



**ISI BORULU ELEKTRONİK SOĞUTUCUYA  
TERMOELEKTRİK ENTEGRASYONUNUN  
DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Mehmet Emin ÖZTÜRK**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**2025**

(Her hakkı saklıdır.)

**T.C.**  
**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ISI BORULU ELEKTRONİK SOĞUTUCUYA TERMOELEKTRİK**  
**ENTEGRASYONUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Mehmet Emin ÖZTÜRK**

**Danışman:** Doç Dr. Emre MANDEV

**ERZURUM, 2025**

T.C.  
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

---

**ISI BORULU ELEKTRONİK SOĞUTUCUYA TERMoeLEKTRİK  
ENTEGRASYONUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Emre MANDEV danışmanlığında Mehmet Emin ÖZTÜRK tarafından hazırlanan bu çalışma 14.12.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** kabul edilmiştir.

|                  |                                                                   |                   |
|------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Danışman:</b> | Doç. Dr. Emre MANDEV<br><i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>        | <i>İmza</i> ..... |
| <b>Üye:</b>      | Dr. Öğr. Üyesi Murat CEYLAN<br><i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i> | <i>İmza</i> ..... |
| <b>Üye:</b>      | Dr. Öğr. Üyesi Orhan YILDIRIM<br><i>Atatürk Üniversitesi</i>      | <i>İmza</i> ..... |

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

**Prof. Dr. İlker KAZAZ**  
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Erzurum Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2024/010 numaralı proje ile desteklenmiştir.

## ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etik ilkelere uygun davrandığımı ve tezin hazırlanması sürecinde üretken yapay zekâ programlarından, içeriğin ve sonuçların özgünlük sorumluluğunun tarafıma ait olması ve çalışmanın bilimsel niteliğini etkilemeyecek düzeyde, yalnızca yardımcı bir araç olarak sınırlı düzeyde destek alındığını beyan ederim.

14.12.2025

İmzası

Mehmet Emin ÖZTÜRK

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının fikrinin olgunlaşması, yöntemsel çerçevesinin şekillenmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi süreçlerinde, yönlendirici yaklaşımı ve yapıcı eleştirileriyle bana her zaman yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Emre MANDEV'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma kapsamında deneysel tasarım, yöntem geliştirme ve değerlendirme aşamalarında katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ, Dr. Öğr. Üyesi Murat CEYLAN ve Arş. Gör. Burak MURATÇOBANOĞLU'na değerli görüşleri ve destekleri için teşekkür ederim. Lisansüstü eğitim sürecimde bilgi ve deneyimlerini paylaşılarak katkıda bulunan Prof. Dr. Eyüphan MANAY'a da teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının hayata geçirilmesinde sağladığı destekten dolayı Erzurum Teknik Üniversitesi'ne ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 2024/010) teşekkür ederim.

Tez süreci boyunca sabırları, anlayışları ve motivasyonlarıyla her zaman yanımda olan, manevi desteğiyle güç veren sevgili eşim Namenur'a ve çocuklarım Göktürk ile Umay Bilge'ye minnettarlığımı ifade etmek isterim. Her şartta yanımda duran, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anneme ve babama da gönülden teşekkür ederim. Bu zorlu sürecin her adımında onların varlığı gücümü artırmış ve çalışmaya olan inancımı pekiştirmiştir.

**Mehmet Emin ÖZTÜRK**

## ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

### ISI BORULU ELEKTRONİK SOĞUTUCUYA TERMoeLEKTRİK ENTEGRASYONUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ

Mehmet Emin ÖZTÜRK

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

**Danışman:** Doç Dr. Emre MANDEV

Bu tez çalışmasında, elektronik bileşenlerin soğutulmasına yönelik ısı borulu-kanatçıklı-fanlı referans mimari ile bu yapıya termoelektrik (TE) modül entegrasyonu içeren hibrit mimari, aynı deney platformu üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deney matrisi, ısı yükü 10–20–30–40 W seviyelerinde (H4–H3–H2–H1) ve fan işletiminin 0,48–0,96–1,50–2,16 (F1–F2–F3–F4) kademelerinde sistematik olarak değiştirilmesiyle oluşturulmuş, hibrit senaryolarda TE modül iki farklı besleme seviyesinde (P1: 21,6 W ve P2: 32 W) çalıştırılmıştır. Isıl performans, yalnızca ısı yük yüzey sıcaklığı üzerinden değil, ısı borusunun adyabatik/yoğuşma bölgeleri ile fan giriş-çıkış hava sıcaklıklarını kapsayan çok noktalı termokupl ölçümleri üzerinden değerlendirilmiş ve termal kamera görüntüleri kararlı hal sıcaklık dağılımlarının alan bazlı doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca her iki mimaride soğutma için tüketilen toplam elektriksel güç belirlenmiş ve fan gürültü seviyeleri de ölçülerek analiz edilmiştir. Referans mimaride fan seviyesi artırıldıkça kararlı hal sıcaklığının kademeli olarak düştüğü, ancak bu iyileşmenin azalan marjinal fayda karakteri sergilediği görülmüştür. Hibrit mimaride TE modülün devreye alınması, tüm koşullarda yüzey sıcaklığında ani ve keskin bir düşüş oluşturarak aktif soğutmanın tepe sıcaklık bastırma kabiliyetini doğrulamıştır. Buna karşın besleme gücünün P1'den P2'ye yükseltilmesi, tüketimi artırmasına rağmen sıcaklık eğrilerinde anlamlı bir ilave iyileşme üretmemiştir. Enerji-akustik boyut birlikte ele alındığında, gürültü seviyesinin esas olarak fan kademesi tarafından belirlendiği, TE entegrasyonunun ise doğrudan yeni bir gürültü kaynağı oluşturmada, aynı/benzer sıcaklık hedeflerine daha düşük fan seviyelerinde erişmeyi mümkün kılabildiği gösterilmiştir (örnek karşılaştırma: referans H1F4 noktasında 59,31 °C için 65,72 dBA, hibrit H1F1P1 noktasında 57,26 °C için 51,88 dBA). Bu çerçevede çalışma, termal performans-enerji tüketimi-fan gürültüsü eksenlerinde, uygulama hedeflerine bağlı olarak referans ya da hibrit mimarinin hangi işletim noktalarında daha rasyonel olduğunu nicel biçimde ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Isı borusu, Termoelektrik, Elektronik Soğutma, Fan Gürültüsü, Tepe Sıcaklık Bastırma

## ABSTRACT

MASTER'S THESIS

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMOELECTRIC INTEGRATION IN A HEAT PIPE ELECTRONIC COOLER

Mehmet Emin ÖZTÜRK

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Emre MANDEV

This thesis presents a comparative investigation of a heat-pipe-finned-fan reference cooling architecture and a hybrid architecture integrating a thermoelectric (TE) module for cooling electronic components on the same experimental platform. The experimental matrix was established by systematically varying the heat load at 10–20–30–40 W (H4–H3–H2–H1) and the fan operating levels at 0.48–0.96–1.50–2.16 W (F1–F2–F3–F4); in the hybrid scenarios, the TE module was operated at two different electrical input levels (P1: 21.6 W and P2: 32 W). Thermal performance was evaluated not only based on the heater surface temperature, but also using multi-point thermocouple measurements covering the heat pipe adiabatic/condensation sections and the inlet/outlet air temperatures across the fan, while infrared thermal imaging was employed to validate steady-state temperature distributions in a spatially resolved manner. In addition, the total electrical power consumption for cooling was determined for both architectures, and fan noise levels were measured and analyzed. For the reference architecture, increasing the fan level resulted in a gradual reduction in steady-state temperature; however, the improvement exhibited diminishing marginal returns. In the hybrid architecture, activating the TE module produced an abrupt and pronounced drop in surface temperature under all conditions, confirming the capability of active cooling to suppress peak temperatures. Nevertheless, increasing the TE input from P1 to P2 raised power consumption without providing a meaningful additional improvement in the temperature profiles. When the energy–acoustic aspects were jointly considered, the noise level is governed primarily by the fan operating level, whereas TE integration can enable achieving the same/similar temperature targets at lower fan levels without introducing an additional noise source (in the reference case H1F4, 65.72 dBA was required to maintain 59.31 °C, whereas in the hybrid case H1F1P1, 51.88 dBA was sufficient to maintain 57.26 °C). Within this framework, the study quantitatively identifies the operating points at which the reference or hybrid architecture is more rational, depending on application objectives, across the axes of thermal performance, energy consumption, and fan noise.

**Keywords:** Heat Pipe, Thermoelectric, Electronics Cooling, Fan Noise, Peak Temperature Suppression

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI .....                                                                 | i         |
| TEŞEKKÜR .....                                                                                                             | ii        |
| ÖZET.....                                                                                                                  | iii       |
| ABSTRACT .....                                                                                                             | iv        |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                                                          | v         |
| TABLolar DİZİNİ .....                                                                                                      | vii       |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                                                      | viii      |
| KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ .....                                                                                       | xi        |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                                                      | <b>1</b>  |
| 1.1. Konu ve Kapsam .....                                                                                                  | 1         |
| 1.2. Elektronik Bileşenler için Soğutma Teknolojileri ve Temel Kavramlar.....                                              | 8         |
| 1.3. Isı Borulu-Fanlı Soğutma Sisteminin Seçilme Gerekçesi ve Alternatif<br>Yöntemlerle Karşılaştırmalı Değerlendirme..... | 12        |
| 1.4. Isı Borularının Yapısı, Çalışma Prensibi ve Tipleri .....                                                             | 19        |
| 1.4.1. Isı borularının yapısı.....                                                                                         | 20        |
| 1.4.2. Isı borularının çalışma prensibi .....                                                                              | 23        |
| 1.4.3. Isı borularının tipleri ve sınıflandırma.....                                                                       | 25        |
| 1.5. Termoelektrik Elemanların Çalışma Mantığı ve Termoelektrik Soğutma.....                                               | 26        |
| 1.6. Fan Gürültüsü, Tanımlamalar ve Kavramlar.....                                                                         | 30        |
| <b>2. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>                                                                                            | <b>34</b> |
| 2.1. Isı Borulu Soğutma Sistemleriyle Elektroniklerin Soğutulması .....                                                    | 34        |
| 2.2. Termoelektrik Uygulamalarla Elektroniklerin Soğutulması .....                                                         | 45        |
| 2.3 Isı Borusu ve Termoelektrik Hibrit Sistemlerle Elektroniklerin Soğutulması .....                                       | 50        |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>                                                                                          | <b>57</b> |
| 3.1. Deney Sisteminin Kurulumu .....                                                                                       | 57        |
| 3.2. Deney Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar .....                                                                          | 59        |
| 3.3. Test Bölgesinin Detayları .....                                                                                       | 66        |
| 3.4. Deney Senaryoları ve Deneylerin Yapılışı .....                                                                        | 70        |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>                                                                             | <b>75</b> |
| 4.1. Isı Borulu-Fanlı Soğutucunun Termal Performansı .....                                                                 | 76        |
| 4.2. Isı Borulu ve Termoelektrik Hibrit Soğutma Sisteminin Termal Performansı ...                                          | 83        |
| 4.3. Farklı Soğutma Stratejilerinin Termal Görüntüleme İle Mukayesesi .....                                                | 90        |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4. Soğutucu Fanın Gürültü Seviyesinin Değerlendirilmesi.....                      | 93         |
| 4.5. Soğutma Enerji Tüketimleri ve Karalı Hal Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi ... | 96         |
| <b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>                                                    | <b>101</b> |
| 5.1. Sonuçlar.....                                                                  | 101        |
| 5.2. Öneriler.....                                                                  | 103        |
| <b>KAYNAKÇA .....</b>                                                               | <b>105</b> |



## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.</b> Elektronik Sistemlerde Termal Yönetim Stratejilerinin Sınıflandırma Çerçevesi (Shabany, 2009; Zhang et al., 2021).....             | 9  |
| <b>Tablo 2.</b> Elektronik Soğutma Yöntemlerinin Çalışma Prensibine Göre Sınıflandırılması (Dhumal et al., 2023).....                              | 10 |
| <b>Tablo 3.</b> Soğutma Akışkanı ile Temas Şekline Göre Elektronik Soğutma Yöntemleri (Birbarah et al., 2020; Zhang et al., 2021).....             | 10 |
| <b>Tablo 4.</b> Isı Borusu Uygulamalarında Kullanılan Bazı Çalışma Akışkanları Ve Tipik Çalışma Aralıkları (Byon, 2016). ....                      | 21 |
| <b>Tablo 5.</b> Elektronik Bileşenlerin Soğutulmasında Kullanılan Bazı Isı Borulu Isı Alıcı Tasarımlarının Özellikleri (Gibbons et al., 2021)..... | 44 |
| <b>Tablo 6.</b> Isı Borulu-Fanlı Soğutucu Deney Planı .....                                                                                        | 70 |
| <b>Tablo 7.</b> Isı Borulu-Fanlı ve Termoelektrik Hibrit Sistem Deney Planı .....                                                                  | 72 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.</b> Daha Küçük Bileşenler Elektronikler İçin Ne Anlama Geliyor? (Anonymous, 2019a) .....                                                      | 1  |
| <b>Şekil 2.</b> Elektronik Bileşenlerdeki Düzensiz Sıcaklık Dağılımını Gösteren Bir Termal Görüntü (Anonymous, 2025a) .....                               | 2  |
| <b>Şekil 3.</b> Bir Güç Elektroniği Bileşeninin Gerilim Ve Sıcaklık Sınırları Açısından Güvenli Çalışma Alanı (SOA) (Saucedo-Dorantes et al., 2022) ..... | 3  |
| <b>Şekil 4.</b> Dizüstü Bilgisayarda Kullanılan Tipik Bir Isı Borulu-Fanlı Soğutma Sistemi Örneği (Anonymous, 2019b) .....                                | 5  |
| <b>Şekil 5.</b> Dar Bir Dizüstü Bilgisayar Muhafazası İçine Entegre Edilmiş Isı Borulu-Fanlı Soğutma Sistemi (Anonymous, 2024a) .....                     | 13 |
| <b>Şekil 6.</b> Mikrokanallı Isı Alıcısı Tabanlı Elektronik Soğutma Uygulama Örneği (Anonymous, 2020a) .....                                              | 15 |
| <b>Şekil 7.</b> Yüksek Yoğunluklu Sunucu Ekipmanlarının Daldırmalı Soğutma Havuzu İçinde Çalıştırılması (Anonymous, 2025b) .....                          | 16 |
| <b>Şekil 8.</b> Çarpan Jet Temelli Elektronik Soğutma Uygulama Örneği (Anonymous, 2020b) .....                                                            | 17 |
| <b>Şekil 9.</b> Termal Şok Soğutma İçin Kanatlı Isı Borulu PCM Tabanlı Isı Alıcı (Yang et al., 2018) .....                                                | 18 |
| <b>Şekil 10.</b> Tipik Bir Isı Borusunun Çalışma Prensibi (Anonymous, 2022) .....                                                                         | 19 |
| <b>Şekil 11.</b> Isı Borularında Yaygın Olarak Kullanılan Fital Tipleri (Jouhara et al., 2018) .....                                                      | 22 |
| <b>Şekil 12.</b> Bir Termoelektrik Modülün Şematik Çalışma Prensibi (Ivanov et al., 2019) .....                                                           | 27 |
| <b>Şekil 13.</b> Bir Termoelektrik Modülde Akım Değerine Bağlı Olarak Soğutma Kapasitesi ve COP Değişimi (Anonymous, 2025c) .....                         | 29 |
| <b>Şekil 14.</b> Fan Gürültüsünün Kaynağına Dair Bir Şematik Sınıflandırma (Anonymous, 2025d) .....                                                       | 32 |
| <b>Şekil 15.</b> Gürültü Seviyelerini Değerlendiren Tipik Bir Desibel Ölçeği (Anonymous, 2024b) .....                                                     | 33 |
| <b>Şekil 16.</b> Deney Sistemi ve Ekipmanların Açıklamalı Görseli .....                                                                                   | 59 |
| <b>Şekil 17.</b> Deney Sisteminde Kullanılan TESTO 885 Termal Kamera (Anonim, 2025a) .....                                                                | 61 |
| <b>Şekil 18.</b> Deney Sisteminde Kullanılan LR8402-20 Data Kartı (Anonim, 2025b) .....                                                                   | 61 |

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 19.</b> Deney Sisteminde Kullanılan DC Güç Kaynakları a) Isıl Yük, b) Termoelektrik Eleman ve c) Soğutma Fanları.....                                    | 63 |
| <b>Şekil 20.</b> Deney Sisteminde Kullanılan Testo 425 Sıcak Tel Anemometresi (Anonim, 2025f).....                                                                | 65 |
| <b>Şekil 21.</b> Deney Sisteminde Kullanılan PCE 322A Ses Ölçüm ve Kayıt Cihaz (Anonim, 2025g).....                                                               | 66 |
| <b>Şekil 22.</b> Test Bölgesinin Detayları Açıklamalı Şematik Görsel.....                                                                                         | 68 |
| <b>Şekil 23.</b> Temaslı Ölçüm Termokuplların Yerleşiminin Şematik Gösterimi .....                                                                                | 69 |
| <b>Şekil 24.</b> Soğutma Fanının Güce Bağlı Hava Akış Hızı Karakteristiği.....                                                                                    | 73 |
| <b>Şekil 25.</b> 40 W ve 20 W Isıtma Yükleri için (a) Çalışma ve (b) Soğuma Periyodunda Isıl Yük Yüzey Sıcaklığının Zamana Göre Değişimi .....                    | 79 |
| <b>Şekil 26.</b> 30 W ve 10 W Isıtma Yükleri için (a) Çalışma ve (b) Soğuma Periyodunda Isıl Yük Yüzey Sıcaklığının Zamana Göre Değişimi .....                    | 80 |
| <b>Şekil 27.</b> Isıl Yük, Isı Borusu ve Fan Bölgelerinden Alınan Zamana Bağlı Sıcaklıklar (a) H1F1 (b) H1F4.....                                                 | 81 |
| <b>Şekil 28.</b> Isıl Yük, Isı Borusu ve Fan Bölgelerinden Alınan Zamana Bağlı Sıcaklıklar (a) H4F1 (b) H4F4.....                                                 | 82 |
| <b>Şekil 29.</b> P1 ve P2 TE Tüketim Modlarında 40 W Isıtma Yüğü İçin (a) Çalışma ve (b) Soğuma Periyodunda Isıl Yük Yüzey Sıcaklığının Zamana Göre Değişimi..... | 85 |
| <b>Şekil 30.</b> Isı Borulu ve TE Engtegreli Soğutma Sistemlerinin (a) Çalışma ve (b) Soğuma Periyodunda Isıl Yük Yüzey Sıcaklıklarının Karşılaştırılması.....    | 86 |
| <b>Şekil 31.</b> Isıl Yük, Isı Borusu ve Fan Bölgelerinden Alınan Zamana Bağlı Sıcaklıklar (a) H1F1P1 (b) H1F1P2 .....                                            | 88 |
| <b>Şekil 32.</b> İkincil (TE) Isı Borusu ve Fan Bölgelerinden Alınan Zamana Bağlı Sıcaklıklar (a) H1F1P1 (b) H1F1P2 .....                                         | 89 |
| <b>Şekil 33.</b> Isı Borulu Soğutma Sistem İçin Termal Kamera Görüntülemeleri (a) Gerçek Görüntü (b) Sıcaklık Skalası.....                                        | 90 |
| <b>Şekil 34.</b> Isı Borulu Soğutma Sistem İçin Farklı Deney Koşullarında Kararlı Hal Sıcaklık Dağılımları.....                                                   | 92 |
| <b>Şekil 35.</b> Hibrit Soğutma Sistem İçin Farklı Deney Koşullarında Kararlı Hal Sıcaklık Dağılımları.....                                                       | 93 |
| <b>Şekil 36.</b> Farklı Fan Çalışma Modlarında Maks-Min-Ortalama Olarak Gürültü Düzeyleri (dBA) .....                                                             | 94 |
| <b>Şekil 37.</b> dBA Cinsinden Gürültü Düzeyi Ölçümleri (a) SF (b) F1 (c) F2 (d) F3 (e) F495                                                                      |    |

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 38.</b> Isı Borulu Soğutma Sistemi için Kararlı Hal Sıcaklıklarıyla Toplam Soğutma<br>Tüketimlerinin Mukayesesi .....                | 97 |
| <b>Şekil 39.</b> Hibrit Soğutma Sistemi için Kararlı Hal Sıcaklıklarıyla Toplam Soğutma<br>Tüketimlerinin Mukayesesi .....                    | 98 |
| <b>Şekil 40.</b> Isı Borulu ve Hibrit Soğutma Sistemlerinin Kararlı Hal Sıcaklığı-Soğutma<br>Tüketimi-Gürültü Yönüyle Değerlendirilmesi ..... | 98 |



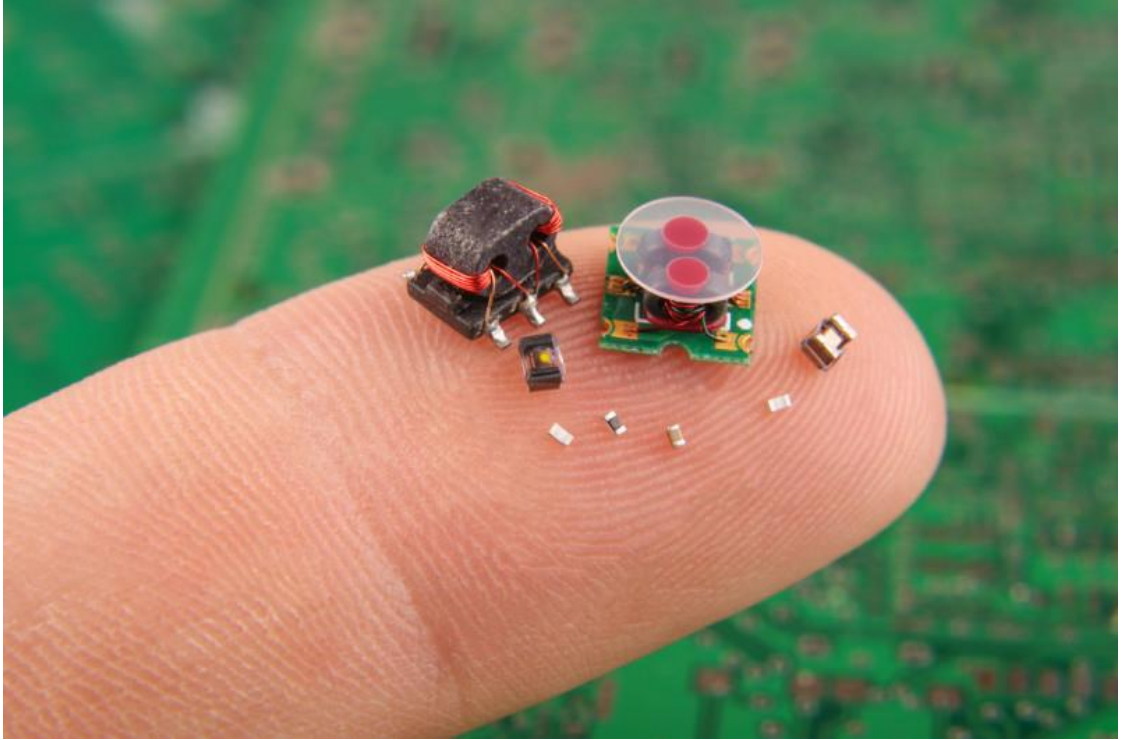
## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

|            |                                 |
|------------|---------------------------------|
| $\dot{m}$  | Kütleli Debi (kg/s)             |
| C          | Santigrat                       |
| CFD        | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| COP        | Isıl Performans Katsayısı       |
| $C_p$      | Özgöl Isı (J/kg.K)              |
| dBA        | A-Ağırlıklı Desibel Seviyesi    |
| GAHP       | Yerçekimi Destekli Isı Borusu   |
| HP         | Isı Borusu                      |
| I          | Akım (A)                        |
| K          | Kelvin                          |
| LED        | Işık Yayan Diyot                |
| °          | Derece                          |
| P          | Elektriksel Güç (W)             |
| PCM        | Faz Değiştiren Malzeme          |
| Q          | Transfer Edilen Isı (W)         |
| $Q_c$      | Çekilen Isı (W)                 |
| $Q_h$      | Atılan Isı (W)                  |
| SOA        | Güvenli Çalışma Alanı           |
| TEC        | Termoelektrik Soğutucu          |
| V          | Gerilim (V)                     |
| W          | Watt                            |
| $\Delta T$ | Sıcaklık Farkı                  |
| $\alpha$   | Seebeck Katsayısı               |

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Konu ve Kapsam

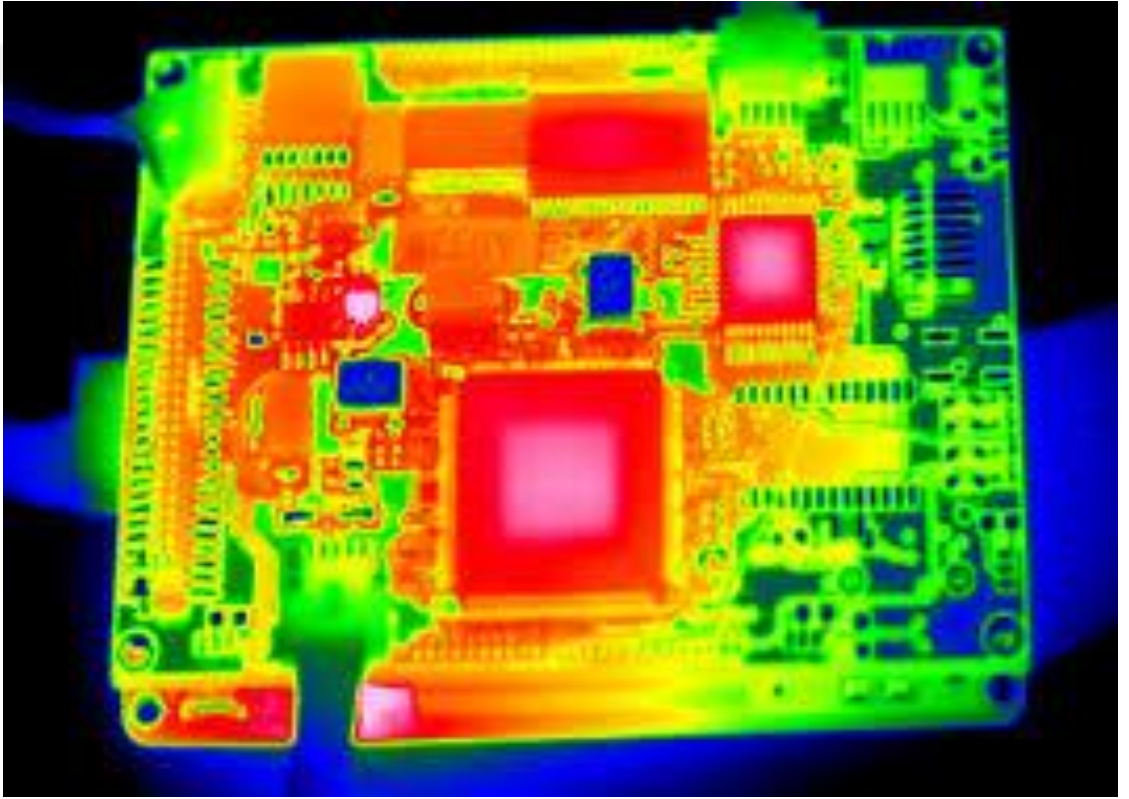
Günümüzde güç elektroniği sürücüler, LED aydınlatma modülleri, RF yükselteçleri, batarya yönetim devreleri, sensör arayüz kartları, farklı türde kontrol/iletişim kartları, mikroişlemciler ve grafik işlem birimleri gibi birçok elektronik bileşen, sınırlı fiziksel hacimler içinde daha fazla iş yapacak şekilde tasarlanmaktadır. Şekil 1’de minyatürleştirmenin ne anlama geldiği sorusunu somutlaştıran bir görsel yer almaktadır. Bileşenlerin küçülmesi (minyatürleştirme), entegrasyonun artması ve daha yoğun paketleme tercihleri; birim hacimde üretilen ısıнын yükselmesine yol açmakta ve termal yönetim konusunu giderek daha kritik hale getirmektedir. Bu nedenle soğutma, elektronik tasarımın sonradan eklenen bir ayrıntısı değil; performansın sürdürülebilirliği, güvenilirlik/ömür, enerji verimliliği ve kullanıcı konforu gibi temel hedefleri doğrudan etkileyen bir mühendislik olarak görülmelidir (Kyeremateng et al., 2017; Mandev, 2022).



**Şekil 1.** Daha Küçük Bileşenler Elektronikler İçin Ne Anlama Geliyor?  
(Anonymous, 2019a)

Elektronik sistemlerde güç tüketimi arttıkça, bu gücün önemli bir kısmı ısı olarak açığa çıkar. Üstelik birçok uygulamada yük sabit değildir; sistem zaman zaman düşük güçte çalışırken, belirli anlarda ani güç artışları gösterebilir (örneğin motor sürücülerde

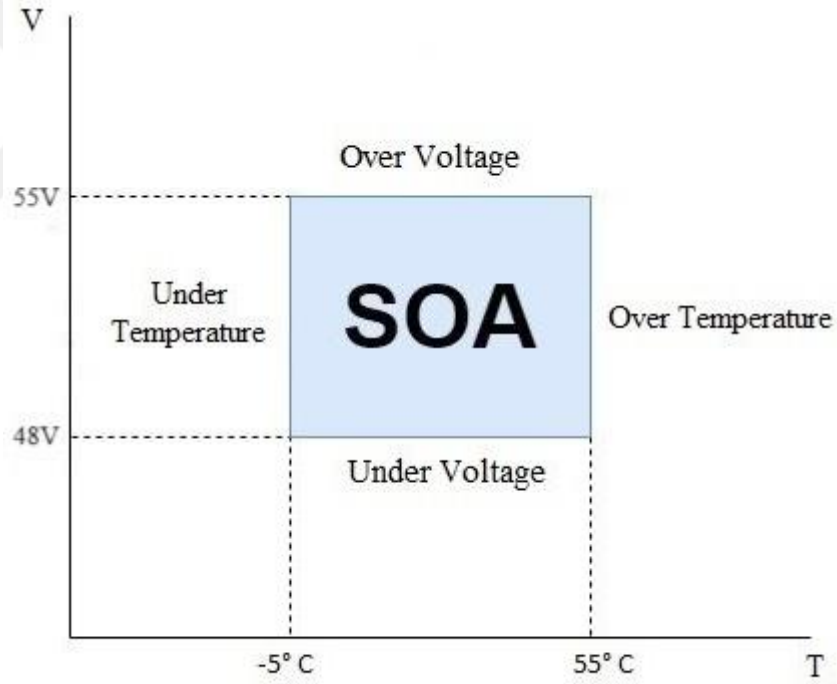
ani tork talebi, RF sistemlerde ani yayın gücü artışı, LED sürücülerde akım yükselmeleri, anahtarlama güç kaynaklarında geçici rejimler gibi). Bu tip durumlarda ısı üretimi kısa sürede yükselir ve bileşen üzerinde yerel sıcaklık odakları (hot-spot) oluşabilir. Bu bağlamda, Şekil 2’de gösterilen termal görüntü, bileşenler arası sıcaklık eşitsizliklerini ve olası hot-spot bölgelerini görsel olarak ortaya koymaktadır. Hot-spot, tüm kartın ortalama sıcaklığından daha yüksek sıcaklığa çıkan küçük bir bölgedir ve çoğu zaman arızaların başlangıç noktasıdır. Bu nedenle etkili bir soğutma çözümü, yalnızca ortalama sıcaklığı düşürmek için değil; aynı zamanda hot-spot sıcaklıklarını bastırmak, sıcaklığın zamana bağlı değişimini kontrol etmek ve bileşenler arasındaki sıcaklık farklarını azaltmak için gereklidir (Dhumal et al., 2023; Yule et al. 2024).



