ELEKTRİKLİ BİR ARACIN BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Muhammed DÖNMEZ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ BİR ARACIN BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Muhammed DÖNMEZ
0000-0002-9046-4989

Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİKLİ BİR ARACIN BATARYA SOĞUTMA SİSTEMİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Muhammed DÖNMEZ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

Bu çalışmada, elektrikli araç bataryalarının daldırmalı soğutma performansı, yaygın olarak kullanılan iki farklı hücre kimyasına sahip batarya modülleri için incelenmiştir. Bu kapsamda, biri 24 adet 2.5 Ah kapasiteli 18650 $LiNiMnCoO_2$ (NMC) hücresinden, diğeri 10 adet 6 Ah kapasiteli 32700 $LiFePO_4$ (LFP) hücresinden oluşan iki modül, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle simüle edilmiştir. Latin Hiperküp Örnekleme (LHS), Taguchi yöntemi ve manuel oluşturulan toplamda 44 farklı tasarım çok amaçlı optimizasyon çalışmasında, 4C deşarj oranı ve 0.008 kg/s soğutucu akışkan debisinde ortalama hücre sıcaklığı ile basınç düşüşünün birlikte her iki modül içinde en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Optimum 18650 NMC modül tasarımı, temel tasarıma kıyasla ortalama hücre sıcaklığında 1,13 K'lık bir artış gösterirken, basınç düşüşünde %81,52 oranında azalma sağlamıştır. 32700 LFP modülünde ise ortalama hücre sıcaklığı 1,91 K artmış, ancak basınç düşüşü %88,32 oranında azaltılmıştır. Ayrıca, optimum 18650 NMC ile 32700 LFP modüllerinin aynı güç miktarında deşarj edilmeleri durumunda 32700 LFP modülünün soğutma sisteminin termal-akış performansının daha iyi olduğu gösterilmiştir. Ayrıca 32700 LFP modülü için, çeşitli deşarj oranı (1C–4C) ve debi (0.0001–0.008 kg/s) aralığında Batarya Termal Yönetim Sistem (BTYS) performansı HAD incelenmiş ve elde edilen verilerle eğitilen yapay sinir ağı (YSA) modeli ortalama sıcaklık tahmininde yüksek doğruluk ($R > 0.99$) sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, batarya termal yönetim sistemi, optimizasyon, yapay sinir ağları, daldırmalı soğutma
2025, xvii + 83 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

BATTERY COOLING SYSTEM DESIGN AND OPTIMIZATION OF AN ELECTRIC VEHICLE

Muhammed DÖNMEZ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

In this study, the immersion cooling performance of electric vehicle batteries is investigated for battery modules with two different cell chemistries that are widely used. For this purpose, two modules, one consisting of twenty-four 2.5 Ah capacity 18650 $LiNiMnCoO_2$ (NMC) cells and the other consisting of ten 6 Ah capacity 32700 $LiFePO_4$ (LFP) cells, are analyzed by Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The multi-objective optimization study of a total of 44 different designs generated by Latin Hypercube Sampling (LHS), Taguchi method, and manually is aimed to simultaneously minimize the average cell temperature and pressure drop for both modules at 4C discharge rate and 0.008 kg/s coolant flow rate. The optimum 18650 NMC module design shows an increase of 1.13 K in average cell temperature compared to the basic design while providing a decrease of 81.52% in pressure drop. The average cell temperature in the 32700 LFP module increases by 1.91 K, but the pressure drop is reduced by 88.32%. Furthermore, the optimized 32700 LFP module demonstrates a more efficient thermal–flow performance under equal power discharge conditions than the 18650 NMC module, indicating a more effective cooling system design. Moreover, CFD-based evaluation of the BTMS performance for the 32700 LFP module under varying discharge rates (1C–4C) and flow rates (0.0001–0.008 kg/s) is conducted, and the ANN model trained with the simulation data acquires good predictive performance for average temperature estimation ($R > 0.99$).

Key words: Electric vehicles, battery thermal management system, optimization, artificial neural networks, immersion cooling
2025, xvii + 83 pages.

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca her türlü desteğini gördüğüm bütün öğretmenlerime ve hocalarıma teşekkürlerimi sunuyorum. Bilhassa bu doktora tez çalışmasında kıymetli danışman hocam Prof. Dr. M. İhsan Karamangil'e teşekkürlerimi sunuyorum. Yine her türlü desteğini esirgemeyen, arkadaşlarıma, dostlarıma ve büyüklerime teşekkürlerimi sunuyorum. Bu hayatı benim için anlamlı kılan ve her zaman varlıkları benim güç, dayanak ve hamd sebebi olan aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

Muhammed DÖNMEZ
25/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
1. GİRİŞ…… 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Lityum Bataryalara ve Soğutma Sistemlerine Genel Bakış 3
2.2. Hava Soğutmalı BTYS 6
2.3. FDM soğutmalı BTYS 9
2.4. Dolaylı sıvı soğutmalı BTYS 12
2.5. Hibrit BTYS: FDM ve dolaylı sıvı soğutma 16
2. 6. Doğrudan sıvı soğutmalı BTYS 17
2.7. Makine Öğrenmesi Yöntemiyle Batarya Modülünde Sensörsüz Sıcaklık Tahmini 23
3. MATERYAL ve YÖNTEM 25
3.1. Deneysel Metodoloji 25
3.1.1. Batarya Seçimi ve Özellikleri 25
3.1.2. Deneysel Yöntem 26
3.1.3. Belirsizlik Analizi ve Hata Değerlendirmesi 28
3.2. NTGK Tabanlı Hücre Modellemesi 29
3.2.1. Sayısal Modelin Doğrulanması 33
3.3. Korunum Denklemleri ve Sınır Koşulları 33
3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği 38
3.4.1. Sayısal Yöntem 38
3.4.2. Ağdan Bağımsızlık Çalışması 38
3.5. YSA Tabanlı Sıcaklık Tahmini Metodolojisi 39
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 42
4.1. 18650 NMC Modül Optimizasyonu 42
4.2. 32700 LFP Modül Optimizasyonu 50
4.3. 32700 LFP ve 18650 NMC Optimum Modüllerinin Aynı Güç Değerinde Karşılaştırması 58
4.4. Farklı Deşarj Oranı ve Kütlesel Debilerde 61
4.5. YSA ile Sıcaklık Tahmini 66
5. SONUÇ…… 71
KAYNAKLAR 73
EKLER 78
EK 1…… 79
EK 2…… 80
EK 3…….. 81
EK 4……. 82
ÖZGEÇMİŞ 83

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
$\vec{v}$	Hız vektörü
$\emptyset_-$	Negatif elektrot potansiyel alanları
$\emptyset_+$	Pozitif elektrot potansiyel alanları
a_n	DoD'de çeşitli polinom terimleri için eğri uyum katsayıları
b_n	Polinom katsayıları
C_1	Sıcaklık sabit
C_2	Sıcaklığa hassasiyet bir sabit
C_p	Özgül ısı kapasitesi
D_h	Hidrolik çap
J_{ech}	Hacimsel akım transfer hızı
k	Isı iletkenliği
k_c	Soğutucu akışkanın ısı iletkenliği
P	Basınç
Q	Hücrenin teorik nominal kapasitesi
$\dot{q}_{ech}$	Elektrokimyasal hacimsel ısı üretim hızı
R_e	Reynolds sayısı
T	Bataryanın çalışma sıcaklığı
U	Açık devre gerilimi (OCV)
V	Hücre hacmi.
Y	Gerilim-akım (V-I) eğrisinin ters eğimi
M	Dinamik viskozite
ρc	Soğutucu akışkanın yoğunluğu
σ^-	Negatif elektrodun iletkenliği
σ^+	Pozitif elektrodun iletkenliği
T_{ref}	Referans sıcaklık
x	Orijinal amaç fonksiyonu değeri
r	Normalize edilmiş amaç değeri
r_1	Birinci amaç fonksiyonlarının normalize edilmiş değerleri
r_2	İkinci amaç fonksiyonlarının normalize edilmiş değerleri
D	İdeal noktaya Öklidyen uzaklık

Kısaltmalar	**Açıklama**
ANN	Artificial neural network
BYS	Batarya yönetim sistemi
BTY	Batarya termal yönetimi
BTYS	Batarya termal yönetim sistemi
CC	Sabit akım
CFD	Computational fluid dynamics
CV	Sabit gerilim
FDM	Faz değişim malzemeleri
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
KFDM	Kompozit faz değişim malzemeleri
LHS	Latin hiperküp örneklemesi

LİB	Lityum-ion batarya
LİBS	Lityum-ion batarya sistemi
LFP	$LiFePO_4$
NMC	$LiNiMnCoO_2$
NTGK	Newman-tiedeman-gu-kim
MSE	Ortalama kare hatası
YSA	Yapay sinir ağları

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Elektrikli araçlar için sınıflandırma a) Bataryalı Elektrikli Araç b) Plug-in Hibrit Elektrikli Araç c) Hibrit Elektrikli Araç d) Yakıt Pilli Elektrikli Araç (Tekin, 2024)…….....	3
Şekil 2.2.	Li-ion batarya…….....	4
Şekil 2.3.	Batarya kötüye kullanım mekanizmaları…….	6
Şekil 2.4.	Bataryada yangın esnasında alev ve duman yayılımı...……...	6
Şekil 2.5.	Şematik batarya soğutma sistemleri…….	7
Şekil 2.6.	Kanatçık düzenleri; (a) kanatçıksız hücre, (b) boyuna kanatçık, (c) spiral kanatçık, (d) dairesel kanatçık (Omar ve Adham, 2025)……...	8
Şekil 2.7.	Malzeme hazırlama işleminin şematik diyagramı (Adit ve ark., 2025'ten değiştirilerek alınmıştır).....	10
Şekil 2.8.	Farklı kanatçık yapısına sahip PCM ile kaplanmış silindirik bir batarya; a) tek helezonlu kanatçık, b) çift helezonlu kanatçık, c) çift helezonlu çatallı kanatçık.(Raj ve Harish, 2025'ten değiştirilerek alınmıştır)…….…….....	11
Şekil 2.9.	Soğutma ve ısı dağıtım sistemine ait kıvrımlı (serpantin) soğutma kanalının yapısı (Xu ve ark., 2021'den değiştirilerek alınmıştır)…….	13
Şekil 2.10.	BTYS modelinin şematik gösterimi (Wang ve ark., 2021'den değiştirilerek alınmıştır)……...	14
Şekil 2.11.	Lityum-iyon batarya hücreleri için yenilikçi soğutma sisteminin grafik diyagramı (Hasan ve ark., 2023'ten değiştirilerek alınmıştır)……..	15
Şekil 2.12.	Modelin şematik gösterimi (Ren ve ark., 2024'ten değiştirilerek alınmıştır)……...	16
Şekil 2.13.	İncelenen sunucu yapısı ve basitleştirilmiş süreç (X. Li ve ark., 2024'ten değiştirilerek alınmıştır)……	19
Şekil 2.14.	Batarya modülüne ait farklı giriş, çıkış türleri ve sıcaklık izleme noktaları (Mo ve ark., 2025'ten değiştirilerek alınmıştır)…….	20
Şekil 2.15.	Dört farklı akış geometrisi (Banerjee ve Nidhul, 2025'ten değiştirilerek alınmıştır)……...	22
Şekil 3.1.	Genel metodoloji şematik gösterimi……	25
Şekil 3.2.	Test düzeneği……..	27
Şekil 3.3.	18650 NMC için termal kamera görseli 2C'de 800 s (a) ve 1700 s(b), 3C'de 800 s (c) ve 1300 s (d) (Donmez ve Karamangil, 2024)……...	28
Şekil 3.4.	32700 LFP için termal kamera görseli 2C'de 800 s (a) ve 1700 s(b), 3C'de 800 s (c) ve 1300 s (d) (Donmez ve ark., 2025)……	29
Şekil 3.5.	Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması 18650 NMC (a) (Donmez ve Karamangil, 2024'ten değiştilerek alınmıştır) ve 32700 LFP (b) (Donmez ve ark., 2025'ten	33

	değiştirilerek alınmıştır)…….……	
Şekil 3.6.	Optimizasyon tasarım parametreleri……	36
Şekil 3.7.	Modül üzerinde sınır koşulları……	37
Şekil 3.8.	Ağ yapısı…….	39
Şekil 3.9.	Ağdan bağımsızlık çalışması 18650 NMC (a) ve 32700 LFP (b)……	39
Şekil 4.1.	Farklı tasarımlarda 18650 NMC modül için basınç düşüşü…	43
Şekil 4.2.	Farklı tasarımlarda 18650 NMC modül için ortalama hücre sıcaklığı……...	44
Şekil 4.3.	18650 NMC modül için basınç düşüşü YSA modelinin MSE ve R eğrileri…….	45
Şekil 4.4.	18650 NMC modül için ortalama hücre sıcaklığı YSA modelinin MSE ve R eğrileri……...	45
Şekil 4.5.	18650 NMC için pareto ön cephe……	46
Şekil 4.6.	Daldırma soğutma batarya sisteminin basınç ve sıcaklık dağılımı temel tasarım (a,b) ve optimum tasarım (c,d) için 4C ve 0,008 kg/s……..	47
Şekil 4.7.	18650 NMC modül için EF, MO, NOVEC kullanımında ortalama hücre sıcaklık eğrileri……...	48
Şekil 4.8.	18650 NMC modül için EF, MO, NOVEC kullanımında basınç dağılımları……	49
Şekil 4.9.	18650 NMC modül için EF, MO, NOVEC kullanımında sıcaklık dağılımları……..	49
Şekil 4.10.	Farklı tasarımlarda 32700 LFP modül için basınç düşüşü…..	51
Şekil 4.11.	Farklı tasarımlarda 32700 LFP modül için ortalama hücre sıcaklığı……...	52
Şekil 4.12.	32700 modül için basınç düşüşü YSA modelinin MSE ve R eğrileri…….	53
Şekil 4.13.	32700 modül için ortalama hücre sıcaklığı YSA modelinin MSE ve R eğrileri……	53
Şekil 4.14.	32700 LFP için pareto ön cephe……..	54
Şekil 4.15.	Daldırma soğutma batarya sisteminin basınç ve sıcaklık dağılımı temel tasarım (a,b) ve optimum tasarım (c,d) için 4C ve 0,008 kg/s…….……..	55
Şekil 4.16.	32700 LFP modül için EF, MO, NOVEC kullanımında ortalama hücre sıcaklık eğrileri……...	55
Şekil 4.17.	32700 LFP modül için EF, MO, NOVEC kullanımında basınç dağılımları……	56
Şekil 4.18.	32700 LFP modül için EF, MO, NOVEC kullanımında sıcaklık dağılımları……..	57
Şekil 4.19.	32700 LFP ve 18650 NMC modüllerinin ortalama hücre sıcaklıklarının karşılaştırılması……	59
Şekil 4.20.	32700 LFP ve 18650 NMC modüllerinin basınç düşüşü değerlerinin karşılaştırılması……...	59
Şekil 4.21.	32700 LFP 3C ve 0,003 kg/s (a), 32700 LFP 3C ve 0,007 kg/s (b) ve 18650 NMC 2,595C ve 0,003 kg/s (c) için sıcaklık dağılımları …….	60
Şekil 4.22.	32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve soğutucu debilerindeki	61

ortalama hücre sıcaklıkları……...
Şekil 4.23. 32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve 0,0001 kg/s'de sıcaklıklar dağlımları……... 62
Şekil 4.24. 32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve 0,0008 kg/s'de sıcaklıklar dağlımları……... 63
Şekil 4.25. 32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve 0,005 kg/s'de sıcaklıklar dağlımları……... 64
Şekil 4.26. 32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve 0,008 kg/s'de sıcaklıklar dağlımları……... 65
Şekil 4.27. 32700 LFP için 0.0001-0.008 kg/s basınç düşüşü değerleri… 66
Şekil 4.28. En iyi performans doğrulaması……... 67
Şekil 4.29. Hata histogramı……... 68
Şekil 4.30. R eğrileri…….. 69
Şekil 4.31. YSA ile HAD karşılaştırması…….. 70

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Batarya özellikleri…….	26
Çizelge 2.2.	18650 NMC hücrenin özellikleri..…….	30
Çizelge 2.3.	32700 LFP hücrenin özellikleri…..……...……	30
Çizelge 2.4.	18650 NMC hücrenin NTGK parametreleri.……...…..……	31
Çizelge 2.5.	32700 LFP hücrenin NTGK parametreleri.……...……	32
Çizelge 2.6.	Modül özellikleri……...……	35
Çizelge 2.7.	Akışkan özellikleri……..…	35
Çizelge 3.1.	EF, MO ve NOVEC'in 18650 NMC modül performansına etkisi ……	50
Çizelge 3.2.	EF, MO ve NOVEC'in 32700 LFP modül performansına etkisi ……	58
Çizelge 3.3.	Karşılaştırma için kullanılan değerler…….….	58

1. GİRİŞ

Fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi ve çevresel sorunlara yönelik artan endişe, sürdürülebilir temiz enerji teknolojilerine geçişi teşvik etmiştir. İçten yanmalı motorlu araçların hakim olduğu ulaşım sektörü, elektrikli araçların artan entegrasyonuyla bir dönüşüm geçirmektedir. Bu dönüşümde sera gazı emisyonlarını azaltma ve hava kirliliğini hafifletmek için hükümet düzenlemelerine uyma gereksinimi önem arz etmektedir. Bundan dolayı otomotiv endüstrisi, çevreye zararsız, ekonomik alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Bunlar arasında, lityum iyon bataryalar (LİB'ler), elektrokimyasal özellikleri ve enerji verimliliği nedeniyle öne çıkmıştır. Bu yüzden LİB'ler, elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve yenilenebilir enerji sistemleri için umut verici enerji depolama teknolojilerinden biri kabul edilmektedir. Enerji depolama pazarındaki kullanımı, yüksek enerji yoğunluğu, hafif tasarım, uzun çevrim ömrü, düşük kendi kendine deşarj oranları ve hızlı şarj/deşarj yeteneklerinden kaynaklanmaktadır.

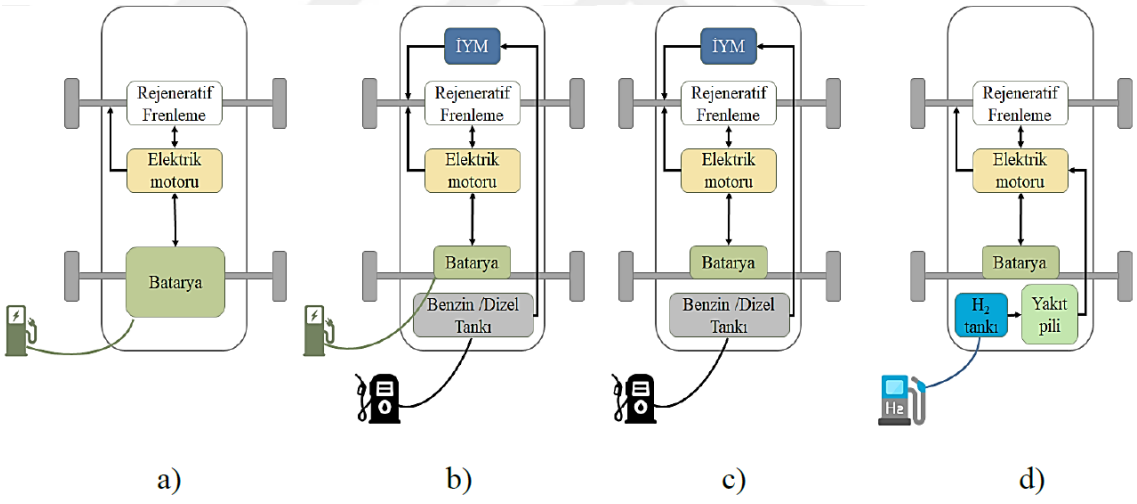
Bu avantajlara rağmen, LİB'lerin belirli sıcaklık aralığında çalışabilmesi bataryaların termal yönetimini (BTY) önemli bir zorluk olarak ortaya çıkarmıştır. LİB'lerin termal davranışı, performanslarını, güvenliklerini ve kullanım ömürlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Optimum sıcaklık aralığının dışında bataryalarda, kapasite azalması, hücre bileşenlerinin daha hızlı bozulma gibi etkilere yol açmaktadır. Sonuç olarak, batarya sıcaklığını optimum aralıkta tutmak yalnızca enerji verimliliği ve güç çıkışı gibi performans ölçütlerini korumak için değil, aynı zamanda sistemin güvenliğini sağlamak için de önemlidir.

Özellikle agresif şarj/deşarj LİB'lerin optimal çalışma aralığı dışında olmaya zorlamaktadır. Bu çalışma koşulları batarya paketi içinde düzensiz sıcaklık dağılımlarına neden olur. Ayrıca yaşlanmayı hızlandıran ve güvenlik risklerini kötüleştiren termal gradyanlara yol açmaktadır. Bu nedenle, Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS'ler), hücre ve batarya modül sıcaklığını düzenlemeyi, gradyanları en aza indirmeyi amaçlayan önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Etkili BTYS tasarımı, birkaç hedefi ele almaktadır. Bunlar LİB'lerin sıcaklıklarını güvenli çalışma aralığında tutmak, hücreler arasında düzgün sıcaklık dağılımı elde etmek, sistem karmaşıklığını en aza indirmek ve düşük pompalama gücü gerektiren tasarımı sağlamaktır. BTYS'lerin performansında, termal yönetim tarafından tüketilen enerji birçok durum için önem arz etmektedir. Dahası, zayıf termal tasarım, kısıtlı çalışma sınırlarını gerektirebilir ve böylece pilin tam kapasitesinin yetersiz kullanılmasına neden olabilir. Sonuç olarak BTYS'lerin optimizasyonu elektrikli araçların verimliliği ve güvenirliği için yapılması gerekmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrikli araçlar, enerji kaynaklarının kullanımına göre dört temel kategoriye ayrılabilir. Bu enerji kaynakları elektrik, hidrojen ve petrol türevi yakıtlardır. Tam elektrikli araçlar, yalnızca elektrik enerjisiyle çalışır ve hareket için elektrik motorları kullanır. Şarj edilebilir hibrit araçlar, şarj istasyonu ile şarj edilebilen batarya ile içten yanmalı motoru bir arada bulundurur. Bazı hibrit araçlar ise bataryalarını dışarıdan şarj etmez, enerji geri kazanımı ve motor desteği ile şarj sağlanır. Ayrı bir sınıf olarak değerlendirilen yakıt pilli elektrikli araçlar ise ana enerji kaynağı olarak hidrojen kullanır. Yakıt hücrelerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar ile elektrik üretilir ve yalnızca su buharı açığa çıkar. Bu bölümde elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon pillerin çalışma prensibi ve soğutma sistemleri açıklanmıştır. Ayrıca soğutma sistemlerine dair kaynak araştırmasına yer verilmiştir. Şekil 2.1'de elektrikli araçları sınıflandırılması gösterilmiştir.

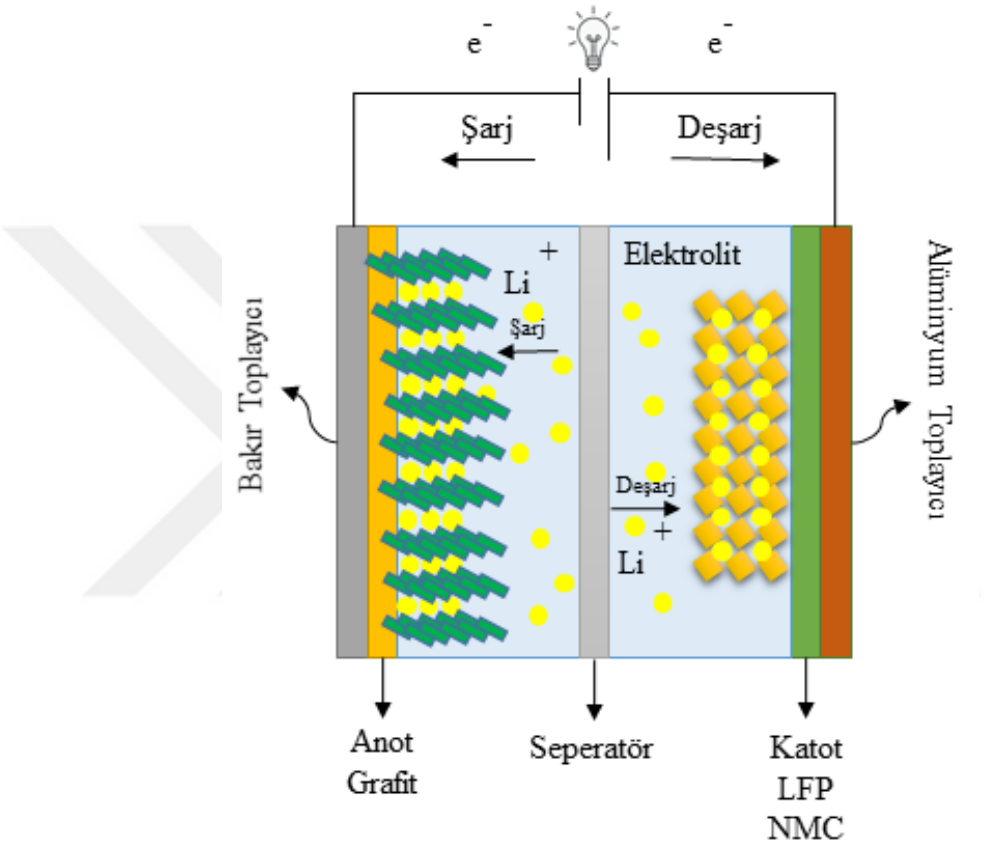


Şekil 2.1. Elektrikli araçlar için sınıflandırma a) Bataryalı Elektrikli Araç b) Plug-in Hibrit Elektrikli Araç c) Hibrit Elektrikli Araç d) Yakıt Pilli Elektrikli Araç (Tekin, 2024)

2.1. Lityum Bataryalara ve Soğutma Sistemlerine Genel Bakış

LİB'ler, Şekil 2.2'de şematik olarak gösterildiği gibi, Li^+ iyonlarının katot ve anot arasında bir elektrolit aracılığıyla iki yönlü taşınmasıyla çalışmaktadır. Deşarj sırasında, lityum iyonları elektrolit aracılığıyla anottan katoda hareket ederken, elektronlar

dışarıdan akarak güç sağlamaktadır. Şarj sırasında ise bu olay tersine işlemektedir. Bu hareket esnasında özellikle yüksek akımlarda şarj/deşarj ısı oluşumu belirginleşmektedir. Elektrolit, akım toplayıcıları ve elektrot arayüzlerindeki iç direnç, ısı üretimine katkıda bulunur. LFP piller için gerçekleşen genel kimyasal tepkimeler Eşitlik 2.1 ve 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Li-ion batarya

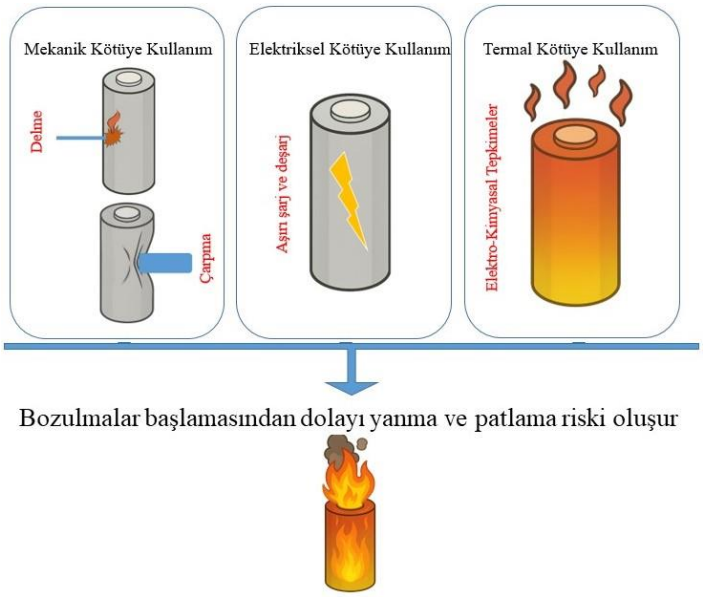
$$Li \leftrightarrow Li^{+} + e^{-} \tag{2.1}$$

$$FePO_4 + Li^{+} + e^{-} \leftrightarrow LiFePO_4 \tag{2.2}$$

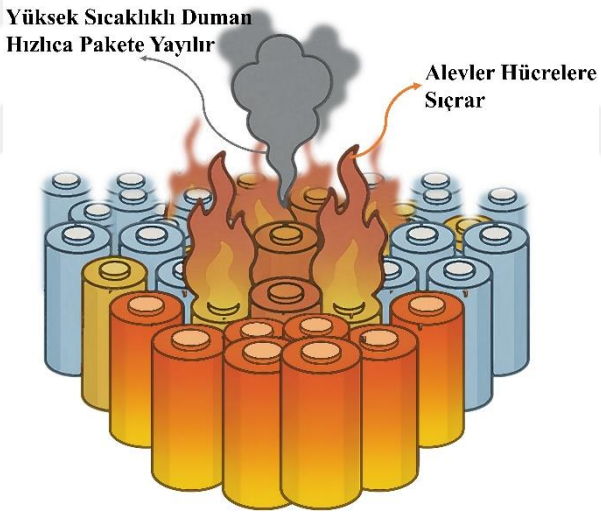
Etkili termal yönetim, özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek performanslı uygulamalarda lityum iyon batarya sistemlerinin (LİBS) tasarımında temel bir

gerekliliktir. Batarya teknolojisi daha yüksek enerji ve güç yoğunluklarına sahip oldukça, sıcaklıkları güvenli çalışma sınırları içinde kontrol etmek giderek daha kritik hale gelmiştir. Yetersiz termal yönetim, düzensiz sıcaklık dağılımlarına, hızlanan bozulmaya, azalan çevrim ömrüne sebep olur. Bu zorlukları ele almak için, birçok termal yönetim stratejisi geliştirilmiştir. Bunlar temelde hava soğutma, kanallar kullanılarak dolaylı sıvı soğutma, faz değişim malzemeleriyle (FDM) ve dielektrik sıvılarla doğrudan soğutma olarak sınıflandırılabilir. Bu sistemler, ayrı ayrı veya hibrit olarak BTYS tasarımının temelini oluşturur.

LİB'lerde ugun olmayan kullanım koşulları altında meydana gelen çok boyutlu arıza mekanizmaları bulunmaktadır, Şekil 2.3. Bunlar mekanik kötüye kullanım, elektriksel kötüye kullanım ve termal kötüye kullanımdır. Mekanik kötüye kullanım, çarpışma veya delinme durumunda ortaya çıkmaktadır. Elektriksel kötüye kullanım aşırı şarj veya aşırı deşarj gibi hücrenin tasarım voltaj ve akım sınırlarını aşan durumlarda görülür. Bu koşullar, özellikle yüksek şarj durumu altında anotta lityum kaplama ve dendrit oluşumunu sebep olur. Dendritler de ayırıcıyı delerek kısa devrelere neden olabilmektedir. Ayrıca, kısa devre sırasında oluşan yüksek akımlar, iç direnç kaynaklı ısıyı artırarak hücrenin iç sıcaklığını hızla yükseltmektedir. Termal kötüye kullanım ise, hücrenin soğutulmaması durumunda yüksek sıcaklıklara ulaşması veya dış ısı kaynaklarına maruz kalmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu süreç, elektrolit kararlılığının bozulmasına ve ayırıcının yanmasına neden olarak anot ve katot arasındaki fiziksel mesafenin daha da azalmasına ve kısa devre yolunun engelsiz hale gelmesine neden olmaktadır. Sıcaklık arttıkça, elektrolit çözücüleri ve katot malzemelerinin ekzotermik bozunma reaksiyonları başlamaktadır. Batarya modülünün geri döndülemez şekilde ölmesine sebep olacak alev ve dumanlar Şekil 2.4'te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.3. Batarya kötüye kullanım mekanizmaları



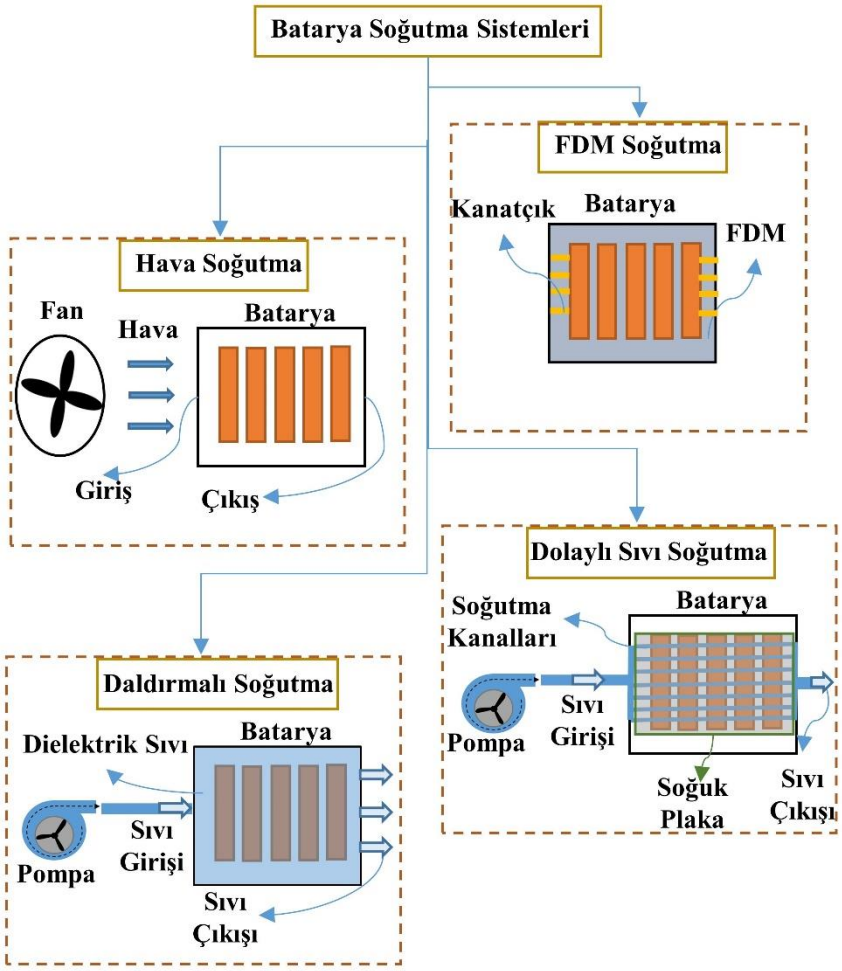
Şekil 2.4. Bataryada yangın esnasında alev ve duman yayılımı

Şekil 2.5'te elektrikli araçların batarya termal yönetimini gerçekleştirebilmek adına tasarlanan soğutma sistemleri şematik gösterilmiştir.

