



**18650 Lİ-İYON BATARYA PAKETLERİ İÇİN
YENİLİKÇİ SOĞUTMA TASARIMI VE
NANOAKIŞKANLARIN TERMAL PERFORMANS
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Yunus Emre HAMAMCI

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ**

**18650 Lİ-İYON BATARYA PAKETLERİ İÇİN YENİLİKÇİ SOĞUTMA
TASARIMI VE NANOAKIŞKANLARIN TERMAL PERFORMANS
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Yunus Emre HAMAMCI

**Tez Danışmanı:
Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ**

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Eylül 2024**

Yunus Emre HAMAMCI tarafından hazırlanan “18650 Lİ-İYON BATARYA PAKETLERİ İÇİN YENİLİKÇİ SOĞUTMA TASARIMI VE NANOAKIŞKANLARIN TERMAL PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 13/09/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Emrah DENİZ (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Fikret POLAT (DÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Yunus Emre HAMAMCI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

18650 Lİ-İYON BATARYA PAKETLERİ İÇİN YENİLİKÇİ SOĞUTMA TASARIMI VE NANOAKIŞKANLARIN TERMAL PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Yunus Emre HAMAMCI

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ

Eylül 2024, 77 sayfa

Fosil yakıtların tükenmesi ve karbon emisyonlarının çevreye verdiği zararlar, enerji sürdürülebilirliği konusundaki endişeleri artırmıştır. Bu doğrultuda, çevresel etkileri azaltmak ve yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmak amacıyla elektrikli araçlar önemli bir alternatif haline gelmektedir. Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları sayesinde yaygın olarak tercih edilse de aşırı ısınma riskine karşı etkin bir soğutma sistemine ihtiyaç duyarlar. Bu çalışmada, 18650 tipi lityum-iyon piller için tasarlanan bakır boru ve plakalarla desteklenen bir soğutma sistemi nümerik olarak incelenmiştir. Tasarlanan sistemde demineralize su, Su-BN ve Su-Al₂O₃ nanoakışkanları kullanılarak farklı debilerde (0,75 l/dk, 1,5 l/dk, 2,25 l/dk) ve deşarj hızlarında (1C, 3C, 5C) soğutma performansı karşılaştırılmıştır. Termal analizler sonucunda, debi arttıkça maksimum pil sıcaklığı ve pil sıcaklık farkının azaldığı gözlemlenmiştir. 0,75 l/dk debi ile 1,5 l/dk ve 2,25 l/dk

debiler karşılaştırıldığında sırasıyla maksimum pil sıcaklığı ortalama %2,07 ve %2,66 oranında azalmıştır. Nanoakışkan kullanımıyla pil sıcaklıklarında etkili sıcaklık düşüşleri gözlemlenmiştir. Su-BN kullanıldığında sıcaklık düşüşü daha belirgindir, Su-Al₂O₃ ise daha az ama yine de anlamlı bir soğutma etkisi sağlar. 0,75 l/dk debide 5C deşarj değerinde Demineralize Su soğutucu akışkanı kullanıldığında maksimum pil sıcaklığı 30,92 °C iken bu değer Su-BN kullanımıyla %3,21 oranında, Su-Al₂O₃ kullanımıyla %1,60 oranında azalmıştır. Bu sonuçlar, lityum-iyon bataryaların su kullanımına nazaran nanoakışkanlarla daha güvenli ve verimli bir şekilde soğutulabileceğini ve nanoakışkanların bu süreçte önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Elektrikli Taşıtlar, Batarya, Isı yönetimi, Soğutma, Nanoakışkanlar

Bilim Kodu : 91435

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INNOVATIVE COOLING DESIGN FOR 18650 LI-ION BATTERY PACKS AND THE EFFECTS OF NANOFLUIDS ON THERMAL PERFORMANCE

Yunus Emre HAMAMCI

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Mustafa KARAGÖZ

September 2024, 77 pages

The depletion of fossil fuels and the environmental damage caused by carbon emissions have raised concerns about energy sustainability. Accordingly, electric vehicles are becoming an important alternative to reduce environmental impacts and accelerate the transition to renewable energy. Although lithium-ion batteries are widely used in electric vehicles due to their high energy density, they need an effective cooling system against the risk of overheating. In this study, a cooling system supported by copper tubes and plates designed for 18650-type lithium-ion batteries is numerically investigated. In the designed system, demineralized water, Water-BN, and Water- Al_2O_3 nanofluids were used to compare the cooling performance at different flow rates (0,75 l/min, 1,5 l/min, 2,25 l/min) and discharge rates (1C, 3C, 5C). As a result of thermal analysis, it was observed that the maximum battery temperature and battery temperature difference decreased as the flow rate increased. When 0,75 l/min flow rate was compared with 1,5 l/min and 2,25 l/min flow rates, the maximum battery

temperature decreased by 2,07% and 2,66%, respectively. Effective temperature reductions in battery temperatures were observed with the use of nanofluids. The maximum battery temperature was 30,92 °C when using Demineralized Water coolant at a discharge value of 5C at a flow rate of 0,75 l/min, while this value decreased by 3,21% when using Water-BN and 1,60% when using Water- Al_2O_3 . These results show that lithium-ion batteries can be cooled more safely and efficiently with nanofluids than with water and that nanofluids can play an important role in this process.

Keywords: Electric Vehicles, Battery, Heat management, Refrigeration, Nanofluidics.

Science Code : 91435

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezini hazırlarken, batarya teknolojilerinin günümüzde ne denli hızlı bir gelişim gösterdiğini ve bu teknolojinin hayatımızın birçok alanına nasıl entegre olduğunu bir kez daha anladım. Elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve yenilenebilir enerji depolama sistemleri gibi uygulamalar, batarya paketlerinin performansını ve güvenliğini artırma gereksinimini de beraberinde getirmiştir. Bu noktada, batarya paketlerinin termal yönetimi, performansın sürdürülebilirliği ve güvenliği açısından kritik bir önem arz etmektedir.

Tez çalışmamın temellerini atan bu sürecin her aşamasında bana rehberlik eden danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ'e, değerli bilgileri ve tecrübeleriyle katkıda bulunan araştırma ekibime ve desteklerini esirgemeyen Aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Analiz ve dizayn konusundaki tecrübelerini esirgemeyen Hüseyin Meriç AYDIN ve Ailesine, her zaman destekçim olan Bekir Yunus OZBİLEN ve Ali ÖZTÜRK`e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreç boyunca elde ettiğim bilgi birikimi ve tecrübelerin, ileride yapacağım çalışmalarda bana yol göstereceğine ve katkı sağlayacağına inanıyorum. Tezimin, batarya teknolojileri alanında çalışan bilim insanları ve mühendisler için faydalı bir kaynak olmasını diliyorum.

Saygılarımla,

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	4
ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ VE BATARYA SİSTEMLERİ	4
2.1. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ	4
2.1.1. Tamamen Elektrikli Araçlar	6
2.1.2. Hibrit Elektrikli Araçlar.....	9
2.1.3. Yakıt Pili Araçlar	10
2.2. TAMAMEN ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYALAR.....	13
2.3. LİTYUM İYON BATARYALAR.....	18
2.3.1. Lityum İyon Bataryaların Yapısı ve Kullanım Alanları	18
2.3.2. Lityum İyon Bataryaların Çalışması.....	20
2.3.3. Lityum İyon Bataryaların Avantajları ve Dezavantajları	22
2.3.4. Lityum İyon Bataryalarda Termal Problemler	25
BÖLÜM 3	27

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	27
BÖLÜM 4.....	46
MATERYAL METOT.....	46
4.1. 18650 LİTYUM İYON BATARYA.....	46
4.1.1. 18650 Lityum İyon Batarya Boyutları ve Özellikleri.....	47
4.1.2. 18650 Lityum İyon Batarya için Yüzey Isı Değerleri.....	48
4.2. TASARLANAN BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİ VE CAD MODELİ... 48	
4.3. BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİNİN ANSYS’TE MODELLENMESİ ... 53	
4.4. KULLANILAN AKIŞKANLARIN ÖZELLİKLERİ.....	55
BÖLÜM 5.....	58
ANALİZ SONUÇLARI.....	58
5.1. 0,75 L/DK DEBİDE DEŞARJ ANALİZLERİ.....	58
5.2. 1,5 L/DK DEBİDE DEŞARJ ANALİZLERİ.....	61
5.3. 2,5 L/DK DEBİDE DEŞARJ ANALİZLERİ.....	63
5.4. DEBİ DEĞİŞİMİNİN BATARYA SICAKLIĞINA ETKİSİ.....	66
BÖLÜM 6.....	69
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Yıllara göre global elektrikli araç satışları [1].	1
Şekil 2.1. New York`taki elektrikli taksi fotoğrafı görülmektedir [4-6].	4
Şekil 2.2. Karl Benz`in 1886 yılında patentini aldığı ilk otomobil [9].	5
Şekil 2.3. Elektrikli araçlarda bulunan sistemler [10].	6
Şekil 2.4. Tesla Model S [11].	7
Şekil 2.5. Nissan Leaf [12].	8
Şekil 2.6. Chevrolet Bolt EV [13].	8
Şekil 2.7. Hibrit elektrikli araçlarda bulunan sistemler [10].	9
Şekil 2.8. Yakıt hücreli elektrikli araçlarda bulunan sistemler [10].	11
Şekil 2.9. Yakıt pilli araçların en çok bilineni olan Toyota Crown Sedan [15].	11
Şekil 2.10. Yakıt hücreli araç şeması [16].	12
Şekil 2.11. Tamamen elektrikli araçlarda batarya konumu ve sistem bileşenleri [17].	13
Şekil 2.12. Kurşun asit kesiti [19].	15
Şekil 2.13. Nikel-kadmiyum pil iç yapısı [19].	16
Şekil 2.14. Model helikopterlerde kullanılan LiPo pil fotoğrafı verilmiştir [21].	16
Şekil 2.15. LiFePO ₄ batarya fotoğrafı [23].	17
Şekil 2.16. Şarj edilebilir NiMH batarya görseli [26].	18
Şekil 2.17. Tesla Model S ait standart batarya paketi [30].	19
Şekil 2.18. Tesla Model S ait standart batarya hücreleri [30].	20
Şekil 2.19. Lityum iyon bataryanın temel işleyişi [33].	21
Şekil 3.1. Labirent tipi bir soğutma kanalı [36].	28
Şekil 3.2. (a) Hava soğutma, (b) Su soğutma [37].	29
Şekil 3.3. Üç farklı soğutucu plaka tasarımı [38].	30

Sayfa

Şekil 3.4. (a) Batarya modülü ve soğutucu sistem, (b) Farklı geometriye sahip büküm şeritler, (c) Büküm sıklığı değişimi [39].	31
Şekil 3.5. Batarya paketi ve kanal yapısı [40].	32
Şekil 3.6. (a) Çoklu U stil mikro kanal, (b) serpantin mikro kanallı soğutmalı plaka, (c) paralel mikro kanallı soğutmalı plaka [41].	33
Şekil 3.7. (a) Tasarlanan pil grubu, (b) biyonomik kanal sıvı soğutma plakaları, (c) plakada sıvı akış gösterimi [42].	34
Şekil 3.8. Batarya modülünün şematik diyagramı ve petek yapılı soğutucu [43].	35
Şekil 3.9. (a) Havayla soğutma, (b) Suyla soğutma [44].	35
Şekil 3.10. Tasarlanan yeni serpantin kanallı soğutma plakası için akış hatları [45].	36
Şekil 3.11. (a) Tek şerit dört kanallı, (b) tek şerit sekiz kanallı, (c) iki şerit dört kanallı, (d) dört şerit dört kanallı, (e) mikro kanal tasarımı [46].	37
Şekil 3.12. (a) Seri akış, (b) paralel akış, (c) modüler sıvı soğutma plakaları, (d) akış yönleri (I-II-III) [47].	38
Şekil 3.13. (a) Batarya soğutma sistemi, (b) 7 farklı sıvı kanal biçimi [48].	39
Şekil 3.14. Alveoler benzeri petek sıvı soğutma sistemi tasarımı [49].	40
Şekil 3.15. (a) Pil modülü, (b) Faz değiştiren malzemeli, (c) Sıvılı destekli (d) Hibrit sistem [50].	41
Şekil 3.16. (a) Batarya ve soğutma plakaları, (b) soğutma plakası görüntüsü, (c) 8 farklı akış durumu [51].	42
Şekil 3.17. Alüminyum soğutma plakaları ve soğutma sistemi [52].	43
Şekil 3.18. (a) Batarya modülü, (b) akıştaki engellerin gösterimi [53].	44
Şekil 3.19. Bal peteği manifoldlu sıvı soğutma plakasından ve faz değiştiren malzemedan oluşan soğutma sistemi [54].	45
Şekil 4.1. 18650 Li-iyon pil standart boyutları.	47
Şekil 4.2. a: Bakır boru, b: Bakır plaka.	49
Şekil 4.3. Tasarlanan batarya soğutma sistemi.	50
Şekil 4.4. a: Eğilmiş tekli bakır boru formu, b: Kesit görüntüsü.	50
Şekil 4.5. Bakır boru eğim ölçüleri.	51
Şekil 4.6. a: Bakır boru plaka bağlantısı, b: 16 pil grubu için plaka yerleşimi.	51
Şekil 4.7. Ark formu plaka ölçüleri.	52

Sayfa

Şekil 4.8. 16 Pil paketinin montajlı hali.	52
Şekil 4.9. Simetrisi alınmış pil paketi görseli.	54
Şekil 4.10. Mesh yapılmış pil paketi görseli.	54
Şekil 5.1. 0,75 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için maksimum pil sıcaklıkları.	60
Şekil 5.2. 0,75 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için ortalama pil sıcaklıkları.	60
Şekil 5.3. 0,75 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için pil grubu maksimum sıcaklık farkı.	60
Şekil 5.4. 1,5 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için maksimum pil sıcaklıkları.	62
Şekil 5.5. 1,5 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için ortalama pil sıcaklıkları.	62
Şekil 5.6. 1,5 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için pil grubu maksimum sıcaklık farkı.	63
Şekil 5.7. 2,25 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için maksimum pil sıcaklıkları.	64
Şekil 5.8. 2,25 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için ortalama pil sıcaklıkları.	65
Şekil 5.9. 2,25 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için pil grubu maksimum sıcaklık farkı.	65
Şekil 5.10. 5C deşarj hızında farklı debi ve soğutucu akışkan için maksimum pil sıcaklık değişimi.	67
Şekil 5.11. 5C deşarj hızında farklı debi ve soğutucu akışkan için ortalama sıcaklık değişimi.	67
Şekil 5.12. 5C deşarj hızında farklı debi ve soğutucu akışkan için pil grubu maksimum sıcaklık farkı.	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan pil çeşitleri verilmiştir [18].	14
Tablo 2.2. Lityum rezervinin ülkelere göre dağılımı [34].	23
Tablo 4.1. Pil hücresine ait özellikler [56].	48
Tablo 4.2. Deşarj akımları için ısı miktarı ve birim yüzeye düşen ısı miktarları.	48
Tablo 4.3. Soğutucu akışkan debi ve hızları.	55
Tablo 4.4. Baz akışkan ve nanoparteküllere ait termofiziksel özellikler.	56
Tablo 4.5. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri.	56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Li-iyon	: Lityum İyon
BN	: Bor Nitrür
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Pb-acid	: Kurşun-Asit akü
Pb	: Kurşun
PbO ₂	: Kurşun Dioksit
PbSO ₄	: Kurşun Sülfat
Ni-Cd	: Nikel-Kadmiyum
Cd (OH) ₂	: Kadmiyum Hidroksit
Ni(OH) ₂	: Nikel Hidroksit
LiPo	: Lityum Polimer
LiFePO ₄	: Lityum Demir Fosfat Batarya
Li-S	: Lityum-Kükürt Batarya
Li ₂ S	: Lityum sülfür
NiMH	: Nikel-Metal Hidrit Batarya
LiCoO ₂	: Lityum Kobalt Oksit

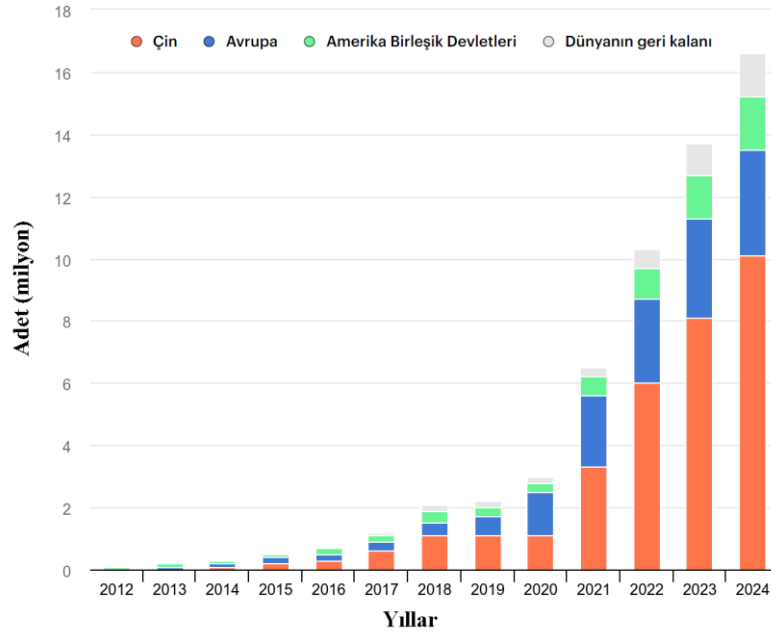
KISALTMALAR

EV	: Elektrikli araç
$Q_{potansiyel}$: Potansiyel ısı miktarı
$R_{iç}$: İç direnç
$\rho_{nanoakışkan}$: Nanoakışkan yoğunluğu (kg/m^3)
$\rho_{nanopartikül}$: Nanopartikül yoğunluğu (kg/m^3)
$\rho_{bazakışkan}$: Baz akışkan yoğunluğu (kg/m^3)
λ	: Yüzde akışkan miktarı
$C_{Pnanoakışkan}$: Nanoakışkan ısı kapasitesi ($J/kg.K$)
$C_{Pnanopartikül}$: Nanopartikül ısı kapasitesi ($J/kg.K$)
$C_{Pbazakışkan}$: Baz akışkan ısı kapasitesi ($J/kg.K$)
$K_{nanoakışkan}$: Nanoakışkan ısı iletim katsayısı ($W/m.K$)
$K_{nanopartikül}$: Nanopartikül ısı iletim katsayısı ($W/m.K$)
$K_{bazakışkan}$: Baz akışkan ısı iletim katsayısı ($W/m.K$)
$\mu_{nanoakışkan}$: Nanoakışkan viskozitesi ($mPa.s$)
$\mu_{bazakışkan}$: Baz akışkan viskozitesi ($mPa.s$)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Fosil yakıt rezervlerinin giderek azalması ve içten yanmalı motorların neden olduğu yüksek karbon emisyonları, çevresel dengeleri tehdit ederken, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği konusundaki endişeleri de attırmaktadır. Küresel ısınma ve hava kirliliği gibi sorunların etkisinin daha fazla hissedildiği bu dönemde, fosil yakıt kullanımına alternatif çözümler arayışı hız kazanmaktadır. Bu bağlamda hem çevresel etkileri azaltmak hem de yenilenebilir enerjiye geçişi desteklemek amacıyla elektrikli araçlar, günümüz ulaşım sektöründe giderek daha fazla tercih edilen bir seçenek haline gelmektedir. 2020 yılında dünya genelinde elektrikli araç satışları yaklaşık 3 milyon civarındayken, 2021'de bu rakam 2,2 kat artışla 6,6 milyona, 2022 yılında ise 3,3 kat artışla yaklaşık 10 milyon elektrikli araca, 2023'te bu sayı 4,7 kat artışla 14 milyona yaklaşmış ve 2024 yılında bu rakam 16 milyonun üzerine çıkmıştır [1]. Şekil 1.1'de yıllara göre global elektrikli araç satışları verilmiştir [1].



Şekil 1.1. Yıllara göre global elektrikli araç satışları [1].

Elektrikli araçların temel olarak kritik parçaları elektrik motoru, güç elektroniği, şarj altyapısı ve bataryadır. Bu parçalar içerisinde batarya teknolojisi maliyet, enerji yoğunluğu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemi göz önünde bulundurulduğunda, bataryalar genellikle elektrikli araçlardaki en kritik bileşen olarak değerlendirilmektedir. Batarya, elektrikli aracın temel enerji kaynağını sağlayan bileşendir ve aracın performansı, menzili, şarj süresi, maliyeti ve çevresel etkileri üzerinde doğrudan etkilidir.

Elektrikli araçlarda yüksek enerji yoğunluğu, hızlı şarj olabilme, düşük ağırlık ve enerji verimliliği sebebiyle lityum-iyon bataryalar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Lityum-iyon bataryaların enerji yoğunluğu yüksek olmasına ve birçok avantajı bulunmasına rağmen özellikle hızlı şarj/deşarj işlemleri sırasında bataryaların soğutulması gereklidir. Aksi takdirde, termal kaçak riski artar ve bataryanın verimliliği düşebilir. Lityum-iyon bataryaların en büyük risklerinden biri termal kaçak problemidir. Bu bataryanın içindeki hücrelerin aşırı ısınarak kendiliğinden yanma ya da patlama riskine neden olmasıdır. Aşırı şarj, kısa devre ya da fiziksel hasar sonucu meydana gelen bu durum, bataryaların güvenlik önlemleri açısından hassas olmasını gerektirir. Özellikle büyük enerji kapasitelerine sahip elektrikli araç bataryalarında bu risk daha büyüktür. Lityum-iyon bataryaların soğutulması, özellikle yüksek enerji yoğunluklarına sahip uygulamalarda güvenlik, performans ve ömrün korunması açısından kritik bir öneme sahiptir. Hava, sıvı, faz değiştiren malzeme ve hibrit termal yönetim sistemleri gibi farklı soğutma yöntemleri, bataryanın kullanım alanına ve büyüklüğüne göre seçilmektedir. Soğutma sistemlerinin etkin kullanımı, lityum-iyon bataryaların güvenliğini artırmak ve daha uzun süreli performans sağlamak için gereklidir [2].

Bu çalışmada yukarıda bahsedilen problemler ele alınarak 18650 Li-iyon piller için soğutma sağlanabilecek bir sistem tasarlanmıştır. Tasarım 18650 Li-iyon pil grubu 16'lı bir pil paketi olacak şekilde SolidWorks 3D çizim programıyla yapılmıştır. Tasarlanan soğutma sisteminde piller arasında bakır boru dolaştırılmış ve bakır boru pil arasında bakır plakalar yerleştirilmiştir. Böylece soğutmanın daha homojen olması sağlanmıştır. Tasarlanan soğutma sistemi içerisinde demineralize su, Su-BN (Bor-

nitür), Su-Al₂O₃ (Alüminyum oksit) soğutucu akışkanları geçirilerek soğutma performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı debiler kullanılarak (0,75 l/dk-1,5 l/dk-2,25 l/dk) debi değişiminin soğutma performansına etkisi incelenmiştir. Pil paketlerinin termal analizleri 1C, 3C, 5C deşarj hızlarında, akışkan giriş sıcaklığı 25 °C sabit tutularak ANSYS paket programında yapılmıştır. Tasarlanan pil paketi yansıtma simetrisine sahip olduğundan paketin tamamı yerine yarısının analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında maksimum pil sıcaklığı, pil ortalama sıcaklığı ve pil grubu maksimum sıcaklık fark değerleri ele alınarak analiz sonuçları değerlendirilmiştir.



BÖLÜM 2

ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ VE BATARYA SİSTEMLERİ

2.1. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ

Fosil kaynaklı yakıtların azalması ve meydana getirdiği çevresel problemler elektrikli araç teknolojisine olan ilgiyi daha da arttırmıştır. Elektrikli araçlar tarihsel gelişim sürecinde birçok önemli kilometre taşına sahiptir. Tarihte ilk elektrikli araç modeli, 1835 yılında Hollanda'da Profesör Stratingh tarafından geliştirilmiştir [3]. Bu dönemde, elektrikli araçlar henüz gelişme aşamasındaydı ancak 19. yüzyılın sonlarına doğru Robert Davidson'un 1838'de ulaşılabildiği 6,4 km/h hızıyla elektrikli lokomotifin üretmesi, bu alandaki erken dönem çalışmalarının bir göstergesiydi [4]. Şekil 2.1'de 1900'lü yıllarında kullanılan elektrikli taksiler görülmektedir [4-6].



Şekil 2.1. New York'taki elektrikli taksi fotoğrafı görülmektedir [4-6].

Elektrikli araç teknolojisinin gelişiminde önemli bir adım, 1859'da kurşun-asit bataryalarının geliştirilerek kullanılmaya başlanmasıyla gerçekleşmiştir [6]. Daha sonra, 1882'de Siemens'in Berlin'de ilk elektrikli trolleybüsü üretmesi [7] ve 1886'da Karl Benz'in içten yanmalı motorla çalışan ilk otomobili olan Motorwagen'i üretmesi [8] gibi önemli olaylar yaşanmıştır. Bu gelişmeler, elektrikli araç teknolojisinin ilk adımlarıydı ve zamanla bu teknolojiye olan ilgi artmıştır. Şekil 2.2'de Karl Benz'in 1886 yılında patentini aldığı gaz motorlu aracı gösterilmiştir [9].



Şekil 2.2. Karl Benz'in 1886 yılında patentini aldığı ilk otomobil [9].

En büyük faktörlerden olan, içten yanmalı motorlu araçların seri üretime geçmesi ve benzin fiyatlarının düşmesi nedeniyle elektrikli araçlara olan ilgi azalmıştır. Bu dönemde, içten yanmalı motorlu araçlar daha ekonomik ve yaygın hale geldi. Ancak, çevre sorunları ve petrol krizleri gibi faktörler, 1960'lı ve 1970'li yıllarda elektrikli araç teknolojisine olan ilgiyi yeniden canlandırmıştır.

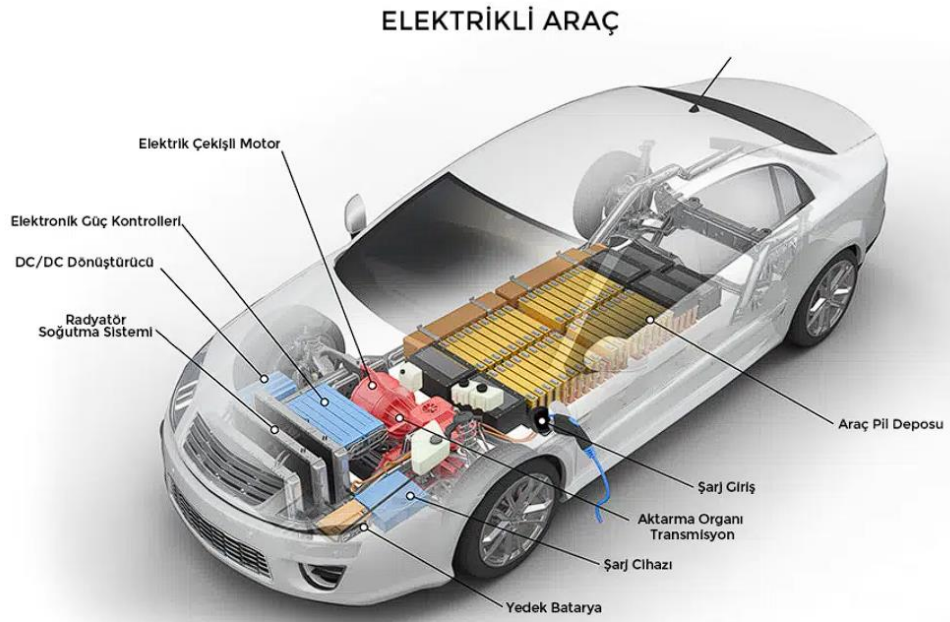
1980'lerden itibaren, hükümetlerin çevre dostu araçlara olan ilgisini artırmak için ekonomik teşvikler sağlamasıyla birlikte elektrikli araçlar yeniden dikkat çekmeye başlamıştır. Sonrasında, 1990'lardan itibaren yeni batarya teknolojilerinin

geliştirilmesiyle birlikte birçok otomobil üreticisi elektrikli araç modellerini geliştirmeye başlamıştır [8].

