelen ortalama sıcaklık değerleri ise; saf su, bor nitrür nanopartikülü ve titanyum dioksit nanopartikülü katkılı soğutma sıvılarının kullanıldığı batarya termal yönetim sistemlerinde sırasıyla 26,93; 26,71 ve 27,08 °C olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama sıcaklık değerlerine göre en kötü soğutma performansı şarj deneyleri için titanyum dioksit nanopartikülü katkılı soğutma sıvısının kullanıldığı batarya termal yönetim sisteminde elde edilmiştir. Şarj deneyleri sonunda 9 adet sıcaklık sensöründen alınan verilerin karşılaştırılması Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Şarj deneyi (1C) sonunda sensörlerden alınan sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.2 incelediğinde en iyi soğutma performansının bor nitrür takviyeli batarya termal yönetim sisteminde elde edildiği açıkça görülmektedir. Bor nitrür takviyesi ile yalnızca sensör 3 hariç diğer tüm noktalarda en düşük sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

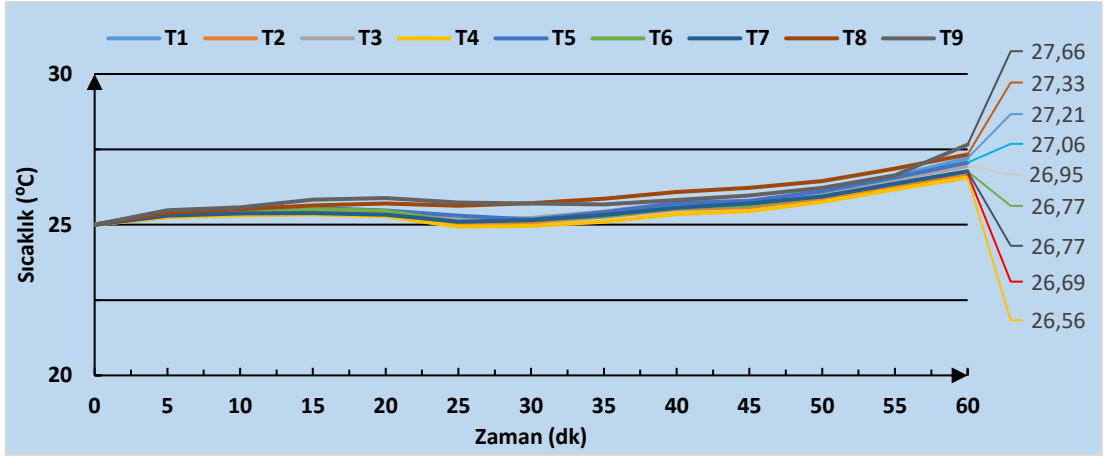
## 4.2. DEŞARJ DENEYLERİ

Deşarj deneyleri ise batarya modülünün termal yönetimi üzerindeki etkileri incelemek amacıyla 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarında gerçekleştirildi. Sırasıyla 2,8 ohm, 1,4 ohm ve 0,9 ohm direnç değerlerinin kullanıldığı deşarj deneyleri, her bir deşarj hızı için yaklaşık olarak 60 dakika, 30 dakika ve 20 dakika süresince devam etti. Saf su, TiO<sub>2</sub>-su ve BN-su nanoakışkanları ile ayrı ayrı gerçekleştirilen deşarj işlemlerinin batarya modülünün termal davranışı üzerindeki etkilerinin zaman içindeki değişimi gözlemlendi.

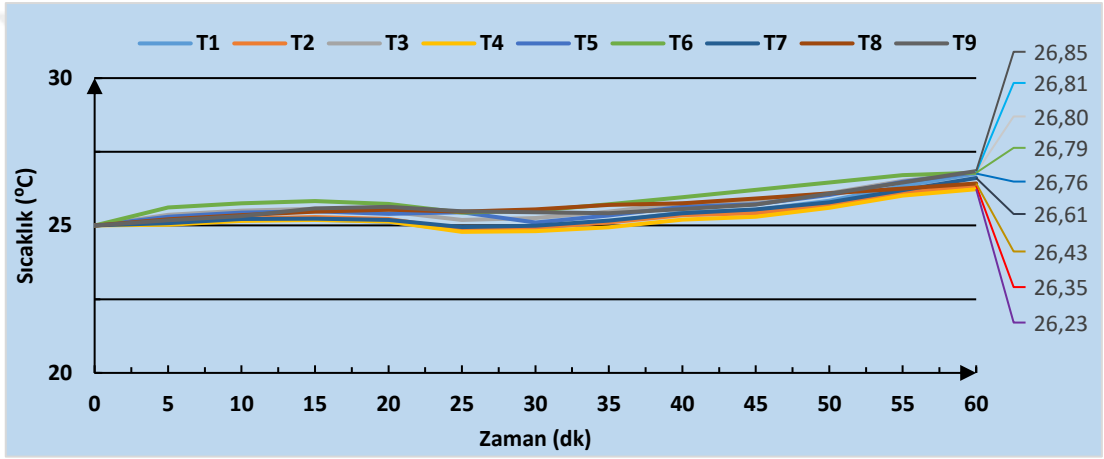
### 4.2.1. Deşarj Deneyleri (1C Deşarj Hızında)

1C deşarj hızında yapılan deşarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin

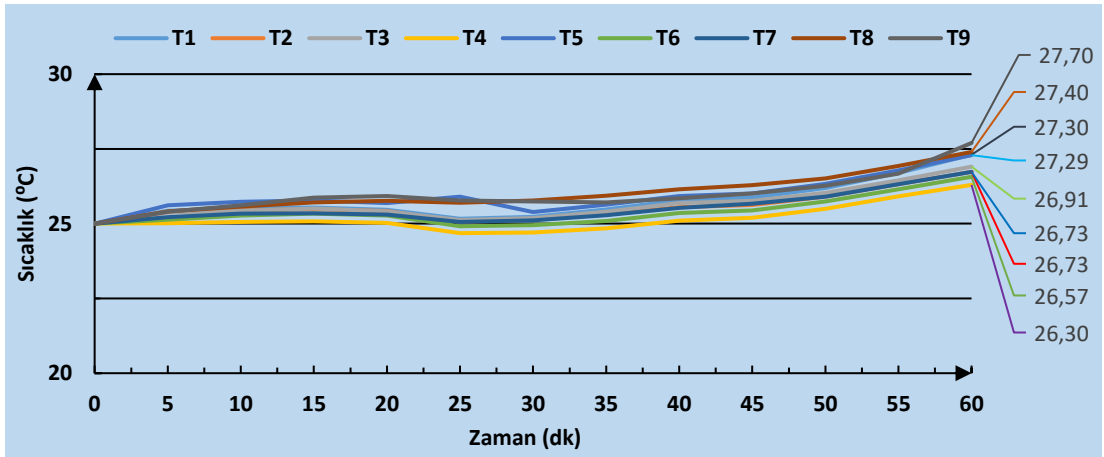
zamana göre değişimi Şekil 4.3'te görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.3. Değarj deneyleri, (a) saf su, (b) bor nitrür, (c) titanyum dioksit, 1C değarj hızında yapılan değarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.

