

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SERPANTİN KANALLI SOĞUTMA PLAKALARININ TERMOHİDROLİK
ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Nagihan ÇEKİRGE

Danışman: Doç. Dr. Orhan KALKAN

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Doç. Dr. Orhan KALKAN

Doç. Dr. Ali CELEN

Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Nagihan ÇEKİRGE]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Orhan KALKAN danışmanlığında, Nagihan ÇEKİRGE tarafından hazırlanan bu çalışma 26/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Termodinamik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Ali CELEN İmza:

Üye : Doç. Dr. Orhan KALKAN İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİR İmza:

Yukarıdaki Yüksek Lisans/Doktora Tezi Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR

Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Serpantin Kanallı Soğutma Plakalarının Termohidrolik Analizi ve Optimizasyonu” isimli “Yüksek Lisans” tezini tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 26/12/2025.

(İmza)

Nagihan ÇEKİRGE

ÖZET

SERPANTİN KANALLI SOĞUTMA PLAKALARININ TERMOHİDROLİK ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Nagihan ÇEKİRGE

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Orhan KALKAN

2025, 99 sayfa

Yüksek yoğunluklu enerji sistemleri, elektronik devreler ve batarya paketleri gibi cihazların istenilen sıcaklık aralıklarında çalışmaları ısıl yönetim sistemleri ile sağlanmaktadır. Bu sistemlerin en kritik elemanlarından birisi de soğutma plakalarıdır. Bu çalışmada, belirli çalışma şartları altında soğutulan sıvı soğutma plakasının ısıl ve hidrolik performans davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel analizde, sıvı soğutma yöntemi ile serpantin kanallı soğutma plakasının soğutulma işlemi 10 °C, 15 °C, 20 °C su giriş sıcaklıkları, 0,1 L/dk, 0,5 L/dk, 0,9 L/dk hacimsel debi ve 75 W, 100 W ve 125 W ısıl güç çalışma şartları altında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma şartları altında soğutma plakasının, plaka yüzey sıcaklık dağılımları, soğutma sıvısı sıcaklık değişimleri ve oluşan basınç kayıpları ölçülerek göstermiş olduğu soğutma performansı analiz edilmiştir. Sayısal analiz yönteminde ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak sistemin sayısal modeli oluşturulup elde edilen deneysel verilerle doğrulama çalışması yapılmıştır. Daha sonra soğutma plakasının performansına; hacimsel debi ($\dot{V}$), soğutma sıvısı giriş sıcaklığı (T_g), kanal giriş çapı (D_i), akışkan türü, kanal genişleme oranı (θ) ve plaka malzemesinin etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, 0,9 L/dk su hacimsel debisi, 10 °C soğutma sıvısı giriş sıcaklığı, 100/0 su/etilen-glikol karışım oranı, 4,5 mm kanal giriş çapı, 4,5 mm kanal genişleme oranı ve bakır malzeme türü şartlarında soğutma plakası yüzeyinde gelişen ortalama ve maksimum sıcaklığın en düşük değerleri hesaplanmıştır. Ek olarak soğutma plakasının çok amaçlı optimizasyonu yapılmıştır. $\dot{V}$, T_g , D_i ve θ bağımsız parametreleri ile yapılan optimizasyon sonucunda optimum performans değerleri sırasıyla, 0,5 L/dk, 11,16 °C, 4,47 mm ve 1,49 mm olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Soğutma plakası, ısıl yönetim sistemleri, sıvı soğutma yöntemi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, optimizasyon



ABSTRACT

THERMOHYDRAULIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF SERPENTINE- CHANNEL COLD PLATES

Nagihan ÇEKİRGE

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,**

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Orhan KALKAN

2025, 99 pages

High-density energy systems, electronic circuits, and battery packs require thermal management systems to operate within desired temperature ranges. Cold plates are one of the most critical components of these systems. In this study, the thermal and hydraulic performance behavior of a liquid cold plate cooled under specific operating conditions was investigated experimentally and numerically. In the experimental analysis, the cooling process of a serpentine channel cold plate was carried out using the liquid cooling method under water inlet temperatures of 10 °C, 15 °C, and 20 °C, volumetric flow rates of 0.1 L/min, 0.5 L/min, and 0.9 L/min, and thermal power operating conditions of 75 W, 100 W, and 125 W. Under these operating conditions, the cooling performance of the cold plate was analyzed by measuring the plate surface temperature distributions, coolant temperature variations, and pressure drops. In the numerical analysis method, a numerical model of the system was created using computational fluid dynamics, and a validation study was performed with the obtained experimental data. Subsequently, the performance of the cold plate was evaluated using; The effects of volumetric flow rate ($\dot{V}$), coolant inlet temperature (T_g), channel inlet diameter (D_i), fluid type, channel expansion ratio (θ), and plate material were investigated. As a result, 0.9 L/min water volumetric flow rate, 10 °C cooling fluid inlet temperature, 100/0 water/ethylene-glycol mixture ratio, 4.5 mm channel inlet diameter, 4.5 mm channel expansion ratio, and copper material type, the minimum values of the average and maximum temperatures developing on the cooling plate surface were calculated. In addition, a multi-objective

optimization of the cold plate was performed. As a result of the optimization performed with the independent parameters $\dot{V}$, T_g , D_i and θ , the optimum performance values were calculated as 0.5 L/min, 11.16 °C, 4.47 mm, and 1.49 mm, respectively.

Keywords: Cold plate, thermal management systems, liquid cooling method, computational fluid dynamics, optimization



TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecim boyunca, bilgi ve tecrübesini büyük bir özveri ile paylaşarak yolumu aydınlatan saygıdeğer danışmanım Sayın Doç. Dr. Orhan KALKAN'a teşekkürlerimi sunarım. Bilgi ve deneyimleri ile bu sürece katkılarını sunan saygıdeğer hocam Sayın Doç. Dr. Ali CELEN'e teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışmasını FBA-2025-993 proje numarası ile destekleyerek yürütülmesine katkı sağlayan Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim. Başarı yolculuğuma eşlik eden, hayatımın her sürecinde inanç ve sevgilerini hissettiğim, maddi ve manevi katkılarını sunan kıymetli aileme, kardeşlerime ve dostlarıma teşekkür ederim.

Nagihan ÇEKİRGE

Aralık, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	14
1.1. Araştırmanın Amacı	14
1.2. Araştırmanın Kapsamı.....	16
1.3. Araştırmanın Önemi	16
1.4. Varsayımlar	17
1.5. Sınırlılıklar.....	17
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	17
2.1. Isıl Yönetim Sistemi	17
2.1.1. Elektronik cihazlarda ısıl yönetim.....	18
2.2. Bataryalarda Isıl Yönetim.....	19
2.2.1. Hava ile soğutma	21
2.2.2. Isı borusu ile soğutma.....	22
2.2.3. Faz değıştiren malzeme ile soğutma.....	23
2.2.4. Termoelektrik soğutma.....	24
2.2.5. Sıvı ile soğutma	25
2.3. Soğutma Plakası	26
2.4. Literatür Özetleri	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM	38
3.1. Sıvı Soğutma Deneysel Analiz Yöntemi	38
3.1.1. Sıvı soğutma deney setinin oluşturulması	41
3.1.2. Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar.....	43

3.1.2.1. Su banyosu.....	43
3.1.2.2. Debimetre	44
3.1.2.3. Sirkülasyon pompası	45
3.1.2.4. Fark basınç ölçer.....	46
3.1.2.5. Soğutma plakası.....	47
3.1.2.6. Silikon ısıtıcı rezistans.....	48
3.1.2.7. PT100 ve T tipi ısı çiftleri	49
3.1.2.8. Veri kayıt cihazı.....	49
3.1.2.9. Güç kaynağı.....	50
3.2. Sıvı Soğutma Sayısal Analiz Yöntemi	51
3.2.1. Soğutma plakasının modellenmesi ve HAD çözümü	51
3.2.1.1. Geometri modelleme	53
3.2.1.2. Soğutma plakası ağ yapısı	55
3.2.1.3. Ağ bağımsızlık analizi	56
3.2.1.4. Başlangıç ve sınır şartları	57
3.3. Optimizasyon.....	59
4. BULGULAR	64
4.1. Deneysel Sonuçlar ile Sayısal Modelin Doğrulanması	64
4.2. Akışkan Debinin Etkisi	66
4.3. Akışkan Giriş Sıcaklığının Etkisi	68
4.4. Akışkan Türünün Etkisi.....	70
4.5. Kanal Giriş Çapının Etkisi.....	72
4.6. Kanal Genişleme Oranı Etkisi	74
4.7. Soğutma Plakası Malzeme Türü Etkisi	76
4.8. Soğutma Plakası Optimizasyonu	78
5. SONUÇLAR.....	91
KAYNAKÇA	93



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Deneysel çalışma şartları	39
Tablo 3.2. Su banyosuna ait özellikler	44
Tablo 3.3. Türbin tip debimetre cihaz özellikleri	45
Tablo 3.4. Frekans ayarlı sirkülasyon pompasının teknik özellikleri	46
Tablo 3.5. Fark basınç ölçer cihaz özellikleri	47
Tablo 3.6. Veri kayıt cihazının teknik özellikleri	50
Tablo 3.7. DC güç kaynağının teknik özellikleri	51
Tablo 3.8. Soğutma plakası malzemelerinin termofiziksel özellikleri	58
Tablo 3.9. Soğutma sıvısı karışım oranlarına göre termofiziksel özellikler	59
Tablo 4.1. Deneysel sonuçların sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılması	65
Tablo 4.2. Optimizasyon parametreleri ve seviye değerleri	79
Tablo 4.3. DT'ye ait bağımsız değişkenler ve seviye yanıt değerleri	80
Tablo 4.4. ΔP yanıtı için ANOVA analiz sonuçları	82
Tablo 4.5. T_{maks} yanıtı için ANOVA analiz sonuçları	83
Tablo 4.6. ΔT yanıtı için ANOVA analiz sonuçları	84
Tablo 4.7. Tort yanıtı için ANOVA analiz sonuçları	85
Tablo 4.8. Soğutma plakası için optimum performans sağlayan değerler	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Sıvı soğutma sistemi	15
Şekil 2.1. Isıl yönetim sistemi örneği	18
Şekil 2.2. Elektronik cihazlarda ısıl yönetim	19
Şekil 2.3. Bataryalarda ısıl yönetim sistemi	20
Şekil 2.4. Batarya ısıl yönetim sistemlerinin sınıflandırılması	21
Şekil 2.5. Hava ile soğutma sistem modeli	22
Şekil 2.6. Isı boruları ile soğutma sistem modeli	23
Şekil 2.7. Termoelektrik soğutma sistemi	24
Şekil 2.8. Sıvı soğutma plakası soğutma ünitesinin şematik diyagramı.	27
Şekil 2.9. Soğutma plakasının kullanıldığı otomotiv alanı	28
Şekil 3.1. Test bölgesinin oluşturulması a) serpantin kanal yapılı soğutma plakası b) soğutma plakasına silikon ısıtıcı rezistans uygulanması, c) ısıtıcı rezistansın farklı noktalarına ısıl çiftlerin yerleştirilmesi ve d) yalıtım köpüğü uygulaması	40
Şekil 3.2. Serpantin kanallı soğutma plakasının sıvı ile soğutma deney setinin görünümü	42
Şekil 3.3. Serpantin kanallı soğutma plakasının sıvı ile soğutma deney düzeneği şematik gösterimi	42
Şekil 3.4. Soğutma ve ısıtma sağlayan su banyosu	44
Şekil 3.5 Türbin tip gösterge ve debimetre cihazları.....	45
Şekil 3.6. Frekans ayarlı sirkülasyon pompası	46
Şekil 3.7. Fark basınç ölçer	47
Şekil 3.8. Soğutma plakası	48
Şekil 3.9. Silikon ısıtıcı rezistans	48
Şekil 3.10. Veri kayıt cihazı	50
Şekil 3.11. DC güç kaynağı.....	51
Şekil 3.12. HAD programında oluşturulan bakır borulu soğutma plakasının geometrik model ve ölçüleri	54
Şekil 3.13. HAD programında oluşturulan akış kanallı soğutma plakasının kanal genişleme oranı gösterimi.....	54
Şekil 3.14. Soğutma plakası ve akışkan kanalının ağ yapısı görünümü.....	55
Şekil 3.15. Soğutma plakasının ağ bağımsızlık analizi	56
Şekil 3.16. Doğrulama çalışması yapılan serpantin kanal yapılı soğutma plakasında y + değeri	57
Şekil 3.17. HAD programında modellenen soğutma plakasının sınır şartlarının şematik gösterimi	58
Şekil 3.18. Optimizasyon akış şeması	63

Şekil 4.1. Suyun hacimsel debisinin soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi	67
Şekil 4.2. Suyun hacimsel debisinin plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişim grafiği.....	68
Şekil 4.3. Suyun farklı giriş sıcaklıklarının soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi	69
Şekil 4.4. Su sıcaklığının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişimi	70
Şekil 4.5. Su/EG oranlarının soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi	71
Şekil 4.6. Su/EG oranının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişimi	72
Şekil 4.7. Kanal giriş çaplarına göre soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi	73
Şekil 4.8. Kanal giriş çapının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişimi	74
Şekil 4.9. Kanal genişleme oranlarına göre soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi	75
Şekil 4.10. Kanal genişleme oranının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişimi.....	76
Şekil 4.11. Plaka malzemesinin soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi	77
Şekil 4.12. Farklı plaka malzeme türlerinin plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişim grafiği	78
Şekil 4.13. İstenilen fonksiyonların gerçek ve tahmini sayısal değerlerin sırasıyla T_{ort} , T_{maks} , ΔT ve ΔP için dağılımları	81
Şekil 4.14. a) Su giriş sıcaklığı ve hacimsel debinin b) Kanal genişleme oranı ve kanal giriş çapının ΔP değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği.....	86
Şekil 4.15. a) Su giriş sıcaklığı ve debinin b) Kanal genişleme oranı ve su giriş sıcaklığının ΔT değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği	87
Şekil 4.16. a) Su giriş sıcaklığı ve debinin b) Kanal genişleme oranı ve kanal çapının T_{ort} değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği	87
Şekil 4.17. a) Su giriş sıcaklığı ve debinin b) Kanal genişleme oranı ve kanal çapının T_{maks} değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği	88
Şekil 4.18. Çok amaçlı optimizasyon sonuçları	90

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

T_{maks}	Maksimum plaka sıcaklığı
T_{min}	Minimum plaka sıcaklığı
T_{ort}	Ortalama plaka sıcaklığı
ΔT	Sıcaklık farkı
ΔT_{maks}	Maksimum sıcaklık farkı
ΔP	Basınç düşümü
$\dot{V}$	Akışkanın hacimsel debisi
V_g	Akışkan giriş hızı
T_g	Akışkan giriş sıcaklığı
P_0	Çıkış noktasındaki basınç
$\square \square$	Kanal giriş çapı
$\square \square$	Kanal çıkış çapı
θ	Kanal genişleme oranı
Q	Isı akısı
A_c	Kesit alanı
d_i	İstenebilirlik Fonksiyonu
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
BIYS	Batarya Isıl Yönetim Sistemi
FDM	Faz Değiştiren Malzeme
LİB	Lityum-iyon Batarya

Re	Reynolds Sayısı
YYY	Yanıt Yüzey Yöntemi
DT	Deney Tasarım

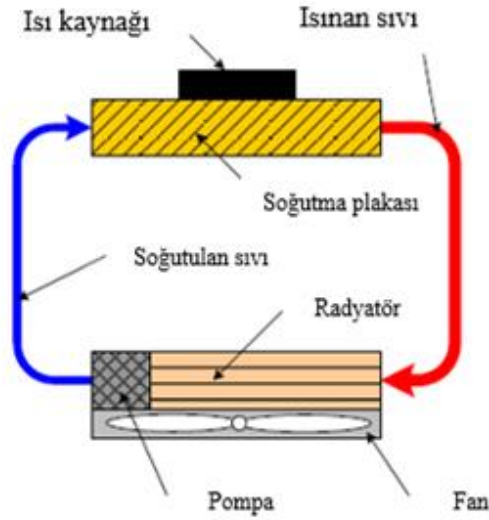


1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Amacı

Nüfus artışı, kentsel gelişme, teknolojik gelişme ve sanayileşme, küresel enerji talebindeki artışa sebep olmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle elektronik sistemler, güç elektroniği modülleri ve enerji depolama çözümlerinde oluşan yoğun güç tüketimi, ısıl yönetimini zorunlu hale getirmiştir. Sistemlerin çalışması esnasında açığa çıkan ısı, sistem bileşenlerinin performansını ve verimliliğini etkilemektedir. Bu sistemlerde, artan ısı yoğunluğunun önlenmesi ve çalışma sıcaklığının belirli bir aralıkta tutularak ısıнын etkin bir şekilde uzaklaştırılması ısıl yönetim sistemleri ile sağlanmaktadır (Atılğan, 2024; Bulut, 2022). Isıl yönetim sistemleri, bir cihazın veya sistemin sıcaklık düzenlemesini kontrol etmek ve optimize etmek için kullanılan teknolojik çözümleri ifade eder. Isıl yönetim sistemleri, fan, ısı değiştiricisi, termal ped ve soğutma plakaları gibi bileşenler içerir. Bu bağlamda, başta yüksek güç yoğunluklu bileşenler ve gelişen elektrikli araç teknolojisinde etkin ısıl yönetimi için soğutma plakalarının kritik rolü vardır. Gerekli soğutma işlemindeki en önemli elemanlardan birisi soğutma plakaları olup, genellikle alüminyum veya bakır plakalardan imal edilmektedirler. Soğutma plakası, özellikle sıvı soğutmalı yöntemlerde tercih edilerek yüksek soğutma verimliliği sunmaktadır (Yang vd., 2025a). Günümüzün ticari araçlarında tipik olarak sıvı soğutmalı sistem kullanımı batarya sıcaklıklarını etkili bir şekilde azaltabilmektir (Zhao vd., 2024). Sıvı soğutma plakalı ısıl yönetim sistemi ile yüksek sıcaklıklarda açığa çıkan ısıнын soğurularak soğutulması, düşük sıcaklıklarda ise ısıtılması sağlanarak sıcaklık dağılımı homojenliği elde edilmektedir. Böylece batarya paketinin tüm yüzeylerinde optimum çalışma sıcaklığı korunarak sıcaklık farklarının minimuma indirilmesi amaçlanır. Soğutma plakalarının genel olarak homojen ısı dağılımı, üniform soğutma, kompakt tasarım ve bakım maliyetlerinin az olması avantajları yaygın kullanım sağlar.

Sıvı soğutma sistemlerinde kullanılan soğutma plakası Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Soğutma plakası girişine pompa vasıtası ile soğutma sıvısı pompalanır, sistemden soğurulan ısıl enerji soğutma sıvısından ısı eşanjörü-fan bileşeni ile çekilerek dış ortama atılması ile soğutma işlemi yapılır.



Şekil 1.1. Sıvı soğutma sistemi (Blinov vd., 2011)

Soğutma plakası, sahip olduğu kanal yapısı ve bu kanallarda kullanılan yüksek ısı iletim katsayılı soğutma sıvılarıyla ısı yönetiminde etkin rol oynamaktadır. Isıl yönetim sistemlerinde soğutma işlevi görevini yapan soğutma plakaları çalışmanın ana unsuru olmaktadır. Bu çalışmada, sıvı ile soğutma yönteminde kullanılan serpantin kanal yapılı sıvı soğutma plakasının farklı çalışma şartlarında göstermiş olduğu ısı ve hidrolik performans verimlilikleri analiz edilmiştir. Bu bağlamda, uygulanan soğutma yöntemi ile plaka yüzeyinde oluşan maksimum sıcaklık farkının düşürülerek daha etkin bir homojen sıcaklık dağılımı sağlanması ve kanallarda oluşan basıncın düşürülmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada, farklı çalışma şartlarında (debi, sıcaklık, ısı akısı) yapılan deneylerle soğutma plakasının göstermiş olduğu ısı ve hidrolik performansı incelenmiştir. Daha sonra sayısal analiz yöntemi ile soğutma plakasının aynı çalışma şartları altında gösterdiği performansı ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak doğrulanmıştır. Buna ek olarak, serpantin kanallı sıvı soğutma plakasının, farklı kanal genişleme oranları (θ), plaka malzeme türleri, kanal çapı (D_i , D_o) akışkan hacimsel debisi ($\dot{V}$), soğutma sıvısı giriş sıcaklıkları (T_g), su/etilen-glikol (EG) akışkan karışım oranları kullanıldığı durumlarda göstermiş olduğu performans verimlilikleri de sayısal olarak analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda optimum performans sağlayan soğutma plakası tasarımı belirlenerek sistemlerde kullanım etkinliğinin artırılmasına olanak sağlanacaktır.

Sayısal analiz ve deneysel doğrulama çalışmaları ile:

1. Isıl yönetim sistemlerinde kullanılan serpantin kanallı sıvı soğutma plakasının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak modellenmesi,

2. Sıvı soğutma plakasının, farklı sınır şartlarındaki ısı ve hidrolik performans parametreleri olan;
 - i. Maksimum plaka sıcaklığı (T_{maks}),
 - ii. Ortalama plaka sıcaklığı (T_{ort}),
 - iii. Plaka yüzeyinde oluşan maksimum sıcaklık farkı (ΔT_{maks}) ve
 - iv. Plaka kanallarında oluşan basınç düşümü (ΔP) değerlerinin belirlenmesi,
3. Soğutma plakası üzerindeki maksimum sıcaklık farkının düşürülmesi amaçlanarak sıcaklık homojenliğinin iyileştirilmesi,
4. Optimum performans sağlayan soğutma plakası tasarımının belirlenmesi sağlanacaktır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda yüksek güç yoğunluğuna sahip sistemlerde soğutma verimliliğini artırmaya yönelik öneriler sunmak ve bilimsel çalışmaların geliştirilip üretilmesiyle literatüre katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

1.2. Araştırmanın Kapsamı

Isıl yönetim sistemlerinde kullanılan serpantin kanal yapılı soğutma plakasının deneysel ve sayısal analizi yapılmıştır. Konvansiyonel serpantinli bir soğutma plakası farklı sınır şartlarında deneysel olarak incelenip belirlenen performans çıktıları hesaplanmıştır. Sonrasında deneysel olarak incelenen bu tasarıma sahip soğutma plakası referans olarak kullanılıp yapılan sayısal çalışmalar için doğrulama unsuru teşkil etmektedir. Farklı sınır şartlarında yapılan analizler, ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece soğutma plakalarının ısı ve hidrolik performans parametreleri (T_{ort} , T_{maks} , ΔT_{maks} ve ΔP) sayısal olarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda belirlenen tasarım parametreleri kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak serpantin kanallı soğutma plakaları için optimum bir tasarım önerilmiştir.

1.3. Araştırmanın Önemi

Isıl yönetim sistemlerinde gerekli soğutma işleminin sağlanabilmesi için en önemli elemanlardan birisi soğutma plakaları olduğundan soğutma plakalarının tasarımı ve optimum koşullarda kullanılması büyük önem arz etmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlara göre

tasarlanan soğutma plakası ile yüksek güç yoğunluğuna sahip elektronik ekipmanların soğutulması ve yeni nesil elektrikli araçlarda kullanım etkinliğinin artmasına olanak sağlanacaktır. Bu çalışma ile sistem ve cihazlarda kullanılan sıvı soğutma plakasının performansı iyileştirilerek sıcaklık homojenliği artırılmaya çalışılacaktır.

1.4. Varsayımlar

Soğutma plakası yalıtılarak yapılan deneylerin adyabatik koşullarda olduğu varsayılmıştır.

Soğutma sıvısı sıkıştırılmaz Newtonyen akış tipi olarak kabul edilmiş olup akışkan ve plaka arasındaki yüzey sızdırmaz olarak varsayılmıştır.

Belirli sıcaklık aralıklarında soğutma sıvılarının termofiziksel özellikleri sabit kabul edilmiştir.

Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyonları doğru şekilde yapılmış olup hata oranlarının cihaz veri değerleri ile uyumlu olduğu varsayılmıştır.

1.5. Sınırlılıklar

Deneysel analizi yapılan soğutma plakası, belirli bir geometri ve malzeme çeşidine sahip olup soğutma sıvısı olarak su kullanımı ile sınırlıdır.

Soğutma plakası yüzeyine silikon ısıtıcı rezistanslar aracılığı ile uygulanan ısı akısı sabit ve homojen olarak uygulanmıştır.

Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyet değerleri sonuçların doğruluk oranlarını etkileyebilmektedir.

HAD programında yapılan analizler, geometri ağ yapısına ve seçilen akışkan modeline göre çözümlenmiştir. Farklı ağ modellemesi ve akışkan türleri kullanımı farklı sonuçlara yol açabilir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Isıl Yönetim Sistemi

Günümüz teknolojisinde sistem bileşenlerinin etkin performansı doğrudan çalışma sıcaklığına bağlıdır. Isıl yönetim sistemi, bir sistemi çalışma sıcaklığı aralığında tutmak için kullanılan araç ve teknolojileri ifade eder. Böylece sistemde meydana gelen ısıнын kontrollü bir şekilde

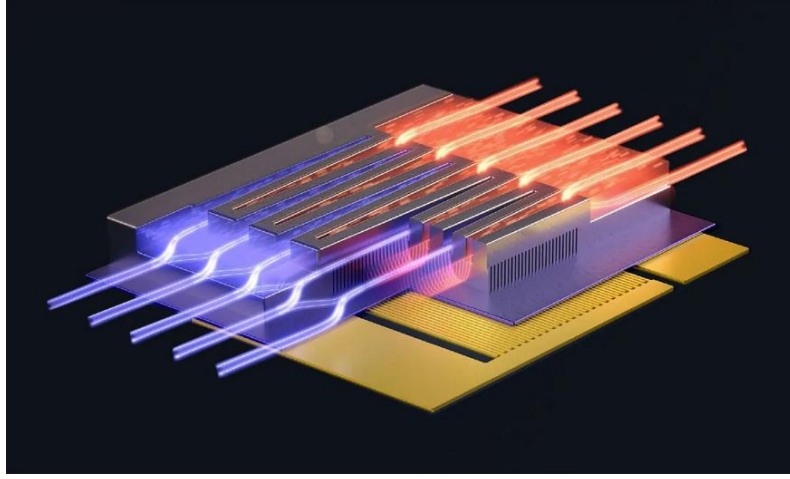
dağıtılmasıyla sistem güvenilirliği ve verimliliği sağlanabilmektedir. Şekil 2.1.'de ısıl yönetim sisteminin kullanıldığı örnek bir cihaz gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Isıl yönetim sistemi örneği (Boyd, 2023)

2.1.1. Elektronik cihazlarda ısıl yönetim

Çip teknolojisinde ilerleme sağlandıkça transistörler arasındaki mesafe giderek azalmakta ve buna bağlı olarak birim yüzeyden yayılan ısı miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Bu da elektronik cihazlar için ısıl yönetim sistemi kullanımını gerekli kılar (Kalkan, 2023). Elektronik cihazlarda örnek bir ısıl yönetim Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Elektronik cihazlarda ısıl yönetim ile yüksek yoğunluklu bileşenler, mikro işlemciler ve veri merkezlerinde sistem kararlılığı korunarak yüksek işlem gücü performansı sağlanabilmektedir.

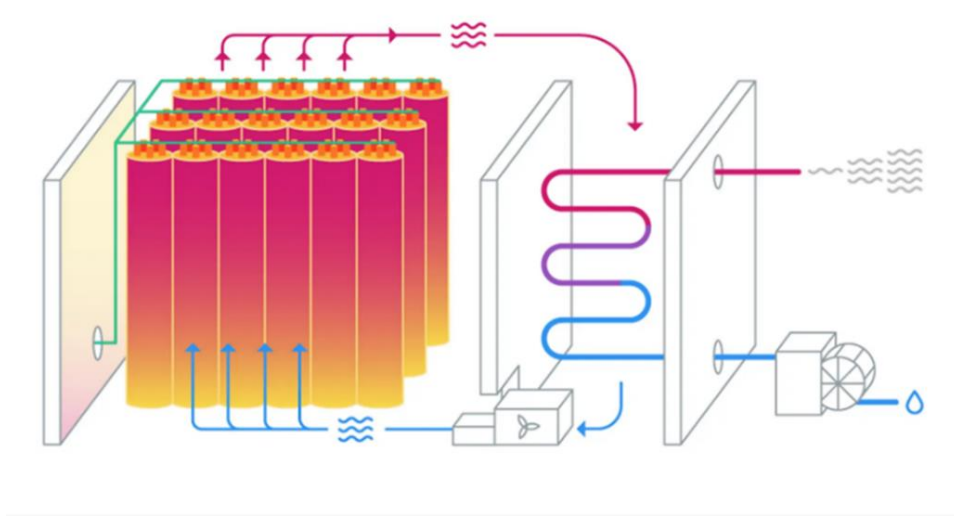


Şekil 2.2. Elektronik cihazlarda ısı yönetim (Patel, 2020)

2.2. Bataryalarda Isıl Yönetim

Ulaşım, havacılık, uzay elektroniği vb. endüstrilerinde, batarya paketinin verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için batarya ısı yönetim sistemi (BIYS) kullanımını gerekli kılar. Elektrikli araçlarda dahil olmak üzere yüksek güç yoğunluklu bileşenler ve gelişen elektronik sistemlerin tasarım ve performanslarında batarya teknolojisi seçimi önem arz etmektedir. Elektrik araçlarda kullanılan BIYS; soğutma, ısıtma, havalandırma ve yalıtım özellikli dört işlevi üstlenmektedir (Öztop, 2025).

Tipik bir BIYS, batarya paketinin çalışmasını izlemek ve kontrol etmek için birlikte çalışan akü izleme ünitesi, merkezi işlem birimi, güç yönetim birimi, iletişim arayüzü, güvenlik ve koruma mekanizmaları gibi çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Örnek bir batarya ısı yönetim sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Bataryalarda ısı yönetim sistemi (Blain, 2022)

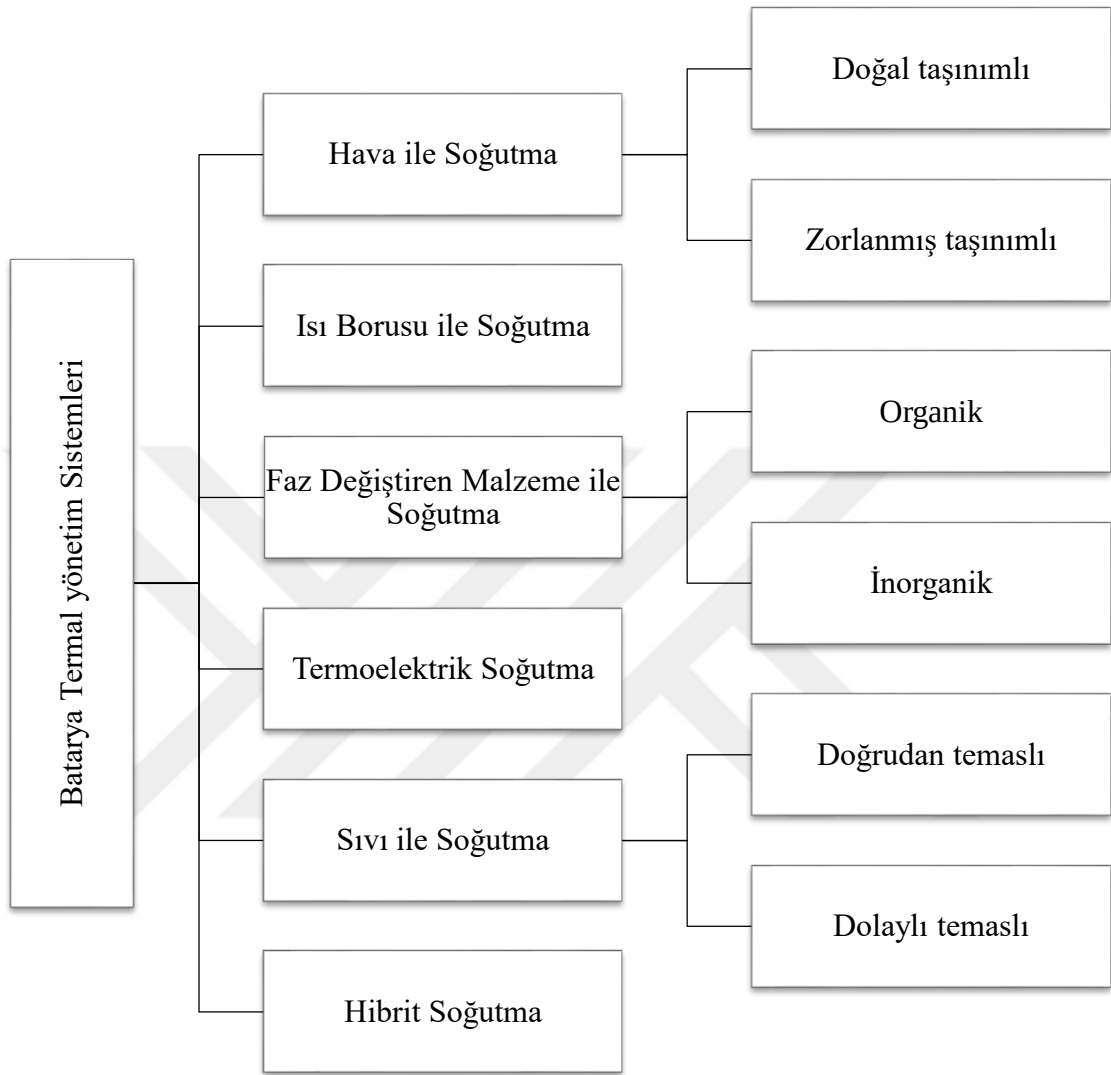
Batarya ısı yönetim sistemleri, Şekil 2.4'te görüldüğü üzere sınıflandırılmıştır. Soğutma işlemi için bir BIYS, kullandığı yöntemlere göre pasif soğutma, aktif soğutma ve hem aktif hem de pasif yöntemleri içeren hibrit soğutma sistemleri ile oluşmaktadır.

