



**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA TERMAL
YÖNETİM SİSTEMLERİNİN OPTİMUM TASARIMI**

Emre BULUT



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA TERMAL YÖNETİM
SİSTEMLERİNİN OPTİMUM TASARIMI**

Emre BULUT
0000-0001-9159-5000

Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN OPTİMUM TASARIMI

Emre BULUT

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

Batarya termal yönetim sistemlerinde sıvı ile soğutma yöntemi etkili bir yöntemdir. Bu çalışmada dört hücreden ve on iki hücreden oluşan iki farklı batarya modülü için içerisinde farklı tip kanal yapısı olan soğutma plakalarının optimum tasarımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Dört hücreden oluşan batarya modülü için içerisinde serpantin kanal olan soğutma plakası tasarlanmış ve serpantin kanalı oluşturan paralel kanal sayısının ve soğutucu akışkan kütleli debisinin soğutma performansına ve basınç düşümüne etkileri incelenmiştir. Kanal yüksekliği, kanal genişliği ve kütleli debi tasarım değişkeni olarak belirlenerek LHS yöntemiyle tasarım noktaları oluşturulmuş ve CFD analizleri yapılmıştır. Belirlenen tasarım noktaları arasından en iyi tasarımları belirleyebilmek için GRA yöntemi kullanılmıştır. Önerilen LHS – GRA yöntemiyle ortalama ısı taşınım katsayısından %11.3 ödün vererek basınç düşümü ve kütleli debide baz tasarıma göre sırasıyla %40.3 ve %4.5 oranında iyileşme sağlanmıştır. On iki hücreli batarya modülü için içerisinden birbirine paralel üç kanal geçen soğutma plakaları tasarlanmıştır. Batarya modülündeki hücreler arasındaki en yüksek sıcaklık farkını ve basınç düşümünü azaltmak adına optimizasyon çalışması yapılmıştır. Kanal yüksekliği, kanal genişliği ve çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranı tasarım değişkenleri olarak belirlenmiş ve LHS yöntemiyle belirlenen tasarım noktalarında CFD analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçları kullanılarak RTF yöntemi ile düşük bağlı hataya sahip ve sağlam bir vekil model oluşturulmuştur. Vekil model kullanılarak her bir tasarım değişkeninin soğutma performansına ve basınç düşümüne etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. NSGAIL, NSGAIII, MOPSO ve CMOPSO yöntemleri ile optimizasyon çalışmaları yapılmış ve bu yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır. CMOPSO yöntemi ile sıcaklık farkında ve basınç düşümünde sırasıyla %30.3 ve %5.3 iyileştirme sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: LHS, GRA, Çok amaçlı optimizasyon, Batarya termal yönetim sistemi, Batarya termal modelleme, Soğutma plakası, CFD, Serpantin kanal

2022, x + 88 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

OPTIMUM DESIGN OF BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS OF ELECTRIC VEHICLES

Emre BULUT

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

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

In this study, optimization studies were carried out to design cooling plates with different types of channel structures for two different battery modules. For the four-cell battery module, cooling plates with serpentine channels were designed and the effects of the number of channels and the mass flow rate on the cooling performance and pressure drop were investigated. The channel height and width and mass flow rate were determined as design variables. The design points were created with the LHS method and CFD analyzes were made. The GRA method was used to select the best designs. With the proposed LHS-GRA method, the optimized design provided 40.3% decrease in the pressure drop with a penalty of 11.3% decrease in the convective heat transfer coefficient. For the twelve-cell battery module, cooling plates with three parallel channels were designed. Optimization studies were conducted to reduce the temperature difference between the cells in the module and pressure drop. The channel height and width and the ratio of channel height at the outlet to the channel height at the inlet were determined as design variables and CFD analyzes were conducted. A robust surrogate model was created with the RBF method. The effects of each design variable on the cooling performance and pressure drop were examined. Optimization studies were carried out with NSGAI, NSGAII, MOPSO and CMOPSO methods and the performances of these methods were compared. With the CMOPSO method, a 30.3% decrease in the temperature difference and a 5.3% decrease in the pressure drop were achieved.

Keywords: LHS, GRA, Multi-objective optimization, Battery thermal management system, Battery thermal modelling, Cooling Plates, CFD, Serpentine channel
2022, x + 88 pages.

TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini esirgemeyen değerli aileme ve her zaman yanımda olan eşime ve kızıma ve teşekkür ederim.

Batarya Test Laboratuvarı ile tezimdeki deneysel çalışmalara katkıda bulunan ALTINAY ELEKTROMOBİLİTE Şirketine teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim sürecinde ve akademik hayatımın başından itibaren değerli destekleri için Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK ve Doç. Dr. Gökhan SEVİLGİN'e ve mesai arkadaşım Öğr. Gör. Dr. Emre İsa ALBAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Emre BULUT
17/06/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Batarya Soğutma Yöntemleri.....	3
2.1.1. Hava ile soğutma yöntemleri	4
2.1.2 Faz değiştiren malzemeler ile soğutma yöntemleri.....	7
2.1.3 Sıvı ile soğutma yöntemleri	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1. LTO Batarya Hücresi	17
3.2. Deney Düzenegi	20
3.3. Nümerik Model	21
3.3.1 MSMD yaklaşımı	22
3.3.2 NTGK modeli	22
3.3.3 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi.....	24
3.3.4 Isı transferi hesaplamaları	28
3.4. LHS – GRA yöntemi.....	29
3.5. Vekil Modelleme Yöntemleri	32
3.6. Optimizasyon Yöntemleri	33
3.6.1. Genetik algoritmalar (GA).....	34
3.6.2. Parçacık sürü optimizasyonu.....	36
3.7. Performans Metrikleri	38
3.7.1. Hypervolume.....	39
3.7.2. Inverted Generational Distance (IGD)	40
3.7.3. Boşluk (Metric of Spacing).....	41
3.7.4. Yayılma (Metric of Spread)	42
3.8. Batarya Paketi ve Soğutma Plakalarının Tasarım	42
3.8.1 Dört hücreli batarya modülü	42
3.8.2. Dört hücreli batarya modülü ağ yapısı	44
3.8.3. Dört hücreli batarya modülü modelinin doğrulanması	45
3.8.4. On iki hücreli batarya modülü.....	47
3.8.5 On iki hücreli batarya modülünün ağ yapısı	49
4. BULGULAR	50
4.1. Dört Hücreli Batarya Modülü Çalışmaları	50
4.1.1. Tasarım değişkenlerinin belirlenmesi	54
4.1.2. LHS ile belirlenen noktaların CFD analizleri (Dört hücreli modül)	55
4.1.3. GRA ile en iyi tasarım değişkenlerinin belirlenmesi	56
4.2. On İki Hücreli Batarya Modülü Çalışmaları	61
4.2.1. LHS ile belirlen noktaların CFD analizleri (On iki hücreli modül)	63
4.2.2. On iki hücreli batarya modülü için vekil modelleme.....	64
4.2.3. Tasarım değişkenlerinin etkilerinin incelenmesi	65

4.2.4. On iki hücreli batarya modülünün çok amaçlı optimizasyonu.....	69
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	76
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	87



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
T	Sıcaklık [K, °C]
ρ_b	Bataryanın yoğunluğu [kg/m ³]
$c_{p,b}$	Bataryanın özgül ısısı [J/(kgK)]
k_b	Bataryanın ısı iletim katsayısı [W/(mK)]
S_n :	Negatif elektrodun elektrik iletkenliği [S/m]
S_p :	Pozitif elektrodun elektrik iletkenliği [S/m]
V_n :	Negatif elektrodun potansiyeli [V]
V_p :	Pozitif elektrodun potansiyeli [V]
$\dot{Q}_{gen}$:	Toplam ısı üretimi [W/m ³]
$\dot{Q}_{ECh}$:	Elektrokimyasal reaksiyon kaynaklı ısı üretimi [W/m ³]
j_{ECh} :	Akım yoğunluğu [A/m ³]
U :	Bataryaya özel uyum katsayısı
Y :	Bataryaya özel uyum katsayısı
ρ_c :	Soğutma plakasının yoğunluğu [kg/m ³]
$c_{p,c}$:	Soğutma plakasının özgül ısısı [J/(kgK)]
k_c :	Soğutma plakasının ısı iletim katsayısı [W/(mK)]
S :	Kaynak terim
L_h :	Hidrodinamik giriş uzunluğu [m]
D_h :	Hidrolik çap [m]
U_m :	Soğutu akışkanın ortalama hızı [m/s]
$\dot{m}$:	Soğutucu akışkanın kütleli debisi [kg/s]
A_{cs} :	Kanalın kesit alanı [m ²]
Re :	Reynolds Sayısı
μ :	Dinamik viskozite [Pa.s]
f_{app} :	Görünür sürtünme faktörü
f_{fd} :	Tam gelişmiş akış için Fanning sürtünme faktörü
L :	Serpantin kanalın toplam uzunluğu [m]
L^+ :	Boyutsuz kanal uzunluğu
$K_{(\infty)}$:	İnkremental basınç düşümü
c :	Uyum katsayısı
α :	Kanal yüksekliğinin genişliğine oranı
w :	Kanal genişliği [m]
h :	Kanal yüksekliği [m]
P :	Basınç [Pa]
ρ_f :	Soğutucu akışkanın yoğunluğu [kg/m ³]
$c_{p,f}$:	Soğutucu akışkanın özgül ısısı [J/(kgK)]
k_f :	Soğutucu akışkanın ısı iletim katsayısı [W/(mK)]
$\vec{V}$:	Hız vektörü [m/s]
$\vec{g}$:	Yer çekimi ivmesi vektörü [m/s ²]
ΔP_{total} :	Toplam basınç düşümü [Pa]
ΔP_f :	Sürtünme kayıpları kaynaklı basınç düşümü [Pa]
ΔP_{180° :	180° dönüş kaynaklı basınç düşümü [Pa]

n :	180° dönüş sayısı
ξ :	Dirsek kayıp katsayısı
C :	180° dönüşün eğrilik oranı
β :	Kanal yüksekliğinin kanal genişliğine oranı
L_s :	Kanallar arasındaki boşluk [m]
$\dot{Q}_c$:	Soğutucuya aktarılan ısı [W]
$T_{c,in}$:	Soğutucu akışkanın giriş sıcaklığı [K]
$T_{c,out}$:	Soğutucu akışkanın çıkış sıcaklığı [K]
h_{avg} :	Ortalama ısı taşınım katsayısı [W/(m ² K)]
A_s :	Serpantin kanalın ısı transferi yüzey alanı [m ²]
ΔT_{lm} :	LMTD değeri [K]
T_{ref} :	Referans düzlemin ortalama sıcaklığı [K]
$\Delta i(k)$:	The absolute deviation sequences values
$y_0(k)$:	Referans dizi
$y_i(k)$:	Karşılaştırma dizisi
Δmax :	Mutlak maksimum standart sapma
Δmin :	Mutlak minimum standart sapma
$\xi_i(k)$:	Gri ilişki katsayısı
ϕ :	Tanımlama katsayısı
Y_i :	Referans dizisi ile karşılaştırma dizisi arasındaki korelasyon
$w_j(k)$:	k faktörünün normalize edilmiş ağırlığı

Kısaltmalar Açıklama

CFD	Computational fluid dynamics
FDM	Faz değiştiren materyal
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
LHS	Latin Hypercupe Sampling
GRA	Gri ilişki analizi
LTO	Lityum Titanat Oksit
HV	Hypervolume
IGD	Terslenmiş nesilsel mesafe
S	Boşluk metriği
SP	Yayılma metriği
RTF	Radyal tabanlı fonksiyonlar
GA	Genetik algoritmalar
NSGAI	Nondominated Sorting Genetic Algorithm II
NSGAIII	Nondominated Sorting Genetic Algorithm II
MOPSO	Multi-objective Particle Swarm Optimization
CMOPSO	Competitive Multi-Objective Particle Swarm Optimization

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Optimizasyon çalışması yapılan bir hava ile soğutma sistemi	4
Şekil 2.2. Farklı tip soğutma yöntemleri	6
Şekil 2.3. Bakır plaka ilaveli FDM ile soğutma sistemi	8
Şekil 2.4. Bakır kanatçık ve sıvı ile soğutma destekli ısı borusu ile soğutma yöntemi	10
Şekil 2.5. Daralan kanal ile soğutma sistemi	12
Şekil 2.6. Mini kanallı soğutma plakası örneği	13
Şekil 2.7. Farklı serpentine kanal tasarımları	14
Şekil 2.8. Soğutma plakaları ile sıvı soğutma yöntemi	15
Şekil 3.1. Sıcaklık değişimine bağlı batarya deşarj kapasitesi	18
Şekil 3.2. Şarj – deşarj çevrim sayısına bağlı kapasite geri kazanımı oranının değişimi	19
Şekil 3.3. Zamana bağlı batarya doluluk oranının değişimi	19
Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan LTO batarya hücresi	20
Şekil 3.5. Deney düzeneği	21
Şekil 3.6. Deneysel veriler ve lineer fonksiyon eğrisi	24
Şekil 3.7. Soğutma plakasındaki serpantin kanal ve referans düzlem	29
Şekil 3.8. GA çalışma diyagramı	35
Şekil 3.9. PSO algoritmasının çalışma diyagramı	37
Şekil 3.10. Pareto Front çözümlerinin olası durumları	39
Şekil 3.11. Hypervolume değerinin temsili gösterimi	40
Şekil 3.12. Dört hücreden oluşan batarya modülü	43
Şekil 3.13. Paralel kanal sayıları değişen serpantin kanallı soğutma plakaları	43
Şekil 3.14. Dört hücreli batarya modülünün ağ yapısı	44
Şekil 3.15. Ağ yapısından bağımsızlık analizleri	45
Şekil 3.16. Deneylerden ve nümerik analizlerden elde edilen sıcaklık değerleri	46
Şekil 3.17. Deneylerden ve nümerik analizlerden elde edilen voltaj değerleri	46
Şekil 3.18. Reynolds sayısına bağlı nümerik analiz ve teorik hesaplamalara ait basınç düşümü değerleri	47
Şekil 3.19. Batarya modülü ve soğutma plakaları	48
Şekil 3.20. On iki hücreli batarya modülünün ağ yapısı	49
Şekil 4.1. Orta batarya hücresindeki sıcaklık dağılımları	51
Şekil 4.2. Farklı kütleli debilerde en yüksek sıcaklık değerleri	52
Şekil 4.3. Farklı kütleli debilerde taşınım ile ısı transferi katsayısı değerleri	52
Şekil 4.4. Paralel kanal sayısının basınç düşümü değerlerine olan etkisi	53
Şekil 4.5. Paralel kanal sayısının en yüksek sıcaklık değerlerine olan etkisi	54
Şekil 4.6. Batarya modülü üzerindeki sıcaklık dağılımları A) Baz Tasarım B) LHS No 21	59
Şekil 4.7. Serpantin kanalın orta kesitinde basınç dağılımları [Pa] A) Baz tasarım B) LHS No 21	60
Şekil 4.8. On iki hücreli batarya modülü için A) Sıcaklık dağılımı B) Basınç dağılımı	62
Şekil 4.9. RTF modelleri ve CFD simülasyonları arasındaki bağıl hatalar	65
Şekil 4.10. Tasarım değişkenlerinin sıcaklık farkına olan etkisi	67
Şekil 4.11. Tasarım değişkenlerinin basınç düşümüne olan etkisi	68
Şekil 4.12. Tasarım değişkenlerinin en yüksek sıcaklığa olan etkisi	69
Şekil 4.13. Farklı optimizasyon yöntemlerinin Pareto cepheleri	71

Şekil 4.14. Farklı optimizasyon yöntemlerinin CFD sonuçlarına göre bağlı hataları.....	72
Şekil 4.15. On iki hücreli modülün soğutucu plakalarındaki sıcaklık dağılımı A) Baz tasarım B) CMOPSO yöntemiyle belirlenen tasarım.....	73
Şekil 4.16. On iki hücreli modülün soğutucu plakaların içindeki kanalların basınç dağılımı A) Baz tasarım B) CMOPSO yöntemiyle belirlenen tasarım	74



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. LTO bataryanın genel özellikleri	18
Çizelge 3.2. Soğutma plakası ve soğutucu akışkan malzemelerinin özellikleri	29
Çizelge 4.1. Dört hücreli modülün analizlerinin başlangıç ve sınır şartları.....	50
Çizelge 4.2. LHS ile belirlenen tasarım noktaları ve analiz sonuçları (Dört hücreli batarya modülü için).....	55
Çizelge 4.3. Normalize edilmiş tasarım değerleri, GR, GRA değerleri ve sıralamaları	56
Çizelge 4.4. Baz tasarım ve en yüksek GRA değerine sahip ilk beş tasarımın sonuçları	58
Çizelge 4.5. On iki hücreli modülün analizlerinin başlangıç ve sınır şartları	61
Çizelge 4.6. LHS ile belirlenen tasarım noktaları ve analiz sonuçları (dört hücreli batarya modülü için).....	63
Çizelge 4.7. Farklı tasarım değişkenlerinin normalize değerlerinin dağılımı	66
Çizelge 4.8. Farklı yöntemlerin performans metriklerinin ortalaması	70
Çizelge 4.9. Farklı yöntemlerin performans metriklerinin standart sapmaları	70
Çizelge 4.10. Farklı optimizasyon yöntemlerinin sonuçları ile CFD sonuçlarının karşılaştırılması.....	72

1. GİRİŞ

Son yıllarda taşıt kaynaklı kirleticilerin sebep olduğu hava kirliliğini, küresel ısınmanın en önemli nedenlerinden biri olan sera gazlarını ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak için, dünya genelinde neredeyse tüm otomotiv üreticileri, elektrikli araçların tasarlanmasına ve üretimine yönelmektedir. Elektrikli araçların en önemli bileşenlerinden birisi de kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürmekte kullanılan bataryalardır. Bataryaların çalışma prensibi gereği elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda ısı açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucu oluşan ısıyı bataryalardan uzaklaştırmak için batarya termal yönetim sistemleri kullanılmaktadır. Aynı zamanda belirli sıcaklık değerlerinin altında reaksiyonlar yüksek verimde gerçekleşmemektedir. Batarya termal yönetim sisteminin bir görevi de bataryaların ısınmasını sağlamaktır. Bu çalışmada sadece soğutma sistemleri incelenmiştir.

Batarya termal yönetim sistemlerinin, bataryanın maksimum sıcaklıklarını belli bir değerin altında tutmak, batarya paketi içindeki sıcaklık farklarını asgari düzeyde tutmak gibi önemli görevleri vardır. Bu görevler, batarya paketlerinin ömrünü uzatmaya, batarya ömrü süresince mümkün olan en yüksek performansı sağlamaya ve batarya paketlerinin güvenliğini sağlamaya yardımcı olmaktadır.

Elektrikli araçların batarya termal yönetim sistemlerinde farklı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Hava ile soğutma, sıvı ile soğutma, ısı boruları ile soğutma ve faz değiştiren malzemeler kullanılarak soğutma bu yöntemlere örnek olarak verilebilir. Her yöntemin birbirine göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Bu yöntemlerin bir arada kullanıldığı sistemler de mevcuttur.

Sıvı ile soğutma sistemleri, batarya hücrelerinde üretilen ısıyı, soğutma plakaları aracılığıyla, genellikle bir veya birden fazla kanalın içinden geçen sıvıya aktarılması prensibinden faydalanır. Sıvı ile soğutma sistemlerinde kanal tipi, kanal geometrisi, akışın özellikleri, soğutucu akışkan tipi ve soğutucu akışkan debisi gibi ısı transferini, sistem performansını ve toplam basınç düşümünü etkileyen parametreler büyük önem taşımaktadır. Toplam basınç düşümü de pompanın ilave güç tüketimini arttırdığından

dolayı sıvı ile soğutma sistemlerinde göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur. Son yıllarda sistem verimliliğini etkileyen bu parametrelerin optimizasyon çalışmaları hız kazanmıştır.

Bu çalışmada dört hücreden ve on iki hücreden oluşan iki farklı batarya paketi için farklı soğutma plakaları tasarlanmış ve farklı optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Dört hücreli batarya paketi için içerisinde serpantin kanal yapısına sahip iki adet soğutma plakası tasarlanmıştır. Farklı kanal sayısının ve farklı soğutucu akışkan kütleli debisinin soğutma performansına ve toplam basınç düşümüne etkileri incelenmiştir. Uygun kanal sayısı ve kütleli debi aralığı belirlendikten sonra ısı taşınım katsayısını arttırmak ve toplam basınç düşümünü azaltmak amacıyla daha önce literatürde birlikte kullanılmayan Latin Hypercube Sampling ve Grey Relational Analysis yöntemleri ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Tasarım değişkenleri olarak kanal yüksekliği, kanal genişliği ve kütleli debi seçilmiştir. On iki hücreden oluşan batarya paketi için ise içerisinde üçer tane paralel kanal bulunan iki adet soğutma plakası tasarlanmıştır. Kanal yüksekliği, kanal genişliği ve kanal çıkış yüksekliğinin kanal giriş yüksekliğine oranı tasarım değişkeni olarak belirlenmiştir. Batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkını ve toplam basınç düşümünü azaltmak için çok amaçlı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Radyal tabanlı fonksiyonlar kullanılarak amaç fonksiyonları oluşturulmuştur. Literatürde yaygın olarak kullanılan optimizasyon teknikleri kullanılarak sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar, depolanan kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen taşınabilir aygıtlardır (Whittingham, 2012). Dönüştürme işlemini de yüksek verimliliğe sahip elektrokimyasal redoks reaksiyonları ile sağlamaktadırlar. Bu sürecin tersi de gerçekleşerek şarj edilebilir bataryalar şarj edilebilir. Elektrokimyasal redoks reaksiyonları, bir elektrik devresi üzerinden, bir malzemeden diğer bir malzemeye elektron transferi ile gerçekleşir. Elektron transferiyle olan bu reaksiyonlarda yanma veya paslanma olmaz ve sadece ısı açığa çıkar. Elektrikli araçlarda, batarya paketlerinden en yüksek verimi alabilmek için bataryaların sıcaklıklarını güvenli çalışma aralığında tutacak ve batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farklılığını azaltacak batarya termal yönetim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Batarya termal yönetim sistemlerinden beklenenler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Paseran, 2002; Reddy, 2011):

- Bir modüldeki batarya hücreleri arasında ve modüllerden oluşan batarya paketinin her tarafında sıcaklık farkları çok fazla olmamalıdır.
- Batarya paketindeki tüm hücreleri güvenliği çalışma sıcaklığı aralığında tutulmalıdır.
- Hafif, kompakt ve kolay montaj edilebilir olmalıdır.
- Dayanıklı ve güvenilir olmalıdır.
- Enerji tüketimi az olmalıdır.
- Bakımı kolay ve düşük maliyetli olmalıdır.

2.1. Batarya Soğutma Yöntemleri

Bataryalarda gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların verimi soğuk ortam şartlarında düşmektedir. Batarya termal yönetim sistemleri gerektiğinde bataryaların ısıtılmasını da sağlamaz. Bataryaların ısıtılması da önemli bir konu olsa da, bu tez çalışmasında, batarya modüllerinin soğutulması üzerine çalışılmıştır.

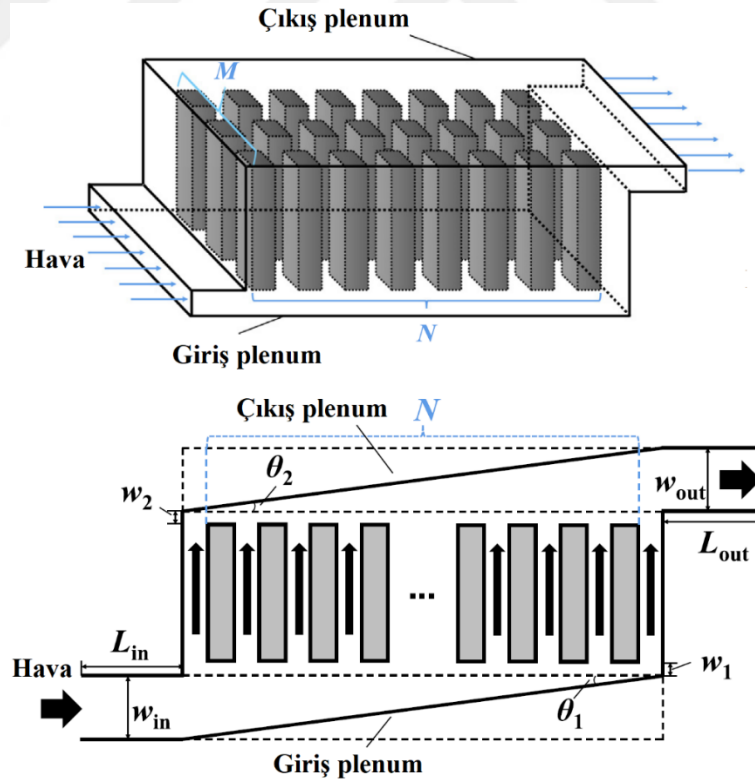
Elektrikli ve hibrit araçlarda hava ile soğutma, sıvı ile soğutma, ısı borusu ile soğutma ve faz değiştiren maddelerle soğutma gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bazı

çalışmalarda bu yöntemler birlikte kullanılmıştır. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantajları bulunmaktadır (Paseran, 2001).

2.1.1. Hava ile soğutma yöntemleri

Hava ile soğutma yöntemi hafif ve düşük maliyetlidir. Bakımı ve montajı kolaydır. Ancak havanın özgül ısısının düşük olması sebebiyle hibrit araçlar gibi toplam ısı üretiminin daha düşük olduğu batarya sistemlerinde kullanılması daha uygundur (Paseran, 2001).

Chen ve ark. (2017) bir hibrit araç batarya paketi için hava ile soğutma yöntemi üzerine çalışmışlardır. Giriş ve çıkış plenum çaplarının genişliklerini tasarım değişkeni olarak belirleyip optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. Optimizasyon yapılan hava ile soğutma sistemi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda batarya yüzeyleri arasındaki maksimum sıcaklık farkı %45 azalmıştır.

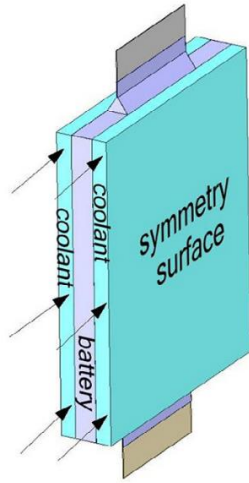


Şekil 2.1. Optimizasyon çalışması yapılan bir hava ile soğutma sistemi (Chen ve ark., 2017)

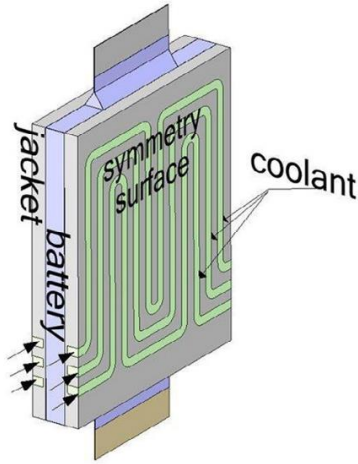
Wang ve ark. (2016) lityum-iyon batarya modülünü hava ile soğutma yöntemiyle düşük yükte ve farklı ortam sıcaklıklarında çalışma şartlarında sürekli soğutma ve kesikli soğutmanın performanslarını incelemişlerdir. Modül içerisindeki en yüksek sıcaklıkta 1.1 – 1.3 °C artışla ile sistemden çekilen enerjiyi sırasıyla, %83 - %92 azaldığını görmüşlerdir.

Tran ve ark. (2014) lityum-iyon batarya paketinde yüksek güç tüketimi anında ısı borusu ile soğutma yönteminin tek başına yetmediğini, ısı borusunun yoğuşturucu kısmının doğal taşınım ile soğutulduğu durumda yetersiz kaldığını görmüşler ve ısı borusu ve hava ile soğutma yöntemini birlikte kullanmışlardır. Isı borusunun yoğuşturucu kısmını zorlanmış taşınım ile soğutarak batarya paketini istenilen sıcaklık aralığında tutabilmişlerdir. Artan hava hızının belirli bir değerden sonra soğutmaya olumlu katkısının olmadığını görmüşlerdir. Sistemden çekilen enerjiyi ve ses miktarını azaltmak ve en etkin soğutma performansını sağlayabilmek için hava hızını ve hava kanallarının geometrisini tasarım değişkeni olarak belirleyerek optimizasyon çalışması yapmışlardır.

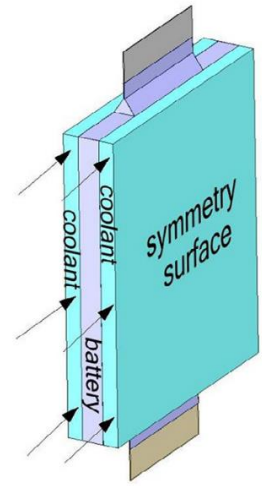
Chen ve ark. (2016) tek bir batarya hücrelerini dört farklı soğutma yöntemiyle soğutarak sistemleri karşılaştırmışlardır. CFD analizi yapılan soğutma yöntemleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Hava ile soğutma yönteminde bataryadan çekilen enerjinin en fazla olduğunu görmüşlerdir. İndirek sıvı soğutma sisteminde, özellikle düşük soğutucu sıvı debilerinde homojen sıcaklık dağılımının elde edilemediğini görmüşlerdir.



Hava ile soğutma yöntemi



Sıvı ile soğutma yöntemi (indirek)



Sıvı ile soğutma yöntemi (direk)

Şekil 2.2. Farklı tip soğutma yöntemleri (Chen ve ark., 2016)

Liu ve ark. (2014) yirmi hücreden oluşan batarya paketinde hava, FDM ve sıvı ile termal yönetiminin performanslarını yüksek deşarj sırasında karşılaştırmışlardır. Atmosfer şartlarında sıvı ile soğutma yöntemiyle en düşük batarya sıcaklıklarına ulaşılmış, FDM ile soğutmanın da yeterli olduğunu ve en iyi batarya yüzeyi sıcaklık dağılımını verdiğini tespit etmişlerdir. Düşük ortam sıcaklıklarında hava ile ısıtma yönteminin bataryanın ısınmasında yeterli olduğunu ve deşarj işleminin sonuna kadar istenilen sıcaklığı sağladığını görmüşlerdir. Artan Reynolds sayısının, hava ile soğutma yönteminde pek fazla etkisinin olmadığını, sıvı ile soğutma yönteminde ise faydalı olduğunu görmüşlerdir.

E ve ark. (2021) silindirik lityum-iyon bataryalardan oluşan bir batarya paketi için hava ile soğutma sistemi tasarlamışlar ve ortogonal deney tasarımı ve GRA kullanarak optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. Hava giriş hızının, girişteki menfez çapının, giriş ve çıkış menfezlerinin konumun soğutma performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Hava giriş hızının ve giriş ve çıkış menfez konumlarının soğutma performansında en etkili olan değişkenler olduğunu tespit etmişlerdir.

