

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BATARYA HÜCRELERİNE EKLENEN KANATÇIKLARIN
ELEKTRİKLİ ARAÇ TERMAL YÖNETİM SİSTEMİ PERFORMANSINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mesut ÖZTOP

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Abdulmuttalip ŞAHİNASLAN

OCAK 2025

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BATARYA HÜCRELERİNE EKLENEN KANATÇIKLARIN
ELEKTRİKLİ ARAÇ TERMAL YÖNETİM SİSTEMİ PERFORMANSINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Mesut ÖZTOP
(36173618002)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Abdulmuttalip ŞAHİNASLAN

OCAK 2025

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi, beni her konuda yönlendiren ve cesaretlendiren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdulluttalip ŞAHİNASLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de bana her türlü desteği sunan anneme, babama, ağabeyim Prof. Dr. Hakan Fehmi ÖZTOP'a ve eşim Gülsüm'e, çalışmalarım nedeniyle zamanlarını çaldığım çocuklarım Elif Beyza, Ahmet Arda ve Mehmet Çağrı'ya da ayrıca teşekkür ederim.

Tezin uygulama aşamasında FDK-2021-2285 numaralı proje kapsamında sağlanan maddi destek için de İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimine teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Batarya Hücrelerine Eklenen Kanatçıkların Elektrikli Araç Termal Yönetim Sistemi Performansına Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde, hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mesut ÖZTOP



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Elektrikli Araçlar ve Batarya Teknolojileri	1
1.2. Tezin Amacı	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Batarya Teknolojileri	5
2.1.1. Kurşun asit bataryalar	5
2.1.2. Nikel metal hidrit bataryalar (NiMH).....	5
2.1.3. Sodyum sülfür (NaS) piller	6
2.1.4. Redoks akış bataryaları (RFB)	6
2.1.5. Lityum iyon piller	7
2.2. Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS)	11
2.2.1. Hava ile termal yönetim	13
2.2.2. Sıvı ile termal yönetim	14
2.2.3. Faz değiştiren malzemeler ile termal yönetim.....	14
2.2.4. Batarya termal yönetimini iyileştirmeye yönelik çalışmalar	16
2.2.5. Batarya ısıtma teknolojileri	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. Matematiksel Arkaplan.....	28
3.2. Sayısal Yöntem.....	31
3.3. Deneysel Yöntem	39
4. BULGULAR.....	43
4.1. Sayısal Çalışma Bulguları	43
4.1.1. Seri bağlı iki pilin incelenmesi	43
4.1.2. Düz dizilmiş 4S3P batarya paketinin incelenmesi	46
4.1.2.1. Doğal taşınım koşulları.....	46
4.1.2.2. Zorlanmış taşınım koşulları	49
4.1.3. Şaşırtmalı dizilmiş 4S3P batarya paketinin incelenmesi	57
4.1.3.1. Doğal taşınım koşulları.....	57
4.1.3.2. Zorlanmış Taşınım Koşulları	60
4.1.4. Trapezoid Kanatlı Pil Paketinin Geliştirilmesi.....	62
4.2. Deneysel Çalışma Bulguları	64
4.2.1. Kanatsız pil paketi şarj süreci	65
4.2.2. Kanatsız pil paketi deşarj süreci	66
4.2.3. Kanatlı pil paketi şarj süreci	68
4.2.4. Kanatlı pil paketi deşarj süreci	69
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	72
6. KAYNAKÇA.....	76
ÖZGEÇMİŞ	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Bazı batarya türlerinin tipik özellikleri.....	3
Çizelge 3.1 R_0 direncinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi.....	33
Çizelge 3.2 R_1 direncinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi.....	33
Çizelge 3.3 R_2 direncinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi.....	34
Çizelge 3.4 C_1 kapasitörünün değerinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi.....	34
Çizelge 3.5 C_2 kapasitörünün değerinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi.....	34
Çizelge 3.6 Sayısal çalışmada kullanılan değişkenler ve değerleri.....	35
Çizelge 3.7 Çalışmada kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri.....	36
Çizelge 3.8 Deneysel çalışmada kullanılan pillerin teknik özellikleri.....	40
Çizelge 3.9 Batarya paketi kapasite test cihazı bilgileri.....	41
Çizelge 4.1 2S batarya paketi için en yüksek pil sıcaklıkları.....	43
Çizelge 4.2 4S3P batarya paketi için kanat tiplerine göre en yüksek pil sıcaklıkları.....	47
Çizelge 4.3 4S3P batarya paketi için zorlanmış taşınım koşullarında en yüksek pil sıcaklıkları.....	49
Çizelge 4.4 Yüksek ortam sıcaklıklarında zorlanmış taşınım koşullarında pillerin en yüksek sıcaklıkları	55
Çizelge 4.5 4S3P şaşırtmalı dizilim doğal taşınım koşullarında farklı kanat tiplerine göre en yüksek pil sıcaklıkları	58
Çizelge 4.6 Trapezoid kesitli farklı kanat uzunlukları için pillerin sıcaklık dağılımı.....	63
Çizelge 4.7 Farklı ağ yapıları ve erişilen en yüksek sıcaklık değerleri.....	63
Çizelge 5.1 Deneysel çalışmada erişilen en yüksek sıcaklık değerleri	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Tam (a) ve hibrit (b) elektrikli araç mimarisi.....	2
Şekil 2.1 Lityum iyon pillerde şarj ve deşarj reaksiyonları.....	8
Şekil 2.2 Batarya hücresi ve modülü.....	10
Şekil 2.3 Tesla marka bir araca ait batarya paketi.....	10
Şekil 2.4 Hava ile termal yönetim; a) pasif b) aktif c) enerji kazanımlı sistemler	14
Şekil 2.5 Sıvı soğutmalı sistemler; a) pasif soğutma b) aktif soğutma c) soğutma sıvılı sistemler	15
Şekil 2.6 Hücre yan yüzeylerine açılmış mini kanalların etkisi	18
Şekil 2.7 İçi boşaltılmış pil hücresi: a) ısı kanalı, b) faz değiştirilen malzeme	19
Şekil 2.8 Batarya, ısı kanalları ve kanatçıklar	19
Şekil 2.9 Silindirik hücrelerden elde edilen farklı modül şekilleri.....	20
Şekil 2.10 Silindirik hücrenin a) kutuplardan b) yanal yüzeyinden soğutulması.....	21
Şekil 2.11 Dört silindirik pil ve önerilen kanat yapısı.....	24
Şekil 2.12 Dokuz hücreli pil paketi a) kanatsız b) kanatlı yapı.....	25
Şekil 2.13 Hücrelerin farklı dizilim türleri için termal etkiler	26
Şekil 2.14 Hapsedilmiş ve açık batarya hücrelerine hava akışı	26
Şekil 3.1 Batarya analizlerinde kullanılan eşdeğer devre modeline ait elektrik devresi	32
Şekil 3.2 Kanat geometrileri; a) Halka b) Kare c) Pim d) Trapezoid kesitli e) Ağ yapılı ...	37
Şekil 3.3 4S3P Konfigürasyonda batarya paketi düz (a) ve şaşırtmalı (b) dizilim	38
Şekil 3.4 4S3P Batarya paketleri; a) kanatsız b) kanatlı	39
Şekil 3.5 Deneylerde kullanılan veri kaydedici.....	41
Şekil 3.6 Deney düzenekleri a) kanatsız b) trapezoid kanatlı batarya paketleri.....	42
Şekil 4.1 2S konfigürasyonunda kanat tiplerine göre pillerin sıcaklık değişimi.....	44
Şekil 4.2 2S konfigürasyonundaki kanatsız piller için ısı akı grafiği.....	45
Şekil 4.3 2S konfigürasyonundaki trapezoid kanatlı piller için ısı akı grafiği.....	45
Şekil 4.4 2S bağlı, trapezoid (a) ve halka (b) kanatlı piller için doğal taşınım koşullarında sıcaklık dağılımı	46
Şekil 4.5 4S3P bağlı batarya paketinde doğal taşınım koşullarında 8 numaralı pile ait sıcaklık değişimi	48
Şekil 4.6 4S3P batarya paketi için kanat tiplerine göre doğal taşınım koşullarında ısı transfer hızının değişimi	48
Şekil 4.7 Trapezoid kanatlı batarya paketi hücreleri ve paket merkez düzlemindeki hava için sıcaklık dağılımı	49
Şekil 4.8 4S3P batarya paketinden, zorlanmış taşınım koşullarında 8 numaralı pilin farklı kanat tipleri için sıcaklık değişimi.....	51
Şekil 4.9 4S3P batarya paketinde, zorlanmış taşınım koşullarında farklı kanat tipleri için ısı transfer hızı değişimi	51
Şekil 4.10 Zorlanmış taşınım koşullarında paket içi sıcaklık farklarının değişimi	52
Şekil 4.11 Zorlanmış taşınım koşullarında pim tipi kanatlı paket sıcaklık dağılımı	53
Şekil 4.12 Zorlanmış taşınım koşullarında trapezoid tip kanatlı paket sıcaklık dağılımı ...	53
Şekil 4.13 Zorlanmış taşınım koşullarında zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) $t=360$ s, b) $t=1300$ s ve c) $t=1800$ s	54
Şekil 4.14 Yüksek ortam sıcaklığında zorlanmış taşınım koşullarında farklı kanat tipleri için sıcaklık değişimi	56
Şekil 4.15 Yüksek ortam sıcaklıklarında zorlanmış taşınım koşullarında paket içi sıcaklık farklılıkları	57
Şekil 4.16 Şaşırtmalı dizilim durumunda farklı kanat tipleri için sıcaklık değişimi	59

Şekil 4.17 Şaşırtmalı dizilim durumunda 8 numaralı pil için ısı transfer hızı değişimi.....	59
Şekil 4.18 Şaşırtmalı dizilimde zorlanmış taşınım koşulları için 8 numaralı pile ait sıcaklık değişimi	60
Şekil 4.19 Şaşırtmalı dizilimde zorlanmış taşınım koşullarında 8 numaralı pil için ısı transfer hızı	61
Şekil 4.20 Şaşırtmalı dizilimde zorlanmış taşınım koşullarında paket içi sıcaklık farklılıkları.....	61
Şekil 4.21 a) Uzun trapezoid kanat ve b) piller arası mesafe uyarlanmış düz dizilim geometrisi.....	62
Şekil 4.22 Sıcaklık farkı için bir başka çalışma ile yapılan mukayese sonuçları.....	64
Şekil 4.23 Kanatsız pil paketinin şarj süreci boyunca gerilim ve akım değişimi.....	65
Şekil 4.24 Kanatsız pillerin şarj sürecinde sıcaklık değişimi	66
Şekil 4.25 Kanatsız pil paketinin deşarj süreci boyunca gerilim ve akım değişimi.....	67
Şekil 4.26 Kanatsız pil paketinin deşarj sürecinde, seçilen 4 pile ait sıcaklık değişimi	67
Şekil 4.27 Kanatlı pil paketinin şarj işlemi boyunca gerilim ve akım değişimi.....	68
Şekil 4.28 Kanatlı pil paketinin şarj sürecinde 4 pile ait sıcaklık değişimi.....	69
Şekil 4.29 Kanatlı pil paketi deşarj süreci boyunca gerilim ve akım değişimi	70
Şekil 4.30 Kanatlı pillerin deşarj sürecinde sıcaklık değişimi	70
Şekil 5.1 4S3P Kanatsız batarya paketi için Joule ısısı değişimi	73
Şekil 5.2 4S3P Trapezoid tipi kanatlı batarya paketi için Joule ısısı değişimi	73

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

A	: Amper
C	: Kapasite
°C	: Santigrat
c_a	: Havanın özgül ısısı, $J.kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_b	: Batarya özgül ısısı, $J.kg^{-1} \cdot K^{-1}$
E_{OC}	: Açık devre voltajı, V
E	: Çalışma voltajı, V
F	: Farad
g	: Yerçekimi ivmesi, $m.s^{-2}$
h	: Taşınım katsayısı, $W.m^{-2} \cdot K^{-1}$
H	: Kanal yüksekliği, m
I	: Akım, A
I_0, K_0	: Bessel fonksiyonları
J	: Joule
k	: Isı iletim katsayısı, $W.m^{-1} \cdot K^{-1}$
k_a	: Havanın ısı iletim katsayısı, $W.m^{-1} \cdot K^{-1}$
K	: Kelvin
kWh	: Kilowatt-saat
L	: Kanat uzunluğu, m
p	: Kanat çevresi, m
Q_{gen}	: Batarya ısı üretim kapasitesi, J
$\dot{Q}_{gen}$	: Bataryada birim zamanda üretilen ısı, W
$\dot{Q}_{rev}$	: Bataryada birim zamanda üretilen tersinir ısı, W
$\dot{Q}_{irr}$	: Bataryada birim zamanda tersinmez ısı, W
Q_d	: Hava tarafından çekilen ısı, J
Q_b	: Bataryada depolanan ısı, J
Q_s	: Kayıp ısı, J
R	: Direnç, Ohm
R_e	: Pilin eşdeğer direnci, Ohm
Re	: Reynolds sayısı

S_D	: Merkezler arası açıklık, mm
S_i	: Hava giriş alanı, m ²
S_L	: Boyuna aralık, mm
S_s	: Modül içinde hava akış kesit alanı, m ²
S_T	: Enine aralık, mm
T	: Sıcaklık, °C, K
T_b	: Batarya sıcaklığı, °C
T_i	: Giriş sıcaklığı, °C
T_o	: Çıkış sıcaklığı, °C
T_∞	: Ortam sıcaklığı, °C
$\bar{T}_o$	: Ortalama çıkış sıcaklığı, °C
V	: Volt
V_i	: Ortalama hava giriş hızı, m.s ⁻¹
$\vec{V}$	: Hız vektörü, m.s ⁻¹
W	: Watt
W	: Kanal genişliği
ρ_a	: Havanın yoğunluğu kg.m ⁻³
ρ_b	: Bataryanın yoğunluğu kg.m ⁻³
μ	: Viskosite, Pa.s
ADG	: Açık Devre Gerilimi
A/C	: Hava Şartlandırma Sistemi
BTYS	: Batarya Termal Yönetim Sistemi
BYS	: Batarya Yönetim Sistemi
CC/CV	: Sabit Akım/Sabit Gerilim
EA	: Elektrikli Araç
EDM	: Eşdeğer Devre Modeli
FDM	: Faz Değiştiren Malzemeler
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç
MSMD	: Çok ölçekli çok alanlı
NaS	: Sodyum Sülfür
NiMH	: Nikel Metal Hidrit
NTGK	: Newman, Tiedemann, Gu ve Kim

P2D	: Newman alts Pseudo 2D
RFB	: Redoks Akış Bataryası
SoC	: Batarya Şarj Durumu
SoH	: Batarya Sağlık Durumu
SoL	: Batarya Ömür Durumu
TEA	: Tümüyle Elektrikli Araç
TYS	: Termal Yönetim Sistemi
USD	: Amerikan Doları
VRB	: Vanadyum Redoks Bataryası



ÖZET

Doktora Tezi

BATARYA HÜCRELERİNE EKLENEN KANATÇIKLARIN ELEKTRİKLİ ARAÇ TERMAL YÖNETİM SİSTEMİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

MESUT ÖZTOP

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

82+XI sayfa

2025

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Abdulluttalip ŞAHİNASLAN

Bu çalışmada, silindirik lityum iyon bataryalar için, havayla daha iyi bir soğutma performansı elde etmek üzere hücre düzeyinde uygulanacak, farklı tipte kanatçıklar önerilmiştir. Lityum iyon piller için termal koşullar önemli olup, daha iyi bir performans ve pil ömrü için hücre sıcaklığının 15 °C ile 35 °C arasında olması ve tüm modül hacminde 5 °C üzerinde bir sıcaklık farkı oluşmayacak şekilde homojen sıcaklık dağılımı istenir. Bu kısıtlamalar nedeniyle, elektrikli araçların Batarya Termal Yönetim Sistemlerinde (BTYS) pek çok farklı türde, aktif veya pasif soğutma yöntemi kullanılmaktadır.

Çalışmada, 18650 koduyla bilinen silindirik pil hücrelerinin yanal yüzeyine doğrudan kanatçıklar entegre edilmiştir. 2 seri (2S) ve 4 seri 3 paralel (4S3P) modül konfigürasyonları farklı deşarj hızları için, kanatçık taşımayan hücreler ve halka, kare, trapezoid, pim ve ağ tipi kanatçık profillerine sahip hücreler FloEFD paket programı kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal çalışmada, eşdeğer devre modeline göre yapılan batarya analizleri ile sistemin termal analizi eş zamanlı olarak çalıştırılmış, sonuçlar, kanatçıkların doğal taşınım ortamında 2 – 4 °C aralığında, zorlanmış taşınım ortamında 7 – 8 °C aralığında fayda sağladığı tespit edilmiştir. Ancak, bazı tasarımlarda, zorlanmış taşınım, lityum iyon piller için istenmeyen bir sıcaklık dağılımı olan 5 °C üzerinde paket içi sıcaklık farklarına neden olmaktadır. Deneysel çalışmada, sayısal olarak en etkin sonuçları veren trapezoid kesitli kanatçık eklenmiş piller için şarj-deşarj deneyleri gerçekleştirilmiş ve kanatçıklı hücrelerin kanatçıksız olanlara kıyasla daha düşük sıcaklıklara eriştiği görülmüştür.

Çalışılan kanat tipleri, alan ve hacim için %150–200 aralığında, ağırlık için %33 – 40 aralığında bir artışa sebep olmaktadır. Anılan aralıklarda sıcaklık düşüşlerinin BTYS tekniği açısından önemli olduğu, hava soğutma sistemlerinin diğer soğutma yöntemlerine kıyasla yapısal basitlik, düşük maliyet ve elektriksel güvenlik gibi avantajları da dikkate alındığında, modüler kanat yapısı biçiminde önerilen yaklaşımın, ağırlık ve hacim artışlarının sorun teşkil etmeyeceği mühendislik uygulamalarında kullanılabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler:Lityum İyon Bataryalar, Batarya Termal Yönetim Sistemleri, Elektrikli Araçlar, Kanat

ABSTRACT

Phd. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FINS ADDED TO BATTERY CELLS ON THE PERFORMANCE OF ELECTRIC VEHICLE THERMAL MANAGEMENT SYSTEM

MESUT ÖZTOP

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

82 + XI pages

2025

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Abdulmuttalip ŞAHİNASLAN

In this study, different types of fins are proposed to be applied to the cells to obtain better cooling performance with air for cylindrical lithium-ion batteries. Thermal conditions are important for lithium-ion batteries, and for better performance and battery life, it is desired for the cell temperature to be between 15 °C and 35 °C and for a homogeneous temperature distribution in the entire module volume without a temperature difference of more than 5 °C. Due to these restrictions, many different types of active or passive cooling methods are used in the Battery Thermal Management Systems (BTMS) of electric vehicles.

In the study, fins were directly integrated into the lateral surface of the cylindrical battery cells known with the code 18650. 2 series (2S) and 4 series 3 parallel (4S3P) module configurations were numerically analyzed using the FloEFD package program for different discharge rates, cells without fins and cells with annular, square, trapezoidal, pin and mesh type fin profiles. In the numerical study, battery analyses performed according to the equivalent circuit model and thermal analysis of the system were run simultaneously, and the results showed that the fins provided benefits in the range of 2 - 4 °C in the natural convection environment and 7 - 8 °C in the forced convection environment. However, in some designs, forced convection causes temperature differences in the package over 5 °C, which is an undesirable temperature distribution for lithium-ion batteries. In the experimental study, charge-discharge experiments were performed for batteries with trapezoidal section fins, which gave the most effective results numerically, and it was observed that the finned cells reached lower temperatures compared to those without fins.

The studied fin types cause an increase in the range of 150-200% for area and volume, and 33-40% for weight. Considering that temperature drops in the mentioned ranges are important for the BTMS technique and the advantages of air cooling systems such as structural simplicity, low cost and electrical safety compared to other cooling methods, it is envisaged that the proposed approach in the form of a modular fin structure can be used in engineering applications where weight and volume increases will not be a problem.

Keywords: Li-ion Batteries, Battery Thermal Management System, Electric Vehicle, Fins

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar yüz yılı aşkın bir süredir bilinmesine rağmen çevresel kaygıların artması, petrol fiyatlarının yükselmesi ve sonuç olarak fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması gerekliliği ile birlikte son yıllarda rağbet görmeye başlamıştır. Ağır ve hacimli bataryaların yüksek maliyetleri, araçların kısa menzilleri ve elektriksel güvenlik sorunları gibi nedenlerle içten yanmalı motorlu araçlar karşısında uzun yıllar ticarileşemeyen bu teknoloji, günümüzde kullanılabilir duruma gelmiş, ulaştırma kavramının yerini zaman içinde mobilite kavramı almaya başlamış, bu değişen anlayışla birlikte elektrikli bisiklet, scooter, hoverboard gibi bireysel taşıtlar da günlük hayatımızda yer edinmiştir.

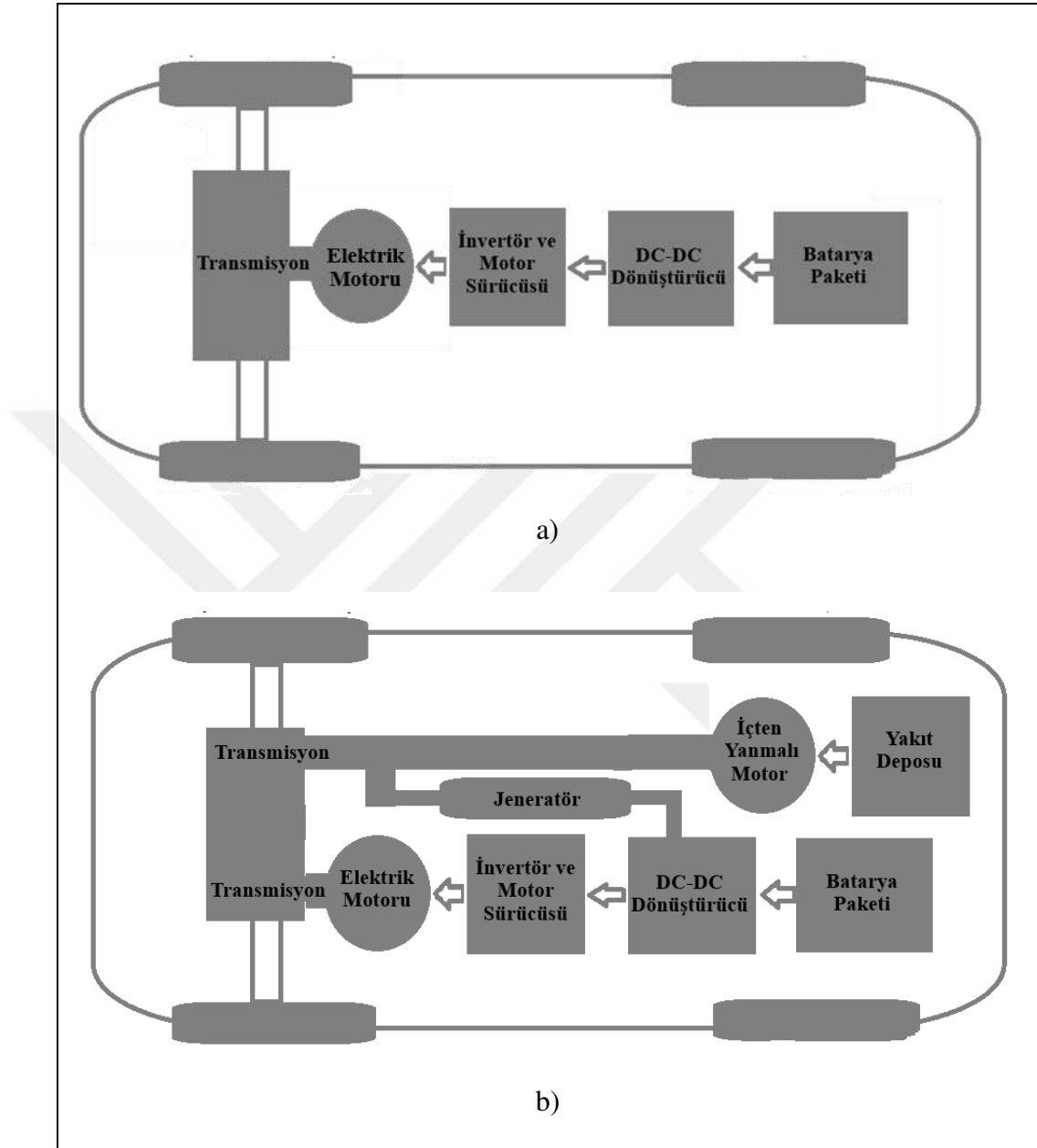
Benzer şekilde mobil elektrikli aletler de her geçen gün hayatımızdaki yerini genişletmektedir. Önceleri büyük ölçüde cep telefonları için vazgeçilmez olan batarya teknolojileri son dönemde diz üstü bilgisayarlar, dronelar, şarjlı temizlik ve mutfak aletleri, el aletleri, medikal cihazlar gibi pek çok ürün grubunda yaygınlaşmıştır.

Bütün bu mobil cihazlar için günümüzde en uygun enerji kaynağı, elektrokimyasal enerji depolama sistemleri olan pillerdir. Hücre tabanlı bu sistemlerde her bir hücre, bir separatör ile ayrılmış anot ve katottan oluşmakta, gereksinim duyulan güç ve süreye göre piller seri ve paralel bağlanmak suretiyle batarya modülleri elde edilmektedir. Ancak elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin ağırlık, hacim, maliyet ve menzil gibi birbirlerine bağlı boyutsal problemlerinin yanı sıra termal kaçış, yangın riski gibi ürün ve ürün fonksiyonları bazında aşılması gereken mühendislik sorunları da mevcuttur.

1.1.Elektrikli Araçlar ve Batarya Teknolojileri

Elektrikli araçlar (EA), batarya, elektrik motoru ve yardımcı ekipmanları ile birlikte Tümüyle Elektrikli Araç (TEA) olarak tasarlanabildikleri gibi araç üstünde bulunan geleneksel içten yanmalı motorun gerektiğinde tahrik, gerektiğinde batarya şarjı için kullanılabildiği Hibrit Elektrikli Araç (HEA) biçiminde de olabilmektedir. Yaygın bu iki türün haricinde Yakıt Pilli Araçlar, Mikro Hibrit Araçlar, Kısmi Hibrit Araçlar gibi türleri de söz konusudur. Güç kaynağı olarak elektrik enerjisinin kimyasal enerji biçiminde depolandığı değişik türde bataryalar kullanan elektrikli araçlar ticarileşme ve yaygınlaşma aşamasında olup, güç kaynağı olarak ultrakapasitör ya da yakıt hücreleri kullanımı da araştırma – geliştirme safhasındadır (Dinçer, Hamut, & Javani, 2017). Tümüyle elektrikli

araçlara ve hibrit elektrikli araçlara ait mimarileri özetleyen şematik görseller Şekil 1.1’de sunulmuştur (Hannan ve diğ., 2017).



Şekil 1.1 Tam (a) ve hibrit (b) elektrikli araç mimarisi (Hannan ve diğ., 2017).

Elektrikli araçları içten yanmalı motorlu araçlar karşısında zayıf kılan en temel unsur, büyük ölçüde bataryaya bağlı olmak üzere yüksek araç maliyetleri ve tek bir şarj ile alınabilecek menzilin kısırlığıdır. Bu nedenle araştırma ve geliştirme çalışmaları ağırlıklı olarak bataryalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Elektrikli araçlar için alternatif teşkil eden kurşun-asit, nikel metal hidrat, lityum iyon, sodyum sülfür ve vanadyum redoks gibi bazı batarya türlerine ait karşılaştırmalar Çizelge 1.1’de verilmiştir (Luo ve diğ., 2015) (Aneke ve Wang, 2016).

Çizelge 1.1 Bazı batarya türlerinin tipik özellikleri (Luo ve diğ., 2022), (Aneke ve Wang, 2016)

Batarya Türü Özellikler		Kurşun-Asit	NiMH	Lityum iyon	NaS	VRB
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)		25-50	60-120	75-200	150-240	10-30
Güç Yoğunluğu (W/kg)		75-300	250-1000	500-2000	150-230	80-150
Ömür (%100 deşarj derinliği)		200-1000	180-2000	1000-10000	2500-4000	>12000
Maliyet (USD/kWh)		100-300	900-3500	300-2500	300-500	150-1000
Çevrim Verimliliği (%)		75-85	≈ 65	85-97	75-90	75-90

Batarya teknolojilerinin önemli problem alanlarından birisi de batarya termal yönetim sistemleridir. Günümüzde elektrikli araçlar ve diğer tüm şarjlı ekipmanlar için en uygun batarya teknolojilerinden birisi olarak görülen lityum iyon bataryalar şarj ve deşarj esnasında ısı enerjisi üretmekte, yükselen sıcaklıklar bataryalarda verimsizliğe, yüksek maliyetli bataryaların ömrü noktasında kısaltmaya ve termal kaçışla birlikte bataryanın iflasına ve yangın tehlikelerine sebebiyet verebilmektedir.

Batarya termal yönetim sistemleri için ısı yükleri ve ortam sıcaklıkları dikkate alınarak hava soğutmalı sistemler, sıvı soğutmalı sistemler, soğutma akışkanlı sistemler ve faz değiştiren malzeme esaslı sistemler kullanılabilmektedir. Bunların haricinde termoelektrik soğutma, ısı borusu ile soğutma gibi yenilikçi sistemler de söz konusu olup, manyetik soğutma, piezo elektrik soğutma gibi geleneksel olmayan soğutma teknikleri ise araştırma aşamasındadır. Özellikle soğuk iklimlerde ön ısıtma fonksiyonunu da yerine getiren termal yönetim sistemleri, seçilen ısıtma/soğutma sisteminin elverdiği ölçüde farklı tasarımlar kullanılarak geliştirilebilmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Bu doktora çalışmasında, elektrikli araçlar ve diğer mobil cihazlar için termal yönetim sistemleri incelenmiş olup, lityum iyon bataryaların şarj ve deşarj süreçleri esnasında üretmiş olduğu yüksek ısıların yarattığı olumsuzlukları gidermek için hava soğutmalı sistemlere yenilikçi bir yaklaşım önerilmesi amaçlanmaktadır. Hava soğutmalı sistemler basit yapıları ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilen sistemler olup,

etkinliklerini artırmak amacıyla hücre düzeyinde eklenecek farklı profillerdeki kanatçıklar için denemeler yapılmıştır.

Çalışmada piyasada 18650 koduyla bilinen 18 mm çapa ve 65 mm yüksekliğe sahip silindir formundaki lityum iyon piller baz alınmış, bu pillerin yanal yüzeylerine eklenen halka, kare, trapezoid, pim ve ağ tipi kanatçıkların, hücrede oluşan maksimum sıcaklık ve modül içinde oluşan maksimum sıcaklık farklılıklarına etkisi irdelenmiştir. Kanatçıklar, pil paketlerinin ağırlık ve hacmini artıracığından her bir uygulama için bir fayda maliyet analizi yapılması önerilmiş, farklı pil dizilimlerinin olası etkileri gözlenmiştir. Sayısal olarak yürütülen çalışmanın sonuçları yapılan deneylerle doğrulanmıştır.

Doğrudan hücre yüzeyine entegre edilecek kanatçıklar sadece hava ile soğutma sistemlerinde değil, sıvı veya faz değiştiren malzeme temelli sistemlerde de etkili olabilir. Kanatlar, batarya ön ısıtma sistemlerinde de kullanılabilecektir. Ancak bu tez çalışması kapsamında hücre yüzeyine entegre edilen kanatların sadece hava ile soğutmaya etkisi konu edilmiştir.

Önerilen kanat yapıları, batarya yüzeyine monte edilerek kalıcı olabileceği gibi, kolayca sökülüp takılabilecek opsiyonel bir modüler tasarım biçiminde de kullanılabilir. Kanat geometrileri batarya hücresinin üretim aşamasında dış gövdeye entegre edilmiş bir şekilde de ticari faydaya dönüştürülebilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Doktora çalışmasında, batarya teknolojileri, lityum iyon bataryalar, batarya termal yönetim sistemleri ve özellikle de hava ile soğutma sağlayan batarya soğutma sistemleri hakkında kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır.

2.1. Batarya Teknolojileri

Yaygın olarak bilinen ve kullanılan bazı batarya türleri kurşun asit bataryalar, nikel metal hidrit bataryalar, lityum iyon bataryalar ve akış bataryaları olup öne çıkan özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1.1. Kurşun asit bataryalar

Kurşun-asit bataryalar en eski şarj edilebilir bataryalar olup, evsel ve endüstriyel amaçlarla kullanımı 19. yüzyılın ortalarına kadar uzanır. İlk elektrikli araçlarda da kullanılan kurşun asit bataryalar, içten yanmalı motorlu araçların ateşleme sistemlerinde ve diğer elektrikli unsurlarının beslenmesinde kullanılmaktadır. Kurşun asit bataryalarda, pozitif ve negatif elektrotlar ayrı ayrı kurşundioksit (PbO_2) ve metalik kurşundan (Pb) oluşur ve bunlar seyreltilmiş bir sülfürik asit elektrolitine (H^+ ve SO_4^{2-}) daldırılır. Kurşun-asit akülerin kullanılmasının başlıca avantajları yüksek enerji verimliliği, düşük kendi kendine deşarj oranı ve düşük ilk maliyettir. Bununla birlikte, ticari kullanım için daha fazla tanıtılmalarına rağmen, %20'nin altında kalan deşarj derinliği, 300-500 döngü dolayındaki düşük çevrim ömrü, düşük enerji yoğunluğu ve düşük şarj hızı gibi bazı belirgin teknik dezavantajları mevcuttur (Warner, 2024) (Hu ve diğ., 2017).

2.1.2. Nikel metal hidrit bataryalar (NiMH)

NiMH piller, nikel-oksihidroksit ($NiOOH$) bazlı pozitif elektrot, metalik kadmiyum (Cd) bazlı negatif elektrot ve genellikle potasyum hidroksit (KOH) gibi alkalın elektrolitten oluşur. Nikel kadmiyum ($NiCd$) muadillerine göre, NiMH pil daha yüksek güç/enerji yoğunluğuna sahiptir, daha çevre dostudur ve hafıza etkisine maruz kalmaya daha az eğilimlidir. Ancak, yüksek kendi kendine deşarj oranı, sınırlı hizmet ömrü ve düşük olarak değerlendirilebilecek %65 Coulomb verimliliği gibi çeşitli teknik dezavantajları mevcuttur. Öte yandan, hızlı şarjı ve aşırı şarjı tolere etme yeteneği çok düşüktür. Özellikle hızlı şarj sırasında, büyük miktarda ısı üretilebilir ve hidrojen birikmesi hücre yırtılmasına neden olarak kapasite düşüşüne yol açabilir. Bu nedenle, NiMH bataryaların şarj stratejileri titizlikle tasarlanmalıdır (Hu ve diğ., 2017), (Reddy ve Linden, 2011).

2.1.3. Sodyum sülfür (NaS) piller

NaS piller, erimiş bir kükürt anot, erimiş bir sodyum katot ve katı beta alümina seramik elektrolitten oluşur. Şarj ve deşarj döngüleri, kükürt ve sodyumun erimiş halde bulunduğu 300 °C üzerindeki sıcaklıklarda çalıştırılmalıdır. Bu nedenle çalışmaya başlatmak için dışarıdan ısı verilmesi gerekirken, devam eden şarj ve deşarj süreçleri sırasında elektrokimyasal reaksiyonlarda üretilen ısı yeterli gelir. Hücreler, ısıl açıdan korunum için bloklar halinde düzenlenir ve ayrıca vakumla yalıtılmış bir kutuya yerleştirilir. Elektrolit, elektronlar yerine yalnızca sodyum iyonlarının geçmesine izin veren yalıtkan bir malzemeden seçilir.

NaS pilinin ilgi çekici potansiyeli, yüksek enerji yoğunluğu (150–240 Wh/kg), yüksek verimliliği (%75–90), uzun kullanım ömrü (2.500–4.000 döngü) ve derin, hızlı deşarj sağlama yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Bir NaS pilinin güç yoğunluğu, kurşun-asit ve VRB muadillerinden çok daha yüksek ancak NiMH ve lityum iyon pillere kıyasla daha düşüktür. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda çalışabilme yeteneği, sıcak ve zorlu ortamlarda çalışmasına olanak tanır. Bu avantajlar, NaS pillerini sabit enerji depolaması uygulamaları için uygun hale getirmiştir. Son dönemde, NaS pilleri, özellikle rüzgar ve güneş enerjisi üretim tesisleri için güç sistemini ve yenilenebilir enerji üretimini desteklemede önemli bir rol oynamıştır (Reddy ve Linden, 2011), (Hu ve diğ., 2017).