Pasif sistemler, bataryada üretilen ısıyı soğurabilen ya da iletim yolu ile batarya hücrelerinden uzaklaştırırken ortam dinamiklerini kullanan sistemlerdir. Pasif yöntemde kullanılan araçlar; hava ile soğutma, ısı dağıtıcı veya ısı emici, kanatçık kullanımı, ısı borusu ve faz değiştiren malzeme (FDM) şeklindedir (Menak vd., 2021). Bu sistemlerde soğutma sıvısının hareketine ihtiyaç duyulmadığından pompa ve kompresör gibi ek yapılar bulunmamaktadır. Böylelikle sessiz çalışma ve taşınabilir cihazlardaki uygulamalarıyla üstünlük sağlayarak çevre dostu çözümler sunmaktadır.

Aktif sistemler, bataryalardaki ısı transferinin sağlanması için harici bir güç kullanımını gerektiren sistemlerdir. Bunlara bir fan veya pompa yardımı ile batarya paketinin iç ortamına, iç ortamında bulunan kanallara veya batarya paketine yerleştirilmiş soğutucu plakalarda bulunan kanallara akışkan ileten sistemler örnek verilebilir (Karagöz 2023). Aktif sistemlerde kullanılan araçlar; hava bazlı soğutma, sıvı bazlı soğutma ve termoelektrik soğutma yöntemleridir. Genellikle yüksek performans gerektiren elektrikli araçlar ya da büyük enerji depolama sistem uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu sistemlerin yüksek enerji tüketimleri ve daha karmaşık altyapı sistem gereksinimleri uygulamalarda sınırlı kullanım sağlamaktadır.

Hibrit sistemler ise hem aktif hem de pasif soğutma yapılan sistemlerin birleşimidir. Bu tür sistemler maliyet, kurulum ve ısı performans açısından en uygun ikili ya da daha fazla ısı

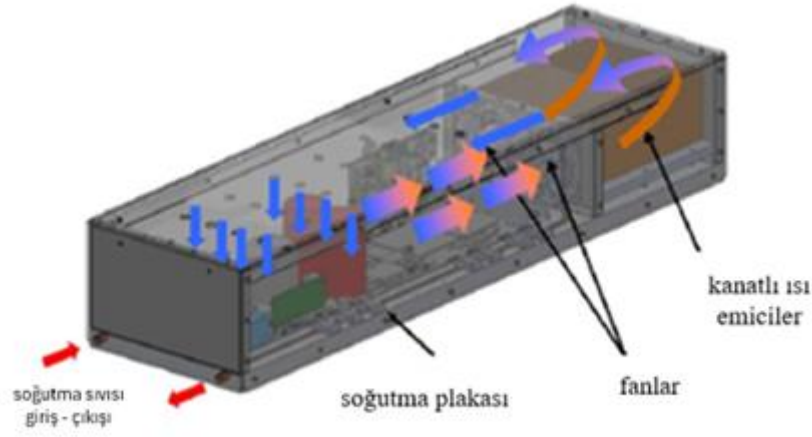
yönetim sisteminin kombinasyonu ile oluşmaktadır. Hava sirkülasyonlu FDM, sıvı sirkülasyonlu FDM ve ısı borulu FDM günümüzde yaygın olarak kullanılan hibrit BIYS'dir (Dilbaz, 2023).



Şekil 2.4. Batarya ısı yönetim sistemlerinin sınıflandırılması (Hwang vd., 2024; Zhu vd., 2025)

2.2.1. Hava ile soğutma

Elektrikli araçlarda hem bataryaların soğutulması hem de ısıнын homojen olarak dağılımının sağlanması amacıyla yaygın olarak kullanılan geleneksel ısı yönetim sistemidir. Sistemin ısı yükünün belirli bir değeri geçmeyen durumlarda tercih edilmektedir. Şekil 2.5'te örnek bir hava ile soğutma sistem modeli gösterilmiştir. Bu sistemde akışkan olarak havanın kullanılması, kolay ve maliyetsiz ulaşımına sahip olması, sızdırmazlık, bakım kolaylığı, hafiflik ve soğutulacak ekipmana doğrudan temas edebilmesi gibi avantajları ile ön plana çıkmaktadır.

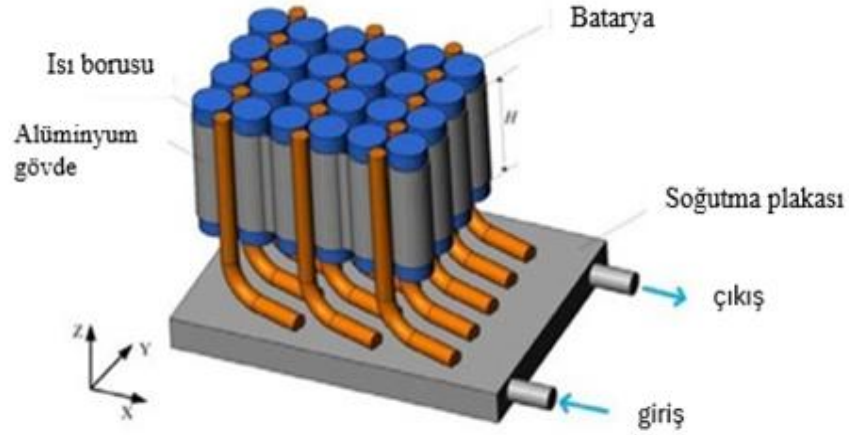


Şekil 2.5. Hava ile soğutma sistem modeli (Casano ve Piva, 2015)

Hava ile ısı yönetim sistemleri; doğal (pasif) taşınımlı ve zorlanmış taşınımlı (aktif) sistemler olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır. Her iki sistemde, havanın düşük özgül ısı kapasitesi ve ısı iletkenliği sebebiyle, batarya paketinin sıcaklık artışını belli bir ölçüde sınırlayabilmekte ve sıcaklık homojenliğini koruma konusunda bazı durumlarda yetersiz kalmaktadır (Martin, 2024).

2.2.2. Isı borusu ile soğutma

Isı borusu ile soğutma sisteminde harici bir pompalama gücü kullanılmadan kendiliğinden çalışabilen ve çok küçük sıcaklık farklarında bile sıvı-gaz faz değişimli ısı transferi etkisiyle büyük miktarlardaki ısıyı yüksek hızlarda önemli mesafelere taşıyabilen ısı yönetim yapabilen pasif sistemlerdir (Kim vd., 2019). Isı borusu ve soğutulacak yüzey arasında iyi bir ısı temas uygulanması ile istenmeyen ısının etkili bir şekilde dağıtılarak sıcaklık homojenliği sağlanmaktadır. Şekil 2.6'da ısı boruları ile soğutma sistem modeli gösterilmiştir. Isı boruları, kompakt yapı, esnek geometri, bakım kolaylığı ve katı iletkenlere göre yüksek ısı iletkenliğe sahip özellikleriyle öne çıkmakta ve yüksek performanslı bir ısı transfer bileşeni olarak çeşitli cihazların ısı yönetiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Lin vd., 2011; Patel ve Rathod, 2020).



Şekil 2.6. Isı boruları ile soğutma sistem modeli (Mahek vd., 2025)

2.2.3. Faz değıştiren malzeme ile soğutma

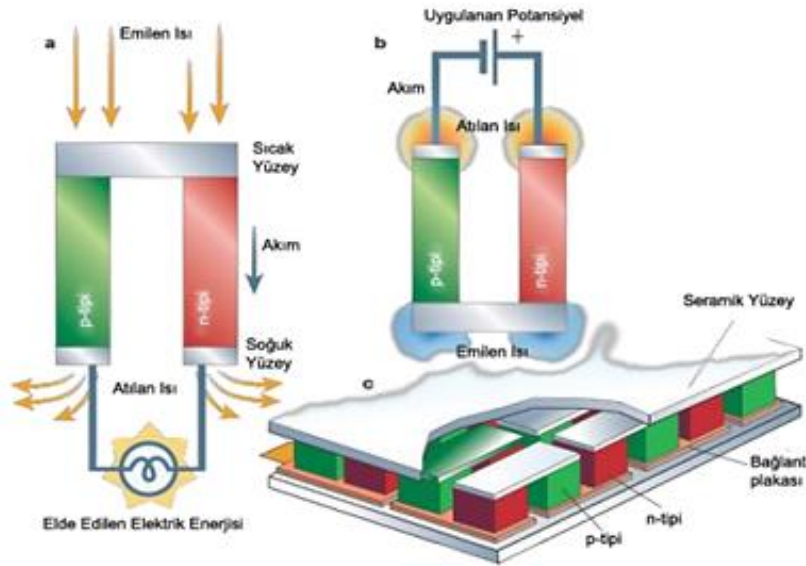
Faz değıştiren malzemeler (FDM), ısıl yönetim uygulamaları için yenilikçi bir çözüm olup faz geçişleri sırasında ısıl enerjiyi soğurabildiklerinden sıcaklık uzun süre faz değışim sıcaklığı civarında tutulabilir. FDM'ler ısıyı emerek veya serbest bırakarak yüksek enerji depolama yoğunluklu özellikleriyle soğutma performansı için umut verici pasif ısıl yönetim sistemi olarak ortaya çıkmaktadır (Belwadi ve Akula, 2025; Choi, vd., 2024; Sevügan vd., 2022). FDM'lere dışarıdan ısı verildiğinde, katıdan sıvıya ya da sıvıdan gaz haline geçiş sırasında ısıyı emerek depolar ve gizli ısı maksimum olana kadar bu işleme devam eder. Depolanan gizli ısı belirli sıcaklık aralığında serbest bırakılır. Bu durumda soğutulan yüzeyden çekilen ısılarla sıcaklık artışı en aza indirilerek homojenlik sağlanmaktadır. FDM'lerin performansı faz geçiş sıcaklığı, ısı depolama kapasitesi ve çevresel koşullarla doğru orantılıdır. Isıl dengeleme ile batarya hücreleri daha verimli bir şekilde çalışarak oluşabilecek sıcaklık dalgalanmalarına karşı daha dirençli hale gelmesi sağlanır. Isıl yönetim sisteminde, daha etkin sıcaklık homojenliği sağlanması ve bataryalarda oluşabilecek ısı kaçaklarına karşı uygun çözümler sunması kullanılabilirliğini artırmaktadır. Bina yalıtımı ve elektronik soğutma gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar.

Faz değıştiren malzeme ile batarya ısıl yönetim sistemleri, faz değıştiren malzemenin bileşimine göre organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üçe, faz değıştiren malzemenin fazlarına göre katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-buhar olmak üzere de üçe ayrılırlar (Kaba vd., 2021).

Organik FDM'ler, parafin ve yağ asitleri (stearik asit, polioller, uzun zincirli alkanlar vb.) gibi karbon bazlı bileşiklerden oluşur.

2.2.4. Termoelektrik soğutma

Termoelektrik soğutma, sıcaklık dengelemesi veya ortam sıcaklığının altında bir soğutma yönetiminin gerektiği uygulamalarda kullanılan, hareketli parçası bulunmayan ve ısı pompası olarak kullanılan ısıl yönetim sistemleridir. Termoelektrik soğutma, N ve P tipi yarı iletken metal çiftlerinden oluşan modüllere gerilim uygulanmasıyla zıt uçlarda meydana gelen sıcaklık artışı ve azalışını açıklayan Peltier etkisinden kaynaklanmaktadır (Tören ve Mollahasanoğlu, 2022). Peltier etkisi sayesinde, harici bir mekanik güç gerektiren ekipmanlara ihtiyaç duymadan soğutma yapabilmeleri, gürültüsüz çalışmalarını sağlamaktadır. Termoelektrik bir modülün soğutma mekanizması Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Termoelektrik soğutma sistemi (Doğdu, 2013)

Termoelektrik soğutma sistemleri, küçük ölçekli soğutmada (yani soğutma kapasitesi 100 W'tan küçük olan cihazlar) ve sıcak nokta soğutma uygulamalarında (lazer/LED soğutma) yaygın şekilde kullanılmaktadır. Termoelektrik soğutucular, herhangi bir soğutma sıvısına ihtiyaç duymadan çalışmasıyla çevre dostu çözümler sunmaktadır. Ayrıca, fotovoltaik (PV) hücreler, yakıt hücreleri ve doğru akım (DC) elektrik kaynakları ile çalıştırılabilme avantajına sahiptir (Zhao ve Tan, 2014). Termoelektrik soğutmanın dezavantajı düşük enerji verimliliği ve yüksek maliyetli olmasıdır. Böylece diğer soğutma sistemleri ile hibrit soğutma yöntemi

olarak kullanılmasıyla performans verimlilikleri artırılmaktadır. Batarya ısı yönetiminin yanı sıra termoelektrik soğutma, mikroişlemci birimlerinin, yarı iletken lazerlerin ve çiplerin ısı yönetimi, giyilebilir soğutma giysilerinin tasarımı ve kurulum alanının sınırlı olduğu tıbbi teşhis ekipmanı için sıcaklık düzenlemesi dahil olmak üzere teknik alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Yu vd., 2025).

2.2.5. Sıvı ile soğutma

Sıvının ısı iletkenliği havadan daha yüksektir, bu da ısının bileşenlerden daha etkili bir şekilde emilmesine ve aktarılmasına olanak tanır. Sıvı ile soğutma sistemi, sıvıların üstün ısı iletkenlik özelliklerinden yararlanarak artan güç gereksinimine rağmen daha yüksek ısı transfer katsayısı, güçlü soğutma kapasitesi ve bataryalarda sıcaklığın homojen şekilde dağılımını sunmaktadır (Yang vd., 2025b; Zhou vd., 2025). Sıvı bazlı BIYS’de soğutma sıvısı olarak su, EG, yağlar, nanoakışkanlar, sıvı metaller ve organik bileşikler gibi farklı sıvı türleri kullanılmaktadır (Deng vd., 2018; Hwang vd., 2024). Batarya ve soğutma sıvısı arasındaki ısı transfer performansı, soğutma sıvısının ısı iletkenliğine, viskozitesine, yoğunluğuna ve akışkan debisine bağlıdır (Deng vd., 2018).

Sıvı bazlı BIYS, soğutulacak yüzeye doğrudan temas halinde olup olmamasına göre doğrudan temaslı ve dolaylı temaslı soğutma olarak ikiye ayrılırlar. Doğrudan temaslı soğutma sistemleri, daha fazla kompaktlık avantajıyla birlikte ısıyı yüzeyden verimli bir şekilde uzaklaştırmak için genellikle dielektrik ısı transfer akışkanı (mineral yağlar, nanoakışkanlar, EG gibi) kullanır. Doğrudan temaslı soğutma sistemlerinde diğer soğutma yöntemlerindeki gibi ara yüzeyde oluşan ısı dirençler olmadığından soğutulacak yüzey ile soğutma sıvısı doğrudan ısı transferine maruz kalmakta ve daha etkin bir soğutma sağlanmaktadır (Lian vd., 2025; Yang vd., 2025b). Bu sistemde bakım ihtiyacı gerektiren pompa, rezervuar, borular ve radyatörler gibi maliyetli ek bileşenler gerektirmesi sistemin dezavantajlarındanır.

Dolaylı temaslı sıvı soğutma sistemlerinde soğutulacak yüzey ile soğutma sıvısı arasında bir soğutma kanalı, gömlek veya ısı değiştirici gibi ara ekipmanlar kullanılmaktadır (Wu vd., 2019). Dolaylı temaslı sıvı soğutma, soğutucuyu ara ekipman yüzeyine eşit şekilde yayarak maksimum sıcaklık noktalarını azaltabilir ve bölgesel aşırı ısınmayı önleyerek tutarlı ısı yönetim performans sağlayabilir. Diğer yandan dolaylı temaslı sıvı soğutma sistemleri, soğutucu seçiminde esneklik sunarak kullanıcıların özel uygulama gereksinimlerine en uygun

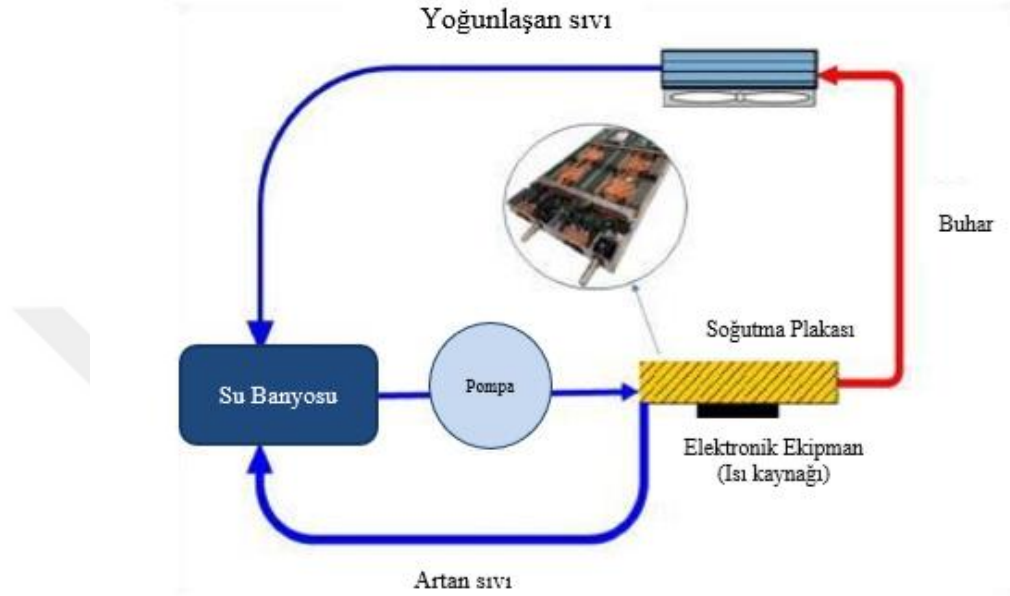
soğutucuyu seçmesine olanak tanır. Farklı soğutucu sıvıların farklı ısı özellikleri, korozyon direnci ve çevresel etkileri vardır; bu da soğutma verimliliği, uyumluluk ve çevresel etki gibi faktörlere dayalı olarak özelleştirmeye olanak tanır. Ayrıca toz, nem veya kirletici maddelerin sistem bütünlüğünü tehlikeye atabileceği ortamlarda kullanılan elektronik cihazlar veya ekipmanlar için ideal hale getirilmiş olunur. Bununla birlikte sisteme sıvı girişi veya sızıntı riski azaltılarak hassas elektroniklerin hasar görme olasılığı en aza indirilir ve sistem güvenilirliği artırılmış olur. Dolaylı temaslı sıvı soğutma sistemleri, değişen soğutma gereksinimlerine ve sistem konfigürasyonlarına uyum sağlayacak şekilde kolayca ölçeklendirilebilir ve modüler hale getirilebilir. Birden fazla bileşeni soğutmak veya sistem düzenindeki değişikliklere uyum sağlamak için gerektiğinde ek sirkülasyon döngüleri kullanılabilir veya değiştirilebilir; böylece dolaylı temaslı sıvı soğutmayı çeşitli uygulamalar ve ortamlar için uygun hale getirilmiş olur. Bu yöntem, ekipman kullanım ömrü boyunca tutarlı soğutma performansı ve sistem kararlılığı sağlayarak bakım gereksinimlerini ve arıza süresini azaltır. Genel olarak, dolaylı temaslı sıvı soğutma, verimli ısı transferi, eşit sıcaklık dağılımı, soğutucu seçiminde esneklik, kapalı sistemlerle uyumluluk, sıvıya maruz kalma riskinin azaltılması, ölçeklenebilirlik, modülerlik, gürültü azaltma ve uzun vadeli güvenilirlik gibi çeşitli avantajlar sunar. Bu avantajlar, dolaylı temaslı sıvı soğutmayı, elektronik soğutmadan endüstriyel ve ticari soğutma çözümlerine kadar çok çeşitli ısı yönetim uygulamaları için tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir (Jin vd., 2014; Sarchami vd., 2023).

2.3. Soğutma Plakası

Soğutma plakaları, uzay, havacılık, savunma, otomotiv, tıbbi cihazlar, yenilenebilir enerji, telekomünikasyon bilgi ve işlem teknolojileri, endüstriyel makineler ve güç elektroniği gibi çeşitli enerji veya makine uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ağırlık ve hacim optimizasyonunu önemli olduğu havacılık ve uzay elektroniği endüstrisinde kullanılan radar sistemleri, uydu ve iletişim araçları gibi elektronik sistemlerin maksimum performans verimliliği soğutma plakaları ile sağlanmaktadır. Soğutma plakasının sıvı soğutma yöntemlerinde kullanımı oldukça fazladır.

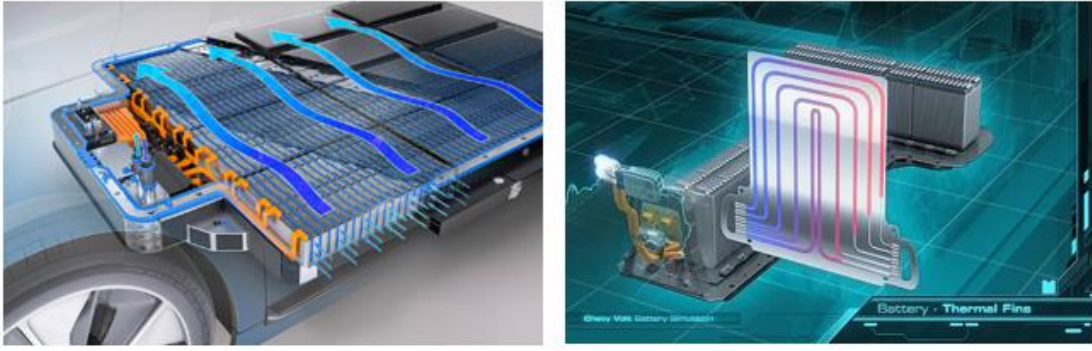
Soğutma plakası, Şekil 2.8’de gösterildiği gibi soğutma sıvısının içinden akmasını sağlayan kanal yapıları ve akışkan giriş çıkış noktaları olan alüminyum veya bakır alaşımlı plakalardır. Soğutma plakasında soğutma işlemi su ve EG karışımları kullanılarak yapılır ve bu karışımların ısı iletkenliği ve özgül ısı kapasitesi havadan daha yüksek olduğu için daha hızlı ısı transferi

sağlamaktadır (Tong vd., 2025). Bir sirkülasyon pompası ile soğutma plakası girişine soğutma sıvısı pompalanarak akışkanın kanallarda ilerlemesi sağlanır. Isı kaynağı tarafından üretilen ısı iletim yoluyla sıvı soğutma plakasına aktarılmaktadır. Sistemden soğurulan ısı enerji soğutma sıvısından ısı eşanjörü-fan bileşeni ile çekilerek dış ortama atılmasıyla soğutma işlemi yapılmaktadır.



Şekil 2.8. Sıvı soğutma plakası soğutma ünitesinin şematik diyagramı (Alkrush vd., 2024).

Soğutma plakasının soğutma performansı, kanal yapılarının boyutları ve geometrisi, akışkan giriş çıkış noktalarının sayısı ve konumu ile kullanılan malzeme özellikleri gibi faktörlerden etkilenir (Tang vd., 2025). Otomotiv alanında, özellikle gelişen elektrikli araç teknolojisinde Şekil 2.9’da bir örneği gösterilen soğutma plakaları kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda batarya paketlerinin ısıl yönetiminde kullanılmasıyla sıcaklık aralığının korunması, bataryanın verimliliğini ve performansını artırırken, aşırı ısınmaya ve oluşabilecek güvenlik sorunlarına karşı koruma sağlamaktadır.



Şekil 2.9. Soğutma plakasının kullanıldığı otomotiv alanı (Perry, 2018; Voiturenet, 2024)

Bilgi ve iletişim teknolojileri alanında ise veri merkezlerinde, telekomünikasyon altyapısında ağ ekipmanlarının ürettiği ısının yönetilmesi, kesintisiz veri iletimi ve sistem güvenilirliğini sağlamak için soğutma plakaları kullanılır. Yüksek performanslı bilişim (HPC) hücrelerinde ve merkezi soğutmasında hem merkezi işlem birimi (CPU) hem de grafik işlem birimi (GPU) ile yapılan hesaplamalar ve diğer işlemler sırasında oluşan yüksek ısı yüklerinin giderilmesinde soğutma plakaları yaygın olarak tercih edilmektedir (Pambudi vd., 2022; Silva vd., 2024). Sıvı ile soğutma teknolojisi, sıvıların yüksek ısı iletkenliğinden yararlanarak çip soğutma performansının iyileştirilmesinde ve veri merkezlerinde enerji tüketiminin azaltılmasında önemli rol oynamaktadır (Li vd., 2025).

2.4. Literatür Özetleri

Literatürde soğutma plakalarının kullanıldığı ısı yönetim sistemleri ile ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların bazıları şöyle özetlenmiştir.

Bao vd. çalışmalarında, lityum iyon bataryaların (LIB) ısı yönetimi için tasarlanan ultra ince, düz ve geniş akış kanallarına sahip soğutma plakasının (WCP) performans etkilerini incelemişlerdir. Soğutma plakası ile toplam giriş itici kuvvet, ısı akısı, kanal genişliği ve akış kanalı düzeninin batarya üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, geleneksel soğutma plakası tasarımları olan serpantin kanallı (SCP), çatal şekilli (BCP) ve U- dönüşlü (UCP) plakalara kıyasla performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, toplam giriş itici kuvvetin artmasıyla hem maksimum sıcaklık hem de sıcaklık standart sapmasının azaldığını ve buna bağlı olarak ısı performansın iyileştiğini ortaya koymuştur. WCP'nin SCP, BCP ve UCP ile karşılaştırıldığında maksimum sıcaklığı sırasıyla 4.31 K, 19.31 K, 45.50 K düşürdüğü ve sıcaklık standart sapmasını ise sırasıyla %47,51, %45,40 ve %65,08 oranında azalttığı

belirlenmiştir. Ayrıca kanal genişliğinin artırılması ile WCP'nin ısıl performansında artış gözlenmiştir. Örneğin 55 mm ile 5 mm genişliğe sahip WCP plakaları karşılaştırıldığında, maksimum sıcaklıkta 3,31 K düşüş sağlandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, WCP tasarımının, geleneksel soğutma plakalarına kıyasla bataryaların ısıl yönetiminde daha etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir (Bao ve Shao, 2023).

Amalesh vd. çalışmalarında yüksek güçlü LIB'lerin ısıl yönetimini iyileştirmek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan dairesel yuva profil kanallı ve zikzak profil kanallı olarak iki farklı mini kanallı soğutma plakası tasarlamışlardır. Çalışmada soğutma sıvısı giriş hızı, soğutma sıvısı giriş sıcaklığı ve kanal sayısı parametrelerinin tasarlanan plaka üzerindeki soğutma performansına etkileri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Batarya üzerindeki sıcaklık artış etkisini gözlemlemek için her iki tasarımda da soğutma sıvısı giriş hızı sistematik olarak 0,05 ile 0,3 m/s arasında değiştirilmiştir. Hızın artırılması ile sıcaklık artışının önemli ölçüde azaldığı fakat aynı zamanda basınç düşümünü ve pompalama gücünü artırdığı bulunmuştur. Ayrıca daha iyi bir soğutma performansı için kanal sayısının beş olması gerektiği gösterilmiştir. Sonuç olarak yeni mini kanallı soğutma plakası tasarımı soğutma verimliliğini artırmakta ve bataryaların maksimum sıcaklıklarını düşürmektedir (Amalesh vd., 2023).

Zhao vd., yaptıkları çalışmada prizmatik bataryalar için altıgen-bal peteği şekilli akış kanalına sahip sıvı soğutma plakası (HLCP) tasarlamışlardır. Tasarlanan HLCP ile soğutma sıvısı arasındaki ısı transfer yüzey alanının arttığı görülmüştür. HLCP'nin yapısal parametreleri ve soğutma sıvısı debi değişkenleri ile sayısal simülasyon için ilgili modeller oluşturulmuştur. Bal peteği akış kanal yapısının etkisi, sıcaklık dağılımının iyileştirilmesi gibi analizler yapılmıştır. Sonuç olarak optimum yapısal parametrelerin; soğutma kanalının genişliği 3 mm ve düzenli altıgen alüminyum bloğun merkezinden yan uzunluğuna olan dikey mesafe 608 mm olduğunda HLCP'nin etkili ısıl performans sağladığı görülmüştür. Soğutma sıvısı giriş hızı 0,1 m/s ve HLCP kalınlığı 3 mm olarak ayarlandığında, bataryanın maksimum sıcaklığı ve maksimum sıcaklık farkı sırasıyla 302,5 K ve 4,1 K olarak bulunmuştur. Tek bir HLCP'deki basınç düşümü ise 122,4 Pa olarak ölçülmüştür. Soğutma sıvısı giriş hızının artırılması ile soğutma performansında iyileşme görülmüştür (Zhao vd., 2023).

Feng vd. çalışmalarında, gradyan dağılımlı Tesla tipi soğutma plakası tasarlayarak ısıl yönetim ve enerji verimliliği analizini gerçekleştirmişlerdir. 24 adet prizmatik LIB hücrelerinin bir araya getirilmesiyle dört küçük modül yapısı oluşturulmuş ve bu modüllerin yan yüzeylerine Tesla

tipi soğutma plakaları yerleştirilmiştir. Soğutma plakası performansı Kriging yardımcı model ve NSGA-II algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Soğutma sisteminin hidrotermal performansı hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ile değerlendirilmiştir. Bu kapsamda bataryada oluşan maksimum sıcaklık, sıcaklık farkı ve basınç düşümü gibi parametreler incelenmiştir. Çalışmanın sonucu kütsel debinin hidrotermal performans üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu, bunu kanal derinliği ve Tesla valf mesafesinin izlediğini göstermektedir. Ayrıca Pareto dağılım çözümüne göre, temel duruma kıyasla basınç düşümünde %75,7 oranında maksimum azalma sağlandığı tespit edilmiştir (Feng vd., 2024).