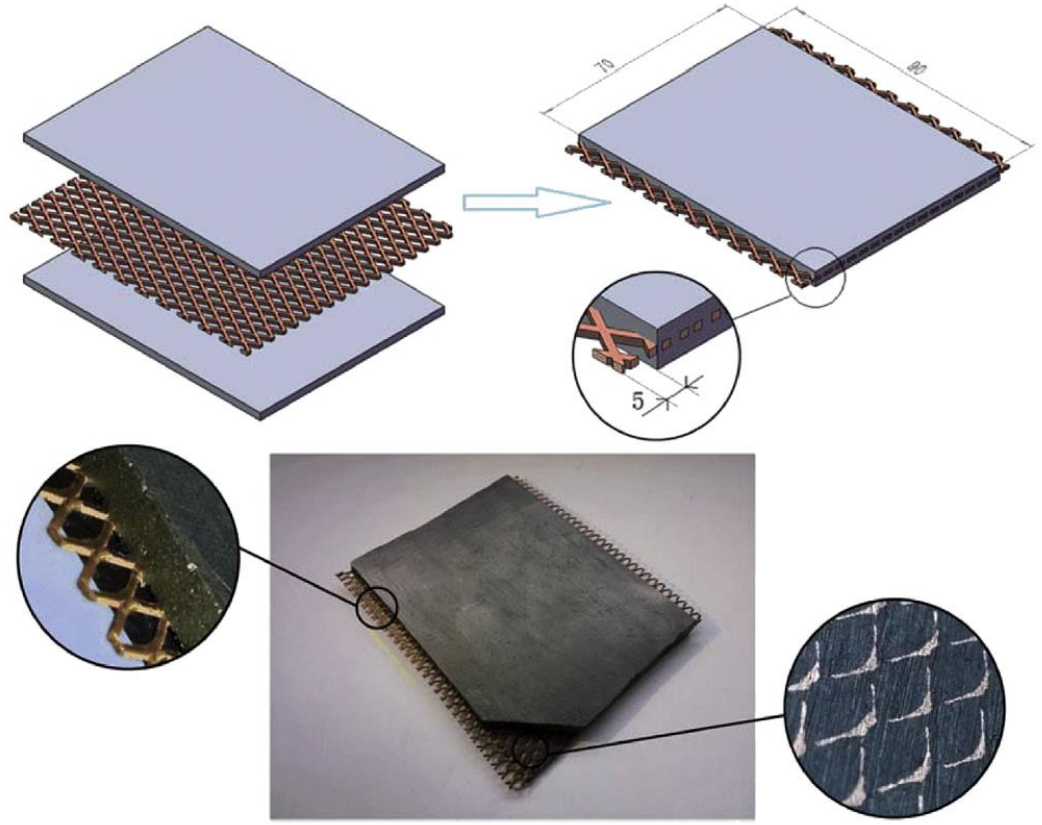
2.1.2 Faz değiştiren malzemeler ile soğutma yöntemleri

Faz değiştiren malzemeler (FDM) istenilen sıcaklık aralığında eriyebilen veya katılaşabilen, gizli ısıyı depolayabilen malzemelerdir. Erime noktasına kadar bataryanın sıcaklığını tutabilen pasif bir soğutma yöntemidir. Bu yöntem tek başına kullanıldığında yeterli olmayabilir ancak hava veya sıvı ile soğutma yöntemleri ile birlikte kullanılabilir. Diğer soğutma yöntemleriyle birlikte kullanılabilmesi ve sistemden çekilen enerjiyi azaltması gibi faydalarından dolayı son yıllarda bu malzemeler üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır.

Alipanah ve Li (2016) oktadekan, galyum ve oktadekan–alüminyum köpük kompozit FDM ile soğutma yönteminde deneyler yapmışlardır. FDM ile köpüklerin birlikte kullanmanın daha iyi soğutma performansı gösterdiğini ve batarya yüzeyindeki sıcaklık farklılıklarının daha az olduğunu görmüşlerdir. Metal köpük ile oluşturulan kompozit sistemin daha yüksek ısıl iletim katsayısı ve özgül ısısı sayesinde daha iyi soğutma performansı sergilediğini görmüşlerdir.

Lv ve ark. (2016) ve lityum-iyon batarya paketini soğutmak için FDM zerine alüminyum kanatçıklar ekleyerek ısı transferi yüzey alanını arttırarak en yüksek sıcaklığı %4, batarya yüzeyindeki sıcaklık farkını da %12 azaltmışlardır.

Wu ve ark. (2016) lityum-iyon batarya hücresinin soğutulmasında hava ile soğutma ile birlikte FDM ve bakır plaka ilaveli FDM ile soğutma yöntemlerini birleştirerek soğutma performanslarını karşılaştırmışlardır. Bakır plaka ilaveli FDM ile soğutma sistemi şekil 2.3'te görülmektedir. Bakır plaka ilaveli FDM ile soğutmada, bakır plaka ilavesiz FDM ile soğutmaya göre %6-7, sadece hava ile soğutmaya göre ise %15-16 iyileşme sağlamışlardır.



Şekil 2.3. Bakır plaka ilaveli FDM ile soğutma sistemi (Wu ve ark., 2016)

Wu ve ark. (2017) lityum-iyon bataryada sadece FDM ile soğutma yönteminin ve ısı borusu destekli FDM ile soğutma yönteminin performanslarını karşılaştırmışlardır. Isı borusu destekli sistemin ısı borusu desteksiz sisteme göre hem batarya hücrelerinin yüzeyinde hem de batarya paketinin genelinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmişlerdir. Bataryadan belirli miktarda enerji çekildiğinde sadece PCM ile olan soğutma sisteminde çekilen enerjiyle birlikte sıcaklıkta sürekli artış gözlemlenirken ısı borusu destekli sistemde belirli bir süre sonra sıcaklık sabit tutulabilmiştir.

Ianniciello ve ark. (2018) FDM ile soğutma yöntemleri üzerine yapılan araştırmaları inceleyerek sistem performansının arttırılabilmesi için yöntemler önermişlerdir. Sayısal ya da deneysel yöntemlerle sistem için en uygun FDM'i belirlemeyi, metal kanatçıklar gibi ısı iletimi yüksek malzemeleri FDM yüzeyine eklemeyi, metal köpük veya grafit matris ile FDM'i birleştirmeyi, farklı erime sıcaklıklarına sahip FDM katmanlarını birleştirmeyi, sistemde tasarım optimizasyonu yapmayı ve FDM yüzey alanını arttırmayı

tavsiye etmişlerdir. Ancak sadece FDM ile soğutma yönteminin yeterli olmadığı durumlarda hava ile soğutma ve PCM ile soğutma yöntemlerini beraber kullanmayı önermişlerdir.

2.1.3 Sıvı ile soğutma yöntemleri

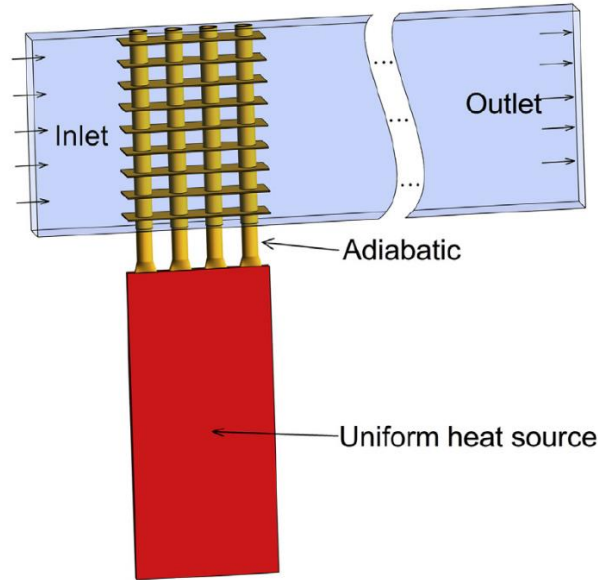
Sıvı ile soğutma yöntemleri elektrikli araçlarda yüksek akım ile şarj-deşarj, yüksek ivmelenme ve yüksek fren enerjisi geri kazanımı oranlarında en iyi soğutma performansı gösteren soğutma yöntemleridir. Hava ile soğutma yöntemlerine göre daha yüksek soğutma kapasitesi sağlamaktadır. Ancak pompa, soğutma sıvısı için depo, ısı değiştirici gibi elemanlar nedeniyle hava ile soğutma sistemlerine göre daha ağır ve masraflıdır. Diğer sistemlere göre bakım ve tamiri daha zor ve masraflıdır. Isı borusu ile soğutma yöntemi de pasif sıvı ile soğutma sistemi olarak sınıflandırılabilir. Isı borularının yüksek ısıl iletim katsayısı, evaporatör yüzeyinde neredeyse sabit sıcaklık sağlaması, esnek geometriye sahip olabilmesi, farklı ölçülerdeki boşluklara uygulanabilmesi ve diğer soğutma yöntemleriyle birlikte kullanılabilmesi gibi avantajlar sahiptir. Ancak ısı borularının yüksek maliyet ve üretiminin zor olması gibi dezavantajları vardır. Son yıllarda farklı soğutucu akışkan tipleri, farklı soğutma plakası tipleri, soğutma plakaları üzerine optimizasyon çalışmaları ve farklı tip soğutma yöntemlerini bir arada kullanma gibi bir çok alanda, çok sayıda çalışmalar yapılmıştır.

Yang ve ark. (2015) lityum-iyon batarya sıvı ile soğutma sisteminde elektromanyetik pompa ve soğutucu akışkan olarak su yerine sıvı metal (galyum) kullanmışlardır. Sıvı galyumun daha yüksek soğutma kapasitesine sahip olması daha homojen sıcaklık dağılımı sağlamasına ve hızlı şarj-deşarj gibi yüksek ısı üretimin olduğu durumlarda su ile soğutmaya çok daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca sıvı metal kullanımıyla soğutma performansının artmasında dolayı elektromanyetik pompanın daha az enerji tükettiğini görmüşlerdir.

Mondal ve ark. (2017) lityum-iyon batarya paketinin sıvı ile soğutma sisteminde farklı soğutucu akışkanların performanslarını incelemişlerdir. Saf su ve etilen - glikolü farklı oranlarda karıştırmışlar ve bu akışkanlara nano-parçacıklar ilave ederek akışkanların

soğutma performanslarını karşılaştırmışlardır. Saf suyun ısı iletim katsayısının etilen glikol karışımına göre daha yüksek olmasından dolayı bütün durumlarda saf suyun soğutma performansının diğerlerine göre daha iyi olduğu görmüşlerdir. Nano-parçacık ilavesinin ısı iletim katsayısını arttırmasına rağmen soğutma performansında önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bunun sebebinin de nano-parçacıkların akışkanın özgül ısısını düşürmesi ve akışkana aktarılan ısı miktarının azaldığı sonucuna varmışlardır.

Ye ve ark. (2015) tek batarya hücresinde yüksek hızlı şarj-deşarj ve sert ivmelenme gibi yüksek ısı üretimi durumunda ısı borusu temelli sıvı ile soğutma sisteminin performansını incelemiş ve optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. Isı borusunun yoğunlaştırıcı kısmını su ile soğutmuşlar ve farklı sayıda bakır kanatçıklar eklemişlerdir. Tasarladıkları soğutma sistemi Şekil 2.4'te verilmiştir. Isı borusunun sayısının artmasının bir noktadan sonra homojen sıcaklık dağılımı sağlamaya pek katkısının olmadığı görülmüştür. Bakır kanatçıkların sayısı arttıkça soğutma kapasitesinin de artmasından dolayı soğutma performansı da artmış ve homojen sıcaklık dağılımı sağlamaya da olumlu katkı sağlamıştır.



Şekil 2.4. Bakır kanatçık ve sıvı ile soğutma destekli ısı borusu ile soğutma yöntemi (Ye ve ark., 2015)

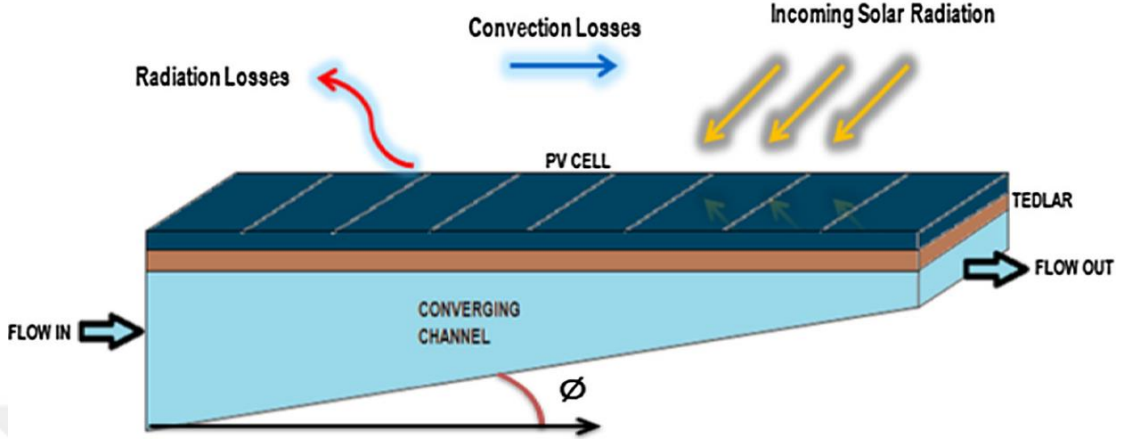
Liang ve ark. (2018) lityum-iyon batarya paketi için ısı boruları ile soğutma yöntemini kullanmışlardır. Isı borularının yoğunlaştırıcı kısımlarını su ile soğutmuşlardır. Soğutma sisteminin farklı ortam sıcaklıklarında, farklı soğutma suyu sıcaklıklarında ve farklı su debilerinde soğutma performansını incelemişlerdir. Ortam sıcaklığı ile soğutma suyu sıcaklığının aynı olduğu durumda soğutma suyu debisinin artması soğutma performansını arttırmış ancak suyun debisinin artmasının bir noktadan sonra soğutma performansına çok fazla etkisi olmadığı görülmüştür. Yüksek ortam sıcaklığında düşük soğutma suyu sıcaklığının soğutma performansına etkisinin en fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca kesikli soğutma suyu çevrimi üzerine de çalışılmış ve batarya paketinin istenilen sıcaklık aralığında tutulabileceğini de gözlemlemişlerdir. Kesikli soğutma çevrimi ile de bataryadan çekilen enerji miktarı azalmıştır.

Qian ve ark. (2016) lityum-iyon batarya paketini soğutmak için içerisinden soğutucu akışkan geçen mini kanallara sahip soğutma plakalarını kullanmışlardır. Mini kanal sayısının ve farklı soğutucu akışkan debisinin batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımına ve batarya soğutma performansına etkilerini incelemişlerdir. İki ile yedi arasında değişen mini kanal sayısının soğutma performansı ve batarya yüzeyi sıcaklık dağılımları incelendiğinde, kanal sayısı beşe kadar iyi bir performans artışı sağlanırken kanal sayısı beşten fazla olduğunda performansta ve sıcaklık dağılımlarında çok fazla iyileşme olmadığını tespit etmişlerdir.

Manivannan ve ark. (2011) bir soğutma plakası üzerinde Taguchi – GRA yöntemiyle çok amaçlı optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. Kanatçık genişliği, yüksekliği ve uzunluğunu tasarım değişkeni olarak belirlemişler ve ortalama ısı transfer katsayısını, basınç düşümünü, termal direnci ve sistemin kütlesini amaç fonksiyonları olarak belirleyip optimize etmişlerdir. Taguchi – GRA yöntemiyle optimal soğutma plakası geometrisini belirlemişlerdir.

Baloch ve ark. (2015) güneş panellerinin soğutulmasında daralan kanala sahip bir soğutma plakası kullanmışlardır. Kanalin daralma açısının güneş panelinin en yüksek sıcaklığına ve sıcaklık dağılımına olan etkisini hem deneysel hem de nümerik olarak incelemişlerdir. Daralan kanal geometrisi ile birlikte daha homojen bir sıcaklık

dağılımının mümkün olduğunu tespit etmişlerdir. Tasarladıkları soğutma sistemi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



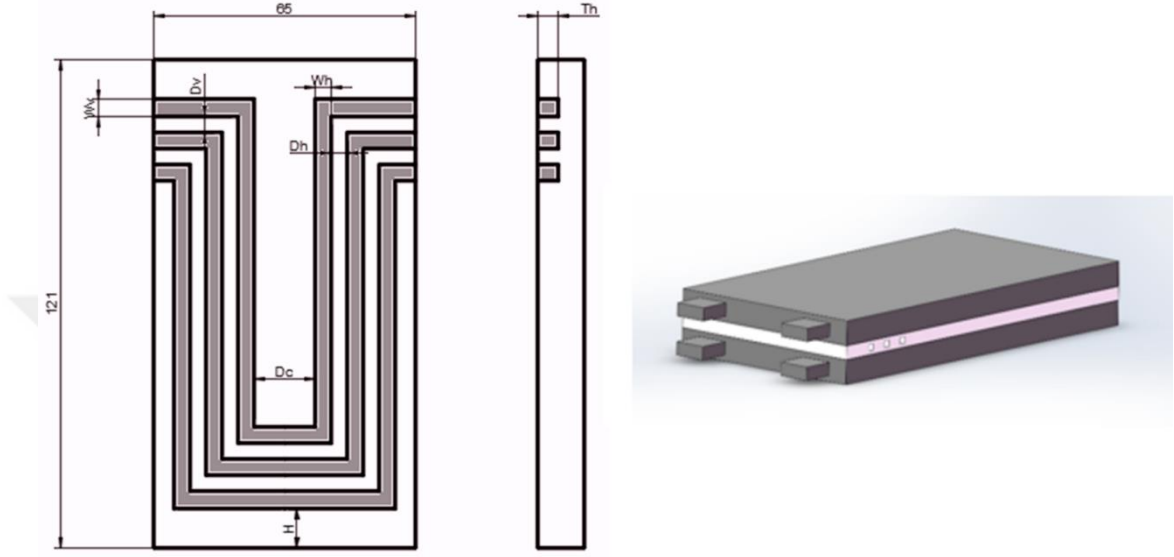
Şekil 2.5. Daralan kanal ile soğutma sistemi (Baloch ve ark., 2015)

Naquiuddin ve ark. (2018) mikro kanallı soğutma plakaları tasarımında Taguchi – Grey optimizasyon yöntemini kullanmışlardır. Yapılan çalışmada homojen sıcaklık dağılımı ve basınç düşümünü azaltmak amaçlanmıştır. Basınç düşümünü en çok etkileyen parametrelerin sırasıyla kanatçık genişliği, kütleli debi, kanal genişliği ve kanatçık yüksekliği olduğunu görmüşlerdir.

E ve ark. (2018) bir batarya modülünü tasarlarlarken ortogonal deney tasarımı metoduyla soğutucu plakanın tasarım değişkenlerinin soğutma performansına etkilerini incelemişlerdir. Kanal genişliği, kanal yüksekliği, kanal sayısı ve soğutucu akışkan debisinin ısı transferine olan etkilerini incelemişler ve kanal sayısının en çok etkileyen değişken olduğunu, soğutucu akışkan debisinin ikinci sırada olduğunu ve kanal yüksekliğinin en az etkileyen değişken olduğunu görmüşlerdir. Homojen sıcaklık dağılımında ise kanal sayısı ve soğutucu akışkan debisinin etkilerinin benzer olduğunu ve ana etken unsurlar olarak sayılabileceğini ve kanal genişliği ve yüksekliğinin ise ikincil etken unsurlar sayılabileceğini tespit etmişlerdir.

Chen ve ark. (2019) bir batarya modülünü soğutmak için içerisinde soğutucu akışkan geçen mini kanallara sahip soğutma plakaları kullanmışlardır. Deney tasarım yöntemi

olarak LHS kullanmışlar ve CFD çalışmaları yürütmüşlerdir. Değişkenlerin etkisini görmek için duyarlılık analizi yapmışlardır. Duyarlılık analizi sonuçlarına göre mini kanal yüksekliğinin maksimum sıcaklığa olan etkisinin en yüksek olduğunu (%91.8) tespit etmişlerdir. Kullandıkları soğutma plakası Şekil 2.6’da gösterilmiştir.

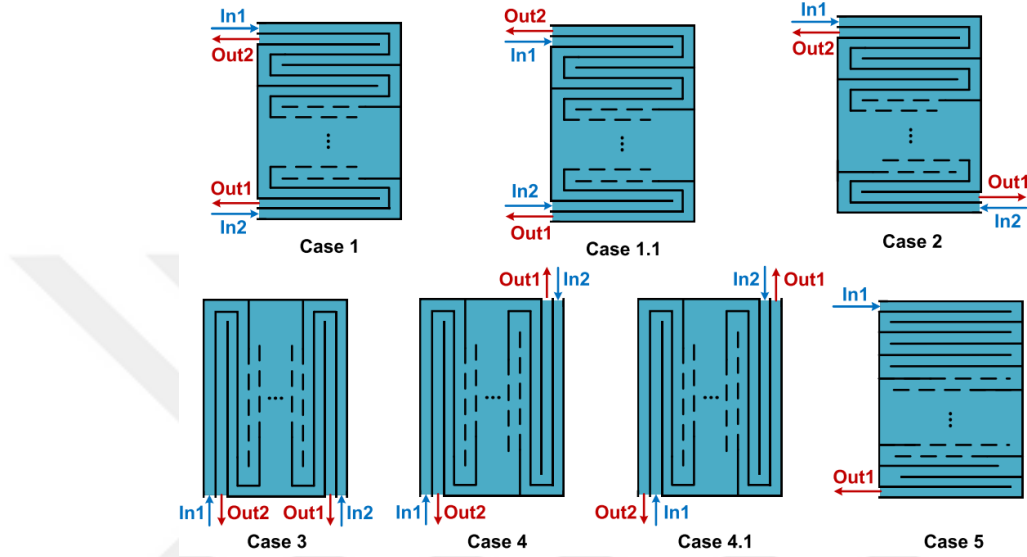


Şekil 2.6. Mini kanallı soğutma plakası örneği (Chen ve ark., 2019)

Deng ve ark. (2019) bir batarya paketinde soğutma plakası sayısı, soğutma plakasındaki kanal geometrisi, soğutucu akışkanın debisi ve soğutucu akışkanın akış yönünün soğutma performansına etkisini incelemişlerdir. Soğutma plakası arttıkça maksimum sıcaklığın ve batarya paketindeki sıcaklık farkının azaldığını tespit etmişlerdir. Eğer soğutma plakası sayısı az olarak tercih edilecekse de soğutma plakalarını batarya paketinin orta kısımlarına koyulmasının daha iyi performans sergilediğini görmüşlerdir. Soğutucu akışkan debisinin artmasıyla birlikte maksimum sıcaklığın ve sıcaklık farkının azaldığını tespit etmişlerdir. Soğutucu akışkanın akış yönünün homojen sıcaklık dağılımını sağlamada etkili olduğunu görmüşlerdir.

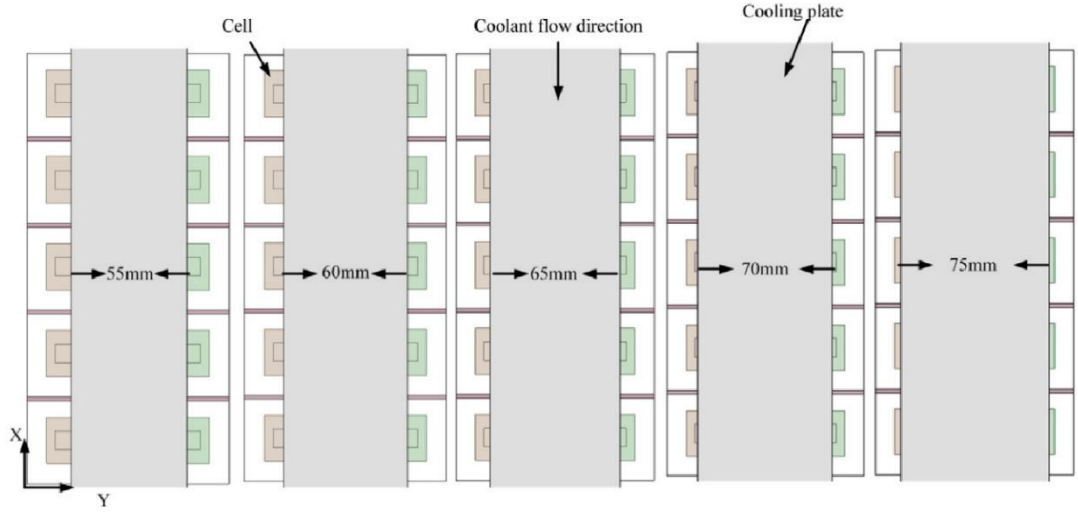
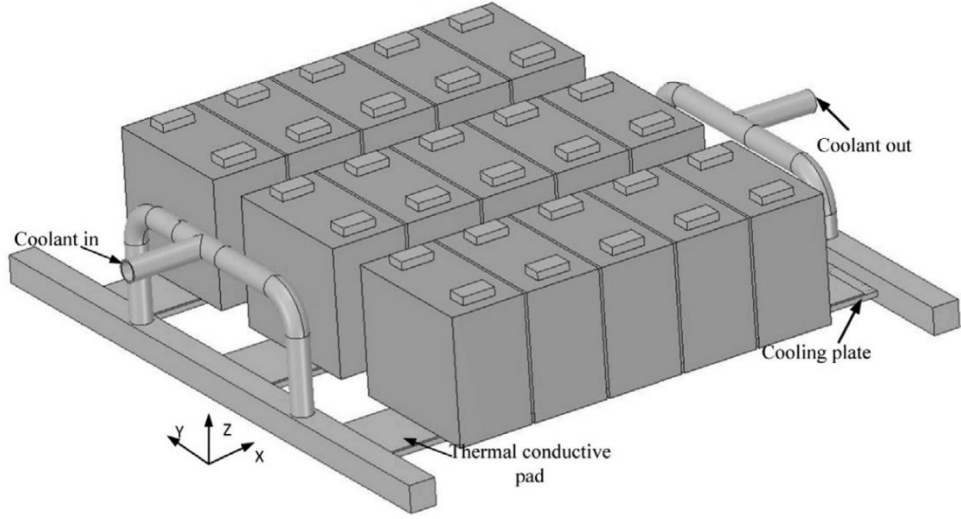
Sheng ve ark. (2019) bir lityum-iyon batarya modülünü soğutmak için içinde serpantin kanallar olan soğutma plakaları kullanmışlardır. Bir soğutma plakası iki adet serpantin kanalı değişik konfigürasyonlarda tasarlayıp performanslarını incelemişlerdir. Ayrıca serpantin kanal genişliğinin de etkilerini incelemişlerdir. Tasarlanan kanallar Şekil 2.7’de

gösterilmiştir. Çift giriş çift çıkış düzenine sahip soğutma plakalarının tek giriş tek çıkış olan soğutma plakalarına göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Özellikle aynı tarafta bir giriş ve çıkış olduğu düzenin avantajlı olduğunu görmüşlerdir. Bu düzende soğutucu akışkan debisinin artmasının maksimum sıcaklığı azalttığını ancak batarya yüzeyi üzerindeki sıcaklık farklılığına pek bir etkisi olmadığını tespit etmişlerdir.



Şekil 2.7. Farklı serpantin kanal tasarımları (Sheng ve ark., 2019)

Shang ve ark. (2019) bir lityum-iyon batarya paketinde, soğutma performansına etki eden birden fazla değişkenin en iyi değerlerini bulmaya çalışmışlardır. Tasarladıkları soğutma sistemi tasarımı Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Soğutma plakası genişliğinin arttıkça ve soğutucu akışkanın sıcaklığı azaldıkça maksimum sıcaklığın azaldığını ancak değişkenlerdeki değişimin etkisinin belli noktalardan sonra azaldığını ve tek bir değişkeni optimizasyon için belirlemenin zor olduğunu söylemişlerdir. Soğutma plakası genişliği, soğutucu akışkan sıcaklığı ve soğutucu akışkanın debisini değişken olarak kabul ederek ortogonal test düzeni oluşturmuşlardır. Ortogonal test düzenine göre yapılan analiz sonuçlarına göre maksimum sıcaklıkta %12.61 ve paket üzerindeki sıcaklık farkında %20.83 iyileşme sağlamışlardır.



Şekil 2.8. Soğutma plakaları ile sıvı soğutma yöntemi (Shang ve ark., 2019)

Deng ve ark. (2020) lityum-iyon batarya modülü için sıvı ile soğutma yöntemini seçmiş ve hücrelerin arasına soğutma plakası tasarlamışlardır. Daha sonra kanal geometrisi üzerinde değişkenler belirleyip çok amaçlı optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. LHS yöntemini kullanarak değişkenler için farklı değerler belirleyip nümerik analizler yapmışlardır. Amaç fonksiyonlarını elde etmek için yüzey cevap yaklaşımını kullanmışlardır. NSGA II algoritmasını kullanarak Pareto optimal eğriyi elde etmişlerdir. Sürtünme katsayısında %85.53 ve ısı transfer katsayısında ise %17.19 değişim elde etmişlerdir.

Bu çalışmada yüksek ısı uzaklaştırma kapasitesinden dolayı sıvı ile soğutma yöntemi seçilmiştir. İki farklı tip soğutma plakası tasarlanarak, tasarım değişkenlerinin optimum değerlerinin bulunması hedeflenmiştir. Literatürde Taguchi ve GRA yöntemlerinin sıklıkla birlikte kullanıldığı görülmüş ancak LHS ve GRA yöntemlerinin beraber kullanımına rastlanmamıştır. Batarya soğutma sistemleri için tasarlanan soğutma plakalarının içinde genişleyen kanal tasarımına sahip soğutma kanalları ile ilgili araştırmaların yetersiz olduğu görlmştir. Bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen hususlar ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında farklı sayıda Lityum Titanat (LTO) anot malzemeye sahip batarya hücrelerinden batarya modülleri için soğutma sistemleri için optimum soğutma sistemi tasarlanması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda LTO batarya hücresindeki ısı üretimi nümerik olarak modellenmiş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Kanal içi akıştaki basınç düşümü CFD sonuçları literatürdeki teorik modellerden faydalanarak doğrulanmıştır. Bu bölümde kullanılan materyal ve yöntemler anlatılmıştır.

3.1. LTO Batarya Hücresi

Son yıllarda bataryalarda anot malzemesi olarak sıklıkla kullanılan karbon temelli malzemeler yerine daha verimli ve daha güvenli malzemeler üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Kalay temelli, antimon temelli ve silisyum temelli malzemeler, farklı metal oksitler, sert karbonlar ve LTO bu malzemelere örnek olarak verilebilir. Diğer malzemelere arasında LTO bazı avantajları sayesinde öne çıkmaktadır. Bu avantajlar maddeler halinde aşağıdaki gibi özetlenebilir (Vikram Babu ve ark., 2018).