2.2. Hava Soğutmalı BTYS

Hava soğutma, özellikle tüketici elektroniğinde ve ilk elektrikli araçlarda, basitliği, düşük maliyeti ve uygulama kolaylığı nedeniyle yaygın olarak benimsenmiştir. Hava

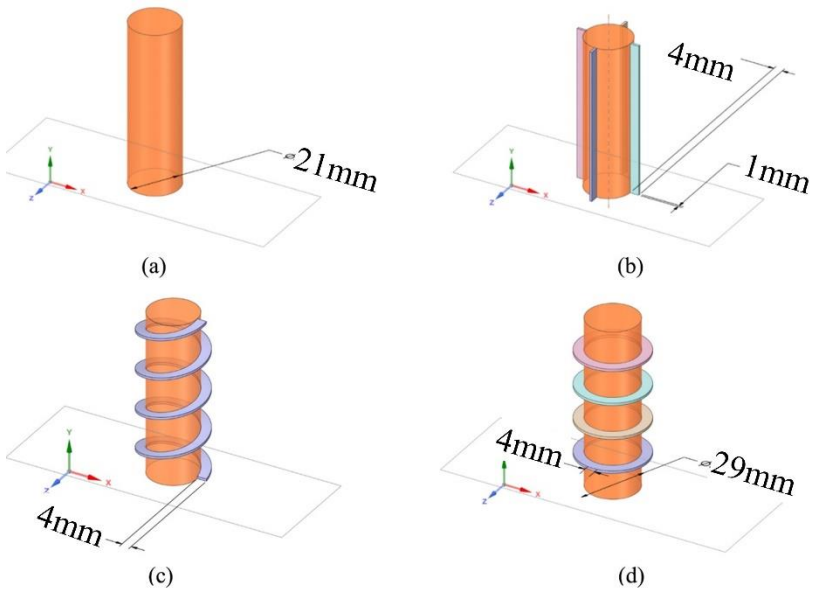
soğutmalı BTYS'de, ısı, ortam veya şartlandırılmış hava kullanılarak pasif veya aktif sistemle paketten uzaklaştırılmaktadır. Hava fanlar ve kanatçıklar yoluyla pil takımının yüzeyleri boyunca dolaştırılır. Bu sistemin temel avantajları, düşük maliyet, minimum bakım gereksinimleri ve düşük sistem ağırlığıdır. Ancak, önemli sınırlamalarıda bulunmaktadır. Havanın düşük özgül ısı kapasitesi ve termal iletkenliği, özellikle yoğun veya yüksek enerjili kullanan sistemlerde zayıf ısı gidermesine sebep olmaktadır. Ayrıca, hava soğutmalı sistemlerde, özellikle karmaşık geometrilere sahip paketlerde, düzensiz akış dağılımı ve paket içinde düzensiz sıcaklık alanları görülür. Bu termal düzensizlik, hücrelerin düzensiz yaşlanmasına, genel verimliliğin azalmasına ve uzun vadede güvenlik risklerine yol açmaktadır. Dahası yüksek deşarj hızlarında geleneksel hava soğutması yetersiz kalmaktadır.(Zhao ve ark., 2021)



Şekil 2.5. Şematik batarya soğutma sistemleri

Kumar ve ark., (2024) hava soğutmalı LİBS için farklı hücre dizilimlerinin termal performans üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Yirmi yedi adet 18650 silindirik hücre içeren dikdörtgen bir modül içerisinde yedi farklı hücre yerleşimini incelemişlerdir. 1D elektrokimyasal ve 2D ısıl-akış modellerini birleştirerek, 1C ve 5C deşarj oranlarında, 100 ile 1000 arasında değişen Reynolds sayılarında simüle etmişlerdir. Buldukları sonuçlar, hava akışı desenlerinin, sıcaklık alanlarının ve basınç düşüşünün hücrelerin geometrik düzenine son derece duyarlı olduğunu göstermiştir. Dizilimler arasında zikzak dizilim, en düşük maksimum hücre sıcaklığı ve en küçük sıcaklık farkı ile en iyi termal performansı sağlamıştır.

Omar ve Adham, (2025) silindirik LİB'ler için hava soğutmalı BTYS geliştirmişlerdir. HAD simülasyonlarıyla uzunlamasına, sarmal ve dairesel kanatların, Şekil 2.6, ısıl performansları değerlendirilmişlerdir. En iyi soğutma verimi dairesel kanatlarla elde edilmiş ve bu verim, kanat boyutları ve hava akış hızı optimize edilerek daha da artırılmıştır. Ayrıca, klasik dikdörtgen hava kanalı yerine dairesel boru kullanılması, daha düzgün sıcaklık dağılımı ve daha düşük maksimum sıcaklık sağlamıştır.



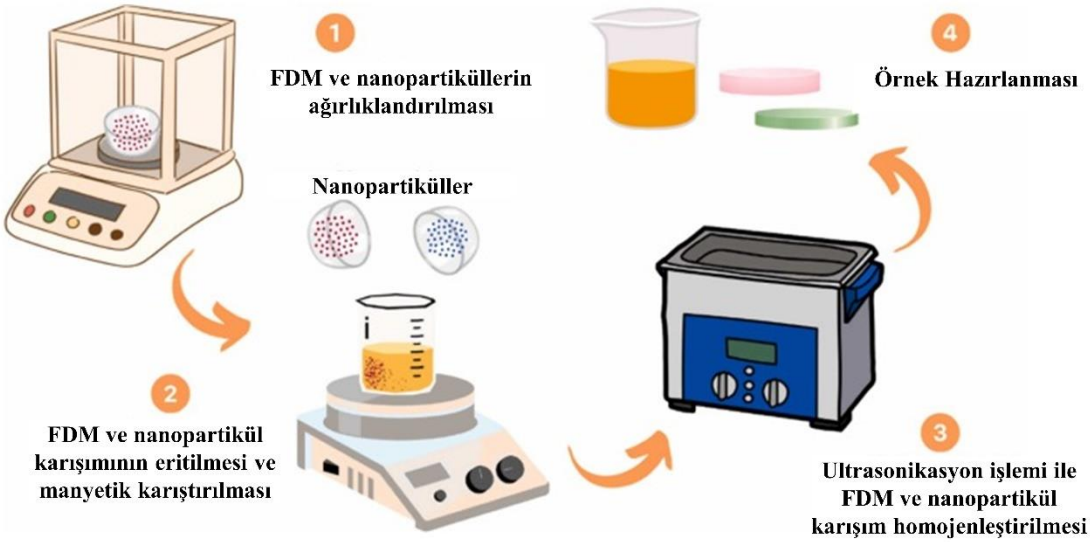
Şekil 2.6. Kanatçık düzenleri; (a) kanatçıksız hücre, (b) boyuna kanatçık, (c) spiral kanatçık, (d) dairesel kanatçık (Omar ve Adham, 2025'ten değiştirilerek alınmıştır)

K. Chen ve ark., (2024) LİB paketlerinde değişken termal koşullara, dinamik akış kontrol stratejileriyle hava soğutmalı BTYS'yi sayısal olarak incelemişlerdir. Havanın sınırlı ısı kapasitesi ve yüksek deşarj oranlarında oluşan sıcaklık gradyanlarına çözüm getirmek amacıyla, J tipi, U tipi ve L tipi hava akış desenlerini kullanmışlardır. Akış yönlendirmesi yaparak soğutma havasını sıcak noktalara yönlendirerek sıcaklık homojenliğini artırmış ve maksimum sıcaklıkları düşürmüşlerdir.

2.3. FDM soğutmalı BTYS

Aktif soğutma sistemlerine tamamlayıcı olarak, FDM'ler, harici güç gerektirmeden sıcaklık dalgalanmalarını sabitleyebilen pasif termal yönetim bileşenleridir. FDM'ler, erime süreçleri sırasında gizli ısıyı emme ve katılaşma sırasında serbest bırakma ilkesiyle çalışmaktadır. Faz geçişi sırasındaki yüksek enerji emililmleri sayesinde maksimum sıcaklıkları azaltmalarını sağlamaktadır. FDM'ler, pakette çeşitli biçimlerde yerleştirilebilmekte ve bu konuda araştırmalar yapılmaktadır. FDM'lerin temel sınırlamalarından biri, grafen, metal parçacıkları veya karbon nanotüpleri gibi termal olarak iletken katkı maddeleriyle güçlendirilmediği takdirde yerel sıcak noktalara yol açabilen, doğası gereği düşük termal iletkenlikleridir. Araştırmacılar, FDM'leri iletken yollarla entegre etmenin veya soğuk plakalarla hibritleştirmenin hem pasif hem de aktif soğutma performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. (Luo ve ark., 2022)

Adit ve ark.., (2025) yüksek deşarj oranlarına sahip 18650 LFP soğutmak için çift kanatlı bir yapı ile birlikte hibrit nano katkılı FDM tasarlamışlardır. FDM malzemelerinin düşük ısıl iletkenlik gibi sınırlamalarını aşmak amacıyla, parafin balmumu içerisine Al_2O_3 ve ZnO nanoparçacıkları ekleyerek ısı dağılımını artırmayı hedeflemişlerdir. Yapılan çalışmadaki malzeme hazırlanışı Şekil 2.7'de gösterilmiştir. NTGK modeli temel alınarak yapılan HAD simülasyonları ile 12C–20C arasındaki deşarj oranlarında hücrenin ısıl davranışı analiz edilmiştir. Sonuçta, nano katkılı FDM ve kanatlı yapı ile termal performans arttırılmıştır.



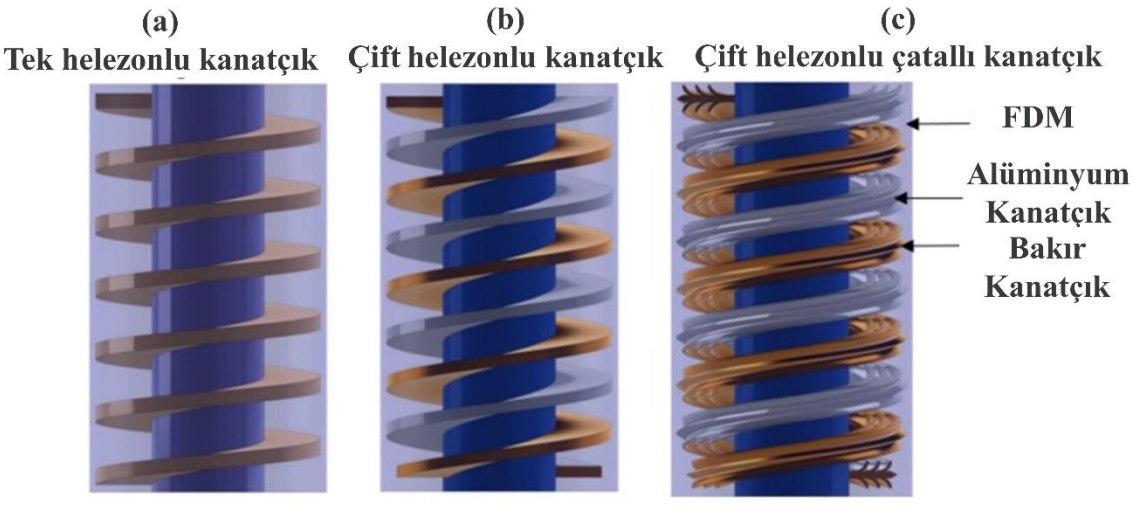
Şekil 2.7. Malzeme hazırlama işleminin şematik diyagramı (Adit ve ark., 2025'ten değiştirilerek alınmıştır)

Patel ve Rathod, (2024) FDM tabanlı bir BTYS kullanarak, hücreler arası mesafe ve dizilim düzeninin LİB paketlerinin ısıl performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda, hücrelerin doğrusal ve şaşırtmalı dizilimlerini 1 mm, 3 mm ve 5 mm olmak üzere üç farklı hücre aralığını deneysel olarak incelemişlerdir. FDM ile, 0.6C şarj sürecinde maksimum batarya sıcaklığını %13, sıcaklık gradyanını ise %18 oranında azaltmışlardır. Hücre aralığı açısından, 1 mm mesafe paket hacmini %27.7, ağırlığını ise %13.8 oranında azaltarak kompaktlık sağlasa da, ardışık iki şarj/deşarj döngüsünden sonra yetersiz soğutma performansı sergilemiştir. Maksimum sıcaklık 60°C'yi, sıcaklık farkı ise 18°C'yi aşmıştır. Öte yandan, 5 mm aralık en iyi ısıl performansı sunmuştur. Maksimum sıcaklık 45°C'nin altında ve sıcaklık farkını 1.2°C gibi daha düşük seviyelerde tutmuştur. Bu da hacim kısıtlarının ön planda olmadığı durumlar için en uygun yapılandırmadır. 3 mm aralık ise %7.26 ağırlık azalması sağlarken, kabul edilebilir düzeyde ısıl performans sunarak makul bir denge noktası oluşturmuştur.

Najafi Khaboshan ve ark., (2024) 3C deşarj koşulunda FDM, metal köpük ve ısı kanatçıklarını entegre eden BTYS üzerine sayısal ve makine öğrenmesi tabanlı analiz sunmuşlardır. Dört farklı BTYS yapılandırması değerlendirilmiştir. Bunlar FDM, FDM + kanatçık, FDM + metal köpük ve tüm bileşenlerin entegre edildiği birleşik yapılardır.

Dördüncü yapı, en yüksek termal performansı göstermiştir. Çalışmada, kanatçık sayısı ve uzunluğu ile malzeme seçiminin etkileri araştırılmış; bakırın daha yüksek ısıl iletkenliği sayesinde üstün performans sağladığı gösterilmiştir. Daha uzun ve daha fazla sayıda kanatçık, sıcaklık homojenliğini artırmış ve FDM'nin erime başlangıcını geciktirerek ısı yayılımı ve depolama kapasitesini artırmıştır. Ayrıca, YSA modeli, kanatçık sayısı, yüksekliği, uzunluğu ve zamana bağlı olarak batarya yüzey sıcaklığı ile FDM sıvı etkileşimini yüksek doğrulukla tahmin etmiştir. Sıcaklık için $R^2 = 0.99$ ve sıvı fraksiyonu için $R^2 = 0.98$ değerlerine ulaşarak HAD sonuçlarıyla büyük oranda örtüşmüştür. Bu durum, YSA'nın zaman alıcı sayısal simülasyonlara alternatif olarak hızlı ve etkili bir kestirim aracı olabileceğini göstermiştir.

Raj ve Harish, (2025) LİB'ler için şeker alkolü bazlı hibrit nano katkılı FDM'yi helisel kanat tasarımlarıyla birleştirmişlerdir, Şekil 2.8. Çalışmada, erime verimliliğini önemli ölçüde artıran ve sıcaklık farklarını azaltan çift helisel çatallı kanat yapısı sunulmuştur. Sayısal simülasyonlar, çalışmada kullanılan BTYS ile ısı emilimi arttırıldığı ve faz değişimini hızlandırdığını göstermiştir.



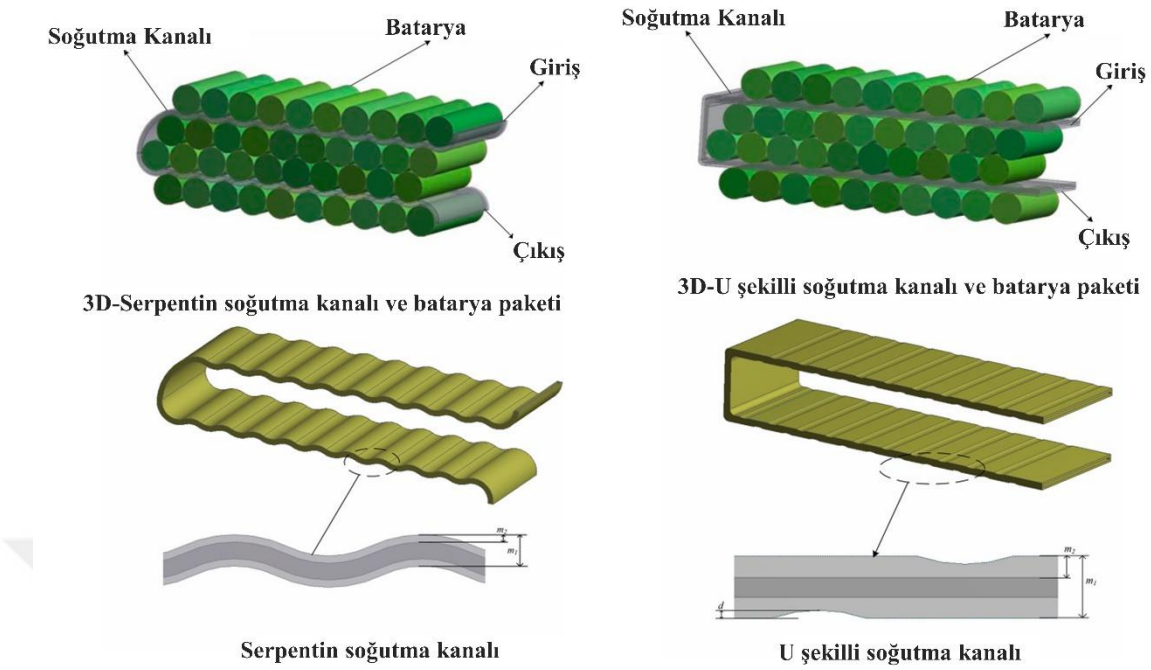
Şekil 2.8. Farklı kanatçık yapısına sahip PCM ile kaplanmış silindirik bir batarya; a) tek helezonlu kanatçık, b) çift helezonlu kanatçık, c) çift helezonlu çatallı kanatçık.(Raj ve Harish, 2025'ten değiştirilerek alınmıştır)

2.4. Dolaylı sıvı soğutmalı BTYS

Yaygın kullanılan dolaylı sıvı soğutma sistemlerinde batarya paketine soğutma kanalları veya soğuk plakalar entegre edilmiştir. Bu hücre yüzeyinden akan bir sıvıyla (su, su-glikol karışımı veya diğer tasarlanmış soğutucular) ısının atılmasını sağlamaktadır, Şekil 2.6. Bu sistemler, sıvıların daha yüksek yoğunluğuna, özgül ısısına ve termal iletkenliğine atfedilen havaya kıyasla önemli ölçüde iyileştirilmiş paketten ısı atılımını sağlar. Sıvı soğutma yalnızca maksimum hücre sıcaklıklarını daha etkili bir şekilde azaltmakla kalmaz, aynı zamanda paket boyunca sıcaklık düzgünlüğünü de iyileştirir. İyi tasarlanmış bir dolaylı sıvı soğutma sistemi, hızlı şarj ve deşarj koşullarında paket içindeki sıcaklıkları güvenli aralıkta tutabilmektedir. Ancak, sıvı soğutma sistemleri hava soğutma sistemlerine göre ek karmaşıklık, maliyet ve ağırlık getirmektedir. Bu zorluklara rağmen, elektrikli araçlarda yaygın kullanılmaktadır. (W. Wu ve ark., 2019)

H. Zhang ve ark., (2024) manifold soğutma plakası tasarımlarını HAD ile incelemişlerdir. Optimize edilmemiş soğutma yöntemlerinin, yüksek C oranlarında ortaya çıkan ısıyı yeterince uzaklaştıramamasından dolayı iki yeni kanal düzeni farklı parametereler için incelenmiştir. Çalışmalarında termal performansta %30'a varan iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşmeye karşılık gelen basınç düşüşü yalnızca %19 artmış olup, sıcaklık homojenliğindeki gelişme ve daha düşük ortalama sıcaklık ile bu artış kabul edilebilir bulunmuştur.

Xu ve ark., (2021) LİB için ısı dağılımını iyileştirmeyi amaçlayan optimize edilmiş bir sıvı soğutma sistemi geliştirmişlerdir. HAD ve çok parametreli optimizasyon bir arada kullanılarak, sıcaklık artışını en aza indiren ve termal homojenliği artıran bir soğutma yapısı tasarlanmıştır. Soğutucu akışkan hızı, kanal düzeni ve giriş sıcaklığı gibi temel değişkenler sistematik olarak analiz edilerek en uygun yapılandırmalar belirlenmiştir. Sonuçlar, optimize edilmiş tasarımın maksimum hücre sıcaklığını ve sıcaklık farkını önemli ölçüde azalttığını görmüşlerdir. Şekil 2.9'da çalışmalarında karşılaştırılan soğutma kanalları sunulmuştur.

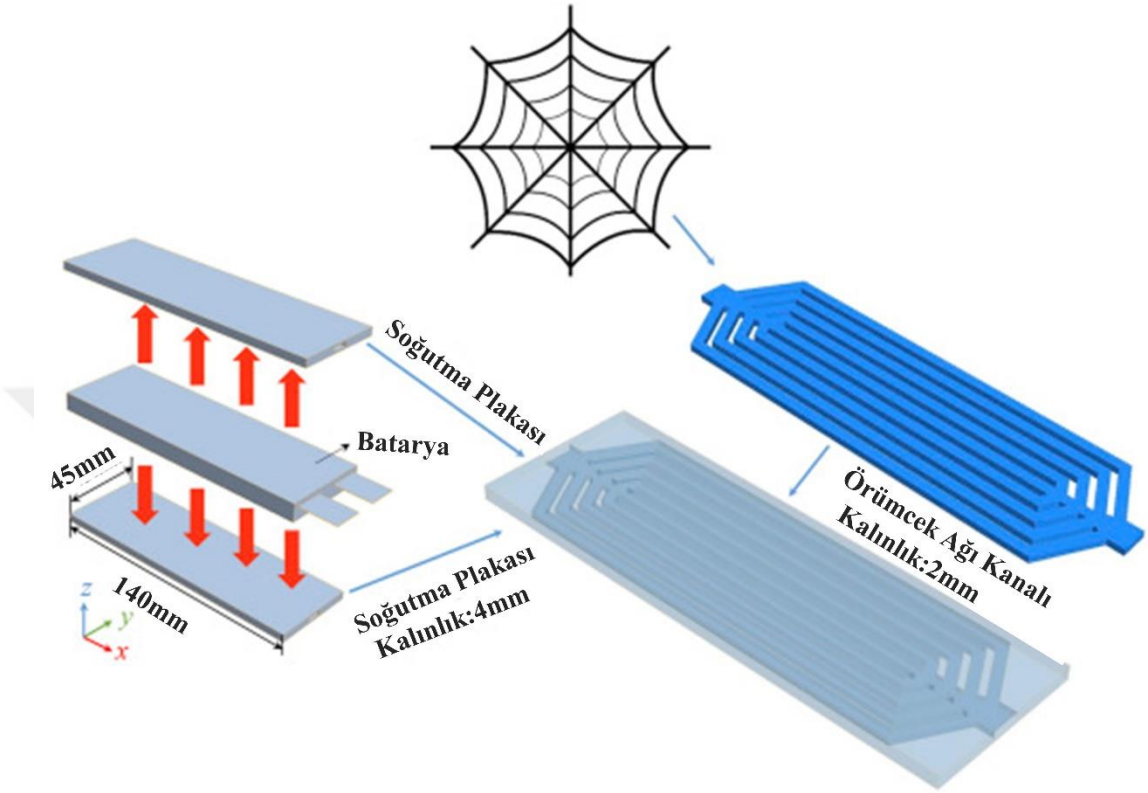


Şekil 2.9. Soğutma ve ısı dağıtım sistemine ait kıvrımlı (serpantin) soğutma kanalının yapısı (Xu ve ark., 2021'den değiştirilerek alınmıştır)

J. peng Wu ve ark., (2024) deşarj süreçlerinde görülen düzensiz ısı üretimini dikkate alan yeni bir topoloji optimizasyon yöntemi sunmuşlardır. Sabit ısı akısı varsayımına dayandığı durumların aksine, bu çalışmada iç direnç ve elektrokimyasal reaksiyonların neden olduğu bölgesel sıcaklık değişimlerini doğru biçimde modellemek amacıyla NTGK (Newman-Tiedemann-Gu-Kim) modeli kullanılmıştır. Topoloji optimizasyon süreci, yüzey sıcaklığına dayalı bir modelle elde edilen ısı kaynağı fonksiyonunun MATLAB üzerinden entegrasyonu ile geliştirilmiştir. Şekilsiz ısı kaynaklarına sahip topoloji optimizasyonu ile tasarlanan soğutma plakasının performansının daha iyi olduğunu söylemişlerdir.

Wang ve ark., (2021) kese tipi lityum-iyon bataryaların soğutma performansını artırmak amacıyla, Şekil 2.10'da görülen örümcek ağı geometrisinden ilham alan yenilikçi bir biyomimetik soğutma plakası tasarımı sunmuşlardır. Sayısal simülasyonlarla farklı kanal yapılandırmalarının yüksek deşarj koşullarındaki ısıl davranışları incelenmiştir. Maksimum hücre sıcaklığını ve batarya yüzeyindeki sıcaklık gradyanını en aza indirmeyi hedefleyen çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı uygulanmıştır. Sonuçlar,

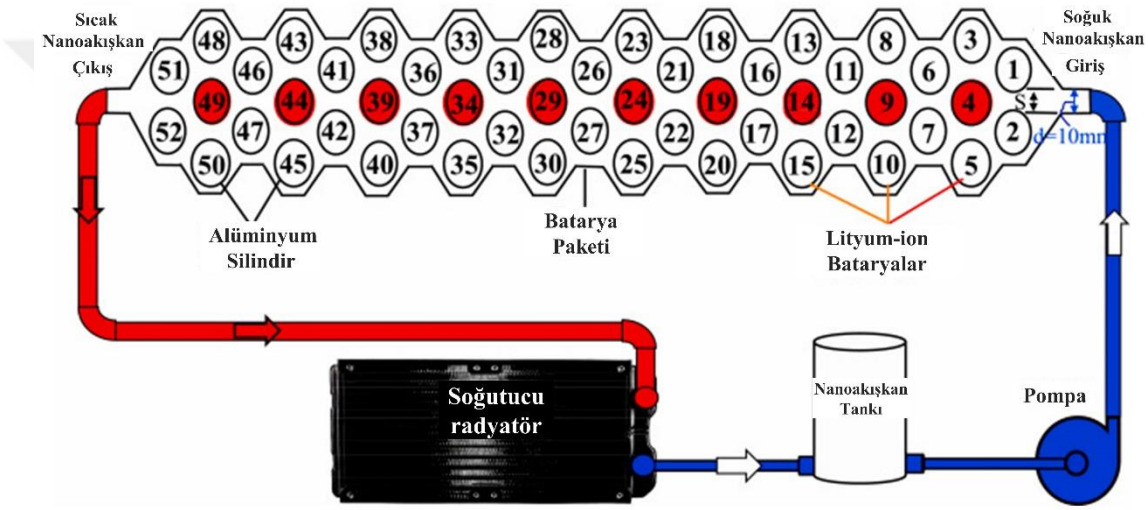
optimize edilmiş örümcek ağı yapısının soğutucu dağılımını ve termal homojenliği geleneksel doğrusal kanallara kıyasla önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur.



Şekil 2.10. BTYS modelinin şematik gösterimi (Wang ve ark., 2021'den değiştirilerek alınmıştır)

Monika ve ark., (2021) kese tipi LİB modülleri için dikdörtgen mini kanallı soğutma plakaları kullanan sıvı tabanlı BTYS tasarımını optimize etmeye yönelik sayısal çalışma sunmuşlardır. COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak üç boyutlu eşzamanlı ısı transferi modeli geliştirilmiş ve bu model, ısı üretimini ve dağılımını doğru şekilde temsil edebilmek için bir boyutlu elektrokimyasal-termal model ile eşleştirilmiştir. Kanal sayısı (3–8), kanal genişliği (3–7 mm), soğutucu türü (hava, su, etilen glikol-su karışımı, mineral yağ), kütlesel debi (0.001–0.005 kg/s) ve giriş sıcaklığı (10–40 °C) gibi temel parametrelerin etkileri sistematik olarak incelemişlerdir. En iyi ısıl performans, 25 °C giriş sıcaklığı ve 3×10^{-3} kg/s debiyle su kullanılan, 6 mm genişliğinde beş mini kanala sahip tasarımda elde edilmiştir.

Hasan ve ark., (2023) silindirik LİB hücreleri için çeşitli nanoakışkanlar kullanılarak geliştirilen termal yönetim sistemini sayısal incelemişlerdir, Şekil 2.11. Sistem, 15.000-30.000 arasındaki Reynolds sayılarında değerlendirilmiş ve su içinde dağılmış SiO_2, Al_2O_3, ZnO ve CuO gibi nanoakışkanlar incelenmiştir. HAD simülasyonları ile her bir nanofluidin sıcaklık dağılımı, ısı giderme verimliliği üzerindeki etkisi 52 hücreli bir batarya paketi üzerinde analiz edilmiştir. Test edilen soğutucular arasında SiO_2–su bazlı nanofluid, düşük akış hızlarında dahi batarya sıcaklığını 40 °C'nin altında tutarak en etkili ısıl performansı göstermiştir.



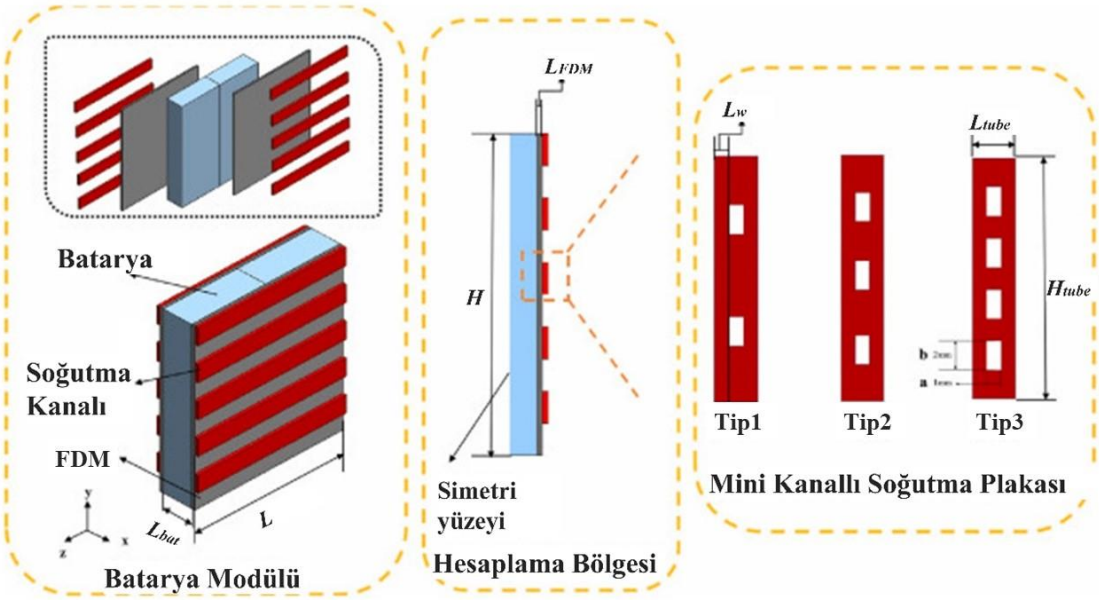
Şekil 2.11. Lityum-iyon batarya hücreleri için yenilikçi soğutma sisteminin grafik diyagramı (Hasan ve ark., 2023'ten değiştirilerek alınmıştır)

Mubashir ve ark., (2024) dairesel boşluklu kanatçık yapılı soğutma plakası tasarımı sunmuş ve sayısal olarak değerlendirmişlerdir. Boşluksuz kanatçıklı yapılar, ısı transferini artırmakta etkili olsa da BTYS ağırlığını ve yapısal karmaşıklığını artırmaktadır. Bu soruna çözüm olarak geliştirilen boşluklu dairesel kanatçık yapısı, soğutucu akışının daha eşit dağılmasını, artırılmış ısı transfer yüzeyi ve daha düşük basınç düşüşü ile birlikte hafiflik avantajı sunmuştur. Kanatçık çapının artırılması T_{max} değerini hafif düşürmekte, plaka kütlesini önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak basınç düşüşünü artırmaktadır.