2.1.4. Redoks akış bataryaları (RFB)

Modern redoks akış bataryalarının ilk örnekleri pozitif ve negatif çözeltiler arasındaki aktif iyonların çapraz kontaminasyonu ve şarj sırasında negatif elektrotta aşırı hidrojen üretimi nedeniyle dramatik şekilde kapasite düşüşü gösteren demir-krom akış bataryalarıdır. Sonraki süreçte, polisülfid/brom akış pili, vanadyum ve çinko/brom hibrit akış pili gibi çeşitli redoks akış kategorileri geliştirilmiştir. Vanadyum redoks bataryaları (VRB), pozitif ve negatif elektrolitlerin vanadyumu kullanması ve bu sayede aktif iyonların çapraz geçişiyle kapasite düşüşü meydana geldiğinde, elektrolitlerin yeniden karıştırılabilmesi nedeniyle öne çıkmaktadır. Ayrıca VRB tipi bataryalarda, negatif elektrottaki redoks çiftlerinin standart potansiyeli hidrojen oluşum potansiyelini aştığı için fazladan hidrojen üretilmez.

Kurşun-asit ve lityum iyon gibi diğer şarj edilebilir pillerle karşılaştırıldığında, ticari redoks akış bataryaları daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Öte yandan aşağıda sunulan bazı belirgin avantajları nedeniyle tercih edilmektedir;

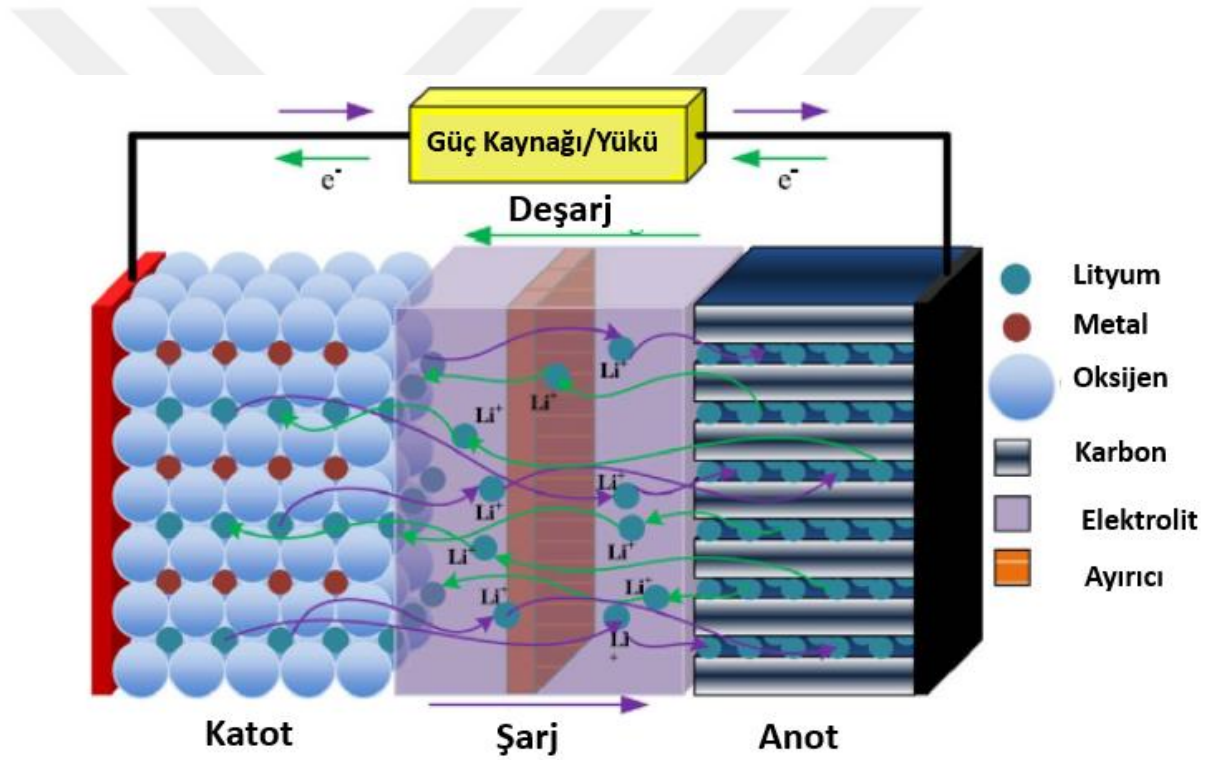
- RFB'lerin gücü ve enerji kapasitesi birbirinden tamamen bağımsızdır. Batarya gücü, hücre sayısı tarafından belirlenirken, enerji kapasitesi elektrolitlere bağlıdır. Bu nedenle bir RFB, modüler şekilde tasarımlarla MW düzeyinin çok üzerinde güç üretirken, düşük MWh enerji düzeylerine ölçeklenebilir. Ayrıca, farklı doluluk düzeylerine veya farklı sıcaklıklara sahip hücrelerin bir modül halinde çalışabilmesi için batarya yönetim sistemi gerekliliği daha düşüktür.
- RFB'lerin elektrotları, redoks reaksiyonu için yalnızca elektrokimyasal olarak aktif bir yüzey ve şarj/deşarj sırasında yalnızca sıvı faz reaksiyonu sağladığından uzun ömürlüdürler.
- Şarj/deşarj sırasında her iki elektrotta da metalik dendrit oluşmaz ve bu da dahili kısa devre risklerini önler. Ayrıca VRB gibi birçok RFB'de elektrolit sulu ve yanıcı değildir. Bu nedenle, RFB güvenli, güvenilir ve pek çok alanda uygulanabilir.
- RFB'lerin şarj vedeşarj arasındaki geçişleri 0,02 saniye gibi kısa sürelerde sağlanabilir. Bu nedenle, değişken yenilenebilir enerjileri dengelemek için uygundur (Hu ve diğ., 2017).

2.1.5. Lityum iyon piller

Lityum iyon piller 1990'ların başında Sony firması tarafından ticari olarak geliştirilen, şarj edilebilir pillerdir. Diğer pil tipleriyle (örneğin, NiMH, NiCd ve kurşun asit) karşılaştırıldığında, lityum iyon piller yüksek enerji yoğunluğu (yüksek çıkış voltajı nedeniyle), yüksek verimlilik, uzun çevrim ömrü ve çevre dostu olma avantajlarına sahiptir. Bu avantajları nedeniyle, yeni nesil elektrikli araçlar ve fişli - hibrit elektrikli araçlar için en uygun güç kaynaklarından biri olarak kabul edilirler. Elektrikli araçların hızla gelişmesiyle birlikte, lityum iyon pil teknolojileri büyük ilerleme kaydetmiş ve enerji depolama uygulamaları için sağlam bir teknik ve endüstriyel temel sağlamıştır (Reddy ve Linden, 2011), (Hu ve diğ., 2017).

Lityum iyon piller anot, katot ve elektrolitten oluşmaktadır. Pozitif elektrot katot, genellikle metal oksitlerden oluşur ve ticari pillerde lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum demir fosfat (LiFePO_4) veya lityum mangan oksit (LiMnO_2) tercih edilir. Negatif elektrot anot, gözenekli karbon yapıya sahip olup, grafit en çok tercih edilen anot malzemesidir. Elektrolit ise lityum iyonları içeren organik bir çözücüdür. Elektrolitin iyon iletkenliğinin yüksek, elektrik iletkenliğinin düşük, çalışma sıcaklık aralığının geniş, belirli bir voltaj aralığında termodinamik kararlılığının yüksek ve çevre dostu olması istenir (Pistoia ve Liaw, 2018).

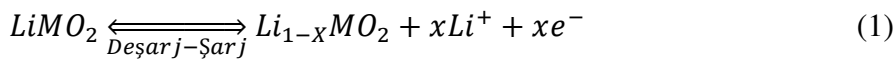
Lityum iyon pillerin çalışma prensibi, şarj esnasında katottan anoda ve deşarj esnasında anottan katoda lityum elektronlarının geçişi esasına dayanır. Lityum iyon piller şarj olurken pozitif uçtan negatif uca elektrolit üzerinden lityum elektronları geçerek negatif uca kalır ve bu işlem sayesinde pil içerisinde enerji depolanır. Pozitif uçtan negatif uca elektron akışı durduğunda pil tamamen şarj olmuştur. Deşarj esnasında da bunun tam tersi olarak negatif uçtan pozitif uca lityum iyonlarının hareketi gerçekleşmektedir ve bu olayla piller enerji tüketir. Negatif uçtan pozitif uca elektron akışı durduğunda lityum iyon pil tamamen enerjisini boşaltıp deşarj olmuş ve şarja ihtiyaç duyar hale gelmiştir (Matsuki ve Ozawa, 2009), (Nazri ve Pistoia, 2009). Lityum iyon pilin içinde gerçekleşen şarj ve deşarj reaksiyonları Şekil 2.1’de pilin şematik görünümü üzerinde açıklanmıştır (Hannan ve diğ., 2017).



Şekil 2.1 Lityum iyon pillerde şarj ve deşarj reaksiyonları (Hannan ve diğ., 2017)

Lityum iyon pillerde şarj ve deşarj esnasında anot ve katot elektrotlarında meydana gelen indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları Eşitlik 1 ve Eşitlik 2’de verilmiştir.

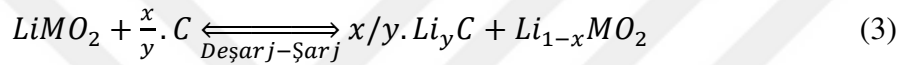
Pozitif elektrot (Katot):



Negatif elektrot (Anot):



Burada, $LiMO_2$, $LiCoO_2$ gibi metal oksit bir pozitif malzemeyi ve C, grafit gibi karbon içeren negatif bir malzemeyi temsil eder. Eşitliklerde verilen x ve y değerleri, lityum için elektrot malzemelerinin molar kapasitelerine göre seçilir. Normalde x yaklaşık 0,5 ve y yaklaşık 0,16'dır, bu nedenle x/y oranı yaklaşık olarak 3'tür. Deşarj durumunda bunun tersi gerçekleşir. Hücrede metalik lityum bulunmadığından, lityum iyon piller kimyasal olarak daha az reaktiftir, daha güvenlidir ve negatif elektrot malzemesi olarak lityum metal kullanan şarj edilebilir lityum pillere kıyasla daha uzun çevrim ömrü sağlar. Lityum iyon pilde gerçekleşen toplam reaksiyon ise Eşitlik 3'teki gibi yazılabilir (Reddy ve Linden, 2011).



Öte yandan elektrikli araçlar için lityum iyon pillerin yüksek kapasite ve büyük sayılarda seri-paralel bağlanabilme gibi olumlu özelliklerine karşın, güvenlik, dayanıklılık, homojenlik ve maliyet lityum iyon pillerin araç üstü geniş uygulamalarına sınırlamalar getirir. Bütün bunlar lityum iyon pillerin iyi tasarlanmış batarya yönetim sistemleri ile çalıştırılmasını zaruri kılar (Lu ve diğ., 2013). Bir batarya paketi içindeki her bir pil hücresi minör düzeylerde de olsa farklı özelliklere sahip olduğundan paketin homojen bir yapı oluşturması, güvenli ve güvenilir enerji arzı sağlaması yönetim sistemlerinin kabiliyetlerine bağlıdır.

Batarya teknolojileri, basit elektronik cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmasına rağmen, bataryaların performansları ve ömürleri güvenli bir çalışma alanına bağlıdır. Bu çalışma alanı pillerin aşırı şarj ve deşarj durumlarında meydana gelebilecek tehlikelerin önüne geçerek performanslarını iyileştirmektedir. Pillerin güvenlik ve performans açısından bu güvenli bölgede çalışmalarını sağlayan ünite Batarya Yönetim Sistemi'dir (BYS). Batarya Yönetim Sisteminin görüntüleme algoritmasında batarya modelleme, batarya parametre kestirimleri, batarya durum kestirimleri ve batarya hücre dengeleme gibi çeşitli görevleri vardır (Muratoğlu ve Alkaya, 2015).

Lityum iyon bataryalar silindirik, prizmatik veya poşet (kesecik) şekillerinde ticari olarak kullanılmakta olup, piyasada en yaygın ve bilinen türü, 18650 kodlu pil olarak isimlendirilen, 18 mm çap ve 65 mm yüksekliğe sahip silindirik hücrelerdir. Bu tekil

hücrelerin gerilim ve kapasitesini artırmak üzere 8, 15, 24 veya daha fazla adedinin seri ve paralel şekillerde elektriksel bağlantılarının sağlanması ile modüller (paketler) oluşturulur. Yüksek güç gerektiren uygulamalarda çok sayıda modül bir arada kullanılabilir. Örnek bir hücre ve modül Şekil 2.2’de, 7104 adet hücreden oluşan araç üstü bir batarya paketi ise Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Batarya hücresi ve modülü

Örnek olarak seçilen Tesla Model S aracının batarya paketinde 16 adet seri bağlı modül bulunmakta olup, bu modüllerin içerisinde 74 paralel hücreye sahip 6 adet alt modül, birbirine seri şekilde bağlanmıştır. Bir modülde 444 adet hücre bulunmaktadır. Bir pil hücresinin nominal gerilim değeri 3,8 V alındığında, bir modülün sahip olduğu nominal gerilim değeri 22.8 V ve tüm batarya paketinin gerilim değeri ise 364.8 V değerindedir. Bu batarya paketinin kapasite değeri 233 Ah ve yaklaşık 85 kWh değerine sahip bir batarya enerjisine sahiptir (Özel, 2019).



Şekil 2.3 Tesla marka bir araca ait batarya paketi

Lityum iyon bataryaların sıcaklık ve güç ilişkisi ile sıcaklık ve batarya ömrü ilişkisi birlikte değerlendirildiğinde ideal çalışma sıcaklığının 15 °C ile 35 °C arasındaki sıcaklık değerleri olduğu bilinmektedir. Bu değerlerin altına düşülmesi veya üstüne çıkılması bataryalarda ve/veya kullanıldıkları ekipmanlarda önemli problemlere sebep olabilmektedir. Öte yandan birbirlerine seri/paralel bağlı çok sayıda hücrenin oluşturduğu batarya paketi içindeki sıcaklık dağılımının da olabildiğince homojen olması gerekmekte, 5 °C ve üzerindeki sıcaklık farklılıkları arzu edilmemektedir. Elektrikli ev aletlerinde, elektrikli bisiklet, scooter gibi ekipmanlarda bu sıcaklık koşulları kısmen yakalanabilirken yüksek güç gerektiren elektrikli araçlarda termal koşulları sağlayabilmek, soğuk iklimlerde ön ısıtmayı, diğer pek çok koşulda ise aktif soğutma sistemlerini elzem hale getirmekte, bu da otomotiv teknolojisi açısından sistem üzerinde ilave donanım, yazılım ve entegrasyon sorunları olarak ortaya çıkmaktadır.

Daha iyi bir pil performansı için kalsiyum ve alüminyum gibi farklı malzemeleri geliştirmek amacıyla pil kimyası üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Zhang ve diğ., 2016) (Wang ve diğ., 2018). Ancak, maliyet, enerji yoğunluğu ve tedarik gibi farklı yönler birlikte değerlendirildiğinde, lityum iyon pillerin elektrikli araçlar için hala en uygun alternatifi teşkil ettiği söylenebilir.

2.2.Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS)

Batarya Yönetim Sistemi elektrikli ve hibrit elektrikli araçların kritik bir bileşenidir. Batarya yönetim sisteminin amacı bataryanın güvenli ve güvenilir çalışmasını garanti etmektir. Pilin güvenliğini ve güvenilirliğini korumak için durum izleme ve değerlendirme, şarj kontrolü ve hücre dengeleme, yönetim sistemlerince uygulanan işlevlerdir.

Elektrokimyasal bir ürün olarak pil, farklı çalışma ve çevre koşulları altında farklı davranır. Bir pilin performansının belirsizliği, bu işlevlerin yerine getirilmesi için çok çeşitli zorluklar oluşturmaktadır. Batarya yönetim sistemleri için en kritik görevler batarya durumunu tespit etmeye yönelik olarak, bataryaların şarj durumu (state of charge, SoC), sağlık durumu (State of Health, SoH) ve ömür durumu (State of Life, SoL) bileşenlerinin değerlendirilmesidir. Çeşitli donanım ve yazılım unsurları barındıran batarya yönetim sistemleri için en önemli konulardan birisi de ısı (termal) yönetimidir (Xing ve diğ., 2011). Bu amaca ulaşmak için, halihazırda elektrikli araçlarda ve hibrit elektrikli araçlarda çeşitli türlerde termal yönetim sistemleri kullanılmaktadır.

Elektrikli araçlarda kullanılan Batarya Termal Yönetim Sistemleri temelde dört işlev üstlenmektedir. Bunlar;

- Soğutma: Bataryanın ürettiği ısıdan dolayı sıcaklığın optimum değerler üzerine çıkmasını engellemek,
- Isıtma: Özellikle soğuk iklimlerde ilk çalışma anında bataryanın sıcaklığını optimum seviyelere yükseltmek,
- Havalandırma: Batarya çalışması esnasında oluşabilecek tehlikeli gazların ortamdaki tahliyesi,
- Yalıtım: İklim koşullarının uç seviyelerde olduğu bölgelerde özellikle uzun süreli park neticesinde ortam sıcaklığından etkilenmeyi minimize etmek (Pesaran, 2001).

EA ve HEA batarya paketleri ve otomotiv elektroniği ile ilgili termal sorunlar, bataryanın ve ilgili sistemin performansını ve kullanım ömrünü önemli ölçüde etkileyebilir. Bataryanın ideal sıcaklık aralıklarında çalışmasını sağlamak için, EA'larda ve HEA'larda termal yönetim sistemleri uygulanarak bataryaların optimum çalışma koşulları dışına çıkmasının azaltılması gerekir. Bu sistemler, batarya sıcaklığını istenen aralıklar içinde tutarak verimliliği artırır. Böylece, bataryadaki elektrokimyasal sistemlerin donması veya aşırı ısınması önlenir, bu da güç kapasitesinde ve şarj / deşarj kapasitesindeki azalmaları ve pilin erken yaşlanmasını önler. Tümüyle elektrikli ve hibrit elektrikli araç termal yönetim sistemleri, iç ve dış sıcaklık değişimlerinden etkilenmeksizin, ilgili bileşenleri güvenli ve verimli bir şekilde çalıştırmak ve sistemi ilgili ılıman aralıklarda tutmak için dört farklı döngüden oluşur. Radyatör devresi, güç elektroniği devresi, sürücü ünite devresi ve hava şartlandırma (A/C) devresi şeklindeki bu döngüler araçtan araca yapıları ve çalışma prensipleri itibarıyla farklılıklar gösterebilir (Dinçer ve diğ., 2017).

Bu çalışmanın konusunu oluşturan, elektrikli araçlarda termal yönden temel kaynağı ve problemi oluşturan bataryanın, termal yönetimi genellikle araç kabin klima devresi (A/C) ile birlikte ele alınmaktadır. Lityum iyon bataryalar $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında çalışmaktadır (Vayrynen ve Salminen, 2012). Ortam sıcaklığı da dikkate alınırsa dünya coğrafyasının pek çok bölgesini içine alan bu sıcaklık değerleri bu tür bataryaların elektrikli araçlarda kullanımı noktasında cesaret verici olmuştur. Öte yandan optimum çalışma sıcaklığı ise $15 - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığıdır (Pesaran ve Santhanagopalan, 2013), (Matthe ve diğ., 2011). Sıcaklık değeri $30 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında olmak üzere, batarya çalışma sıcaklığındaki her $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ derecelik artış batarya ömrünü ortalama 2 ay kısaltmaktadır (Motloch ve diğ., 2002). Ayrıca bataryayı oluşturan çok sayıda pil ve modüller arasındaki sıcaklık farkları da önemlidir. Verimli ve güvenli bir elektrikli araç için tüm batarya hacmi içinde, modüller

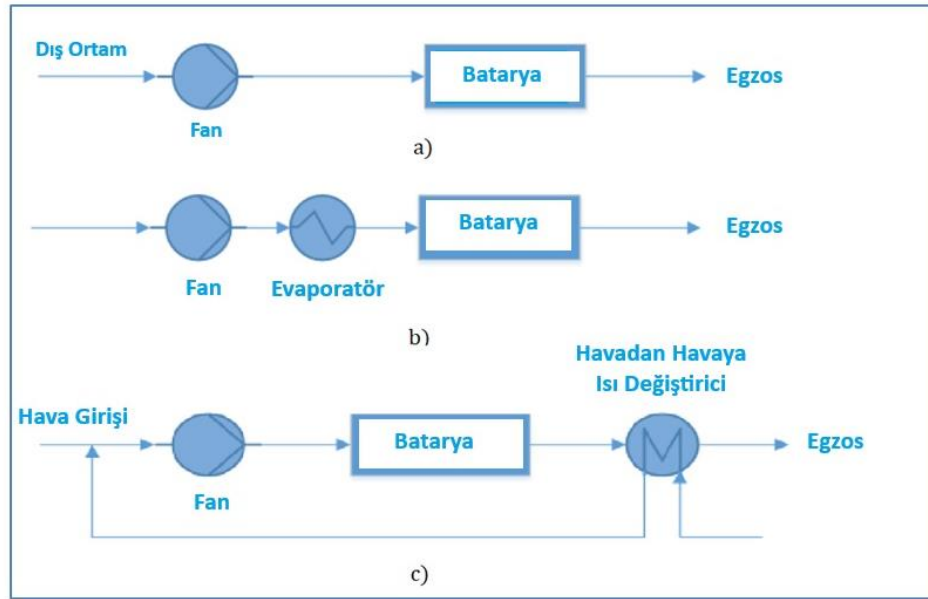
arasındaki sıcaklık farkının 5 °C dereceyi geçmemesi arzu edilmektedir (Pesaran, 2001), (Pesaran, 2002). Dolayısıyla esasen termal yönetim sistemleri tek başına bir soğutma ya da ısıtma işlemi değil, sıcaklığı yukarıda anılan değerler arasında tutma amacı taşımaktadır. Bu cihetle, TYS, soğutmanın yanı sıra özellikle soğuk iklim koşullarında kullanılacak olan batarya sistemleri için ısıtma fonksiyonunu da üstlenebilmektedir. Ancak ticari uygulamalarda, otomotiv teknolojilerindeki karmaşıklık düzeyi ile ilgili parametreler de dikkate alındığında sadece soğutma yapan sistemler yaygındır.

Sıcaklık dağılımları ve batarya hücresinin sıcaklığının homojen olmaması, farklı uygulamalar için temel problemler ve dezavantajlardır. Lityum iyon hücrelerinin termodinamiği, tek fazlı ve çok fazlı katıların yanı sıra sıvı elektrolit karışımlarının varlığı ile karmaşılaşır. Isı üretimi, ana elektrokimyasal reaksiyonların yanı sıra karıştırma ve faz değişiminden de kaynaklanabilir (Xiao ve diğ., 2010), (Duan ve Naterer, 2010), (Williford ve diğ., 2009), (Viswanathan ve diğ., 2010), (Lin ve diğ., 2009), (Kumaresan ve diğ., 2008).

Termal yönetim sistemleri aktif veya pasif şeklinde sınıflandırılmaktadır. Aktif yönetim, bir soğutma ve/veya ısıtma kaynağı kullanılması, pasif yönetim ise sadece ortam sıcaklığının kullanılması şeklinde uygulanmaktadır. Ayrıca kullanılan ortama göre sınıflandırıldığında hava esaslı, sıvı esaslı ve faz değiştiren malzeme esaslı ısıl yönetim sistemleri olduğu gibi ısı kanalları, soğutma çevrimli sistemler, termoelektrik, manyetik ve piezoelektrik soğutma gibi teknikler de söz konusudur. Öte yandan ısı transferi sağlayan ortamın bataryalara doğrudan temas edip etmemesine göre direk veya indirek sistemler şeklinde bir sınıflandırma da mevcuttur (Pesaran, 2001), (Yıldız, 2016), (Huaqiang ve diğ., 2017).

2.2.1. Hava ile termal yönetim

Termal ortam olarak havayı kullanan sistemlerin en büyük avantajı bataryaların olası gaz salma riskine karşı doğal bir havalandırma imkanı sunmasıdır. Pasif veya aktif şekilde dizayn edilen hava ile soğutma/ısıtma sistemlerinde dış ortamdan veya araç içinden alınan hava doğrudan veya şartlandırılmış olarak batarya paketine verilebilir. Batarya paketinden sıcak şekilde çıkan havanın geri kazanıldığı sistemler de mevcut olup, bu üç alternatif Şekil 2.4'te şematize edilmiştir (Pesaran, 2001), (Li ve Zhu, 2014).



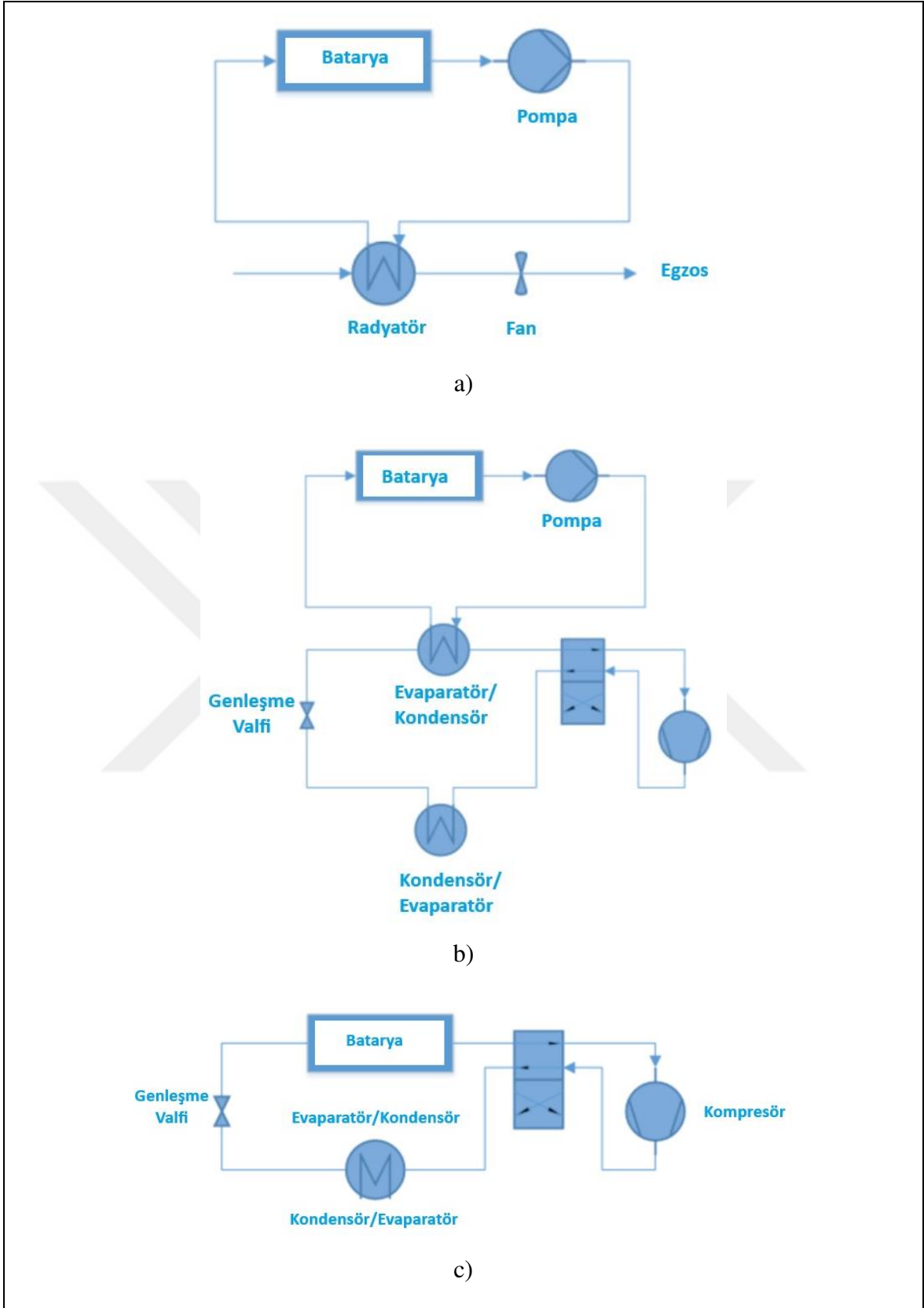
Şekil 2.4 Hava ile termal yönetim; a) pasif b) aktif c) enerji kazanımlı sistemler (Pesaran, 2001), (Li ve Zhu, 2014).

2.2.2. Sıvı ile termal yönetim

Sıvı soğutmalı sistemler Şekil 2.5’de görüldüğü gibi pasif veya aktif olarak dizayn edilebileceği gibi bataryaya doğrudan temas eden veya etmeyen şeklinde sınıflandırılabilir. Batarya paketini soğutan sıvı, bir radyatör yardımıyla soğutulup tekrar devreye sokulabileceği gibi aktif sistemlerde ikinci bir devrede ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Bataryaya doğrudan temas eden sistemlerde mineral yağ gibi dielektrik sıvılar kullanılırken doğrudan bataryaya temas etmeyen sistemlerde etilen glikol ve su karışımı gibi iletken sıvılar kullanılabilir. Doğrudan soğutma sıvılarının kullanıldığı soğutma çevrimleri de batarya termal yönetim sistemlerinde kullanılmaktadır sistemler (Pesaran, 2001), (Li ve Zhu, 2014).

2.2.3. Faz değiştiren malzemeler ile termal yönetim

Faz değiştiren malzemelerin (FDM) özellikle katı halden sıvı hale geçiş sürecinde saklayabildiği gizli ısı batarya termal yönetim sistemleri için önemli bir fırsat oluşturmaktadır. Zira gizli ısı aktarımı yapılırken sıcaklık sabit kaldığı halde görece yüksek miktarda ısı transferi sağlanabilmesi, batarya sistemlerinde sıcaklık dalgalanmalarını dar bir alanla sınırladığı gibi üretilen ısıнын da ortamdan uzaklaştırılması noktasında iyi bir çözüm oluşturur.



Şekil 2.5 Sıvı soğutmalı sistemler; a) pasif soğutma b) aktif soğutma c) soğutma sıvılı sistemler (Pesaran, 2001), (Li ve Zhu, 2014).

Faz değiştiren malzemelerin batarya termal yönetim sistemlerinde kullanılması en önemli avantajı dielektrik malzemelerin bataryaya doğrudan temas edebilmesi ve sıcaklığın belli aralıklarda tutulması yönünde sağladığı avantajdır. Ayrıca sirkülasyona gerek duyulmaması, kontrol sistemine gerek duyulmaması ve sonuç olarak daha az g, daha az yer ve maliyet gerektirmesi önemli avantajlarıdır. Silindirik lityum iyon batarya paketleri için yapılan bir çalışmada batarya hücrelerinin hacimsel olarak %80'ine kadar faz değiştiren sıvıya batırıldığı bir durumda sıcaklığın 35 C altında tutulabildiği ve sıcaklık farkının 4 C dereceyi geçmediği gözlenmiştir (Al-Zareer ve diğ., 2020). Elektrikli araç bataryalarının termal yönetimi sürecinde faz değiştiren malzemelerin kullanımı, pek çok çalışmaya konu edilmiş, batarya sıcaklığının ve modüller arası sıcaklık farklarının düşük kaldığı birçok çalışmada doğrulanmıştır (Ianniciello ve diğ., 2018) (Luo ve diğ., 2022).

2.2.4. Batarya termal yönetimini iyileştirmeye yönelik alışmalar

Bu bölümde, batarya termal yönetim sistemlerinin performansını iyileştirmeye yönelik olarak literatürde yer bulan farklı ve yenilikçi uygulamalara yer verilmiştir.

Farklı soğutma strateji ve yöntemleri birlikte düşünüldüğünde batarya termal yönetim sistemleri için pek çok alternatif ve hibrit kombinasyon ortaya çıkmaktadır. Literatürde farklı termal yönetim sistemlerini mukayese eden çok çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bunlardan bu doktora çalışması ile yakından ilgili görülen bazıları burada irdelenmiştir.

Doğal ve zorlanmış hava ile soğutma tekniklerinin, doğrudan ve dolaylı sıvı soğutma yöntemlerinin ve ısı borularıyla soğutma dahil olmakzere farklı teknolojilerinin ayrıntılı bir mukayesesinin yapıldığı çalışmalarda, hava soğutmalı BTYS'nin güvenli, tutarlı ve basit tasarım gibi avantajlı özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak havanın bir soğutma ortamı olarak daha düşük ısı kapasitesine sahip olması ve termal verimliliğinin sınırlı olduğu grlmştir. Bu durum, optimum bir soğutma sağlamak için havanın batarya paketlerinin içindeki kanallardan aktığı yüksek şarj/deşarj oranlarında zorlanmış hava soğutmalı BTYS'lerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır (Thakur ve diğ., 2020) (Rahmani ve diğ., 2024).

BTYS'lerde hava soğutmasının incelendiği bir diğer çalışmada ise verimli BTYS'leri tasarlamada doğru sayısal modelleme ve batarya davranışının simülasyonunun önemi ortaya konulmuştur. İncelenen üç optimizasyon tekniğinden; hava akış kanalı optimizasyonunun en çok tercih edilen strateji olduğu görülmektedir. Her ne kadar birçok araştırmacı araştırdıkları modeller için çeşitli sayısal simülasyonlar gerçekleştirme yöntemlerini

tanımlamış olsa da, BTYS ile ilgili olarak çeşitli amaç fonksiyonları için tasarım değişkenlerinin seçilmesinde ve tasarım alanlarının tanımlanmasında deney tasarımı uygulamalarının eksikliği açıkça fark edilmiştir (Akinlabi ve Solyali, 2020).

Termal yönetim sisteminde havanın kullanılması daha az etkili fakat daha az karmaşık olmasına karşın sıvı soğutmalı ve ısıtmalı sistemin daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Genel olarak, paralel hibrit elektrikli araçlarda hava kullanımının termal yönetim sistemi için yeterli olduğu fakat elektrikli araçlar ve seri hibrit elektrikli araçlarda optimum termal performans için sıvı bazlı sistemlerin gerekli olduğu değerlendirilmektedir. Batarya paketinin araç içindeki konumunun da batarya termal yönetim sistemi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olacağı belirtilmektedir (Pesaran, 2001).

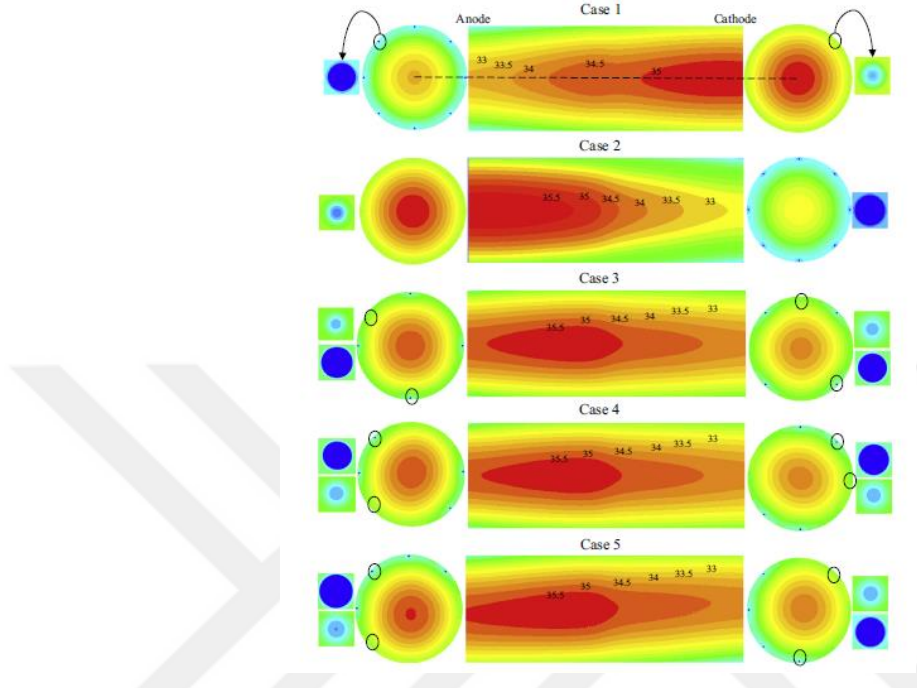
Yapılan bir başka çalışmada, hava soğutma, direk sıvı soğutma, indirek sıvı soğutma ve kanatçık yapılı soğutma yöntemleri aynı hacimli lityum iyon batarya paketi için sayısal olarak incelenmiştir. Buna göre hava soğutma sisteminin, aynı ortalama sıcaklığı korumak için diğer yöntemlerden 2 ila 3 kat daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğu; indirek sıvı soğutma sisteminin en düşük maksimum sıcaklık artışını sağladığı; kanatçıklı soğutma sisteminin, aynı hacimli batarya paketi için ağırlığı yaklaşık % 40 artırdığı sonuçlarına ulaşılmıştır. İndirek sıvı soğutma sistemi, daha düşük soğutma performansına sahip olmakla birlikte, doğrudan sıvı soğutma sistemine kıyasla daha pratiktir (Chen ve diğ., 2016).

Bir başka çalışmada ise yan yana dizilmiş lityum iyon hücrelerinden oluşan batarya paketinde her 20 hücre arasına konulan hava kanallarının doğal ve cebri konveksiyon etkileri incelenmiştir. Akışkan olarak hava kullanıldığında cebri konveksiyonun daha etkili olduğu, akışkan olarak sıvı kullanıldığında doğrudan bataryaya temas eden sıvıların soğutma performansının doğrudan temasın olmadığı sistemlere göre daha fazla olduğu sayısal olarak analiz ve rapor edilmiştir (Karimi ve Li, 2013) .