Kalkan vd. çalışmalarında elektrikli araçlarda kullanılan sıvı soğutmalı bataryaların ısı yönetimi için deneysel olarak tasarladıkları mini kanallı soğutma plakalarının (MCCP) optimizasyonunu yapmışlardır. Bataryaların ısı yönetiminde maksimum batarya sıcaklığı (MBT), batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık farkı (MTD) ve kanallardaki basınç düşüm değerleri (ΔP) önemli faktörler olduğu için minimize edilmesi gerekmektedir. Deneysel olarak tasarlanan MCCP'nin geometrik parametrelerinin ve soğutma sıvısı debisinin çok amaçlı optimizasyonunu İstenebilirlik Fonksiyonu Yaklaşımı ile sağlamışlardır. Sonuç olarak MBT, MTD ve ΔP için geliştirilen model denklemlerinin tahmin doğrulukları %97,75, %95,49 ve %97,15 olarak belirlenmiştir. Tasarım değişkenleri olan kanal genişliği, kanallar arası mesafe, kanal derinliği, kanallardaki geçiş sayısı ve soğutma sıvısı debisinin optimum değerleri sırasıyla 5, 5, 10, 13 ve 0,7061 olarak bulunmuştur (Kalkan vd., 2022).

Alınca (2023), çalışmasında GOUPIL Industries tarafından üretilen G6 aracında kullanılan LİB modelini ele alarak sıvı soğutma plakası tasarlamıştır. Plakanın termal modeli Amesim yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada üç farklı kanal sayısı, kanal yükseklikleri ve akışkan debisi ile laminar ve türbülanslı koşullar altında optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı EG oranlarındaki soğutma sıvıları kullanılarak batarya ve plaka arasındaki ısı transferi analizi yapılmıştır. Optimizasyon için Taguchi ortogonal matrisinden yararlanılmış ve sayısal analizler HAD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme ölçütü olarak tabanda oluşan maksimum sıcaklık, taban yüzey sıcaklığının standart sapması ve basınç kaybı göz önünde bulundurulmuş, elde edilen çıktılar Minitab yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Birden fazla sonuç parametresi olduğu için Taguchi tabanlı çok yanıtlı Gri İlişki Analizi ile optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Li vd., LİB modüllerinin ısıl yönetimini iyileştirmek amacıyla dışbükey paket yapılı soğutma plakası optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Dışbükey paket yapılı soğutma plakası için en uygun parametreler (yarıçap, enine aralık ve boyuna aralık) simülasyon analizi ve ortogonal deneyler yoluyla belirlenmiştir. Bu çalışmada farklı deşarj oranları, ortam sıcaklığı, soğutma sıvısı giriş sıcaklığı ve giriş hızının batarya modülünün ısı dağılımı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Batarya modülü üzerinde oluşan sıcaklık dağılım etkileri HAD kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, soğutma plakası ile batarya arasındaki temas alanı artarken soğutma sıvısının daha iyi homojen dağılım gösterdiği ve iyi bir ısı transferi sağladığı görülmüştür. Bu tasarım, bataryanın maksimum sıcaklığını 1,13 °C düşürmüş, aynı zamanda sıcaklık farklarını minimize ederek ısıl dengeyi iyileştirmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen dışbükey paketin, bataryanın ısı dağılımını; yarıçap (r)= 0.75 mm, yatay aralık (x)= 3,50 mm ve dikey aralık (y)= 4,50 mm optimum yapısal parametreleri ile etkili bir şekilde iyileştirebileceğini göstermektedir (Li vd., 2024a).

Fok vd. çalışmalarında yeni iğne-kanat yapılı soğutma plakası tasarımı yaparak ısıl yönetim performans analizini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. İğne-kanat yapılı soğutma plakası optimizasyonunda Bezier eğrileri ile geometri beş farklı noktadan analiz edilmiştir. Bezier eğrileri ile akışkan daha iyi yönlendirilerek ısı transfer soğutma verimliliğinin artması ile geometrinin daha iyi şekilde kontrolü sağlanmıştır. Toplamda yedi farklı iğne-kanat yapılı geometri incelenmiş ve en iyi ısıl performansın 1.000 Reynolds sayısında olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak yükselen Re sayısına rağmen basınç değerinin düştüğü görülmüştür (Fok vd., 2024).

Ma vd. çalışmalarında, uzay araçlarında ısı dağıtma cihazı olarak kullanılan tahrikli soğutma plakalı su süblimatörü üzerine uygulanan gözenekli alüminyum köpüğün soğutma sistemleri üzerindeki ısıl etkilerini incelemişlerdir. Akışkan dinamiği ve alüminyum köpüğün soğutma plakası üzerindeki ısı transfer analizinde HAD kullanılmıştır. Çalışmalarında sıcaklık ve entropi değişimleri, besleme suyu basıncı ve gerilimi, ısı transferinin özellikleri ve farklı gözenekli yapıların karşılaştırmalı analizleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, artan gözeneklilik ile süblimasyon tüpündeki buz oluşum hızının arttığı böylece alüminyum köpüğün ısıl iletkenlik performansı ve soğutma etkisinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Plaka üzerinde gözenekli alüminyum köpüğün optimum gözeneklilik aralığı ise $0,7 \pm 0,05$ olarak belirlenmiştir. Alüminyum köpük yapılarının, özellikle kompakt ve hafif soğutma sistemlerinde su

buharlaştırıcı olarak kullanılabileceği ve yüksek verimlilik sağlayabileceği önerilmiştir (Ma vd., 2024).

Zhang vd., çalışmalarında 10 kW seviyesinde ısı yüküne sahip iki fazlı mini kanallı soğutma plakasının akış ve ısı transfer performansını incelemişlerdir. Kanal yapısı, soğutma sıvısı türleri, ısı transfer özellikleri, akış homojenliği ve akış direncinin soğutma plakası sıcaklığı ve basınç düşümü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sayısal ve deneysel incelemeler sonucunda Iğ yapılı soğutma plakasının dikdörtgen kanal yapılı soğutma plakasından daha iyi performans gösterdiği elde edilmiştir. Ayrıca, R1234ze(E) soğutma sıvısı kullanıldığında R1233zd(E) soğutma sıvısına göre daha iyi sıcaklık ve basınç düşümü sağladığı görülmüştür. Soğutma plakası, ısıtma gücü 20 kW olduğunda, 60 °C sıcaklıkta ve 9 L/dk debisinde R1234ze(E) soğutma sıvısı kullanıldığında yüzey sıcaklığını 80 °C altında ve basınç düşümünü 0,6 barın altında tutulabileceği öngörülmüştür (Zhang vd., 2023).

Zhou vd. çalışmalarında hava taşıtlarında oluşan titreşimin sıvı bazlı elektronik soğutma sistem ve bileşenler üzerindeki performans etkilerini incelemişlerdir. Titreşim koşulları altında farklı geometri yapısına sahip MCCP, dikdörtgen nervürlü soğutma plakası (RRCP) ve elmas nervürlü soğutma plakalarının (DRCP) ısı transfer ve akış özellikleri analiz edilmiştir. Titreşim frekansı, genlik ve yönünün soğutma plakaları üzerindeki hidrotermal etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, titreşimin ısı transfer kapasitesini artırdığı ve basınç dönüşümü salınımını belirgin şekilde yoğunlaştırdığı görülmüştür. Ayrıca soğutma plakasının ısı transfer kapasitesini artırmıştır. Statik koşullarla karşılaştırıldığında 30 Hz, 1,5 mm titreşim ortamında RRCP ve DRCP'nin ısı transfer katsayıları %5,94 ve %2,77 oranında arttığı gözlemlenmiştir (Zhou vd., 2024).

Zhang vd. çalışmalarında, BIYS ile ısı dağıtımı için radyal ısıl sütunlarla birleştirilmiş alt soğuma plakalı yeni bir soğutma modeli önermişlerdir. Model, batarya paketinin altında bir mikro kanal plakası ve silindirik bataryalara bağlı üç yay şeklinde kenarı olan ısıl sütunlarla oluşturulmuştur. Çalışmada farklı soğutma modellerinin, ısıl sütun yüksekliklerinin ve soğutma sıvısı debi değerlerinin batarya ısı yayma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, 1C ve 2C deşarj oranlarında birleştirilmiş soğutma modelinin geleneksel modele kıyasla maksimum sıcaklığı sırasıyla %16,6 ve %32,0 oranında azalttığı görülmüştür. ısıl sütunun yüksekliği arttıkça bataryanın maksimum sıcaklığı ve sıcaklık farkının azaldığı belirlenmiştir. 1C ve 2C deşarj oranlarında hacimsel debi değerleri artırıldığında bataryaların maksimum

sıcaklığı sırasıyla 27 °C ve 31 °C'ye düştüğü ve sıcaklık farklarının da azaldığı gözlemlenmiştir (Zhang vd., 2025).

Mubashir vd., çalışmalarında dairesel içi boş kanatçıklara sahip yeni bir soğutma plakası tasarımı önermişlerdir. Soğutma plakası tasarımı simülasyon modeli ANSYS (ICEM) programında geliştirilmiştir. Çalışmada kanatçıkların çapı, kütsel debi, kanatçıklar arasındaki mesafe, soğutma plakası kalınlığı ve soğutma yönlerinin etkisi gibi yapısal parametrelerin batarya maksimum sıcaklığı, sıcaklık standart sapması ve basınç düşümü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, kanatçıkların çap değişkenliğinin maksimum sıcaklık üzerindeki etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Kanatçığın çapı arttırıldığında soğutma plakasının kütselinin azaldığı ve basınç düşümünün arttığı belirlenmiştir. Kanatçıklar arasındaki mesafenin azalması ile soğutma sıvısı tarafından daha fazla ısı emilimi sağlanarak batarya sıcaklığının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, optimize edilmiş soğutma yapısının performansı maksimum sıcaklık, sıcaklık farkı, soğutma plakası kütseli ve güç tüketimi açısından aynı çalışma koşulları altında geleneksel sıvı soğutma yapıları ile karşılaştırılmıştır. Optimize edilmiş soğutma konfigürasyonu, maksimum sıcaklığı, sıcaklık farkını, soğutma plakasının kütselini ve güç tüketimini sırasıyla %6, %29, %55,2 ve %85,9 oranında azalttığı sonucuna ulaşmışlardır (Mubashir vd., 2024).

Chen vd., yaptıkları çalışmalarda geleneksel akış kanal yapılı soğutma plakalarının ısı performansını arttırmak amacıyla çift katmanlı yaprak damar akış kanal yapısına sahip soğutma plakası tasarlamışlardır. Tasarlanan soğutma plakası üst ve alt akışkan kanallarından oluşmakta ve bir batarya paketini soğutmaktadır. Üst akış kanalları ısı alışverişi için batarya modülü ile temas halinde iken alt akış kanalları ise diğer alanlarla temas ederek batarya üzerine homojen ısı dağılımı sağlar. Geleneksel akış kanal yapılı soğutma plakaları ile karşılaştırmalı optimizasyonu sağlanmıştır. Sonuçlara göre, çift katmanlı biyotik yaprak damar kanallı soğutma plakası ile maksimum sıcaklık, sıcaklık farkı ve basınç düşümü değerlerinde daha iyi performans sağlandığı deneysel olarak bulunmuştur. Batarya paketinde daha iyi ısı homojenlik sağlanarak sıcaklık farkı azalmıştır. Optimize edilen çift katmanlı yaprak damar akış kanalı soğutma plakası ile pompalama gücünün daha az olduğu ve güç tüketiminde yaklaşık %90 tasarruf sağlayabileceği öngörülmüştür. Ayrıca en iyi soğutma verimliliği soğutma sıvısının zıt yönlü olarak ilerlediği, dal açısının 80°, dal kanalı genişliği 5 mm ana kanal genişliği 7,5 mm ve soğutma sıvısının 0,03 kg/s kütsel debi olarak ayarlandığında elde edildiğini ortaya koymaktadır (Chen vd., 2024a).

Pu vd., yaptıkları çalışmada BIYS soğutma plakası tasarımlarını ve performans analizlerini sayısal analiz yoluyla incelemişlerdir. Geleneksel düz kanallı soğutma plakalarını üç farklı yerleştirme stratejisine göre; alt soğutma plakası (BCP), yan çift soğutma plakası (SDCP-A&B) ve alt-yan çift soğutma plakası (BDP) olarak değerlendirmişlerdir. Batarya ısı yönetim performansının artırılması için stereoskopik soğutma plakası yapıları 3DCP-A ve 3DCP-B tasarlanmıştır. BCP tasarımı ile karşılaştırıldığında, maksimum sıcaklık farkı sırasıyla %23,8 ve %35,9 değerinde azalmıştır. Optimize edilen soğutma yapısı belirlenmiş ve diğer yapılarla karşılaştırıldığında 3DCP-B'nin daha az güç tüketimi ile etkin ısı yönetim performansı sağladığı bulunmuştur. Aynı zamanda basınç düşümünde ise BCP ve 3DCP-A modellerine kıyasla sırasıyla %75,9 ve %44,3 azalma sağlanmıştır. 3DCP-B tasarımının pompalama güç tüketimi geleneksel tasarımın sadece %6'sı kadar olduğu bulunmuştur (Pu vd., 2024).

Chen vd., çalışmalarında LİB'lerin deşarjı sırasında gözlemlenen sıcaklık birikimi sorunlarını azaltmak için Biyonik Lotus Yaprığı kanallı sıvı soğutma plakası önermişlerdir. Önerilen bu sıvı soğutma plakası ile lityum-iyon batarya içindeki sıcaklık homojenliğinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Çift girişli ve çift çıkışlı biyonik lotus yaprağı kanallı sıvı soğutma plakasının ısı yayma etkinliği, kanal açısı (α), kanal sayısı (N), kanal genişliği (D) ve kütleli debi (M) tasarım faktörleri ile analiz edilmiştir. Tek değişkenli analiz kullanarak farklı iç konfigürasyonların ve kütleli debilerin LİB sıcaklıkları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak ortogonal analiz yoluyla belirlenen optimum parametre kombinasyonu ile kanal açısı ve kütleli debinin LİB maksimum sıcaklığını önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Deneysel olarak belirlenen optimum kombinasyon ($M=1,0$ g/s, $N=4$, $D=2,5$ mm, $\alpha=90^\circ$), 5C deşarj sırasında bataryaların maksimum sıcaklık değerinin $29,732^\circ\text{C}$ 'nin altında kalmasını sağlamıştır. Geleneksel bir serpantin kanallı soğutma plakası ile karşılaştırıldığında, optimize edilmiş biyonik lotus yaprağı kanallı soğutma plakası maksimum sıcaklık değerinde $0,776^\circ\text{C}$, maksimum sıcaklık değişimi değerinde $2,445^\circ\text{C}$ azalma göstermiş ve basınç düşümü değeri ise %43,44 oranında düştüğü gözlemlenmiştir (Chen vd., 2025).

Kalkan vd., çalışmalarında yeni bir mini kanallı soğutma plakası tasarlayarak bataryaların ısı yönetimi üzerindeki performansını geleneksel serpantin kanallı soğutma plakaları ile karşılaştırarak incelemişlerdir. Soğutma sıvısı giriş sıcaklığı, debisi, deşarj hızı etkileri, batarya yüzey sıcaklık değişimleri ile soğutma plakaları tarafından uzaklaştırılan ısı ve basınç düşümleri incelenmiştir. Mini kanallı soğutma plakasının batarya yüzeyindeki yerel sıcaklık farkının en aza indirilmesi ve ortalama batarya yüzey sıcaklığının düşürülmesinde etkili olduğu

görülmüştür. Soğutma plakasında kullanılan soğutma sıvısının 15-35 °C giriş sıcaklıkları ve 0,1-1,1 L/dk farklı debi değerleri ile deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak, soğutma sıvısı giriş sıcaklığı en düşük değerinde iken batarya yüzeyinde en büyük maksimum sıcaklık farkı olduğu görülmüştür. Mini kanallı soğutma plakasının kullanımı, serpantinli olana kıyasla maksimum ortalama batarya yüzey sıcaklığında 5,7 °C azalma sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca mini kanallı soğutma plakasının kullanımı batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık farkının azaltılmasında %40 a kadar iyileştirme sağladığı belirlenmiştir (Kalkan vd., 2021).

Abdulqader vd., çalışmalarında geleneksel kanal tasarımı soğutma plakalarının sınırlı soğutma kapasitesinin, hidrotermal performans ve sıcaklık homojenliği bakımından iyileştirilmesi için deneysel analiz yapmışlardır. Deneysel model, değişken genişlikli kanallardan oluşan farklı şekilli pim kanatları ve oluk yapılarından meydana gelmektedir. Tasarladıkları modelde dört farklı tip (elips, damla, eşkenar dörtgen veya yamuk) pim kanadı oluğu kullanılmış ve soğutma plaka malzemeleri bakırdan üretilmiştir. Deneysel analizler, 0,004-0,04 kg/s kütleli debi ve 1C-2C deşarj aralığında yapılmıştır. Soğutma sıvısı olarak kullanılan su ile laminar akış koşulları altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, tasarlanan farklı şekilli pim kanat ve oluk yapıları kanalların kullanımı soğutma plakasının ısı dağılımını iyileştirdiği ve hidrolik pompalama gücünü artırdığı gözlemlenmiştir. Akış hızının artmasıyla Nusselt sayısında görülen %82,5 oranındaki iyileşme yamuk pim kanat yapıları soğutma plakasında elde edilmiştir. Ayrıca, %33,2 oranındaki en düşük pompalama gücü artış yüzdesi elips pim kanat yapıları soğutma plakasında olduğu belirlenmiştir. Analizler sonucunda hesaplanan en iyi termohidrolik performans kat sayısı 1.685 olup, yamuk pim kanat yapıları soğutma plakasında elde edilmiştir (Abdulqader ve Jaffal, 2024).

Wang vd., yaptıkları çalışmada nervürlü yapıya sahip çift katmanlı serpantin mikrokanallı bir soğutma plakası tasarlamışlardır. Mikrokanallı soğutma plakasının akış yolunun soğutma plakasının ısıl-hidrolik performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ortogonal sayısal testler aracılığıyla, nervür yüksekliği, nervür kesme sayısı, nervür kesme boşluğu ve nervür ucu sapma mesafesinin soğutma plakasının ısıl-hidrolik performansı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Ayrıca, nervür yapısının akış ve ısı transferi performansı üzerindeki önemini değerlendirmişlerdir. Optimum nervür yapısı parametreleri ortogonal testin sonuçlarına göre belirlenerek analiz edilmiştir. Sonuç olarak, paralel akış yolunun daha düzgün akış dağılımı gösterdiği ve seri akış yoluna göre soğutma plakasının yaklaşık %2,5 daha düşük ısıl direncine sahip olduğunu göstermektedir. Nervür yüksekliği 0,3 mm'den 3 mm'ye çıkarıldığında taşınım

katsayısının %18 oranında arttığı ve soğutma sıvısı ısı dağılımını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, soğutma plakasının termal direncinin %12 oranında azaltmıştır. İlk yapıya kıyasla en yüksek performans değerlendirme kriteri, optimize edilmiş yapı için toplam termal direnç ve basınç düşümü sırasıyla %5,5 ve %7,4 oranında iyileşme elde edilmiştir. En düşük toplam termal direnç sahip yapıda termal direnç %7,9 oranında azalırken basınç düşümünün %27 oranında arttığı tespit edilmiştir (Wang vd., 2025).

Ma vd. çalışmalarında geleneksel düz kanallı soğutma plakalarındaki akış ve ısı transferi sınırlılıklarını iyileştirmek için halka kanallı soğutma plakası tasarlayarak performansları karşılaştırılmıştır. Soğutma plakalarının termal performansını detaylı olarak incelemek için j/f faktörünü kullanmışlardır. Yapılan karşılaştırmalı deneyler ve analiz yoluyla halka kanallı soğutma plakasının daha düşük değerlerde basınç düşümüne ve daha iyi termal performansa sahip olduğu belirlenmiştir. Kütsel debinin artmasıyla halka kanallı soğutma plakasında boyutsuz j/f faktörü performans kriteri ile iyileştirme etkisinin daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca kanal genişliği 6 mm olduğunda daha iyi termal performans sergilendiği ve j/f değerinin en yüksek olduğu görülmüştür. Kanal genişlikleri aynı olan halka kanallı soğutma plakasında en içteki kanalların en kısa akış yoluna ve en büyük kütsel debiye sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, aynı kanal genişliklerine sahip halka kanallı soğutma plakasında en dış, orta ve en iç kanal genişlikleri sırasıyla 6,66 mm, 6 mm ve 4 mm olduğunda daha verimli batarya termal yönetim performansı sağlandığı belirlenmiştir. Tasarlanan halka kanallı soğutma plakası ile geleneksel düz kanallı soğutma plakası karşılaştırıldığında halka kanallı tasarımın termal performansı %39,4 oranında iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Ma vd., 2025).

Keyinci vd., çalışmalarında kavis şekilli ve çok dallı serpantin yapıları sıvı soğutma plakası tasarlamışlardır. LiFePO₄ batarya paketlerin güvenliği, uzun ömürlülüğü ve performansını iyileştirme amaçlı deneyler yapılmıştır. Sıvı soğutma plakasında soğutma sıvısının ilerleyebileceği iki, üç ve dört kanal yapıları farklı konfigürasyonlar modellenerek çok girişli yapı tasarlanmıştır. Böylece yüksek deşarj koşulları altında soğutma plakalarının kanal yerleşiminin, kanal sayısının, soğutma sıvısı giriş sıcaklıklarının LİB'ler üzerindeki etkileri ve termal yönetim performansları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, iki kanal yapıları soğutma plakalarının yüksek debi değerlerinde yeterli soğutma performansı gösterdiği fakat düşük debi değerlerinde homojen ısı dağılımını sağlayamadığı belirlenmiştir. Dört kanal yapıları soğutma plakalarının ısı performansı iyileştirmede etkin olduğu gözlemlenmiş ancak yerel sıcaklık değişimleri de

gözlenmiştir. Üç kanal yapılı soğutma plakasında soğutma sistemi termal homojenliği önemli ölçüde artırmıştır. Böylece sıcaklık dağılımlarını azaltmış ve test edilen tüm akış hızlarında maksimum sıcaklık artışını indirmişlerdir. Soğutma sıvısı hızı 0,1 m/s olduğunda bile maksimum sıcaklığın 304 K'nin altında kalarak sistemin güvenilir çalışma potansiyeli sağlanmıştır (Keyinci vd., 2025).

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde, ısıl yönetim sistemlerinde kullanılan sıvı soğutma plakalarının sistem verimliliği açısından kritik bir öneme sahip olduğu ve bununla ilgili performans iyileştirme çalışmalarına oldukça ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, sıvı soğutma yöntemi ile soğutulan serpantin kanallı sıvı soğutma plakasının ısıl ve hidrolik performans davranışları incelenmiştir. Soğutma plakasının farklı çalışma şartları altında soğutulduğunda plaka yüzeyinde oluşan maksimum ortalama sıcaklık, basınç düşümü ve yüzey sıcaklık dağılım değerleri deneysel ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, soğutma plakasının optimum performans sağlayan parametreleri belirlenmesi amacıyla çok amaçlı optimizasyonu yapılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmanın temelinde yer alan serpantin kanallı sıvı soğutma plakasının sıvı soğutma yönteminde gösterdiği ısı ve hidrolik performans davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel analiz yöntemi, deneylerde kullanılan ekipmanlar, kullanılan malzemelerin fiziksel ve termal özellikleri, ölçüm cihazlarının teknik özellikleri ve oluşturulan deney seti açıklanmıştır. Bununla birlikte sayısal analizde soğutma sisteminin modellenmesi, HAD çözümü, kullanılan paket programı ve ilgili denklemler detaylı bir şekilde sunulmuştur. Buna ek olarak, deneysel ve sayısal olarak incelenen serpantin kanallı soğutma plakasının soğutma performans verimliliğini en ideal şekilde sağlamak için optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda soğutma plakasının optimum performans sağlayan parametreleri belirlenmiştir.

3.1. Sıvı Soğutma Deneysel Analiz Yöntemi

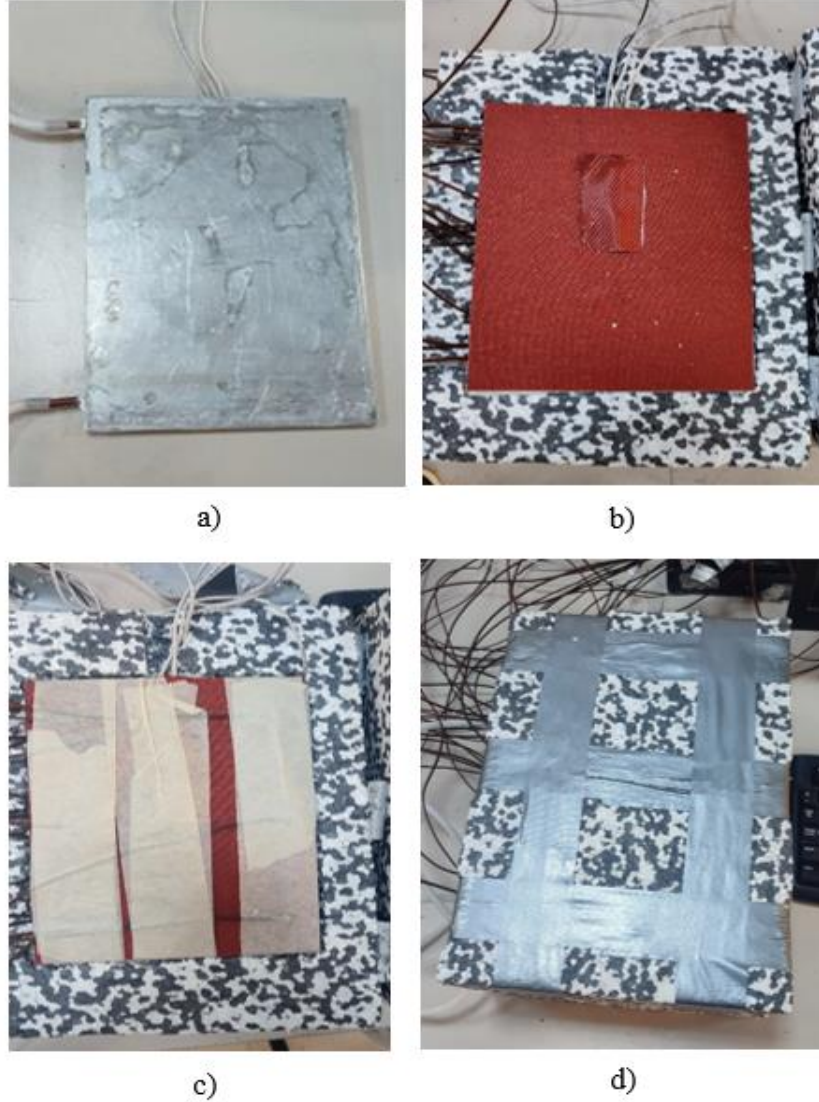
Sıvı soğutma deneysel analiz yönteminde konvansiyonel serpantinli bir soğutma plakasının belirlenen sınır şartları altında (debi, sıcaklık, ısı akısı) göstermiş olduğu plaka yüzey sıcaklık dağılımları, soğutma sıvısı sıcaklık değişimleri ve oluşan basınç kayıpları ölçülmüştür. Sıvı soğutma deneyi Tablo 3.1’de sunulan şartlar altında gerçekleştirilmiş olup, soğutma sıvısı olarak su kullanılmıştır. Yapılan deneylerde uygulanan elektriksel güç ile plaka yüzeyinde oluşan sıcaklıklar, su giriş ve çıkış sıcaklıkları on sekiz farklı noktaya yerleştirilen ısı çiftleriyle ölçülmüştür. Ayrıca, suyun debisi ve soğutma plakasında oluşan basınç düşüm değerleri de ölçülmüştür.

Tablo 3.1. Deneysel çalışma şartları

Deney No	Su debisi ($\dot{V}$) (L/dk)	Su giriş sıcaklığı (T_g) (°C)	Elektriksel güç (Q) (W)
1	0,1	10	125
2	0,1	15	125
3	0,1	20	125
4	0,1	10	100
5	0,1	15	100
6	0,1	20	100
7	0,1	10	75
8	0,1	15	75
9	0,1	20	75
10	0,5	10	125
11	0,5	15	125
12	0,5	20	125
13	0,5	10	100
14	0,5	15	100
15	0,5	20	100
16	0,5	10	75
17	0,5	15	75
18	0,5	20	75
19	0,9	10	125
20	0,9	15	125
21	0,9	20	125
22	0,9	10	100
23	0,9	15	100
24	0,9	20	100
25	0,9	10	75
26	0,9	15	75
27	0,9	20	75

Deney düzeneğinde kullanılan soğutma plakası, preslenmiş alüminyum alaşımlı olarak imal edilmiş olup, soğutma sıvısı dolaşımı için yerleşik kanallara sahiptir. Bu yerleşik serpantin yapılı kanallara bakır boru yerleştirilmiştir. Soğutma plakasında soğutma sıvısı olarak su

kullanılmıştır. Şekil 3.1-a’da deney düzeneğinde kullanılan serpantin kanallı soğutma plakası gösterilmiştir. Şekil 3.1-b’de görüldüğü gibi soğutma plakasına ısıl enerji kaynağı sağlaması için plakanın iki yüzeyine silikon ısıtıcı rezistans yerleştirilmiştir. Soğutma plakası yüzeyindeki ısıtıcı rezistansların farklı noktalarına Şekil 3.1-c’de görüleceği üzere ısıl çiftler yerleştirilmiştir.

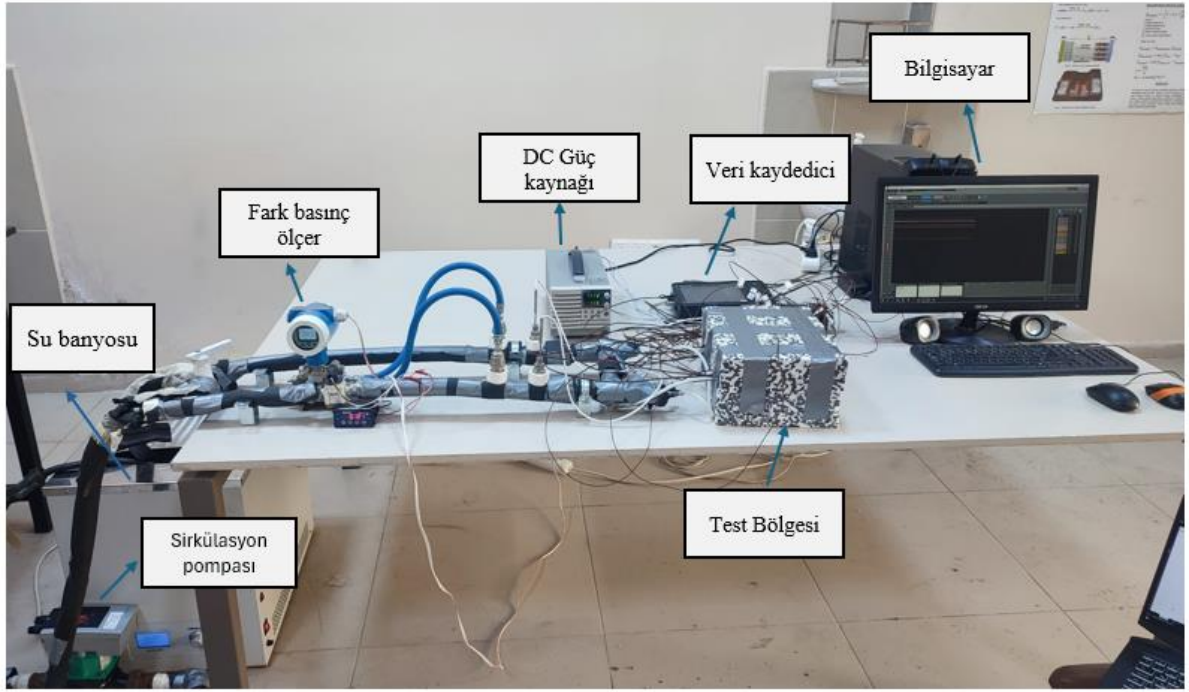


Şekil 3.1. Test bölgesinin oluşturulması a) serpantin kanal yapılı soğutma plakası b) soğutma plakasına silikon ısıtıcı rezistans uygulanması, c) ısıtıcı rezistansın farklı noktalarına ısıl çiftlerin yerleştirilmesi ve d) yalıtım köpüğü uygulaması

Isı kaynağından alınan enerjinin soğutma sıvısına direkt olarak iletilmesi için Şekil 3.1-d’de yalıtım köpüğü uygulanmış olup test bölgesi oluşturulmuştur. Böylelikle ortamdan termal izolasyon sağlanarak deneyler adyabatik kabul edilebilecek koşullarda gerçekleştirilmiştir.