**Şekil 2.** Elektronik Bileşenlerdeki Düzensiz Sıcaklık Dağılımını Gösteren Bir Termal Görüntü (Anonymous, 2025a)

Güç elektroniği bileşenlerinin belirli gerilim ve sıcaklık aralıkları dışında kararlı çalışamaması, tasarımda güvenli çalışma alanı kavramını kritik hale getirmektedir. Bunu açıklayan bir görsel Şekil 3’de sunulmuştur. Sıcaklığın yükselmesi, elektronik sistemlerde iki temel probleme yol açar. Birincisi performansın sınırlanmasıdır: Pek çok elektronik ürün, güvenli çalışma için belirlenmiş maksimum sıcaklık eşiklerine yaklaştığında kendini korumaya yönelik kontrol stratejileri uygular. Bu stratejiler; çıkış gücünü sınırlama, akımı düşürme, anahtarlama frekansını azaltma, çalışma modunu

değiştirme veya belirli fonksiyonları geçici olarak kısma şeklinde olabilir. Son kullanıcı açısından bu durum; beklenen performansın düşmesi, verimin azalması veya sistemin koruma moduna girmesi olarak görünür. İkinci problem ise güvenilirlik ve ömür üzerindeki etkidir; Sıcaklık arttıkça birçok bozunma mekanizması hızlanır. Elektronik bileşenlerde metal hatlarda elektromigrasyon, lehim ve bağlantı bölgelerinde yorulma/çatlama, paketleme malzemelerinde termal genleşme kaynaklı gerilmeler, dielektrik malzemelerde yaşlanma ve arayüz malzemelerinde (termal macun, pad, yapıştırıcı vb.) özellik kaybı gibi süreçler sıcaklığa oldukça duyarlıdır. Bu süreçlerin önemli bir kısmı sıcaklıkla birlikte üstel şekilde hızlanabildiği için, mühendislikte sıcaklık artışı ömrü hızlı biçimde kısaltır yaklaşımı yaygın olarak kabul edilir. Bu nedenle ısı yönetimi; yalnızca anlık güvenliği değil, ürünün uzun dönem kararlılığını ve servis ömrünü belirleyen ana etkenlerden biridir (Patra et al., 2013; Li et al., 2024; Tian et al., 2025).



**Şekil 3.** Bir Güç Elektroniği Bileşeninin Gerilim Ve Sıcaklık Sınırları Açısından Güvenli Çalışma Alanı (SOA) (Saucedo-Dorantes et al., 2022)

Bu noktada tasarım açısından kritik olan, elektronik bileşenlerin maksimum izin verilen sıcaklıklarının (datasheet veya standartlarla tanımlanan limitlerin) altında kalmaktır. Ancak pratikte hedef yalnızca limitin altında kalmak değildir. Daha gerçekçi hedef, tepe sıcaklıkları bu limitlerden anlamlı bir güvenlik payı ile aşağıda tutmaktır.

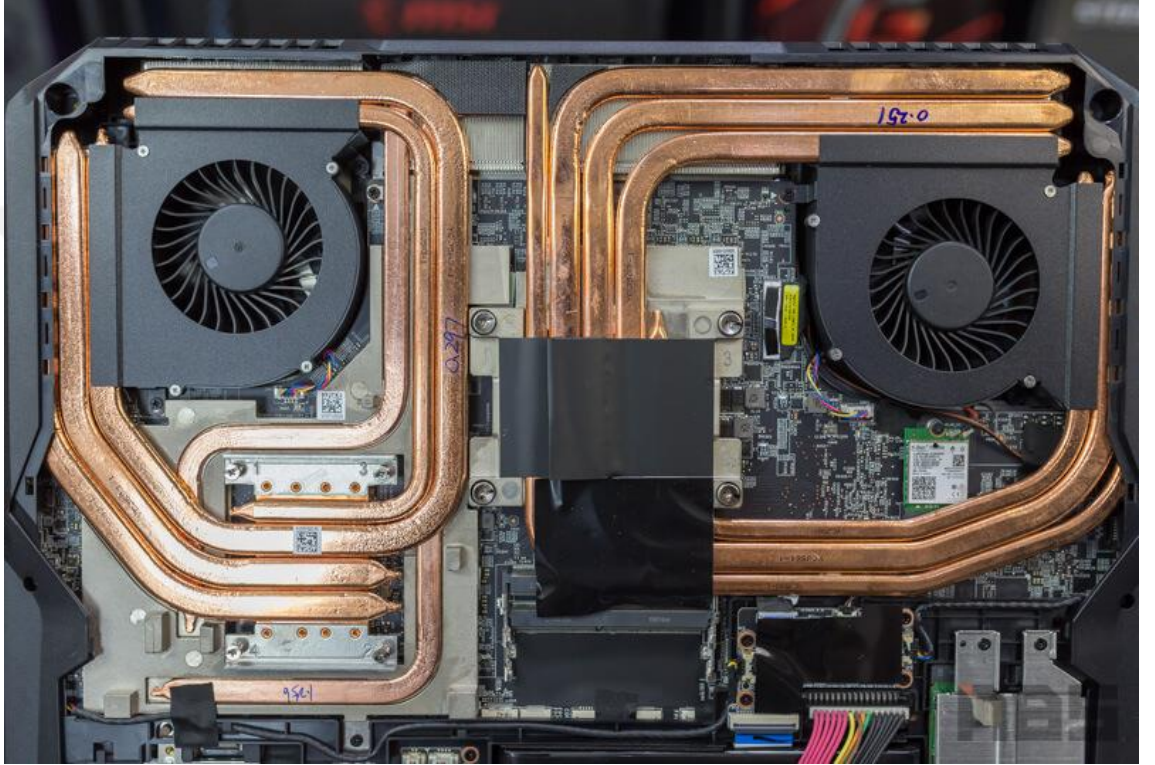
Bunun sağladığı kazanımlar oldukça nettir: (i) koruma mekanizmalarının devreye girme ihtimali azalır, (ii) sıcaklık çevrimlerinin genliği düşerek mekanik yorulma etkileri azalır, (iii) termal arayüz malzemelerinin ve bağlantı bölgelerinin yaşlanma hızı yavaşlar, (iv) ortam sıcaklığı değişimleri, tozlanma, hava kanalı tıkanmaları veya fan performansındaki yaşlanma gibi saha koşullarına karşı sistem daha dayanıklı hale gelir. Kısacası, daha düşük ve daha dengeli sıcaklık profili, daha kararlı çalışma ve daha uzun ömür demektir (Wolff et al., 2021).

Ancak elektronik soğutmada sıcaklığı düşürmenin çoğu zaman bir bedeli vardır. En yaygın çözümlerden biri, hava soğutmalı sistemlerde fan ile zorlanmış taşınımı artırmaktır. Fan hızı arttıkça kanatçıklar üzerinden geçen hava debisi yükselir, ısı transferi artar ve sıcaklık düşer. Bununla birlikte fan hızının artması; daha yüksek güç tüketimi ve çoğu zaman daha yüksek akustik gürültü anlamına gelir (Corsini et al., 2012; Feng et al., 2023; Chen et al., 2024).

Özellikle masaüstü cihazlar, laboratuvar ekipmanları, ofis ortamında kullanılan elektronik sistemler veya sessizliğin kritik olduğu uygulamalarda fan gürültüsü bir konfor problemi haline gelebilir. İç mekan gürültüsüne ilişkin kılavuz değerler, doğrudan bir elektronik cihaz fanı standardı olarak yazılmamış olsa bile, hangi seviyelerin rahatsızlık ve aktivite engeli oluşturabileceğine dair önemli bir çerçeve sunar. Örneğin ABD EPA, iç ortam için yaklaşık 45 dB, dış ortam için yaklaşık 55 dB seviyelerini rahatsızlık/aktivite engelini önlemeye yönelik hedef olarak özetlemektedir. WHO'nun gece gürültüsü kılavuzları ise daha düşük seviyeleri sağlık temelli hedefler olarak ele almakta; 40 dB seviyesini kılavuz değer, 55 dB seviyesini ise ara hedef olarak tartışmaktadır (Anonymous, 1976; Anonymous, 2011). Bu çerçeve, fan kaynaklı gürültünün 60 dBA ve üzeri değerlere çıkabildiği durumlarda konfor açısından neden kritik bir tasarım kısıtı haline geldiğini açıklamaktadır. Ayrıca çevresel gürültünün bilişsel fonksiyonlar üzerindeki olumsuz etkilerine dair sistematik derlemeler de, uzun süreli maruziyetin dikkat ve bilişsel performans gibi alanlarda olumsuz sonuçlarla ilişkilendirilebildiğini göstermektedir (Thompson et al., 2022; Hahad et al., 2025).

Isı borulu-fanlı soğutma sistemleri bu çerçevede güçlü bir referans çözüm sunmaktadır. Şekil 4'de bir diz üstü bilgisayar üzerinde kullanılan bir ısı borulu-fanlı soğutma sistemi örneği gösterilmiştir. Isı borusu, faz değişimi temelli yapısı sayesinde ısıyı pasif olarak taşıyabilen, yüksek etkin ısıl iletkenlik gösterebilen bir elemandır; böylece küçük bir bölgede yoğunlaşan ısıyı daha geniş bir alana yayarak kanatçıklar

üzerinde daha etkin ısı atımına katkı sağlayabilir. Elektronik soğutmada ısı borularının yüksek etkin ısıl iletkenlik, harici enerji gerektirmeden ısı transferi, kompakt geometriye uyum gibi avantajlarla yaygın kullanıldığı literatürde vurgulanmaktadır. Isı borusunun pasif olması, ek enerji tüketimi oluşturmaması açısından da önemlidir; enerji tüketiminin ana belirleyicisi çoğunlukla fan olur. Bununla birlikte fan, zorlanmış taşınımı sağladığı için kaçınılmaz biçimde gürültü üretir ve sistem tasarımında sıcaklığı düşürme ile gürültüyü azaltma arasında bir denge ortaya çıkar.



**Şekil 4.** Dizüstü Bilgisayarda Kullanılan Tipik Bir Isı Borulu-Fanlı Soğutma Sistemi Örneği (Anonymous, 2019b)

Bu noktada, ısı borulu soğutma sistemine termoelektrik (Peltier) bir elemanın entegre edilmesi ilgi çekici bir alternatif veya tamamlayıcı yaklaşım sunmaktadır. Termoelektrik soğutma, genel olarak yüksek verimli bir yöntem olarak kabul edilmez; çünkü çoğu çalışma noktasında COP değeri sınırlıdır ve sisteme ek bir elektriksel güç yükü getirir. Buna rağmen termoelektrik elemanlar; dönen parça içermemesi, titreşimsiz çalışması, prensipte sessiz olması ve yerel sıcaklık kontrolü sağlayabilmesi gibi avantajlar nedeniyle elektronik soğutmada potansiyel taşır (Muratçobanoğlu et al., 2024; Muratçobanoğlu et al., 2025). Termoelektrik elemanın enerji dengesi gereği, sıcak tarafta atılması gereken ısı çekilen soğutma yükü ile termoelektrik elemana aktarılan gücün toplamı şeklinde artar; bu durum soğutma performansını artırırken toplam güç tüketimini

yükseltebileceğini gösterir. Ayrıca termoelektrik soğutucularda (TEC) soğutma kapasitesinin  $\Delta T$  ile değiştiği bilgisi, entegrasyonun her koşulda aynı faydayı vermeyeceğini, sistem düzeyinde değerlendirme gerektiğini ortaya koyar.

Bu bölümde tartışılan problemler bağlamında araştırma şu sorulara odaklanmaktadır; Isı borulu-fanlı bir soğutma sistemine termoelektrik bir elemanın entegrasyonu, elektronik bir bileşenin sıcaklık kontrolünü hangi düzeyde iyileştirmekte; bu iyileştirme enerji tüketimi ve akustik gürültü açısından nasıl bir karşılık oluşturmaktadır?

Bu doğrultuda çalışmanın temel amacı, termoelektrik eleman entegrasyonunun termal performansa katkısını bütüncül bir bakış açısıyla deneysel olarak ortaya koymaktır. Bu genel amaca bağlı olarak çalışmanın hedefleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Isı borulu-fanlı bir soğutma sisteminde elektronik bileşen sıcaklığının farklı güç seviyelerinde nasıl değiştiğini belirlemek ve termoelektrik entegrasyonun sıcaklık düşüşü etkisini nicel olarak değerlendirmek.
2. Mevcut sistem ile termoelektrik entegrasyonlu yapının toplam soğutma gücü tüketimini karşılaştırarak; termal iyileşme nedeniyle sağlanan kazanımlar ile tüketilen ek gücün birlikte değerlendirilmesini sağlamak.
3. Termal performansın fan devri ile ilişkisini inceleyerek, sıcaklık kontrolünün akustik gürültü üzerindeki etkisini değerlendirmek ve kullanıcı konforu açısından sonuçlarını tartışmak.

Bu çerçevede tez kapsamında, elektronik bir bileşeni temsil eden ısı kaynağı farklı güç seviyelerinde çalıştırılmış ve ısı borulu-fanlı bir soğutma sistemi ile soğutularak sistemin referans termal performansı ortaya konmuştur. Böylece termoelektrik eleman eklenmeden önce; ısı kaynağından ısı borusuna, oradan da kanatçıklar ve hava akışı üzerinden çevreye ısının taşınma/uzaklaştırılma karakteri belirlenmiş; farklı çalışma koşullarında sıcaklıkların nasıl değiştiği, tepe sıcaklıkların hangi düzeylerde olduğu ve sistemin hangi bileşenlerinin performansı sınırladığı anlaşılmaya çalışılmıştır. Ardından aynı düzenek üzerine bir termoelektrik eleman entegre edilerek, bu entegrasyonun soğutma mekanizmasına ve ısı yayılımına etkisi karşılaştırmalı biçimde incelenmiş; böylece sistemin sıcaklık düşüşü davranışı ve termoelektrik elemanın termal yönetim potansiyeli değerlendirilmiştir.

Deneyler sırasında ısı kaynağı, ısı borusu ve hava hattının (fan giriş-çıkış bölgesi dahil) çeşitli noktalarından temaslı (termokupl) ve temassız (termal kamera) ölçümler gerçekleştirilmiştir. Temaslı ölçümlerle belirlenen noktalardaki sıcaklıklar sürekli izlenerek zamana bağlı ısı geçişler ve kararlı durum sıcaklıkları ortaya çıkarılmış; termal kamera ölçümleri ile de özellikle ısı kaynağı yüzeyindeki sıcaklık dağılımı gözlemlenmiştir. Bu iki ölçüm yaklaşımının birlikte kullanılması sayesinde, yalnızca tek bir noktadaki sıcaklık değil, sıcaklığın sistem üzerinde nasıl dağıldığı, hangi bölgelerde yoğunlaştığı ve entegrasyon sonrası bu dağılımın nasıl değiştiği daha güvenilir bir şekilde yorumlanabilmektedir.

Buna ek olarak, soğutma sisteminin kullanıcı deneyimi açısından kritik bir çıktısı olan fan kaynaklı akustik gürültü seviyesi ölçülerek, elde edilen termal iyileştirmenin konfor boyutundaki karşılığı da analiz edilmiştir. Böylece çalışma, klasik olarak yalnızca daha düşük sıcaklık hedefiyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda gürültü seviyesinin hangi çalışma koşullarında hangi düzeylere çıktığını ve termoelektrik entegrasyonunun bu tabloyu nasıl etkileyebileceğini de görünür kılmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle uzun süreli kullanım senaryolarında akustik konforun tasarım kısıtı haline geldiği elektronik ürünler açısından anlamlı bir değerlendirme zemini sunmaktadır.

Termoelektrik entegrasyonunun, tepe sıcaklıkları belirgin biçimde düşürebileceği öngörülmekle birlikte, bu kazanımın sistem düzeyinde bir maliyeti olacağı kabul edilmiştir. Nitekim termoelektrik eleman, soğutma etkisini oluşturabilmek için ek elektrik gücü talep etmekte ve bu durum toplam güç tüketiminde artışa yol açabilmektedir. Dolayısıyla entegrasyonun gerçek katkısı, yalnızca sıcaklık düşüşü ile değil, bu düşüşün hangi ek enerji maliyetiyle sağlandığı ve sistemin genel verimliliğine etkisi ile birlikte değerlendirilmelidir. Bu çalışmada güç tüketimi perspektifi, termoelektrik elemanın sisteme getirdiği ek yük ile birlikte ele alınmıştır. Öte yandan, entegrasyonla elde edilen daha düşük sıcaklık seviyelerinin önemli bir sistem avantajı doğurabileceği görülmüştür; Termoelektrik eleman kullanımı ile ısı kaynağı sıcaklığı daha düşük seviyelerde tutulabildiğinde, ısı borusu tarafındaki fanın daha düşük hızlarda çalıştırılabilmesi mümkün hale gelecektir. Böylece fan kaynaklı gürültünün azaltılması yönünde umut vadeden bir kazanım elde edilebilir. Bu nokta, termoelektrik elemanın tek başına verimli bir soğutucu olmaktan ziyade, sistemde fan hızını düşürmeye izin veren bir tamamlayıcı/dengeleyici eleman olarak konumlandırılabilceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak bu tez, yalnızca geliştirilmiş soğutma verimini göstermekle yetinmeyip; termoelektrik entegrasyonun termal performans, toplam enerji tüketimi ve akustik gürültü eksenlerinde oluşturduğu etkileri birlikte ele alarak, aralarındaki ilişkiyi incelemeyi amaçlamaktadır.

## **1.2. Elektronik Bileşenler için Soğutma Teknolojileri ve Temel Kavramlar**

Elektronik sistemlerde termal yönetim, çoğu zaman yalnızca hangi soğutucunun seçileceği sorusuna indirgenen bir mühendislik uygulaması gibi görülse de, gerçekte bunun çok daha geniş ve bütüncül bir tasarım alanına karşılık geldiği bilinmektedir. Bir elektronik bileşenin güvenilirliği, performansı ve ömrü doğrudan çalışma sıcaklığıyla ilişkilidir; sıcaklığın kontrol altına alınamadığı durumlarda performans sınırlamaları, verim kayıpları, malzeme yorulması ve nihayetinde sistem arızaları ortaya çıkabilir. Bu nedenle termal yönetim, yalnızca bir donanım ekleme meselesi değil, mikro ölçekte çip seviyesinden makro ölçekte sistem mimarisine kadar uzanan çok katmanlı bir tasarım yaklaşımını gerektirir.

Bu noktada elektronik sistemlerde soğutmanın özü, yalnızca ısıyı düşürmek değil; ısı üretiminin gerçekleştiği noktadan çevreye kadar uzanan bir ısıl yolun bilinçli bir şekilde tasarlanmasıdır. Bu yol kabaca; ısının önce bileşen içinde üretilmesi, daha sonra paketlenme malzemeleri üzerinden ilerlemesi, termal arayüz ile diğer bileşenlere aktarılması, bir ısı yayıcı ya da taşıyıcı yapı üzerinde dağılması ve son olarak havaya veya sıvıya geçmiş halde çevreye bırakılması adımlarından oluşur. Bu zincirde yer alan her adım; malzeme seçimi, geometrik kısıtlar, yüzey pürüzlülüğü, temas basıncı veya akışkan özellikleri gibi parametrelere bağlı olarak; toplam sıcaklık artışına katkıda bulunur. Dolayısıyla tasarım problemi çoğu zaman tek bir bileşen seçimiyle çözülebilecek bir konu değildir; bunun yerine seri ve paralel ısıl dirençlerden oluşan bütünleşik bir yapının optimize edilmesiyle ilgilidir. Bu yaklaşım literatürde elektronik soğutma disiplininin temel bakış açılarından biri olarak kabul edilir (Amer and Abbas, 2025).

Pratikte sıcaklık, yalnızca kullanılan soğutucunun kapasitesine bağlı değildir; ısının nerede üretildiği, hangi malzemelerden geçtiği, bileşenlerin nasıl konumlandığı ve cihazın ısıyı çevreyle nasıl etkileşime soktuğu gibi birçok faktör tarafından belirlenir. Elektronik soğutma teknolojileri de bu çok katmanlı yapıya bağlı olarak farklı fiziksel prensiplere dayanır. Bir kısım yöntemler ısının iletimini artırarak yayılım sağlar; bazıları faz değişimine dayalı ısı taşıma prensipleri ile yüksek ısı akılarını yönetir; diğerleri ise

termoelektrik ya da buhar sıkıştırılmalı sistemlerde olduğu gibi ısıyı aktif biçimde pompalayarak sıcaklık farkı yaratır. Tablo 1’de elektronik uygulamalar için soğutma teknolojileri sınıflandırma eksenlerini göre değerlendirilmiş ve uygulama örnekleri sunulmuştur (Zhang et al., 2021).

**Tablo 1.** Elektronik Sistemlerde Termal Yönetim Stratejilerinin Sınıflandırma Çerçevesi (Shabany, 2009; Zhang et al., 2021)

| Sınıflandırma Eksen | Uygulama Örneği                        | Uygulama Açıklaması                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Enerji Kullanımı    | Pasif / Aktif                          | Soğutma performansı büyük ölçüde ortamın termofiziksel özelliklerine bağlıdır. Havadan sıvıya ve iki fazlı çözümlere geçişle ısı taşınım katsayısı ve yönetilebilir ısı akısı artarken; sistem karmaşıklığı, kontrol gereksinimleri ve maliyet de eş zamanlı olarak yükselir.                                              |
| Isı Atılan Ortam    | Hava / Sıvı / İki Fazlı                | Pasif sistemler (ör. ısı borusu, buhar odası) ek güç tüketimi gerektirmeden güvenilirlik ve bakım avantajı sağlarken; aktif sistemler (ör. fan, pompa, termoelektrik modül) daha yüksek soğutma kapasitesi sunabilir fakat enerji tüketimi, gürültü, titreşim ve arıza risklerini artırabilir.                             |
| Faz Durumu          | Tek Fazlı / Faz Değişimli              | Faz değişimli sistemler, gizli ısıdan yararlanarak yüksek ısı akıları, sıcak nokta bastırma ve kompakt entegrasyon açısından önemli avantaj sunar; ancak tasarım doğrulaması ve akış rejimi kararlılığı daha karmaşıktır (Hou et al., 2019).                                                                               |
| Sistem Düzeyi       | Bileşen / Kart / Modül / Kutu / Sistem | Termal yönetim stratejisi, ısının üretildiği seviyeye göre ölçeklendirilmelidir. Yerel sıcak noktalarda bileşen seviyesinde çözümler kritik önem taşırken; yüksek güç yoğunluklarında modül ve sistem düzeyinde bütünlük termal mimariler gereklidir. “Sorun neredeyse çözüm oraya yaklaşır” ilkesi burada belirleyicidir. |

Elektronik soğutma teknolojilerinin değerlendirilmesinde en yaygın başvuru noktalarından biri, soğutma yöntemlerinin enerji kullanımına göre sınıflandırılmasıdır. Bu kapsamda gerçekleştirilen bir sınıflandırma Tablo 2’de sunulmuştur. Bununla birlikte, özellikle modern yüksek güç yoğunluklu uygulamalarda soğutma performansını etkileyen bir diğer kritik değişken, soğutma akışkanının elektronik bileşenle temas şeklidir. Doğrudan temas eden ve dolaylı temas eden yöntemler arasındaki fark, ısı transfer katsayıları, izolasyon gereksinimleri, uygulama kısıtları ve güvenlik riskleri açısından önemli sonuçlar doğurur. Bu nedenle, soğutma akışkanı ile temas biçimine göre

yapılan sınıflandırma, teknoloji seçimi açısından tamamlayıcı bir bakış açısı sunmaktadır ve bir örneği Tablo 3’te verilmiştir.

**Tablo 2.** Elektronik Soğutma Yöntemlerinin Çalışma Prensibine Göre Sınıflandırılması (Dhumal et al., 2023)

| Çalışma Prensibi | Soğutma Yöntemleri                          |
|------------------|---------------------------------------------|
| Aktif Soğutma    | Zorlanmış Taşınım ile (Hava) Soğutma        |
|                  | Sıvı Soğutma                                |
|                  | Çarpan Jet ile Soğutma                      |
|                  | Sprey Soğutma                               |
|                  | Akışkan Çevrimli Soğutma                    |
|                  | Termoelektrik Soğutma                       |
| Pasif Soğutma    | Doğal Taşınım ile (Hava) Soğutma            |
|                  | Isı Boruları ile Soğutma                    |
|                  | Buhar Odaları ile Soğutma                   |
|                  | Faz Değiştiren Malzemeler (PCM) ile Soğutma |

**Tablo 3.** Soğutma Akışkanı ile Temas Şekline Göre Elektronik Soğutma Yöntemleri (Birbarah et al., 2020; Zhang et al., 2021)

| Soğutma Akışkanına Temas Şekli | Soğutma Yöntemleri                                  |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Doğrudan Temas                 | Hava ile Soğutma                                    |
|                                | Sprey Soğutma                                       |
|                                | Daldırmalı (İmmersiyon) Soğutma                     |
|                                | Püskürtmeli Soğutma                                 |
|                                | Damla Elektroıslatmalı Soğutma (Ahmad et al., 2021) |
| Dolaylı Temas                  | Mikrokanallı Soğutma                                |
|                                | Isı Boruları ile Soğutma                            |
|                                | Buhar Odaları ile Soğutma                           |
|                                | Termoelektrik Soğutma                               |
|                                | Faz Değiştiren Malzemeler (PCM) ile Soğutma         |

Elektronik soğutma yöntemlerini fiziksel prensiplerine ve akışkanla temas biçimlerine göre sınıflandırmak, konuya düzenli bir giriş sağlar; ancak tasarım açısından

tutarlı bir karşılaştırma yapabilmek için bu sınıflandırmaların, termal yönetimin temel kavramlarıyla desteklenmesi gerekir. Çünkü aynı soğutma yaklaşımı, ısının üretildiği alanın büyüklüğü, ısıl yolun bileşenleri ve çalışma rejiminin zamansal karakteri değiştiğinde çok farklı sonuçlar verebilir. Bu nedenle elektronik soğutmayı anlamlandırmanın ilk adımı, hangi teknoloji? sorusundan önce, sıcaklığı belirleyen büyüklüklerin ve bu büyüklüklerin tasarım kararlarıyla ilişkilerinin netleştirilmesidir.

Termal yönetimde başlangıç noktası ısı yüküdür; ancak belirleyici olan yalnızca uzaklaştırılması gereken toplam ısı miktarı değil, bu ısının hangi alan ve hacimde üretildiğidir. Küçük bir ayak izi üzerinde yoğunlaşan yükler, ısı akısını yükseltir ve ısıyı kısa mesafede güvenli biçimde yayma/aktarma zorunluluğu doğurur. Bu noktada yüksek güç yoğunluğu kavramı, soğutucunun kapasitesinden önce ısıl yolun tüm halkalarını tasarım konusu haline getirir: paketleme ve taban yapısı, arayüz temas kalitesi, ısı yayıcı elemanların geometrisi ve nihayet akışkana aktarım süreci birlikte ele alınmadığında beklenen sıcaklık düşüşleri elde edilmelidir (Murshed et al., 2017).

Bu bütünsel bakışı en iyi özetleyen büyüklüklerden biri ısıl dirençtir; çünkü belirli bir ısı yükünde ortaya çıkan sıcaklık artışını tek bir çerçevede ifade eder. Ancak elektronik sistemlerde ısıl direnç çoğunlukla tek bir değer değildir; arayüz, iletim ve taşınım basamakları seri-paralel bir ağ gibi davranır. Bu nedenle termal tasarım, yalnızca soğutucu seçimi olarak değil; temas/arayüz düzeni, montaj koşulları ve ısıl yol geometrisinin birlikte optimize edilmesi olarak görülmelidir. Ayrıca gerçek uygulamalarda yüklerin zamana bağlı olması nedeniyle, yalnızca kararlı durum değil, geçici rejim davranışı da önemlidir: sistemin ısıl ataleti, güç pikleri altında sıcaklığın yükselme hızını belirler ve tasarımın kritik senaryolardaki başarısını doğrudan etkiler.

Elektronik sistemlerde güvenilirlik açısından öne çıkan bir diğer olgu sıcak nokta (hot-spot) oluşumudur. Yerel güç yoğunlaşmaları veya ısıl yolun yerel zayıflıkları, küçük bölgelerde tepe sıcaklıkların oluşmasına yol açar; bu da çoğu bozunma mekanizmasının tepe sıcaklığa ve sıcaklık gradyentlerine duyarlı olması nedeniyle kritik önemdedir. Bu yüzden bir soğutma çözümünün değerini belirleyen yalnızca ortalama sıcaklığı düşürmesi değil; tepe sıcaklığı azaltması ve sıcaklık dağılımını daha uniform hale getirmesidir (Ebadian and Lin, 2011).