2.5. Hibrit BTYS: FDM ve dolaylı sıvı soğutma

Dolaylı sıvı soğutma sistemleri ısıyı uzaklaştırma nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu sistemde yerel olarak istenmeyen sıcaklıklar oluşabilir. Bunu gidermek için, FDM ile entegrasyonu hibrit strateji olarak ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşım, sıcaklık düzgünlüğü, daha yüksek ısı dağıtma kapasitesi ve daha fazla sistem kararlılığı sunarak, kompakt, güvenilir ve verimli bir BTYS tasarımı sunar.

Ren ve ark., (2024) LİB paketlerinde termal güvenliği ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla, FDM ile mini kanallı soğutma plakalarını eden optimize edilmiş bir BTYS önermişlerdir, Şekil 2.12. 1.2C'nin altındaki oranlarda FDM'nin tek başına yeterli olduğunu, 2C'nin üzerindeki oranlarda ise aktif sıvı soğutmanın gerekli hale geldiğini söylemişlerdir.



Şekil 2.12. Modelin şematik gösterimi (Ren ve ark., 2024'ten değiştirilerek alınmıştır)

Zheng ve ark., (2024) silindirik LİB paketlerinde ısı dağılımını iyileştirmek amacıyla FDM ile karşı akışlı dalgalı soğutma plakasını entegre eden hibrit bir BTYS önererek tasarımı sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, yüksek ortam sıcaklığı (40°C) ve hızlı deşarj (3C) koşullarında ortaya çıkan düzensiz sıcaklık dağılımını ele almayı

hedeflemişlerdir. Sonuç olarak soğutma sıvısı kütle debisi 3×10^{-3} kg/s'de verimlilik sağlanırken, maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı sırasıyla 49,98 °C ve 3,39 °C ile sınırlandırılmıştır.

He ve ark., (2024) yüksek deşarj oranları ve zorlu ısıl koşullar altında LİB'lerin termal performansını artırmak amacıyla mikro ısı borusu dizileri ile FDM birleştiren hibrit BTYS önererek sayısal olarak değerlendirmişlerdir. Sonuçta, T_{max}'ı geleneksel hava soğutmalı sistemlere göre %22.3, yalnızca mikro ısı borusu dizileri kullanılan sistemlere göre ise %7.8 oranında azaltmışlardır. 5C deşarj oranında T_{max}'ın 40 °C altında kaldığını ve sıcaklık homojenliğinin korunduğunu göstermişlerdir.

X. Chen ve ark., (2024) silindirik LİB'lerde FDM ile kanallara sahip sıvı soğutma plakalarının entegre edildiği hibrit BTYS tasarlamışlardır. COMSOL Multiphysics kullanılarak NTGK temelli eşlenik üç boyutlu ısıl-elektrokimyasal model oluşturulmuş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Sistem performansını etkileyen temel parametreler kanal şekli, giriş/çıkış sayısı, kanal katmanları, soğutucu türü, debi ve FDM entegreli alüminyum kanatçık sayısı analiz edilmiştir. Elmas biçimli kanallar, üçgen ve altıgen kanallara kıyasla basınç düşüşü sağlamış ve benzer ısıl performans korunmuştur. İki girişli ve dört katmanlı bir yapı, ısıl verimlilik ile üretim maliyeti arasında dengeli bir çözüm sunarak maksimum sıcaklığı 308.7 K, sıcaklık farkını (ΔT) 2.9 K ve güç tüketimini %27 azaltmayı başarmıştır. Debinin 0.1 g/s'ten 0.6 g/s'e çıkarılması T_{max}'i 3.9 K düşürmüş; ayrıca çatallı kanal eklenmesiyle T_{max}'i 12 K azaltmıştır.

2. 6. Doğrudan sıvı soğutmalı BTYS

Son yıllarda, doğrudan sıvı soğutması (daldırmalı soğutma) paketlerin termal yükünü yönetmek için umut verici bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, bataryanın iletken olmayan bir sıvıya daldırmadır. Daldırma soğutması, diğer yöntemlere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Isı paket yüzeylerinden ve pil hücrelerin tüm yüzeylerinden doğrudan çekildiği için karmaşık ısı emici yapılara olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Dahası, sıvının tüm yüzeylere teması nedeniyle tüm hücrelerde diğer sistemlere göre düzgün bir sıcaklık dağılımı sağlar. Avantajlara rağmen daldırma soğutmasının

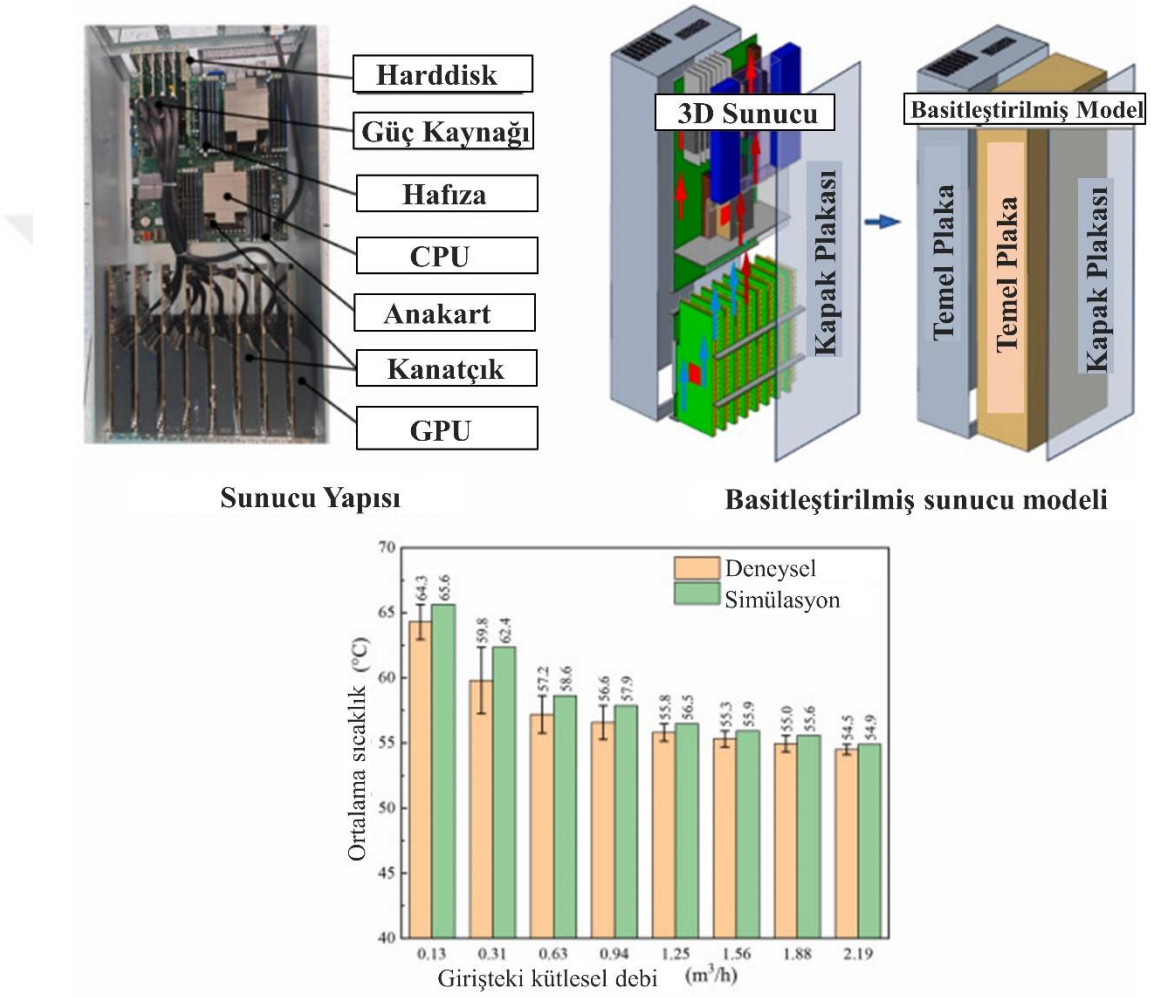
problemleride bulunmaktadır. Sistem entegrasyonu, sızdırmaz muhafaza, sıvı sirkülasyon pompaları ve iki fazlı soğutma için ek sistemler dahil olmak üzere sıvı yönetimi altyapısı gerektirir. Dielektrik sıvıların seçiminde yalnızca termal özellikleri değil, aynı zamanda hücre malzemeleriyle uyumluluğu, toksisiteyi, çevresel etkiyi ve termal döngü altında uzun vadeli kararlılığı da dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte, deneysel ve modelleme araştırmaları daldırma soğutmasının daha üstün performanslı olduğunu ortaya koymaktadır, Roe ve ark., (2022).

Y. Li ve ark., (2024) 8 Ah prizmatik $LiFePO_4$ bataryalar için daldırma soğutmanın termal performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma, özellikle yüksek C oranı ve dinamik yükleme durumlarında daldırma soğutmanın geleneksel doğal konveksiyon yöntemlerine kıyasla üstünlük sağladığını ortaya koymuşlardır. Hava soğutmasına göre, SF33 kullanılarak yapılan daldırma işleminin, 5C ve 8C deşarj oranlarında maksimum batarya sıcaklığını sırasıyla yalnızca 33,25°C ve 35°C ile sınırlayarak düşük sıcaklık artışı ve kararlı ısıl davranış sağladığını söylemişlerdir.

Choi ve ark., (2023) aşırı şarj koşulları için hibrit daldırma soğutma BTYS önermişlerdir. Akış dengesizliğini önlemek ve ısı dağılım verimliliğini artırmak amacıyla kanatçıklar ve akış bölme duvarları içeren tek fazlı bir daldırma soğutma sistemi tasarlamışlardır. Önerilen tasarımın önemli iyileşmeler sağladığını ortaya koymuşlardır. Dielektrik sıvı olarak Novec 7500 kullanılarak yapılan testlerde, maksimum batarya sıcaklığını 6.7°C kadar düşürülmüş, sıcaklık homojenliğini 3.0 K iyileştirmiş ve aynı zamanda basınç düşüşü ile güç tüketimini sırasıyla %45.4 ve %61 oranında azaltılmıştır.

X. Li ve ark., (2024) yüksek yoğunluklu veri merkezlerinde tek fazlı daldırma soğutma için özel olarak tasarlanmış sıvı soğutma tankının performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Şekilde deneysel ve sayısal sistemlerde kullanılan sistem ve sonuç karşılaştırılması sunulmuştur. Çalışma, aynı soğutucu içinde çalışan çok sayıda grafik işlem birimi arasında termal denge sağlama zorluğuna odaklanmaktadır. On altı sunucuyu barındıran özel tasarım bir tank, farklı giriş sıcaklıkları, akış hızları ve grafik işlem birimi yük oranları altında test edilmiştir. Sonuçlar, soğutucu giriş sıcaklığının ve

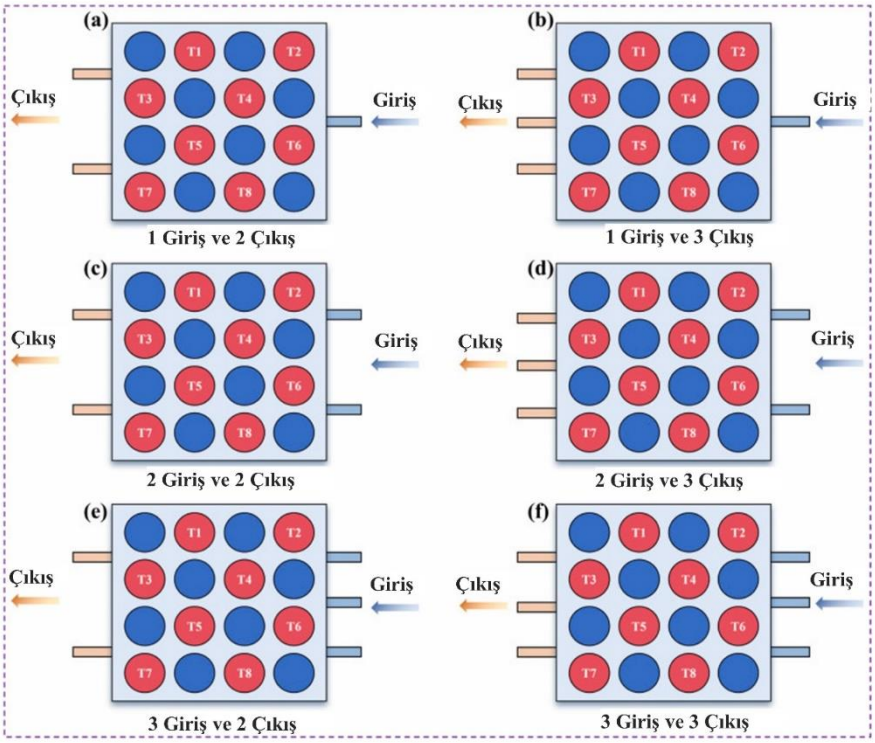
yük oranının azaltılması ile birlikte akış hızının artırılmasının ortalama grafik işlem birimi sıcaklıklarını belirgin şekilde düşürdüğünü göstermektedir. Termal yükteki dalgalanmalara rağmen, sistem grafik işlem birimleri arasında sıcaklık farkını 5 °C'nin altında tutmakta ve kare sapma değerini 1.0 ile 1.5 arasında sabit tutarak yüksek sıcaklık homojenliği sağlamaktadır.



Şekil 2.13. İncelenen sunucu yapısı ve basitleştirilmiş süreç (X. Li ve ark., 2024'ten değiştirilerek alınmıştır)

Mo et ark., (2025), 21700 hücrelerden oluşan 4P4S yapıdaki modül için altı farklı giriş–çıkış düzenini, Şekil 2.14, incelemişlerdir. Gerçek zamanlı gerilim ve sıcaklık ölçümleri, üç giriş ve üç çıkışa sahip düzeneklerin en düşük maksimum sıcaklığı

(40.2 °C) sağladığını ve 3C deşarj oranında sıcaklık homojenliğini 4.7 °C koruduğunu göstermiştir.



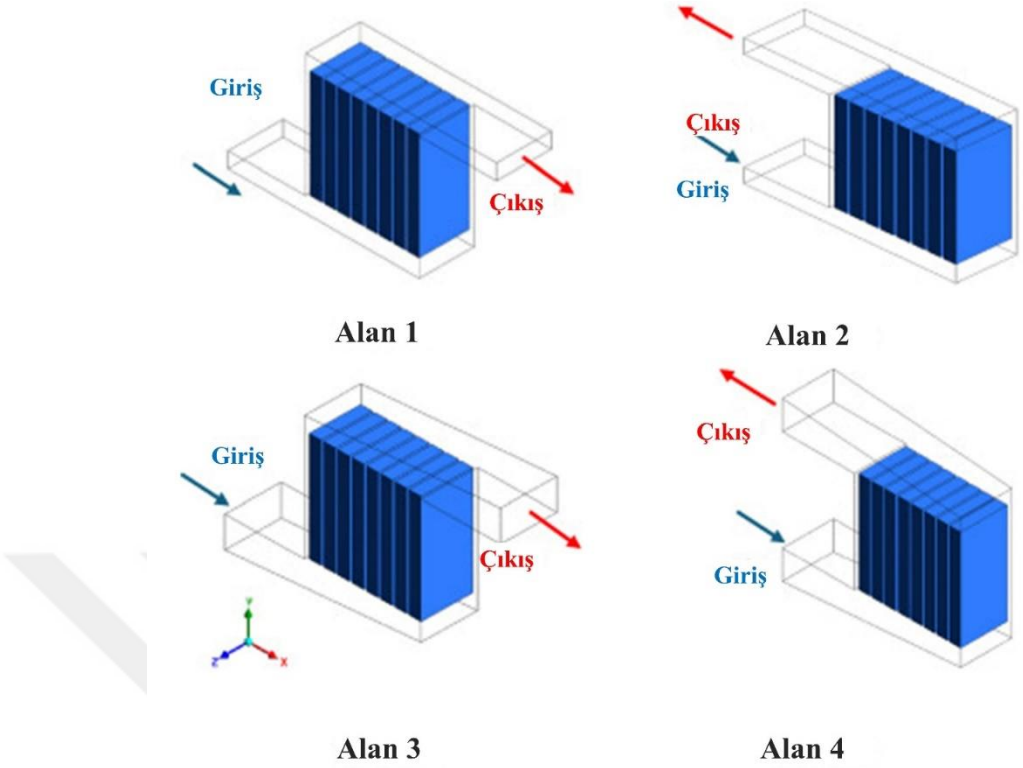
Şekil 2.14. Batarya modülüne ait farklı giriş, çıkış türleri ve sıcaklık izleme noktaları (Mo ve ark., 2025'ten değiştirilerek alınmıştır)

Liu ve ark., (2023) mineral yağ kullanılarak 16 hücreli LİB modülünün ısıl yönetimi üzerine sayısal bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada, batarya aralığı (1–5 mm), soğutucu akış hızı (0.05–0.35 m/s) ve deşarj oranı (1C, 2C ve 3C) gibi tasarım ve çalışma parametrelerinin ısı uzaklaştırma performansı üzerindeki etkileri HAD ile incelenmiş ve simülasyonlar, önceki deneysel verilerle doğrulanmıştır. Bulgular, daldırma soğutmanın doğal konveksiyona kıyasla batarya yüzey sıcaklıklarını %63'e kadar düşürdüğünü göstermiştir. Hücreler arası mesafe arttıkça maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkı azalmış, ancak 4 mm'nin üzerindeki artışlarda bu iyileşmeler sınırlı kalmıştır. Akış hızı arttıkça soğutma verimliliği ve sıcaklık homojenliği iyileşmekte; ancak 0.2 m/s üzerinde fayda azalırken, basınç düşüşü doğrusal olarak artmıştır.

Dubey ve ark., (2021) iki farklı BTYS 3M™ Novec™ 7500 ile daldırma soğutma ve 50/50 etilen glikol-su karışımıyla alt soğutma plakası arasında karşılaştırmalı analiz gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, özellikle yüksek C oranlarında daldırma soğutmanın üstün ısı iletim kapasitesi sağladığını ve hücrelerin maksimum ve ortalama sıcaklıkları önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir. Daldırma soğutma maksimum hücre sıcaklığını 44 °C ile sınırlandırırken, alt soğutma plakası kullanılan sistemde bu değer 64 °C'ye kadar çıkmıştır. Düşük deşarj oranlarında (0.5C), her iki sistemin benzer performans sergilediği görülmüş, bu da alt plaka soğutmanın düşük talepli uygulamalarda yeterli olabileceğini göstermiştir. Basınç düşüşü analizleri, daldırma soğutmanın çok daha avantajlı olduğunu ortaya koymuş; bu sistemin soğutma plakasına kıyasla 25 kata kadar daha düşük pompalama direnci gösterdiğini söylemişlerdir.

Gao ve ark., (2024) biyomimetik tasarımlardan ilham alarak geliştirdikleri BTYS ile daldırma soğutmayı, balık formundan esinlenilerek tasarlanmış özel akış yönlendiricilerle birleştirmişlerdir. NTGK ile, 33 V gerilime sahip, 8S4P düzende 32 adet 18650 silindirik hücreden oluşan bir batarya paketi üzerinde test edilmiş ve simülasyonlar deneysel verilerle doğrulanmıştır. Ayrıca yönlendiricisiz, düz yönlendiricili, dairesel delikli ve balık şeklinde dört farklı yapılandırma karşılaştırılmıştır. 3C deşarj oranı ve 0.00273 kg/s'de, balık delikli yapı maksimum hücre sıcaklığını düz yönlendiricili yapıya göre %12.2 azaltırken, pompa gücünü %42.1 düşürdüğünü görmüşlerdir. ΔT_{max} değeri 4.38 °C ile güvenli sınırın altında kalmıştır.

Banerjee ve Nidhul, (2025) yüksek deşarj oranlarına sahip LİB için hava, saf su, n-heptan ve Novec 7200 gibi farklı dielektrik sıvılar kullanarak 3C ve 5C deşarj oranlarında termal-akış performansını karşılaştırılmıştır. Dört farklı akış geometrisi arasında en uygun yapı HAD ile belirlenmiştir, Şekil 2.15. Sonuçlara göre, en düşük maksimum sıcaklık saf su ile elde edilirken, en iyi sıcaklık homojenliği ve en düşük basınç düşüşü Novec 7200 ile sağlanmıştır. Kanat entegrasyonu, ilave enerji düşüşü oluşturmadan ısıl performansı arttırılmıştır.



Şekil 2.15. Dört farklı akış geometrisi (Banerjee ve Nidhul, 2025'ten değiştirilerek alınmıştır)

Salter ve ark., (2024) yüksek deşarj oranlarında daldırmalı soğutmayı deneysel incelemişlerdir. Samsung INR 18650 20S hücrelerinden oluşan, 2 Ah kapasiteli 12 hücreli bir batarya paketi 4 seri ve 3 paralel düzende ve özel olarak tasarlanmış polikarbon bir hazne içinde Opteon SF-33 sıvısına tamamen daldırılmıştır. Tüm test koşullarında, daldırma soğutmalı sistem her bir hücrenin sıcaklığını 15 °C ile 35 °C arasındaki güvenli aralıkta tutmayı başarmış, tek bir hücre içindeki maksimum sıcaklık farkı 1.5 °C'yi, hücreler arası fark ise 3 °C'yi geçmemiştir.

Zhou ve ark., (2022) daldırma soğutmalı LİB için BTYS yönelik sayısal inceleme gerçekleştirmişlerdir. 24 Ah kapasiteli hücre üzerinde NTGK tabanlı ANSYS Fluent ticari yazılımı kullanılarak, farklı deşarj oranlarında incelenmiştir. Doğal konveksiyon, pasif daldırma ve aktif daldırma olmak üzere üç farklı ısıl stratejinin karşılaştırıldığı çalışmada, aktif daldırmanın 1 mm/s'de maksimum sıcaklığı düşürürken sıcaklık farkını arttırdığı görülmüştür. Akış hızının 1 mm/s'den 12 mm/s'ye çıkarılması maksimum

sıcaklığı ile sıcaklık homojenliği sağlanmıştır. Fakat bu iyileşme artan basınç düşüşü ve pompa enerjisi tüketimiyle sınırlanmıştır.

2.7. Makine Öğrenmesi Yöntemiyle Batarya Modülünde Sensörsüz Sıcaklık Tahmini

Doğru sıcaklık tahmini, termal güvenliği sağlamak ve enerji depolama sistemlerinde kontrol stratejilerini optimize etmek için önemlidir. Bu konuda makine öğrenimine dayalı yaklaşımlar giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu yöntemler, fiziksel sıcaklık sensörlerine ihtiyaç duymadan termal durumları çıkarmak için voltaj, akım ve şarj durumu gibi ölçülebilir sistem parametrelerinden veya daha önce gerçekleştirilmiş deneysel veya sayısal yöntemle birlikte daha az sayıda sensörle çalışacak algoritmalar geliştirilmektedir. Deneysel veya simülasyonlardan elde edilen veri kümelerinden karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri öğrenerek, makine öğrenimi modelleri yüksek doğrulukla sensörsüz sıcaklık tahmini sağlayabilir. Bu yaklaşım yalnızca donanım bağımlılığını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda sistem düzeyinde tanılama ve öngörücü kontrol yeteneklerini de geliştirir.

Zafar ve ark., (2024) LİB yüzey sıcaklığının doğru ve sensörsüz tahmini için geliştirdikleri derin öğrenme tabanlı DeepTimeNet mimarisini sunmuşlardır. Sensör tabanlı yöntemlerin yüksek maliyet, yapısal karmaşıklık ve ekstrem çevresel koşullarda azalan güvenilirlik gibi sınırlamalarına karşılık, DeepTimeNet fiziksel sensör ihtiyacını ortadan kaldırarak yüksek doğrulukta sıcaklık tahmini yapabilen sağlam ve ekonomik bir alternatif sunmuştur. Karşılaştırmalı analizlerde DeepTimeNet, yalnızca daha düşük tahmin hatası değil, aynı zamanda daha düşük hesaplama karmaşıklığı ve daha hızlı çıkarım süresi ile etkili olduğu gösterilmiştir.

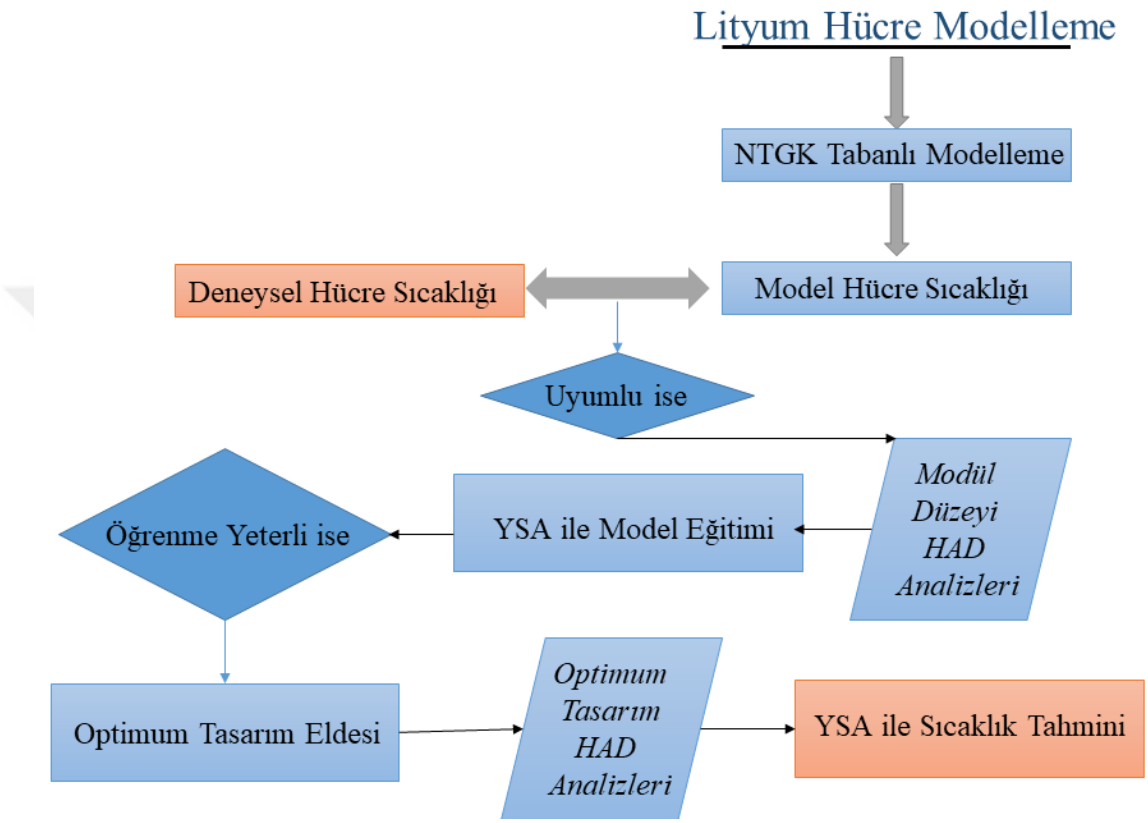
Pathmanaban ve ark., (2024) elektrikli bisikletlerde kullanılan LFP bataryaların yüzey sıcaklığının doğru şekilde tahmin edilmesi amacıyla makine öğrenmesi tekniklerinin uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Yolcu yükü, araç hızı ve ortam sıcaklığı gibi dış etkenlerin, özellikle gündüz ve gece şarj döngüleri sırasında batarya sıcaklığı üzerindeki etkileri sistematik olarak analiz edilmiştir. Dört farklı ML algoritması, Random Forest,

Long Short-Term Memory, Support Vector Machine ve Multi-Layer Perceptron uygulanmıştır. Bu modeller arasında en yüksek doğruluk RF modelinde elde edilmiş; R^2 = 0.9228 ve RMSE = 0.9023 değerleriyle hem öngörü başarımı hem de hesaplama verimliliği açısından diğer yöntemleri geride bırakmıştır. Yolcu yükü altındaki deşarj işlemi, yüksüz senaryolara göre batarya sıcaklığını belirgin şekilde artırarak (maksimum 39.44°C, minimum 31.31°C) yolcu yükünün termal etkisi ortaya konmuştur. Gündüz şarjı sırasında güneş ışınımı ve ortam koşullarının etkisiyle maksimum batarya sıcaklığı 40.5°C'ye ulaşırken, gece şarjında bu değer 38.9°C ile sınırlı kalmış; batarya ön yüzeyinin çevresel etkiler nedeniyle sürekli olarak daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, hibrit (LHS-Taguchi-Manuel) (Husnu Bademlioglu ve ark., 2024; Peng ve ark., 2024) bir tasarım uzayı kullanılarak YSA (Abdellatif ve ark., 2025; Yan ve ark., 2025) ile çok amaçlı Genetik algoritmayı (Deb et al., 2002; C. Li & Chen, 2024; G. Liu et al., 2024) birleştiren iki farklı kimyaya sahip batarya modülü için daldırmalı soğutmada geometrik yerleşimine dair bir optimizasyon çalışması sunulmuştur. Ayırca farklı C oranı ve soğutucu akışkan debisinde eğitilen YSA ile maliyetsiz sıcaklık tahmini gerçekleştrilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölüm, çalışmada kullanılan deneysel ve sayısal metodolojileri açıklamaktadır. Şekil 3.1'de tezde yapılan çalışmalar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Genel metodoloji şematik gösterimi

3.1. Deneysel Metodoloji

3.1.1. Batarya Seçimi ve Özellikleri

Deneysel çalışma, piyasada yaygın olarak kullanılan kimyalara sahip iki farklı LİB SNG Power IFR32700 ve Eve INR18650 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu hücreler, elektrikli araçlar gibi yüksek enerji yoğunluklu uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmeleri nedeniyle seçilmiştir. Her iki hücre tipine ait nominal kapasite, gerilim, hücre kimyası ve form faktörü gibi teknik özellikler Çizelge 2.1'de (Donmez ve ark., 2025; Donmez ve Karamangil, 2024) sunulmuştur. IFR32700 hücresi, yüksek termal kararlılık

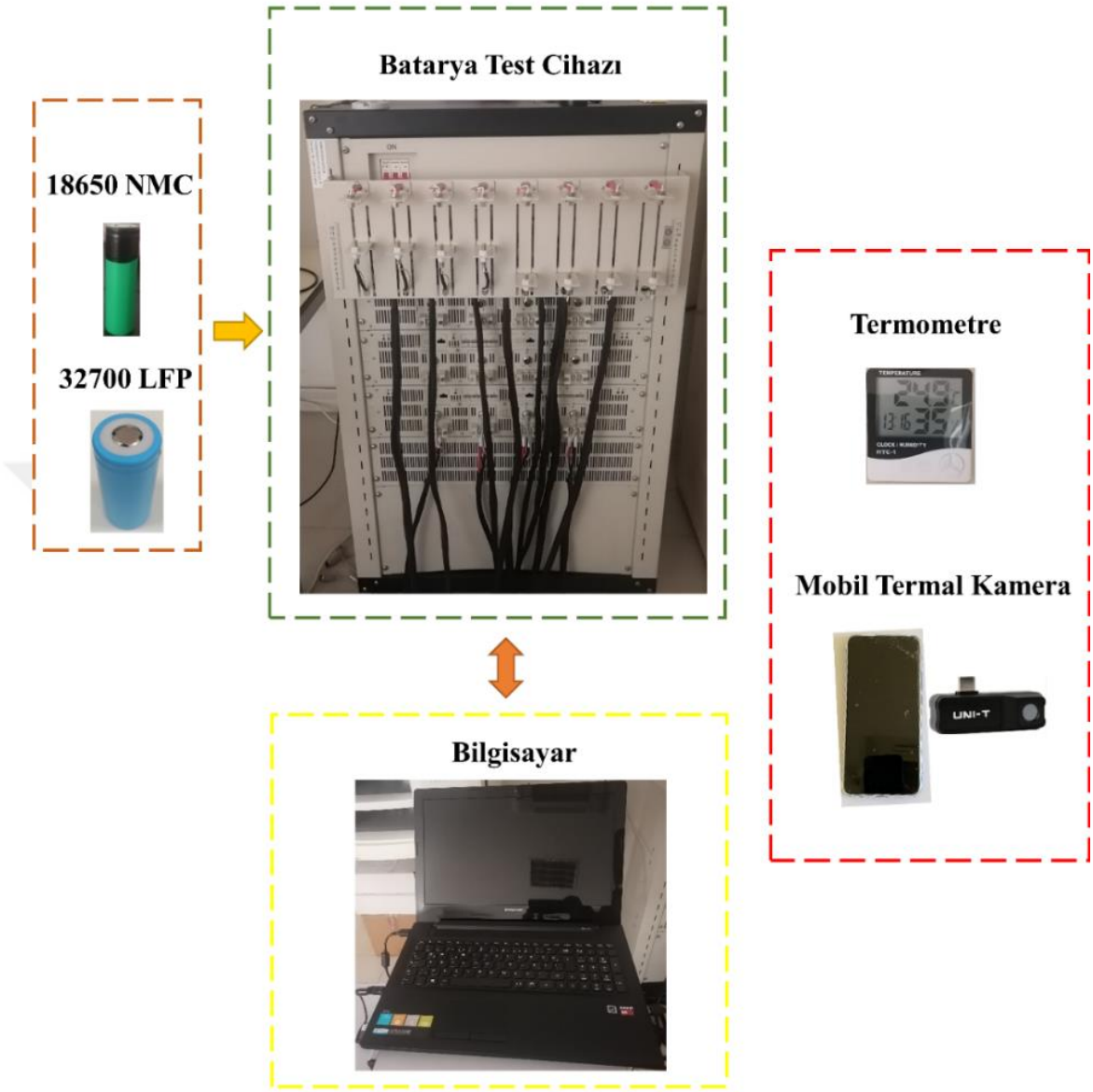
ve uzun çevrim ömürlü LFP temelli silindirik bir hücredir. Diğer yandan, INR18650 hücresi, daha yüksek enerji yoğunluğu ve deşarj akımı toleransına sahip olan NMC kimyasına sahiptir.