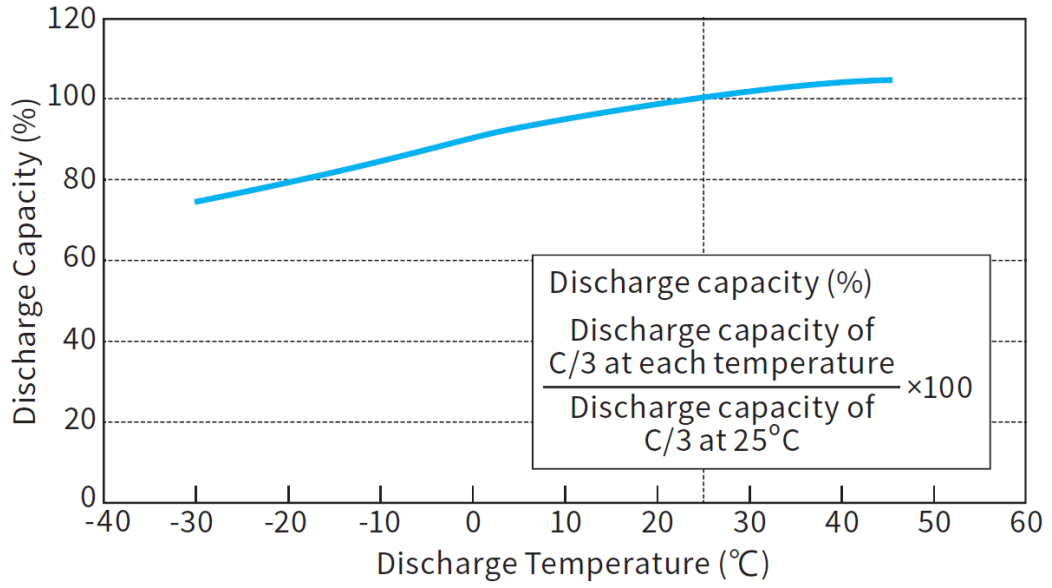
- Hızlı lityum iyonu transferi
- Çevriminin mükemmel tersinirliği
- Yüksek termodinamik stabilitesi
- Şarj ve deşarj sırasında neredeyse yok denilebilecek hacimsel değişim
- Yüksek çevrim ömrü

Bataryalar düşük ve yüksek sıcaklıklar altında farklı performanslar göstermektedirler. Çok düşük sıcaklıklarda enerji kapasitesi, güç kapasitesi ve batarya ömrü ciddi oranlarda azalmaktadır. Sıcaklığın $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düştüğü durumlarda kapasitede %25 oranında kayıp, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ gibi çok daha düşük sıcaklıkta ise enerji yoğunluğunda %95'e varan kayıplar görülebilmektedir. Çok yüksek sıcaklıklarda da kapasite kayıpları, performans kayıpları ve kendi kendine deşarj gibi sorunlar oluşmaktadır. $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 800 kere şarj – deşarj çevrimi sonucunda %36, $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 490 kere şarj – deşarj çevriminde ise %70'lere varan kapasite kayıpları görülebilmektedir (Wu ve ark., 2019). Bu çalışmada, nümerik analizlerde ve deneysel çalışmada Toshiba markasının SCiB model bataryası kullanılmıştır. Kullanılan bataryanın genel özellikleri Çizelge 3.1'de, farklı

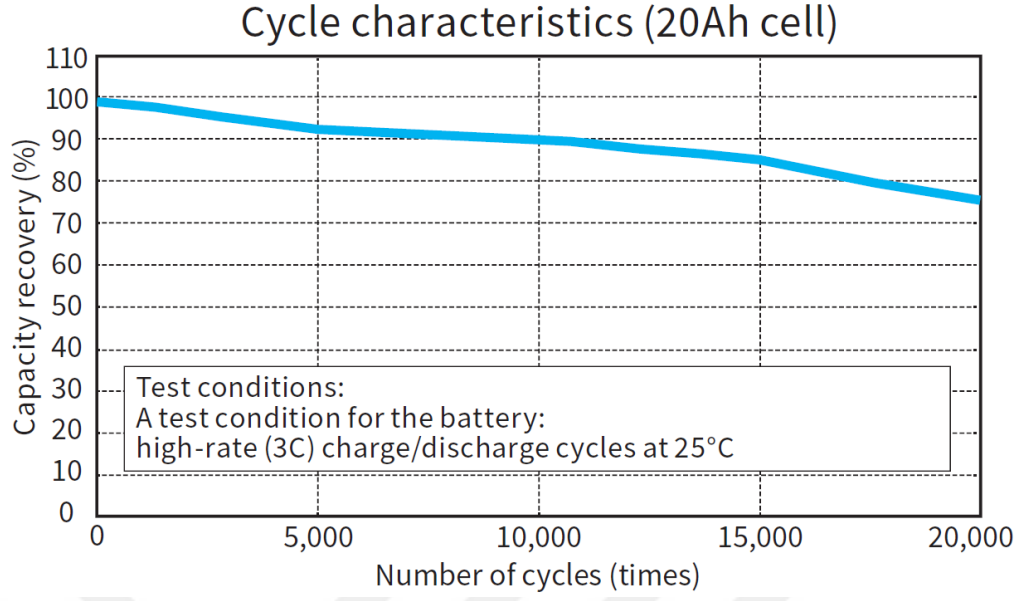
sıcaklıklardaki kapasite değerleri Şekil 3.1’de ve batarya kapasitesinin şarj – deşarj çevrim sayısı ile değişimi ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. LTO bataryanın genel özellikleri (Anonim 2021a)

Özellik	Değeri
Nominal voltaj	2.3 V
Kapasite	20 Ah
Alt kesme voltajı	1.5 V
Üst voltaj limiti	2.7 V
Çalışma sıcaklığı	-30 °C / 55 °C
Ağırlık	510 g
Boyutlar	103x115x22 mm ³
İç direnç	1 mΩ (SOC 50% 25 °C)
Dış cidar malzemesi	Alüminyum
Enerji yoğunluğu	90 Wh/kg

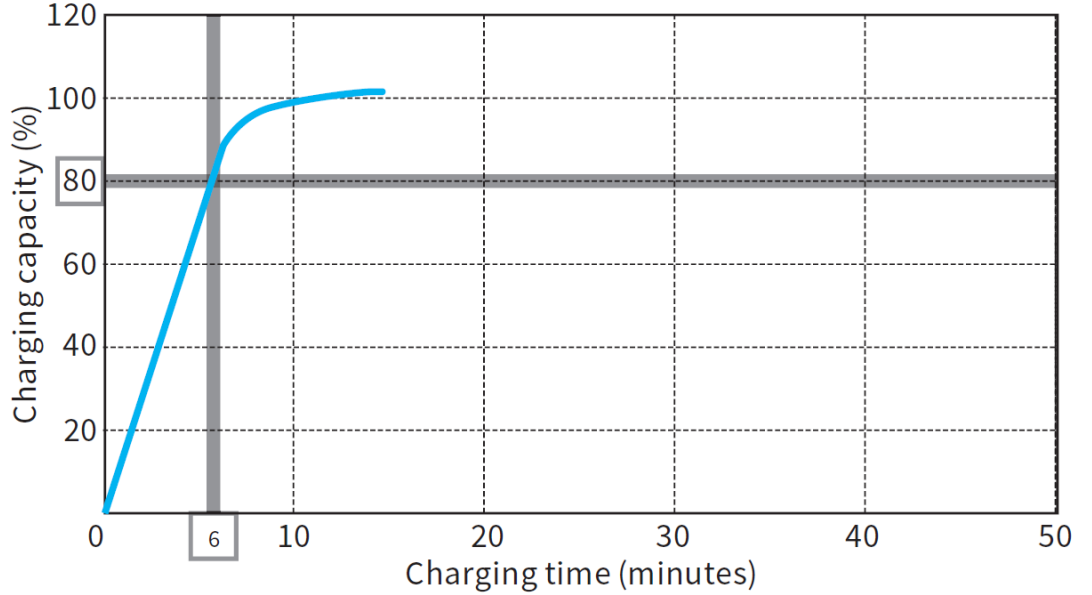


Şekil 3.1. Sıcaklık değişimine bağlı batarya deşarj kapasitesi (Anonim 2021a)



Şekil 3.2. Şarj – deşarj çevrim sayısına bağlı kapasite geri kazanımı oranının değişimi (Anonim 2021a)

Bataryaların belirli bir şarj – deşarj çevrim sayısı kapasitesi vardır. Çevrim sayısı arttıkça bataryaların kapasitesi azalmaktadır. Lityum-iyon bataryaların tercih edilmesinin sebeplerinden birisi de hızlı şarj – deşarja olanak sağlamasıdır. Bu çalışmada kullanılan bataryanın zamana bağlı doluluk oranının değişimi Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Zamana bağlı batarya doluluk oranının değişimi (Anonim 2021a)

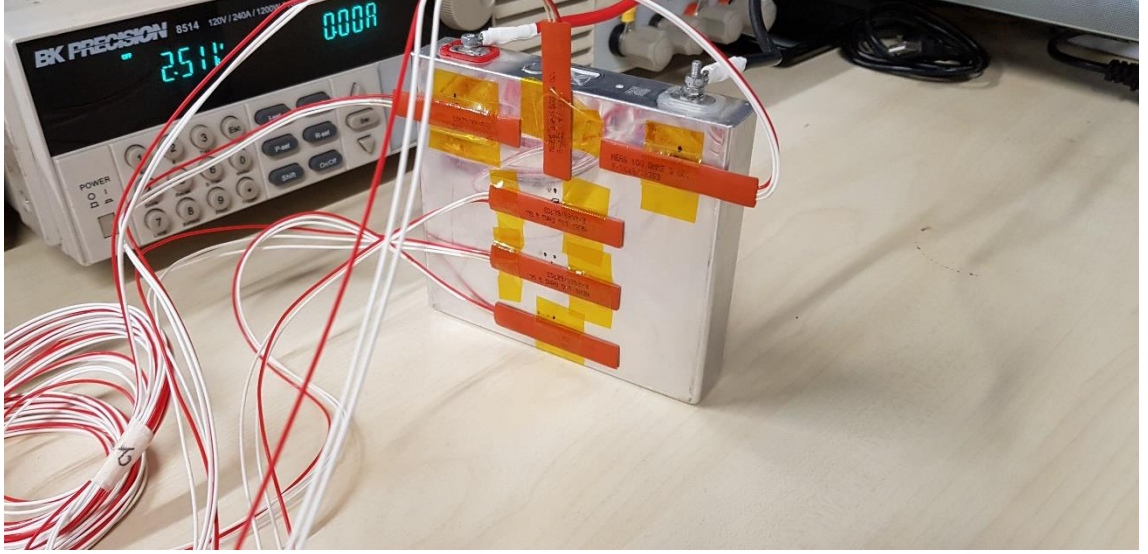
3.2. Deney Düzenegi

Bu çalışmada, tek bir batarya hücresinin belirli akımlarda deşarj edilmesiyle nümerik analizler için gereken bazı veriler elde edilmiştir. Ayrıca nümerik analizin sıcaklık değerleri deneysel verilerle doğrulanmıştır. Daha önceden özellikleri verilen batarya hücresinin üzerinde noktalar belirlenmiş (Şekil 3.4) ve sıcaklık değerleri bilgisayar ortamına kaydedilmiştir.



Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan LTO batarya hücresi

Bataryanın deşarj işlemi için BK Precision 8514 model cihaz ve sıcaklık ölçümleri için altı adet ısıl çift kullanılmıştır (Şekil 3.5). BK Precision 8514 cihazının ölçüm hassasiyetlerinin akım için 0.1 mA ve voltaj için 1 mV olduğu üretici firma tarafından belirtilmiştir (Anonim 2021b). Deneylerde kullanılan ısıl çiftler -40 °C ile 400 °C arasında ve ± 0.75 °C doğrulukla ölçüm yapabilmektedir. Toplam deneysel hatayı hesaplamak Moffat (1988) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Deneylerdeki en yüksek hata ± 3 mertebelerinde hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Deney düzeneği

Deneylerden elde edilen veriler iki farklı amaç için kullanılmıştır. Birinci amaç bataryanın özgül ısını tespit etmektir. İkinci amaç ise nümerik modelin doğrulanmasıdır. Bu amaçlar için tam dolu batarya hücresi sırasıyla 20 A, 40 A, 60 A ve 100 A sabit akımla 1.8 V voltaj değerine kadar deşarj edilmiştir.

3.3. Nümerik Model

Bu çalışmada CFD analizleri ANSYS Fluent yazılımını kullanılarak yapılmıştır. Bu kısımda CFD analizlerinde kullanılan denklemlerden bahsedilecektir.

Lityum iyon pilleri modellerken fizik temelli birçok alanda modellemek gerektiğinden zorluklarla karşılaşılır. Farklı ölçeklerdeki karmaşık fizikler problemi çözmeyi zorlaştırır. Termal analiz yapmanın amacı bataryadaki sıcaklık dağılımını elde etmektir. Elektrot çifti ölçeğinde baktığımızda Lityum iyonlarının transferindeki fizik anot, seperatör ve katot sandviç yapılarında gerçekleşir. Aktif materyalde Lityum iyonlarının transferi ise atomik ölçektedir. Multi-Scale Multi-Domain (MSMD) yaklaşımı farklı alanlarda farklı fiziklerin çözümünde kullanılır.

3.3.1 MSMD yaklaşımı

Bataryanın ısı ve elektrik alanı CFD ile aşağıdaki batarya ölçeğindeki denklem (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) ile çözümlenmektedir.

$$\frac{\partial(\rho_b c_{p,b} T_b)}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + \dot{q}_{gen} \quad (3.1)$$

$$\dot{q}_{gen} = S_p |\nabla V_p|^2 + S_n |\nabla V_n|^2 + \dot{q}_{ECh} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot (S_p \nabla V_p) = -j_{ECh} \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot (S_n \nabla V_n) = j_{ECh} \quad (3.4)$$

Burada ρ_b [kg/m³] bataryanın özgül ağırlığı, $c_{p,b}$ [J/(kgK)] bataryanın özgül ısısı, T [K] sıcaklığı ve k_b [W/(mK)] bataryanın ısı iletim katsayısıdır. S_n ve S_p [S/m] ise sırasıyla negatif ve pozitif elektrotların elektrik iletkenliğidir. V_n ve V_p [V] ise sırasıyla negatif ve pozitif elektrotların potansiyel farklarıdır. $\dot{q}_{gen}$ [W/m³] ise direnç kaynaklı ve elektrokimyasal reaksiyonlar kaynaklı toplam ısınmayı, $\dot{q}_{ECh}$ [W/m³] ve j_{ECh} [A/m²] ise sırasıyla elektrokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan ısı üretimini ve hacimsel akım yoğunluğunu temsil etmektedir (Kim ve ark., 2011).

ANSYS Fluent yazılımında Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) modeli ve eşdeğer devre modeli-Equivalent Circuit Model (ECM) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada NTGK modeli kullanılmıştır.

3.3.2 NTGK modeli

NTGK modeli yarı ampirik elektrokimyasal modeldir. Kwon ve ark. (2006) tarafından önerilmiş ve diğer araştırmacılar tarafından da kullanılmıştır (Kim ve ark., 2008 ve Yi ve ark., 2013). Denklem (3.3) ve (3.4)' teki hacimsel akım yoğunluğu ve potansiyel alan denklem (3.5)' te cebirsel olarak ifade edilmiştir.

$$j_{Ech} = \frac{Y}{V_{olume}} [U - (V_p - V_n)] \quad (3.5)$$

V_{olume} tek bir batarya hücresindeki aktif hacmini temsil eder. U ve Y bataryanın deşarj oranına bağlı fonksiyonlardır ve Denklem (3.6) ve (3.7)' dan elde edilir. U ve Y fonksiyonları kullanılarak elde edilen elektrokimyasal reaksiyonlardan dolayı oluşan ısı üretimi ise Denklem (3.8)' de verilmiştir.

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DoD)^n \right) \quad (3.6)$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 b_n (DoD)^n \right) \quad (3.7)$$

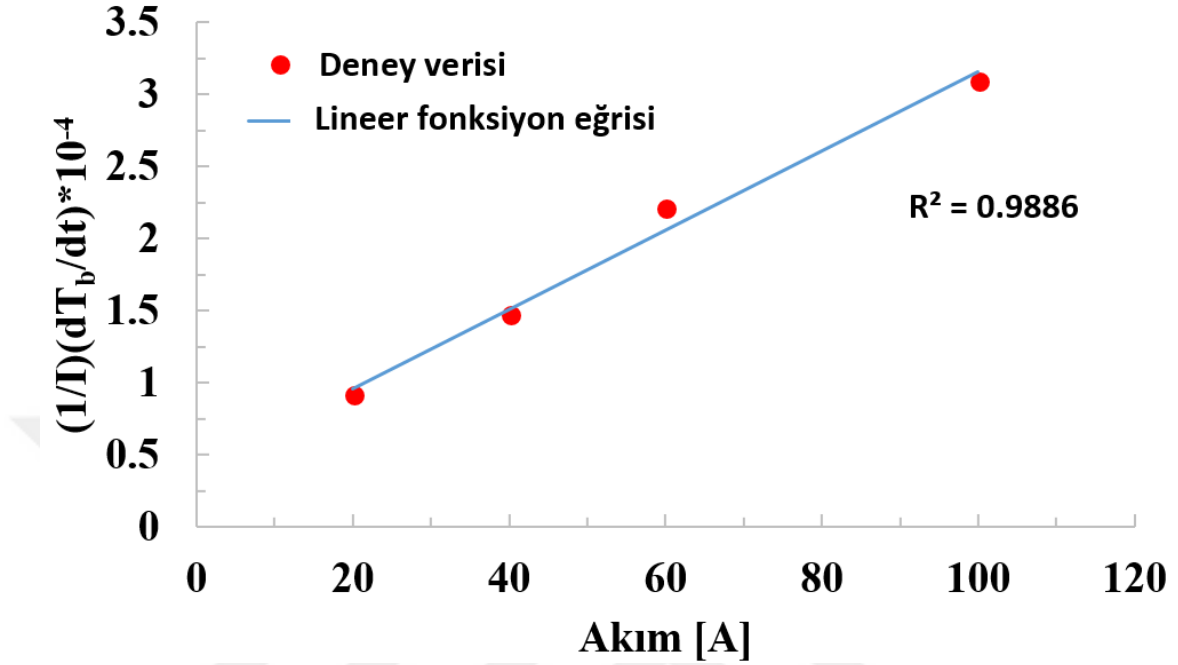
$$\dot{q}_{Ech} = j_{Ech} \left[U - (V_p - V_n) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (3.8)$$

Isı üretimi denkleminin bir başka formu olan Denklem (3.9) ise bataryanın özgül ısını hesaplamak için kullanılmıştır.

$$\left(\frac{1}{I} \right) \left(\frac{dT}{dt} \right) = \frac{R_j}{m_b c_{p,b}} \cdot I + \frac{T}{m_b c_{p,b}} \frac{dU}{dT} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)' bakıldığında $\dot{q}_{Ech}$ belirli voltaj aralığında sabit olduğu kabulüyle $1/I(dT/dt)$ fonksiyonunun akıma bağlı bir lineer fonksiyon olduğu düşünülebilir (Bernardi ve ark., 1985, Chen ve ark., 2019 ve Deng ve ark., 2020). Bu fonksiyonu elde etmek için tam dolu batarya hücresi 20 A, 40 A, 60 A ve 100 A akım değerlerinde deşarj edilip, elektrokimyasal ısı transferinin sabit kabul edilebileceği 2.2 V ile 2 V arasındaki sıcaklık değerleri deneysel çalışmayla elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler ve lineer

fonksiyon Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Lineer fonksiyonun eğimi kullanılarak bataryanın özgül ısısı ($c_{p,b}$) 729.9 J/(kgK) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. Deneysel veriler ve lineer fonksiyon eğrisi

3.3.3 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi

Bu çalışmada akışkanın hareketini, ısı transferini ve kimyasal reaksiyonları içeren sistemleri bilgisayar yazılımıyla analiz etmemize olanak veren HAD yöntemi kullanılmıştır. HAD çözüm yönteminde sonlu hacimler metodu kullanılır. Sonlu hacimler metodunda ilk adım olarak çözüm bölgesi belirli sayıda ayrık kontrol hacimlerine bölünür ve korunum denklemlerinin her bir hacim elemanı üzerinde integrasyonu sağlanır. Kontrol hacmi için kullanılan integral formundaki denklemler cebirsel denklemlere dönüştürülür ve iteratif yöntemler kullanılarak yaklaşık çözümler edilmeye çalışılır (Sevilgen, 2010).

Katı bölgeler için kullanılan enerji korunumu denklemi Denklem (3.10)' da verilmiştir (Gu, 1983, Deng ve ark., 2019, ve Bulut ve ark., 2021)

$$\frac{\partial(\rho_c c_{p,c} T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k_c \nabla T) \quad (3.10)$$

Burada ρ_c [kg/m³] soğutma plakasının yoğunluğunu, $c_{p,c}$ [J/(kgK)] soğutma plakasının özgül ısısını, k_c [W/(mK)] soğutma plakasının ısıl iletkenlik katsayısını temsil etmektedir.

Akışkan bölgesi için kütle, momentum ve enerji korunumu denklemleri Denklem (3.11), (3.12) ve (3.13)' de verilmiştir (Shah ve London, 1978, Mirmanto, 2013 ve Kılıç ve ark., 2020).

$$\frac{\partial(\rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{V}) = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial(\rho_f \vec{V})}{\partial t} + \rho_f (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) + \rho_f \vec{g} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial(\rho_f c_{p,f} T)}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla(\rho_f c_{p,f} T) = \nabla \cdot (k_f \nabla T) \quad (3.13)$$

Burada ρ_f [kg/m³] akışkanın yoğunluğunu, $c_{p,f}$ [J/(kgK)] akışkanın özgül ısısı, k_f [W/(mK)] akışkanın ısıl iletim katsayısı, $\vec{V}$ [m/s] akışkanın hızını, p [Pa] akışkanın basıncını ve $\vec{g}$ [m/s²] yer çekimi ivmesini temsil etmektedir.

Bu çalışmada CFD ile elde edilen basınç düşümü değerleri teorik basınç düşümü modelleriyle doğrulanmıştır. Basınç düşümünün teorik modellenmesinde Denklem (3.14) ve Denklem (3.24) arasındaki denklemler kullanılmıştır (Shah, 1978, Shah ve London, 1978, Mirmanto, 2013, Kılıç ve ark., 2020, Sevilgen ve ark., 2021 ve Bulut ve ark., 2021).

$$\Delta P_{total} = \Delta P_f + \Delta P_{180^\circ} \quad (3.14)$$

Burada ΔP_f sürtünme kayıplarından dolayı oluşan basınç düşümünü, ΔP_{180° 180°'lik dönüşlerden kaynaklanan basınç düşümünü ve ΔP_{total} ise ΔP_f ve ΔP_{180° 'den kaynaklanan basınç düşümlerinin toplamını ifade etmektedir.

$$L_h \approx 0.05 \text{ Re} \cdot D_h \quad (3.15)$$

$$D_h = 2 \cdot \frac{(w \cdot h)}{(w + h)} \quad (3.16)$$

$$U_m = \frac{\dot{m}}{\rho_l \cdot A_{cs}} \quad (3.17)$$

$$\text{Re} = \frac{(\rho_l U_m D_h)}{\mu} \quad (3.18)$$

Burada L_h [m] hidrodinamik giriş uzunluğunu, D_h [m] hidrolik çapı, U_m [m/s] soğutucu akışkanın ortalama hızı, $\dot{m}$ [kg/s] soğutucu akışkanın kütleli debisi, A_{cs} [m²] soğutma kanalının kesit alanı, Re Reynolds Sayısını, μ [Pa.s] soğutucu akışkanın dinamik viskozitesini temsil etmektedir.

Eğer kanal veya borunun toplam uzunluğu hidrodinamik giriş uzunluğunda az ise sürtünmeden dolayı oluşan basınç düşümü gelişmekte olan ve tam gelişmiş akışlar için Denklem (3.19) ile hesaplanabilir.

$$\Delta P_f = \frac{\rho_l \cdot U_m^2}{2} \left(\frac{4f_{app}L}{D_h} \right) \quad (3.19)$$

$$f_{app} = \frac{3.44}{Re\sqrt{L^+}} + \frac{(f_{fd} \cdot Re) + \frac{K_{(\infty)}}{4L^+} - \frac{3.44}{\sqrt{L^+}}}{Re \left(1 + \frac{c}{(L^+)^2}\right)} \quad (3.20)$$

$$L^+ = \frac{L/D_h}{Re} \quad (3.21)$$

$$K_{(\infty)} = 0.674 + 1.2501\alpha + 0.3417\alpha^2 - 0.8358\alpha^3 \quad (3.22)$$

$$c = (0.1811 + 4.3488\alpha + 1.6027\alpha^2) \times 10^{-4} \quad (3.23)$$

$$\alpha = \min(w, h) / \max(w, h) \quad (3.24)$$

$$f_{fd} = \frac{24}{Re} (1 - 1.3553\alpha + 1.9467\alpha^2 - 1.7012\alpha^3 + 0.9567\alpha^4 - 0.2537\alpha^5) \quad (3.25)$$

Burada görünür Fanning sürtünme f_{app} Denklem (3.20) kullanılarak hesaplanabilir. Cidardaki sürtünme kuvvetlerinin atalet kuvvetlerine oranı olan Fanning sürtünme faktörünü (f_{fd}) ise Denklem (3.25) kullanılarak hesaplanabilir. Aradaki denklemlerde L kanalın uzunluğunu, Denklem (3.21) ile hesaplanan L^+ boyutsuz kanal uzunluğunu, Denklem (3.22) ile hesaplanan $K_{(\infty)}$ tam gelişmiş kademeli basınç düşümü katsayısını, Denklem (3.23) ile hesaplanan c ayarlama katsayısı, Denklem (3.24) ile hesaplanan α en boy oranını temsil eder.

180°'lik dönüşlerden kaynaklanan basınç düşümünü hesaplamak için Denklem (3.26) kullanılmıştır.

$$\Delta P_{180^\circ} = \frac{1}{2} \rho_l \cdot U_m^2 \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (3.26)$$

$$\xi = 0.46(Re)^{\frac{1}{3}}(1 - 0.18C + 0.016C^2)(1 - 0.2\beta - 0.0022\beta^2) \left[1 + 0.26 \left(\frac{L_s}{D_h} \right)^{\frac{2}{3}} - 0.0018 \left(\frac{L_s}{D_h} \right)^2 \right] \quad (3.27)$$

Burada n 180°'lik dönüşlerin sayısını ve Denklem (3.27) ile hesaplanan ξ ise Reynolds Sayısının 100 ile 1000 arasındaki olduğu durumlarda dirsek kayıp katsayısını, Shah, 1978 tarafından tanımlanan C 180° dönüşlerin çap oranını, β kanal yüksekliğinin kanal genişliğine oranını ve L_s ise serpentine kanalların arasındaki dikey mesafeyi ifade eder.

3.3.4 Isı transferi hesaplamaları

Soğutucu akışkana aktarılan ısı transferi miktarı $\dot{Q}_C$ [W] Denklem (3.28) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_C = \dot{m} \cdot c_p (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (3.28)$$

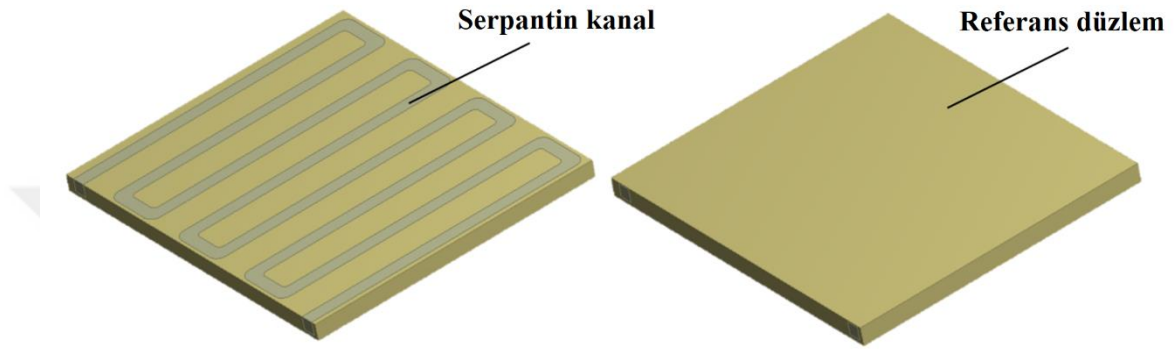
Burada $T_{c,in}$ [K] ve $T_{c,out}$ [K] sırasıyla soğutucu akışkanın kanala giriş ve kanaldan çıkış sıcaklıklarıdır. $\dot{Q}_C$, Denklem (3.29), Denklem (3.30) ve Denklem (3.31) ile de hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_C = h_{avg} A_s \Delta T_{lm} \quad (3.29)$$

$$\Delta T_{lm} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln((\Delta T_1) / (\Delta T_2)) \quad (3.30)$$

$$\Delta T_1 = T_{ref} - \Delta T_{c,in}, \quad \Delta T_2 = T_{ref} - \Delta T_{c,out} \quad (3.31)$$

Burada h_{avg} [W/(m²K)] ortalama ısı taşınım katsayısını, A_s [m²] serpantin kanalın toplam ısı transfer yüzey alanını ve ΔT_{lm} [K] logaritmik ortalama sıcaklık farkını temsil eder. Ortalama ısı taşınım katsayısını ve toplam ısı transferini hesaplarken simülasyonun sonundaki sıcaklık değerleri kullanılmıştır. T_{ref} [K] ise akışkan bölgesine komşu olan referans düzlemin ortalama yüzey sıcaklığını temsil eder. Referans düzlem Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Soğutma plakasındaki serpantin kanal ve referans düzlem

Bu çalışmada kullanılan soğutma plakalarının ve soğutucu akışkanın malzeme özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Soğutma plakası ve soğutucu akışkan malzemelerinin özellikleri

Malzeme	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kgK)]	k [W/(mK)]	μ [Pa.s]
Alüminyum	2719	871	202,4	-
Su	998,2	4182	0,6	0,001

3.4. LHS – GRA yöntemi

Bu çalışmada dört hücreden oluşan batarya modülüne ait soğutma plakalarının, daha önceden literatürde bir arada kullanılmayan LHS ve GRA yöntemlerinin bir arada kullanılmasıyla optimizasyon çalışması yapılmıştır. GRA farklı değişkenlerin farklı

amaçlara olan etkilerini hesaplamakta kullanılan etkili bir yöntemdir. Chamoli ve ark., (2016) GRA yöntemini kullanarak içerisinde delikli diskler bulunan bir ısı değiştiricinin geometrik değişkenlerin ve akış hızının performansa olan etkilerini incelemişlerdir. Bezbaruah ve ark., (2020) geometrik değişkenlerin hava ısıtıcı kollektörlerdeki termal ve hidrolik karakteristiklerine etkisini hesaplamak için GRA yöntemini kullanmışlardır.

GRA yöntemi sıklıkla deneysel tasarım yöntemi olarak Taguchi yöntemiyle birlikte kullanılmıştır. Ancak ortogonal deney tasarımının tüm kombinasyonları incelememesinden dolayı, tüm giriş değişkenlerinin etkilerinin görülmesi gereken durumlarda önerilmemektedir (Prasad ve ark., 2012). LHS ise aynı örneklem boyutuna sahip rastgele giriş değişkenlerinin çok daha büyük bir tasarım alanını temsil edebilir ve yanıtların genel ortalamasının tahmininde güçlü olduğu kanıtlamış bir yöntemdir (Chen ve ark., 2013, Xu ve ark., 2013, Albak, 2021 ve Bulut ve ark., 2021). Bu sebeplerden dolayı CFD çalışmalarında da sıklıkla kullanılmaktadır. Navid ve ark., (2018) bir dizel motorun çalışma parametrelerini optimize etmek için Nelder – Mead algoritmasını kullanmışlar ve deney tasarım yöntemi olarak LHS’ i seçmişlerdir. Thakkar ve ark., (2021) santrifüj pompa tasarımının çok amaçlı optimizasyonu için deney tasarım yöntemi olarak LHS kullanmışlar ve tasarım alanında değişkenlerin dağılımının güzel olmasından dolayı optimizasyon algoritmasının sağlamlığında ve güvenilirliğinde güzel sonuçlar elde etmişlerdir. Yukarıdaki sebeplerden dolayı LHS – GRA yöntemi yeni bir yaklaşım olarak bu çalışmada kullanılmıştır.

Gri ilişki teorisi ilk defa Ju-Long, 1982 tarafından önerilmiş bir sistem bilimi teorisidir. GRA, birden çok değerlendirme parametresi altında birden çok alternatifi olan durumları çözmek için uygundur. GRA, seriler arasındaki ilişkiyi tahmin edebilen ve analitik veya geometrik verilere ait bir etki hesaplama yaklaşımıdır (Zhang ve ark., 2011)]. Yaklaşımın ana adımları, gri ilişkisel üretim, gri ilişkisel mutlak fark dizilerinin hesaplanması, gri ilişkisel katsayı hesaplaması ve gri ilişkisel derece hesaplamasını içerir.

Bu çalışmada GRA, soğutma sisteminin güç kaybını azaltmak ve basınç düşüşünü azaltarak ve konvektif ısı transfer katsayısını artırarak verimliliği artırmak için kullanılmıştır.

GRA' daki ilk aşamadır normalizasyondur. Bu aşamada, ham veriler standartlaştırılır ve karşılaştırmaya izin vermek için $[0,1]$ aralığında değerlere dönüştürülür. Normalleştirme işleminde farklı faktörler için Denklem (3.32) ve (3.33) kullanılır.

$$y_i(k) = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (3.32)$$

$$y_i(k) = \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (3.33)$$

Burada Denklem (3.32) daha yüksek değerlerin daha iyi olduğu, Denklem (3.33) ise daha düşük değerlerin daha iyi olduğu durumlar için kullanılır.

GRA' daki ikinci aşama, gri ilişkisel mutlak sapma dizilerinin hesaplanmasıdır. Mutlak sapma dizileri değerleri olan $\Delta i(k)$ Denklem (3.34) ile ifade edilebilir.

$$\Delta i(k) = |y_0(k) - y_i(k)| \quad (3.34)$$

Burada $y_0(k)$ referans diziyi ve $y_i(k)$ karşılaştırmalı diziyi tanımlar. Denklem (3.35) ve Denklem (3.36) ise maksimum ve minimum mutlak sapmaları tahmin etmek için kullanılır.

$$\Delta max = \max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)| \quad (3.35)$$

$$\Delta min = \min_i \min_k |y_0(k) - y_i(k)| \quad (3.36)$$

Burada Δmax , $y_0(k)$ ve $y_i(k)$ arasındaki mutlak maksimum sapma değeri, Δmin ise $y_0(k)$ ve $y_i(k)$ arasındaki mutlak minimum sapma değerini ifade eder.

Referans dizisi $y_0(k)$ ile karşılaştırmalı dizi $y_i(k)$ arasındaki gri ilişki katsayısı $\xi_i(k)$ Denklem (3.37) ile hesaplanabilir.