Güncel hayatta da artan yakıt fiyatları ve çevre bilinci, elektrikli araçların popülerliğini artırmış durumdadır. Elektrikli araçlar, sıfır emisyonlu sürüş ve daha düşük işletme maliyetleri gibi avantajlar sunarak benzinli ve dizel araçlara alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca, teknolojik gelişmelerle birlikte elektrikli araçların menzili ve şarj altyapısı da geliştirilmektedir. Bu durum elektrikli araçların kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

2.1.1. Tamamen Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlardan farklı olarak elektrik motorlarıyla hareket ederler. Elektrikli araçlarda, genellikle bataryalardan veya başka enerji depolama sistemlerinden güç alırlar. Elektrik motorları, bataryadan aldıkları elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek aracı hareket ettirirler. Elektrikli araçların çalışma prensibi, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha basittir ve daha az hareketli parça içerir, bu da daha az bakım gerektirir. Şekil 2.3'te elektrikli araçlarda bulunan sistemler verilmiştir [10].



Şekil 2.3. Elektrikli araçlarda bulunan sistemler [10].

Elektrikli araçların menzili, sürüş koşullarına, kullanılan batarya kapasitesine ve aracın aerodinamik yapısına bağlıdır. Günümüzde kullanılan elektrikli araçlar genellikle 200-300 mil (320-480 kilometre) arasında bir menzile sahiptirler. Ancak, bu menzil araç modeline, batarya teknolojisine ve sürüş koşullarına bağlı olarak değişebilir. Günümüzde güncel ve yaygın olarak kullanılan bazı elektrikli araç modelleri Şekil 2.4-2.6` da verilmiştir. Tesla Model S: Yüksek performanslı, lüks bir sedan araç olan Tesla Model S, konforlu bir tasarıma ve geniş bir menzile sahiptir ve çeşitli batarya seçenekleri sunar. Model S, Tesla'nın öncü elektrikli araçlarından biridir. Menzili 634 kilometredir [11].



Şekil 2.4. Tesla Model S [11].

Nissan Leaf: Daha uygun fiyatlı bir seçenek olan Nissan Leaf, kompakt bir hatchback araçtır ve şehir içi sürüşler için idealdir. Leaf, geniş bir menzile sahip olmasa da günlük kullanım için yeterli bir menzile sahiptir. Menzili 385 kilometredir [12].



Şekil 2.5. Nissan Leaf [12].

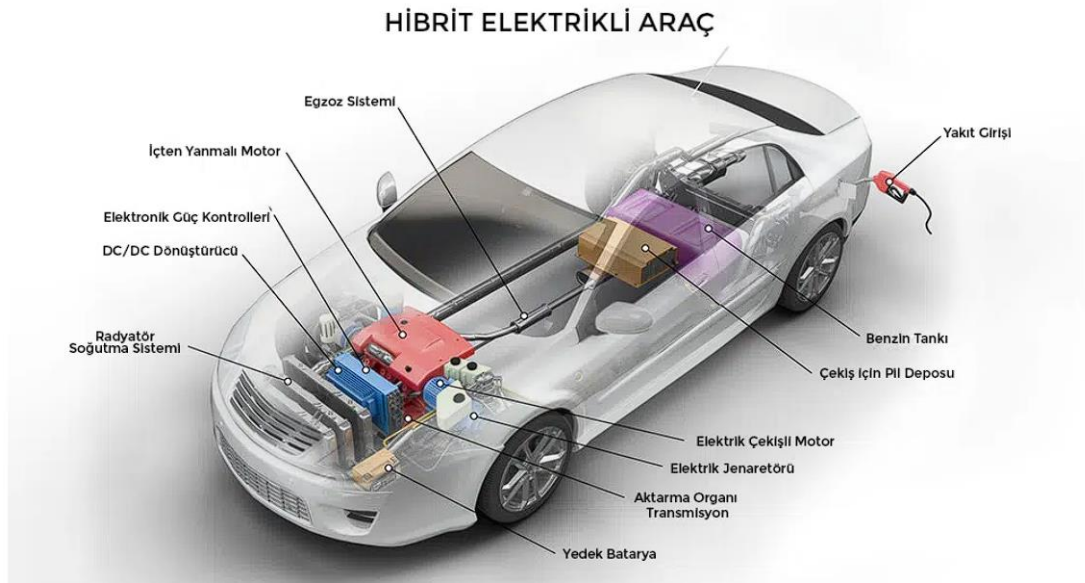
Chevrolet Bolt EV: uygun fiyatlı bir kompakt hatchback araçtır ve Tesla'nın daha pahalı modellerine kıyasla daha uygun bir fiyatla geniş bir menzil sunar. Menzili 417 kilometredir [13]. Fotoğrafları verilen elektrikli araçlar, farklı seğmenlerdeki farklı elektrikli araçları temsil etmektedir ve elektrikli araç pazarının çeşitliliğini göstermektedir. Elektrikli araçlar, çevre dostu ve düşük işletme maliyetleri sağladığı için giderek daha popüler hale gelmektedir.



Şekil 2.6. Chevrolet Bolt EV [13].

2.1.2. Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrit elektrikli araçlar hem içten yanmalı motor hem de elektrikli motoru bir arada bulunduran taşıtlardır. Bu araçlar, yakıt tüketimini azaltarak ve emisyonları düşürerek çevre dostu bir alternatif sunarlar. Elektrikli hibrit araçlar paralel, seri ve paralel-hibrit tahrik sistemleri olmak üzere günümüzde otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan üç farklı elektrikli tahrik sistemidir. Bu sistemler, aracın güç kaynağı, motoru ve bataryaları arasındaki bağlantı şekilleri açısından farklılık gösterirler. Paralel tahrik sistemlerinde, içten yanmalı motor ve elektrik motoru aynı anda çalışarak aracın tahriğini sağlarlar. Seri tahrik sistemlerinde ise sadece elektrik motoru kullanılırken, içten yanmalı motorun doğrudan tahrik ettiği bir jeneratör bulunur ve bu jeneratör elektrik motorunu besler. Paralel-hibrit tahrik sistemleri ise bu iki sistemin bir kombinasyonudur; içten yanmalı motor ve elektrik motoru birlikte veya bağımsız olarak aracı tahrik ederler [14]. Şekil 2.7’de Hibrit elektrikli araçlarda bulunan sistemler verilmiştir [10].



Şekil 2.7. Hibrit elektrikli araçlarda bulunan sistemler [10].

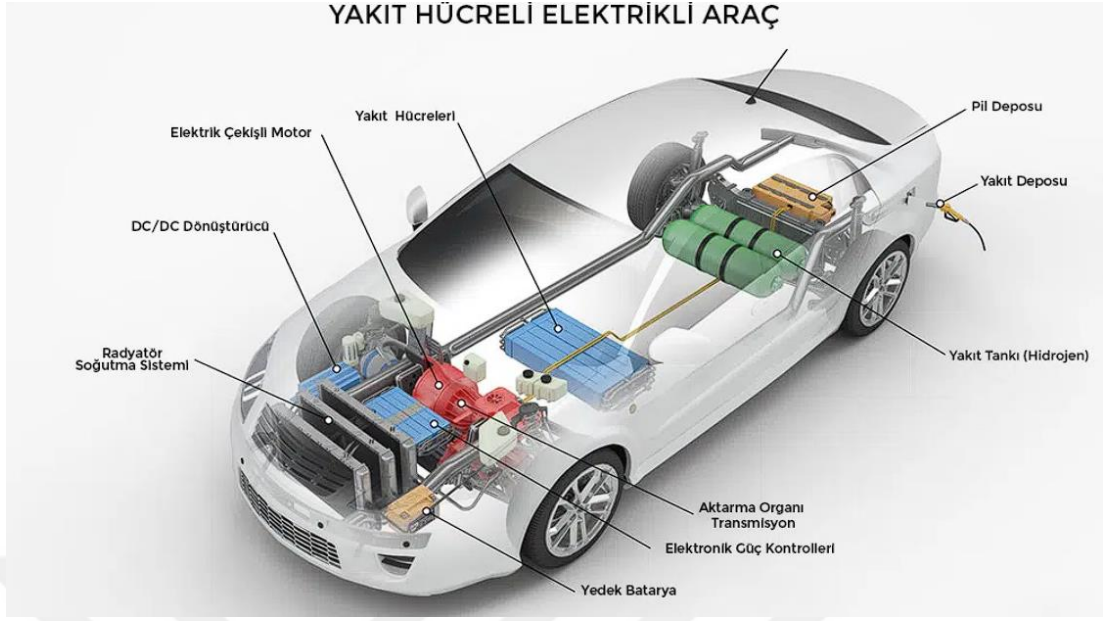
Her bir tahrik sistemi, farklı bağlantı şekillerine ve bileşenlere sahiptir. Paralel tahrik sistemlerinde, içten yanmalı motor ve elektrik motoru ayrı ayrı tahrik sistemlerine bağlanırken, bataryalar genellikle elektrik motoruna güç sağlamak için kullanılır. Seri

tahrik sistemlerinde ise, içten yanmalı motor ve elektrik motoru birbirine seri olarak bağlanır ve bataryalar elektrik motorunu beslemek için kullanılır. Paralel-hibrit tahrik sistemlerinde ise, içten yanmalı motor, elektrik motoru ve bataryalar arasındaki bağlantı daha karmaşıktır; içten yanmalı motor ve elektrik motoru, aracın ihtiyacına göre birlikte veya bağımsız olarak çalışabilir ve bataryalar her iki motoru da besleyebilir.

Bu üç tahrik sistemi, farklı avantajlar ve dezavantajlar sunar. Paralel tahrik sistemleri genellikle daha iyi bir performans ve sürüş deneyimi sağlarken, seri tahrik sistemleri daha yüksek verimlilik ve düşük emisyonlar sunabilir. Paralel-hibrit tahrik sistemleri ise, hem performansı hem de verimliliği dengeleyerek geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu nedenle, otomotiv endüstrisindeki elektrifikasyon trendiyle birlikte, bu üç tahrik sistemi de daha fazla dikkate alınmaktadır [14].

2.1.3. Yakıt Pili Araçlar

Yakıt pilli araçlar, hidrojen yakıt hücresi teknolojisi kullanılarak çalışır. Bu araçlarda, bir yakıt hücresi sistemi bulunur. Yakıt hücresi, hidrojen gazı ile oksijen gazını kimyasal reaksiyona sokarak elektrik enerjisi üretir. Bu kimyasal reaksiyon sonucunda ortaya su ve ısı gibi temiz yan ürünler çıkar. Şekil 2.8’de yakıt hücreli elektrikli araçlarda bulunan sistemler ve bir yakıt hücreli elektrikli araç örneği verilmiştir [10]. Şekil 2.9’da günümüzde çok fazla tercih edilen yakıt hücreli araç Toyota Crown Sedan verilmiştir [15].



Şekil 2.8. Yakıt hücresi elektrikli araçlarda bulunan sistemler [10].



Şekil 2.9. Yakıt pilli araçların en çok bilineni olan Toyota Crown Sedan [15].

Yakıt hücresi sistemi genellikle şu adımları içerir:

1. Hidrojen Temini: Yakıt hücresi sistemi için gerekli olan hidrojen gazı, depolama tankından alınır. Hidrojen genellikle sıvı veya gaz halinde depolanır.

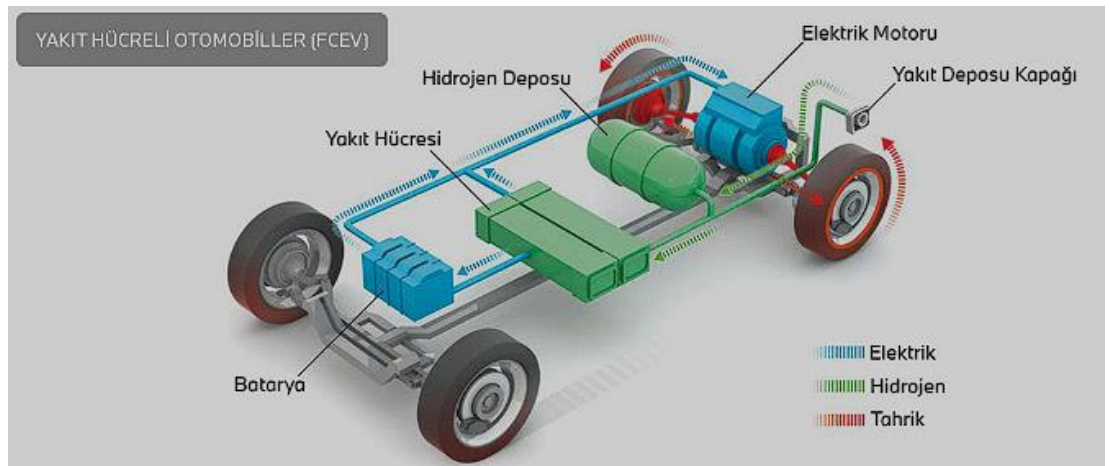
2. Oksijen Temini: Dışarıdaki havadan alınan oksijen, yakıt hücresi sisteminin oksijen elektrotuna iletir.

3. Kimyasal Reaksiyon: Hidrojen gazı ve oksijen gazı, yakıt hücresi içindeki elektrotlar aracılığıyla birleştirilir. Bu reaksiyon sırasında hidrojenin elektronları serbest bırakılır ve hidrojen iyonları oluşur. Elektronlar, dış devre boyunca dolaşarak elektrik enerjisi üretir. Hidrojen iyonları ise elektrotlar arasında hareket ederek diğer tarafta oksijen ile birleşir, su oluşturur.

4. Elektrik Üretimi: Kimyasal reaksiyon sonucunda ortaya çıkan elektronlar, dış devre boyunca dolaşarak elektrik akımı oluşturur. Bu elektrik akımı, aracın elektrik motorunu çalıştırır ve aracın hareket etmesini sağlar.

5. Sıcaklık ve Su Yönetimi: Kimyasal reaksiyon sırasında ortaya çıkan ısı, aracın içinde yönetilir ve soğutulur. Ayrıca, reaksiyon sonucunda oluşan su, araçtan tahliye edilir.

Yakıt pilli araçlar, temiz ve verimli bir enerji kaynağı olan hidrojeni kullanarak sıfır emisyonlu bir sürüş deneyimi sunar. Bu nedenle, çevre dostu bir alternatif olarak giderek daha fazla ilgi çekmektedirler. Şekil 2.10'da yakıt hücreli araç şeması verilmiştir [16].

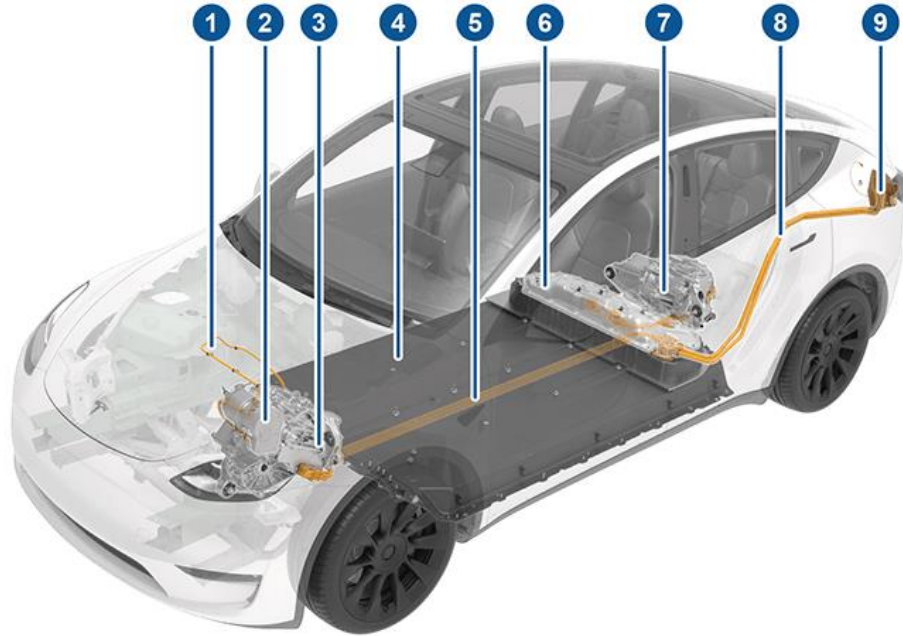


Şekil 2.10. Yakıt hücreli araç şeması [16].

2.2. TAMAMEN ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYALAR

Son 15 yılda tamamen elektrikli araçların yükselişi, büyük ölçüde batarya teknolojisindeki hızlı gelişmelere dayanmaktadır. Batarya teknolojisi, elektrikli araçların performansını, menzilin ve kullanılabilirliğini belirleyen temel unsurlardan biridir.

Gelişen teknoloji ile birlikte, batarya teknolojisindeki ilerlemelerin sayesinde tamamen elektrikli araçlar daha da rekabetçi hale gelmiştir. Bu süreçte, batarya kapasiteleri artarken aynı zamanda daha hafif ve daha kompakt batarya paketleri geliştirilmiştir. Bu da araçların daha uzun menzile sahip olmasını ve daha az şarj aralığına ihtiyaç duymasını sağlamıştır. Şekil 2.11’de tamamen elektrikli araçlarda batarya konumu ve sistem bileşenleri verilmiştir [17].



1-Yüksek Gerilim Kablo, 2-Isı Pompası Montajı, 3-Ön Motor (Sadece Çift Motorlu araçlar), 4-Yüksek Voltajlı Akü, 5- Yüksek Gerilim Kablo, 6-Yüksek Gerilim Bileşenleri için Servis Erişim Paneli, 7-Arka Motor, 8-Yüksek Gerilim Baraları, 9-Şarj portu

Şekil 2.11. Tamamen elektrikli araçlarda batarya konumu ve sistem bileşenleri [17].

Batarya teknolojisindeki gelişmeler, elektrikli araçların performansını da önemli ölçüde artırmıştır. Daha güçlü bataryalar, araçların daha hızlı şarj olmasını ve daha yüksek hızlara ulaşmasını sağlamıştır. Ayrıca, gelişmiş batarya sistemleri, araçların daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmasını ve daha iyi çekiş kontrolü sağlamasını mümkün kılmıştır.

Bu süreçte yaşanan en önemli gelişmelerden biri, maliyetlerdeki düşüş olmuştur. Batarya üretimindeki teknolojik ilerlemeler, üretim maliyetlerini düşürmüş ve böylece elektrikli araçların satın alma maliyetlerini daha erişilebilir hale getirmiştir. Ayrıca, daha uzun batarya ömrü ve daha düşük bakım gereksinimleri gibi faktörler de elektrikli araçların toplam sahip olma maliyetini azaltmıştır.

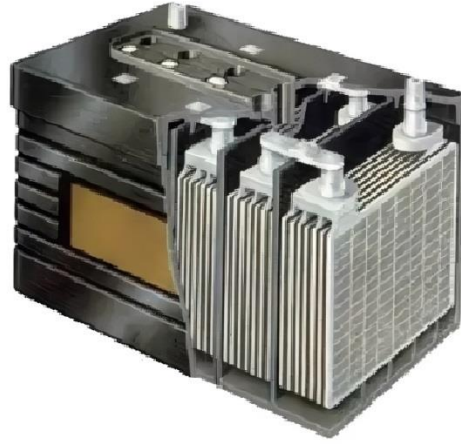
Sonuç olarak, son 15 yılda batarya teknolojisindeki hızlı gelişmeler, tamamen elektrikli araçların daha popüler hale gelmesine ve daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap etmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmelerin gelecekte de devam etmesi bekleniyor ve elektrikli araçların daha da yaygınlaşmasına ve geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara olan bağımlılığın azalmasına yol açacaktır.

Tamamen elektrikli araçlarda kullanılan batarya çeşitleri genellikle lityum bazlı olmakla birlikte, farklı yapı ve bileşenlere sahiptir. Tablo 2.1'de tamamen elektrikli araçlarda kullanılan batarya çeşitleri verilmiştir [18]. Aşağıda yaygın kullanılan bataryaların çalışması, kullanım alanları kısaca açıklanmıştır.

Tablo 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan pil çeşitleri verilmiştir [18].

Batarya çeşitleri	Çevrim ömrü	Nominal gerilim (v)	Çalışma sıcaklığı aralığı (°C)	Hafıza etkisi	Enerji yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim ömrü
Pb-acid	1000	2	-15 +50	Yok	35	1000
Li-S	300	2.5	-60 +60	Yok	350-650	300
NiCd	2000	1.2	-20 +50	Var	50-80	2000
NiMH	< 3000	1.2	-20 +60	Nadir	70-95	< 3000
Zebra	> 1200	2.6	+245 +350	Yok	90-120	> 1200
LiPo	> 1200	3.7	-20 +60	Yok	130-225	> 1200
LiFePO4	> 2000	3.2	-45 +75	Yok	120	> 2000
Li-ion	2000	3.6	-20 +60	Yok	118-250	2000

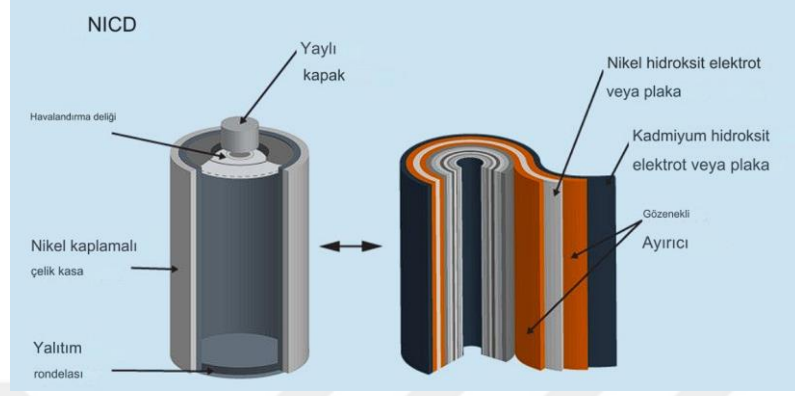
Pb-acid: Kurşun asit bataryalar, temel olarak iki adet kurşun levha ve aralarındaki sülfürik asit çözeltisinden oluşur. Bu levhalar, elektrik akımını iletme ve kimyasal reaksiyonları gerçekleştirmek için özel olarak hazırlanmıştır. Batarya şarj esnasında sülfürik asit ile etkileşime girerek bir kimyasal reaksiyon gerçekleşir. Bu reaksiyon sonucunda, pozitif elektrotta kurşun dioksit (PbO_2), negatif elektrotta ise saf kurşun (Pb) oluşur. Batarya deşarj esnasında, ters bir reaksiyon gerçekleşir. Kurşun dioksit ve saf kurşun, sülfürik asit ile birleşerek her iki elektrotta da kurşun sülfat ($PbSO_4$) oluşturur. Böylece enerji verir [19]. Kurşun asit bataryalar güvenilir, yüksek başlangıç akım kapasitesi, düşük maliyet ve bakım kolaylığı sebebiyle tercih edilirler. Şekil 2.12’de Kurşun asit pil iç yapısı gösterilmiştir [19].



Şekil 2.12. Kurşun asit kesiti [19].

Ni-Cd: Nikel-kadmiyum (Ni-Cd) piller, uzun yıllar boyunca dayanıklılıkları ve şarj edilebilir olmaları nedeniyle birçok alanda kullanılmış olsa da çevresel etkileri nedeniyle günümüzde daha çok lityum iyon piller gibi alternatif teknolojiler tercih edilmektedir. Ni-Cd piller, şarj edilebilir bir pil türüdür ve şarj işlemi sırasında elektrotlardaki maddeler arasında bir elektron alışverişi gerçekleşir. Bu sayede negatif elektrotta kadmiyum hidroksit ($Cd(OH)_2$), pozitif elektrotta ise nikel hidroksit ($Ni(OH)_2$) oluşur. Deşarj işleminde ise bu maddeler arasındaki elektron alışverişi tersine döner ve elektrik enerjisi üretilir. Uzun ömür, geniş çalışma sıcaklık aralığı ve yüksek sayıda şarj-deşarj döngüsü sebebiyle medikal, askeri, aydınlatma pilleri ve elektrikli el aletlerinde yaygın olarak kullanılan Ni-Cd piller günümüzde yerini Lityum

İyon pillere bırakmaktadır [19]. Şekil 2.13'te Nikel-kadmiyum pil iç yapısı görülmektedir [19].



Şekil 2.13. Nikel-kadmiyum pil iç yapısı [19].

LiPo: Lityum Polimer bataryalar, günümüzde cep telefonları, tabletler, dizüstü bilgisayarlar elektrikli araçlar, elektrikli otomobiller, motosikletler, bisikletler, drone'lar, RC arabalar, model uçaklar gibi yaygın kullanım alanı bulan, yüksek enerji yoğunluğuna sahip, hafif ve şarj edilebilir bir pil türüdür. Şarj sırasında, dışarıdan beslenen elektrik enerjisi vasıtasıyla lityum iyonları, anottan katoda doğru hareket eder. Deşarj sırasında bu işlemin tersi olur. LiPo bataryalar bünyesinde katı bir elektrolit yerine polimer bir elektrolit bulundurduğundan daha esnek ve hafif yapılar elde edilebilirler [20]. Şekil 2.14'de Model helikopterlerde kullanılan LiPo pil fotoğrafı verilmiştir [21].



Şekil 2.14. Model helikopterlerde kullanılan LiPo pil fotoğrafı verilmiştir [21].

LiFePO₄: Son yıllarda enerji depolama sistemlerinde popülerlik kazanan Lityum Demir Fosfat bataryalar güvenilir ve uzun ömürlü ve çevre dostu olmaları sebebiyle

tercih edilirler. LiFePO_4 bataryalar deşarj sırasında lityum iyonları katottan anota doğru hareket ederken şarj esnasında bu işlem tersine dönerek bataryanın dolması sağlanır. LiFePO_4 bataryalar elektrikli otomobiller, forkliftler, golf arabaları ve güneş enerjisi sistemleri gibi birçok alanda kendine kullanım yeri bulmaktadır [22]. Şekil 2.15'te LiFePO_4 batarya fotoğrafı verilmiştir [23].



Şekil 2.15. LiFePO_4 batarya fotoğrafı [23].

Li-S: Lityum-Kükürt Piller, yüksek teorik enerji yoğunlukları sayesinde son yıllarda enerji depolama sistemleri alanında ilgi görmektedir. Katot malzemesi olarak sülfür kullanılan Lityum-Kükürt piller kükürdün çözünme-birikme problemleri sebebiyle pilin ömrünü kısaltabilmektedir. Pilin dolduğu süreçte, dışarıdan gelen elektrik enerjisi sayesinde lityum iyonları, anottan katoda doğru hareket eder ve kükürt ile birleşerek lityum sülfür (Li_2S) oluşturmakta, pilin boşaldığı süreç ise şarj işlemindeki reaksiyonun tersi olmaktadır [24].

NiMH: Nikel-Metal Hidrit piller, özellikle çevre dostu olması nedeniyle tercih edilen ve şarj edilebilir pil teknolojilerinde uzun süredir kullanılan bir batarya türüdür. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları ve hafıza etkisine sahip olmaması önemli avantajları arasındadır. Bataryanın negatif elektrotlarında metal hidrit alaşımlarının kullanılması, bu bataryaya özgün özellikler kazandırmaktadır. Şarj sırasında, metal hidrit alaşımındaki hidrojen atomları, elektronlarını vererek pozitif iyonlara dönüşür. Bu iyonlar, elektrolit içinde hareket ederek katottaki nikel hidroksit ile reaksiyona girer

ve böylece batarya dolar. Deşarj şarj işleminin tam tersidir [25]. Şekil 2.16'da şarj edilebilir NiMH batarya görseli verilmiştir [26].



Şekil 2.16. Şarj edilebilir NiMH batarya görseli [26].