Başka bir çalışmada ise 3 boyutlu modellenen bataryaların paralel düzende, hava ile soğutulması problemi optimize edilmiş, sabit giriş debisine göre yapılan optimizasyonda sıcaklık farkının %45 dolayında iyileştirildiği, sabit güç tüketimine göre yapılan optimizasyonda ise %41 iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir (Chen ve diğ., 2017).

Bataryalar hacim ve ağırlıkları itibariyle elektrikli araçlara önemli kısıtlar getirmektedir. Bu durumu minimize etmek ve daha etkin bir termal yönetim sistemi kurmak açısından son dönemde batarya hücre, modül ve paketlerinin geometrisine yönelik çalışmalar yaygınlaşmıştır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi silindirik hücrelerin dış gövdelerini oluşturan ince metal sacların içine mini kanallar açılarak bu kanallarda sıvı dolaştırılması hücre geometrisi açısından önemli bir müdahaledir (Zhao ve diğ., 2015). Benzer durum

prizmatik batarya paketleri için daha geniş kanallar biçiminde uygulanmıştır (Rao ve diğ., 2019). Öte yandan hücre etrafında dolaştırılan helezonik boruların içinde soğutma sıvısı dolaştırılması ve modüllerin silindirik kutular biçiminde tasarımı da sayısal olarak yapılan incelemelerde önemli faydalar öngörmüştür (Adair ve diğ., 2014).

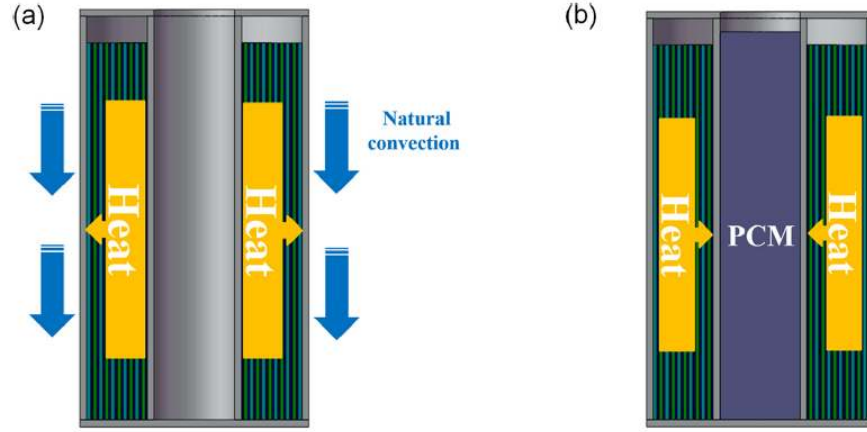


Şekil 2.6 Hücre yan yüzeylerine açılmış mini kanalların etkisi (Zhao ve diğ., 2015)

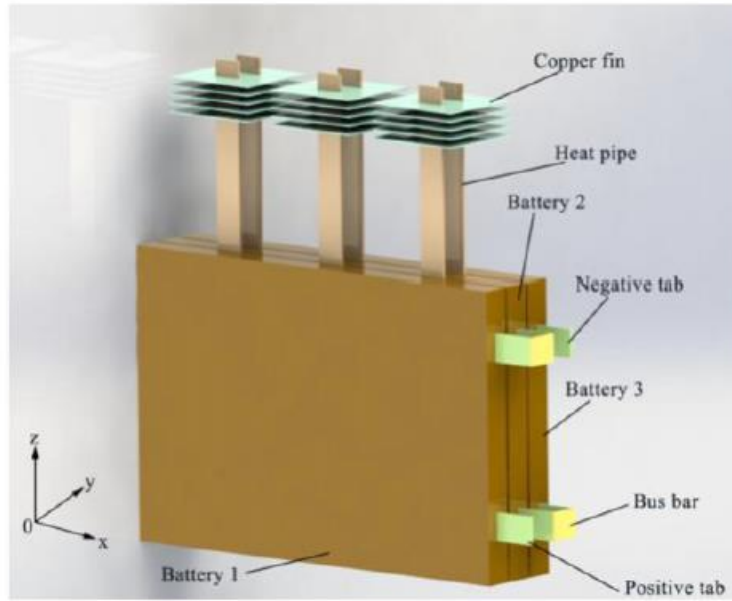
Benzer şekilde bir başka çalışma ise Şekil 2.7’de görüldüğü üzere silindirik, ancak merkezi boş şekilde üretilmiş bir NiCoMn batarya hücresinin iç delik kısmına faz değiştiren malzeme olarak parafin doldurulması ve bir başka alternatif olarak da söz konusu boşluğun ısı kanalı olarak soğutmaya katkı sağlaması deneysel olarak incelenmiştir. Termal sonuçlar olumlu olmakla birlikte söz konusu iç boşluğun aynı toplam hacimdeki bataryaya göre performansı ve üretim sürecine etkisi incelenmemiştir (Gou ve diğ., 2019).

Sistemin hacmini önemli ölçüde artırmasına rağmen ısı kanalları batarya sistemlerinin gerek soğutulmasında, gerekse ön ısıtılmasında etkili ve pratik yöntemlerden birisidir. Söz konusu sistemlerin elektrikli araçlar için etkili bir yöntem olduğu deneysel olarak gösterilmiştir (Wang ve diğ., 2015). Batarya modül geometrisini önemli ölçüde değiştirmeyi öneren bir diğer çalışmada ise Şekil 2.8’deki gibi modüllerin uç kısmına ısı kanalları eklenmesinin ve ısı kanallarının yüzeylerinin de kanatçıklarla artırılmasının lityum iyon bataryalardaki ısı kaçış olayı üzerine etkisi sayısal olarak incelenmiştir (Li ve diğ., 2019). Termal sonuçlar olumlu olmakla birlikte bu tasarımın geniş hacminden dolayı araç iç

dizaynının olumsuz etkileneceği ve titreşim etkilerinin sistemin ömrünü azaltacağı söylenebilir. Benzer ısı kanalları sadece hızlı şarj anında uygulanmak üzere de sayısal ve deneysel olarak analiz edilmiştir (Ye ve diğ., 2015).



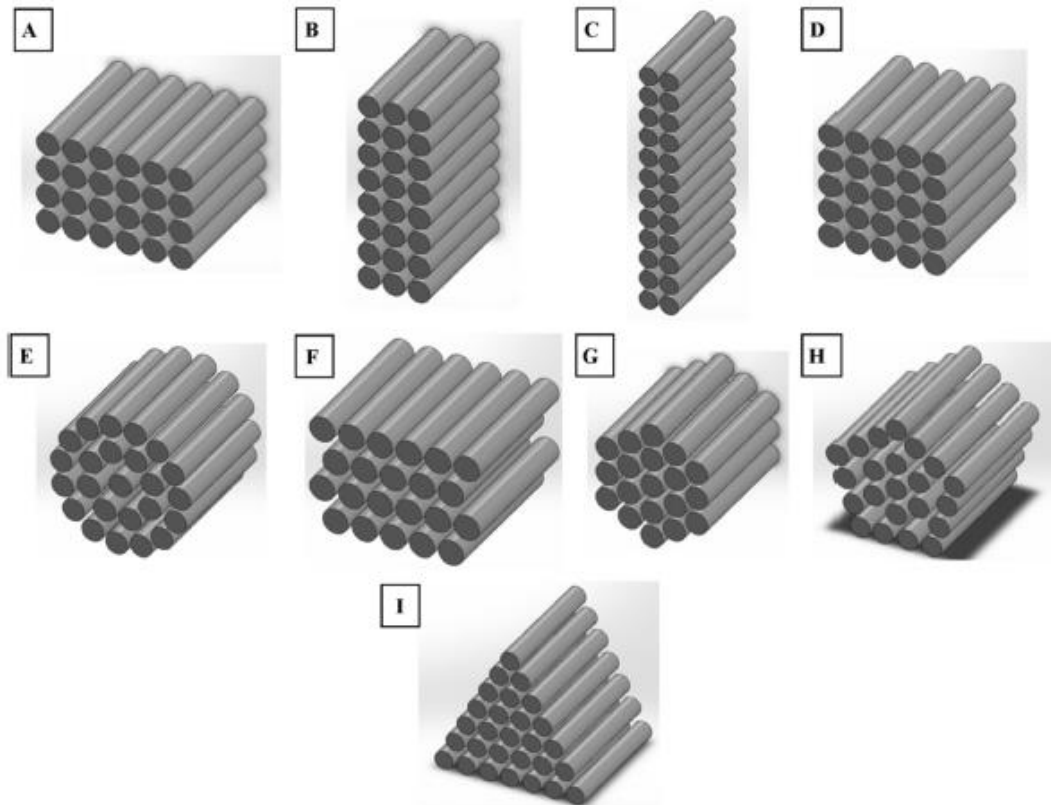
Şekil 2.7 İçi boşaltılmış pil hücresi: a) ısı kanalı, b) faz değıştiren malzeme (Gou ve diğ., 2019)



Şekil 2.8 Batarya, ısı kanalları ve kanatçıklar (Li ve diğ., 2019)

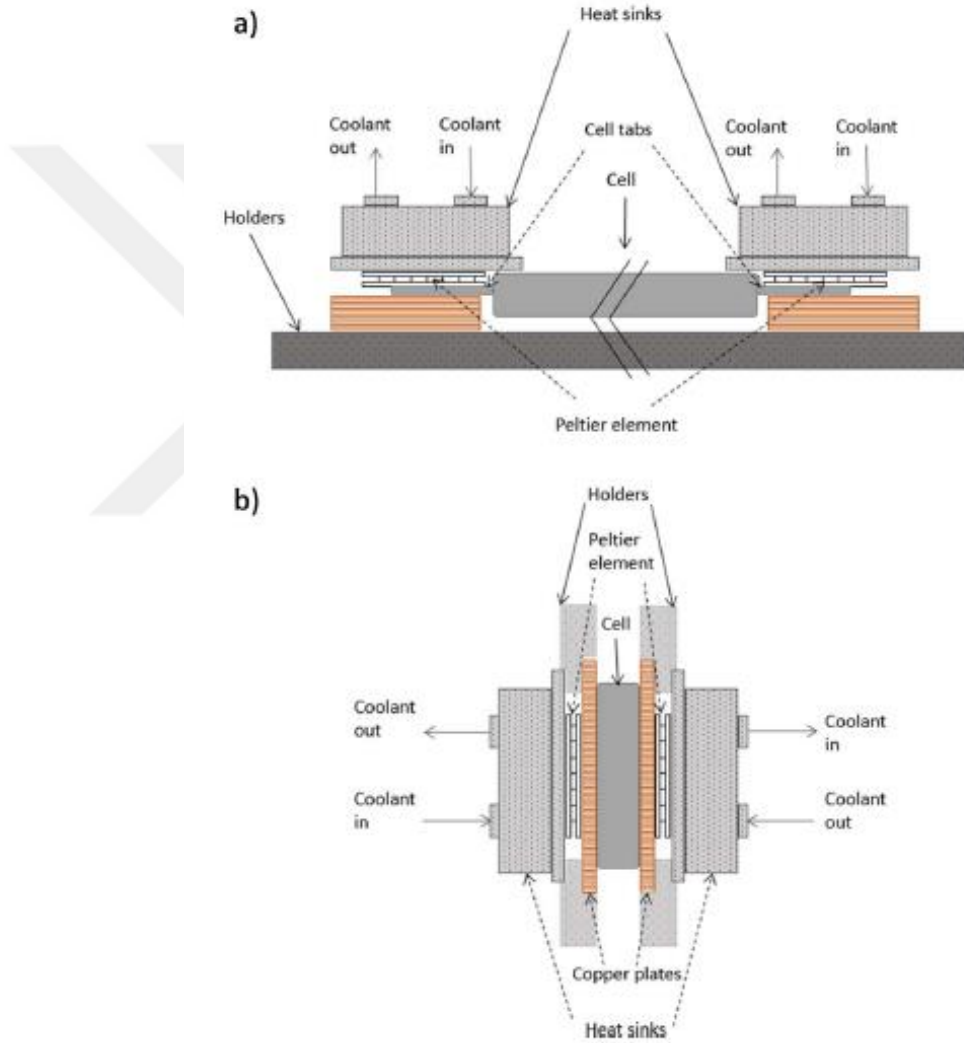
Literatürde hibrit soğutma ortamları kullanan sistemlere yönelik çalışmalar da mevcuttur. Farklı soğutucu akışkanları birbirine temasını engellemek üzere özel batarya modül geometrileri kullanılan bu çalışmalardan birisinde doğal ve zorlanmış hava ile soğutmanın yanı sıra kılcallık etkisi kullanılarak su da sisteme entegre edilmiştir. Deneysel

Batarya hücrelerinin farklı aralıklarla düz dizilimine ilişkin analizler ile minimum hacim oluşturacak şekilde silindirik pillerin açılı diziliminin analizine yönelik literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Alt ve üst yüzeylerden plakalı soğutma, yanal yüzeyler arasından geçen soğutucu kanallar ve bu kanalların optimum konfigürasyonları sıvı, gaz ve nano-akışkan ortamlar için analiz edilmiştir (Jarrett ve Kim, 2011), (Cao ve diğ., 2020), (Al-Zareer ve diğ., 2019), (Lazrak ve diğ., 2018), (Zhao ve diğ., 2019), (Wiriyasart ve diğ., 2020). Ayrıca Şekil 2.9'daki gibi lityum iyon pillerin farklı adetlerinin üçgen, dörtgen, beşgen ve altıgen prizma ile silindirik yapılar biçiminde oluşturduğu modüllerin nano-akışkan ile soğutulmasına yönelik mukayeseli analizler de yapılmıştır (Sefidan ve diğ., 2017).



20

Modül ve paket geometrilerinin termal yönetim sistemleri ile ilişkisine ilişkin önemli bir çalışma ise Şekil 2.10 ile şematize edilmiştir. Bu çalışmada batarya hücresinin yan yüzeyinin soğutulması ile taban ve tavan (kutup) yüzeylerinin soğutulması arasında fark olduğu ortaya konulmuştur. Kutup yüzeylerinden yapılan soğutma işleminin yan yüzeyden yapılan soğutma işlemine göre batarya ömrü üzerinde olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir (Hunt ve diğ., 2016).



Şekil 2.10 Silindirik hücrenin a) kutuplardan b) yan yüzeyinden soğutulması
(Hunt ve diğ., 2016)

Hava ile soğutma sağlayan batarya termal yönetim sistemlerinin performansının tespitinde bataryaların ulaştığı maksimum sıcaklık ve paket içi sıcaklık dağılımı en önemli

iki parametre olup, performansı etkileyen başlıca unsurlar hava akış yönü, modül yapısı ve hücreler arası boşluk şeklinde sıralanabilir (Sharma ve Prabhakar, 2021).

Yapılan bir çalışmada silindirik lityum iyon pil modülü için hava dağıtım borularına dayalı yeni bir soğutma stratejisi önerilmiştir. Çalışmada, pil modülünün maksimum sıcaklığının, giriş basıncının artırılmasıyla etkili bir şekilde azaltılabileceği ve bunun sonucunda güç tüketiminde önemli bir artışa neden olabileceği gösterilmiştir (Zhou ve diğ., 2019). Başka bir sayısal çalışma, açık hücreli alüminyum köpük ısı emici ile zorlanmış hava soğutmasının birlikte kullanılmasını önermektedir. Alüminyum köpüğün gözenekliliğinin azaltılması, pillerin ortalama yüzey sıcaklığını düşürürken, sıcaklık farkını artırmaktadır. Sıcaklık dağılımını homojenize etmek için çeşitli tasarımlar yapılmış ve iyileştirmeler sağlanmıştır (Wang ve diğ., 2021).

Batarya termal yönetim sistemlerinde havanın soğutma performansını artırmak için Yang ve diğerleri tarafından biyotik yüzey yapısına sahip bir radyatör önerilmiştir. Çalışmada, üç farklı kanatçık kesiti (dikdörtgen, yamuk ve elips) ve farklı kalınlık, yükseklik ve uzunluk değerleri için maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı hesaplanmıştır. Optimum parametreler, maksimum sıcaklığı 313 K ve sıcaklık farkını 5 K içinde koruyabilmektedir (Yang ve diğ., 2020). Chen ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, pil paketleri için hava soğutma konseptinin ayrıntılı hücre düzeyinde termal performansı ve basınç düşüşü etkisi için 3 boyutlu HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modelleri oluşturulmuştur. Ancak pim kanatçıkların kanal içinde ve kanal dışında olduğu her iki konfigürasyon da termal gereksinimleri karşılamamıştır (Chen ve diğ., 2017).

Bir diğer sayısal çalışmada, karşılıklı yön değiştiren hava akışı analiz edilmiş ve karşılıklı akışın pil sisteminin hücre düzeyinde sıcaklık farkını yaklaşık 4 °C (%72) ve maksimum hücre sıcaklığını tek yönlü akışa kıyasla 1,5 °C azaltılabileceğini göstermiştir (Mahamud ve Park, 2011). Li ve diğerleri ise, optimize edilmiş bir tasarımı belirlemek için 18 farklı hava akışı konfigürasyonunun çalıştırıldığı bir U tipi BTYS'yi sayısal olarak analiz etmiş, giriş sıcaklığının soğutma kanallarındaki maksimum sıcaklığı doğrudan etkilediğini ancak kanallar arasındaki sıcaklık farkı üzerinde daha az etkisi olduğunu göstermiştir (Li ve diğ., 2021). Fan ve diğ. (2019), hava soğutmalı bir lityum iyon pil modülünün termal yönetimi üzerine parametrik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sıcaklık artışının komşu hücreler arasındaki boşluk aralığının azaltılmasıyla düşürülebileceği gösterilmiştir. Sıcaklığın homojen dağılımı yüksek akış hızlarında ve hücreler arasında küçük boşluklar ile sağlanabilmektedir. Benzer şekilde, Hoş ve Türkakar (2021), hava soğutmalı 6S6P pil paketi

için (toplamda 36 Lityum-iyon 26650, LiFePO₄ pil) sistemi için iki boyutlu bir hidrodinamik ve termal analiz gerçekleştirmiştir.

Wang ve diğ. (2014) tarafından kübik, dikdörtgen, silindirik ve altıgen formlardaki modüller cebri hava soğutması için araştırılmıştır. Hizalanmış ve kademeli hücre yapılandırmaları Yang ve diğ. (2015) tarafından hava soğutma sistemi için karşılaştırılmış ve geometrik olarak optimize edilmiştir. Bu çalışmalarda tasarım gereksinimlerini (maksimum sıcaklık artışı, sıcaklık düzgünlüğü, güç gereksinimi ve soğutma indeksi) dengeleyerek, hizalanmış düzenleme için uzunlamasına aralık, enine aralık ve hava giriş genişliğinin optimum kombinasyonu açısından uygun bir çözüm elde edilmiştir.

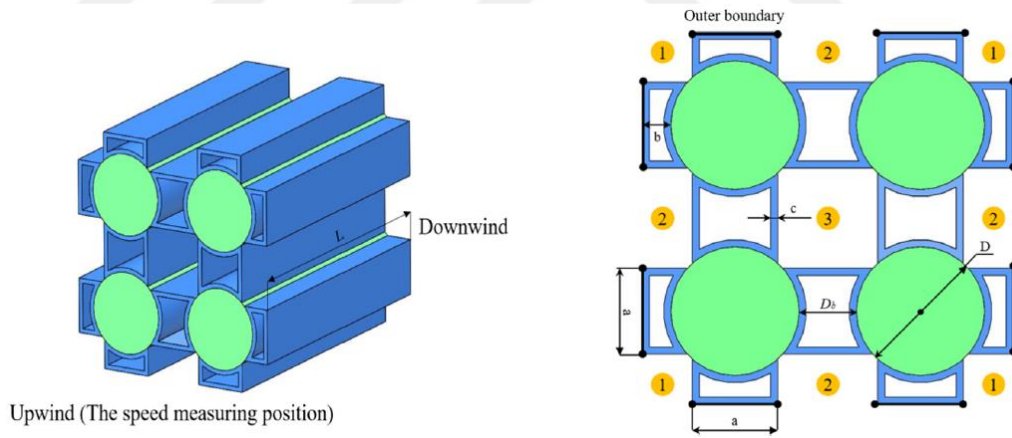
Jiaqiang ve diğ. (2018), 60 hücreli bir pil modülünün termal özelliklerini araştırmıştır. Modülün sıcaklık dağılımları geçici simülasyon kullanılarak tartışılmış ve sonuçlar, farklı taraflarda bulunan giriş ve çıkışların soğutma performansının aynı taraftakinden daha iyi olduğunu ve deflektör plakasının kullanımının termal performansı büyük ölçüde artırabileceğini göstermiştir.

Batarya termal yönetim sistemlerinde kanat uygulamaları sıklıkla faz değiştiren malzemelerin düşük ısı iletkenliklerinin sebep olduğu olumsuz etkileri azaltmak için önerilmiştir. Faz değiştiren malzemeler ile kanat uygulamalarının birlikte kullanımı çeşitli çalışmalarda incelenmiştir (Moaveni ve diğ., 2024), (Aslan ve diğ., 2022). Literatürde yer alan çalışmalarda farklı ve yenilikçi kanat geometrileri için termal performans iyileşmeleri deneysel ve sayısal olarak gözlenmiştir. Düz ve yay biçimindeki kanatların performansı (Sun ve diğ., 2021) ve boyuna ve halka biçimindeki kanatların sağladığı termal performans (Sun ve diğ., 2019) incelenmiş, her iki çalışmada da kanatların önemli derecede iyileşme sağladığı gözlenmiştir. Sayısal olarak analiz edilen bir parametrik çalışmada, bataryayı saran faz değiştiren malzeme içine bakır kanatlar eklenmiş ve batarya-FDM ikilisi ortam havası ile soğutmaya tabi tutulmuştur. 3 farklı faz değiştiren malzeme için farklı kanat sayıları ve farklı deşarj hızlarında yürütülen çalışmalarda 12 adet kanat kullanımı durumunda ortalama batarya sıcaklığında 15 °C düşüş gözlenmiştir. Paket içi sıcaklık farkı kanatsız durumda 5,9 °C iken 12 kanat kullanımı durumunda bu fark 1,9 °C seviyesine indirilmiştir (Türkakar ve Hoş, 2023). Yapılan bir başka çalışmada ise 9 farklı kanat tipi, faz değiştiren malzeme ile birlikte kullanılmış ve aynı hacim ve kütlede kanat ve faz değiştiren malzeme kullanılmakla birlikte önemli düzeyde termal performans artışı sağlanmıştır. Optimum tasarıma sahip kanatlar sıcaklığı 45°C seviyesinde tutabilmiş ve ısı transfer kapasitesi yaklaşık %15

iyileştirilmiştir. Böylelikle sistemin toplam ağırlığı %10 dolayında azaltılmıştır. (Zhang ve diğ., 2023)

Kanat uygulamaları için yapılan sayısal ve deneysel çalışmalarda, silindirik pili radyal olarak saran halka biçiminde kanat dizilerinin pil sıcaklığı üzerinde %39,23 düzeyinde iyileşme sağlanmıştır (Chaudhari ve diğ., 2024). Benzer şekilde silindirik pillerin yanal yüzeylerini çevreleyen ince kanatların soğutma performansı üzerindeki etkileri %18,71 olarak saptanmıştır (Padalkar ve diğ., 2024).

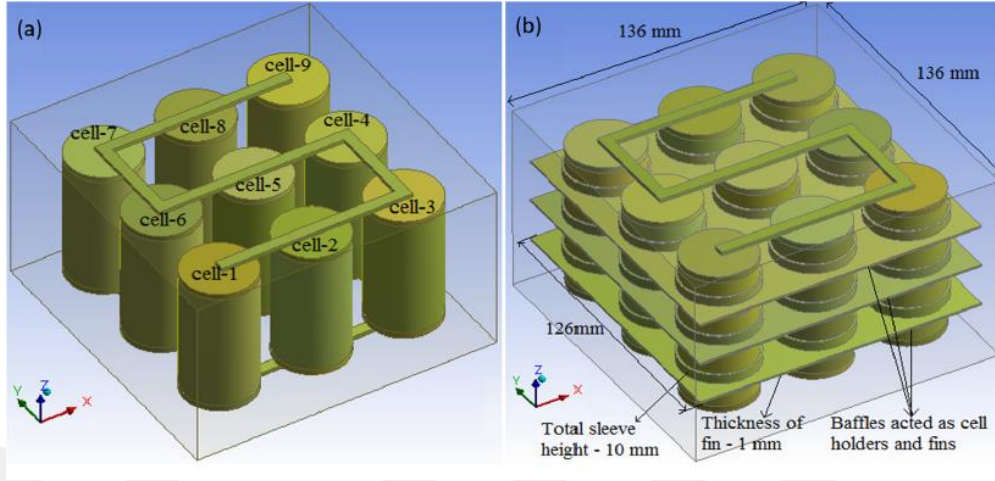
Hava ile soğutma uygulamalarında kanat kullanımına ait bir çalışmada, dört silindirik batarya hücresine Şekil 2.11'deki gibi eklenen boşluklu yapıya sahip alüminyum kanat yapısının üstten bir fan yardımıyla soğutulması durumu sayısal ve deneysel olarak analiz edilmiştir. 4C hız ile yapılan deşarjlarda, 1,5 m/s hava giriş hızıyla uygulanan taşınım sonucunda maksimum sıcaklık 48,5 °C ve maksimum sıcaklık farkı 4,8 °C olarak tespit edilmiştir. Optimum kanat genişliği komşu piller arasındaki mesafenin 4 mm olduğu durum için gözlenmiş olup, bu konfigürasyon pil başına 13,2 gr. kanat ağırlığı getirmektedir (Qin ve diğ., 2021).



Şekil 2.11 Dört silindirik pil ve önerilen kanat yapısı (Qin ve diğ., 2021)

Kanatların hava ile soğutma uygulamalarındaki etkinliğini araştırmaya yönelik bir başka çalışmada batarya hücrelerini bir arada tutan ve genellikle plastik malzemeden üretilen pil tutucuların aynı zamanda kanat gibi davranmasına yönelik bir model geliştirilmiştir. Şekil 2.12'de 9 pilin 3 kanat yapısı ile gösterimi şematize edilmiştir. Yapılan sayısal çalışmada C, 2C ve 3C deşarj hızlarında kanatsız yapının sırasıyla 301.5 K, 303.9 K ve 308.8 K maksimum sıcaklıklara eriştiği, kanat kullanımı durumunda ise maksimum sıcaklıkların

300.6 K, 302.1 K, ve 304 K olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kanatların sıcaklık dağılımı üzerinde de olumlu etkileri ölçümlenmiştir (Kummitha, 2023).

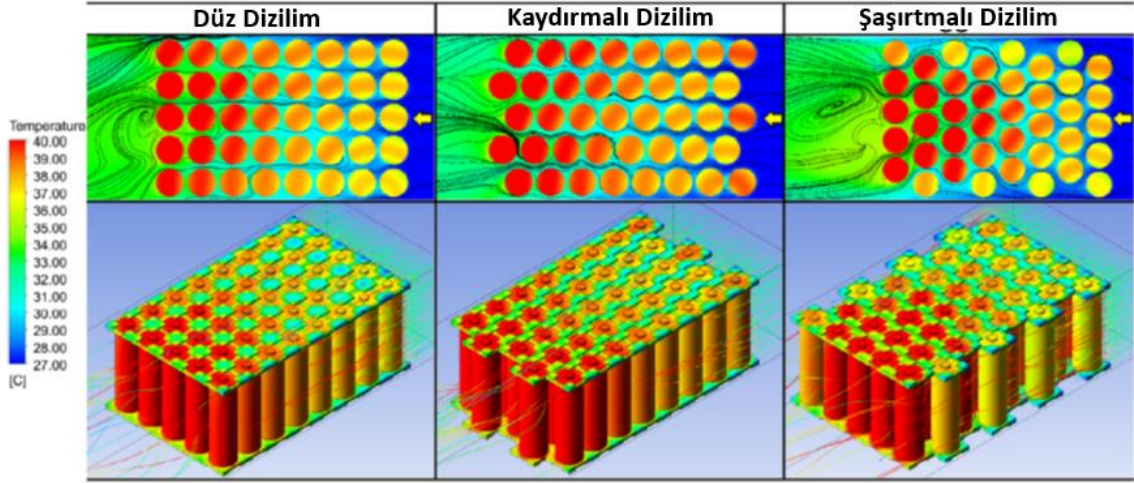


Şekil 2.12 Dokuz hücreli pil paketi a) kanatsız b) kanatlı yapı (Kummitha, 2023)

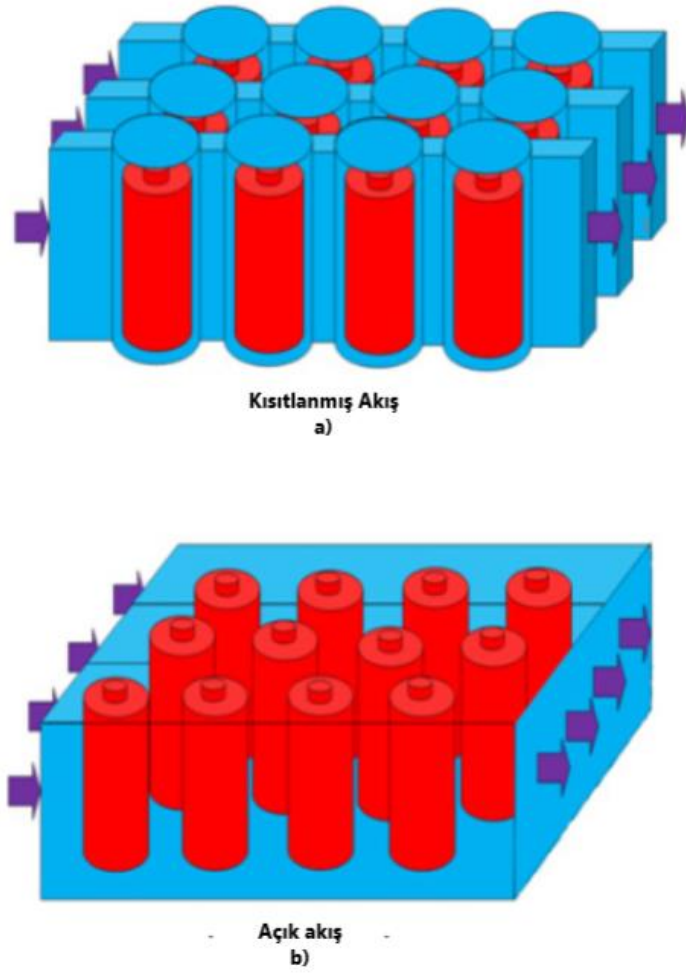
Özellikle hava ile soğutma sistemlerinde batarya hücrelerinin dizilim şekilleri, aralarındaki mesafeler ve hava akış yönü de oldukça önemlidir. Batarya hücrelerinden elde edilen deneysel sonuçların sayısal sonuçlarda toplulaştırılmış şekilde (lumped) kullanılması prensibine dayandırılan bir çalışmada düz dikdörtgen, şaşırtmalı dikdörtgen, altıgen ve kare batarya paketleri farklı hızlarda hava akımları ile soğutulmuş ve en iyi sıcaklık sonuçları, havanın üstten giriş, alt kenarlardan çıkış sağladığı kare dizilim için elde edilmiştir (Bamrah ve diğ., 2022).

Şekil 2.13'deki gibi hücrelerin dizilim şekillerinin hava soğutma performansına etkisinin incelendiği bir çalışmada ise düz, kaydırmalı ve şaşırtmalı dizilimler kıyaslanmıştır. Kaydırmalı dizilimin %6,3 daha fazla yer gereksinimine karşın, %43,1 daha az güç tüketimi sağladığı gözlenmiştir (Saechan ve Dhuchakallaya, 2021).

Hücre diziliminin etkisini araştırmaya yönelik çalışmalardan bir diğ erinde ise, batarya paketi içindeki hücreler Şekil 2.14'deki gibi açık ve hapsedilmiş şekilde hava akımına maruz bırakılmış, hava akımının düzenlendiği hapsedilmiş durum için 6,19 °C düzeyine ulaşan bir sıcaklık avantajı elde edilmiştir. Bu konfigürasyon sistemin ağırlığını bir miktar artırmış olsa da endüstriyel uygulamalarda kolaylık da sağlamaktadır (Jilte ve diğ., 2019).



Şekil 2.13 Hücrelerin farklı dizilim türleri için termal etkiler (Saechan ve Dhuchakallaya, 2021)



Şekil 2.14 Hapsedilmiş ve açık batarya hücrelerine hava akışı (Jilte ve diğ., 2019)

Modül içindeki bataryalar arası mesafelerin olabildiğince az olması paketin enerji yoğunluğunu maksimize etmek bakımından önemlidir. Ancak hava ile soğutma sistemlerinin performansını artırmak üzere enine ve boyuna aralıklar için bir optimizasyon çalışması gereklidir. Nitekim bu konuda yapılan bir sayısal çalışma; hava akış yönü dikkate alınarak, enine aralıkların soğutma verimliliği faktörü üzerinde, boyuna aralıkların paket içi ısı dağılımı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir (Kumar ve Chaudhari, 2021).

Batarya Termal Yönetim Sistemleri batarya hücrelerinin ömür ve performansının iyileştirilmesinin yanı sıra güvenlik için de son derece önemlidir. Bataryalarda ve dolayısıyla elektrikli araç ve taşınabilir cihazlarda yangına sebep olan durumların %90'ı hücre içi kısa devrelerden meydana gelmektedir. Separatörün zarar görmesi nedeniyle anot ve katotun birbirine teması şeklindeki bu durum separatörün ezilmesi veya delinmesi ile sonuçlanabilecek mekanik bir müdahale, elektriksel olarak dentrit büyümesi veya yüksek sıcaklıklara ulaşılması sonucunda ortaya çıkar. Batarya yönetim sistemleri marifetiyle yangın oluşmaması veya etkisinin kısıtlı kalması noktasında pek çok strateji geliştirilmişse de termal yönetim sistemleri sıcaklık değerlerinin kontrolü noktasında vazgeçilmez bir görev üstlenmektedir (Feng ve diğ., 2020).

2.2.5. Batarya ısıtma teknolojileri

Ortam sıcaklığının çok düşük seyrettiği iklimlerde kullanılan araçların bataryaları için ön ısıtma uygulanabilmektedir. Bataryaları soğuk hava koşullarında önceden ısıtmak, lityum iyon pillerin performansını ve ömrünü artırmak için önemli önlemlerden biridir. Genel olarak, ön ısıtma, ısı kaynağının bataryaya göre konumuna bağlı olarak harici ısıtma ve dahili ısıtma olarak ayrılabilir. Harici ısıtma yöntemleri genellikle düşük sistem karmaşıklığı, uzun ısıtma süresi ve yüksek enerji kaybı ile karakterize edilir; dahili ısıtma yöntemleri daha kısa bir ısıtma süresi, daha yüksek bir ısıtma verimliliği ve termal kaynaklı yaşlanma üzerinde daha az etki sağlayabilir, ancak daha yüksek güvenlik riski taşır (Wu ve diğ., 2020).

Harici ısıtma sistemleri iletimle ve taşınım ile ısıtma olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Bir rezistans yardımıyla ısıtma, Peltier etkisi ile ısıtma, ısı borusu ile ısıtma, yanma yardımıyla ısıtma ve faz değiştiren malzemeler kullanılarak sağlanan ısıtma türleri iletimle ısıtma kapsamında değerlendirilmektedir. Havayla, sıvıyla ve ısı pompası yardımıyla sağlanan ısıtma türleri ise taşınım ile ısıtma kapsamındaki yöntemlerdir. Dahili ısıtmanın ise, dahili kendi kendini ısıtma, karşılıklı ısıtma, kendi kendine ısınan lityum iyon pil ve alternatif akım ısıtması şeklinde çeşitleri mevcuttur (Hu ve diğ., 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Pek çok bilimsel çalışmada olduğu gibi bataryaların termal analizi çalışmalarında da sayısal ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Batarya termal analizlerine yönelik deneysel çalışmalarda, ortam sıcaklık ve nemi gibi ortam koşullarının oluşturulmasının zorluğu, soğutucu akışkan hız ve debisi gibi proses koşullarının tesisindeki güçlükler ve şarj ve deşarj sürelerinin uzun olması gibi sebeplerle sayısal yöntemler tercih edilmektedir.

Sayısal yöntemlerde her bir pil hücreesine sabit veya değişken, yığın şeklinde bir ısı transferi değeri belirlenmesi ve hücre ve paket düzeyindeki termal analizlerin üretilen bu ısı miktarına göre yürütülmesi esasına dayanılabileceği gibi pil hücresinin içinde gerçekleşen elektrokimyasal proseslerin ve dolayısıyla ısı üretiminin modellenmesi yöntemi de benimsenebilir. Sayısal çalışmalar, deneysel çalışmalara geçilmeden önce deney tasarımı aşamasını daha kolay tanımlayabilmek için kullanılabileceği gibi parametre sayısının artırılması ve her bir parametre için farklı değerlerin denenebilmesi amacıyla da tercih edilebilir.