1C deşarj verileri incelendiğinde pillerde oluşan maksimum sıcaklıkların saf su, bor nitrür ve titanyum dioksit katkılı soğutma sıvılarının kullanıldığı batarya termal yönetim sistemlerinde sırasıyla 27,66; 26,85 ve 27,70 °C olduğu görülmektedir. Şarj deneylerinde olduğu gibi 1C deşarj deneylerinde de en iyi soğutma performansının bor nitrür katkılı termal yönetim sisteminde elde edildiği görülmüştür. Maksimum sıcaklıklar bakımından bor nitrür nanopartikül katkılı soğutma sıvısının saf suya göre maksimum sıcaklığı %2,93 düşürdüğü, titanyum dioksit nanopartikülünün katıldığı soğutma sıvısının ise yine saf suya göre maksimum sıcaklığı %0,14 oranında artırdığı görülmüştür. Tüm sensörlerden alınan verilere göre ise 1C deşarj deneyleri sonucunda batarya modülünde meydana gelen ortalama sıcaklık değerlerinin; saf su, bor nitrür nanopartikülü ve titanyum dioksit nanopartikülü katkılı soğutma sıvılarının kullanıldığı batarya termal yönetim sistemlerinde sırasıyla 27,00; 26,62 ve 26,99 °C olduğu gözlemlenmiştir. Her iki nanopartikül takviyesinin de 1C deşarj deneylerinde soğutma performansı için olumlu etkiler meydana getirdiği görülmüştür. Bor nitrür en iyi performansı sağlasa da şarj deneylerinin aksine titanyum dioksit de suya göre daha iyi bir performans sergilemiştir. 1C deşarj deneyleri sonunda 9 adet sıcaklık sensöründen alınan verilerin birbirleriyle karşılaştırılması Şekil 4.4'te verilmiştir.

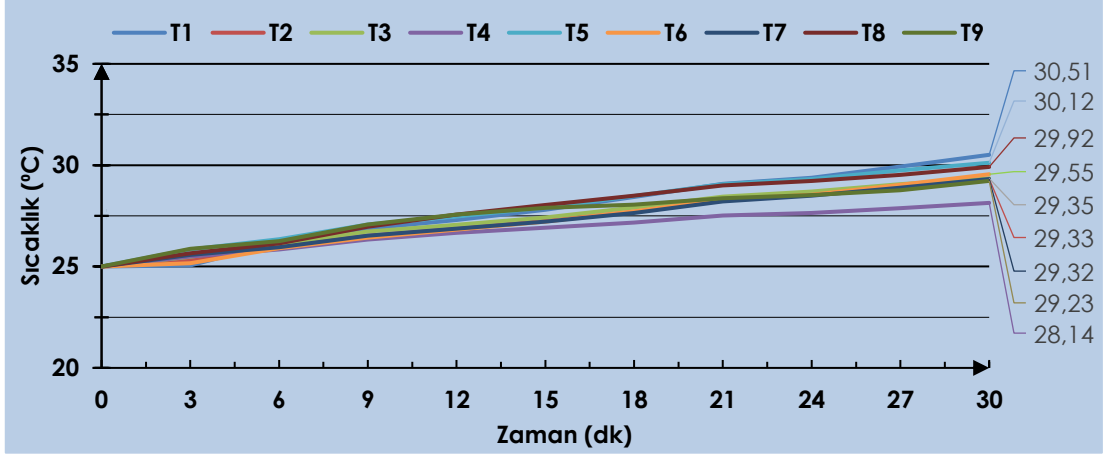


Şekil 4.4. Deşarj deneyi (1C) sonunda sensörlerden alınan sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.

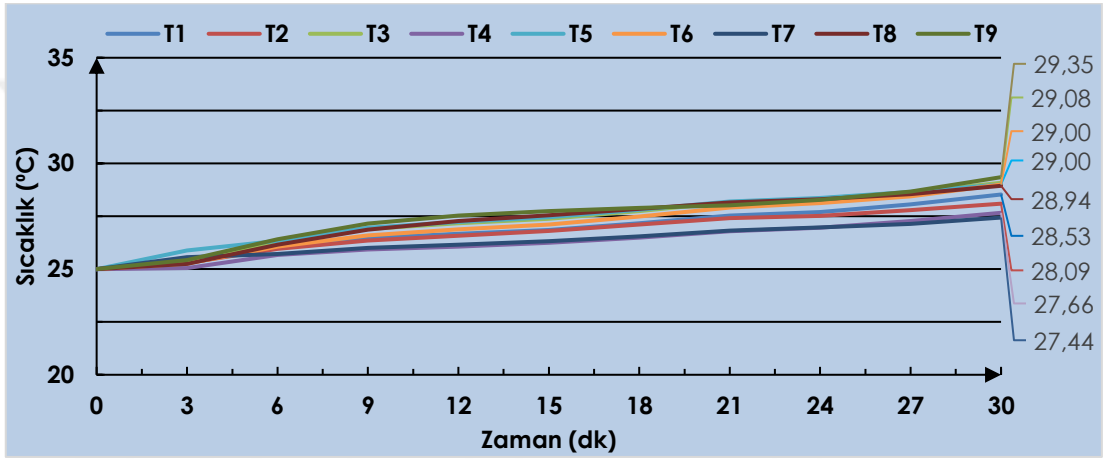
Şekil 4.4 incelediğinde en iyi soğutma performansının bor nitrür takviyeli batarya termal yönetim sisteminde elde edildiği açıkça görülmektedir. Bor nitrür takviyesi ile yalnızca sensör 6 hariç diğer tüm noktalarda en düşük sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

#### 4.2.2. Deşarj Deneyleri (2C Deşarj Hızında)

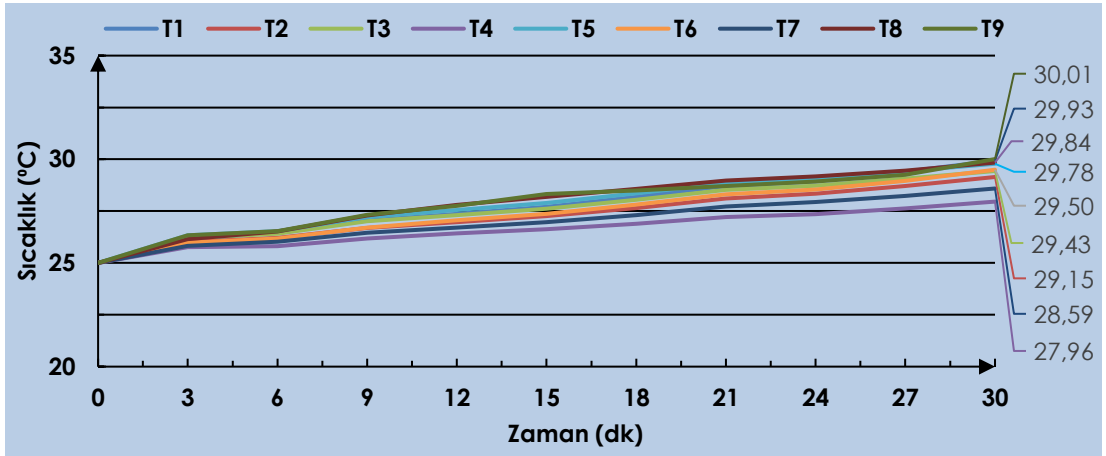
2C deşarj hızında yapılan deşarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana göre değişimi Şekil 4.5'te görülmektedir.



(a)



(b)

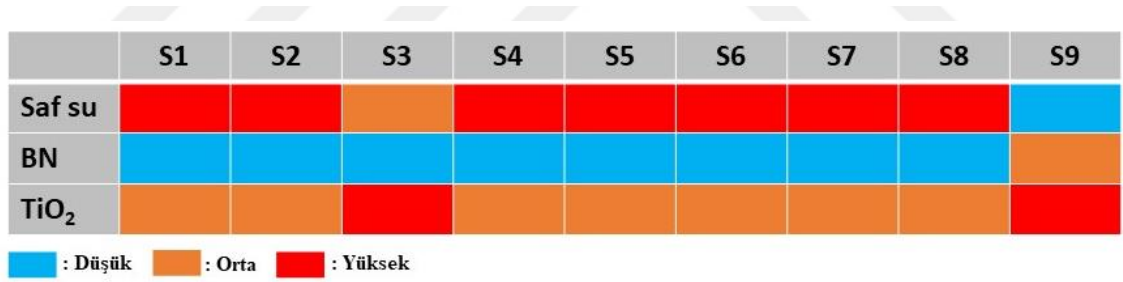


(c)

Şekil 4.5. Deşarj deneyleri, (a) saf su, (b) bor nitrür, (c) titanyum dioksit, 2C deşarj hızında yapılan deşarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.