Elektronik soğutma teknolojilerini yerli yerine oturtmanın pratik bir yolu, soğutma işlevini iki ana fonksiyona ayırmaktır: ısıyı yaymak/dağıtmak (spreading) ve

ısıyı taşımak-atmak (transport & rejection). Isıyı yaymak/dağıtmak, kaynağa yakın bölgede yüksek ısı akısını geniş bir alana yayarak yönetilebilir hale getirmeyi hedefler; yüksek iletkenlikli yayıcılar, buhar odaları, uygun yerleşimli ısı boruları ve iyi arayüz teması bu amaca hizmet eder. Isıyı taşımak-atmak ise ısıнын uygun bir bölgeye taşınması ve havaya/sıvıya aktarılması sürecidir; fanlı zorlanmış taşınım, pompalı sıvı dolaşımı veya ısı pompalama tabanlı yaklaşımlar bu aşamada rol alır. Kritik nokta, teknolojilerin bu fonksiyonlar içindeki rolünü doğru okumaktır: yalnızca taşınımı artırmak her zaman tepe sıcaklığı beklenen ölçüde düşürmeyebilir; benzer şekilde bazı aktif yöntemler yerel sıcaklık kontrolü sağlasa da sistemin başka bir halkasında ek yük oluşturabilir.

Sonuç olarak elektronik soğutmada tek bir en iyi yöntemden çok, ısı yükü profili, güç yoğunluğu, paketlenme/arayüz koşulları, enerji bütçesi ve konfor gereksinimi bileşiminde değişen rasyonel seçimler söz konusudur. Bu nedenle değerlendirme, yalnızca sıcaklık seviyeleri üzerinden değil; tepe sıcaklık, sıcaklık uniformluğu, toplam ısı direnç/empedans, geçici tepki, enerji maliyeti ve (fanlı sistemlerde) akustik etki gibi metriklerin birlikte ele alınmasıyla anlam kazanır. Bu yaklaşımı takip eden mantıklı adım, her bir teknoloji ailesinin hangi fonksiyonda güçlü olduğunu, hangi koşullarda sınırlamalarla karşılaştığını ve hangi kullanım senaryolarında en rasyonel çözümü sunduğunu sistematik biçimde ortaya koymaktır.

### **1.3. Isı Borulu-Fanlı Soğutma Sisteminin Seçilme Gerekçesi ve Alternatif Yöntemlerle Karşılaştırmalı Değerlendirme**

Isı borulu ve fanlı soğutma mimarisinin tercih edilmesinin temel gerekçesi, elektronik ürünlerde en yaygın karşılaşılan tasarım kısıtlarıyla uyumlu, olgunlaşmış ve ticari olarak yerleşik bir çözüm sınıfı olmasıdır. Güncel elektronik sistemlerde yalnızca yüksek ısı yükleri değil, aynı zamanda sınırlı hacim, değişken yük profilleri, bakım gereksinimi, maliyet baskısı ve kullanıcı konforu gibi çok boyutlu kriterler birlikte belirleyicidir. Bu çerçevede ısı borusu, faz değişimi temelli mekanizması sayesinde ısıyı kaynağa yakın küçük bir alandan alarak daha geniş bir alana pasif biçimde taşıyabilen bir eleman olarak, sıcak nokta kaynaklı yüksek ısı akısını yönetilebilir seviyelere düşürür. Fan ve kanatçık grubu ise bu ısıнын çevreye aktarılmasını sağlayarak sistemin ısı atım kapasitesini, çalışma koşullarına bağlı olarak ayarlanabilir hale getirir. Bu iki bileşenin birlikte kullanımı, yüksek ısı akısı sorununu yalnızca hava tarafında daha agresif taşınım ile çözmeye çalışmak yerine, önce ısıyı uygun bir alana yaymayı ve sonra çevreye

atmayı hedefleyen daha dengeli bir termal mimari oluşturur. Bu mimarinin dar hacimli taşınabilir cihazlara entegrasyonuna ilişkin bir örnek ise Şekil 5'te gösterilmektedir. Birçok üründe ısı üreten eleman ile ısının çevreye atılabileceği bölge aynı yerde değildir; kimi zaman ısı kaynağı cihazın merkezinde sıkışmış durumdadır, kimi zaman hava giriş ve çıkışları yalnızca belirli kenarlarda toplanmıştır, kimi zaman da mekanik yerleşim nedeniyle ısı atıcı yüzeyler ısı kaynağından uzakta kalır. Bu koşullarda ısı borusu, yalnızca yüksek iletkenlikli bir çubuk gibi davranmaz; faz değişimi sayesinde ısıyı düşük sıcaklık farklarıyla taşıırken aynı zamanda kaynağa yakın bölgede oluşan ısı akısını daha geniş bir ısı atım alanına dağıtarak sıcak nokta kaynaklı zorlanmayı azaltır.



**Şekil 5.** Dar Bir Dizüstü Bilgisayar Muhafazası İçine Entegre Edilmiş Isı Borulu-Fanlı Soğutma Sistemi (Anonymous, 2024a)

Böyle bir yayma ve taşıma etkisi, ısı atıcı yüzeylerin daha homojen çalışmasını sağlar; kanatçıkların bir kısmının boşta kalması veya ısı yükünün küçük bir bölgede

birikmesi gibi istenmeyen durumları sınırlar. Bunun sonucu olarak, aynı ısı atıcı hacimde daha düşük tepe sıcaklıklar hedeflenebilmesi veya benzer tepe sıcaklık seviyelerinde daha düşük hava debisiyle çalışılabilmesi mümkündür. Bu durum, yalnızca enerji tüketimi açısından değil, fanın çalışma karakteri üzerinden gürültü, titreşim ve algılanan konfor üzerinde de belirleyici olur; dolayısıyla ısı borulu ve fanlı mimari, termal hedefleri kullanıcı konforu ve verimlilikle birlikte yönetmek isteyen ticari tasarımlar için güçlü bir referans niteliği taşır. Ek olarak bu yapı, modüler bir tasarım mantığına izin verir: ısı borusu sayısı, yerleşimi ve çapı; kanatçık geometrisi; fan boyutu ve kontrol stratejisi gibi parametreler farklı ürün sınıflarında benzer ilkelerle ölçeklenebilir olduğundan, üreticiler açısından maliyet ve ürün ailesi geliştirme süreçleri de daha yönetilebilir bir çerçevede ilerler (Chen et al., 2016; Tang et al., 2018; Zhou et al., 2019a).

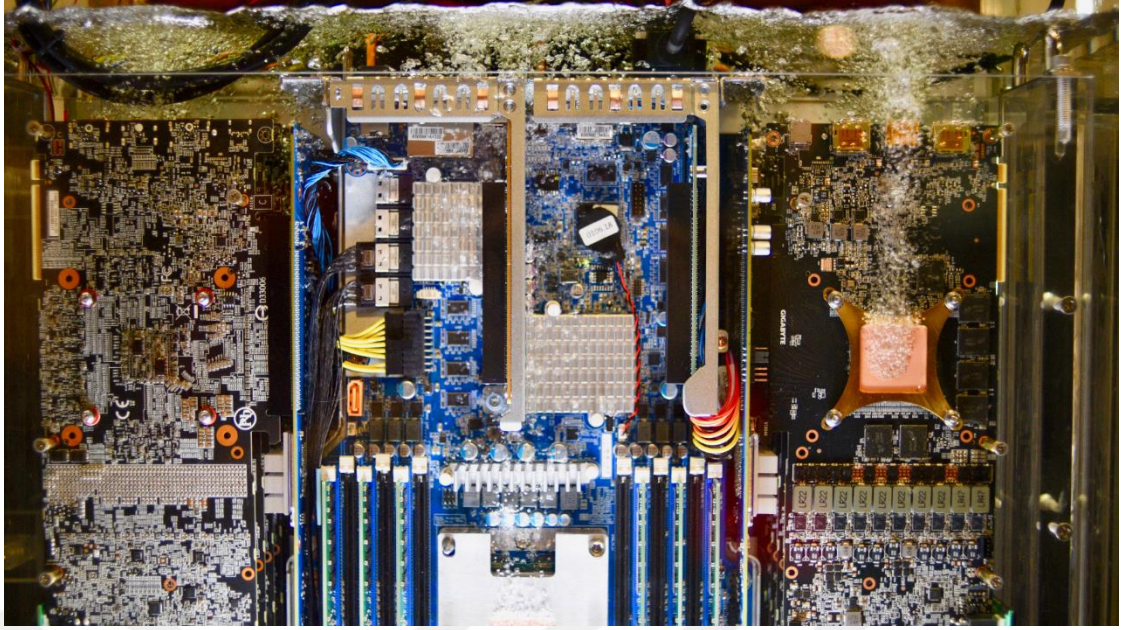
Buna karşılık alternatif yöntemler, özellikle yüksek ısı akılarının uzaklaştırılmasında etkileyici performans potansiyeli sunsa da, bu performans çoğu zaman sistem düzeyi bazı bedellerle birlikte gelir. Mikrokanallı sıvı soğutma, dolaylı temaslı yaklaşımlar içinde yerel ısı transferini yükseltmede öne çıkan çözümlerden biridir; küçük hidrolik çaplar sayesinde akış sınır tabakasının karakteri değişir, taşınım katsayıları artabilir ve yüksek ısı akıları daha düşük yüzey sıcaklıklarıyla yönetilebilir. Ancak mikrokanal yaklaşımının doğası, ısı tasarım ile akışkan devresi tasarımını birbirinden ayırmaz hale getirir. Kanalların basınç kaybı, akışın kanallar arasında dağılımı, giriş koşulları ve ısı yükü altındaki viskozite değişimleri gibi etkiler, yalnızca termal değil hidrolik tasarımın da hassas olmasını gerektirir. Ayrıca kanal boyutları küçüldükçe tıkanma riski, filtrasyon ihtiyacı, bağlantı bölgelerinde sızdırmazlık hassasiyeti ve uzun dönem işletmede tortu birikimi veya korozyon gibi güvenilirlik başlıkları daha kritik hale gelir. Bu nedenle mikrokanallı çözümler, en yüksek ısı yoğunluklarını en düşük sıcaklıklarla yönetme hedefinin baskın olduğu ve sıvı devresinin getirdiği bakım, güvenilirlik ve mimari yüklerin kabul edilebilir olduğu uygulamalarda daha rasyonel bir seçenek olarak konumlanır. Bu yaklaşımın elektronik sistemlere entegrasyonuna ilişkin tipik bir uygulama örneği ise Şekil 6'da sunulmaktadır. Buna karşın ısı borulu ve fanlı mimari, aynı sınıf termal hedeflere her zaman ulaşmasa bile, ticari ürün gerçekliğinde sıklıkla belirleyici olan maliyet, hacim, bakım gereksinimi, kullanıcı konforu ve ürün ailesi ölçeklenebilirliği gibi kriterleri daha dengeli biçimde karşılayabildiği için yaygın bir endüstriyel standart haline gelmiştir. Bu fark, iki yaklaşım arasında hangisi daha iyi sorusundan ziyade hangi kısıt setinde hangisi daha rasyonel

sorusunun daha doğru bir değerlendirme zemini sunduğunu göstermektedir (Lu and Vafai, 2016; Yu et al., 2024).



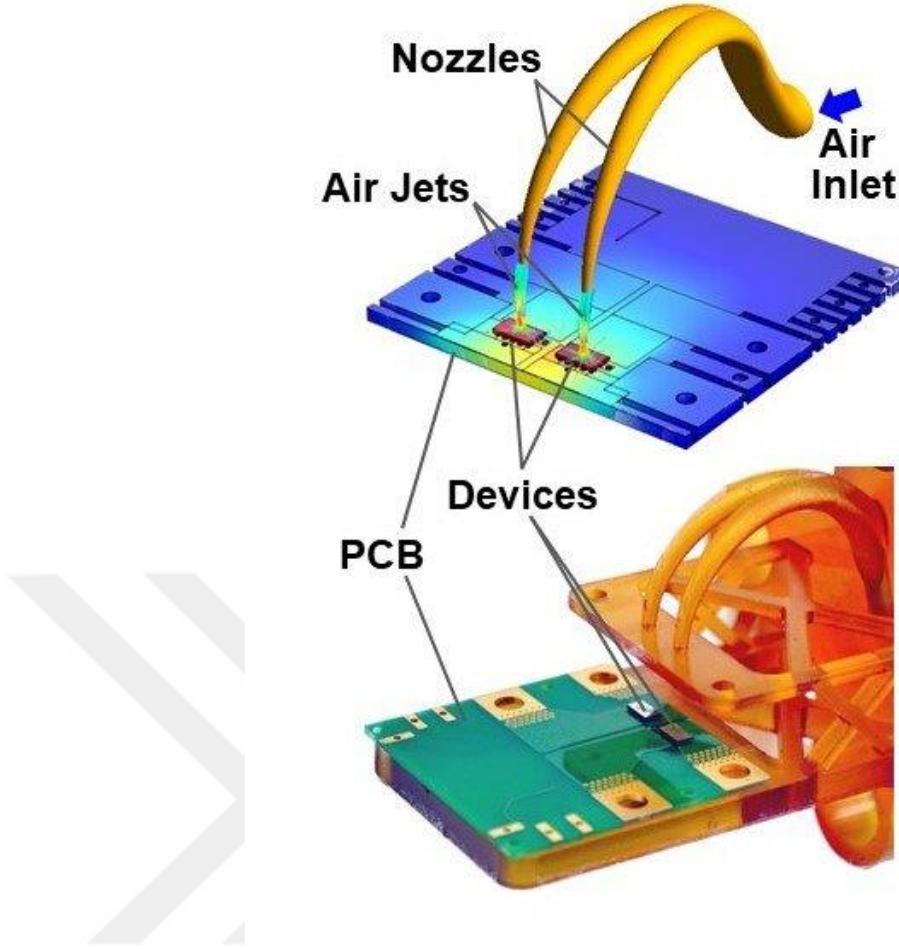
**Şekil 6.** Mikrokanallı Isı Alıcısı Tabanlı Elektronik Soğutma Uygulama Örneği  
(Anonymous, 2020a)

Alternatif yöntemlerle kıyaslandığında, ısı borulu-fanlı çözümün öne çıkan diğer bir unsur uygulanabilirlik ve sistem entegrasyonudur. Daldırmalı (immersion) soğutma, sıvının doğrudan bileşenlerle temas ettiği için çok yüksek ısı transfer katsayılarına ve yüksek soğutma potansiyeline ulaşabilir; literatürde de doğrudan sıvı temasıyla sıcak bileşenlerin etkin biçimde soğutulabildiği vurgulanır. Ancak Şekil 7’de görüldüğü üzere, bu yaklaşım dielektrik sıvı gereksinimi, malzeme uyumluluğu, tank/kapalı hacim, sızdırmazlık, servis-bakım prosedürleri ve işletme lojistiği gibi ek sistem mühendisliği katmanları getirir; pratikte soğutma çözümü bir ısı alıcıdan ziyade bir altyapı mimarisine dönüşür. Dielektrik sıvı kullanımı ve güvenli daldırma prensibi, bu yöntemin doğası gereğidir. Bu nedenle daldırmalı soğutma, yüksek güç yoğunluklu donanım sınıflarında son derece güçlü bir aday olmakla birlikte, daha kompakt ve ürünleşmiş geometrilerde (sınırlı hacim, taşınabilirlik, bakım kolaylığı gibi) benzer ölçekte uygulanması çoğu zaman daha güç ve maliyetlidir. Ayrıca bu tür uygulamalarda soğutma performansının yanı sıra güvenlik ve operasyonel değişkenler de daha belirleyici hale gelebilmektedir (Fan and Duan, 2020; Pambudi et al., 2022).



**Şekil 7.** Yüksek Yoğunluklu Sunucu Ekipmanlarının Daldırmalı Soğutma Havuzu İçinde Çalıştırılması (Anonymous, 2025b)

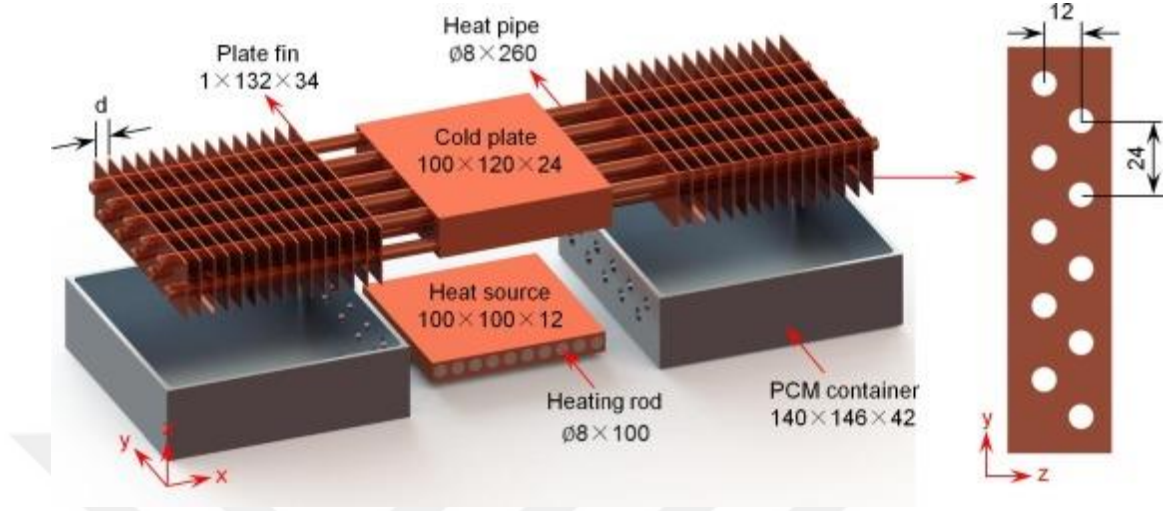
Çarpan jet (jet impingement) soğutma ise, özellikle yüksek ısı akısı uzaklaştırmada literatürde güçlü bir yöntem ailesi olarak öne çıkar; jet çarpmasıyla elde edilen yüksek yerel taşınım katsayıları, küçük sıcaklık farklarıyla yüksek ısı akısı çekebilme potansiyeli sunar. Bununla birlikte çarpan jet ile soğutmada genellikle nozül geometrik kısıtları, hassas hizalama, yüksek debi veya basınç düşümüyle ilişkili pompalama gereksinimleri, filtrasyon-tıkanma hassasiyeti ve hidrolik tasarım karmaşıklığı gibi pratik kısıtlar taşır. Bu tür sistemlerde performans artışı çoğu zaman ek akış gücü ve mekanik/akışkan altyapısı ile birlikte gelir; dolayısıyla termal kazanımın enerji maliyeti ve sistem karmaşıklığı yönünden uygulanması zorlu hale gelebilir. Çarpan jet ile soğutmada, teknik olarak çok güçlü bir seçenek olsa da, çalışma kapsamı kompakt, düşük ek altyapı ve ölçeklenebilir ürün mimarisi hedefleniyorsa daha ağır bir çözüm sınıfına karşılık gelmektedir (Sarkar et al., 2023). Bu çerçevede çarpan jet temelli soğutma mimarisinin tipik uygulama düzeneklerine ilişkin şematik bir örnek, sistemin akış yönlendirme stratejisi ve nozül yüzey konfigürasyonu ortaya koyacak şekilde Şekil 8’de sunulmuştur.



**Şekil 8.** Çarpan Jet Temelli Elektronik Soğutma Uygulama Örneği  
(Anonymous, 2020b)

Faz değıştiren malzemeler (PCM) ise farklı bir problemin çözümünde çok değerli bir alternatif olabilirler. PCM'ler, gizli ısı depolama sayesinde özellikle geçici yüklerde (pikli çalışma, kısa süreli güç sıçramaları) sıcaklık artışını tamponlayabilir ve sıcaklık dalgalanmasını azaltabilir. Buna karşın PCM tabanlı çözümler, enerjiyi depoladığı için kapasite dolduğunda aynı performansı sürdürülemez; ayrıca PCM'nin yeniden katılaşması için ısının çevreye atılması gerekir. Başka bir ifadeyle PCM çoğu zaman sürekli rejimde nihai soğutucu değil, termal tampon/dengeleyici rolündedir; doğru faz değışim sıcaklığı seçimi, kapsülleme, uzun çevrim dayanımı ve ek kütle/hacim gibi tasarım değışkenleri de belirginleşir. Bu nedenle PCM, sürekli yüksek ısı yükü altında çalışacak ve uzun süre kararlı rejim performansı istenen sistemlerde tek başına referans çözüm olmaktan çok, başka bir ısı atım mekanizmasını destekleyen bir geçici rejim iyileştirici olarak konumlanır (Yang et al., 2021; Ye et al., 2024). Bu bağlamda faz değıştiren malzemenin, kanatlı ısı borulu mimariyle bütünleştirilerek geçici rejimlerde termal performansın

iyileştirilmesine yönelik uygulama yaklaşımını gösteren bir örnek, tasarımın ısı depolama-ısı taşıma bileşenlerini bir arada ele alan şematik yapısıyla birlikte Şekil 9’da sunulmaktadır.



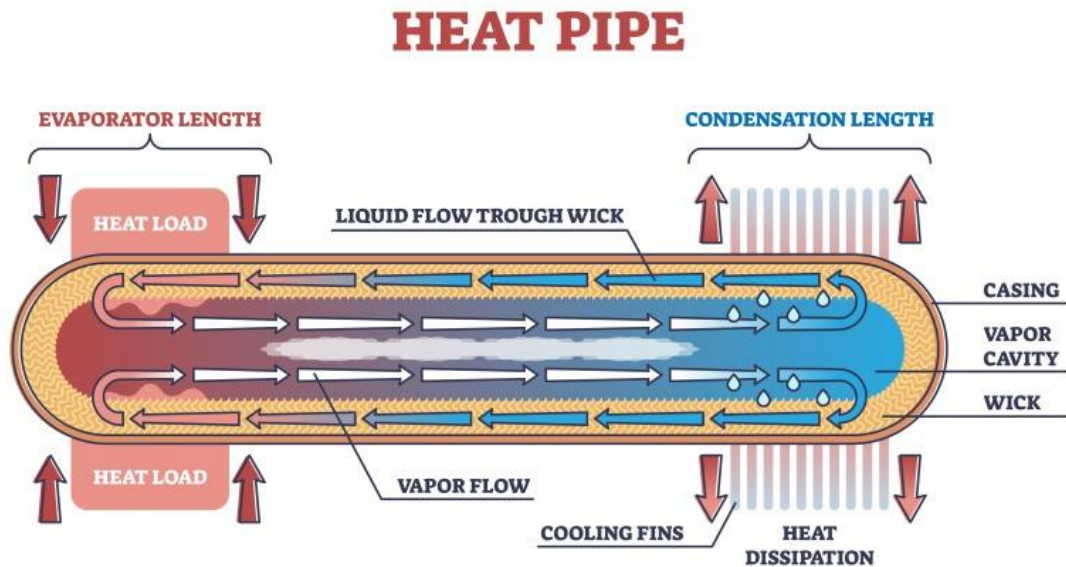
**Şekil 9.** Termal Şok Soğutma İçin Kanatlı Isı Borulu PCM Tabanlı Isı Alıcı (Yang et al., 2018)

Isı borulu-fanlı sistem, (i) sıcak nokta kaynaklı ısı akışını pasif olarak yayabilen ve taşıyabilen bir elemanı (ısı borusu) ve (ii) çevreye ısı atımını kontrollü biçimde sağlayan bir elemanı (fan ve kanatçık grubu) birlikte içerdiği için, elektronik soğutmada kritik iki işlevi aynı mimari içinde bütünleştirir: ısıyı kaynağa yakın bölgede yayarak yönetilebilir hale getirmek ve ardından havaya aktararak çevreye atmaktır. Bu mimarinin endüstride yerleşik ve ticari ürünlerde yaygın olmasının temel nedeni, farklı ürün sınıflarında benzer bir tasarım mantığıyla ölçeklenebilmesi ve sınırlı hacim, maliyet baskısı, bakım gereksinimi ve kullanıcı konforu gibi pratik kısıtlarla uyumlu bir çözüm ailesi sunmasıdır. Bir başka ifadeyle ısı borulu-fanlı yapı, yalnızca yüksek ısı yüklerini yönetebildiği için değil, aynı zamanda üretilebilirlik, paketlenme uyumu, servis edilebilirlik ve toplam sahip olma maliyeti açısından öngörülebilir bir tasarım çerçevesi sunduğu için yaygın bir endüstriyel standart haline gelmiştir. Ayrıca bu yaklaşım, doğrudan sıvı temaslı yöntemlerin getirdiği elektriksel izolasyon, sızdırmazlık ve işletme prosedürleri gibi ilave sistem gereksinimlerini zorunlu kılmadan, ısıyı kaynaktan alıp uygun bir atım bölgesine taşıma problemine pratik bir çözüm üretir. Termoelektrik entegrasyon gibi aktif bir elemanın eklenmesi durumunda da bu mimari önemli bir değerlendirme zemini sunar: termoelektrik eleman yerel sıcaklık gradyeni oluşturarak tepe sıcaklığı bastırabilir; ancak enerji dengesi gereği sıcak tarafta atılması gereken toplam ısı, soğutulan yük ile birlikte elemanın çektiği elektrik gücünün toplamı olarak

artar. Dolayısıyla elde edilen sıcaklık düşüşünün sürdürülebilirliği, artan ısı atım yükünü ısı borusu-kanatçık-fan hattının ne ölçüde taşıyabildiği ile belirlenir. Bu nedenle ısı borulu-fanlı mimari, hem gerçek uygulamalarda yaygın ve olgun bir referans platform sunar hem de termoelektrik entegrasyonun termal kazanım, enerji bedeli ve akustik etki arasındaki dengeyi sistem düzeyinde görünür kılan güçlü bir çerçeve oluşturur. İzleyen başlıklarda ısı borularının çalışma prensipleri ve tasarım sınırları ile termoelektrik soğutmanın temel mantığı, bu endüstriyel bağlam ve sistem perspektifi içinde daha anlamlı biçimde konumlandırılacaktır.

#### 1.4. Isı Borularının Yapısı, Çalışma Prensibi ve Tipleri

Isı borusu, bir ısı kaynağından aldığı ısıyı başka bir bölgeye pasif olarak taşıyan, içinde sınırlı miktarda çalışma akışkanı bulunan, kapalı ve genellikle vakumlanmış bir ısı transfer elemanıdır. Pasif ifadesi burada kritiktir: ısı borusu, ısıyı taşımak için harici bir pompa ya da kompresör gibi tahrik gücüne ihtiyaç duymaz; ısı girişi ve çıkışı gerçekleştiği sürece, kendi içinde faz değişimi döngüsü kurarak çalışır. Bu yönüyle ısı boruları, elektronik termal yönetimde yalnızca bir parça değil, ısıl yolun mimarisini belirleyen bir ısı taşıma altyapısı olarak görülebilir. Isı borusunun temel çalışma döngüsü Şekil 10'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 10. Tipik Bir Isı Borusunun Çalışma Prensibi (Anonymous, 2022)

#### 1.4.1. Isı borularının yapısı

Klasik soğutma yaklaşımı çoğu üründe şu zincirle özetlenir: Isı önce katı iletimle paketlenme yapısından ve taban plakasından geçer, ardından bir ısı yayıcı veya soğutucu blok üzerinde alan kazanır, son olarak kanatçıklar üzerinden havaya taşınım ile aktarılır. Bu yaklaşım birçok uygulamada yeterli olsa da, modern elektroniklerde iki eğilim bu zinciri zorlamaktadır. Birincisi, toplam ısı yükünden bağımsız olarak yerel ısı akısının artmasıdır. Isı, küçük bir temas alanına sıkıştığında, aynı güçte bile sıcaklıklar daha hızlı yükselir ve tepe sıcaklık oluşumu kolaylaşır. İkincisi, ısıya üretildiği yer ile ısıya atılabildiği yerin çakışmamasıdır. Örneğin dizüstü bilgisayarlardaki mekanik yerleşim, hava kanalı kısıtları, batarya, ekran, muhafaza geometrisi veya güvenlik gerekleri nedeniyle ısı atıcı yüzeyler ısı kaynağından uzakta konumlanabilir. Yalnızca metal iletimiyle bu mesafeyi düşük sıcaklık farkıyla aşmak çoğu zaman zordur; çünkü katı iletimin taşıyabileceği ısı, kesit alanı, uzunluk ve malzeme iletkenliği ile sınırlıdır.

Isı borusu bu noktada kritik hale gelir. Faz değişimi sayesinde ısıyı düşük sıcaklık farklarıyla taşıyabilmesi, ısı kaynağı çevresindeki yüksek ısı akısını daha geniş bir alana yayabilmesi ve bunu kompakt bir geometri içinde yapabilmesi, elektronik soğutmada özellikle tepe sıcaklık kontrolü açısından belirleyicidir. Kısaca ısı borusu, ısıyı havaya daha hızlı vermeye çalışmaktan önce, ısıyı yönetilebilir bir bölgeye taşımayı ve yaymayı mümkün kılar (Faghri, 1995; Jouhara et al., 2023).

Isı borusu, pasif faz değişimiyle ısı taşıma prensibine dayandığı için yapısal olarak birkaç temel elemanın birlikte ve uyumlu biçimde çalışmasına ihtiyaç duyar. Bu elemanlar yalnızca bir boru ve içindeki sıvı şeklinde düşünülmemelidir. Çünkü ısı borusunun performansını ve güvenilirliğini belirleyen esas unsur, kapalı hacmin korunması, iç akış yollarının doğru kurgulanması ve buhar ile sıvı akışlarının birbirini engellemeden süreklilik göstermesidir.

Isı borusunun muhafazası, iç ortamı dış ortamdaki ayıran ve cihazın kapalı çevrim karakterini mümkün kılan ana taşıyıcı parçadır. Muhafaza hem çalışma akışkanını ve buhar hacmini sızdırmaz biçimde içeride tutar hem de ısıya girişi ve ısı çıkışı bölgelerinde iç yapıya aktarılacağı katı yolu oluşturur. Bu nedenle muhafazadan beklenen yalnızca yüksek ısı iletkenliği değildir. Uzun süreli gaz geçirimsizliği, sızdırmazlık, üretim sonrası iç ortamın kararlılığı ve sıcaklık çevrimleri altında şekil değişimine karşı dayanım da önemlidir. Elektronik uygulamalarda bakır ve alüminyum alaşımlarının sık

tercih edilmesi, ısı iletkenlik ile üretim kolaylığının ve maliyetin dengelenebilmesinden kaynaklanır. Bununla birlikte asıl kritik nokta, muhafaza malzemesinin seçilen çalışma akışkanı ve fitil yapısıyla kimyasal açıdan uyumlu olmasıdır. Aksi durumda uzun vadede gaz oluşumu, yüzey ıslanabilirliğinin bozulması veya korozyon benzeri etkiler performansı düşürebilir. Ayrıca cidar kalınlığı azaltıldığında katı taraftaki ısı direnç düşse bile, özellikle düzleştirilmiş ve ince kesitli tasarımlarda yerel ezilme, burkulma ve montaj kaynaklı hasar riski artar.