2.3. LİTYUM İYON BATARYALAR

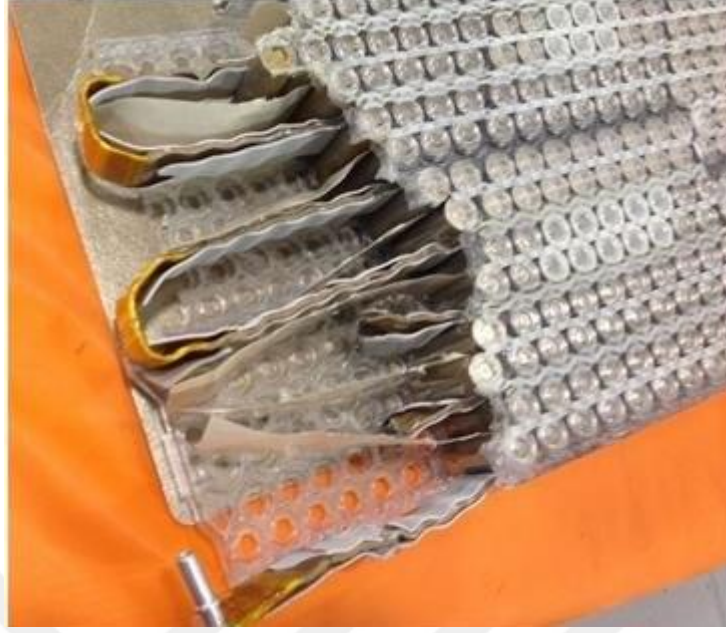
2.3.1. Lityum İyon Bataryaların Yapısı ve Kullanım Alanları

Lityum-iyon (Li-ion) piller, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektro-kimyasal hücre yapılarıdır. Lityum-iyon batarya anot, katot, elektrolit, ayırıcı ve kasa unsurlarından oluşur. Her bileşenin bir işlevi bulunmaktadır. Negatif elektrot (anot): Anot malzemesi, lityum iyonlarını hızlı bir şekilde tutabilme kapasitesine sahip olmalıdır. Genellikle grafit veya diğer karbon bazlı malzemelerden yapılır. Şarj sırasında lityum iyonları elektrolit aracılığıyla katottan anoda doğru hareket eder ve burada depolanır. Pozitif Elektrot (Katot): lityum kobalt oksit, lityum demir fosfat gibi lityum iyonlarının kaynağı olan ve lityum içeren metal oksitlerden oluşmaktadır. Deşarj sırasında katottan lityum iyonları ayrılarak anot tarafına doğru hareket ederken elektrik üretilir. Lityum-iyon bataryayı oluşturan unsurlardan olan elektrolit iletken sıvı veya jel yapıya sahip olup lityum iyonlarının anot ile katot arasında hareket etmesini sağlar [27]. Elektrolit hem iyonik iletkenlik sağlamalı hem de elektron geçişini engellemelidir, böylece iç kısa devreler önlenir. Ayırıcı: iyonların geçişine izin veren gözenekli bir yapıya sahip olmasına rağmen anot ve katot arasında fiziksel

teması engelleyerek kısa devreyi öleme görevini üstlenir. Dış kasa ise batarya hücrelerini çevreleyen koruyucu yapıdır. Çelik, alüminyum ya da polimer malzemeler kasa malzemesi olarak kullanılabilir. Dış kasa bataryanın iç yapısını çevresel etkilerden korur ve güvenli bir yapı sağlar. Li-ion piller, yüksek enerji yoğunlukları, uzun ömürleri ve hafiflikleri sayesinde günümüzde akıllı telefonlar, tabletler, dizüstü bilgisayarlar gibi taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli arabalar, bisikletler, scooterlar, defibrilatörler, taşınabilir ventilatörler, insülin pompaları, güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri, uzay ajansları, uydular, roketler, matkaplar, vidalama makineleri, taşlama makineleri gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir [28, 29]. Şekil 2.17’ de Tesla Model S ait standart batarya paketi görseli sunulmuştur. Şekil 2.18’ de Tesla Model S ait standart batarya hücreleri gösterilmektedir [30].



Şekil 2.17. Tesla Model S ait standart batarya paketi [30].



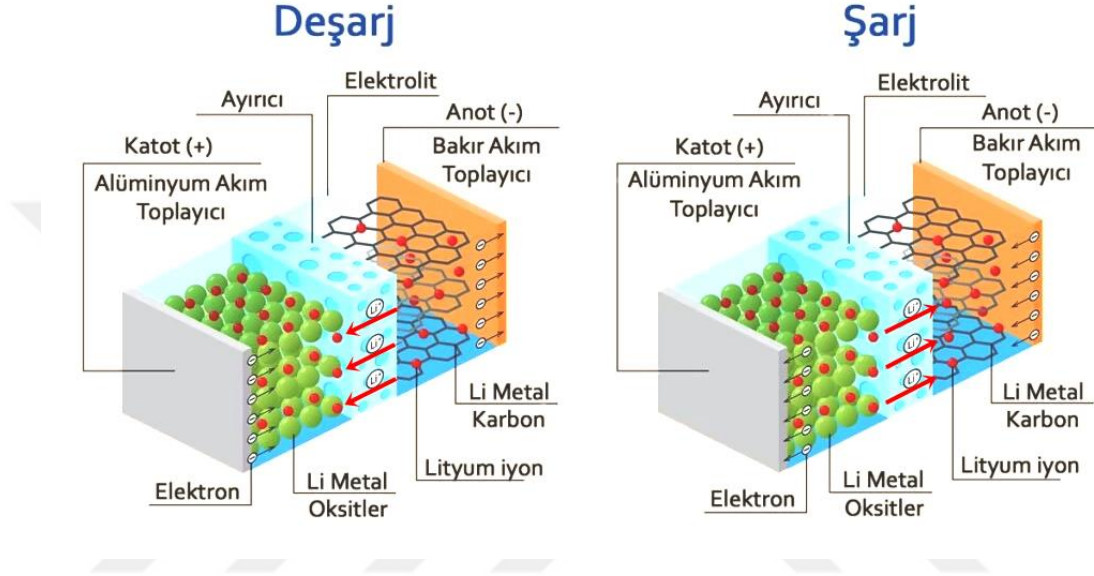
Şekil 2.18. Tesla Model S ait standart batarya hücreleri [30].

2.3.2. Lityum İyon Bataryaların Çalışması

Lityum iyon piller, modern enerji depolama teknolojilerinde önemli bir rol oynar. Bu pillerin tarihi, kimya ve mühendislik alanındaki ilerlemelerle yakından ilişkilidir. Lityum iyon pillerin temelleri, 1980'lerin başlarına dayanır. İlk olarak, Amerikalı kimyager John B. Goodenough ve Japon bilim insanları, lityum iyon bataryaların temel prensiplerini geliştirmişlerdir. John B. Goodenough, lityum kobalt oksit (LiCoO_2) katot malzemesinin keşfiyle bu teknolojinin önünü açtı. Akira Yoshino ise ilk ticari lityum iyon bataryayı geliştirdi ve bu pil, 1991'de Sony tarafından piyasaya kablosuz bir telefonla sürülmüştür. Bu batarya, hafifliği ve yüksek enerji yoğunluğu sayesinde taşınabilir elektronik cihazlarda devrim yarattı [31, 32].

Bu teknolojinin başarılı bir şekilde ticari üretimi, pil tasarımında kullanılan çeşitli malzemeler ve yapısal değişikliklerle mümkün oldu. Lityum iyon piller, yüksek kapasiteleri, düşük şarj kayıpları ve uzun ömürleri ile günümüz teknolojisinde geniş bir uygulama yelpazesine sahip hale geldi. Akıllı telefonlar, dizüstü bilgisayarlar, elektrikli araçlar ve diğer birçok cihazda bu pillerin kullanımı, günlük yaşamımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir [32].

Gelişen teknolojilerle birlikte, lityum iyon pillerin verimliliği, güvenliği ve çevresel etkileri konusunda sürekli iyileştirmeler yapılmaktadır. Araştırmalar, bu pillerin gelecekte daha uzun ömürlü, daha hızlı şarj olan ve daha çevre dostu versiyonlarını geliştirmeyi hedeflemektedir. Şekil 2.19'da lityum iyon bataryanın temel işleyişini, yani nasıl enerji depoladıklarını ve serbest bıraktıklarını açıkça göstermektedir [33].



Şekil 2.19. Lityum iyon bataryanın temel işleyişi [33].

Deşarj Süreci Şekil 2.19 da sol kısımda gösterilmiştir. Bu süreç pilin kullanımda olduğu zamandır, yani cihaz çalışırken pil cihaza enerji sağlar.

Katot (+): Pozitif elektrottur. Burada alüminyum akım toplayıcı kullanılır. Lityum iyonları bu katottan ayrılarak elektrolit aracılığıyla anota doğru hareket eder.

Anot (-): Negatif elektrottur. Karbon (genellikle grafit) ve bakır akım toplayıcı içerir. Bu süreçte lityum iyonları anoda doğru ilerler.

Lityum İyonlar (Li^+): Deşarj sırasında, lityum iyonları katottan anota doğru hareket eder. Aynı zamanda elektronlar da dış devrede bir elektrik akımı oluşturur, bu da pilin güç sağladığı anlamına gelir.

Elektron Akışı: Elektronlar, dış devreden geçerek katottan anota doğru akar. Bu enerji cihazlara güç sağlar.

Şarj Süreci Şekil 2.19'da sağ kısımda gösterilmiştir. Bu süreç pilin doldurulduğu süreçtir.

Katot (+): Şarj sırasında, lityum iyonları anottan ayrılarak katoda geri döner. Aynı zamanda elektronlar da dış devrede anot tarafından çekilir.

Anot (-): Şarj sürecinde lityum iyonları buradan ayrılır ve katoda geri döner.

Lityum İyonlar (Li^+): Şarj sırasında lityum iyonları anottan ayrılır ve elektrolit boyunca katoda geri döner. Bu işlem sırasında pil, enerji depolar.

Elektron Akışı: Elektronlar dış devrede ters yönde akar ve bu akış pilin yeniden şarj olmasına yol açar.

2.3.3. Lityum İyon Bataryaların Avantajları ve Dezavantajları

Artan çevre kirliliğiyle mücadele etmek için lityum iyon pilleri, alternatif bir enerji depolama çözümü olarak öne çıkmaktadır. Ancak, bu pillerin hammaddesi olan lityum madenlerinin çıkarılması sürecinde çevresel etkileri göz ardı edilemez. Özellikle, lityum madenlerinin çıkarılması su kaynaklarına ve yerel ekosistemlere zarar verebilir. Bununla birlikte, lityum iyon pilleri, diğer batarya türlerine göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğundan, daha uzun ömürlü ve verimli bir enerji depolama çözümü sunmaktadır. Geri dönüşüm ve yeniden kullanım teknolojilerinin geliştirilmesiyle, lityum iyon pillerin çevresel etkileri azaltılabilir. Ancak, bu teknolojinin daha geniş çapta kullanılabilmesi için maliyetlerin düşürülmesi ve verimliliğin artırılması gerekmektedir. Lityum iyon piller, elektrikli araçlar, taşınabilir cihazlar ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu nedenle, lityum iyon pillerin çevresel etkileri ve sürdürülebilirliği üzerine yapılan araştırmalar büyük önem taşımaktadır.

Lityum elementi sınırlı bir kaynaktır. Lityum rezervini yeni keşifler, üretim artışı ve teknolojik gelişmeler bu rezervleri etkilemekle birlikte 2024 yılı rezervlerinin ülkelere göre dağılımı Tablo 2.2'de verilmiştir [34]. Sınırlı kaynaklar lityum batarya geri dönüşüm ve yeniden kullanım teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Tablo 2.2. Lityum rezervinin ülkelere göre dağılımı [34].

Ülke	Rezerv (Milyon Ton)	Yüzdelerik Pay (%)
Bolivya	23	21,91
Arjantin	22	20,95
Şili	11	10,48
Avustralya	8,7	8,29
Çin	6,8	6,48
Almanya	3,8	3,62
Kanada	3	2,86
Kongo	3	2,86
Meksika	1,7	1,62
Çekya	1,3	1,24
Sırbistan	1,2	1,14
Peru	1	0,95
Rusya	1	0,95
Mali	0,89	0,85
Brezilya	0,8	0,76
Zimbabve	0,69	0,66
İspanya	0,32	0,30
Portekiz	0,27	0,26
Namibya	0,23	0,22
Gana	0,2	0,19
Finlandiya	0,068	0,06
Avusturya	0,06	0,06
Kazakistan	0,05	0,05
Toplam	105	100

Lityum bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür gibi önemli avantajlar sunarken, yüksek maliyetler, çevresel etkiler ve geri dönüşüm zorlukları gibi dezavantajlara da sahiptirler. Aşağıda lityum bataryanın avantaj ve dezavantajları maddeler halinde verilmiştir.

Avantajlar:

-Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler: Lityum bataryalar, birim ağırlık veya hacim başına yüksek enerji depolama kapasitesine sahiptir. Bu, bataryanın kullanıldığı ekipmanın daha uzun süreli kullanımını sağlar.

-Uzun Ömürlüdürler: Genellikle 500-1500 şarj döngüsüne dayanabilen lityum bataryalar, diğer batarya türlerine kıyasla daha uzun ömürlüdür.

-Hızlı Şarj Edilebilir: Lityum batarya kullanan cihazlar daha kısa sürede kullanılabilir hale gelir, diğer batarya türlerine göre daha hızlı şarj olabilirler.

-Düşük hafıza etkisine sahiptirler: hafıza etkisi, bataryanın tam şarj edilmediğinde kapasitesinin azalması olayıdır. Lityum bataryalar düşük hafıza etkisine sahiptirler yani bataryanın kapasitesini kaybetmeden şarj edilebilirler.

-Düşük ağırlık: Lityum bataryalar düşük ağırlığa sahiptir. Bu özelliği lityum batarya kullanan cihaz veya araçların hafif olmasını sağlar.

-Gelişmiş güvenlik özelliklerine sahiptir: Modern lityum bataryalar, aşırı şarj, aşırı deşarj ve kısa devre gibi güvenlik risklerine karşı koruma sağlayan sistemlere sahiptir.

Dezavantajlar:

-Yüksek maliyet: Lityum bataryalar, sınırlı hammadde ve üretim maliyetleri nedeniyle diğer batarya türlerine göre daha pahalı olabilir. Bu durum lityum batarya kullanan cihaz veya araçların toplam maliyetini artırabilir.

- Çevresel etkiler ve sınırlı kaynaklar: Lityum elementi sınırlı bir kaynaktır, bunun yanı sıra madencilik su tüketimi, toprak kirliliği ve ekosistem etkileri gibi çevresel etkiler yaratabilir.

-Geri dönüşüm problemleri: Bataryaların geri dönüştürülmemesi, çevresel kirliliğe yol açabilir. Lityum bataryaların geri dönüşüm süreci özel teknolojiler gerektirmektedir ve karmaşıktır.

-Sıcaklık hassasiyeti: Lityum bataryalar, aşırı sıcaklık ve aşırı soğuk koşullarına karşı hassastır. Yüksek sıcaklıklar bataryanın ömrünü kısaltabilir, performansını etkileyebilir ve güvenlik riskleri ortaya çıkabilir.

-Kısıtlı şarj ve deşarj aralığı: Lityum bataryalar belirli bir aralıkta şarj ve deşarj olmak üzere tasarlanmıştır. Bu aralığın dışına çıkılması, bataryanın performansını etkileyebilir veya hasara yol açabilir.

-Güvenlik riskleri: Yanma ve patlama gibi riskler taşıyabilirler.

-Soğutma gereksinimi: Yüksek güç uygulamalarında ısınma problemi yaşanabilir. Bu nedenle, özellikle elektrikli araçlarda etkili soğutma sistemleri kullanılması gerekir.

2.3.4. Lityum İyon Bataryalarda Termal Problemler

Lityum iyon piller, günümüzün elektronik cihazlarından elektrikli araçlara kadar geniş bir yelpazede yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu pillerin termal yönetimi, düşük ısı ve yüksek ısı kaynaklı sorunlar nedeniyle önemli bir konudur. Özellikle, lityum iyon piller yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında performanslarında düşüş yaşanabilir ve hatta patlama riski ortaya çıkabilir. Bu nedenle, termal problemlerin önlenmesi veya yönetilmesi, lityum iyon pillerin güvenliği ve verimliliği açısından kritik öneme sahiptir.

Lityum iyon pillerdeki termal sorunlar, çeşitli faktörlerden kaynaklanmaktadır. Bunlar arasında, hücre içi kimyasal reaksiyonlar sırasında ortaya çıkan ısı, dış ortam sıcaklığındaki değişiklikler, aşırı şarj veya deşarj gibi kullanım koşulları ve hatta mekanik stresler bulunmaktadır. Bu faktörlerin her biri, lityum iyon pillerin termal performansını etkileyebilir ve potansiyel olarak güvenlik riskleri oluşturabilir.

Lityum iyon batarya paketinden verimli bir performans almak için, ideal sıcaklığın 15-35 °C' arasında olmalıdır. Ayrıca, batarya modülleri ve hücreleri arasındaki sıcaklık farkı 5 °C'yi geçmemelidir [35, 36].

Literatürde, lityum iyon pillerdeki termal sorunlarla ilgili birçok araştırma ve çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğu lityum iyon pillerin ısınma sorunlarına odaklanmaktadır. Özellikle, ısınma problemlerinin bir soğutma sistemi kullanılarak nasıl stabil hale getirilebileceği üzerine yoğunlaşmıştır. Bölüm 3'te batarya paketlerinin sıvıyla soğutulması konusunda güncel literatür verilmiştir.



BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Elektrikli araçların en kritik bileşen olarak değerlendirilmekte olan bataryaların performansı ve ömrü, doğru sıcaklık yönetimi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, bataryaların aşırı ısınmasını veya soğumasını önlemek için hava soğutma sistemleri, ısı boruları, faz değiştiren malzemeler ile soğutma, hibrit soğutma sistemleri ve sıvı soğutma gibi sistemler kullanılır. Hava soğutma sistemleri batarya modüllerinin dış yüzeyinden hava akışı sağlayarak soğutma gerçekleştirilir. Daha küçük batarya paketleri için uygun olan bu sistem, basit ve maliyeti düşüktür. Ancak, büyük batarya paketlerinde yeterli soğutma sağlamak zorlanabilir, piller arası sıcaklık farkını yeterince düşüremeyebilir. Faz değiştiren malzeme ile soğutma sistemlerinde sıcaklık değiştiğinde faz değiştiren özel malzemeler kullanılır. Bu malzemeler, ısıyı emerek bataryanın sıcaklığını düşürür ve daha sonra bu ısıyı yavaşça ortama verir. Genellikle hafif malzemelerden üretilmelerine ve faz değiştirme sırasında büyük miktarda ısı çekmelerine karşın bu malzemelerin maliyetleri yüksek olabilir ve zamanla performansını kaybedebilir. Hibrit batarya soğutma sistemleri yüksek performans sergilese de daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Sıvı soğutmalı batarya sistemleri batarya modüllerinin içinden veya dışından bir soğutucu sıvı (genellikle su veya özel bir sıvı karışımı) dolaştırılarak soğutma sağlanır. Sıvı soğutma, hava soğutmaya göre daha etkilidir ve daha büyük batarya paketlerinde kullanılır [37]. Sıvı soğutma sistemleri, direkt temaslı ve dolaylı temaslı olmak üzere ikiye ayrılır. Büyük batarya paketlerinde bile etkili soğutma sağlayarak, bataryanın performansını optimize edebilir. Batarya modülleri arasında sıcaklık farkını minimize ederek, bataryanın ömrünü uzatır. Farklı batarya konfigürasyonlarına uyum sağlayabilir. Sıvı soğutma sistemleri yüksek verimliliği, esnekliği ve ek özellikler sunması nedeniyle en avantajlı seçeneklerden biri olması sebebiyle bu çalışmada sıvı soğutma sistemi ele alınmış ve aşağıda verilen literatür çalışmasında batarya termal yönetiminde sıvı kullanılan sistemler incelenmiştir.

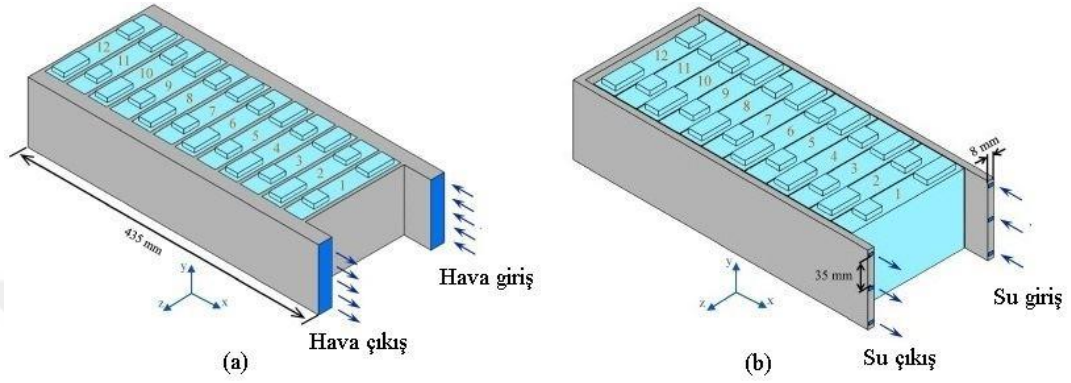
Çeliğin yapmış olduğu çalışmada, 18 adet 18650 lityum iyon pil içeren bir batarya modülü, labirent tipi bir soğutma kanalına yerleştirilmiş. Soğutma kanalından saf su, %0,1 bor nitrür nanoakışkanı-su ve %0,1 titanyum dioksit-su nanoakışkanı geçirilerek, soğutma akışkanlarının termal performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak, soğutucu akışkanların giriş debisi 790 ml/dk ve giriş sıcaklığı 25 °C olarak sabit tutulmuş, 1C şarj ve 1C, 2C ve 3C deşarj oranlarında testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, bor nitrür-su nanoakışkanının diğer akışkanlara göre daha iyi soğutma sağladığı ve batarya modülünün sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiği vurgulanmıştır. Şekil 3.1’de Tasarlanan labirent tipi soğutma sisteme ait fotoğraf verilmiştir [36].



Şekil 3.1. Labirent tipi bir soğutma kanalı [36].

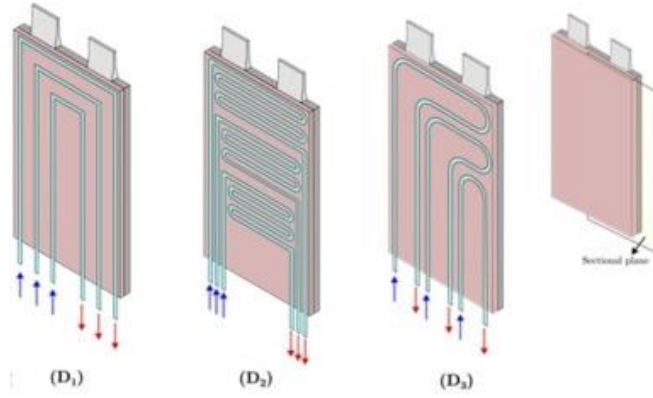
Akbarzadeh ve arkadaşları 48 V'luk bir pil modülünün termal yönetimi için hava ve su soğutma sistemlerini nümerik olarak karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma yapmak için U tipi hava soğutma sistemi ile U şeklinde bir su soğutma plakasına sahip batarya paketinin 2C deşarj hızında performansları karşılaştırılmıştır. Analiz edilen batarya soğutma sistemleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Soğutucuların 25 °C sabit sıcaklıkla sisteme girdiği varsayılmıştır. Çalışmada su için 0,5-2-3,5 L/dk debi, hava için 3, 12, 21 L/s debi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda hücreler arası maksimum ortalama sıcaklık farkı hava tipi soğutucu akışkan hızının artışına bağlı olarak artarken, sıvı tip soğutucuda soğutucu akış hızının artması hücreler arası maksimum ortalama sıcaklık

farkını azaltmıştır. 0.5 W güç tüketim değeri için en sıcak hücrenin ortalama sıcaklığı sıvı soğutmalı sistemde hava soğutmalı sisteme göre 3 °C daha düşük olduğu bulunmuştur. Araştırmacılar sıvı soğutmalı sistemin sıcaklığı daha homojen dağıttığını ve hava soğutmalı sistemden daha verimli olduğunu çalışmalarında vurgulamıştır [37].



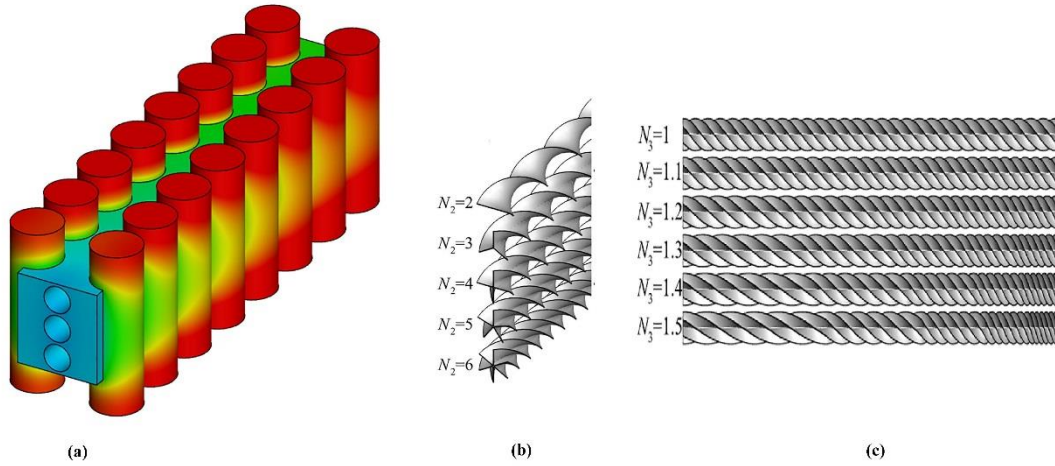
Şekil 3.2. (a) Hava soğutma, (b) Su soğutma [37].

Jha ve arkadaşları 20 Ah Li-ion torba pilin sıcaklık artışını optimum sınırlar içinde kontrol etmek için 3 farklı tasarımda statik ve dinamik şartlarda nümerik analizler gerçekleştirmiştir. Şekil 3.3'te 3 farklı tasarım gösterilmiştir. Yazarlar şekilde gösterilen yenilikçi tasarımlardan su, 20:80 etilen glikol-su ve %1 Al₂O₃-su soğutucu akışkanlarını 0,04 m/s giriş hızıyla geçirmiş ve 1, 2, 3, 4 ve 5 C deşarj hızında performanslarını karşılaştırmıştır. Bunun yanı sıra kanal genişliklerini de değiştiren araştırmacılar tasarladıkları sistemi ANSYS analiz programında çözümlenerek sonuçları yorumlamışlardır. Önerilen D₃ tasarımıyla, termal performans ve termohidrolik verimlilik açısından diğer genel tasarım D1'den daha iyi performans göstererek güç tüketimini %15 oranında azalttığı vurgulanmıştır. Suyu %20 etilen glikol eklenmesi, düşük termofiziksel özellikler nedeniyle sıcaklığı ve homojenliği arttırmış olsa da suya kıyasla düşük donma noktası ve yüksek kaynama sıcaklığı nedeniyle tercih edilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca %1 Al₂O₃ nanopartikül eklenmesi ortalama ısı transfer katsayısı değerini iyileştirerek, pilin maksimum sıcaklığını 5C deşarj hızında 303 K'nin altında tuttuğu bildirilmiştir [38].



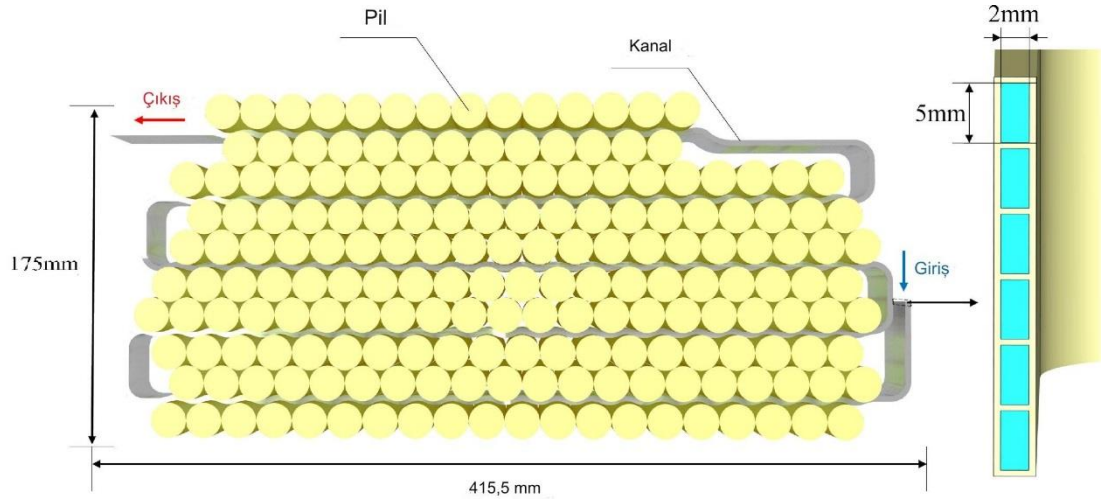
Şekil 3.3. Üç farklı soğutucu plaka tasarımı [38].