2C deşarj verileri incelendiğinde pillerde oluşan maksimum sıcaklıkların saf su, bor nitrür ve titanyum dioksit katkılı soğutma sıvılarının kullanıldığı batarya termal yönetim

sistemlerinde sırasıyla 30,51; 29,35 ve 30,01 °C olduğu görülmektedir. 2C deşarj deneylerinde de en iyi soğutma performansının bor nitrür katkılı termal yönetim sisteminde elde edildiği görülmüştür. Maksimum sıcaklıklar bakımından bor nitrür nanopartikül katkılı soğutma sıvısının saf suya göre maksimum sıcaklığı %3,80, titanyum dioksit nanopartikülünün katıldığı soğutma sıvısının ise yine saf suya göre maksimum sıcaklığı %1,63 oranında düşürdüğü görülmüştür. Maksimum sıcaklıklar açısından önceki şarj ve deşarj deneylerinin aksine titanyum dioksit nanopartikülünün katıldığı soğutma sıvısının da maksimum sıcaklığı düşürmede pozitif yönde bir etkisi görülmüştür. Tüm sensörlerden alınan verilere göre ise 2C deşarj deneyleri sonucunda batarya modülünde meydana gelen ortalama sıcaklık değerlerinin; saf su, bor nitrür nanopartikülü ve titanyum dioksit nanopartikülü katkılı soğutma sıvılarının kullanıldığı batarya termal yönetim sistemlerinde sırasıyla 29,50; 28,57 ve 29,35 °C olduğu gözlemlenmiştir. Her iki nanopartikül takviyesinin de 1C deşarj deneylerinde olduğu gibi soğutma performansı açısından olumlu etkiler meydana getirdiği görülmüştür. Bor nitrür ilavesi önceki deneylerde olduğu gibi en iyi soğutma performansını göstermiştir. 2C deşarj deneyleri sonunda 9 adet sıcaklık sensöründen alınan verilerin birbirleriyle karşılaştırılması Şekil 4.6'da verilmiştir.

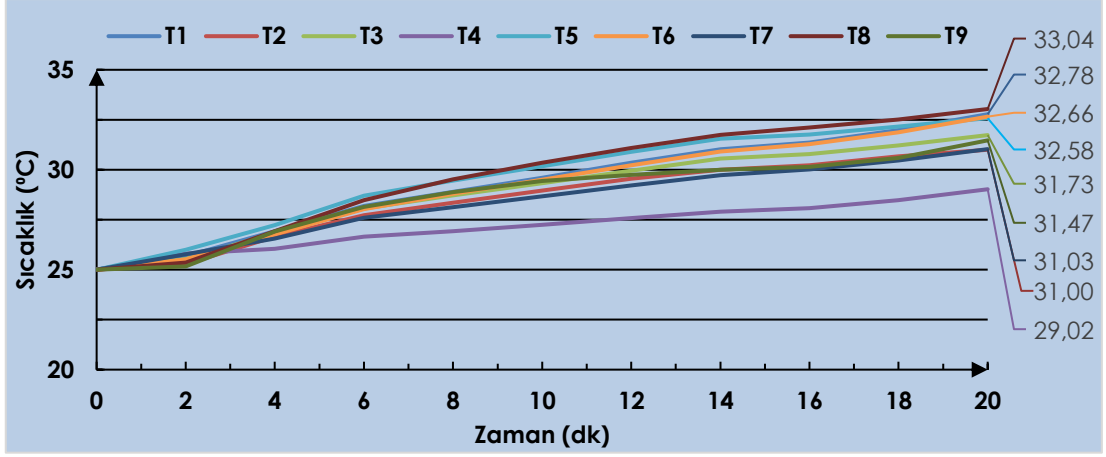


Şekil 4.6. Deşarj deneyi (2C) sonunda sensörlerden alınan sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.

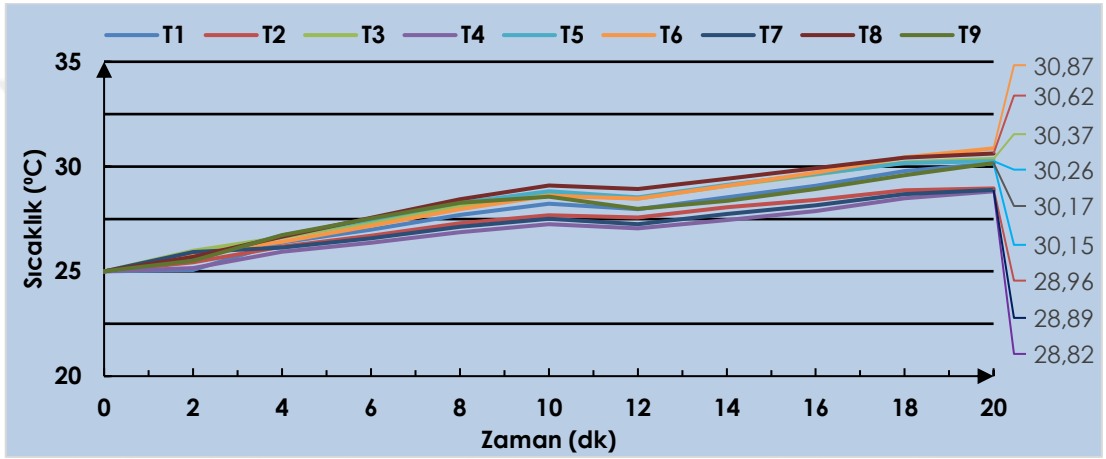
Şekil 4.6 incelediğinde en iyi soğutma performansının bor nitrür takviyeli batarya termal yönetim sisteminde elde edildiği açıkça görülmektedir. Bor nitrür takviyesi ile yalnızca sensör 9 hariç diğer tüm noktalarda en düşük sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

#### 4.2.3. Deşarj Deneyleri (3C Deşarj Hızında)

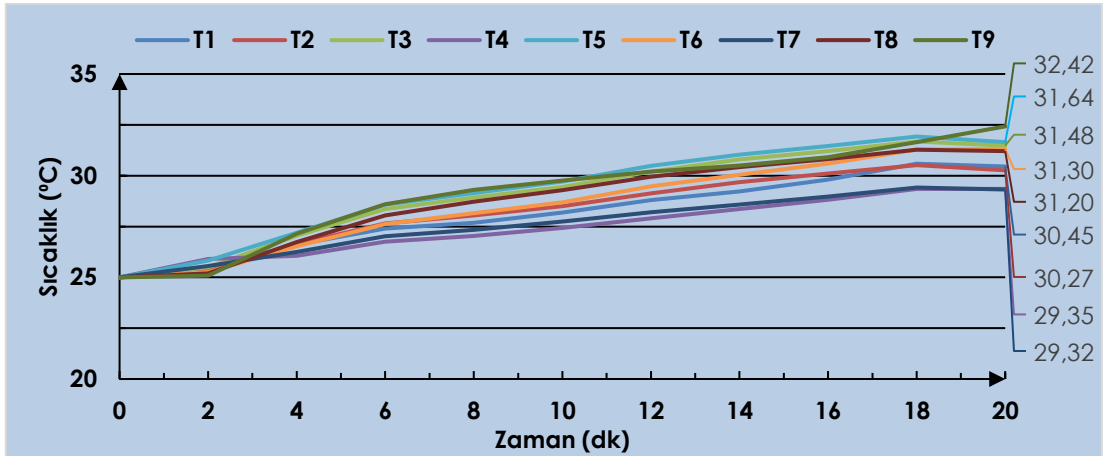
3C deşarj hızında yapılan deşarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana göre değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.7. Deşarj deneyleri, (a) saf su, (b) bor nitrür, (c) titanyum dioksit, 3C deşarj hızında yapılan deşarj deneylerinde 9 farklı sensörden alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.