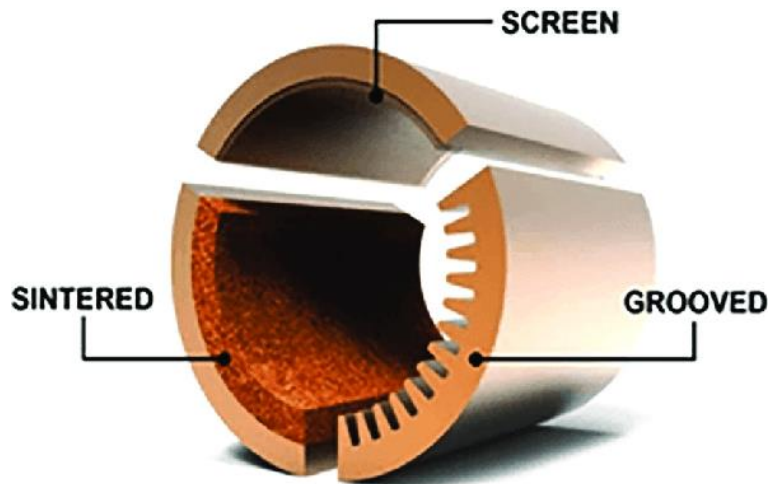
**Tablo 4.** Isı Borusu Uygulamalarında Kullanılan Bazı Çalışma Akışkanları Ve Tipik Çalışma Aralıkları (Byon, 2016).

| Sıcaklık Aralığı | Akışkan Adı | Çalışma Sıcaklığı (°C) | Basınç (bar) |
|------------------|-------------|------------------------|--------------|
| Kriyojenik       | Helyum      | -271 : -268            | 0.06 : 2.29  |
|                  | Azot        | -203 : -150            | 0.48 : 28.8  |
| Düşük Sıcaklık   | Amonyak     | -60 : 120              | 0.27 : 90.44 |
|                  | Su          | -20 : 200              | 0.02 : 16.19 |
|                  | Etanol      | -30 : 130              | 0.01 : 4.30  |
|                  | Aseton      | -40 : 140              | 0.01 : 10.49 |
| Orta Sıcaklık    | Naftalin    | 100 : 400              | 0.02 : 17.5  |
|                  | Cıva        | 150 : 750              | 0.01 : 63    |
| Yüksek Sıcaklık  | Sodyum      | 500 : 1300             | 0.01 : 15.91 |
|                  | Sezyum      | 375 : 825              | 0.02 : 3.41  |
|                  | Lityum      | 1030 : 1730            | 0.07 : 8.90  |

Çalışma akışkanı, ısı borusunun faz değişimi yoluyla ısı taşımalarını sağlayan aktif ortamdır ve seçim yalnızca kaynama sıcaklığına bakılarak yapılamaz. Uygun akışkan, yüksek gizli ısıya sahip olmalı, buharlaşma ve yoğunlaşma sırasında yeterli ısı taşımayı küçük sıcaklık farklarıyla sürdürebilmeli, fitil yüzeyini iyi ıslatabilmeli ve seçilen muhafaza malzemesiyle uzun süre kimyasal kararlılığını koruyabilmelidir. Viskozite, yüzey gerilimi ve ıslanabilirlik gibi özellikler, hem sıvının fitil içinde geri dönüşünü hem de buhar tarafındaki akış kayıplarını etkilediği için doğrudan performansa yansır. Elektronik soğutmanın sık görülen sıcaklık aralıklarında su, bakır muhafaza ile birlikte yaygın bir seçimdir. Daha düşük sıcaklıklarda farklı akışkanlar tercih edilebilir. Akışkanın saflığı da tasarımın ayrılmaz bir parçasıdır. Düşük seviyedeki kirleticiler dahi yüzey etkileşimlerini değiştirerek ıslanabilirliği ve uzun dönem kararlılığı olumsuz etkileyebilir. Benzer şekilde şarj edilen akışkan miktarı, fitilin kuru kalma eğilimi ile

evaporatör bölgesinde sıvı birikimi arasında hassas bir denge oluşturur. Dolum oranının uygun seçilmemesi, bazı koşullarda sıcaklık dalgalanmasına ve performans düşüşüne neden olabilir. Uygulama sıcaklık aralığına bağlı olarak ısı borularında farklı akışkanlar tercih edilmektedir; kriyojenik, düşük, orta ve yüksek sıcaklık gruplarının belirleyici özellikleri Tablo 4’de özetlenmiştir.

Fitil yapısı, ısı borusunun karakteristik iç bileşeni olup çevrimin sürekliliğini sağlayan ana geri dönüş mekanizmasıdır. Fitil, kondenserde yoğunlaşan sıvıyı evaporatöre geri gönderecek kılcal iletimi sağlarken, aynı zamanda evaporatör bölgesinde sıvıyı yüzeye yayarak kararlı buharlaşma koşulları oluşturur. Bu nedenle fitilin geometrisi ve mikroyapısı, ısı borusunun taşıma kapasitesini belirleyen temel sınırlardan biri olan kapiler sınır üzerinde doğrudan etkilidir. Sinterlenmiş toz fitiller küçük gözenek yapılarıyla yüksek kılcal basınç üretebilir; ancak geçirgenliğin azalması sıvı akış direncini artırabilir. Tel örgü fitiller üretim açısından pratik olup kılcal performansları katman sayısı ve sıklık ile ayarlanabilir. Oluklu yapılar ise muhafaza içine işlenen kanallar üzerinden sıvı dönüşü sağlayarak bazı geometri ve ısı yükü aralıklarında avantaj sunar, fakat yönelim hassasiyeti daha belirgin olabilir. Fitil tasarımında gözenek boyutu kılcal basıncın temel belirleyicisiyken, porozite ve geçirgenlik sıvı akış direncini şekillendirir; fitil kalınlığı ve muhafaza ile temas kalitesi ise hem ısı iletim yolunu hem de fitil içinde oluşan ek sıcaklık farklarını etkileyebilir. Uygulamada ısı transferi, kapiler iletim ve imalat kolaylığı gibi kriterler, fitil yapısı seçiminde belirleyici olmaktadır. Isı borularında yaygın olarak kullanılan fitil tiplerinin görseli Şekil 11’de sunulmuştur.



**Şekil 11.** Isı Borularında Yaygın Olarak Kullanılan Fitil Tipleri (Jouhara et al., 2018)

Buhar hacmi, fitilin karşısında kalan ve buharın evaporatörden kondensera taşındığı ana akış yoludur. Bu bölümün temel hedefi, buharı olabildiğince düşük basınç kaybıyla iletebilmektir; çünkü buhar tarafındaki akış kayıpları büyüdükçe aynı ısı taşımayı sürdürebilmek için daha büyük bir sıcaklık farkı gerekir ve bu durum etkin ısı taşıma kabiliyetini zayıflatır. Özellikle ince kesitli ve uzun hatlı tasarımlarda buhar kanalının akış direnci daha kritik hale gelir; yüksek ısı akılarında bu durum performans sınırlarına yaklaşmayı hızlandıran bir etken olarak ortaya çıkabilir.

Isı borusu genel olarak evaporatör, adyabatik bölüm ve kondenser olmak üzere üç işlevsel bölge üzerinden tanımlanır. Evaporatörde ısı girişiyle fitildeki sıvı buharlaşır; adyabatik bölümde ideal olarak dışarıyla ısı alışverişi sınırlı olup buhar ve sıvı taşınır; kondenserde ise buhar yoğunlaşarak ısısını dış ortama aktarır. Bu bölgeler aynı muhafaza üzerinde yer alsada, dış montaj koşulları, temas basıncı, ara malzeme kullanımı ve yüzey pürüzlülüğü gibi etkenler her bölgede oluşan eşdeğer ısı direnci farklılaştırabilir. Bu nedenle ısı borusunun gerçek uygulamadaki davranışı, yalnızca iç döngünün teorik verimliliğiyle değil; dış arayüzlerin kalitesi ve montaj detaylarıyla birlikte değerlendirilmelidir (Velardo et al., 2019; Rashidi et al., 2021; Jouhara et al., 2023).

#### **1.4.2. Isı borularının çalışma prensibi**

Isı borularının çalışma prensibi, kapalı bir hacim içerisinde gerçekleşen faz değişimine dayalı döngüsel bir ısı taşıma mekanizması olarak açıklanabilir. Bu mekanizmanın anlaşılması, vakumlanmış gövde yapısı, evaporasyon yoluyla ısı alımı, buharın basınç farkı ile taşınması, yoğunlaşma sonucu ısı bırakımı ve sıvının tekrar buharlaşma bölgesine yönlendirilmesi gibi ardışık süreçlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirir.

Vakumlu kapalı yapı ve çalışma akışkanı; ısı boruları, sızdırmaz şekilde kapatılmış, içerisine seçilen çalışma akışkanından yalnızca belirli bir miktar eklenmiş, geriye kalan hacmi ise vakumlanmış ısı transfer elemanlarıdır. Vakum uygulaması, hem çalışma akışkanının doymuş eğrisini uygulama sıcaklığına uygun aralığa çekmeyi sağlar hem de boru içinde yoğunlaşmayı engelleyen diğer gazları en aza indirerek ısı direnci düşürür. Bu gazların varlığı, zaman içinde kondenser bölgesinde bir bariyer görevi görerek buharın yoğunlaşma yüzeyiyle temasını sınırlayabilir ve performans kaybına neden olabilir.

Evaporatörde ısı alımı ve buharlaşma; ısıнын boruya girdiği evaporatör bölgesinde, ısı akışı önce boru duvarından fitil ya da iç yüzey yapısına, ardından sıvı fazdaki çalışma akışkanına aktarılır. Akışkan doyma sıcaklığına ulaştığında buhar fazına geçer ve burada taşıdığı enerji sıcaklıktaki ani yükselişle değil, gizli ısı formunda gerçekleşir. Gizli ısıнын büyüklüğü nedeniyle az miktarda kütle akışı bile kayda değer bir ısı yükünün uzak bölgelere taşınmasını mümkün kılar. Dolayısıyla evaporatörde sıcaklık artışı sınırlı olsa dahi yüksek ısı transfer performansı elde edilebilir.

Buhar hareketinin temel itici gücü: basınç farkı; evaporatör bölgesindeki buharlaşma, yerel buhar basıncını artırır. Daha düşük sıcaklıktaki kondenser tarafında ise doymuş buhar basıncı daha düşük seviyede olduğundan, bu fark buharı boru içerisinde itici bir etki ile soğuk bölgeye yönlendirir. Doymuş buhar basıncının sıcaklığa son derece duyarlı olması, ısı borularının çok sınırlı sıcaklık farkları ile çalışabilmesinin temel açıklamasıdır. Sistemin bu pasif taşınım özelliği, harici pompalama gerektiren sıvı devrelerine karşı önemli bir üstünlük sağlamaktadır.

Kondenserde yoğunlaşma ve ısıнын dışarıya atılması; buhar, kondenser yüzeyine ulaştığında sıcaklık farkı nedeniyle yoğunlaşır ve buharlaşma sırasında depolanan gizli ısı, dış ortama atılmak üzere açığa çıkar. Enerji, boru gövdesi aracılığıyla kanatçıklı yapılar, sıvı soğutucular veya hava akımları gibi nihai ısı atım sistemine aktarılır. Kondenserin soğutma kapasitesi yetersiz kaldığında ise yoğunlaşma verimi düşer, boru içi basınç dengesi bozulabilir ve bu durum çevrimin kararlılığını etkileyebilir. Dolayısıyla ısı borusu, tek başına ısıyı yok eden bir yapı değil, ısı taşıma ve yeniden dağıtma arayüzüdür.

Sıvı fazın geri taşınması: kapiler etkili fitil yapısı; ısı borusunu klasik buharlaşma-yoğunlaşma kaplarından ayırtıran en belirgin özellik, yoğunlaşan sıvının evaporatör yönüne geri taşınabilmesidir. Fitil malzemesi, gözenekli iç yapısı sayesinde kapiler etki oluşturur ve bu etki yoğunlaşmış sıvıyı yerçekimine karşı dahi evaporatöre doğru çekebilecek seviyelerdedir. Fitilin malzemesi, gözenek yapısı, kalınlığı ve geometrisi, çevrimin sürdürülebilir debisini ve dolayısıyla ısı borusunun maksimum transfer kapasitesini belirleyen ana tasarım parametreleri arasındadır.

Çalışma prensibini ortaya koyan bu adımlar bir arada düşünüldüğünde ısı borusu, ısıyı büyük ölçüde gizli ısı üzerinden taşıdığı için çok yüksek bir etkin iletkenlik etkisi gösterir. Uygulamada ısı borusu, aynı kesitte bir metal çubuğa göre çok daha düşük sıcaklık gradyanıyla çalışabilir. Bu üstünlük, özellikle ısıнын kaynaktan uzak bir kanatçık

bölgesine taşınması, tepe sıcaklıkların bastırılması ve sıcaklık dağılımının daha homojen hale getirilmesi gibi hedeflerde kendini gösterir (Faghri, 1995; Zohuri, 2011; Silverstein, 2020; Arshad et al., 2020).

#### **1.4.3. Isı borularının tipleri ve sınıflandırma**

Isı boruları tek bir geometriden ibaret değildir; geri dönüş mekanizması, iç yapı, taşıma mesafesi ve amaçlanan işlevlerine göre farklı türlere ayrılır. Elektronik soğutmada karşılaşılan ana türleri aşağıdaki gibi değerlendirmek mümkündür.

**Fitilli ısı boruları:** Bu sınıf, sıvı geri dönüşünü fitil yapısı ile sağlayan en yaygın gruptur. Fitil sayesinde yerçekimine bağımlılık azalır ve farklı yönelimlerde çalışma mümkün hale gelir. En büyük avantajı, kompakt formda güvenilir ve ürünleşmiş bir çözüm sunmasıdır. Sınırları ise fitilin kapiler kapasitesi, gözenek boyutu ve geçirgenliği ile belirlenir. Yük büyüdükçe fitildeki basınç kaybı artar ve kuruma riski doğabilir.

**Fitilsiz ısı boruları ve termosifonlar:** Fitilsiz yapılarda sıvı geri dönüşü kapiler etki yerine yerçekimiyle gerçekleşir. Dikey veya eğimli konumlarda yüksek performans verebilirler ve iç yapıları daha basittir. Ancak yönelime hassastırlar; ters yönde çalışmada sıvı evaporatöre dönemez. Bu nedenle taşınabilir cihazlar gibi konumu değişen ürünlerde sınırlıdır; daha çok sabit yönelimli sistemlerde uygundur.

**Mikro ısı boruları:** Mikro ölçekte, genellikle çok küçük hidrolik çaplara sahip kanallar üzerinden faz değişimiyle ısı taşıyan yapılardır. İnce yapılar, yerel sıcak nokta bastırma ve entegre paketleme açısından avantaj sunabilir. Ancak mikro ölçekte akış kararlılığı, üretim toleransları ve tıkanma gibi konular daha kritik hale gelir. Bu nedenle kullanım alanı, yüksek entegrasyon gerektiren özel tasarımlarda yoğunlaşır.

**Düz ısı boruları ve buhar odaları:** Elektronik soğutmada çok yaygın bir alt sınıf, düz formda çalışan ve iki boyutlu yayılma etkisi sağlayan buhar odalarıdır. Amaç yalnızca ısıyı uzak bir yere taşımak değil, aynı zamanda taban üzerinde ısıyı geniş bir alana yaymaktır. Bu, küçük bir temas alanına sahip kaynaklarda kanatçıkların homojen beslenmesini sağlar. Avantajı, sıcaklık dağılımını iyileştirmesi ve tepe sıcaklığı düşürmesidir. Sınırları ise kalınlık, iç yapı tasarımı ve özellikle evaporatör bölgesindeki yerel ısı akısına bağlı limitlerle ilişkilidir.

**Devre ısı boruları ve kapiler pompalanmış devreler:** Daha uzun mesafelerde ve daha yüksek ısı yüklerinde, buhar ve sıvı hatları ayrılmış devre mimarileri kullanılır.

Devre ısı boruları, kaynaktan uzak kondenser tasarımlarına olanak verir ve bazı uygulamalarda yüksek ısı akısı yönetiminde güçlüdür. Ancak yapı daha karmaşıktır; başlatma davranışı, rezervuar ve kontrol detayları tasarımın parçası haline gelir. Bu sınıf, genellikle daha büyük sistemlerde ve daha seçici uygulama gereksinimlerinde tercih edilir.

Darbeli ısı boruları ve özel iki fazlı yapılar: Bazı tasarımlar, fitil yerine iki fazlı akışın kendi kendine oluşturduğu salınımlı hareketlerden yararlanır. Avantajı basit üretim ve belirli koşullarda yüksek ısı taşıma potansiyelidir. Ancak çalışma rejimi kararlılığı, yönelim ve sıcaklık aralığına duyarlılık gibi nedenlerle her ürün sınıfında standart çözüm haline gelmemiştir.

Gelişmiş ve hibrit yaklaşımlar: Isı borusu, bazen faz değiştiren malzemelerle veya farklı yayma elemanlarıyla birlikte kullanılır. Buradaki amaç, geçici yükleri tamponlamak, kısa süreli piklerde tepe sıcaklığı sınırlamak veya sıcaklık dalgalanmasını azaltmaktır. Hibrit yaklaşımın sınırı, sistemin toplam hacim ve kütle bütçesi ile sürekli rejimde ısının mutlaka çevreye atılması gereğidir (Zohuri, 2020; Özdemir et al., 2024).

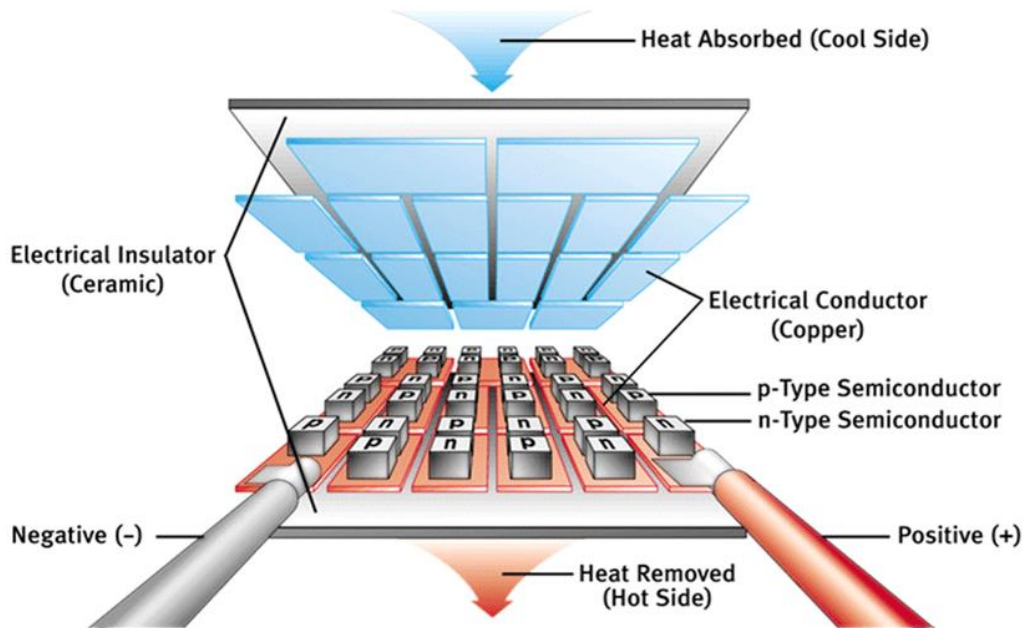
### **1.5. Termoelektrik Elemanların Çalışma Mantığı ve Termoelektrik Soğutma**

Termoelektrik soğutma, bir yarı iletken yapı üzerinden elektrik akımı geçirildiğinde ısının bir yüzeyden alınarak diğer yüzeye taşınabilmesi esasına dayanır. Bu mekanizma, makroskopik düzeyde ısı pompalama gibi görünen; mikroskopik düzeyde ise yük taşıyıcılarının (elektronlar ve oyuklar) enerji ve entropi taşımasıyla açıklanan bir olgudur. Termoelektrik elemanlar, hareketli parça içermemeleri ve elektriksel olarak doğrudan sürülebilmeleri sayesinde sıcaklık kontrolünün istenildiği, titreşimin istenmediği veya yerel sıcak nokta bastırmanın kritik olduğu elektronik uygulamalarda dikkate değer bir seçenek oluşturur. Bununla birlikte termoelektrik soğutma, her koşulda yüksek verimli bir çözüm değildir; sağladığı soğutma etkisi, taşınan ısı yükü, hedeflenen sıcaklık farkı ve sıcak taraftan ısının uzaklaştırılma kabiliyeti birlikte ele alınmadığında sistem düzeyinde beklenmeyen sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle termoelektrik soğutmayı doğru konumlandırmak için önce temel etkiler, ardından modül yapısı, enerji dengesi ve performans metrikleri sistematik biçimde kurulmalıdır.

Termoelektrik olaylar üç temel etki ile çerçevelenir. Birincisi Seebeck etkisidir. İki farklı iletken veya yarı iletkendeki oluşan bir devrede eklemler arasında sıcaklık farkı varsa, devrede bir gerilim oluşur. Bu gerilimin sıcaklık farkına oranı Seebeck katsayısı

olarak tanımlanır ve genellikle  $\alpha$  ile gösterilir. İkincisi Peltier etkisidir. Bir birleşim noktasından akım geçirildiğinde, birleşimde ısı soğurulabilir veya yayabilir. Soğutma uygulamalarında doğrudan kullanılan etki budur. Üçüncüsü Thomson etkisidir. Tek bir malzeme boyunca hem sıcaklık gradyeni hem akım varsa, malzeme içinde ek bir ısı üretimi veya soğurumu ortaya çıkar. Mühendislik modellerinde çoğu zaman ikinci mertebe bir düzeltme olarak yer alır. Bu üç etki, tersinir enerji dönüşümlerini ve kaçınılmaz kayıpları birlikte içerdiği için termoelektrik soğutma performansı her zaman yararlı ısı pompalanması ile ohmik ısı üretimi ve ısı iletim kaçakları arasındaki rekabet tarafından belirlenir (MacDonald, 2006; Zhou and Yu, 2012; Twaha et al., 2016).

Elektronik soğutmada kullanılan termoelektrik soğutucu modüller, tipik olarak çok sayıda p tipi ve n tipi yarı iletken birimden oluşur. Bu birimler elektriksel olarak seri bağlanarak aynı akımın tüm çiftlerden geçmesi sağlanır; ısı olarak ise paralel bir ısı yolu gibi davranırlar ve ısının soğuk yüzeyden sıcak yüzeye taşınmasına katkı verirler. Birimlerin iki ucunda genellikle elektriksel yalıtkan fakat ısı iletken seramik plakalar bulunur. Böylece modül mekanik olarak bütünleşir, elektriksel izolasyon sağlanır ve ısı akı yüzeylere düzgün dağıtılır. Akım yönü ters çevrildiğinde soğuk ve sıcak yüzey yer değiştirir. Bu özellik, aynı donanım üzerinden hem soğutma hem ısıtma fonksiyonunun gerçekleştirilebilmesini mümkün kılar. Bir termoelektrik modülde, soğuk yüzeyden ısı alınması, sıcak yüzeye ısı aktarılması, akım yönü ve p-n tipi bacakların seri yapısı ile seramik plakaların gösterildiği şematik bir görsel Şekil 12’de sunulmuştur.



**Şekil 12.** Bir Termoelektrik Modülün Şematik Çalışma Prensibi (Ivanov et al., 2019)

Termoelektrik soğutmanın tasarım mantığını en net ortaya koyan ifade enerji dengesidir. Soğuk taraftan çekilen ısı  $Q_c$  yalnız başına sistemin kurtulduğu ısı değildir. Çünkü modül aynı anda elektrik gücü tüketir ve bu güç de ısıya dönüşerek sıcak tarafta taşınması gereken toplam yükü büyütür. Bu nedenle sıcak tarafta atılması gereken ısı genellikle;

$$Q_h = Q_c + P \quad (1)$$

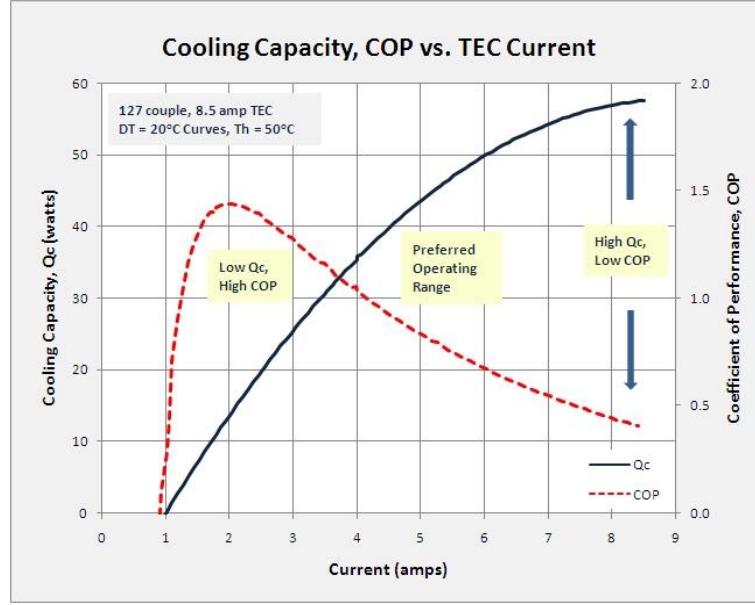
ilişkisiyle özetlenir. Pratik sonuç şudur; soğuk tarafta belirli bir ısı yükü çekiliyor olsa bile, sıcak tarafta ısıyı uzaklaştırma kapasitesi yeterli değilse sıcak yüzey hızla ısınır. Bu da modülün oluşturabildiği sıcaklık farkını azaltır, soğutma etkisini düşürür ve çoğu durumda performans katsayısını geriye çeker. Bu nedenle termoelektrik soğutma yalnız modül seçimi ile bitmez. Sıcak taraftaki ısı atım mimarisi (ısı yayıcı, ısı borusu, kanatçık ve hava akışı gibi) sistemin belirleyici parçasıdır (Sajid et al., 2017; Cai et al., 2019).

Literatürde yaygın kullanılan mühendislik modeli, soğuk taraftaki ısı çekişini üç bileşenle ifade eder: Peltier ile taşınan yararlı ısı, elektriksel dirençten doğan Joule ısısının bir kısmı ve sıcak taraftan soğuk tarafa geri kaçan ısı iletim. Benzer biçimde sıcak taraftaki ısı atımı da Peltier taşınımı, Joule ısısı ve iletim terimleriyle yazılır. Bu çerçevede, akımı artırınca her zaman daha iyi soğutur gibi sezgisel görünen fakat belirli bir noktadan sonra geçersizleşen davranışları açıklar. Akım artışı Peltier taşınımını artırırken Joule kayıplarını da karesel olarak büyütür. Bu yüzden optimum bir çalışma noktası söz konusudur ve bunu yakalamak soğutma stratejisi açısından oldukça önemlidir.

Termoelektrik soğutmada performans katsayısı, soğuk taraftan çekilen ısıнын modüle verilen elektrik gücüne oranı olarak tanımlanır. Performans katsayısı;

$$COP = Q_c / P \quad (2)$$

olarak tanımlanır. Bu metrik, kaç watt elektrik ile kaç watt soğutma etkisi üretildiğini doğrudan gösterdiği için sistem değerlendirmesinde kritiktir. Ancak COP sabit bir sayı değildir; hedeflenen sıcaklık farkı arttıkça ve sıcak taraf ısı atımı zorlaştıkça COP genellikle düşme eğilimi gösterir. Ayrıca COP, seçilen akıma ve sıcak taraftaki soğutma altyapısına belirgin biçimde duyarlıdır. Şekil 13, termoelektrik modül tasarımında akım seçiminin, soğutma kapasitesi ve verim gerilimi çerçevesinde en kritik karar noktalarından biri olduğunu doğrulamaktadır.



**Şekil 13.** Bir Termoelektrik Modülde Akım Değerine Bağlı Olarak Soğutma Kapasitesi ve COP Değişimi (Anonymous, 2025c)

Termoelektrik modül performansının kökü malzeme özelliklerine iner. İyi bir termoelektrik malzeme, aynı anda üç hedefi makul düzeyde sağlamaya çalışır. Yüksek Seebeck katsayısı (yük taşıyıcı başına yüksek gerilim üretimi), yüksek elektriksel iletkenlik (Joule kayıplarını sınırlamak için) ve düşük ısı iletkenlik (sıcak taraftan soğuk tarafa ısı kaçışını azaltmak için). Bu üçlünün birlikte değerlendirilmesi, literatürde termoelektrik etkinlik tartışmasının merkezindedir. Çoğu kaynakta boyutsuz  $ZT$  büyüklüğüyle özetlenir. Uygulama açısından kritik nokta, malzeme iyileştikçe aynı sıcaklık farkında daha yüksek COP veya daha yüksek ısı çekişinin mümkün hale gelmesidir. Fakat sistem düzeyinde sıcak taraf ısı atımı yetersizse malzeme avantajı büyük ölçüde gölgelenebilir. Bu nedenle malzeme düzeyi kazanımlar, modül tasarımı ve ısı atım mimarisiyle birlikte ele alındığında anlamlı bir sonuca dönüşür (Goldsmid, 2010; Nolas et al., 2013).

Termoelektrik elemanların elektronik soğutmada ilgi görmesinin temel nedeni, yerel ve kontrol edilebilir bir soğutma etkisi üretebilmeleridir. Bir ısı kaynağı üzerinde sıcak nokta davranışı baskınsa, klasik yaklaşım çoğu zaman fan debisini artırmak veya daha büyük bir ısı atıcı kullanmaktır. Bu ise gürültü, hacim ve enerji tüketimi maliyetini büyütür. Termoelektrik modül ise doğrudan ısı kaynağına yakın konumlandırıldığında tepe sıcaklığı aşağı çekmeye yardımcı olabilir. Bu sayede aynı tepe sıcaklığı hedefinde fanın daha düşük hızlarda çalıştırılması veya yük piklerinde sıcaklığın daha kontrollü tutulması mümkün hale gelebilir. Ancak burada belirleyici olan, modülün sıcak tarafta

oluşturduğu ek ısı yükünün güvenli biçimde uzaklaştırılmasıdır. Aksi halde sistemin toplam sıcaklık seviyesi yükselir ve hedeflenen fayda sınırlı kalır.