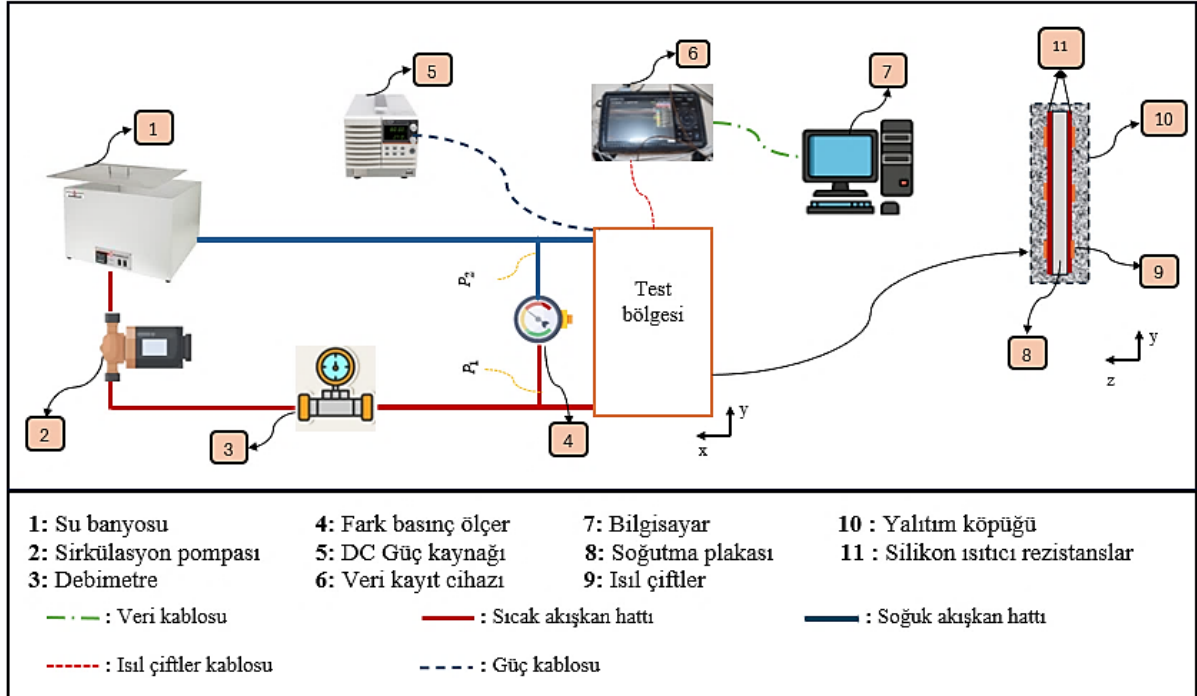
3.1.1. Sıvı soğutma deney setinin oluşturulması

Soğutma plakası kullanılarak farklı çalışma şartlarında sıvı ile soğutma deneylerinin yapılması için Şekil 3.2’de genel görünümü verilen deney seti oluşturulmuştur. Deneysel düzenekte soğutma sıvısı olarak su kullanılmıştır. Soğutma sıvısı, su banyosunda farklı giriş sıcaklıklarına ayarlanarak (10°C, 15°C ve 20°C) soğutma plakasına gönderilir. Soğutma plakasının her iki yüzeyine uygulanan silikon ısıtıcı rezistanslara güç kaynağından farklı çalışma şartlarında (75, 100 ve 125W) akım verilerek ısıtılması sağlanır. Burada ısınan rezistanslarda oluşan ısı enerjisinin tamamı soğutma plakasına ve kanallardaki soğutma sıvısına aktarılmaktadır. Soğutma plakasında ısınan su, farklı kademe ve akış hızlarında çalışabilen sirkülasyon pompasına gider. Sirkülasyon pompasında basınçlandırılarak sistemdeki akışı sirküle edilen soğutma sıvısı ise tekrar su banyosuna gider ve sistemin sürekliliği sağlanır. Deneyin düzeneğinde kullanılan suyun debisi ise sistem hattı üzerindeki debimetre cihazı ile ölçülür. Silikon ısıtıcı rezistans üzerinde farklı noktalara yerleştirilen ısı çiftleri ile soğutma plakasının yüzey sıcaklık değerleri ölçümü sağlanır. Kullanılan ısı çiftleri ile yüzeydeki maksimum plaka sıcaklık (T_{maks}) ve minimum plaka sıcaklık T_{min} değerleri belirlenerek plaka yüzeyinde oluşan maksimum sıcaklık farkı ΔT_{maks} hesaplanır. Soğutma plakasında suyun plakaya giriş ve çıkış noktalarında oluşturduğu basınç değerleri ise fark basınç ölçer cihazı ile ölçülerek soğutma plakası kanallarında oluşan basınç düşümünün (ΔP) hesaplanması sağlanır.



Şekil 3.2. Serpantin kanallı soğutma plakasının sıvı ile soğutma deney setinin görünümü

Serpantin kanallı soğutma plakasının sıvı ile soğutma performansının incelendiği deneysel düzeneğin kurulumu Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Serpantin kanallı soğutma plakasının sıvı ile soğutma deney düzeneği şematik gösterimi

Deney sisteminin çalışma aşamaları aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- i. Her deney başlangıcında çalışma şartı olan elektriksel güç değerine ayarlanan DC güç kaynağı ile silikon ısıtıcı rezistanslara akım verilmesi sağlanır.
- ii. İstenilen debi değerine ayarlanan su ise su banyosunda çalışma sıcaklığına getirilir ve sirkülasyon pompası ile debimetreden geçerek test bölgesine ulaşır.
- iii. Burada, giriş bölgesinden soğutma plakasına giren su serpantin kanal yapılarında dolaşarak plaka yüzeyinde oluşan ısıyı soğurur. Böylelikle sıcaklığı yükselmiş olarak çıkan su, tekrar su banyosuna gider ve sistemin sıcaklık değerleri belli bir noktada değişmeyene kadar bu şekilde devri daim ettirilir. Yani sistemin ısıl dengeye gelmesi beklenir.
- iv. Deney sürecinde PT 100 ve T tipi ısıl çiftler ile ölçülen suyun giriş-çıkış sıcaklıkları ile plakanın yüzey sıcaklık değerleri veri kayıt cihazına kaydedilmektedir.

3.1.2. Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar

Deney düzeneği; su banyosu, debimetre, sirkülasyon pompası, fark basınç ölçer, serpantin kanallı sıvı soğutma plakası, silikon ısıtıcı rezistans, yalıtım köpüğü, PT 100, ısıl çiftler, veri kayıt cihazı ve DC güç kaynağı elemanlarından oluşmaktadır.

3.1.2.1. Su banyosu

Su banyosu, soğutma plakasında dolaşarak ısınan suyun istenilen giriş sıcaklığına getirilmesi ve o sıcaklıkta sabit derecede tutulması için kullanılmaktadır. Şekil 3.4'te soğutma ve ısıtma sağlayan su banyosu gösterilmiştir. Tablo 3.2'de özellikleri verilen su banyosu kendi içerisinde bir sirkülasyon pompasına sahiptir. Böylece su banyosunda, soğutma sıvısı sıcaklık homojenliğinin sağlanması için sıvı sürekli devridaim ettirilmektedir.



Şekil 3.4. Soğutma ve ısıtma sağlayan su banyosu

Tablo 3.2. Su banyosuna ait özellikler

Özellik	Değer
Marka/model	Miprolab/MSS30
Çalışma sıcaklık aralığı	-10 °C - 100 °C
Güç	900 W / 220 V
Sıvı hacmi	15 Litre
Sıcaklık gösterge hassasiyeti	± 0,5 °C
Gösterge tipi	LCD

3.1.2.2. Debimetre

Soğutma plakasına giren soğutma sıvısının hacimsel debisi Şekil 3.5'te görülen debimetre cihazı ile ölçülmektedir. Deneyin düzeneğinde kullanılan türbin tip debimetre, akış yolu üzerinde kanatlara sahip olan bir rotor içermekte olup soğutma sıvısının mekanik enerjisi ile dönmektedir. Akışkanın hızına bağlı gelişen dönme hızı ile rotor üzerindeki kanatlara gelen değişen aralıklı sinyallerin işlenmesiyle akışkan debisi ölçülmektedir. Türbin tip debimetre cihaz özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.5 Tübin tip gösterge ve debimetre cihazları

Tablo 3.3. Tübin tip debimetre cihaz özellikleri

Özellik	Değer
Marka/model	Bass Instruments/DFFK.020.B
Ölçüm doğruluğu	$\pm\%1$
Ölçüm aralığı	6-200 L/saat
Basınç	20 bar
Çalışma sıcaklığı	-10 °C – 70 °C
Çıkış	Pulse 4-20 mA
Besleme	5-24 V DC
Gösterge tipi	LCD

3.1.2.3. Sirkülasyon pompası

Sirkülasyon pompası, su banyosunda istenilen giriş sıcaklığına getirilen sıvının plakaya girmeden önce istenilen debiye getirilmesi için kullanılmaktadır. Şekil 3.6’da frekans ayarlı sirkülasyon pompası gösterilmekte olup su debisi oranı ayarlanabilmektedir. Sistemde oluşan basınç kayıplarından dolayı su banyosunda bulunan sirkülasyon pompasının istenilen debi değerini sağlayamadığı için harici bir sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Sistemde kullanılan frekans ayarlı sirkülasyon pompasının teknik özellikleri Tablo 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.6. Frekans ayarlı sirkülasyon pompası

Tablo 3.4. Frekans ayarlı sirkülasyon pompasının teknik özellikleri

Özellik	Değer
Marka/model	Wilo/Yonos Maxo 25-0,5-10
Maksimum debi	9,6 m ³ /saat
Maksimum basma yüksekliği	10 metre
Maksimum çalışma basıncı	10 bar
Devir hızı	1000 - 4450 devir/dk
Maksimum güç tüketimi	5 - 190 W
Akışkan sıcaklığı	-20 / +110 °C

3.1.2.4. Fark basınç ölçer

Şekil 3.7’de gösterilen fark basınç ölçer cihazı ile soğutma plakasında akışkanın plakaya giriş ve çıkış noktalarında oluşturduğu basınç değerleri ölçülmektedir. Özellikleri Tablo 3.5’te verilen fark basınç ölçüm cihazı, ölçülen basınç düşüm değerini sahip olduğu LCD ekran ile göstermektedir. Cihaz üzerinde iki akışkan giriş noktaları bulunmakta olup soğutma plakasına giren sıvı hattı birinci akışkan girişine, plakadan çıkan sıvı hattı ise ikinci akışkan girişine

bağlıdır. Böylelikle soğutma plakasının iki nokta arasında oluşan basınç değerlerinin ölçülüp farkı alınmasıyla soğutma plakasındaki basınç kayıp değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 3.7. Fark basınç ölçer

Tablo 3.5. Fark basınç ölçer cihaz özellikleri

Özellik	Değer
Marka/model	Mesens / MSP3100
Ölçüm doğruluğu	%0,075
Ölçüm aralığı	0-16 kPa
Dayanma basıncı	137 bar
Çalışma sıcaklığı	- 40 °C – 125 °C
Besleme	10.5 - 55 V DC
Gösterge tipi	LCD

3.1.2.5. Soğutma plakası

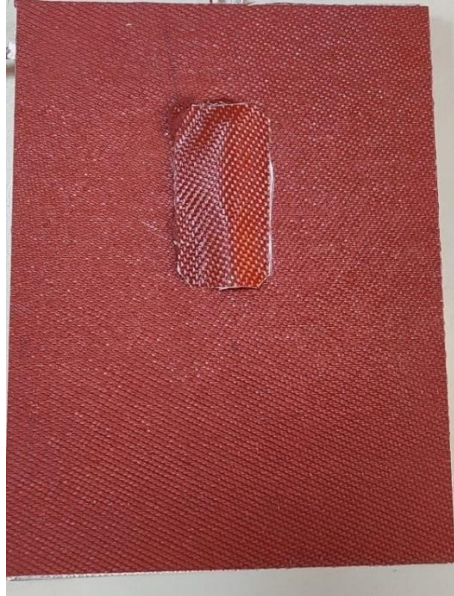
Deney düzeneğinde, iki simetrik levhanın birleşimi ile oluşan alüminyum alaşımlı soğutma plakası kullanılmıştır. Soğutma plakasının serpantin yapılı akışkan kanalları freze tezgahında açılarak üretilmiştir. Açılan bu kanallara serpantinli yapıya uygun olarak 3 mm çapında bakır boru yerleştirilmiştir. Bakır boru ile plaka arasındaki temas direncini en aza indirmek için arayüzeye termal macun uygulanmıştır. Bakır boru içerisinden soğutma plakasında dolaşımı sağlanan su sirküle edilmektedir. Giriş çıkış noktalarına sahip, 160 mm x 210 mm ölçülerinde ve 10 mm kalınlığında olan soğutma plakası Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Soğutma plakası

3.1.2.6. Silikon ısıtıcı rezistans

Şekil 3.9’da gösterilen silikon ısıtıcı rezistans, soğutma plakasına ısı transferinin sağlanması için kullanılmaktadır. Bu silikon ısıtıcı, soğutma plakası boyutlarında olup maksimum 250 – 300 W değerleri arasında ısı gücü üretebilmektedir. Soğutma plakasının iki yüzeyine de uygulandığından iki adet silikon ısıtıcı rezistans kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Silikon ısıtıcı rezistans

3.1.2.7. PT100 ve T tipi ısı çiftleri

PT100 sıcaklık sensörü, platin tel malzemeli (PT) bir direnç termometresi olup sıcaklık ölçümlerinde kullanılmaktadır. Isıl çiftler ise farklı iletken metal ucun kaynaklanması ile oluşturulan sıcaklık ölçüm sensörüdür. Deney düzeneğinde iki tip sıcaklık ölçüm sensörü kullanılarak soğutma sıvısının sıcaklığı ve plaka yüzey sıcaklıkları hassasiyetle ölçülmektedir. Soğutma sıvısının test bölgesine giriş ve çıkış sıcaklıklarının ölçümü için PT100 daldırma tipi sıcaklık sensörleri akışkan hattına bağlanmıştır. Silikon ısıtıcı rezistans yüzeyine uygulanan T tipi ısı çiftleri ile farklı noktalardaki sıcaklık değerleri ölçümü yapılmaktadır. PT100 sensörleri sıcaklığa göre değişken direnç üretirken ısı çiftleri sıcaklığa göre farklı gerilim değeri üretmektedirler (Kalkan, 2021). Sistemde kullanılan T tipi ısı çiftleri ± 1 °C ölçüm hassasiyetle ölçüm yaparken, PT100 sensörleri ise $\pm 0,1$ °C ölçüm hassasiyetine sahiptir. Sıcaklık ölçüm sensörlerinin kalibrasyonları veri kayıt cihazına bağlandıktan sonra yapılmıştır.

3.1.2.8. Veri kayıt cihazı

Veri kayıt cihazı, deneyde ölçülen sıcaklık değerlerini belirli zaman aralıklarıyla otomatik olarak kaydederek hassas veri toplanmasını sağlamaktadır. Deney düzeneğinde, silikon ısıtıcı rezistans üzerine yerleştirilen T tipi ısı çiftlerinden gelen sinyalleri toplayarak sayısal verilere dönüştürmektedir. Soğutma plakasının her iki yüzeyinde olan rezistanslara toplamda on sekiz adet ısı çifti yerleştirilerek farklı noktalardaki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Ayrıca suyun test bölgesine giriş çıkış noktalarındaki PT100 sensörleri ile oluşan sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 3.10'da gösterilen veri kayıt cihazı ile kaydedilmektedir. Cihazın bilgisayar yazılımı vasıtası ile anlık görüntüleme yapılarak ölçülen sıcaklık değerleri grafiksel olarak izlenebilmektedir. Burada ölçülen değerler ile T_{min} ve T_{maks} sıcaklıkları belirlenerek ΔT_{maks} değeri hesaplanır. Sistemde kullanılan veri kayıt cihazının teknik özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Veri kayıt cihazı

Tablo 3.6. Veri kayıt cihazının teknik özellikleri

Özellik	Değer
Marka/model	Graphtec/midi Logger GL840
Kanal sayısı	20 adet analog giriş
Çalışma Sıcaklığı	-20 °C - +60 °C
Doğruluk	±%0,1
Çözünürlük	16 bit
Voltaj giriş aralığı	20 mV – 100V
Ara bellek	4 GB / 2 MB dahili
Gösterge tipi	7 inç LCD renkli ekran

3.1.2.9. Güç kaynağı

Deney setinde farklı çalışma şartlarını gerçekleştirmek için Şekil 3.11’de gösterilen doğru akım (DC) güç kaynağı kullanılmıştır. Her deney başlangıcında istenen çalışma şartı için (75 W, 100 W ve 125 W) uygun güç değeri ayarlanarak sisteme doğru akım verilmesi sağlanmaktadır. Rezistans üzerinden soğutma plakası ve soğutma sıvısına elektriksel güç aktarılarak soğutma plakası yüzeyinde sıcaklık homojenliği elde edilmektedir. Deneysel analizin kontrollü bir şekilde yürütülebilmesinde kullanılan DC güç kaynağının teknik özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.11. DC güç kaynağı

Tablo 3.7. DC güç kaynağının teknik özellikleri

Özellik	Değer
Marka/model	GW INSTEK/PSW 80-27
Voltaj aralığı	0 -80 V, 27 A
Güç	720 W
Gösterge tipi	LCD
Doğruluk	$\pm 0,1\%$

3.2. Sıvı Soğutma Sayısal Analiz Yöntemi

Sıvı soğutma sayısal analiz yönteminde, ANSYS – Fluent 2022R1 paket programı kullanılarak soğutma plakasının sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, ısıl yönetim sistemlerinde kullanılan soğutma plakası HAD programında modellenerek belirli sınır şartları altındaki ısı performans karakteristikleri incelenmiştir. Öncelikle farklı geometrik modeller oluşturulmuştur. Daha sonra bu geometrik modelin ağ yapıları oluşturularak ağdan bağımsızlık analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında ise modelin kurulum aşaması tamamlanıp çözümler belirlenen sınır şartları altında yapılmıştır.

3.2.1. Soğutma plakasının modellenmesi ve HAD çözümü

HAD, hareketli akışkanlarda kütle, momentum ve enerjinin taşınmasını düzenleyen diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü ile ilgilidir. Bu teknik ile sıvı akışı, basınç kayıpları, ısı ve kütle

transferi, kimyasal reaksiyonlar ve bunlarla ilişkili sonuçlar elde edilebilmekte ve çözüm yönteminde sonlu hacimler metodu kullanılmaktadır (Bulut 2022; Güler Aslanbay ve İmamoğlu, 2020).

ANSYS – Fluent programında öncelikle sonlu hacim metodu ile hesaplama yapılacak sistem kontrol hacimlerine bölünerek kütle, momentum, enerji vb. genel korunum denklemleri hesaplanır (Fallahrafti vd., 2024; Li vd., 2024b; Zhong vd., 2025). Akışkanlar mekaniğinde süreklilik ve Navier – Stokes denklemleri akış modelinin çözümünde kullanılarak sayısal olarak hesaplanmaktadır. Sıkıştırılmaz akışkanın herhangi bir noktadaki süreklilik (kütle korunumu) ifadesi sürekli sistemler için Eş. 3.1’den hesaplanmaktadır.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

Burada; ∇ , del operatörü, ρ , akışkanın yoğunluğu (kg/m^3) ve $\vec{V}$, hız vektörü (m/s)’dir.

Newtonyen tip özellikli akışkanın Navier – Stokes (momentum korunumu) ifadesi sürekli sistemler için Eş. 3.2’de verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \nabla \tau + \rho \vec{g} \quad (3.2)$$

Burada; ρ , akışkanın yoğunluğu (kg/m^3), P , basınç (Pa), τ , viskoz gerilme (Pa) ve $\vec{g}$ ise yer çekimi ivmesi (m/s^2)’dir.

Akışkanda meydana gelen ısı transferi veya sıcaklık değişim değerleri ise Eş. 3.3’te verilen enerji korunumu denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$\nabla(\rho \vec{V} h) = \nabla(k \nabla T) + \phi + S \quad (3.3)$$

Burada; ρ , akışkan yoğunluğu (kg/m^3), h , özgül entalpi (kJ/kg), T , sıcaklık (K), k , ısı iletim katsayısı (W/m.K), ve S ise hacimsel ısı üretimi (W/m^3)’dir.

HAD analizinde standart $k - \varepsilon$ türbülans akış modeli kullanılmıştır. Bu modele ait temel denklemler Eş. 3.4, Eş. 3.5, Eş. 3.6 ve Eş. 3.7’de verilmiştir.

$$\nabla(\rho \vec{V} k) = \nabla \left[\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.4)$$

$$\nabla(\rho \vec{V} \varepsilon) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.7)$$

Burada; boyutsuz model sabitleri $C_\mu=0,09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$ 'dir. G_k , türbülans üretim terimi, μ , moleküler dinamik viskozite, μ_t , türbülans viskozitesi, k ve ε türbülans kinetik enerjisi olmaktadır.

HAD programında modellenecek olan geometrinin giriş parametre değerleri ile soğutma plakası üzerindeki maksimum sıcaklık farkının düşürülmesi için analizler yapılacaktır. Paket programında ilgili nümerik denklemlerin çözümü için uygun ağ yapısı oluşturulacak, ağ bağımsızlık analizi yapıldıktan sonra gerekli sınır şartları tanımlanarak çözücü çalıştırılıp istenilen parametreler (sıcaklık, basınç, hız, vb.) elde edilecektir. HAD programı kullanımı zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır.

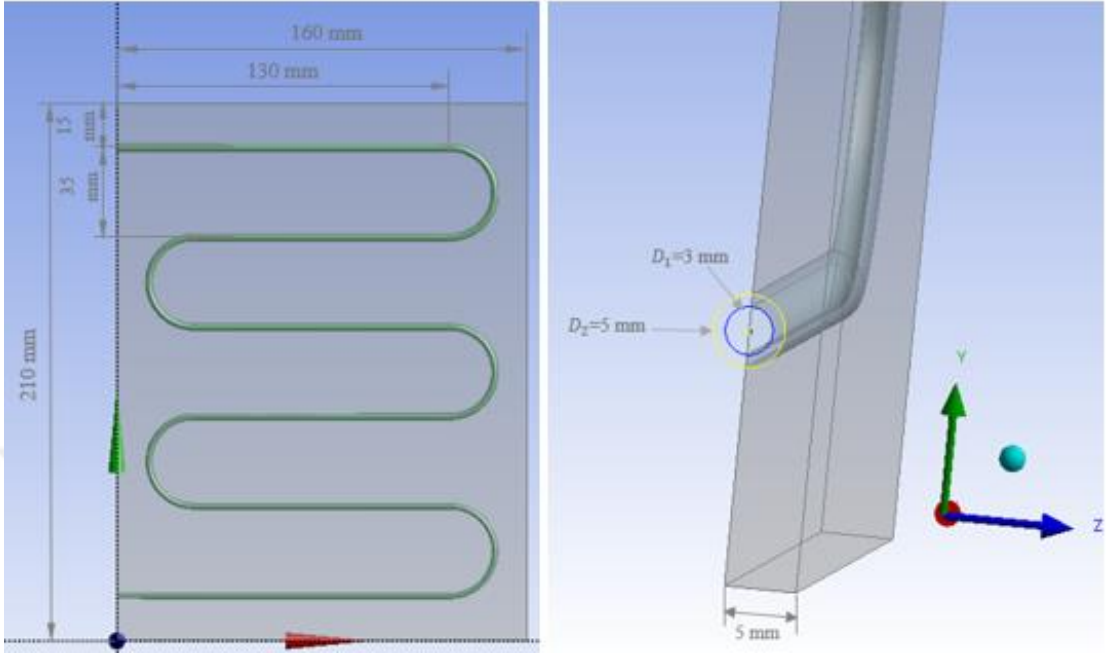
HAD analizinde işlem adımları (Güler Aslanbay ve İmamoğlu, 2020; Tokgöz ve Süfer, 2023):

- i. Problemin tanımlanması yapılarak amaç belirlenir.
- ii. Problemin geometrisi modellenir. Geometriye uygun olan çözüm ağ yapısı tipi (dörtgen, altıgen, prizma, vs.) seçilerek sistemin çözüm ağ yapısı oluşturulur.
- iii. Sınır şartları ve fiziksel özellikleri belirlenir.
- iv. Girilen parametreler ile problemin çözümü yapılır.
- v. Analiz sonuçları değerlendirilerek çözüm tamamlanır.

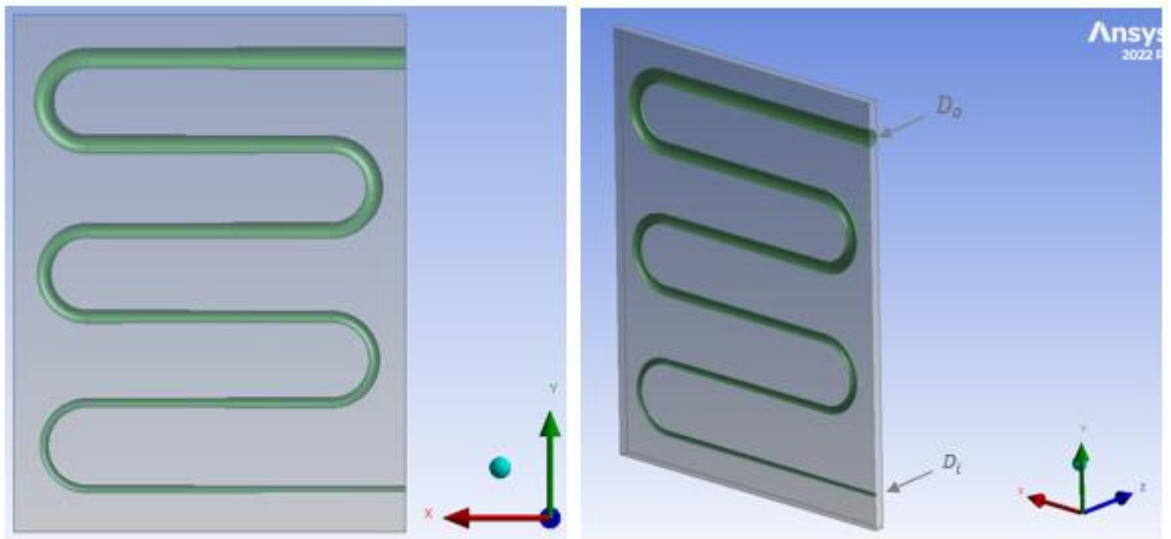
3.2.1.1. Geometri modelleme

Serpantin kanallı sıvı soğutma plakasının ısı ve hidrolik performans parametrelerinin (T_{ort} , T_{maks} , ΔT_{maks} ve ΔP) sayısal olarak hesaplanması için HAD yöntemi kullanılmış ve üç boyutlu model oluşturulmuştur. Sıvı ile soğutma sayısal yönteminde, HAD programında analizi yapılacak olan soğutma plakasının model ve ölçüleri Şekil 3.12'de gösterildiği gibidir. Plaka geometrisi, ANSYS Design Modeler programı kullanılarak 160x210x5 mm boyutlarında simetrik olarak modellenmiştir. Soğutma plakası, 5 mm çapında yerleşik serpantin kanala

sahiptir. Yerleşik kanal içerisinde 3 mm iç çapa sahip bakır boru mevcut olan bu model ile deneysel sistemin doğrulama çalışması yapılmıştır. Analizlerin çözüm süreci ve hesaplama maliyeti tasarrufu amacıyla plaka simetrik olarak modellenmiştir.



Şekil 3.12. HAD programında oluşturulan bakır borulu soğutma plakasının geometrik model ve ölçüleri

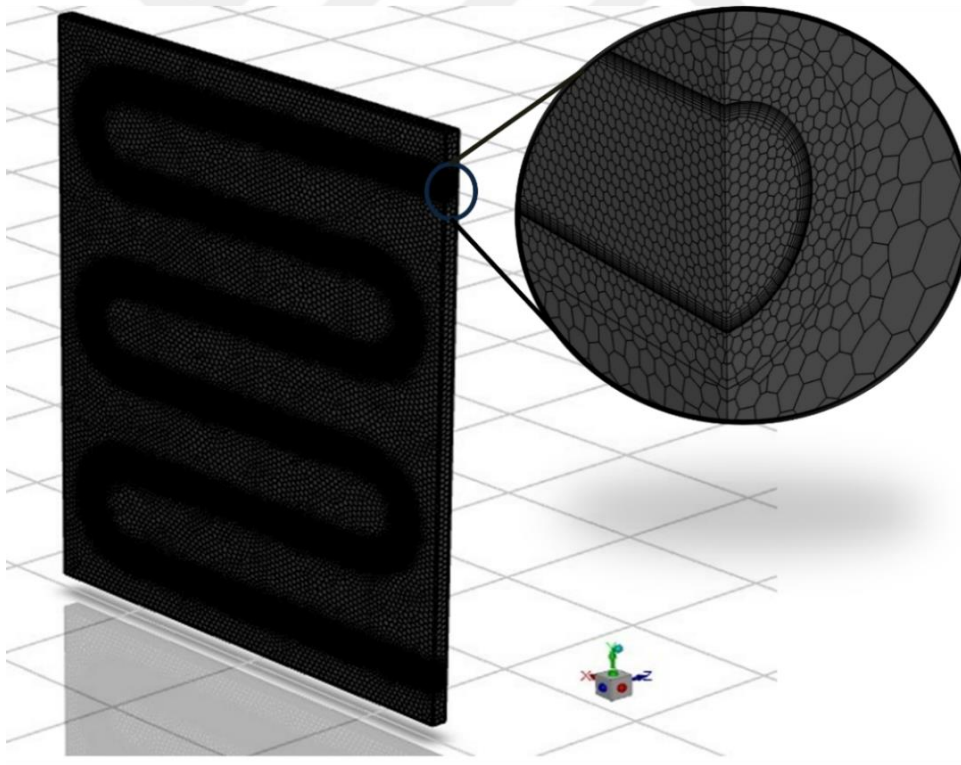


Şekil 3.13. HAD programında oluşturulan akış kanallı soğutma plakasının kanal genişleme oranı gösterimi

HAD programında yapılan deneysel sistemin doğrulama çalışmasından sonra yapılan sayısal analizlerde bakır boru modele dahil edilmemiştir. HAD programında, serpantin kanal yapısında akış alanı bulunan soğutma plakası Şekil 3.13'te gösterildiği modellenmiştir. Soğutma plakası kanal giriş çapı (D_i) ve kanal çıkış çapı (D_o) olarak modellenmiştir. Belirli hacimsel debi ($\dot{V}=0,1-0,9$ L/dk), soğutma sıvısı giriş sıcaklığı ($T_g=10-30$ °C), akışkan türü, kanal giriş çapı ($D_i=2-4,5$ mm), kanal genişleme oranı ($\theta= D_o/D_i=1,5-4,5$) ve plaka malzeme türlerinin etkileri sayısal olarak incelenmiştir.