3C deşarj verileri incelendiğinde pillerde oluşan maksimum sıcaklıkların saf su, bor nitrür

ve titanyum dioksit katkılı soğutma sıvılarının kullanıldığı batarya termal yönetim sistemlerinde sırasıyla 33,04; 30,87 ve 32,42 °C olduğu görülmektedir. 3C deşarj deneylerinde de en iyi soğutma performansının diğer tüm deneylerde olduğu gibi bor nitrür katkılı termal yönetim sisteminde elde edildiği görülmüştür. Başka bir deyişle maksimum sıcaklıklar bakımından bor nitrür nanopartikül katkılı soğutma sıvısının saf suya göre maksimum sıcaklığı %6,57, titanyum dioksit nanopartikülünün katıldığı soğutma sıvısının ise yine saf suya göre maksimum sıcaklığı %1,88 oranında düşürdüğü görülmüştür. Maksimum sıcaklıklar açısından titanyum dioksit nanopartikülünün katıldığı soğutma sıvısının maksimum sıcaklığı düşürmede pozitif yönde bir etkisi olmasının yanı sıra bu etkinin artan deşarj oranları için daha da artacağı öngörülmektedir. Tüm sensörlerden alınan verilere göre ise 3C deşarj deneyleri sonucunda batarya modülünde meydana gelen ortalama sıcaklık değerlerinin; saf su, bor nitrür nanopartikülü ve titanyum dioksit nanopartikülü katkılı soğutma sıvılarının kullanıldığı batarya termal yönetim sistemlerinde sırasıyla 31,70; 29,90 ve 30,83 °C olduğu ve her iki nanopartikül takviyesinin de önceki deşarj deneylerinde olduğu gibi soğutma performansı açısından olumlu etkiler meydana getirdiği görülmüştür. Bor nitrür ilavesi önceki deneylerde olduğu gibi en iyi soğutma performansını göstermiştir. 3C deşarj deneyleri sonunda 9 adet sıcaklık sensöründen alınan verilerin birbirleriyle karşılaştırılması Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Deşarj deneyi (3C) sonunda sensörlerden alınan sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.8 incelediğinde en iyi soğutma performansının bor nitrür takviyeli batarya termal yönetim sisteminde elde edildiği açıkça görülmektedir. Bor nitrür takviyesi ile tüm noktalarda en düşük sıcaklık değerlerinin elde edildiği ve nanopartikül takviyesinin genel olarak soğutma performansını olumlu yönde etkilemesinin yanında bor nitrürün titanyum dioksite göre daha iyi bir alternatif olduğu kanaatine varılmıştır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, gelişmekte ve yaygınlaşmakta olan hibrit elektrikli araçlar ve elektrikli araçlar için batarya termal yönetim sistemi (BTYS) tasarımının önemi ve yöntemleri incelenmiştir. Hibrit elektrikli araçlar ve elektrikli araçlar, fosil yakıtlı araçlara göre daha çevre dostu, verimli ve ekonomik olsalar da performans ve rekabet gücünü arttırmak için bataryaların daha uzun ömürlü, daha güvenli ve daha yüksek kapasiteli olması gerekmektedir. Bataryaların performansı ve ömrü çalışma sıcaklığına bağlıdır. Çok yüksek veya çok düşük sıcaklık, bataryaların kapasitesini, gücünü, verimliliğini ve güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, bataryaların içindeki sıcaklık dağılımının eşit olmaması da bataryaların ömrünü kısaltmaktadır. Bu da BTYS'nin tasarımını ve optimizasyonunu zorunlu kılmaktadır.

Batarya paketlerinin tarihçesi ve gelişimi üzerine yapılan literatür araştırmasında, lityum bazlı pillerin performans, maliyet, çevrim ömrü, kapasite, ağırlık ve yüksek güç gibi kriterlerde daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmadaki batarya modülü, elektrikli araçlar ve hibrit elektrikli araçlar gibi pek çok alanda tercih edilen lityum iyon pillerden oluşturulmuştur.

Hibrit elektrikli araçlar ve elektrikli araçlar için BTYS tasarımının önemi ve yöntemleri literatür taraması ile incelenmiştir. Literatürdeki BTYS çeşitleri arasında hava soğutma, sıvı soğutma, faz değiştiren malzeme ve ısı borusu gibi temel yöntemler bulunmaktadır. Her yöntemin kendine özgü bir uygulama koşulu, avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca, elektrikli araçlar için daha güvenilir ve çevre dostu bir seçenek olması adına temel yöntemlerin farklı kombinasyonlarıyla oluşturulan hibrit soğutma yöntemleri de tasarlanmakta ve üzerine çalışmalar yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sıvı soğutma sisteminin, yapılan geniş literatür taramasında, bataryanın performansı, enerjisi, güvenliği açısından birçok elektrikli araç üreticisi tarafından tercih edildiği gözlemlenmiştir.

Yapılan literatür araştırmasında, nanoakışkanların farklı uygulama alanlarında termal performansı arttırdığı görülmüştür. Nanoakışkanların termal iletkenliği ısı transfer katsayısını ve ısı kapasitesini yükselttiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, sıvı soğutma



sisteminde temel akışkan olarak kullanılan saf suyun termal performansı, %0,1 katkıli TiO<sub>2</sub>-su ve %0,1 katkıli BN-su nanoakışkanlarının termal performansı ile karşılaştırılmıştır. BN nanopartikülünün kullanım tercih sebebi, yüksek termal iletkenlik, ısıl kararlılık gibi özelliklerinin yanı sıra Türkiye'nin dünyanın en büyük bor rezervine sahip olması ve ekonomik bir avantaj sağlayabileceği olmasından kaynaklanmaktadır. TiO<sub>2</sub> nanopartikülü ise yapılan literatür taramasında, yüksek termal iletkenlik, ısıl kararlılık ve yüksek verim gibi üstünlükleri nedeniyle tercih edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmada, 6S-3P konfigürasyonunda 18 adet Sony 18650 tipi lityum-iyon pil modülü bakır soğutma kanalı içerisine yerleştirilmiştir. Saf su, TiO<sub>2</sub>-su ve BN-su nanoakışkanları soğutma kanalı içerisinden ayrı ayrı gönderilerek termal performansları karşılaştırılmıştır. Deneyler, pil modülünü farklı koşullarda test etmek adına 1C şarj ve 1C, 2C ve 3C deşarj oranlarında gerçekleştirilmiştir. Deney boyunca tüm sıvıların giriş sıcaklığı 25 °C ve debisi 790 ml/dk olacak şekilde sabit tutulmuştur. Nanoakışkanların termal performansının saf su ile karşılaştırılması için ayrı ayrı gerçekleştirilen şarj ve deşarj işlemleri sonucunda toplamda 12 adet deney gerçekleştirilmiştir.

Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen şarj deneylerinin termal performansları, 25 °C sıvı giriş sıcaklığı ve 790 ml/dk sabit debi ile 1C şarj oranında gerçekleştirilen ve 60 dakika süren şarj deneyleri sonucunda karşılaştırılmıştır. Şarj deneyleri, pil hücrelerinin aralarına yerleştirilen 9 adet sıcaklık sensöründen alınan verilere göre değerlendirilmiştir.