Bu çalışmada, paket içerisindeki her bir pil hücresinde üretilen ısı enerjisinin tespitine yönelik olarak elektrokimyasal süreç modellenmiş olup, eş zamanlı olarak yapılan termal analize göre maksimum pil sıcaklıkları ile paket içi maksimum sıcaklık farkları tespit edilmiştir. Çalışmada silindirik lityum iyon batarya hücrelerine eklenecek farklı geometrilerdeki kanatçıkların batarya üzerindeki termal etkileri incelenmiştir. Literatür araştırması bölümünde genişçe ele alındığı üzere, kanatlar genellikle batarya paketlerine bütünsel olarak uygulanmakta olup, hücre düzeyindeki uygulamalar son derece kısıtlıdır. Bu çalışmada, piyasada 18650 koduyla bilinen, silindirik pil modeli seçilerek, bu pil hücresinin yanal yüzeyine doğrudan eklemenecek farklı tür ve ebatlardaki kanatçıkların termal etkileri analiz edilmiştir.

3.1. Matematiksel Arkaplan

Bu çalışmada, silindirik bir pilin ve pil paketinin üç boyutlu modelleri oluşturulmuş, sonlu elemanlar yöntemine dayanan HAD yazılımı FloEFD kullanılarak termal davranışları araştırılmıştır. Pilin ısı gücü, SoC ve pil sıcaklığına bağlı olduğundan zamana bağlı bir simülasyon modeli uygulanmıştır. Modelin uygulanabilmesi için gerekli matematiksel denklem ve bağıntılar aşağıda açıklanmıştır;

Pil paketi için zamana bağlı süreklilik, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla (\rho_a \cdot \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_a \vec{V})}{\partial t} + \nabla(\rho_a \vec{V} \cdot \vec{V}) = -\nabla p_a + \frac{\mu}{\rho_a} \nabla^2 \vec{V} + \rho_a g \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_a c_a T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a c_a \vec{V} T) = \nabla \cdot (k_a \cdot \nabla T) \quad (6)$$

Lityum iyon batarya için ısı iletim denklemi silindirik koordinatlar kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\rho_b \cdot c_{p,b} \cdot \frac{\partial T_b}{\partial t} = \dot{Q}_{gen} + \frac{k_{b,r}}{r} \frac{\partial(r \cdot \frac{\partial T_b}{\partial r})}{\partial r} + \frac{k_{b,\theta}}{r^2} \frac{\partial^2 T_b}{\partial \theta^2} + k_{b,z} \frac{\partial^2 T_b}{\partial z^2} \quad (7)$$

Lityum iyon pillerin ısı üretim hızı; $\dot{Q}_{gen}$; polarizasyon ve Joule ısılarının, yani tersinir ve tersinmez ısıların toplamına yaklaşık olarak eşittir (Jiaqiang ve diğ., 2018) ve bu durum;

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{rev} + \dot{Q}_{irr} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebilir. İlk terim $\dot{Q}_{rev}$, yüksek deşarj oranlarında sıklıkla ihmal edilen tersinir ısı iken ikinci terim $\dot{Q}_{irr}$, tersinmez ısıyı temsil eder ve;

$$\dot{Q}_{irr} = I(E_{OC} - E) = I^2 R_e \quad (9)$$

biçiminde tanımlanabilir. Burada, E_{OC} açık devre voltajı, E çalışma voltajı, I deşarj akımı ve R_e pilin eşdeğer direncidir. Eşdeğer direnç, pil sıcaklığı ve şarj durumu (SoC) ile değişmekte olup, deneysel olarak elde edilebilir. Lityum iyon pillerin deşarj sırasında ürettiği ısı;

$$Q_{gen} = n \int \dot{Q}_{gen} dt = n \int I^2 R_e dt \quad (10)$$

şeklinde tanımlanabilir. n hücre sayısı olup, hava soğutmalı pil paketi için enerji denklemi;

$$Q_{gen} = Q_d + Q_b + Q_s \quad (11)$$

şeklindedir.

Q_d hava tarafından çekilen ısı, Q_b bataryada depolanan ısı ve Q_s elektrik bağlantıları vb. hava harici ortama aktarılan kayıp ısı olup

$$Q_d = \int c_a \rho_a W H (T_o - T_i) V_a dt \quad (12)$$

ve

$$Q_b = n c_b m_b \Delta T_{ort} \quad (13)$$

şeklinde tanımlanır (Fan, ve diğerleri, 2019).

Kanat üzerinde seçilen diferansiyel bir eleman üzerinde enerjinin korunumu eşitliği kurulacak olursa elemene iletilen ısı, elemenden dışarıya iletilen ve taşınım ile havaya atılan ısıya eşit olacağı görülecektir. Buna göre ısı iletkenliğinin ve taşınım ile ısı transferi katsayısının sabit kabul edildiği, radyasyonun ihmal edildiği durum için kanat genel denklemi;

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \cdot \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \cdot \frac{h}{k} \cdot \frac{dA_s}{dx} \right) \cdot (T - T_\infty) = 0 \quad (14)$$

şeklindedir. Bu genel denklem;

a) Sabit kesitli kanatlar için;

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \left(\frac{hP}{kA_c} \right) \cdot (T - T_\infty) = 0 \quad (15)$$

şeklinde özelleştirilebilir.

$$\theta(x) \equiv T(x) - T_\infty \text{ ve}$$

$$m^2 = \frac{hP}{kA_c}$$

olmak üzere Eşitlik 15 doğrusal, homojen, ikinci dereceden sabit katsayılı bir diferansiyel denkleme dönüştürülebilir ve;

$$\theta(x) = C_1 \cdot e^{mx} + C_2 \cdot e^{-mx} \quad (16)$$

genel çözümüne ulaşılabilir.

b) Değişken kesitli kanatlar için; genel denklemin çözümü çok daha karmaşık olup fiziksel modelde kanat kesit alanı yarıçapa bağlı olarak değiştiğinden Eşitlik 15’de x yerine r yazılarak ve örneğin halka tipi kanat için kanat yüzeyi $2 \cdot \pi \cdot (r^2 - r_1^2)$ yerine konulmak suretiyle;

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \left(\frac{1}{r} \right) \frac{dT}{dr} - \left(\frac{2h}{kt} \right) \cdot (T - T_\infty) = 0 \text{ ve } m^2 = 2h/kt$$

dönüşümü yapılarak modifiye edilmiş sıfırıncı dereceden bir Bessel denklemi elde edilebilir ve genel çözüm olarak;

$$\theta(r) = C_1 \cdot I_0(mr) + C_2 \cdot K_0(mr) \quad (17)$$

eşitliğine ulaşılabilir. Burada I_0 ve K_0 sırasıyla modifiye, birinci ve ikinci tür Bessel fonksiyonlarıdır (Incropera ve DeWitt, 1996).

3.2.Sayısal Yöntem

Bir bataryadaki kimyasal, termal ve elektriksel süreçlerin gelişimini sayısal olarak tahminlemek için iki model kullanılır:

1) *Tek potansiyelli deneysel pil modeli*

Tek Potansiyelli Deneysel Pil Modeli, akım toplayıcının, elektrotların ve seperatörün geometrisinin tamamen çözüldüğü durumlar için elverişlidir. Bu model, tek bir pil hücresindeki elektrot ölçeği tahminleri için en uygundur. Ancak, bu model, özellikle karmaşık geometriye batarya sistemlerindeki tüm elektrokimyasal olayları incelemek için sınırlı kullanıma sahiptir. Dolayısıyla tek bir pil hücresi için bile tüm katmanları net bir şekilde çözmek çok zahmetli ve pahalı olacaktır. Oysa birçok endüstriyel uygulamada, seri veya paralel olarak bağlanmış birden fazla hücreden oluşan pil paketleri kullanılmaktadır.

2) *Çift potansiyelli çok ölçekli çok alanlı (MSMD) pil modeli*

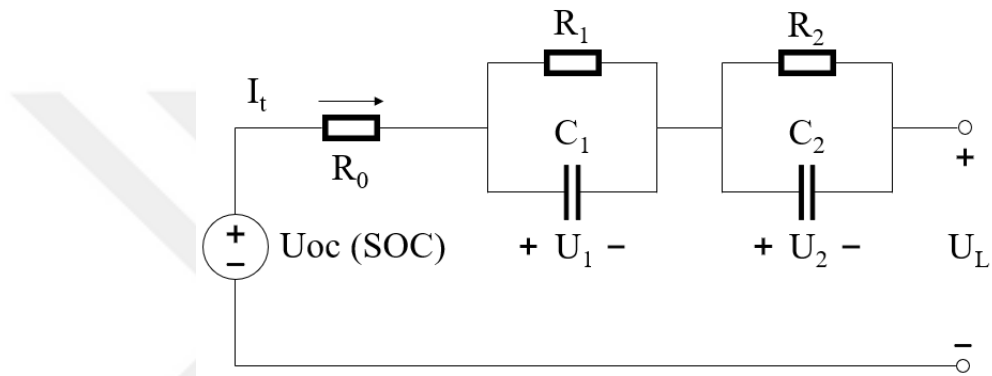
MSMD pil modeli, çok ölçekli çok boyutlu bir yaklaşıma dayanan homojen bir modelle bu sınırlamaları aşar. Bu yaklaşımda, tüm pil ortotropik bir süreklilik olarak kabul edilir; bu nedenle, ağ artık pilin mikro yapısıyla sınırlı değildir. Çeşitli analiz gereksinimlerine uyulması için, modelde üç elektrokimyasal alt model geliştirilmiştir;

- Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) deneysel modeli,
- Eşdeğer Devre Modeli (EDM)
- Newman alts Pseudo 2D (P2D) Modeli

Modeller, çeşitli düzenlemelerdeki pil sistemlerinde çeşitli uzunluk ölçeklerine yayılan fiziksel ve elektrokimyasal fenomenleri inceleme esnekliği sunar (ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules Manual., 2015).

Bu çalışmanın sayısal analiz kısmında Eşdeğer Devre Modeli (EDM) kullanılmıştır. Eşdeğer Devre Modeli, batarya deşarj ve şarj süreçlerini simüle etmemize olanak tanımakta olup, ekonomik, çok yönlü ve hem tek bir pil hücresini hem de bir pil paketini simüle etmek için uygundur. Sadece lityum iyon piller için değil, diğer çeşitli katı pil tipleri için de kullanılabilir (Ansys 2021 R2, Theory guide).

EDM, lityum iyon batarya paketinde bulunan elektrik devresini temsil eden, şarj durumuna göre direnç ve kapasitör değerlerini otomatik olarak girerek pil hücresindeki termal ve elektrokimyasal davranışları simüle eden bir modeldir. EDM’lerde genellikle istatistiksel veriler kullanılmasına rağmen, bu çalışmada kullanılan HAD analizi programı Simcenter FloEFD batarya modülünde, bataryaların gerçek şarj/deşarj testlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu test sonuçları, batarya doluluk oranı, sıcaklık, batarya akımı, kapasite ve batarya ömrü gibi durumlara bağlıdır (Baturar, 2023). Bataryaların termal davranışını incelemek için, Thevenin modelinin uygulandığı Eşdeğer Devre Modelinin elektrik devresi şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Batarya analizlerinde kullanılan eşdeğer devre modeline ait elektrik devresi

Bu elektrik devresinde iki gerilim kaynağı bulunmaktadır. İlk gerilim kaynağı bataryanın açık devre gerilimini (ADG), ikincisi ise parazit gerilimleri göstermektedir. Ayrıca, bu modelde oluşturulan elektrik devresinde iki kapasitör (C_1 ve C_2) ve üç direnç (R_0 , R_1 ve R_2) mevcuttur. Elektrik devresinde U_1 , U_2 ve SoC durum değişkenleri olarak isimlendirilir. Eşdeğer devre modelinde kullanılan durum denklemleri;

$$\dot{U}_1 = -\frac{1}{R_1 \cdot C_1} \cdot U_1 + \frac{1}{C_1} \cdot I_t \quad (18)$$

$$\dot{U}_2 = -\frac{1}{R_2 \cdot C_2} \cdot U_2 + \frac{1}{C_2} \cdot I_t \quad (19)$$

$$S\dot{O}C_1 = -\frac{1}{Q_n} \cdot I_t \quad (20)$$

Burada, $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$ ve $S\dot{O}C_1$, sırasıyla U_1 , U_2 ve SoC’un türevleridir. Q_n ise pilindeşarj kapasitesi olup;

$$U_L = UOC(SoC) - U_1 - U_2 - I_t R_0 \quad (21)$$

şeklinde tanımlanır.

Modelin girdileri, şarj durumu ve sıcaklığın fonksiyonu olarak açık devre gerilimi, direnç ve kapasitans değerleridir. FloEFD programında 18650 NCA lityum iyon pilin özgül ısısı veya yoğunluğu gibi özellikleri kayıtlıdır. ADG'nin SoC'ye göre değişimi;

SoC < 0.045 olduğu durum için;

$$ADG = (((((32331380 \cdot SoC - 3874275) \cdot SoC + 171376) \cdot SoC - 3657.520) \cdot SoC + 50.46514) \cdot SoC + 2.753555) \quad (22)$$

SoC ≥ 0.045 olduğu durum için;

$$ADG = (((((21.64633 \cdot SoC + 65.26533) \cdot SoC + 73.65402) \cdot SoC - 37.59461) \cdot SoC + 8.155476) \cdot SoC + 0.3291814) \cdot SoC + 3.284202 \quad (23)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

EDM, lityum iyon batarya paketinde bulunan devrenin şarj durumuna ve sıcaklığa göre dirençlerin (R_0 , R_1 ve R_2) ve kapasitör (C_1 ve C_2) değerlerini otomatik olarak girerek pil hücreesindeki termal ve elektrokimyasal davranışları simüle eder. FloEFD batarya modülünde hesaplamalarda yer alan R_0 , R_1 , R_2 , C_1 ve C_2 'nin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimleri sırasıyla Çizelge 3.1 – 3.5 ile verilmiştir (Simcenter FloEFD 2312.0001, 2023), (Widanage ve diğ. 2016a), (Widanage ve diğ., 2016b).

Çizelge 3.1 R_0 direncinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi

Sıcaklık (K)	273.2	283.2	298.2	318.2
SoC (%)				
10	0.0821 Ω	0.0456 Ω	0.0433 Ω	0.0329 Ω
20	0.0826 Ω	0.0575 Ω	0.0426 Ω	0.0299 Ω
50	0.0718 Ω	0.0486 Ω	0.0354 Ω	0.0273 Ω
85	0.0631 Ω	0.0528 Ω	0.0358 Ω	0.0275 Ω
95	0.057 Ω	0.044 Ω	0.047 Ω	0.0312 Ω

Çizelge 3.2 R_1 direncinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi

Sıcaklık (K)	273.2	283.2	298.2	318.2
SoC (%)				
10	0.0581 Ω	0.0297 Ω	0.0228 Ω	0.00195 Ω
20	0.0679 Ω	0.0234 Ω	0.0039 Ω	0.00119 Ω
50	0.0194 Ω	0.00451 Ω	0.0015 Ω	0.00145 Ω
85	0.0181 Ω	0.00573 Ω	0.0016 Ω	0.00126 Ω
95	0.055 Ω	0.032 Ω	0.0064 Ω	0.0016 Ω

Çizelge 3.3 R₂ direncinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi

Sıcaklık (K)	273.2	283.2	298.2	318.2
SoC (%)				
10	0.118 Ω	0.069 Ω	0.0289 Ω	0.0146 Ω
20	0.0551 Ω	0.0226 Ω	0.0189 Ω	0.0119 Ω
50	0.0353 Ω	0.0201 Ω	0.0154 Ω	0.00998 Ω
85	0.0325 Ω	0.0284 Ω	0.0155 Ω	0.0091 Ω
95	0.0396 Ω	0.0262 Ω	0.0185 Ω	0.0111 Ω

Çizelge 3.4 C₁ kapasitörünün değerinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi

Sıcaklık (K)	273.2	283.2	298.2	318.2
SoC (%)				
10	7.75 F	4.95 F	11,6 F	211 F
20	7.75 F	9.74 F	61,3 F	672 F
50	11.8 F	45 F	600 F	524 F
85	9.94 F	39,4 F	281 F	556 F
95	2.29 F	3,19 F	29.7 F	688 F

Çizelge 3.5 C₂ kapasitörünün değerinin sıcaklık ve SoC'a bağlı değişimi

Sıcaklık (K)	273.2	283.2	298.2	318.2
SoC (%)				
10	37.3 F	101 F	426 F	1100 F
20	541 F	743 F	1050 F	1410 F
50	824 F	1040 F	1530 F	1860 F
85	729 F	715 F	1190 F	1200 F
95	187 F	630 F	892 F	1260 F

Sayısal çalışmada, NCA tipi 18650 kodlu lityum iyon piller seçilmiş olup, FloEFD termal analiz ve akış programı kullanılarak batarya modellemesi ve kanat tasarımı yapılmış, 4S3P bağlantı modeline sahip batarya paketi için farklı koşullar altında elektrokimyasal ve termal analizler gerçekleştirilmiştir. Kare kesitli, pim şeklinde, halka şeklinde, trapezoid kesitli ve ağ yapıda kanatlara sahip batarya paketleri ile kanat içermeyen hücrelerin oluşturduğu batarya paketleri ayrı ayrı şarj ve deşarj döngülerine tabi tutulmuş, voltaj ve yüzey sıcaklık değerleri ile ortama yaydıkları ısı akıları analiz edilmiştir.

4S3P biçiminde batarya paketleri, düz ve şaşırtmalı hücre dizilimleri için oluşturularak 2C deşarj hızı ile yürütülen sayısal denemeler doğal taşınım koşullarının yanı sıra, çapraz hava akımı altında da gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ortam ve materyal başlangıç sıcaklıklarının 20 °C ve 30 °C olduğu durumlar analiz edilmiştir.

Sayısal çalışmada kullanılan değişkenler ve değerleri/türleri Çizelge 3.'da listelenmiştir.

Çizelge 3.6 Sayısal çalışmada kullanılan değişkenler ve değerleri

Değişkenler	Değişkenlere ait değerler
Batarya Modeli	• 2S (2 Seri pil bağlantısı) • 4S3P (4 seri, 3 paralel pil bağlantısı)
Hücre Dizilim Türü	• Düz Dizilim • Şaşırtmalı Dizilim
Isı Taşınım Türü ve Koşullar	• Doğal Taşınım Ortam ve tüm materyaller için başlangıç sıcaklığı: 20 °C • Zorlanmış Taşınım Hava Giriş Hızı: 2 m/s, Ortam ve tüm materyaller için başlangıç sıcaklığı:20 °C • Zorlanmış Taşınım Hava Giriş Hızı: 4 m/s, Ortam ve tüm materyaller için başlangıç sıcaklığı: 30 °C
Kanatçık Geometrisi	• Kare kesitli • Kesik Konik Pim şeklinde • Halka şeklinde • Trapezoid kesitli • Ağ Yapıda
Deşarj Hızı	2C
Batarya Hücresi	NCA 18650
Kanatlar	Alüminyum
Bağlantı Elemanları	Nikel
Batarya Paketi Kutusu	Paslanmaz Çelik (AISI 321)
Hücre Doluluk Oranı	%100

Lityum iyon batarya hücrelerinin hava kullanılarak termal yönetimleri konusunda en önemli koşullardan birisi de ortam sıcaklığıdır. Elektrikli araçlar, dünyanın pek çok coğrafyasında kullanılmaya aday olmakla birlikte ortam sıcaklığı, nem, aşırı yağış ve sellerden korunma hali, kuraklık ve tozlanma gibi sebeplerden dolayı araç modellerinde farklı tasarımlara gidilebilmektedir. Bu çalışmada, ortam sıcaklığı olarak 20 °C ve 30 °C koşulları benimsenmiş, ortam sıcaklığının 30°C düzeyine çıkacağı durumlarda doğal taşınımın yeterli olmayacağı öngörüsüyle denemeler zorlanmış taşınım altında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sayısını artırmamak adına zorlanmış taşınım denemeleri 2 m/s hava giriş hızı ve 20°C sıcaklık koşulları ile 4 m/s hava giriş hızı ve 30°C sıcaklık koşulları altında yapılmıştır.

Sayısal çalışmada kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

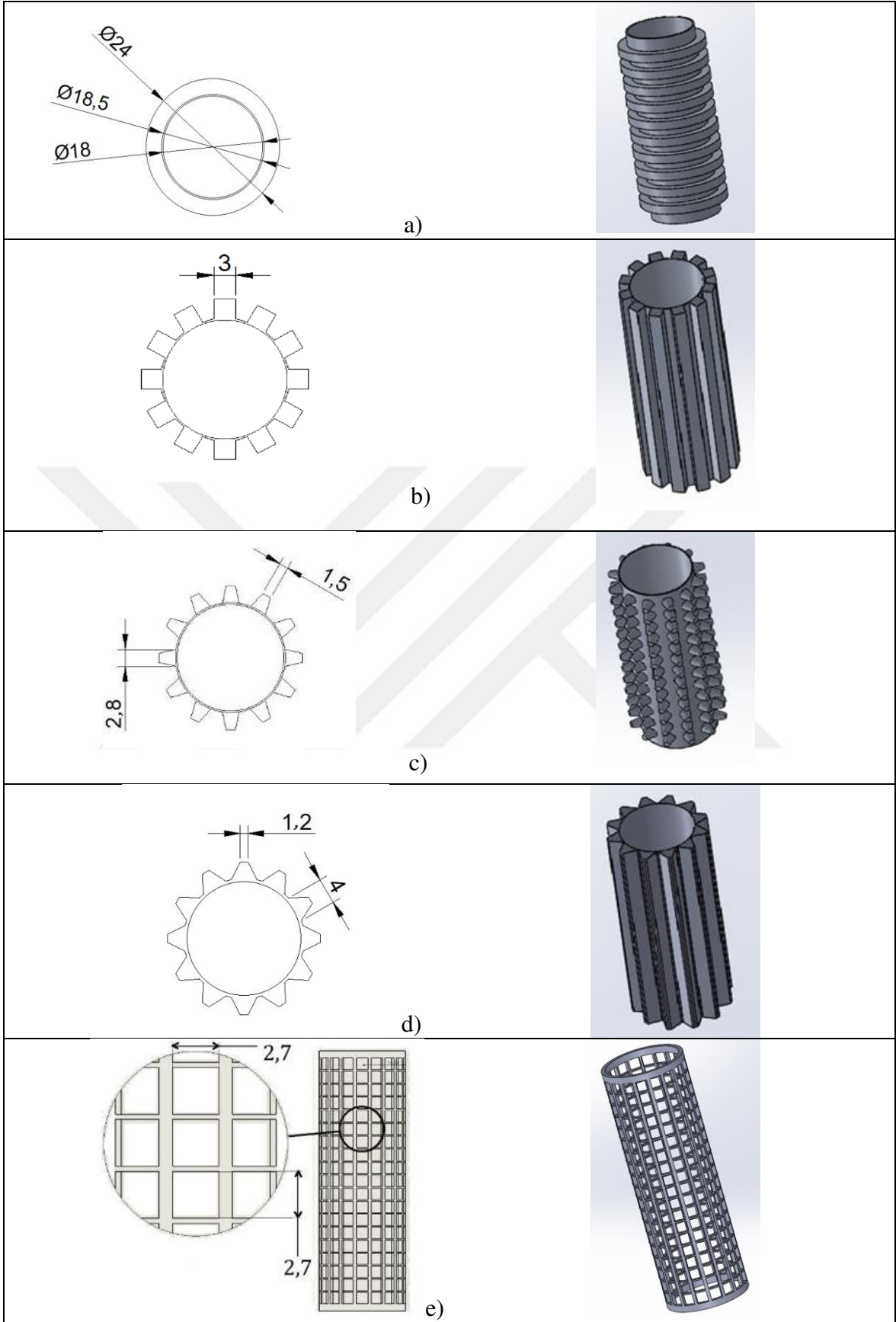
Çizelge 3.7 Çalışmada kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri (Incropera ve DeWitt, 1996), (Simcenter FloEFD 2312.0001, 2023)

Termofiziksel Özellikler	Yoğunluk (ρ) [kg.m ⁻³]	Özgül Isı (c) [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Isıl İletkenlik (k) [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Malzeme			
Hava	1,225	1006,92496 (27 °C)	0,0243073 (0 °C)
Batarya (NCA)	2750	823	3,4 (Eksenel) 28,05 (Radyal)
Alüminyum	2688,9	902 (25 °C)	237 (25 °C)
Paslanmaz Çelik (AISI 302)	7900	500	16.29999
Paslanmaz Çelik (AISI 321)	8100	510 (27°C)	15.1 (27°C)
Nikel	8910	482 (127°C)	90,7 (27°C)

Sayısal çalışmada kullanılan kanatçıkların geometrilerine ilişkin detaylar Şekil 3.2 a-e’de verilmiştir. Ağ yapıdaki kanat tipi hariç olmak üzere bütün kanat tipleri için, pil gövdesini yanal yüzeyi boyunca saran 0,5 mm kalınlığında bir cidar kullanılmış, kanat geometrisi bu cidar üzerine inşa edilmiştir. Zira her bir hücreye takılacak olan kanat gövdesinin yekpare olması pil üzerine kanat montajı için büyük kolaylık sağlamaktadır.

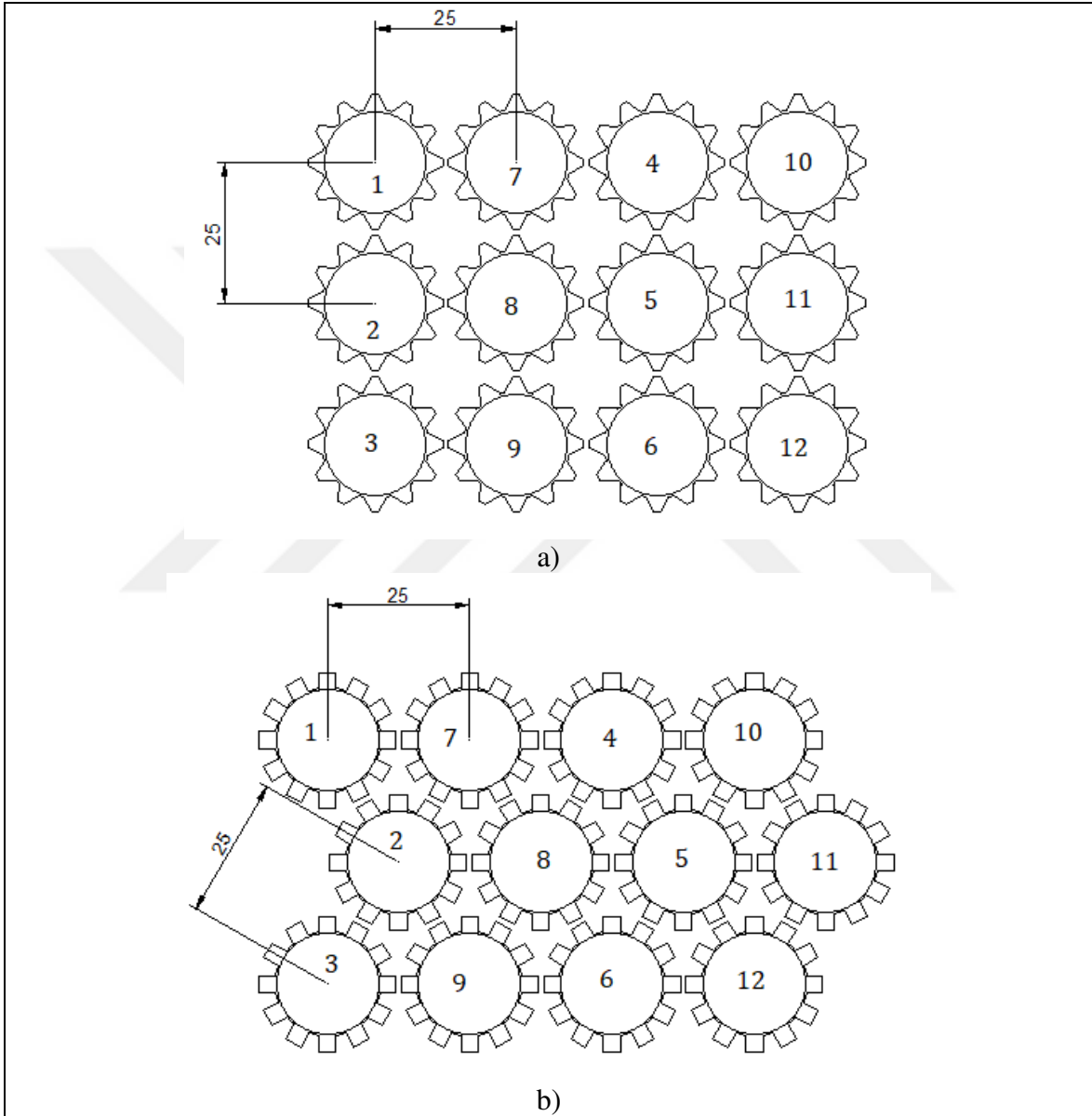
Çalışmada 18650 pil baz alındığından kanat gövdesinin iç çapı için nominal ölçü olarak 18 mm alınmıştır. Ancak 18650 sınıfında yer almakla birlikte farklı pil marka ve modellerinde küçük çap farklılıkları olduğu hususu dikkate alınarak cidar kalınlığı 0,5 mm olarak belirlenmiştir.

Doktora çalışmasında kanat yapısının batarya hücrelerine montajı üzerinde farklı alternatifler oluşturulmuş ve denemeler yapılmış, kanatların her birinin pil yüzeyine ayrı ayrı montajının yapılması pek çok yapısal sorun getirmiştir. Nihai olarak sayısal ve deneysel çalışmalarda Şekil 3.2 ile verilen silindirik ve pil dış yüzeyine sıkı geçme yöntemi ile montajlanacak kanat yapılarının kullanılmasına karar verilmiştir. Kanat uzunluğu tüm kanat türleri için 2,5 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2 Kanat geometrileri; a) Halka b) Kare c) Pim d) Trapezoid kesitli e) Ağ yapılı

Sayısal çalışmada kullanılan batarya paketlerinde hücrelerin dizilimine ait gösterimler ve yapılan pil numaralandırması düz ve şaşırtmalı dizilim için Şekil 3.3 ile verilmiştir. Şekil 3.3 a’da trapezoid kesitli kanatlar, Şekil 3.3 b’de kare kesitli kanatların gösterimine yer verilmiştir. Diğer kanat geometrilerine sahip piller için de aynı dizilim koşulları uygulanmıştır.



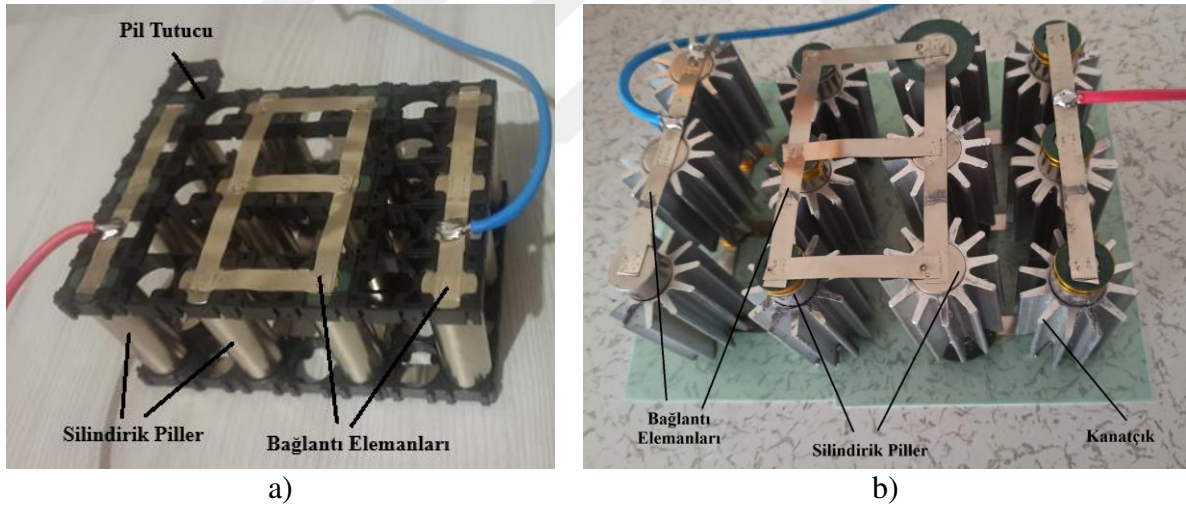
Şekil 3.3 4S3P Konfigürasyonda batarya paketi düz (a) ve şaşırtmalı (b) dizilim

3.3.Deneysel Yöntem

Batarya hücrelerinin genişletilmiş yüzey sağlamak üzere kanat kullanılarak soğutulmasının incelenmesi aşamasında, yapılan sayısal çalışmaların yönlendirmeleri doğrultusunda, alınan sonuçların pratik uygulamada da doğrulanması amacıyla deneysel çalışma yürütülmüştür. Deneysel çalışmada, gerek deney maliyetleri, gerekse deney süreleri dikkate alınarak sadece düz dizilime sahip batarya paketi kullanılmış, kanat içermeyen model ile sayısal çalışmada en iyi sonuçları veren trapezoid kesitli kanada sahip hücrelerden oluşan model şarj ve deşarj işlemlerine tabi tutularak ulaşılan sıcaklık değerleri gözlenmiştir.

Trapezoid kanatçıklar ekstrüzyon yöntemi ile üretilen alüminyum profillerin uygun boylarda kesilerek silindirik bataryalara sıkı şekilde geçirilmesi şeklinde montajlanmış olup temas direncini azaltmak amacıyla termal yapıştırıcı da kullanılmıştır. Pil yüksekliği 65 mm olmakla birlikte pil kutuplarında temas sorunu yaşanmaması için kanat yüksekliği 50 mm şeklinde belirlenmiştir.

Deneysel çalışma için oluşturulan 4S3P bağlantı konfigürasyonundaki kanatsız ve kanatlı batarya paketleri Şekil 3.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.4 4S3P Batarya paketleri; a) kanatsız b) kanatlı

Deneysel çalışmada kullanılan lityum iyon pillere ait teknik spesifikasyonlar Çizelge 3.8 ile verilmiştir. Standart olarak 18650 geometrili, Power-Xtra marka, 2000 mAh kapasiteye sahip piller seçilmiş olup, 6000 mAh (3C) hızda sürekli deşarj edilebilir olmaları nedeniyle bu tercih yapılmıştır.

Çizelge 3.8 Deneysel çalışmada kullanılan lityum iyon pillerin teknik özellikleri

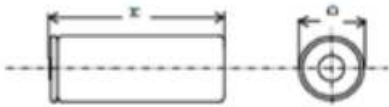
Pil Modeli	Power-Xtra PX18650-20B-3.7V 2000 mAh Li-ion Batarya – 3C
Stok Kodu	900.600.503.320

TEKNİK ÖZELLİKLER

Özellikleri	Değeri	Açıklama
Anma Gerilimi	3,7±0,05 V	0,2C Deşarj
Şarj	Yöntem	CC-CV
Tipik Kapasite	Gerilim	4,2±0,05V
	2000mAh	0,2C Deşarj
Standart Şarj Akımı	1000 mAh (0,5C)	4,2 V gerilim değerine kadar 1000mA sabit akımda şarj, sonrasında 4,2 V sabit gerilimde, akım 20mA veya altına düşüncye kadar şarj.
Standart Deşarj Akımı	400 mAh (0,2C)	2,75 V gerilime kadar 400 mA
Maksimum Deşarj Akımı	2000mAh (1,0C)	1,0C / 2,75 V gerilime kadar 2000mAh
Maksimum Sürekli Deşarj Akımı	6000 mAh (3,0C)	3,0C
Sıcaklık	Şarj	0 - +45°C
	Deşarj	-20 - +60°C
	Depolama	1 yıldan az: -20 ~ +25°C 3 aydan az: -20 ~ +40°C
Ağırlık	43 gr.	Yaklaşık değer
Döngü Testleri	Döngü Testleri için ortam sıcaklığının 23°C ± 2°C aralığında olması gerekir. Hücre CC/CV=0,5C/4,20V koşullarında akım 0,05C değerine düşüncye kadar yapılır, 10 dakika beklenir, sonrasında 2,75 nihai gerilime ulaşınca kadar, 0,5C sabit akım altında deşarj edilir ve bir sonraki şarj/deşarj döngüsü için 10 dakika beklenir. Pil ara verilmeksizin 300 defa şarj/deşarj edilecektir.	

Teknik Resim

Çap	18,7mm
Yükseklik	65,5mm



Fotoğraf



Deneyler esnasında kullanılan batarya paketi kapasite test cihazına ait teknik özellikler Çizelge 3.9’da verilmiştir. Batarya kapasite test cihazları, batarya veya batarya

paketlerinin arzu edilen koşullar altında şarj ve deşarj işlemlerini gerçekleştirmekte, zamana bağlı olarak gerilim, akım, kapasite ve enerji değerlerini ölçümlemekte ve test cihazına özel yazılımın kurulu olduğu bilgisayar aracılığıyla kaydetmektedir.