Bu çerçevede termoelektrik modül, çoğu elektronik üründe tek başına birincil soğutucu olmaktan ziyade, iyi tasarlanmış bir ısı taşıma ve ısı atım mimarisini tamamlayan bir eleman olarak daha güçlü bir konuma oturur. Isı borusu, buhar odası, kanatçık ve kontrollü hava akışı gibi elemanlar sıcak tarafta ısıyı taşımak ve atmak görevini üstlenirken, termoelektrik eleman daha çok tepe sıcaklığı aşağı çekmek ve geçici yükleri yönetmek gibi bir kontrol katmanı sunabilir. Sistem mühendisliği açısından rasyonel hedef, modülün çektiği ısı kadar modüle verilen gücün de sıcak tarafta taşınacağını baştan kabul ederek boyutlandırma yapmaktır.

Termoelektrik modüller pratikte çoğunlukla doğru akım ile sürülür ve en yaygın kontrol değişkeni akımdır. Sabit akım sürme, modelleme ve deneysel karşılaştırmalar açısından basit ve tekrarlanabilir bir çerçeve sağlar. Ancak termal yükün zamanla değiştiği durumlarda sabit akım, gereksiz güç tüketimine veya hedef sıcaklıktan sapmaya yol açabilir. Bu nedenle sıcaklık geri beslemeli kontrol stratejileri, özellikle hedeflenen yüzey sıcaklığının dar aralıkta tutulmasının istendiği uygulamalarda önem kazanır. Bu perspektif, termoelektrik soğutmayı yalnızca bir modül olmaktan çıkarıp kontrol edilebilir bir termal eyleyici olarak ele alan modern yaklaşımı temsil eder.

Termoelektrik soğutmanın sınırları iki düzeyde değerlendirilmelidir. Birinci düzey fiziksel sınırdır. Belirli bir sıcaklık farkında, belirli bir ısı yükünü çekerken COP'un hızla düşmesi ve sıcak taraf ısıl direnci büyüdükçe soğuk tarafın avantajının kaybolması. Optimum akımın varlığı ve aşırı akımda Joule kayıplarının baskın hale gelmesi bu sınıfa girer. İkinci düzey mühendislik sınırıdır. Termal arayüz dirençleri, seramik plaka ile soğutucu yüzey arasındaki temas kalitesi, montaj basıncı, lehim bağlantılarında ısıl çevrim yorulması ve uzun süreli işletmede performansın sapsması gibi faktörler gerçek sistemde belirleyicidir. Bu nedenle iyi bir termoelektrik tasarım, yalnızca modül katalog değerlerine değil, sıcak taraf ısı atım koşullarına, arayüz malzemelerine ve işletme profilinin zamansal karakterine birlikte dayandırılmalıdır (Salah and Abuhelwa, 2020).

## **1.6. Fan Gürültüsü, Tanımlamalar ve Kavramlar**

Fanlı soğutma, elektronik sistemlerde zorlanmış taşınım mekanizmasına geçişi sağlayarak sıcaklıkları düşürmenin en yaygın ve en ölçeklenebilir yollarından biridir. Ancak bu yaklaşım ısıl performans kazanımını çoğu zaman akustik bir bedelle birlikte

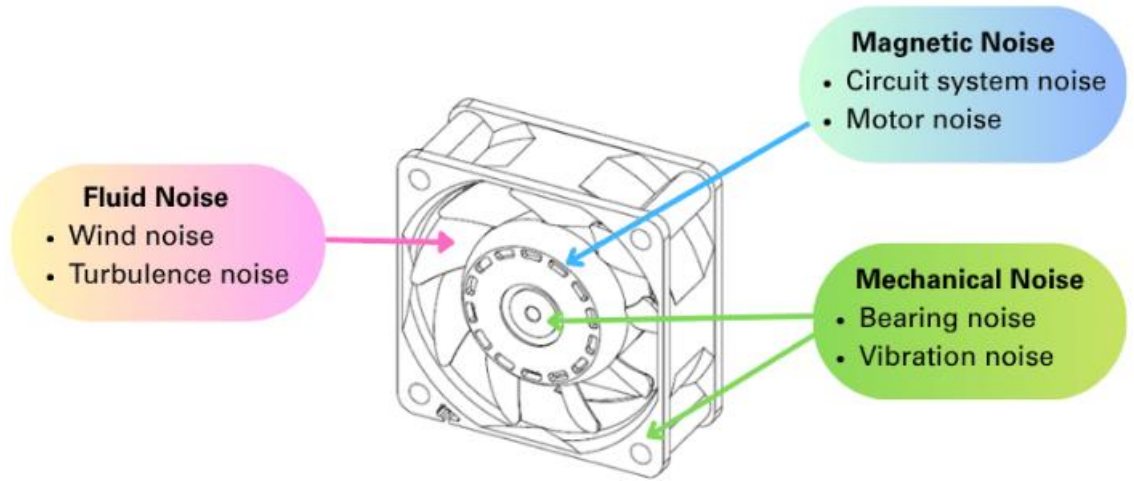
getirir. Fan gürültüsü, kullanıcı konforunu ve ürün algısını doğrudan etkileyebildiği gibi, bazı uygulamalarda (ofis içi cihazlar, laboratuvar ekipmanı, hassas ölçüm ortamları) bir tasarım kısıtı haline gelebilir. Bu nedenle fan gürültüsünü yalnızca yüksek mi düşük mü şeklinde değil, hangi büyüklüklerle tanımlandığı, hangi fiziksel mekanizmalarla üretildiği, nasıl ölçülüp raporlandığı ve hangi tasarım parametreleriyle ilişkilendiği üzerinden ele almak gerekir (Beranek and V  r, 2006; Bies and Hansen, 2017).

Akustikte en temel iki kavram ses basıncı ve ses gücüdür. Ses basıncı, bir noktada havadaki basınç dalgalanmasının büyüklüğünü ifade eder; pratikte mikrofonda ölçülür ve ortamın akustik özelliklerinden (yansıma, soğurma, mesafe, yönlülük) güçlü b  iminde etkilenir. Ses gücü ise kaynağın ortama yaydığı akustik enerjinin kaynak karakteristiğı olarak düşünülebilecek büyüklüğüdür.   vresel koşullardan daha az etkilenmesi nedeniyle farklı ürün veya tasarımları kıyaslamak için daha uygun bir temel sağlar. Bu ayırım, fan gürültüsünü karşılaştırırken neden bazı dokümanların ses gücü düzeyini (kaynak), bazılarının ise belirli bir noktadaki ses basıncı düzeyini (alıcı) raporladığını açıklar. Ses gücü düzeyinin belirlenmesinde yaygın yaklaşımlardan biri, ses basıncı   l  mlerinden hareketle yapılan mühendislik yöntemleridir ve bu yaklaşım ISO 3744 kapsamında standartlaştırılmıştır (Lu et al., 2024).

Ses basıncı düzeyi ve ses gücü düzeyi, geniş dinamik aralığı pratik b  iminde ifade etmek için desibel cinsinden logaritmik   l  kte verilir. Bu logaritmik yapı nedeniyle küçük sayı farkları her zaman küçük değışim anlamına gelmez. Örneğın birkaç desibellik artı   enerji açısından belirgin bir büyümeye karşılık gelebilir. İnsan işitmesi tüm frekanslara aynı duyarlılıkla tepki vermez. Bu nedenle pratikte ölçümler sıklıkla A ağırlıklandırılmalı olarak raporlanır ve değ  r dBA b  iminde sunulur. dBA, özellikle orta frekans bandını daha baskın hale getirerek işitsel algıya daha yakın tek sayı bir göstergedir (Bies and Hansen, 2017).

Fan gürültüsü genellikle iki ana bileşenden oluşur. İlki geniş bant gürültü; türbülans kaynaklı, belirli bir frekansa kilitlenmeyen daha yayvan spektral enerji dağılımıdır. Akış ayrılması, giriş bozulmaları, türbülans şiddeti ve çıkıştaki karı  ma bu bileşeni büyütür. İkincisi ton gürültüsü; belirli frekanslarda keskin tepe yapan bileşenlerdir. En karakteristik örnek, fanın dönmesiyle ilişkili kanat geçiş frekansı ve bunun harmonikleridir. Tonal bileşenler, aynı toplam enerji seviyesinde dahi daha rahatsız edici algılanabildiğ   için tasarımda özel önem taşır (Kinsler et al., 2000; Ardo, 2023).

Fan gürültüsünü köken açısından iki sınıfta toplamak açıklayıcıdır. Şekil 14, bu kaynakların aerodinamik, mekanik ve manyetik bileşenler çerçevesinde farklı bir sınıflandırma ile sunmuş ve ayrımı görsel olarak desteklemiştir. Aerodinamik kaynaklar; akışın fan kanadı etrafında hızlanması, yön değiştirmesi ve türbülans üretmesiyle ortaya çıkar. Kanat arka kenarında girdap saçılması, uç boşluğu girdapları, rotor-stator etkileşimi, girişte hız profili bozukluğu ve stall benzeri kararsız akış rejimleri aerodinamik gürültüyü artıran tipik mekanizmalardır. Bu mekanizmalar hem geniş bant hem de tonal bileşenler üretebilir ve fanın çalışma noktasına (debi basınç ilişkisine) duyarlıdır. Axial fanların gürültü oluşumu ve tonal-geniş bant ayrımı literatürde bu çerçevede ele alınır. Mekanik kaynaklar; motor elektromanyetik etkileri, rulmanlar, balans kaçıklığı, gövde titreşimleri ve montaj elemanları mekanik gürültünün başlıca unsurlarıdır. Mekanik bileşenler özellikle belirli devirlerde belirgin tonlar veya dar bantlı titreşim tepeleri üretebilir. Bu nedenle fan gürültüsü yalnızca hava kaynaklı bir problem değildir. Akışkan, yapı ve montaj etkileşimi olan çok disiplinli bir problemdir .



**Şekil 14.** Fan Gürültüsünün Kaynağına Dair Bir Şematik Sınıflandırma  
(Anonymous, 2025d)

Fan gürültüsünün olumsuz etkileri yalnızca rahatsız edici bir ses üretmesiyle sınırlı değildir; konfor ve algı üzerinde doğrudan belirleyici olur ve çoğu zaman ürün kalitesi algısını şekillendirir. İşlevsel boyutta gürültü, iletişimi ve bilişsel performansı zayıflatabilen bir çevresel yük oluşturur; konuşma anlaşılabilirliğini düşürmesi, dikkat gerektiren görevlerde performansı olumsuz etkilemesi ve mental yorgunluğu artırması bu çerçevenin pratik sonuçlarıdır. Sağlık ve refah açısından ise çalışma dönemlerinde veya sessizliğin beklendiği zaman aralıklarında gürültü dikkat dağınıklarına sebebiyet verebilir. Çevresel gürültü literatürü uzun süreli maruziyetlerin stres tepkileri ve bazı

kardiyovasküler risk göstergeleriyle ilişkilendirilebildiğini de tartışmaktadır. Bu nedenle fan gürültüsü, bazı ürün sınıflarında yalnızca konfor parametresi değil, kullanım senaryosunu ve tasarım hedeflerini belirleyen bir kısıt olarak ele alınmalıdır. Şekil 15. gürültü seviyelerini değerlendiren tipik bir desibel ölçeği sunmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi 70 dBA seviyesi çok yüksek bantta yer alır. Bu düzeyden kaçınmak pratikte en önce kullanıcı konforunu korur ve uzun süreli kullanımda rahatsızlık, zihinsel yorgunluk ve stres tepkisini azaltır. Ayrıca ticari açıdan bakıldığında daha düşük gürültü hedefi, ürün algısı ve kabul edilebilirlik açısından belirgin bir kazanım sağlar. Cihazın arka planda kaybolması kullanıcı memnuniyetini ve kullanım süresini artırır.



**Şekil 15.** Gürültü Seviyelerini Değerlendiren Tipik Bir Desibel Ölçeği  
(Anonymous, 2024b)

Fan gürültüsü, soğutma ihtiyacının doğrudan bir sonucu gibi görünse de, pratikte aynı sıcaklık hedefi farklı akustik çıktılarla sağlanabilir. Bunun nedeni, toplam ısı atımının yalnızca fan devrine bağlı olmaması; ısıl yolun iletim ve yayma performansı, kanatçık geometrisi, hava kanalı kayıpları ve giriş çıkış koşullarının fanın çalışma noktasını değiştirmesidir. Fan, aerodinamik olarak zorlandığı bölgelerde daha yüksek türbülans ve daha güçlü tonal bileşenler üretmeye eğilimlidir. Buna karşın daha düşük basınç kaybı ile aynı debiyi sağlayabildiği bir sistemde daha sessiz çalışabilir. Dolayısıyla fan gürültüsü, yalnızca fan seçimi değil, aynı zamanda kanal, kanatçık, yerleşim ve kontrol stratejilerinin ortak çıktısıdır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Isı Borulu Soğutma Sistemleriyle Elektroniklerin Soğutulması

Bu alt bölümde ele alınan çalışmalar, ısı borulu soğutma sistemleriyle ilgili literatürün tamamını kapsama iddiası taşımamaktadır. Isı borulu uygulamalar, elektronik soğutmadan enerji sistemlerine ve uzay uygulamalarına kadar çok geniş bir alana yayılmakta, bu nedenle bütün çalışmaların ayrıntılı biçimde özetlenmesi pratik olarak mümkün değildir. Buradaki amaç, elektronik bileşenlerin soğutulmasına odaklanan ve özellikle düz, yassı, kısmen yassılaştırılmış, devre tipi ve eşmerkezli ısı borularını konu alan seçilmiş bir grup çalışmayı bir araya getirerek, güncel araştırma eğilimlerine ilişkin tutarlı bir çerçeve sunmaktır. Bu çerçeve, ısı borusunun yalnızca bir yardımcı eleman değil, yüksek ısı akısı, sınırlı hacim ve sıcak nokta bastırma gereksinimlerinin aynı anda yönetildiği durumlarda, tüm ısı yol mimarisini belirleyen temel bir tasarım bileşeni olarak nasıl konumlandığını görünür kılmayı hedeflemektedir.

Çalışmaların seçimi yapılırken, gerçekçi sınır koşulları altında elektronik soğutmaya yönelik özgün katkı yapan ve ısı borusunun geometrisi, fitil yapısı, çalışma akışkanı, doldurma oranı, etkin uzunluk ve konum gibi parametrelerin deneysel veya sayısal olarak sistematik biçimde incelendiği yayınlara öncelik verilmiştir. İncelenen çalışmalar, farklı güç seviyelerine ve yerleşim koşullarına sahip elektronik sistemlerde kullanılan çeşitli ısı borulu soğutma çözümlerini kapsamaktadır. Ultra ince düz yapılardan döngü ve devre tipi mimarilere, farklı fitil ve gövde geometrilerinden kanatçıklı ısı alıcılarla bütünleşik tasarımlara uzanan bu örnekler, ısı borularının elektronik soğutmada hem pasif ısı yayma–taşıma kapasitesi hem de hava ya da sıvı soğutmalı sistemlerle birlikte çalışma yeteneği açısından sunduğu genel eğilimleri ortaya koymaktadır.

Chen et al. (2019), yoğunlaştırılmış ve çok ince taşınabilir elektroniklerin soğutulması için yalnızca 2 mm kalınlığında alüminyum düz bir ısı borusu geliştirerek ısııl davranışını deneysel olarak incelemiştir. Deney düzeneğinde ısı borusu bir bakır çubukla ısıtılmış, üstüne su kanallı soğutma plakası yerleştirilmiş, farklı noktalara yapıştırılan ısı çiftleriyle yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi kaydedilmiş ve yayılma türü eşdeğer ısıl direnç, merkez ve köşe noktalar arasındaki sıcaklık farkından hesaplanmıştır. Isı yükü 20 ile 160 W arasında değiştirilmiş, soğutma suyu sıcaklığı üç farklı değerde (yaklaşık 15-25 °C aralığında) sınanmış ve ısı borusu hem yatayda hem de

çeşitli eğim açılarında çalıştırılmıştır. Sonuçlar, bu ultra ince yapının ısı yükündeki artışa çok hızlı tepki verdiğini, yaklaşık 250-400 saniye içinde kararlı duruma geçtiğini ve yatay konumda 160 W'a kadar ısıyı kararlı biçimde uzaklaştırabildiğini göstermiştir. Isı yükü arttıkça fitil içindeki sıvı filminin incelmesiyle buharlaşma direncinin azaldığı, buna bağlı olarak ısıl direncin 0,198-0,156 °C/W aralığında kaldığı ve en düşük değerin 140 W civarında elde edildiği rapor edilmiştir.

Zeghari et al. (2019), bakır gözenekli fitil yapısına sahip düz bir ısı borusunun elektronik bileşenlerin soğutulmasında kullanılabilirliğini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, yatay konumda çalışan düz ısı borusunun önce laboratuvar ölçeğinde ayrıntılı ısı karakterizasyonu yapılmış; histerezis davranışı, farklı ısı yükleri altında başlatma süreci, sistem ısıl direnci, etkin ısıl iletkenlik ve çeşitli dolum oranlarının etkisi değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, yaklaşık dörtte bir hacim dolumunun bu ısı borusu geometrisi için en uygun değer olduğunu, bu durumda sistem ısıl direncinin en düşük, etkin ısıl iletkenliğinin ise en yüksek olduğunu göstermiştir. Çalışmada ayrıca n-pentanın, incelenen diğer akışkanlara kıyasla daha yüksek gizli ısı, uygun yüzey gerilimi ve çevresel göstergeler açısından avantajlı olduğu, bu nedenle seçilen geometride en etkin çalışma akışkanı olarak öne çıktığı belirtilmiştir. Elde edilen bu bulguların ardından, belirlenen en iyi akışkan ve dolum oranı kullanılarak düz ısı borusunun bir televizyon alıcısı içinde, fanlı geleneksel soğutma düzeniyle karşılaştırmalı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma sonuçları, ısı borulu pasif düzenin işlemci sıcaklığını fanlı çözüme yakın düzeylerde tutabildiğini, buna karşılık kart üzerindeki diğer bileşenlerde daha düşük sıcaklıklar sağladığını ve fanın üflediği sıcak havanın oluşturduğu istenmeyen ısınmayı önlediğini göstermiştir.

Zhou et al. (2019b), yüksek ısı akıllı elektroniklerin soğutulmasına yönelik ultra ince yassı ısı borularının performansını artırmak amacıyla, çift gözenekli spiral dokunmuş tel örgü fitile sahip yeni bir yapı önermektedir. Çalışmada 0,05 ve 0,04 mm çaplı bakır teller kullanılarak hem tek gözenekli hem de çift gözenekli olmak üzere üç farklı fitil konfigürasyonu tasarlanmış; bu fitiller için geçirgenlik ve kapiler limit, analitik modeller üzerinden değerlendirilmiş, ardından kızılötesi kamera ile yürütülen kapiler yükselme deneyleriyle kapiler performansları karakterize edilmiştir. Üretilen fitiller, çapı 6 mm olan silindirik ısı borularına sinterlenmiş, borular daha sonra yassılaştırılarak ultra ince ısı borusu numuneleri elde edilmiş ve bu numuneler, yatay konumda 80-140 % arasında değişen dolum oranları ve 10-26 W aralığında ısı yükleri altında test edilmiştir. Deney

sonuçları, optimum dolum oranının yaklaşık %120 olduğunu; bu koşulda buhar-sıvı dolaşımının daha dengeli gerçekleştiğini, kuruma veya kondenser tarafında sıvı birikmesi kaynaklı performans kayıplarının azaldığını göstermektedir. Yazarlar, toplam ısı direncin %70'ten fazlasının buharlaşma bölgesine ait olduğunu ve dolayısıyla fitil yapısının bu bölgede belirleyici hale geldiğini vurgulamaktadır. Sonuç olarak çalışma, büyük gözeneklerin sağladığı yüksek geçirgenlik ile küçük gözeneklerin ürettiği yüksek kapiler basıncı tek bir fitil yapısında birleştirerek, ultra ince ısı borularında hem üretim maliyeti hem de termal performans açısından dengeli bir tasarım alanı oluşturulabileceğini ortaya koymaktadır.

Septiadi et al. (2020), bilgisayar işlemcilerinin soğutulmasında kullanılan kaskad düz ısı borulu bir sistemde etkin uzunluk kavramının termal performansa etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada bakır gövdeli, sinterlenmiş toz fitilli iki kademeli bir ısı borusu tasarımı kullanılmış; birinci kademe işlemci üzerindeki ısıyı ara bölgeye taşıırken, ikinci kademe bu ısıyı kanatçıklı ısı alıcıya ileten yapı olarak kurgulanmıştır. Farklı tasarım seçeneklerini temsil etmek üzere etkin uzunluk 20, 23 ve 26 santimetre olacak biçimde üç farklı düzenek oluşturulmuş; Intel Core i5 işlemci, yazılım tabanlı yükleme yöntemiyle hem düşük yük (yalnızca işletim sistemi çalışırken) hem de tam yük koşullarında çalıştırılarak, evaporatör ve kondenser bölgelerindeki sıcaklıklar çok noktalı termokupl sistemiyle ölçülmüş ve buradan eşdeğer ısı dirençler hesaplanmıştır. Sonuçlar, tüm etkin uzunluk seçeneklerinde kaskad ısı borulu yapının, fanı sökülmüş standart soğutucuya göre belirgin biçimde daha düşük işlemci sıcaklıkları sağladığını, ayrıca fanlı standart soğutucuyla kıyaslandığında da benzer hatta bazı koşullarda daha iyi bir sıcaklık profili sunduğunu göstermektedir. Tam yük altında işlemci sıcaklığı 20, 23 ve 26 santimetre için sırasıyla yaklaşık 64, 65 ve 65 °C düzeylerinde kalmış, kondenser sıcaklıkları ise çevre sıcaklığına nispeten yakın değerlere inmiştir. Çalışmanın genel değerlendirmesi, uygun etkin uzunluk seçimiyle kaskad düz ısı borulu soğutucuların, işlemci soğutmasında geleneksel fan destekli çözümlere uygulanabilir bir alternatif oluşturabileceği yönündedir.

Brahim and Jemni (2021), bakır metal köpük fitil yapısına sahip düz ısı borularının, çoklu sıcak nokta içeren elektronik kartların soğutulmasındaki davranışını üç boyutlu sayısal bir modelle incelemiştir. Çalışmada, farklı gözenek yapısına sahip bakır köpük ve sinterlenmiş toz fitiller için buhar bölgesi ve gözenekli fitil bölgesinde kütle, momentum ve enerji denklemleri COMSOL tabanlı bir CFD modeliyle birlikte çözülmüş,

böylece sıcaklık alanı, sıvı/buhar hız dağılımı, sıvı basınç düşümü ve kapiler limit aynı çerçevede değerlendirilmiştir. Analizler, kritik durumların duvara yakın üst bölgelerdeki sıcak noktalarda ortaya çıktığını ve hotspot alanı küçüldükçe artan ısı akısı nedeniyle fitil kuruma riskinin belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Yazarlar, farklı yapısal özelliklerdeki bakır köpükler arasında kapiler basınç ve geçirgenlik dengesi açısından optimum kombinasyonlar bulunduğunu ve metal köpük fitillerin elektronik soğutmada güçlü bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Zhao et al. (2021), elektroniklerin soğutulmasına yönelik olarak çevre dostu R1233zd(E) akışkanlı, alüminyum alaşımdan üretilmiş düz disk buharlaştırıcılı bir devre ısı borusu tasarlamakta ve deneysel olarak karakterize etmektedir. Çalışmada, nikelden sinterlenmiş biporoz fitil yapısına sahip buharlaştırıcı, yaklaşık 790 mm etkin ısı taşıma mesafesine ve 16,62 cm<sup>2</sup>'lik ısıtma yüzeyine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır; bu yapı telekom ekipmanları ve küçük/orta boy sunucu kasaları gibi karasal elektronik uygulamaları hedefleyen kompakt bir döngüsel ısı borusu prototipi olarak ele alınmıştır. Deneysel program kapsamında, ısı alıcı sıcaklığı -10, 0, 15 ve 30 °C seviyelerinde değiştirilmiş; her durumda başlatma davranışı, sabit ve değişken ısı yükleri altındaki kararlı/yarı kararlı çalışma karakteristikleri izlenmiştir. Sonuçlar, hedeflenen yüzey sıcaklığı sınırı 75 °C korunurken, -10 °C ısı alıcı sıcaklığında 190 W (11,43 W/cm<sup>2</sup>), 30 °C'de ise 130 W (7,82 W/cm<sup>2</sup>) ısı yüküne kadar güvenli çalışmanın mümkün olduğunu; minimum buharlaştırıcı ve toplam döngüsel ısı borusu ısı dirençlerinin sırasıyla yaklaşık 0,134 ve 0,197 °C/W seviyelerine kadar düşebildiğini göstermektedir. Düşük ısı yüklerinde başlatma sürecinde geçici sıcaklık aşmaları ve salınımlar gözlenmiş, ancak fitil-kompanzasyon haznesi etkileşimi sayesinde sistemin kendi kendine kararlı rejime oturduğu rapor edilmiştir. Çalışma, R1233zd(E) akışkanının düşük toksisite ve düşük küresel ısınma potansiyeli ile güvenli bir alternatif sunduğunu, düz buharlaştırıcılı devre ısı borularının ise karasal elektronik soğutma uygulamalarında uzun taşıma mesafesi, düşük ısı direnç ve değişken yükler altında hızlı termal cevap gibi avantajlar sağlayabildiğini ortaya koymaktadır.

Xin et al. (2022), küçük hacimli ve yüksek ısı akılı elektroniklerin soğutulması için geliştirilen mini oluklu düz ısı borularında fitil geometrisinin ve dağılımının ısı performansına etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemektedir. Çalışmada bakır gövdeli, su ile doldurulmuş, V kesitli, dikdörtgen kesitli ve blok tipi oluklara sahip düz ısı boruları imal edilmiş; evaporatör-adyabatik-kondenser bölgeleri boyunca sıcaklıklar hassas

sıcaklık algılayıcıları ile ölçülmüş ve sistem, değişen ısı yükü, eğim açısı ve çalışma sıcaklığı altında test edilmiştir. Buna paralel olarak, buhar ve sıvı bölgelerinde kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerini esas alan bir boyutlu bir model kurularak, deney koşullarına karşılık gelecek şekilde ısı borusu içindeki basınç dağılımı, sıvı ve buhar hızları, kapiler basınç farkı ve ısı sınırlar hesaplanmıştır. Sonuçlar, V kesitli oluklara sahip düz ısı borusunun, dikdörtgen ve blok yapılı seçeneklere kıyasla daha düşük ısı direnç ve daha iyi sıcaklık düzgünlüğü sağladığını; buna karşılık blok tipinin daha yüksek toplam ısı taşıma kapasitesine ulaştığını göstermektedir. Yazarlar, evaporatör tarafında olukların dar, kondenser tarafında ise geniş olacak biçimde eğimli yerleştirildiği V2 konfigürasyonunun, sıvı geri dönüşünü hızlandırarak fitil içi ısı direnci yaklaşık %10 azaltabildiğini ve sıcaklık tepe değerini birkaç derece düşürdüğünü rapor etmektedir.

Xiong et al. (2022), yüksek ısı akısına sahip elektronik yongaların soğutulması için yeni bir düz buharlaştırıcı döngüsel ısı borusu tasarlayarak bu sistemin ısı davranışını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada bakır gövdeli, sinterlenmiş gözenekli bakır fitil kullanılan ve fitil içinde çift sıra buhar kanalları bulunan bir buharlaştırıcı ile, iki katmanlı su soğutmalı bir yoğusturucu ve farklı çaplarda buhar, sıvı ve yoğusturucu hatlarından oluşan kapalı devreler tasarlanmıştır. Kurulan deney düzeneğinde, dokuz farklı konumlandırma (pozitif yerçekimi, yatay ve ters yerçekimi yönleri), 10-40 °C aralığında ısı alıcı su sıcaklığı ve 1-4 L/dk aralığında su debisi için ısı yükü 50-750 W aralığında değiştirilerek bağlantı sıcaklığı, buharlaştırıcı ve yoğusturucu yüzey sıcaklıkları, sistem ve ısı borusu eşdeğer ısı direnci ile buharlaşma ısı taşınım katsayısı belirlenmiştir. Sonuçlar, önerilen düz buharlaştırıcı döngüsel ısı borusunun pozitif yerçekimi yönlerinde, özellikle buharlaştırıcının yoğusturucunun altında olduğu +90° konumunda, 83.33 W/cm<sup>2</sup> düzeyindeki ısı akılarında dahi kararlı biçimde çalışabildiğini ve bağlantı sıcaklığını en elverişli konumda 750 W yükte yaklaşık 83,6 °C düzeyinde tuttuğunu göstermiştir. Yönelimin ısı performans üzerinde belirgin etkili olduğu, buna karşılık ısı alıcı su sıcaklığının 10-40 °C arasında artırılmasının aynı ısı yükünde bağlantı sıcaklığını yalnızca birkaç derece yükselttiği, 1-4 L/dk arasındaki debi değişiminin ise ısı direnç ve bağlantı sıcaklığı üzerinde sınırlı bir etkisi olduğu rapor edilmiştir.

Hu et al. (2023), geleneksel sokak lambalarının yalnızca ışık kaynağı değiştirilerek ışık yayan diyotlu bir yapıya dönüştürülebilmesi amacıyla, ısı taşıyıcı elemanı döngüsel bir ısı borusu olan yeni bir aydınlatma modülü tasarlamış ve bu düzende

sinterlenmiş nikel fitil ile polieter sülfon esaslı gözenekli fitilin performansını karşılaştırmıştır. Çalışmada buharlaştırıcı kısmında altı adet diyot çip bulunan döngüsel ısı borusu, kanatçıklı boru ve fan ile desteklenen bir yoğuşturucu bölgesi ile birleştirilmiş, uygun bir soğutucu akışkan doldurulmuş ve sistem farklı eğim açıları ile çeşitli ortam sıcaklıklarında çalıştırılarak yüzey sıcaklıkları çok noktadan ölçülmüş, ısı dirençleri hesaplanmış ve ayrıca uzun süreli kararlılık için birkaç prototip haftalar boyunca kesintisiz çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, polieter fitilin özellikle eğimin arttığı ve çevre sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda nikel fitile kıyasla daha düşük ısı kaynağı sıcaklığı ve daha düşük ısı direnç sağladığını, böylece diyot birleşim sıcaklıklarının yaygın ömür sınırının anlamlı biçimde altında tutulabildiğini göstermektedir. Uzun süreli deneyler ve iç yapı incelemeleri, polimer esaslı fitilin gözenek yapısının ve geçirgenlik özelliklerinin test süreci sonunda büyük ölçüde korunduğunu, dolayısıyla ısı borusunun bu tür aydınlatma armatürlerinde uzun dönemli kullanım için de uygun olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca polieter sülfon fitilin nikel fitile göre daha hafif ve daha düşük maliyetli olması, döngüsel ısı borulu bu çözümü hem ısı performans hem de ekonomi açısından sokak aydınlatması gibi geniş ölçekli uygulamalar için cazip kılmaktadır.