Çizelge 2.1. Batarya Özellikleri

	INR18650 (NMC)	**IFR32700 (LFP)**
Nominal Kapasite	2.5 Ah	6 Ah
Nominal Voltaj	3.7 V	3.2 V
Kesme Voltajı	2.5 V ve 4.2 V	2 V ve 3.65 V
Katot	$LiNiMnCoO_2$	$LiFePO_4$
Anot	Grafit	Grafit
Çap	18 mm	32 mm
Uzunluk	65 mm	70 mm

3.1.2. Deneysel Yöntem

Hücrelerin termal ve elektriksel karakterizasyonu deneysel olarak test edilmiştir. Şekil 3.2'de deneysel düzeneğin şematik gösterimi sunulmuştur. Bu testlerde şarj ve deşarj döngüleri boyunca akım ve gerilim değerleri gerçek zamanlı olarak Neware Battery Tester CT-8016-5V30A-NTA cihazıyla kontrol edilmiştir. Cihaz, 30 A'e kadar maksimum deşarj akımında ve 5 V'ye kadar maksimum gerilimde çalıştırılabilmektedir. Akım profillerinin programlanması ve veri eldesi test cihazına bağlı bilgisayarla yazılım arayüzü vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık verileri, ±1 °C ölçüm doğruluğu ve 0,1 °C çözünürlüğe sahip K tipi termokupllar kullanılarak elde edilmiştir. Termokupllar –70 °C ila 260 °C arasında geniş bir çalışma aralığında 0–5 V çıkış gerilimi sunmakta ve tam skalanın %0,05'i hassasiyetinde çalışmaktadır. Sıcaklık verilerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak amacıyla, mobil termal kamera ile yüzey sıcaklığına ilişkin termal görüntüleme yapılmış ve deşarj süresi boyunca belirli zaman aralıklarında termal kontur verileri kaydedilerek yüzeydeki sıcaklık değeri yaklaşık olarak doğrulanmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında çevre koşulları kontrol altında tutulmuştur. Bu sıcaklık kontrolü, özellikle yüksek C oranlı deşarjlar sırasında yüzey sıcaklığı ölçümlerinde ortaya çıkabilecek tutarsızlıkları önlemek açısından kritik öneme sahiptir.

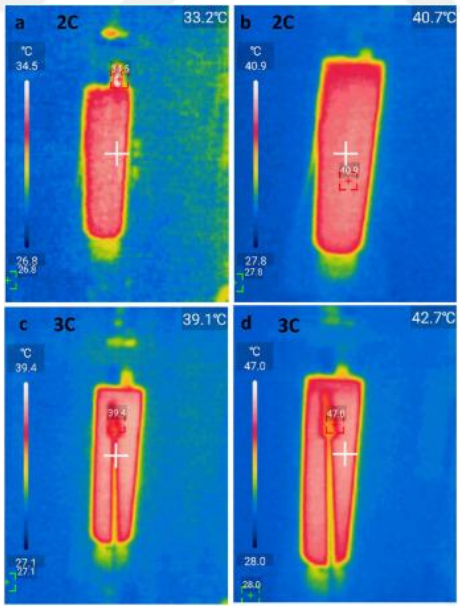


Şekil 3.2. Test düzeneği.

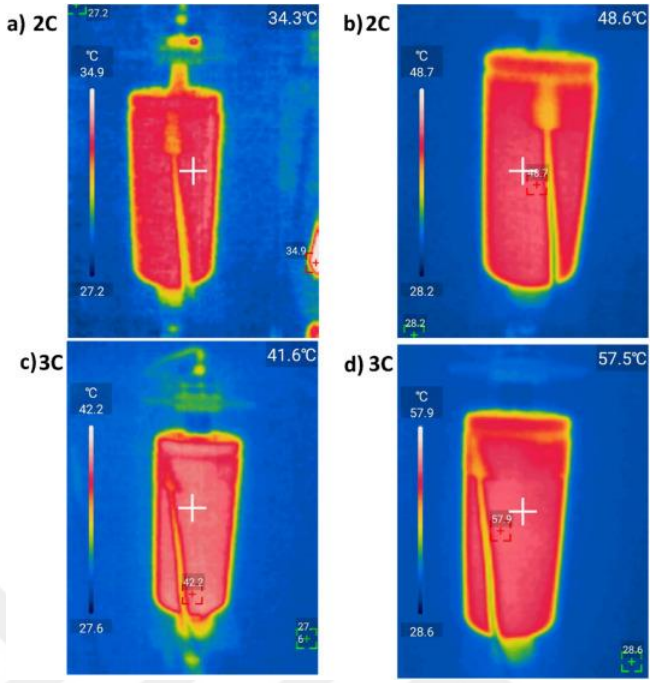
Deneylerde her bir batarya hücresi, standart sabit akım-sabit gerilim (CC-CV) şarj ile tamamen şarj edilmiş ve ardından ısıl dengeyi sağlamak amacıyla bir saat süreyle dinlenmeye bırakılmıştır. Deşarj profillerinde, özellikle yüksek talep gerektiren uygulamalarda sıkça karşılaşılan 2C ve 3C oranlarına odaklanarak, farklı C oranlarında termal davranışın değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Batarya test cihazı ile termokupllardan elde edilen veriler, kontrol arayüzü üzerinden senkronize edilerek; akım, gerilim ve sıcaklık verileri elde edilmiştir.

3.1.3. Belirsizlik Analizi ve Hata Değerlendirmesi

Termal ölçümlerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla, termokupların teknik özelliklerine dayalı bir belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. ±1 °C doğruluk değerine sahip olan termokupllar için ölçülen sıcaklıkların belirsizlik aralığı hesaplanmış ve her ölçümdeki oluşabilecek bağıl hata belirlenmiştir. SNG Power IFR32700 hücresi için 3C deşarj sonrası yüzey sıcaklığı 333,1 K olup, ±1 °C'lik belirsizlikle birlikte hesaplanan bağıl hata %0,30 olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, 2C deşarj durumunda gözlemlenen sıcaklık 324,07 K olup, buna karşılık gelen hata oranı %0,31'dir. Eve INR18650 hücresi için yapılan analizde ise, 3C deşarj sonrası yüzey sıcaklığı 321,56 K, 2C deşarjda ise 315,54 K olarak ölçülmüş; bu değerlere karşılık gelen göreli hatalar sırasıyla %0.31 ve %0.32 olarak hesaplanmıştır. Aynı anda kaydedilen termal kamera ölçümleri, termokupl verileriyle uyum göstermiştir. 18650 NMC ve 32700 LFP hücreleri için 2C 800s (a), 1700s (b) ve 3C 800s (c), 1300s (d) deşarj oranlarında elde edilen termal kamera görüntüleri, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. 18650 NMC için termal kamera görseli 2C'de 800 s (a) ve 1700 s(b), 3C'de 800 s (c) ve 1300 s (d) (Donmez ve Karamangil, 2024)



Şekil 3.4. 32700 LFP için termal kamera görseli 2C'de 800 s (a) ve 1700 s(b), 3C'de 800 s (c) ve 1300 s (d) (Donmez ve ark., 2025)

3.2. NTGK Tabanlı Hücre Modellemesi

Bu bölümde, LFP ve NMC bataryaların tek fazlı sıvı daldırma soğutma performansı için sayısal modelleme metodolojosi tanıtılmıştır. Batarya hücreleri, LFP bataryaları için 10S1P düzeninde NMC için ise 24S1P düzenlenmiş olup soğutucu içerisinde tamamen daldırılmış şekilde modellenmiştir. NTGK parametreleri 18650 NMC için Çizelge 2.2'de (Dey ve ark., 2024; Donmez ve Karamangil, 2024; Yang ve ark., 2021) ve 32700 LFP için Çizelge 2.3'te (Donmez ve ark., 2025; Monika ve ark., 2021; Y. Zhang ve ark., 2022) sunulmuştur. Batarya paketleri, NTGK yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

LİB modeli üç ana bileşenden oluşmaktadır: alüminyumdan oluşan pozitif tab bölgesi, aktif ısı üretim hücre bölgesi ve bakırdan oluşan negatif tab bölgesi. NTGK yöntemi, Li-ion hücresini ortotropik özelliklere (G.-H. Kim ve ark., 2011) sahip sürekli bir ortam olarak ele alınmış ve bu yaklaşım Kwon ve ark., (2006) tarafından tanımlandığı şekilde uygulanmıştır. Bu sürekli ortamın pozitif ve negatif bölgeleri içerisindeki

elektrokimyasal davranış, yük korunumuna dayalı Eşitlik 3.1 ve 3.2 aracılığıyla modellenmiştir.

Çizelge 2.2. 18650 NMC hücrenin özellikleri

Hücre Özellikler,	**Pozitif Tab**	**Negatif Tab**	**Hücre**
Yoğunluk/ kg m^{-3}	2791	8960	2758
Özgül ısı kapasitesi/ J $kg^{-1}K^{-1}$	870	385	1000
Termal iletkenlik/ W m^{-1} K^{-1}	202,4	413	4,5

Çizelge 2.3. 32700 LFP hücrenin özellikleri

Hücre Özellikleri	**Pozitif Tab**	**Negatif Tab**	**Hücre**
Yoğunluk/ kg m^{-3}	2719	8978	2092
Özgül ısı kapasitesi/ J $kg^{-1}K^{-1}$	871	381	800
Termal iletkenlik/ W m^{-1} K^{-1}	202.4	387.6	18.2

$$\sigma_{+}\nabla^2\varphi_{+} = -J_{ech} \tag{3.1}$$

$$\sigma_{-}\nabla^2\varphi_{-} = J_{ech} \tag{3.2}$$

Bu bağlamda, negatif ve pozitif elektrotların iletkenlikleri sırasıyla σ^{-} ve σ^{+} ile gösterilmektedir. Birim hacimden geçen akım oranı J_{ech} (A/m^3) ile ifade edilirken, elektrotlara ait potansiyel alanlar $\emptyset_{-}$ ve $\emptyset_{+}$ sembolleriyle tanımlanmaktadır. Newman ve Tiedemann, (1993), hücre boyunca oluşan potansiyel farkı ile akım transfer oranı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu belirlemiş ve bu ilişkiye dayanarak polarizasyon eğrisine bağlı bir matematiksel model geliştirmiştir, Eşitlik 3.3. Bu model, hücre içi elektrokimyasal davranışın analizinde temel bir referans oluşturmakta olup aşağıda detaylandırılmıştır.

$$J_{ech} = \alpha Y[U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \tag{3.3}$$

α elektrotun özgül yüzey alanını temsil ederken, Y ve U parametreleri eğri uydurma katsayıları olarak görev yapmaktadır. Eşitlik 3.4 ve 3.5'te, U açık devre gerilimini, Y gerilim-akım (V–I) eğrisinin ters eğimini temsil etmektedir. Eşitliklerdeki a_n ve b_n olan parametreleri, modelleme ortamına entegre edilmiş parametre tahmin aracı kullanılarak deneysel voltaj-akım (V–I) deşarj profillerine uydurularak elde edilmiştir. Bu parametrelerin değerleri Çizelge 2.4 ve 2.5'te sunulmuştur. Model, polarizasyon davranışı deneysel U ve Y fonksiyonları aracılığıyla yakalanmıştır. Simüle edilen ve ölçülen voltaj eğrileri arasındaki sapmayı en aza indirmek için model katsayıları ayarlanmış ve NTGK parametre setinin, hücrenin tüm çalışma aralığı boyunca dinamik elektrokimyasal davranışını doğru bir şekilde temsil etmesini sağlanmıştır. Bu parametrelerin fonksiyonel ilişkisi, Gu, (1983) tarafından aşağıdaki eşitliklerde tanımlanmıştır: Eşitlik 3.6'da deşarj deriniliği gösterilmiştir.

$$Y = \left[\sum_{n=0}^{5} a_n (DoD)^n\right] exp\left(-C_1\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \tag{3.4}$$

$$U = \left[\sum_{n=0}^{5} b_n (DoD)^n\right] - C_2\left(T - T_{ref}\right) \tag{3.5}$$

Çizelge 2.4. 18650 NMC hücrenin NTGK parametreleri

Katsayı	**Değer**	**Katsayı**	**Değer**
a0	4.097909	b0	538.2983
a1	-1.13854	b1	-1079.45
a2	2.718455	b2	5364.187
a3	-11.972	b3	-5398.78
a4	20.53622	b4	-3704.76
a5	-11.4746	b5	5347.081
C1	0	C2	0

Çizelge 2.5. 32700 LFP hücrenin NTGK parametreleri

Katsayı	Değer	Katsayı	Değer
a0	3.315073	b0	548.5908
a1	-0.9089	b1	1008.317
a2	7.267569	b2	-13709.2
a3	-24.6843	b3	55402.23
a4	34.35797	b4	-83373.7
a5	-16.8232	b5	42002.91
C1	0	C2	0

$$DoD = \frac{V}{3600Q}\int_0^t J_{ech}dt \tag{3.6}$$

Buradaki, Q, hücrenin teorik nominal kapasitesini, V ise hücre hacmini temsil etmektedir. Bu yarı-ampirik elektrokimyasal yaklaşım, enerji denklemi aracılığıyla hücrenin Eşitlik 3.7'de göründüğü şekilde termal tepkisiyle birleştirilmiştir. Bu entegrasyon, hücrede meydana gelen çeşitli ısı üretim mekanizmalarını dikkate almaktadır. Bunlar arasında, ohmik ısınma ($\sigma|\nabla\emptyset|^2$) ve elektrot-elektrolit ara yüzeylerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında üretilen ısı yer almaktadır. Bu ısıl süreçler, U. S. Kim ve ark., (2008) tarafından detaylı olarak açıklanmıştır.

$$\rho_c C_c \frac{\partial T}{\partial t} - k_c \nabla^2 T = \sigma_+ |\nabla \varphi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \varphi_-|^2 + \dot{q}_{ech} \tag{3.7}$$

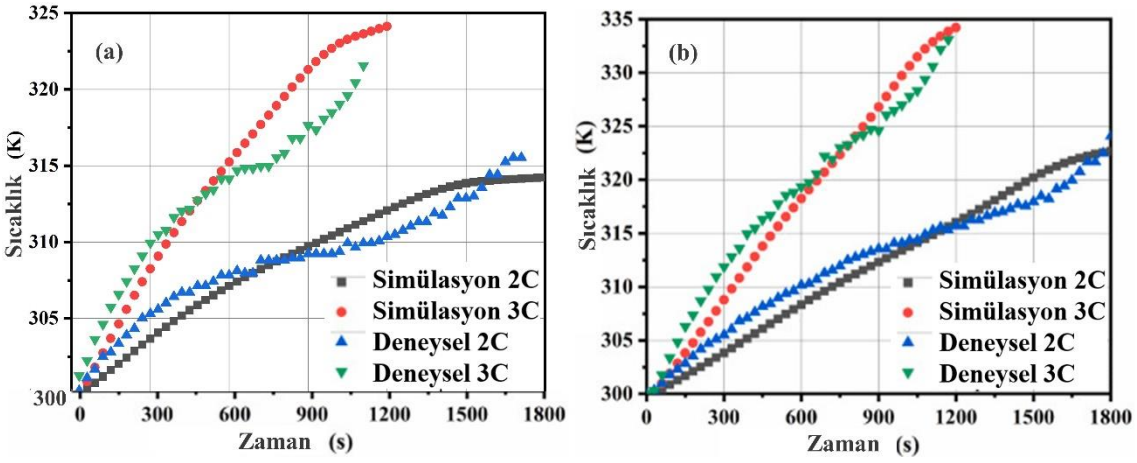
C_c, k_c ve ρ_c sırasıyla özgül ısı kapasitesi, ısıl iletkenlik ve yoğunluğu ifade etmektedir. Elektrokimyasal hacimsel ısı üretim hızı $\dot{q}_{ech}$ ile gösterilmekte olup, iki bileşenden oluşmaktadır. Birinci bileşen, hücre gerilimi ile açık devre gerilimi arasındaki farkla tanımlanan polarizasyona bağlı enerji kayıplarını temsil eden geri döndürülemez ısı

üretimidir ve U − (∅₊ − ∅₋) ifadesiyle gösterilmektedir. İkinci bileşen ise, sistemdeki entropik değişimleri temsil eden geri döndürülebilir ısı üretimi, dT/dU ifadesiyle tanımlanır. Bu iki mekanizma birlikte, hücrenin elektrokimyasal reaksiyonları sırasında oluşan toplam ısı üretimini belirlemektedir.

$$\dot{q}_{ech} = J_{ech}\left[U - (\varphi_+ - \varphi_-) - T\frac{dU}{dT}\right] \tag{3.8}$$

3.2.1. Sayısal Modelin Doğrulanması

Tekli hücreye ait sayısal modelin doğruluğu, deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır; bu karşılaştırma Şekil 3.5'te sunulmuştur. Analizlerde 30 saniyelik zaman adımı ve her adım için 60 yineleme uygulanmıştır. Modelde ortam sıcaklığı 27 °C olarak sabitlenmiş ve bataryanın başlangıç sıcaklığı bu değere eşit kabul edilmiştir.



Şekil 3.5. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması 18650 NMC (a) (Donmez ve Karamangil, 2024'ten değiştilerek alınmıştır) ve 32700 LFP (b) (Donmez ve ark., 2025'ten değiştirilerek alınmıştır)

3.3. Korunum Denklemleri ve Sınır Koşulları

Soğutucu akışkan için kütle, momentum ve enerji korunumu denklemleri sırasıyla Eşitlik 3.9, Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11 ile ifade edilmiştir. Bu denklemler, akışkanın sürekliliğini, ivmelenmesini ve ısı taşınımını tanımlamakta olup, sayısal modelin temel

fiziksel dayanaklarını oluşturmaktadır. Batarya modülüne ait yapısal ve geometrik özellikler Çizelge 2.6'da sunulmuştur. Ayrıca dielektrik soğutucu akışkanların AmpCool AC-100 (EF) (Jithin ve Rajesh, 2022; Sundin ve Sponholtz, 2020), mineral yağ (MO) (D. Chen ve ark., 2016; Jithin ve Rajesh, 2022) ve Hydrofluoroethers 3M Novec 7500 (NOVEC) (Choi ve ark., 2023; Shi ve ark., 2025) için özellikler Çizelge 2.7'de sunulmuştur. EF, en düşük yoğunluğa (811 kg/m³) ve en yüksek özgül ısı kapasitesine (2203,2 J/kg·K) sahiptir. Bu EF'i geçici termal enerji emilimi için yüksek bir potansiyel kılar. Ayrıca bu üç akışkan içinde termal iletkenliğide en yüksek olan akışkandır (0,1373W/m·K). Dinamik viskozitesi ise nispeten düşük kalmaktadır (0,008kg/m·s). 920 kg/m³'lük daha yüksek bir yoğunluğa ve 1900 J/kg·K'lik özgül ısıya sahip MO biraz daha düşük termal iletkenliğe (0,13W/m·K) sahiptir. Ancak önemli ölçüde daha yüksek viskoziteye (0,056kg/m·s) sahiptir ve bu da kullanımında akış direncini ve basınç düşüşünü arttıracağını göstermektedir. Buna karşılık, NOVEC en yüksek yoğunluk (1624 kg/m³) ve en düşük özgül ısı kapasitesi (1121 J/kg·K) ve özellikle en düşük termal iletkenliği (0,066 W/m·K) gösterir. Bu da onu termal açıdan en dezavantajlı akışkan kılar. Ancak, pompalama gücü gereksinimini azaltacak düşük bir viskoziteye (0,0013 kg/m·s) sahiptir. Sayısal analizde uygulanan sınır şartları arasında; hücrelerin dış yüzeyinde başlangıç sıcaklığının sabit 27 °C olarak tanımlanması, girişte sabit soğutucu akış hızı veya debisi, çıkışta atmosfer basıncı ve dış duvarlarda ısı geçişine kapalı sınır koşulları yer almaktadır. Eşitlik 3.9, 3.10 ve 3.11'de, ρ, v $\vec{}$, P, μ, C_p, k, ve T yoğunluk, hız vektörü, basınç, dinamik viskozite, özgül ısı kapasitesi, termal iletkenlik ve sıcaklık değerlerini temsil etmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{3.9}$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \mathrm{P} + \mu \nabla^2 \vec{v} \tag{3.10}$$

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho C_p \vec{v} T\right) = \nabla \cdot (k \nabla \mathrm{T}) \tag{3.11}$$

Çizelge 2.6. Modül özellikleri

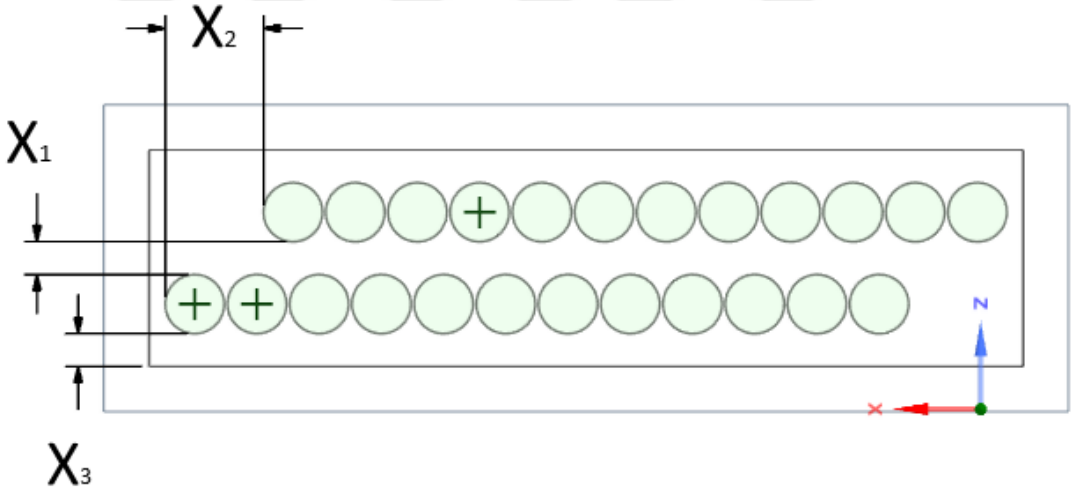
Parametre	**18650 NMC Modül**	**32700 LFP Modül**
Modül Boyutları	37,5 x 237 x 68 mm^3	65,5 x 174 x 74 mm^3
Hücre Sayısı	24	10
Modül Düzeni	24 seri 1 paralel (24S1P)	10 series 1 parallel (10S1P)
Nominal Voltaj (V)	86.4	32
Güç Kapasitesi (Wh)	222	192

Çizelge 2.7. Akışkan Özellikleri

Akışkan Özellikleri	**EF**	**MO**	**NOVEC**
Yoğunluk/ kg m^{-3}	811	920	1624
Özgül Isı/ J $kg^{-1}K^{-1}$	2203.2	1900	1121
Termal İletkenlik/ W m^{-1} K^{-1}	0.1373	0.13	0.066
Viskozite/ kg m^{-1} s^{-1}	0.008	0.056	0.0013

Bu çalışmada, modül içindeki hücrelerin düzenini optimize etmek için bir deney tasarımı uygulanmıştır. Termal ve akış performansını artıran optimum BTYS için örnekleme tekniği, tasarım parametresi normalizasyonu ve çok kriterli karar vermeyi içeren bir yaklaşım benimsenmiştir. Optimum tasarım için x_1, x_2 ve x_3 olarak üç tasarım değişkeni ele alınmıştır. Hesaplama verimliliğini koruyarak tasarım alanının kapsamlı bir şekilde incelenmesini sağlamak için hibrit örnekleme kullanılmıştır. Bu strateji, LHS kullanılarak oluşturulan 30 nokta, Taguchi ortogonal dizi tasarımına dayalı 9 nokta ve elle tanımlanmış 5 tasarım durumunu içerir. LHS yöntemi, çok boyutlu tasarım alanını istatistiksel olarak bağımsız temsil etme kapasitesi nedeniyle seçilmiştir. Taguchi yöntemi ve 5 manuel tanımlanmış nokta, sınır etkilerini ve belli orta noktaları yakalamak için seçilmiştir. Tüm tasarım değişkenleri başlangıçta, düzgün ölçeklemeyi kolaylaştırmak ve vekil modelleme ve optimizasyon aşamalarında sayısal istikrarsızlığı önlemek için normalize aralık [0, 1] içinde tanımlanır. Daha sonra normalleştirme

şeması, modülün geometrik kısıtlamalarına dayalı fiziksel boyutlara dönüştürülmüştür. x1 ve 3_ ölçüsü = 0,5 + 9,5 * x1 ve 3_normalize, 0,5 mm ile 10 mm arasında bir aralık elde edilir. x2_ölçüsü = 30 * x2_normalize, 0 mm ile 30 mm arasında değerler elde edilmiştir. Şekil 3.6'da modül üstünde parametreler gösterilmiştir. Sonuçlar vekil model oluşturmak için kullanılır. Bu vekil model, performans eğilimlerinin etkili bir şekilde araştırılmasını sağlar ve ek yüksek maliyetli simülasyonlara gerek kalmadan optimizasyon tekniklerinin uygulanmasını kolaylaştırır. Son karar verme için, örneklenen yapılandırmalar arasında en dengeli tasarımı belirlemek için Öklid mesafesine dayalı bir seçim kriteri uygulanmıştır. Bu yaklaşım, her tasarım noktasını, ideal çözümün minimum sıcaklık artışı, minimum sıcaklık gradyanı ve minimum basınç düşüşüne sahip varsayımsal noktaya karşılık geldiği normalleştirilmiş çok amaçlı bir alanda değerlendirir. Pareto ön analizinde x, maksimum ve minimum değerleri kullanılarak r'ye normalize edilir ve Öklid mesafe D, Eşitlik 3.12 ve 3.13'teki gibi normalize edilmiş değerler olan r_1 ve r_2 kullanılarak ideal nokta hesaplanır.



Şekil 3.6. Optimizasyon tasarım parametreleri.

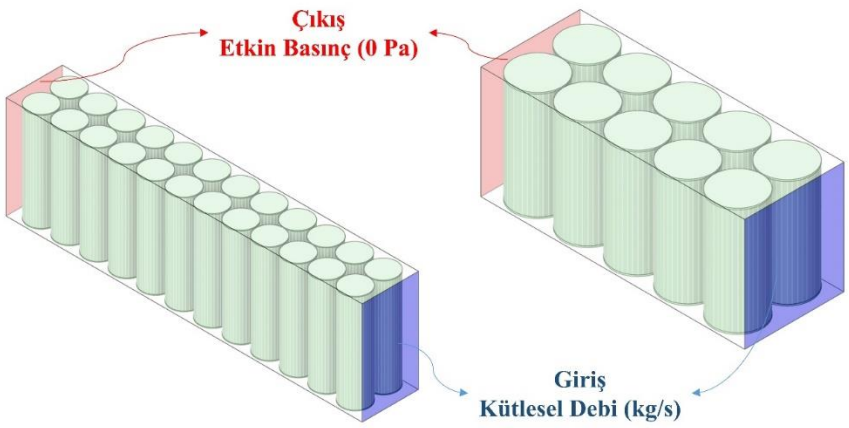
$$r = \frac{\max(x) - x}{\max(x) - \min(x)} \tag{3.12}$$

$$D = \sqrt{(r_1 - 1)^2 + (r_2 - 1)^2} \tag{3.13}$$

Eşitlik 3.14, akışkanın türbülanslı/laminer olduğunu değerlendirmek için kullanılan Reynolds sayısı (Re)'dır. Bu eşitlikte D_h hidrolik çapı temsil etmektedir. Tüm akışkanlar ve iki farklı kanal geometrisi için yapılan hesaplamalarda, elde edilen Reynolds sayıları 2300'ün altında kalarak akışın tamamen laminer rejimde gerçekleştiğini göstermiştir. 18650 NMC modül için sırasıyla EF, MO ve NOVEC akışkanlarında Re sayıları 18,96, 2,71 ve 116,66 olarak hesaplanmıştır. 32700 LFP modül için ise EF için 14,34, MO için 2,05 ve NOVEC için ise 87,96 bulunmuştur. Anot ve katot kalınlıkları 1 mm olarak alınmıştır. Yükseklik yönünde, hücreler ile modül muhafazası arasında 1 mm'lik bir akış boşluğu bulunurken, diğer yönlerde bu boşluk 2 mm olarak belirlenmiştir. Batarya modülüne uygulanan sınır koşulları ise Şekil 3.7'de gösterilmektedir.

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \tag{3.14}$$

Tüm sayısal simülasyonlar, 300 K başlangıç sıcaklığı ile başlatılmıştır. Modülün dış yüzeylerinin tamamı adyabatik olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle, sınır yüzeylerde herhangi bir ısı geçişi gerçekleşmemektedir. Soğutucu akışkan, modüle 300 K sabit sıcaklıkla giriş yapmaktadır. Modül içindeki girişte kütlesel debi çıkışta ise basınç çıkışı sınır koşullarına göre modellenmiştir. Modülün iç duvarlarında kaymasız sınır koşulları uygulanmıştır.



Şekil 3.7. Modül üzerinde sınır koşulları

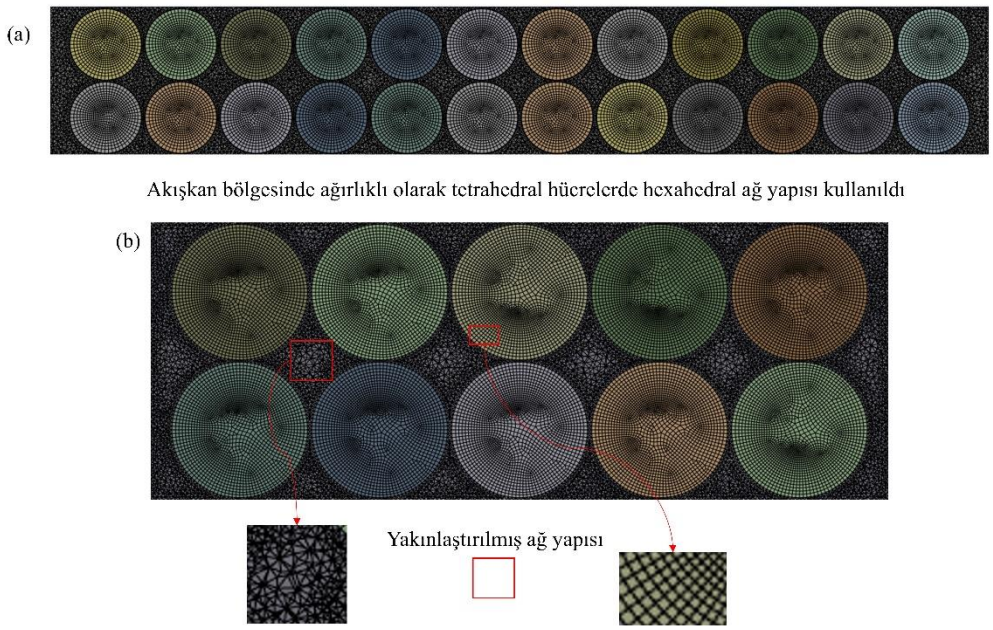
3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

3.4.1. Sayısal Yöntem

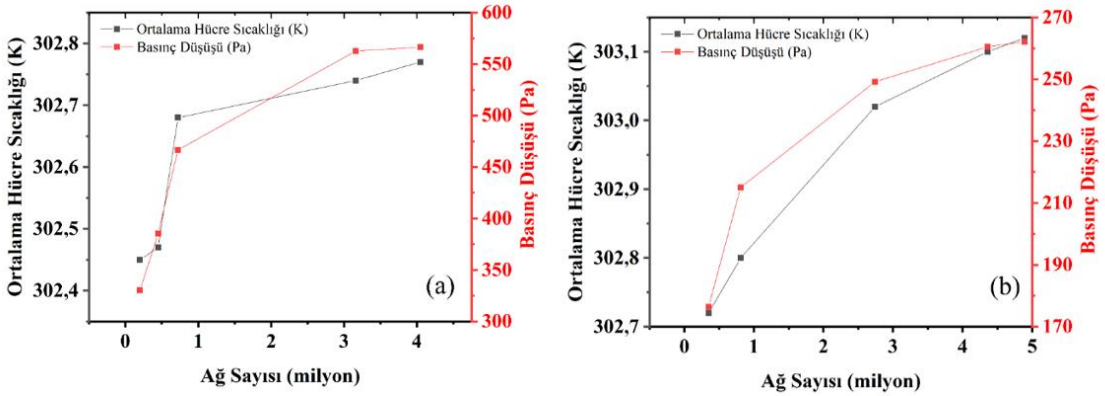
Korunum denklemleri, ANSYS Fluent 2024 R1 yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Basınç-hız ilişkisi için pressure-based algoritması uygulanmıştır. Basınç denklemi ikinci derece şemayla çözülürken, diğer tüm denklemler ikinci dereceden yukarı yönlü ayrıklaştırma yöntemiyle çözülmüştür. Gevşetme faktörleri; basınç için 0.3, yoğunluk için 1, momentum için 0.7 ve enerji için 1 olarak ayarlanmıştır. Her zaman adımı için 60 yineleme gerçekleştirilmiştir. Çözümün doğruluğunu sağlamak amacıyla, yakınsama kriterleri şu şekilde belirlenmiştir: süreklilik değeri 10^{-3}'ün altına, momentum 10^{-3}'ün altına ve enerji denklemi ise 10^{-6}'nın altına düşmesi olarak belirlenmiştir.