Esmaceli ve Khoshvaght'ın yapmış olduğu çalışmada lityum iyon batarya soğutma performansını değerlendirmek için sıvı soğutmalı bir batarya paketinde bükülmüş şerhlerin performansa etkisini nümerik olarak incelemiştir. 16 adet ticari 18650 lityum iyon pilin 8 adet 2 sıra dizilmiş şekliyle bir pil paketi oluşturmuşlardır. Pil paketini soğutmak için Şekil 3.4 a'da gözüken pillerin arasındaki alüminyum plaka kullanılmıştır. Alüminyum plaka üzerinde bulunan kanaldan akışkan 2 C deşarj hızında, 298,15 K giriş sıcaklığı ve 0,00399 kg*s⁻¹ kütle akış hızında geçirilmiştir. Analizlerde boş kanaldan su geçirildikten sonra Şekil 3.4 b'de gözüken eşit uzunluklara sahip 5 farklı büküm şerit kanallara yerleştirilerek analizler çeşitlendirilmiştir. Daha sonra eşit uzunluklara sahip büküm şeritler Şekil 3.4 c'de gözüken farklı uzunluklara sahip 6 büküm şeritle değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Böylece düz kanal yerine, farklı büküm geometrisinde sahip şeritlerle ve farklı uzunluklara sahip şerit geometrileri ile pil soğutma performansları incelenmiştir. Analizler sonucunda şeritlerde büküm sayısını arttırmak su akış yolunu genişletmekte ve radyal hızı arttırdığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra pompalama güç tüketimini azaltmak için uygun sayıda bükümün gerekli olduğu vurgulanmıştır. Analizlerde N5 ten sonra pil sıcaklıklarında anlamlı bir fark bulunamamıştır. Bu sebeple optimum büküm geometrisinin N5 olduğuna karar verilmiştir. Şekil 3.4 c'de gösterilen soğutma kanalları boyunca eğim oranını azaltmak, duvar yüzeylerine yakın daha büyük kayma hızı sağladığı için soğutma kanallarının sonunda ısı transfer katsayısının artmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu sebeple en iyi performansın N3-1,5 tasarımı ile elde edildiği bildirilmiştir [39].



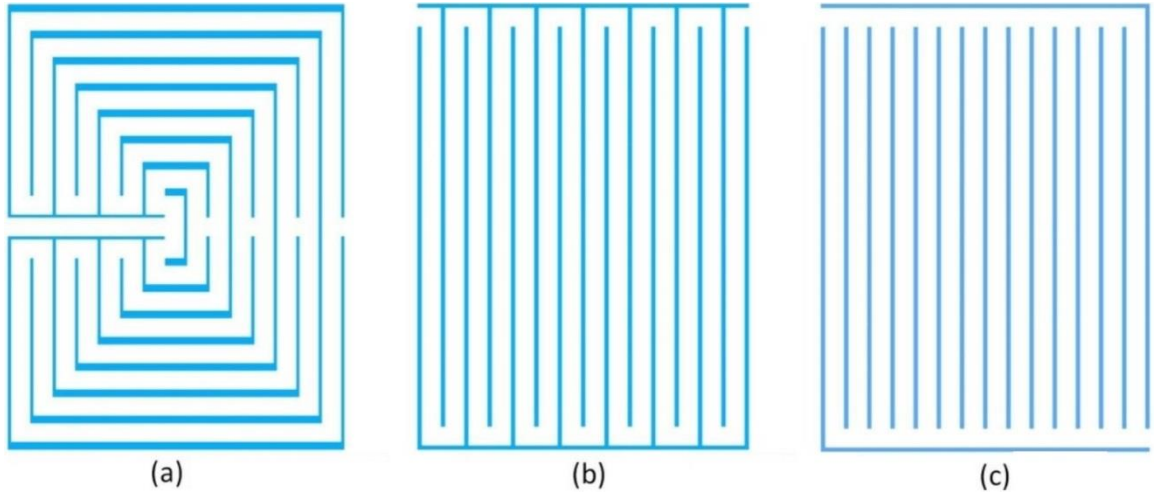
Şekil 3.4. (a) Batarya modülü ve soğutucu sistem, (b) Farklı geometriye sahip büküm şeritler, (c) Büküm sıklığı değişimi [39].

He ve arkadaşları bataryaların sürüş koşullarında soğutma performansının nasıl değiştiğini incelemek istemiştir. Araştırmacılar aracın dönüşlerde kanaldaki sıvı üzerinde ek kuvvetlere yol açabileceğini ve bununla elektrikli araçların sıvı soğutmalı pil takımı termal yönetimini etkileyebileceğini bildirmiştir. Bunun için önceden yapılan bir deneysel çalışmayı referans olarak nümerik analizler gerçekleştirmiştir. Dönüşün olmadığı, 40 km/h, 45 km/h ve 50 km/h dönüş hızları durumunda Şekil 3.5'te gösterilen batarya paketinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler 0,02 kg/s'lik bir giriş kütle akış hızı ve 293,15 K'lik su giriş sıcaklığı koşulunda yapılmıştır. 2C ve 3C deşarj hızlarında analizler çeşitlendirilmiştir. Yapılan analizlere göre dönüş, dönüş olmayan koşullara kıyasla pil grubunun maksimum sıcaklığını ve sıcaklık farkını artırır. Daha yüksek araç hızları bu etkileri daha da kötüleştirir ve pil grubunun sıcaklık homojenliğini ve soğutma verimliliğini azaltır. Daha yüksek deşarj hızları sıcaklık homojenliğini bozar ve sıcaklık farkını daha düşük deşarj oranlarından daha hızlı artırır sonucuna ulaşılmıştır [40].



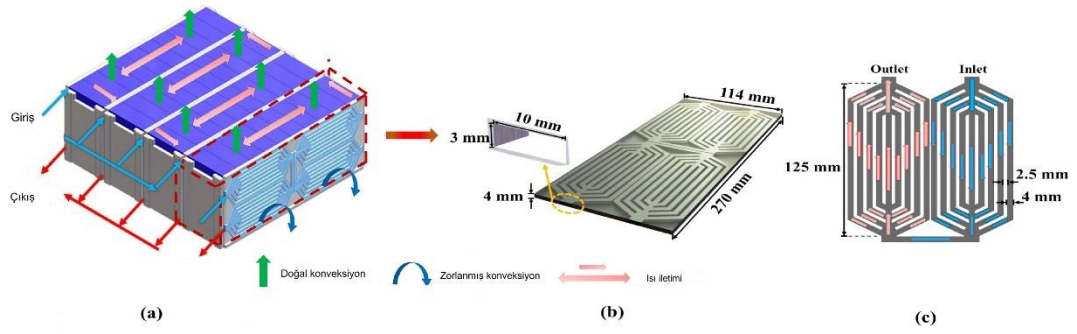
Şekil 3.5. Batarya paketi ve kanal yapısı [40].

Qi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yüksek hızlı deşarj sırasında otomotiv bataryalarının ısı dağılımı sorununu ele almak için tasarlanmış sıvı soğutma plakasında Çoklu U stil mikro kanalın yeni bir formunu sunmaktadır. Yenilikçi tasarıma sahip çoklu u stil mikro kanallı plaka (Şekil 3.6 (a)'da gösterilmiştir) mevcut serpantin mikro kanallı soğutmalı plaka (b) ve paralel mikro kanallı soğutmalı plakayla (c) karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Soğutucu akışkan su, giriş sıcaklığı 298,15 K ve akışkanın debisi $0,015 \text{ kg*s}^{-1}$ kabul edilmiştir. Analizler Çoklu U stil mikro kanalın kanal çapları değiştirerek çeşitlendirilmiştir. Sonuç olarak yeni tasarlanmış çoklu U stil mikro kanal mevcut serpantin mikro kanallı soğutmalı plaka ve paralel mikro kanallı soğutmalı plakaya göre üstün performans sergilemiştir. Çoklu U stil mikro kanaldan her an akış kanalı bölümünden eşit akı ile geçtiğinden ve genişlik merkezden çevreye doğru kademeli olarak azaldıkça, oklu U stil mikro kanalın eşit olarak azalan bölümü sürekli olarak azalır. Bu, soğutucunun hızının merkezden çevreye doğru istikrarlı bir şekilde artmasını sağlayarak piller etrafındaki ısı dağıtımını iyileştirir yorumunda bulunulmuştur [41].



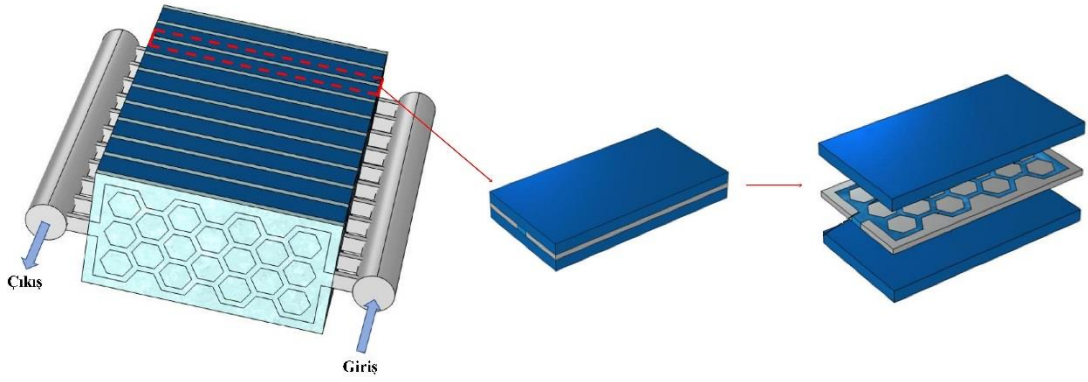
Şekil 3.6. (a) Çoklu U stil mikro kanal, (b) serpantin mikro kanallı soğutmalı plaka, (c) paralel mikro kanallı soğutmalı plaka [41].

Xie ve arkadaşları on adet seri ve dört adet paralel olacak şekilde 42 V/3,86 kWh bir pil grubu oluşturmuş, oluşturulan pil grubunu soğutmak için çalışmalar yapmıştır. Yazarların biyonik kanal sıvı soğutma plakaları ismini verdiği Şekil 3.7 (b)'de görülen plakalar yazarlar tarafından özel olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.7 (c)'de ölçüleri verilen tasarım pil grubunu soğutmak için piller arasına yerleştirilerek içerisinde su dolaştırılmıştır. Yazarlar soğutucu akışkanını 0,05-0,10-0,15-0,20-0,30-0,40-0,50 m*s⁻¹ debilerde ve 3 farklı giriş çıkış kombinasyonu ile dolaştırmıştır. Soğutma suyu giriş sıcaklığı 25 °C olarak ayarlanmış, farklı ortam sıcaklıklarında, 1C, 2C ve 3C deşarj hızında nümerik analiz gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar sonuç olarak, sıvı soğutma sistemi daha düşük enerji tüketimini korurken olağanüstü soğutma performansı göstermektedir. Örneğin, 3C'lik bir deşarj hızı ve 50 °C'lik bir ortam sıcaklığı ile pil grubunun sıcaklığı ve sıcaklık farkı sırasıyla 30,9 ve 4,47 °C'nin altında tutularak kontrol edilebilir olduğunu, bunun yanı sıra toplam güç tüketiminin homojen hız stratejisine göre %42,0 oranında azaltılarak 0,202 W'a kadar düşebilir olduğu bulmuştur [42].



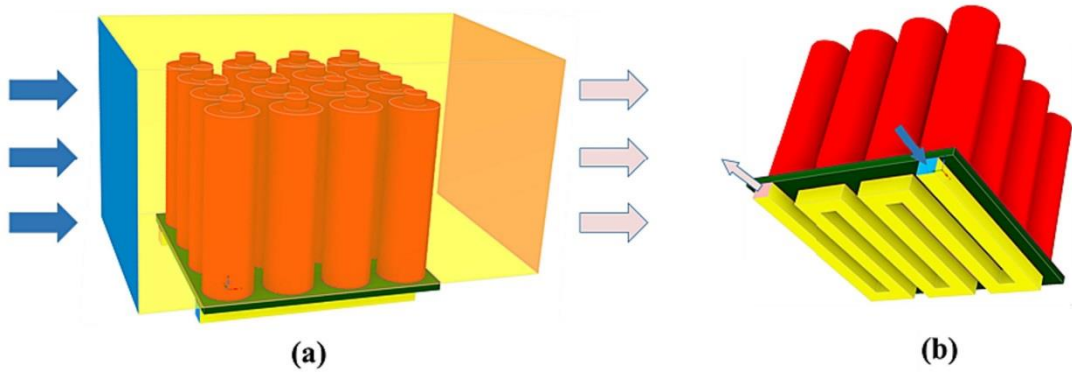
Şekil 3.7. (a) Tasarlanan pil grubu, (b) biyonik kanal sıvı soğutma plakaları, (c) plakada sıvı akış gösterimi [42].

Zhao ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada petek yapılı sıvı soğutma plakası tasarlamış ve petek yapısının optimum parametreleri belirlenmiştir. Petek yapılı sıvı soğutma plakasının sıvı giriş çapı, akış hızı, kanal kalınlıkları ve soğutma sıvısı akış yönün batarya modülünün sıcaklık dağılımına etkisi de incelenmiştir. Şekil 3.8’de tasarlanan petek yapılı soğutma plakalarının batarya modülüne bağlantısı ve yapısı görülmektedir. Soğutucu akışkanın su olduğu sistemde soğutucu akışkan giriş sıcaklığı ve ortam sıcaklığı 298,15 K’de sabit tutulmuş, akışkan debisi 6 farklı (0,01-0,03-0,05-0,1-0,3-0,5 m/s) hızda denenmiştir. Petek yapılı sıvı soğutma plakası 3mm ve 0,1 m/s akışkan debisi için en iyi sıcaklık performansı elde edilmiştir. Bu değerler maksimum sıcaklık için 302,5 K ve maksimum sıcaklık farkı için 4,1 K olduğu tespit edilmiştir. Akışkanın giriş hızının artması ile birlikte maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık fark değerlerinde iyileşme olduğu, 0,3 m/s debinin üzerinde belirgin bir iyileşmenin gözlemlenmediği belirtilmiştir. Ayrıca soğutucu akışkanın iki bitişik petek yapılı sıvı soğutma plakasından zıt yönlerde akışlarının sağlandığı tasarımla sıcaklık dağılımının iyileştiği ve plakalarının kullanım ömrünün artabileceği bilgisi verilmiştir [43].



Şekil 3.8. Batarya modülünün şematik diyagramı ve petek yapılı soğutucu [43].

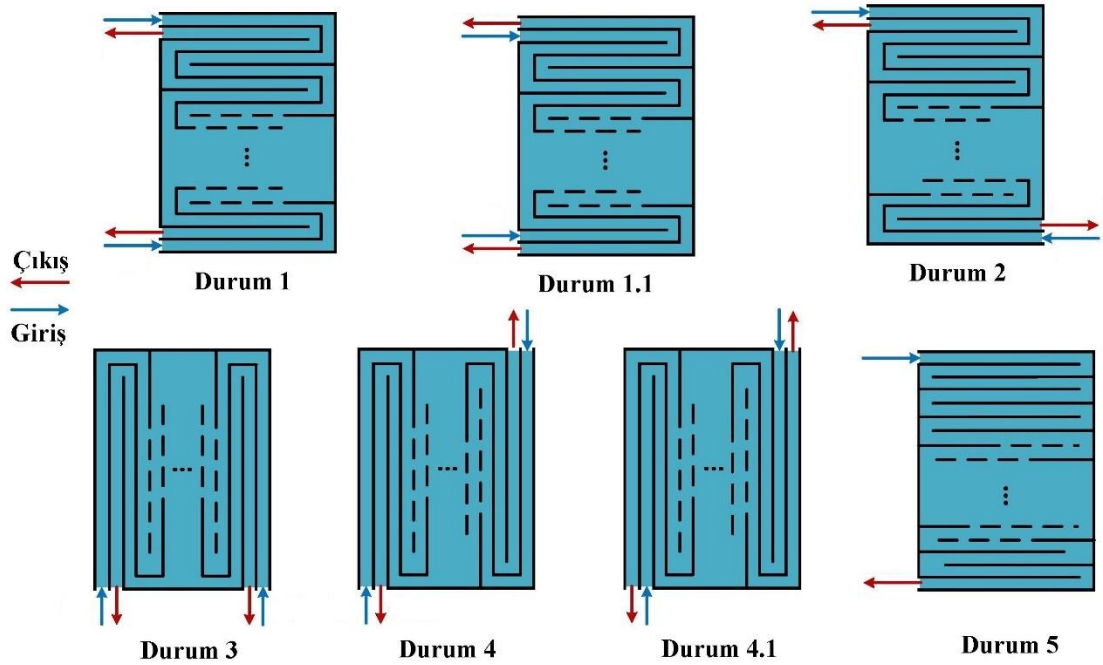
Ye ve arkadaşları 4x4 dizilimde 18650 lityum iyon batarya grubunun termal yönetimi için hava destekli sıvı soğutma sistemi tasarlamış ve analizlerini çalışmalarında paylaşmışlardır. Şekil 3.9 (a)'da hava soğutma, (b)' de su soğutma sistemleri gösterilmiştir. Çalışmada 4 farklı hava hızı, 4 farklı su hızında ve 2C deşarj hızında ANSYS programında analizlerin gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Çalışmada hava akışının olması ve artması ısı dağılımını destekleyeceği ve hem hava hem de sıvı bölgelerinde entropi üretimini azaltacağı, uygun sıvı akış hızı, pil sisteminin sıcaklık farkını azaltmaya yardımcı olacağı vurgulanmıştır. Ayrıca hibrit sistem kullanımının maksimum sıcaklığı ve sıcaklık farkını daha etkili bir şekilde azaltabileceği belirtilmiştir [44].



Şekil 3.9. (a) Havayla soğutma, (b) Suyla soğutma [44].

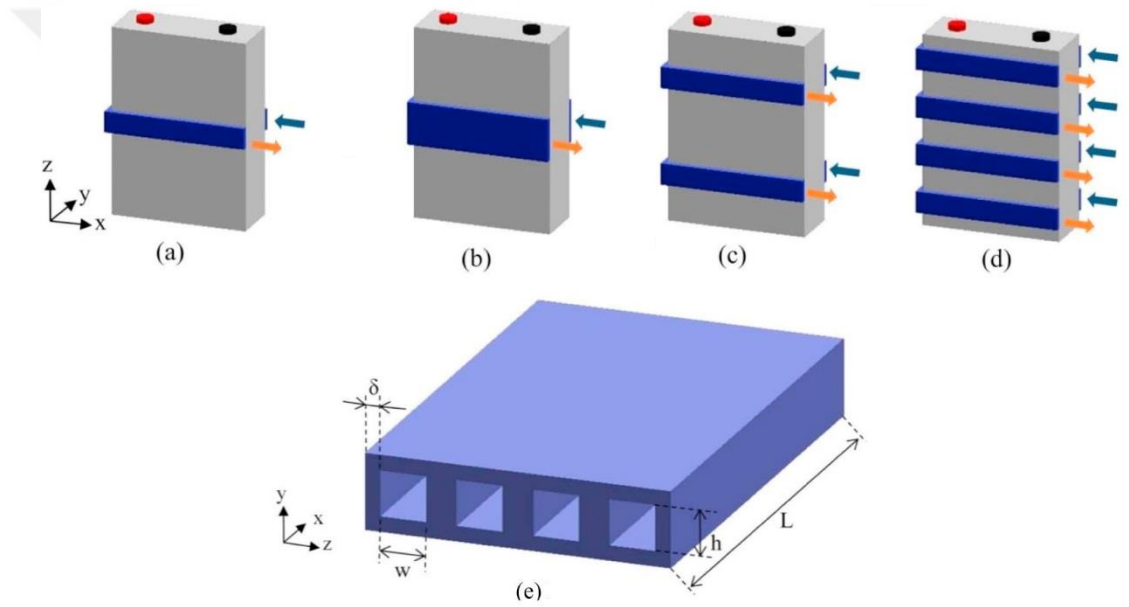
Sheng ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, bir hücre modülünün istenmeyen sıcaklık dağılımını daha iyi yönetmek için çift giriş ve çıkışlı yeni bir serpantin kanallı

sıvı soğutma plakası geliştirilmiştir. Hücre modülü için basitleştirilmiş bir modelle, farklı çalışma koşulları altında hücre sıcaklık dağılımı üzerinde soğutma plakasının akış yönlerinin, akış hızlarının ($0,25 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3} \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) ve kanal genişliklerinin (4, 6, 8, 10 ve 12 mm) etkilerini incelemek için FloEFD yazılımı kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Şekil 3.10'da çift giriş ve çıkışlı yeni bir serpantin kanallı soğutma plakaları akış hatları verilmiştir. Şekil 3.10'da verilen 7 farklı durum için, hücre modülünün maksimum sıcaklık artışını ve sıcaklık dağılımını etkili bir şekilde azaltabileceği, çift giriş ve çıkışlı soğutma plakası kanalının termal yönetim kabiliyeti, tek giriş ve çıkışlı soğutma plakası kanalından üstün olduğu, özellikle kanalının giriş ve çıkışının aynı tarafa göre zıt tarafa düzenlenmesinin bir avantajı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada soğutucu akışkan akış hızını artırmak, hücrenin maksimum sıcaklık artışını etkili bir şekilde azaltabileceği ancak sıcaklık farkını çok fazla etkilemeyeceği, kanal genişliğini arttırmanın, hücrenin maksimum sıcaklık artışı ve sıcaklık farkı üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Bunun yanı sıra pompalamada kullanılan enerji tüketimini azaltmak için, dolayısıyla işletme maliyetini azaltmak için yeterli kanal genişliği tasarlanmasının önemli olduğu belirtilmiştir [45].



Şekil 3.10. Tasarlanan yeni serpantin kanallı soğutma plakası için akış hatları [45].

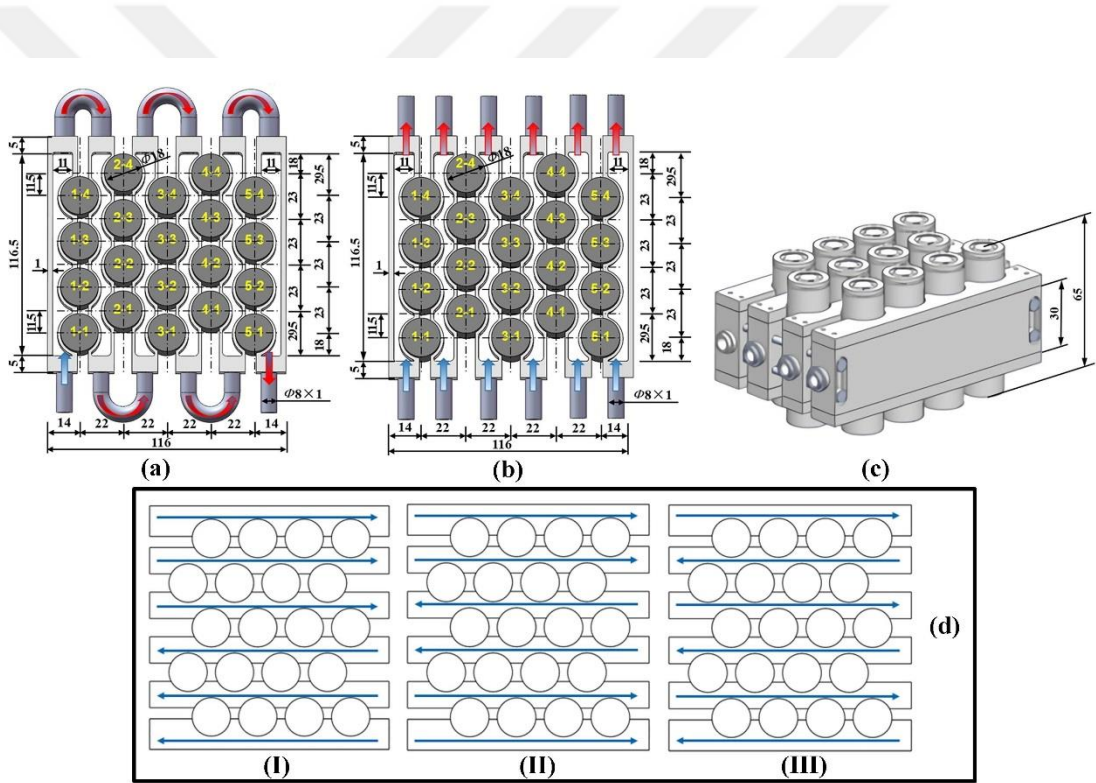
Lan ve arkadaşları, lityum iyon bataryanın termal yönetimini sağlamak için alüminyum malzemeden mikro kanal tasarımı yaptıkları çalışmalarında Şekil 3.11’ de gösterilen çeşitli mikro kanalların soğutma performansına olan etkilerini araştırmışlardır. Su giriş sıcaklığının 27 °C’de sabit tutulduğu analizlerde farklı deşarj hızı (1-1,5-2C) ve debileri (0,05-0,10-0,15-0,20-0,4-0,6-0,8-1 l/dk) ele alınmıştır. Araştırmacılar mikro kanal soğutma tasarımının batarya termal yönetimi için uygulanılabileceğini, tasarlanan sistemin basınç düşüşü ve pompalama gücünden çok az bir maliyetle hem maksimum sıcaklık artışını hem de tüm bataryadaki sıcaklık farkını azaltabileceğini vurgulamıştır [46].



Şekil 3.11. (a) Tek şerit dört kanallı, (b) tek şerit sekiz kanallı, (c) iki şerit dört kanallı, (d) dört şerit dört kanallı, (e) mikro kanal tasarımı [46].

Wang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada silindirik 18650 lityum iyon hücreleri için yeni bir modüler sıvı soğutmalı sistem tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımda soğutma sıvısı akış modu (paralel ve seri) ve soğutucu akış hızı (40,60,80,100,120,140 ml*dk⁻¹) değişkenlerinin, pil hücrelerinin termal davranışlarına olan etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Simülasyonda kullanılan girdiler hücrenin fiziksel parametreleri deneylerle elde edilmiştir. Ortam sıcaklığın 25 °C kabul edildiği analizlerde 3C deşarj hızı, Şekil 3.12’de gösterilen model ve 3 farklı akış yönü (I-II-III) kullanılmıştır. Belirli soğutma yapısı için soğutma suyu akış hızını

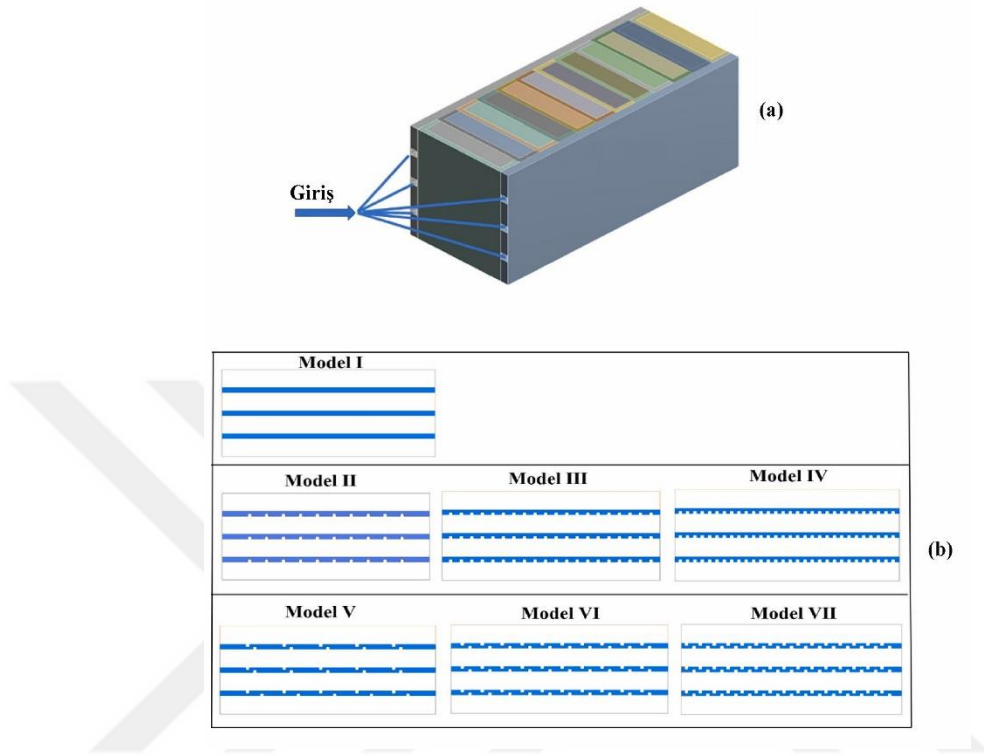
artırarak soğutma etkisini iyileştirmenin bir sınırı vardır. Akış hızı nispeten küçük olduğunda, soğutma suyu akış hızını artırmak maksimum sıcaklığı önemli ölçüde düşürebilir ve pil modülündeki sıcaklık düzgünlüğünü iyileştirebilir fakat akış hızı belirli bir değere çıktığında, soğutma etkisi artık belirgin olmazken güç tüketimi hızla artar. Bu sebeple akış hızı seçiminde soğutma etkisi ile güç tüketimi arasındaki denge dikkate alınmasının önemi vurgulanmıştır. Batarya paketlerinin hücre sayısı büyük olduğunda, paralel soğutmanın daha işlevsel olduğu belirtilmiştir. Akış yönü düzeni III'ün optimum soğutma etkinliğini olduğu bulunmuştur. Bu akış yönü için sıcaklık farkının ise $4,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ve maksimum sıcaklığın $35,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye düştüğünü tespit edilmiştir [47].