3.2.1.2. Soğutma plakası ağ yapısı

Tasarlanan üç boyutlu geometri üzerinde ağ yapısı oluşturularak HAD programında analizler gerçekleştirilmiştir. Parçaların geometrik yapısı ve boyutlarına bağlı olarak değişkenlik gösteren ağ eleman sayısı; işlemin çözüm süresini, hızını ve sonuçları etkileyebilmektedir. Burada geometri yapısı optimum sayıdaki elemanlara bölünerek çözümün ideal sonuçlar vermesi amaçlanmaktadır.



Şekil 3.14. Soğutma plakası ve akışkan kanalının ağ yapısı görünümü

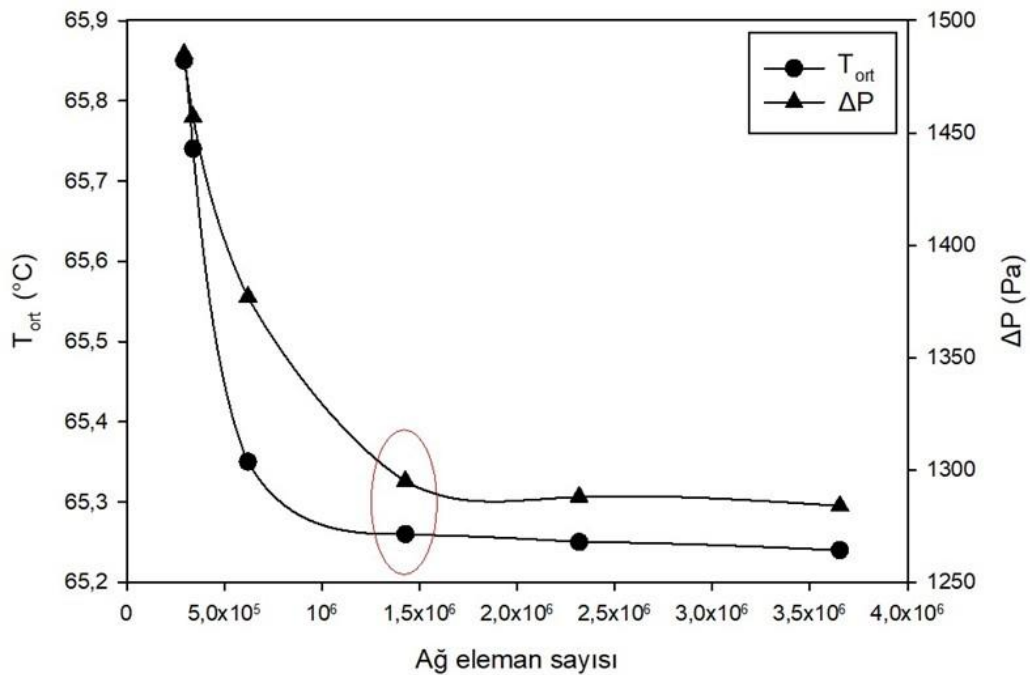
Ansys Fluent Meshing arayüzünde geometri üzerine ağ yapısı tanımlanmıştır. Serpantin kanallı sıvı soğutma plakasının ve akışkan kanalının sonlu hacim yöntemiyle sayısal çözümlerin

gerçekleştirilmesi için detaylı ağ yapısı Şekil 3.14’te gösterilmiştir. Sıvı – katı alan arayüzünde soğutma sıvısının hız ve sıcaklık sınır tabakası çözümlerinin daha gerçekçi sonuçlar vermesi amacıyla burada daha yoğun ağ yapısı uygulanmıştır.

Soğutma plakası, ağ kalitesinin ortalama seviye üzerinde olduğunu gösteren minimum ortogonal kalite 0,42 değerine sahiptir. HAD analizlerinde minimum ortogonal kalitenin genellikle 0.1 değerinden yüksek olması beklenir (Dilbaz, 2023).

3.2.1.3. Ağ bağımsızlık analizi

HAD programında sonuçların doğruluğu, modellenen geometri üzerinde oluşturulan ağ yapısı ile etkilenmektedir. Oluşturulan ağ yapısının sayısı ve kalitesi sonuç farklılıklarına ve artan hesaplama maliyetine sebep olur. Bu durumun önüne geçmek için soğutma plakasının farklı sayılardaki ağ yapılarının sayısal olarak çözümlenmesi ile optimum sayıda ağ yapısı oluşturulur. Bu çözümlerle ağ sayılarına göre elde edilen ortalama sıcaklık (T_{ort}) ve basınç kaybı (ΔP) değerleri kıyaslanarak ağ bağımsızlık analizi yapılmıştır. Ağ sayılarına göre değişim gösteren soğutma plakasının ağ bağımsızlık analiz grafiği Şekil 3.15’te verilmiştir.

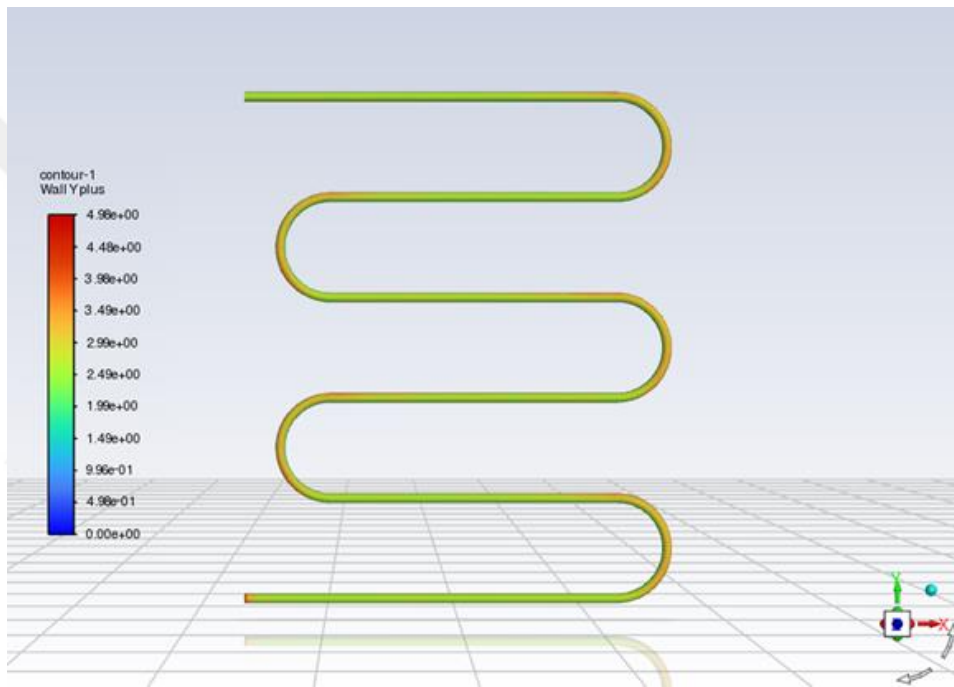


Şekil 3.15. Soğutma plakasının ağ bağımsızlık analizi

Grafiğe göre, soğutma plakasının artan ağ sayısına rağmen belirli bir noktadan sonra çözüm sonuçlarında önemli bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. Sıvı kanallı soğutma plakası için maksimum sapma oranları dikkate alınarak yaklaşık 1,5 milyon eleman sayısına sahip ağ yapısı tercih

edilmiştir. Böylece işlem süresinin azaltılması ve çözüm doğruluğunun artırılması amaçlanmıştır. Ağ bağımsızlık analizinin doğrulama çalışması, 125 W, 0,1 L/dk ve 20 °C şartlarında yapılan çözümler baz alınarak yapılmıştır.

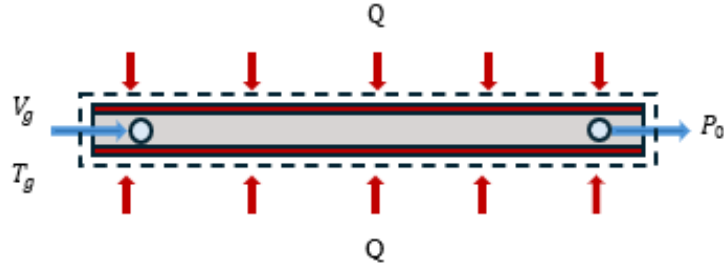
Kanal yapısı içerisinde bulunan akışkanın yüzeyle temas ettiği bölgede sınır tabakası gelişir. Gelişen bu sınır tabakası akış durumunu etkilediği için ağ yapısının en ideal şekilde çözümlenmesi önemlidir. Böylece cidara yakın bölgelerde yoğun ağ yapısı kullanılmış ve inflation tabakası eklenerek sınır tabaka alanı çözümlenmiştir. Seçilen türbülans modeli ve sınır tabaka çözümü yapılarak soğutma plakası kanal yapısında gelişen y^+ değerinin konturu Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Doğrulama çalışması yapılan serpantin kanal yapılı soğutma plakasında y^+ değeri

3.2.1.4. Başlangıç ve sınır şartları

Sayısal analiz için soğutma plakasına HAD programında uygulanan sınır şartlarının Şekil 3.17’de şematik olarak gösterimi verilmiştir. Yalıtılan bölge ile dış ortam sınırlarından ısı transferi olmadan ısıtıcı rezistanslardan soğutma plakasına gelen ısı, Q doğrudan soğutma sıvısına aktarılmaktadır.



Şekil 3.17. HAD programında modellenen soğutma plakasının sınır şartlarının şematik gösterimi

Soğutma sıvısı olarak sıkıştırılamaz akışkan olan su ve EG karışımı seçilmiştir. Soğutma plakası malzemelerinin termofiziksel özellikleri Tablo 3.8’de paylaşılmıştır. Akışkanın soğutma plakasına giriş hızı, V_g (m/s) ve giriş sıcaklığı T_g (°C) olarak tanımlanmıştır. Akışkanın soğutma plakasından çıkış basıncı ise P_0 olarak tanımlanmıştır. Modellenen soğutma plakası yüzeyine homojen olacak şekilde Q değerinde ısı akısı uygulanmıştır.

Tablo 3.8. Soğutma plakası malzemelerinin termofiziksel özellikleri (Thermtest instruments, 2005)

Malzeme (20 °C)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg.K)	k (W/m.K)	μ (kg/m.s)
Alüminyum	2698	921	225.94	-
Bakır	8940	385	397.48	-
Zirkonyum	6500	285	31.38	-
Grafit	2250	707	167.36	-

Sayısal analizlerde, su soğutma sıvısına ek olarak yüksek donma noktası değerine sahip etilen-glikol akışkanı kullanılmıştır. Sistemde kullanılan su ve EG akışkanlarının farklı karışım oranlarında sahip olduğu donma noktası değerleri ve termofiziksel özellikleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9. Soğutma sıvısı karışım oranlarına göre termofiziksel özellikler (Corechem Essential Chemistry, 1981)

Su oranı (%)	EG oranı (%)	Donma noktası (%)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg.K)	k (W/m.k)
100	0	0	997.05	4181	0.603
80	20	-7.8	1030	3850	0.48
60	40	-22.3	1060	3550	0.42
40	60	-48.3	1085	3250	0.37

Akış türü, boyutsuz parametre olan Reynolds sayısının Eş. 3.8'den hesaplanmasıyla belirlenmektedir (Chen vd., 2024b). Modellenen soğutma plakasındaki farklı çalışma şartları için akış türbülanslı olduğundan ($Re > 4000$), Standart $k - \epsilon$ türbülans akış modeli çalışma şartı olarak seçilmiştir.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.8)$$

Burada; ρ , akışkanın yoğunluğu (kg/m³), V , akışkan ortalama hızı (m/s), D , boru çapı (m) ve μ , dinamik viskozite (kg/m.s)'dir.

Farklı debilerdeki akışkanların hız değerleri ise Eş. 3.9'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$V_g = \frac{\dot{V}}{A_c} \quad (3.9)$$

Burada; $\dot{V}$, hacimsel debi (m³/s) ve A_c , akış kesit alanı (m²)'dir.

Kesit alanı ise Eş. 3.10'dan hesaplanmıştır.

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.10)$$

3.3. Optimizasyon

Bu bölümde, deneysel ve sayısal performans analizleri yapılan soğutma plakası optimize edilerek en uygun verimliliği sağlayan performans parametreleri belirlenecektir. Optimizasyon işlemi, prosesin belirlenen hedefler (yanıtlar) doğrultusunda, bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri ve bu bağımsız değişkenlerin hedefe (yanıta) olan etkileri de göz

önünde bulundurularak bir araya getirilip uygulanması işlemidir (Şen, 2017). Optimizasyon, sistem sürecinde belirlenen bir fonksiyonun minimum ya da maksimum olması için uygulanmaktadır. Sistem performansının artırılması ve elde edilen sonuçların doğrulama çalışması Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak elde edilmiştir. Yanıt yüzey yöntemi, proseslerin geliştirilmesi ve optimizasyonu için gerekli bir takım istatistiksel ve matematiksel tekniklerin bir arada kullanıldığı bir yöntemdir (Koç ve Kaymak Ertekin, 2009; Eren, 2004). Sisteme uygulanacak olan YYY için ilk olarak eleme denemeleri yani sistemi karakterize eden faktör veya değişkenlerin belirlenmesi aşaması uygulanmaktadır. Daha sonra belirlenen bu bağımsız değişkenlerin sistemin yanıtında oluşturdukları değerlerin, optimum noktaya yakın sonuçlar verip vermediğini belirleme alanı olan bölge araştırmasının oluşturulduğu aşamaya geçilmektedir. Son olarak işlem optimizasyonu aşamasında ise optimum noktaya yaklaşıldığında optimum nokta etrafında oluşan gerçek yanıt yüzeyinin eğriliği daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Bu eğriliğin tahminlenmesinde lineer olmayan modeller, genellikle ikinci dereceden polinomial modeller, üssel modeller veya eksponensiyel modeller kullanılır (Koç ve Kaymak-Ertekin, 2009). Gerçek yanıt yüzeyinde gelişen eğriliğin tahmininde ikinci dereceden polinomial denklemler birçok çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da kullanılmıştır. İkinci dereceden YYY metodu ile değişkenler arasında birçok ilişki tanımlanmaktadır. Yanıt yüzeyinin tahminlenmesinde en küçük kareler yöntemi kullanılarak tasarım değişkenlerine karşılık gelen yanıt değerleri Eş. 3.11 ve Eş. 3.12’de verilen denklemlerle belirlenmektedir.

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (3.11)$$

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} x_i x_j + E$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3.12)$$

Burada y_i , gerçek yanıt fonksiyonunun beklenen değerini, Y_i , yaklaşım fonksiyonunu, m , bağımsız tasarım değişken sayısını, x_i , ilgili tasarım değişkeninin ölçekli değeri, E , deneysel hata terimini, β , ise tahminlenecek model katsayılarını ifade etmektedir.

Yanıt yüzey yöntemin doğruluğu, uygun yaklaşım fonksiyon seçimine ve tasarım alanı içinde seçilen tasarım noktalarına yani deney tasarım yapısının belirlenmesi olarak iki temel faktöre bağlıdır. Yanıt yüzey yönteminde, elde edilen deney verileriyle bağımlı değişkenler (yanıt) ve bağımsız değişkenler (faktörler) arasında ilişki sağlanarak gerçeğe en yakın regresyon model oluşturulan deney tasarım (DT) alanı belirlenir. Burada oluşturulan regresyon modellerin

deneyisel verileri ne ölçüde karşıladığı ve denklemlerin birbiri ile uyumluluğu Varyans Analizi (ANOVA) ile belirlenmektedir. ANOVA, deney tasarım yapılarını oluşturan bağımsız değişkenler arasında oluşan anlamlı etkileşimin istatistiksel olarak belirlenmesini sağlamaktadır.

Optimizasyon sürecinden önce bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirilerek her bir faktörün yanıt üzerindeki etkisi nicel biçimde ifade edilir. Bu ifadeler F istatistiği, regresyon kat sayısı (R^2), düzeltilmiş $R^2(R_{adj}^2)$, tahmini $R^2(R_{pred}^2)$ değerleri sırasıyla Eş. 3.13, Eş. 3.14, Eş. 3.15 ve Eş.3.16'da verilmiştir.

$$F = \frac{(SST-SSE)/p}{SSE/(n-p-1)} \quad (3.13)$$

$$R^2 = 1 - SSE/SST \quad (3.14)$$

$$R_{düzeltilmiş}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1} \quad (3.15)$$

$$R_{tahmini}^2 = (1 - \sum_{i=1}^n e - i^2) / SS_{tot} \quad (3.16)$$

Burada, SSE, hata kareler toplamını, SST toplam kareler toplamını, p ise yanıt yüzey modelinde sabit olmayan terimlerin sayısını, σ , yanıtta toplam varyasyonu ifade etmektedir.

Sistemin performans parametrelerinin (T_{maks} , T_{ort} , ΔT_{maks} ve ΔP) ikinci dereceden yanıt denklemlerinin elde edilmesinden sonra bu yanıt değerlerinin minimuma ulaşılması istenir. Bu işlem ise İstenebilirlik Fonksiyon Yaklaşımı (Composite Desirability Function) ile sağlanmaktadır. İstenebilirlik fonksiyon yaklaşımı, tüm yanıtların bir araya getirilerek istenilen sonuçları verecek şekilde bağımlı değişkenlerin aynı anda optimize edilmesidir. Böylece her yanıt fonksiyonu bağımsız değişkenlerin 0 ile 1 arasında değişen boyutsuz fonksiyonlara dönüştürülür. İstenebilirlik Fonksiyonu (d_i) olarak adlandırılan bu fonksiyonlar her bir yanıt (y_i) için ayrı ayrı hesaplanarak bireysel fonksiyonları oluşturur. Oluşan bu bireysel fonksiyonların geometrik ortalaması alınarak tüm yanıtların bir arada olduğu İstenebilirlik fonksiyonu (D) Eş. 3.20 denkleminde elde edilir. Her bir yanıtın minimum, maksimum, belirli bir aralıkta olması veya hedef değer atanması gibi durumlara göre farklı istenebilirlik fonksiyonları kullanılmaktadır.

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^w & L_i \leq y_i \leq T_i \\ 1 & y_i > T_i \end{cases} \quad (3.17)$$

$$d_i = \begin{cases} 1 & y_i < L_i \\ \left(\frac{T_i - y_i}{T_i - L_i}\right)^w & L_i \leq y_i \leq T_i \\ 0 & y_i > T_i \end{cases} \quad (3.18)$$

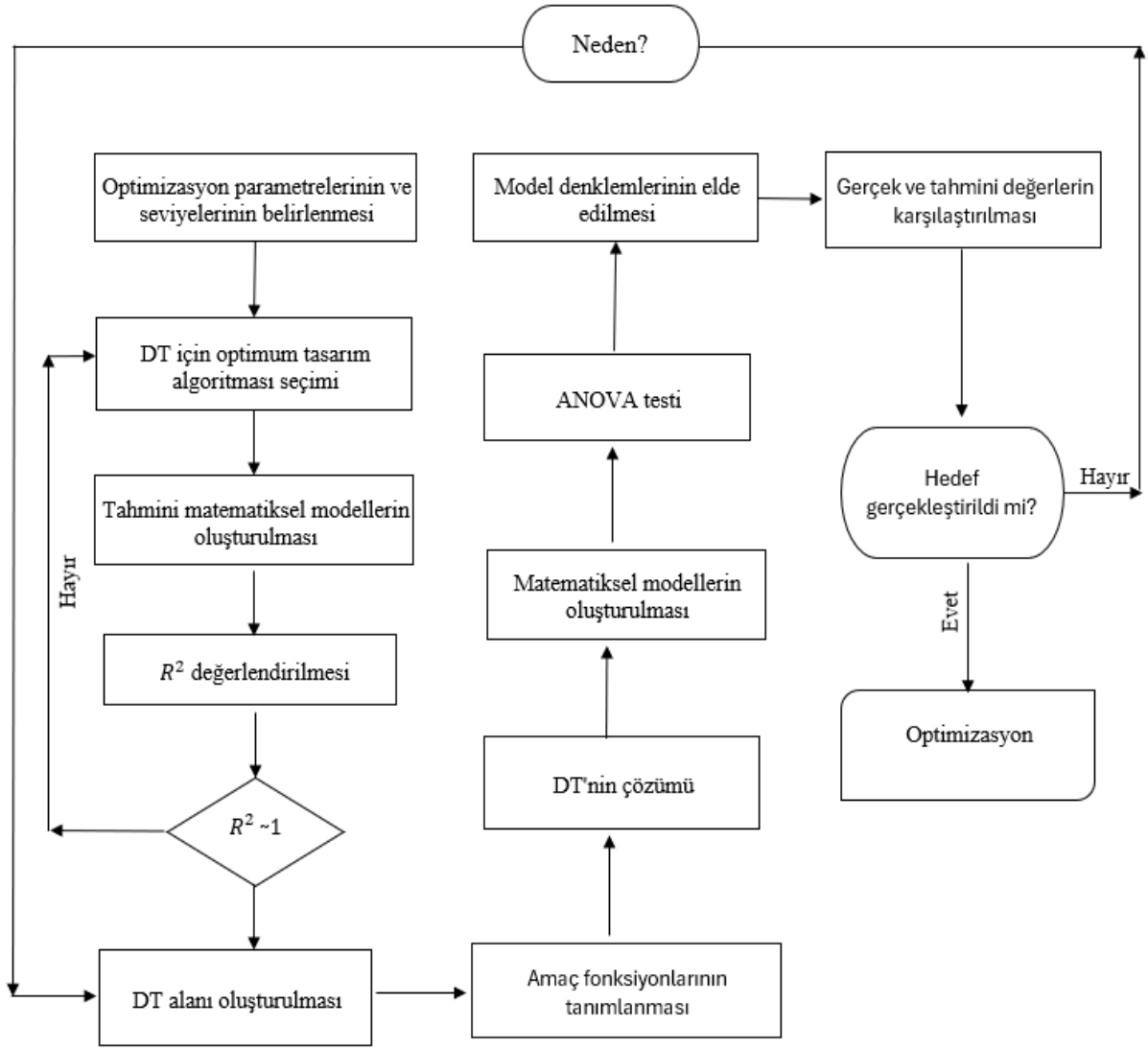
$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^w & L_i \leq y_i \leq T_i \\ \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - L_i}\right)^w & T_i \leq y_i \leq U_i \\ 0 & y_i > U_i \end{cases} \quad (3.19)$$

$$D = \prod_{i=1}^n d_i^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad (3.20)$$

Burada; T_i , hedef değeri, L_i ve U_i sırasıyla alt ve üst sınırlar olarak tanımlanmaktadır. w_i ise ağırlık katsayılarına ilave olarak her bir i numaralı yanıtın d_i fonksiyonlarının optimizasyondaki önemliliğini belirten dereceyi ifade etmektedir.

T_i hedef değerinin maksimum olması için y_i değeri Eş. 3.17'den hesaplanmalıdır. T_i hedef değerinin minimum olması için y_i değeri, Eş. 3.18'den hesap edilmelidir. Buna ek olarak T_i hedef değerinin L_i ve U_i sınır değerleri aralığında olması için Eş. 3.19 denklemi çözümlenmelidir.

Belirlenen optimizasyon parametreleri ile oluşturulan deney tasarım alanı için yöntem belirlenerek uygulanan model denklemlerinin doğruluk değerleri tahmin edilir. Bu çalışma için I - Optimal Design (I - Optimum Deney Tasarımı) yaklaşımı seçilerek deney tasarım alanındaki her bir bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında yapılan çözüm sonuçlarının tahmin doğrulukları belirlenmektedir. Optimizasyon işlemlerine ait akış şeması Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Optimizasyon akış şeması

4. BULGULAR

Bu bölümde, deneysel ortamda farklı sınır şartlarında soğutulan soğutma plakasının doğrulama çalışması HAD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte soğutma yönteminde ısı ve hidrolik davranışları etkileyen ve optimum performans sağlayan parametrelerin belirlenmesi amacıyla soğutma plakasının optimizasyonu yapılmıştır.

4.1. Deneysel Sonuçlar ile Sayısal Modelin Doğrulanması

Sayısal çözümlerden elde edilen bulguların doğruluğunu test etmek ve güvenilirliğini artırmak amacıyla bu bulguların deneysel verilerle kıyaslanması yapılmaktadır. Sayısal analiz yönteminin deneysel analiz yöntemi ile ana eğilimlerinin ve davranışlarının doğru bir şekilde yakalaması önemlidir.

Yapılan kontrollü deneylerde konvansiyonel serpantin kanallı sıvı soğutma plakasının soğutma performansı analiz edilmiştir. Deneyler, sıcaklık, debi ve ısı akısı bağımsız değişken parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. Burada soğutma sıvısı olarak kullanılan suyun giriş sıcaklıkları, 10 °C, 15 °C ve 20 °C olarak üç farklı değerde ele alınmıştır. Suyun hacimsel debisi ise 0,1 L/dk, 0,5 L/dk ve 0,9 L/dk değerlerinde sabit tutulmuştur. Bir diğer parametre ise ısıtıcı rezistanslara uygulanan elektriksel güç, 75 W, 100 W ve 125 W değerlerinde sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Deneylerde soğutma plakasının sıvı ile soğutma performansı parametrelerinin farklı değerlerde sabit tutulmasıyla toplamda yirmi yedi farklı durum için analiz edilmiştir. Silikon ısıtıcı rezistansların iki yüzeyindeki toplam on sekiz farklı noktaya uygulanan ısı çiftleri ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu sıcaklık değerlerinin ortalaması alınarak plaka yüzeyinde oluşan ortalama sıcaklık değeri elde edilmiştir.

Çalışmada HAD kullanılarak yapılan sayısal analizler, elde edilen deneysel verilerle doğrulanmıştır. Burada soğutma plakası modellenerek belirli sınır şartları altında soğutulmasıyla gelişen basınç düşüm ve sıcaklık değerleri analiz edilmiştir. Deneylerde ele alınan parametreler ile yirmi yedi farklı durum için soğutma performansları sayısal olarak incelenmiş ve doğrulama çalışması yapılmıştır. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen basınç düşüm ve sıcaklık değerleri ile bu değerlerin hata oranları Tablo 4.1’de sunulmuştur. Yapılan sayısal analizler ile deney sonuçları karşılaştırıldığında hata oranlarının kabul edilebilir aralıkta olduğu sonucuna varılmaktadır. Tablodaki deney sayıları ile verilen kodlamalar hacimsel debi,

soğutma sıvısı giriş sıcaklığı ve ısı akısını temsil etmektedir. Örneğin V0,1T10Q125 kodlaması V=0,1 L/dk hacimsel debi, T=10 °C su giriş sıcaklığı ve Q=125 W ısı gücü temsil etmektedir.

Tablo 4.1. Deneysel sonuçların sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılması

Deneyler	ΔP (Pa) deneysel	ΔP (Pa) sayısal	Hata oranı (%)	T_{ort} (°C) deneysel	T_{ort} (°C) sayısal	Hata oranı (%)
V0,1T10Q125	1390	1288,8	7,28	59,95	55,43	7,53
V0,1T15Q125	1368	1288,7	5,79	62,89	60,42	3,92
V0,1T20Q125	1302	1288,7	1,02	66,21	65,43	1,17
V0,1T10Q100	1445	1288,7	10,81	50,84	46,61	8,32
V0,1T15Q100	1397	1288,7	7,75	54,8	51,31	6,36
V0,1T20Q100	1336	1288,7	3,54	58,06	56,31	3,01
V0,1T10Q75	1512	1288,7	14,76	36,11	37,49	3,82
V0,1T15Q75	1466	1288,7	12,09	41,23	42,18	2,30
V0,1T20Q75	1393	1288,7	7,48	47,02	47,2	0,38
V0,5T10Q125	16223	14807	8,72	47,22	46,92	0,63
V0,5T15Q125	16102	14807	8,04	52,14	51,92	0,42
V0,5T20Q125	16003	14807	7,47	57,4	56,76	1,11
V0,5T10Q100	16548	14807	10,52	42,47	39,55	6,87
V0,5T15Q100	16487	14807	10,18	46,32	44,55	3,82
V0,5T20Q100	16350	14807	9,43	51,1	49,43	3,26
V0,5T10Q75	17104	14807	13,42	34,25	32,18	6,04
V0,5T15Q75	16995	14807	12,87	38,98	37,18	4,61
V0,5T20Q75	16856	14807	12,15	44,25	42,13	4,79
V0,9T10Q125	37228	35473	4,71	45,12	46	1,95
V0,9T15Q125	37019	35465	4,19	50,25	51	1,49
V0,9T20Q125	36841	35466	3,73	54,55	55,83	2,34
V0,9T10Q100	37451	35473	5,28	36,65	38,82	5,92
V0,9T15Q100	37124	35472	4,44	42,88	43,82	2,19
V0,9T20Q100	37001	35466	4,14	46,18	48,74	5,54
V0,9T10Q75	37841	35473	6,25	30,15	31,63	4,90
V0,9T15Q75	37652	35473	5,78	34,74	36,63	5,44
V0,9T20Q75	37338	35467	5,01	39,92	41,63	4,28

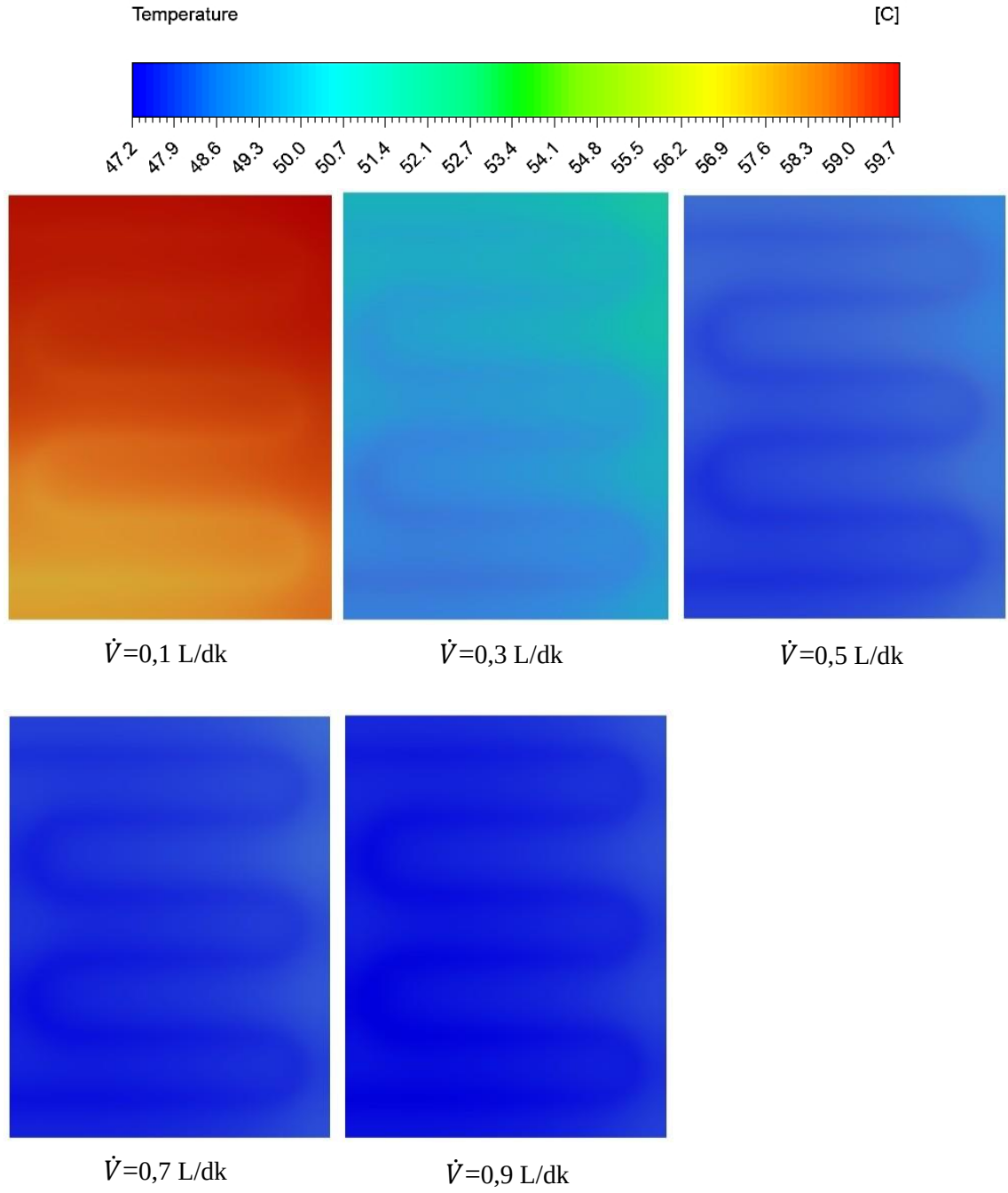
Doğrulama çalışması değerlendirildiğinde, ortalama sıcaklık için hata oranının 0,1 L/dk hacimsel debi, 10 °C su giriş sıcaklığı ve 100 W ısı güç değerlerinde en yüksek (%8,32) olduğu görülmektedir. Bununla birlikte 0,1 L/dk, 20 °C ve 75 W değerlerinde ise en düşük (%0,38) hata oranına sahip olduğu görülmektedir. Basınç düşüm değeri için hata oranının 0,1 L/dk hacimsel debi, 10 °C su giriş sıcaklığı ve 75 W ısı güç değerlerinde en yüksek (%14,76) olduğu görülmektedir. Ayrıca 0,1 L/dk, 20 °C ve 125 W değerlerinde ise en düşük (%1,02) hata oranına sahip olduğu görülmektedir.