3.4.2. Ağdan Bağımsızlık Çalışması

Tetrahedral ve hexahedral hücrelerden oluşan ağ yapısı, çok bölgeli ağ üretim tekniği kullanılarak ANSYS Meshing aracıyla oluşturulmuştur. Modüllerin ağ yapıları Şekil 3.8'de sunulmuştur. Hem güvenilir hem de doğru sonuçlar elde edebilmek ve aynı zamanda hesaplama yükünü en aza indirmek amacıyla ağdan bağımsızlık çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda en uygun ağ düzeni belirlenmiştir. 18650 NMC modül için toplamda 1447455 düğüm noktası ve 3161211 eleman kullanılırken 32700 LFP modül için 2114216 düğüm noktası ve 4366519 eleman kullanılmıştır. Akışkan bölgesi ağırlıklı olarak tetrahedral elemandan oluşurken, batarya hücreleri hexahedral elemanlardan oluşturulmuştur. Ayrıca, tetrahedral ve hexahedral bölgeler arasında düzgün geçiş sağlamak amacıyla wedge ve piramit elemanlar kullanılmıştır. Şekil 3.9'da ağdan bağımsızlık çalışması sunulmuştur.



Şekil 3.8. Ağ yapısı



Şekil 3.9. Ağdan bağımsızlık çalışması 18650 NMC (a) ve 32700 LFP (b)

3.5. YSA Tabanlı Sıcaklık Tahmini Metodolojisi

Sayısal modelleme, YSA ile entegre edilmiştir. HAD simülasyonları, farklı C oranları ve soğutucu akış debileri altında gerçekleştirilmiş; böylece geçici ısıl davranış modellenmiştir. Soğutucu akışkanlara ait ısıl iletkenlik, özgül ısı kapasitesi ve viskozite gibi fiziksel özellikler, HAD analizlerinde soğutma performanslarının doğru şekilde temsil edilmesi için dikkate alınmıştır. Bu simülasyonlar sonucunda elde edilen kapsamlı veri kümesi, YSA modelinin eğitimi ve test edilmesi için temel oluşturmuştur.

MATLAB ortamında uygulanan ileri beslemeli YSA, bir giriş katmanı, bir gizli katman ve bir çıkış katmanından oluşmaktadır. Giriş değişkenleri C oranı, zaman, ve soğutucu debisi olup; çıkış değişkeni ortalama hücre sıcaklığıdır. Model eğitimi Levenberg–Marquardt ile gerçekleştirilmiştir. Veri seti %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olmak üzere üçe bölünmüştür. Model doğruluğu belirleme katsayısı (R^2) ve ortalama kare hata (MSE) gibi performans ölçütleri temel alınarak değerlendirilmiştir.

Girdi verisi, Eşitlik 3.15'te açıklandığı şekilde normalize edilmiştir.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{offset}}{X_{gain}} + X_{min} \tag{3.15}$$

Gizli katmandaki her bir nöronun çıktısı, Eşitlik 3.16'da gösterildiği gibi tan-sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

$$a_1 = \tanh(W_1 . X_{norm}^T + b_1) \tag{3.16}$$

Tan-sigmoid aktivasyon fonksiyonu ise, Eşitlik 3.17'de tanımlanmıştır.

$$f(x) = \frac{2}{1 + \exp(-2x)} - 1 \tag{3.17}$$

Çıkış katmanında, gizli katmandan gelen çıktılar doğrusal olarak birleştirilerek modelin çıktısı üretilir; bu işlem Eşitlik 3.18'de açıklanmıştır.

$$a_2 = W_2 . a_1 + b_2 \tag{3.18}$$

Bu çıktı daha sonra, Eşitlik 3.19'da detaylandırılan işlem takip edilerek tahmin edilen batarya sıcaklığını elde etmek için denormalize edilmiştir.

$$Y = a_2 x Y_{gain} + Y_{offset} \tag{3.19}$$

Son olarak, modelin performansı, tahmin edilen ve gerçek sıcaklıklar arasındaki MSE hesaplanarak değerlendirilmiş; bu işlem Eşitlik 3.20'de belirtilmiştir.

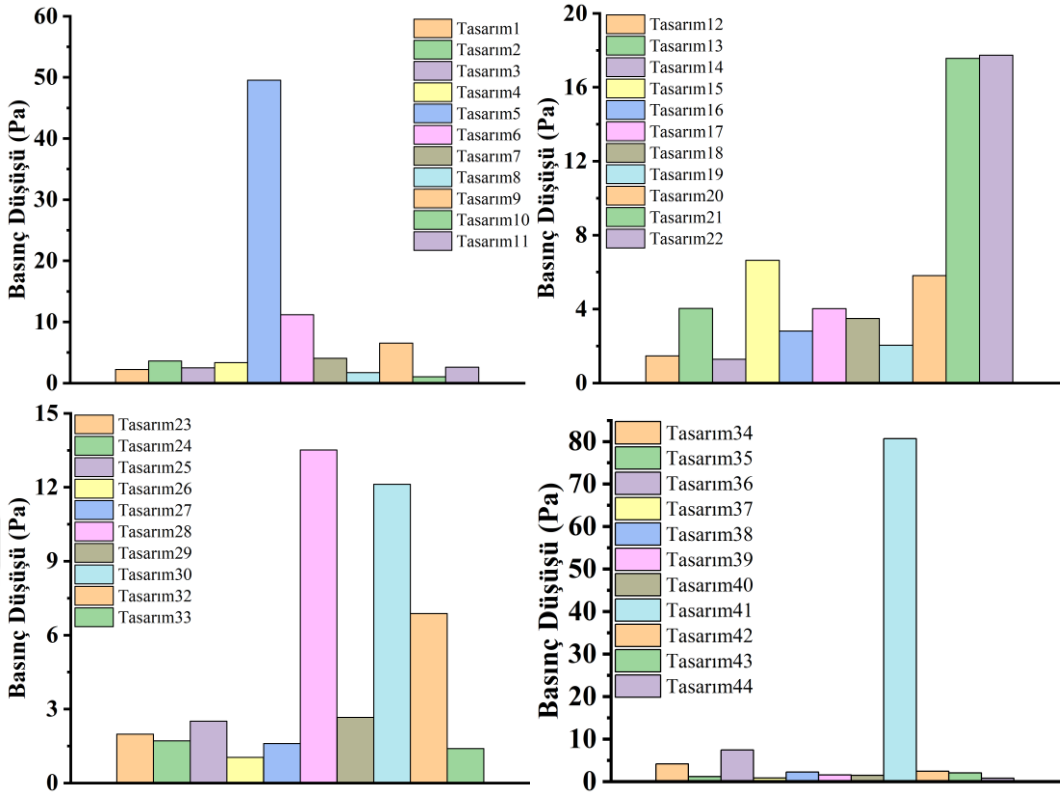
$$MSE = \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}(Y_q - \hat{Y}_q) \tag{3.20}$$

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, biri yirmi dört adet 2,5 Ah 18650 NMC, diğeri on adet 6 Ah 32700 LFP hücresinden oluşan modüllerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışması 30 LHS, 9 Taguchi ve 5 manuel belirlenmiş toplam 44 örnekle yapılmıştır. Tasarım optimizasyonunun sonrasında, termal ve basınç düşüşü performanslarını değerlendirmek için aynı güç değeri için optimize edilmiş 18650 ve 32700 modülleri için karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Bunlar arasından, daha iyi performans gösteren modül daha sonraki analizler için seçilmiştir. Bu analizlerde, çeşitli deşarj oranları (1C-4C) ve soğutucu akışkan debilerinde (0,0001-0,008 kg/s) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlardan, basınç düşüşü ve ortalama hücre sıcaklığı elde edilmiştir. Son olarak, simülasyon verileriyle bir YSA modeli geliştirilmiş ve eğitilmiştir. Ortalama hücre sıcaklığına ilişkin YSA tahminleri daha sonra HAD simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

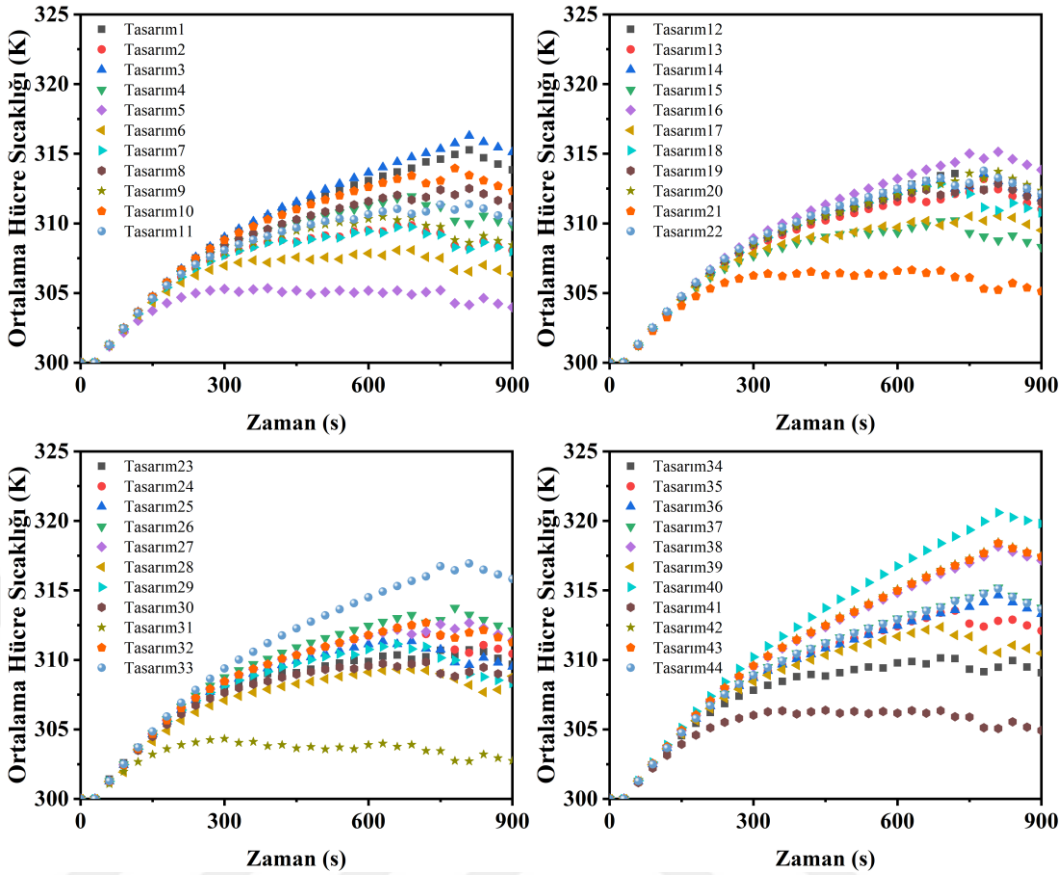
4.1. 18650 NMC Modül Optimizasyonu

18650 NMC hücrelerinden oluşan batarya modülünün optimizasyonu, 4C ve 0.008 kg/s koşullarında, basınç düşüşü ile ortalama hücre sıcaklığı değerlendirilerek gerçekleştirilmiştir. Ardından, bu çalışma koşullarında elde edilen optimum tasarım, temel tasarımla karşılaştırılmıştır. 18650 NMC batarya modülüne ait 44 farklı örnekle oluşturulan tasarımlara karşılık gelen basınç düşüşü değerleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Farklı tasarımlara göre basınç düşüşü değerleri değişkendir. Bu durum basınç düşüşünün tasarıma duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle Tasarım5 ve Tasarım41 sırasıyla 49,55 Pa ve 80,71 Pa'lık yüksek basınç düşüşü ile dikkat çekmiştir. Buna karşılık, birçok tasarımda ise çoğunlukla 5 Pa'nın altında kalan düşük basınç düşüşleri görülmüştür. Özellikle Tasarım31'de (temel tasarım-562,65 Pa) çok yüksek basınç düşüşü elde edildiği için diğer tasarımlara ait görsellerin daha kolay okunabilmesi için Şekil 4.1'e verisi eklenmemiştir. Tasarıma göre olan bu değişiklik, modülün verimliliğini belirlemede tasarım parametrelerinin kritik rolünü vurgulamıştır. Düşük güç tüketimli ve verimli soğutma sistemleri için basınç düşüşü değeri minimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.1. Farklı tasarımlarda 18650 NMC modül için basınç düşüşü.

Şekil 4.2'de 18650 modül tasarımı için ortalama hücre sıcaklığının zamana bağlı değişimi sunulmuştur. Tasarımlar arasında belirgin bir ısıl performans farklılığı gözlemlenmiştir. Tasarım40 ve Tasarım43'te, deşarj sonrası ortalama hücre sıcaklığı 315 K'den büyüktür. Bu bazı tasarımlarda soğutucu akışkan tarafından yetersiz ısı absorbe edildiğini göstermektedir. Buna karşılık, Tasarım5, Tasarım31 ve Tasarım41 deşarj döngüsü boyunca ortalama hücre sıcaklığını sürekli olarak daha düşük seviyelerde tutmuştur. Deşarj sonrası ortalama hücre sıcaklığı bu tasarımlar için 305 K'den düşük olmuştur.

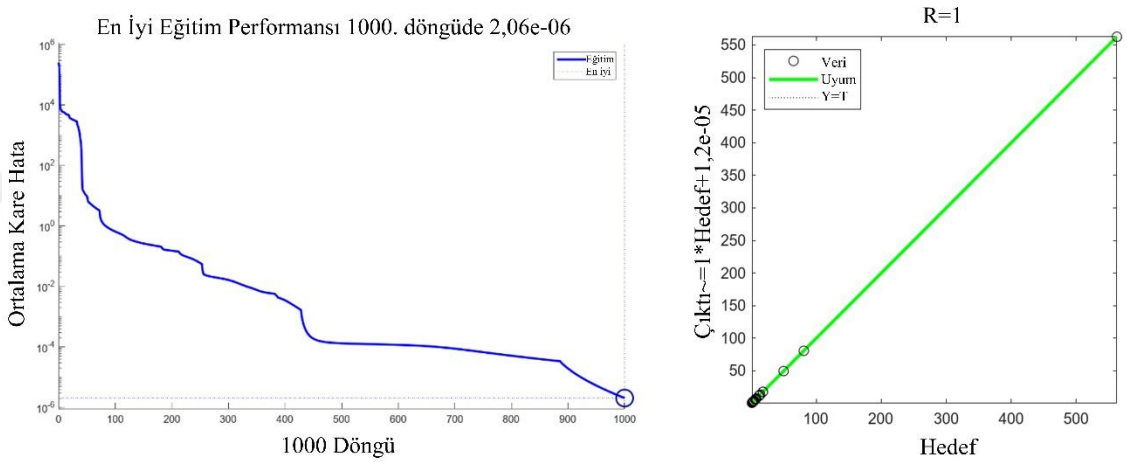


Şekil 4.2. Farklı tasarımlarda 18650 NMC modül için ortalama hücre sıcaklığı.

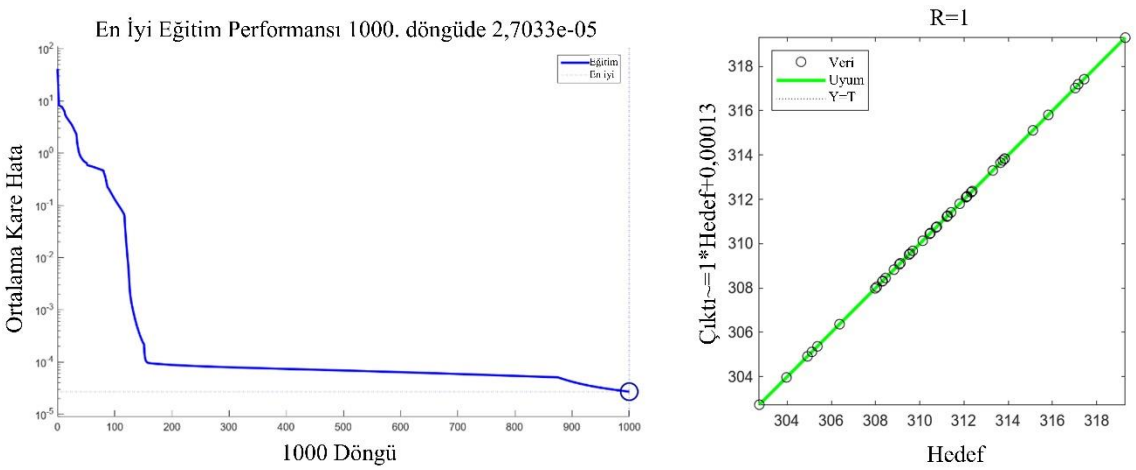
Şekil 4.3'te, YSA modelinin 18650 batarya modülündeki basınç düşüşünü tahmin etmedeki performansı sunulmuştur. MSE grafiğinde, hata değerinin sürekli azaldığı ve en iyi eğitim performansının 1000. döngüde 2.06×10^{-6} gibi düşük bir MSE ile elde edildiği görülmüştür. R grafiğinde, tahmin edilen ve gerçek basınç düşüşü değerleri arasındaki regresyon analizi sunulmuştur. Verilerin Y=T doğrusu boyunca iyi hizalanması ve regresyon katsayısının (R=1) elde edilmesi, modelin tasarım girdileri ile basınç düşüşü arasındaki ilişkiyi yakaladığını göstermiştir. YSA'nın tasarım uzayının modellemesinde doğrulukla basınç düşüşü tahmini sayesinde gelecekteki optimizasyon çalışmalarında hesaplama maliyetini düşürerek HAD analizlerine olan bağımlılığı azaltmıştır.

18650 NMC'nin ortalama hücre sıcaklığı için kurulan YSA modeline ait MSE ve regresyon performansını Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Eğitim hatası 1000 döngü

nihayetinde $2{,}7033\times10^{-5}$ seviyesinde minimum MSE değerine ulaşmıştır. R analizi çalışmasında tahmin edilen ve gerçek sıcaklık değerleri arasında iyi uyum bulunduğunu göstermiştir. Regresyon katsayısının (R=1) elde edilmesi, modelin giriş özellikleri ile ısıl davranış arasındaki ilişkiyi yüksek doğrulukla öğrendiğini kanıtlamıştır. Bu uyum değeri, ağın fiziksel simülasyon sonuçlarını hassasiyetle yeniden üretebildiğini göstermektedir.

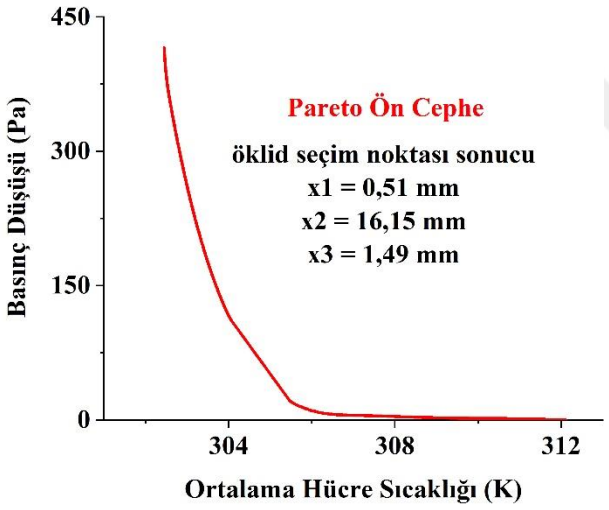


Şekil 4.3. 18650 NMC modül için basınç düşüşü YSA modelinin ortalama kare hata ve R eğrileri.



Şekil 4.4. 18650 NMC modül için ortalama hücre sıcaklığı YSA modelinin ortalama kare hata ve R eğrileri

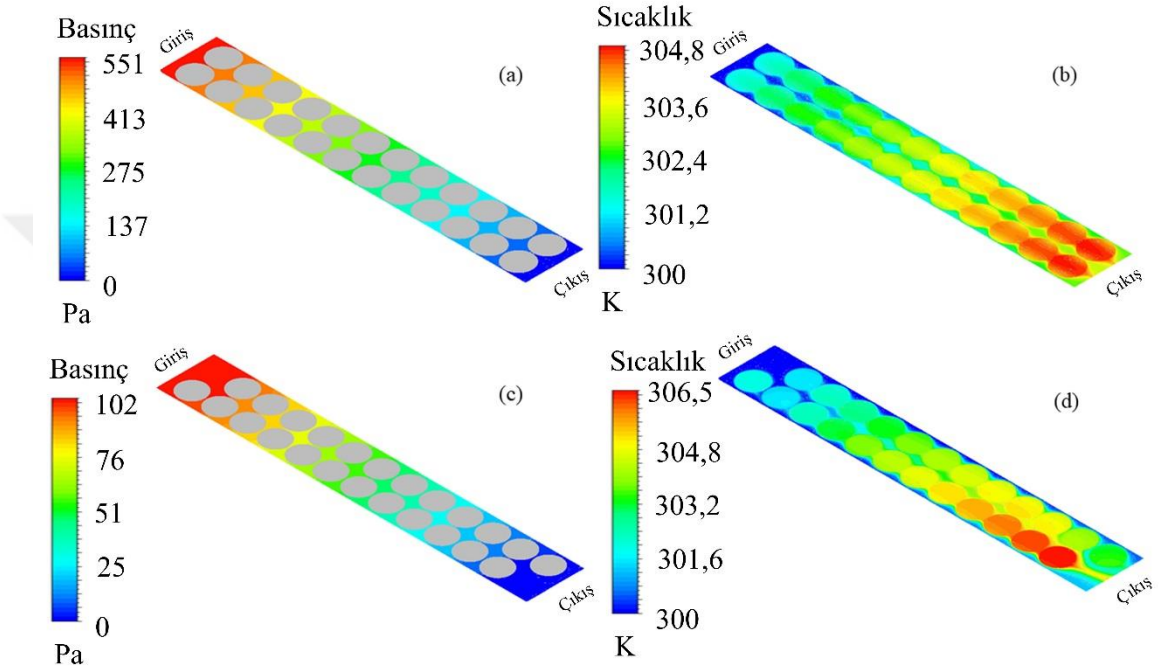
Şekil 4.5'te, ortalama hücre sıcaklığı ile basınç düşüşü arasındaki ilişkiyi temsil eden Pareto ön cephesi gösterilmiştir. Ortalama sıcaklık 302 K'ye doğru azaldıkça, basınç düşüşünün 400 Pa'nın üzerine çıktığı keskin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, iyi ısıl kontrolün kaçınılmaz olarak yüksek basınç düşüşüyle sonuçlandığını ortaya koymuştur. Öte yandan, basınç düşüşünün 0 Pa'nın doğru yaklaştığı tasarımlarda ortalama sıcaklık 310 K'nin üzerine çıkarak yetersiz soğutma etkisini göstermiştir. En uygun tasarım, Pareto eğrisi üzerindeki dengeli noktayı seçmek amacıyla kullanılan Öklidyen mesafe minimizasyonu yöntemiyle belirlenmiştir. Bu noktaya karşılık gelen tasarım parametrelerinde (x_1 = 0.51 mm, x_2 = 16.15 mm, x_3 = 1.49 mm), kabul edilebilir bir soğutma performansı sağlarken pompalama gereksinimini düşük düzeyde tutan tasarımı temsil etmektedir. Tek bir parametreye odaklanmak yerine, Pareto ön cephe ile dengeli tasarımın seçimi mümkün olmuştur.



Şekil 4.5. 18650 NMC için pareto ön cephe

Şekil 4.6'da 4C deşarj oranı ve 0,008 kg/s'de, 18650 batarya modülünün basınç ve sıcaklık dağılımları, temel tasarım (a, b) ve optimum tasarım (c, d) için karşılaştırılmıştır. Temel tasarımın, giriş bölgesinde basınç 550 Pa değerini aşmıştır. Giriş ve çıkış arasındaki bu basınç farkı verimsiz tasarımda önemli akış direnci oluştuğunu göstermektedir. Sıcaklık dağılımı Şekil 4.6 (b), özellikle modülün çıkışına doğru artarak 304 K'yi aşmıştır. Buna karşılık, optimize edilen tasarımda maksimum

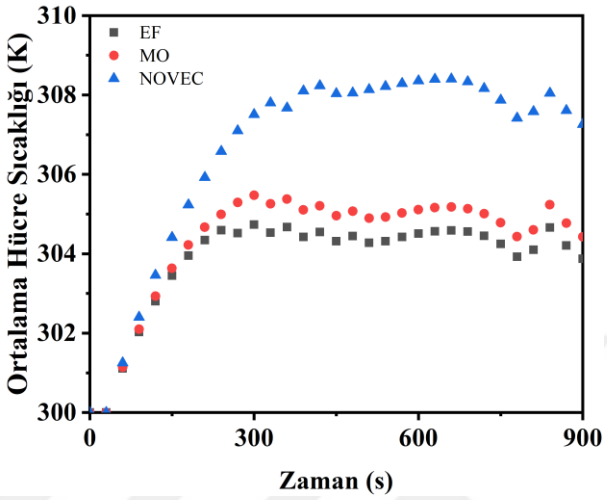
basınç değeri yaklaşık 104 Pa'ya düşmüştür, Şekil 4.6 (c). Bu daha verimli bir sıvı yönlendirme stratejisini göstermiştir. Ancak modüldeki ortalama hücre sıcaklığı ve maksimum sıcaklık değeri temel tasarıma göre artmıştır. Genetik algoritmada, popülasyon büyüklüğü 500, iterasyon sayısı 2000 olarak belirlenmiştir. Ayrıca 0.8'lik bir çaprazlama oranı uygulanmıştır.



Şekil 4.6. Daldırma soğutma batarya sisteminin basınç ve sıcaklık dağılımı temel tasarım (a,b) ve optimum tasarım (c,d) için 4C ve 0,008 kg/s

4C deşarj oranı ve 0,008 kg/s debide, üç farklı dielektrik sıvı kullanılarak daldırmalı soğutulan 18650 batarya modülüne ait ortalama hücre sıcaklığının zamana bağlı değişimi Şekil 4.7'de sunulmuştur. EF ile soğutulan sistem, ortalama hücre sıcaklığını simülasyon süresi boyunca sürekli olarak en düşük seviyede tutarak en etkili ısıl düzenlemeyi sağlamıştır. Bu performans, EF'nin daha iyi ısıl iletkenlik ve özgül ısı kapasitesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. MO benzer şekilde kararlı bir davranış sergilemiştir. Buna karşılık, NOVEC sıvısı en yüksek sıcaklık profiline sahiptir. Maksimum ortalama hücre sıcaklığı 311 K değerini aşmıştır. Bu eğilim, NOVEC'in nispeten düşük ısıl kapasiteye sahip olduğunu ve aynı akış hızı altında ısıyı uzaklaştırma kabiliyetinin sınırlı olabileceğini göstermiştir. Genel olarak, elde edilen

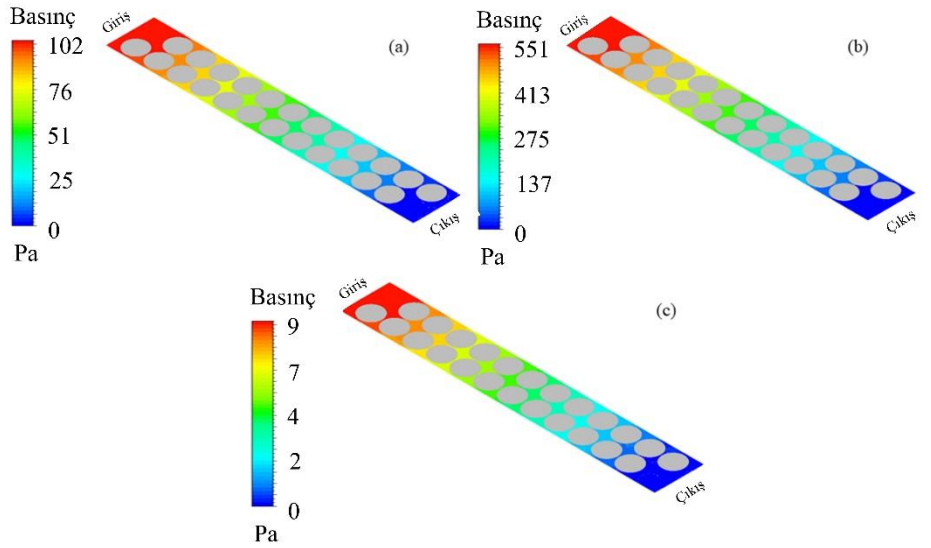
sonuçlar daldırmalı soğutma sistemlerinde sıvı seçiminin kritik önem taşıdığını ortaya koymuştur. Aynı çalışma koşullarında soğutucu özelliklerinin batarya modülünün maksimum sıcaklık seviyesini ve sıcaklık artış hızını doğrudan etkilediğini göstermiştir.



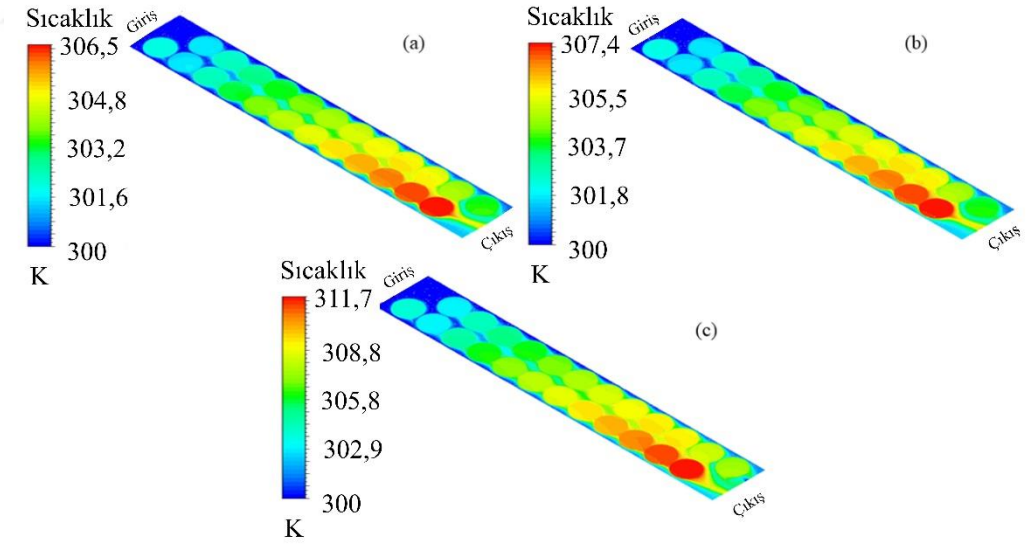
Şekil 4.7. 18650 NMC modül için EF, MO, NOVEC kullanımında ortalama hücre sıcaklık eğrileri

Şekil 4.8'de, 18650 daldırmalı soğutma modülünde EF (a), MO (b) ve NOVEC (c) sıvıları kullanılarak elde edilen basınç dağılımını, 4C deşarj oranı ve 0,008 kg/s debi koşullarında gösterilmiştir. Üç sıvı arasında gözlemlenen belirgin basınç dağılım farklılığı, esas olarak viskozite farkından kaynaklanmaktadır. EF'de maksimum basınç modül girişinde 102 Pa'yı aşarken, Şekil 4.8 (a), MO kullanılan durumda basınç değerleri belirgin şekilde artmakta ve Şekil 4.8 (b)'de görüldüğü üzere yaklaşık 550 Pa değerini aşmaktadır. NOVEC ise yaklaşık 9 Pa ile en düşük basınç düşüşü davranışını sergilemiştir, Şekil 4.8 (c). Şekil 4.9, 4C ve 0,008 kg/s koşullarında üç farklı daldırmalı soğutma sıvısı—EF (a), MO (b) ve NOVEC (c)—kullanılarak soğutulan 18650 batarya modülünün deşarj sonrası sıcaklık dağılımını göstermektedir. EF, yaklaşık 300 K ile 306.5 K arasında dar bir aralıkta kalan sıcaklık değerleriyle en homojen soğutma performansını göstermiştir. MO, kullanımında maksimum sıcaklık yaklaşık 307.4 K'ye kadar çıkmıştır. NOVEC ise 311 K'yi aşan maksimum sıcaklıklarla daha kötü bir performans sergilemiştir. EF daha dengeli bir ısıl kontrol sunduğundan, homojen ısı

uzaklaştırımı gerektiren yüksek deşarjlı uygulamalar için daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmıştır.



Şekil 4.8. 18650 NMC modül için EF (a), MO (b) , NOVEC (c) kullanımında basınç dağılımları.



Şekil 4.9. 18650 NMC modül için EF (a), MO (b), NOVEC (c) kullanımında sıcaklık dağılımları.