- 1C şarj oranında Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen şarj deneyleri sonucunda, batarya modülünün ortalama sıcaklığı sırasıyla 26,93 °C, 26,71 °C ve 27,08 °C olarak ölçülmüştür. Hücreler arası maksimum sıcaklık farkı ise sırasıyla 0,42 °C, 0,67 °C ve 1,14 °C olarak ölçülmüştür.
- Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen şarj deneyleri sonucunda, üç sıvının da batarya modülünün optimum sıcaklığını sağladığı görülmüştür. Şarj deneyi sonucunda batarya modülünde ölçülen maksimum sıcaklıklar sırasıyla 27,13 °C, 26,94 °C ve 27,62 °C olarak ölçülmüştür.
- BN-su nanoakışkanının termal performansının diğer soğutucu akışkanlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanın termal iletkenliği saf suya göre daha yüksek olmasına rağmen saf su, TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanına göre daha

iyi bir termal performans göstermiştir. Bu durumun olası nedenleri, nanopartikül konsantrasyonu, parçacık boyutu ve şekli, akış rejimi gibi faktörlerden kaynaklanabilir.

Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen deşarj deneylerinin termal performansları, 25 °C sıvı giriş sıcaklığı ve 790 ml/dk sabit debi ile 1C deşarj oranında gerçekleştirilen ve 60 dakika süren deşarj deneyleri sonucunda karşılaştırılmıştır. Deşarj deneyleri, pil hücrelerinin aralarına yerleştirilen 9 adet sıcaklık sensöründen alınan verilere göre değerlendirilmiştir.

- 1C deşarj oranında Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen deşarj deneyleri sonucunda, batarya modülünün ortalama sıcaklığı sırasıyla 27,00 °C, 26,62 °C ve 26,99 °C olarak ölçülmüştür. Hücreler arası maksimum sıcaklık farkı ise sırasıyla 1,10 °C, 0,62 °C ve 1,40 °C olarak ölçülmüştür.
- Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen deşarj deneyleri sonucunda, üç sıvının da batarya modülünün optimum sıcaklığını sağladığı görülmüştür. Deşarj deneyi sonucunda batarya modülünde ölçülen maksimum sıcaklıklar sırasıyla 27,66 °C, 26,85 °C ve 27,70 °C olarak ölçülmüştür.
- BN-su nanoakışkanının termal performansının diğer soğutucu akışkanlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanın termal iletkenliği saf suya göre daha yüksek olmasına rağmen saf su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanın termal performansları arasında anlamlı bir fark oluşmamıştır. Bu durumun olası nedenleri, nanopartikül konsantrasyonu, parçacık boyutu ve şekli, akış rejimi gibi faktörlerden kaynaklanabilir.

Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen deşarj deneylerinin termal performansları, 25 °C sıvı giriş sıcaklığı ve 790 ml/dk sabit debi ile 2C deşarj oranında gerçekleştirilen ve 30 dakika süren deşarj deneyleri sonucunda karşılaştırılmıştır. Deşarj deneyleri, pil hücrelerinin aralarına yerleştirilen 9 adet sıcaklık sensöründen alınan verilere göre değerlendirilmiştir.

- 2C deşarj oranında Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen deşarj deneyleri sonucunda, batarya modülünün ortalama sıcaklığı sırasıyla 29,50 °C, 28,57 °C ve 29,35 °C olarak ölçülmüştür. Hücreler arası maksimum sıcaklık farkı ise sırasıyla 2,37 °C, 1,91 °C ve 2,05 °C olarak ölçülmüştür.

- Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen deşarj deneyleri sonucunda, üç sıvının da batarya modülünün optimum sıcaklığını sağladığı görülmüştür. Deşarj deneyi sonucunda batarya modülünde ölçülen maksimum sıcaklıklar sırasıyla 30,51 °C, 29,35 °C ve 30,01 °C olarak ölçülmüştür.
- 2C Deşarj oranında BN-su nanoakışkanının hem ortalama sıcaklığı hem de maksimum sıcaklık farkı diğer nanoakışkanlardan daha düşüktür. Ancak, deşarj oranının artmasıyla nanoakışkanların termal performanslarının saf suya göre yükseldiği görülmüştür. Bu durumun olası nedenleri, deşarj oranı arttıkça, batarya paketindeki ısı akışı da artar. Nanoakışkanların ısı transfer katsayısı, saf sudan daha yüksektir. Bu, nanoakışkanların ısıyı daha verimli bir şekilde transfer ettikleri anlamını taşır.

Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen deşarj deneylerinin termal performansları, 25 °C sıvı giriş sıcaklığı ve 790 ml/dk sabit debi ile 3C deşarj oranında gerçekleştirilen ve 20 dakika süren deşarj deneyleri sonucunda karşılaştırılmıştır. Deşarj deneyleri, pil hücrelerinin aralarına yerleştirilen 9 adet sıcaklık sensöründen alınan verilere göre değerlendirilmiştir.

- 3C deşarj oranında Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen deşarj deneyleri sonucunda, batarya modülünün ortalama sıcaklığı sırasıyla 31,70 °C, 29,90 °C ve 30,83 °C olarak ölçülmüştür. Hücreler arası maksimum sıcaklık farkı ise sırasıyla 4,02 °C, 2,05 °C ve 3,10 °C olarak ölçülmüştür.
- Saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen deşarj deneyleri sonucunda, üç sıvının da batarya modülünün optimum sıcaklığını sağladığı görülmüştür. Deşarj deneyi sonucunda batarya modülünde ölçülen maksimum sıcaklıklar sırasıyla 33,04 °C, 30,87 °C ve 32,42 °C olarak ölçülmüştür.
- 3C deşarj oranında BN-su nanoakışkanının hem ortalama sıcaklığı hem de maksimum sıcaklık farkı diğer nanoakışkanlardan daha düşüktür. Deşarj oranının artmasıyla saf suyun termal performansındaki düşüş oranı dikkat çekmiştir. Batarya paketinin performansı ve ömrü açısından maksimum sıcaklığının 35 °C'nin altında olması gerekmektedir. Ayrıca hücreler arası sıcaklık farkının 5 °C'nin altında tutulması gerekmektedir. 3C deşarj deneyi sonucunda saf su için maksimum sıcaklık ve hücreler arası sıcaklık farkı sırasıyla 33,04 °C ve 4,02 °C olarak ölçülmüş ve bu değerler kritik sınır sıcaklığına oldukça yaklaşmıştır. Daha

yüksek deşarj oranlarında batarya paketinin maksimum sıcaklığı ve hücreler arası sıcaklık farkı yükselir. Bu durumda, saf su batarya paketinin optimum sıcaklığını sağlayamaz ve batarya ömrünü ve verimliliğini azaltabilir. Bu nedenle deşarj oranının artmasıyla saf suyun batarya soğutmasında yetersiz kalacağı öngörülmektedir.

- Buna karşılık, nanoakışkanların, artan deşarj oranlarına göre termal performanslarındaki düşüş oranı saf suya göre oldukça düşüktür. Bu bulgular, nanoakışkanların batarya soğutmasında saf suya göre daha etkili bir alternatif olduğunu göstermektedir.
- Deneyler sonucunda, saf su, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanlarının termal performansları karşılaştırıldığında sıralama şu şekilde oluşmuştur;

%0,1 BN-su > %0,1 TiO<sub>2</sub>-su > Saf su

Bu çalışmada, elektrikli araç ve hibrit elektrikli araç bataryalarının termal yönetim sistemlerinde nanoakışkan kullanımının avantajları ve dezavantajları incelenmiş olup, nanoakışkanların seçimi, hazırlanması, kararlılığı ve çevresel etkileri gibi konularda çalışmaların gelişmesine katkı sağlaması umulan bazı önemli noktalar ve çözüm yolları şöyle belirtilebilir;

- Batarya termal yönetim sisteminde nanoakışkan kullanımının avantajları ve dezavantajları literatürde henüz tam olarak belirlenememiş ve optimizasyon parametreleri sabit tutulmuştur. Bu çalışmada, ısı iletkenliği yüksek olan BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanlarının batarya performansına etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, BN-su nanoakışkanının batarya termal yönetim sisteminde en uygun seçenek olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, BN-su nanoakışkanının farklı çalışma koşullarında batarya termal yönetim sisteminde kullanılması daha fazla araştırılmalıdır.
- Bu çalışma kapsamında deneysel koşullar nanoakışkanların sıcaklık değişimlerine göre termal iletkenliklerinin ölçülmesine izin vermemiştir. Bu nedenle, bu parametrenin ilerleyen çalışmalarda veya farklı araştırmacılar tarafından daha hassas sıcaklık kontrolü yapabilen düzenekler ile mutlaka araştırılması ve nanoakışkanların termodinamik yönden daha detaylı analiz edilmesi gerektiği öngörülmektedir.