4.2. Akışkan Debisinin Etkisi

Suyun hacimsel debisinin maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışma, 125 W, 20 °C sınır şartları ile 0,1 L/dk, 0,3 L/dk, 0,5 L/dk, 0,7 L/dk ve 0,9 L/dk debi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Soğutma plakası yüzeyinde gelişen sıcaklık dağılımı Şekil 4.1’de verilmiştir. Sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, artan debi miktarı ile soğutma plakasının giriş bölgesi ile çıkış bölgeleri arasındaki sıcaklık farkının giderek azaldığı görülmektedir. Soğutma plakasının en iyi homojenliği 0,9 L/dk debi değerinde sağlanırken, 0,1 L/dk debi değerinde ise düzensiz sıcaklık dağılımı olduğu görülmektedir.

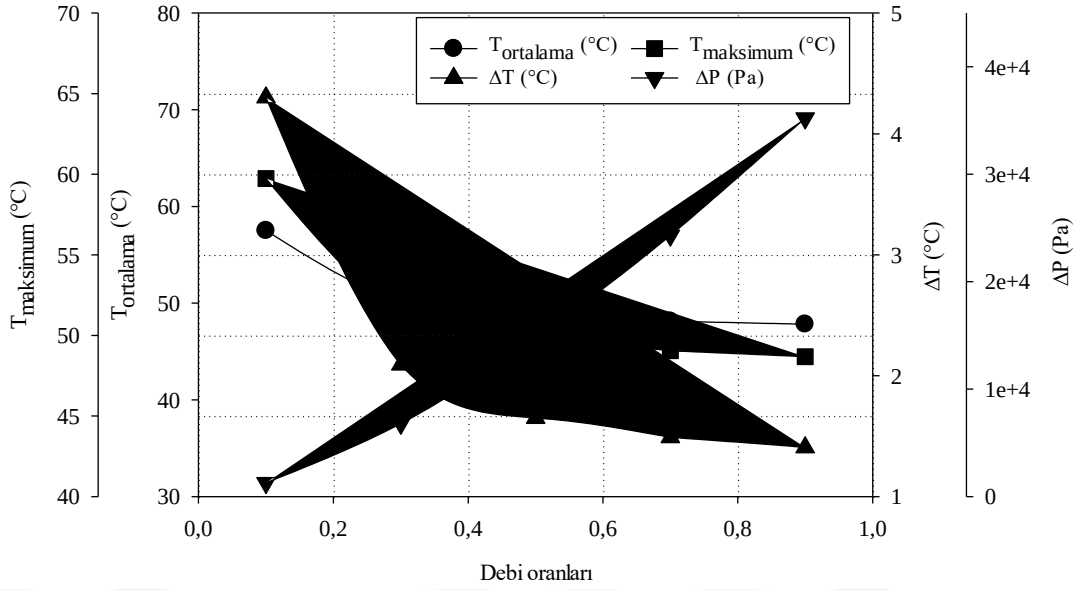
Suyun hacimsel debisinin T_{ort} , T_{maks} , ΔT ve ΔP değerlerine göre değişim grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir. T_{ort} en yüksek 57,52 °C değerine 0,1 L/dk debi şartında ulaşmışken debi 0,3 L/dk’ya çıkarıldığında 50,14 °C değerine ani bir düşüş sergilemiştir. Bu debi değerinden sonra T_{ort} ‘daki azalma miktarının düştüğü görülmektedir. 0,9 L/dk debi şartında ise en düşük 47,81 °C değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde T_{maks} için de 0,3 L/dk debi şartında bir kırılma noktası olduğu görülmektedir. T_{maks} en yüksek değeri 0,1 L/dk debide 59,73 °C değerini alırken en düşük değeri ise 48,67 °C olup 0,9 L/dk debi şartında görülmüştür.

ΔT değeri, 0,1 L/dk debi şartında en yüksek 4,30 °C değerine ulaşmıştır. 0,3 L/dk debi şartında ise 2,09 °C değerine düştüğü gözlenmiştir. Bu debi şartından sonra ΔT değerinde azalma miktarı düşmekte olup, 0,9 L/dk debi şartında en düşük değeri 1,40 °C olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak kanallarda oluşan ΔP değeri ise, 0,1 L/dk debi şartında en düşük 1278 Pa olarak hesaplanmıştır. 0,3 L/dk debi şartında ani bir yükseliş göstererek 6787 Pa değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.1. Suyun hacimsel debisinin soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi

ΔP 'nin en yüksek değeri ise 35219 Pa olarak 0,9 L/dk debi şartında olduğu belirlenmiştir. Artan debi miktarı ile maksimum sıcaklık, ortalama sıcaklık ve sıcaklık homojenliği değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bununla birlikte, kanallarda gelişen basınç düşümünde artış olduğu görülmüştür.

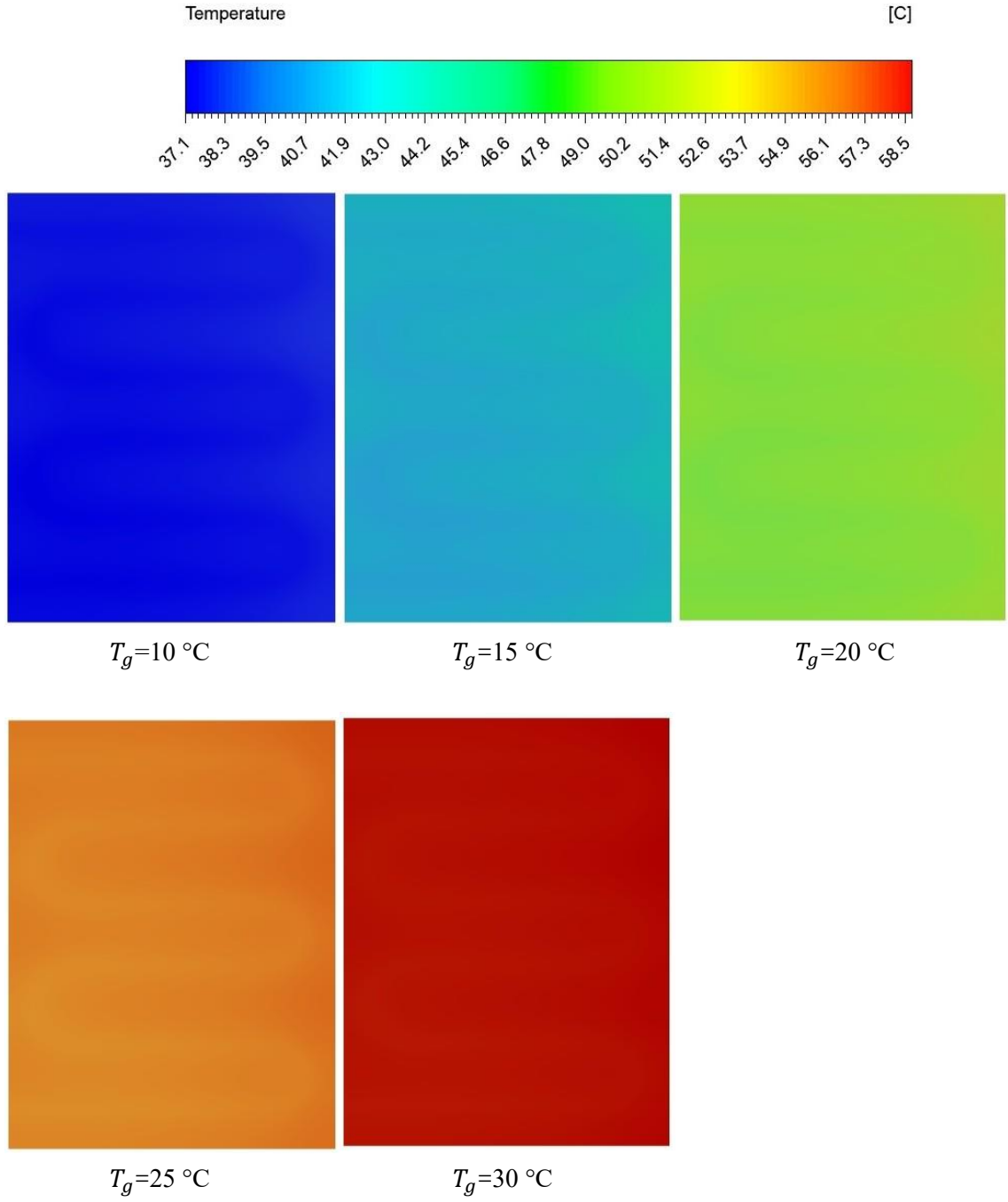


Şekil 4.2. Suyun hacimsel debisinin plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişim grafiği

4.3. Akışkan Giriş Sıcaklığının Etkisi

Soğutma sıvısının farklı giriş sıcaklıklarında soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi Şekil 4.3'te incelenmiştir. Suyun farklı giriş sıcaklıkları, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C ve 30 °C olarak ele alınmıştır. Buna ek olarak 125 W güç değeri ve 0,9 L/dk debi çalışma şartları kullanılarak plaka soğutulmuştur. Soğutma plakası yüzeyinde gelişen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, artan T_g ile plaka yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerinin arttığı gözlenmektedir.

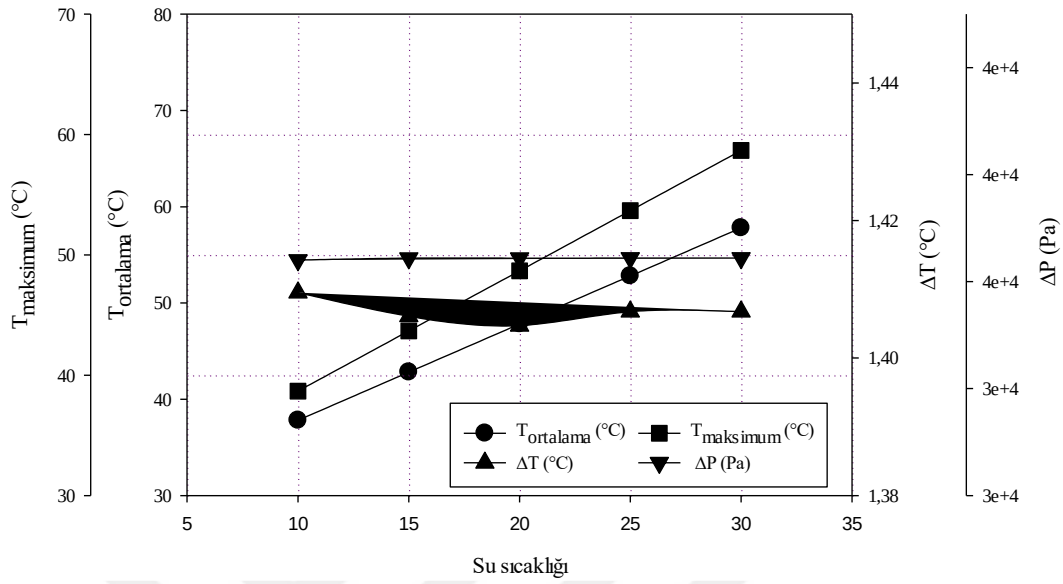
Su sıcaklığının T_{ort} , T_{maks} , ΔT ve ΔP değerlerine göre değişim grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir. T_{ort} , en düşük 37,81 °C değerini 10 °C su giriş sıcaklığı şartında sağlamışken sıcaklık 15 °C'ye çıkarıldığında 42,81 °C değerine ulaşmıştır. Su sıcaklığı artışı ile T_{ort} değeri doğrusal olarak artma eğilimi göstermektedir. 30 °C su giriş sıcaklığında ise en yüksek 57,81 °C değeri hesaplanmıştır. Benzer şekilde T_{maks} için de su giriş sıcaklığı artışı ile doğrusal artış olduğu görülmektedir. T_{maks} en düşük değeri 10 °C su giriş sıcaklığında 38,67 °C değerini alırken en yüksek değeri ise 58,67 °C olarak 30 °C su giriş sıcaklığı şartında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Suyun farklı giriş sıcaklıklarının soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi

ΔT değerinin artan su giriş sıcaklıkları ile az değişim gösterdiği gözlemlenmiş olup bu değer $1,40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak hesap edilmiştir. Bununla birlikte kanallarda oluşan ΔP değerlerinin fazla değişim göstermediği görülmektedir. ΔP 'nin en düşük değeri $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ su giriş sıcaklığında 35202 Pa değerini alırken en yüksek değeri ise 35220 Pa olarak $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ su sıcaklığı şartında olduğu belirlenmiştir. Suyun sıcaklığı artırıldıkça, maksimum sıcaklık ve ortalama sıcaklık

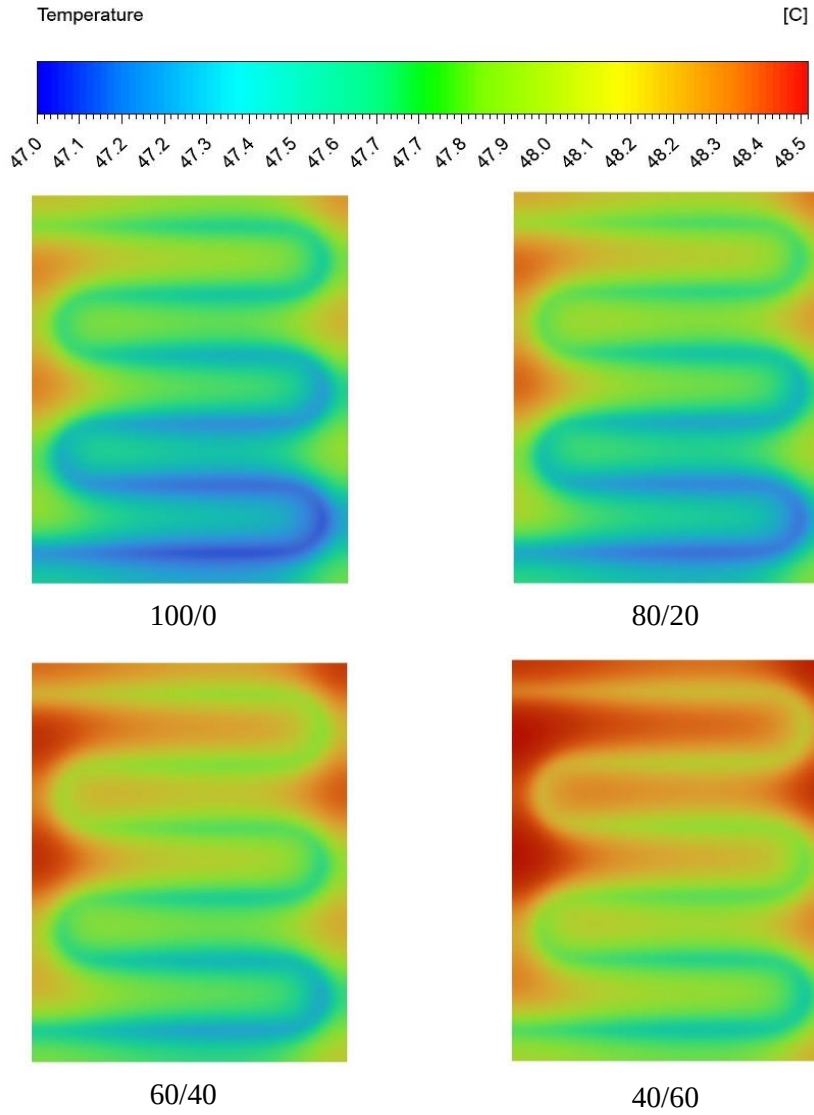
değerlerinin arttığı gözlenmektedir. Bununla birlikte, sıcaklık homojenliği ve basınç düşüm değerlerinde çok az değişim olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4. Su sıcaklığının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişimi

4.4. Akışkan Türünün Etkisi

Soğutma sıvısı olarak kullanılan su ve EG akışkan karışımı ile yapılan sayısal simülasyon sonucunda serpantin kanallı sıvı soğutma plakası yüzeyinde gelişen sıcaklık dağılımları Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Su ve EG karışımlarında, EG'nin kütlece karışım oranları %0, %20, %40 ve %60 olarak ele alınmıştır. Böylece Su/EG oranları sırasıyla 100/0, 80/20, 60/40 ve 40/60 olarak ifade edilmiştir. 125 W ısı gücü, 20 °C akışkan giriş sıcaklığı ve 0,9 L/dk debi çalışma şartları kullanılarak plaka soğutulmuştur. Sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, EG karışım oranının artırılmasıyla sıcaklık homojenliğinde kayda değer bir değişim olmadığı görülmektedir. Plaka üzerindeki maksimum sıcaklık bölgesi glikol oranının en yüksek olduğu şartta gerçekleştiği görülmektedir.

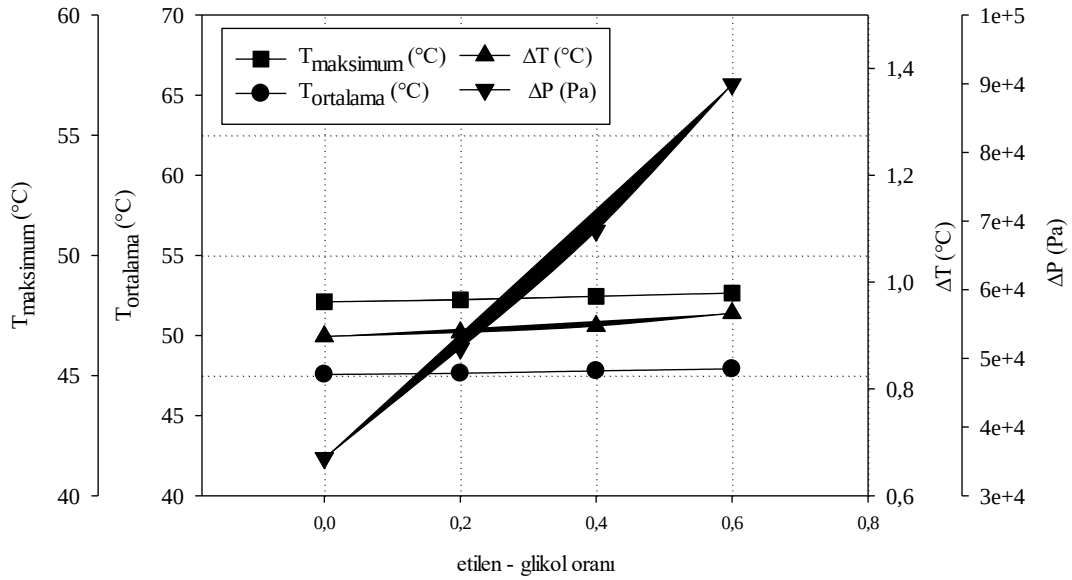


Şekil 4.5. Su/EG oranlarının soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi

Su/EG oranının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişim grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir. T_{ort} , en düşük 47,57 °C değerini 100/0 oranı yani saf su kullanıldığında sağlamışken 40/60 oranında en yüksek 47,91 °C değerine ulaşmıştır. Buna benzer olarak T_{maks} için de saf su kullanıldığında en düşük 48,07 °C değerini alırken en yüksek değeri ise 48,43 °C olarak 40/60 oranı şartında görülmüştür.

ΔT değeri, 100/0 oranı şartında en düşük 0,89 °C değerinde olurken 40/60 oranına çıkarıldığında 0,94 °C en yüksek değerine sahip olduğu görülmüştür. buna ek olarak kanallarda oluşan ΔP değeri ise, 100/0 oranı şartında en düşük 35496 Pa olarak belirlenmiştir. 40/60 oranında ise en yüksek 89933 Pa değerine ulaştığı hesaplanmıştır. Buna ek olarak, su ile farklı

karışım oranlarında karıştırılan EG sıvısının oranı arttıkça maksimum sıcaklık, ortalama sıcaklık ve sıcaklık homojenliği değerlerinde çok az değişim olduğu görülmektedir. Artan EG karışım oranları ile basınç düşüm değerinde artış meydana geldiği gözlenmektedir.



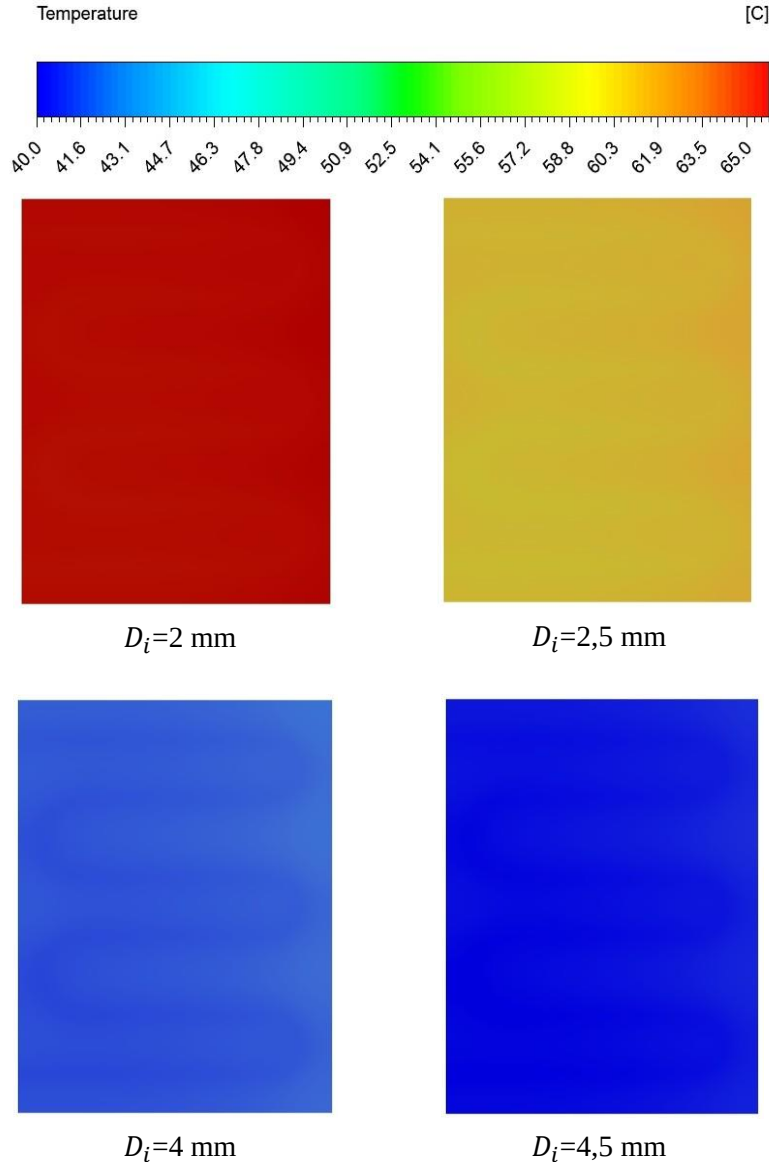
Şekil 4.6. Su/EG oranının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişimi

4.5. Kanal Giriş Çapının Etkisi

Serpantin kanal yapılı sıvı soğutma plakasının kanal giriş çapı değerlerinin değişimleri ile plaka yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Burada soğutma plakasının soğutma performansı, kanal giriş çapları 2 mm, 2,5 mm, 4 mm ve 4,5 mm olduğundaki değerleri ile soğutulmuştur. Çalışma 125 W, 20 °C ve 0,9 L/dk şartları ile analiz edilmiştir. Şekil 4.7’de sırasıyla 2 mm, 2,5 mm, 4 mm ve 4,5 mm kanal giriş çapına sahip soğutma plakasının yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı etkileri görülmektedir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, kanal giriş çapının artırılması ile sıcaklık homojenliğinde kayda değer bir değişim olmadığı ve ortalama sıcaklığın giderek azaldığı görülmektedir.

Kanal giriş çapının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişim grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir. T_{ort} , en yüksek 65,08 °C değerine 2 mm kanal giriş çapı şartında ulaşmışken kanal giriş çapı 2,5 mm’ye çıkarıldığında 57,03 °C’ye düştüğü belirlenmiştir. Kanal giriş çapının artan değeri ile T_{ort} değerinde azalma eğilimi görülmektedir.

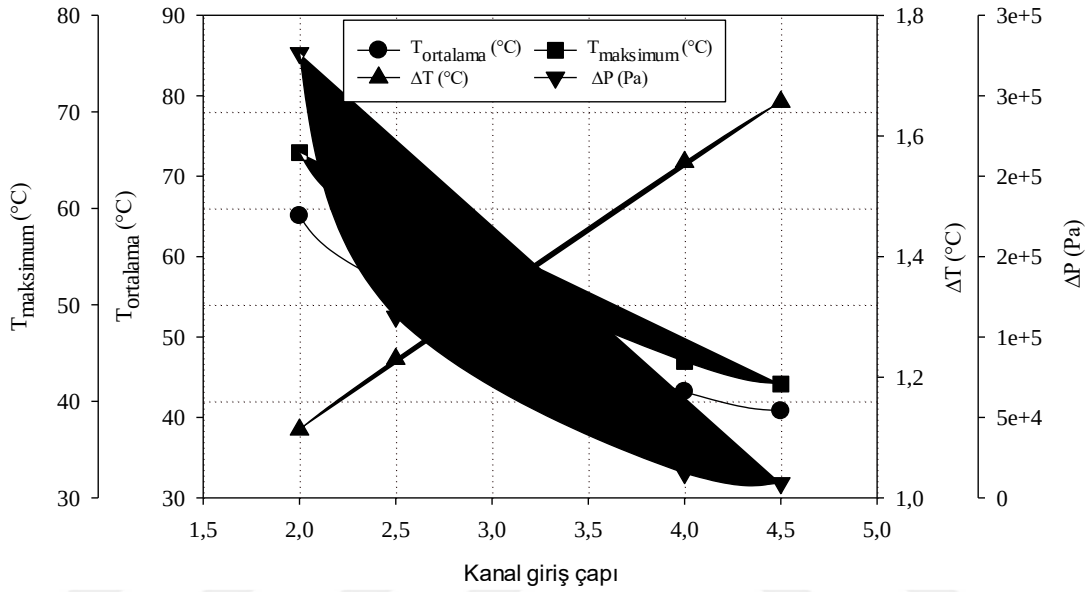
T_{ort} 'in en düşük değeri 40,79 °C olarak 4,5 mm kanal giriş çapı şartında hesaplanmıştır. Benzer olarak T_{maks} değerinde de azalma eğilimi görülmüş, en yüksek 65,78 °C değerini 2 mm kanal giriş çapı şartında görülmüştür. Kanal giriş çapı 4,5 mm şartında ise en düşük değerin 41,79 °C olduğuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.7. Kanal giriş çaplarına göre soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi

ΔT değerine bakıldığında 2 mm kanal giriş çapı şartında en düşük 1,11 °C değeri sağlanırken kanal giriş çapı 4,5 mm'ye çıkarıldığında ise 1,65 °C'ye yükseldiği belirlenmiştir. Ek olarak, ΔP değeri 2 mm kanal giriş çapı şartında en yüksek 276552 Pa değerine ulaşmıştır. ΔP değeri

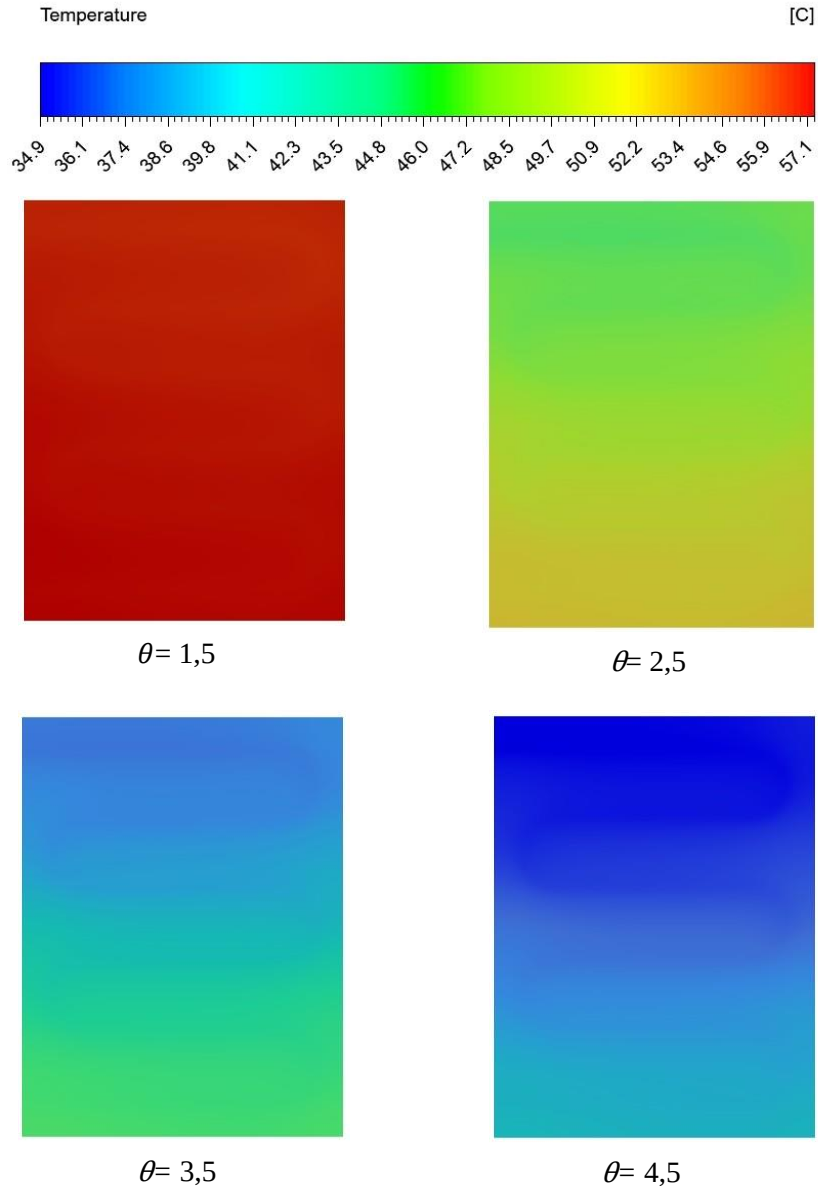
2,5 mm kanal giriş çapı şartında ani bir düşüş göstermiş olup bu kanal giriş çapından sonra ΔP değerinde azalma miktarının düştüğü görülmektedir. 4,5 mm kanal giriş çapı şartında ise en düşük 9184 Pa değerinde olduğu hesaplanmıştır. Kanal giriş çapının artmasıyla maksimum sıcaklık, ortalama sıcaklık ve basınç düşüm değerlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte sıcaklık homojenliği değerinin artan kanal giriş çapı ile ters orantılı olarak arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.8. Kanal giriş çapının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişimi

4.6. Kanal Genişleme Oranı Etkisi

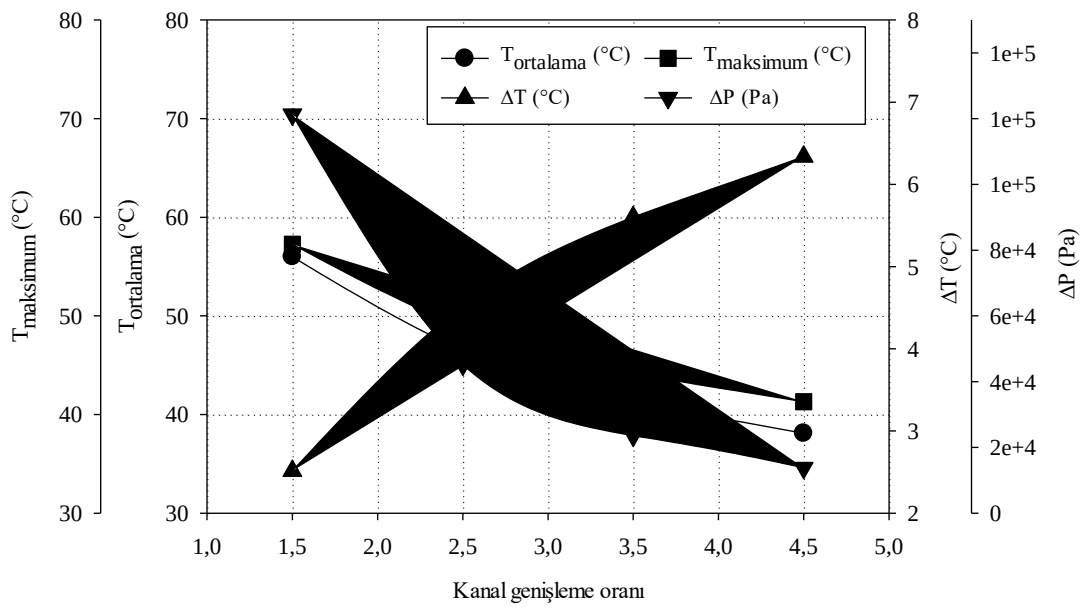
Belirli su giriş sıcaklığı, debi ve ısı akısı şartları altında soğutulan soğutma plakasının yüzeyinde gelişen sıcaklık dağılımları farklı kanal genişleme oranları (θ) ile sayısal olarak analiz edilmiştir. Analizde, kanal genişleme oranları 1,5, 2,5, 3,5 ve 4,5 olarak ele alınmış ve 125 W, 20 °C, 0,9 L/dk sınır şartları ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma şartlarında plaka yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, artan kanal genişleme oranı ile ortalama sıcaklık değerinin azaldığı görülmektedir. Soğutma plakasının kanal genişleme oranı arttıkça sıcaklık homojenliğinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.9. Kanal genişleme oranlarına göre soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi

Kanal genişleme oranının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişim grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. T_{ort} , 1,5 mm kanal genişleme şartında en yüksek 56,0 °C değerini göstermiştir. 4,5 mm kanal genişleme şartında ise en düşük 38,09 °C değerinde olduğu belirlenmiştir. T_{maks} 'ın en yüksek değeri 1,5 mm kanal genişleme oranında 57,27 °C değerine ulaşmışken kanal çapı 4,5'e artırıldığında 41,29 °C ile en düşük değerde olduğu görülmektedir.