Rangasamy et al. (2023), kısmen yassılaştırılmış fitilli bir ısı borusunun elektronik soğutmada kullanılabilirliğini ve enerji performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, buharlaştırıcı kısmı yassılaştırılmış, adyabatik ve yoğuşturucu kısımları dairesel bırakılmış bakır bir ısı borusu tasarlanmıştır; bu sayede yassı bölgenin elektronik devre yüzeyine doğrudan temas edebilmesi, dairesel kısmın ise sistem dışında daha serbest yerleşim imkanı sunması hedeflenmiştir. Deney düzeneğinde, su ile birlikte alüminyum oksit ve titanyum dioksit katkılı nanoakışkanlar çalışma akışkanı olarak kullanılmış; dolum oranı sabit tutulurken 50-300 W aralığında ısı girdisi ve 0°, 45° ve 90° olmak üzere üç farklı eğim açısı için buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu bölge sıcaklıkları ölçülerek toplam ısı direnç ve ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Sonuçlar, ısı direncin ısı girdisi arttıkça azaldığını, en düşük ısı direnç ve en yüksek ısı taşınım katsayısının 45° eğimde alüminyum oksit katkılı nanoakışkan ile elde edildiğini, bu akışkanın suya ve titanyum dioksit göre hem daha düşük direnç hem de daha yüksek ısı taşınım katsayısı sağladığını göstermektedir. Yazarlar ayrıca kısmen yassılaştırılmış ısı borusunun performansını tamamen dairesel ve tamamen yassılaştırılmış ısı boruları ile karşılaştırmış; kısmen yassı tasarımın, akış rejimindeki ek basınç kaybına karşın, yoğuşturucu bölgesinde düzenli akış karakteri sayesinde dairesel boruya göre daha düşük

ısıl direnç ve daha yüksek ısı taşınım katsayısı sunduğunu, tamamen yassılaştırılmış borudan ise yalnızca sınırlı ölçüde geri kaldığını rapor etmişlerdir.

Gan et al. (2024), yüksek güçlü elektronik elemanların soğutulması için, tabanı düz borularından oluşan üç boyutlu geliştirilmiş bir ısı alıcı tasarlayıp deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada önce tek bir düz ısı borusunun farklı doldurma oranlarında ilk çalışma davranışı ve ısı transfer performansı test edilmiş, bu eleman için en uygun çalışma koşulları belirlendikten sonra, en uygun tasarım parametreleri kullanılarak ısı borulu kanatçıklı ısı alıcı oluşturulmuş ve aynı boyutlardaki klasik alüminyum kanatçıklı ısı alıcı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, düz ısı borusu için yaklaşık %35 doldurma oranının, hem en kısa ilk çalışma süresini hem de en düşük ısıl direnci verdiğini, bu nedenle kanatçık tasarımı için en uygun değer olduğunu göstermektedir. Geliştirilmiş ısı borulu ısı alıcının toplam ısıl direncinin, geniş çalışma aralığında  $0,48 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$  değerinin altında kaldığı, tabandaki sıcaklık farklılıklarını  $1,7\text{-}1,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$  mertebesine kadar düşürdüğü ve özellikle zorlanmış taşınım koşullarında klasik alüminyum kanatçıklı yapıya göre belirgin üstünlük sağladığı rapor edilmiştir.

Ling et al. (2024), yüksek ısı akısına sahip elektronik bileşenlerin soğutulması için mikro kanallı fitil yapısına sahip yeni bir döngü ısı borusunun ısıl davranışını deneysel olarak incelemektedir. Düz buharlaştırıcıya entegre edilen ve sinterlenmiş bakır tozundan oluşturulan fitil içinde birbirine paralel on üç buhar kanalı bulunan düzenekte,  $30\text{-}180 \text{ W}$  aralığında hem düzenli artan/azalan yükler hem de rastgele değişen yükler altında başlatma ve kararlı rejim performansı değerlendirilmiştir; deneylerde ısı kaynağı sıcaklığının  $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin, buharlaştırıcı yüzey sıcaklığının ise yaklaşık  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında tutulabildiği ve artan ısı yüküyle birlikte başlatma süresinin kısaldığı gösterilmiştir. Rastgele yük değişimlerinde sistemin birkaç saniye içinde yanıt verdiği, sekiz dakika içinde yeni kararlı duruma ulaştığı ve tüm ölçüm noktalarındaki sıcaklık dalgalanmasının  $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında kaldığı, bu nedenle değişken güç tüketimine sahip sunucu sınıfı elektronikler için uygun bir sıcaklık kontrolü sağlanabildiği belirtilmiştir. Etkin ısıtılan alan  $20 \times 20 \text{ mm}$ 'ye küçültüldüğünde ise bu düzenekle  $210 \text{ W}$  seviyesine karşılık gelen  $52,5 \text{ W/cm}^2$  mertebesinde ısı akısının yönetilebildiği, bu ısı akısında dahi buharlaştırıcı sıcaklığının yaklaşık  $59,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kaldığı ve literatürde rapor edilen düz buharlaştırıcılı döngü ısı borularına göre hem daha yüksek ısı akısı hem de daha düşük sıcaklık düzeyi sunabildiği vurgulanmaktadır.

Zhong et al. (2024), yüksek güçlü elektronik bileşenlerin soğutulmasında kullanılabilecek yeni bir eşmerkezli ısı borusu geometrisi geliştirerek, klasik silindirik ısı borularının ısı taşıma sınırını artırmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, bakır gövdeli ve sinterlenmiş toz fitil yapısına sahip, adyabatik bölgede içten ikinci bir boru ile buhar ve sıvı kanallarını birbirinden ayıran bir ısı borusu tasarlanmıştır; böylece buhar ve sıvı karşı akışı sırasında oluşan kesme gerilmesi ve buna bağlı buhar sürüklenmesi etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Deneysel incelemede farklı doldurma oranları ve sinterlenmiş bakır tozu tane boyutları için, su çalışma akışkanı kullanılarak ısı yükü basamaklı olarak artırılmıştır. Bu süreçte buharlaşma sıcaklığı, toplam ve bölgesel ısı dirençleri ile kararlı çalışma sınırı ölçülmüş ve aynı koşullarda çalışan klasik silindirik ısı borusu ile karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar, yaklaşık %125 doluluk oranının ve 106-125 mikrometre aralığındaki toz büyüklüğünün, fitilde kapiler basınç ile geçirgenlik arasında en dengeli bileşimi verdiğini, bu koşullarda toplam ısı direncinin geniş bir ısı yükü aralığında düşük kaldığını ve kuruma sınırının daha geç ortaya çıktığını göstermektedir. Ayrıca yeni eşmerkezli yapı, klasik ısı borusuna göre yaklaşık %57 daha yüksek ısı yükünde kararlı çalışabilmiş, buharlaşma sıcaklığını yaklaşık 10-20 °C daha aşağıya çekmiş ve toplam ısı direnci belirgin biçimde düşürmüştür. Yazarlar, iç boru ile buhar ve sıvı akımlarının ayrılmasının, sıvı geri dönüşünü kolaylaştırarak buhar sürüklenmesini bastırdığını ve bu basit tasarım değişikliğinin yüksek güçlü elektronikler için düşük maliyetli fakat etkili bir ısı borusu iyileştirme yaklaşımı sunduğunu vurgulamaktadır.

Xiong et al. (2024), yüksek ısı yük taşıyan elektronik bileşenlerin hava ile soğutulması için düz buharlaştırıcı ve yüksek verimli yoğuşturucuya sahip yeni bir devre tipi ısı borulu soğutma sistemi önermekte ve ayrıntılı olarak incelemektedir. Çalışmada önce yoğuşturucu tasarımına temel oluşturmak amacıyla, kanatçıklı iki farklı ısı alıcı geometrisi için üç boyutlu sayısal akış ve ısı geçişi çözümleri yapılmış, panjur kesitli kıvrımlı kanatçıkların aynı hava hızında daha düşük çıkış suyu sıcaklığı ve daha yüksek ısı çekme kapasitesi sağladığı gösterilmiştir. Ardından geliştirilen düz buharlaştırıcı devre ısı borusu, değişen doldurma oranları (yaklaşık %33 ve %46), farklı fan gerilimleri ve yedi ayrı konumda deneysel olarak test edilmiştir. Bakır ısı bloğu ile temsil edilen 30×30 milimetrelik bir yonga üzerinden 50-550 W aralığında ısı girdisi uygulanarak düğüm sıcaklığı, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu sıcaklıkları ile sistem ısı direnci hesaplanmıştır. Sonuçlar, hava soğutmalı sistemde yaklaşık %33 dolum oranının 50-450 W aralığında daha düşük düğüm sıcaklığı sağladığını, fan geriliminin yükselmesiyle özellikle yüksek

güçlerde hem düğüm sıcaklığının hem de sistem ısıl direncinin belirgin biçimde azaldığını ve yaklaşık 500 W'lık yonga gücünde düğüm sıcaklığının 85 °C civarında tutulabildiğini ortaya koymaktadır. Son aşamada aynı düzeneğin su ile soğutulan sürümüyle enerji tüketimi karşılaştırılmış, fan, pompa ve soğutma makinesinin güç tüketimi dikkate alındığında hava soğutmalı düzenekte beş yıllık işletme süresinde toplam enerji tüketiminin su soğutmalı düzeneğin yaklaşık onda birinden daha düşük kaldığı hesaplanmış ve böylece yüksek ısı akıllı yongalar için hava soğutmalı devre ısı borulu mimarinin, uygun tasarım yapıldığında hem ısıl kapasite hem de enerji tüketimi açısından güçlü bir seçenek olabileceği vurgulanmıştır.

Bai et al. (2024), yarı iletken tabanlı elektronik aygıtlarda hafif ve yüksek performanslı ısıl yönetim amacıyla, üç boyutlu spiral dokulu tel fitil yapısına sahip entegre alüminyum düz plaka ısı borusu geliştirmiş ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, fitil yapısı alüminyum tozu ile kaplanıp gövdeye sinterleme yoluyla bütünleşik hale getirilerek hem duvar-fitil arayüzündeki ısıl direnç azaltılmış hem de kılcal pompalama yeteneği yükseltilmiştir. Ardından farklı doldurma oranları (%30, 40 ve 50) ve çeşitli eğim açıları (0°, 30°, 60° ve 90°) için ısı kaynağı sıcaklığı, ısıl direnç ve eşdeğer ısıl iletkenlik ölçülmüştür. Sonuçlar, spiral örgülü ve toz kaplı fitilin, klasik mikro kanallı alüminyum düz plaka ısı borularına göre çok daha yüksek kılcal yükselme yüksekliği sağladığını, böylece buharlaşma bölgesine sıvı dönüşünün güvenilir biçimde sürdürülebildiğini göstermektedir. Doldurma oranı açısından en dengeli performansın, %40 doldurma ile elde edildiği, bu durumda yer çekimi yardımcı 90° konumda yaklaşık 31,82 W/cm<sup>2</sup> mertebesinde ısı akısı taşınabildiği, toplam ısıl direncin yaklaşık 0,052 °C/W seviyesine düştüğü ve eşdeğer ısıl iletkenliğin 14500 W/(m·K) düzeyine ulaştığı rapor edilmektedir. Aynı ısı borusunun yatay konumda bile 13,64 W/cm<sup>2</sup> civarında ısı akısını, kabul edilebilir ısıl direnç değerleriyle aktarabilmesi, tasarımın eğim değişimlerine karşı dayanıklı olduğuna işaret etmektedir. Yazarlar, bu sayede kütlesi ve maliyeti görece olarak düşük, ancak kritik ısı akısı ve etkin iletkenlik bakımından mevcut alüminyum tabanlı çözümlerin ötesine geçen bir elektronik soğutma elemanı ortaya koyduklarını, bunun da özellikle taşınabilir aygıtlarda ve hafiflik gerektiren diğer elektronik uygulamalarda önemli bir tasarım seçeneği sunduğunu vurgulamaktadır.

Shi et al. (2025), endüstride yaygın olarak kullanılan ısı borulu işlemci soğutucularında, üretim sırasında fitil kalınlığının ısıl performansa etkisini inceleyerek, küçük geometrik sapmaların bile sıcaklık denetimi açısından önemini ortaya

koymaktadır. Çalışmada önce bakır gövde, sinterlenmiş fitil ve buhar çekirdeğinin ayrı katmanlar olarak ele alındığı katmanlı bir ısı borusu modeli geliştirilmiş; bu modelle, tek bir ısı borusunun hem buharlaştırıcı hem yoğunlaştırıcı bölgesinde ısı dirençler ayrıntılı biçimde hesaplanmış ve ardından dört ısı borusundan oluşan kanatçıklı bir işlemci soğutucu modülüne genelleştirilmiştir. Yazarlar, farklı büyüklük ve yönde fitil kalınlık dengesizliği için değişen sınır koşullarında sayısal çözüm yapmış, ısı direnç ve ısı aktarım kapasitesinin yanında buhar-sıvı arayüzündeki ısı akısı dağılımını ve ısı kaynağı yüzey sıcaklığını değerlendirmiştir. Sonuçlar, fitil kalınlığının buharlaştırıcı tarafında incelendiği bölgelerin yerel ısı direnci düşürdüğünü, bu sayede tek ısı borusu için buharlaştırıcı ısı direncinin yaklaşık %40 azaltılabildiğini ve toplam ısı aktarımının belirgin biçimde arttığını; buna karşılık yoğunlaştırıcı tarafında fitil dengesizliğinin, dış taşınım direncinin baskın olması nedeniyle ihmal edilebilir düzeyde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu alt bölümde özetlenen çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, elektronik soğutmada ısı borulu çözümlerin belli başlı birkaç ekseninde yoğunlaştığı görülmektedir. Bir grup çalışma, ultra ince düz ısı boruları, yassılaştırılmış ve kısmen yassılaştırılmış geometriler ile mikro yapıli fitiller üzerinden, küçük temas alanlı ısı kaynaklarında sıcak nokta kontrolü ve sıcaklık dağılımının iyileştirilmesine odaklanmaktadır. Diğer yandan döngü ısı boruları, devre tipi ve eşmerkezli yapılar ile doldurma oranı, fitil gözenek yapısı ve iç akış düzenlemesinin ısı taşıma sınırı, kuruma davranışı ve ısı direnç üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmektedir. Çeşitli uygulama örneklerinde düz ısı borulu kanatçıklı ısı alıcıların, klasik katı metal soğutuculara göre daha düşük ısı direnç, daha homojen taban sıcaklığı ve daha yüksek etkin ısı iletkenlik sunduğu; uygun tasarım yapıldığında fan destekli geleneksel çözümlerle yarışan, hatta bazı durumlarda bunları aşan performansa ulaşabildiği gösterilmektedir. Elektronik soğutmada literatürde rapor edilen farklı ısı borulu ısı alıcı geometrilerinin, kullanılan malzeme, fitil yapısı, çalışma akışkanı, soğutma ortamı ve elde edilen ısı direnç değerleri bakımından nasıl konumlandığını göstermek üzere, temsili bazı çalışmalar Tablo 5'te özetlenmiştir.

**Tablo 5.** Elektronik Bileşenlerin Soğutulmasında Kullanılan Bazı Isı Borulu Isı Alıcı Tasarımlarının Özellikleri (Gibbons et al., 2021).

| Referans             | Tip      | Malzeme | Boyutlar [mm]   | Fital Yapısı                                           | Çalışma Akışkanı    | Soğutma Ortamı                   | Çalışma Aralığı [°C] | Isıl Güç [W] | Isıl Direnç [K/W] |
|----------------------|----------|---------|-----------------|--------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|--------------|-------------------|
| Solomon et al., 2012 | Dairesel | Bakır   | 19,5 × 400      | Bakır Nano Parçacık Kaplı Tel Örgü                     | Su                  | Su, Zorlanmış Taşınım            | 42–116               | 200          | 0,31              |
| Wong et al., 2011    | Düz      | Bakır   | 100 × 90 × 1,34 | Üst Plakada Üçgen Kanallar, Alt Plakada Bakır Tel Örgü | Su, Metanol, Aseton | Hava, Zorlanmış Taşınım          | Belirtilmemiş        | 460          | 0,03              |
| Hsieh et al., 2012   | Düz      | Al      | 150 × 31 × 5,5  | Dikdörtgen Kanallar ve Bakır Tel Örgü                  | Aseton              | Sıvı Soğutucu, Zorlanmış Taşınım | 50–62,5              | 140          | 0,32              |
| Wang et al., 2013    | Düz      | Bakır   | 87 × 83 × 7     | Bakır Dairesel Kanallar                                | Su                  | Hava, Zorlanmış Taşınım          | ≈93–98               | ≈30          | 0,07              |
| Sun and Qiu, 2014    | Düz      | Bakır   | 70 × 70 × 3     | Sinterlenmiş Bakır Toz                                 | Su, Etanol          | Su, Zorlanmış Taşınım            | 35–100               | 207          | 0,10              |
| Peng et al., 2015    | Düz      | Bakır   | 90              | Yaprak Damarı Benzeri Kanallı                          | Su, Etanol          | Hava, Zorlanmış Taşınım          | Belirtilmemiş        | 90           | 0,17              |
| Shaeri et al., 2017  | Düz      | Bakır   | 76 × 76 × 3,5   | Sinterlenmiş Bakır Toz                                 | Su                  | Su, Zorlanmış Taşınım            | 48–105               | 152          | 0,37              |
| Deng et al., 2017    | Düz      | Bakır   | 75 × 75 × 6     | Sinterlenmiş Bakır Toz                                 | Etanol              | Su, Zorlanmış Taşınım            | 30–40                | 280          | 0,14              |
| Feng et al., 2020    | Düz      | Bakır   | 180 × 180 × 3   | Gözenekli Bakır Sütuncuklar ve Üçgen Kanallar          | Su                  | Su, Zorlanmış Taşınım            | 48–55                | 100          | 0,05              |

Diğer taraftan bu çalışmalar, güçlü yönlerin yanı sıra belirli sınırları da ortaya koymaktadır. Doldurma oranı, fitil tipi, yönelim, akış düzeni ve ısı yükü profili değiştiğinde ısı borularının kuruma riskinin, başlatma davranışının ve kararlı çalışma sınırlarının hızla değiştiği; dolayısıyla pasif yapının tek başına her çalışma senaryosunda güvenli sıcaklık aralığını garanti edemediği anlaşılmaktadır. Ayrıca pek çok tasarımda sıcaklık hedeflerine ulaşmak için hala fan devrinin yükseltilmesine ihtiyaç duyulmakta, bu da enerji tüketimi ve gürültü açısından yeni tasarım kısıtları doğurmaktadır. Bu nedenle 2.1 bölümünde derlenen literatür, ısı borulu–fanlı mimarinin elektronik soğutmada olgun ve yaygın bir referans platform sunduğunu, ancak değişken yükler altında tepe sıcaklığın daha sıkı denetimi ve fan gereksiniminin azaltılması için ilave yöntemlere ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Tezin devamında ele alınacak termoelektrik soğutma uygulamaları (2.2) ve ısı borusu–termoelektrik hibrit sistemler (2.3) bu boşluğa yanıt aramakta; burada sunulan ısı borulu çözümler ise, termoelektrik entegrasyonun sağlayacağı ek kazanımların değerlendirileceği temel karşılaştırma zeminini oluşturmaktadır.

## **2.2. Termoelektrik Uygulamalarla Elektroniklerin Soğutulması**

Termoelektrik soğutucular, elektronik bileşenlerin sıcak nokta sorunlarının giderilmesi ve yüksek ısı akısı oluşturan mikroişlemcilerde yüzey sıcaklığının düşürülmesi için de kritik bir rol oynamaktadır. Mikro TEC yapılarının malzeme özellikleri ile performans parametreleri arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalarda, Seebeck katsayısındaki artışın COP’i artırdığı, elektriksel dirençteki değişimin ise soğutma kapasitesini doğrudan etkilediği görülmüştür (Lee et al., 2010). Yüksek güç TEC modülleri için geliştirilen analitik çözümler ise işlemci yüzey sıcaklığının optimize akım ve ısıl temas tasarımıyla önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir (Zhang et al., 2010). Bu sonuçlar, termoelektrik soğutmanın özellikle yüksek güç yoğunluklu elektroniklerde uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.

Elektronik bileşenlerde giderek artan güç yoğunlukları, sıcak nokta oluşumu ve termal dengesizliği kritik mühendislik problemleri haline getirdiğinden, termoelektrik soğutucular yüksek hassasiyetli elektronik soğutma uygulamalarında yoğun biçimde araştırılmaktadır. TEC’ler, Peltier etkisi sayesinde doğrudan yüzeyden ısı çekebilme yetenekleri, kompakt yapıları ve hızlı kontrol imkanlarıyla mikroişlemciler, güç elektroniği modülleri, akıllı cihazlar ve veri merkezi bileşenleri için önemli avantajlar

sunmaktadır. Literatürde TEC uygulamalarına yönelik en kapsamlı teorik analizlerden biri, elektronik soğutmada kullanılan TEC sistemlerinde ısı değiştirici yüzey alanı dağılımının, sıcak-soğuk yüzey ısı iletkenliklerinin ve malzeme özelliklerinin soğutma kapasitesi ile COP üzerinde belirleyici olduğu sonucunu ortaya koymuştur (Zhu et al., 2013). Çalışmada geliştirilen matematiksel modele göre optimum soğutma performansı, toplam ısı transfer alanının sıcak ve soğuk yüzeyler arasında uygun oranlarda tahsis edilmesiyle elde edilmektedir. Bu bulgu, elektronik soğutma tasarımında TEC-geometri eşleşmesinin kritik önemini göstermektedir.

Yüksek güç yoğunluklarına sahip işlemcilerde TEC performansına yönelik analizlerde, hem sabit soğutma yükünde bağlantı sıcaklığının belirlenmesi hem de belirli bağlantı sıcaklığında pompalanabilecek ısı miktarının bulunması için kapalı form çözümler sunmuştur. Zhang et al. (2010), daha önce yaygın şekilde kullanılan iteratif modellerin aksine, termoelektrik kol geometrisi veya ayrıntılı malzeme parametrelerine ihtiyaç duymadan tasarım optimizasyonu yapılabilmesini sağlamaktadır. Sonuçlar, ticari TEC modüllerinin uygun akım değerleri ve gelişmiş ısı yayıcılarla birlikte kullanılması halinde işlemcilerde anlamlı sıcaklık düşüşleri elde edilebileceğini göstermektedir.

Elektronik soğutmada bir diğer önemli araştırma alanı, mikro boyutlu TEC yapılarıdır. Mikro TEC sistemlerinin  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ve  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  temelli termoelektrik kolonları kullanarak sıcak nokta soğutma başarımının analiz edildiği çalışmalarda, Seebeck katsayısı ve elektriksel direnç gibi malzeme özelliklerinin COP ve soğutma kapasitesi üzerinde son derece belirleyici olduğu gösterilmiştir. Özellikle 20  $\mu\text{m}$  mertebesindeki TEC bacaklarında elektriksel direnç artışı Joule ısısını yükselterek performansı sınırlamakta, dolayısıyla mikro TEC tasarımlarında malzeme mühendisliği ve kontak katman optimizasyonu ön plana çıkmaktadır (Lee et al., 2010). Bir çalışmada, elektronik soğutmada kullanılan TEC'lerin performansı, soğuk yüzey sıcaklığı ve sıcak-soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı üzerinden değerlendirilmiştir. Soğutma kapasitesi, çip bağlantı noktası sıcaklığı, COP ve sıcak yüzey için gerekli ısı alıcı ısı iletkenliği hesaplanmıştır. Sonuçlar, soğuk yüzey sıcaklığı arttıkça ve  $\Delta T$  azaldıkça soğutma kapasitesinin yükseldiğini göstermiştir. Maksimum soğutma kapasitesi 207 W, çip bağlantı sıcaklığı ise 88 °C olarak elde edilmiştir. TEC'in sıcak yüzeyinde gerekli ısı alıcı ısı iletkenliği 0.054 °C/W olarak belirlenmiştir. Ayrıca, zorlanmış çalışma rejimlerinde ( $\Delta T < 0$ ) daha yüksek soğutma kapasitesi ve COP elde edilebildiği, bu noktada mikrokanal

yapılı su veya hava soğutmalı ısı alıcıların düşük ısı direnç gereksinimini karşılayabildiği gösterilmiştir (Chein and Huang, 2004).

Du et al. (2025), özellikle yüksek ısı akılı yongaların yerel olarak soğutulmasında karşılaşılan sıcak uç ve soğuk uç arayüz direnci sorununa odaklanarak, termoelektrik elemanları doğrudan yonga arka yüzeyine ve gövde içine gömülü mikro kanallı bir ısı alıcıya bağlayan çift gömülü bir soğutma düzeni önermektedir. Silisyum tabanlı bir deneme yongası üzerinde yürütülen deneylerde, farklı akım ve soğutucu debileri için yonga sıcaklığı, sıcaklık dağılımı ve toplam ısı direnç ayrıntılı biçimde izlenmiştir. Ayrıca geliştirilen kuramsal modelle, paket içi ek ısı dirençlerin termoelektrik soğutma gücü ve erişilebilir sıcaklık farkı üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Bulgular, gömülü yapı sayesinde termoelektrik modül ile yonga arasındaki arayüz direncinin önemli ölçüde azaldığını, aynı ısı yükünde bağlantı sıcaklığının belirgin biçimde düştüğünü ve klasik paketlemeye göre daha düşük sıcaklık gradyentleri elde edildiğini göstermektedir. Bu da termoelektrik elemanların bütünleşik elektronik soğutma çözümlerinde daha etkin kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Lin et al. (2025), oda sıcaklığına yakın aralıkta çalışmaya uygun magnezyum–bizmut esaslı alaşımlar kullanarak, küçük boyutlu bir termoelektrik soğutucu geliştirmekte ve bunu doğrudan elektronik devre soğutma bağlamında değerlendirmektedir. Çalışmada, bacak boyu, taşıyıcı plaka türü ve temas katmanı kalınlığı gibi geometrik değişkenlerin en yüksek sıcaklık farkı ve soğutma gücü üzerindeki etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Ardından seçilen tasarım, çok katmanlı bir yapı halinde üretilmiş ve bir mikrodenetleyici işlemcinin arka yüzeyine bağlanarak denenmiştir. Deneysel sonuçlar, yeni alaşım bileşimi ve boyutlandırma ile işlemci yüzey sıcaklığında anlamlı düşüşler sağlanabildiğini, ısı akısı arttığında bile sıcaklığın öngörülen sınırlar altında tutulabildiğini ve böylece magnezyum–bizmut tabanlı termoelektrik elemanların küçük güçlü elektroniklerde yerel sıcaklık kontrolü için uygulanabilir bir seçenek sunduğunu göstermektedir.

Fan et al. (2025), termoelektrik soğutma modülünün sıcak tarafındaki ısı arayüz direncini azaltmak ve taşınabilir elektroniklerde soğutma etkinliğini yükseltmek amacıyla, seramik taşıyıcı plaka içine gömülü su kanallarına sahip bütünleşik bir sıvı soğutma yapısı tasarlanmaktadır. Önce ayrıntılı sayısal analizlerle klasik harici su bloğu ile yeni çözüm karşılaştırılmış, ardından kanalları seramik içinde yer alan çok ayaklı bir termoelektrik modül üretilmiş ve hem ısıtıcı blokla hem de gerçek bir akıllı telefon

üzerinde test edilmiştir. Ölçümler, gömülü soğutucu kullanıldığında termoelektrik modülün sıcak tarafı sıcaklığının belirgin şekilde düştüğünü, aynı ısı yükünde ısı kaynağı sıcaklığının geleneksel düzene göre on dereceyi aşan oranlarda azaltılabildiğini ve telefon uygulamasında da en yüksek gövde sıcaklığının hissedilir biçimde gerilediğini göstermektedir. Çalışma, bu tür bütünsel çözümlerin, özellikle ince hacimli taşınabilir elektroniklerde hem sıcaklık kontrolü hem de uzun süreli çalışma kararlılığı açısından önemli kazanımlar sağlayabileceğini vurgulamaktadır.

Liu et al. (2024) ise, termoelektrik soğutucunun sıcak tarafına yerleştirilen ısı alıcının geometrisini iyileştirerek, yüksek ısı akıllı elektronik elemanların daha düşük bağlantı sıcaklıklarında tutulmasını hedeflemektedir. Bu amaçla, damla biçimli kesite sahip milikanallar içeren yeni bir ısı alıcı tanımlanmış; önce çeşitli kanal şekilleri sayısal olarak incelenmiş, ardından en iyi performans gösteren geometri termoelektrik modülün alt tabakasına gömülü şekilde üretilmiştir. Deneylerde, bu gömülü milikanallı yapı hem ısıtıcı blokla hem de yüksek ısı akısına sahip bir alan etkili transistor ile sınanmıştır. Elde edilen bulgular, önerilen ısı alıcının hem basınç kaybını sınırlarken hem de ısı taşınım katsayısını yükselttiğini, böylece yaklaşık  $75 \text{ kW/m}^2$  ölçeğindeki ısı akılarında bile birleşim sıcaklığının  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  civarında sabitlenebildiğini ortaya koymuştur. Sonuçlar, termoelektrik soğutucuların sıcak tarafında ısıl arayüz direncini düşüren bu tür gömülü milikanal tasarımlarının, yüksek güçlü elektronik devrelerin güvenli sıcaklık aralığında tutulması için etkili bir araç olabileceğini göstermektedir.