Çizelge 3.1'de normalizasyon işlemi yapılırken minimum sıcaklık değeri 300 K minimum basınç değeri ise 0 Pa alınmıştır. Maksimum değerler ise soğutuculardan elde

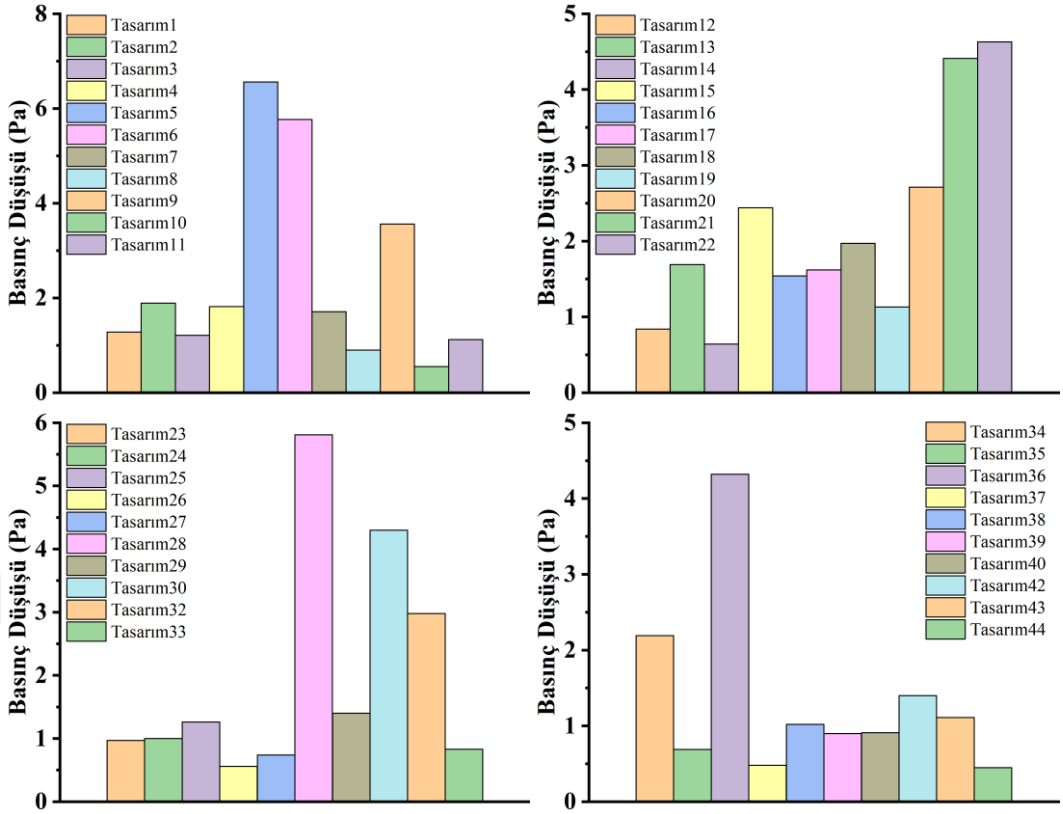
edilen maksimum sonuç olarak alınmıştır. Normalizasyon değerlerinin toplamına göre bir minimizasyon yapıldığında en iyi modül performansı EF soğutucusu kullanımıda elde edilmiştir.

Çizelge 3.1. EF, MO ve NOVEC'in 18650 NMC modül performansına etkisi

	Akışkanlar			**Normalizasyon**		
	EF	**MO**	**NOVEC**	**EF**	**MO**	**NOVEC**
Basınç Düşüşü (Pa)	103,92	561,89	9,22	0,185	1	0.016
Deşarj Sonrası Ortalama Hücre Sıcaklığı (K)	303,87	304,42	307,26	0,533	0,609	1
Normalize Değerlerin Toplamı	-	-	-	0,718	1,609	1,016

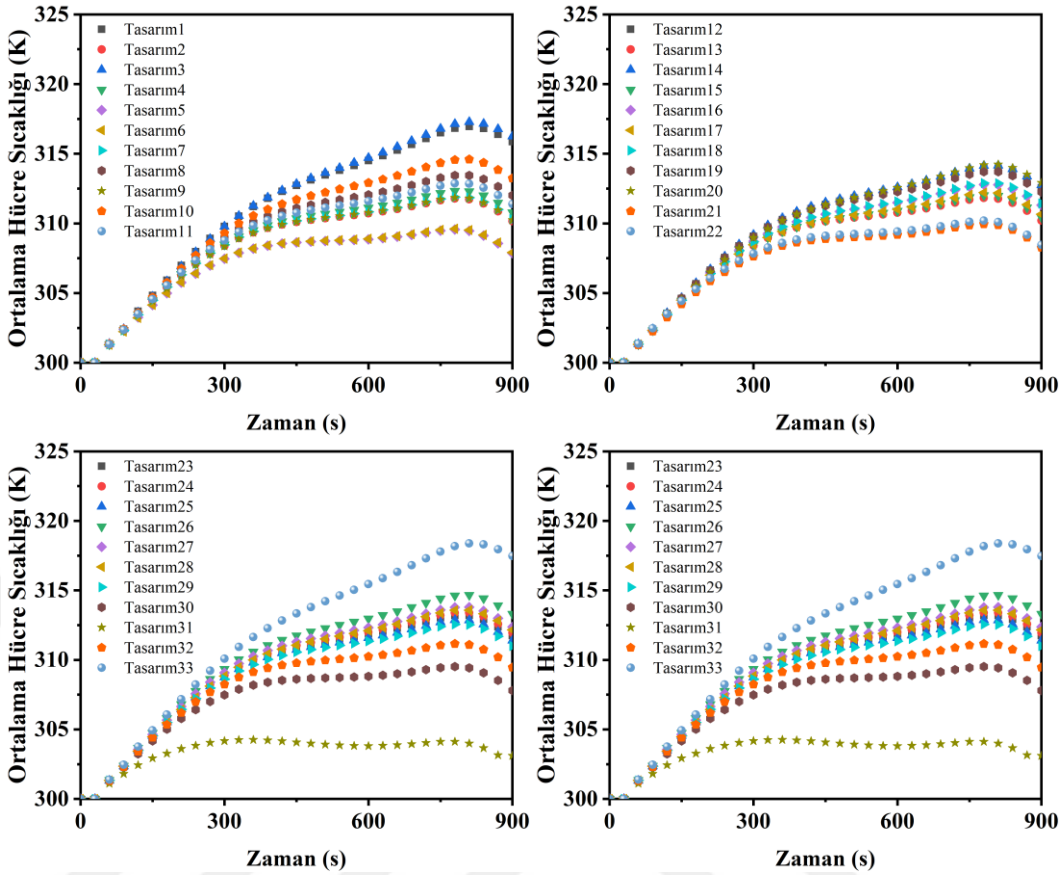
4.2. 32700 LFP Modül Optimizasyonu

32700 LFP hücrelerinden oluşan batarya modülünün optimizasyonu, 4C ve 0.008 kg/s için ısıl ve akış performansı analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon çalışması uygulanarak, ortalama hücre sıcaklığının düşürülmesi ve basınç düşüşünün en aza indirilmesi amaçlanmıştır. 32700 batarya modülüne ait farklı tasarımlar için elde edilen basınç düşüşü değerleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. 18650 modülüne kıyasla, tüm tasarım senaryoları belirgin şekilde daha düşük basınç düşüşü sergilemiştir. Bu değerler çoğunlukla 5 Pa'nın altında kalmıştır. Genel olarak düşük basınç aralığına rağmen, tasarımlar arasında dikkat çekici farklılıklar gözlemlenmiştir. Tasarım5, Tasarım6 ve Tasarım28 sırasıyla 6,56, 5,77 ve 5,81 Pa ile diğer tasarımlara göre daha yüksek basınç düşüşüne sahiptir. Ayrıca grafiklerin okunabilirliğini artırmak için en yüksek basınç dağılımını gösteren Tasarım31 (temel tasarım-260,51) ve Tasarım41 (180,45 Pa) grafiklere eklenmemiştir. Öte yandan, çoğu tasarımın 2 Pa'nın altında kalan basınç düşüşleri ile verimli olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan tasarım uzayının etkinliği farklı basınç dağılımı sağlayan tasarımlarla gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Farklı tasarımlarda 32700 LFP modül için basınç düşüşü

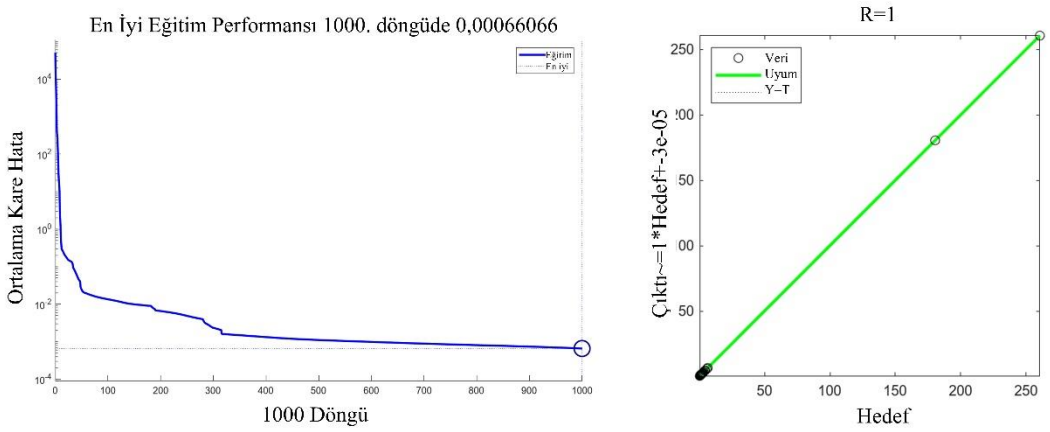
32700 batarya modülü tasarımlarına bağlı ortalama hücre sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Deşarj sonrası ortalama hücre sıcaklığı büyük çoğunlukla 305 K ile 320 K arasında kalmıştır. 18650 NMC'ye kıyasla, 32700 LFP daha yüksek sıcaklık artışı sergilemiştir. Bu durum daha çok ısı üretimiyle açıklanabilir. Tasarım38 ve Tasarım40 sıcaklık artışının daha belirgin olduğu ve ortalama nihai sıcaklıkların sırasıyla 317,64 ve 318,92 K'ye ulaştığı belirlenmiştir. Buna karşılık, bazı tasarımlar için bu değer 310 K'nin altında kalmıştır. Elde edilen bulgular, 32700 modülünün farklı geometrik düzenlemeler altında geniş bir ısıl performans aralığı sunduğunu ortaya koymuştur. Aynı zamanda ısı uzaklaştırma verimliliğini artıran veya sınırlayan tasarımlar gösterilmiştir.



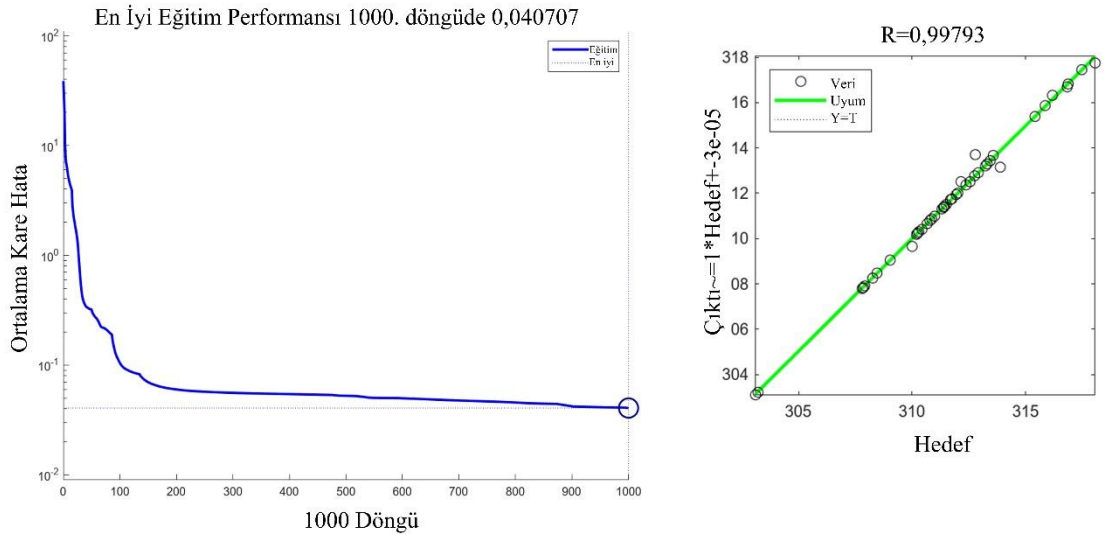
Şekil 4.11. Farklı tasarımlarda 32700 LFP modül için ortalama hücre sıcaklığı.

Şekil 4.12'de sunulan 32700 modül için basınç düşüşü YSA modelinin MSE ve R eğrileri eğrileri modelin başarısını göstermektedir. YSA modelin performansı, eğitim ilerledikçe belirgin şekilde iyileşmekte ve 1000. döngü sonunda minimum hata değeri-MSE olan yaklaşık 0.0006'ya ulaşılmıştır. Eğri üzerindeki doğrusal uyumun eğiminin yaklaşık olarak 1 ve kesişim noktasının sıfıra yakın olması, tahminlerin yüksek doğrulukla yapıldığını ortaya koymuştur.

Şekil 4.13'te, YSA modelinin deşarj sonrası ortalama sıcaklık için eğitim sürecindeki hata eğilimi sunulmuştur. MSE değeri, öğrenme ilerledikçe düzenli olarak azalarak 1000. döngü sonunda yaklaşık 0.0407 seviyesine ulaşmıştır. Modelin tahmin ettiği çıktı değerleri ile gerçek hedef değerler arasındaki ilişki R eğrisi ile sunulmuştur. R=0.99793, modelin yüksek doğrulukla genellenebilir çıktılar ürettiğini göstermiştir.



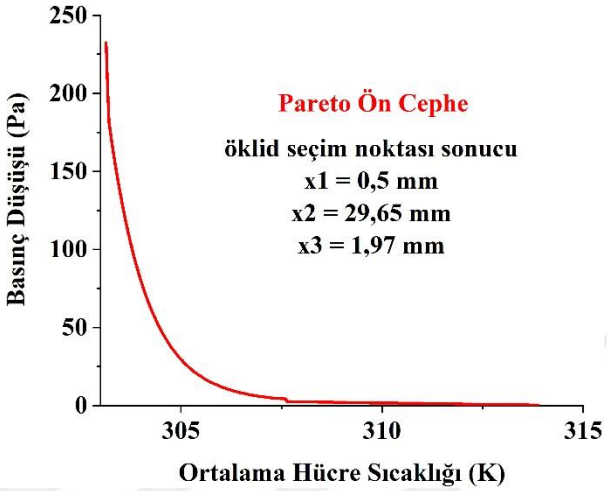
Şekil 4.12. 32700 modül için basınç düşüşü YSA modelinin ortalama kare hata ve R eğrileri.



Şekil 4.13. 32700 modül için ortalama hücre sıcaklığı YSA modelinin ortalama kare hata ve R eğrileri

Şekil 4.14'te, Pareto ön cephesini sunmaktadır. Ortalama sıcaklık 306 K'nin altına düştükçe basınç düşüşünde önemli bir artış olduğunu göstermiştir. Bu durum, yüksek ısıl performans getiren tasarımların daha fazla basınç düşüşüne sebep olduğunu göstermiştir. 32700 tasarımı için Pareto eğrisinin eğimi makul düzeyde soğutmanın, yüksek basınç düşüşü oluşmadan sağlanabileceği geniş bir tasarım aralığı bulunduğunu göstermiştir. Yaklaşık 310 K'nin üzerindeki bölgelerde ise basınç düşüşü elde edilen iyileşmelerin sınırlı kalması, ısıl performanstan ödün verilmesinin artık anlamlı bir

kazanç sağlamadığını göstermiştir. Eğri üzerinde Öklidyen mesafe yöntemiyle belirlenen en uygun çözüm, (x_1 = 0.5 mm, x_2 = 29.65 mm, x_3 = 1.97 mm) tasarımına karşılık gelmektedir.

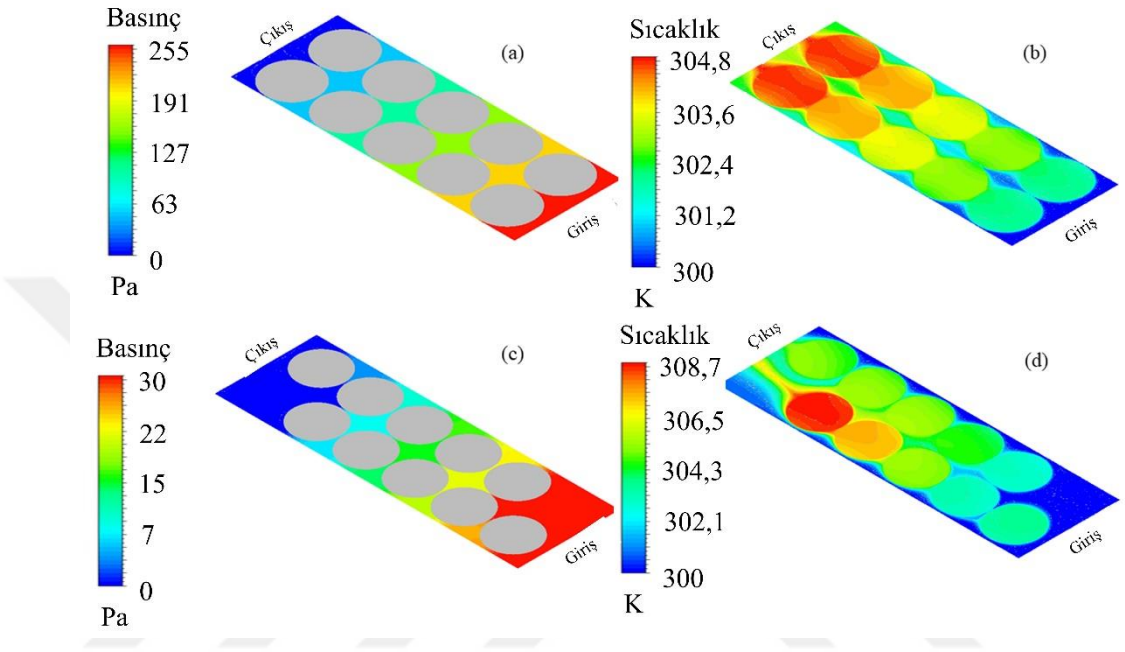


Şekil 4.14. 32700 LFP için pareto ön cephe

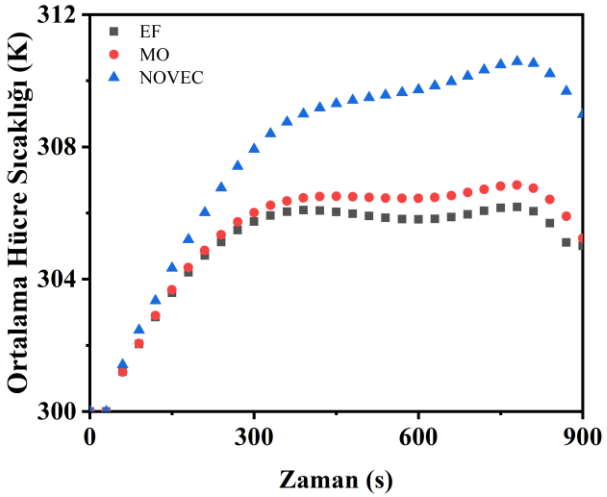
Şekil 4.15'te, 4C ve 0.008 kg/s altında daldırmalı soğutulan 32700 batarya modülünün basınç ve sıcaklık dağılımlarını, temel tasarım Şekil 4.15'(a, b) ve optimize edilmiş tasarım Şekil 4.15 (c, d)'de için karşılaştırılmıştır. Temel tasarımda, girişte basınç değeri 255 Pa değerini aşmıştır. Sıcaklık dağılımı ise, özellikle çıkışta 304 K'yi aşmıştır. Buna karşılık, optimize edilen tasarımda akış performansı belirgin şekilde iyileşmiştir. Maksimum basınç yaklaşık 30 Pa'ye düşmüş, bu akış geçişlerinin daha düzgün ve dirençlerin azaltıldığını göstermiştir. Ancak optimize edilmiş tasarımda sıcaklık değerleri temel tasarıma göre nispeten artış göstermiştir. 32700 LFP için genetik algoritma ayarları 18650 modüldekine benzer şekilde uygunlanmıştır.

4C ve 0,008 kg/s koşullarında, EF, MO ve NOVEC ile soğutulan modülün ortalama hücre sıcaklığının değişimi Şekil 4.16'da gösterilmiştir. EF sıvısı ortalama sıcaklığı en düşük ve en kararlı sağlamıştır. Hızlı plato eğilimi, EF'nin yüksek ısıl iletkenliği ile iyi ısı absorbe ettiğini göstermiştir. MO sıvısı ise yaklaşık EF'ye benzer bir ısıl performans sergilemiştir. Buna karşılık, NOVEC sıvısı en yüksek ortalama sıcaklık değerini sunmuştur ve maksimum ortalama sıcaklık 310 K'nin üzerine çıkmıştır. Bu durum

özellikle enerji yoğunluğu yüksek olan 32700 gibi büyük hücrelerde, ısıl verimliliğinin daha kritik hale geldiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, 32700 ebatlı silindirik hücrelerde tıpkı 18650'de olduğu gibi ısıl güvenlik ve performansın sağlanmasında soğutucu sıvı seçiminin temel bir rol oynadığını doğrulamıştır.

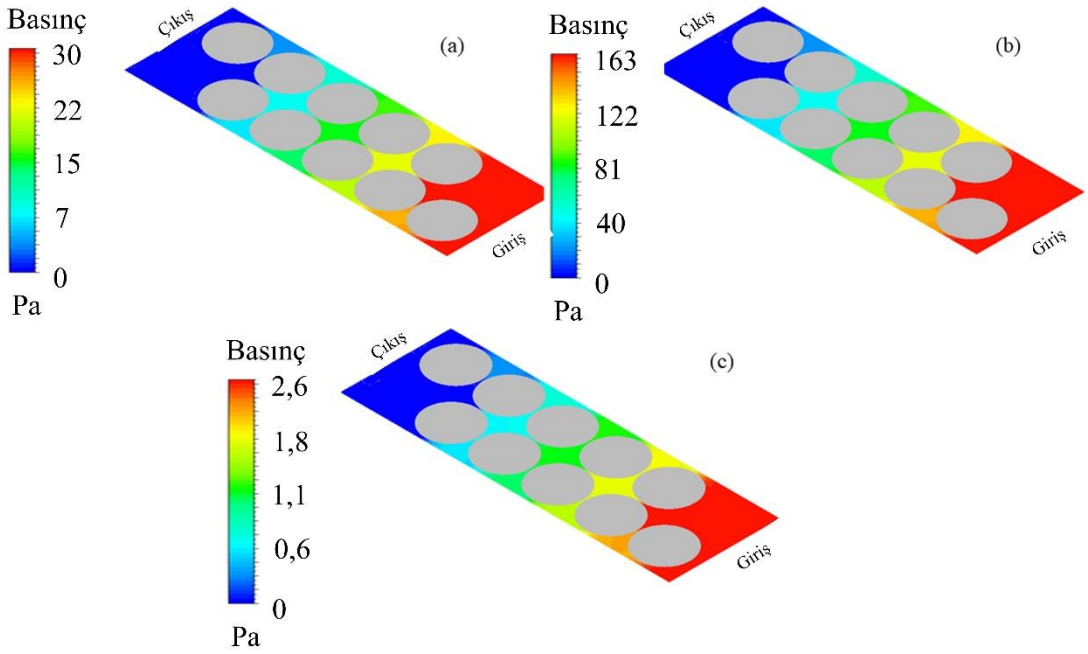


Şekil 4.15. Daldırma soğutma batarya sisteminin basınç ve sıcaklık dağılımı temel tasarım (a,b) ve optimum tasarım (c,d) için 4C ve 0,008 kg/s



Şekil 4.16. 32700 LFP modül için EF, MO, NOVEC kullanımında ortalama hücre sıcaklık eğrileri

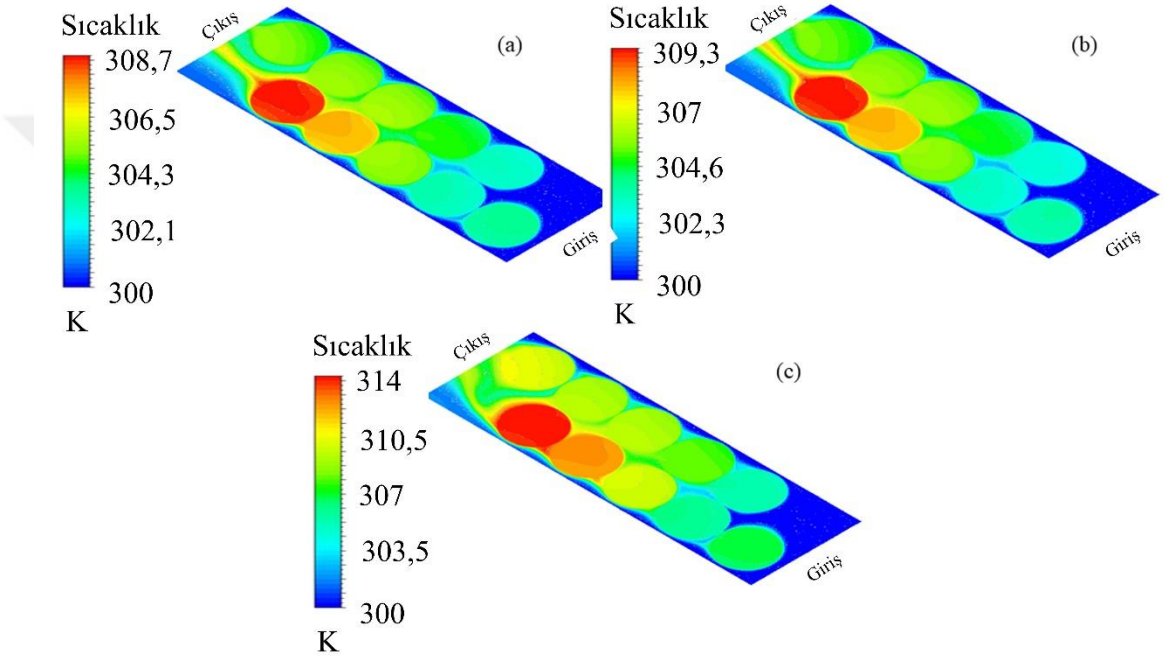
Şekil 4.17'de, 4C ve 0,008 kg/s akış hızı altında EF (a), MO (b) ve NOVEC (c) sıvılarıyla daldırmalı soğutulan 32700 batarya modülündeki basınç dağılımını gösterilmiştir. Aynı tasarıma sahip ve sınır koşulları altında çalışılmasına rağmen, kullanılan sıvıların özelliklerine bağlı olarak akış direncinde belirgin farklılıklar bulunmaktadır. EF akışkanında, maksimum basınç düşüşü yaklaşık 30 Pa seviyesindedir. MO'da ise basınç değerleri belirgin şekilde artarak yaklaşık 165 Pa'ya kadar ulaşmaktadır. Bu, iç dirençlerin daha yüksek olduğunu ve çalışma sırasında daha fazla pompalama gücü gereksinimine yol açağını göstermiştir. Öte yandan, NOVEC en düşük akış direnci göstermiş ve maksimum basınç değeri 3 Pa'nın altında kalmıştır. Bu düşük viskoziteye bağlı olarak minimum sürtünme ve blokajsız akış davranışından kaynaklanmıştır.



Şekil 4.17. 32700 LFP modül için EF, MO, NOVEC kullanımında basınç dağılımları

4C ve 0,008 kg/s koşullarında EF (a), MO (b) ve NOVEC (c) sıvıları ile daldırmalı olarak soğutulan 32700 batarya modülünün deşarj sonrası sıcaklık dağılımı Şekil 4.18'de, gösterilmiştir. EF maksimum hücre sıcaklıklarını 309 K'nin altında tutmuştur. MO benzer bir sıcaklık dağılımı sunmakla birlikte, maksimum sıcaklık değeri 310 K

değerinin altında kalmıştır. NOVEC sıvısıyla elde edilen dağılımda ise daha kritik bir durum ortaya çıkmıştır. Maksimum sıcaklıklar 314 K'nin üzerine çıkmıştır. Bu bulgular, her üç sıvının da daldırmalı soğutma sağlayabildiğini doğrulamıştır. EF'nin yüksek kapasiteli silindirik hücrelerde en homojen ve verimli ısıl performansı sunduğunu ortaya koymuştur. Akış direncini azaltma açısından NOVEC kullanımı avantaj sunsada yüksek deşarj koşullarında ısıl sınırlamalar getirebilecek bir risk faktörü oluşturmaktadır.



Şekil 4.18. 32700 LFP modül için EF, MO, NOVEC kullanımında sıcaklık dağılımları

Çizelge 3.2'de normalizasyon işlemi yapılırken 18650 ile yapılan işlemlere benzer olarak minimum sıcaklık değeri 300 K minimum basınç değeri ise 0 Pa alınmıştır. Maksimum değerler ise soğutuculardan elde edilen maksimum sonuç olarak alınmıştır. Normalizasyon değerlerinin toplamına göre bir minimizasyon yapıldığında en iyi modül performansı EF soğutucusu kullanımında elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. EF, MO ve NOVEC'in 32700 LFP modül performansına etkisi

	Akışkanlar			Normalizasyon		
	EF	**MO**	**NOVEC**	**EF**	**MO**	**NOVEC**
Basınç Düşüşü (Pa)	30,44	165,79	2,66	0,184	1	0,016
Deşarj Sonrası Ortalama Hücre Sıcaklığı (K)	305,01	305,23	308,98	0,558	0,582	1
Normalize Değerlerin Toplamı	-	-	-	0,742	1,582	1,016

4.3. 32700 LFP ve 18650 NMC Optimum Modüllerinin Aynı Güç Değerinde Karşılaştırması

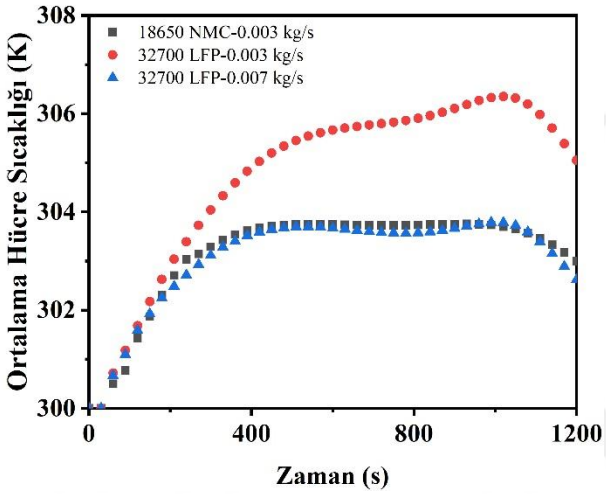
Bu bölümde, modülde aynı güç ve enerji kullanım durumunda 18650 NMC ve 32700 LFP modüllerinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmanın anlamlı olmasını sağlamak amacıyla her iki modül eşit süre boyunca aynı güç seviyesinde deşarj edilmiştir. Çizelge 3.3'te kullanılan hesaplamalar sunulmuştur. 32700 LFP modülü 0.003 ve 0.007 kg/s olmak üzere iki farklı debide incelenirken, 18650 NMC modülü 0.003 kg/s debide simüle edilmiştir.

Çizelge 3.3. Karşılaştırma için kullanılan değerler

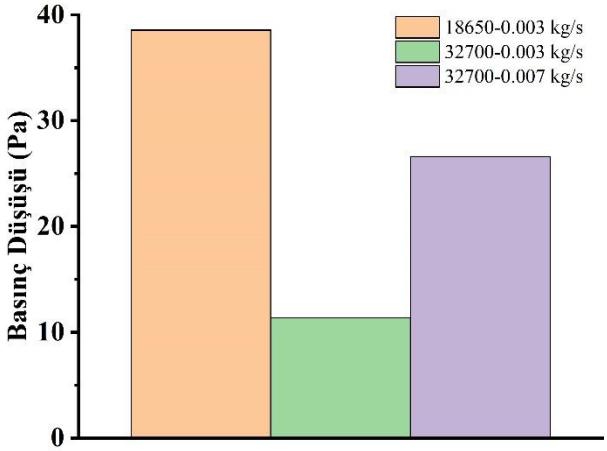
Özellik	**18650 NMC Modülü**	**32700 LFP Modülü**
Toplam Voltaj (V)	88,8	32
Enerji Kapasitesi (Wh)	222 Wh	192 Wh
Uygulanan C oranı	2,595	3
Akım (A)	2,5 x 2,595 = 6,4875 A	6 x 3 = 18 A
Güç (W)	88,8 x 6,4875 ≈576 W	576
Süre (s)	1200	1200
Enerji Tüketimi (Wh)	(576 x 1200) / 3600=192 Wh	(576 x 1200) / 3600=192 Wh

Şekil 4.19, optimize edilmiş 18650 NMC ve 32700 LFP batarya modüllerine ait ortalama hücre sıcaklığının zamanla değişimini göstermektedir. 0,0008 kg/s'de 1.6C oranında deşarj edilen 18650 NMC modülü, 32700 LFP'ye göre daha düşük ortalama hücre sıcaklığı sergilemiştir. 32700 LFP için akış hızının 0.0015 kg/s'ye çıkarılmasıyla birlikte, deşarj sonrası ortalama hücre sıcaklığı 18650 NMC'ye göre daha düşük kalmıştır.