ΔT incelendiğinde, 1,5 mm kanal genişleme şartında en düşük 2,51 °C değerinde olduğu belirlenmiştir. Kanal genişleme oranı 4,5 mm olduğunda ise en yüksek 6,33 °C değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. ΔP değeri, 1,5 mm kanal genişleme şartında en yüksek 121273 Pa değerinde olduğu hesaplanmıştır. Bu kanal genişleme oranından sonra ani bir düşüş göstererek 2,5 mm kanal genişleme oranında 45173 Pa değerinde olduğu belirlenmiştir. ΔP 'nin en düşük 13779 Pa değeri ise 4,5 mm kanal genişleme şartında olduğu belirlenmiştir. Artan kanal genişleme oranı ile maksimum plaka sıcaklığı ve ortalama sıcaklık değerlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Buna ek olarak, sıcaklık homojenliği ve basınç düşüm değerlerinde azalma meydana geldiği anlaşılmaktadır.

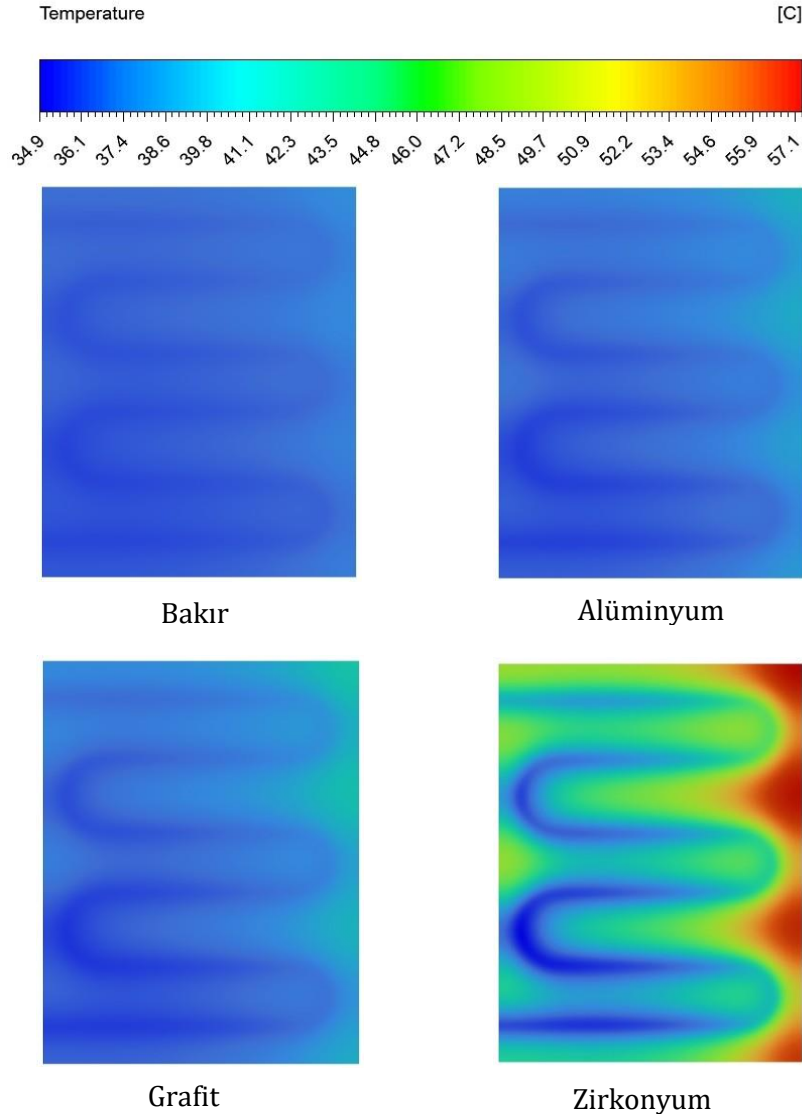


Şekil 4.10. Kanal genişleme oranının plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişimi

4.7. Soğutma Plakası Malzeme Türü Etkisi

Soğutma plakasının farklı malzeme türlerinin soğutma performansına etkisi incelenmiştir. Analizde, farklı malzeme türleri olarak Alüminyum (Al), Bakır (Cu), Grafit (Gr) ve Zirkonyum (Zr) malzemeleri tercih edilmiştir. Bununla birlikte 125 W, 20 °C, 0,9 L/dk sınır şartları uygulanmış ve soğutma plakası yüzeyinde gelişen sıcaklık dağılımı Şekil 4.11’de verilmiştir. Sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, bakır malzeme kullanıldığı durumda en homojen sıcaklık

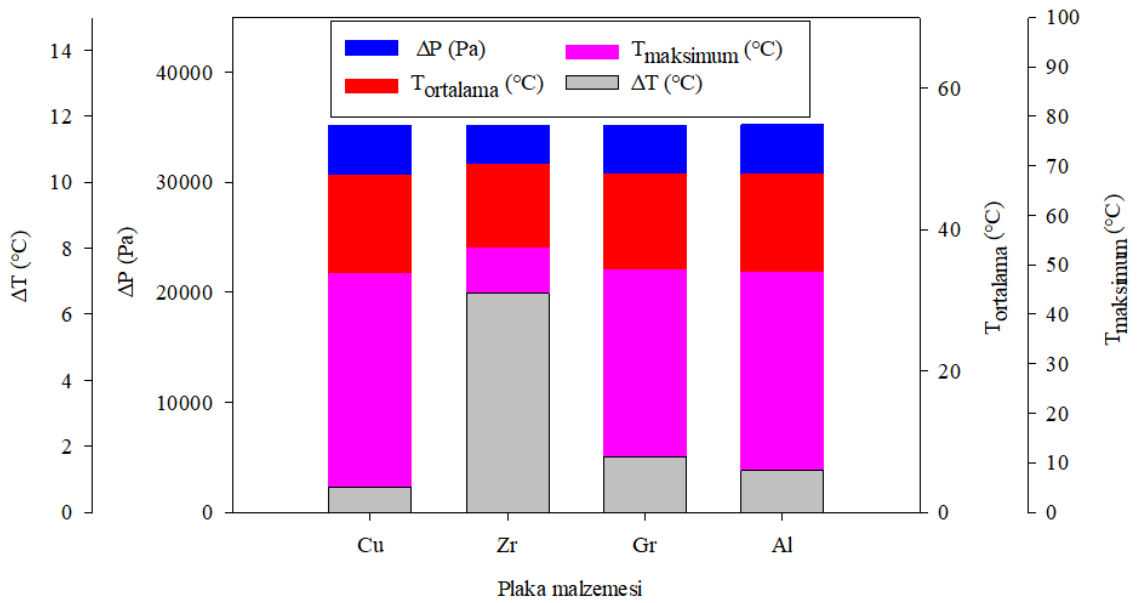
dağılımı elde edildiği görülmektedir. Zirkonyum malzemeli plakada ise en düzensiz sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.11. Plaka malzemesinin soğutma plakası yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarına etkisi

Farklı plaka malzeme türlerinin plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişim grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir. T_{ort} , en yüksek 49,22 °C değerine Zirkonyum malzemesi şartında sağlamıştır. Daha sonra T_{ort} en düşük değerini ise 47,65 °C değeri ile Bakır malzeme şartında olduğu görülmüştür. Ek olarak T_{maks} değerine bakıldığında en yüksek 53,45 °C değerini Zirkonyum, en düşük 48,11 °C değerini ise Bakır malzemesinde aldığı belirlenmiştir.

ΔT değeri, Zirkonyum malzeme şartında en yüksek 6,62 °C değerinde iken en düşük değerini Bakır malzeme şartında 0,75 °C değerine sahip olmuştur. Buna ek olarak kanallarda oluşan ΔP değerinde ise fazla değişim olmadığı görülmektedir. ΔP en düşük 35219 Pa değerini Alüminyum malzeme şartında sağlamışken en yüksek 35202 Pa değerini Zirkonyum malzeme şartında olduğu hesaplanmıştır. Sıcaklık homojenliği en iyi Bakır malzemeli plaka kullanıldığında oluşurken Zirkonyum malzeme kullanıldığında ise en düzensiz homojenliğin olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, tüm malzeme türlerinde plakada gelişen basınç düşüm değerinde çok az değişimin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. Farklı plaka malzeme türlerinin plaka yüzeyinde gelişen sıcaklıklar ile basınç düşüm değerlerine göre değişim grafiği

4.8. Soğutma Plakası Optimizasyonu

DeneySEL ve sayısal olarak incelenen serpantin kanallı soğutma plakasının soğutma performans verimliliğini en ideal şekilde sağlamak için çok amaçlı optimizasyonu yapılmıştır. I-Optimum Deney Tasarım algoritması kullanılarak oluşturan DT' ye ait alan değişkenleri belirlenerek Yanıt Yüzey Yöntemi ile regresyon model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellerin istatistiksel analizi ANOVA yöntemi ile sağlanmıştır. Bağımlı ve bağımsız değişkenlerle oluşan tasarım modeli denklem çözümlerinin tahmin doğrulukları hesaplanmıştır. Soğutma plakasının optimizasyonunda önceden tanımlanan D_i , θ , $\dot{V}$ ve T_g olarak dört adet bağımsız değişken

kullanılmıştır. Bu değişkenler ile optimizasyon yapılarak plakada gelişen T_{ort} , T_{maks} , ΔT ve ΔP yanıt değerlerinin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Optimizasyon parametreleri olan bu bağımsız değişkenlerin seviyelerinin belirlendiği değerler Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Optimizasyon parametreleri ve seviye değerleri

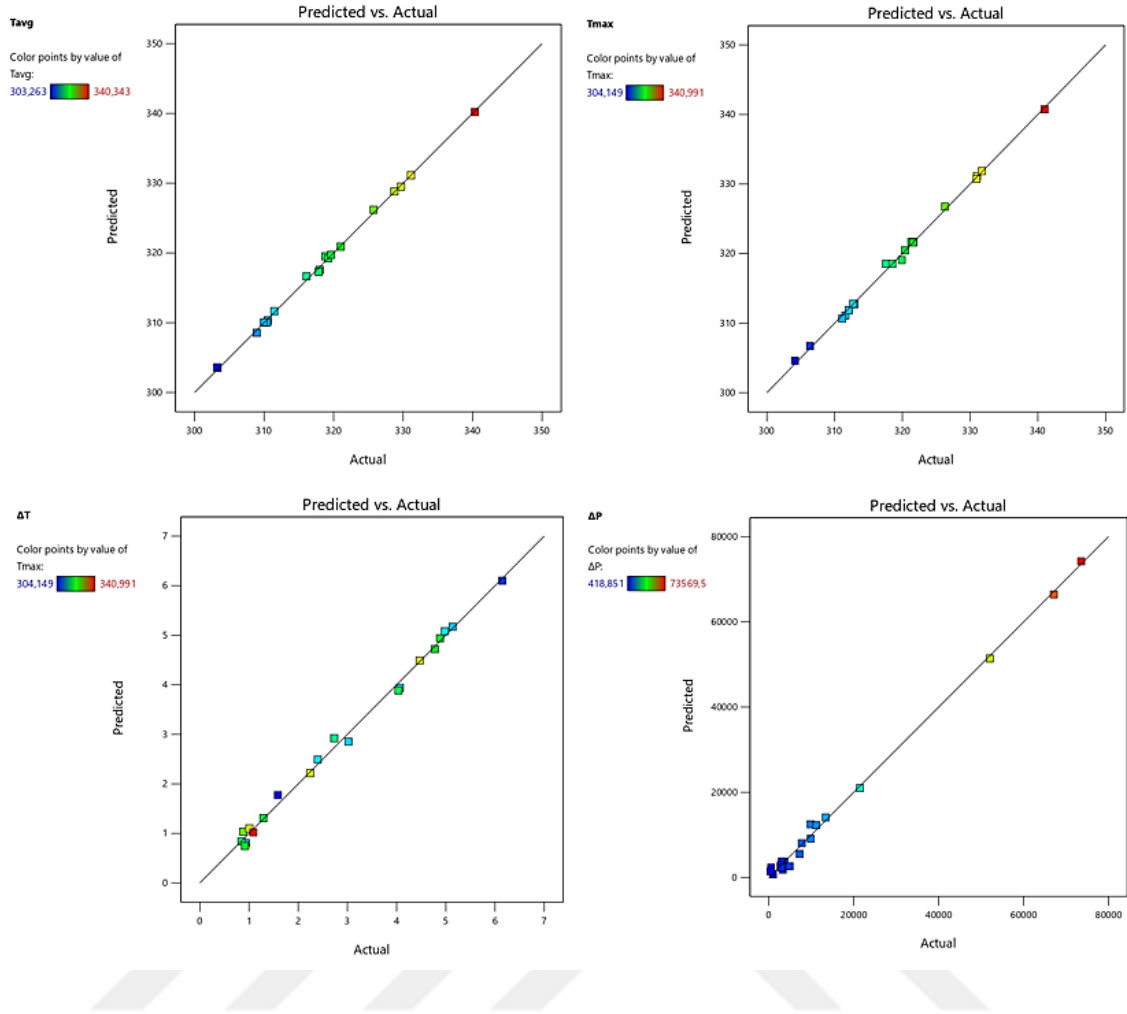
	Bağımsız Değişkenler	Optimizasyon Parametreleri	Seviyeler	
			-1	+1
Sayısal Faktörler	x_1	D_i	2	4,5
	x_2	θ	1	4,5
	x_3	$\dot{V}$	0,1	0,9
	x_4	T_g	10	30

Soğutma plakası yüzeyinde gelişen T_{ort} , T_{maks} , ΔT_{maks} ve ΔP değerleri optimize edilecek yanıt değerlerdir. Toplam 20 örneklemden oluşan DT ve ANSYS-Fluent programında çözümlenerek elde edilen yanıt değerleri Tablo 4.3’te verilmiştir. Her yanıt değişkeni için bağımsız değişkenlere bağlı ikinci dereceden polinomiyal model denklemleri oluşturularak ANOVA analizi test edilmiştir.

Tablo 4.3. DT'ye ait bağımsız değişkenler ve seviye yanıt değerleri

Örneklem Sırası	Bağımsız Değişken Değerleri				Yanıt Değerleri			
	D (mm)	θ (mm)	$\dot{V}$ (L/dk)	T_g (°C)	ΔP (Pa)	T_{maks} (°C)	T_{ort} (°C)	ΔT_{maks} (°C)
1	2,86	2,26	0,32	20,30	2753	44,44	42,96	2,73
2	3,75	1,90	0,12	10,00	7278	38,96	37,38	3,02
3	4,01	1,06	0,74	29,95	9840	53,16	52,61	0,88
4	2,05	4,36	0,31	15,27	3670	38,44	35,79	5,14
5	2,18	4,10	0,31	25,39	3078	48,18	45,66	4,88
6	4,31	1,05	0,77	16,16	7767	37,96	37,39	0,93
7	4,37	1,15	0,52	24,03	3283	45,38	44,84	0,85
8	2,09	4,21	0,12	29,49	987	57,87	56,55	2,24
9	2,05	1,04	0,40	13,26	73570	58,59	57,99	1,01
10	2,11	4,25	0,78	11,97	9869	33,21	30,14	6,15
11	2,10	1,22	0,43	27,05	52053	67,84	67,19	1,09
12	2,41	3,15	0,83	17,73	11194	39,79	37,25	4,98
13	2,16	2,82	0,82	22,89	21479	48,50	46,06	4,78
14	4,40	1,88	0,33	12,51	583	31,00	30,11	1,59
15	4,50	1,08	0,68	27,52	4909	48,45	47,89	0,92
16	2,16	2,54	0,48	11,11	13419	38,95	36,84	4,07
17	2,47	1,22	0,84	13,15	67122	47,24	46,49	1,29
18	4,34	1,75	0,85	22,05	2857	39,60	38,32	2,40
19	4,32	1,00	0,11	24,59	419	57,82	55,59	4,47
20	3,10	2,90	0,46	27,49	2973	46,76	44,70	4,04

Bağımlı değişkenlerin regresyon denklemleri için gerçek ve tahmini değerlerinin birbirleriyle tutarlı olduğu grafik Şekil 4.13'te görülmektedir.



Şekil 4.13. İstenilen fonksiyonların gerçek ve tahmini sayısal değerlerin sırasıyla T_{ort} , T_{maks} , ΔT ve ΔP için dağılımları

ΔP , T_{maks} , ΔT ve T_{ort} için üretilen regresyon modeli denklemleri için tahmini R^2 değerleri sırasıyla 0,8999, 0,9455, 0,8689 ve 0,9739'dur.

ΔP , T_{maks} , ΔT ve T_{ort} yanıtları için ANOVA analiz sonuçları sırasıyla Tablo 4.4, Tablo 4.5, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de verilmiştir. Analiz sonucunda ortaya çıkan model denklemleri ise sırasıyla Eş. 4.1, Eş. 4.2, Eş. 4.3 ve Eş. 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. ΔP yanıtı için ANOVA analiz sonuçları

Yanıt	Kaynak	Kareler toplamı	DF	Kareler Ortalaması	F değeri	P değeri
ΔP	Model	928000000	14	663300000	125,8	< 0,0001
	$\dot{V} - \dot{V}$	58830000	1	58830000	11,16	0,0205
	$T_g - T_g$	2005000	1	2005000	0,3803	0,5644
	$D_i - D_i$	1805000	1	1805000	0,3424	0,5838
	$\theta - \theta$	10270000	1	10270000	1,95	0,2217
	$\dot{V} - T_g$	31570000	1	31570000	5,99	0,0581
	$\dot{V} - D_i$	144500000	1	144500000	27,41	0,0034
	$\dot{V} - \theta$	40320000	1	40320000	7,65	0,396
	$T_g - D_i$	23830000	1	23830000	4,52	0,0868
	$T_g - \theta$	61790000	1	61790000	11,72	0,0188
	$D_i - \theta$	595500000	1	595500000	112,95	0,0001
	$\dot{V}^2$	11200000	1	11200000	2,12	0,2047
	T_g^2	502,47	1	502,47	0,0001	0,9926
	D_i^2	98080000	1	98080000	18,6	0,0076
	θ^2	791400000	1	791400000	150,11	< 0,0001
		26360000	5	5272000		
	Toplam	9312000000	19			
$R^2=0,9972, R^2_{\text{düzeltilmiş}} = 0,9892, R^2_{\text{tahmini}}=0,8999$						

$$\Delta P = 300857 + 69039,14.\dot{V} - 2370,36.T_g - 87690,7.D_i - 117668.\theta + 1087,72.\dot{V}.T_g - 21083,5.\dot{V}.D_i - 10007,5.\dot{V}.\theta + 254,4396.T_g.D_i + 408,5534.T_g.\theta + 18001,35.D_i.\theta + 18226,32.\dot{V}^2 - 0,18262.T_g^2 + 6979,536.D_i^2 + 10789,32.\theta^2 \quad (4.1)$$

Bununla birlikte, 36,94 hassasiyet oranıyla birlikte bu modelin tasarım uzayını tarayabildiğini göstermektedir.

Tablo 4.5. T_{maks} yanıtı için ANOVA analiz sonuçları

Yanıt	Kaynak	Kareler toplamı	DF	Kareler Ortalaması	F değeri	P değeri
T_{maks}	Model	1675,3	14	119,66	201,04	< 0,0001
	$\dot{V} - \dot{V}$	33,69	1	33,69	56,61	0,0007
	$T_g - T_g$	427,86	1	427,86	718,82	< 0,0001
	$D_i - D_i$	38,36	1	38,36	64,45	0,0005
	$\theta - \theta$	35,35	1	35,35	59,39	0,0006
	$\dot{V} - T_g$	0,8049	1	0,8049	1,35	0,2974
	$\dot{V} - D_i$	0,8761	1	0,8761	1,47	0,2792
	$\dot{V} - \theta$	7,42	1	7,42	12,47	0,0167
	$T_g - D_i$	0,4592	1	0,4592	0,7714	0,42
	$T_g - \theta$	2,05	1	2,05	3,44	0,1229
	$D_i - \theta$	3,65	1	3,65	6,14	0,056
	$\dot{V}^2$	33,6	1	33,6	56,45	0,0007
	T_g^2	1,3	1	1,3	2,19	0,1989
	D_i^2	6,23	1	6,23	10,47	0,0231
	θ^2	22,48	1	22,48	37,77	0,0017
		2,98	5	0,5952		
	Toplam	1678,27	19			
$R^2=0,9982, R^2_{\text{düzeltilmiş}} = 0,9933, R^2_{\text{tahmini}}=0,9455$						

$$\begin{aligned}
T_{maks} = & 397,3475 - 59,921.\dot{V} + 0,291924.T_g - 22,846.D_i - 22,6564.\theta + \\
& 0,173674.\dot{V}.T_g + 1,64141.\dot{V}.D_i + 4,29329.\dot{V}.\theta + 0,035317.T_g.D_i + 0,074352.T_g.\theta + \\
& 1,40974.D_i.\theta + 3156656.\dot{V}^2 + 0,009305.T_g^2 + 1,7595.D_i^2 + 1,81845.\theta^2
\end{aligned}
\tag{4.2}$$

Bununla birlikte, 54,05 hassasiyet oranıyla birlikte bu modelin tasarım uzayını tarayabildiğini göstermektedir.

Tablo 4.6. ΔT yanıtı için ANOVA analiz sonuçları

Yanıt	Kaynak	Kareler toplamı	DF	Kareler Ortalaması	F değeri	P değeri
ΔT	Model	60,18	14	4,3	85,76	< 0.0001
	$\dot{V} - \dot{V}$	0,6259	1	0,6259	12,49	0,0167
	$T_g - T_g$	0,023	1	0,023	0,4585	0,5284
	$D_i - D_i$	0,0768	1	0,0768	1,53	0,2707
	$\theta - \theta$	15,48	1	15,48	308,9	< 0.0001
	$\dot{V} - T_g$	0,0006	1	0,0006	0,0127	0,9148
	$\dot{V} - D_i$	0,0001	1	0,0001	0,0023	0,9635
	$\dot{V} - \theta$	2,43	1	2,43	48,55	0,0009
	$T_g - D_i$	0,4845	1	0,4845	9,67	0,0266
	$T_g - \theta$	0,0833	1	0,0833	1,66	0,2537
	$D_i - \theta$	0,0158	1	0,0158	0,3147	0,599
	$\dot{V}^2$	0,0071	1	0,0071	0,1415	0,7222
	T_g^2	1,04	1	1,04	20,69	0,0061
	D_i^2	2,15	1	2,15	42,88	0,0012
	θ^2	0,4482	1	0,4482	8,94	0,0304
		0,2506	5	0,0501		
	Toplam	60,43	19			
$R^2=0,9959, R^2_{\text{düzeltilmiş}} = 0,9842, R^2_{\text{tahmini}}=0,8689$						

$$\begin{aligned}
\Delta T = & 13,20466 - 43,8276.\dot{V} - 0,30468.T_g - 3,02506.D_i + 1,85519.\theta + \\
& 0,767627.\dot{V}.T_g + 4,63367.\dot{V}.D_i + 10,92166.\dot{V}.\theta + 0,146863.T_g.D_i - 0,15902.T_g.\theta + \\
& 23,55838.\dot{V}^2 - 0,68145.\theta^2 - 0,23289.\dot{V}.T_g.D_i - 8,46673.\dot{V}^2.\theta + 0,032684.T_g.\theta^2
\end{aligned}
\tag{4.3}$$

Bununla birlikte, 27,63 hassasiyet oranıyla birlikte bu modelin tasarım uzayını tarayabildiğini göstermektedir.

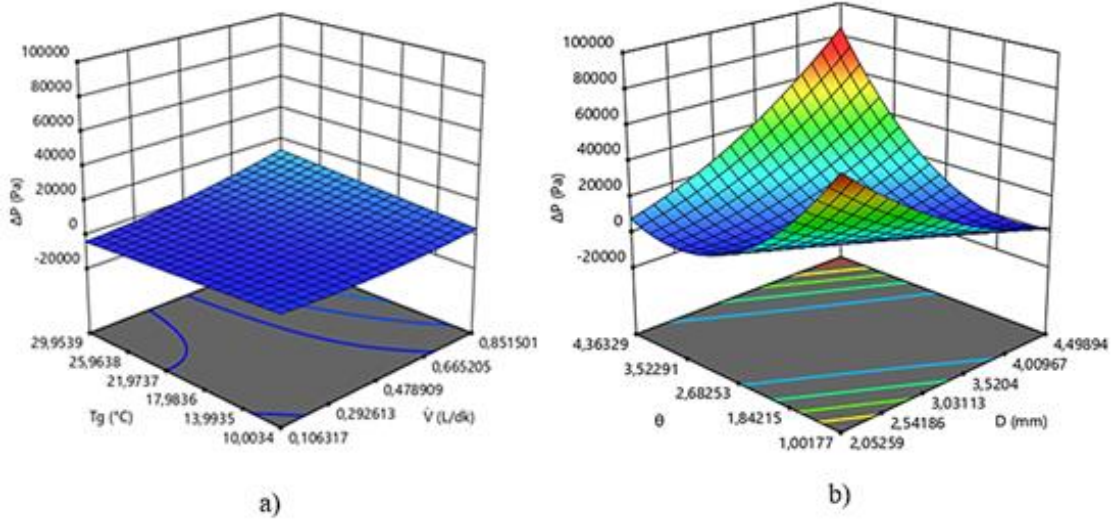
Tablo 4.7. T_{ort} yanıtı için ANOVA analiz sonuçları

Yanıt	Kaynak	Kareler toplamı	DF	Kareler Ortalaması	F değeri	P değeri
T_{ort}	Model	1790,19	14	127,87	297,41	< 0.0001
	$\dot{V} - \dot{V}$	32,42	1	32,42	75,4	0,0003
	$T_g - T_g$	424,04	1	424,04	986,26	< 0.0001
	$D_i - D_i$	34,94	1	34,94	81,26	0,0003
	$\theta - \theta$	40,83	1	40,83	94,96	0,0002
	$\dot{V} - T_g$	0,5632	1	0,5632	1,31	0,3042
	$\dot{V} - D_i$	1,32	1	1,32	3,07	0,1401
	$\dot{V} - \theta$	4,94	1	4,94	11,49	0,0195
	$T_g - D_i$	0,0338	1	0,0338	0,0786	0,7904
	$T_g - \theta$	2,19	1	2,19	5,08	0,0738
	$D_i - \theta$	4,82	1	4,82	11,22	0,0203
	$\dot{V}^2$	28,79	1	28,79	66,96	0,0004
	T_g^2	2,82	1	2,82	6,55	0,0506
	D_i^2	7,15	1	7,15	16,63	0,0096
	θ^2	25,97	1	25,97	60,41	0,0006
		2,15	5	0,4299		
	Toplam	1792,34	19			
	$R^2=0,9988, R^2_{\text{düzeltilmiş}} = 0,9954, R^2_{\text{tahmini}}=0,9739$					

$$\begin{aligned}
T_{ort} = & 398,627 - 56,0316.\dot{V} + 0,203742.T_g - 23,6163.D_i - 24,1013.\theta + \\
& 0,145272.\dot{V}.T_g + 2,01506.\dot{V}.D_i + 3,50347.\dot{V}.\theta + 0,009583.T_g.D_i + 0,076841.T_g.\theta + \\
& 1,6201.D_i.\theta + 29,21849.\dot{V}^2 + 0,013676.T_g^2 + 1,88424.D_i^2 + 1,95459.\theta^2
\end{aligned}
\tag{4.4}$$

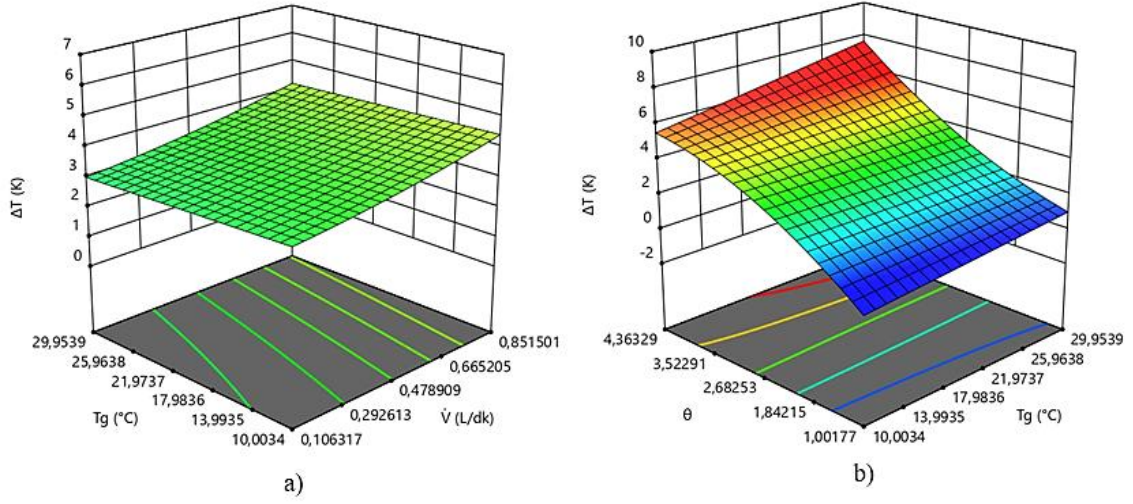
Bununla birlikte, 64,60 hassasiyet oranıyla birlikte bu modelin tasarım uzayını tarayabildiğini göstermektedir.