Barrubeeah et al. (2021) çalışmasında, yüksek ısı yayılımına sahip işlemcilerde termoelektrik modül ve kanatçıklı bir hava soğutucunun birlikte kullanıldığı bir elektronik soğutma yapısının nasıl tasarlanıp en uygun hale getirilebileceği ele alınmıştır. Araştırmacılar, enerji dengesi temelli analitik bir model geliştirerek termoelektrik modülün ısı pompalama davranışını ifade etmiştir. Bu modeli deneysel ölçümler ve ayrıntılı üç boyutlu sayısal benzetimlerle doğrulamıştır. Ayrıca üretici verilerinden etkin malzeme özelliklerini türetme yaklaşımıyla, modül giriş gücü ve performans tahminindeki belirsizliği azaltmayı hedeflemişlerdir. Bu çerçevede hem modül geometrisi hem de ısı alıcı kanat geometrisi birlikte parametre taramasına sokulmuştur. Belirli bir akım altında geometrik oran büyüdükçe soğutma kapasitesi ve sistem veriminin arttığı, sabit geometrik oranda ise akım arttıkça soğutma kapasitesinin bir tepe değere ulaşp sonra azaldığı gösterilmiştir. Çalışmanın en kritik sonucu, hedef elektronik bileşene özel en uygun parametrelerle tasarlanmış termoelektrik modüller kullanıldığında, ticari ve en

uygun olmayan seçeneklere göre soğutma kapasitesinin yaklaşık %70 artırılabilceğinin raporlanmasıdır.

Cai et al. (2016) çalışmasında, termoelektrik modülün yalnız başına ele alınmasının pratik elektronik soğutmada yeterli olmadığını vurgulayarak, modülün sıcak tarafındaki ısı değiştiricinin ve modül ile çip arasındaki ara parçanın ölçeğini aynı kuramsal çerçevede değerlendiren bir performans çözümlemesi sunmuştur. Araştırmada sıcak taraftaki kanatçıklı ısı alıcının ısı atma yeteneği sade bir biçimde modellenmiş ve bu model termoelektrik modül denklemleriyle birleştirilerek iki tür analitik çözüm türetilmiştir. Belirli bir soğutma yükü verildiğinde çip yüzey sıcaklığının bulunmasına ve belirli bir çip sıcaklığı hedeflendiğinde sağlanabilecek soğutma yükünün hesaplanmasına odaklanılmıştır. Modül-çip arasında yer alan uzatıcı bloğun, temas ve iletim dirençlerini etkileyerek çip sıcaklığı ile termoelektrik modülün soğuk yüzeyi arasındaki ilişkiyi belirgin biçimde değiştirdiği, dolayısıyla yalnızca modül parametrelerini değil, ara parça ölçeğini ve sıcak taraftaki ısı alıcı performansını birlikte ayarlamanın etkin soğutma çalışma modu seçimi için gerekli olduğu ortaya konmuştur.

Yang et al. (2024) çalışmasında, dışarıdan ek enerji tüketmeden elektronik soğutma sağlama hedefiyle atık ısıdan elektrik üreten termoelektrik jeneratör ve bu elektrikle çalışan fan destekli bir düzenek ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın özgün katkısı, termoelektrik jeneratörün doğrudan ısı kaynağı üzerine yerleştirilmesinin ısı yolu direncini artırarak performansı sınırladığı tespitinden hareketle, termoelektrik üretici alt ve üst iki ısı alıcı arasına konumlandırıran yeni bir yerleşim önermesidir, Böylece alt ısı alıcı kaynağı serin tutarken, iki uç arasındaki sıcaklık farkı fanı besleyecek elektrik üretimini sürdürebilmektedir. yöntem olarak ısı ve elektrik alanlarının birlikte çözüldüğü sayısal modelleme kurulmuştur. Bunun yanında termoelektrik bacak boyu, kesit alanı ve ısı alıcı kanat yüksekliklerinin etkisi taranmış ve çok amaçlı genetik algoritma ile hem çip sıcaklığını düşürme hem de termo-mekanik gerilmeyi azaltma hedefleri birlikte optimize edilmiştir. Sonuçlar, önerilen yerleşimin yüksek ısı yüklerinde daha avantajlı olduğunu, çip sıcaklığı sınırı korunurken dış enerji olmaksızın 340 W seviyesinde ısı gücünün uzaklaştırılabildiğini ve bunun pasif hava soğutmaya göre yaklaşık %70 iyileşme anlamına geldiğini raporlamıştır.

Tüm bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, termoelektrik soğutucuların elektronik bileşenlerin termal yönetiminde hem pasif hem aktif çözümlerin yerine geçebilecek düzeyde olgunlaştığı görülmektedir. TEC performansı; malzeme özellikleri,

akım yoğunluğu, temas tabakası tasarımı, ısı değiştirici mimarisi ve hibrit ısı taşıyıcı elemanlarla olan entegrasyon gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Literatür, doğru şekilde optimize edilen TEC yapılarının sıcak nokta giderimi, yüksek güç yoğunluklu işlemci soğutma, mobil cihaz termal yönetimi ve veri merkezi uygulamalarında son derece etkili olduğunu açıkça göstermektedir. Bu birikim, tez kapsamında ele alınacak hibrit ısı borusu-termoelektrik mimarilerinin tasarımı için güçlü bir teorik temel sunmaktadır.

### **2.3 Isı Borusu ve Termoelektrik Hibrit Sistemlerle Elektroniklerin Soğutulması**

Isı boruları, elektronik soğutmada düşük ısı dirençle ısıyı yayma ve uzaklaştırma açısından güçlü bir pasif çözüm sunmasına rağmen, her uygulamada tek başına yeterli performansı garanti edemeyebilir. Özellikle yüksek ısı akısı, hızlı yük değişimleri, farklı yönelimlerde çalışma ve dar güvenli sıcaklık aralığı gibi koşullarda, yalnızca pasif ısı taşıma mekanizmalarına dayalı çözümler tepe sıcaklığın sınırlandırılmasında zorlanabilmektedir. Bu nedenle literatürde, ısı borularının yüksek ısı taşıma kapasitesini korurken sıcaklık seviyesini daha etkin yönetebilmek amacıyla termoelektrik elemanlarla birleştirildiği hibrit soğutma yaklaşımları öne çıkmaktadır. Termoelektrik modüller, kritik bölgelerde ek bir soğutma veya sıcaklık dengeleme etkisi oluşturarak, sistemin farklı çalışma senaryolarında daha kararlı ve kontrol edilebilir bir sıcaklık rejimine taşınmasına katkı sağlayabilmektedir. Bu bölümde, ısı borusu ve termoelektrik elemanların birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin elektronik soğutmada nasıl konumlandığı; hangi problem sınıflarına çözüm ürettiği ve hangi mimari yaklaşımlarla uygulandığı, seçilmiş çalışmalar üzerinden özetlenmektedir.

Isı borulu soğutmanın tek başına yeterli olmadığı yüksek ısı akılı elektroniklerde, ısı borusu destekli hibrit TEC sistemleri önemli avantajlar sağlamaktadır. Örneğin, sıcak yüzeye entegre edilen yerçekimi destekli ısı borusunun (GAHP) TEC performansını yaklaşık %73 oranında artırdığı, aynı soğutma yükü için elektrik tüketimini ise %42 oranında azaltabildiği gösterilmiştir (Sun et al., 2017). Bu hibrit yaklaşım, TEC modülünün sıcak yüzey sıcaklığını düşürerek  $\Delta T$  farkını artırmakta ve soğutma kapasitesini iyileştirmektedir; dolayısıyla yüksek güçlü işlemci veya GPU'larda oldukça avantajlıdır bir soğutma yaklaşımı önerilmektedir.

Putra et al. (2011), yüksek ısı yük taşıyan bilgisayar işlemcilerinin soğutulması için ısı borulu sıvı bloğu ile termoelektrik modülün bütünleşik kullanıldığı ve

nanoakışkanlarla beslenen hibrit bir soğutma sistemini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, bakır gövdeli ticari bir ısı borulu sıvı bloğu işlemci üzerine yerleştirilmiş, bu bloğun sıcak tarafına iki kademeli termoelektrik modüller entegre edilmiş ve soğutucu akışkan olarak suya alüminyum oksit ve titanyum dioksit nano parçacıkları karıştırılarak elde edilen nanoakışkanlar kapalı devre bir düzenek içinde dolaştırılmıştır. Deneysel program kapsamında, nanoakışkan türü ve hacimsel derişimi (yüzde 0,5 ve yüzde 1), soğutucu sıcaklığı (yaklaşık 25–35 °C aralığı) ve işlemci yük durumu (boşta ve tam yük) değiştirilerek, giriş ve çıkış sıcaklıkları ile işlemci sıcaklığı zamana bağlı olarak izlenmiş; ayrıca ısı borulu sıvı bloğun giriş–çıkış basınç farkı ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, ısı borulu sıvı bloğun tek başına klasik fanlı ısı alıcılara göre işlemci sıcaklığını belirgin biçimde düşürdüğünü, su yerine nanoakışkan kullanıldığında ise özellikle yüksek derişimde ilave sıcaklık düşüşleri elde edildiğini göstermektedir. Soğutucu sıcaklığı azaltıldığında işlemci sıcaklığının tüm yük koşullarında daha da düştüğü, buna karşılık nanoakışkanların neden olduğu basınç kaybının düşük derişimlerde ihmal edilebilir seviyede kaldığı rapor edilmiştir. Tercih edilen en gelişmiş durumda, ısı borulu sıvı bloğa termoelektrik modül entegre edilmesiyle, alüminyum oksit katkılı nanoakışkan kullanıldığında işlemci sıcaklığının ortam sıcaklığının yaklaşık 4–6 °C altına kadar çekilebildiği ve bu iyileşmenin yük düzeyine göre büyük ölçüde korunduğu belirtilmektedir. Çalışma genel olarak, nanoakışkan destekli ısı borulu sıvı bloğun termoelektrik pompa ile birlikte kullanıldığı bu hibrit yapının, geleneksel hava soğutmalı çözümlere kıyasla elektronik bileşenlerin sıcaklığını daha düşük seviyelerde tutabildiğini ve bu sayede hem ısı performans hem de uzun ömür açısından güçlü bir elektronik soğutma seçeneği sunduğunu ortaya koymaktadır.

Zhang et al. (2020), elektrikli taşıt bataryaları için ısı borusu ile termoelektrik soğutucunun birlikte kullanıldığı bir batarya ısı yönetim sistemi geliştirerek, bu hibrit yapının farklı deşarj oranlarında yüzey sıcaklığını nasıl kontrol ettiğini hem kuramsal hem deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada önce büyük kapasiteli lityum iyon hücrede oluşan ısı üretimi, iç direnç verilerinden yararlanılarak enerji dengesi temelli bir modelle hesaplanmış; ardından doğal soğutmalı durum, yalnızca ısı borusu ve fan içeren sistem ve ısı borusu ile termoelektrik soğutucunun birlikte kullanıldığı yapı için üç boyutlu akış ve ısı geçişi çözümleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar, doğal soğutmada yüksek deşarj oranlarında batarya yüzey sıcaklığının önerilen çalışma aralığının üzerine çıktığını, yalnızca ısı borusu kullanılan durumda ise sıcaklıkların belirgin ölçüde düşmesine

rağmen en yüksek deşarj oranında sınır değerin hala aşıldığını göstermiş; buna karşılık ısı borusu ile termoelektrik soğutucunun bir arada kullanıldığı düzenekte tüm deşarj oranlarında yüzey sıcaklığının hedeflenen aralıkta tutulabildiği ortaya konmuştur. Daha sonra dört hücreden oluşan bir paket, iklimlendirilmiş bir kabin içinde aynı üç yapı için farklı deşarj oranlarında çalıştırılarak yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi çok noktalı sıcaklık algılayıcıları ile ölçülmüş ve sayısal modelle karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca termoelektrik elemanın hangi yüzey sıcaklığında devreye girmesinin enerji tüketimi ile sıcaklık sınırı arasında en dengeli sonucu verdiği araştırılmış ve orta deşarj oranları için termoelektrik elemanın her zaman çalışmasına gerek olmadığı, belirli bir eşik sıcaklıktan sonra devreye alınmasının yeterli olduğu ortaya konmuştur. Genel olarak bu makale, faz değişimi temelli ısı borulu yapı ile yerel sıcaklık bastırma yeteneği yüksek olan termoelektrik soğutucunun birlikte kullanılmasıyla, yüksek ısı üretimine sahip enerji depolama elemanlarının sıcaklıklarının dar aralıkta tutulabildiğini ve bu yaklaşımın güç elektroniği ve batarya odaklı elektronik soğutma tasarımları için uygulanabilir bir hibrit çözüm sunduğunu göstermektedir.

Pastukhov and Maydanik (2023), değişken dış koşullar altında çalışan elektronik benzeri bir ısı kaynağının sıcaklığını hassas biçimde sabit tutmak amacıyla, kapalı devre ısı borusu ile bütünleştirilmiş bir termoelektrik dönüştürücü temelli sıcaklık denetim sistemi geliştirmiştir. Çalışmada, genliği 10 ile 320 W arasında değişen ısı yüküne sahip bir ısı kaynağı, amonyak dolgulu bir kapalı devre ısı borusu ile soğutulmuş; ısı borusunun dengeleme haznesine temas eden termoelektrik eleman, oransal integral türev denetleyici tarafından ısı kaynağı sıcaklığı geri beslemesiyle kumanda edilmiştir. Isı alıcı sıcaklığı -10 ile +30 °C arasında, ısı kaynağı hedef sıcaklığı ise 20, 40 ve 60 °C değerlerinde ayarlanmış; yatay ve dik konumlarda, önce ısı borusunun doğal çalışma eğrileri belirlenmiş, ardından denetim devresi devreye alınarak farklı ısı yükü ve çevre koşullarında sıcaklık-zaman tepkileri incelenmiştir. Deneyler, bu hibrit yapının kararlı durumda ısı kaynağı sıcaklığını hedef değerin yaklaşık  $\pm 0,2$  °C içinde tutabildiğini ve 40 W mertebesine kadar ani ısı yükü artışlarında kısa süreli sıcaklık sapmasının 2,5 °C'yi aşmadığını göstermektedir. Ayrıca yazarlar, denetleyicinin yazılımına eklenen iki basit mantıksal koşul ile düşük ısı yüklerinde ilk çalıştırmanın güvenilir hale geldiğini, yüksek ısı yüklerinde ise sistem doğal çalışma sınırına yaklaşıldığında termoelektrik elemanın devreden çıkarılarak aşırı ısınma ve gereksiz enerji tüketiminin önlenabildiğini vurgulamaktadır. Elde edilen bulgular, kapalı devre ısı borusu ile termoelektrik elemanın

bir arada kullanılmasının, özellikle dar sıcaklık aralıklarında çalışması gereken işlemci, lazer ve optik algılayıcı gibi hassas elektronik bileşenler için, yüksek doğruluklu ve enerji açısından görece ekonomik bir sıcaklık denetimi sağlayabildiğini ortaya koymaktadır.

Başka bir çalışmada termoelektrik soğutma sistemlerinin ileri düzey hibritlenmiş versiyonlarından biri olarak, ısı borusu-PCM destekli TEG/TEC sistemleri önerilmiştir. Bu çalışmada ısı borusu tarafından taşınan ısıнын bir bölümünün TEG modülünde elektrik üretimi için kullanılması ve kalan kısmın PCM’de depolanması, elektronik soğutma ve enerji yönetimini bütünleşik hale getirmektedir. Deneysel bulgular, yalnızca metal köpük kullanılan durumda sıcaklığın hızla 85 °C’ye ulaştığını, ancak PCM eklenmesiyle sıcaklığın düşük seviyelerde tutulabildiğini göstermektedir (Li et al., 2023). Yüksek poroziteli bakır köpük ve entegre ısı borusunun kullanılmasıyla hem ısı kontrol hem enerji verimi önemli seviyede geliştirilmiştir. Bu tür hibrit mimariler, özellikle kesintili yük profiline sahip elektroniklerde sıcaklık salınımlarını azaltmak için önerilmiştir.

Krishnan et al. (2023), katı-katı faz değiştiren malzeme destekli ve ısı borulu bir ısı alıcının elektronik soğutmada nasıl davrandığını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, neopentil glikol içeren alüminyum bir ısı alıcısına bakır-su ısı borusu entegre edilmiş, ısı alıcı hacminin yaklaşık üçte biri, üçte ikisi ve tama yakın doluluk oranları için 9-13 W aralığındaki ısı girdilerinde geçici rejim sıcaklık tepkileri ayrıntılı olarak ölçülmüştür. Üç temel yapı kıyaslanmıştır: faz değiştiren malzeme ve ısı borusunu birlikte içeren ısı alıcı, yalnızca faz değiştiren malzeme içeren ısı alıcı ve tamamen boş ısı alıcı; sıcaklık-zaman eğrilerinden yola çıkarak belirli bir sınır sıcaklığa erişme süresi ve bu süre üzerinden tanımlanan iyileşme oranı hesaplanmıştır. En yüksek doluluk oranında faz değiştiren malzeme ve ısı borusunun birlikte kullanıldığı yapı, hem doğal taşınım hem de fanla zorlanmış taşınım koşullarında, yalnızca faz değiştiren malzeme içeren yapıya ve boş ısı alıcısına göre belirgin biçimde daha uzun süre sıcaklık yükselmesini geciktirmiş; iyileşme oranı yaklaşık üç kat düzeyine ulaşmış ve ısı borusuz duruma göre %30-80 aralığında performans artışı sağlamıştır. Sayısal model, deneysel sıcaklık dağılımları ve ısı alıcı içindeki faz dönüşüm bölgeleri ile iyi uyum göstermiş; bu model üzerinden ısı borusunun hem yukarıya hem de radyal yönde ısı taşıyarak faz değiştiren malzemenin hacimsel olarak daha etkin kullanılmasına katkı verdiği gösterilmiştir.

Huang et al. (2024), özellikle uzay uygulamalarında elektronik bileşenlerin sıcaklık kontrolü için geliştirilen düz bir döngü ısı borusuna termoelektrik soğutucu

entegre ederek bu hibrit yapının çalışma özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Deney programında, 10 ile 200 W arasında değişen ısı yükleri ve farklı termoelektrik güç seviyeleri için başlatma davranışı, buharlaştırıcı ve genleşme haznesi sıcaklıkları, sistem ısıl direnci ve sıcaklık dalgalanmaları izlenmiştir. Sonuçlar, düşük ısı yüklerinde termoelektrik soğutucunun genleşme haznesini soğutup buharlaştırıcıyı aynı anda ısıtarak döngünün başlatılmasını yaklaşık yüzde elli oranında hızlandırdığını, ayrıca 10 ile 20 W aralığında buharlaştırıcı çalışma sıcaklığını termoelektrik eleman kullanılmayan duruma göre yaklaşık kırk derece düşürebildiğini göstermektedir. Uygun güç aralığında çalıştırılan termoelektrik modüller, düz döngü ısı borusunun eşdeğer ısıl direncini yaklaşık 0,13–0,15 °C/W bandına indirerek yüksek ısı taşıma yeteneğini korurken sıcaklık seviyesini daha iyi denetlemeye imkan vermektedir. Çalışmada ayrıca kullanılmak üzere monte edilip devre dışı bırakılan termoelektrik modüllerin buharlaştırıcı ile genleşme haznesi arasında ek bir ısı sızıntı yolu oluşturarak çalışma sıcaklığını birkaç derece artırdığı, düşük ısı yükü ile düşük termoelektrik gücünün birlikte kullanıldığı koşullarda ise iki fazlı akış dağılımına bağlı sıcaklık salınımlarının ortaya çıkabildiği rapor edilmiştir. Ters yönde beslenen termoelektrik soğutucu ile genleşme haznesine çok küçük bir elektrik gücü uygulanarak, klasik film tipi ısıtıcılara göre çok daha yüksek bir sıcaklık yükseltme verimi elde edilmiş ve yalnızca 0,1 W düzeyindeki bir güçle genleşme haznesi sıcaklığının yaklaşık on derece artırılabilirdiği gösterilmiştir. Genel olarak çalışma, termoelektrik eleman ile bütünleştirilen düz döngü ısı borularının, hem başlatma güvenilirliği hem de çalışma sıcaklığı ayarlanabilirliği açısından elektronik soğutma uygulamalarında ve özellikle uzay ortamında çalışan kompakt yüksek ısı akıllı bileşenlerin ısıl yönetiminde önemli bir tasarım seçeneği sunduğunu ortaya koymaktadır.

Zhou and Li (2025) çalışmasında, yüksek güçlü ve farklı yönelimlerde çalışmak zorunda olan mobil elektronik yongalar için, termoelektrik modül ile entegre edilmiş bir çevrimli ısı borusu tabanlı hibrit soğutma sistemi geliştirilmiştir. Bu çalışmanın kapsamı, klasik çevrimli ısı borularının yerçekimine karşı çalışmada yaşadığı sıvı geri dönüş sınırlamalarını aşmak ve yüksek ortam sıcaklıklarında kararlı soğutma sağlamak üzerine kuruludur. Önerilen sistemde termoelektrik modül, ısı borusunun dengeleme haznesine entegre edilerek bu bölgenin sıcaklığı aktif olarak düşürülmüş ve böylece yoğuşan sıvının buharlaştırıcıya geri dönüşü güçlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar farklı yönelimler, farklı ısı yükleri ve farklı çevre sıcaklıkları altında gerçekleştirilmiş; elde edilen veriler kuramsal bir model ile de desteklenmiştir. Sonuçlar, termoelektrik destekli yapının hem

yerçekimi destekli hem de yerçekimine karşı konumlarda düşük toplam ısı direnç değerleri sağladığını ve elektronik birleşim noktası sıcaklığını güvenli sınırlar içinde tuttuğunu göstermiştir. Ayrıca termoelektrik modülün ek enerji tüketiminin sınırlı olduğu ve sistemin genel enerji veriminin yüksek kaldığı ortaya konmuştur. Bu yönüyle çalışma, zorlu çevre koşullarında çalışan yüksek güçlü elektronikler için ısı borusu-termoelektrik hibrit sistemlerin uygulanabilirliğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Xie et al. (2025) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada ise, çift dengeleme haznesine sahip bir çevrimli ısı borusunun termoelektrik modüllerle birleştirilerek aktif sıcaklık kontrolü sağlama potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmanın temel hedefi, elektronik soğutmada yalnızca pasif ısı uzaklaştırmaya bağlı kalmadan, çalışma sıcaklığının hassas biçimde kontrol edilebildiği bir hibrit yapı ortaya koymaktır. Deneysel düzende termoelektrik modüller farklı dengeleme haznelerine uygulanmış ve bu haznelerin soğutulması ya da ısıtılması yoluyla sistemin denge sıcaklığı ayarlanmıştır. Isı yükü, soğutucu sıcaklığı ve sistem yönelimi gibi parametrelerin aktif sıcaklık kontrolü üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, belirli bir ısı yükü aralığında çalışma sıcaklığının hedeflenen değere yüksek doğrulukla sabitlenebildiğini ve sıcaklık sapmasının çok küçük seviyelerde kaldığını göstermiştir. Özellikle termoelektrik modülün uygun konumlandırılmasıyla, hem daha kısa tepki süresi hem de daha düşük enerji tüketimi elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, ısı borusu ve termoelektrik entegrasyonunun yalnızca soğutma kapasitesini artırmakla kalmadığı, aynı zamanda elektronik sistemler için hassas ve kararlı sıcaklık kontrolü sağlama açısından da önemli bir avantaj sunduğu vurgulanmıştır.

Liao et al. (2026), yüksek ısı tasarım gücüne sahip işlemcilerin geçici yüklenmelerinde kullanılmak üzere, yüksek yoğunluklu p-n birleşimli kompakt bir termoelektrik modül ile iki kademeli ısı borulu bir hava soğutucu yapısını birleştiren hibrit bir sistem tasarlamakta ve bunun ısı performansını deneysel olarak incelemektedir. Önerilen düzende birinci ısı borulu ısı alıcı düşük işlemci yüklerinde yalnızca pasif ısı taşınımı için kullanılırken, ikinci ısı borulu blok termoelektrik modülün sıcak yüzeyinden gelen ısıyı uzaklaştırmakta ve iki blok tek bir fanla soğutulurken, sistemin düşük yüklerde yalnızca ısı borulu pasif kipte, yüksek yüklerde ise ısı borusu ile desteklenmiş termoelektrik soğutma kipinde çalışmasına olanak tanınmaktadır. Elde edilen bulgular, termoelektrik modül kapalı iken soğutucunun yalnızca pasif ısı borusu olarak çalışabildiğini; modül devreye girdiğinde ise 400 W düzeyinde dahi işlemci temas

yüzeyinin 75 °C'nin altında tutulabildiğini ve ani yük artışlarında yaklaşık 30 saniye içinde ilave 2–4 °C sıcaklık düşüşü sağlanabildiğini ortaya koymaktadır. Akım arttıkça belirli bir değere kadar toplam ısı direncin ve yüzey sıcaklığının azaldığı, ancak daha yüksek akımlarda artan joule ısı ve sıcak yüzey sıcaklığı nedeniyle soğutma kazanımının zayıfladığı, özellikle 1–2 A aralığında performans katsayısının 3,2'ye ulaşarak enerji tüketimi açısından elverişli bir çalışma penceresi sunduğu rapor edilmektedir. Yazarlar, bu hibrit mimarinin düşük yüklerde yalnızca ısı borularıyla ek elektriksel güç gerektirmeden çalışabildiğini, yüksek güç ve hız aşırıtma senaryolarında ise termoelektrik modülün kısa süreli devreye alınarak hem maksimum sıcaklığı hem de sıcaklık dalgalanmalarını sınırlayabildiğini, dolayısıyla ısı borusu–termoelektrik birleşiminin masaüstü işlemci soğutucularında geçici rejim odaklı yeni bir tasarım yönü sunduğunu vurgulamaktadır.

Bu bölümde derlenen literatür, ısı borusu–termoelektrik hibritlemenin elektronik soğutmada iki kritik boşluğu kapattığını net biçimde göstermektedir: (i) pasif ısı borusunun yönelim/başlatma/kuruma sınırlarına yaklaşılacak koşullarda çalışma güvenilirliğini artırmak ve (ii) değişken yükler altında tepe sıcaklığı dar bir bantta tutacak aktif bir mekanizma sağlamak. Çalışmaların ortak sonucu, termoelektrik elemanın doğru konumlandırma ve uygun kontrol mantığıyla yalnızca soğutma kapasitesini artırmadığı; aynı zamanda sistemin denge sıcaklığını ayarlanabilir kıldığı, geçici rejimlerde sıcaklık taşmalarını bastırdığı ve belirli senaryolarda fan gereksinimini düşürmeye aday bir tasarım serbestliği sunduğudur. Bununla birlikte hibrit mimarilerin enerji tüketimi–ısı kazanımda dengesi, Joule ısı kaynaklı ters etkiler, ek ısı sızıntı yolları, paketleme/temas dirençleri ve kontrol stratejisinin seçimi gibi tasarım parametrelerine yüksek duyarlılık gösterdiği de görülmektedir. Dolayısıyla hibrit çözüm, tekil bir donanım ekisinden ziyade, tasarım problemi olarak ele alınmalıdır. Bu çalışmada, burada sunulan literatür çerçevesinden hareketle hibrit yapının hedeflenen çalışma senaryolarındaki tepe sıcaklık denetimi yetkinliği, fan bağımlılığını azaltma potansiyeli ve enerji verimliliği üzerindeki etkisi kapsamlı biçimde değerlendirilecektir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Deney Sisteminin Kurulumu

Deney sistemi, ısı borulu–fanlı bir soğutma mimarisinin temel performansını karakterize etmek ve bu mimariye harici bir termoelektrik eleman entegrasyonunun etkisini sistem düzeyinde değerlendirmek amacıyla kurulmuştur. Kurulumun temel yaklaşımı, yalnızca ısı performansın değil, aynı zamanda enerji tüketimi ve fan gürültüsü gibi uygulama açısından belirleyici çıktıların da aynı deney platformu üzerinde birlikte izlenebilmesidir. Bu nedenle deney düzeneği; ısı yük üretimi, ısı yolun taşınım bileşenleri, ölçüm altyapısı ve güç besleme altyapısı açısından birbirinden ayrıştırılabilir fakat birlikte çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Deney sisteminin merkezinde test bölgesi bulunmaktadır ve tüm ölçüm ve işletim bileşenleri bu bölgenin etrafında konumlandırılmıştır. Test bölgesi, ısı yükün uygulandığı alan ile bu yükün ısı borusu üzerinden taşındığı ve fan destekli ısı atım hattıyla çevreye aktarıldığı ana ısı yolun bir araya geldiği kısımdır. Bu bölüm, deneyin hem fiziksel sınırlarını hem de ölçüm stratejisinin referans noktalarını tanımladığı için, geometri ve bileşen yerleşimi açısından birincil öneme sahiptir. Bu nedenle test bölgesine ait detaylar, izleyen alt bölümde ayrıca verilerek açıklanmıştır.

Kurulum, termal analizlerin güvenilir şekilde yürütülebilmesi için iki farklı sıcaklık ölçüm yaklaşımını birlikte içerecek biçimde planlanmıştır: temaslı ölçüm ve temassız ölçüm. Temaslı ölçüm yaklaşımında, test bölgesinde ısı davranışı temsil etmesi beklenen ve ısı yol üzerinde kritik rol oynayan noktalara termokupllar yerleştirilmiştir. Termokuplların montajı, ölçüm noktası ile yüzey arasında güvenilir temas sağlayacak şekilde yapılmış; böylece sıcaklık ölçümlerinin zamana bağlı değişimi kararlı biçimde izlenebilir hale getirilmiştir. Termokupl yerleşimlerinin ve hangi bölgeleri temsil ettiğinin ayrıntıları bir sonraki bölümde sunulacaktır.