- Bu çalışmada, batarya termal yönetim sisteminde nanoakışkan kullanımında, herhangi bir kimyasal stabilizatör eklemeyen BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanları hazırlanmıştır. Bu durum nanopartiküllerin kristal kafes boyutlarının ve yüzey alanlarının artmasına neden olmaktadır. Bu da nanopartiküllerin dağılım davranışlarını olumsuz yönde etkileyerek, kümeleşme ve çökme eğilimlerini arttırmaktadır. Bu akışkanların, ısıl iletkenlikleri ve batarya sıcaklığı üzerindeki etkileri açısından iyi sonuçlar elde edilmiş olsa da nanopartiküllerin dağılım davranışlarının iyileştirilmesi için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Bu sayede, nanoakışkanların ısı transfer performanslarının daha da artırılabilceği düşünülmektedir.
- Batarya termal yönetim sisteminde nanoakışkan kullanımının performansının iyi olduğu sonucuna varılsa da bu varsayımın doğrulanması için nanoakışkanların tekrarlanabilirlik analizlerine ihtiyaç vardır. Bu analizler, aynı nanoakışkan kullanılarak aynı koşullarda gerçekleştirilen deneylerin belirli zaman aralıklarıyla tekrar edilmesi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması yoluyla yapılmalıdır. Zaman içinde sonuçlarda oluşabilecek değişiklikler nanoakışkanların kullanım ömrünü ve stabilitesini etkileyebilir. Nanoakışkanların ticari olarak kullanılabilmesi, batarya soğutma sisteminin verimliliğini iyileştirebilir ve böylece ulaşım sektöründe elektrikli araçların performans ve rekabet gücünü artırabilir. Bu çalışmada, BN-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanlarının batarya termal yönetim sistemindeki termal performansı saf suyun termal performansı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, diğer soğutucu akışkanlara göre %0,1 konsantrasyonda BN-su nanoakışkanının en iyi performansı verdiği görülmüştür. Bu nanoakışkan için tekrarlanabilirlik ve ekonomik analizler yapılması halinde, batarya termal yönetim sisteminde kullanılma potansiyelinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Dinçer İ. ve Ezan M. A., “Tüba Enerji Depolama Teknolojileri Raporu”, *Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları*, Ankara, Mayıs 2020.
- [2] U. Nations, D. of Economic, S. Affairs, ve P. Division, “World Population Prospects 2022 Summary of Results”. (13 Ocak, 2023). [Online]. Erişim: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary>
- [3] “IEA (2022), World Energy Outlook 2022, IEA, Paris”, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A). (13 Ocak, 2023). [Online]. Erişim: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [4] “bp Energy Outlook 2022”. (13 Ocak, 2023). [Online]. Erişim: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf>
- [5] “IEA, Transport sector CO2 emissions by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030, IEA, Paris”, IEA. Licence: CC BY 4.0. (31 Ekim, 2023). [Online]. Erişim: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/transport-sector-co2-emissions-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>
- [6] “Hannah Ritchie (2020) - “Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from?” (31 Ekim, 2023). [Online]. Erişim: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>
- [7] “The world’s first electric car | Collection stories | University Museum | University of Groningen”. (24 Aralık, 2023). [Online]. Erişim: <https://www.rug.nl/museum/collections/collection-stories/wagentje-van-stratingh?lang=en>
- [8] F. B. Özkanlı ve Z. Demir, “Integration of Electric Vehicles Into The Smart Grid”, *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilimler*, c. 9, sy 2021, ss. 51-60, Ara. 2021.
- [9] A. Kerem, “Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri”, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 5, sy 1, ss. 1-13, 2014.

- [10] “Elektrikli arabanın icadı ve 190 yıllık tarihi gelişimi”. (26 Haziran, 2023). [Online]. Erişim: <https://evrenatlasi.com/elektrikli-arabanin-icadi-ve-tarihi-gelisimi/>
- [11] S. Kocabey, “Elektrikli otomobillerin dünü, bugünü ve geleceği”, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, c. 1, sy 1, ss. 16-23, Şub. 2018.
- [12] G. Caner Birer, “Elektrikli Araçlar”, *Bilim ve Teknik Dergisi*. (24 Aralık, 2023). [Online]. Erişim: [https://bilimteknik.tubitak.gov.tr/system/files/makale/28\\_elektrikli.pdf](https://bilimteknik.tubitak.gov.tr/system/files/makale/28_elektrikli.pdf)
- [13] Gürbüz Y. ve Kulaksız A. A., “Elektrikli araçlar ile klasik içten yanmalı motorlu araçların çeşitli yönlerden karşılaştırılması”, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 6, sy 2, ss. 117-125, 2016.
- [14] A. G. Abo-Khalil vd., “Electric vehicle impact on energy industry, policy, technical barriers, and power systems”, *International Journal of Thermofluids*, c. 13, sy 100134, ss. 1-12, 2022.
- [15] “Internal combustion engine vs electric motor”. (30 Haziran, 2023). [Online]. Erişim: <https://www.aldautomotive.at/en/useful-information/mobility-blog/articles/internal-combustion-engine-vs-electric-motor>
- [16] “İçten Yanmalı ve Turbo Motor Nedir? Nasıl Çalışır?” (01 Temmuz, 2023). [Online]. Erişim: <https://rentiva.com/blog/icten-yanmali-turbo-motor-nedir-nasil-calisir>
- [17] “Elektrik Motoru nedir? Çeşitleri nelerdir? – Mugul Elektronik”. (01 Temmuz, 2023). [Online]. Erişim: <https://mugul.com/elektrik-motoru/>
- [18] L. Xin ve S. S. Williamson, “Assessment of efficiency improvement techniques for future power electronics intensive hybrid electric vehicle drive trains”, içinde *IEEE Canada Electrical Power Conference*, Canada, 2007, ss. 268-273.
- [19] A. Emadi, Y. J. Lee, ve K. Rajashekara, “Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 55, sy 6. ss. 2237-2245, 2008.
- [20] C. C. Chan, “The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, c. 95, sy 4, ss. 704-718, 2007.

- [21] Omonowo D. Momoh ve Michael O. Omoigui, “An overview of hybrid electric vehicle technology”, içinde *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* , 2009, ss. 1286-1292.
- [22] M. Sefa Çetin, B. Karakaya ve T. Gençoğlu, “Elektrikli araçlar için lityum iyon bataryaların modellenmesi”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, c. 33, sy 2, ss. 755-763, 2021.
- [23] Durmuş F. S. ve Kaymaz H., “Elektrikli araç şarj yöntemleri”, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi*, c. 3, sy 2, ss. 123-139, Eki. 2020.
- [24] “Electric cars and plug-in hybrids explained”. (01 Temmuz, 2023). [Online]. Erişim: <https://www.bmw.com/en/innovation/Plug-in-hybrid-and-other-kinds-of-electric-cars.html>
- [25] M. Muthukumar, N. Rengarajan, B. Velliyangiri, M. A. Omprakas, C. B. Rohit, ve U. K. Raja, “The development of fuel cell electric vehicles - A review”, içinde *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, ss. 1181-1187.
- [26] J. Ying Yong, V. K. Ramachandaramurthy, K. Miao Tan, ve N. Mithulananthan, “A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects”, *Renewable and sustainable energy reviews*, c. 49, ss. 365-385, 2015.
- [27] J. J. Kopera, “Inside the Nickel metal hydride battery. Cobasys, MI, USA”. (16 Kasım, 2023). [Online]. Erişim: [https://www.cobasys.com/pdf/tutorial/InsideNimhBattery/inside\\_nimh\\_battery\\_technology.html](https://www.cobasys.com/pdf/tutorial/InsideNimhBattery/inside_nimh_battery_technology.html)
- [28] C.-H. Dustmann, “Advances in ZEBRA batteries”, *J Power Sources*, c. 127, sy 1-2, ss. 85-92, 2004.
- [29] J. L. Sudworth, “The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery”, *J Power Sources*, c. 100, sy 1-2, ss. 149-163, 2001.
- [30] S. F. Tie ve C. W. Tan, “A review of energy sources and energy management system in electric vehicles”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 20, ss. 82-102, 2013.
- [31] “The Difference Between Lithium Ion Batteries vs Lithium Iron Phosphate Batteries”. (04 Temmuz, 2023). [Online]. Erişim:



<https://www.lithiumbatterychina.com/tr/blog/2021/08/19/the-difference-between-lithium-ion-batteries-vs-lithium-iron-phosphate-batteries/>

- [32] V. S. Kolosnitsyn ve E. V. Karaseva, “Lithium-sulfur batteries: Problems and solutions”, *Russian Journal of Electrochemistry*, c. 44, sy 5, ss. 506-509, 2008.
- [33] A. Opitz, P. Badami, L. Shen, K. Vignarooban, ve A. M. Kannan, “Can Li-Ion batteries be the panacea for automotive applications?”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 68, sy 1. Elsevier Ltd, ss. 685-692, 2017.
- [34] Kul B., “Geçmişten günümüze piller”, *Takvim-i Vekayi*, c. 8, sy 1, ss. 104-115, 2020.
- [35] M. S. Whittingham ve A. Yoshino, “Lithium-ion batteries”, *The Royal Swedish Academy of Sciences*, ss. 1-13, 2019.
- [36] B. Deniz ve Ö. Keleş, “Lityum iyon pil teknolojisi”, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası*, c. 162, ss. 42-48, 2013.
- [37] “2019’da Dünyadaki 5 Büyük Lithium-İyon Pil Üreticisine Bakış”. (04 Temmuz, 2023). [Online]. Erişim: <https://www.myenerjisolar.com/dunyadaki-5-buyuk-lithium-ion-pil-ureticisi/>
- [38] H. Liu, Z. Wei, W. He, ve J. Zhao, “Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review”, *Energy Convers Manag*, c. 150, ss. 304-330, 2017.
- [39] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, ve G. Yushin, “Li-ion battery materials: present and future”, *Materials Today*, c. 18, sy 5, ss. 252-264, 2015.
- [40] Sivakumar M, Muruganantham R, ve Subadevi R, “Synthesis of surface modified LiFePO<sub>4</sub> cathode material via polyol technique for high rate lithium secondary battery”, *Appl Surf Sci*, c. 337, ss. 234-240, 2015.
- [41] J. Lee, P. Kumar, B. M. Moudgil, ve R. K. Singh, “Electrochemical enhancement of LiFePO<sub>4</sub> as a cathode material by incorporating Cu flakes for lithium ion rechargeable battery”, *Solid State Ion*, c. 231, ss. 18-24, 2012.
- [42] C.-W. Shen *vd.*, “Low temperature process modified MCMB for lithium ion batteries”, *Solid State Ion*, c. 268, ss. 282-287, 2014.

- [43] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, ve Y. Yan, “A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 64, ss. 106-128, 2016.
- [44] F. Jiang, Y. Nie, L. Yin, Y. Feng, Q. Yu, ve C. Zhong, “Core-shell-structured nanofibrous membrane as advanced separator for lithium-ion batteries”, *J Memb Sci*, c. 510, ss. 1-9, Tem. 2016.
- [45] “The market size of lithium battery structural parts in China-Tycorun Batteries”. (06 Temmuz, 2023). [Online]. Erişim: <https://www.tycorun.com/blogs/news/the-market-size-of-lithium-battery-structural-parts-in-china>
- [46] J. Jaguemont, L. Boulon, ve Y. Dubé, “A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures”, *Appl Energy*, c. 164, ss. 99-114, 2016.
- [47] S. Ma vd., “Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review”, *Progress in Natural Science: Materials International*, c. 28, sy 6, ss. 653-666, 2018.
- [48] L. H. J. Raijmakers, D. L. Danilov, R.-A. Eichel, ve P. H. L. Notten, “A review on various temperature-indication methods for Li-ion batteries”, *Appl Energy*, c. 240, ss. 918-945, 2019.
- [49] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, C. Wimmer, T. Soczka-Guth, ve D. U. Sauer, “Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation”, *J Power Sources*, c. 196, sy 12, ss. 5334-5341, 2011.
- [50] D. Danilov ve P. H. L. Notten, “Mathematical modelling of ionic transport in the electrolyte of Li-ion batteries”, *Electrochim Acta*, c. 53, sy 17, ss. 5569-5578, 2008.
- [51] C. Heubner, M. Schneider, C. Lämmel, ve A. Michaelis, “Local heat generation in a single stack lithium ion battery cell”, *Electrochim Acta*, c. 186, ss. 404-412, 2015.
- [52] X.-G. Yang, G. Zhang, ve C.-Y. Wang, “Computational design and refinement of self-heating lithium ion batteries”, *J Power Sources*, c. 328, ss. 203-211, 2016.
- [53] R. E. Williford, V. V Viswanathan, ve J.-G. Zhang, “Effects of entropy changes in

- anodes and cathodes on the thermal behavior of lithium ion batteries”, *J Power Sources*, c. 189, sy 1, ss. 101-107, 2009.
- [54] A. De Vita, A. Maheshwari, M. Destro, M. Santarelli, ve M. Carello, “Transient thermal analysis of a lithium-ion battery pack comparing different cooling solutions for automotive applications”, *Appl Energy*, c. 206, ss. 101-112, 2017.
- [55] E. Schuster, C. Ziebert, A. Melcher, M. Rohde, ve H. J. Seifert, “Thermal behavior and electrochemical heat generation in a commercial 40 Ah lithium ion pouch cell”, *J Power Sources*, c. 286, ss. 580-589, 2015.
- [56] L. Bodenes *vd.*, “Lithium secondary batteries working at very high temperature: Capacity fade and understanding of aging mechanisms”, *J Power Sources*, c. 236, ss. 265-275, 2013.
- [57] P. Ramadass, B. Haran, R. White, ve B. N. Popov, “Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures Part I. Cycling performance”, *J Power Sources*, c. 112, sy 2, ss. 606-613, 2002.
- [58] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, ve C. Chen, “Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery”, *J Power Sources*, c. 208, ss. 210-224, 2012.
- [59] W. Q. Walker *vd.*, “Decoupling of heat generated from ejected and non-ejected contents of 18650-format lithium-ion cells using statistical methods”, *J Power Sources*, c. 415, ss. 207-218, 2019.
- [60] X. Feng, C. Xu, X. He, L. Wang, G. Zhang, ve M. Ouyang, “Mechanisms for the evolution of cell variations within a  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ /graphite lithium-ion battery pack caused by temperature non-uniformity”, *J Clean Prod*, c. 205, ss. 447-462, 2018.
- [61] M. Y. Kaba, O. Kalkan ve A. Celen, “Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar ve Termal Yönetim Sistemlerinin İncelenmesi”, *Konya Journal of Engineering Sciences*, c. 9, sy 4, ss. 1119-1136, Ara. 2021.
- [62] J. Li ve Z. Zhu, “Battery thermal management systems of electric vehicles”, master thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2014.
- [63] A. G. Olabi *vd.*, “Battery thermal management systems: Recent progress and challenges”, *International Journal of Thermofluids*, c. 15, sy 100171, ss. 1-31, Ağu. 2022.