Soğutma plakası optimizasyonunda bağımsız değişkenlerin ΔP değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü hacimsel debinin artışı ile ΔP 'nin de arttığı ve artan soğutma sıvısı giriş sıcaklığı ile ΔP değerinde fazla değişim olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte artan kanal genişleme oranı ve kanal giriş çapının değerleri ile ΔP değerinde belirgin değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Burada θ ve D_i artmasıyla ΔP değerinde artış gözlenmektedir.



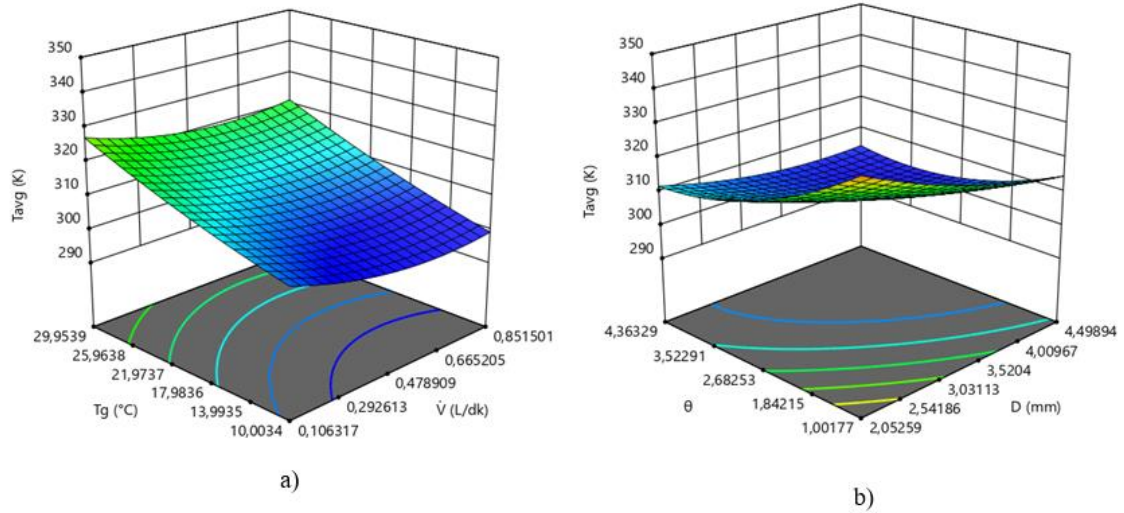
Şekil 4.14. a) Su giriş sıcaklığı ve hacimsel debinin b) Kanal genişleme oranı ve kanal giriş çapının ΔP değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği

Bağımsız değişkenlerin ΔT değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, su giriş sıcaklığı değeri arttığında ΔT değerinde çok az değişim olduğu görülürken artan hacimsel debi değeri ile ΔT değerinde artış olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte kanal genişleme oranı ve su giriş sıcaklığı değerlerinde artış olduğunda ΔT değerinde artma olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.15. a) Su giriş sıcaklığı ve debinin b) Kanal genişleme oranı ve su giriş sıcaklığının ΔT değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği

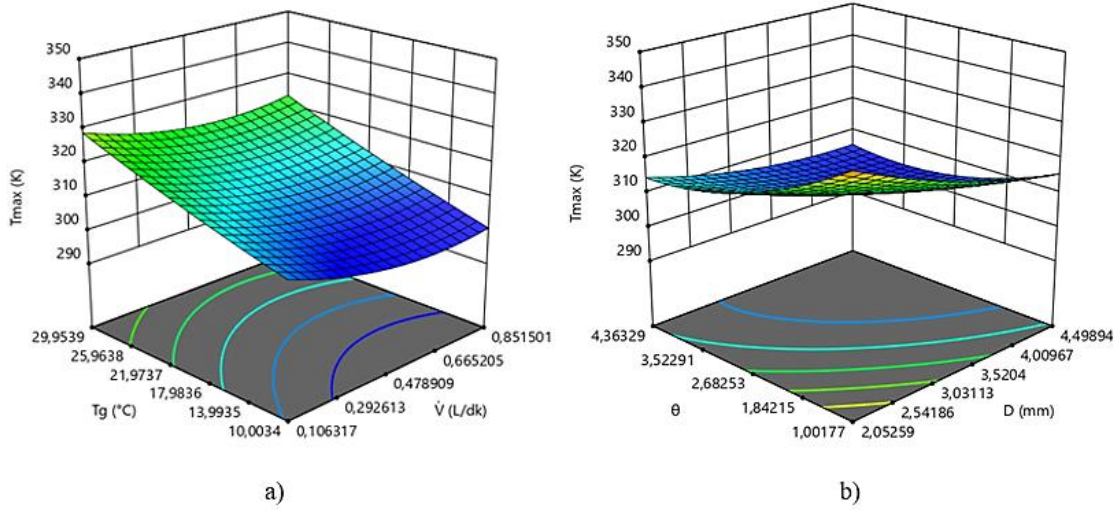
Bağımsız değişkenlerin T_{ort} değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, su giriş sıcaklığı artırıldığında T_{ort} değerinde artış gözlemlenirken artan hacimsel debi değerinde ise T_{ort} değerinin azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak kanal genişleme oranı ve kanal giriş çapının artışı ile T_{ort} değerinde azalma meydana gelmektedir.



Şekil 4.16. a) Su giriş sıcaklığı ve debinin b) Kanal genişleme oranı ve kanal çapının T_{ort} değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği

Bağımsız değişkenlerin T_{maks} değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, su giriş sıcaklığı artırıldığında T_{maks} değerinde artış

gözlemlenirken artan hacimsel debi değerinde ise T_{maks} değerinin azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak artan kanal genişleme oranı ve kanal giriş çapı değerleri ile T_{maks} değerinin azaldığı görülmektedir.



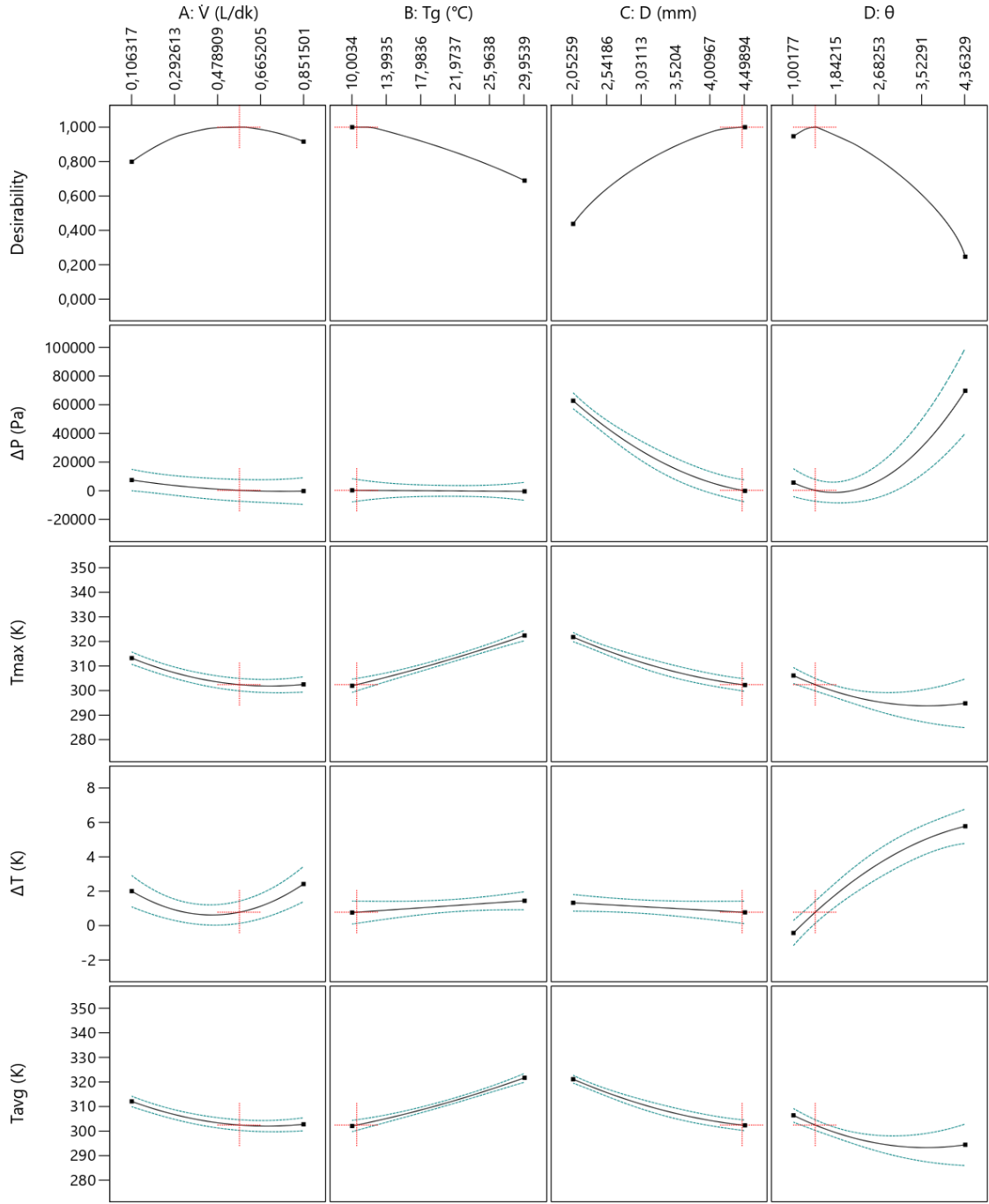
Şekil 4.17. a) Su giriş sıcaklığı ve debinin b) Kanal genişleme oranı ve kanal çapının T_{maks} değerine etkisinin yanıt yüzey grafiği

Bağımlı değişkenler olan ve matematiksel modelleri oluşturulan T_{ort} , T_{maks} , ΔT ve ΔP yanıt değerlerinin tahmin doğrulukları belirlenmiştir. Daha sonra optimum performans sağlayan bağımsız değişkenlere uygulanan optimizasyon işlemi ile yanıt değerlerinin minimuma ulaşılması amaçlanmıştır. Bu aşamada İstenebilirlik Fonksiyonu Yaklaşımı ile elde edilen optimizasyon sonuçları Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Optimizasyon işlemi sonuçlarına bakıldığında, ΔP değerinin artan hacimsel debi ve su giriş sıcaklık değerlerinde fazla değişim göstermediği görülmektedir. Buna rağmen artan kanal giriş çapı değerlerinde ise ΔP değerinde azalma olduğu görülürken artan kanal genişleme oranında ise artış olduğu görülmektedir. T_{maks} için, artan hacimsel debi, kanal giriş çapı ve kanal genişleme oranı değerlerinde azalma eğilimi göstermiştir. Ek olarak artan su giriş sıcaklığı değerlerinde ise artma eğilimi göstermiştir. ΔT için, artan hacimsel debi değerinde önce azaldığı sonra arttığı görülmektedir. Ek olarak, artan su giriş sıcaklığı değerlerinde artma eğilimi gösterirken artan kanal giriş çapı değerlerinde ise azalma eğilimi göstermiştir. Ayrıca artan kanal genişleme oranı ile artış gösterdiği gözlenmektedir. T_{ort} için, artan hacimsel debi ve kanal genişleme oranı değerlerinde azalma eğilimi göstermiştir. Ek olarak artan su giriş sıcaklığı değerlerinde artma eğilimli olurken artan kanal giriş çapı değerlerinde ise azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak, yanıt değerlerinin ideal

performansı için bağımsız değişkenlerin optimum noktaları belirlenmiştir. Yapılan çok amaçlı optimizasyon sonucunda soğutma plakasına optimum performans sağlayan değerler Tablo 4.8’de verilmiştir. Bu dört amaç fonksiyonu için optimum performans sağlayan $\dot{V}$, T_g , D_i ve θ parametre değerleri sırasıyla 0,5 L/dk, 11,16 °C, 4,47 mm ve 1,49 mm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.8. Soğutma plakası için optimum performans sağlayan değerler

No	$\dot{V}$ (L/dk)	T_g (°C)	D_i (mm)	θ (mm)	ΔP (Pa)	T_{maks} (°C)	ΔT (°C)	T_{ort} (°C)	İstenebilirlik
1	0,50	11,16	4,47	1,49	316,86	29,95	0,835	29,60	1
2	0,58	11,58	4,49	1,41	85,98	30,13	0,781	29,90	1
3	0,57	10,54	4,45	1,42	370,38	29,31	0,77	29,17	1
4	0,63	10,63	4,49	1,37	111,20	29,31	0,805	29,29	1
5	0,50	10,68	4,46	1,5	396,09	29,57	0,821	29,26	1
6	0,52	10,15	4,46	1,48	282,79	28,95	0,802	28,75	1
7	0,57	10,56	4,47	1,40	370,50	29,44	0,707	29,32	1
8	0,61	10,84	4,46	1,40	243,30	29,44	0,844	29,33	1
9	0,53	10,47	4,48	1,46	196,38	29,25	0,768	29,04	1
10	0,54	10,63	4,46	1,46	325,77	29,40	0,793	29,18	1



Şekil 4.18. Çok amaçlı optimizasyon sonuçları

5. SONUÇLAR

Yapılan tez çalışmasında, ısıl yönetim sistemlerinde kullanılan sıvı soğutma plakasının sıvı soğutma yöntemi ile soğutulduğunda gösterdiği ısı ve hidrolik performans davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel ortamda farklı sınır şartlarında soğutulan soğutma plakasının verileri kullanılarak yapılan HAD analizleri doğrulanmıştır. Sayısal analiz yöntemi ile soğutma sıvısının giriş hızı, sıcaklığı ve türünün etkisi, kanal çapı, kanal genişleme oranı ile farklı plaka malzeme türlerinin soğutma performansına ve basınç düşümüne etkileri incelenmiştir. Buna ek olarak, optimum performans sağlayan parametrelerin belirlenmesi amacıyla soğutma plakasının çok amaçlı optimizasyonu da yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde;

En yüksek güç değerinde (125 W, 20 °C ve 0,9 L/dk) deneysel olarak soğutulma işleminde elde edilen T_{ort} ve ΔP değerleri sırasıyla 54,55 °C ve 36841 Pa olarak ölçülmüştür. Artan debi miktarlarıyla yapılan sıvı ile soğutma deneyinde basınç düşümünün en düşük 10 °C ve 125 W ısı güç değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Ek olarak, hacimsel debi miktarının artmasıyla soğutma plakası yüzeyinde gelişen T_{ort} değerinin azaldığı görülürken ΔP değerinde artış olduğu sonucuna varılmıştır. Soğutma plakası yüzeyindeki rezistanslara uygulanan elektriksel güç değerinin artmasıyla plaka yüzeyinde gelişen T_{ort} değerinde artma olduğu belirlenmiştir.

Sıvı ile soğutma performansının sayısal analizinde, artan debi miktarı, kanal giriş çapı ve kanal genişleme oranları ile T_{ort} ve T_{maks} değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte artan kanal giriş çapı ve kanal genişleme oranları ile ΔP değerinde azalma olduğu sonucuna varılmıştır.

Soğutma plakası yüzeyinde gelişen T_{ort} ve T_{maks} değerleri en düşük 0,9 L/dk su hacimsel debisi, 10 °C soğutma sıvısı giriş sıcaklığı, Su/EG=100/0 karışım oranı, 4,5 mm kanal giriş çapı, 4,5 kanal genişleme oranı ve bakır malzeme türü şartlarında hesaplanmıştır.

Sıcaklık homojenliğini su giriş sıcaklığı, kanal giriş çapı ve Su/EG karışım oranlarının çok az değerinde etkilediği sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak su giriş sıcaklığı ve plaka malzeme türlerinin basınç düşüm değerlerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Soğutma plakası optimizasyonunda, $\dot{V}$, T_g , D_i ve θ bağımsız değişken parametreleri için uygulanan optimizasyon işlemi sonucunda optimum performans değerleri sırasıyla, 0,5 L/dk, 11,16 °C, 4,47 mm ve 1,49 mm olarak hesaplanmıştır.



KAYNAKÇA

- Abdulqader, A. A. ve Jaffal, H. M. (2024). *An experimental study to evaluate the performance of variable-width channel cold plates for cooling rectangular Li-ion batteries*. International Journal of Thermofluids, 24.
- Alınca, Z. N. (2023). *Optimization and comparison of the liquid cooling plate used in the electric vehicle battery with different coolants as water and ethylene glycol-water solutions*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Alkrush, A. A., Salem, M. S., Abdelrehim, O. ve Hegazi, A. A. (2024). *Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions*. International Journal of Refrigeration.
- Amalesh, T., Narasimhan, N. L. ve Reddy, G. R. (2023). *Numerical and experimental studies on novel minichannel cold plates for lithium-ion battery thermal management*. Journal of Energy Storage, 73, 109167.
- Atılğan Z. (2024). *Elektrikli araçlar için lityum iyon batarya paketinin termal yönetimi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Bao, Y. ve Shao, S. (2023). *Numerical study on ultrathin wide straight flow channel cold plate for Li-ion battery thermal management*. Journal of Energy Storage, 64, 107263.
- Belwadi, Z. A. ve Akula, R. (2025). *Design of a PCM-based thermal management system for cylindrical Li-ion battery using topology optimization*. Applied Thermal Engineering, 270.
- Blain L. (2022). New Atlas Energy. https://newatlas.com/energy/rondo-heat-battery-brick-toaster/#gallery:4?itm_source=newatlas&itm_medium=article-body.
- Blinov, A., Vinnikov, D. ve Lehtla, T. (2011). *Cooling Methods for High-Power Electronic Systems*. Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering, 29(1), 79-86.
- Boyd. (2023). *Boyd Introduction to Thermal Management: Keeping Devices Cool*. <https://www.boydcorp.com/blog/thermal-management-introduction.html>.
- Bulut E. (2022). *Elektrikli araçlarda batarya termal yönetim sistemlerinin optimum tasarımı*. (Doktora tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Casano, G. ve Piva, S. (2015). *Air-Water Cooling System for Switch-Mode Power Supplies*. Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 05(03), 66-75.
- Chen, Z., Hong, X., Huo, Z. ve Ruan, D. (2024a). *Enhancing lithium-ion battery cooling efficiency through leaf vein-inspired double-layer liquid cooling plate design*. Journal of Energy Storage, 88.

- Chen, C., Qian, Y., Xu, G., Zhang, Q. ve Lu, P. (2024b). *Numerical investigation on thermal management performance of soft packing Li-ion batteries with oblique multi-channel cold plates*. Renewable Energy, 234.
- Chen, X., Yan, S., Wang, D., Han, J., Guan, Z., Yin, Y., ... Dong, H. (2025). *A novel bionic lotus leaf channel liquid cooling plate for enhanced thermal management of lithium-ion batteries*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 236.
- Choi, H., Hong, J., Lee, S., Kim, D. ve Lee, H. (2024). *A novel battery thermal management system for cooling/preheating utilizing a polymer intercell heat exchanger with phase change material*. Applied Thermal Engineering, 238.
- Corechem Essential Chemistry. (1981). 14 Ekim 2025 tarihinde <https://corecheminc.com/ethylene-glycol-water-mixture-properties/> adresinden erişildi.
- Deng, Y., Feng, C., E, J., Zhu, H., Chen, J., Wen, M. ve Yin, H. (2018). *Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review*. Applied Thermal Engineering.
- Dilbaz F. (2023). *Lityum iyon bataryaların termal yönetimi için sayısal çalışmalar*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Doğdu M. F. (2013). *Termoelektrik soğutucuların performansına doğrudan temaslı ısı değiştiricilerin etkilerinin deneysel incelenmesi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Eren İ. (2004). *Patateslerin osmotik dehidrasyonunun "Response Surface" metodu kullanılarak optimizasyonu*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Fallahtafti, N., Hosseini, F., Hadad, Y., Rangarajan, S., Hoang, C. H. ve Sammakia, B. (2024). *Experimental characterization and geometrical optimization of a commercial two-phase designed cold plate*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 155, 1.
- Feng, S., Shan, S., Lai, C., Chen, J., Li, X. ve Mori, S. (2024). *Multi-objective optimization on thermal performance and energy efficiency for battery module using gradient distributed Tesla cold plate*. Energy Conversion and Management, 308, 118383.
- Fok, P. J. Y., Liu, P., Kandasamy, R. ve Wong, T. N. (2024). *Thermal performance of cold plates with novel pin-fins designed using Bézier curves*. International Journal of Thermal Sciences, 195, 108611.
- Güler Aslanbay B. ve İmamoğlu E. (2020). Bilgisayar destekli simülasyon ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 42-46.
- Hwang, F. S., Confrey, T., Reidy, C., Picovici, D., Callaghan, D., Culliton, D. ve Nolan, C. (2024). *Review of battery thermal management systems in electric vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

- Jin, L. W., Lee, P. S., Kong, X. X., Fan, Y. ve Chou, S. K. (2014). *Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management*. Applied Energy, 113, 1786-1794.
- Kaba, M. Y., Kalkan, O. ve Celen, A. (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar ve termal yönetim sistemlerinin incelenmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(4), 1119-1136.
- Kalkan, O. (2021). *Elektrikli araç bataryalarının farklı metodlarla soğutulmasının deneysel ve sayısal analizi*. (Doktora tezi), Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Kalkan, O. (2023). *Multi-objective optimization of a liquid metal cooled heat sink for electronic cooling applications*. International Journal of Thermal Sciences, 190.
- Kalkan, O., Celen, A. ve Bakirci, K. (2022). *Multi-objective optimization of a mini channeled cold plate for using thermal management of a Li-Ion battery*. Energy, 251, 123949.
- Kalkan, O., Celen, A., Bakirci, K. ve Dalkilic, A. S. (2021). *Experimental investigation of thermal performance of novel cold plate design used in a Li-ion pouch-type battery*. Applied Thermal Engineering, 191.
- Karagöz M. E. (2023). *FDM (Faz Değiştiren Malzeme) esaslı bir batarya ısı yönetim sisteminin modellenmesi ve farklı parametrelere göre sayısal analizi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sivas.
- Keyinci, S., Ilinčić, P., Tosun, E., Uzun, M., Yakaryılmaz, A. C. ve Ozcanli, M. (2025). *Design and performance analysis of a curved channel liquid cooling system for battery thermal management*. Thermal Science and Engineering Progress, 63.
- Kim, J., Oh, J. ve Lee, H. (2019). *Review on battery thermal management system for electric vehicles*. Applied Thermal Engineering.
- Koç B. ve Kaymak-Ertekin F. (2009). *Yanıt yüzey yöntemi ve gıda işleme uygulamaları*. Gıda, 35(1), 1-8.
- Li, Y., Li, B., Bei, S., Li, L., Zhang, L. ve Hu, M. (2024a). *Thermal management of lithium-ion battery modules optimized based on the design of cold plate with convex pack structure*. Applied Thermal Engineering, 257, 124186.
- Li, H., Chen, L., Zuo, H., Zhang, B. ve Jia, G. (2024b). *Performance enhancement of a battery thermal management system using novel liquid cold plates with micro-channel featuring pin fins*. Energy, 301.
- Li, J., Luo, X., Wang, M., Chen, C., Yang, C., Zhang, Z. ve Xin, G. (2025). *Study of flow and heat transfer characteristics of tandem cold plates for data center cooling*. Case Studies in Thermal Engineering, 73, 106590.
- Lian, Y., Ling, H., Song, G., Gong, K., Fan, C., Wang, F. ve He, B. (2025). *Optimization and thermal performance analysis of direct cooling plates with multi-splitting-*

- merging channels for electric-vehicle battery thermal management*. International Journal of Thermal Sciences, 214.
- Lin, Z., Wang, S., Huo, J., Hu, Y., Chen, J., Zhang, W. ve Lee, E. (2011). *Heat transfer characteristics and LED heat sink application of aluminum plate oscillating heat pipes*. Applied Thermal Engineering, 31(14-15), 2221-2229.
- Ma, D., Pang, L. ve Cao, X. (2024). *Numerical investigation on the effect of porosity aluminum foam on the heat transfer characteristics of a driven cold plate water sublimator*. Applied Thermal Engineering, 250, 123547.
- Ma, K., Wang, J., Wang, Q. ve Mao, Q. (2025). *Numerical simulation of battery thermal management based on ring microchannel cold plate*. International Journal of Thermal Sciences, 210.
- Mahek, M. K., Ramadan, M., Ghazal, M., Riaz, F., Choi, D. S. ve Alkhedher, M. (2025). *Advanced thermal management with heat pipes in lithium-ion battery systems: Innovations and AI-driven optimization*. Next Energy.
- Martin, M. (2024). *Elektrikli araçlarda batarya soğutma plakasının nümerik analizler ile termal yönetimi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Menak R., Karadağ T., Altuğ M. ve Tan N. (2021). *Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemleri üzerine bir derleme çalışması*. Gazi University Journal of Science Part A:Engineering and innovation, 235-259.
- Mubashir, M., Xu, J., Guo, Z., Wang, X., Wang, H., Qiao, F., ... Mei, X. (2024). *Numerical investigation of a novel cold plate design with uniform circular hollow fins for battery thermal management systems*. Applied Thermal Engineering, 237.
- Öztop, M. (2025). *Batarya hücrelerine eklenen kanatçıkların elektrikli araç termal yönetim sistemi performansına etkisinin incelenmesi*. (Doktora tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Pambudi, N. A., Sarifudin, A., Firdaus, R. A., Ulfa, D. K., Gandidi, I. M. ve Romadhon, R. (2022). *The immersion cooling technology: Current and future development in energy saving*. Alexandria Engineering Journal.
- Patel, J. R. ve Rathod, M. K. (2020). *Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries*. Journal of Power Sources.
- Perry J. (2018). *İndustry Developments in Thermal Management of Electric Vehicle Batteries*. 9 Kasım 2025 tarihinde <https://www.qats.com/cms/2018/10/12/industry-developments-in-thermal-management-of-electric-vehicle-batteries/> adresinden erişildi.
- Patel P. (2020). *IEEE Spectrum Building Power Electronics With Microscopic Plumbing Could Save Enormous Amounts of Money*. <https://spectrum.ieee.org/codesigning-electronics-and-microfluidics-for-a-cooling-boost>.

- Pu, J. H., Li, R. C., Li, Y., Zhang, H., Du, M., Hua, N. ve Zhang, X. K. (2024). *The novel stereoscopic cooling plate designs and performance analysis for battery thermal management systems*. Applied Thermal Engineering, 257.
- Sarchami, A., Kiani, M., Najafi, M. ve Houshfar, E. (2023). *Experimental investigation of the innovated indirect-cooling system for Li-ion battery packs under fast charging and discharging*. Journal of Energy Storage, 61.
- Sevugan, P. A., Pradeep, M., Krishnaswamy, A. ve Karunamurthy, K. (2022). *Battery Thermal Management System for electric vehicles using Phase Change Materials*. Materials Today: Proceeding (C. 51, ss. 1604-1611).
- Silva, C. A., Vilaça, R., Pereira, A. ve Bessa, R. J. (2024). *A review on the decarbonization of high-performance computing centers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Şen Y., (2017). *Vakum pişirmenin sert şeker kalite karakteristikleri üzerine etkisinin belirlenmesi ve işlem parametrelerinin optimizasyonu*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Tang, S., Wang, J., Song, Z., Cheng, J., Fan, X. ve Li, W. (2025). *Topology optimization and numerical analysis of cold plates under regional heat generation of Lithium-Ion battery*. Thermal Science and Engineering Progress, 64.
- Thermtest Instruments. (2005) <https://thermtest.com/thermal-resources/materials-database> adresinden erişildi.
- Tokgöz N. ve Süfer Ö. (2023). Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine genel bir bakış. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2392-2408.
- Tong, B., Shi, J., Cao, M., Xuan, W., Chen, J., Jin, K., ... Wang, Q. (2025). *Comprehensive comparison study on battery thermal management modules with indirect and direct liquid cooling*. Applied Thermal Engineering, 268.
- Tören, M. ve Mollahasanoğlu, H. (2022). Termoelektrik soğutma sisteminin alternatif transformatör soğutma sistemi olarak performansı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 498-505.
- Voiturenet. (2024). Comment fonctionnent les systèmes de refroidissement des batteries de voitures électriques. 9 Kasım 2025 tarihinde <https://www.voiturenet.ma/en/blog/comment-fonctionnent-les-systemes-de-refroidissement-des-batteries-de-voitures-electriques> adresinden erişildi.
- Wang, H., Gan, Y., Luo, Q., Li, Y. ve Feng, J. (2025). *A study on the effect of channel structures on flow and heat transfer performance of cold plate with double-layer serpentine microchannel*. Applied Thermal Engineering, 259.
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S. ve Lai, Y. (2019). *A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management*. Energy Conversion and Management.

- Yang, H., Xu, W., Huang, Y., Xu, C., Hu, Z., Yan, J., ... Bo, Z. (2025a). *A hybrid battery thermal management structure with partial embedding of finned liquid cooling plate into phase change material*. Journal of Energy Storage, 134, 118254.
- Yang, K., Shen, H., Li, K., Fang, L., Huang, J., Zhang, R., ... Xin, G. (2025b). *Foam structured graphene film with ultralow interfacial thermal resistance for liquid cooling thermal management*. Applied Thermal Engineering, 279, 127688.
- Yu, H., Zhu, X., Ma, X. ve Yan, H. (2025). *Cooling performance analysis and sensitivity analysis of thermoelectric cooling for an 18650 battery pack thermal management*. Case Studies in Thermal Engineering, 72.
- Zhang, Yifan, Fan, Y., Liu, Z. ve Liu, W. (2023). *Experimental and numerical study on two-phase minichannel cold plate for high-power device*. Applied Thermal Engineering, 230, 120704.
- Zhang, Ying, Wang, Z., Zou, S., Liu, Y., Zhao, S. ve Ke, Z. (2025). *A new bottom and radial coupled heat dissipation model for battery thermal management system*. Applied Thermal Engineering, 258.
- Zhao, Ding, Lei, Z. ve An, C. (2023). *Research on battery thermal management system based on liquid cooling plate with honeycomb-like flow channel*. Applied Thermal Engineering, 218.
- Zhao, Dongliang ve Tan, G. (2014). *A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications*. Applied Thermal Engineering.
- Zhao, Y., Zhang, X., Yang, B. ve Cai, S. (2024). *A review of battery thermal management systems using liquid cooling and PCM*. Journal of Energy Storage, 76, 1-18.
- Zhong, Q., Garg, A., Gao, L., Garg, A., Panda, B. ve Wei, K. (2025). *Topology-optimized liquid cooling plates for low-temperature battery preheating: A multi-objective thermal management strategy*. Thermal Science and Engineering Progress, 67.
- Zhou, F., Zhao, Y., Yin, E., Hu, D. ve Li, Q. (2024). *Effects of vibration conditions on the heat transfer and flow characteristics of cold plates*. Applied Thermal Engineering, 248, 123100.
- Zhou, L., Zhang, S., Jain, A. ve Li, X. (2025). *Recent advances in indirect liquid cooling of lithium-ion batteries*. Journal of Energy Storage.
- Zhu, Y., Pan, L., Li, Y. ve Ren, J. (2025). *Advances in flow pattern design of liquid-cooled components for battery thermal management system*. Future Batteries, 5, 100018.

ÖZ GEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nagihan ÇEKİRGE

Eğitim Bilgileri:

Lisans: Erzincan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

Akademik Çalışmalar:

5. Uluslararası Üsküdar Bilimsel Araştırmalar Kongresi’nde “Serpantin Kanallı Soğutma Plakalarının Deneysel ve Sayısal Termohidrolik Analizi” isimli bildiri metni yayınlanmıştır.