Çizelge 3.9 Batarya paketi kapasite test cihazı bilgileri

Test Cihazı Özellikleri	
Marka	SoliCELL
Model	ZL-100V 120 A 1 CH
Gerilim	380 V
Güç	36 kW
Ağırlık	200 kg

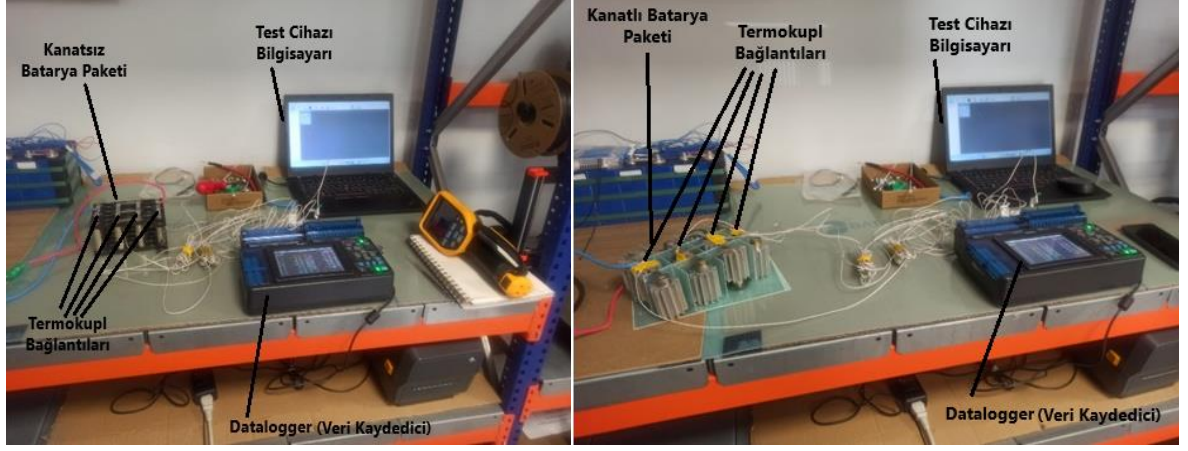
Deney esnasında seçilen bazı hücreler üzerine yerleştirilen termal çiftler aracılığıyla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Deney düzeneğinde, Şekil 3.5’de gösterilen HIOKI marka LR8402-20 Model veri kaydedici kullanılmıştır. Veri kaydediciler, termokupldan gelen elektriksel sinyali alarak belirli bir periyot boyunca sıcaklık verisi olarak kayıt altına almaktadır. Deneyisel çalışmaların yürütüldüğü süreçte, batarya yüzey sıcaklıklarını anlık olarak kontrol etmek amacıyla veri kaydedici frekansı 1 saniye olarak ayarlanmıştır. Bu konfigürasyona göre, batarya paketi içerisindeki seçilen pillerin zamana bağlı sıcaklık değerleri de her saniye başı düzenli aralıklarla kaydedilmiştir.



Şekil 3.5 Deneylerde kullanılan veri kaydedici

Deney düzenekleri Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Şekil 3.6 **Deney düzenekleri a) kanatsız b) trapezoid kanatlı** Şekil 3.6 a’da gösterilen düzenek, kanatsız pillerden oluşan 4S3P batarya paketine, Şekil 3.6 b’de gösterilen trapezoidal kanatlara sahip pillerden oluşan

4S3P batarya paketine ait olup, paketlerin orta sırasında yer alan, 2, 5, 8 ve 11 numaralı pillerin sıcaklıklarını kaydetmek üzere termokupl kullanılmıştır.



a)

b)

Şekil 3.6 Deney düzenekleri a) kanatsız b) trapezoid kanatlı batarya paketleri

4. BULGULAR

Bu doktora çalışmasında pil yüzeyine eklenen kanatların sıcaklığa etkisi incelenirken sayısal yöntemlerden faydalanılmış, yapılan termal analizler deneysel bir çalışma ile doğrulanmıştır. Sayısal ve deneysel çalışmalara ait bulgulara bu bölümde yer verilmiştir.

4.1.Sayısal Çalışma Bulguları

Sayısal çalışmalar iki silindirik pilin birbirlerine seri olarak bağlandığı durum (2S) ile, 12 silindirik pilin 4S3P konfigürasyonunda bağlanarak oluşturdukları pil paketlerini incelemeye yöneliktir. 2S pil paketine ilişkin analizler FloEFD programı kullanılarak doğal taşınım koşulları altında yürütülmüştür. 4S3P konfigürasyonu ise adı geçen ticari yazılım ile düz ve şaşırtmalı hücre dizilim yapısına göre doğal taşınım koşullarında analiz edilmiş, artan sıcaklıkların kontrol altında tutulabilmesi için sistemde hava akımı ile zorlanmış taşınım uygulanmıştır. Sayısal çalışmaya ait bulgular devam eden bölümlerde verilmektedir.

4.1.1. Seri bağlı iki pilin incelenmesi

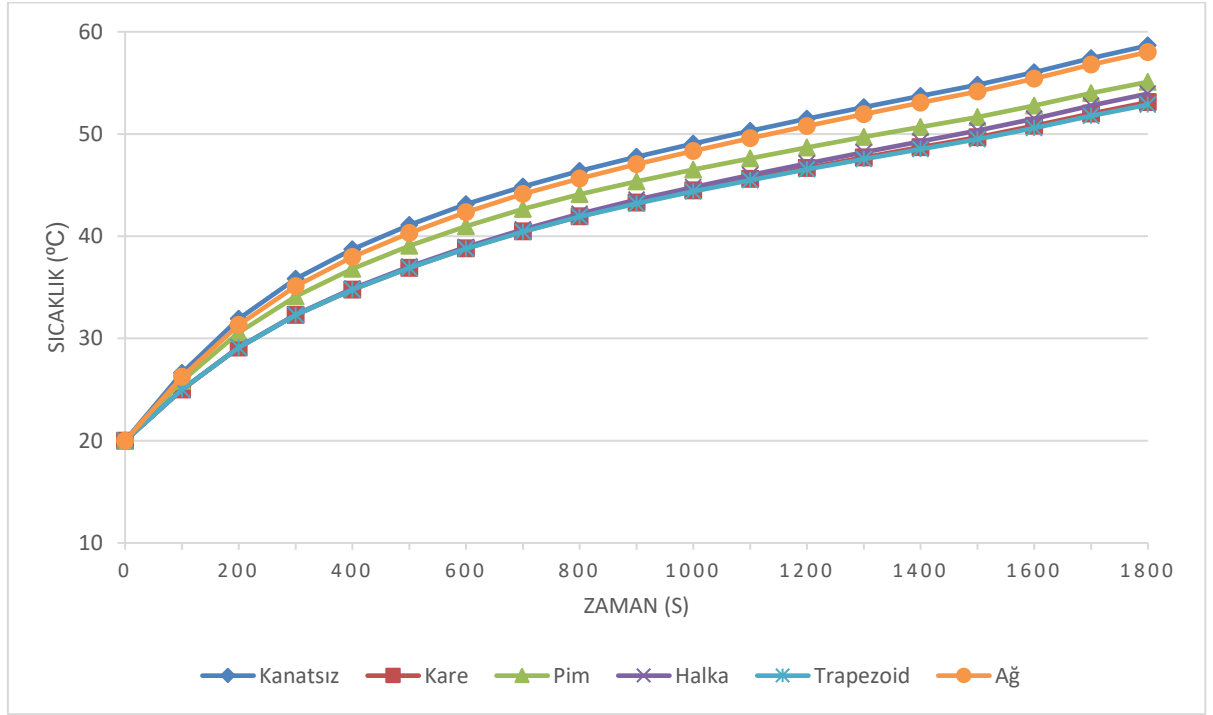
İki silindirik pilin seri olarak bağlandığı (2S) batarya paketinin ısı üretimi MSMD modeli kapsamında eşdeğer devre modeli kullanılarak tahminlenmiş ve doğal taşınım koşulları için termal analiz sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Başlangıç sıcaklığı 20 °C olarak alınmış, elektrokimyasal ve termal boyutları ile eşzamanlı olarak çözümleme yapılmış, sayısal çalışma sonucunda elde edilen en yüksek pil sıcaklıkları farklı kanat tipleri için Çizelge 4.1’de verilmiştir. Kanatsız pil sıcaklıklarının 58,65 °C düzeyine ulaştığı, en düşük sıcaklık değerinde kalan trapezoid kesitli kanada sahip pil için sıcaklığın 52,86 °C düzeyinde kaldığı hesaplanmıştır. Sonuç olarak kanatlı hücreler, kanatsız hücrelere göre 6 °C dolayında sıcaklık avantajı sağlamıştır.

Çizelge 4.1 2S batarya paketi için en yüksek pil sıcaklıkları (°C)

Kanat Tipi Pil No	Kanatsız	Kare	Pim	Halka	Trapezoid	Ağ
Pil – 1	58,65	53,11	55,09	53,95	52,86	58,02
Pil – 2	58,65	53,12	55,10	53,95	52,86	58,03

İki pilin seri şekilde bağlanması ile elde edilen paketin 2C deşarj hızı ile boşaltılması halinde sayısal olarak hesaplanan maksimum sıcaklıkların zamana göre değişimi Pil – 1 için Şekil 4.1Şekil 4.1’de verilmiştir. 30 dakika boyunca sürdürülen deşarj işlemi esnasında

kanatsız pil hücrelerinin sıcaklıklarının kanatlı pillere göre daha yüksek seviyelerde seyrettiği görülmüştür. Trapezoid kesitli pil en düşük sıcaklığa sahip iken, bunu sırasıyla kare, halka, pim ve ağ yapılı kanatlara sahip piller izlemiştir. Deşarj süreci boyunca pil sıcaklıkları devamlı surette artış göstermiş, bir maksimum değere ulaşmamıştır. Bu durum, üretilen ısının, etrafa yayılan ısıdan daha fazla olduğunu göstermektedir.



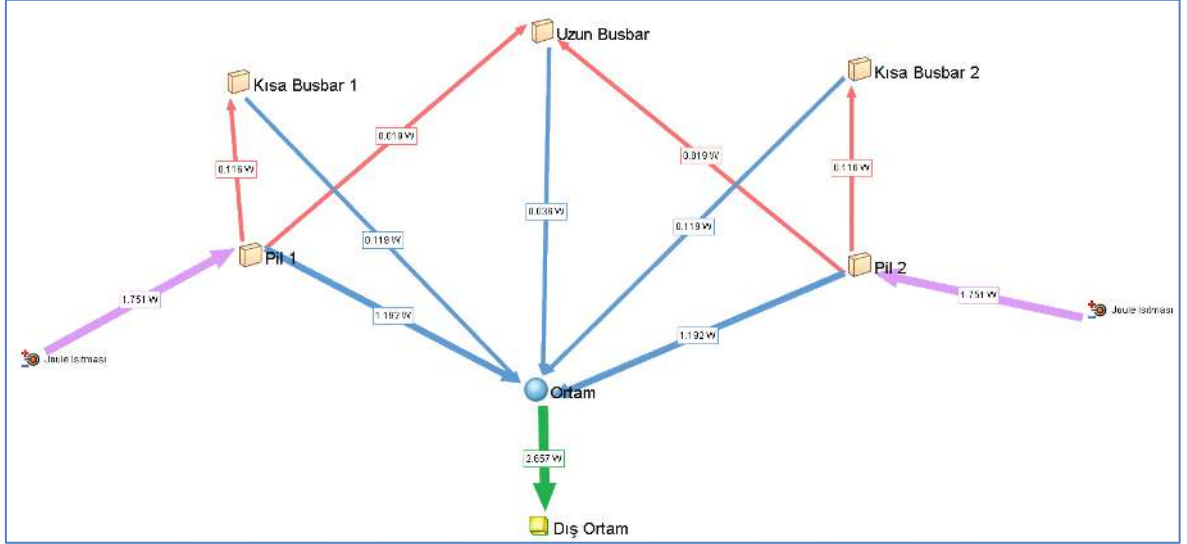
Şekil 4.1 2S konfigürasyonunda kanat tiplerine göre pillerin sıcaklık değişimi (Pil - 1)

Sistemin ısı akı grafiği Şekil 4.2**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ve Şekil 4.3**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ile sırasıyla kanatsız piller ve trapezoid kesitli kanada sahip piller için verilmiştir. Akı grafiklerinde kanatların pillerde oluşan joule ısısının dışarı atılmasında etkisinin olduğu görülmektedir.

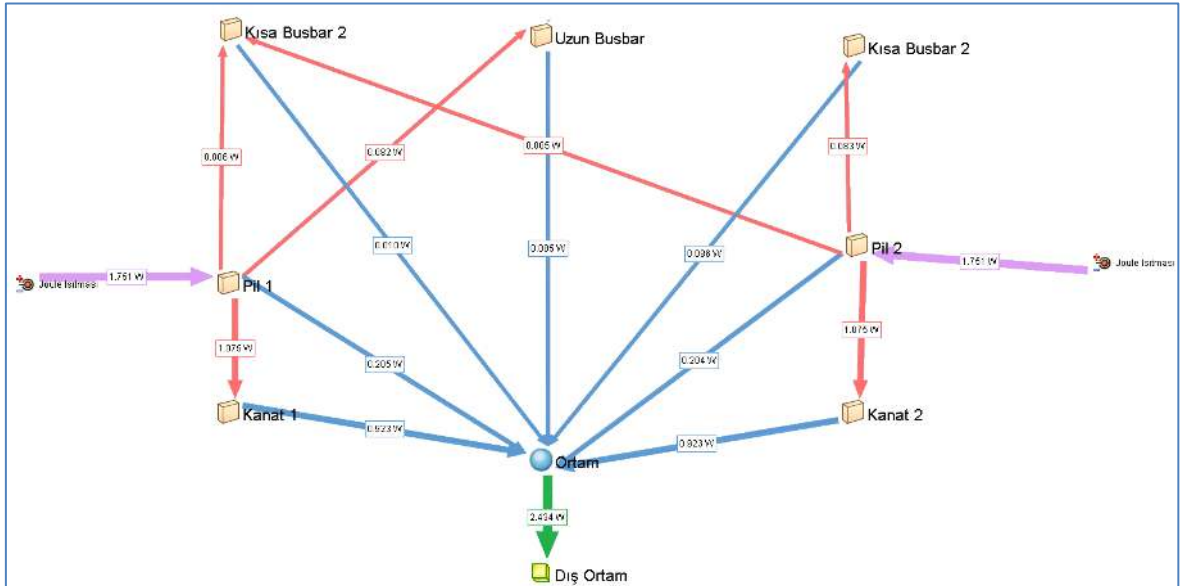
Kanatsız piller için, analiz süresi sonu olan 1800. saniye itibariyle, her bir pilde üretilen ısı 1,751 W olup, bunun 1,192 W olan kısmı havaya, 0,135 W olan piller arasındaki elektriksel bağlantıyı oluşturan nikel busbar çubuklarına iletilmektedir. Üretilen ısının 0,424 W kadarı dış ortama atılamadığından, pil içi sıcaklıklar yükselmektedir.

Şekil 4.3’de verilen en düşük pil sıcaklığını sergileyen trapezoid kesitli kanada sahip pil paketine ait ısı akı grafiği incelendiğinde ise, benzer şekilde Pil -1 için analiz sonunda, birim zaman için üretilen 1,751 W ısı enerjisinin 1,075 W kadar kısmının kanada, 0,088 W kadarlık kısmının busbar çubuklarına iletildiği, 0,205 W kadar kısmı doğrudan pil üzerinden

havaya verilirken, 0,923 W kadar kısmı ise kanat üzerinden taşınım ile atılmaktadır. Bu durum, zamana yaygın şekilde incelendiğinde pilin üzerinde biriken 0,383 W ısıнын kanatsız duruma göre daha az olduğu, dolayısıyla pilin daha düşük sıcaklıklara eriştiği gözlenmiştir. Öte yandan, doğal taşınım şartlarında bu etkinin görece küçük olduğu, kanatların pilleri yalıtın ve ısıyı depolayan bir özellik de gösterdiği ve bu durumun işlem süresi sonunda pillerin soğumasını geciktirici bir etki yapacağı da söylenebilir.



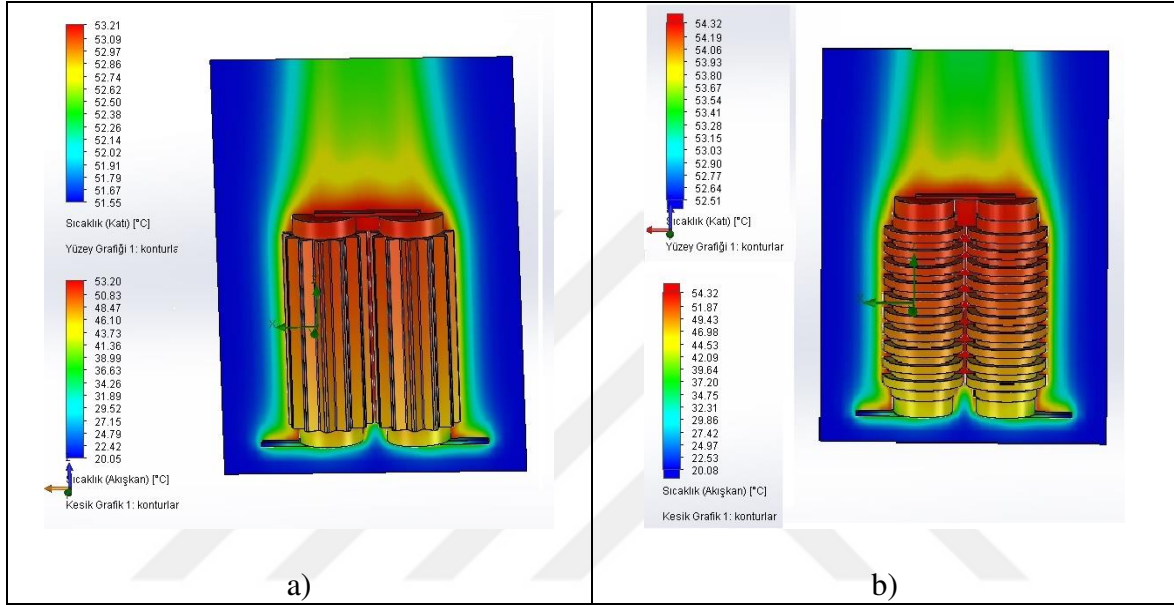
Şekil 4.2 2S konfigürasyonundaki kanatsız piller için ısı akı grafiği



Şekil 4.3 2S konfigürasyonundaki trapezoid kanatlı piller için ısı akı grafiği

Şekil 4.4 2S bağlı, trapezoid (a) ve halka (b) kanatlı piller için doğal taşınım koşullarında sıcaklık dağılımı **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de trapezoid kanatlı piller ile halka kanatlı pillerin katı gövdelerindeki (pil ve kanat) sıcaklık dağılımı ile pillerin

merkez düzlemindeki havanın sıcaklık dağılımı birlikte verilmiştir. Halka kanatların, ısınan havanın akış yönüne dik, trapezoidal kanatların ise hava akış yönünde olmasının sonuçları küçük de olsa gözlenebilmektedir. Trapezoidal kanatlar ısınan havanın yükselmesini kolaylaştırırken, halka şeklindeki kanatlar ısınan havanın yükselmesini engellemektedir. Maksimum sıcaklık değerlerine bakıldığında da halka şeklindeki kanatların kullanılması durumunda daha yüksek sıcaklıklara erişildiği görülmektedir. Ayrıca pil sıcaklıkları hücrenin üst tarafına doğru artış göstermektedir.



Şekil 4.4 2S bağlı, trapezoid (a) ve halka (b) kanatlı piller için doğal taşınım koşullarında sıcaklık dağılımı

4.1.2. Düz dizilmiş 4S3P batarya paketinin incelenmesi

4.1.2.1. Doğal taşınım koşulları

4 seri 3 paralel olmak üzere birbirine bağlanarak paket oluşturan 12 silindirik pilin, MSMD modeli çerçevesinde, eşdeğer devre varsayımı ile 2C deşarj hızı ile boşaltılması halindeki termal davranışları sayısal olarak incelenmiştir. 20 °C ortam sıcaklığında, doğal taşınım koşullarında pillerde oluşan en yüksek sıcaklıkların kanat tipine göre değişimi Çizelge 4.2 4S3P batarya paketi için kanat tiplerine göre en yüksek pil sıcaklıkları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Kanatsız piller için sıcaklıklar 58 °C üzerine çıkarken kanatlı pillerin sıcaklıkları ise paket içindeki konumlarına göre 54 – 60 °C aralığında değişmektedir. Kanatsız piller ile kanatlı piller arasındaki sıcaklık farkının 4 °C seviyesine kadar çıktığı, en düşük sıcaklık değerleri trapezoid kesitli kanada sahip pillerde gözlenirken halka tipi kanada sahip pillerin sıcaklığının bazı piller için kanatsız pil sıcaklıklarının üzerine çıktığı görülmüştür. Her bir

kanat tipi için ortalama sıcaklıklar incelendiğinde en düşük sıcaklık değerinin trapezoid kesitli kanatlarda görüldüğü gözlenmiştir.

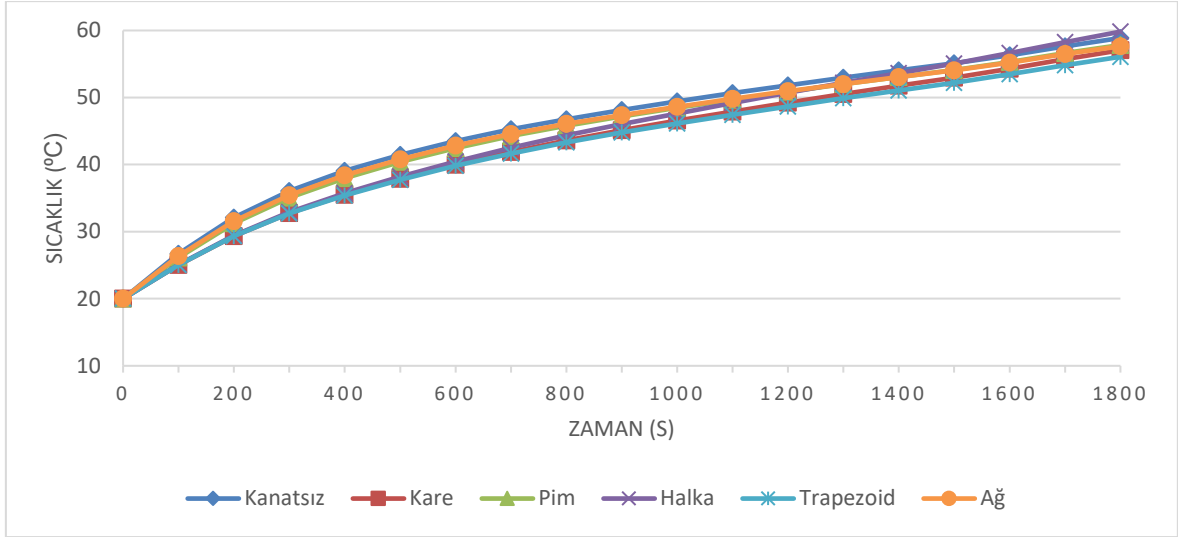
Çizelge 4.2 4S3P batarya paketi için kanat tiplerine göre en yüksek pil sıcaklıkları (°C)

Kanat Tipi Pil No	Kanatsız	Kare	Pim	Halka	Trapezoid	Ağ
Pil – 1	58,72	55,35	56,61	57,14	54,59	56,81
Pil – 2	58,44	55,44	56,73	57,15	54,80	56,88
Pil – 3	58,29	55,62	56,85	57,50	54,22	56,28
Pil – 4	58,29	54,89	56,18	56,74	55,52	56,93
Pil – 5	58,88	55,59	56,74	57,50	56,09	57,48
Pil – 6	58,19	54,82	56,25	56,74	55,51	56,63
Pil – 7	58,29	56,40	57,18	58,70	55,43	56,94
Pil - 8	58,88	57,11	58,00	59,83	56,08	57,65
Pil - 9	58,19	56,26	57,13	58,57	55,42	56,72
Pil - 10	58,73	56,31	57,13	58,68	54,58	56,69
Pil - 11	58,45	57,05	57,83	59,82	54,76	56,85
Pil - 12	58,29	56,24	56,94	58,56	54,37	56,16
Ortalama Sıcaklık	58,47	55,92	56,96	58,08	55,11	56,83

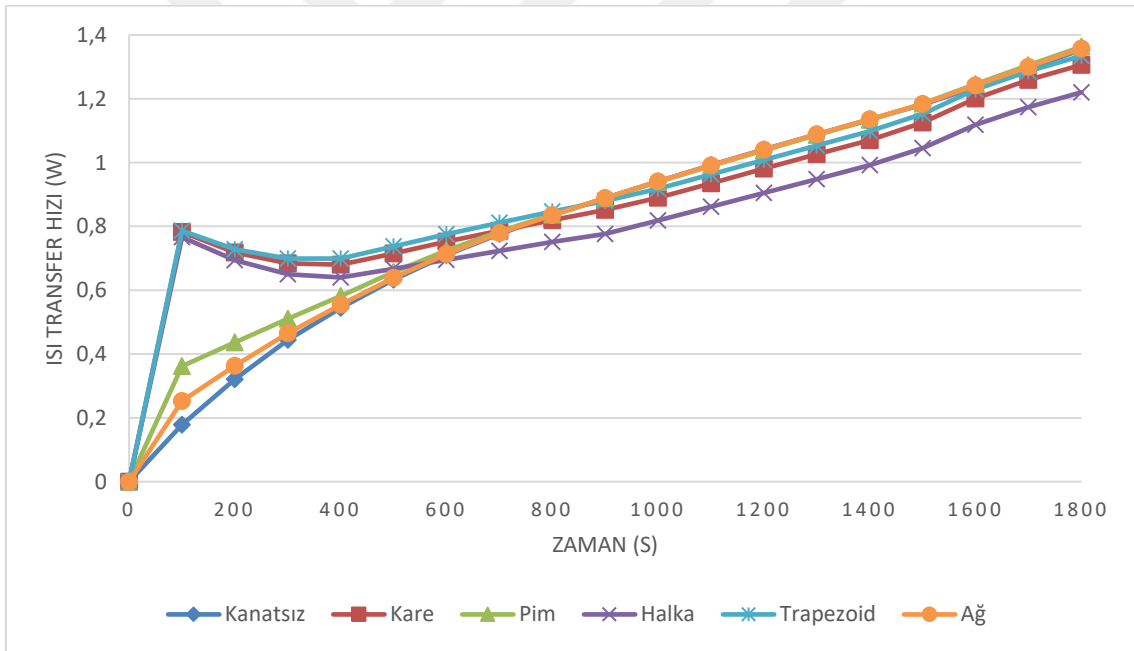
Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere, 5 ve 8 numaralı piller, batarya paketinin iç kısmında yer aldığından, çevre pillerin de sıcaklığından etkilenmekte ve paket dışına ısı transferi yapamadıkları için daha yüksek sıcaklıklara erişmektedirler. 8 numaralı pile ait sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4.5 ile verilmiştir. Gözlemlendiği üzere oldukça düşük sıcaklık farkları ile değişim gösteren kanat tipleri içinde halka tipi kanatlı pil en yüksek, trapezoid tipi kanatlı pil en düşük sıcaklık seviyelerinde seyretmektedir.

Halka tipi kanada sahip pillerin sıcaklıkları ile kanatsız pillerin sıcaklıkları arasında küçük bir fark bulunması, hatta bazı piller için halka kanatlı pillerin daha yüksek sıcaklıklara erişmesinin fiziksel sebebi, kanat yönlerinin doğal taşınım ile yükselen havaya engel olması ile açıklanabilir.

Farklı kanat türleri için paketin iç kısımlarında kalan ve en yüksek sıcaklıklara erişen 8 numaralı pilin ısı transfer davranışı Şekil 4.6 ile verilmiştir. Doğal taşınım koşullarında, kanatsız pillerin, kütle ve hacim itibarıyla daha küçük olan ağ yapıdaki ve pim şeklindeki kanatlı pillerin ilk ısınma anlarında daha yüksek hızlarda ısı transferi gerçekleştirdiği, ısınan havanın yükselmeye başlaması ile birlikte ısı transfer hızlarının birbirine yaklaştığı ve zaman içinde halka tipi kanatların yatay olması nedeniyle trapezoid ve kare gibi dikey kanatlara göre daha düşük hızlarda ısı transferi sağladığı gözlenmiştir.



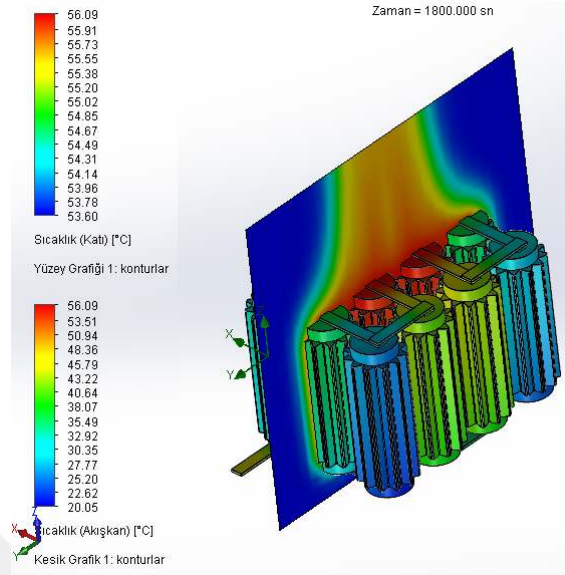
Şekil 4.5 4S3P batarya paketinde doğal taşınım koşullarında 8 numaralı pile ait sıcaklık değişimi



Şekil 4.6 4S3P batarya paketi için kanat tiplerine göre doğal taşınım koşullarında ısı transfer hızının değişimi

Düz dizilim batarya konfigürasyonunda doğal taşınım koşulları altında batarya paketinin iç kısımlarında kalan hücrelerin, dış kenarlarda kalanlara göre daha fazla ısındığı, benzer şekilde dış kenarlardaki hücreler incelendiğinde de köşelerde yer alan hücrelerin daha düşük sıcaklıklara sahip olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.7’de verilen simülasyon

görüntüsüne de yansıyan bu durumun bir sonucu olarak hava akımı batarya paketinin merkezinde yoğunlaşmaktadır.



Şekil 4.7 Trapezoid kanatlı batarya paketi hücreleri ve paket merkez düzlemindeki hava için sıcaklık dağılımı

4.1.2.2. Zorlanmış taşınım koşulları

4S3P batarya paketinin 2C hızı ile deşarjı halinde, zorlanmış taşınım koşullarında oluşan maksimum pil sıcaklıkları, tüm piller için Çizelge 4.3'te verilmiştir. Zorlanmış taşınım koşulları batarya paketinin kısa kenarına yerleştirilen bir fan yardımıyla 2 m/s hızda hava akımı oluşturularak, çapraz akış şeklinde tesis edilmiş olup, ortam sıcaklığı 20 °C olarak verilmiştir. Batarya paketinin alt, üst ve yan kenarları kapalı şekilde dizayn edilmiş olup fanın çalıştığı daire ve karşısındaki kenar açıktır.

Fanla soğutma işlemi 1-3 numaralı pillere en yakın konumda, 10-12 numaralı pillere ise en uzak konumda bulunduğundan bu piller arasında önemli bir sıcaklık farkı meydana gelmektedir. Sıcaklığın en yüksek değerlerde seyrettiği 10-12 numaralı pillerin sıcaklıkları kanat kullanılıp kullanılmaması durumuna göre 3°C ile 4°C arasında değişiklik gösterebilmektedir. Bu fark fana yakın sıralarda yer alan pillerde 7 – 8 °C dolayına çıkabilmektedir.

En düşük pil sıcaklıkları hava akımına paralel, halka tipi kanatlara sahip pillerde gözlenirken geometrik benzerliklerinden dolayı kare ve trapezoid kesite sahip pil sıcaklıklarının büyük ölçüde yakın değerlerde seyrettiği görülmektedir.

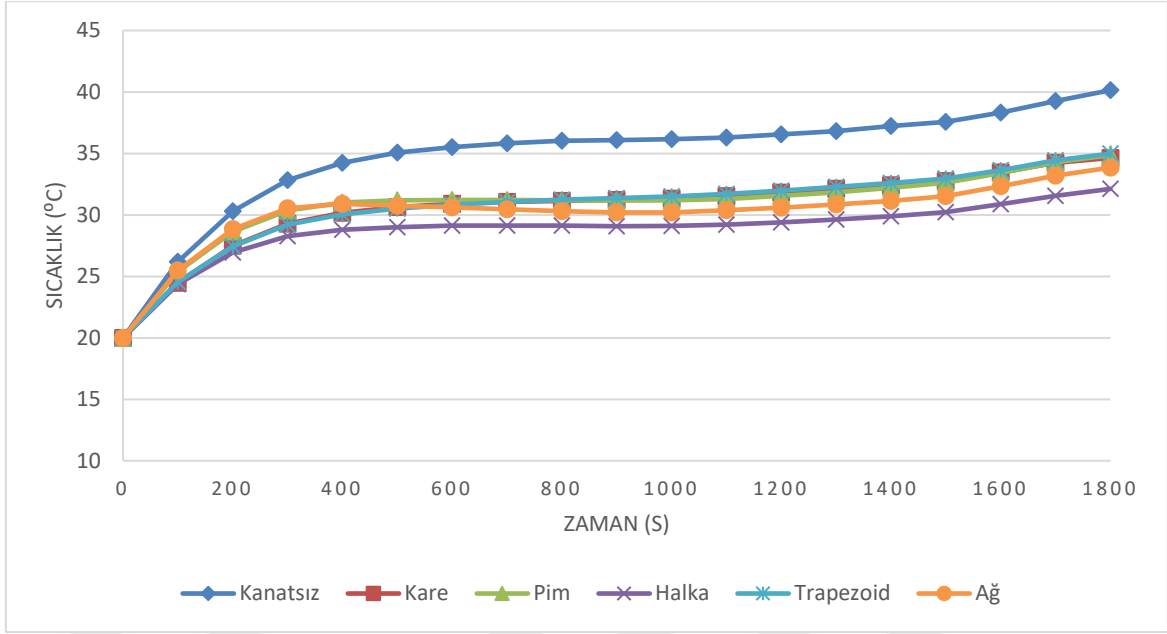
Çizelge 4.3 4S3P batarya paketi için zorlanmış taşınım koşullarında en yüksek pil sıcaklıkları (°C)

Kanat Tipi Pil No	Kanatsız	Kare	Pim	Halka	Trapezoid	Ağ
Pil – 1	38,00	30,01	31,57	29,33	30,16	31,48
Pil – 2	36,78	29,40	30,58	28,68	29,54	30,61
Pil – 3	38,26	29,88	31,74	29,34	30,24	31,84
Pil – 4	40,43	36,27	36,94	34,30	37,13	36,25
Pil – 5	40,29	38,02	36,94	34,51	38,05	35,82
Pil – 6	40,44	36,12	36,70	34,45	36,73	36,18
Pil – 7	40,47	33,83	34,66	31,95	34,70	34,13
Pil – 8	40,14	34,63	34,86	31,95	34,98	33,85
Pil – 9	40,57	33,73	34,86	31,99	34,35	33,84
Pil – 10	40,43	37,59	37,85	36,09	38,05	36,94
Pil – 11	40,66	38,77	37,95	35,36	38,60	36,95
Pil – 12	40,61	37,59	37,90	36,08	37,45	37,67
Ortalama Sıcaklık	39,76	34,65	35,21	32,84	35,00	34,63

Şekil 4.8’de verilen, 8 numaralı pile ait sıcaklıklarının 2C deşarj hızına göre 30 dakika olarak tayin edilen analiz süresi boyunca değişimi incelendiğinde, sıcaklıkların özellikle ilk 4-5 dakika boyunca belirgin bir şekilde hızla arttığı, sonrasındaki süreçte ise kanatsız piller ile kanatlı piller arasında önemli derecede sıcaklık farkları olduğu gözlenmektedir. Kanatlar ilk etapta iletimle ısı transferi ve ısı depolaması etkisiyle pillerin düşük sıcaklıklarda kalmasını sağlamakta, ikinci etapta ise taşınımı kolaylaştırıcı etkisiyle pillerde üretilen ısıyı dış ortama transferini hızlandırmaktadır.