Şekil 4.20, optimize edilmiş 18650 NMC ve 32700 LFP batarya modüllerinin akış performansını göstermektedir. 18650 NMC modülü, 0,003 kg/s debide en yüksek basınç düşüşünü sergilemiştir. Buna karşılık, 32700 LFP modülü belirgin şekilde daha iyi bir akış davranışı sergilemiştir. Aynı 0.003 kg/s'de hatta debinin 0.007 kg/s'ye yükseltilmesi durumunda bile basınç düşüşü çok daha düşüktür. Bu sonuçlar, 32700 LFP modülünün düşük akış hızlarında daha düşük akış direnci sağladığını ve debideki artışlara karşı daha dengeli olduğunu göstermiştir.

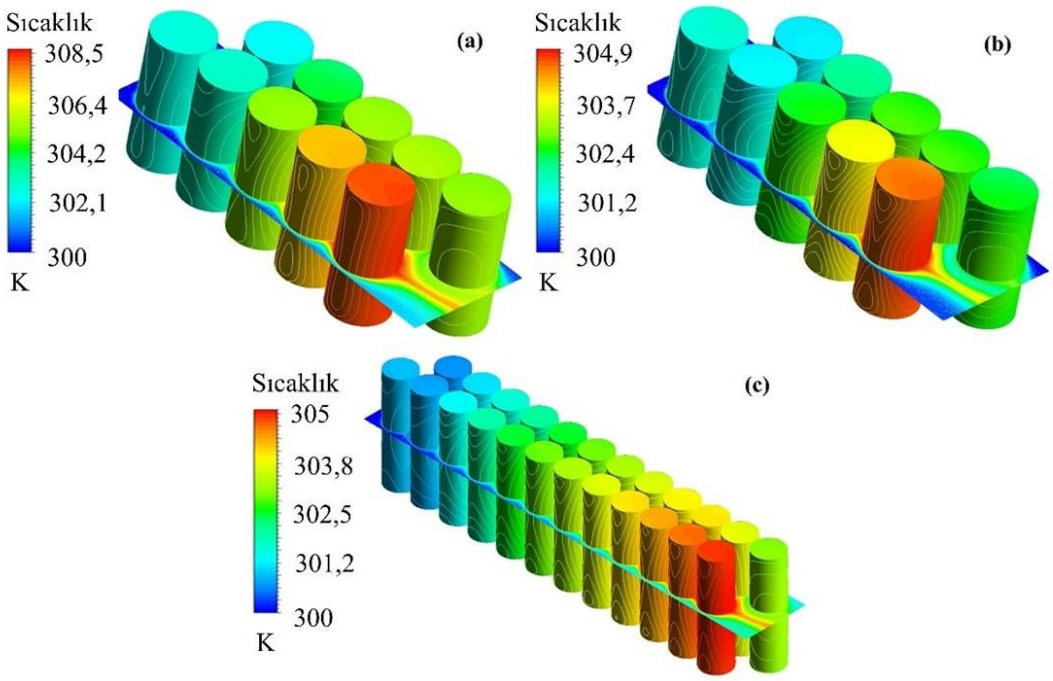


Şekil 4.19. 32700 LFP ve 18650 NMC modüllerinin ortalama hücre sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.20. 32700 LFP ve 18650 NMC modüllerinin basınç düşüşü değerlerinin karşılaştırılması

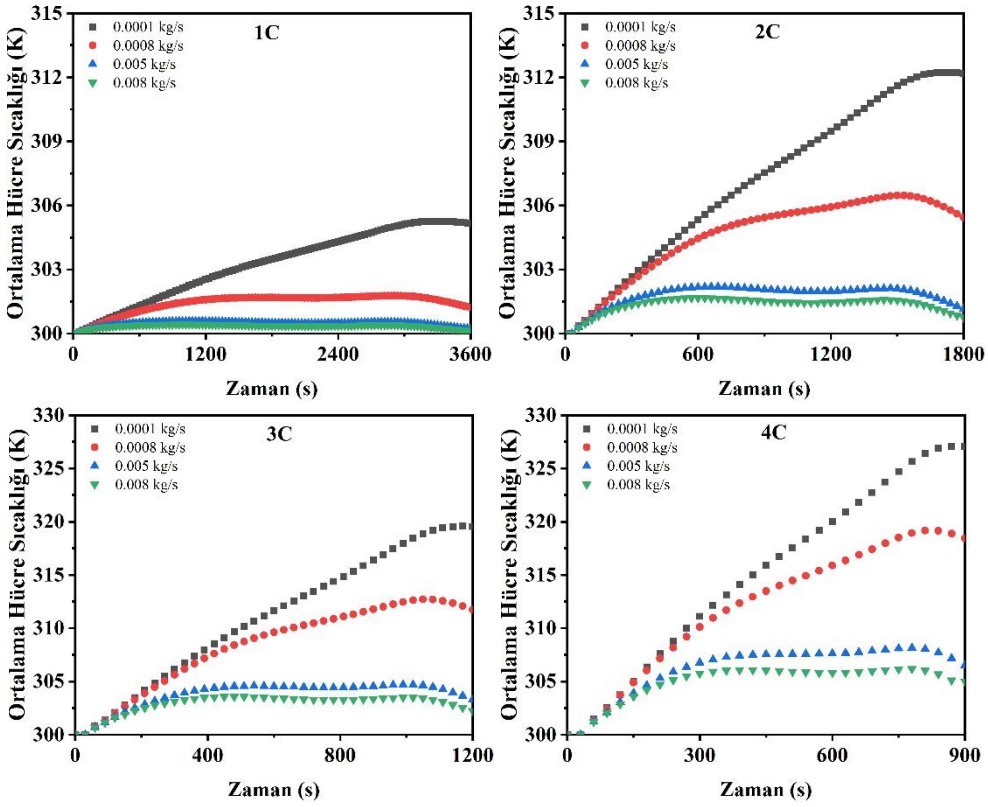
Şekil 4.21, optimum batarya modüllerinin deşarj sonrası sıcaklık dağılımını gösterilmiştir. Şekil 4.21 (a) ve (b), 3C'de 32700 LFP 0,003 kg/s ile 0,007 kg/s debilerinde elde edilen sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Buna karşılık, şekil (c)'de 1.6C deşarj oranında ve 0,0008 kg/s akış hızında çalışan 18650 NMC modülünün sıcaklık dağılımı sunulmuştur. 3C ve 0,003 kg/s koşullarında 32700 LFP modülünün deşarj sonrası ortalama sıcaklığı 305,05 K, maksimum ve minimum hücreler arasındaki sıcaklık farkı 5,95 K'dir. Bu değerler 0,007 kg/s için 302,76 K ve 3,42 K'dir. 2,595C ve 0,003 kg/s koşullarında 18650 NMC modülü için bu değerler 302,99 ve 4,35 K'dir. Bu sonuçlar 3C ve 0,007 kg/s koşullarında 32700 LFP modülünün hem termal hemde akış performansı 2,595C ve 0,003 kg/s koşullarındaki 18650 NMC modülünden daha iyidir.



Şekil 4.21. 32700 LFP 3C ve 0,003 kg/s (a), 32700 LFP 3C ve 0,007 kg/s (b) ve 18650 NMC 2,595C ve 0,003 kg/s (c) için sıcaklık dağılımları

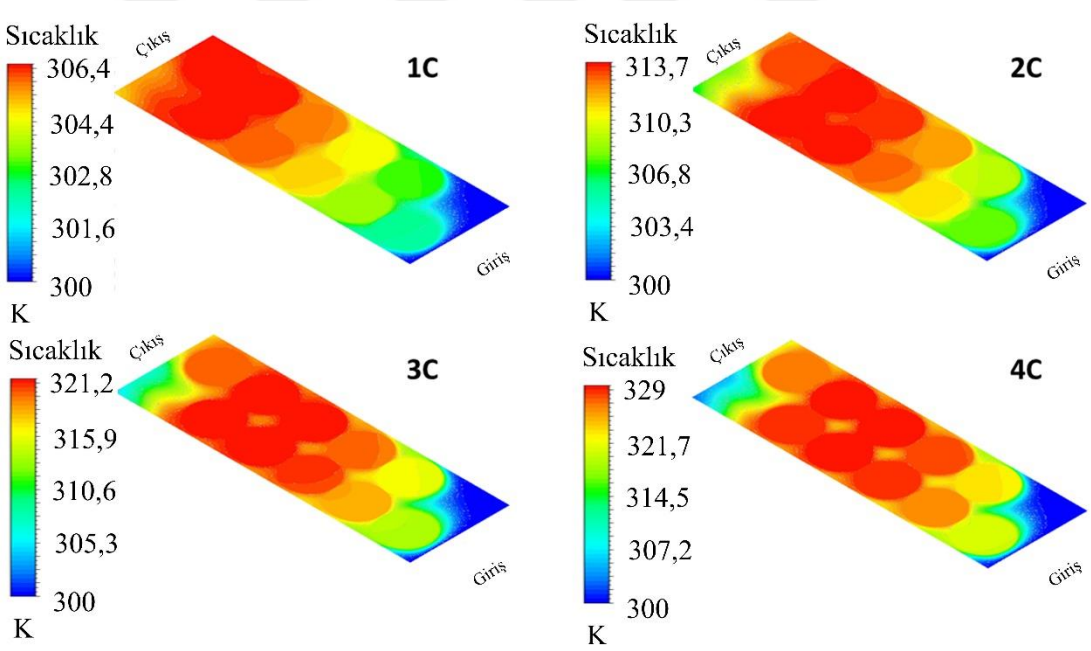
4.4. Farklı Deşarj Oranı ve Kütlesel Debilerde

32700 LFP modülün, 18650 NMC modülüne kıyasla verimli olmasından dolayı, 1C, 2C, 3C ve 4C deşarj oranları ile 0.0001, 0.0008, 0.005 ve 0.008 kg/s debilerinde detaylı bir değerlendirme 32700 LFP için gerçekleştirilmiştir. Bu parametrik çalışma ile, 32700 LFP modülünün ısıl ve akış performansı değerlendirilmiştir. 32700 batarya modülünün ortalama hücre sıcaklığındaki değişimi, farklı deşarj oranları (1C–4C) ve (0,0001–0,008 kg/s) altında Şekil 4.22'de sunulmuştur. 1C koşulunda, sıcaklık artışı tüm akış hızlarında sınırlı kalmıştır. 0,008 kg/s akış hızında sıcaklık deşarj süresi boyunca 301 K'nin altında tutulmuştur. En düşük akış hızı olan 0,0001 kg/s dahi 306 K'nin altında tutarak düşük deşarj oranında yeterli ısı absorbsiyonu sağlanmıştır. Deşarj oranı 2C ve 3C'ye yükseldikçe termal yük belirgin şekilde artmış ve farklı akış hızları arasındaki sıcaklık farkları daha belirgin hale gelmiştir. En zorlu koşul olan 4C deşarj durumunda, soğutucu akışkan debisi kritik öneme ulaşmıştır. 0,0001 kg/s akış hızında sıcaklık 327 K'yi aşmıştır. 0,008 kg/s debide ise 307 K'nin altında kalmıştır.



Şekil 4.22. 32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve debilerdeki ortalama hücre sıcaklıkları

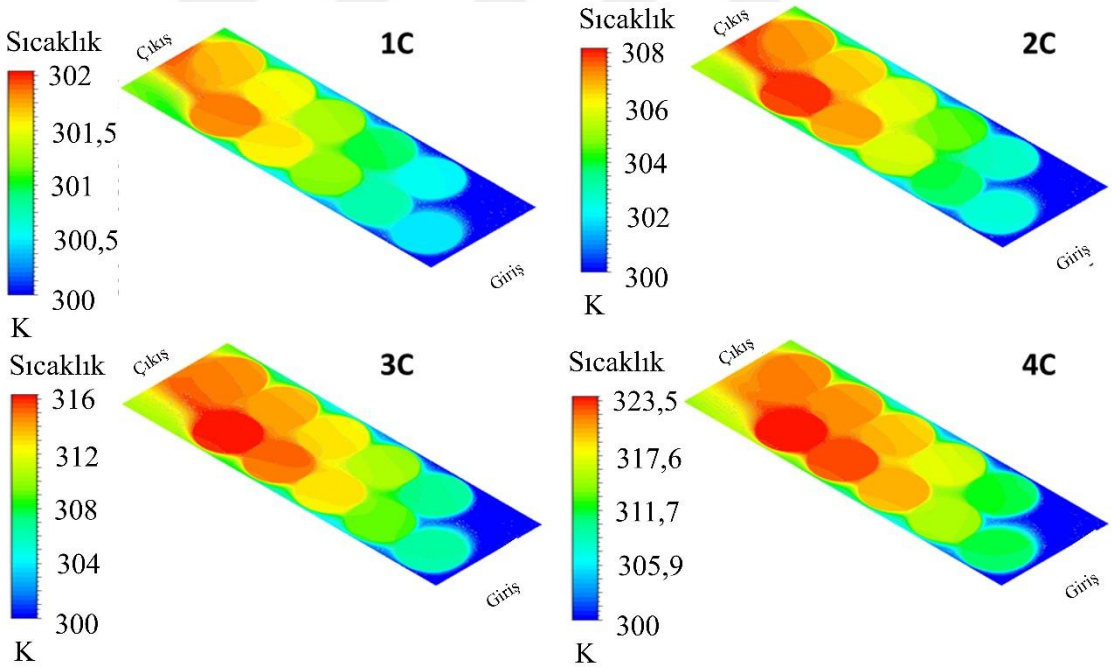
Şekil 4.23, 0,0001 kg/s'de, 32700 batarya modülünün dört farklı deşarj oranı—1C, 2C, 3C ve 4C—için sıcaklık dağılımını göstermektedir. Deşarj oranı arttıkça termal yükün artışıyla beraber soğutucu akışkan debisinin yükü karşılamada yetersiz kaldığını açıkça görülmüştür. 1C koşulunda sıcaklık dağılımı nispeten düzgün olup, maksimum değer yaklaşık 307 K civarındadır ve girişten çıkışa doğru yumuşak bir sıcaklık gradyanı gözlemlenmiştir. Ayrıca maksimum ve minimum hücre sıcaklıkları arasındaki fark 3,85 K'dir. Bu sonuçlar 0,0001 kg/s debisinin 1C deşarj oranında kullanımının uygun olduğu göstermiştir. Bu durum, düşük akış hızının düşük deşarj oranında yeterli ısı yönetimi sağladığını göstermiştir. Ancak 2C'de, sıcaklık önemli seviyede artmış ve maksimum sıcaklık 313 K'yi aşmıştır. 3C deşarj oranında sıcaklık daha kritik hale gelmiştir. Sıcaklıklar 321 K'nin üzerine çıkmıştır. 4C koşulunda ise maksimum hücre sıcaklığı 328 K değerini aşmıştır. Bu bulgular, düşük akış hızının, yüksek deşarj oranları altında ciddi ısıl riskler doğurduğunu açıkça göstermiştir.



Şekil 4.23. 32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve 0,0001 kg/s'de sıcaklıklar dağlımları

0,0008 kg/s'de 32700 batarya modülünün 1C-4C için sıcaklık dağılımını göstermektedir, Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Daha düşük akış koşullarına kıyasla bu orta

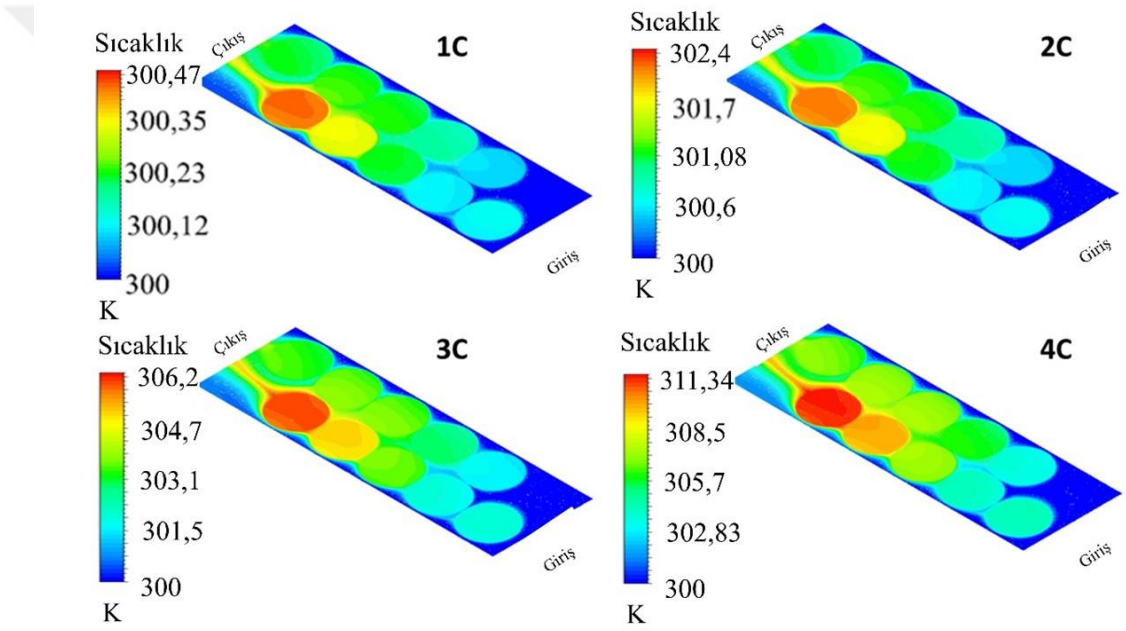
seviyeli soğutma hızı, özellikle düşük ve orta C oranlarında belirgin şekilde iyileştirilmiş bir ısıl performans sağlamıştır. 1C'de maksimum hücre sıcaklığı yaklaşık 302 K ve minimum sıcaklık gradyanlarıyla homojen ve verimli bir soğutma elde edilmiştir. Düşük güç çalışmasında bu debinin fazlasıyla yeterli olduğu gösterilmiştir. 2C'de sıcaklık yaklaşık 308 K'ye ulaşmıştır. Ayrıca maksimum ve minimum hücre sıcaklıkları arasındaki fark 5,38 K'dir. Bu sonuçlar 0,0008 kg/s debisinin 2C deşarj oranında kullanımının uygun olduğunu ancak daha homojen sıcaklık dağılımı için debinin arttıralabileceğini göstermiştir. 3C'de, sıcaklık 315 K'yi aşmıştır. 4C'de sıcaklıktaki homojenlik kaybolmuş, maksimum sıcaklık 323 K değerini aşmıştır. Bu performans 0,0001 kg/s senaryosuna göre daha iyi olsa da, agresif deşarj koşullarının yönetimi için daha yüksek debilere ihtiyaç duyulduğunu açıkça ortaya koymuştur. Genel olarak, 0,0008 kg/s akış hızı 1C ve 2C için güvenilir, 3C ve 4C için ise yetersiz kalmıştır. Yüksek deşarj oranlarında debinin kritik önem taşıdığı gösterilmiştir.



Şekil 4.24. 32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve 0,0008 kg/s'de sıcaklıklar dağılımları

Şekil 4.25'te 0,005 kg/s sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu daha yüksek seviyedeki akış hızının zorlu termal koşullarda tutarlı bir soğutma sağladığını ortaya koymuştur. 1C koşulunda, maksimum sıcaklık yaklaşık 300,5 K düzeyinde

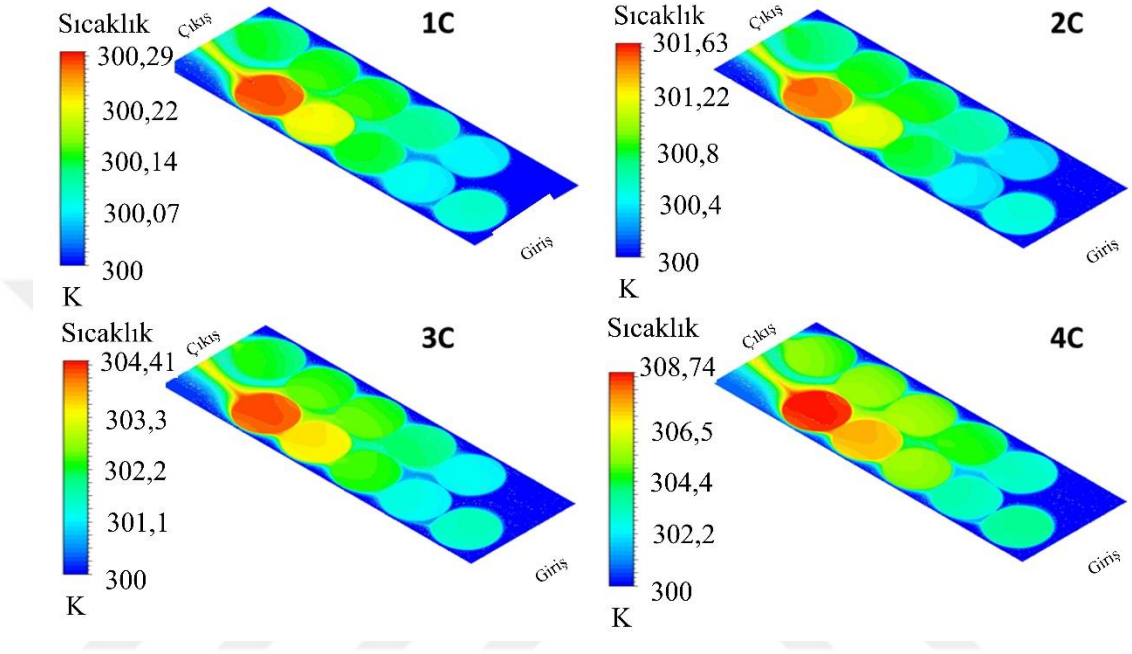
kalmış ve hücreler arasında son derece dar sıcaklık gradyanları görülmüştür. 2C'de, sıcaklık yaklaşık 302,4 K'ye ulaşmıştır, ancak genel sıcaklık dağılımı hâlâ yüksek düzeyde homojen kalmıştır. Bu deşarj oranında maksimum ve minimum hücreler arası sıcaklık farkı 1,72 K'dir. 3C'de, sıcaklık değerleri düzenli biçimde kontrol altında kalmış ve maksimum sıcaklık 307 K değerinin altında kalmış, maksimum ve minimum hücreler arası sıcaklık farkı ise 4,36 K'dir. 4C'de maksimum sıcaklık yaklaşık 311 K değerini aşmıştır. Bu bulgular, 0.005 kg/s akış hızının geniş bir deşarj oranı aralığında güçlü bir soğutma çözümü sunduğunu; sıcaklık artışını etkin şekilde bastırdığını ve sıcaklık dağılımındaki homojenliği korumuştur.



Şekil 4.25. 32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve 0,005 kg/s'de sıcaklıklar dağlımları

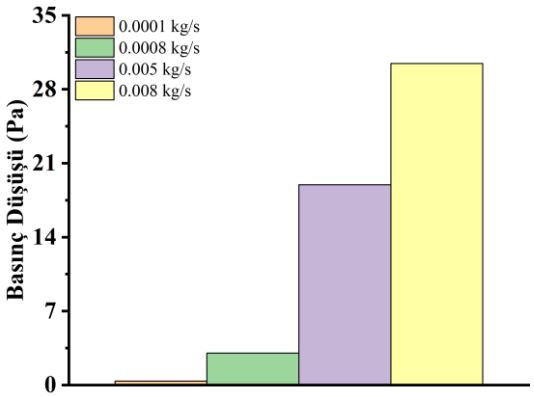
0,008 kg/s debideki sıcaklık dağılımı Şekil 4.26'da gösterilmiştir. 1C'de sıcaklık profili neredeyse tamamen homojen olup, değerler maksimum 300.3 K seviyesine çıkmıştır. 2C'de modül içinde maksimum sıcaklık 302 K'ye yaklaşmıştır. 3C'de sıcaklık 304.4 K'yi aşmıştır ve hücrelerin sıcaklığı kritik eşiğin altında tutulmuştur. Bu yüksek güç çekimi altında dahi ısının etkili şekilde soğutucu tarafından absorbe edildiğini göstermiştir. Böylece soğutma verimliliğinin sürdürüldüğünü göstermiştir. En agresif deşarj olan 4C'de maksimum hücre sıcaklığı 309 K'nin altında kalmıştır. Bu 0,008 kg/s debinin modülün güvenliğini koruduğunu ortaya koymuştur. Maksimum ve minimum

hücreler arası sıcaklık farkı ise 5,86 K'dir. Bu değer 0,01 kg/s debi değerinde 4,73 K'dir. 0,008 kg/s akışkan debisinde aşırı sıcaklık gradyanlarını engellediğini göstererek bu debiyi, uzun ömür ve operasyonel güvenlik gerektiren yüksek performanslı uygulamalar için ideal olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.26. 32700 LFP'nün farklı deşarj oranı ve 0,008 kg/s'de sıcaklıklar dağlımları

Şekil 4.27, dört farklı soğutucu kütle akış hızında (0.0001 ila 0.008 kg/s) gözlemlenen basınç düşüşü değerlerini göstermektedir. Beklendiği üzere, artan debiye bağlı olarak basınç düşüşünde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. En düşük akış hızı olan 0.0001 kg/s seviyesinde basınç düşüşü 0,37 Pa'dır. Sıvı dolaşımı için gereken enerji talebinin düşük olduğunu göstermektedir. Akış hızı 0.0008 kg/s seviyesine çıkarıldığında basınç düşüşü yaklaşık 3,02 Pa seviyesine ulaşmıştır. 0.005 kg/s'ye ulaşıldığında ise basınç düşüşü 18,96 Pa'ye sistemin gerekli pompalama gücü ihtiyacının önemli düzeyde arttığını göstermiştir. En yüksek debi olan 0,008 kg/s'de ise basınç düşüşü 30,44 Pa seviyesine ulaşmıştır. 0,008 kg/s'de ısıl performans artışına rağmen pompalama gücü ihtiyacının belirgin şekilde arttığı belirlenmiştir. Bu bulgular, ısıl verimlilik ile sistem düzeyinde enerji tüketimi arasında denge kurularak debinin belirlenmesinde dikkatli olunması gerektiğini vurgulamıştır.



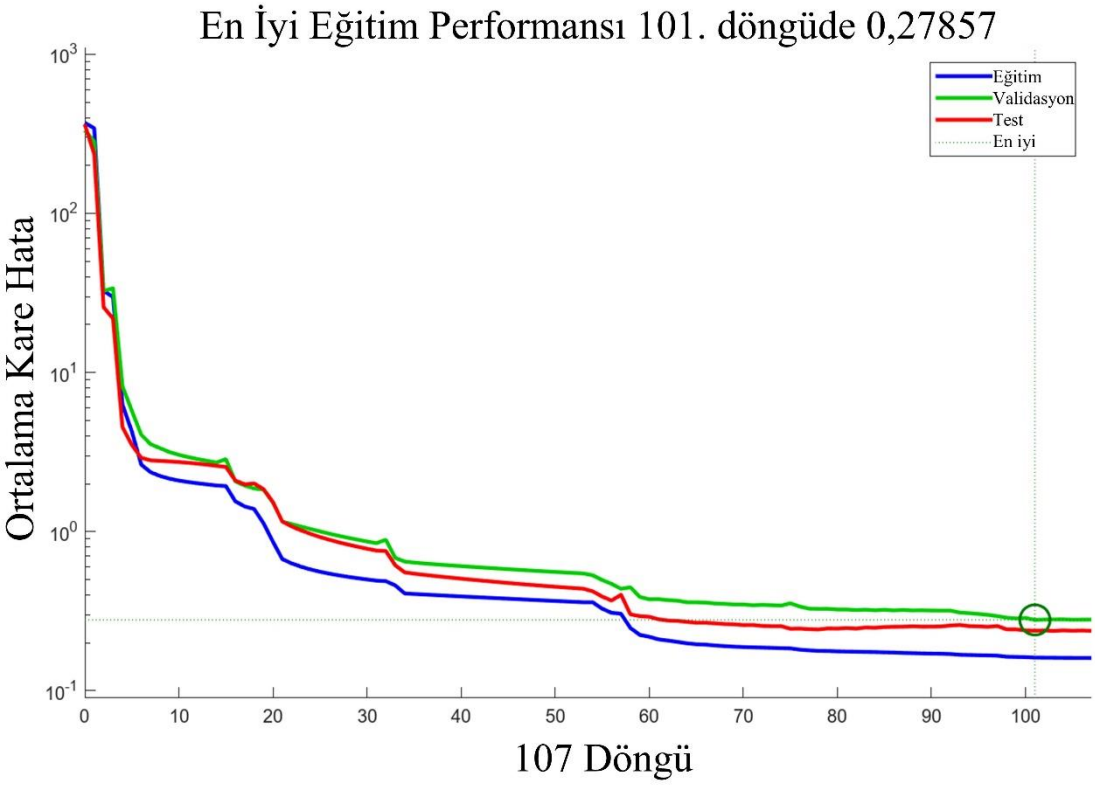
Şekil 4.27. 32700 LFP için 0.0001-0.008 kg/s basınç düşüşü değerleri

4.5. YSA ile Sıcaklık Tahmini

Daldırmalı soğutmalı LİBS'de, YSA hücre sıcaklığını farklı çalışma koşulları altında hızlı ve verimli bir şekilde tahmin etmek için kullanılmıştır. HAD analizleri hesaplama maliyetine ihtiyaç duymasına karşın, YSA modelleri eğitildikten sonra sıcaklık tahmini yapabilmiştir. YSA'lar, deşarj oranı ve akış hızı gibi giriş parametreleri ile ortalama hücre sıcaklıkları arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri öğrenerek, karmaşık ve zamana bağlı koşullarda uygun doğrulukla tahmin yapabilmiştir.

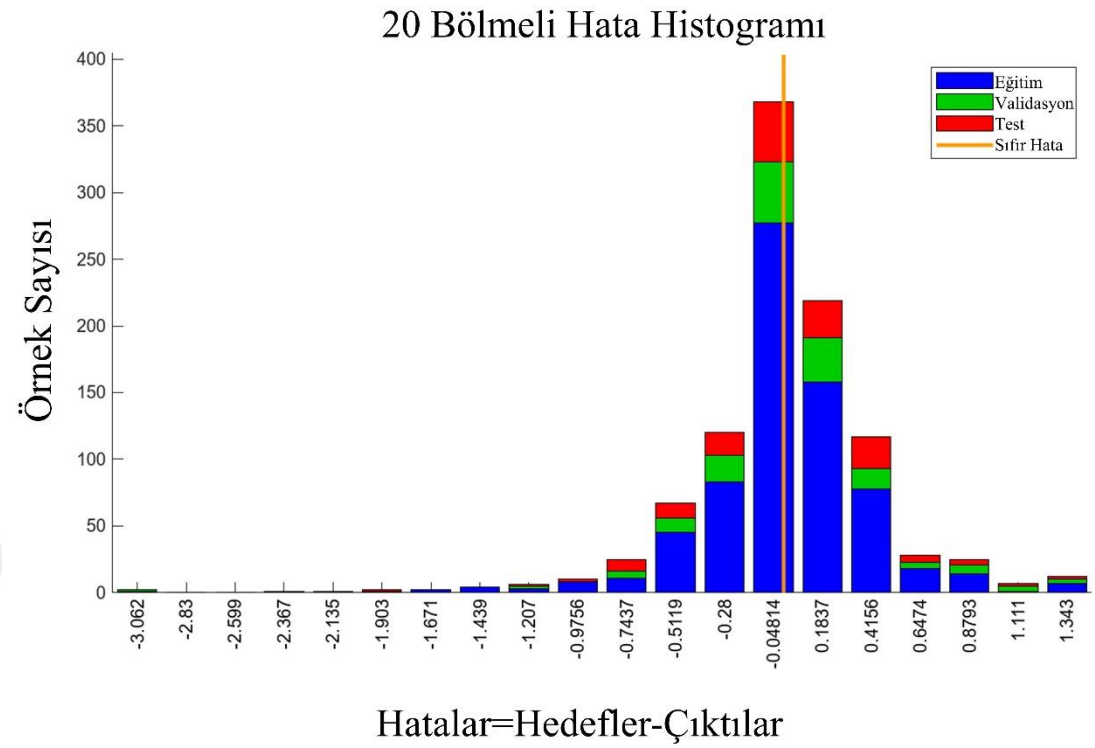
YSA modelinin 107 döngü boyunca eğitim, doğrulama ve MSE profilleri Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Modelin en iyi doğrulama performansının 101. döngüde 0.27857 MSE değeriyle elde edildiği vurgulanmıştır. Başlangıç döngülerinde eğitim, doğrulama ve test eğrilerinin tamamı hızlı bir düşüş sergilemiştir. Eğitimin ilerleyen aşamalarında MSE değerleri daha yavaş şekilde azalmaya devam etmiş, ve yaklaşık 60. döngü sonrasında doğrulama ve test eğrileri yataylaşırken, eğitim eğrisi hafif düşüşünü sürdürmüştür. Doğrulama eğrisinin en düşük noktası olan 101. döngü, en uygun model durumunu temsil etmiştir. Bu noktadan sonra doğrulama performansında anlamlı bir iyileşme görülmediği için eğitim, sona erdirilmiş ve modelin genelleyebilirliği korunmuştur. Grafik, YSA modelinin başarılı bir yakınsama sağladığını ve doğrulama ile test hatalarının düşük ve birbirine yakın değerlere ulaştığını ortaya koyarak aşırı öğrenmenin göstermiştir. Belirlenen en iyi döngü, modelin düzgün biçimde

düzenlendiğini ve farklı durum senaryolarında ortalama hücre sıcaklıklarını güvenilir şekilde tahmin edebileceği bir yapı kazandığını göstermiştir.