- [64] J. P. Rugh, A. Pesaran, ve K. Smith, “Electric vehicle battery thermal issues and thermal management techniques”, içinde *SAE alternative refrigerant and system efficiency symposium*, 2011, ss. 27-29.
- [65] S. Arora, “Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies”, *J Power Sources*, c. 400, ss. 621-640, 2018.
- [66] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, ve H. Zhang, “A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles”, *J Power Sources*, c. 501, sy 230001, ss. 1-18, 2021.
- [67] T. Wang, K. J. Tseng, ve J. Zhao, “Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model”, *Appl Therm Eng*, c. 90, ss. 521-529, 2015.
- [68] H. Behi vd., “A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles”, *Appl Therm Eng*, c. 174, ss. 1-14, Haz. 2020.
- [69] J. Zhao, Z. Rao, Y. Huo, X. Liu, ve Y. Li, “Thermal management of cylindrical power battery module for extending the life of new energy electric vehicles”, *Appl Therm Eng*, c. 85, ss. 33-43, 2015.
- [70] H. Park, “A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles”, *J Power Sources*, c. 239, ss. 30-36, 2013.
- [71] M. R. Giuliano, A. K. Prasad, ve S. G. Advani, “Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium-titanate batteries”, *J Power Sources*, c. 216, ss. 345-352, Eki. 2012.
- [72] X. Yu, Z. Lu, L. Zhang, L. Wei, X. Cui, ve L. Jin, “Experimental study on transient thermal characteristics of stagger-arranged lithium-ion battery pack with air cooling strategy”, *Int J Heat Mass Transf*, c. 143, ss. 1-13, Kas. 2019.
- [73] J. R. Patel ve M. K. Rathod, “Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries”, *J Power Sources*, c. 480, ss. 1-27, Ara. 2020.
- [74] T. Türkbay, “Elektrikli araçlarda nano parçacık katkılı batarya soğutma

- sistemlerinin sayısal olarak incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2018.
- [75] M. Al-Zareer, I. Dincer, ve M. A. Rosen, “A review of novel thermal management systems for batteries”, *Int J Energy Res*, c. 42, sy 10, ss. 3182-3205, Ağu. 2018.
- [76] S. Buğrahan, “Doğrudan Temaslı Sıvı Soğutmalı Bir Batarya Termal Yönetim Sisteminin Tasarımı Ve Analizleri”, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2022.
- [77] J. Zhang vd., “Characterization and experimental investigation of aluminum nitride-based composite phase change materials for battery thermal management”, *Energy Convers Manag*, c. 204, ss. 1-11, 2020.
- [78] X. Zhang, C. Liu, ve Z. Rao, “Experimental investigation on thermal management performance of electric vehicle power battery using composite phase change material”, *J Clean Prod*, c. 201, ss. 916-924, 2018.
- [79] J. Zhang vd., “Experimental investigation of the flame retardant and form-stable composite phase change materials for a power battery thermal management system”, *J Power Sources*, c. 480, ss. 1-11, 2020.
- [80] Z. Ling, S. Li, C. Cai, S. Lin, X. Fang, ve Z. Zhang, “Battery thermal management based on multiscale encapsulated inorganic phase change material of high stability”, *Appl Therm Eng*, c. 193, ss. 1-9, 2021.
- [81] M. Yenigün ve Z. Utlü, “Elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma sistemlerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi”, *Mühendis ve Makina*, c. 59, sy 692, ss. 35-47, 2018.
- [82] S. Park ve D. Jung, “Battery cell arrangement and heat transfer fluid effects on the parasitic power consumption and the cell temperature distribution in a hybrid electric vehicle”, *J Power Sources*, c. 227, ss. 191-198, 2013.
- [83] C. Lan, J. Xu, Y. Qiao, ve Y. Ma, “Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes”, *Appl Therm Eng*, c. 101, ss. 284-292, 2016.
- [84] Y. Ding, M. Wei, ve R. Liu, “Channel parameters for the temperature distribution of a battery thermal management system with liquid cooling”, *Appl Therm Eng*, c. 186, ss. 1-8, 2021.

- [85] 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”, *Appl Therm Eng*, c. 159, ss. 1-8, 2019.
- [86] H. Wang, T. Tao, J. Xu, X. Mei, X. Liu, ve P. Gou, “Cooling capacity of a novel modular liquid-cooled battery thermal management system for cylindrical lithium ion batteries”, *Appl Therm Eng*, c. 178, ss. 1-11, 2020.
- [87] S. Panchal, R. Khasow, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, ve M. Fowler, “Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery”, *Appl Therm Eng*, c. 122, ss. 80-90, 2017.
- [88] C. Zhao, W. Cao, T. Dong, ve F. Jiang, “Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow”, *Int J Heat Mass Transf*, c. 120, ss. 751-762, 2018.
- [89] A. Dirlik, “Nanoakışkanlarda doğal taşınım ile ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi”, yüksek lisans tezi, istanbul teknik üniversitesi, istanbul, 2018.
- [90] M. Usman Sajid ve H. Muhammad Ali, “Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 103, ss. 556-592, 2019.
- [91] F. Şahin ve L. Namlı, “Nanoakışkanlarda kararlılığın ısı transferini iyileştirme açısından önemi”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 7, sy 2, ss. 880-898, Tem. 2018.
- [92] A. H. Pordanjani vd., “Nanofluids: Physical phenomena, applications in thermal systems and the environment effects- a critical review”, *J Clean Prod*, c. 320, ss. 1-38, Eki. 2021.
- [93] S. K. Soylu, “Otomobil radyatöründe TiO<sub>2</sub> esaslı nanoakışkan kullanımının ısı transfer performansı üzerine etkisinin incelenmesi”, Doktora, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 2018.
- [94] A. Sarchami, M. Najafi, A. Imam, ve E. Houshfar, “Experimental study of thermal management system for cylindrical Li-ion battery pack based on nanofluid cooling and copper sheath”, *International Journal of Thermal Sciences*, c. 171, sy 107244, 2022.

- [95] S. Wiriyasart, C. Hommalee, S. Sirikasemsuk, R. Prurapark, ve P. Naphon, “Thermal management system with nanofluids for electric vehicle battery cooling modules”, *Case Studies in Thermal Engineering*, c. 18, ss. 1-11, 2020.
- [96] F. Wu ve Z. Rao, “The lattice Boltzmann investigation of natural convection for nanofluid based battery thermal management”, *Appl Therm Eng*, c. 115, ss. 659-669, 2017.
- [97] Y. Huo ve Z. Rao, “The numerical investigation of nanofluid based cylinder battery thermal management using lattice Boltzmann method”, *Int J Heat Mass Transf*, c. 91, ss. 374-384, 2015.
- [98] M. Tousi, A. Sarchami, M. Kiani, M. Najafi, ve E. Houshfar, “Numerical study of novel liquid-cooled thermal management system for cylindrical Li-ion battery packs under high discharge rate based on AgO nanofluid and copper sheath”, *J Energy Storage*, c. 41, ss. 1-11, 2021.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Kemal ÇELİK

Yabancı Dili : İngilizce

## ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2024
Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2018
Lise	Makine	Kocaeli Teknik Lisesi	2000

## YAYINLAR

K. Çelik ve F. Polat, "Experimental investigation of the effect of nanoparticle reinforced coolant on the cooling performance of battery thermal management system", içinde *1st international blacksea scientific research and innovation congress*, Trabzon, 2023, ss. 221–234.  
[https://www.isarconference.org/files/ugd/6dc816\\_494830e0cbba49a8a5511403a2727f8d.pdf](https://www.isarconference.org/files/ugd/6dc816_494830e0cbba49a8a5511403a2727f8d.pdf)