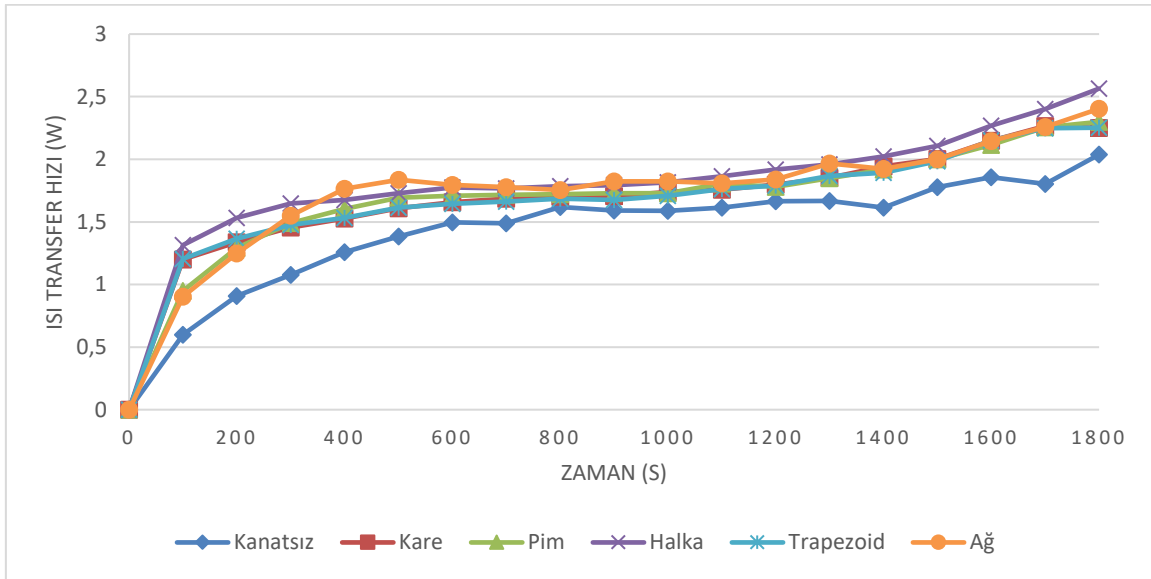
Fanın paket içinde tek bir kenara konumlandırılması nedeniyle pillerin konumları ve kanat türleri arasında sıcaklık iniş/çıkışları yaşanmasına rağmen kanatsız pillerin belirgin bir şekilde daha yüksek sıcaklık değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Kanatların ısı transferine olan olumlu etkisi ısı transfer hızı ile de gözlenmiştir. Şekil 4.9’de verilen grafikte farklı kanat tipleri için ısı transfer hızının zamana göre değişimi çizilmiştir. Ağ yapıdaki ve halka biçimindeki kanatların monte edildiği piller en yüksek ısı transfer hızına sahipken kanatsız pillerin ısı transfer hızı belirgin şekilde düşüktür. Öte yandan kanatsız durumda ısı transfer hızının çok daha değişken olduğu, kanatlı pillerde ise ısı transferinin kararlı bir şekilde seyrettiği görülmektedir. Kanatların ısı transfer hızını düzenleyici etkisi göze çarpmaktadır.



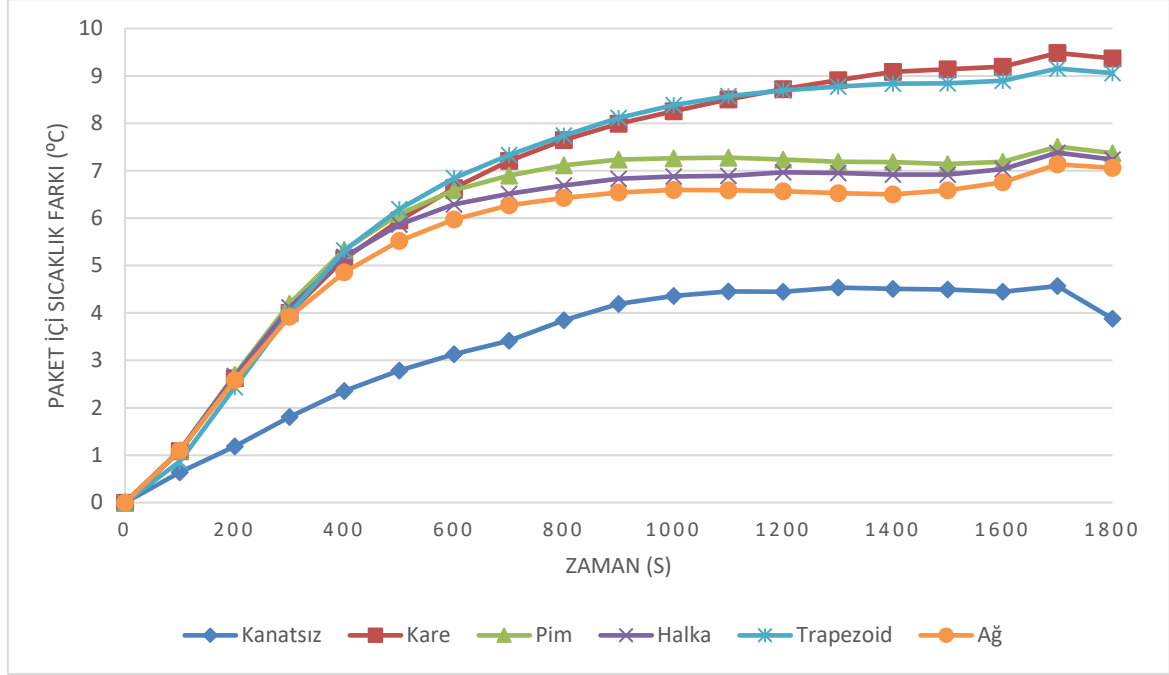
Şekil 4.8 4S3P batarya paketinde, zorlanmış taşınım koşullarında 8 numaralı pilin farklı kanat tipleri için sıcaklık değişimi

Lityum iyon bataryaların performansını ve ömrünü azaltan hususlardan birisi de sıcaklığın aynı paket içinde homojen şekilde dağılmamasıdır. Literatürde sıcaklık dağılımının sınırlarının belirlenmesi noktasında 5 °C sıcaklık farkının aşılması gerekliliği vurgulanmaktadır. Zorlanmış taşınımın önemli dezavantajlarından birisi paket içindeki homojen sıcaklık dağılımını bozması yönündedir.



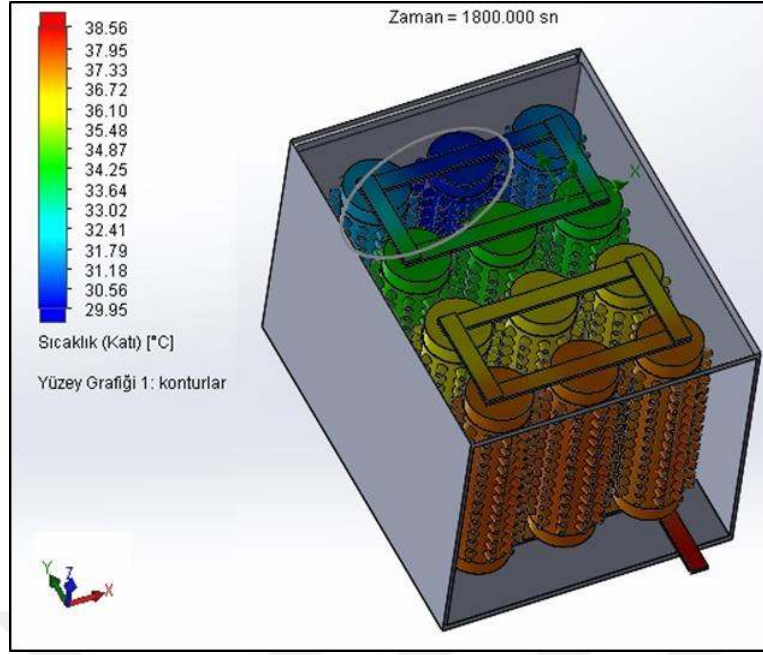
Şekil 4.9 4S3P batarya paketinde, zorlanmış taşınım koşullarında farklı kanat tipleri için ısı transfer hızı değişimi

Şekil 4.10’da zorlanmış taşınım koşulları için aynı paket içinde yer alan 12 pil için en yüksek sıcaklık farklarının zamana göre değişimi verilmiştir. Kanatsız pillerde daha homojen bir sıcaklık dağılımı gözlenirken özellikle kare ve trapezoid kesitli kanatlı pillerde sıcaklık farkının 10 °C düzeyine yaklaştığı, düzensiz bir sıcaklık dağılımı olduğu görülmektedir.

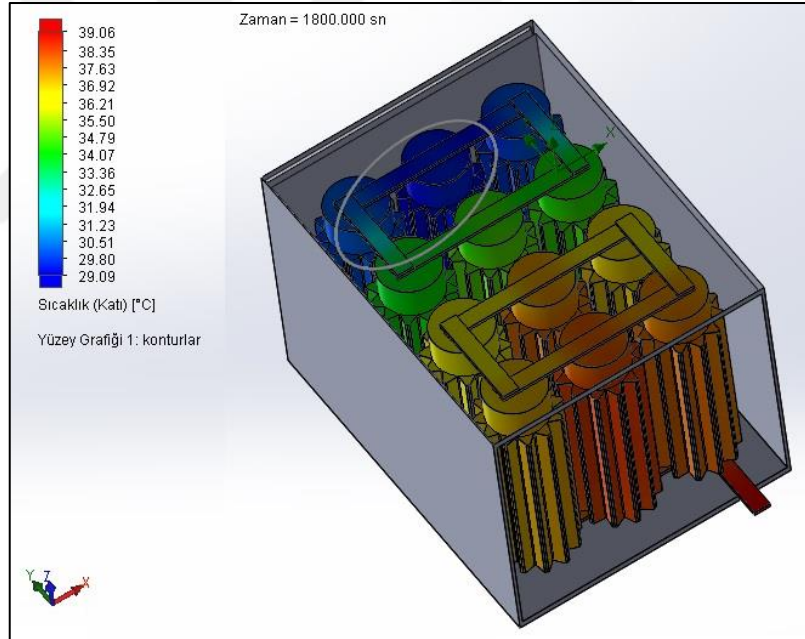


Şekil 4.10 Zorlanmış taşınım koşullarında paket içi sıcaklık farklarının değişimi

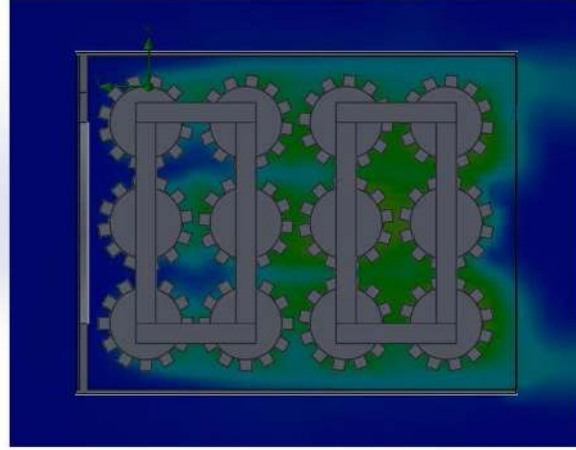
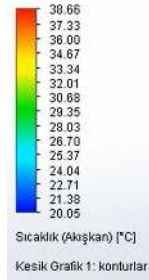
Bu durum, Şekil 4.11’de pim ve Şekil 4.12’de trapezoid tipteki kanatlar için görselleştirilerek verilmiştir. 2C hızıyla yapılan 30 dakika süreli deşarj sonundaki sıcaklık dağılımını gösteren şekillerde yer alan daire, sistemi soğutan fanı temsil etmekte olup, fan dairesi ve karşı kenar açık olmak üzere batarya paketi bir kutu içine yerleştirilmiştir. Fana en yakın konumdaki piller ile en uzak konumdaki piller arasında 7 – 8 °C arasında sıcaklık farkı söz konusu olup, aynı pilin fana bakan ve zıt yöne bakan yüzleri arasında da sıcaklık farkları görülmektedir.



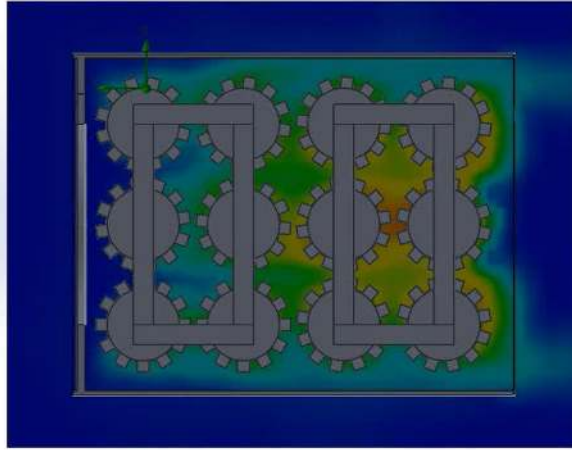
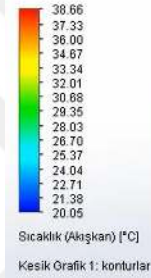
Şekil 4.11 Zorlanmış taşınım koşullarında pim tipi kanatlı paket için sıcaklık dağılımı



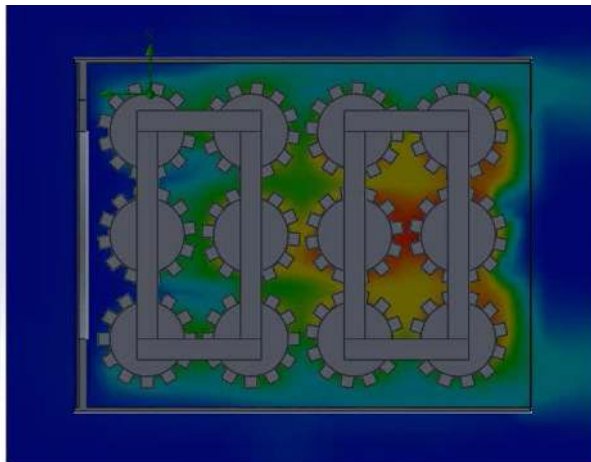
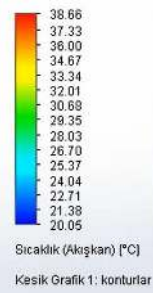
Şekil 4.12 Zorlanmış taşınım koşullarında trapezoid tip kanatlı paket için sıcaklık dağılımı



a)



b)



c)

Şekil 4.13 Zorlanmış taşınım koşullarında zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) $t=360$ s, b) $t=1300$ s ve c) $t=1800$ s

Hava hareketini sağlayan fanın paket içindeki sıcaklık farklarını artırma eğilimi zamana bağlı olarak hava sıcaklığındaki artış olarak da ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.13'te kare kesitli batarya paketi için, 20 °C sıcaklıktaki havanın 2m/s hızla paket içerisine girmesi durumu simüle edilmiş ve 360. 1300. ve deşarj süreci sonu olan 1800. saniyelerdeki hava sıcaklık dağılımı verilmiştir.

Lityum iyon pillerin termal yönetiminde en önemli koşullardan birisi de ortam sıcaklığıdır. 20 °C ortam sıcaklığı için yapılan analizler iklim koşullarının gerekleri de dikkate alınarak 30 °C ortam sıcaklığı için tekrarlanmıştır. Ancak 20 °C ortam sıcaklığına göre yapılan analizlerde pillerin eriştiği maksimum sıcaklıklar sınır değerlerine yaklaştığından bu analizlerde havanın pil paketi içine giriş hızı artırılarak 4 m/s olarak alınmıştır.

Bu koşullar altında ulaşılan maksimum pil sıcaklıkları Çizelge 4.4'de listelenmiştir. Bu analizlerde de benzer şekilde kanatlı pillerin sıcaklıkları, kanatsız pillere kıyasla 6 °C düzeyinde farklar göstermektedir. Kanatsız pillerin ortalama sıcaklığı 43,30 °C iken en iyi performansı sergileyen halka tipi kanatların kullanıldığı pillerin maksimum sıcaklıklarının ortalaması 38,01 °C olarak hesaplanmıştır.

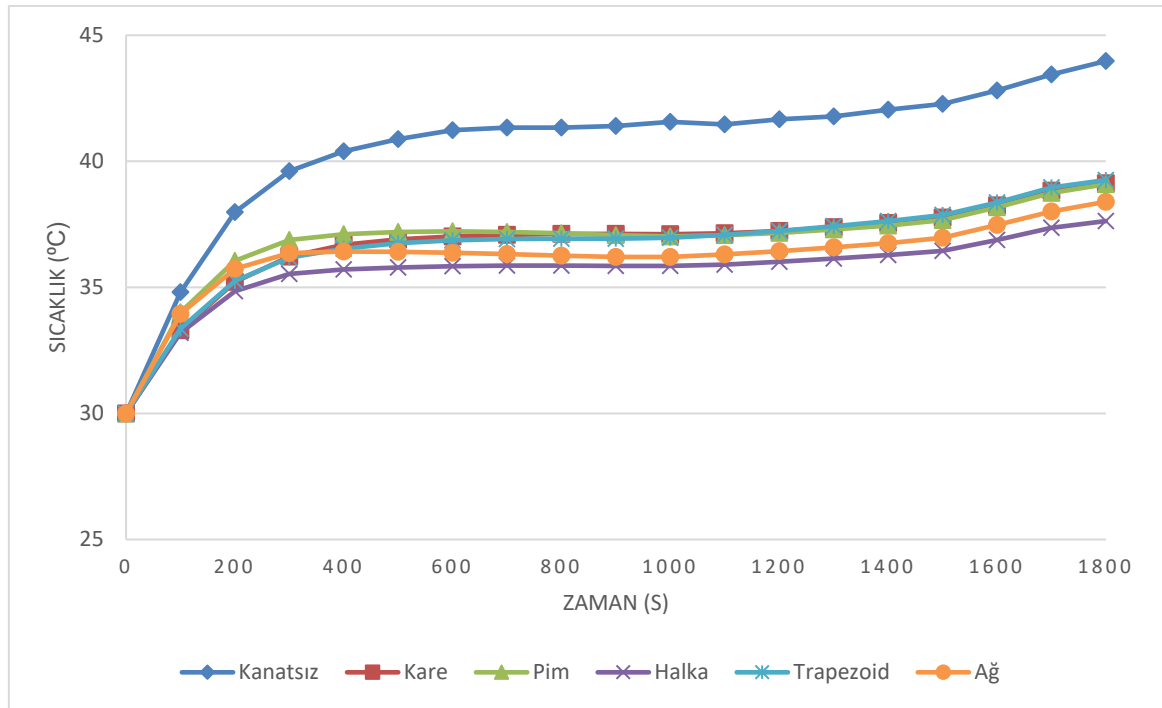
Çizelge 4.4 Yüksek ortam sıcaklıklarında zorlanmış taşınım koşullarında pillerin en yüksek sıcaklıkları (°C)

Kanat Durumu/Türü Pil No	Kanatsız	Kare	Pim	Halka	Trapezoid	Ağ
Pil - 1	42,05	36,32	37,23	36,14	36,30	37,44
Pil - 2	41,35	35,87	36,58	35,59	36,00	36,84
Pil - 3	42,30	36,28	37,31	36,05	36,40	37,64
Pil - 4	43,64	40,08	40,31	38,81	40,23	40,24
Pil - 5	43,73	40,97	40,28	38,94	41,09	39,69
Pil - 6	43,56	39,89	40,26	38,81	40,18	39,81
Pil - 7	43,93	38,78	39,08	37,62	38,92	38,68
Pil - 8	43,97	39,13	39,09	37,63	39,26	38,40
Pil - 9	44,00	38,73	39,14	37,59	38,85	38,51
Pil - 10	43,50	40,93	40,98	39,88	40,82	40,68
Pil - 11	43,75	41,75	41,12	39,41	41,60	40,61
Pil - 12	43,78	40,95	41,01	39,72	40,67	40,69
Ortalama Sıcaklık	43,30	39,14	39,37	38,01	39,19	39,10

Ortam ve materyal için başlangıç sıcaklığının 30 °C ve hava giriş hızının 4 m/s olduğu zorlanmış taşınım koşullarında, 8 numaralı pilin 30 dakikalık deşarj süresi boyunca erişilen maksimum sıcaklıklarının değişimi Şekil 4.14'de verilmiştir. Halka, pim ve kare tipi

kanatların takıldığı piller oldukça benzer sıcaklıklarla en iyi performansı sergilerken bunları sırasıyla ağ ve trapezoid kanatlı piller takip etmektedir.

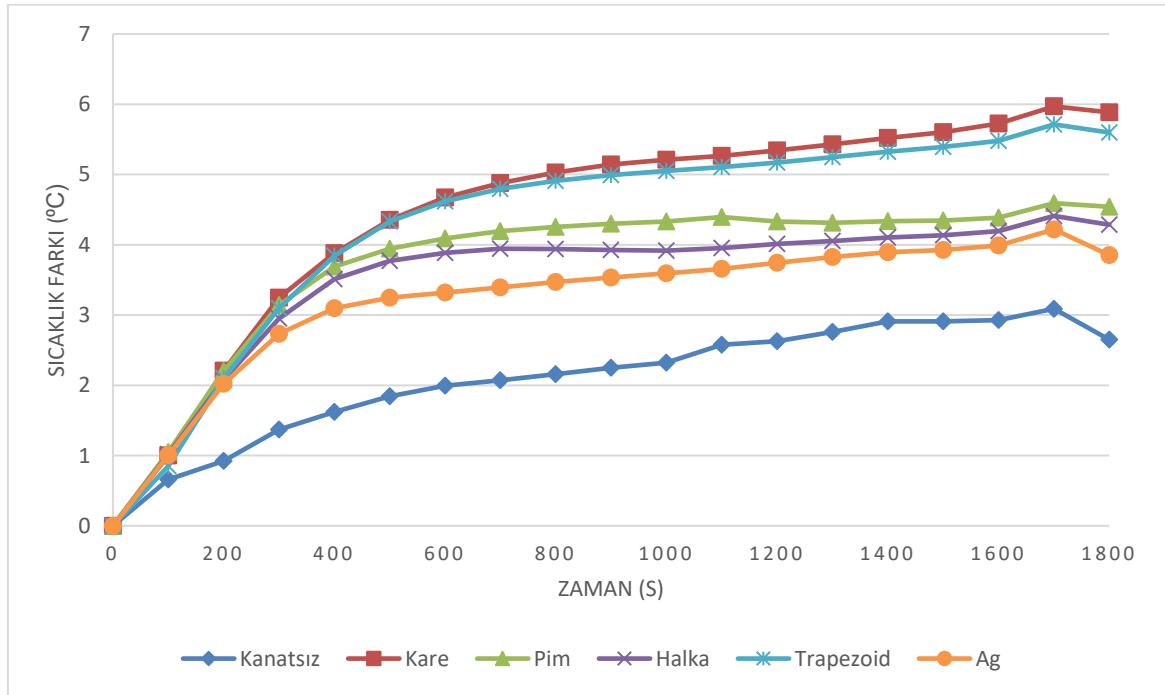
Bu koşullar için de, Şekil 4.7’deki duruma benzer şekilde sıcaklıkların özellikle ilk dakikalarda belirgin bir şekilde hızla arttığı, sonrasındaki süreçte uzunca bir süre sıcaklıkların değişmediği ve kanatsız piller ile kanatlı piller arasında önemli derecede sıcaklık farkları olduğu gözlenmektedir. Deşarj işleminin ilk dakikalarındaki hızlı artış benzer şekilde sıcaklığın pillerden kanatlara iletimine başlanması süreci ile ilgili olup, kanatların ısınmaya başlaması ile birlikte pil sıcaklıkları stabil değerlerde kalmaktadır.



Şekil 4.14 Yüksek ortam sıcaklığında zorlanmış taşınım koşullarında farklı kanat tipleri için sıcaklık değişimi

Sıcaklık dağılımının bir ölçüsü olan, paket içinde anlık olarak oluşan en yüksek sıcaklık ile en düşük sıcaklık arasındaki fark değerleri, her bir kanat tipi için Şekil 4.15’de verilmiştir. İlgili koşullar altında en büyük sıcaklık farkının 6 °C dereceye vardığı gözlenmiştir. Kare tipi kanat için ortaya çıkan bu değer, 20 °C ortam sıcaklığı ve 2 m/s hava giriş hızı koşullarında gerçekleştirilen simülasyonda ulaşılan 10 °C değerinin oldukça altında olmakla birlikte lityum iyon piller için kabul edilebilir sınır olan 5 °C’ın üzerindedir. Sıcaklık farklılıkları noktasında kare kanatlı pilleri sırasıyla, trapezoid, pim, halka, ağ ve kanatsız piller takip etmektedir.

Kanat kullanımı, maksimum sıcaklıkları düşürmekle birlikte fana yakın pillerde çok daha etkin bir soğuma sağladığından paket içi sıcaklık farkları üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Kanatsız piller en fazla 3 °C sıcaklık farkına sebep olmakla birlikte termal olarak kararsızlık arz etmektedir. Şekil 4.15'te görüldüğü üzere kanatsız pillerin kullanıldığı batarya paketi içindeki sıcaklık farkı zamana bağlı olarak değişkenlik göstermekte, ani iniş ve çıkışlar yaşanmaktadır. Kanatlı pillerde sıcaklık farkı kararlılık arz etmekte, önceleri hızlı bir şekilde yükselirken sistemin kısmen dengeye ulaşması ile birlikte daha küçük bir aralıkta seyretmektedir.



Şekil 4.15 Yüksek ortam sıcaklıklarında zorlanmış taşınım koşullarında paket içi sıcaklık farklılıkları

4.1.3. Şaşırtmalı dizilmiş 4S3P batarya paketinin incelenmesi

4.1.3.1. Doğal taşınım koşulları

Taşınım koşullarında, özellikle eşanjör uygulamalarında akışkan hareketlerini kolaylaştırmak üzere şaşırtmalı dizilim kullanılmaktadır. Burada da pillerin soğuması üzerindeki etkisini araştırmak maksadıyla, bir alternatif olarak şaşırtmalı dizilim denenmiştir. 4S3P modülünde, 12 silindirik pil hücresi, merkezleri eşkenar üçgen oluşturacak şekilde dizilerek oluşturulan konfigürasyon ortam sıcaklığının 20 °C olduğu durumda, 2C hızı ile deşarj edilmiş ve her bir pil için maksimum sıcaklık hesaplaması yapılmıştır.

Çizelge 4.5’de verilen pil sıcaklıkları incelendiğinde, düz dizilim durumundakine benzer şekilde, kanatsız pil ile kanatlı piller arasında 2 - 3 °C sıcaklık farkı gözlenmiştir. Kanatsız pillerin sıcaklıkları 59 °C dolayında seyretmekte, pilin paket içindeki konumuna göre 58 °C dolayına inebilmekte veya 60 °C üzerine çıkabilmektedir. En düşük sıcaklık değerleri trapezoid tipteki kanatlara sahip piller için gözlenmekte olup, 56 °C – 57 °C bandındadır. Öte yandan halka tipi kanat içeren pillerin kanatsız pillerden daha fazla ısındığı görülmektedir. Bu durum önceki bölümlerde de izah edildiği üzere radyal kanatların yükselen havaya engel teşkil etmesinden kaynaklanabilir.

Maksimum pil sıcaklıklarının ortalaması incelendiğinde en düşük değerlerin trapezoid tipteki piller için 57,96 °C olarak hesaplandığı gözlenmiştir.

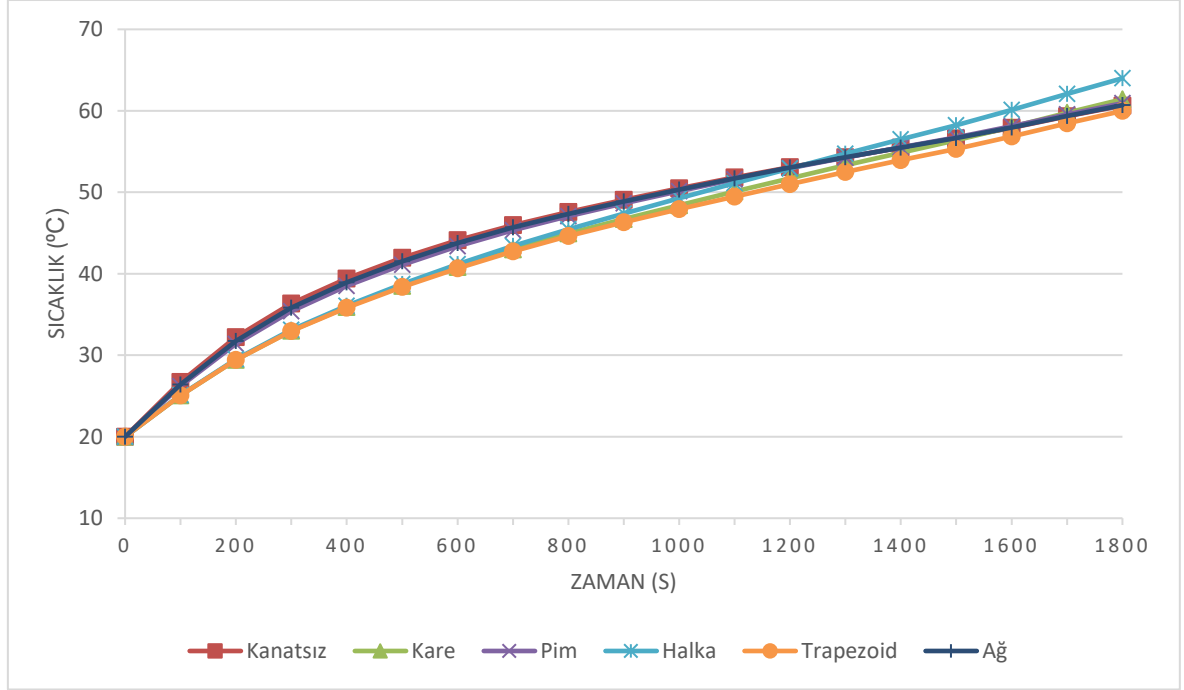
Çizelge 4.5 4S3P şaşırtmalı dizilim doğal taşınım koşullarında farklı kanat tiplerine göre en yüksek pil sıcaklıkları

Kanat Tipi Pil No	Kanatsız	Kare	Pim	Halka	Trapezoid	Ağ
Pil – 1	59,19	57,90	58,17	60,14	56,90	57,97
Pil – 2	58,96	57,33	57,96	59,64	56,50	57,71
Pil – 3	58,84	57,52	57,97	59,82	56,59	57,64
Pil – 4	59,79	60,11	59,77	62,71	58,88	59,60
Pil – 5	60,72	61,42	60,97	64,24	60,03	60,84
Pil – 6	59,73	59,97	59,72	62,54	58,63	59,55
Pil – 7	59,50	60,16	59,61	62,60	58,72	59,23
Pil – 8	60,64	61,42	60,94	64,00	59,99	60,70
Pil – 9	59,39	60,06	59,56	62,57	58,70	59,07
Pil - 10	59,84	57,63	58,38	59,72	56,76	58,72
Pil - 11	59,91	58,81	58,99	61,30	57,72	59,30
Pil - 12	59,28	57,19	57,86	59,36	56,13	58,17
Ortalama Sıcaklık	59,65	59,13	59,16	61,55	57,96	59,04

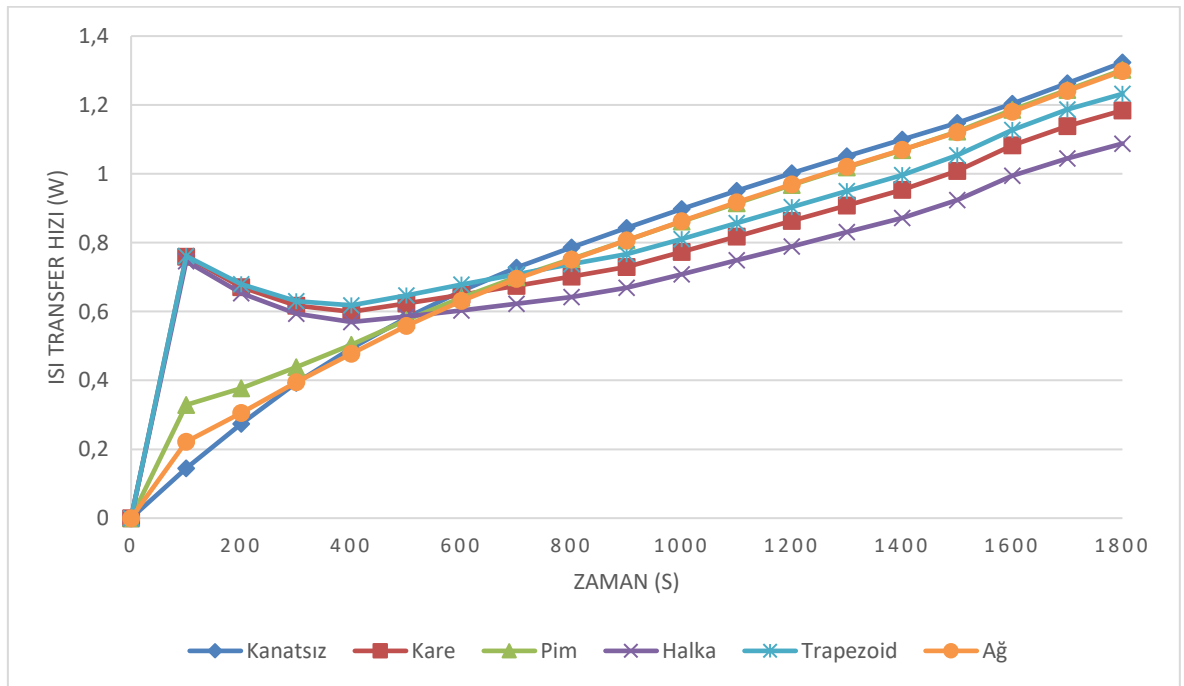
30 dakika boyunca gerçekleşen deşarj işleminde sıcaklığın zamana bağlı değişimi Şekil 4.16’de verilmiştir. Kanat tipine göre çeşitli farklılaşmalar gözlenmekte, halka tipi kanatların sıcaklıklarının çok daha hızlı yükseldiği görülmektedir.

Süreç içindeki ısı transfer hızının zamana bağlı değişimi Şekil 4.17 üzerinde incelendiğinde kare, halka ve trapezoid tipteki kanatların daha yüksek ısı transferi sağladığı, kanatsız durumun, pim ve ağ biçimindeki kanatların ise daha düşük ısı transfer hızı ortaya koyduğu gözlenmiştir.

Şaşırtmalı dizilim için doğal taşınım koşullarında pil yanal yüzeyine yerleştirilen kanatların faydasının 2 °C sıcaklık avantajı gibi sınırlı düzeyde olduğu, paket içindeki sıcaklık farkına etkisinin son derece düşük olduğu söylenebilir.



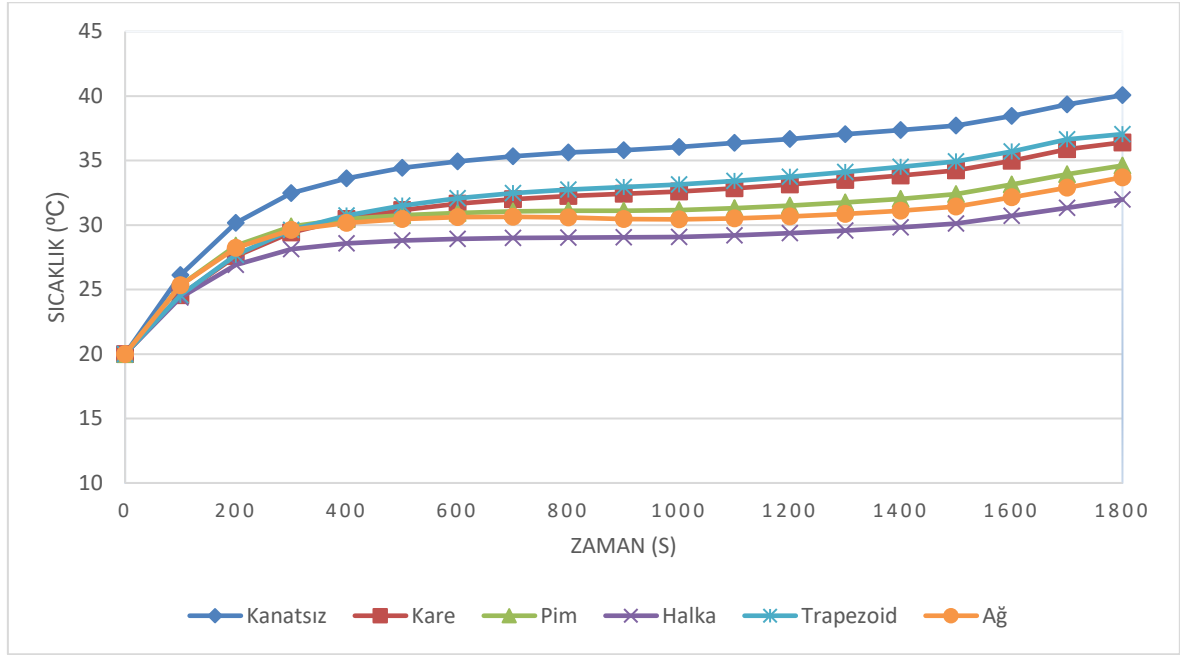
Şekil 4.16 Şaşırtmalı dizilim durumunda farklı kanat tipleri için sıcaklık değişimi



Şekil 4.17 Şaşırtmalı dizilim durumunda 8 numaralı pil için ısı transfer hızı değişimi

4.1.3.2.Zorlanmış Taşınım Koşulları

Şaşırtmalı dizilim, düz dizilime kıyasla ısı transferini kolaylaştırmakta, piller havanın hareketini kesme yönünde daha düşük dirençli bir tavır sergilemektedir. Bu durum yapılan sayısal analizin sonuçlarına da yansımıştır. 2 m/s hava giriş hızı ve 20 °C hava giriş sıcaklığı koşullarında, 8 numaralı pil için farklı kanat türlerine ait sıcaklık değişimi Şekil 4.18’de gösterilmiş olup, kanat kullanılmayan bataryaların sıcaklığının daha yüksek olduğu, öte yandan kanat türleri arasındaki sıcaklık farklarının daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir.