Şekil 3.12. (a) Seri akış, (b) paralel akış, (c) modüler sıvı soğutma plakaları, (d) akış yönleri (I-II-III) [47].

Xie ve arkadaşları çalışmalarında Akbarzadeh ve arkadaşların yapmış olduğu çalışmaya benzer bir çalışma yapmışlardır. Xie ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada farklı olarak sıvı kanallarının biçimini düzenlemişlerdir ve Şekil 3.13 (b)'de 7 farklı sıvı kanal biçimi gösterilmiştir. Çalışma bulgularında kanal içerisindeki ayrıcı sayısının belirli bir aralıkta artırılması soğutma etkisini arttırdığı, çift taraflı desen, tek

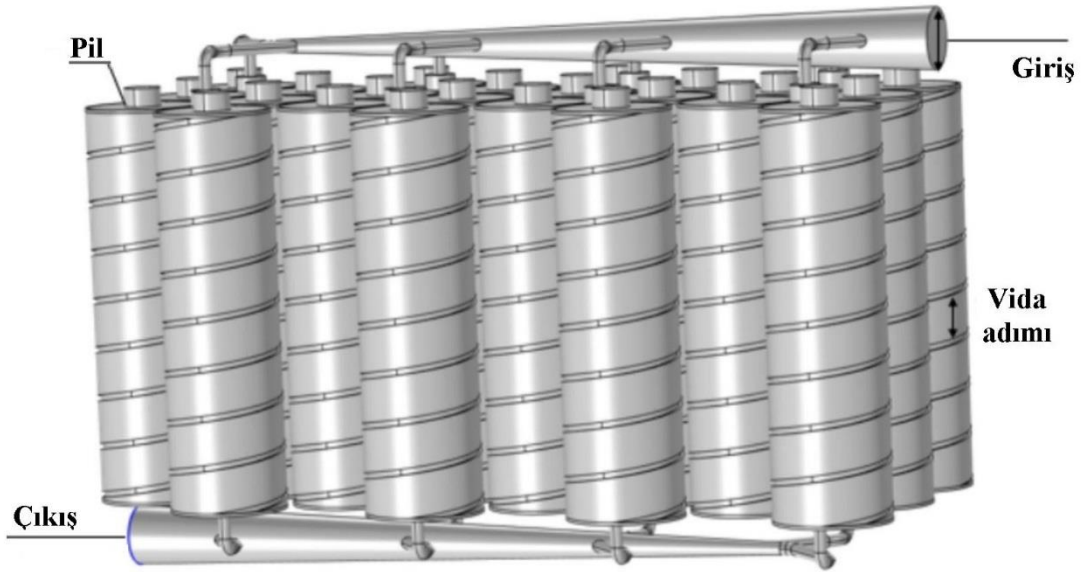
tarafli desene göre daha iyi soğutma etkisi gösterdiği ancak çift tarafli desenin çok daha fazla enerji tükettiği belirtilmiştir [48].



şekil 3.13. (a) Batarya soğutma sistemi, (b) 7 farklı sıvı kanal biçimi [48].

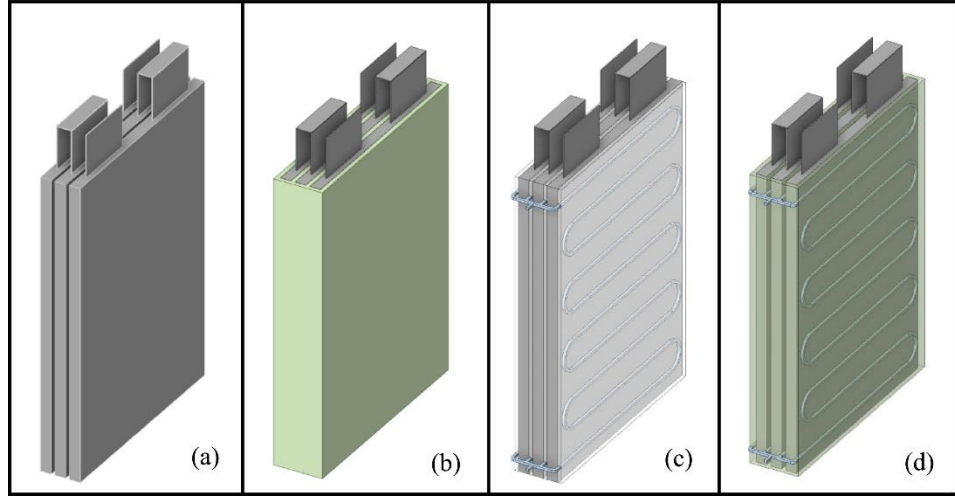
Wei ve arkadaşları yüksek şarj ve deşarj oranları sırasında yüksek enerji yoğunluklu pillerde (lityum iyon) termal kaçak sorununu ele almayı amaçlayan, alveoler benzeri petek sıvı soğutmali bir ısı yönetim sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem, biyolojik dokulardaki hücre soğutmasının biyonik konseptinden esinlenmiştir; silindirik piller hücre görevi görür ve soğutma kanalları kan damarlarına benzetilmiştir. şekil 3.14'de yapısı gösterilen soğutma sisteminde su kullanılmıştır ve su giriş sıcaklığı 25 °C'ye set edilmiştir. Sistemde fraktal kanalın giriş çapları (2,6,10 ve 20 mm), fraktal kanalların dal açıları (30°, 45°, 60° ve 75°) ve farklı sıvı akış koşullarında (0,1-0,6-1-1,5-2-3 l/dk) 5C deşarj hızı için analizler gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan soğutma düzeniyle, fraktal kanalın giriş çapının artırılmasının akış dağılımının düzgünlüğünü iyileştirdiğini, basıncı düşüşünü azalttığını ve hız standart sapmasını düşürdüğünü göstermektedir. Ancak, etki belirli bir değerin üzerinde azalır. Daha yüksek bir akış hızı kullanmak, pil takımı içindeki en yüksek sıcaklığı ve maksimum sıcaklık farkını azaltabilirken,

aynı zamanda basınç kaybını da arttırdığı çalışmada tespit edilmiştir. Tasarlanan soğutma sistemiyle sıcaklık dağılımı iyileştirir ve batarya paketi içindeki en yüksek sıcaklığı azaltılabilir olduğu gösterilmiştir. Spiral kılavuz kanatlarının eğimi ne kadar küçükse, sisteminin soğutma etkisi o kadar iyi olduğu vurgulanmıştır. Optimizasyondan sonra, batarya paketinin yüzeyindeki en yüksek sıcaklık 30,7 °C, maksimum sıcaklık farkı 1,9 °C ve sıcaklığın bağıl standart sapması %0,11'dir ve 4488 Pa akış basınç düşüşü olduğu bulunmuştur [49].



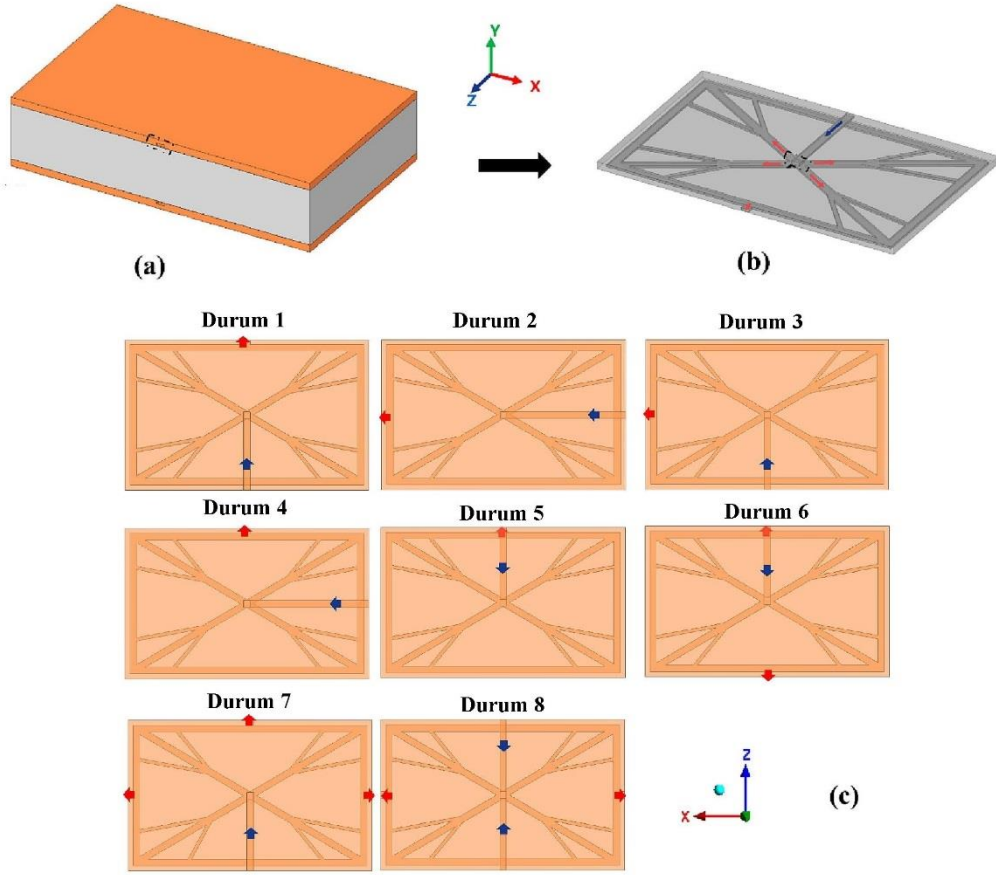
Şekil 3.14. Alveoler benzeri petek sıvı soğutma sistemi tasarımı [49].

Dilbaz ve arkadaşları lityum iyon pillerin optimum çalışma sıcaklığında çalışmasını sağlamak için faz değiştiren malzeme (PCM), sıvı destekli ve hibrit olmak üzere üç ayrı lityum iyon pil soğutma sistemi tasarlamıştır. Tasarımları Şekil 3.15'te verilmiştir. Yazarlar çalışmasında 20 Ah kapasiteli pil takımının simülasyonları çeşitli deşarj hızlarında (2C, 3C ve 4C), farklı reynolds sayısında (250, 500, 750 ve 1000 Re), farklı soğutma sıvılarıyla (su ve Al₂O₃ nanoakışkanı) gerçekleştirmiştir. Batarya termal yönetim sisteminin hibrit sistemle en yüksek pil sıcaklığını %28 oranında iyileştirdiği, faz değiştiren malzeme ve sıvı destekli soğutma tekniklerinin ise sırasıyla %26 ve %27 oranında pil maksimum sıcaklıklarını iyileştirdiği ortaya konmuştur [50].



Şekil 3.15. (a) Pıl modülü, (b) Faz değiştiren malzemeli, (c) Sıvılı destekli (d) Hibrit sistem [50].

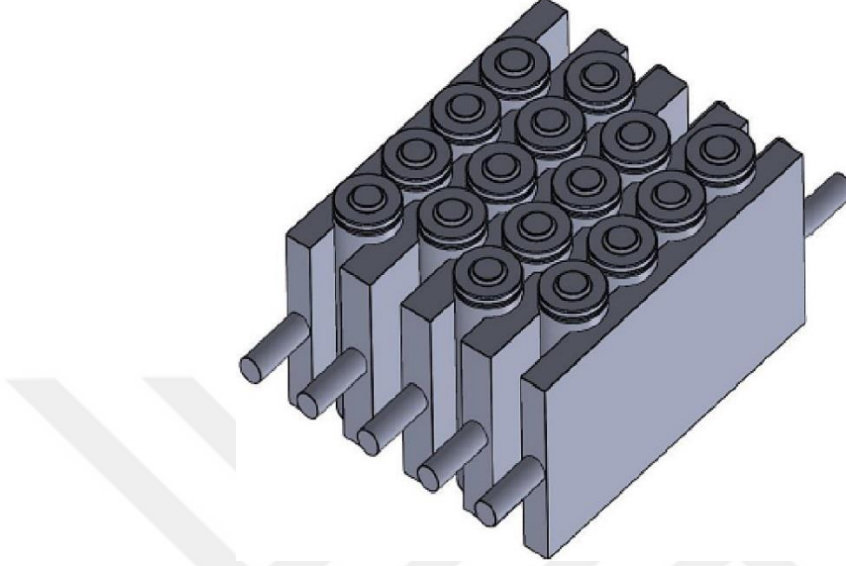
Lv ve arkadaşları daha düşük basınç düşüşlerinde daha iyi bir sıcaklık yönetimi ve sıcaklık tutarlılığı elde etmek için, merkezden çevreye doğru çatallanan çift katmanlı bir mikro kanallı yapıya sahip sıvı soğutma plakalarını yenilikçi bir şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.16'da tasarlanan mikro kanallı yenilikçi sıvı soğutma sistemi verilmiştir. Yazarlar 8 farklı durum, farklı kanal genişlikleri (2, 3, 4, 5, 6 ve 7 mm), farklı deşarj hızı (1C ve 2C) için analizlerini Ansys Fluent 19R2 hesaplamalı akışkanlar dinamiği programında gerçekleştirmiş olup, tüm durumlar için giriş debisi $0,16 \text{ g*s}^{-1}$ kabul edilmiştir. Çift giriş ve çift çıkış düzenlemesine sahip sıvı soğutmalı sistem, en düşük basınç düşüşüyle mükemmel sıcaklık kontrolü ve sıcaklık homojenliği sağlayabildiği, akışkan ana giriş kanalının genişliği ne kadar geniş olursa, bataryadaki maksimum sıcaklık ve basınç düşüşü olacağı çalışmada belirtilmiştir [51].



Şekil 3.16. (a) Batarya ve soğutma plakaları, (b) soğutma plakası görüntüsü, (c) 8 farklı akış durumu [51].

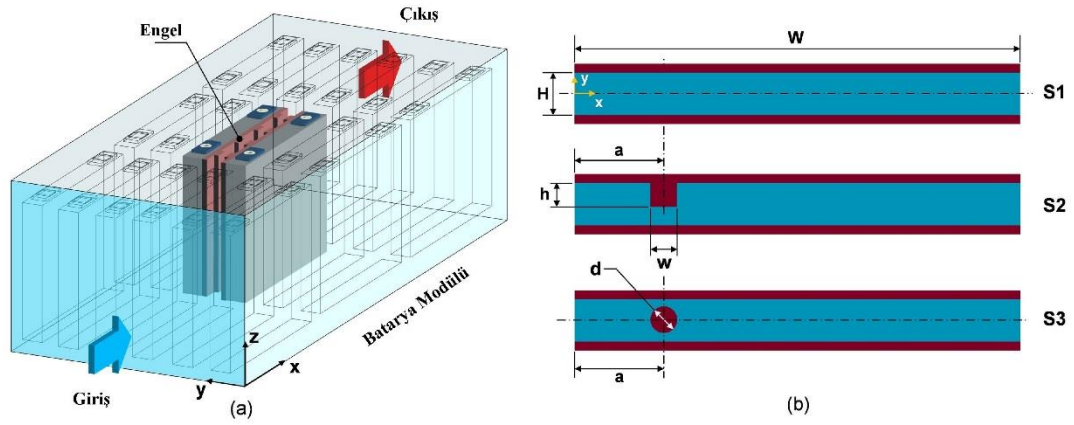
Subramanian ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, pil modüllerinden ısıyı uzaklaştırmak için sıvı bazlı termal yönetim benimsenmiştir. Sunulan çalışmanın temel yeniliği, soğutma kanalı kanatçıkları için alüminyum kullanarak pil modülünün ağırlığını azaltmaktır. Alüminyum ($2,7 \text{ g/cm}^3$), bakıra ($8,96 \text{ g/cm}^3$) kıyasla daha az yoğunur, bu nedenle sistemin genel ağırlığı yaklaşık %60 oranla düşer. Çalışmada soğutma sıvısı olarak etilen glikol ve su kullanmıştır ve soğutucu sıvının akış hızı 3, 4 ve 5 m/s olarak değiştirilerek hesaplamalı çalışmalar yapılmıştır. Kanalla pil temas yüzeyini artırmak için kanal yüksekliği %80'e çıkartılmıştır. Temel soğutma sıvısı ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. ANSYS Fluent kullanılarak yapılan sayısal simülasyon çalışmalarında, 3 m/s'lik bir akış hızının iyi bir soğutma performansı gösterdiği ortaya konulmuştur. Soğutma sıvısı etilen glikol suyla karşılaştırıldığında daha iyi soğutma performansı sergilediği çalışmada ayrıca

belirtilmiştir. Şekil 3.17’de Alüminyum soğutma plakaları ve soğutma sistemi gösterilmiştir [52].



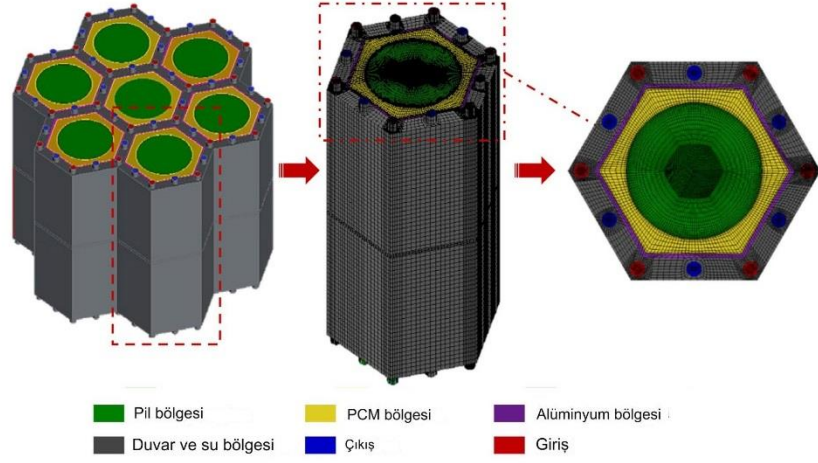
Şekil 3.17. Alüminyum soğutma plakaları ve soğutma sistemi [52].

Roy ve arkadaşları çalışmalarında etkili ısı dağılımı ihtiyacını karşılamak için, geleneksel hava soğutmalı sistemlere kıyasla daha yüksek ısı transfer performansı gösteren sıvı soğutucular kullanıldığını, ancak bu tür sıvı soğutucuların ilişkili artan viskozitesi ve daraltılmış akış yolu, karışımın azalmasına ve dolayısıyla sistemin termal performansının bozulmasına yol açtığını belirtmiştir. Bu problemi ele alan yazarlar engellerle daraltılmış bir akış yolunun ısı transferini artırmak için viskoelastik sıvı soğutucuların kullanılma potansiyelini araştırmış ve batarya soğutma kanallarının özelliklerini modellemiştir. Şekil 3.18’de Modellenen batarya modülü ve akış engelleyicileri gösterilmiştir. Çalışmada, engellerin neden olduğu türbülansın neden olduğu akış dengesizliklerinin ortaya çıkmasına bağlı ısı transferinin arttığı ve maksimum sıcaklığın ve sıcaklık farkının düştüğü belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca daha yüksek Weissenberg sayısı, polimer viskozitesi ve Reynolds sayısı termal performansı iyileştirebileceği not edilmiştir [53].



Şekil 3.18. (a) Batarya modülü, (b) akıştaki engellerin gösterimi [53].

Chen ve arkadaşları bal peteği formunda bir yapı kullanarak lityum iyon pillerin termal yönetim performansını sayısal olarak araştırmak için yeni bir model önerilmiştir. Geleneksel pil termal yönetim sistemleri ile karşılaştırıldığında, mevcut çalışma akış dağılımını ve güç kaybını iyileştirmek için bal peteği manifoldu sıvı soğutma plakasından ve faz değiştiren malzemedan yararlanarak daha iyi termal yönetim performansı sağlandığı belirtilmiştir. Şekil 3.19’da Bal peteği manifoldu sıvı soğutma plakasından ve faz değiştiren malzemedan oluşan yapı gösterilmiştir. Çalışmada akışın değiştirildiği 6 farklı durum verilmiştir. Tasarlanan 6 farklı durum için 6. durum diğerlerinden genel olarak daha üstün olduğu belirlenmiştir. 6. Durum için 3C deşarjında maksimum sıcaklık en düşük 308,44 K olduğu bulunmuştur [54].



Şekil 3.19. Bal peteği manifoldlu sıvı soğutma plakasından ve faz değıştiren malzemeden oluşan soğutma sistemi [54].

Kütüğün yapmış olduğu çalışmada 16'lı aralarında 2 mm boşluk olan 4x4 yapıda 18650 lityum iyon pil paketini nümerik ve deneysel incelemiştir. Nümerik çalışmada 16 pil paketine 1-2-3-4-5 C deşarj hızlarında üreteceği ısılar tanımlanmıştır. Söz konusu deşarj değeri için hava, su, AmpCool ve ATF akışkanlarıyla farklı debilerde analizler gerçekleştirilmiştir. CAD ortamında tasarlanan sistem sıvı akışkan için deneysel olarak hazırlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonucu bataryaların standart çalışma sıcaklıkları arasında kaldığı tespit edilmiştir [55].

Yukarıda verilen güncel literatürde görüldüğü üzere sıvı soğutma sistemlerinin maksimum sıcaklığı ve piller arası sıcaklık farkını istenilen değeri arasında tutabileceği farklı yapısal soğutma sistemleriyle gösterilmiştir. Yapılan çalışmada 16 adetten oluşan 18650 Li-iyon pil grubu için yenilikçi soğutma sistemi tasarlanarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin detayı materyal metot bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

BÖLÜM 4

MATERYAL METOT

Nanoakışanlar, nanometre boyutlarında süspansiyon halinde bulunan nanoparçacıkların bir baz sıvı içinde dağıldığı yenilikçi akışanlar olarak adlandırılır. Bu nanoparçacıklar, metal oksitler, metaller, karbontüpler, grafen, veya polimerler gibi çeşitli malzemelerden yapılabilir. Nanoakışanlar, yüksek ısı iletkenliği, artırılmış termal performans ve gelişmiş fiziksel özellikler sunarlar. Bu özellikler, nanoakışanların özellikle enerji, elektronik soğutma, biyomedikal uygulamalarda ve ısı transfer süreçleri gibi alanlarda cazip kılmaktadır. Bu sebeple nanoakışanlar bataryaların zorlu kullanım süreçlerinde ürettikleri ısının bataryadan uzaklaştırılmasını geleneksel baz sıvı akışkanlara göre verimli bir şekilde yapabilirler. Bu çalışmada 18650 Li-iyon pil grubu 16'lı bir pil paketi (4x4) olacak şekilde modellenmiştir. Piller arasından bakır boru dolaştırılarak pil bakır boru arasında bakır levhalar CAD ortamında yerleştirilmiştir. Pil paketlerinde yüksek deşarj hızlarında aşırı ısınma oluşabilmektedir. Aşırı ısınma pilin patlamasına, güvenlik riskine veya pil kullanım ömrünün azalmasına neden olabilir. Bu problemleri çözmek amacıyla pil paketlerinin termal kararlılığını sağlamak için pil etrafında oluşturulan bakır borulardan Deminarilize su, Su-BN ve Su- Al_2O_3 akışkanları dolaştırılmıştır. Böylece su ve nanoakışkanların soğutma performansları hesaplamalı akışkanlar dinamiği programında analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı debiler kullanılarak (0,75 l/dk-1,5 l/dk-2,25 l/dk) debi değişiminin soğutma performansı incelenmiştir. Pil paketlerinin termal analizleri 1C, 3C, 5C deşarj hızlarında, akışkan giriş sıcaklığı 25 °C sabit tutularak ANSYS paket programında yapılmıştır. Bu bölümde tasarlanan sistemin tüm detayları ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

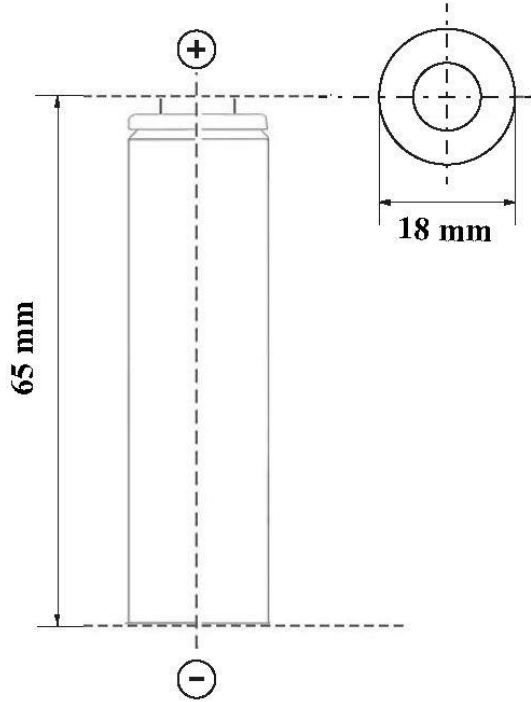
4.1. 18650 LİTYUM İYON BATARYA

Çalışmada 18650 Sony lityum iyon pil ele alınmıştır. Çünkü 18650 piller yüksek enerji depolama kapasiteleri nedeniyle geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından tercih

edilmektedir. Kullanılan pil veya pil gruplarına ait detay aşağıda başlıklarda detaylandırılmıştır.

4.1.1. 18650 Lityum İyon Batarya Boyutları ve Özellikleri

Pillerin kullanıldıkları yere kusursuz şekilde oturabilmeleri için boyutlarının standart olması gerekmektedir. 18650 Li-iyon Pillerin yükseklikleri 65,1 mm'den yüksek, çap değeri 18,25 mm'den daha geniş olmaz. "18650" terimi, pilin boyutlarını ve form faktörünü tanımlayan bir koddur. Bu koddaki rakamlar pilin fiziksel boyutlarına atıfta bulunur. "18" pilin çapının 18 mm olduğu, "65" pil yüksekliğinin 65 mm olduğu, "0" ise pilin silindirik şekilde olduğunu vurgulanmaktadır. Şekil 4.1'de 18650 Li-iyon pilin standart boyutları ve kutup uçları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. 18650 Li-iyon pil standart boyutları.

Çalışmada 2250mAh Sony 18650V3 pil ele alınmıştır. Pil için nominal kapasite 2,25 Ah iken, kesme gerilimi 2,5 Volttur. Pil hücrelerine ait özellikler Tablo 4.1' de verilmiştir [56].

Tablo 4.1. Pil hücrelerine ait özellikler [56].

Model	Sony US18650V3
Kapasite	2,25 Ah
Nominal Voltaj	3,7 V
Şarj Akımı	2,15 A
Ağırlık	44 g
Yarıçap	9 mm
Yükseklik	65 mm
Yüzey Alanı	3675,66 mm ²
İç direnç	31,5 mΩ

4.1.2. 18650 Lityum İyon Batarya için Yüzey Isı Değerleri

Li-ion pillerin şarj veya deşarj işlemleri sırasında, elektrotlardan geçen akım pilin iç direncine maruz kalır. Bu durum pilin iç direnci nedeniyle ısı enerjisi oluşmasına neden olur. Oluşan ısı denklem 4.1 eşitlikle modellenir [55-57].

$$Q_{pilisısı} = I^2 * R_{iç} \quad (4.1)$$

Burada $Q_{pilisısı}$ pilin dolum ya da boşaltım esnasında ortaya çıkabilecek potansiyel ısı miktarı, I akım miktarı, $R_{iç}$ iç dirençtir. Analizlerde pilin sıcaklığa bağlı iç direncinde değişim olmadığı varsayılmıştır. Pilin her deşarj değerindeki ısı hesabı için pil yüzey alanı, pil iç direnci ve pil kapasitesi değeri kullanılmıştır. Tablo 4.2’de deşarj akımları için ısı miktarı ve birim yüzeye düşen ısı miktarları verilmiştir [55].