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta min + \phi \Delta max}{\Delta i(k) + \phi \Delta max} \quad (3.37)$$

Burada ϕ , 0 ile 1 aralığında sınırlı olan tanımlama katsayısıdır. Çoğu çalışmada ϕ değeri 0.5 olarak alındığından dolayı bu çalışmada da 0.5 olarak alınmıştır (Turgut ve ark., 2012).

Gri ilişki derecesi olan Y_i , referans dizi ile karşılaştırmalı dizi arasındaki korelasyon seviyesini tanımlar ve Denklem (3.38) ile hesaplanabilir.

$$Y_i = \sum_{k=1}^n w_j(k) \xi_i(k) \quad (3.38)$$

Burada $w_j(k)$, k faktörünün normalleştirilmiş ağırlık değeridir. Parametreler eşit ağırlığa sahipse, gri ilişki derecesi Denklem (3.39) ile hesaplanabilir.

$$Y_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3.39)$$

3.5. Vekil Modelleme Yöntemleri

Vekil modelleme yöntemleri, yüksek çözüm zamanı ve kapasitesi gerektiren mühendislik analizlerinin hesaplama sürecini kısaltmak için önerilmiştir (Xiao ve ark., 2014). Bu çalışmada on iki hücreden oluşan batarya paketine ait soğutma sisteminin optimizasyonu için vekil modelleme yöntemi tercih edilmiştir. Vekil modelleme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde en fazla kullanılan yöntemlerin en küçük kareler regresyon yöntemi (EKK), hareketli en küçük kareler yöntemi (HEKK), kriging yöntemi ve radyal tabanlı fonksiyonlar yöntemi (RTF) olduğu görülmektedir (Zadeh ve ark., 2009;

Yang ve ark., 2015; Tüten, 2016; Albak, 2020). Bu çalışmada farklı yöntemler denenmiş ve RTF yöntemi isabetli sonuçları vermiştir.

Radyal tabanlı fonksiyonlar, radyal olarak simetrik fonksiyon olan ϕ 'nin lineer kombinasyonlarının interpolasyonunu kullanır (Wild ve ark., 2008; Albak, 2020).

$$f(x) = \sum_{j=1}^K \lambda_j \Phi(\|x - c^{(j)}\|) \quad (3.40)$$

Denklem (3.40)' taki $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K]$ model parametreleri vektörünü, $c^{(j)}, j = 1, 2, \dots, K$ temel fonksiyon merkezini temsil eder. Model parametreleri ise Denklem (3.41) ile hesaplanmaktadır.

$$\lambda = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T f \quad (3.41)$$

Burada Φ , radyal simetrik fonksiyondur ve Denklem (3.42), (3.43) ve (3.44) formlarında bulunabilir (Koziel ve Leifsson, 2013; Albak, 2020).

$$\Phi(r) = \exp(-cr^2) \text{ (Gaussian)} \quad (3.42)$$

$$\Phi(r) = \sqrt{r^2 + c^2} \text{ (Çoklukare, multiquadratic)} \quad (3.43)$$

$$\Phi(r) = \frac{1}{\sqrt{r^2 + c^2}} \text{ (Ters çoklukare, inverse multiquadratic)} \quad (3.44)$$

3.6. Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon, bir veya daha fazla amaç fonksiyonlarının kısıt fonksiyonları sağlanacak şekilde minimum veya maksimum değerlerini vermeyi amaçlayan tasarım değişkenlerinin en uygun değerlerinin bulunmasına yönelik kullanılan bir yöntemdir. (Arora, 1989; Albak, 2020). Optimizasyon için genel denklemler, amaç fonksiyonu için Denklem (3.45), kısıt fonksiyonları için ise Denklem (3.46) ve (3.47) olarak verilebilir.

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.45)$$

$$h_j(x) = h(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \quad j = 1, \dots, p \quad (3.46)$$

$$g_i(x) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0; \quad i = 1, \dots, m \quad (3.47)$$

burada p toplam eşitsizlik kısıtlayıcılarının sayısını, m toplam eşitsizlik kısıtlayıcılarının sayısını ve $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ise tasarım değişkenlerini temsil etmektedir.

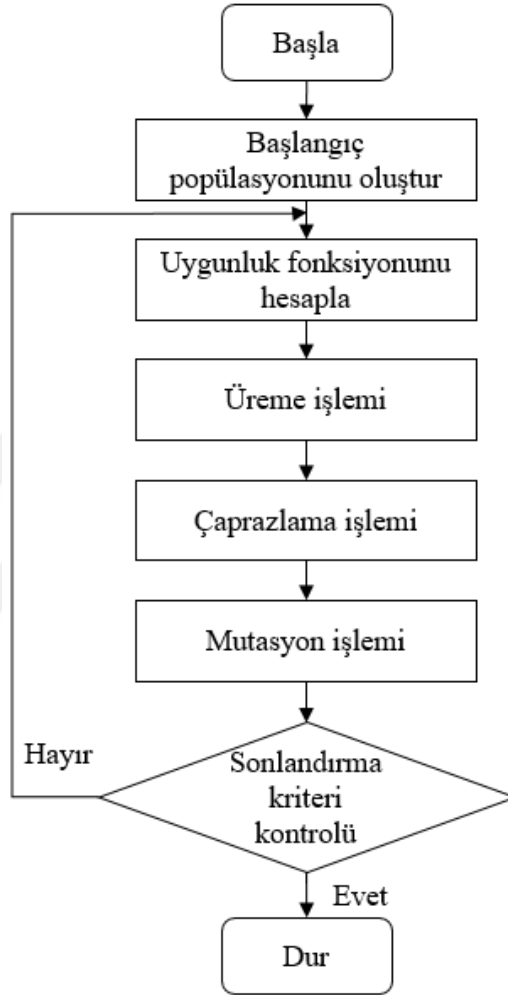
Optimizasyon problemlerinin çözümünde bir çok farklı optimizasyon yöntemi kullanılmaktadır. On iki hücreden oluşan batarya modülü için soğutma sisteminin tasarımının optimizasyon çalışması için NSGA II, NSGA III, MOPSO ve CMOPSO optimizasyon teknikleri kullanılmış ve teknikler karşılaştırılmıştır.

3.6.1. Genetik algoritmalar (GA)

Genetik algoritmalar (GA), John Holland, (1975) tarafından önerilen popülasyon tabanlı evrimsel bir optimizasyon tekniğidir. Bu teknik, genetik bilimindeki evrimsel prensipleri ve kromozomal süreçleri bilgisayar ortamında taklit ederek çalışan arama ve optimizasyon metodudur (Yıldız, 2006).

GA' da ilk adım olarak rastgele oluşturulan ve belirli sayıda bireyler içeren başlangıç popülasyonu belirlenir. Sonra popülasyon içerisindeki her bir bireyin uygunluk değerinin hesaplanmasıyla devam eder. Yüksek uygunluk değerine sahip olan dizilerin yaşama ve çoğalma ihtimali de yüksek olmaktadır (Taşkın ve Emel, 2009). Bireylerin uygunluk değerine göre üreme işlemi olmaktadır. Yeni bireylerin oluşturulması için ebeveyn olacak kromozomların belirlenmesini üreme operatörü sağlamaktadır. İki kromozom arasında çaprazlanma ile belirlenen parçaların yer değiştirmektedir. Daha sonra ise bir bireydeki gen değerlerinin belirli bir mutasyon ihtimali ile ters çevrilmesiyle mutasyon işlemi uygulanmaktadır. Son aşama olarak ise sonlandırma kriterinin sağlanıp

sağlanmadığına bakılarak ya döngü sonlandırılır ya da başa dönülerek yeniden popülasyon oluşturulur ve süreç devam ettirilir. Genellikle belli bir iterasyon sayısına ulaşıldığında ya da çözüm için belirlenen tolerans değerinin altına inildiğinde sonlandırma koşulu sağlanmış olur. GA çalışma diyagramı Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. GA çalışma diyagramı

NSGA-II algoritması, Deb ve ark., (2002) tarafından önerilen çok amaçlı bir genetik algoritmadır. Bu algoritma, Srinivas ve Deb, (1994) tarafından geliştirilen NSGA algoritmasının eksikliklerinin giderilmesiyle oluşturulmuştur. Genetik algoritma tabanlı NSGA-II, Pareto-en iyi kümeyi araştırmak tasarlanmıştır. GA adımlarına ek olarak, baskınlık derecelendirmesini ve yığılma uzaklığını da hesaplar. NSGA-II’ nin hızlı olması, daha az hesaplama karmaşıklığına sahip olması ve seçkinliği dikkate alması sebeplerinden dolayı çokça kullanılan bir algoritmadır (Durmaz ve Şahin, 2017).

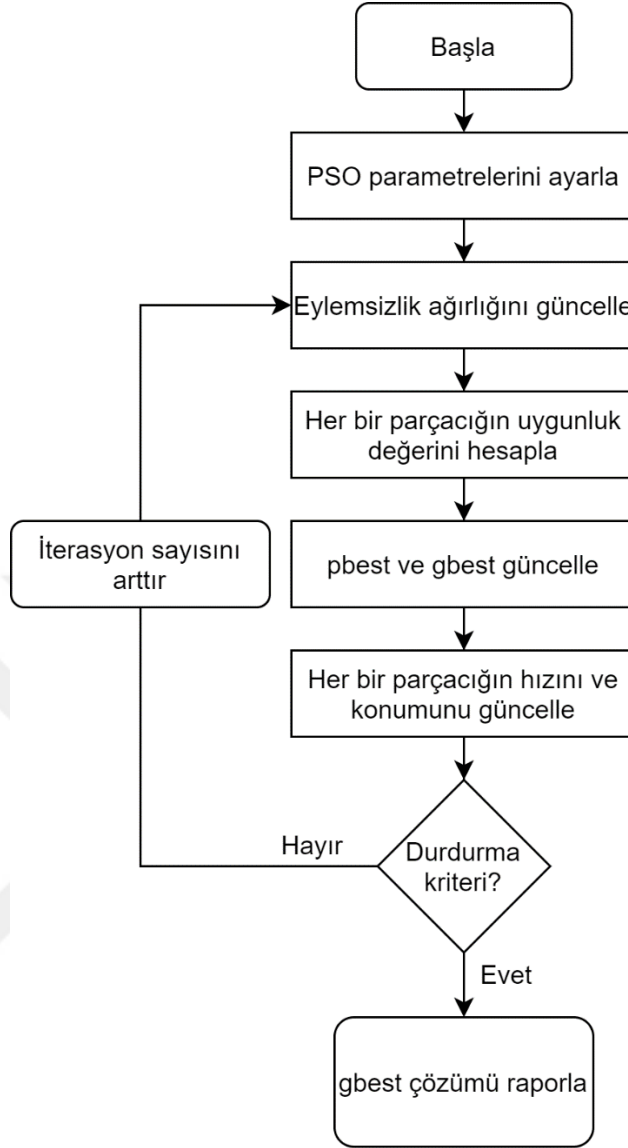
NSGA-III algoritması da Deb ve Jain, (2014) tarafından önerilen NSGA-II' den türetilen çok amaçlı bir genetik algoritmadır. Referans noktası temelli olan NSGA-III algoritması sayıları üç ile on beş arasında değişen amaç fonksiyonlarının tekrarlı çözümlerinde güzel yakınsama ve düzgün dağılımlı noktalar sunmaktadır.

Bu çalışmada GA tabanlı olarak NSGA-II ve NSGA-III tekniklerinin metrikleri incelenmiş ve diğer optimizasyon teknikleriyle karşılaştırılmıştır.

3.6.2. Parçacık sürü optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilen metasezgisel ve popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir. PSO tekniği kuş sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenmiştir. Popülasyondaki her bir birey parçacık olarak isimlendirilir ve bu parçacıklar potansiyel çözümleri temsil etmektedir.

PSO' da her bir parçacık bir kuşa benzetilmekte ve bir çözüm sunmaktadır. Her bir parçacık için uygunluk fonksiyonu ile bulunan bir uygunluk değeri vardır. Parçacıkların arama uzayında kendilerine yön veren hız bilgileri vardır. İlk adım olarak belirli sayıda rasgele parçacıklar üretilir. Bu parçacıklar hız ve konum bilgilerini güncellerler ve arama uzayındaki en uygun sonucu ararlar. Bir parçacığın konumunu güncellerken, bu parçacığın önceki en iyi çözümü (pbest) ve sürüdeki en iyi çözüm (gbest) kullanılmaktadır. Bu değerler (pbest ve gbest) optimizasyon boyunca sürekli güncellenmektedir. Böylece, algoritmanın sonunda global optimum veya global optimuma yakın bir çözüm bulunmaktadır. PSO algoritmasının çalışma diyagramı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3.9. PSO algoritmasının çalışma diyagramı

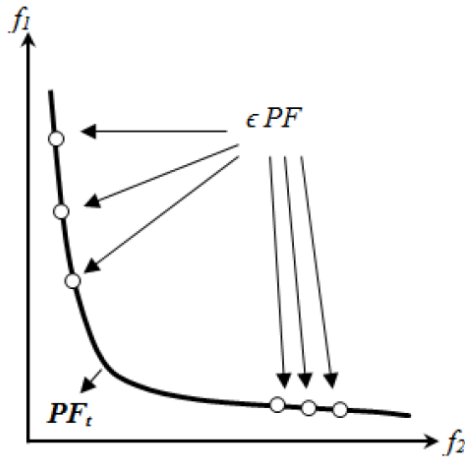
MOPSO ve PSO algoritmaları arasındaki fark en iyi parçacık ve en iyi Personal Best (pbest)'in belirlenme yöntemindedir. MOPSO algoritmasına depo (repository) kavramı eklenmiştir. Depodaki popülasyon bir arşiv olarak kullanılır. Bu arşivde non-dominated cevaplar vardır ve algoritmanın dışında saklanılmaktadır (Coello ve ark., 2004). NSGA-II algoritmasında böyle bir depo yoktur. Bulunan en iyi cevaplar popülasyonun içindedir (self-archiving). MOPSO algoritmasında da kalite ve düzen kriterleri söz konusudur. Mağlup olmayan elemanlar depoya eklenir. Kalite kriterinin sağlanması için deponun elemanlarının arasında elitizmi yerine getirmeyenler kovulur. Düzen kriterinin

sağlanması ise Leader seçiminde çeşitliliğe etkisi fazla olanlar önceliklendirilir ve çeşitliliğe etkisi düşük olanlar elenme potasına girer (Coello ve ark., 2004; Faryad Aghjeh Kand, 2014).

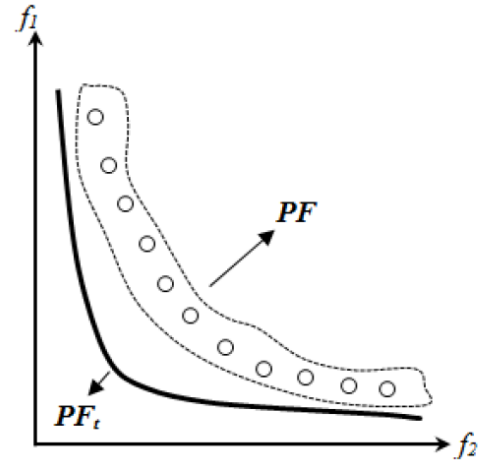
CMOPSO algoritması ise parçacıkların güncellenmesinde rekabet mekanizması temelli öğrenme stratejisi uygular. CMOPSO tekniğinde sürüden rastgele seçilen çiftler rekabet ederler ve kazanan parçacık hızın güncellenmesine rehberlik eder. Bu teknikte MOPSO tekniğinden farklı olarak arama süreci sırasında fazladan bir depoya ihtiyaç duyulmaz. Deponun olmaması ise gerekli hesaplama miktarını azaltır (Zhang ve ark., 2018).

3.7. Performans Metrikleri

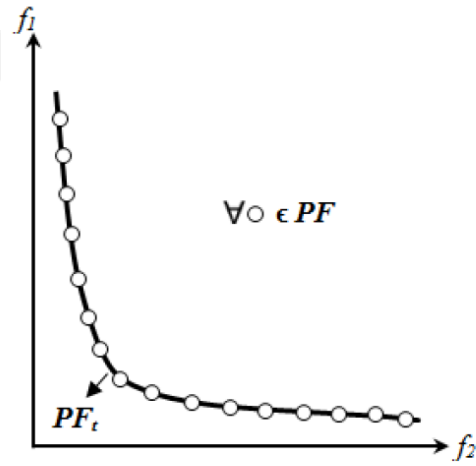
Bu çalışmada farklı çok amaçlı optimizasyon teknikleri kullanılmış ve bu tekniklerin yeterliliğini ve başarılarını kıyaslayabilmek için literatürde sıklıkla kullanılan performans metriklerinden faydalanılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon teknikleri problemin çıktısı olarak birbirini bastıramayan bir çözümler kümesi vermektedir. Bu tekniklerin sonucu oluşan Pareto Front (PF) çözümlerin gerçek Pareto Front (Pareto front true, PFT) yüzeyi en başarılı şekilde tahmin etmesi arzulanmaktadır. Çok amaçlı bir optimizasyon tekniğinin elde ettiği çözümler kümesinin başarısını ölçmek için çeşitlilik ve yakınsama olmak üzere iki çeşit kriter vardır. Pareto Front' u oluşturan çözümlerin gerçek Pareto Front çözümleri boyunca mümkün oldukça geniş bir dağılıma sahip olması çeşitlilik kriterinin başarısı için istenmektedir. Yakınsama kriterinin başarısı için ise Pareto Front çözümlerinin gerçek Pareto Front çözümlerine mümkün olduğu kadar yakın olması beklenmektedir. Çok amaçlı bir optimizasyon tekniği ile elde edilen Pareto Front çözümlerinin olası durumları Şekil 3.10' da gösterilmiştir (Karakoyun, 2021). Bu çalışmada kullanılan metrikler Hypervolume (HV), Ters Uzaklık Mesafesi (IGD), Boşluk (S) ve Yayılma (SP) performans metrikleridir.



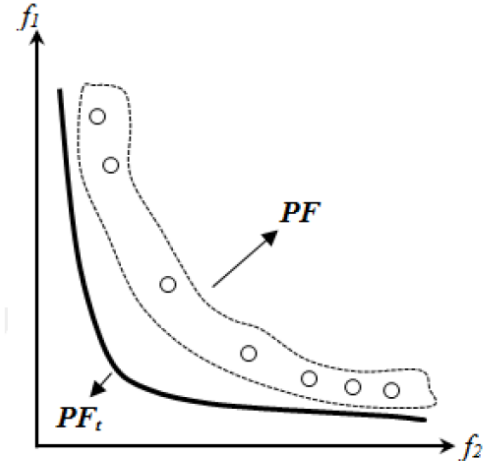
a) Başarılı yakınsama başarısız çeşitlilik



b) Başarılı çeşitlilik başarısız yakınsama



c) İdeal yakınsama ve çeşitlilik



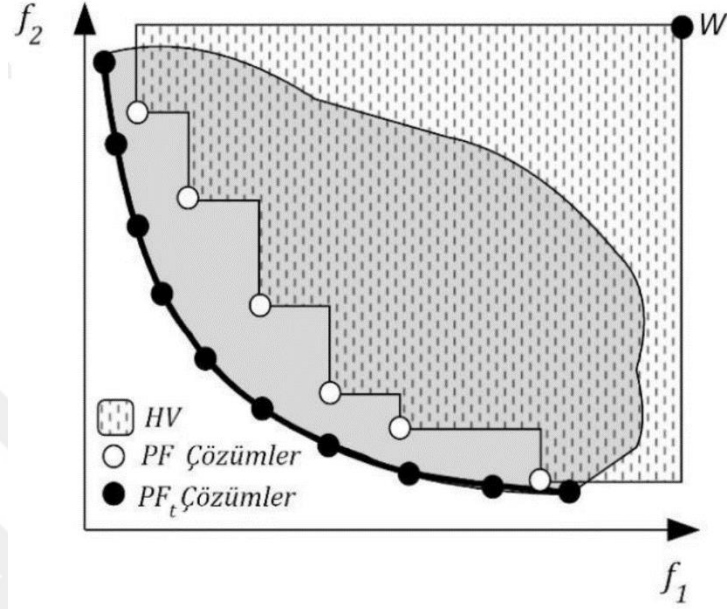
d) Başarısız yakınsama ve çeşitlilik

Şekil 3.10. Pareto Front çözümlerinin olası durumları (Karakoyun, 2021)

3.7.1. Hypervolume

Hypervolume yaklaşımı Zitzler ve Thiele (1999) tarafından önerilen, çok amaçlı optimizasyon tekniklerinin çeşitlilik ve yakınsama başarılarını birlikte ölçebilen bir performans metriğidir. HV performans metriğinde amaç fonksiyonlarının her biri için elde edilen en başarısız değerlerden meydana gelen vektör olarak belirlenen bir W referans noktası ile optimizasyon tekniği ile elde edilen Pareto Front (PF) çözümleri arasında kalan alanın

ölçülmesi ile elde edilen bir değere sahiptir. Çok amaçlı bir algoritma ile elde edilen Pareto Front çözümlerine göre hesaplanan Hypervolume değerinin temsili Şekil 3.11’de gösterilmiştir (Zitzler ve Thiele, 1998; Tan ve ark., 2002; Karakoyun, 2021).



Şekil 3.11. Hypervolume değerinin temsili gösterimi (Özkış, 2017)

Hypervolume değerinin büyük olması istenir. Hypervolume değeri daha büyük olan optimizasyon tekniğinin daha başarılı olduğu söylenebilir. Çok amaçlı bir optimizasyon tekniğinin elde ettiği Pareto Front çözümlerine göre hesaplanan Hypervolume değeri ($i \in PF$ olmak üzere) Denklem (3.48) ile hesaplanabilir (Zitzler ve Thiele, 1999; Özkış, 2017).

$$Hypervolume = hacim \left(\bigcup_{i=1}^{|PF|} v_i \right) \quad (3.48)$$

3.7.2. Inverted Generational Distance (IGD)

Terslenmiş nesilsel mesafe (IGD) hem çeşitlilik hem de yakınsama başarısını ölçen bir metriktir. Gerçek Pareto Front çözümler kümesindeki her bir noktanın en yakınında bulunan Pareto Front çözümüne olan mesafelerin ortalaması sonucu bulunan değerdir.

Pareto Front çözümlerinin mümkün olduğu kadar gerçek Pareto Front çözümlerine yakın olması istendiğinden dolayı bu metriğin mümkün olduğu kaçak olması istenmektedir. IGD metriği Denklem (3.49) ile hesaplanmaktadır (Sierra ve Coello, 2005; Karakoyun, 2021).

$$IGD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{n} \quad (3.49)$$

3.7.3. Boşluk (Metric of Spacing)

Schott, (1995) tarafından önerilen ve birbirini bastıramayan çözümler arasındaki bağıl mesafenin hesaplanması dayalı olan boşluk metriği (Metric of Spacing) Denklem (3.50), (3.51) ve (3.52) ile hesaplanabilmektedir (Eröz, 2020).

$$d_i = \min_{k \in PF \wedge k \neq i} \sum_{m=1}^M |f_i^m - f_k^m| \quad (3.50)$$

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^{|PF|} d_i / PF \quad (3.51)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{|PF|} \sum_{i=1}^{|PF|} (d_i - \bar{d})^2} \quad (3.52)$$

Burada uzaklık ölçüsü, i . çözüm ile elde edilen birbirini bastıramayan çözümler kümesindeki herhangi bir çözüm arasındaki mutlak farkın toplamının minimum değeridir. Çok amaçlı optimizasyon sonucu elde edilen çözümler eşit aralıklı olarak yerleştirildiğinde, karşılık gelen mesafe küçük kalacaktır. Bu nedenle Metric of Spacing değeri daha küçük olan optimizasyon tekniği daha başarılı sayılacaktır (Eröz, 2020).

3.7.4. Yayılma (Metric of Spread)

Metric of Spread yayılma derecesini dikkate almayan ölçümlerde, çözümler belli aralıklarda aynı sonucu ürettiğinden dolayı yayılma derecesini de hesaba katan bir performans metriğidir (Deb, 2001; Eröz, 2020). Yayılma metriği Denklem (3.53) ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta = \frac{\sum_{m=1}^M d_m^e + \sum_{i=1}^{|PF|} (d_i - \bar{d})}{\sum_{m=1}^M d_m^e + |PF| \bar{d}} \quad (3.53)$$

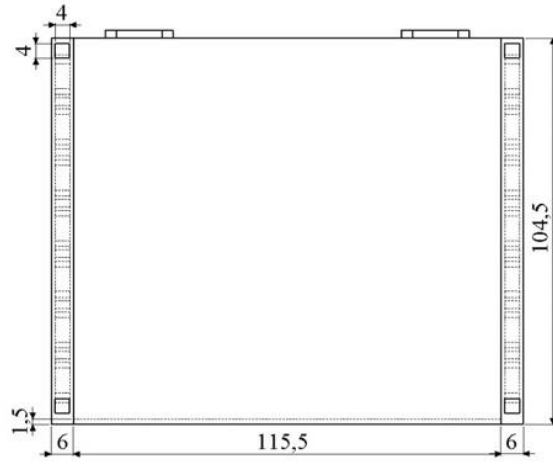
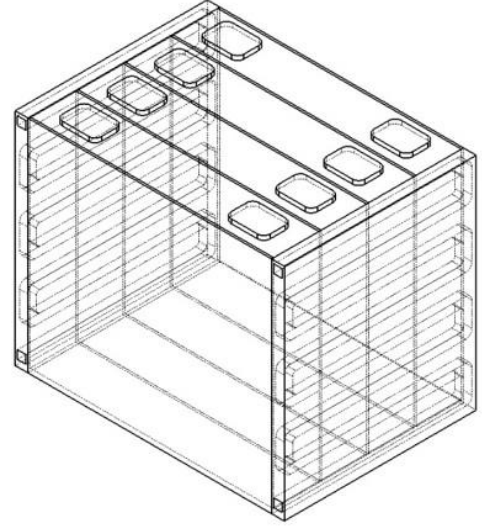
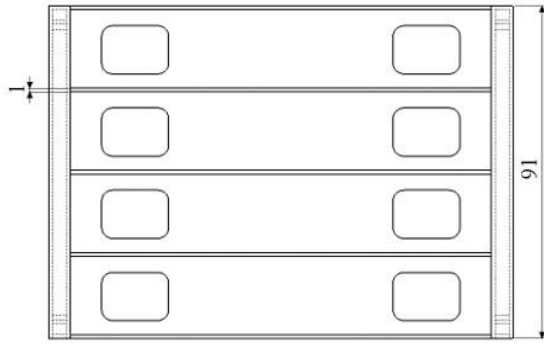
Burada, d_i , komşu çözümler arasında herhangi bir mesafe ölçümü ve $\bar{d}$ ise bu mesafe ölçümlerinin ortalama değeridir ve d_i ' yi hesaplamak için Öklid mesafesi veya kalabalık mesafesi kullanılabilir. d_m^e parametresi ise m . amaç fonksiyonuna karşılık gelen gerçek Pareto Front ve Pareto Front' un uç çözümleri arasındaki mesafedir (Deb, 2001; Eröz, 2020).

3.8. Batarya Paketi ve Soğutma Plakalarının Tasarım

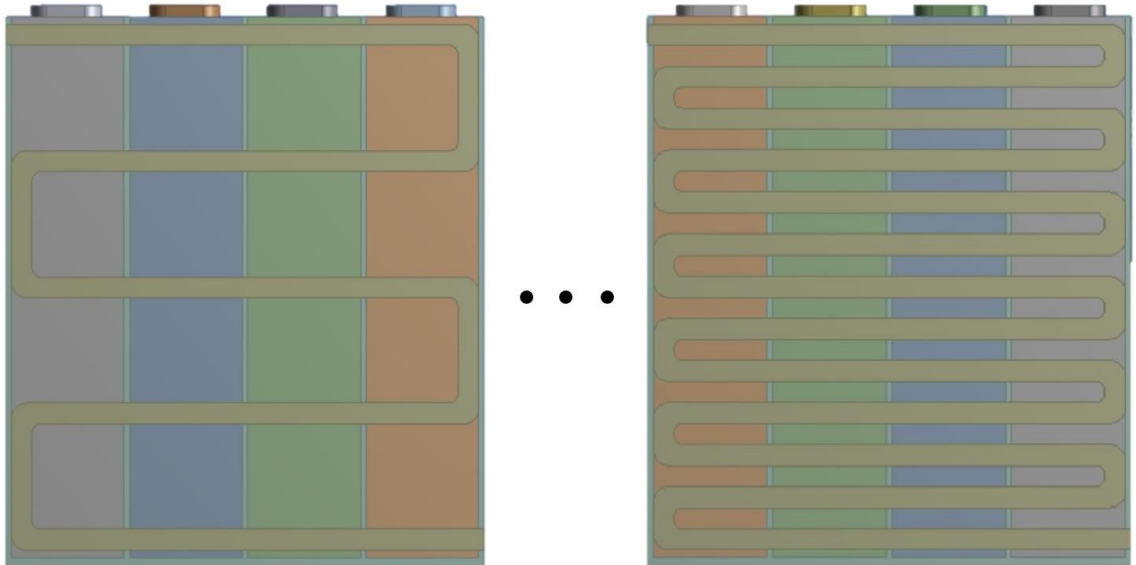
Bu çalışmada dört hücreden ve on iki hücreden oluşan iki farklı batarya modülü ve bu modüller için soğutma plakaları tasarlanmıştır.

3.8.1 Dört hücreli batarya modülü

Bu çalışmada kanal genişliği, kanal yüksekliği ve kütsel debinin etkilerini incelemek için dört hücreli bir batarya modülü için içerisinde serpantin kanallar geçen iki adet soğutma plakası tasarlanmıştır. Bataryalarda üretilen ısı iletim yoluyla soğutucu plakalar vasıtasıyla soğutucu akışkana aktarılmaktadır. Serpantin kanaldaki paralel kanal sayısının soğutma performansına etkisini incelemek için sayıları beş ile on üç arasında değişen paralel kanal sayısına sahip soğutucu plakalar tasarlanmıştır. Tasarlanan batarya modülü ve soğutma plakaları Şekil 3.12 ve Şekil 3.13' de gösterilmiştir.