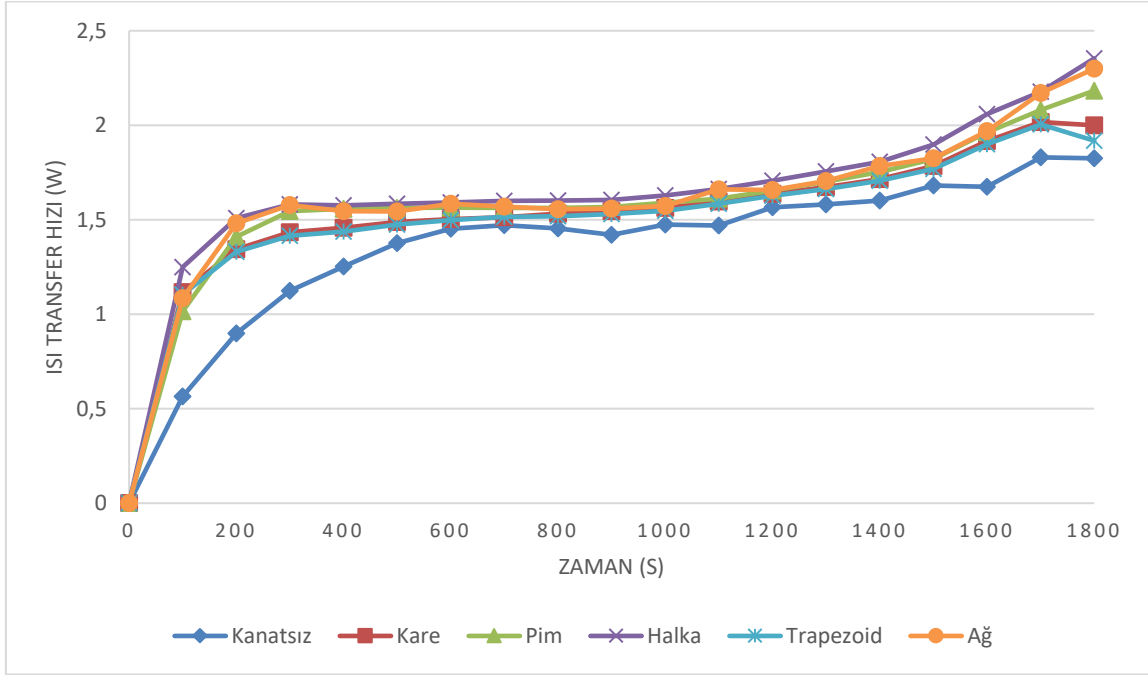


Şekil 4.18 Şaşırtmalı dizilimde zorlanmış taşınım koşulları için 8 numaralı pile ait sıcaklık değişimi

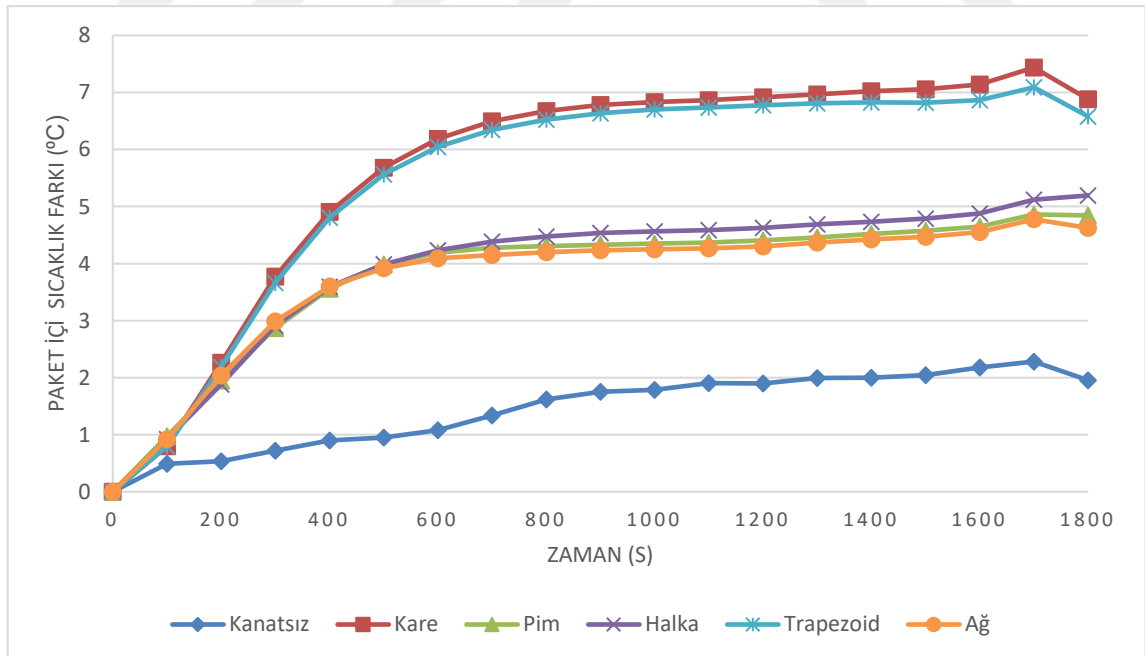
Ortam sıcaklığının 30 °C olarak öngörüldüğü durumda, hava giriş hızı benzer şekilde 4 m/s olarak belirlenmiş olup, verilen zorlanmış taşınım koşullarında 8 numaralı pil için ısı transfer hızı Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Isı transfer hızının ilk 8-9 dakika içerisinde yükseldiği ve uzun süre 1,5 W dolayında stabil bir seyir izlediği gözlenmektedir. Azalan pil yükü ile birlikte yeniden hızlanan ısı transferi kanat olmayan piller için 1,82 W dolayına erişmektedir. En iyi ısı transfer hızını sergileyen halka tipi kanatlı piller için bu değer 2,35 W düzeyine çıkmaktadır.

Kanatsız piller ve kısmen de küçük kütleli ağ yapıdaki piller için ısı transfer hızının zamana göre değişken ve kararsız bir seyir izlediği, diğer tipteki kanatlar için çok daha kararlı olduğu gözlenmektedir. 8 numaralı pil kanatsız şekilde kullanıldığında görece daha

küçük ısı transfer hızı gerçekleşmiş olup, halka ve ağ tipi kanatlı piller için en yüksek ısı transfer hızı gerçekleşmiştir.



Şekil 4.19 Şaşırtmalı dizilimde zorlanmış taşınım koşullarında 8 numaralı pil için ısı transfer hızı

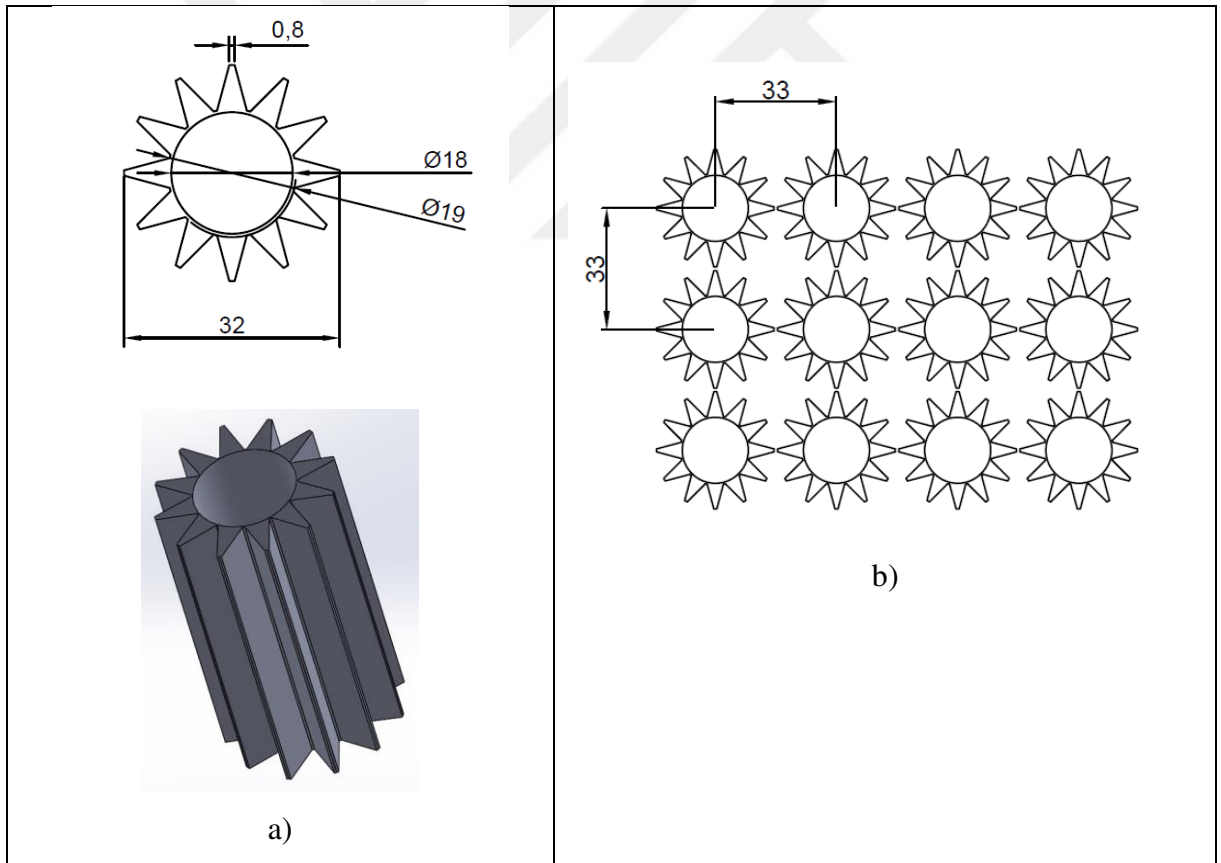


Şekil 4.20 Şaşırtmalı dizilimde zorlanmış taşınım koşullarında paket içi sıcaklık farklılıkları

Şaşırtmalı dizilim durumunda, 4 m/s hava giriş hızı ve 30 °C hava giriş sıcaklığı koşullarında paket içi sıcaklık farkı halka, ağ, pim tipi kanatlar için kabul edilebilir sınır olan 5 °C dolayındadır. Kare ve trapezoid tipteki kanatlar için bu değer 7 °C değerinin üzerine çıkmıştır.

4.1.4. Trapezoid Kanatlı Pil Paketinin Geliştirilmesi

Sayısal çalışma neticesinde elde edilen bulgular trapezoid kesitli kanat geometrisinin sıcaklık noktasında en olumlu sonuçları verdiğini göstermektedir. Bu doğrultuda trapezoid kesitin iyileştirilmesine yönelik ikincil bir sayısal çalışma yürütülmüştür. Trapezoid kesitteki kanat uzunlukları ve dolayısıyla piller arasındaki mesafe artırılarak doğal taşınım koşulları altındaki termal analiz yinelenmiştir. Şekil 4.21’de verilen yeni kanat geometrisi ve düz dizilim konfigürasyonu kullanılarak yapılan analizde pil maksimum sıcaklıklarının önemli derecede düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 4.21 a) Uzun trapezoid kanat ve b) piller arası mesafe uyarlanmış düz dizilim geometrisi

Çizelge 4.6, 4S3P konfigürasyonunda her bir pil için doğal taşınım koşullarında kanat kullanılmaması, kısa kanat uzunluğuna sahip trapezoid veya uzun kanat uzunluğuna sahip trapezoid kanat kullanılması durumu için sıcaklık dağılımını listelemektedir. Önerilen

yeni konfigürasyonda kanatçıkların etkisi çok daha belirgin şekilde gözlenmiş, oluşan en yüksek pil sıcaklıklarında 13 °C dolayında bir düşüş sağlanmıştır.

Çizelge 4.6 Trapezoid kesitli farklı kanat uzunlukları için pillerin sıcaklık dağılımı

Kanat Tipi Pil No	Kanatsız	Kısa Trapezoid	Uzun Trapezoid
Pil – 1	58,72	54,59	45,77
Pil – 2	58,44	54,80	45,54
Pil – 3	58,29	54,22	45,49
Pil – 4	58,29	55,52	45,35
Pil – 5	58,88	56,09	45,30
Pil – 6	58,19	55,51	45,26
Pil – 7	58,29	55,43	45,22
Pil – 8	58,88	56,08	45,28
Pil – 9	58,19	55,42	45,30
Pil – 10	58,73	54,58	45,63
Pil – 11	58,45	54,76	45,48
Pil – 12	58,29	54,37	45,37
Ortalama Sıcaklık	58,47	55,11	45,42

Batarya paketlerinin tasarımı SolidWorks programı ile yapılmış, ağ (mesh) oluşturma işlemi FloEFD programında yapılmıştır. Sayısal analizin güvenilirliği açısından hücre sayısının yüksek olması gerekmekte ancak bu durum çalışılacak bilgisayarın kapasitesi ile ilgili olarak çözüm süresini uzatmaktadır. Bu nedenle sayısal çalışmalarda en uygun hücre sayısının belirlenmesi ve hücre sayısının sonuçlar üzerindeki etkisinin yok edilmesi (grid bağımsızlığının sağlanması) gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında sonuçların ağ yapısından bağımsız olması için FloEFD programında 4 farklı ağ sıklığı denenmiştir.

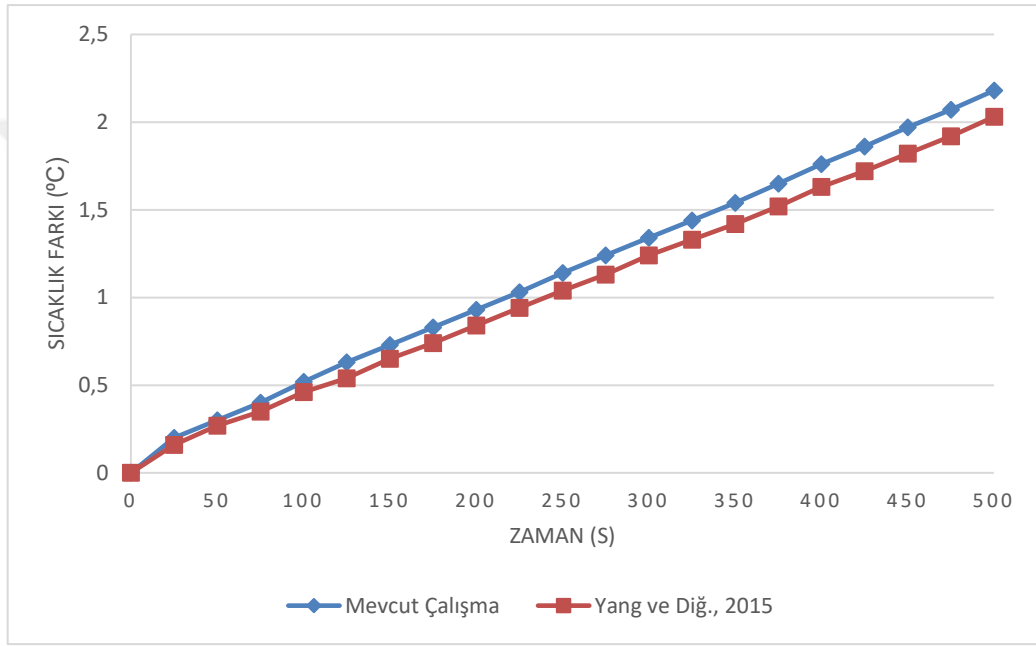
Ağ sıklığına göre hücre sayılarının ve sıcaklığın değişimi Çizelge 4.7’de sunulmuştur. İkinci sıklık derecesinden sonra sıcaklık değişimi son derece az olduğu için bu ağ yapısının kullanılmasına karar verilmiştir.

Hesaplanmalarda Intel Core i9–9900 (16 Çekirdek) (3.10 GHz, 16 MB, 1600 MHz) işlemci ve 64 GB DDR4 RAM iş istasyonu kullanılmıştır.

Çizelge 4.7 Farklı ağ yapıları ve erişilen en yüksek sıcaklık değerleri

Ağ Sıklık Derecesi	1	2	3	4
Hücre sayısı	170.929	342.740	655.502	1.087.881
Katı hücre sayısı	99.051	215.139	420.630	728.261
Akışkan hücre sayısı	71.878	127.601	234.872	359.620
Katı temaslı akışkan hücre sayısı	46.204	79.341	134.886	200.782
Maksimum Sıcaklık (°C)	57,01	56,08	56,02	55,99

Yapılan sayısal çalışmanın doğrulaması literatürde elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Yang ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmadaki sıcaklık değerleri ile mevcut çalışmamızda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada park duvar kalınlığı 0,4 mm, kanat yüksekliği 1 mm, hücre uzunluğu 201 mm, üçgen şekilli ve giriş hava hızının 0,3 m/s olduğu örnek ile kıyaslama yapıldığında elde edilen sonuçlar Şekil 4.22’de verilmiş ve sonuçların büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür (Yang ve diğ., 2015).



Şekil 4.22 Sıcaklık farkı için bir başka çalışma ile yapılan mukayese sonuçları (Yang ve diğ., 2015).

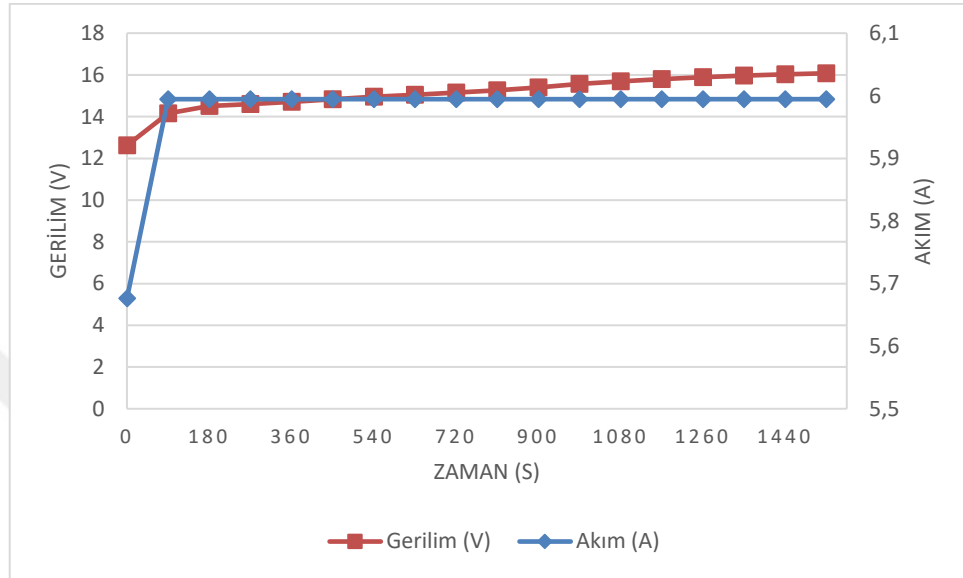
Kanat uzunluğu artırılmış trapezoid kesitli kanatlara sahip batarya paketinin sayısal sonuçlarının doğrulanması amacıyla deneysel çalışma yürütülmüştür.

4.2.Deneysel Çalışma Bulguları

Deneysel çalışmada kanatsız ve uzun trapezoid kanatlı, 4 seri ve 3 paralel (4S3P) konfigürasyonundaki pil paketleri için şarj ve deşarj süreçleri işletilmiştir. Sıcaklık ölçümü için kullanılan termal çiftler, konfigürasyonda, ara sırayı teşkil eden 2, 8, 5 ve 11 numaralı piller üzerine yerleştirilmiş, bu piller sırasıyla 1., 2., 3. ve 4. Pil olarak yeniden numaralandırılmıştır. Veri kaydedici kullanılarak ölçümlenen sıcaklıklar her saniyede bir kayıt altına alınmıştır.

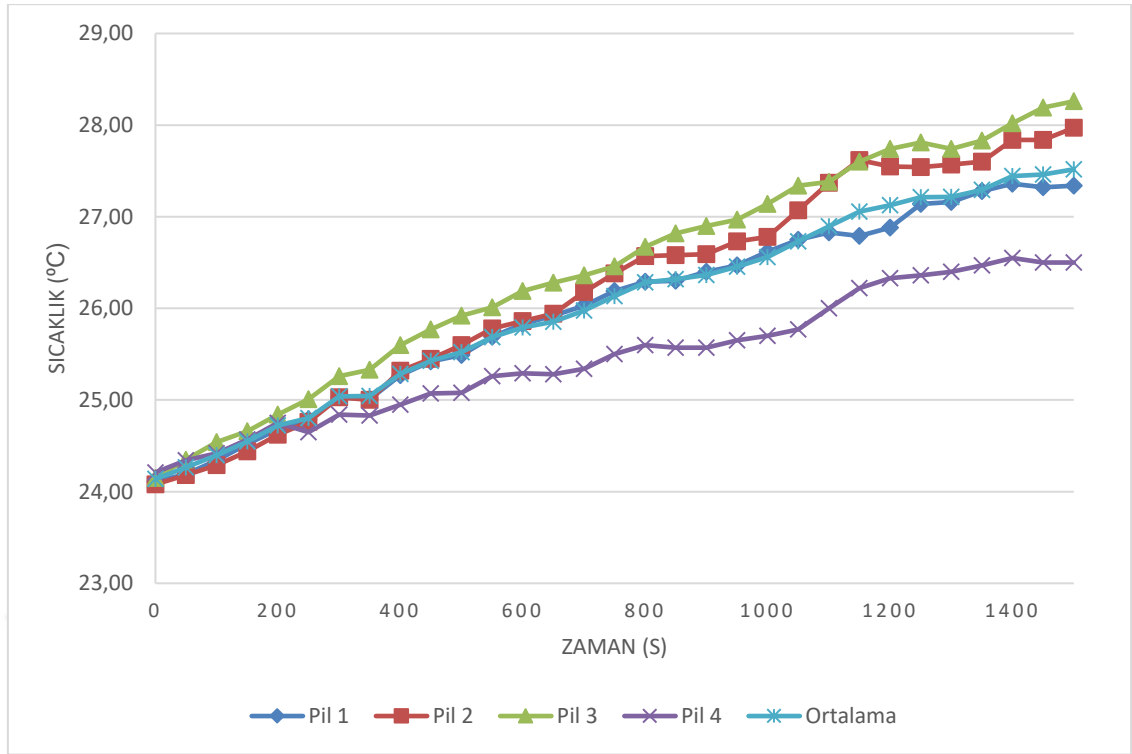
4.2.1. Kanatsız pil paketi şarj süreci

Kanatsız pillerden oluşan paketin şarj işlemi esnasında, batarya test cihazı tarafından üretilen gerilim - akım grafiği Şekil 4.'de verilmiştir. 6 A sabit akım ve 1C şarj hızı ile gerçekleştirilen şarj işleminde 16 V gerilim yüklemesi yapılmış olup işlem 24 dakika 44 saniye sürmüştür.



Şekil 4.23 Kanatsız pil paketinin şarj süreci boyunca gerilim ve akım değişimi

Şarj sürecine ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 4.'de verilmiştir. Deney başlangıcında ortamın ve pillerin sıcaklığı 24 °C dolayında ölçümlenmiş, her bir pilin başlangıç anındaki sıcaklığı veri kaydedici ile kayıt altına alınmıştır. Şarj işleminde batarya sıcaklıkları yaklaşık 4 °C sıcaklık artışı ile 28 °C dolayına çıkmıştır. Erişilen maksimum pil sıcaklıkları sırasıyla 27,41 °C, 27,97 °C, 28,26 °C ve 26,60 °C şeklindedir.



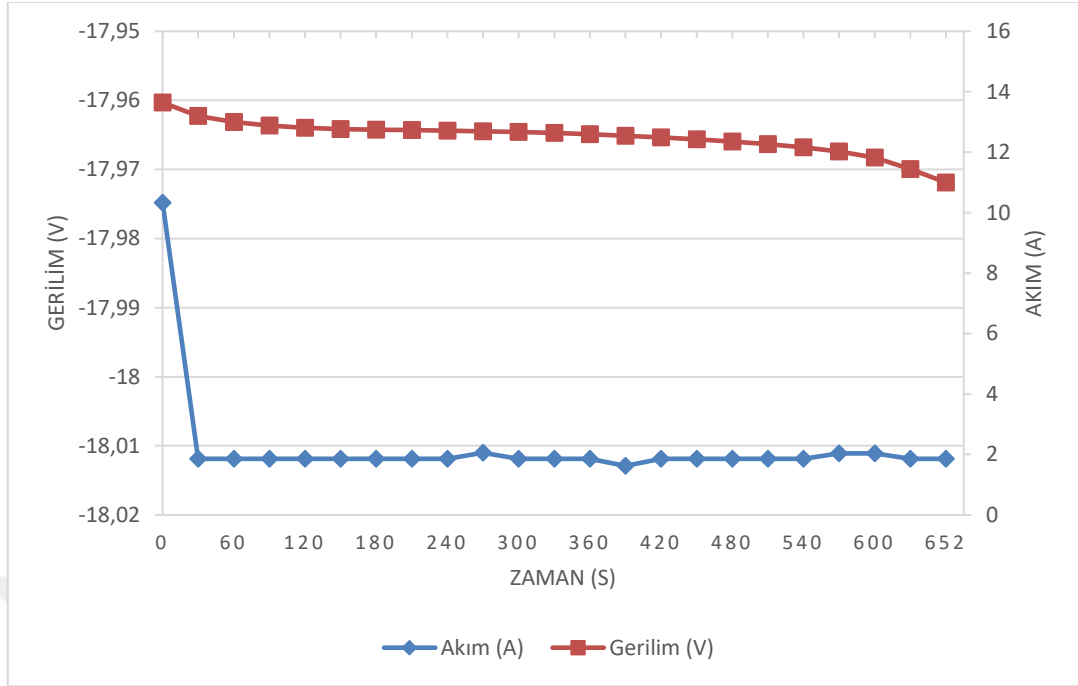
Şekil 4.24 Kanatsız pillerin şarj sürecinde sıcaklık değişimi

4.2.2. Kanatsız pil paketi deşarj süreci

Kanatsız pil paketinin deşarj işlemi 18 A sabit akım değeri altında, 3C deşarj hızı ile gerçekleştirilmiştir. 11 V olarak seçilen kesme gerilimine 10 dakika 52 saniye sonunda ulaşılmıştır. Şekil 4.'de verilen grafik deşarj sürecindeki akım ve gerilim değişimini göstermektedir.

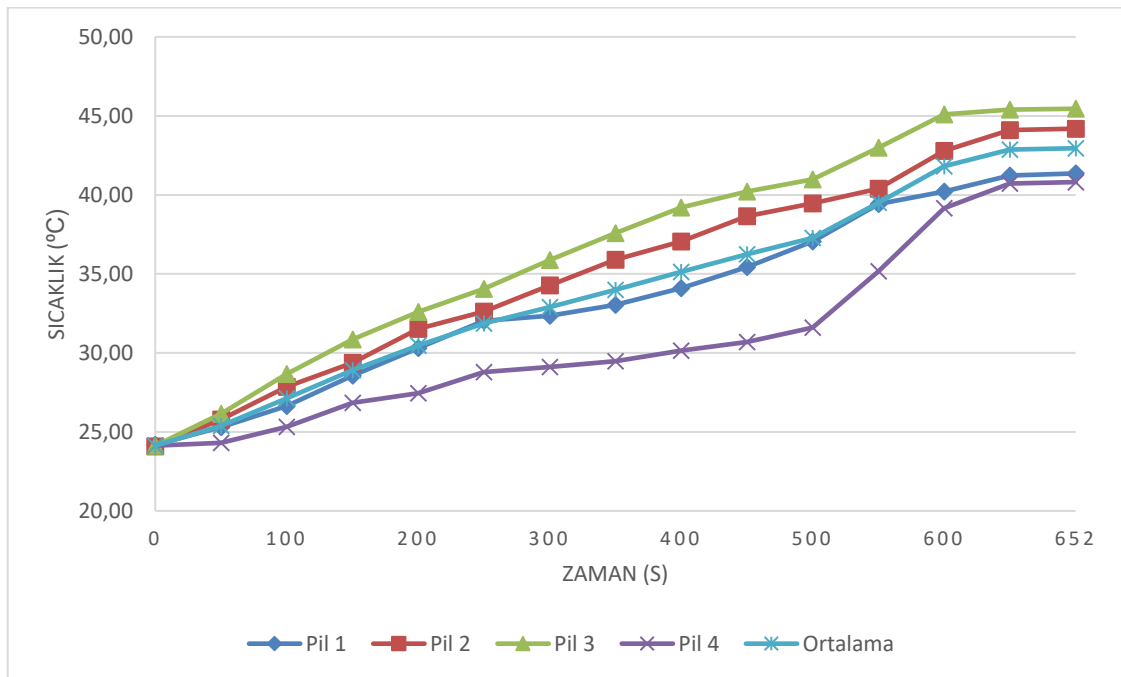
Deşarj sürecinde seçili 4 hücreye ait sıcaklık değişimleri Şekil 4.'de verilmiştir. Ortam sıcaklığında başlatılan deşarj sonunda pil sıcaklıkları sırasıyla 41,36 °C, 44,19 °C, 45,45 °C ve 40,81 °C olarak ölçülmüştür. Pil sıcaklıkları sürekli artan bir eğilim göstermiş olup, deney sonucundaki bu sıcaklık değerleri aynı zamanda maksimum pil sıcaklıkları olarak not edilmiştir.

Deney sonunda batarya içindeki maksimum sıcaklık farkı değeri 5 °C altında kalmış olmakla birlikte, deney esnasında özellikle 4 numaralı pilin diğerlerinden daha az ısınmasından dolayı en fazla 10,31 °C değerine ulaşmıştır. Bu da paket içindeki sıcaklık dağılımının homojen sınırlar dahilinde kalmadığı, kabul edilebilir sıcaklık farkı olan 5 °C değerinin üzerine çıkıldığı anlamına gelmektedir. Pillerin sıcaklık değerlerinin arasındaki farkların yüksek olmasının temel nedeni, batarya paketinin kenar ve iç kısımda yer alan pillerin maruz kaldığı taşınımın farklılıklar göstermesidir. Bu durum, sonuçları Şekil 4.7 ile verilen sayısal çalışmada da ortaya konulmuştur.



Şekil 4.25 Kanatsız pil paketinin deşarj süreci boyunca gerilim ve akım değişimi

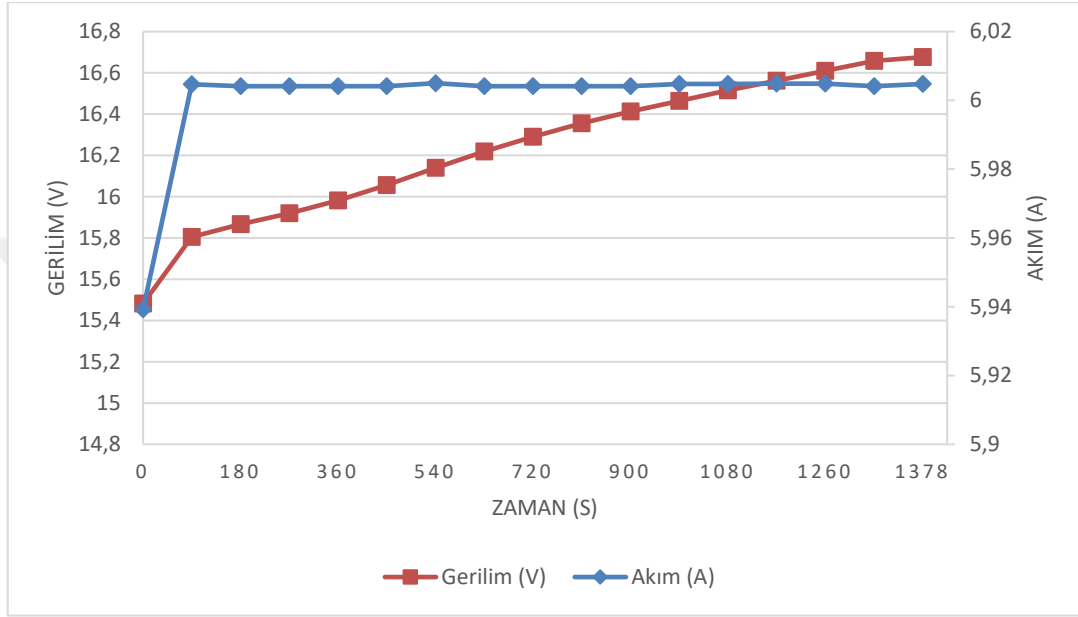
Paketin dış ortama açık, kenar yüzeyinde yer alan 1 (2) ve 4 (11) numaralı pillerin sıcaklıklarının, iç kısımlarda yer alan 2 (8) ve 3 (5) numaralı pillere göre daha düşük değerlerde olduğu gözlenmiştir. Bu durum iç kesimlerde yer alan hücrelerin ısılarını yeterince dışarıya atamamalarına, dolayısıyla sıcaklıklarının yükselmesine işaret etmektedir.



Şekil 4.26 Kanatsız pil paketinin deşarj sürecinde, seçilen 4 pile ait sıcaklık değişimi

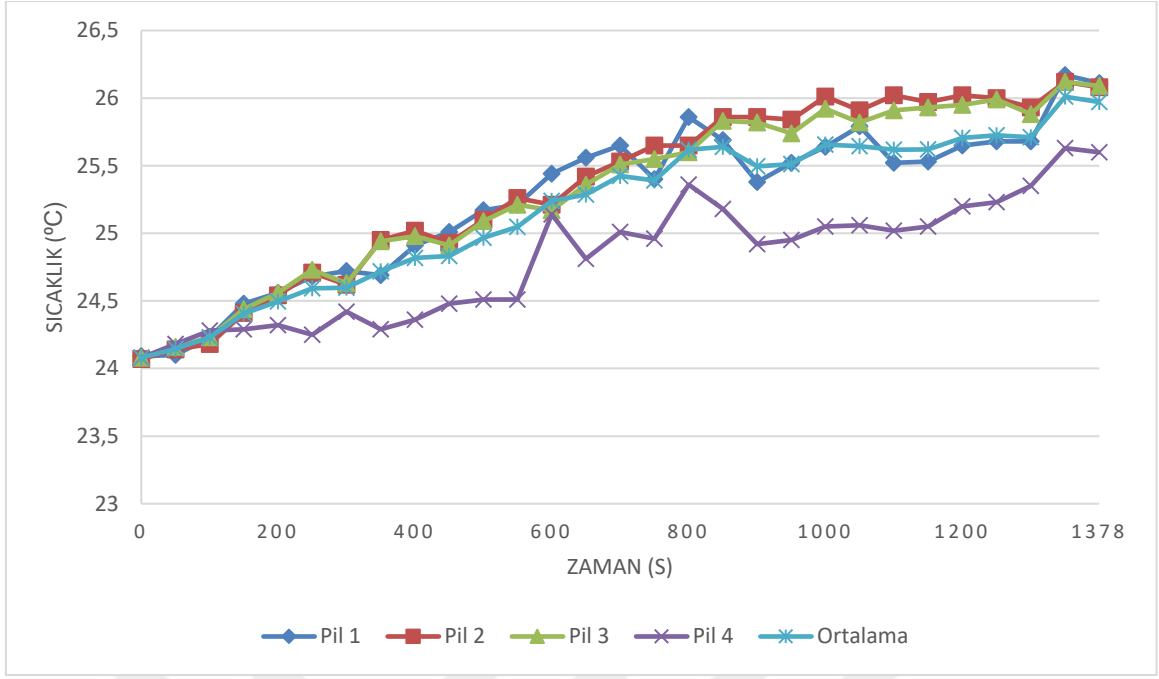
4.2.3. Kanatlı pil paketi şarj süreci

Kanatlı pillerden oluşan paketin şarj sürecinde de benzer şekilde, 6 A sabit akım değeri ve C şarj hızı ile yükleme gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.'da verilen gerilim - akım grafiği yaklaşık 23 dakika süren şarj işlemini göstermekte olup, gerilim değeri 16,6 V değerine ulaştığında akım kesilmiştir.



Şekil 4.27 Kanatlı pil paketinin şarj işlemi boyunca gerilim ve akım değişimi

Kanatlı pil paketinin şarj işleminde ilgili 4 pil hücresi için en yüksek pil sıcaklıkları sırasıyla 26,19 °C, 26,25 °C, 26,24 °C ve 25,66 °C şeklinde gerçekleşmiş olup, pillerin zamana bağlı sıcaklık değişimleri Şekil 4.'de verilmiştir.