Şekil 4.28. Ortalama kare hatası için en iyi performans doğrulaması

Ortalama hücre sıcaklığını tahmin etmek üzere kullanılan YSA modeline ait hata histogramı 4.29'da sunulmuştur. Histogram, hedef ve çıktı değerleri arasındaki farkların, yani tahmin hatalarının dağılımını; eğitim, doğrulama ve test verisetleri için 20 sınıfa ayrılarak sunmaktadır. Hataların sıfıra yakın değerler etrafında yoğunlaşması, modelin tüm veri alt kümelerinde tutarlı performans sergilediğini ve sistematik bir aşırı ya da az tahmin eğilimi olmadığını doğrulamıştır. ±1 K'yi aşan hatalar yalnızca az sayıda örnekte görülmüştür. Sonuç olarak bu hata histogramı, YSA modeli ortalama hücre sıcaklığı tahmininde yüksek doğruluk sağlandığını göstermiştir. Böylece, batarya sistem uygulamalarında güvenilir sıcaklık tahminleri yapılabilceği anlaşılmıştır.

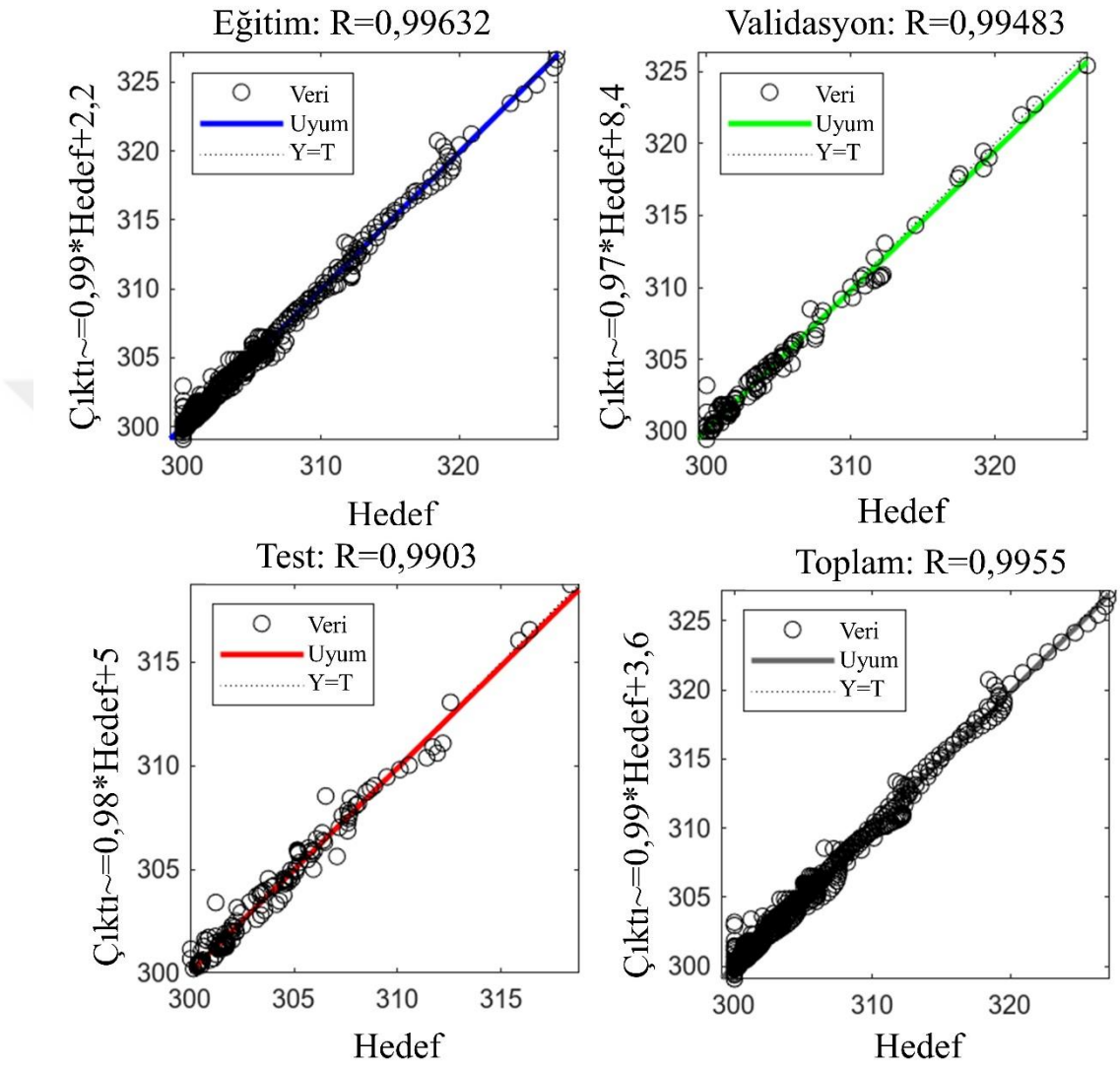


Şekil 4.29. Hata histogramı

Şekil 4.30, batarya modülündeki hücrelerin ortalama sıcaklığını tahmin etmek amacıyla geliştirilen YSA modeline ait regresyon (R-değeri) grafiklerini göstermektedir. Sonuçlar, eğitim, doğrulama ve test veri kümeleri için ayrı ayrı ve tüm veri setinin birleşik performansı ile birlikte sunulmuştur. Eğitim aşamasında, model 0.99632 R-değeri elde etmiş olup, tahmin edilen ve gerçek sıcaklık değerleri arasında neredeyse mükemmel bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Doğrulama verisi için elde edilen 0.99483'lük R-değeri, modelin görülmemiş veriler üzerinde yüksek genelleme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir. Test verisinde ise R-değeri 0.9903 olarak kaydedilmiştir. Eğitim ve doğrulama sonuçlarına göre biraz daha düşük olmasına rağmen, modelin yüksek tahmin doğruluğunu sürdürdüğü gözlemlenmiştir. Tüm veri seti birleştirildiğinde elde edilen genel regresyon eğrisi 0.9955 R-değeri ile sonuçlanmıştır.

Bu modelin giriş parametreleri ile sıcaklık davranışı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi güvenilir şekilde yakaladığını göstermiştir. Tüm veri alt kümelerinde elde edilen

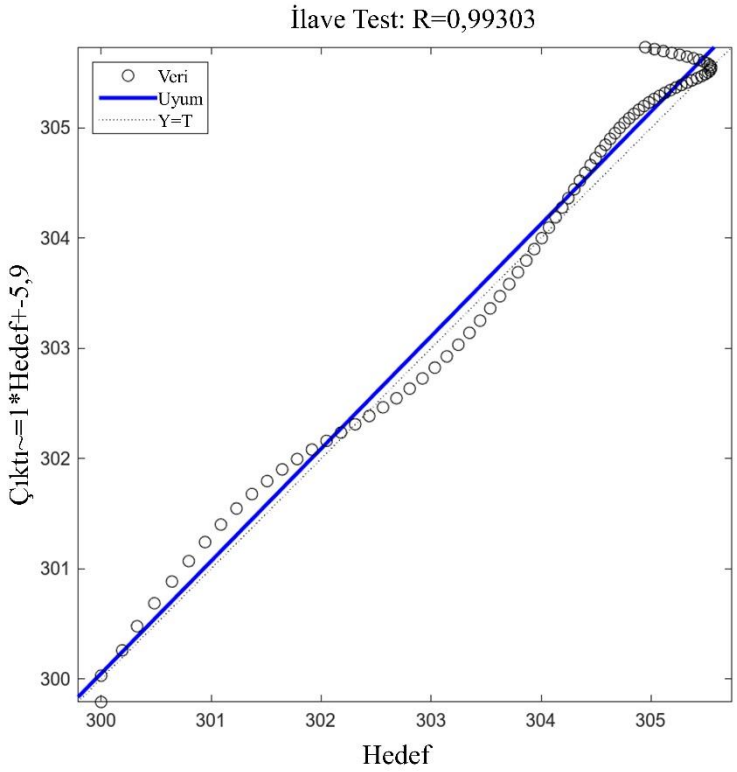
yüksek uyum katsayıları, YSA modelinin doğruluğunu ve kararlılığını kanıtlamış ve modelin sıcaklık tahmini için kullanımın efektif olduğu görülmüştür.



Şekil 4.30. R eğrileri

YSA modelinin ortalama hücre sıcaklığı tahmin gücü, 1.5C deşarj oranı ve 0.0004 kg/s soğutucu debisindeki sayısal simülasyon sonuçları test edilmiştir, Şekil 4.31. Tahmin edilen değerler (çıkışlar) ile referans sayısal hedefler karşılıklı olarak yer almakta; mavi renkte regresyon eğrisi gösterilmiştir. YSA tahminleri ideal çapraz çizgiyi yakından takip etmiş ve 0.99303 R-değeri elde edilerek, tahmin edilen ve HAD'den elde edilen sıcaklık değerleri arasında mükemmele yakın bir korelasyon sağlanmıştır. Veri noktaları

özellikle orta sıcaklık aralığında Y=T çizgisi etrafında yoğun şekilde kümelenmiş olup, ağın eğitim aralığı içerisinde yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini göstermiştir. Sıcaklık aralığının uç noktalarında hafif sapmalar gözlemlenmekte, ancak bu sapmaların büyüklüğü sınırlıdır ve genel model performansını anlamlı şekilde etkilememiştir. Bu ek test, YSA modelinin doğrudan eğitim verisinde yer almayan ara çalışma koşullarında (1.5C ve 0.0004 kg/s) dahi başarılı şekilde genelleme yapabildiğini doğrulamıştır. YSA çıktıları ile sayısal sonuçlar arasındaki güçlü uyum, modelin batarya termal yönetim sistemleri için tahmine dayalı uygulamalarda güvenle kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 4.31. YSA ile HAD karşılaştırması

5. SONUÇ

Bu çalışma, daldırmalı soğutma yöntemiyle LİB'lerin kapsamlı bir termal-akış tasarım ve optimizasyon yakşalımını sunmuştur. İki farklı modül tasarımının, 24 adet silindirik 2.5 Ah kapasiteli 18650 NMC ve 10 adet 6 Ah kapasiteli 32700 LFP hücresinden oluşan, HAD ve çok amaçlı optimizasyon ile karşılaştırmalı bir çalışması sunulmuştur. Elde edilen bulgularda, termal performans ile akış verimliliği arasındaki ilişki detaylandırılmış ve doğrudan sıvı soğutmalı BTYS için verimli tasarımlar belirlenmiştir. Toplam 44 tasarım, LHS, Taguchi ve manuel örnek uzayının birleştirilerek bir tasarım uzayı oluşturulmuştur. Tasarım yineleme döngülerinde yüksek hesaplama maliyetli simülasyonlara olan bağımlılığı ortadan kaldırmak amacıyla, ortalama hücre sıcaklığı ve basınç düşüşünü tahmin etmek üzere YSA dayalı kestirim modelleri kurulmuştur. Pareto analizleri ile desteklenen çok amaçlı genetik algoritma kullanılarak her iki modül için optimum tasarımlar elde edilmiştir. Ayrıca soğutucu akışkan seçiminin etkisi EF, MO ve NOVEC olmak üzere üç farklı dielektrik akışkan kullanılarak değerlendirilmiştir. EF, termal performans açısından en iyi sonuçları verirken. NOVEC düşük viskozitesi sayesinde en düşük basınç düşüşünü sağlasa da termal açıdan en verimsiz olan akışkan olmuştur. MO ise yüksek basınç düşüşüne sebep olmuştur. Pareto ön cephe ile Öklidyen mesafesi en küçük olan, optimum 18650 NMC modül tasarımı, temel tasarıma kıyasla ortalama hücre sıcaklığında 1,13 K'lık bir artış göstermiştir. Basınç düşüşünde %81,52 oranında azalma sağlamıştır. 32700 LFP modülünde ise ortalama hücre sıcaklığı 1,91 K yükselmiştir. Basınç düşüşü ise %88,32 oranında azaltılmıştır. Aynı güç çıkışı koşulunda yapılan karşılaştırmalı değerlendirmede 32700 formatının avantajları belirlenmiştir. 32700 LFP modülü daha düşük basınç düşüşü göstermiştir. Bu düşüklük daha yüksek debilerde bile hem daha düşük sıcaklık hem de daha düşük basınç düşüşü değerleri elde edilebileceğini göstermiştir. Yüksek debi değerinde (0.008 kg/s) termal performans her iki modül içinde ciddi oranda iyileşmiş; tüm C oranlarında maksimum sıcaklıklar kritik eşiğin (10 K) altında kalmıştır. Ayrıca daha iyi termal-akış performansı gösteren 32700 LFP modül için 1C ila 4C arası deşarj oranları ve 0.0001 ila 0.008 kg/s arası soğutucu akışkan debilerinnde en uygun soğutucu akışkan debileri belirlenmiştir. Sonrasında elde edilen verilerle YSA modeli zaman, soğutucu akışkan debisi ve deşarj oranına bağlı

olarak eğitilerek batarya sıcaklıkları tahmin edilmiştir. YSA modeli, eğitim, doğrulama ve test veri kümelerinde 0.99'un üzerinde regresyon katsayısı elde etmiştir. Ayrıca düşük MSE ile doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmiştir. Hata histogramları ve regresyon grafiklerinde gözlemlenen genel doğruluk modelin ara ve test edilmemiş koşullarda da güvenilir batarya sıcaklık öngörüsü yapabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak, bu tezde sunulan yöntem tasarıma dayalı çok amaçlı optimizasyon, HAD simülasyonu, soğutucu akışkan analizi ve YSA tabanlı kestirim modelleme—daldırmalı soğutmalı batarya sistemlerinin tasarımı ve kontrolü için bir çerçeve oluşturmuştur. Optimize edilmiş yerleşimle birleştirildiğinde, 32700 LFP ve 18650 NMC için tasarımı; termal performans, enerji verimliliği ve basınç düşüşü yönetiminde önemli avantajlar sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

Abdellatif, H. E., Khan, S. A., Belaadi, A., & Ghernaout, D. (2025). Enhancing thermal energy storage: The impact of inclined enclosure geometry and artificial neural network based modeling on phase change material melting performance. *Journal of Energy Storage*, *114*(PA), 115750. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115750

Adit, A., Pranto, M. H., & Kibria, G. (2025). *Advanced thermal management of lithium-ion battery using fin-enhanced PCM : A CFD study*. *6*(April).

Banerjee, R., & Nidhul, K. (2025). Effect of various dielectric fluids on temperature homogeneity of Li-ion battery pack in an energy efficient novel immersion cooling design. *Results in Engineering*, *26*(March), 104688. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104688

Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., & Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied Thermal Engineering*, *94*, 846–854. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.015

Chen, K., Zhang, Z., Wu, B., Song, M., & Wu, X. (2024). An air-cooled system with a control strategy for efficient battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, *236*(PB), 121578. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121578

Chen, X., Su, Y., Zhang, Y., Shen, J., Xu, X., Wang, X., & Zhou, F. (2024). Performance of thermal management system based on PCM/forked liquid-cold plate for 18650 cylindrical battery. *Journal of Energy Storage*, *91*(May), 112071. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112071

Choi, H., Lee, H., Kim, J., & Lee, H. (2023). Hybrid single-phase immersion cooling structure for battery thermal management under fast-charging conditions. *Energy Conversion and Management*, *287*(April), 117053. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117053

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *6*(2), 182–197. https://doi.org/10.1109/4235.996017

Dey, H., Pati, S., Randive, P. R., & Baranyi, L. (2024). Effect of finned networks on PCM based battery thermal management system for cylindrical Li-ion batteries. *Case Studies in Thermal Engineering*, *59*(January), 104572. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104572

Donmez, M., & Karamangil, M. I. (2024). Artificial neural networks-based multi-objective optimization of immersion cooling battery thermal management system using Hammersley sampling method. *Case Studies in Thermal Engineering*, *64*(August). https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105509

Donmez, M., Tekin, M., & Karamangil, M. I. (2025). Artificial neural network predictions for temperature: Utilizing numerical analysis in immersion cooling systems using mineral oil and an engineered fluid for 32700 LiFePO4. *International Journal of Thermal Sciences*, *211*(November 2024), 109742. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.109742

Dubey, P., Pulugundla, G., & Srouji, A. K. (2021). Direct comparison of immersion and cold-plate based cooling for automotive li-ion battery modules. *Energies*, *14*(5). https://doi.org/10.3390/en14051259

Gao, Q., Lei, Z., Huang, Y., Zhang, C., & Chen, Y. (2024). Performance investigation

of a liquid immersion cooling system with fish-shaped bionic structure for Lithium-ion battery pack. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *222*(January), 125156. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125156

Gu, H. (1983). Mathematical Analysis of a Zn / NiOOH Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, *130*(7), 1459–1464. https://doi.org/10.1149/1.2120009

Hasan, H. A., Togun, H., Abed, A. M., Qasem, N. A. A., Abderrahmane, A., Guedri, K., & Eldin, S. M. (2023). Numerical investigation on cooling cylindrical lithium-ion-battery by using different types of nanofluids in an innovative cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*, *49*(June), 103097. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103097

He, Z., Li, R., Yang, L., Mikulčić, H., Wang, J., & Čuček, L. (2024). Performance analysis of a battery thermal management system based on phase change materials with micro heat pipe arrays. *Energy Conversion and Management*, *311*(May). https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118506

Husnu Bademlioglu, A., Bedrettin Karatas, O., Furkan Sokmen, K., & Yuruklu, E. (2024). Thermal management and fin characteristic optimization of an electronic power supply utilizing Taguchi and ANOVA methods. *Applied Thermal Engineering*, *252*(March), 123671. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123671

Jithin, K. V., & Rajesh, P. K. (2022). Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *188*, 122608. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122608

Kim, G.-H., Smith, K., Lee, K.-J., Santhanagopalan, S., & Pesaran, A. (2011). Multi-Domain Modeling of Lithium-Ion Batteries Encompassing Multi-Physics in Varied Length Scales. *Journal of The Electrochemical Society*, *158*(8), A955. https://doi.org/10.1149/1.3597614

Kim, U. S., Shin, C. B., & Kim, C. S. (2008). Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, *180*(2), 909–916. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.09.054

Kumar, R., Singh, L. K., & Gupta, A. K. (2024). Evaluating Air-Cooling Performance of Lithium-Ion-Battery Module with Various Cell Arrangements. *Energy Technology*, *12*(2), 1–21. https://doi.org/10.1002/ente.202301061

Kwon, K. H., Shin, C. B., Kang, T. H., & Kim, C. S. (2006). A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, *163*(1 SPEC. ISS.), 151–157. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.012

Li, C., & Chen, W. (2024). Thermal analysis and structure optimization of wavy microchannel with combining ribs of porous layer and solid wall in multi objective genetic algorithm. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *225*(February), 125430. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125430

Li, X., Guo, S., Sun, H., Yin, S., Liu, S., & Wang, Z. (2024). Experimental study of the performance of liquid cooling tank used for single-phase immersion cooling data center. *Case Studies in Thermal Engineering*, *63*(October), 105386. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105386

Li, Y., Bai, M., Gao, L., Yang, Y., Li, Y., Li, Y., & Song, Y. (2024). Effective Heat Dissipation for Prismatic Lithium-ion Battery by Fluorinated Liquid Immersion Cooling Approach. *International Journal of Green Energy*, *21*(2), 244–255.

https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2195921
Liu, G., Pu, L., Zhao, H., Chen, Z., & Li, G. (2024). Multi-objective optimization of CO2 ejector by combined significant variables recognition, ANN surrogate model and multi-objective genetic algorithm. *Energy*, *295*(February), 131010. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131010
Liu, J., Ma, Q., & Li, X. (2023). Numerical study on heat dissipation performance of a lithium-ion battery module based on immersion cooling. *Journal of Energy Storage*, *66*(April), 107511. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107511
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*(P1), 132741. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132741
Mo, C., Yuen, A. C. Y., Wu, Y., Fei, B., & Wang, J. (2025). Investigation on electro-thermal characteristics and heat transfer of immersion cooling for lithium-ion battery module at high-ambient temperature. *Journal of Power Sources*, *645*(May), 237238. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237238
Monika, K., Chakraborty, C., Roy, S., Dinda, S., Singh, S. A., & Datta, S. P. (2021). Parametric investigation to optimize the thermal management of pouch type lithium-ion batteries with mini-channel cold plates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *164*. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120568
Mubashir, M., Xu, J., Guo, Z., Wang, X., Wang, H., Qiao, F., Li, E., & Mei, X. (2024). Numerical investigation of a novel cold plate design with uniform circular hollow fins for battery thermal management systems. *Applied Thermal Engineering*, *237*(October 2023), 121791. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121791
Najafi Khaboshan, H., Jaliliantabar, F., Abdullah, A. A., Panchal, S., & Azarinia, A. (2024). Parametric investigation of battery thermal management system with phase change material, metal foam, and fins; utilizing CFD and ANN models. *Applied Thermal Engineering*, *247*(April), 123080. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123080
Newman, J., & Tiedemann, W. (1993). Potential and Current Distribution in Electrochemical Cells: Interpretation of the Half-Cell Voltage Measurements as a Function of Reference-Electrode Location. *Journal of The Electrochemical Society*, *140*(7), 1961–1968. https://doi.org/10.1149/1.2220746
Omar, A. A., & Adham, A. M. (2025). Thermal analysis of lithium-ion batteries using forced-air cooling and circular fin systems: A numerical study. *International Journal of Thermofluids*, *27*(April), 101212. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101212
Patel, J. R., & Rathod, M. K. (2024). Influence of battery cell spacing on thermal performance of phase change material filled lithium-ion battery pack. *Energy*, *291*(September 2023), 130389. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130389
Pathmanaban, P., Arulraj, P., Raju, M., & Hariharan, C. (2024). Optimizing Electric Bike Battery Management: Machine Learning Predictions of LiFePO4 Temperature Under Varied Conditions. *Journal of Energy Storage*, *99*(PA), 113217. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113217
Peng, G., Ma, L., Hong, S., Ji, G., & Chang, H. (2024). Optimization Design and Internal Flow Characteristics Analysis Based on Latin Hypercube Sampling Method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *50*(4), 2715–2754.

https://doi.org/10.1007/s13369-024-09229-6
Raj, J. V., & Harish, R. (2025). Enhanced helical fin designs with sugar Alcohol-Based hybrid NEPCM for improved melting and thermal safety in Lithium-Ion battery. *Energy Conversion and Management: X*, *26*(April), 101032. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101032
Ren, H., Dang, C., Yin, L., & Chen, Z. (2024). Optimization research on battery thermal management system based on PCM and mini-channel cooling plates. *Case Studies in Thermal Engineering*, *53*(December 2023), 103880. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103880
Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., Li, C., Zhang, F., Null, V., Parkes, M., Patel, Y., Wang, Y., Wang, H., Ouyang, M., Offer, G., & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review. *Journal of Power Sources*, *525*(August 2021), 231094. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231094
Salter, D. W., Bachelier, G., Kumavat, P. S., Trimble, D., & O'Shaughnessy, S. M. (2024). An experimental investigation of forced convective liquid immersion cooling of a 12-cell li-ion battery module. *Journal of Physics: Conference Series*, *2766*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2766/1/012026
Shi, H., Zeng, Z., Kong, B., & Yuan, N. (2025). Enhancing high-density battery performance through innovative single-phase spray technology in immersion cooling systems. *Journal of Power Sources*, *626*(October 2024), 235770. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235770
Sundin, D. W., & Sponholtz, S. (2020). Thermal management of Li-ion batteries with single-phase liquid immersion cooling. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, *1*(February), 82–92. https://doi.org/10.1109/OJVT.2020.2972541
Tekin, M. (2024). *Farklı Lityum İyon Piller İçin Batarya Şarj Durumu Tahmini*. Bursa Uludağ Üniversitesi.
Wang, J., Liu, X., Liu, F., Liu, Y., Wang, F., & Yang, N. (2021). Numerical optimization of the cooling effect of the bionic spider-web channel cold plate on a pouch lithium-ion battery. *Case Studies in Thermal Engineering*, *26*(June), 101124. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101124
Wu, J. peng, Liu, H. ling, Li, C. chong, Li, C. hui, & Xie, G. (2024). Topological optimization and thermal performance of cold plates for lithium-ion battery with non-uniform heat sources. *Applied Thermal Engineering*, *254*(April), 123922. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123922
Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, *182*(January), 262–281. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051
Xu, H., Zhang, X., Xiang, G., & Li, H. (2021). Optimization of liquid cooling and heat dissipation system of lithium-ion battery packs of automobile. *Case Studies in Thermal Engineering*, *26*(May), 101012. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101012
Yan, G., Li, J., Dara, R. N., Shaban, M., Ghandour, R., Alhomayani, F. M., Almadhor, A., Hendy, A., Khan, M. N., & Becheikh, N. (2025). Solar-powered compact thermal energy storage system with rapid response time and rib-enhanced plate via techniques of CFD, ANN, and GA. *Journal of Energy Storage*, *105*(November

2024), 114807. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114807

Yang, W., Zhou, F., Liu, Y., Xu, S., & Chen, X. (2021). Thermal performance of honeycomb-like battery thermal management system with bionic liquid mini-channel and phase change materials for cylindrical lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, *188*(January). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116649

Zafar, M. H., Bukhari, S. M. S., Houran, M. A., Mansoor, M., Khan, N. M., & Sanfilippo, F. (2024). DeepTimeNet: A novel architecture for precise surface temperature estimation of lithium-ion batteries across diverse ambient conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, *61*(February), 105002. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105002

Zhang, H., Ganesan, P., Sharma, R. K., Zubir, M. N. B. M., Badruddin, I. A., & Chong, W. T. (2024). A novel overflow channel design of manifold cold plate for lithium-ion battery: A CFD study. *Process Safety and Environmental Protection*, *189*(April), 648–663. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.092

Zhang, Y., Zuo, W., E, J., Li, J., Li, Q., Sun, K., Zhou, K., & Zhang, G. (2022). Performance comparison between straight channel cold plate and inclined channel cold plate for thermal management of a prismatic LiFePO4 battery. *Energy*, *248*, 123637. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123637

Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M., & Zhang, H. (2021). A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, *501*(May), 230001. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230001

Zheng, J., Chang, L., Mu, M., Li, J., Li, C., Ma, C., & Du, H. (2024). A novel thermal management system combining phase change material with wavy cold plate for lithium-ion battery pack under high ambient temperature and rapid discharging. *Applied Thermal Engineering*, *245*(February), 122803. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122803

Zhou, Y., Wang, Z., Xie, Z., & Wang, Y. (2022). Parametric Investigation on the Performance of a Battery Thermal Management System with Immersion Cooling. *Energies*, *15*(7), 1–21. https://doi.org/10.3390/en15072554

EKLER

EK 1 LHS tasarım ölçüleri

EK 2 Taguchi (1-9) ve manuel (10-14) belirlenmiş tasarım ölçüleri

EK 3 Temel tasarım modül ölçüleri

EK 4 Optimum tasarım modül ölçüleri

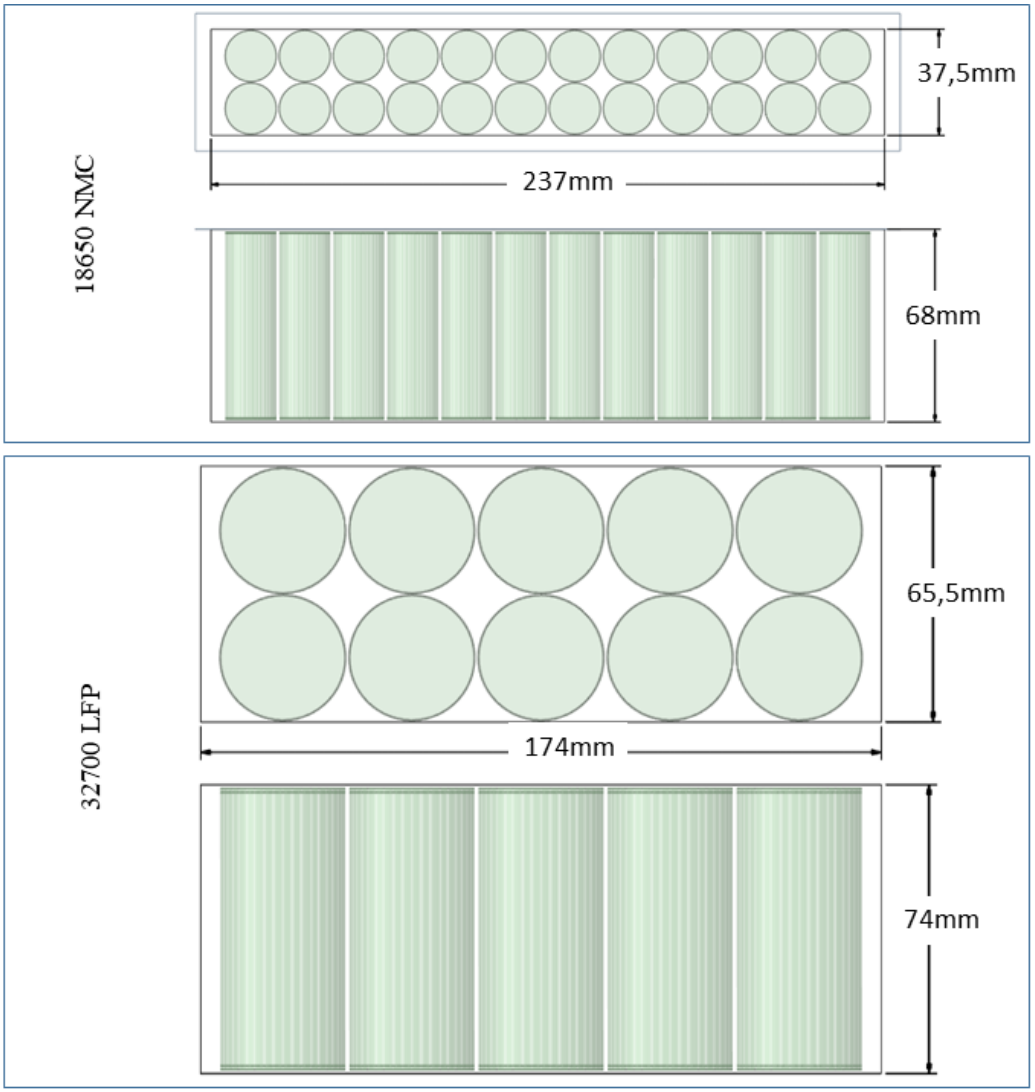
EK 1 LHS tasarım ölçüleri

	Normalize Değerler			Ölçüler		
Tasarım	**x_1**	**x_2**	**x_3**	**x_1**	**x_2**	**x_3**
1	0.00	0.95	0.82	0.53	28.35	8.24
2	0.60	0.91	0.41	6.20	27.32	4.41
3	0.92	0.85	0.08	9.22	25.36	1.28
4	0.79	0.24	0.24	7.97	7.05	2.81
5	0.15	0.59	0.12	1.94	17.79	1.60
6	0.37	0.01	0.27	4.06	0.29	3.04
7	0.52	0.46	0.46	5.46	13.76	4.86
8	0.94	0.30	0.56	9.43	8.88	5.85
9	0.12	0.18	0.50	1.62	5.39	5.22
10	0.90	0.22	0.93	9.04	6.55	9.35
11	0.76	0.42	0.52	7.73	12.54	5.44
12	0.41	0.11	0.95	4.39	3.34	9.54
13	0.18	0.61	0.62	2.25	18.23	6.40
14	0.49	0.49	0.97	5.20	14.65	9.76
15	0.56	0.74	0.18	5.78	22.34	2.20
16	0.08	0.79	0.74	1.26	23.58	7.54
17	0.69	0.67	0.30	7.09	20.16	3.37
18	0.21	0.04	0.67	2.48	1.17	6.84
19	0.46	0.09	0.79	4.86	2.74	8.04
20	0.60	0.31	0.06	6.23	9.39	1.09
21	0.26	0.51	0.21	2.95	15.42	2.50
22	0.31	0.72	0.16	3.42	21.46	2.05
23	0.73	0.37	0.65	7.41	11.13	6.67
24	0.29	0.89	0.88	3.26	26.74	8.88
25	0.86	0.82	0.34	8.70	24.68	3.71
26	0.98	1.00	0.85	9.82	29.88	8.58
27	0.81	0.54	0.72	8.20	16.06	7.34
28	0.35	0.35	0.01	3.81	10.35	0.60
29	0.65	0.15	0.58	6.70	4.52	5.97
30	0.05	0.65	0.38	0.93	19.36	4.14

EK 2 Taguchi (1-9) ve manuel (10-14) belirlenmiş tasarım ölçüleri

	Normalize Değerler			Ölçüler		
Tasarım	**x_1**	**x_2**	**x_3**	**x_1**	**x_2**	**x_3**
1	0	0	0	0.5	0	0.5
2	0	0.5	0.5	0.5	15	5.25
3	0	1	1	0.5	30	10
4	0.5	0	0.5	5.25	0	5.25
5	0.5	0.5	1	5.25	15	10
6	0.5	1	0	5.25	30	0.5
7	1	0	1	10	0	10
8	1	0.5	0	10	15	0.5
9	1	1	0.5	10	30	5.25
10	0	0	1	0.5	0	10
11	0	1	0	0.5	30	0.5
12	1	0	0	10	0	0.5
13	1	1	0	10	30	0.5
14	1	1	1	10	30	10

EK 3 Temel tasarım modül ölçüleri



EK 4 Optimum tasarım modül ölçüleri