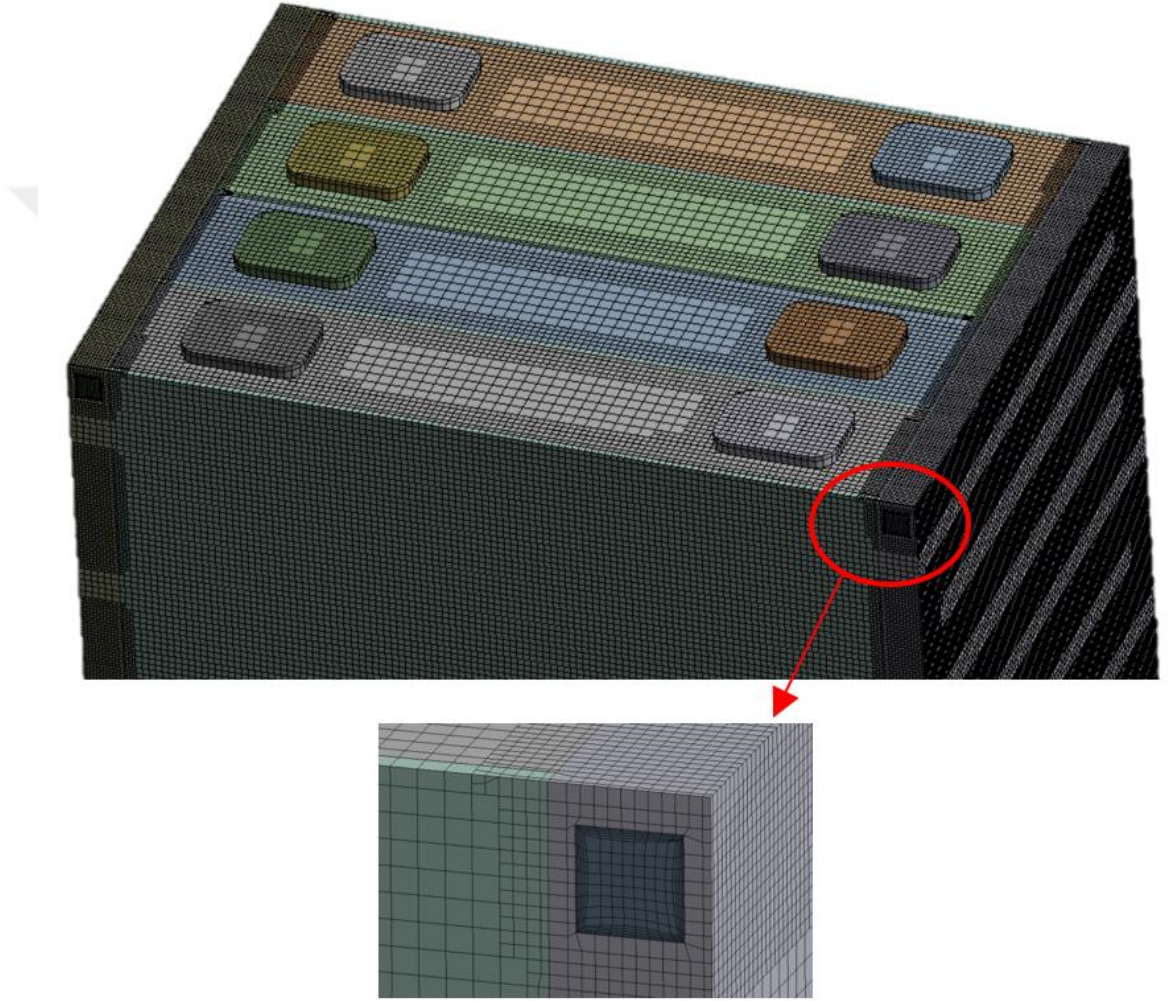
Şekil 3.12. Dört hücreden oluşan batarya modülü



Şekil 3.13. Paralel kanal sayıları değişen serpantin kanallı soğutma plakaları

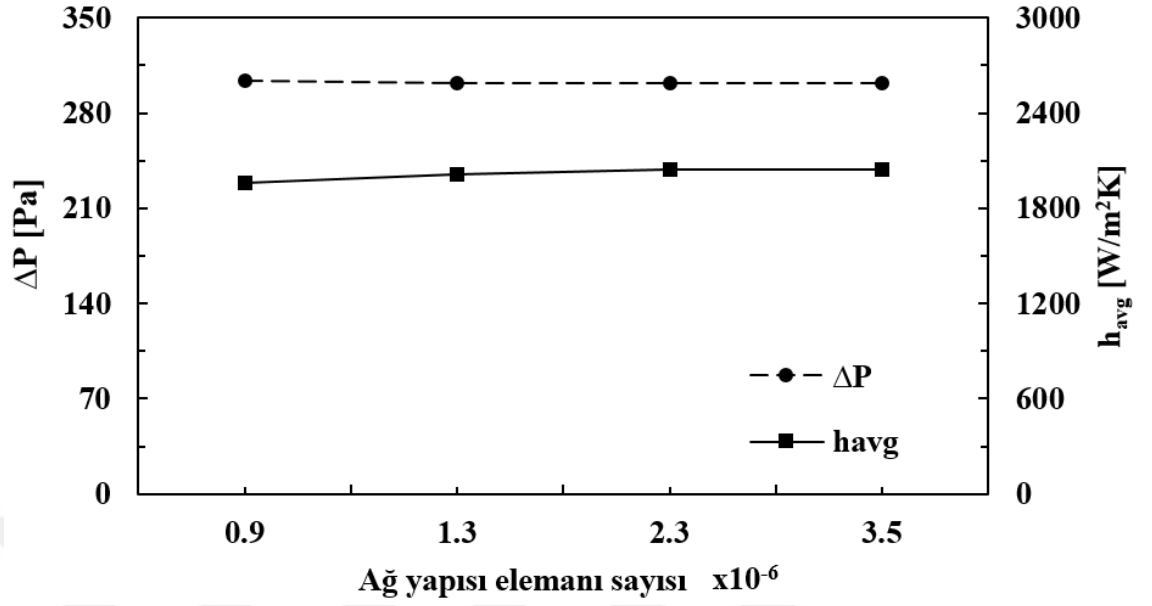
3.8.2. Dört hücreli batarya modülü ağ yapısı

Dört hücreli batarya modülünün ağ yapısı ANSYS Meshing modülü ile oluşturulmuştur. Ağ yapısında sayıları 1.3 – 2.3 milyon aralığında değişen çoğu hexahedral elemanlar kullanılmıştır. Kanalin duvarlarına yakın kısımlarında beş adet inflation tabakası oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısı Şekil 3.14’te görülmektedir.



Şekil 3.14. Dört hücreli batarya modülünün ağ yapısı

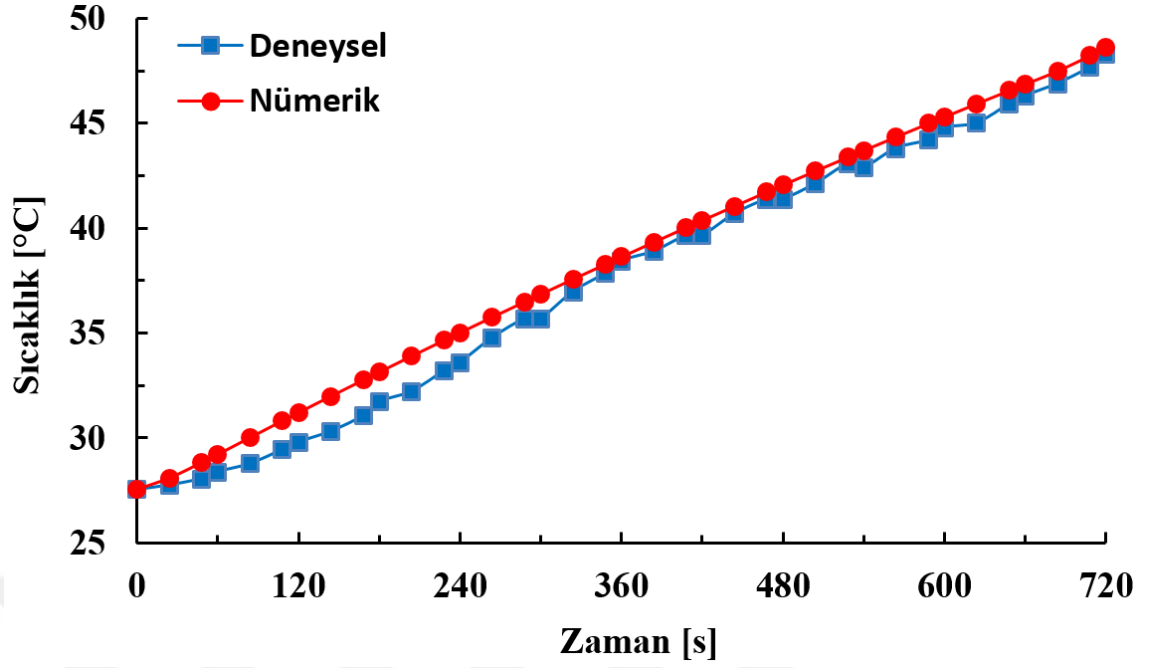
Dört farklı ağ yapısı elemanı sayısı için ağ yapısından bağımsızlık (mesh independency) analizleri yapılmış olup Şekil 3.15’te gösterilmiştir. Ağ yapısından bağımsızlık analize göstermektedir ki 2.3 milyon civarında eleman sayısı sonuçların doğruluğu açısından yeterlidir.



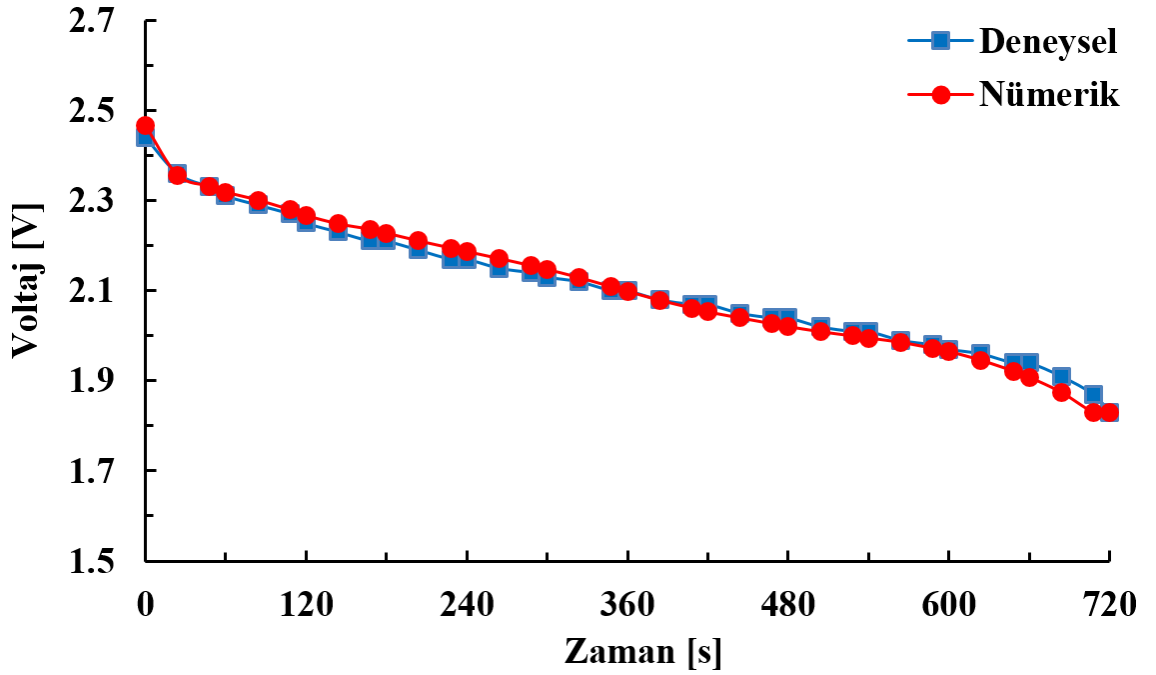
Şekil 3.15. Ağ yapısından bağımsızlık analizleri

3.8.3. Dört hücreli batarya modülü modelinin doğrulanması

Bu çalışmada tüm batarya modüllerinde, özellikleri Bölüm 3.1’ de verilen LTO batarya hücresi kullanılmıştır. Kullanılan batarya hücresinin üzerinden altı noktadan (Şekil 3.4) sıcaklık değerleri alınmış ve batarya hücresi için kullanılan ısı üretimi modeli buradan alından sıcaklık değerleriyle doğrulanmıştır. Doğrulama için tam dolu batarya hücresi 27.5 °C atmosfer sıcaklığında 100 A akım ile 720 s boyunca deşarj edilmiştir. Daha önceden deneyler için belirlenen altı adet ölçüm noktası bilgisayarda yapılan analizlerde de aynı yerlere tanımlanmış ve bu noktaların ortalama değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan deney esnasında voltaj değerleri de belirli aralıklarda kaydedilmiş ve analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneylerden ve nümerik analizlerden elde edilen sıcaklık ve voltaj değerleri Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Karşılaştırmaya bakıldığında bataryanın ısı üretimi için kullanılan modelin deneysel verilerle güzel bir uyum içinde olduğu görülmektedir.



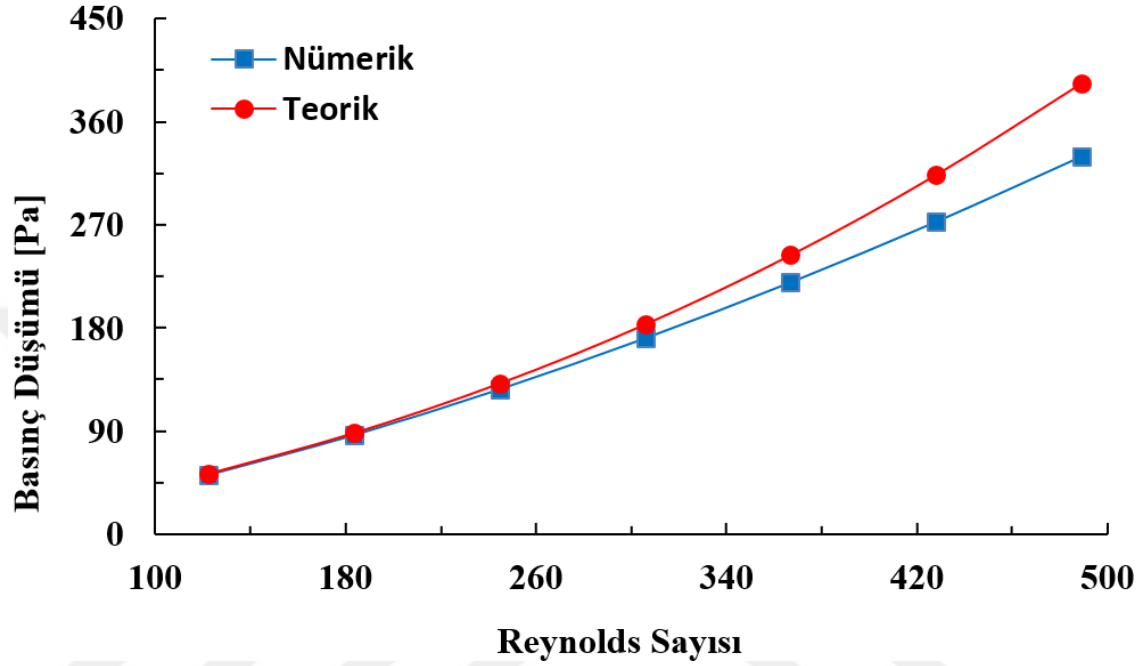
Şekil 3.16. Deneylerden ve nümerik analizlerden elde edilen sıcaklık değerleri



Şekil 3.17. Deneylerden ve nümerik analizlerden elde edilen voltaj değerleri

Serpantin kanallarının içindeki toplam basınç düşümünün nümerik analiz sonuçları da Bölüm 3.3'te verilen teorik hesaplamalar kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulama için kütleli debi 0.001 ile 0.004 kg/s arasında değişen analizler yapılmıştır. Teorik hesaplama

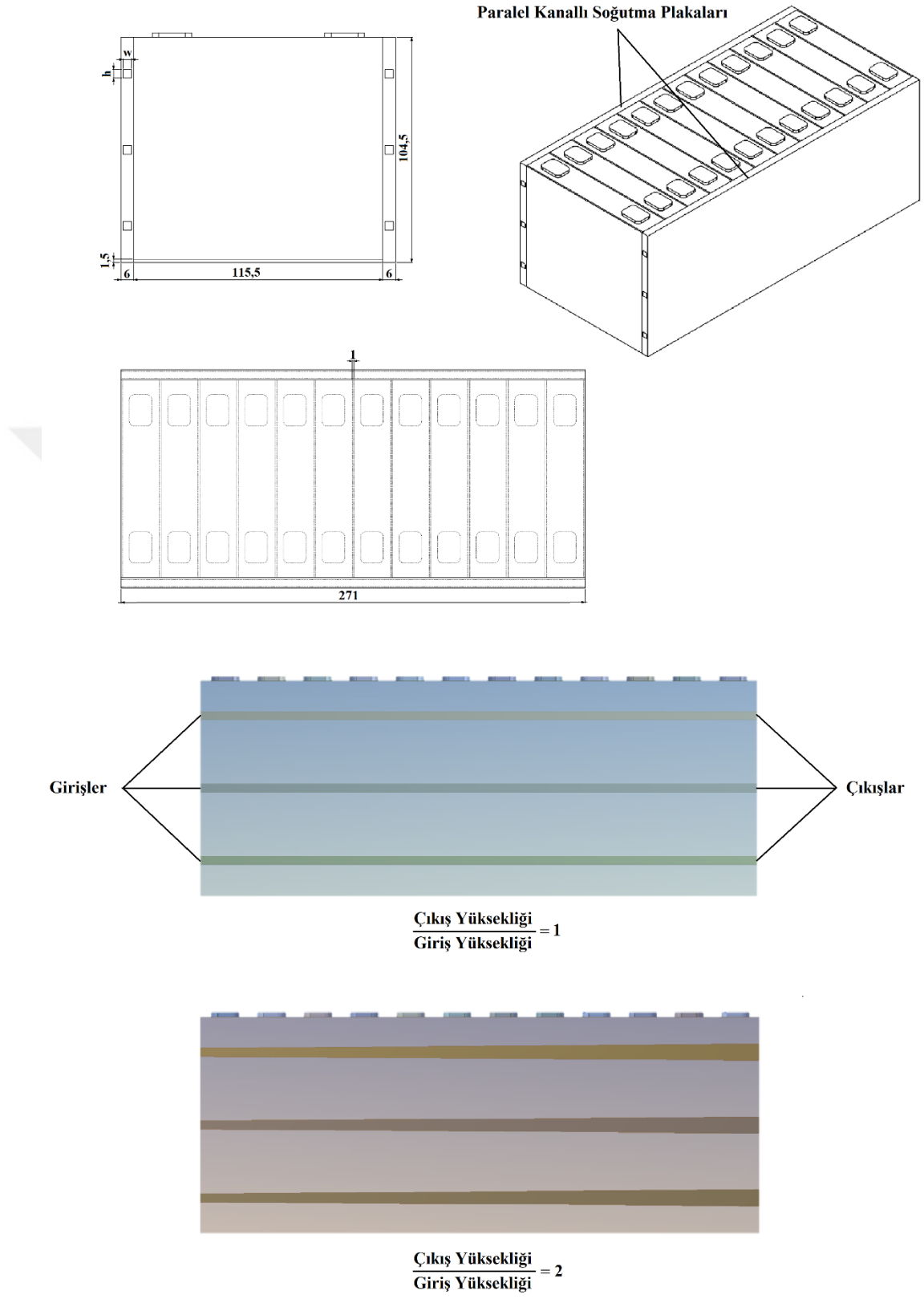
ve nümerik analiz sonuçları Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Karşılaştırma sonuçlarına bakıldığında özellikle düşük Reynolds Sayısı değerlerinde güzel bir uyum görülmüştür. Reynolds Sayısı’nın en yüksek olduğu durumda nümerik analiz ve teorik hesaplamalar arasındaki en fazla basınç düşümü farkının %17.7 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.18. Reynolds sayısına bağlı nümerik analiz ve teorik hesaplamalara ait basınç düşümü değerleri

3.8.4. On iki hücreli batarya modülü

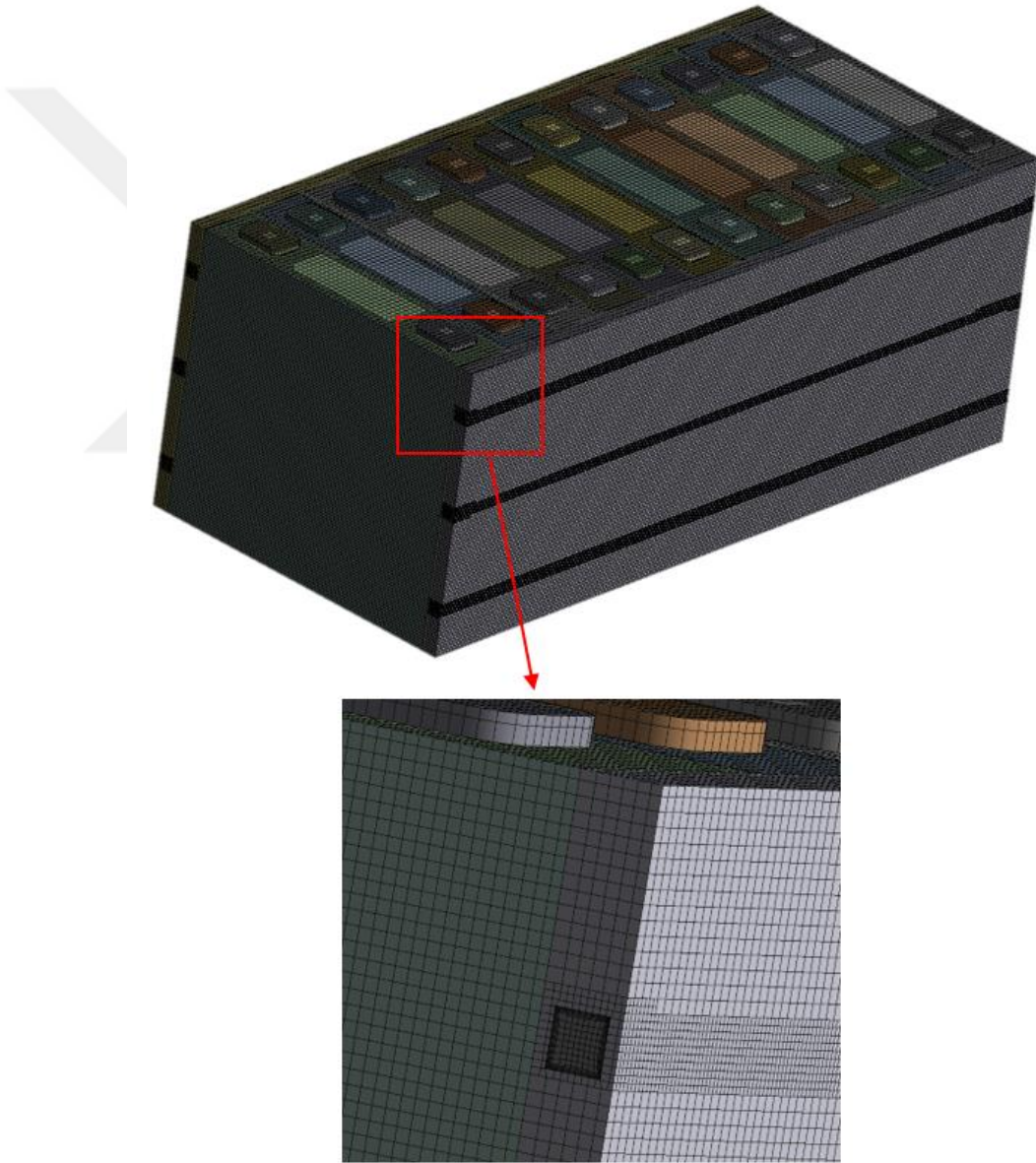
Bu çalışmada kanal yüksekliğinin, kanal genişliğinin ve çıkış yüksekliğinin giriş yüksekliğine oranının basınç düşümü ve soğutma performansına etkilerini incelemek için on iki hücreden bir batarya modülü ve içerisinde paralel soğutma kanalları geçen soğutma plakaları tasarlanmıştır. Bataryalarda üretilen ısı iletim yoluyla ara plakalar, alt plaka ve batarya modülünün iki tarafında bulunan soğutucu plakalar vasıtasıyla soğutucu akışkana aktarılmaktadır. Tasarlanan on iki hücreden oluşan batarya modülü ve soğutucu plakalar Şekil 3.19’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Batarya modülü ve soğutma plakaları

3.8.5 On iki hücreli batarya modülünün ağ yapısı

On iki hücreli batarya modülünün ağ yapısı ANSYS Meshing modülü ile oluşturulmuştur. Ağ yapısında sayıları 3,7 – 4,3 milyon aralığında değişen çoğu hexahedral elemanlar kullanılmıştır. Kanalin duvarlarına yakın kısımlarında beş adet inflation tabakası oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısı Şekil 3.20’de görülmektedir. Ağ yapısından bağımsızlık analizi de yapılmış olup 3,7 milyon civarında eleman sayısı sonuçların doğruluğu açısından yeterli olduğu görülmüştür.



Şekil 3.20. On iki hücreli batarya modülünün ağ yapısı

4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında dört hücreli ve on iki hücreli iki farklı batarya modülü için soğutma sistemi tasarlanmış ve optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu bölümde batarya modüllerinin soğutma performanslarını iyileştirmek için yapılan çalışmalar ve bulgular anlatılacaktır.

4.1. Dört Hücreli Batarya Modülü Çalışmaları

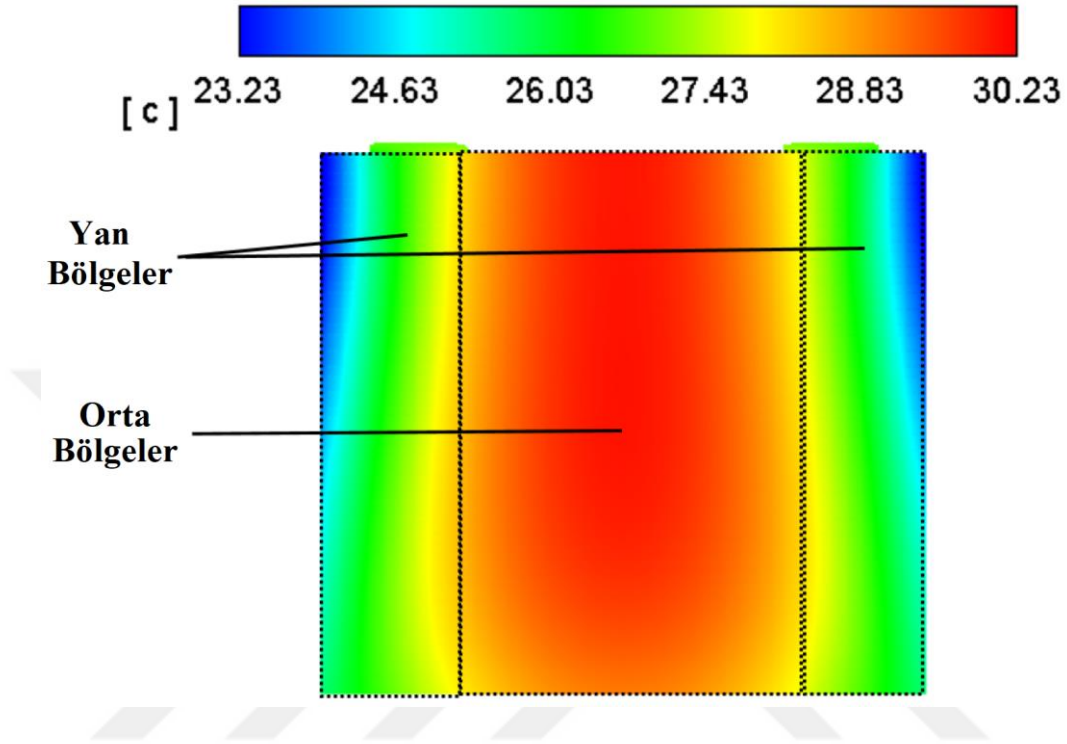
Bu kısımda dört hücreli batarya modülüne ait soğutma performansını ve basınç düşümünü etkileyen değişkenler incelenmiştir. Nümerik analizlere ait başlangıç ve sınır koşulları Çizelge 4.1’ de verilmiştir. Ortam ile temas eden tüm yüzeylere taşınım sınır şartı verilmiş ve $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ değerinde taşınım ile ısı transferi katsayısı tanımlanmıştır.

Çizelge 4.1. Dört hücreli modülün analizlerinin başlangıç ve sınır şartları

Başlangıç/Sınır Şartları	Değer/Tip
Giriş Tipi	Kütleli Debi
Çıkış Tipi	Basınç Çıkışı
Giriş Kütleli Debisi	0,001 – 0,006 kg/s
Çıkıştaki Basınç	0 Pa
Su Sıcaklığı	20 °C
Batarya Sıcaklığı	20 °C
Soğutucu Plaka Sıcaklığı	20 °C
Ortam Sıcaklığı	20 °C
Simülasyon Rejimi	Geçici Rejim
Deşarj Oranı	5c
Simülasyon Süresi	720 s

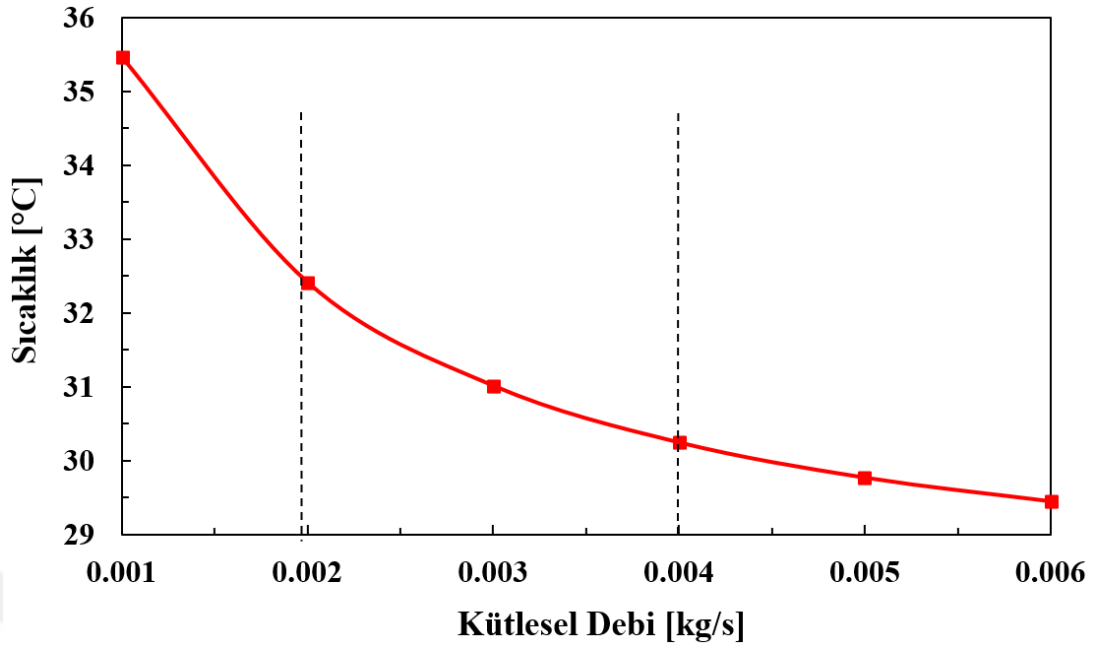
İlk adım olarak, kütleli debinin orta hücrenin dış yüzeyindeki maksimum sıcaklığa olan etkisi incelenmiştir. Orta batarya hücresi üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu çalışmada, batarya hücrelerinin ürettiği ısı, soğutma plakaları ile temas eden ara ve yan plakalar vasıtasıyla soğutma plakalarına iletilir ve daha sonra suya aktarılır. Bu sebeple soğutma plakalarına yakın olan için batarya hücresinin kenarlarındaki sıcaklık beklendiği gibi daha düşüktür. Orta bölgenin üst kısmındaki sıcaklık, orta bölgenin alt kısmından daha yüksektir. Çünkü üst bölge hava ile temas halindedir. Alt bölge ise alt plaka ile temas halindedir. Alt kısmın çıkışa daha yakın

olması ve üst kısmın soğutma plakalarının girişine daha yakın olması nedeniyle yan bölgelerin üst kısımları yan bölgenin üst kısımlarına göre daha yüksek sıcaklık değerlerine sahiptir.



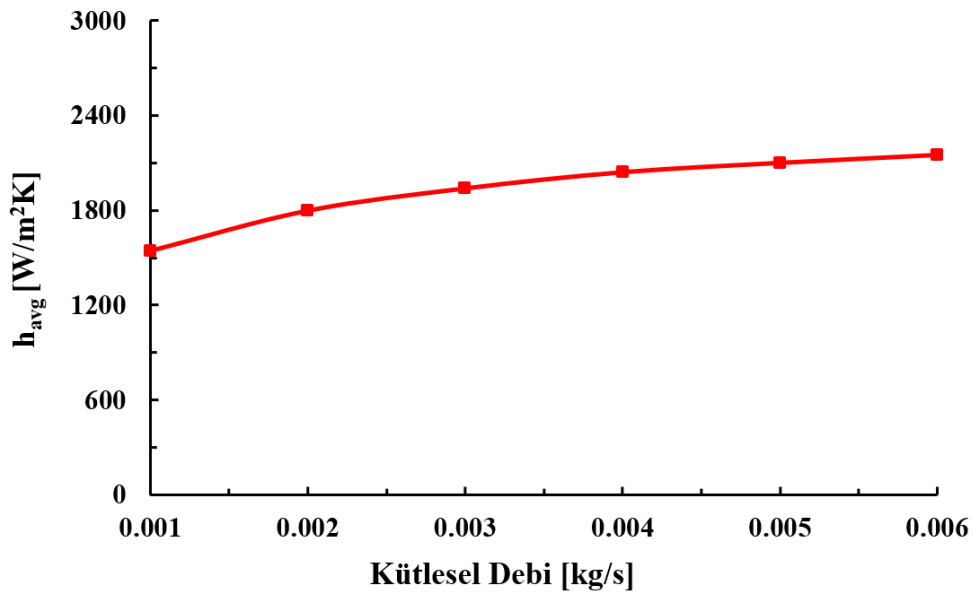
Şekil 4.1. Orta batarya hücresindeki sıcaklık dağılımları

Kütlesel debinin maksimum sıcaklık üzerindeki etkisini incelemek için 0.001 kg/s artışla 0,001 ile 0,006 kg/s aralığında CFD analizleri yapılmıştır. Farklı kütlesel debilerde batarya yüzeyinin en yüksek sıcaklık değerleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Soğutucu akışkanın akmadığı durumda en yüksek sıcaklık değeri 42,4 °C ve farklı kütlesel debi ile soğutmada ise 29,5 ile 35,5 °C arasında değişmektedir. En yüksek sıcaklık değerleri 0,001 – 0,002 kg/s kütlesel debi aralığında büyük ölçüde, 0,002 – 0,004 kg/s kütlesel debi aralığında orta derecede, 0,004 – 0,006 kg/s kütlesel debi aralığında ise az miktarda değişmiştir. Ayrıca, kütle akış hızının artırılması pompanın güç tüketimini de arttıracaktır. Bu nedenle optimizasyon çalışması için 0,002 – 0,004 kg/s kütle akış hızı aralığı seçilmiştir.