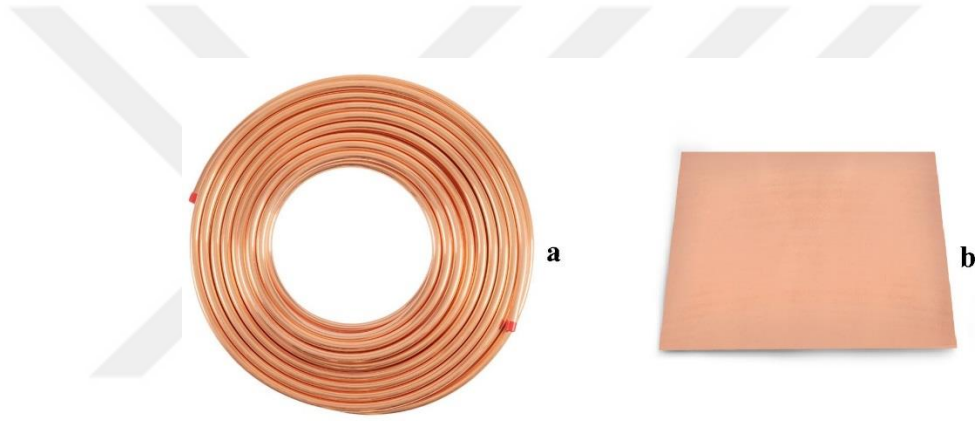
Tablo 4.2. Deşarj akımları için ısı miktarı ve birim yüzeye düşen ısı miktarları.

Deşarj Akımı (A)	Isı Miktarı (W)	Birim Yüzey için Isı Miktarı (W/m ²)
1C	0,15	43,38
3C	1,43	390,47
5C	3,98	1084,65

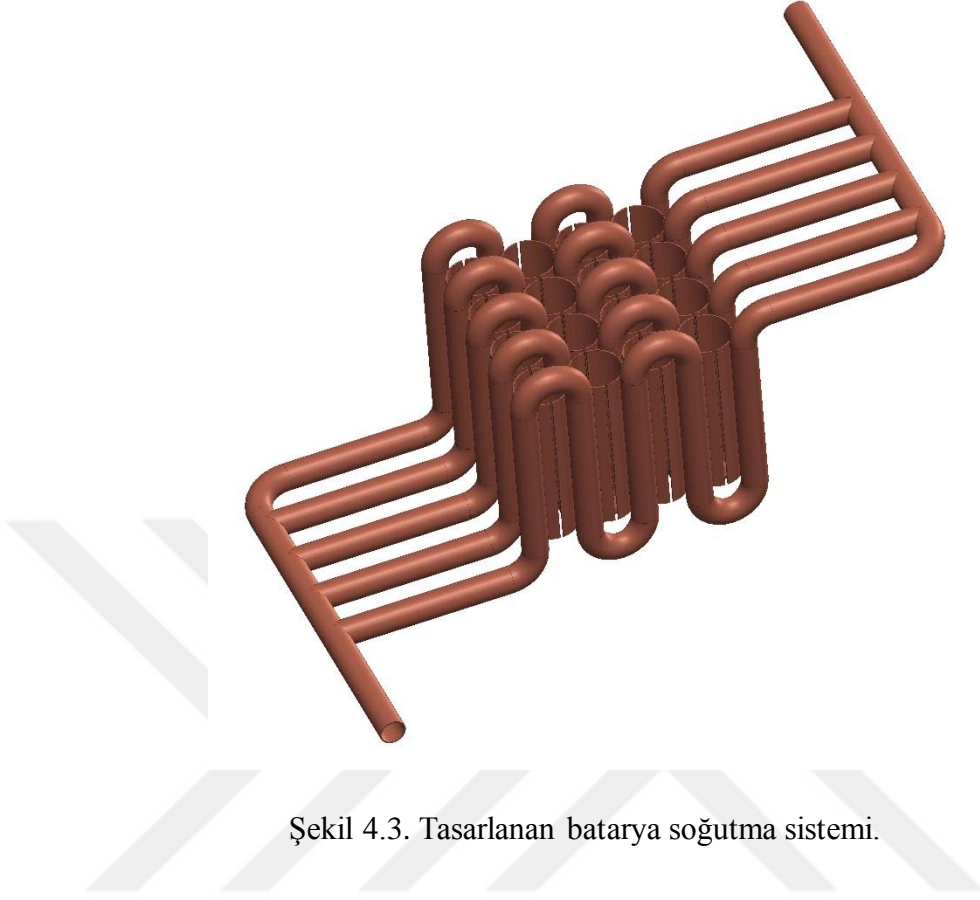
4.2. TASARLANAN BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİ VE CAD MODELİ

Soğutma sistemlerinde bakır, yüksek ısı iletkenliği, dayanıklılığı, korozyon direnci, uygun fiyatlı ve kolay işlenebilir olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu

özellikleri sebebiyle tasarlanan batarya soğutma sisteminde bakır boru ve bakır levha kullanılmıştır. Yine kolay bulunabilir ve uygulanabilir olması için kullanılan bakır boru ve bakır levha piyasada kolay bulunabilen standart özelliklerdeki bakır malzemelerden seçilmiştir. Kullanılan bakır boru ve plakaya ait fotoğraf Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu çalışmada 18650 Li-iyon piller grubu 16’lı bir pil paketi olacak şekilde modellenmiştir. Tasarlanan sistemin birbirini tekrar etmesi ve sadece bakır borunun eğilmesi sureti ile oluşturulabileceğinden pil grubu istenilen adet için tasarlanabilir. Eğilen bakır boruların pillere temas noktalarına bakır plaka yerleştirilmek suretiyle pillerin yüzey alanı mümkün olduğunca fazla kaplanmıştır. Şekil 4.3’de tasarlanan batarya soğutma sistemi CAD görüntüsü verilmiştir.

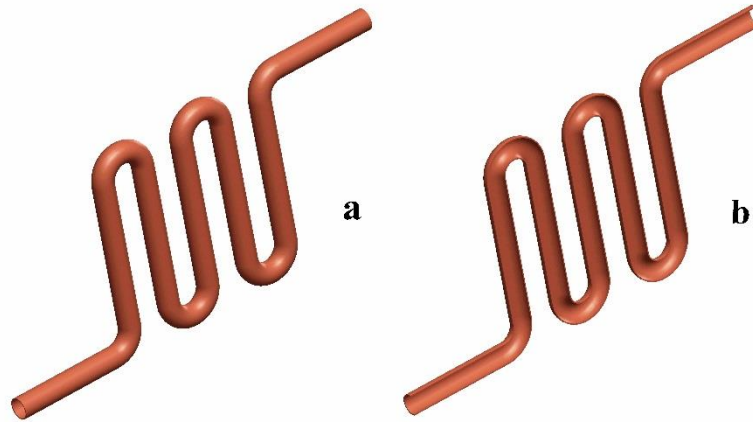


Şekil 4.2. a: Bakır boru, b: Bakır plaka.

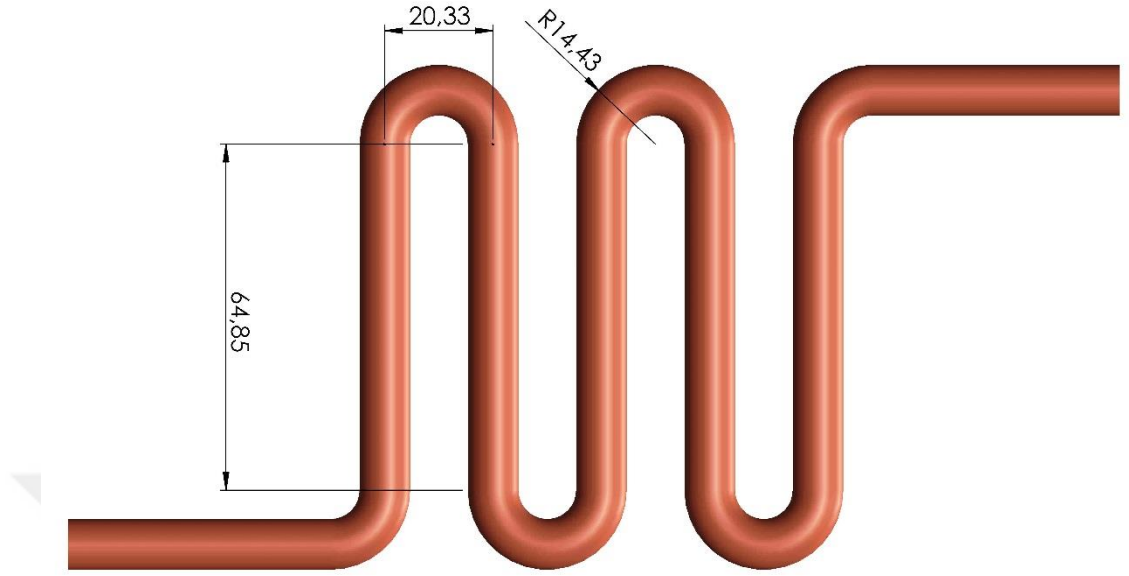


Şekil 4.3. Tasarlanan batarya soğutma sistemi.

Pillerin etrafında soğutma sıvısının dolaştırıldığı bakır boru 9,52 mm dış, 8,52 mm iç çapa sahip standart bakır borudur. Eğilmiş tekli bakır boru formu ve kesit görüntüsü Şekil 4.4'te verilmiştir. Borunun eğim öncesi düz kısmı 64,85 mm, eğim yarıçapı 14,43 mm'dir. Ölçülendirme Şekil 4.5'te verilmiştir.

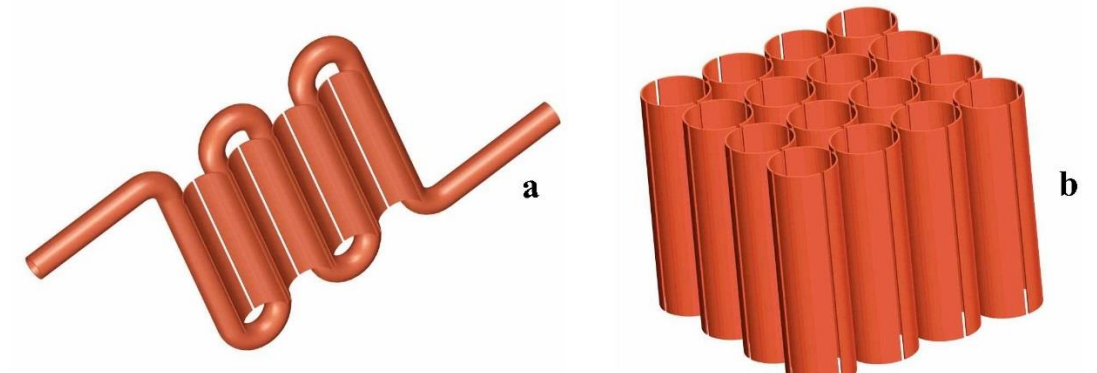


Şekil 4.4. a: Eğilmiş tekli bakır boru formu, b: Kesit görüntüsü.

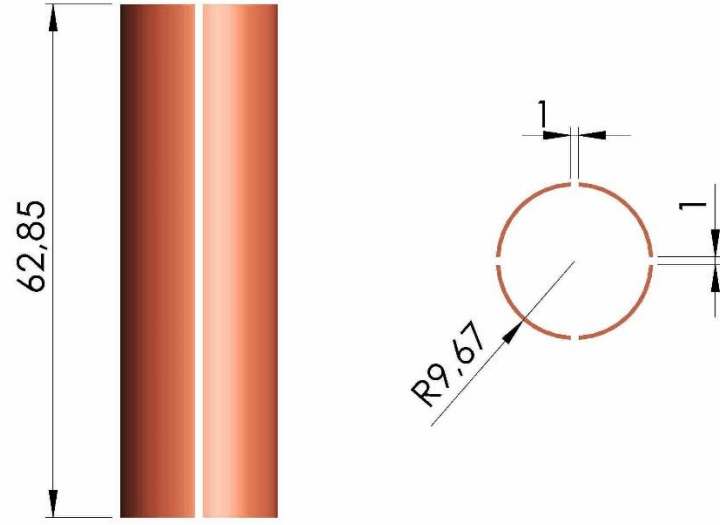


Şekil 4.5. Bakır boru eğim ölçüleri.

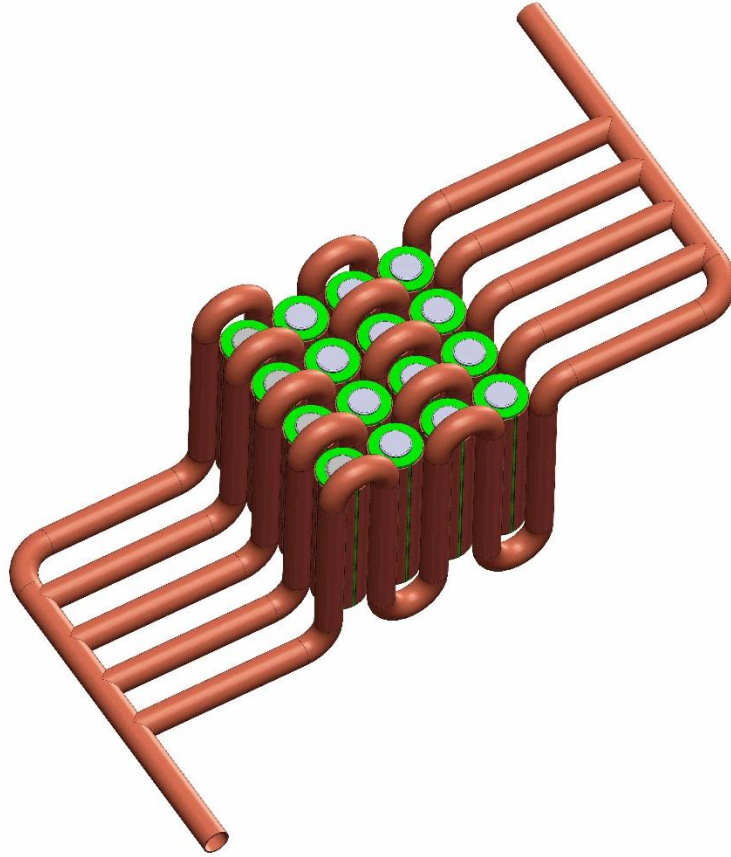
Bakır borunun pil ile birleştiği kısma ısı transferini arttırmak için bakır plaka eklenmiştir. 16 pil için bakır plaka ve boru plaka bağlantısı Şekil 4.6'da verilmiştir. Kullanılan plaka boyu 62,85 mm olup plaka kalınlığı 0,5 mm'dir. Pil yüzeyine sarılan plaka 9,67 mm yarıçapla ark formuna getirilmiştir. Plaka ve bakır boru birbirine bağlanmıştır. Şekil 4.7'de ark formuna getirilen plakanın ölçüleri verilmiştir. Şekil 4.8'de 16 pil paketin montaj hali verilmiştir.



Şekil 4.6. a: Bakır boru plaka bağlantısı, b: 16 pil grubu için plaka yerleşimi.



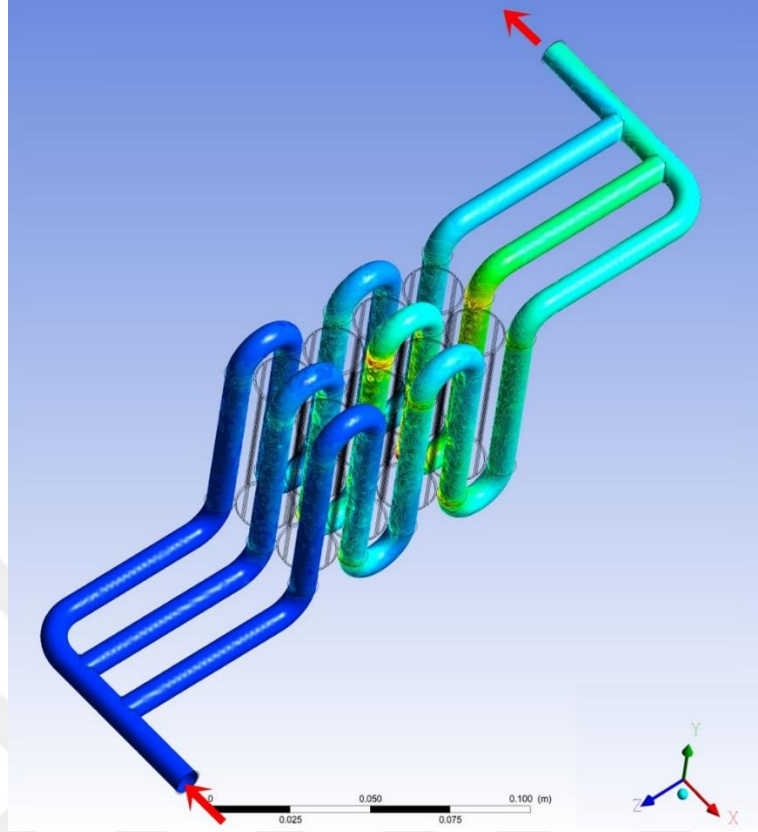
Şekil 4.7. Ark formu plaka ölçüleri.



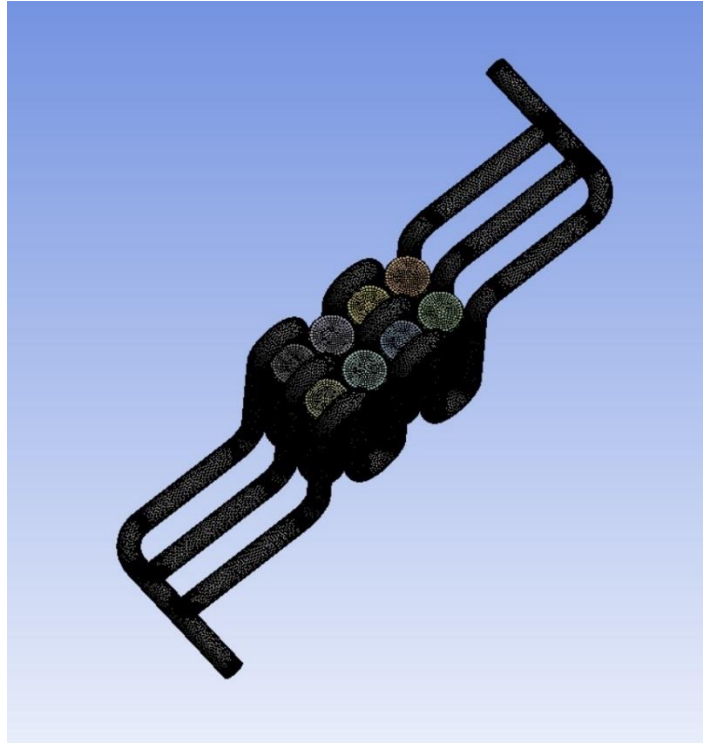
Şekil 4.8. 16 Pil paketinin montajlı hali.

4.3. BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİNİN ANSYS'TE MODELLENMESİ

Pil paketinin termal kararlılığını sağlamak için pil etrafında oluşturulan bakır borulardan demineralize su, Al_2O_3 -Su ve BN-Su akışkanları pil soğutma sisteminin içerisinden geçilmiştir. Böylece su ve nanoakışkanların soğutma performansları ANSYS R2 paket programı vasıtasıyla karşılaştırılabilmiştir. Ayrıca farklı debiler kullanılarak (0,75 l/dk-1,5 l/dk-2,25 l/dk) debi değişiminin soğutma performansı incelenmiştir. Pil paketlerinin termal analizleri 1C, 3C, 5C deşarj hızlarında, akışkan giriş sıcaklığı 25 °C sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. ANSYS gibi mühendislik simülasyon yazılımlarında akışkanlar dinamiği analizinde simetri kullanmanın çeşitli avantajları vardır. Bu avantajlar hesaplama süresinin azalması, hafıza kullanımının azalması, sonuçların doğruluğu, modelleme ve sonuçların daha kolay incelenmesi şeklinde listelenebilir. Tasarlanan pil paketi yansıtma simetrisine sahip olduğundan paketin tamamı yerine yarısının analizi yapılarak yukarıda bahsedilen avantajlardan faydalanılmıştır. Şekil 4.9'da simetrisi alınmış pil paketi görseli sunulmuştur. Şekilde sıvının giriş ve çıkış yönü gösterilmiştir. Mühendislik simülasyonlarında, "node" (düğüm) sayısı önemli bir kavramdır. Düğümler, simülasyon modelinin mesh (ağ) yapısının bir parçasını oluşturur ve belirli geometrik noktaları temsil eder. Daha fazla düğüm sayısı, modelin daha ince bir ağ yapısına sahip olmasını sağlar. Bu da çözümün daha hassas olmasını ve sonuçların gerçek sisteme daha yakın olmasını sağlar. Ancak, gereğinden fazla düğüm sayısı da hesaplamaları gereksiz yere karmaşıklaştırabilir. Düğüm sayısının analiz sonucunu ne kadar etkilediğini test etmek için ağ bağımsızlığı çalışması yapılmıştır ve optimum mesh sayısının 1572815 olduğuna karar verilmiştir. Şekil 4.10'da Mesh yapılmış pil paketi görseli verilmiştir.



Şekil 4.9. Simetrisi alınmış pil paketi görseli.



Şekil 4.10. Mesh yapılmış pil paketi görseli.

4.4. KULLANILAN AKIŞKANLARIN ÖZELLİKLERİ

Üç farklı deşarj hızında deşarj edilen pil paketinin soğutulması için 3 farklı akışkan, 3 farklı debide bakır borulardan geçirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı soğutma akışkanlarının bu analizi, sonuçların karşılaştırılması ve analizlerin doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Kullanılan akışkanlar sistemde en alt kısımdan bakır borulara giriş yapmış ve pil paketini dolaşarak soğutma işlevini yerine getirmiştir. Şekil 4.9’ da akışkan giriş ve çıkış bölgeleri ok ile gösterilmiştir. Akışkan üç farklı debide bakır borudan sirkülasyon yaptırılmıştır. Tablo 4.3’te Soğutucu akışkan debi ve hızları verilmiştir.

Tablo 4.3. Soğutucu akışkan debi ve hızları.

Debi (l/dk)	Hız (m/s)
0,75	0,219
1,5	0,439
2,25	0,658

Baz soğutucu akışkan olarak demineralize su kullanılmıştır. Su içerisine kütleli olarak %2,5 oranla Alüminyum oksit (Al_2O_3) ve Bor-nitrür (BN) eklenerek Nanoakışkanlar oluşturulmuştur. Nanoakışkanlar, yüksek ısı iletkenliği, artırılmış termal performans ve gelişmiş fiziksel özellikler sunarlar. Bu özellikler, Nanoakışkanlar özellikle enerji, elektronik soğutma, biyomedikal uygulamalar ve ısı transfer süreçleri gibi alanlarda cazip kılmaktadır. Bu sebeple nanoakışkanlar bataryaların zorlu kullanım süreçlerinde ürettikleri ısının bataryadan uzaklaştırılmasını geleneksel baz sıvı akışkanlara göre verimli bir şekilde yapabilirler. Bu sebeple nanoakışkan kullanılması planlanmıştır. Nanoakışkan için seçilen nanoparteküllerden biri Al_2O_3 ’tür. Alüminyum oksiti termal yönetim gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Elektronik cihazlarda, ısı değiştiricilerde, yüksek sıcaklık fırınlarında ve diğer endüstriyel uygulamalarda alüminyum oksit, ısıyı etkili bir şekilde iletme ve yayma için kullanılır. Ayrıca Al_2O_3 ekonomik olarak erişilebilir ve geniş çapta kullanılabilir bir malzemedir. Nanoakışkan için seçilen nanoparteküllerden diğeri BN’dür. Dünyadaki bor rezervlerinin yaklaşık %70-75’ine sahip olan Türkiye, bor mineralleri açısından en zengin ülkedir. Bor mineralleri Türkiye için stratejik bir

mineraldir. Yine Al₂O₃ gibi BN’de yüksek ısı iletkenliğe sahip bir mineraldir. Tablo 4.4’te baz akışkan ve nanoparteküllere ait termofiziksel özellikler verilmiştir.

Tablo 4.4. Baz akışkan ve nanoparteküllere ait termofiziksel özellikler.

Temel Özellikler	Baz Akışkan		
	Su	BN	Al ₂ O ₃
Ortalama parçacık boyutu (nm)	-	75	13
Yoğunluk (ρ) (kg/m ³)	997,2	2300	4000
Isıl iletim katsayısı (k) (W/m.K)	0,616	33	40
Isıl kapasite (C _p) (J/kg.K)	4178	489	773
Viskozite (μ) (mPa.s)	0,876	-	-
Safılık (%)	-	>99	99,8
Rengi	-	Siyah	Beyaz

Nanoparteküllerin kütleli olarak %2,5 oranında suya ilavesiyle ayrı ayrı Su-Al₂O₃, Su-BN nanoakışkanların özellikleri belirlenmiştir. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri Tablo 4.5’te verilmiştir. Nanoakışkanların bu özelliklerinin tespitinde aşağıda verilen formüllerden faydalanılmıştır.

Tablo 4.5. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri.

Nanoakışkanlar	Yoğunluk (Kg/m ³)	Isıl iletim katsayısı (W/m.K)	Isıl kapasite (J/kg.K)	Viskozite (mPa.s)
%2,5 BN-Su	1029,77	0,719	3972	0,754
%2,5 AL203-Su	1072,27	0,797	3860	0,672

Nanoakışkanın yoğunluğunun tespitinde denklem 4.2 kullanılmıştır [36].

$$\rho_{nanoakışkan} = \lambda \rho_{nanopartikül} + (1 - \lambda) \rho_{bazakışkan} \quad (4.2)$$

Burada;

$\rho_{nanoakışkan}$: nanoakışkan yoğunluğu (kg/m³)

$\rho_{nanopartikül}$: nanopartikül yoğunluğu (kg/m³)

$\rho_{bazakışkan}$: baz akışkan yoğunluğu (kg/m³)

λ :Yüzde miktarı

Nanoakışkanın ısıl kapasitesinin tespitinde denklem 4.3 kullanılmıştır [36].

$$C_{P_{nanoakışkan}} = \lambda C_{P_{nanopartikül}} + (1 - \lambda) C_{P_{bazakışkan}} \quad (4.3)$$

Burada;

$C_{P_{nanoakışkan}}$: Nanoakışkan ısıl kapasitesi (J/kg.K)

$C_{P_{nanopartikül}}$: Nanopartikül ısıl kapasitesi (J/kg.K)

$C_{P_{bazakışkan}}$: Baz akışkan ısıl kapasitesi (J/kg.K)

λ = :Yüzde miktarı

Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı tespitinde denklem 4.4 kullanılmıştır [36].

$$k_{nanoakışkan} = \frac{k_{nanopartikül} + 2k_{bazakışkan} + 2(k_{nanopartikül} - k_{bazakışkan})\lambda}{k_{nanopartikül} + 2k_{bazakışkan} - (k_{nanopartikül} - k_{bazakışkan})\lambda} k_{bazakışkan} \quad (4.4)$$

Burada;

$K_{nanoakışkan}$: Nanoakışkan ısı iletim katsayısı (W/m.K)

$K_{nanopartikül}$: Nanopartikül ısı iletim katsayısı (W/m.K)

$K_{bazakışkan}$: Baza kışkan ısı iletim katsayısı (W/m.K)

λ :Yüzde miktarı

Nanoakışkanın viskozite hesabında denklem 4.5 kullanılmıştır [36].

$$\mu_{nanoakışkan} = (1 + 2.5 \lambda) \mu_{bazakışkan} \quad (4.5)$$

Burada;

$\mu_{nanoakışkan}$: Nanoakışkan viskozitesi (mPa.s)

$\mu_{bazakışkan}$:Baz akışkan viskozitesi (mPa.s)

λ :Yüzde miktarı

BÖLÜM 5

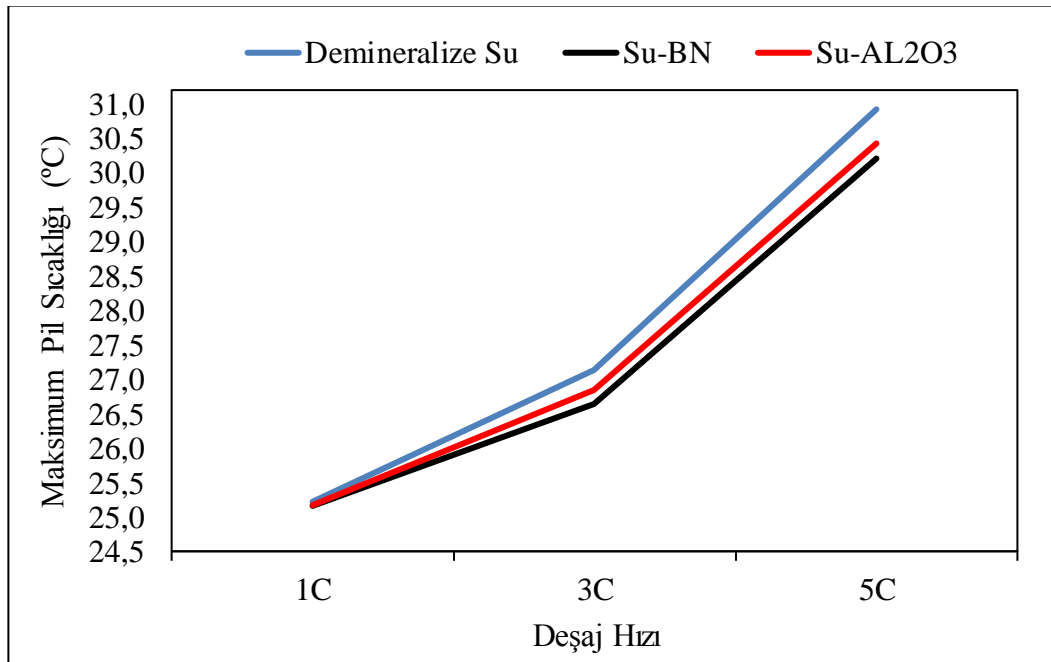
ANALİZ SONUÇLARI

Elektrikli araçlarda kullanılan 18650 pil paketlerinde termal kararlılığını sağlamak için öncelikle pil etrafında dolaşan bakır borulardan ve plakalardan yenilikçi bir tasarımı yapılmıştır. Bu bakır borudan Demineralize su, Su-Al₂O₃ ve Su-BN akışkanları dolaştırılmıştır. Böylece su ve nanoakışkanların soğutma performansları ANSYS programında karşılaştırılabilmektedir. Ayrıca farklı debiler kullanılarak (0,75 l/dk-1,5 l/dk-2,25 l/dk) debi değişiminin soğutma performansı incelenmiştir. Pil paketlerinin termal analizleri 1C, 3C, 5C deşarj hızlarında, akışkan giriş sıcaklığı 25°C kabul edilerek ANSYS paket programında yapılmıştır. Simetrik pil paketindeki her bir pil için demineralize su, Su-Al₂O₃ ve Su-BN akışkanları kullanılarak ayrı ayrı pil maksimum sıcaklıkları, ortalama pil sıcaklığı ve pil grubu sıcaklık fark değerleri alınacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Simetrik pil grubunda her bir pil için yapılan analizlerin sonuçları ve yorumları benzer olduğu için analiz sonuçlarında simetrik pil paketinin maksimum pil sıcaklığı, pil paketinin ortalama sıcaklığı ve pil grubundaki maksimum sıcaklık fark değerleri ele alınarak analiz sonuçları verilmiştir. Detaylı analiz sonuçlarına aşağıdaki başlıklarda yer verilmiştir.