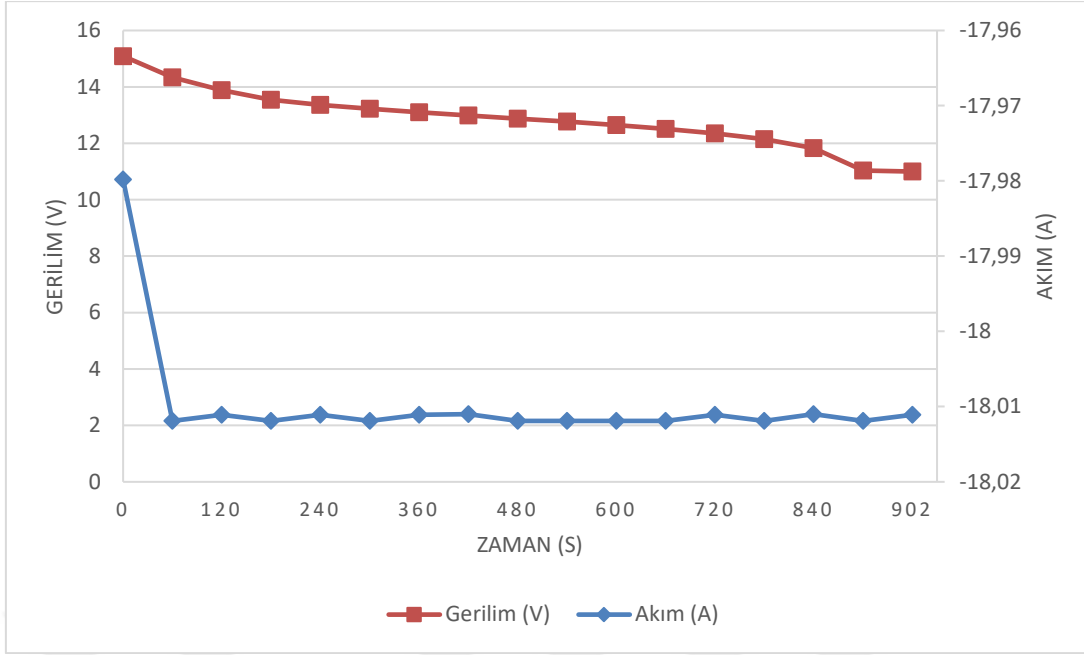
Şekil 4.28 Kanatlı pil paketinin şarj sürecinde 4 pile ait sıcaklık değişimi

4.2.4. Kanatlı pil paketi deşarj süreci

Kanatlı pil paketinin deşarj işlemi de 3C deşarj hızı ile 18 A akım çekilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.'de verildiği üzere 11 V kesme gerilimine kadar sürdürülen deşarj işlemi 15 dakika 2 saniye sürmüştür.

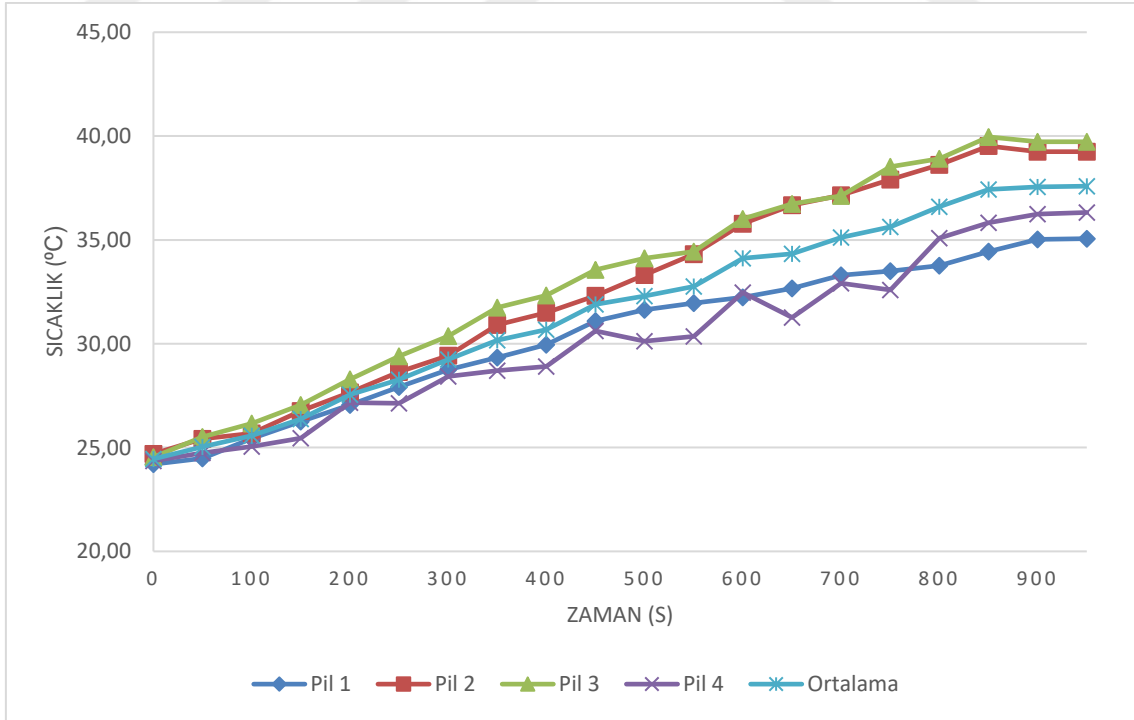
Kanatlı pillerden oluşan 4S3P pil paketinin 3C hızla deşarjında, pil sıcaklıkları değişimi Şekil 4.'da gösterilmiş olup, ilgili 4 pilin nihai sıcaklıkları sırasıyla, 35,06 °C, 39,25 °C, 39,72 °C ve 36,32 °C değerlerine ulaşmış ve bu sıcaklıkların ortalaması 37,59 °C olarak hesaplanmıştır. Pil sıcaklıkları hemen hemen tüm deney boyunca sürekli artan bir eğilim göstermiş olup, ulaşılan en yüksek pil sıcaklıkları sırasıyla 35,06 °C, 39,72 °C, 39,99 °C ve 36,32 °C'dir.

Diğer şarj ve deşarj süreçlerine benzer şekilde paketin iç kesimlerinde bulunan piller, doğal taşınımın yetersiz kalması nedeniyle daha yüksek sıcaklıklara erişmiştir. Piller arasındaki sıcaklık farkının en yüksek değeri 6,06 °C şeklinde gerçekleşmiş olup, bu değer paket içinde sıcaklığın arzu edilen düzeyde homojen dağılmadığının göstergesidir.



Şekil 4.29 Kanatlı pil paketi deşarj süreci boyunca gerilim ve akım değişimi

Kanatlı pillerden oluşan batarya paketi için gözlenen bir diğer durum ise sıcaklık değişimlerinin kanatsız pillere göre çok daha yavaş gerçekleştiği, ani sıcaklık iniş ve çıkışlarının yaşanmadığı, süreç boyunca sıcaklığın daha kararlı bir seyir takip ettiğidir.



Şekil 4.30 Kanatlı pillerin deşarj sürecinde sıcaklık değişimi

Sayısal ve deneysel çalışmalarda elde edilen bulguların birlikte değerlendirilmesi, hücre düzeyinde kanat uygulamalarının elektrikli araçların hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerinde bir alternatif olarak kullanılmasına ışıık tutacak, önerilen sistemin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyacaktır.



5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerine yenilikçi bir yaklaşım getirmek amacıyla batarya hücresi düzeyinde, farklı kesitlerde kanat uygulamaları önerilmiştir. Bu uygulamaların, doğal taşınım koşullarında kanat tipine göre 2 – 4 °C aralığında değişen düzeylerde sıcaklık avantajı sağladığı, zorlanmış taşınım koşullarında ise bu avantajın 7 – 8 °C dolayına çıkabildiği sayısal analiz çalışması ile tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada ise kanatlı ve kanatsız pillerin şarj ve deşarj durumlarında ulaştıkları en yüksek sıcaklıklar ile batarya paketi içinde oluşan sıcaklık farklarının maksimum değerleri Çizelge 5.1’te verilmiştir.

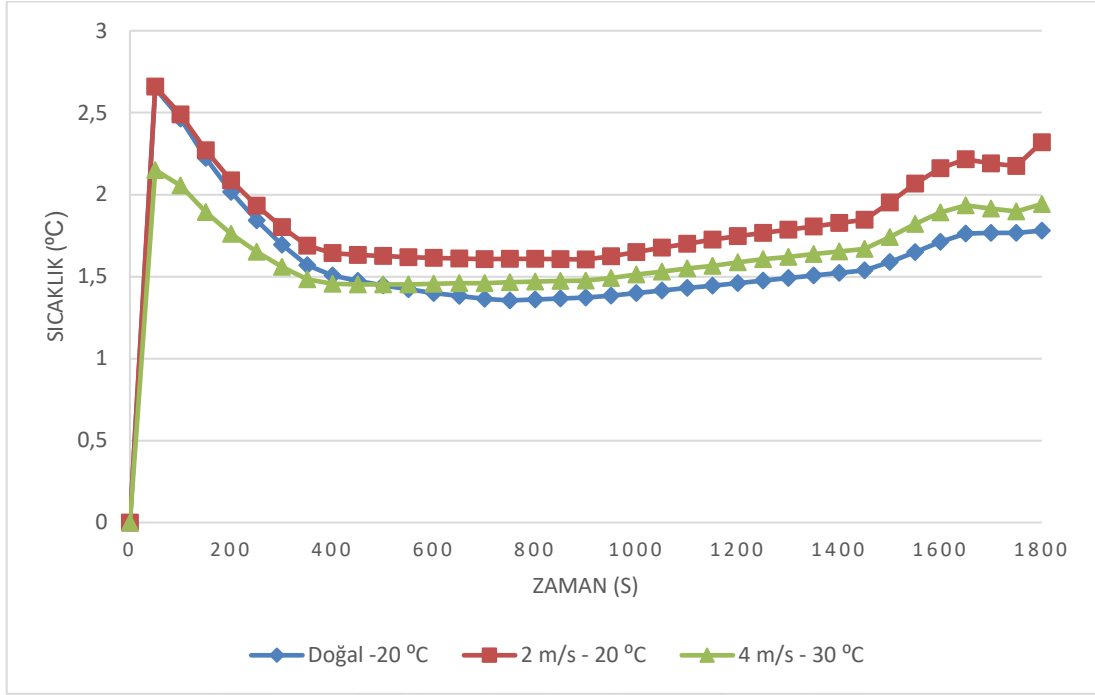
Çizelge 5.1 Deneysel çalışmada erişilen en yüksek sıcaklık değerleri (°C)

Batarya Paketi Durumu		Pil 1	Pil 2	Pil 3	Pil 4	Paket içi Sıcaklık Farkı (Maks.)
Şarj	Kanatsız Paket (1C)	27,41	27,97	28,26	26,60	1,76
	Kanatlı Paket (1C)	26,19	26,25	26,24	25,66	1,04
Şarj durumu için kanatın sıcaklığa etkisi		1,12	1,72	2,02	0,94	-
Deşarj	Kanatsız Paket (3C)	41,36	44,19	45,45	40,81	10,31
	Kanatlı Paket (3C)	35,06	39,72	39,99	36,32	6,06
Deşarj durumu için kanatın sıcaklığa etkisi		6,13	4,36	5,39	4,28	-

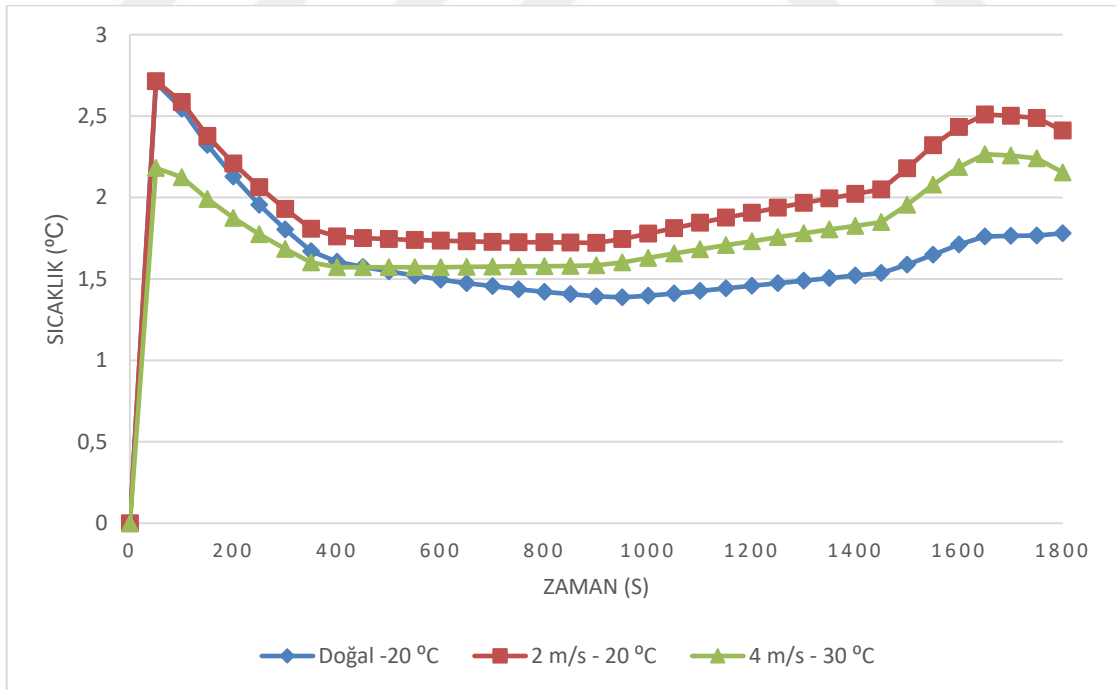
Seri şekilde bağlanmış iki pilin ısı akıları incelendiğinde kanat kullanımı halinde %5 dolayında bir ısı akısı avantajı gözlenmiş olup, bu durum toplam kanat etkinliğinin 1,05 olduğunu göstermektedir. Bilindiği üzere uygulamada kanat etkinlik değerinin en az 2 olması benimsenmektedir (Incropera ve DeWitt, 1996). Ancak lityum iyon bataryaların kullanıldığı araç ve aletlerin yüksek maliyetleri ve ömürleri birlikte düşünüldüğünde etkinlik değeri düşük seviyelerde de olsa kanat kullanımının faydalı olacağı, bununla birlikte kanat etkinlik değerini artırmaya yönelik uygulamalar yapılabileceği değerlendirilmektedir.

Batarya yüzeyine takılan kanatların bir diğer etkisi ise, bataryaların ısınmasına temel teşkil eden joule ısısındaki değişimdir. 4S3P konfigürasyonunda oluşturulan paket için farklı kanat tiplerinde ve farklı taşınım koşullarında joule ısısının zamanla değişimi farklılık göstermektedir. Joule ısısının kanatsız batarya paketi ve trapezoid tipi kanatlı batarya paketi için değişimi sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 ile verilmiştir. Kanat türüne, ortam sıcaklığına

ve taşınım koşullarına göre değişen joule ısısı doğal olarak pil sıcaklıklarını da etkilemektedir.



Şekil 5.1 4S3P kanatsız batarya paketi için Joule ısısı değişimi



Şekil 5.2 4S3P trapezoid tipi kanatlı batarya paketi için Joule ısısı değişimi

Çalışmada, basit ve düşük maliyetli olmasından dolayı hava soğutmalı sistemler hedeflenmiştir. Önerilen kanat yapıları faz değiştiren malzeme veya sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerinde de kullanılabilecektir.

Öte yandan, zorlanmış taşınım ile yapılan soğutma uygulamasının paket içi sıcaklık dağılımını olumsuz etkilediği, sıcaklık farkını istenmeyecek düzeyde artırdığı görülmüştür. Bu durumun önlenmesi için; paket içinde birden fazla noktada fan uygulaması yapılabilir veya pillerin alt veya üst kısmına yerleştirilecek fan(lar) ile aksenal akış sağlanabilir. Benzer şekilde fanın konumlandırılmasına uygun şekilde kanat yönü belirlenebileceği gibi, sıcaklığın homojen şekilde dağılmasını sağlamak üzere hava yönlendirici plakalar da eklenebilir. Ancak batarya hücreleri arasındaki iletken bağlantı plakalarının özellikle aksenal akış uygulamaları için engel teşkil edebileceği, batarya paketi kutusunun tasarımının da aksenal akıştan olumsuz etkilenebileceği, kutu içerisine yerleştirilecek hava yönlendirme plakalarının batarya hücreleri arasında kısa devre oluşturma riskleri gibi hususlar değerlendirilmelidir.

Literatürde rastlanmayan hücre düzeyinde farklı kanat tiplerinin termal etkilerini incelemeye yönelik bu çalışma sonucunda, önerilen kanat tiplerinin batarya paketi ağırlığı ve hacminde önemli derecede artışa sebep olacağı, buna kıyasla sağlayacağı termal avantajın kısıtlı kalacağı gözlenmiştir. Çalışılan kanat tipleri, alan ve hacim için %150 – %200 aralığında, ağırlık için %33 – %40 aralığında bir artışa sebep olmaktadır. Hava soğutma sistemlerinin diğer soğutma yöntemlerine kıyasla avantajları dikkate alındığında, anılan aralıklarda sıcaklık düşüşlerinin önemli olduğu, ağırlık ve hacim artışlarının sorun teşkil etmeyeceği mühendislik uygulamalarında önerilen yaklaşımın kullanılabileceği öngörülmektedir. Zira hava soğutma sistemleri doğrudan araç hareketinden yararlanılarak veya ilave fan sistemleri ile zorlanmış taşınım koşullarında çalışabildiğinden yapısal açıdan basit, batarya ile herhangi bir iletken teması gerçekleşmediğinden ve olası gaz çıkışlarının ortamdaki uzaklaştırılmasına imkan verildiğinden elektriksel açıdan güvenli ve bütün bunların bir sonucu olarak düşük maliyetlidir.

Batarya modülü yerine, her bir hücre üzerine kanat uygulamasının en önemli zorluklarından birisi de hücre yüzeyine kanatların entegrasyonu sorunudur. Kanatların her birinin, pil gövdesine ayrı ayrı monte edilmesi oldukça güç olduğundan bu çalışmada kanatlar için, pil dış yüzeyine sarılabilecek yekpare silindirik yapılar öngörülmüştür. Bu silindirik yapının pil hücrelerini saran ince tabakası pil üzerinde istenmeyen bir yalıtım etkisi

oluşturmaktadır. Kanat ağırlığını da artıran bu yapının etkisi, ağ tipi kanat yapısı ile büyük ölçüde çözümlenmiştir.

Sonuç olarak, söz konusu kanat yapılarının, termal yönetimin önemli olduğu, hava ile soğutmanın avantajlı veya kaçınılmaz olduğu, alan ve hacim sorunu bulunmayan sistemler için bir alternatif teşkil edebileceği değerlendirilmektedir.

Alan, hacim ve ağırlığı azaltmaya yönelik yeni çalışmalar yapılabileceği gibi zorlanmış taşınım için birden fazla fan kullanılarak paket içinde farklı noktalara konumlandırılması, kanat geometrilerinin değiştirilmesi ve kanat optimizasyonu yapılması gibi konular ileride gerçekleştirilebilecek akademik ve endüstriyel Ar-Ge konuları olabilir. Benzer şekilde, kanat uygulamalarının batarya hücrelerinin tasarım ve imalat aşamalarında dikkate alınabileceği, hücrelerin kanatlı şekilde üretilmelerinin de bir alternatif olabileceği değerlendirilmektedir. Öte yandan kanatların, pillerde, sökülüp takılabilir bir yapı dahilinde kullanılması da bir çok açıdan avantaj yaratacaktır. Bu alternatiflerin, imalat tekniği, lojistik unsurlar ve pazarlama avantajları açısından değerlendirilmesi ve yapılacak fayda maliyet analizi çalışmaları da ele alınabilecek ileri araştırma konuları arasındadır.

6. KAYNAKÇA

- Adair, D., Ismailov, K., & Baken, Z.** (2014). Thermal Management of Lithium-ion Battery Packs. *Comsol Conference*.
- Akinlabi, A., & Solyali, D.** (2020). Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (125). doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109815.
- Al-Zareer, M., Dinçer, I., & Rosen, M.** (2019). A novel approach for performance improvement of liquid to vapor based battery cooling systems. *Energy Conversion and Management* (187), 191-204.
- Al-Zareer, M., Dinçer, İ., & Rosen, M. A.** (2020). A thermal performance management system for lithium-ion battery packs. *Applied Thermal Engineering*(165).
- Aneke, M., & Wang, M.** (2016). Energy storage technologies and real life applications: A state of the art review. *Appl. Energy* (179), 350-377.
- ANSYS 2021 R2**, Theory guide.
- ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules Manual.** (2015). ANSYS®, Inc. Canonsburg, PA: SAS IP Inc.
- Aslan, E., Aydın, Y., & Yaşa, Y.** (2022). Consideration of graphene material in PCM with aluminum fin structure for improving the battery cooling performance. *Int. Journal of Energy Research*(46), 10758-10769. doi:10.1002/er.7878
- Bamrah, P., Chauhan, M., & Sikarwar, B.** (2022). CFD Analysis of Battery Thermal Management. *Journal of Physics: Conference Series*. doi:doi:10.1088/1742-6596/2178/1/012035
- Baturar, O.** (2023). Lityum İyon Bataryaların Termal Performansının Sayısal İncelenmesi ve Optimizasyonu, (Yüksek Lisans Tezi) YÖK Tez Veri Tabanı No:809564.
- Cao, J., Luo, M., Fang, X., Ling, Z., & Zhang, Z.** (2020). Liquid cooling with phase change materials for cylindrical Li-ion batteries: An experimental and numerical study. *Energy*(191).
- Chaudhari, J., Singh, G., Rathod, M., & Muhammad Ali, H.** (2024). Experimental and computational analysis on lithium ion battery thermal management system utilizing air cooling with radial fns. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*(149), 203-218.
- Chen, D., Jiang, J., Kim, G., Yang, C., & Pesaran, A.** (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied Thermal Engineering*(94), 846-854.
- Chen, K., Han, T., Khalighi, B., & Kalus, P.** (2017). Air Cooling Concepts for Li-Ion Battery Pack in Cell Level. *ASME Heat Transfer Summer Conference*.
- Chen, K., Wang, S., Mengxuan, S., & Chen, L.** (2017). Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*(111), 943-952.
- Dinçer, İ., Hamut, H. S., & Javani, N.** (2017). Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems. John Wiley & Sons Ltd.
- Duan, X., & Naterer, G.** (2010). Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules. *Int. J. Heat Mass Transf.*(53), 5176–5182.
- Fan, Y., Bao, Y., Ling, C., Chu, Y., Tan, X., & Yang, S.** (2019). Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density

- cylindrical lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 96-109. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.157
- Feng, X., Ren, D., He, X., & Ouyang, M.** (2020). Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries. *Joule*, 4 (4), 743-770. doi:https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.02.010
- Gou, J., Liu, W., & Luo, Y.** (2019). The thermal performance of a novel internal cooling method for the electric vehicle battery: An experimental study. *Applied Thermal Engineering* (161).
- Hannan, M., Hoque, M., Mohamed, A., & Ayob, A.** (2017). Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(69), 771-789. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.171
- Hoş, İ., & Türkakar, G.** (2021). Heat transfer and thermal management of lithium-ion battery pack system with forced air convection, Vol:6, No:1, Page 25-30 (2021). *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 1 (6), 25-30.
- Hu, X., Zheng, Y., Howey, D., Perez, H., Foley, A., & Pecht, M.** (2020). Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives. *Progress in Energy and Combustion Science*(77). doi:https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806
- Hu, X., Zou, C., Zhang, C., & Li, Y.** (2017). Technological Developments in Batteries: A Survey of Principal Roles, Types, and Management Needs. *IEEE Power & Energy Magazine*. doi:10.1109/MPE.2017.2708812
- Huaqiang, L., Zhongbao, W., Weidong, H., & Jiyun, Z.** (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*(150), 304-330.
- Hunt, I. A., Zhao, Y., Patel, Y., & Offer, G. J.** (2016). Surface Cooling Causes Accelerated Degradation Compared to Tab Cooling for Lithium-Ion Pouch Cells, Ian A. Hunt et al 2016 163 A1846. *J. Electrochem. Soc.*(163), A1846-A1852.
- Ianniciello, L., Biwole, P., & Achard, P.** (2018). Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials,. *Journal of Power Sources*(378), 383-403.
- Incropera, F., & DeWitt, D.** (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (4th edition b.). John Wiley & Sons.
- Jarrett, A., & Kim, Y.** (2011). Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance. *Journal of Power Sources*(196), 10359-10368.
- Jiaqiang, E., Han, D., Qui, A., Zhu, H., Deng, Y., Chen, J., Peng, Q.** (2018). Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering* (132), 508-520. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.115.
- Jiaqiang, E., Yue, M., Chen, J., Zhu, H., Deng, Y., Zhu, Y., Kang, S.** (2018). Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle. *Applied Thermal Engineering*(144), 231-241. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.064.
- Jilte, R., Kumar, R., & Ma, L.** (2019). Thermal performance of a novel confined flow Li-ion battery module. *Applied Thermal Engineering*(146), 1-11. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.099
- Karimi, G., & Li, X.** (2013). Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Int. J. Energy Res.*(37), 13-24.

- Kumar, K., & Chaudhari, M.** (2021). Design of cell spacing in lithium-ion battery module for improvement in cooling performance of the battery thermal management system. *Journal of Power Sources*, 481. doi:https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229016
- Kumaresan, K., Sikha, G., & White, R.** (2008). Thermal model for a Li-ion cell. *J. Electrochem. Soc.*(155), A164–A171.
- Kummitha, O.** (2023). Thermal cooling of li-ion cylindrical cells battery module with baffles arrangement for airflow cooling numerical analysis. *Journal of Energy Storage*(59). doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106474
- Lazrak, A., Fourmigue, J., & Robin, J.** (2018). An innovative practical battery thermal management system based on phase change materials: Numerical and experimental investigations. *Applied Thermal Engineering*(128), 20-32.
- Li, J., & Zhu, Z.** (2014). Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles (Master's Thesis). <http://odr.chalmers.se>
- Li, X., Zhao, J., Yuan, J., Duan, J., & Liang, C.** (2021). Simulation and analysis of air cooling configurations for a lithium-ion battery pack. *Journal of Energy Storage*(35).
- Li, Y., Qi, F., Guo, H., Guo, Z., Xu, G., & Liu, J.** (2019). Numerical investigation of thermal runaway propagation in a Li-ion battery module using the heat pipe cooling system,. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 3(75), 183-199.
- Lin, C., Chen, K., Sun, F., Tang, P., & Zhao, H.** (2009). Research on thermo-physical properties identification and thermal analysis of EV Li-ion battery. *In Proceedings of the 2009 Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, (s. 1426-1431). Dearborn.
- Ling, Z., Wang, F., Fang, X., Gao, X., & Zhang, Z.** (2015). A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling. *Applied Energy*(148), 403-409.
- Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M.** (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*(226), 272-288.
- Luo, J., Zou, D., Wang, Y., Wang, S., & Huang, L.** (2022). Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal* (430). doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132741
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J.** (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Appl. Energy*(137), 511-536.
- Mahamud, R., & Park, C.** (2011). Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity. *Journal of Power Sources* (196), 5685-5696. doi:https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.076.
- Matsuki, K., & Ozawa, K.** (2009). General concepts. *Lithium Ion Rechargeable Batteries: Materials, Technology, and New Applications*.
- Matthe, R., Turner, L., & Mettlach, H.** (2011). Battery System for Electric Vehicle with Extended Range. *SAE International Journal of Engines*(4 (1)), 1944-1962.
- Moaveni, A., Siavashi, M., & Mousavi, S.** (2024). Passive and hybrid battery thermal management system by cooling flow control, employing nano-PCM, fins, and metal foam. *Energy*(288). doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129809.
- Motloch, C., Christophersen, J., Belt, J., Wright, R., Hunt, G., Sutula, R., Miller, T.** (2002). High-power battery testing procedures and analytical methodologies

- for HEV's. *SAE Transactions Journal of Passenger Cars; Electronic and Electrical Systems*, 7(111), 797-802.
- Muratoğlu, Y., & Alkaya, A.** (2015). Elektrikli Araç Teknolojisi Ve Pil Yönetim Sistemi-İnceleme,. VIII. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı.
- Nazri, G., & Pistoia, G.** (2009). Lithium Batteries: Science and Technology,.
- Özel, M.** (2019). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Paketinin Termal Modeli ve Analizi. (Yüksek Lisans Tezi), YÖK Veri Tabanı No:632403.
- Padalkar, A., Cahudhari, M., Kore, K., Nevaskar, S., Nilegave, D., & Funde, A.** (2024). Effects of circumferential fin on cooling performance improvement of forced air-cooled battery pack. *Applied Thermal Engineering*(238).
- Pesaran, A. A.** (2001). Battery Thermal Management in EVs and HEVs : Issues and Solutions. *Advanced Automotive Battery Conference*.
- Pesaran, A. A.** (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *J. Power Sources* (110), 377-382. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00200-8)
- Pesaran, A., & Santhanagopalan, G.** (2013). Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications. *30th Int Battery Seminar*.
- Pistoia, G., & Liaw, B.** (2018). Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. Springer.
- Qin, P., Liao, M., Mei, W., Sun, J., & Wang, Q.** (2021). The experimental and numerical investigation on a hybrid battery thermal management system based on forced-air convection and internal finned structure. *Applied Thermal Engineering*(195). doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117212>
- Rahmani, A., Dibaj, M., & Akrami, M.** (2024). Recent Advancements in Battery Thermal Management Systems for Enhanced Performance of Li-Ion Batteries: A Comprehensive Review. *Batteries*, 10 (8), 265. doi:<https://doi.org/10.3390/batteries10080265>
- Rao, Z., Wen, Y., & Zhao, J.** (2019). Thermal performance of battery thermal management system using composite matrix coupled with mini-channel. *Energy Storage*. doi:<https://doi.org/10.1002/est2.59>
- Reddy, T., & Linden, D.** (2011). Linden's Handbook of Batteries. Mc Grawhill.
- Saechan, P., & Dhuchakallaya, I.** (2021). Numerical investigation of air cooling system for a densely packed battery to enhance the cooling performance through cell arrangement strategy. *International Journal of Research*, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1002/er.7571>
- Sefidan, A., Sojoudi, A., & Saha, S.** (2017). Nanofluid-based cooling of cylindrical lithium-ion battery packs employing forced air flow. *International Journal of Thermal Sciences* (117), 44-58.
- Sharma, D., & Prabhakar, A.** (2021). A review on air cooled and air centric hybrid thermal management techniques for Li-ion battery packs in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 41, 102885. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102885>
- Simcenter FloEFD 2312.0001** (2023) (Bilgisayar Yazılımı), Siemens.
- Sun, Z., Fan, R., & Zheng, N.** (2021). Thermal management of a simulated battery with the compound use of phase change material and fins: Experimental and numerical investigations. *International Journal of Thermal Sciences* (165). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106945>

- Sun, Z., Fan, R., Yan, F., Zhou, T., & Zheng, N.** (2019). Thermal management of the lithium-ion battery by the composite PCM-Fin structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (145). doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118739
- Thakur, A., Prabakaran, R., Elkadeem, M., Sharshir, S., Arıcı, M., Wang, C., Saidur, R.** (2020). A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles,. *Journal of Energy Storage*(32). doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101771
- Türkakar, G., & Hoş, İ.** (2023). Numerical investigation of lithium-ion battery thermal management using fins embedded in phase change materials. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2(38), 1105-1116. doi:10.17341/gazimmfd.762563
- Vayrynen, A., & Salminen, J.** (2012). Lithium ion battery production. *Journal of Chem. Thermodynamics* (46), 80-85.
- Viswanathan, V., Choi, D., Wang, D., Xu, W., Towne, S., Williford, R., Yang, Z.** (2010). Effect of entropy change of lithium intercalation in cathodes and anodes on Li-ion battery thermal management. *J. Power Sources* (195), 3720-3729.
- Wang, M., Jiang, C., Zhang, S., Song, X., Tang, Y., & Cheng, H.-M.** (2018). Reversible calcium alloying enables a practical room-temperature rechargeable calcium-ion battery with a high discharge voltage. *Nature Chemistry* (10), 667-672. doi:https://doi.org/10.1038/s41557-018-0045-4.
- Wang, Q., Jiang, B., Xue, Q., Sun, H., Li, B., Zou, H., & Yan, Y.** (2015). Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes. *Applied Thermal Engineering* (88), 54-60.
- Wang, T., Tseng, K., Zhao, J., & Wei, Z.** (2014). Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Applied Energy* (134), 229-238. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.013.
- Wang, Y., Yu, Y., Jing, Z., Wang, C., Zhou, G., & Zhao, W.** (2021). Thermal performance of lithium-ion batteries applying forced air cooling with an improved aluminium foam heat sink design. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*(167).
- Warner, J.** (2024). *The Handbook of Li-ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Type and Terminology*. Elsevier Inc.
- Wei, Y., & Agelin-Chaab, M.** (2019). Development and experimental analysis of a hybrid cooling concept for electric vehicle battery packs. *Journal of Energy Storage*(25).
- Widanage, W.D., Barai, A., Chouchelamane, G.H., Uddin, K. McGordon, A., Marco, J., Jennings, P.**, Design and use of multisine signals for Li-ion battery equivalent circuit modelling. Part 1: Signal design, *Journal of Power Sources*, Volume 324, 2016, Pages 70-78, ISSN 0378-7753, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.05.015.
- Widanage, W.D., Barai, A., Chouchelamane, G.H., Uddin, K. McGordon, A., Marco, J., Jennings, P.**, Design and use of multisine signals for Li-ion battery equivalent circuit modelling. Part 2: Model estimation, *Journal of Power Sources*, Volume 324, 2016, Pages 61-69, ISSN 0378-7753, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.05.014.
- Williford, R., Viswanathan, V., & Zhang, J.-G.** (2009). Effects of entropy changes in anodes and cathodes on the thermal behavior of lithium ion batteries. *J. Power Sources* (189), 101-107.

- Wiriyasart, S., Hommalee, C., Sirikasemsuk, S., Prupark, R., & Naphon, P.** (2020). Thermal management system with nanofluids for electric vehicle battery cooling modules. *Case Studies in Thermal Engineering*(18).
- Wu, S., Xiong, R., Li, H., Nian, V., & Ma, S.** (2020). The state of the art on preheating lithium-ion batteries in cold weather. *Journal of Energy Storage* (27). doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101059>
- Xiao, H., Shaohua, L., & Stanton, S.** (2010). A novel thermal model for HEV/EV battery modeling based on CFD calculation. *In Proceedings of the 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 893-900.
- Xing, Y., Ma, E., Tsui, K., & Pecht, M.** (2011). Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles. *Energies*, 1840-1857.
- Yang, N., Zhang, X., Li, G., & Hua, D.** (2015). Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Applied Thermal Engineering*(80), 55-65.
- Yang, W., Zhou, F., Zhou, H., & Liu, Y.** (2020). Thermal performance of axial air cooling system with bionic surface structure for cylindrical lithium-ion battery module, Vol. 161, 2020, 120307. *Int. J. of Heat and Mass Transfer* (161).
- Ye, Y., Saw, L., Shi, Y., & Tay, A.** (2015). Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging. *Applied Thermal Engineering* (86), 281-291.
- Yıldız, M.** (2016). Uçaklarda Kullanıma Yönelik Batarya Isıl Yönetim Sistemlerinin Araştırılması (Cilt Doktora Tezi).
- Zhang, F., Lu, F., Liang, B., Zhu, Y., Gou, H., Xiao, K., & He, Y.** (2023). Thermal performance analysis of a new type of branch-fin enhanced battery thermal management PCM module. *Renewable Energy* (206), 1049-1063. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.083>
- Zhang, X., Tang, Y., Zhang, F., & Lee, C.-S.** (2016). A Novel Aluminum–Graphite Dual-Ion Battery. *Adv. Energy Mater.* (6). doi:DOI: 10.1002/aenm.201502588.
- Zhao, C., Sousa, A., & Jiang, F.** (2019). Minimization of thermal non-uniformity in lithium-ion battery pack cooled by channeled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (129), 660-670.
- Zhao, J., Rao, Z., & Li, Y.** (2015). Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery. *Energy Conversion and Management* (103), 157-165.
- Zhou, H., Zhou, F., Xu, L., Kong, J., & Yang, Q.** (2019). Thermal performance of cylindrical Lithium-ion battery thermal management system based on air distribution pipe. *Int. J. of Heat and Mass Transfer* (131), 984-998.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad

: Mesut ÖZTOP

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2002, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans:** 2007, Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmalat Teknolojileri Bilim Dalı
- **Doktora:** 2025, İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2002-2006: Uzman Yardımcısı, KOSGEB Erciyes Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Merkezi
- 2006-2010: Bilimsel Programlar Uzman Yardımcısı, TÜBİTAK Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı
- 2010-2018: Birim Başkanı/Genel Sekreter, Fırat Kalkınma Ajansı
- 2018-2018: Öğretim Görevlisi, BAP Koordinatör Yrd., İnönü Üniversitesi
- 2018-Halen: Öğretim Görevlisi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.)

- M. Öztıp, A. Şahinaslan, Control of temperature distribution for Li-ion battery modules via longitudinal fins, *Journal of Energy Storage, Volume 52, Part A*, 2022, 104760, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104760>
- Şahinaslan, A., Öztıp, M., Numerical Investigation of Thermal Performance of Air Cooling for Li-ion Batteries with Finned Surface, *5 th International Conference on Physical Chemistry & Functional Materials*, 23-25 June 2022.
- Şahinaslan, A., Öztıp, M., Silindirik Pil Hücrelerinin Yanal Yüzeylerine Entegre Edilen Farklı Kanat Profillerinin Termal Etkilerinin Sayısal Ve Deneysel Olarak İncelenmesi, *12th International Zeugma Congress On Scientific Research*, 2-4 Ekim 2024
- Şahinaslan, A., Öztıp, M., “Silindirik Pillerin Termal Yönetimi için Kanatçık”, Patent Başvurusu, 2024/021469