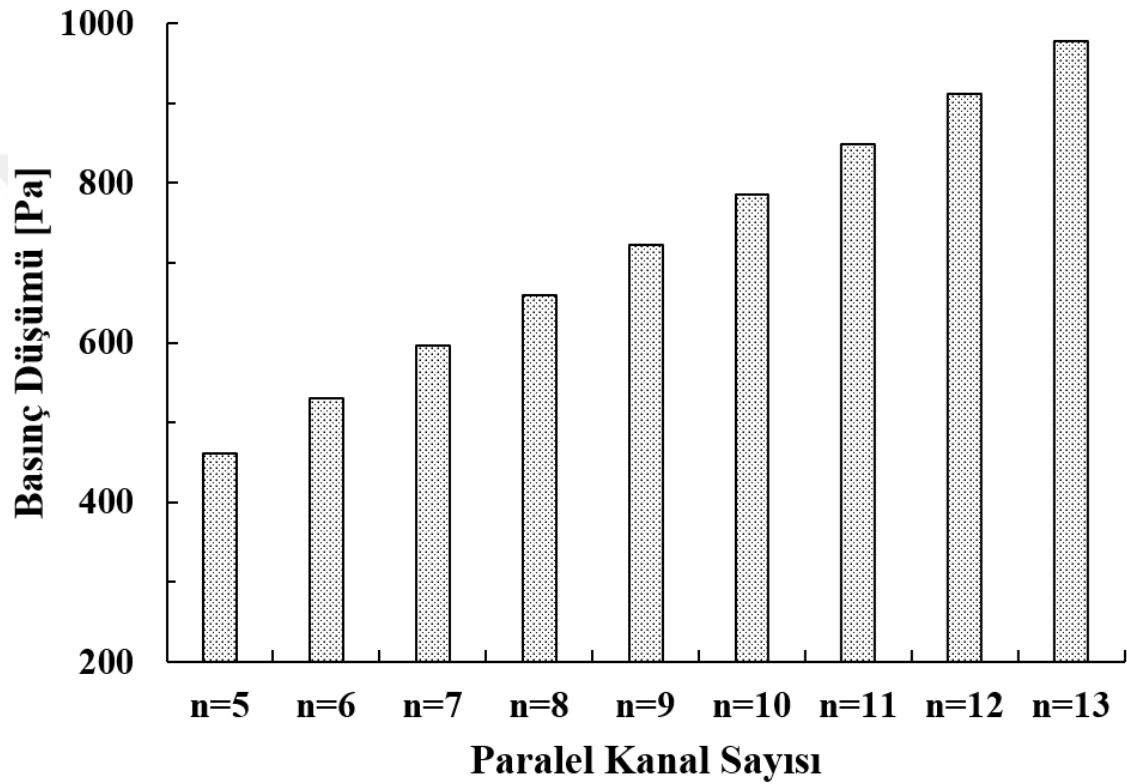
Şekil 4.2. Farklı kütleli debilerde en yüksek sıcaklık değerleri

Farklı kütleli debilerde taşınım ile ısı transferi katsayısı değerleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Kütle akış hızının artmasıyla taşınım ile ısı transfer katsayısı değerleri artar; ancak 0,004 kg/s kütle debisinden sonra hattın eğimi küçülmektedir. Bu durum, diğer çalışmalarda belirtildiği gibi sistemin soğutma kapasitesinin bir sınırı olabileceği için ortaya çıkabilir (Zhao ve ark., 2015; Huo ve ark., 2015).



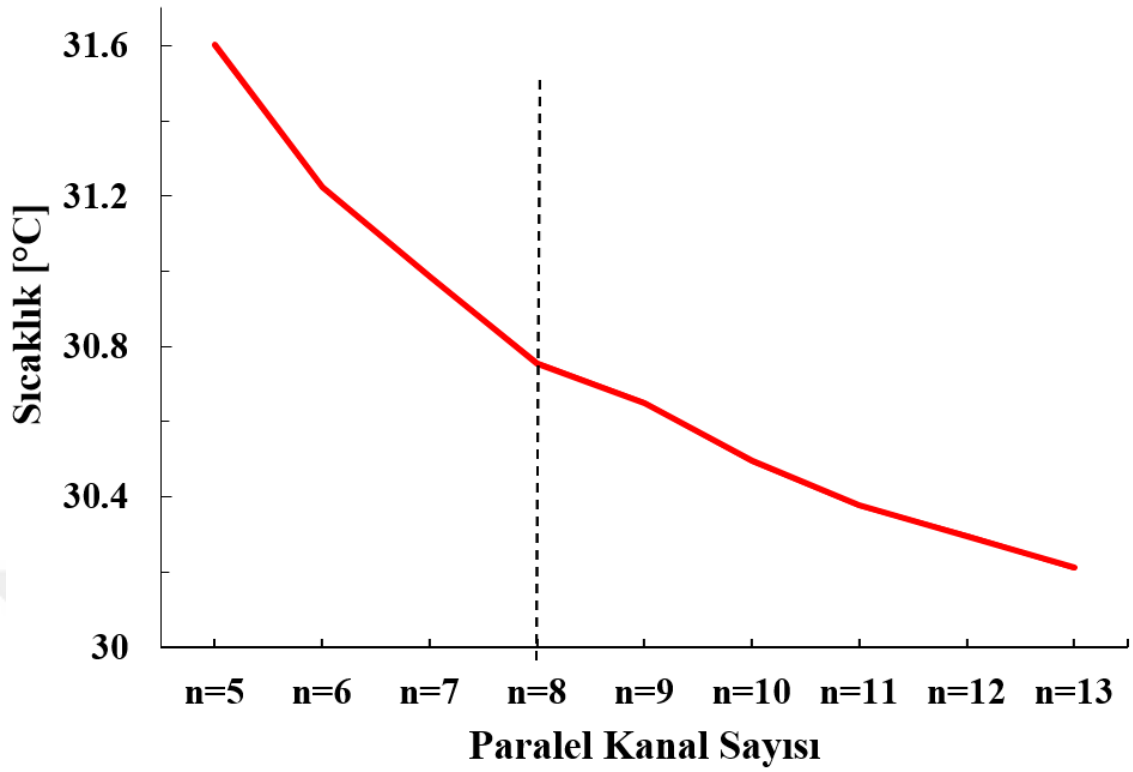
Şekil 4.3. Farklı kütleli debilerde taşınım ile ısı transferi katsayısı değerleri

Serpantin kanalı oluşturan paralel kanalların sayısını belirlemek için farklı kanal sayılarının basınç düşümü ve en yüksek sıcaklık değerlerine olan etkisi araştırılmıştır. 0,004 kg/s kütle debide kanal sayıları beş ile on üç arasında değiştirilerek simülasyonlar yapılmıştır. Farklı kanal sayılarına sahip soğutma plakalarına ait basınç düşümü değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Kanal sayısının artması, toplam kanal uzunluğunu, kanalın toplam alanını, 180° dönüşleri ve yerel direnci artırır. Bu nedenle, 180° dönüşler, sürtünme kayıpları ve yerel direnç nedeniyle basınç düşüşü artar.



Şekil 4.4. Paralel kanal sayısının basınç düşümü değerlerine olan etkisi

Farklı kanal sayılarına sahip soğutma plakalarına ait en yüksek sıcaklık değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Kanal sayısı arttıkça ısı transfer yüzey alanı artmakta ve en yüksek sıcaklıkta bir azalmaya neden olmaktadır. Basınç düşümü, azalan kanal sayısı ile doğrusal olarak azalmaktadır; ancak beş ile sekiz kanal arasındaki en yüksek sıcaklık eğrisinin eğimi sekiz ile on üç kanal arasındakinden daha fazladır. Bu nedenle ileri çalışmalar için sekiz kanallı soğuk plakalar seçilmiştir.



Şekil 4.5. Paralel kanal sayısının en yüksek sıcaklık değerlerine olan etkisi

4.1.1. Tasarım değişkenlerinin belirlenmesi

Optimizasyon için tasarım değişkenleri olarak kanal yüksekliği, kanal genişliği ve kütleli debi; amaç olarak ise toplam basınç düşümü (P), ortalama ısı taşınım katsayısı (h_{avg}) ve en yüksek sıcaklık (T_{max}) seçilmiştir. Tasarım değişkenlerinin sınırları w (kanal genişliği) için 2 – 4 mm, h (kanal yüksekliği) için 4 – 6 mm ve $\dot{m}$ (kütleli debi) için 0,002 – 0,004 kg/s olarak belirlenmiştir. Soğutma plakasının toplam kalınlığı 6 mm ve kanal ile soğutma plakasının dış yüzeyi arasındaki en fazla mesafe 1 mm olduğundan dolayı w parametresinin üst sınırı 4 mm olarak belirlenmiştir. w parametresinin alt sınırı 2 mm olup kanal genişliğinin etkisini görmek için uygundur. Yüksek basınç düşüşünü önlemek için h parametresinin alt sınırı 4 mm olarak seçilmiştir. Düşük ortalama ısı taşınım katsayısını önlemek için h parametresinin üst sınırı ise 6 mm olarak belirlenmiştir. Tasarım değişkenlerinin sınırları belirlendikten sonra LHS ile belirlenen noktalarda CFD analizleri yapılmıştır.

4.1.2. LHS ile belirlenen noktaların CFD analizleri (Dört hücreli modül)

Bu çalışmada, LHS yöntemi kullanılarak tasarım değişkenlerinin sınırları içerisinde otuz tasarım noktası oluşturulmuştur. LHS yöntemi ile oluşturulan tasarım noktaları ve bu verilerle yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Toplam basınç düşümü, ortalama ısı taşınım katsayısı ve en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla 163,50 – 3992,1 Pa, 1362,64 – 3217,04 W/(m²K) ve 30,30 – 32,57 °C arasında değişmektedir ve bu değerlerin aralıkları oldukça geniştir. Bu nedenle GRA, girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkilerini incelemek için kullanılmıştır.

Çizelge 4.2. LHS ile belirlenen tasarım noktaları ve analiz sonuçları (Dört hücreli batarya modülü için)

LHS No	w [mm]	h [mm]	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	h_{avg} [W/(m ² K)]	T _{max} [°C]
1	3,41	3,85	0,00371	894,26	2210,87	30,59
2	2,86	3,30	0,00238	951,00	2151,11	32,06
3	2,11	5,11	0,00211	708,42	2094,87	32,37
4	3,35	5,90	0,00396	439,56	1897,63	30,36
5	2,60	4,77	0,00205	470,22	1843,65	32,57
6	2,91	3,21	0,00216	505,02	1871,98	32,35
7	2,41	3,09	0,00271	1875,9	2540,95	31,60
8	2,49	3,69	0,00350	1797,2	2682,61	30,69
9	2,54	4,19	0,00281	979,22	2234,82	31,43
10	3,74	4,55	0,00293	377,80	1711,56	31,33
11	3,33	5,28	0,00262	311,12	1651,34	31,68
12	2,69	3,95	0,00306	1077,7	2311,18	31,13
13	3,53	5,80	0,00340	325,90	1700,34	30,82
14	3,84	5,44	0,00232	180,52	1401,66	32,15
15	3,97	5,36	0,00222	163,50	1362,64	32,32
16	2,27	5,61	0,00361	1034,1	2372,42	30,50
17	2,05	3,11	0,00374	3992,1	3217,04	30,53
18	3,67	3,44	0,00256	574,64	1848,03	31,82

Çizelge 4.2 LHS ile belirlenen tasarım noktaları ve analiz sonuçları (dört hücreli batarya modülü için)(devam)

19	3,88	5,04	0,00297	286,74	1605,14	31,31
20	2,26	4,99	0,00309	1053,2	2327,55	31,00
21	3,63	5,55	0,00382	393,10	1804,27	30,46
22	2,75	3,54	0,00278	1108,2	2290,78	31,48
23	2,15	4,48	0,00393	1990,1	2795,31	30,30
24	2,36	3,79	0,00359	1961,8	2737,05	30,59
25	3,24	5,75	0,00318	366,60	1757,27	31,00
26	3,04	4,64	0,00245	447,32	1791,26	31,91
27	3,10	4,85	0,00326	583,06	1981,49	30,93
28	3,59	4,35	0,00332	535,98	1915,43	30,92
29	2,96	4,27	0,00251	576,26	1903,67	31,84
30	3,14	4,08	0,00338	837,16	2155,35	30,84

4.1.3. GRA ile en iyi tasarım değişkenlerinin belirlenmesi

Bu çalışmada, ortalama ısı taşınım katsayısı için Denklem (3.32), toplam basınç düşümü ve en yüksek sıcaklık için ise Denklem (3.33) kullanılarak normalizasyon gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, Denklem (3.34) kullanılarak her tasarım için gri ilişki mutlak sapma dizileri hesaplanır. Bir sonraki adımda, Denklem (3.37) kullanılarak gri ilişki katsayıları hesaplanır. Tüm faktörlerin etki oranı aynı olduğundan gri ilişki dereceleri Denklem (3.39) ile hesaplanır. Son olarak her tasarımın GRA değerlerine göre sırası belirlenir. Normalize edilmiş tasarım değerleri, gri ilişki (GR) katsayıları, GRA değerleri ve sıralamaları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Normalize edilmiş tasarım değerleri, GR, GRA değerleri ve sıralamaları

	Normalize tasarım değerleri			GR Katsayıları				
LHS No	P	h_{avg}	T_{max}	P	h_{avg}	T_{max}	GRG	Sıra
1	0,19	0,54	0,13	0,724	0,480	0,796	0,6664	6

Çizelge 4.3 Normalize edilmiş tasarım değerleri, GR, GRA değerleri ve sıralamaları (devam)

2	0,21	0,57	0,77	0,709	0,465	0,392	0,5220	30
3	0,14	0,61	0,91	0,778	0,452	0,354	0,5284	28
4	0,07	0,71	0,03	0,874	0,413	0,950	0,7454	1
5	0,08	0,74	1,00	0,862	0,403	0,333	0,5328	27
6	0,09	0,73	0,90	0,849	0,408	0,356	0,5377	26
7	0,45	0,36	0,57	0,528	0,578	0,467	0,5244	29
8	0,43	0,29	0,17	0,540	0,634	0,743	0,6391	9
9	0,21	0,53	0,50	0,701	0,486	0,502	0,5630	21
10	0,06	0,81	0,45	0,899	0,381	0,526	0,6020	16
11	0,04	0,84	0,61	0,928	0,372	0,452	0,5841	18
12	0,24	0,49	0,36	0,677	0,506	0,579	0,5874	17
13	0,04	0,82	0,23	0,922	0,379	0,685	0,6620	7
14	0,00	0,98	0,81	0,991	0,338	0,380	0,5699	19
15	0,00	1,00	0,89	1,000	0,333	0,360	0,5644	20
16	0,23	0,46	0,09	0,687	0,523	0,850	0,6868	5
17	1,00	0,00	0,10	0,333	1,000	0,831	0,7214	3
18	0,11	0,74	0,67	0,823	0,404	0,428	0,5517	25
19	0,03	0,87	0,44	0,940	0,365	0,531	0,6117	14
20	0,23	0,48	0,31	0,683	0,510	0,617	0,6035	15
21	0,06	0,76	0,09	0,893	0,396	0,850	0,7129	4
22	0,25	0,50	0,52	0,670	0,500	0,491	0,5537	24
23	0,48	0,23	0,00	0,512	0,687	1,000	0,7330	2
24	0,47	0,26	0,13	0,516	0,659	0,796	0,6568	8
25	0,05	0,79	0,31	0,904	0,388	0,617	0,6367	10
26	0,07	0,77	0,71	0,871	0,394	0,414	0,5596	22
27	0,11	0,67	0,28	0,820	0,429	0,642	0,6303	12
28	0,10	0,70	0,27	0,837	0,416	0,646	0,6329	11
29	0,11	0,71	0,68	0,823	0,414	0,425	0,5538	23
30	0,18	0,57	0,24	0,740	0,466	0,677	0,6275	13

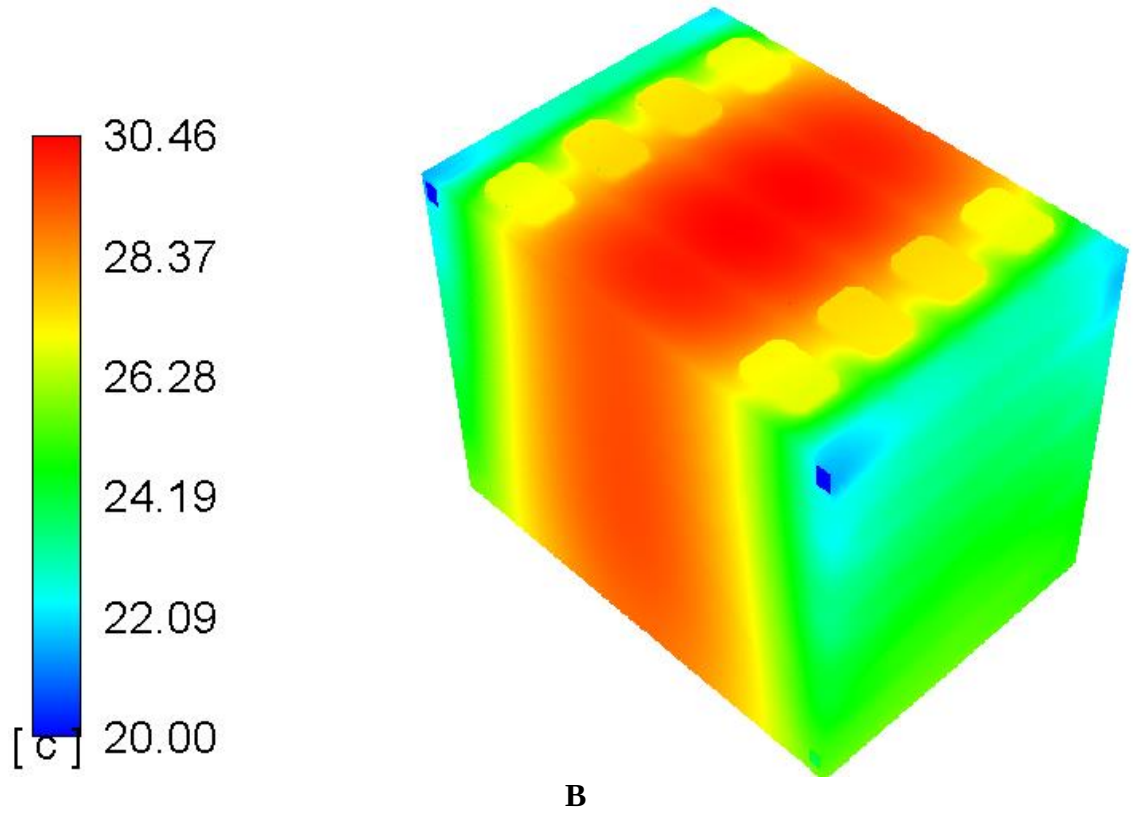
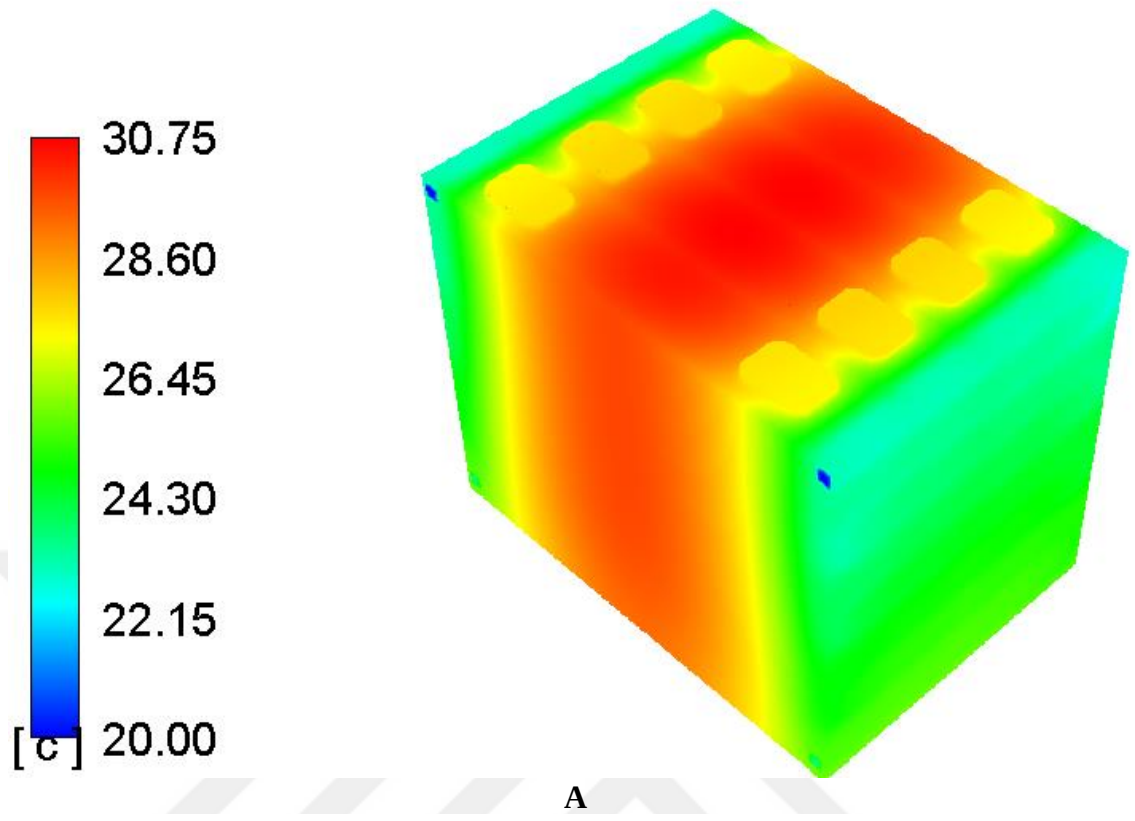
GRA sonuçlarının incelenmesi için, optimizasyon çalışması öncesi yapılan ön çalışmaya göre belirlenen ve baz tasarım olarak kabul edilen analizin sonuçları ile en yüksek GRA değerlerine sahip ilk beş analizin sonuçları karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Baz tasarım ve en yüksek GRA değerine sahip ilk beş tasarımın sonuçları

	<u>Girdiler</u>			<u>Çıktılar</u>			
LHS No	w [mm]	h [mm]	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	h_{avg} [W/(m ² K)]	T _{max} [°C]	Sıra
Baz	4	4	0,00400	659,24	2040,81	30,76	-
4	3,35	5,90	0,00396	439,56	1897,63	30,36	1
23	2,15	4,48	0,00393	1990,1	2795,31	30,30	2
17	2,05	3,11	0,00374	3992,1	3217,04	30,53	3
21	3,63	5,55	0,00382	393,10	1804,27	30,46	4
16	2,27	5,61	0,00361	1034,1	2372,42	30,50	5

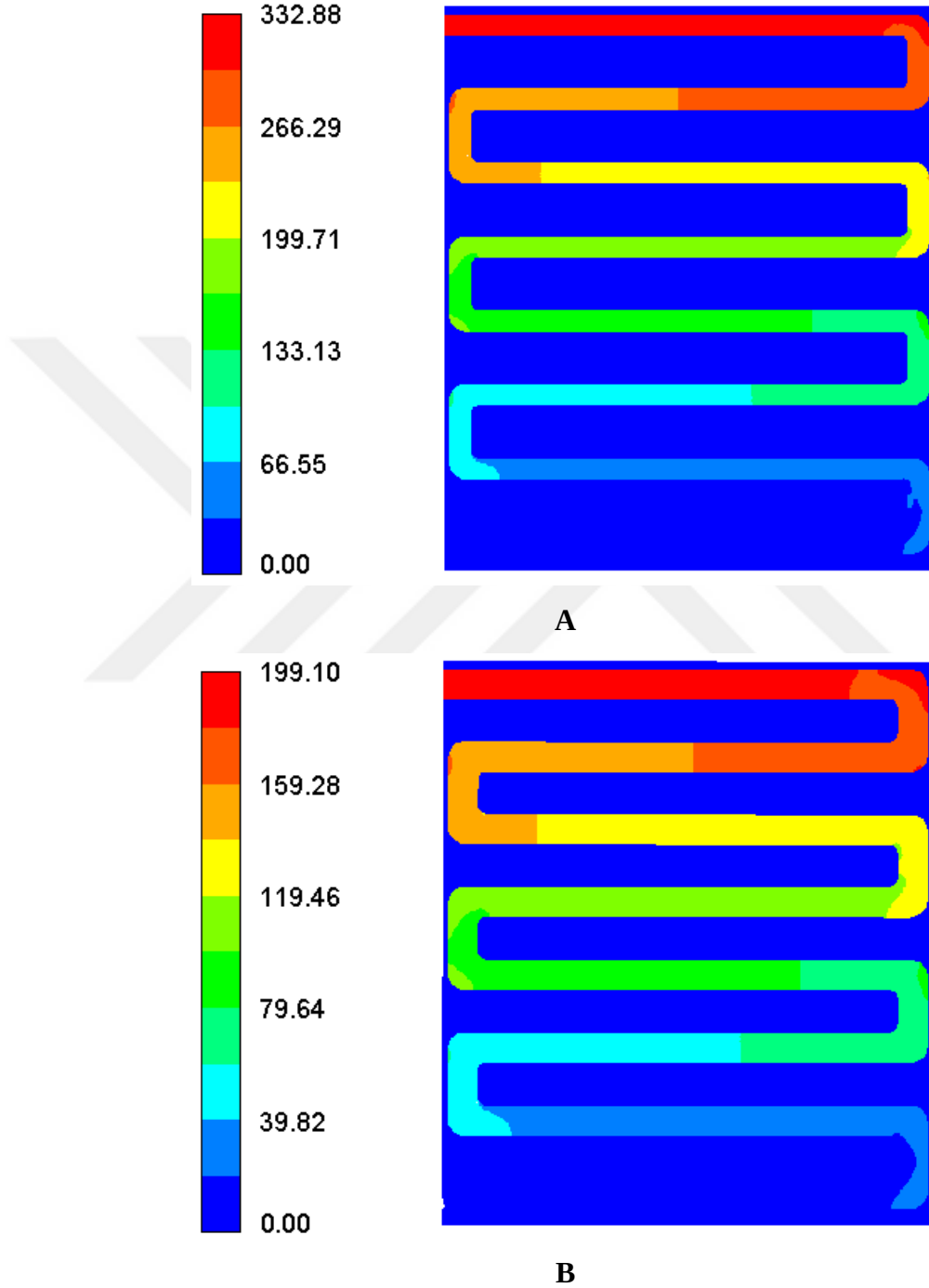
LHS No 4 ve 21'in en yüksek sıcaklık değerlerini baz tasarımdaki değerin altında tutarken basınç düşümünde sırasıyla %33,3 ve %40,3, ortalama ısı taşınım katsayısında sırasıyla %7 ve %11,6 oranında azalma görülmektedir. LHS No 16, 17 ve 23'ün ortalama ısı taşınım katsayıları ciddi bir artış gösterse de basınç düşümü değerleri temel tasarıma göre çok daha yüksektir. LHS No 4'ün kütleli debisi neredeyse temel tasarıma eşittir ve LHS No 21, kütleli debide %4,5'luk düşüş ile temel tasarımın en yüksek sıcaklığının altındaki en yüksek sıcaklık değerini sağlayabildiği görülmüştür. LHS No 21, ortalama ısı taşınım katsayısında %11,6 düşüşe karşı basınç düşümünde %40,3 ve kütleli debide %4,5 azalma sağlaması nedeniyle optimum tasarım olarak seçilebilir.

Baz tasarım ve LHS – GRA yöntemi ile optimum olarak belirlenen LHS No 21 tasarımının sıcaklık dağılımları Şekil 4.6' da verilmiştir. Ayrıca baz tasarımın ortadaki hücrelerinin ortalama sıcaklığı 28,42 °C iken LHS No 21'in ortadaki hücrelerinin ortalama sıcaklığı 28,18 °C olarak hesaplanmıştır. LHS No 21 tasarımı hem en yüksek sıcaklık değerinde hem de ortadaki hücrelerin ortalama sıcaklık değerinde düşüş sağlayabilmiştir.



Şekil 4.6. Batarya modülü üzerindeki sıcaklık dağılımı **A)** Baz Tasarım **B)** LHS No 21

Baz tasarımının ve LHS No 21 tasarımının serpantin kanallarının içerisinde orta kesimdeki basınç dağılımları Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Bir serpantin kanal için basınç farkı 133,8 Pa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. Serpantin kanalın orta kesitinde basınç dağılımları [Pa] **A)** Baz tasarım **B)** LHS No 21

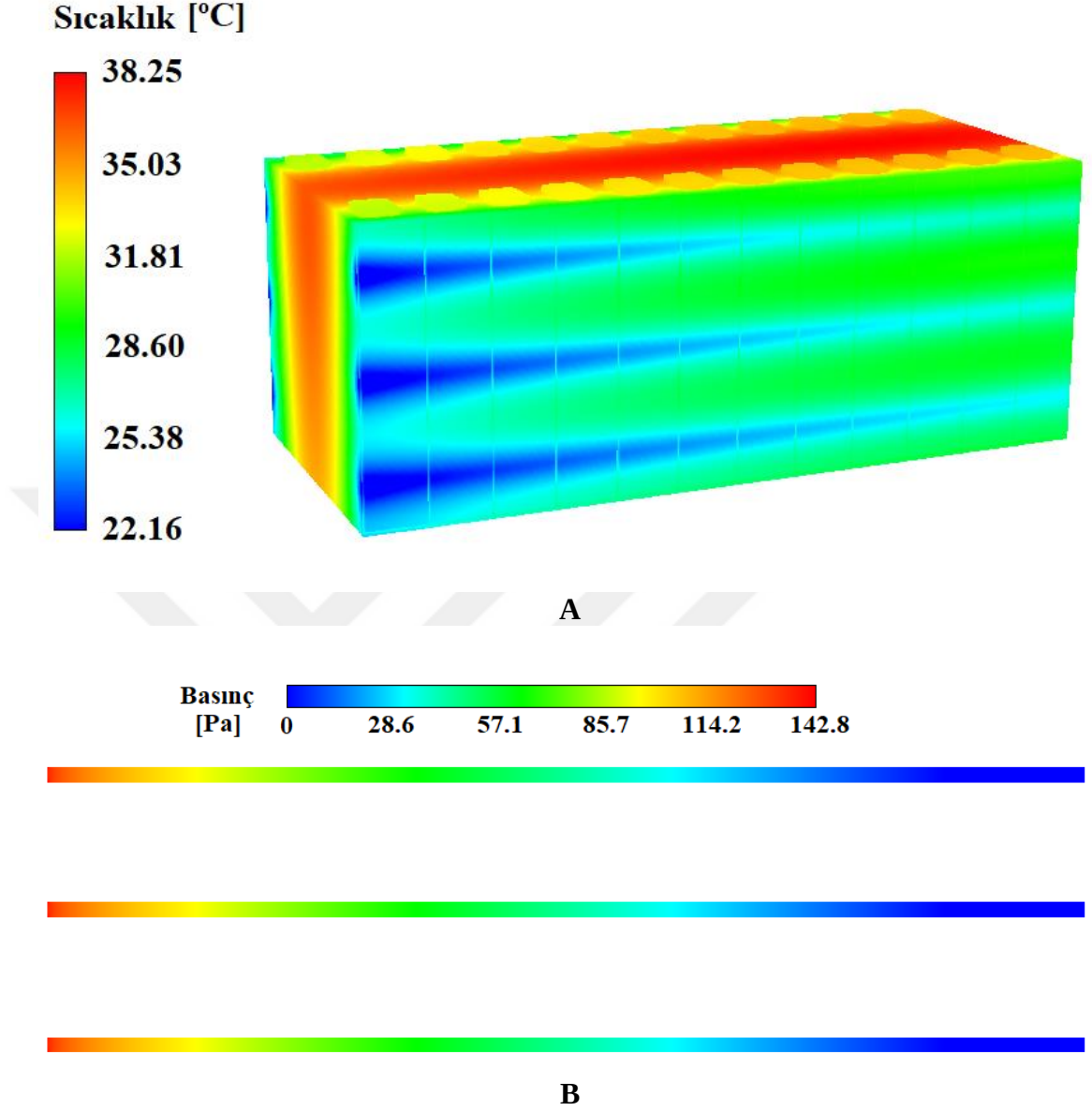
4.2. On İki Hücreli Batarya Modülü Çalışmaları

Bu kısımda on iki hücreli batarya modülüne ait soğutma performansını ve basınç düşümünü etkileyen değişkenler incelenmiştir. Nümerik analizlere ait başlangıç ve sınır koşulları Çizelge 4.5’ te verilmiştir. Ortam ile temas eden tüm yüzeylere taşınım sınır şartı verilmiş ve $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ değerinde taşınım ile ısı transferi katsayısı tanımlanmıştır.