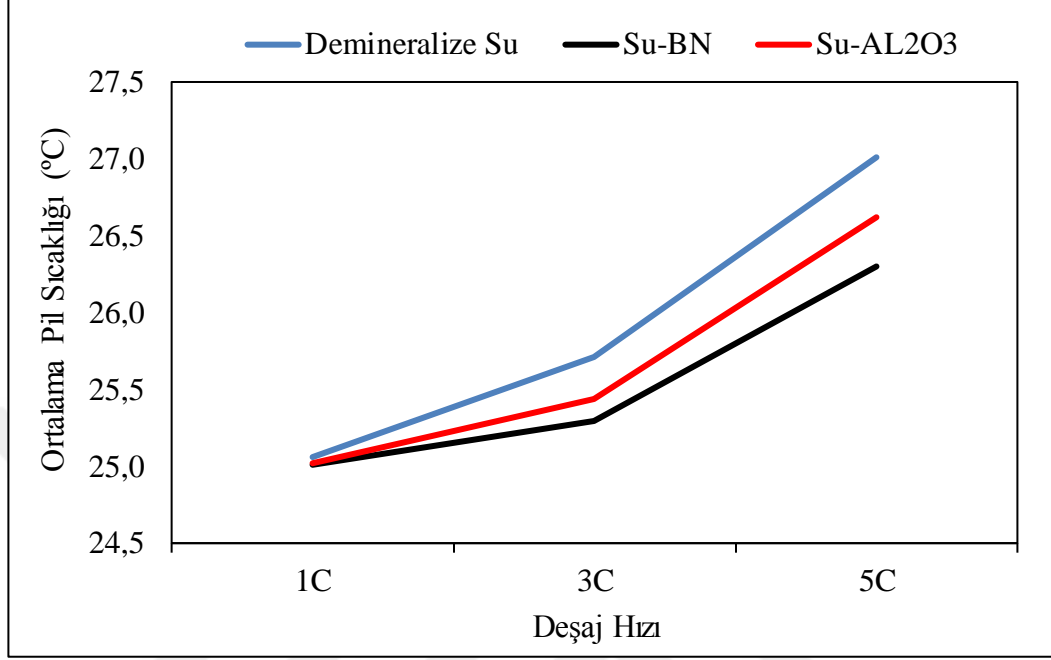
5.1. 0,75 L/DK DEBİDE DEŞARJ ANALİZLERİ

Demineralize su, Su-Al₂O₃ ve Su-BN akışkanlarının bakır boru içerisinden 0,75 l/dk sabit debiyle geçirildiği ve akışkan giriş sıcaklığının 25 °C olduğu analizler pil paketinin 1C, 3C, 5C deşarj hızlarında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde demineralize su, Su-Al₂O₃ ve Su-BN akışkanları için ayrı ayrı maksimum pil sıcaklığı, ortalama pil sıcaklığı, maksimum pil sıcaklık farkı değerleri alınmış ve grafikler oluşturulmuştur. Şekil 5.1’de 0,75 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için maksimum pil sıcaklıkları verilmiştir. Maksimum deşarj hızında Demineralize su, Su-BN ve Su-Al₂O₃ akışkanlarının kullanıldığı analizlerde pil maksimum sıcaklık değerlerinin sırasıyla 30,92°C, 30,21°C, 30,43°C olduğu gözlemlenmiştir.

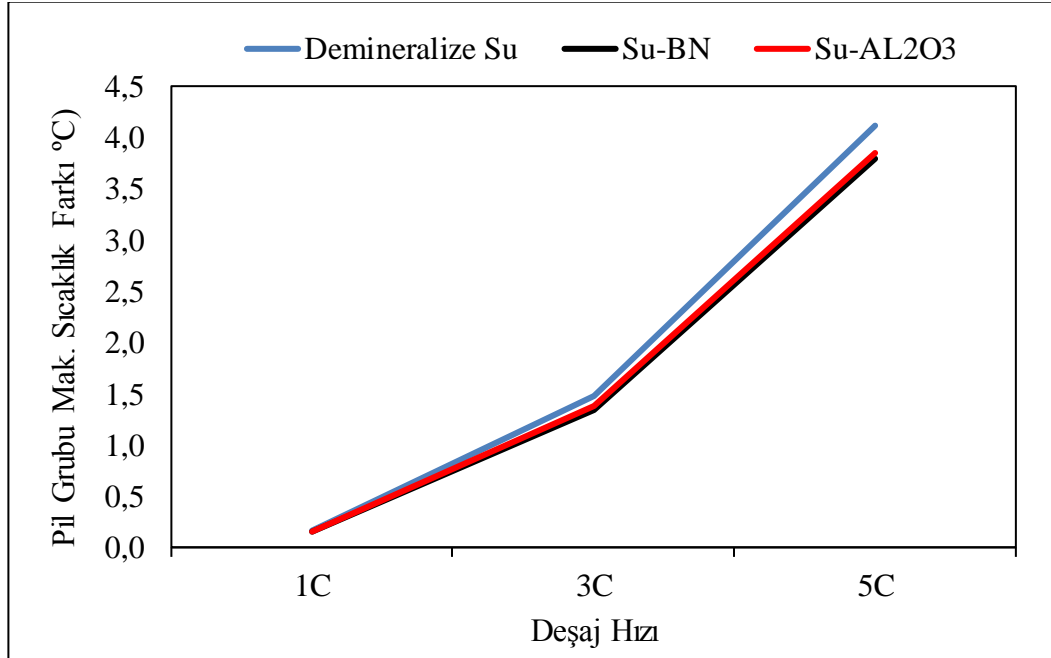
Demineralize suya BN nanopartikülü eklenerek oluşturulan Su-BN nanoakışkanı kullanımıyla maksimum sıcaklıkta %2,31 oranında azalma sağlamıştır. Aynı şekilde demineralize suya Al_2O_3 nanopartikülü eklenerek oluşturulan Su- Al_2O_3 nanoakışkanı kullanımıyla maksimum sıcaklıkta %1,6 oranında azalma sağlamıştır. Şekil 5.2'de 0,75 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için ortalama pil sıcaklıkları verilmiştir. Pil paketi için ortalama pil sıcaklıkları en yüksek deşarj değeri için ele alındığında pil ortalama sıcaklıkları Demineralize su, Su-BN ve Su- Al_2O_3 akışkanları için sırasıyla 27,01°C, 26,30°C, 26,32°C olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen sonuçlara göre Su-BN nanoakışkanıyla suya göre %2,63 oranında azalma, Su- Al_2O_3 nanoakışkanıyla suya göre %1,44 oranında azalma meydana gelmiştir. Pil üzerinde sıcaklık farkının yüksek olmaması pilin güvenliği, performansı, hücre dengelemesi, verimlilik ve ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Bu sebeple için pil üzerindeki maksimum sıcaklık farkının 5°C'yi geçmemesi istenmektedir [36]. Şekil 5.3'de 0,75 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için pil grubunun maksimum sıcaklık farkı verilmiştir. Pil paketinin demineralize suyla soğutulmasıyla yapılan deşarj analizlerinde 1C, 3C ve 5C deşarj değerleri için sırasıyla maksimum sıcaklık farkı 0,18°C, 1,63°C ve 4,47°C olduğu belirlenmiştir. Maksimum deşarj değerlerinde tüm akışkanlar 0,75 l/dk debi için karşılaştırıldığında en iyi sıcaklık fark değeri Su-BN nanoakışkanıyla 4,24°C olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.1. 0,75 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için maksimum pil sıcaklıkları.



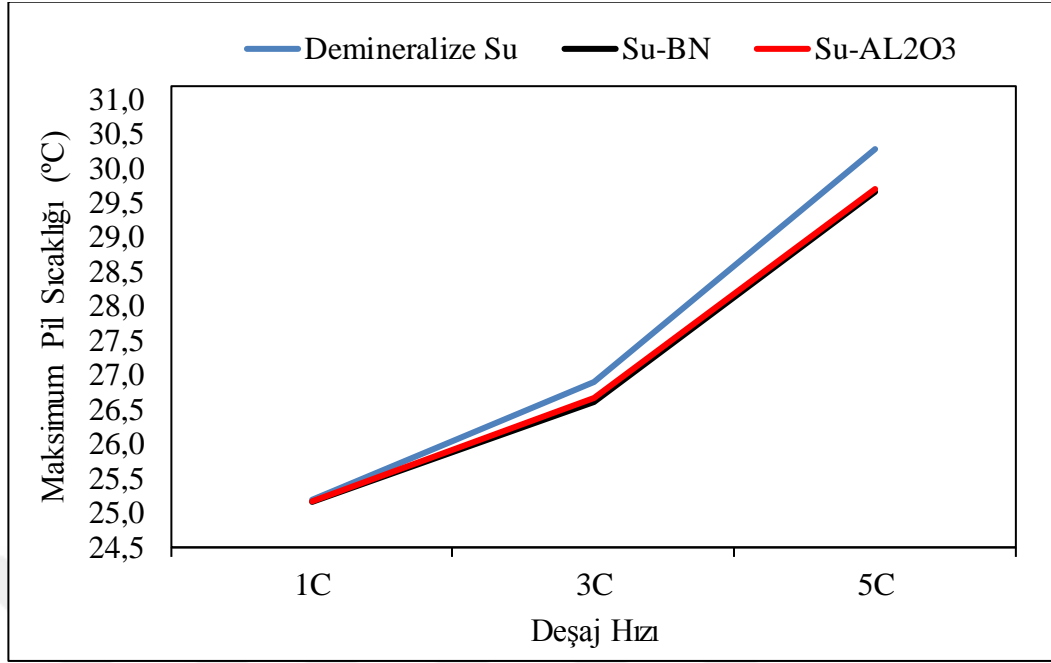
Şekil 5.2. 0,75 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için ortalama pil sıcaklıkları.



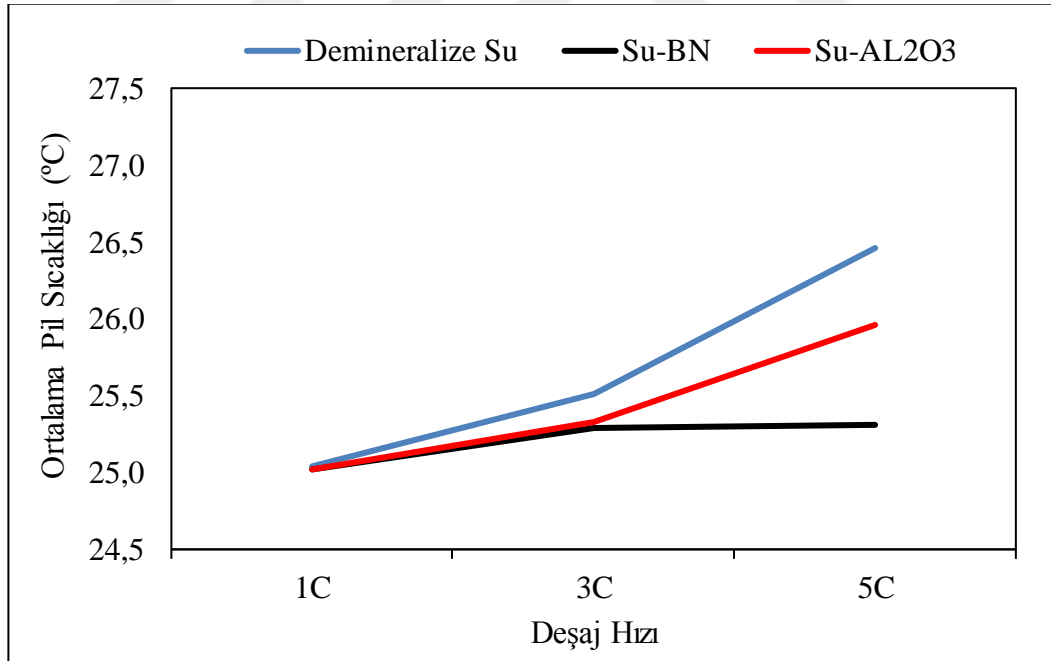
Şekil 5.3. 0,75 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için pil grubu maksimum sıcaklık farkı.

5.2. 1,5 L/DK DEBİDE DEŞARJ ANALİZLERİ

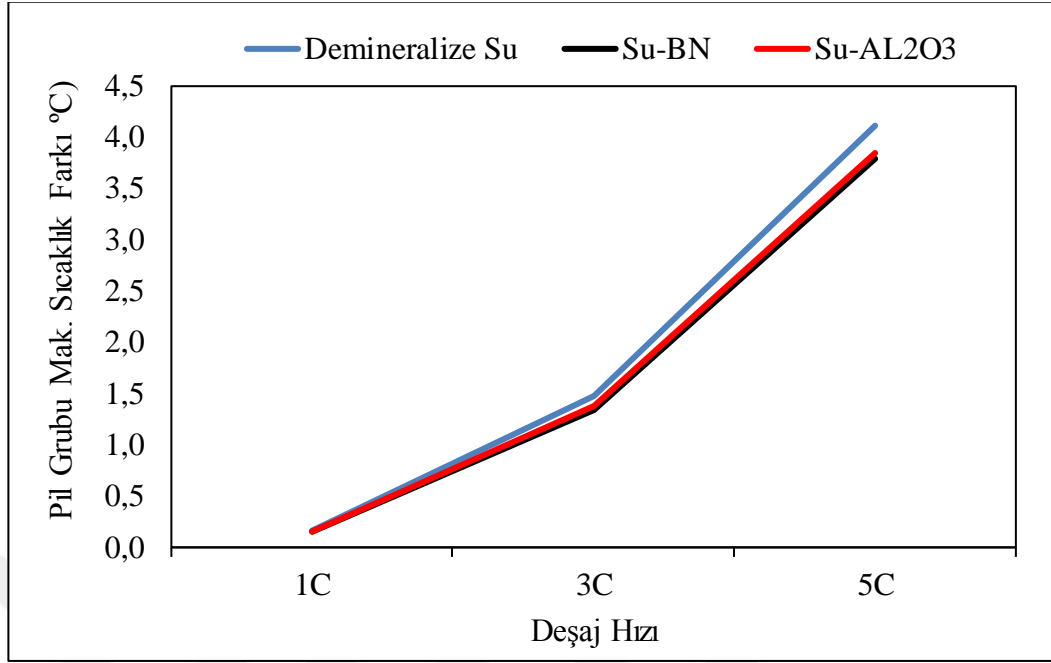
Demineralize su, Su-Al₂O₃ ve Su-BN akışkanları, bakır boru içerisinde 1,5 l/dk sabit debiyle geçirilerek incelenmiştir. Bu incelemelerde akışkanların giriş sıcaklığı 25°C olarak ayarlanmış ve analizler pil paketinin 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında demineralize su, Su-Al₂O₃ ve Su-BN akışkanları için maksimum pil sıcaklığı, ortalama pil sıcaklığı ve pil grubu maksimum sıcaklık farkı ayrı ayrı belirlenmiş ve sonuçlar grafiklerle sunulmuştur. Şekil 5.4'te 1,5 l/dk debide farklı akışkan ve deşarj hızları için maksimum pil sıcaklıkları verilmiştir. Maksimum pil sıcaklığı tüm deşarj değerleri için en fazla demineralize su soğutucu akışkanı kullanıldığında gözlemlenmiştir. Bu değerler 1C, 3C, 5C deşarj hızları için sırasıyla 25,19°C, 26,89°C, 30,29°C olduğu belirlenmiştir. 0,75 l/dk debi sonuçlarında olduğu gibi 1,5 l/dk debi analizlerinde nanoakışkan kullanımıyla sıcaklıklar düşmüştür. Su-BN nanoakışkan kullanımıyla suya göre 1C, 3C, 5C deşarj hızları için sırasıyla %0,12, %1 ve %2,5 oranında maksimum pil sıcaklıkları düşmüştür. Su-Al₂O₃ kullanımıyla oranında maksimum pil sıcaklıkları demineralize suya göre %0,09, %0,78 ve %1,92 oranında düşmüştür. Şekil 5.5'de 1,5 l/dk debide farklı akışkan ve deşarj hızları için ortalama pil sıcaklıkları verilmiştir. Maksimum pil sıcaklıkları, ortalama pil sıcaklıkları ve pil grubu maksimum sıcaklık farkları düşük deşarj değerleri için birbirine yakın olsa da yüksek deşarj değerlerinde nanoakışkan içeren soğutucu akışkanlar ile demineralize su arasındaki fark açılmaktadır. 1C deşarj değeri için demineralize su, Su-BN ve Su-Al₂O₃ akışkanları için ortalama pil sıcaklığı sırasıyla 25,04°C, 25,02°C ve 25,02°C bulunmuştur. Aynı akışkanlar için 3C deşarj değeri sırasıyla 26,46°C, 25,31°C ve 25,96°C olmuştur. Şekil 5.6 1,5 l/dk debide farklı akışkan ve deşarj hızları için pil grubu maksimum sıcaklık farkları verilmiştir. Maksimum pil sıcaklık farkları maksimum deşarj değeri için Su-BN ve Su-Al₂O₃ akışkanları kullanıldığında suya göre sırasıyla %7,85 ve %6,49 oranında azalmıştır.



Şekil 5.4. 1,5 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için maksimum pil sıcaklıkları.



Şekil 5.5. 1,5 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için ortalama pil sıcaklıkları.

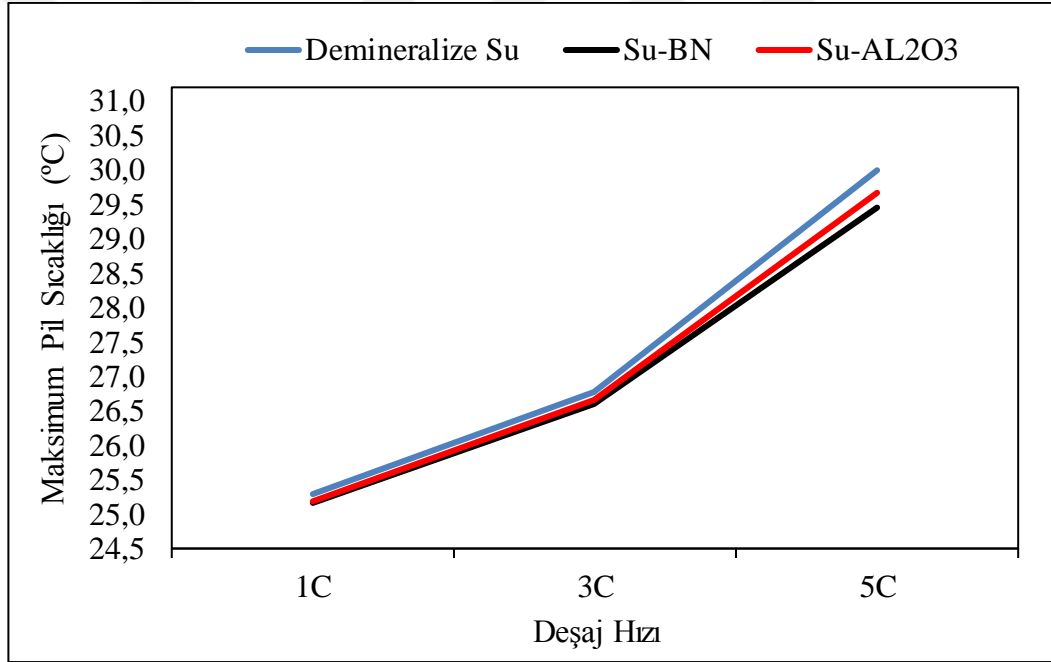


Şekil 5.6. 1,5 l/dk Debide farklı akışkan ve deşaj hızları için pil grubu maksimum sıcaklık farkı.

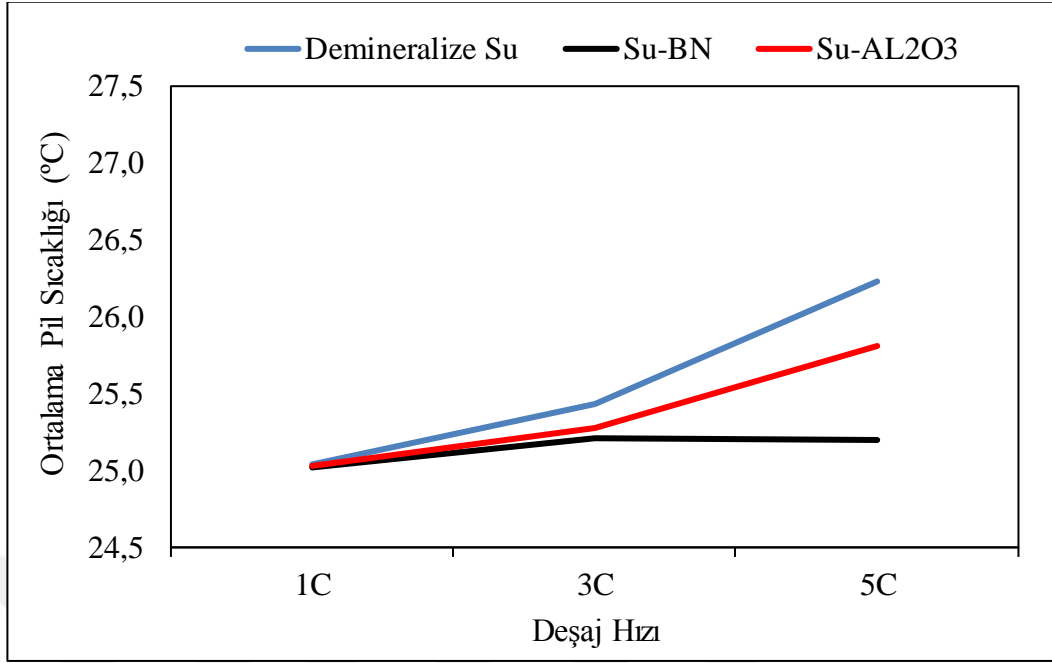
5.3. 2,5 L/DK DEBİDE DEŞARJ ANALİZLERİ

8,52 mm bakır boru içerisinde 0,65 m/s hızla hareket eden soğutucu akışkanların soğutma performansları 1C, 3C ve 5C deşaj hızlarında incelenmiştir. Demineralize su soğutucu akışkanı kullanıldığında 1C, 3C ve 5C deşaj değerleri için pil maksimum sıcaklıkları sırasıyla 25,29°C, 26,79°C, 30,00°C olduğu, Su-BN soğutucu akışkanı için sırasıyla 25,16°C, 26,61°C, 29,45°C ve Su-Al₂O₃ akışkanı için sırasıyla 25,19°C, 26,67°C, 29,67°C olduğu tespit edilmiştir. Maksimum deşaj değeri için maksimum pil sıcaklığı Demineralize suya göre, Su-BN soğutucu akışkanın kullanımıyla %1,81 oranında, Su-Al₂O₃ soğutucu akışkanı kullanımıyla %1,09 oranında düşüş sağlanmıştır. Şekil 5.7'de 2,25 l/dk Debide farklı akışkan ve deşaj hızları için maksimum pil sıcaklıkları gösterilmiştir. Şekil 5.8'de 2,25 l/dk debide farklı akışkan ve deşaj hızları için ortalama pil sıcaklıkları verilmiştir. Ortalama pil sıcaklıkları diğer debilerde olduğu gibi deşaj hızı artışına bağlı olarak artmıştır. Farklı soğutucu akışkan kullanımında sıcaklık farkları deşaj hızı artışına bağlı olarak artış göstermiş, soğutucu akışkanlar arasındaki sıcaklık farkları artmıştır. Maksimum deşaj değeri için Demineralize suya göre Su-BN soğutucu akışkanın kullanımıyla %1,81 Su-Al₂O₃

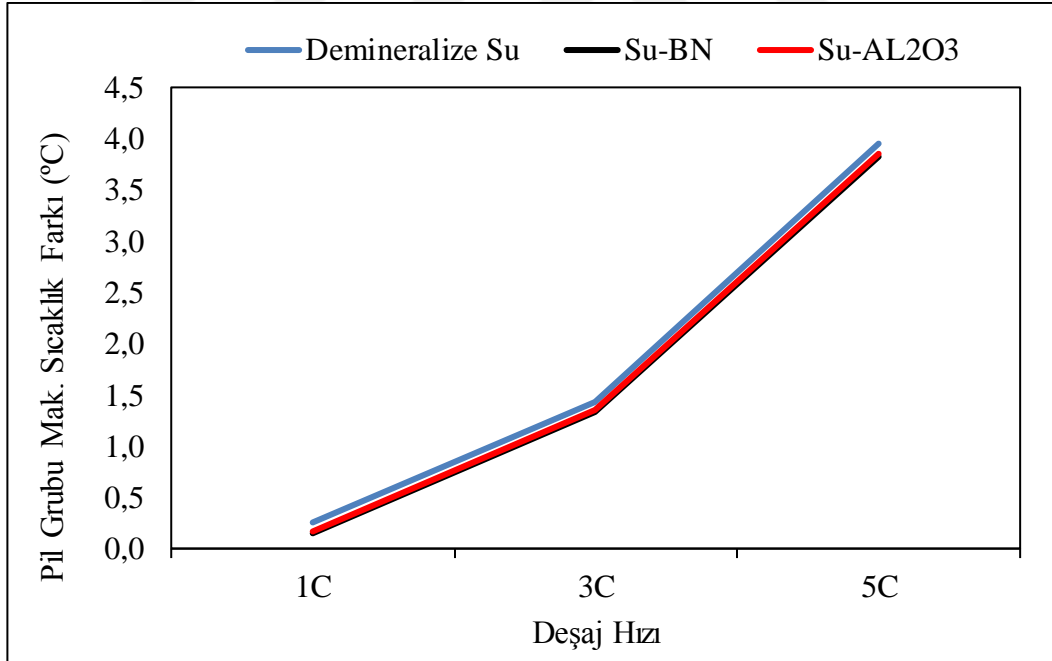
soğutucu akışkanı kullanımıyla %1,09 oranında düşüş sağlanmıştır. Maksimum deşarj değeri için ortalama pil sıcaklık değeri Demineralize suya göre, Su-BN soğutucu akışkanın kullanımıyla %3,93 oranında Su- Al_2O_3 soğutucu akışkanı kullanımıyla %1,60 oranında düşüş sağlanmıştır. Şekil 5.9'da 2,25 l/dk debide farklı akışkan ve deşarj hızları için pil grubu maksimum sıcaklık farkları verilmiştir. Maksimum pil sıcaklık farkları 2,25 l/dk debide farklı akışkan ve deşarj hızları için incelendiğinde maksimum sıcaklık farkının 5C değerinde olduğu belirlenmiştir. Pil grubu maksimum sıcaklık farkı 5C değerinde Demineralize suya göre Su-BN soğutucu akışkanın kullanımıyla %3,21 Su- Al_2O_3 soğutucu akışkanı kullanımıyla %2,51 oranında düşüş sağlanmıştır.