Çizelge 4.5. On iki hücreli modülün analizlerinin başlangıç ve sınır şartları

Başlangıç/Sınır Şartları	Değer/Tip
Giriş Tipi	Kütlesel Debi
Çıkış Tipi	Basınç Çıkışı
Giriş Kütlesel Debisi	0,021 kg/s
Çıkıştaki Basınç	0 Pa
Su Sıcaklığı	20 °C
Batarya Sıcaklığı	20 °C
Soğutucu Plaka Sıcaklığı	20 °C
Ortam Sıcaklığı	20 °C
Simülasyon Rejimi	Geçici Rejim
Deşarj Oranı	5c
Simülasyon Süresi	720 s

İlk olarak, batarya soğutma sisteminin gerekli sorunlarını tespit etmek için baz tasarımın soğutma performansı ve basınç düşümü incelenmiştir. Baz tasarımın parametreleri w için 0,004 m, h için 0,004 m ve Oh/Ih için 1'dir. Sıcaklık ve basıncın konturları Şekil 4.8.'de verilmiştir. Batarya hücrelerinin yan bölgelerinin sıcaklığı, bu bölgeler soğutma plakalarına yakın olduğu için daha düşüktür. Batarya hücrelerinin orta bölgelerinin üst kısmının sıcaklığı, orta bölgelerinin alt kısmından daha yüksektir. Çünkü üst bölgeler atmosfer ile temas halindedir ve alt bölgeler alt ısı ileten plaka ile temas halindedir. Batarya hücre yüzeylerinin ortalama sıcaklık değerleri (T_{ort}) hesaplanmış olup, batarya modülünün baz tasarımının ilk ve son hücreleri için ortalama sıcaklık farkı (ΔT_{ort}) 1,96 °C olarak hesaplanmıştır. Batarya soğutma sisteminin toplam basınç düşümü CFD simülasyonundan 836,88 Pa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8. On iki hücreli batarya modülü için **A)** Sıcaklık dağılımı **B)** Basınç dağılımı

Mühendislik problemleri genellikle işlevsellik ve bazı üretim faktörleri gibi iki veya daha fazla hedefi aynı anda düşünmeyi gerektirir. Bu nedenle çok amaçlı optimizasyon, mühendislik tasarımı ve imalat problemlerinde etkin bir araç olarak sıklıkla tercih edilmektedir.

Sıcaklık farkı, batarya modüllerinin kapasite kullanımı ve çevrim ömrünü olan etkilediğinden dolayı batarya termal yönetim sistemleri için önemli bir faktördür (Saw ve

ark., 2014; Feng ve ark., 2018). Pompanın güç tüketimi nedeniyle batarya termal yönetim sisteminin verimliliği açısından basınç düşümü de önemli bir konudur (Chen ve ark., 2019). Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada sıcaklık farkı ve basınç düşümünü azaltma amacıyla batarya modülleri için daha iyi soğutma sistemleri tasarlamak için çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Batarya modülünün soğutma sistemi için çok amaçlı optimizasyon problemi Denklem (4.1)'de verilmiştir.

$$\begin{cases} \min\{\Delta P(x, y, z), \Delta T_{avg}(x, y, z)\} \\ s. t \begin{cases} 0,002 < w < 0,004 \\ 0,004 < h < 0,008 \\ 1 < O_h/I_h < 2 \end{cases} \end{cases} \quad (4.1)$$

Burada w (kanal genişliği), h (kanal yüksekliği) ve O_h/I_h (kanal çıkış yüksekliğinin kanal giriş yüksekliğine oranı) tasarım değişkenleridir.

4.2.1. LHS ile belirlen noktaların CFD analizleri (On iki hücreli modül)

Bu çalışmada, on iki hücreli batarya modülünün de LHS yöntemi kullanılarak tasarım değişkenlerinin sınırları içerisinde otuz tasarım noktası oluşturulmuştur. LHS yöntemi ile oluşturulan tasarım noktaları ve bu verilerle yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. LHS ile belirlenen tasarım noktaları ve analiz sonuçları (dört hücreli batarya modülü için)

LHS No	w [m]	h [m]	O_h/I_h	ΔT_{ort} [°C]	P [Pa]	T_{max} [°C]
1	0,00341	0,00514	1,85	1,71	991,86	38,18
2	0,00286	0,00441	1,19	1,77	1538,9	38,16
3	0,00211	0,00682	1,05	1,58	1538,6	37,72
4	0,00335	0,00787	1,98	1,55	493,14	37,94
5	0,00260	0,00636	1,02	1,77	985,80	37,88
6	0,00291	0,00429	1,08	1,82	1479,0	38,16
7	0,00241	0,00413	1,36	1,62	2708,6	38,18

Çizelge 4.6 LHS ile belirlenen tasarım noktaları ve analiz sonuçları (dört hücreli batarya modülü için)(devam)

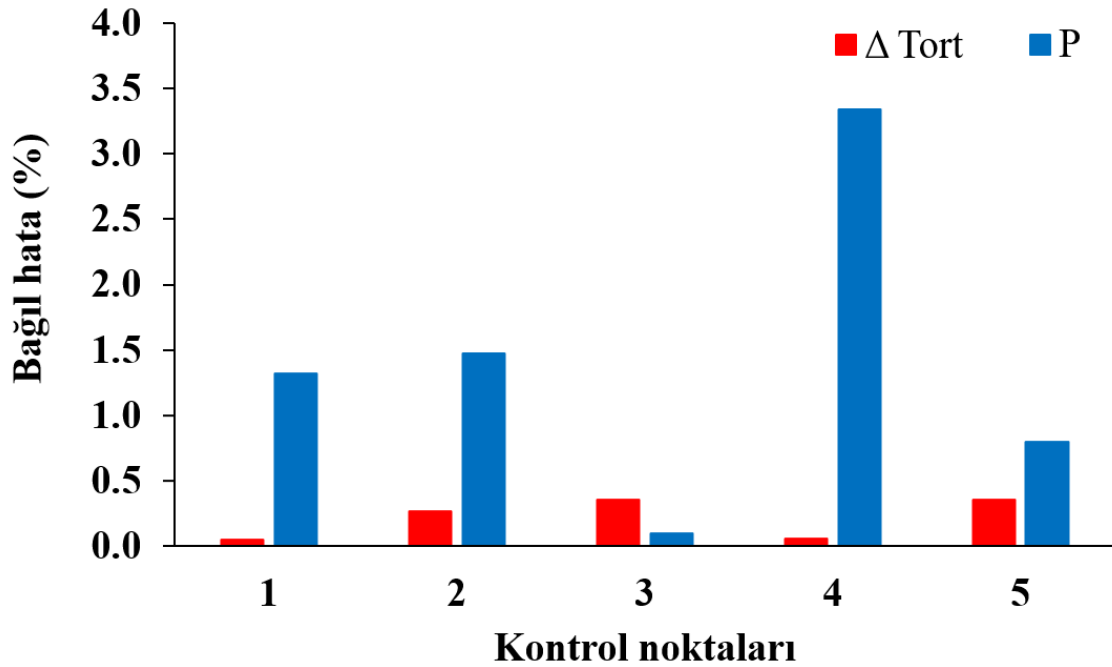
8	0,00249	0,00492	1,75	1,52	2068,9	38,13
9	0,00254	0,00559	1,41	1,59	1454,0	38,02
10	0,00374	0,00607	1,47	1,83	533,34	38,08
11	0,00333	0,00704	1,31	1,77	512,88	37,94
12	0,00269	0,00527	1,53	1,6	1454,1	38,09
13	0,00353	0,00774	1,70	1,68	424,62	37,95
14	0,00384	0,00726	1,16	1,97	330,18	37,96
15	0,00397	0,00714	1,11	2,03	308,82	38,09
16	0,00227	0,00749	1,80	1,22	1350,5	37,76
17	0,00205	0,00415	1,87	1,34	4454,1	38,16
18	0,00367	0,00459	1,28	1,86	872,40	38,16
19	0,00388	0,00673	1,48	1,84	409,56	38,04
20	0,00226	0,00665	1,55	1,36	1543,6	37,85
21	0,00363	0,00741	1,91	1,67	448,26	38,01
22	0,00275	0,00472	1,39	1,67	1605,1	38,14
23	0,00215	0,00597	1,96	1,23	2218,6	37,95
24	0,00236	0,00505	1,80	1,45	2263,0	38,11
25	0,00324	0,00767	1,59	1,62	515,70	37,90
26	0,00304	0,00619	1,23	1,77	762,12	37,99
27	0,00310	0,00647	1,63	1,61	761,70	38,01
28	0,00359	0,00580	1,66	1,75	670,86	38,11
29	0,00296	0,00569	1,26	1,73	941,58	38,03
30	0,00314	0,00544	1,69	1,65	1016,5	38,12

4.2.2. On iki hücreli batarya modülü için vekil modelleme

Bu çalışmada tasarım değişkenlerinin etkilerini incelemek ve çok amaçlı optimizasyon çalışması yapmak amacıyla vekil modelleme yöntemi kullanılmıştır. Radyal tabanlı fonksiyonlar (RTF), doğruluk ve sağlamlık açısından diğer vekil modelleme

yöntemlerinden daha iyi sonuçlar vermektedir. (Jin ve diğerleri, 2001). Bu çalışmada vekil modelleme için RTF tercih edilmiştir.

Vekil modellerin kalitesi, optimizasyon doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, vekil modelin doğruluğunu incelemek için LHS yöntemi kullanılarak beş adet fazladan tasarım noktası oluşturulmuştur. RTF modelleri ile CFD simülasyonları arasındaki bağıl hata (RE) Şekil 4.9'da verilmiştir. Sıcaklık farkı ve basınç düşümü için oluşturulan RTF modellerine göre en yüksek hatanın %3.5'tan az olduğu görülmektedir. RTF modellerinin çok amaçlı optimizasyon çözümleri için yeterli ve yüksek doğrulukta sonuçlar sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.9. RTF modelleri ve CFD simülasyonları arasındaki bağıl hatalar

4.2.3. Tasarım değişkenlerinin etkilerinin incelenmesi

On iki hücreli batarya modülünün soğutma sisteminde w , h ve Oh/lh değişkenlerinin etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Etkileri incelerken bir önceki bölümdeki yüksek doğruluk sağlayan vekil model kullanılmıştır. Etkileri incelemek için tasarım değişkenlerinin normalize değerleri kullanılmış ve bu değerler Çizelge 4.7'de verilmiştir. Her bir

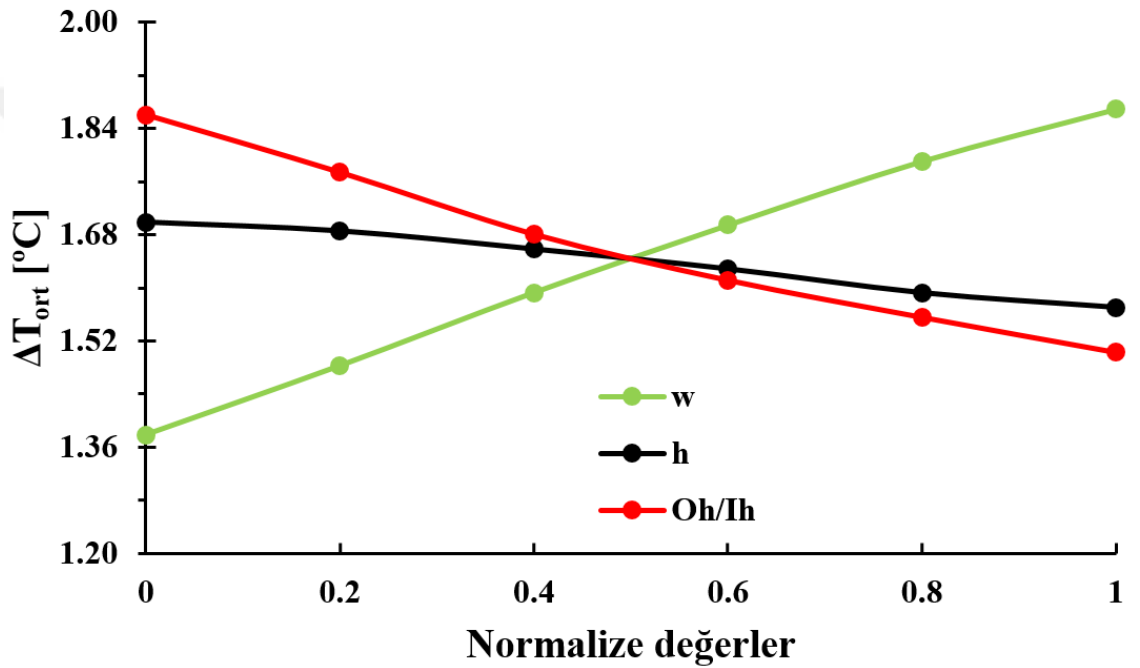
değişken 0,2 aralıklarla arttırılmış ve diğer parametreler 0,5 değerinde sabit tutularak 18 farklı tasarım incelenmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı tasarım değişkenlerinin normalize değerlerinin dağılımı

Tasarım	w	h	O_h/I_h
1	0	0,5	0,5
2	0,2	0,5	0,5
3	0,4	0,5	0,5
4	0,6	0,5	0,5
5	0,8	0,5	0,5
6	1	0,5	0,5
7	0,5	0	0,5
8	0,5	0,2	0,5
9	0,5	0,4	0,5
10	0,5	0,6	0,5
11	0,5	0,8	0,5
12	0,5	1	0,5
13	0,5	0,5	0
14	0,5	0,5	0,2
15	0,5	0,5	0,4
16	0,5	0,5	0,6
17	0,5	0,5	0,8
18	0,5	0,5	1

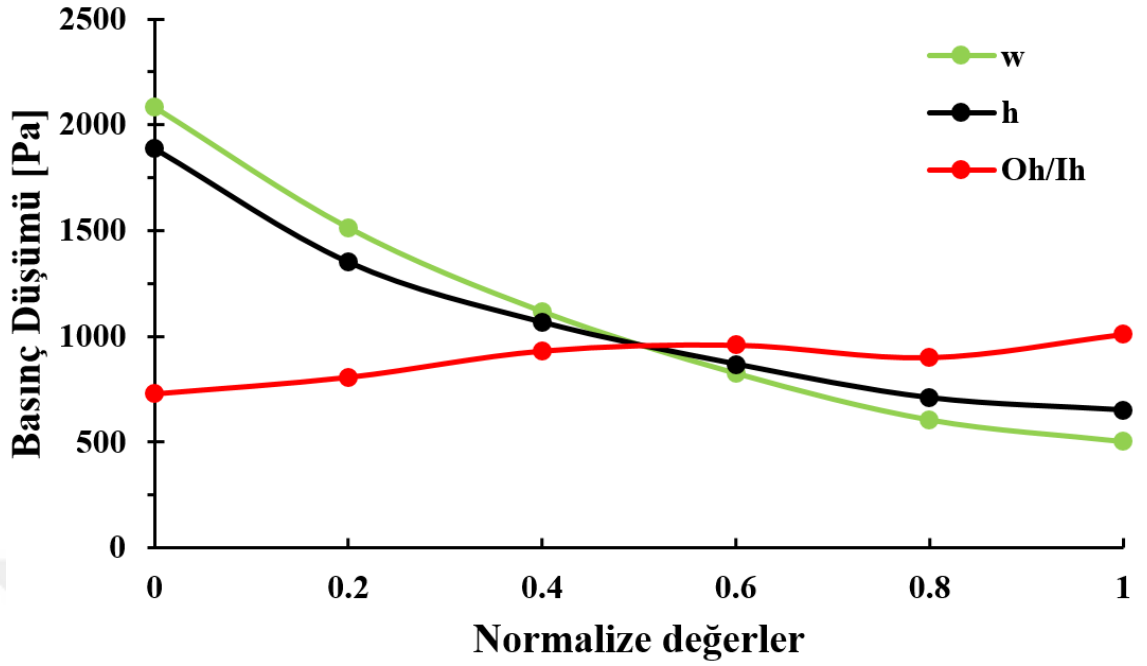
Şekil 4.10’da tasarım değişkenlerinin sıcaklık farkına olan etkisi gösterilmiştir. Kanal çıkış yüksekliğinin kanal giriş yüksekliğine oranı ve kanal yüksekliği arttıkça sıcaklık farkı azalmaktadır. Kanal çıkış yüksekliğinin kanal giriş yüksekliğine oranının etkisinin kanal yüksekliğinin etkisinden daha çok olduğu görülmüştür. Çıkışa doğru artan ısı transferi yüzey alanı sıcaklık farkının azalmasına olumlu katkı sağlamaktadır. Kanalın yüksekliği arttıkça ise akışkanın hızı azalmakta, bu da genişleyen kanalda ortalama ısı taşınım katsayısının azalmasına neden olmaktadır. Ancak artan kanal yüksekliği

nedeniyle ısı transfer alanı da artar. Batarya yüzeylerine paralel olarak artan ısı transfer alanının faydalı etkisi, azalan ortalama ısı taşınım katsayısının olumsuz etkisini geride bırakmaktadır. Kanal genişliği arttıkça ise sıcaklık farkı artmaktadır. Kanal genişliğinin tek başına artması akışkan hızını azaltmakta ve ortalama ısı taşınım katsayısını azaltmaktadır. Artan kanal genişliğiyle birlikte ısı transfer alanı da artmaktadır ancak batarya yüzeylerine dik eksende artan yüzey alanının olumlu etkisi azalan ortalama ısı taşınım katsayısının etkisinden daha azdır.



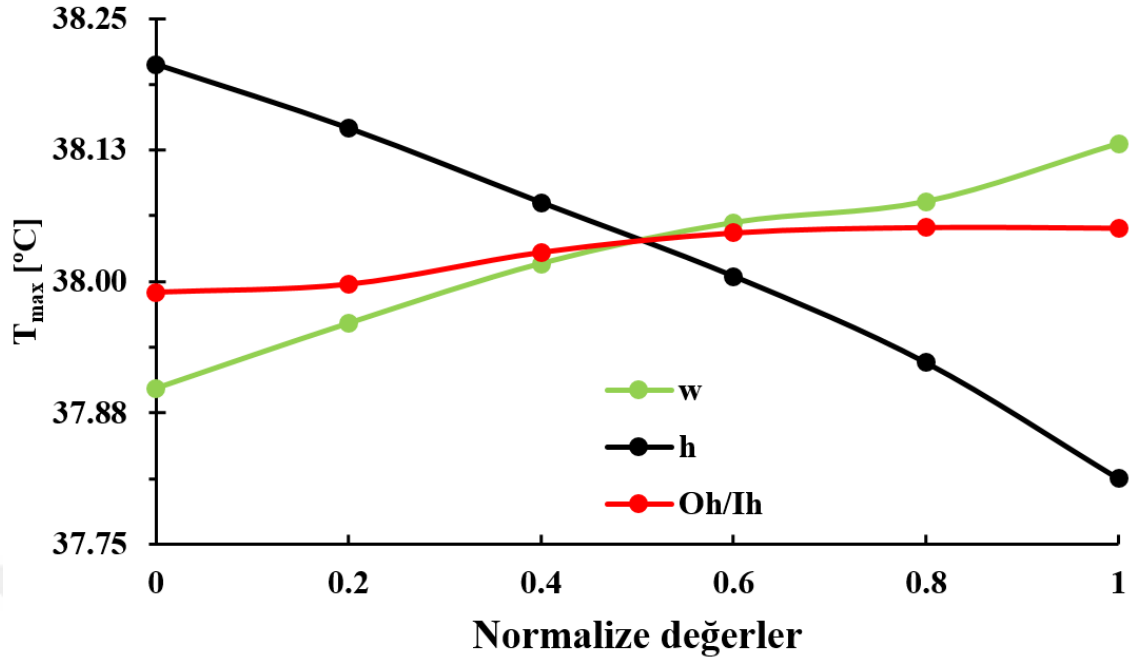
Şekil 4.10. Tasarım değişkenlerinin sıcaklık farkına olan etkisi

Şekil 4.11’de tasarım değişkenlerinin basınç düşümüne olan etkisi gösterilmiştir. Artan yüzey alanı akışkanın hızını düşürerek basınç düşümünü azaltacağından dolayı kanal genişliği ve kanal yüksekliğinin artmasıyla basınç düşümü azalmaktadır. Çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranı arttıkça basınç düşümü artmaktadır. Bunun sebebi ise çıkıştaki akışkan hızının düşmesiyle birlikte Bernoulli prensibi sebebiyle basıncın artmasıdır (White, 2011). Ancak çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranının artmasının etkisi diğer değişkenlerin etkisinden daha düşüktür.



Şekil 4.11. Tasarım değişkenlerinin basınç düşümüne olan etkisi

Şekil 4.12’de tasarım değişkenlerinin en yüksek sıcaklığa olan etkileri gösterilmiştir. Kanal yüksekliği arttıkça en yüksek sıcaklığın azaldığı, kanal genişliği ve girişteki kanal yüksekliğinin çıkıştaki kanal yüksekliğine oranı arttıkça en yüksek sıcaklığın arttığı görülmektedir. Kanal yüksekliği arttıkça en yüksek sıcaklığın düşmesinin sebebi daha önceden de bahsedildiği üzere kanal yüksekliği arttıkça batarya yüzeylerine paralel olarak artan ısı transfer alanının faydalı etkisi, azalan ortalama ısı taşınım katsayısının olumsuz etkisini geride bırakmasıdır. Kanal çıkış yüksekliğinin kanal giriş yüksekliğine oranı ve kanal yüksekliği arttıkça sıcaklık farkı azalmaktadır. Kanal genişliğinin tek başına artması akışkan hızını azalttığından dolayı ortalama ısı taşınım katsayısı da azaltmaktadır. Artan kanal genişliğiyle birlikte ısı transfer alanı da artmaktadır ancak batarya yüzeylerine dik ekseninde artan yüzey alanının olumlu etkisi azalan ortalama ısı taşınım katsayısının etkisinden daha azdır. Kanal çıkış yüksekliğinin kanal giriş yüksekliğine oranının en yüksek sıcaklığa olan etkisi diğer tasarım değişkenlerine göre daha azdır. Isı transferi yüzey alanı ve ısı taşınım katsayısındaki değişimlerin olumlu ve olumsuz ve etkileri bir birlerini dengelemektedirler.



Şekil 4.12. Tasarım değişkenlerinin en yüksek sıcaklığa olan etkisi

4.2.4. On iki hücreli batarya modülünün çok amaçlı optimizasyonu

Bir önceki bölümde kanal yüksekliği, kanal genişliği ve çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranının basınç düşümü, sıcaklık farkı ve en yüksek sıcaklık üzerine önemli etkileri olduğu görülmüştür. Çalışmanın bu bölümünde tasarım değişkenlerinin en uygun değerlerini belirleyebilmek için dört farklı çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılmış ve bu yöntemlerin performansları incelenmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon yöntemi olarak literatürde de sıklıkla kullanılan ve son yıllarda literatüre kazandırılan yöntemlerden NSGA II, NSGA III, MOPSO ve CMOPSO yöntemleri kullanılmıştır. Tüm yöntemler sonuçların doğruluğu ve tekrar edilebilirliği için yirmişer kere çalıştırılmıştır. Tüm yöntemler için iterasyon sayısı 100 ve popülasyon 100 olarak seçilmiştir. Yöntemlerin performanslarını kıyaslamak için Hypervolume (HV), Inverted Generational Distance (IGD), Boşluk ve Yayılma performans metrikleri kullanılmıştır. Kullanılan optimizasyon yöntemleri ait performans metrikleri ve standart sapmaları (Std.) Çizelge 4.8 ve 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı yöntemlerin performans metriklerinin ortalaması

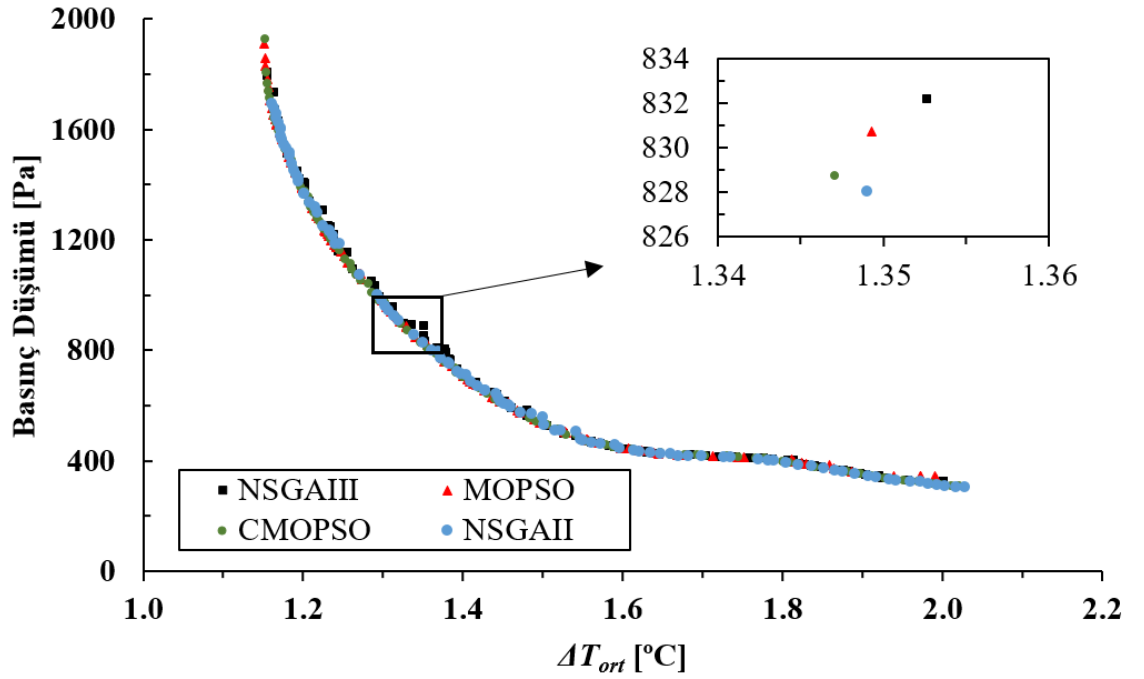
	HV	IGD	Boşluk	Yayılma
Yöntem	Ort.	Ort.	Ort.	Ort.
NSGAII	0,3541	305,830	9,3241	0,8127
NSGAIII	0,3541	305,949	24,5994	0,7845
MOPSO	0,3270	309,408	8,3684	0,9079
CMOPSO	0,3546	305,860	8,7440	0,6829

Çizelge 4.9. Farklı yöntemlerin performans metriklerinin standart sapmaları

	HV	IGD	Boşluk	Yayılma
Yöntem	Std.	Std.	Std.	Std.
NSGAII	0,0002	0,0225	0,7111	0,0422
NSGAIII	0,0014	0,2381	2,2567	0,0302
MOPSO	0,0064	4,7694	1,1521	0,0335
CMOPSO	0,0004	0,0513	0,3964	0,0224

CMOPSO yöntemi HV ve Yayılma performans metriklerinde en iyi ortalama değerlere ve Boşluk ve Yayılma performans metriklerinde en düşük standart sapma değerlerini vermektedir. NSGA II yöntemi de en iyi IGD ortalama değerine ve HV ve IGD performans metriklerinde en düşük standart sapma değerlerine sahiptir. MOPSO yöntemi her ne kadar Boşluk performans metriğinde en iyi ortalama değere sahip olsa da bütün performans metriklerinin standart sapma değerlerinde en kötü sonuçları vermektedir. Performans metriklerinin değerlendirilmesi açısından bakıldığında CMOPSO ve NSGA II yöntemleri en iyi sonuçları vermektedir.

Şekil 4.13'te ise dört farklı optimizasyon yönteminin Pareto cepheleri bir arada verilmiştir. Dört yöntemin de Pareto cepheleri incelendiğinde sonuçların bir birine yakın olduğu görülmektedir.

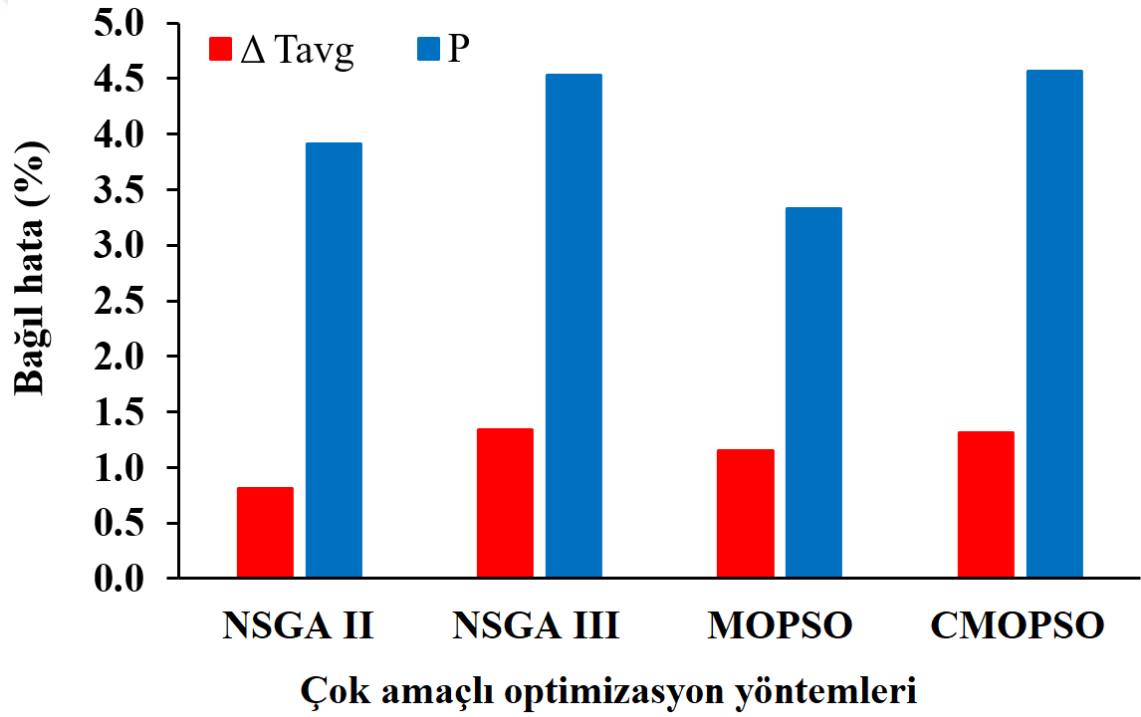


Şekil 4.13. Farklı optimizasyon yöntemlerinin Pareto cepheleri

Bu çalışmada kullanılan bütün çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin Pareto cephelerine bakıldığında sıcaklık farkı azaldıkça basınç düşümü artmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon çalışmalarında birden fazla en iyi sonuç olduğu için genellikle tasarımcılar kendi amaçlarına en uygun tasarımı seçmeye çalışırlar. Her ne kadar bu çalışmada iki adet amaç olsa da tasarım değişkenleri, özellikle çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranı, sıcaklık farkını en aza indirmek birinci önceliklidir. Bu sebepten dolayı baz tasarımın 836.88 Pa olan basınç düşümü değerinin hemen altındaki tasarımlar bu çalışmanın amacına en uygun tasarımlar olarak belirlenmiştir. Farklı çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin verdiği sonuçlar arasından en uygun olarak seçilen tasarımların sonuçları ile bu tasarımların CFD analizi sonuçları Çizelge 4.10'da ve bu çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle tahmin edilen sonuçların CFD analizi sonuçlarına göre bağlı hataları Şekil 4.14'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.10. Farklı optimizasyon yöntemlerinin sonuçları ile CFD sonuçlarının karşılaştırılması

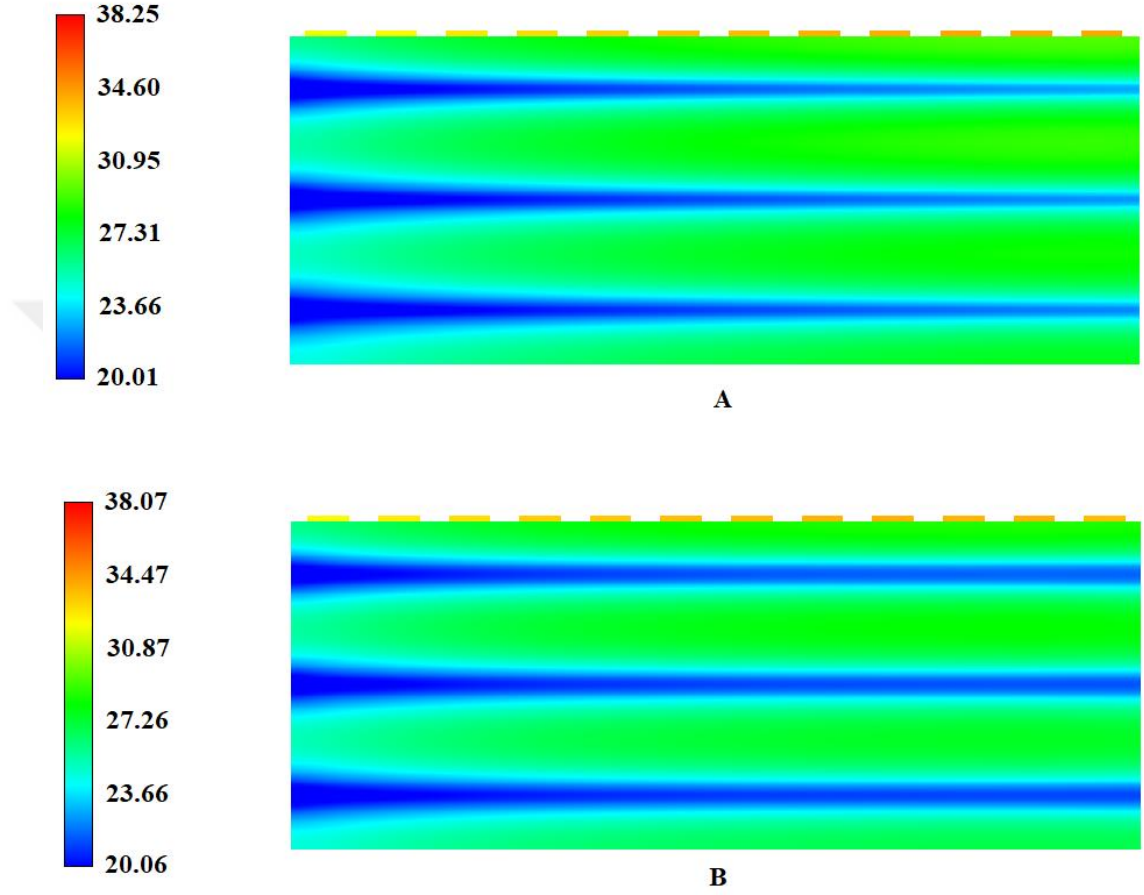
Yöntem	Tasarım değişkenleri			Optimizasyon		CFD	
	w	h	O_h/I_h	ΔT_{ort}	P	ΔT_{ort}	P
NSGAII	0,00270	0,00799	1,86	1,35	828,04	1,36	796,86
NSGAIII	0,00275	0,00783	1,95	1,35	832,20	1,37	796,14
MOPSO	0,00270	0,00794	1,86	1,35	830,76	1,37	804,00
CMOPSO	0,00271	0,00800	1,89	1,35	828,74	1,37	792,54



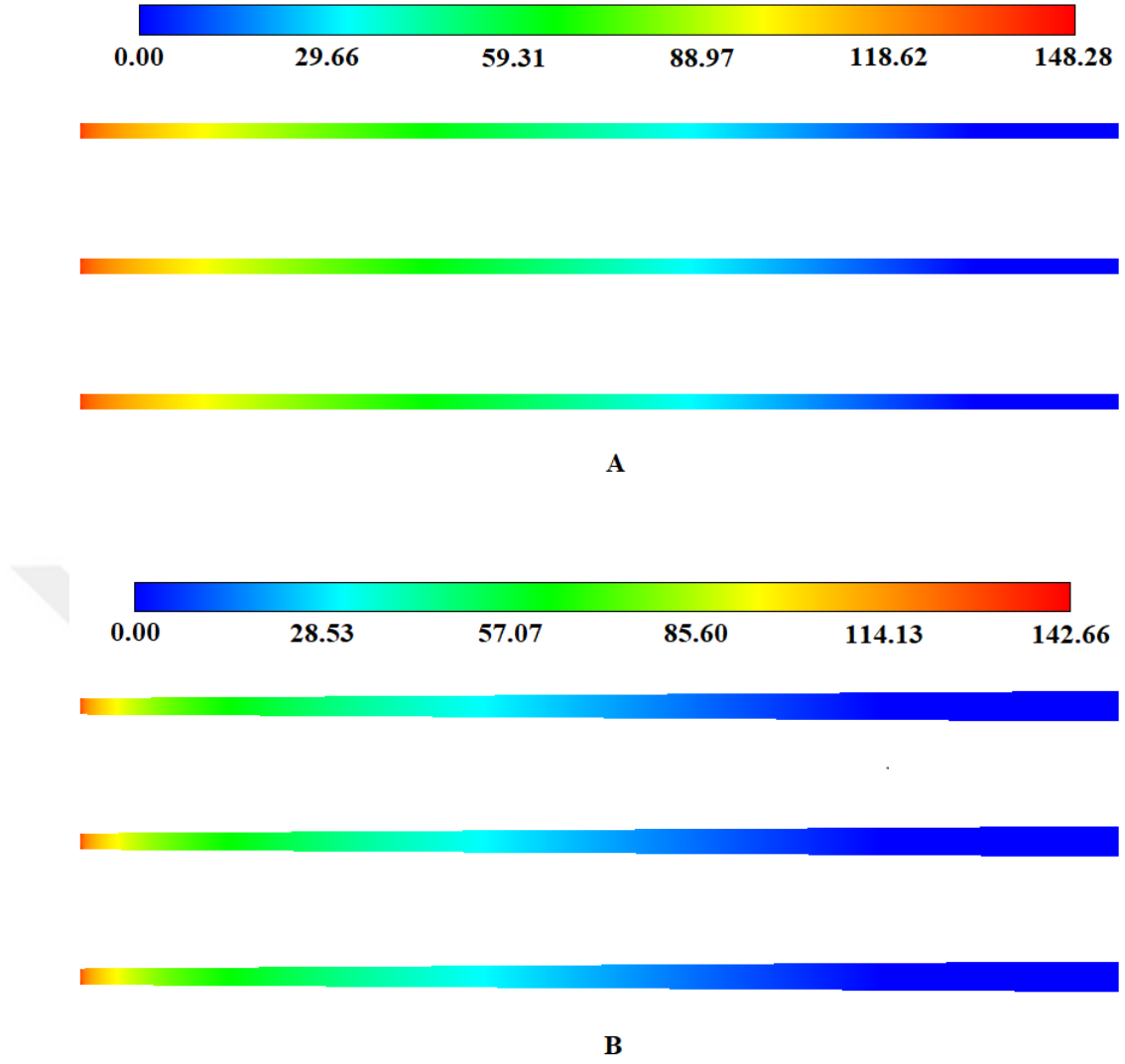
Şekil 4.14. Farklı optimizasyon yöntemlerinin CFD sonuçlarına göre bağıl hataları

Baz tasarımın ve CMOPSO yöntemiyle elde edilen tasarımın soğutucu plakalarındaki sıcaklık dağılımları Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Baz tasarımda soğutucu akışkanın çıkışa doğru ısınmasından dolayı çıkış bölgesine doğru soğutucu plakadaki sıcaklık dağılımı daha yüksektir. CMOPSO ile elde edilen tasarım çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranının 1.89 olması sebebiyle çıkıştaki ısı transferi alanı artmaktadır.

Bunun sonucu olarak soğutucu akışkanın ısınmasından dolayı oluşacak olan sıcaklık farkı artan ısı transfer yüzey alanı ile telafi edilmiş ve giriş bölgesindeki daha yakın sıcaklık farkı elde edilmiştir.



Şekil 4.15. On iki hücreli modülün soğutucu plakalarındaki sıcaklık dağılımı A) Baz tasarım B) CMOPSO yöntemiyle belirlenen tasarım



Şekil 4.16. On iki hücreli modülün soğutucu plakaların içindeki kanalların basınç dağılımı A) Baz tasarım B) CMOPSO yöntemiyle belirlenen tasarım

Şekil 4.16’da on iki hücreli modülün baz tasarım ve CMOPSO yöntemiyle belirlenen tasarımı için soğutucu plakaların içindeki kanalların orta kesitindeki basınç dağılımı gösterilmektedir. CMOPSO ile belirlenen tasarımın kanalın giriş kısmının kesit alanı baz tasarımın kesit alanından daha fazladır ve kanal çıkışına doğru artmaktadır. Bunun basınç düşümüne olumlu etkisi vardır. Çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranı arttıkça basınç düşümü artmaktadır. Ancak daha önceden bahsedildiği üzere bu değişkenin etkisi diğer değişkenlere göre daha azdır.

Çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin tahminlerine ve CFD analizlerinin sonuçlarına bakıldığında tüm optimizasyon yöntemlerinin sıcaklık farkını tahmin etmede çok iyi bir doğruluğa sahip olduğu görülmektedir. Çok amaçlı optimizasyon sonuçlarından seçilen tasarımın kanal genişliğinin belirlenen limit aralığının ortasına yakın olduğu, kanal yüksekliği ve çıkıştaki yüksekliğin girişteki yüksekliğe oranının ise limit aralığının üste sınırlarına yakın olduğu görülmektedir. Sıcaklık farkını ve basınç düşümünü optimize etmek için daha yüksek kanal yüksekliği ve çıkıştaki yüksekliğin girişteki yüksekliğe oranı ve daha düşük kanal genişliği tercih edilebileceği sonucuna varılabilir. CMOPSO yönteminden elde edilen tasarım değişkenlerine sahip tasarımın toplam basınç düşümü için en yüksek bağıl hataya sahip olmasına rağmen, bu tasarım seçilen tasarımların tüm CFD sonuçları arasında en düşük toplam basınç düşüşü değerine sahiptir. Çok amaçlı optimizasyon yöntemi olarak CMOPSO' nun seçilmesiyle sıcaklık farkı %30.3 ve toplam basınç düşümü ise %5.3 oranında azaltılabilmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında farklı sayıda hücrelerden oluşan batarya modüllerinin sıvı ile soğutma yöntemi kullanılarak içerisinden soğutucu akışkanın geçtiği kanallar bulunan farklı tipte soğutucu plakalarının optimum tasarımları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Dört hücreden oluşan batarya modülünün soğutulması için içerisinde serpantin kanal bulunan soğutma plakaları tasarlanmıştır. Paralel kanal sayısının ve soğutucu akışkanın kütleli debisinin soğutma performansına ve basınç düşümüne etkileri incelenmiştir. Sonrasında ise basınç düşümünü ve en yüksek sıcaklığı en aza indirmek ve ortalama ısı taşınım katsayısını en üst düzeye çıkarmak için soğutma sisteminin tasarım optimizasyon çalışması yapılmıştır. Kanal yüksekliği, kanal genişliği ve kütleli debi değişken olarak belirlenmiş ve bu değişkenlerin optimal aralıklarını belirlemek ve verimli bir batarya soğutma sistemi tasarlamak için LHS ve GRA yöntemleri kullanılarak ile yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Sonuçlar, önerilen yaklaşımın, bataryaları güvenli bir çalışma sıcaklığında tutmak ve basınç düşümünü ve en yüksek sıcaklık değerlerini optimize ederek güç tüketimini azaltmak için daha iyi soğutma plakaları tasarlamak için kullanılabileceğini göstermektedir. Dört hücreli batarya modülü için optimum soğutma sistemi tasarlamak adına yapılan çalışmalardan elde edilen bazı çıkarımlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Soğutucu akışkanın kütleli debisi batarya hücrelerinin en yüksek sıcaklık değerleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. En yüksek sıcaklık değerleri 0,001 kg/s kütleli debi için 35,5 °C ve 0,006 kg/s kütleli debi için 29,5 °C'dir. Kütleli debi belirli bir değerin üzerine çıktıkça en yüksek sıcaklık ve ortalama ısı taşınım katsayısında fazla bir değişim olmamaktadır. Kütleli debi belirli bir değerin altına düştüğünde de en yüksek sıcaklık değerleri artmaktadır. Bu çalışmada 0,002 – 0,004 kg/s arasındaki kütleli debi tasarımı için uygun bulunmuştur.
- Serpantin kanalı oluşturan paralel kanal sayısının hem basınç düşümü hem de en yüksek sıcaklık değerleri üzerinde büyük bir etkisi olduğu görülmüştür. Paralel kanal sayısının artması en yüksek sıcaklık değerlerini azaltmakta ancak basınç düşümünü de arttırmaktadır. Beş ile on üç arasında paralel kanal sayısı incelenmiş

ve en yüksek sıcaklık ile basınç düşümü arasındaki denge için sekiz paralel kanal bizim tasarımıımız için uygun bulunmuştur.

- Optimizasyon çalışması için ise farklı tasarımlar LHS yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve bu belirlenen tasarımların CFD analizleri yapılmıştır. Basınç düşümünü ve en yüksek sıcak değerlerini en aza indirmek ve ortalama ısı taşınım katsayısını en üst düzeye çıkarmak için optimum tasarım değişkenlerini ve kütleli debi değerini belirlemek için GRA yöntemi kullanılmıştır. Önerilen yöntemle ortalama ısı taşınım katsayısında %11,3'lük bir ödün ile basınç düşümü ve kütleli debide baz tasarıma göre sırasıyla %40,3 ve %4,5 oranında azalma sağlanmıştır.

On iki hücreden oluşan batarya modülünün soğutulması için içerisinde üçer adet birbirine paralel kanallar bulunan soğutma plakaları tasarlanmıştır. Kanal yüksekliği, kanal genişliği ve çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranı tasarım değişkenleri olarak belirlenmiş ve modülün içerisindeki sıcaklık farkının ve basınç düşümünün azaltılması amacıyla optimizasyon çalışması yapılmıştır. Vekil model oluşturmak için LHS yöntemiyle belirlenen tasarım noktalarının CFD analizleri yapılmıştır. Sonrasında RTF yöntemiyle düşük bağıl hataya sahip bir vekil model oluşturulmuştur. Vekil model kullanılarak tasarım değişkenlerinin soğutma performansına ve basınç düşümüne etkileri incelenmiştir. Sonrasında dört farklı çok amaçlı optimizasyon yöntemi seçilerek optimizasyon çalışmaları yapılmış ve çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin performansları incelenmiştir. On iki hücreli batarya modülü için optimum soğutma sistemi tasarlamak adına yapılan çalışmalardan elde edilen bazı çıkarımlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- CFD sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, RTF modellerinden elde edilen sıcaklık farkı ve basınç düşümü için en yüksek hata %3,5'ten azdır. Bu sonuçlar, RTF modellerinin benzer batarya soğutma sistemleri için yeterli doğrulukla çok amaçlı optimizasyon çalışmalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

- Kanal yüksekliği ve çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranı arttıkça sıcaklık farkı azalmakta, kanal genişliği arttıkça ise sıcaklık farkı arttığı görülmüştür. Kanal yüksekliği ve kanal genişliği arttıkça basınç düşümünün azaldığı, çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranı arttıkça basınç düşümünün az miktarda arttığı görülmüştür. Kanal yüksekliği arttıkça batarya modülü içerisindeki en yüksek sıcaklığın azaldığı, kanal genişliği ve çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranı arttıkça ise en yüksek sıcaklığın arttığı görülmüştür. Ancak çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranının en yüksek sıcaklığa etkisi diğer değişkenlerin etkisinden çok daha azdır.
- NSGAII, NSGAIII, MOPSO ve CMOPSO yöntemleri farklı performans metrikleri kullanılarak performansları karşılaştırılmıştır. NSGAII ve CMOPSO optimizasyon yöntemlerinin performans metriklerinin diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin Pareto cepheleri incelendiğinde ise sonuçların birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.
- CMOPSO yöntemi ile sıcaklık farkında %30,3, toplam basınç düşümünde %5,3 azalma sağlanmıştır. Çok amaçlı optimizasyon çalışmasının sonuçlarından, sıcaklık farkını ve basınç düşüşünü optimize etmek için daha yüksek kanal yüksekliğinin ve çıkıştaki kanal yüksekliğinin girişteki kanal yüksekliğine oranının ve daha düşük kanal genişliğinin tercih edildiği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Albak, E. İ. (2021). Crashworthiness design for multi-cell circumferentially corrugated thin-walled tubes with sub-sections under multiple loading conditions. *Thin-Walled Structures*, 164(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107886>
- Albak, E. İ. 2020. Multi-objective crashworthiness optimization of thin-walled multi-cell tubes with different wall lengths. *International Journal of Crashworthiness*. <https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1724015>
- Albak, E.İ. (2020). Arka aksın yeni yaklaşımlar ile tasarımının en iyilenmesi. Doktora Tezi, BUÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Albak, E.İ., Solmaz, E., Öztürk, F. 2020. Enhancing a twist beam suspension system conceptual design using population-based optimization methods. *Materials Testing*, 62(7): 672-677. <https://doi.org/10.3139/120.111532>
- Alipanah, M., & Li, X. (2016). Numerical studies of lithium-ion battery thermal management systems using phase change materials and metal foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 1159–1168. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.010>
- Anonim, 2021a. <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib.html>
- Anonim, 2021b. <https://www.bkprecision.com/products/dc-electronic-loads/8514-1200-w-programmable-dc-electronic-load.html>
- Baloch, A. A. B., Bahaidarah, H. M. S., Gandhidasan, P., & Al-Sulaiman, F. A. (2015). Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling. *Energy Conversion and Management*, 103, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.018>
- Bernardi D., Pawlikowski E., & Newman J. (1985). A general energy balance for battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(1), 5 <https://doi.org/10.1149/1.2113792>
- Bezbaruah, P. J., Das, R. S., & Sarkar, B. K. (2020). Overall performance analysis and GRA optimization of solar air heater with truncated half conical vortex generators. *Solar Energy*, 196(November), 637–652. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.057>
- Bulut, E., Albak, E. İ., Sevilgen, G., & Öztürk, F. (2021). A new approach for battery thermal management system design based on Grey Relational Analysis and Latin Hypercube Sampling. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28(August), 101452. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101452>
- Bulut, E., Sevilgen, G., Eşiyok, F., Öztürk, F., & Abi, T. T. (2021). Three dimensional numerical analysis of heat transfer during spray quenching of 22MnB5 steel with a single

nozzle. *Heat and Mass Transfer*, 57(6), 961–974. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02992-w>

Chamoli, S., Yu, P., & Kumar, A. (2016). Multi-response optimization of geometric and flow parameters in a heat exchanger tube with perforated disk inserts by Taguchi grey relational analysis. *Applied Thermal Engineering*, 103, 1339–1350. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.166>

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., Wang, S., Song, M., & Chen, L. (2017). Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, 943–952. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.026>

Chen, S., Peng, X., Bao, N., & Garg, A. (2019). A comprehensive analysis and optimization process for an integrated liquid cooling plate for a prismatic lithium-ion battery module. *Applied Thermal Engineering*, 156(April), 324–339. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.089>

Chen, Y., Wen, J., & Cheng, S. (2013). Probabilistic Load Flow Method Based on Nataf Transformation and Latin Hypercube Sampling. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4, 294–301.

Coello, C. A. C., Pulido, G. T. & Lechuga, M. S. (2004). Handling multiple objectives with particle swarm optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3), 256–279. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2004.826067>.

Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Chichester: Wiley.

Deb, K., & Jain, H. (2014). An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: Solving problems with box constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4), 577–601. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535>

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>

Deng, T., Ran, Y., Yin, Y., & Liu, P. (2020). Multi-objective optimization design of thermal management system for lithium-ion battery pack based on Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II. *Applied Thermal Engineering*, 164(66), 114394. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114394>

Deng, T., Zhang, G., Ran, Y., & Liu, P. (2019). Thermal performance of lithium ion battery pack by using cold plate. *Applied Thermal Engineering*, 160(66), 114088.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114088>

Durmaz, E. D., & Şahin, R. (2017). Çok amaçlı tek sıra tesis düzenleme probleminin çözümü için NSGA-II ve hedef programlama yaklaşım. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32(3), 941–955. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.337647>

E, J., Han, D., Qiu, A., Zhu, H., Deng, Y., Chen, J., Zhao, X., Zuo, W., Wang, H., Chen, J., & Peng, Q. (2018). Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system. Applied Thermal Engineering, 132, 508–520. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.115>

E, J., Zeng, Y., Jin, Y., Zhang, B., Huang, Z., Wei, K., Chen, J., Zhu, H., & Deng, Y. (2020). Heat dissipation investigation of the power lithium-ion battery module based on orthogonal experiment design and fuzzy grey relation analysis. Energy, 211, 118596. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118596>

Eröz, E. (2020). Çok amaçlı optimizasyon algoritması: MOGOLDSA (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ.

Faryad Aghjeh Kand, V. (2014). Çok amaçlı NSGA-II ve MOPSO optimizasyon algoritmaları ile kablosuz algılayıcı ağların optimum küme başı yeri seçimi ve kümelemesi (Yüksek Lisans Tezi). KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

Gu H. (1983). Mathematical-Analysis of a Zn/NiOOH Cell. Journal of The Electrochemical Society, 130, 1459-1464.

Holland, J.H. 1975. Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, PA, USA, 183 pp.

Huo, Y., Rao, Z., Liu, X., & Zhao, J. (2015). Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate. Energy Conversion and Management, 89, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.015>

Ianniciello, L., Biwolé, P. H., & Achard, P. (2018). Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials. Journal of Power Sources, 378(December 2017), 383–403. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.071>

Ju-Long, D. (1982). Control problems of grey systems. Systems & Control Letters, 1(5), 288-294. [https://doi.org/10.1016/S0167-6911\(82\)80025-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(82)80025-X).

Karakoyun, M., (2021). Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için kurbağa sıçrama ve gri kurt optimizasyonu algoritmaları tabanlı hibrit bir yöntemin geliştirilmesi (Doktora Tezi). Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization, Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, 4, 1942-1948
<https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.

Kilic, M., Aktas, M., & Sevilgen, G. (2020). Thermal assessment of laminar flow liquid cooling blocks for LED circuit boards used in automotive headlight assemblies. *Energies*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/en13051202>

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>

Koşan M. ve Aktaş M. (2018). Faz değıştiren malzemelerle termal enerji depolayan bir ısı değıştiricisinin sayısal analizi. *Politeknik Dergisi*, 21(2): 403-409.

Koziel, S., Leifsson, L. 2013. Surrogate-based modeling and optimization. Springer, New York, USA, 412 pp.

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>

Liang, J., Gan, Y., & Li, Y. (2018). Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe under different ambient temperatures. *Energy Conversion and Management*, 155(August 2017), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.063>

Liu, R., Chen, J., Xun, J., Jiao, K., & Du, Q. (2014). Numerical investigation of thermal behaviors in lithium-ion battery stack discharge. *Applied Energy*, 132, 288–297.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.024>

Lv, Y., Yang, X., Li, X., Zhang, G., Wang, Z., & Yang, C. (2016). Experimental study on a novel battery thermal management technology based on low density polyethylene-enhanced composite phase change materials coupled with low fins. *Applied Energy*, 178, 376–382. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.058>

Manivannan, S., Devi, S. P., Arumugam, R., & Sudharsan, N. M. (2011). Multi-objective optimization of flat plate heat sink using Taguchi-based Grey relational analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(5–8), 739–749.
<https://doi.org/10.1007/s00170-010-2754-8>

Mirmanto. (2013). Developing Flow Pressure Drop and Friction Factor of Water in Copper Microchannels. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 3(June), 641–649.

Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), 3–17. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X)

- Mondal, B., Lopez, C. F., & Mukherjee, P. P. (2017). Exploring the efficacy of nanofluids for lithium-ion battery thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 112, 779–794. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.130>
- Naqiuddin, N. H., Saw, L. H., Yew, M. C., Yusof, F., Poon, H. M., Cai, Z., & Thiam, H. S. (2018). Numerical investigation for optimizing segmented micro-channel heat sink by Taguchi-Grey method. *Applied Energy*, 222(December 2017), 437–450. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.186>
- Navid, A., Khalilarya, S., & Abbasi, M. (2018). Diesel engine optimization with multi-objective performance characteristics by non-evolutionary Nelder-Mead algorithm: Sobol sequence and Latin hypercube sampling methods comparison in DoE process. *Fuel*, 228(March 2017), 349–367. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.142>
- Özkış, A., (2017). Girdap arama ve yapay alg algoritmalarının çok amaçlı optimizasyon problemlerine uyarlanması (Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Pesaran, A. A. (2001). Advanced automotive battery conference, 5-8 February 2001, Las Vegas, NV.
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations”, *Journal of Power Sources*, 110, 2, 377-382.
- Prasad, K. S., Rao, C. S., & Rao, D. N. (2012). Application of design of experiments to plasma arc welding process: A review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34(1), 75–81. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782012000100010>
- Qian, Z., Li, Y., & Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. *Energy Conversion and Management*, 126, 622–631. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.063>
- Reddy T. B. (2011). *Linden’s Handbook of Batteries*. Fourth Edition, New York, NY: McGraw-Hill Education
- Sevilgen, G. (2010). Otomobil kabininde hız ve sıcaklık dağılımının üç boyutlu sayısal analizi (Doktora Tezi). YÖK veri tabanından erişildi (259690).
- Sevilgen, G., Kilic, M., & Aktas, M. (2021). Dual-separated cooling channel performance evaluation for high-power led Pcb in automotive headlight. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25(March). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100985>
- Shah, R.K. (1978). A correlation for laminar hydrodynamics entry length solution for circular and noncircular ducts. *Journal of Fluids Engineering*. 100, 177–179.

Shah, R.K., London, A.L. (1978). Laminar Flow Forced Convection in Ducts. New York, NY, Amerika Birleşik Devletleri: Academic Press

Shang, Z., Qi, H., Liu, X., Ouyang, C., & Wang, Y. (2019). Structural optimization of lithium-ion battery for improving thermal performance based on a liquid cooling system. International Journal of Heat and Mass Transfer, 130, 33–41.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.074>

Sheng, L., Su, L., Zhang, H., Li, K., Fang, Y., Ye, W., & Fang, Y. (2019). Numerical investigation on a lithium ion battery thermal management utilizing a serpentine-channel liquid cooling plate exchanger. International Journal of Heat and Mass Transfer, 141, 658–668. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.033>

Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Muultiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. Evolutionary Computation, 2(3), 221–248.
<https://doi.org/10.1162/evco.1994.2.3.221>

Tan, K. C., Lee, T. H. ve Khor, E. F. (2002). Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: Performance assessments and comparisons, Artificial intelligence review, 17(4), 251-290.

Taşkın, Ç., Emel, G.G. (2009). Sayısal yöntemlerde genetik algoritmalar. Alfa Aktüel Yayınları, Bursa, Türkiye, 153 s.

Thakkar, S., Vala, H., Patel, V. K., & Patel, R. (2021). Performance improvement of the sanitary centrifugal pump through an integrated approach based on response surface methodology, multi-objective optimization and CFD. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02753-0>

Tran, T. H., Harmand, S., & Sahut, B. (2014). Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery. Journal of Power Sources, 265, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.130>

Turgut, E., Çakmak, G., & Yildiz, C. (2012). Optimization of the concentric heat exchanger with injector turbulators by Taguchi method. Energy Conversion and Management, 53(1), 268–275. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.09.011>

Tüten, N., 2016. Otomobil tork kolunun çevrimsel yükleme altında ağırlık eniyilemesi ve güvenilirlik tahmini. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Vikram Babu, B., Vijaya Babu, K., Tewodros Aregai, G., Seeta Devi, L., Madhavi Latha, B., Sushma Reddi, M., Samatha, K., & Veeraiah, V. (2018). Structural and electrical properties of Li4Ti5O12 anode material for lithium-ion batteries. Results in Physics, 9, 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.02.050>

- Wang, H., Xu, W., & Ma, L. (2016). Actively controlled thermal management of prismatic Li-ion cells under elevated temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.033>
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. 7th Edition, New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Whittingham M. S. (2012). History, Evolution, and Future Status of Energy Storage, *Proceedings of the IEEE* 100, Special Centennial Issue, 1518–1534.
- Wild, S.M., Regis, R.G., Shoemaker, C.A. 2008. ORBIT: Optimization by radial basis function interpolation in trust-regions. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 30(6): 3197–3219. <https://doi.org/10.1137/070691814>
- 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(December 2018), 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051>
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Ke, X., Wang, Z., Situ, W., Li, X., & Zhang, J. (2016). An experimental study of thermal management system using copper mesh-enhanced composite phase change materials for power battery pack. *Energy*, 113, 909–916. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.119>
- Xiao, N.C., Li, Y.F., Yang, Y., Yu, L., Huang, H.Z. 2014. A novel reliability method for structural systems with truncated random variables. *Structural Safety* 50: 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.03.006>
- Xu, F., Sun, G., Li, G., & Li, Q. (2013). Crashworthiness design of multi-component tailor-welded blank (TWB) structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(3), 653–667. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0916-7>
- Yang, X. H., Tan, S. C., & Liu, J. (2016). Thermal management of Li-ion battery with liquid metal. *Energy Conversion and Management*, 117, 577–585. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.054>
- Yang, Y., Zeng, W., Qiu, W.S., Wang, T. 2016. Optimization of the suspension parameters of a rail vehicle based on a virtual prototype Kriging surrogate model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(8): 1890-1898. <https://doi.org/10.1177/0954409715617213>
- Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y., & Tay, A. A. O. (2015). Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging. *Applied Thermal Engineering*, 86, 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.066>

Yıldız, A.R., (2006). Tasarım optimizasyon problemlerinin çözümü için çok amaçlı arama tabanlı bir sistemin geliştirilmesi. Doktora Tezi, BUÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Yi, J., Kim, U. S., Shin, C. B., Han, T., & Park, S. (2013). Modeling the temperature dependence of the discharge behavior of a lithium-ion battery in low environmental temperature. *Journal of Power Sources*, 244, 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.02.085>

Zadeh, P.M., Toropov, V.V., Wood, A.S. 2009. Metamodel-based collaborative optimization framework. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 38(2): 103-115. <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0286-8>.

Zhang, S. F., Liu, S. Y., & Zhai, R. H. (2011). An extended GRA method for MCDM with interval-valued triangular fuzzy assessments and unknown weights. *Computers and Industrial Engineering*, 61(4), 1336–1341. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.008>

Zhang, X., Zheng, X., Cheng, R., Qiu, J., & Jin, Y. (2018). A competitive mechanism based multi-objective particle swarm optimizer with fast convergence. *Information Sciences*, 427, 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.10.037>

Zhao, J., Rao, Z., & Li, Y. (2015). Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery. *Energy Conversion and Management*, 103, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.056>

Zitzler, E. ve Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach, *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 3 (4), 257-271.

Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithm. *Lecture Notes in Computer Science*, 1498, 292–301.