Şekil 5.7. 2,25 l/dk Debide farklı akışkan ve deşarj hızları için maksimum pil sıcaklıkları.



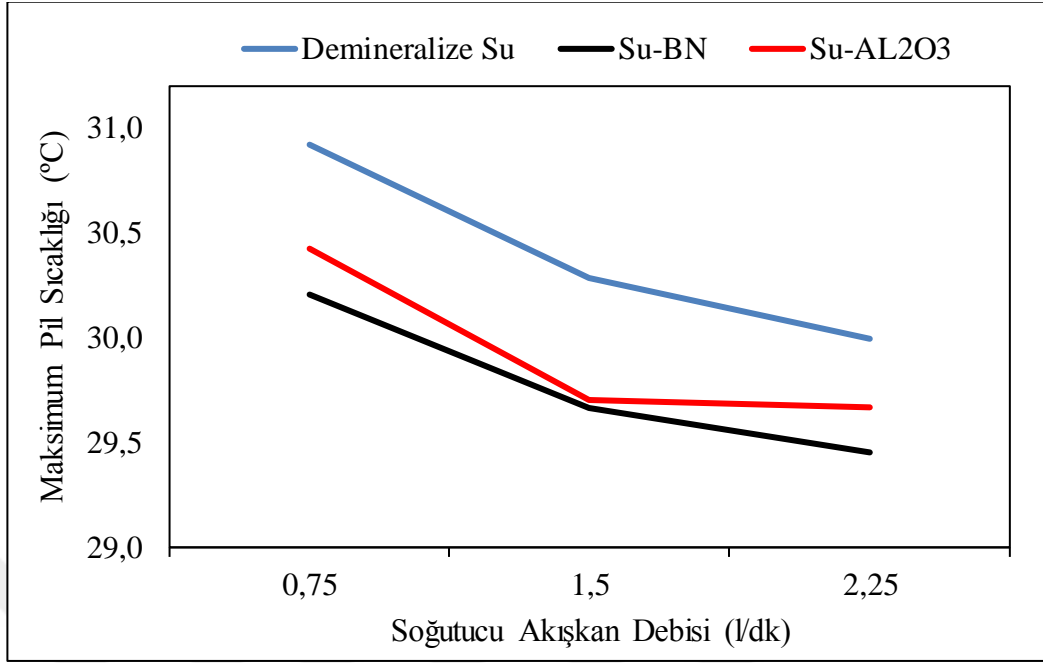
Şekil 5.8. 2,25 l/dk Debide farklı akışkan ve deşaj hızları için ortalama pil sıcaklıkları.



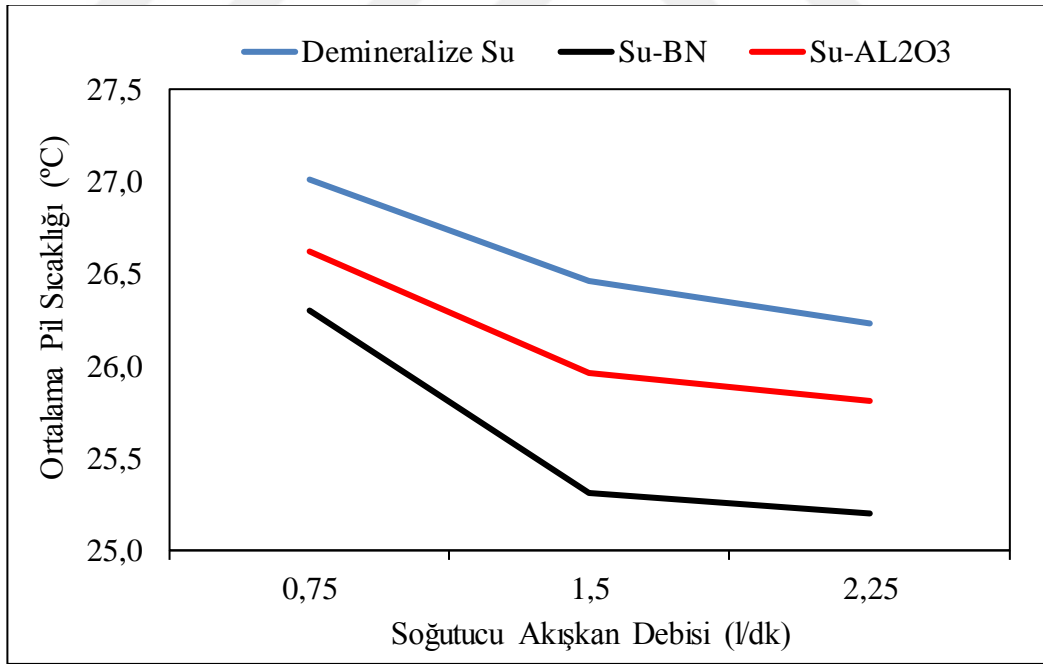
Şekil 5.9. 2,25 l/dk Debide farklı akışkan ve deşaj hızları için pil grubu maksimum sıcaklık farkı.

5.4. DEBİ DEĞİŞİMİNİN BATARYA SICAKLIĞINA ETKİSİ

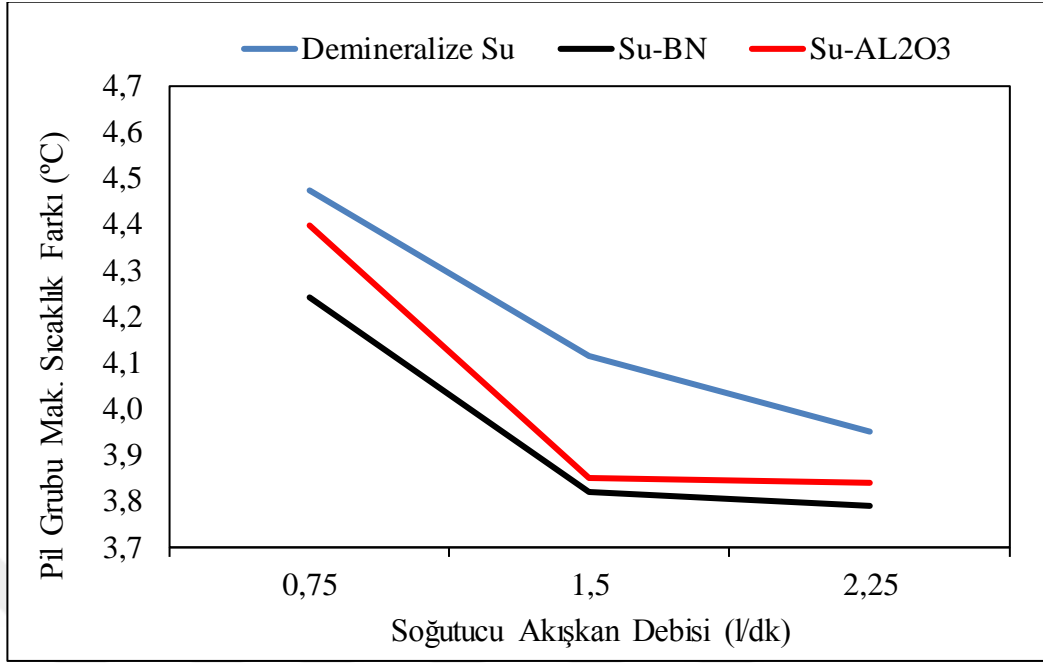
Farklı debi ve soğutucu akışkanlar için pil sıcaklık değişimlerinin en fazla olduğu 5C deşarj hızında pil paketinin maksimum pil sıcaklığı, pil paketinin ortalama sıcaklığı ve Pil grubu maksimum sıcaklık fark değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.10'da 5C deşarj hızında farklı debi ve soğutucu akışkan için maksimum pil sıcaklık değişimi verilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi soğutucu akışkanların debi artışına bağlı olarak maksimum pil sıcaklığında düşüş gözlemlenmiştir. 5C deşarj hızında maksimum pil sıcaklığı için demineralize su ele alındığında 0,75 l/dk debiyle 1,5 l/dk ve 2,25 l/dk'lık debiler karşılaştırıldığında debi artışına bağlı olarak sırasıyla %2,05 ve %2,99 oranında azalma sağlanmıştır. Su-Al₂O₃ ve Su-BN akışkanları içinde benzer oranlar elde edilmiştir. Soğutucu akışkan hızının artması soğutma miktarını gözle görülür biçimde arttırmıştır. Soğutucu hızının etkisi soğutucu akışkan debisinin artmasına bağlı olarak sıcaklığın değişmediği noktada ortadan kalkar. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 de sırasıyla 5C deşarj hızında farklı debi ve soğutucu akışkan için ortalama sıcaklık değişimi ve 5C deşarj hızında farklı debi ve soğutucu akışkan için pil grubu maksimum sıcaklık fark değişimi verilmiştir. Maksimum pil sıcaklık değişimi trendi ortalama sıcaklık değişimi ve maksimum sıcaklık fark değişimi içinde gözlemlenmiştir. Düşük debi hızlarında maksimum sıcaklık farkı literatürde sınır kabul edilen 5 °C ye yakınken debi artışına bağlı olarak maksimum sıcaklık farkı azalmıştır. Tüm akışkan debileri ve akışkanlar için maksimum sıcaklık farkı 5 °C'nin altında değer bulunmuştur.



Şekil 5.10. 5C deşarj hızında farklı debi ve soğutucu akışkan için maksimum pil sıcaklık değişimi.



Şekil 5.11. 5C deşarj hızında farklı debi ve soğutucu akışkan için ortalama sıcaklık değişimi.



Şekil 5.12. 5C deşarj hızında farklı debi ve soğutucu akışkan için pil grubu maksimum sıcaklık farkı.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Li-iyon pillerde pilin patlamasına, güvenlik riskine veya pil kullanım ömrünün azalmasına neden olabilen aşırı ısınma problemi ele alınarak 18650 Li-iyon piller için soğutma sağlayabilecek yenilikçi bir pil soğutma sistemi tasarlanmıştır. Tasarım 18650 Li-iyon pilin 16'lı bir pil paketi olacak şekilde Solidworks çizim programıyla yapılmıştır. Tasarlanan soğutma sisteminde piller arasından bakır boru dolaştırılmış ve bakır boru pil arasında bakır plakalar yerleştirilmiştir. Böylece soğutmanın daha homojen olması sağlanmıştır. Tasarlanan soğutma sistemi içerisinden demineralize su, Su-BN, Su-Al₂O₃ soğutucu akışkanları geçirilerek soğutma performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı debiler kullanılarak (0,75 l/dk-1,5 l/dk-2,25 l/dk) debi değişiminin soğutma performansına etkileri incelenmiştir. Pil paketlerinin termal analizleri 1C, 3C, 5C deşarj hızlarında, akışkan giriş sıcaklığı 25 °C'de sabit tutularak ANSYS paket programında yapılmıştır. Tasarlanan pil paketi yansıtma simetrisine sahip olduğundan paketin tamamı yerine yarısının analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında maksimum pil sıcaklığı, pil ortalama sıcaklığı ve pil grubu maksimum sıcaklık fark değerleri ele alınmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Tez kapsamında bulunan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

Debinin Etkisi: Farklı debi hızlarında (0,75 l/dk, 1,5 l/dk, 2,25 l/dk) yapılan analizlerde debi hızının artması maksimum pil sıcaklığı, pil ortalama sıcaklığı ve pil grubu maksimum sıcaklık fark değerlerini düşürmüştür. 0,75 l/dk debiyle karşılaştırıldığında maksimum pil sıcaklığı, 1,5 l/dk debide tüm akışkanlar için ortalama %2,07 oranında azaltmış, 2,25 l/dk debide tüm akışkanlar için ortalama %2,66 oranında azaltmıştır. 0,75 l/dk debiyle karşılaştırıldığında ortalama pil sıcaklığı, 1,5 l/dk debide tüm akışkanlar için ortalama %2,76 oranında azaltmış, 2,25 l/dk debide tüm akışkanlar için ortalama %3,37 oranında azaltmıştır. 0,75 l/dk debiyle karşılaştırıldığında pil grubu maksimum sıcaklık farkı, 1,5 l/dk debide tüm akışkanlar için ortalama %10,14

oranında azaltmış, 2,25 l/dk debide tüm akışkanlar için ortalama %11,68 oranında azaltmıştır.

Pil Sıcaklık Farkları: Pil sıcaklık farklarının 5°C'yi geçmemesi önemli bir güvenlik kriteridir. Nanoakışkanlar kullanılarak, özellikle Su-BN ile maksimum sıcaklık farkı daha iyi kontrol edilebilmiştir. Düşük akışkan debilerinde pil sıcaklık farkları yüksek iken debi artışıyla bu farkların azaldığı görülmüştür. Maksimum debide ve deşarj hızında Demineralize Su kullanımıyla elde edilen maksimum sıcaklık farkı 3,95 °C iken bu değer Su-BN kullanımıyla %3,21 oranında, Su-Al₂O₃ kullanımıyla %2,51 oranında azalmıştır.

Deşarj Hızının Etkisi: Yüksek deşarj hızlarında (5C), pil sıcaklıkları artma eğilimindedir. Ancak, nanoakışkanların kullanımı bu artışı sınırlayarak pilin daha stabil bir sıcaklıkta kalmasını sağlar. 0,75 l/dk debide 1C deşarj ile karşılaştırıldığında tüm akışkanlar için ortalama maksimum pil sıcaklığı 2C deşarj değerinde %6,68 oranında, 3C deşarj değerinde %21,17 oranında artmıştır. Hızlı şarj ve deşarj işlemi pil paketlerinde soğutma işlemini zorunlu kılmaktadır.

Soğutucu Akışkanların Etkisi: Pilin soğutulmasında kullanılan demineralize su, Su-BN ve Su-Al₂O₃ nanoakışkanları arasında farklılıklar vardır. Nanoakışkanlar, özellikle Su-BN ve Su-Al₂O₃, pil sıcaklığını düşürmede daha etkilidir. Su-BN kullanıldığında sıcaklık düşüşü daha belirgindir, Su-Al₂O₃ ise daha az ama yine de anlamlı bir soğutma etkisi sağlar. 0,75 l/dk debide 5C deşarj değerinde Demineralize Su soğutucu akışkanı kullanıldığında maksimum pil sıcaklığı 30,92 °C iken bu değer Su-BN kullanımıyla %3,21 oranında, Su-Al₂O₃ kullanımıyla %1,60 oranında azalmıştır. 1,5 l/dk debide 5 C deşarj değerinde Demineralize Su soğutucu akışkanı kullanıldığında maksimum pil sıcaklığı 30,29 °C iken bu değer Su-BN kullanımıyla %2,05 oranında, Su-Al₂O₃ kullanımıyla %1,92 oranında azalmıştır. 2,25 l/dk debide 5C deşarj değerinde Demineralize Su soğutucu akışkanı kullanıldığında maksimum pil sıcaklığı 30,00 °C iken bu değer Su-BN kullanımıyla %1,81 oranında, Su-Al₂O₃ kullanımıyla %1,09 oranında azalmıştır. Soğutucu akışkanların soğutma performansları sıralandığında en iyi performansı Su-BN nanoakışkanı sağlamaktadır, sonra Su-Al₂O₃ nanoakışkanı ve en son Demineralize Su soğutucu akışkanı gelmektedir.

Bu çalışmada 18650 Li-iyon pillerin termal kontrolünde nanoakışkanlar ve su kullanımlarının analizleri analizler yapılmıştır. Aşağıda bu çalışmada ve gelecek çalışmalarda okuyucuya öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmada kullanılan nanopartiküllerden biri BN'dür. BN kullanımının nedeni BN rezervinin büyük bir kısmının Türkiye'de olması ve ekonomik bir avantaj sağlama potansiyelinin olmasıdır. Bunun yanı sıra BN ısı kararlılık ve yüksek termal iletkenlik özelliklerine haizdir. Kullanılan diğer bir nanopartikül ise Al_2O_3 nanopartikülüdür. Al_2O_3 termal yönetim gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Araştırmacılar kritik rezervlere ve termal özellikleri iyi olan farklı nanopartikülleri batarya soğutma sistemlerinde deneysel veya nümerik analiz edebilir.

Bu çalışmada 1C, 3C ve 5C deşarj hızında analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar ara değerleri veya farklı şarj hızlarında analizleri gerçekleştirebilir.

Bu çalışmada farklı debilerde analizler yapılmıştır. Literatürden ortalama debi hızları alınarak debiler belirlenmiştir. Daha düşük ve yüksek debi değerlerinde pil sıcaklık değişimleri incelenebilir.

Bu çalışmada nümerik analiz yapılmıştır. Benzer sistemler kurularak nümerik analiz ile deneysel sistemler karşılaştırılabilir.

Bu çalışmada tasarım yapılırken standart bakır boru ve plaka kullanılmıştır. Farklı tasarımlarla ve malzemelerle pil soğutma performansı, ağırlığı veya ekonomisi iyileştirilebilir.

Bu çalışmada su içerisine %2,5 oranında nanopartikül eklenmiştir. Farklı oranlarda nanopartikül kullanılarak analizler gerçekleştirilebilir.

Nanopartikül fiyatı malzeme, işlenebilirlik ve bulunabilirlik gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebilmektedir. Nanopartikül kullanımı maliyeti arttırabilir. Daha uygun soğutucu akışkanlar kullanılarak analiz veya deneysel çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Elektrikli otomobil satışıları), 2012-2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2012-2024>, Lisans: CC BY 4.0 IEA (2024).
- [2] Zhao, H., & Zhang, G. "Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles", *Energy*, 88, 127-138. (2015).
- [3] Sayın, A.A., ve Yüksel, İ. "Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi", *Mühendis ve Makine*, 52(616):75-82 (2011).
- [4] Chan, C., C., "The rise & fall of electric vehicles in 1828–1930: lessons learned", *Proceedings of the IEEE*, 101(1):206 – 212, (2013).
- [5] Larminie, J., Lowry, J., "Electric vehicle technology explained", *John Wiley & Sons Ltd*, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, (2003).
- [6] Kerem, A., "Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri", *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5 (1): 1-13 (2014).
- [7] Singh, M., "Green energy for metropolitan transport", *International Journal on Power Engineering and Energy (IJPEE)*, 4:(1), 338-342, (2013).
- [8] Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., Tırs, M., "Elektrikli Araçlar", *TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü*, Gebze, (2003).
- [9] <https://group.mercedes-benz.com/company/tradition/company-history/1885-1886.html> erişim tarihi 11.09.2024
- [10] <https://afdc.energy.gov/> erişim tarihi 11.09.2024
- [11] https://www.tesla.com/tr_tr/models erişim tarihi 11.09.2024
- [12] <https://www.nissan.ie/vehicles/new-vehicles/leaf.html> erişim tarihi 11.09.2024
- [13] <https://www.chevrolet.ca/en/electric/bolt-ev> erişim tarihi 11.09.2024
- [14] Arabacı, E., "Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Taşıtlardaki Güç Dağıtıcı (Power Split) Mekanizmasının Motor Hızı Değişimine Bağlı İncelenmesi", *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8:(1), 394-404, (2019).

- [15] <https://www.motor1.com/news/694321/2024-toyota-crown-sedan-japan-launch/> 11.09.2024
- [16] <https://www.bmw.com/en/innovation/Plug-in-hybrid-and-other-kinds-of-electric-cars.html> 11.09.2024
- [17] https://www.tesla.com/ownersmanual/modely/en_us/GUID-8FA15856-1720-440F-838B-ACFBA8D7D608.html 11.09.2024
- [18] Çetin, M. S., Karakaya, B., ve Gençoğlu, M., “Elektrikli Araçlar İçin Lityum İyon Bataryaların Modellenmesi”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 755-763, (2021).
- [19] [https://www.birikimpilleri.com/tr/blog/kursun-asit-aku-nasil-calisir/159#:~:text=Kur%C5%9Fun%20asit%20bataryalar%20yayg%C4%B1n%20olarak,%20ve%20yerle%C5%9Fik%20\(UPS\).](https://www.birikimpilleri.com/tr/blog/kursun-asit-aku-nasil-calisir/159#:~:text=Kur%C5%9Fun%20asit%20bataryalar%20yayg%C4%B1n%20olarak,%20ve%20yerle%C5%9Fik%20(UPS).) 11.09.2024
- [20] <http://gebc-energy.com/en-US/News-151.html> 11.09.2024
- [21] <https://www.flywingrc.shop/products/fw450l-v3-rc-helicopter> 11.09.2024
- [22] <https://cmbatteries.com/tr/lifepo4-pilinin-ne-oldu%C4%9Funa-dair-eksiksiz-bir-k%C4%B1lavuz/> 11.09.2024
- [23] <https://www.victronenergy.com.tr/batteries/lithium-battery-12-8v> 11.09.2024
- [24] Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., ve Özgüven, Ö. F., “Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması,” *GU J Sci, Part A*, 8(2), 276-298, (2021).
- [25] <https://www.birikimpilleri.com/tr/blog/nikel-kadmiyum-mu-yoksa-nikel-metal-hidrit-piller-mi/142> 11.09.2024
- [26] <https://ind.gpbatteries.com/products/rechargeable-nimh/nimh-series/high-drain-series.html> 11.09.2024
- [27] Zhang, S., Shui., “A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries”, *Journal of Power Sources*, 164:(1), 351-364, (2007).
- [28] Linden, D., and Reddy, T. B., "Handbook of Batteries", *McGraw-Hill*, (2010).
- [29] https://tr.wikipedia.org/wiki/Lityum_ion_pil 11.09.2024
- [30] Cuma, M., U., Yırtık, E., Derincioğlu, Ç., Ünal, E., Onur, B., Tümay, M., Design “Considerations of High Voltage Battery Packs for Electric Buses”, *International Conference On Advances In Automotive Technologies*, 11-14 Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey, (2016),

- [31] Goodenough, J. B., & Kim, Y. "Challenges for Rechargeable Li Batteries", *Journal of Power Sources*, 195(9), 2438-2443, (2010).
- [32] Yoshino, A., "The birth of the lithium-ion battery", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 51 (24) pp. 5798-5800, (2012).
- [33] <https://poweron.com.tr/blog/lithium-ion-battery-nedir> 11.09.2024
- [34] U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries 2024: *U.S. Geological Survey*, 110-112 p., (2024). <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.
- [35] Olabi, A.G., Maghrabie, H. M., Adhari, O. H. K., Sayed, E. T., Yousef, B. A. A., Salameh, T., Kamil, M., Abdelkareem, M. A., "Battery thermal management systems: Recent progress and challenges", *International Journal of Thermofluids*, c. 15, sy 100171, ss. 1-31, (2022).
- [36] Kemal Ç., "Farklı Nanopartikül Takviyeli Sıvıların Batarya Sisteminin Soğutma Performansı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Düzce, (2023).
- [37] Akbarzadeh, M., Kalogiannis, T., Jaguemont, J., Jin, L., Behi, H., Karimi, D., Beheshti, H., Mierlo, J., V., Berecibar, M., "A comparative study between air cooling and liquid cooling thermal management systems for a high-energy lithium-ion battery module," *Applied Thermal Engineering*, Volume 198, 117503, (2021).
- [38] Jha, P., Hussain, M., Khan, M., K., "Numerical evaluation of nanofluid-based indirect liquid cooling of a Li-ion battery pack using equivalent circuit model under static and dynamic loading conditions," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 159, Part A, 108079, (2024).
- [39] Esmaili, Z., Khoshvaght-Aliabadi, M., "Thermal management and temperature uniformity enhancement of cylindrical lithium-ion battery pack based on liquid cooling equipped with twisted tapes," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 148, 104671, (2023).
- [40] He, Z., Chen, Y., He, D., "Effect of turning conditions on the indirect liquid-cooled battery thermal management in the electric vehicle," *Applied Thermal Engineering*, 124418, (2024).
- [41] Qi, W., Lan, P., Yang, J., Chen, Y., Zhang, Y., Wang, G., Peng, F., Hong, J., "Multi-U-Style micro-channel in liquid cooling plate for thermal management of power batteries," *Applied Thermal Engineering*, Volume 256, 123984, (2024).
- [42] Xie, J., Zhang, G., Yang, X., "Thermal performance analysis of battery thermal management system utilizing bionic liquid cooling plates with differentiated velocity distribution strategy," *Applied Thermal Engineering*, Volume 249, 123351. (2024).

- [43] Zhao, D., Lei, Z., An, C., “Research on battery thermal management system based on liquid cooling plate with honeycomb-like flow channel”, *Applied Thermal Engineering*, Volume 218, 119324, (2023).
- [44] Ye, J., Aldaher A., Y., M., Tan, G., “Thermal performance analysis of 18,650 battery thermal management system integrated with liquid-cooling and air-cooling,” *Journal of Energy Storage*, Volume 72, Part E, (2023).
- [45] Sheng, L., Su, L., Zhang, H., Li, K., Fang, Y., Ye, W., Fang, Y., “Numerical investigation on a lithium ion battery thermal management utilizing a serpentine-channel liquid cooling plate exchanger,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 141, pp. 658-668, (2019).
- [46] 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).
- [47] 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).
- [48] Xie, J., Liu, X., Zhang, G., Yang, X., “A novel strategy to optimize the liquid cooling plates for battery thermal management by precisely tailoring the internal structure of the flow channels,” *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 184, 107877, (2023).
- [49] Wei, Y., Zeng, Z., Du, R., Baig, A., Farooq, M., S., Liu, S., “Design of alveolar biomimetic enhanced heat transfer structure for cylindrical lithium battery pack”, *Journal of Energy Storage*, Volume 101, Part A, 113721, (2024).
- [50] Dilbaz, F., Selimefendigil, F., Öztop, H., F., “Comparisons of different cooling systems for thermal management of lithium-ion battery packs: Phase change material, nano-enhanced channel cooling and hybrid method,” *Journal of Energy Storage*, Volume 90, Part A, 111865, (2024).
- [51] Lv, Y., Liu, H., Luo, W., Liu, D., Zhao, J., Wang, C., Wu, W., Rao, Z., “A numerical study of a novel centrally bifurcated mini-channel liquid cooling plate for enhanced heat transfer characteristics,” *Applied Thermal Engineering*, Volume 247, 123052, (2024).
- [52] Subramanian, M., Ağbulut, Ü., Pachamuthu, S., Sathanandam, S., Solomon, J., M., Arputharaj, B., S., Raja, V., Rajendran, P., Asif, M., “Computational and experimental investigations on liquid-based battery thermal management systems for electric vehicle applications under various discharge rates with different flow speeds,” *Journal of Energy Storage*, Volume 91, 111757, (2024).
- [53] Roy, T., Taylor, D., Poulikakos, D., “Viscoelastic flow instabilities for enhanced heat transfer in battery pack cooling,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 232, 125888, (2024).

[54] Chen, Y., He, M., Feng, J-C., Wang, C., Zhuang, Y., “Thermal management performance of lithium-ion batteries coupled with honeycomb array manifold and phase change materials under microgravity conditions,” *Applied Thermal Engineering*, Volume 251, 123586, (2024).

[55] KÜTÜK, O., T., “Elektrikli Araçlarda Kullanılan 18650 Li-İyon Pillerin Soğutma Analizi ve Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, (2021).

[56] Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information: <https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Sony%20US18650V3%202250mAh%20%28Green%29%20UK.html> Erişim tarihi 20.08.2024

[57] Liu J. Wang Z. Gong J. Liu K. Wang H. Guo L. “Experimental Study of Thermal Runaway Process of 18650 Li-ion battery” *Materials*, 10(3), 230. (2017).

ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre HAMAMCI, ilköğrenimini Yıldırım Beyazıt İlköğretim Okulunda, Ortaöğrenimini Suphi Koyuncuoğlu Ortaokulunda okudu. Lise öğrenimini Kemalpaşa Mopak Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Türk Hava Kurumu Üniversitesinde Önlisans uçak teknolojisi bölümünü bitirdi. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Makine Otomotiv Mühendisliği Bölümüne başladı ve 2020 yılında mezun oldu, 2021 yılda Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans çalışmalarına başlayan yazar özel bir firmada elektrikli araçlar alanında mühendislik yapmaktadır.