Temaslı ölçüm altyapısında kullanılan termokupllar, bir veri toplama kartına bağlanmıştır. Bu kart üzerinden sıcaklık verileri anlık olarak okunmakta, aynı zamanda kartın bağlı olduğu bilgisayara zaman eşleştirmeli biçimde kaydedilmektedir. Böylece deney boyunca sıcaklığın zamanla nasıl değiştiği izlenebilmekte; farklı işletim koşullarında sistemin kararlı duruma ulaşma davranışı veri seti üzerinden değerlendirilebilmektedir. Verilerin bilgisayara aktarımı, ölçüm sürekliliği ve veri bütünlüğü açısından kritik olduğu için ölçüm sürecinin omurgasını oluşturmaktadır. Bu

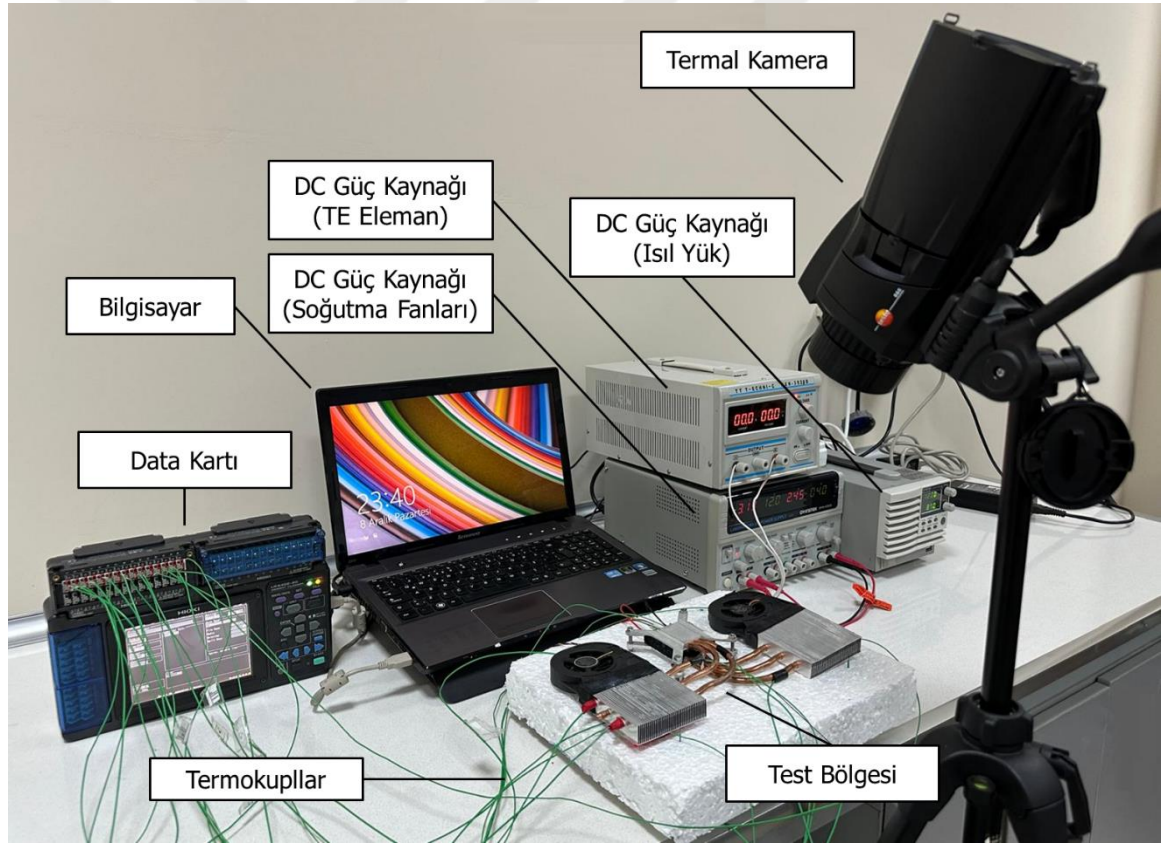
yapı aynı zamanda, fan işletim koşulları ve termoelektrik elemanın işletim durumu gibi değişkenlerle sıcaklık sinyallerinin ilişkilendirilmesine imkan sağlayacak bir kayıt düzeni oluşturur.

Temassız ölçüm yaklaşımında ise termal kamera kullanılmış ve kamera test bölgesinin üst kısmına konumlandırılmıştır. Kamera yerleşimi, test bölgesinin tamamını görebilecek şekilde ayarlanmış; böylece yüzey sıcaklıklarının dağılımı görsel olarak izlenebilir hale getirilmiştir. Temassız ölçümün bu kurulumda üstlendiği rol, temaslı ölçümün sağladığı noktasal sıcaklık değerlerini alan bazında tamamlamak ve sıcaklık dağılımındaki olası düzensizlikleri, sıcak nokta oluşumlarını veya yayılma davranışını görünür kılmaktır. Bu yaklaşım aynı zamanda, test bölgesinde sıcaklığın mekansal olarak nasıl yayıldığının izlenmesine ve deney sırasında koşullar değiştirildiğinde bu yayılmanın nasıl yeniden şekillendiğinin takip edilmesine olanak tanır. Böylece sistemin ısı davranışı, yalnızca seçilmiş noktalara ait ölçümlerle sınırlı kalmadan daha kapsamlı biçimde gözlemlenebilir.

Deney sisteminde test bölgesindeki ısı yükün beslenmesi, soğutma fanlarının işletimi ve termoelektrik elemanın sürülmesi için birbirinden bağımsız üç adet doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır. Bu üçlü besleme mimarisi, sistemin farklı bileşenlerinin birbirini etkilemeden şartlandırılabilmesini ve her bir bileşenin ayrı kontrol değişkenleri üzerinden yönetilmesini sağlar. Isıl yük kaynağı için kullanılan güç kaynağı üzerinden deneyin giriş gücü ayarlanabilmekte; fanlar için kullanılan güç kaynağı ile soğutma şiddeti işletim koşuluna göre değiştirilebilmektedir. Termoelektrik eleman için ayrılan güç kaynağı ise termoelektrik elemanın sisteme sağladığı ek ısı etkinin, enerji tüketimiyle birlikte değerlendirilmesine imkan verir. Bu yapı, sistemin yalnızca tek bir çalışma noktasında değil, kontrollü biçimde değiştirilen koşullar altında incelenebilmesini sağlayarak karşılaştırmalı analizlere zemin hazırlar. Güç kaynakları üzerinden akım ve gerilim kontrolü yapılabilmekte; böylece istenen güç çıkışları elde edilerek deney koşulları tekrarlanabilir biçimde ayarlanabilmektedir. Deney sisteminde, fanın işletim koşullarına bağlı olarak oluşan akustik çıktı ve zorlanmış taşınım şiddeti doğrudan izlenebilmesi için gürültü düzeyi ile fan çıkışındaki hava hızı ayrıca ölçülmüştür. Gürültü ölçümleri, fanın farklı besleme koşullarında oluşturduğu ses seviyesinin nicel olarak karşılaştırılmasına ve termoelektrik entegrasyonla birlikte fanın çalışma gereksiniminin değişip değişmediğinin dolaylı biçimde yorumlanmasına imkan vermektedir. Hava hızı ölçümleri ise fanın sağladığı hava debisine karşılık gelen

zorlanmış taşıyım kapasitesini temsil etmektedir. Bu iki ölçüm birlikte değerlendirilerek, fanın farklı çalışma noktaları için ısı performans-enerji tüketimi-akustik etki eksenindeki fan karakteristikleri oluşturulmuş ve deney sonuçlarının sistem düzeyinde yorumlanması güçlendirilmiştir.

Bu kurulum yaklaşımıyla deney sistemi, ısı borulu–fanlı temel mimarinin referans performansını ve termoelektrik entegrasyonla oluşan değişimi aynı platformda karşılaştırmaya uygun hale getirilmiştir. Ölçüm altyapısının temaslı ve temassız yöntemleri birlikte kullanması, sıcaklığın hem noktasal hem alan bazlı izlenebilmesine olanak tanırken; ayrı güç kaynaklarıyla sağlanan bağımsız şartlandırma, ısı yönetim performansının enerji tüketimi ve fan işletimi ile birlikte sistem düzeyinde ele alınabilmesini mümkün kılmaktadır. Deney sistemi ve ekipmanların yerleşimi, Şekil 16’da açıklamalı bir görsel olarak verilmiştir.



**Şekil 16.** Deney Sistemi ve Ekipmanların Açıklamalı Görseli

### 3.2. Deney Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar

Deney sisteminde temaslı sıcaklık ölçümleri için K-tipi termokupllar kullanılmıştır. K-tipi termokupl, iki farklı iletken malzeme arasındaki ısıelektrik etki

üzerinden ölçüm noktasında oluşan sıcaklık farkını gerilime dönüştürür; bu sayede test bölgesindeki ısı yol üzerinde seçilen kritik noktalarda (ısı kaynağı üzeri, ısı borusunun adyabatik ve yoğunlaşma bölgeleri gibi) sıcaklığın zamana bağlı değişimi güvenilir biçimde izlenmiştir. K-tipi yapı, geniş sıcaklık aralığında çalışabilmesi açısından laboratuvar düzeneğinde pratik bir seçim sunmaktadır. Tipik olarak yaklaşık -270 ile 1372 °C aralığında kullanılabildiği raporlanmaktadır. Ölçüm doğruluğu (belirsizliği) ise ürün tedarikçisinin kataloğunda  $\pm 0,4$  olarak verilmiştir. Bu çalışmada ölçüm zincirinin güvenilirliğini artırmak amacıyla, termokupllar deneylerden önce sabit sıcaklıklı bir su banyosunda 10–90 °C aralığında 5 °C adımlarla kalibre edilmiş ve kalibrasyon sonuçları ölçümlerin değerlendirilmesinde referans alınmıştır.

Deney sisteminde temassız sıcaklık ölçümleri ve sıcaklık dağılımının alan bazında izlenebilmesi için Testo 885 termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera, test bölgesindeki yüzeylerin kızılötesi ışınımını algılayarak iki boyutlu sıcaklık haritaları üretir; bu sayede ısı kaynağı çevresinde oluşan sıcaklık gradyanları, ısı borusu boyunca yayılma davranışı ve yoğunlaşma bölgesindeki sıcaklık seviyeleri görsel olarak izlenebilir. Çalışma kapsamında termal kamera, termokuplların sağladığı noktasal sıcaklık verilerini doğrulamak amacıyla ölçüm zincirine dahil edilmiştir. Testo 885'in dedektör çözünürlüğü 320 × 240 ölçüm noktasına karşılık gelmekte ve bu, tek bir görüntüde 76.800 adet sıcaklık ölçüm noktasının değerlendirilmesine imkan vermektedir. Ayrıca üretici dokümanlarında en küçük ayırt edilebilir sıcaklık farkının 0,03 K altında olduğu belirtilmektedir. Cihazın standart sıcaklık ölçüm aralığı uygulamaya bağlı olarak -20 ile +350 santigrat derece aralığında verilmektedir. Bu çalışma için temel hedef, elektronik soğutma test bölgesinde oluşan yüzey sıcaklık alanını güvenilir biçimde izlemek olduğundan, ölçüm aralığı seçimi ve görüntü ölçeklendirmesi deney koşullarına uygun şekilde yapılandırılmıştır.

Belirsizlik ve doğruluk açısından termal kameraların performansı, cihazın kendi doğruluk sınırlarına ek olarak yüzey özelliklerine ve ölçüm ortamına yüksek derecede duyarlıdır. Üretici dokümanlarında Testo 885 için doğruluk, tipik olarak  $\pm 2$  santigrat derece veya ölçülen değerin  $\pm 2\%$ 'si (hangisi büyükse) şeklinde verilmektedir. Termal kameranın deney düzeneğindeki konumu, test bölgesinin tamamını kapsayacak şekilde üstten görüş sağlayacak biçimde belirlenmiş ve böylece hem ısı kaynağı çevresi hem ısı borusu boyunca sıcaklık dağılımı tek kare içinde izlenebilir hale getirilmiştir. Termal kameranın bir görseli Şekil 17'de sunulmuştur.



**Şekil 17.** Deney Sisteminde Kullanılan TESTO 885 Termal Kamera (Anonim, 2025a)



**Şekil 18.** Deney Sisteminde Kullanılan LR8402-20 Data Kartı (Anonim, 2025b)

Deney düzeneğinde çok noktalı sıcaklık ölçümlerinin ve gerekli görülen elektriksel büyüklüklerin eş zamanlı kaydı için Hioki LR8402-20 bellekli veri kaydedici kullanılmıştır. Bu cihaz, fabrika çıkışında bir evrensel giriş birimi ve bir gerilim-sıcaklık giriş birimi ile yapılandırılmıştır. Bu sayede termokupl tabanlı sıcaklık kanalları ile gerilim kanalları aynı kayıt altyapısında bir araya getirilebilmiştir. Deneyde test bölgesine yerleştirilen termokupllardan gelen sinyaller cihazın girişlerine bağlanarak, sıcaklıkların zamana bağlı değişimi sürekli biçimde izlenmiş, kayıtlar bilgisayara aktarılarak veri değerlendirme sürecinde kullanılmıştır. Veri kaydediciye ait bir görsel Şekil 18’de sunulmuştur. LR8402-20’nin deneyler açısından öne çıkan yönü, kanal sayısı ve örnekleme aralığı ile ölçüm doğruluğunu aynı anda yönetebilmesidir. Cihaz standart olarak 30 analog kanalla çalışmaktadır. Örnekleme tarafında, 1–15. kanallar için 10 milisaniye, 16–30. kanallar için 20 milisaniye örnekleme aralıkları desteklenmektedir.

Deney düzeneğinde ısı yükünü elektriksel olarak kararlı ve tekrarlanabilir biçimde üretilmesi için GW INSTEK PSW30-72 doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır. Bu cihazın görseli Şekil 19a’da sunulmuştur. PSW30-72 modeli 0–30 V gerilim ve 0–72 A akım aralığında ayarlanabilir olup 720 W düzeyinde çıkış gücü sağlayabildiğinden, ısıtıcı elemanın farklı yük basamaklarında şartlandırılmasına olanak verir. Bu güç kaynağının temel kullanım gerekçesi, ısı yükü belirleyen gerilim–akım değerlerinin kontrollü biçimde ayarlanabilmesi ve bu değerlerin deney boyunca kararlı tutulabilmesidir; bu sayede ısı yolunun verdiği sıcaklık cevabı, tanımlı bir giriş altında karşılaştırılabilir hale gelir. PSW serisi için belirtilen regülasyon ve dalgalanma karakteristikleri (örneğin gerilimde hat regülasyonu  $<0,01\% + 1 \text{ mV}$ , yük regülasyonu  $<0,01\% + 2 \text{ mV}$ ; dalgalanma ve gürültü  $<3 \text{ mVrms}$  ve  $<20 \text{ mV}$  tepe-tepe) ısı yükünün kısa süreli salınımlarla bozulmasını sınırlayarak sıcaklık ölçümlerinde yorumlanabilir bir zaman cevabı elde edilmesine katkı verir. Ölçüm belirsizliği gerilim ayar doğruluğu  $0,1\% + 10 \text{ mV}$ , akım ayar doğruluğu  $0,1\% + 100 \text{ mA}$  olarak tanımlanmıştır. Cihaz çözünürlükleri ise gerilimde 1 mV ve akımda 2 mA mertebesindedir.

Harici termoelektrik elemanın beslenmesinde TT TECHNIC KXN3020D ayarlanabilir güç kaynağı kullanılmıştır. Bu cihazın görseli ise Şekil 19b’de verilmiştir. Bu cihazın deney sistemine dahil edilme amacı, termoelektrik eleman üzerinden geçen akımın ayarlanarak termoelektrik etkinin şiddetinin kontrollü biçimde değiştirilmesi ve bunun termal kazanım–enerji bedeli dengesinin ölçülebilmesidir. KXN-3020D sınıfı güç kaynakları 0–30 V gerilim ve 0–20 A akım aralığında çalışacak şekilde tanımlanmakta; sayısal gösterge hassasiyeti  $\pm(1\% + 1 \text{ hane})$  düzeyinde verilmektedir. Deneysel belirsizlik sabit gerilim çalışma koşullarında gerilim kararlılığı  $\leq 0,2\%$ , yük kararlılığı  $\leq 0,1\%$  ve dalgalanma-gürültü  $\leq 0,5\%$  tepe-tepe olarak verilmektedir. Bu veriler ışığında termoelektrik elemanın elektrik beslemesinin deneyler boyunca sabit bir karakteristikte olduğu kabul edilebilir.



(a) GW INSTEK PSW 30-72  
(Anonim, 2025c)



(b) TT TECHNIC KXN3020D  
(Anonim, 2025d)



(c) GW INSTEK GPS-4303 (Anonim, 2025e)

**Şekil 19.** Deney Sisteminde Kullanılan DC Güç Kaynakları a) Isıl Yük, b) Termoelektrik Eleman ve c) Soğutma Fanları

Soğutma fanlarının beslenmesi ve fan hızının gerilim üzerinden şartlandırılabilmesi için GW INSTEK GPS-4303 çok kanallı güç kaynağı kullanılmıştır. İlgili görsel Şekil 19c’de gösterilmektedir. GPS-4303; birinci ve ikinci kanalda 0–30 V ve 0–3 A aralığında iki bağımsız çıkışa ek olarak, üçüncü kanalda 2,2–5,2 V (1 A azami) ve dördüncü kanalda 8–15 V (1 A azami) yardımcı çıkışlar sağlayan dört kanallı bir mimariye sahiptir. Bu çok kanallı yapı, birden fazla fanın ayrı kanallardan beslenerek aynı test koşulunun tekrarlanabilmesine ve fan gerilimi değiştirilirken diğer elektriksel alt sistemlerin etkilenmemesine imkan verir. Fan beslemesinde gerilim kararlılığı ve düşük dalgalanma önemlidir; GPS-4303 için hat regülasyonu  $<0,01\% + 3 \text{ mV}$  ve dalgalanma-gürültü  $<1 \text{ mVrms}$  (5 Hz–1 MHz) gibi değerler, fan beslemesinin kararlı tutulabildiğini

teknik olarak gerekçelendirmek için yeterlidir. Belirsizlik açısından, cihazın sayısal gösterge doğruluğu çıkış açık durumda  $\pm 0,5\%$  olarak verildiğinden, fanlara uygulanan gerilimin raporlanmasında bu değer doğrudan gerilim belirsizliği bileşeni olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım sayesinde, fan gerilimi–hava hızı–gürültü düzeyi eşleştirmeleri (fan karakteristikleri) aynı referans besleme doğruluğu altında sunulabilir ve termoelektrik entegrasyonun akustik/enerji etkileri daha tutarlı biçimde karşılaştırılabilir.

Deney sisteminde fan çıkışındaki hava hızının nicel olarak belirlenmesi ve fanın farklı besleme koşullarında sağladığı zorlanmış taşınım seviyelerinin karşılaştırılabilmesi için Testo 425 sıcak tel anemometresi kullanılmıştır. Sıcak tel prensibinde, prob ucundaki ısıtılmış tel elemandan çevre akışkana olan ısı geçişi hava hızıyla birlikte değiştiğinden, cihaz bu ısı geçişinden yararlanarak yerel hız değerini hesaplar. Bu yaklaşım, fan çıkışındaki hız değişimlerinin termoelektrik entegrasyonla birlikte oluşan sistem tepkisinden ayrıştırılmasına ve fan çalışma noktası–hava hızı–sıcaklık cevabı ilişkisinin kurulmasına imkan verir. Cihazın teknik sınırları üretici veri sayfasına göre şu şekilde verilmiştir; hava hızı ölçüm aralığı 0 ile 30 m/s, çözünürlük 0,01 m/s olup; 0–20 m/s aralığında belirsizlik ifadesi  $\pm 0,03$  m/s + okunan değer %4'ü, 20,01–30 m/s aralığında ise  $\pm 0,5$  metre bölü saniye + okunan değer %5'i) olarak verilmektedir. Testo 425 aynı zamanda prob üzerinde sıcaklık ölçümü de sunmaktadır. Bu kanal için ölçüm aralığı -20 ile +70 santigrat derece, çözünürlük 0,1 °C, belirsizlik ifadesi ise  $\pm 0,5$  °C düzeyinde raporlanmaktadır.

Fan çıkışındaki hız alanı genellikle düzgün dağılmadığı ve türbülans içerebildiği için, anemometre ile elde edilen hız değerinin temsil gücü; ölçüm düzleminin seçimi, probun akışa hizalanması, ölçüm süresinin ortalama alma yaklaşımı ve tekrar edilebilir konumlandırma gibi unsurlara bağlıdır. Bu nedenle ölçümler, fan çıkışını temsil eden sabit bir referans konumda ve aynı ölçüm geometrisi korunarak gerçekleştirilmiş; böylece farklı fan gerilimleri ve farklı ısı işletim durumları arasında karşılaştırılabilir fan karakteristiği verisi oluşturulmuştur. Şekil 20'de Testo 425 sıcak tel anemometresine ait bir görsel sunulmuştur.



**Şekil 20.** Deney Sisteminde Kullanılan Testo 425 Sıcak Tel Anemometresi  
(Anonim, 2025f)

Deney sisteminde fanların akustik çıktısının nicel olarak belirlenmesi ve fan gerilimi ile termoelektrik entegrasyonun ısıl kazanım–enerji tüketimi–gürültü eksenindeki etkilerinin birlikte yorumlanabilmesi için PCE 322A ses ölçüm ve kayıt cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, çevresel ses basıncı seviyesini ölçerek fan çalışma koşullarına bağlı gürültü düzeyinin karşılaştırmalı olarak raporlanmasına imkan vermektedir. Üretici kılavuzunda cihazın IEC 61672-1 Sınıf 2 standardına uygun olduğu, doğruluğunun  $\pm 1,4$  dBA ve ölçüm frekans aralığının 31,5 Hz ile 8 kHz arasında olduğu belirtilmektedir. Ölçüm aralığı kademeli olarak 30–80, 50–100, 80–130 desibel ve otomatik aralıkta 30–130 desibel şeklinde sunulmakta; ekran çözünürlüğü 0,1 desibel olarak raporlanmaktadır. Cihazda frekans ağırlıklandırması olarak A ve C seçenekleri ile zaman ağırlıklandırması olarak hızlı (125 milisaniye) ve yavaş (1 saniye) seçenekleri bulunmaktadır. Bu seçenekler, fan gürültüsünün anlık dalgalanma ve daha kararlı seviye bileşenlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesini mümkün kılar.

Cihazın dahili belleğinin 32.700 ölçüm değerine kadar kayıt yapabildiği de aynı kaynakta belirtilmektedir. Bu çalışmada, fan gürültüsünün karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi için ölçümler sabit bir referans konumda, aynı yerleşim ve aynı ayarlar korunarak alınmış; böylece elde edilen gürültü verisi fan hız ölçümleriyle birlikte fan

karakteristiği olarak raporlanabilir hale getirilmiştir. PCE 322A cihazına ait bir görsel şekil 21’de sunulmuştur.



**şekil 21.** Deney Sisteminde Kullanılan PCE 322A Ses lm ve Kayıt Cihaz  
(Anonim, 2025g)

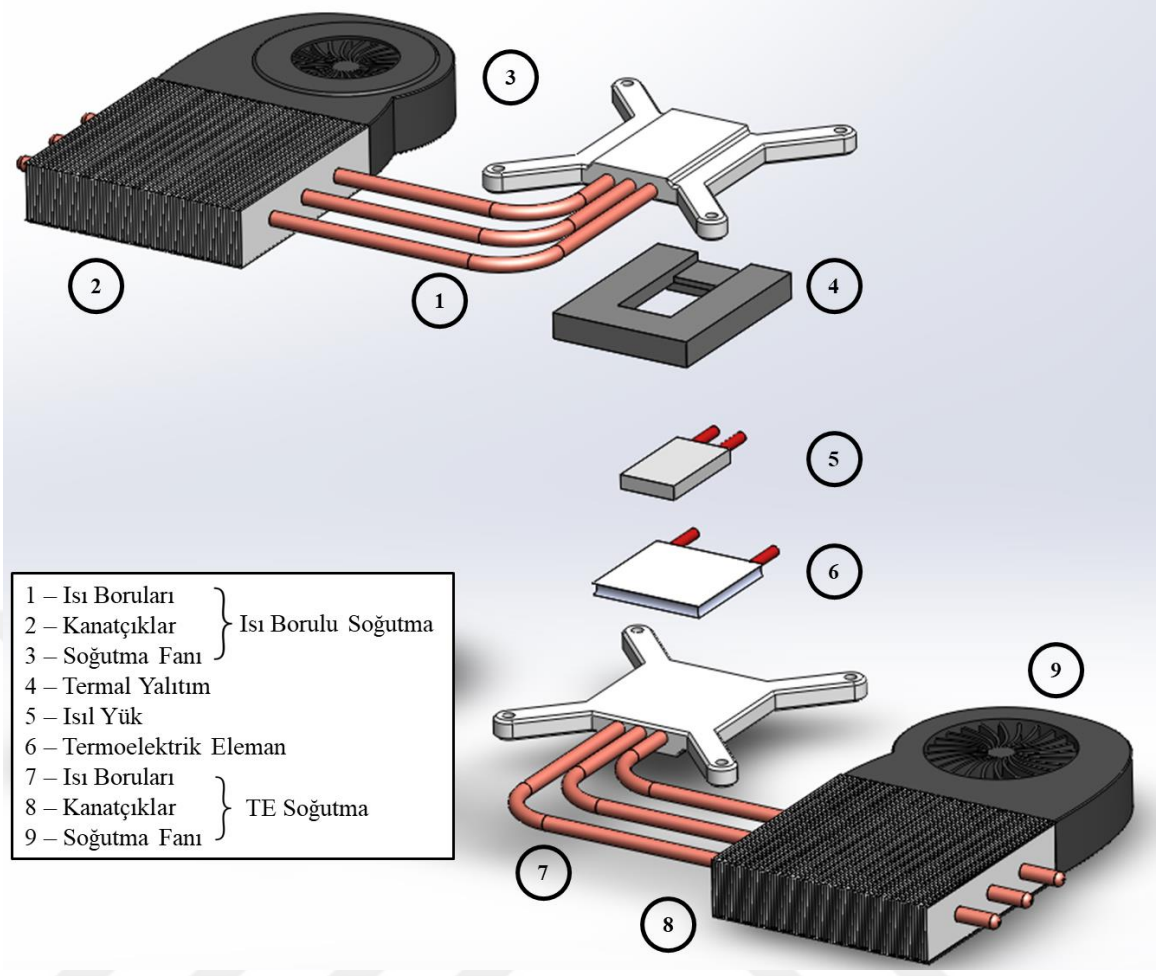
### 3.3. Test Bölgesinin Detayları

Test bölgesi, şekil 22’de şematik olarak gösterildiği üzere, iki adet ısı borulu–fanlı soğutma elemanı arasına yerleştirilmiş bir ısıl yk temelinde kurgulanmıştır. Bu yaklaşımın temel amacı, gerçek bir elektronik bileşende gözlenen lokal ısı üretimi–sınırlı temas alanı–yüksek ısı akısı karakterini laboratuvar koşullarında tekrarlanabilir biçimde temsil etmek ve soğutma mimarisinin bu tür bir ısıl uyarana verdiği yanıtı sistematik olarak inceleyebilmektir. Bu kapsamda kullanılan ısıl yk, deneyin giriş değişkeni olarak tanımlanan elektrik gücünü kontrollü biçimde ısıya dönüştürmekte ve bu ısıнын test bölgesindeki ısıl yol üzerinden ortam havasına atılması hedeflenmektedir. Isıl yükün doğru akım güç kaynağı ile beslenmesi, yk seviyesinin basamaklı veya sürekli şekilde ayarlanabilmesini mümkün kılarken; çevresinin bir ısıl yalıtım malzemesi ile izole edilmesi, uygulanan gücün mümkün olduğunca soğutma sistemi üzerinden tahliye edildiği kabulünü desteklemek üzere tercih edilmiştir. Böylece test bölgesi, ısıl yükün üretildiği bölge ile bu yükün taşındığı ve atıldığı bölgeyi birbirinden ayıran, ancak aralarındaki ısıl etkileşimi görünür kılan bir sınır koşulu oluşturur.

Isıl yük geometrisi, elektronik bileşen benzetimi açısından seçilmiş kompakt bir hacme karşılık gelmekte ve  $20 \times 35 \times 4$  mm boyutlarındadır. Isıl yükün üst yüzeyi, birinci aşama soğutma hattını oluşturan ısı borulu–fanlı soğutma elemanına temas etmektedir. Bu eleman, ısıl yük ile doğrudan temas eden bir yayıcı plaka ile bu plakaya bağlı ısı borularından oluşmaktadır. Yayıcı plakanın temel işlevi, ısıl yükten gelen enerjiyi daha geniş bir temas alanına yayarak ısı borularına daha homojen biçimde aktarabilmek ve böylece yerel sıcak nokta etkisini azaltmaktır. Plaka üzerinden ısı borularına taşınan enerji, ısı borularının faz değişimi temelli taşıma mekanizması sayesinde, yoğunlaşma bölgesine düşük sıcaklık farklarıyla iletilmektedir. Bu mimari, özellikle sınırlı alanlı ısı kaynaklarında ısıl yolun ilk kısmında yayma, ikinci kısmında ise taşıma fonksiyonunun ayrıştırılmasına imkan verdiği için elektronik soğutma uygulamalarında yaygın bir tasarım yaklaşımını temsil eder.

Bu çalışmada kullanılan ısı borulu soğutma elemanında, ısı borularının temas bölgesi düzleştirilmiştir. Bu ısı kaynağı ile ısı borusu arasındaki ısıl temasın geliştirilmesine yönelik bir tasarım özelliği olarak değerlendirilebilir. Yayıcı plaka yaklaşık  $50 \times 50 \times 10$  mm boyutlarındadır ve ısı boruları bu plaka ile bütünleşik şekilde çalışacak biçimde bağlanmıştır. Isı borularının dış çapı 5 mm olup, farklı uzunluklarda üç boru konfigürasyonu mevcuttur. Buradaki borularının uzun olan yaklaşık 230 mm kısa olanı ile 190 mm’dir. Plaka malzemesinin alüminyum alaşımı, ısı borusu gövdesinin ise büyük oranda saf bakır olması, bir yandan yapısal hafiflik ve işlenebilirlik gibi pratik gereksinimleri, diğer yandan yüksek ısıl iletkenlik ihtiyacını aynı tasarımda bir araya getirmektedir. Isı borularının fitil yapısının sinterlenmiş örgü biçiminde olması ise, kılcal geri beslemeyi destekleyerek buharlaştırıcı bölgeye sıvı dönüşünü sürdürmek ve farklı çalışma koşullarında kararlı dolaşımı korumak açısından önemlidir.

Isı borularının yoğunlaşma bölgesi üzerine giydirilen alüminyum kanat dizisi, taşınan ısıнын havaya aktarılmasında yüzey alanını artıran ana elemandır. Kanat dizisinin  $80 \times 80 \times 20$  mm boyutlarda olması, ısı transfer alanının artırılmasına ve fanla zorlanmış taşınımın daha etkin kullanılmasına hizmet etmektedir. Kanat bölgesine üfleme yapan 12 V doğru akım fan ise, yoğunlaşma bölgesindeki dış taşınım direncini düşürerek ısı atımını hızlandırmakta ve sistemin kararlı rejimde daha düşük sıcaklıklara oturmasına katkı sağlamaktadır. Bu yapı, test bölgesinin birinci aşaması olarak ısı borulu–fanlı pasif/yarı-aktif soğutma hattını temsil etmektedir ve termoelektrik eleman kullanılmayan referans deneylerde temel karşılaştırma zemini olarak ele alınmıştır.

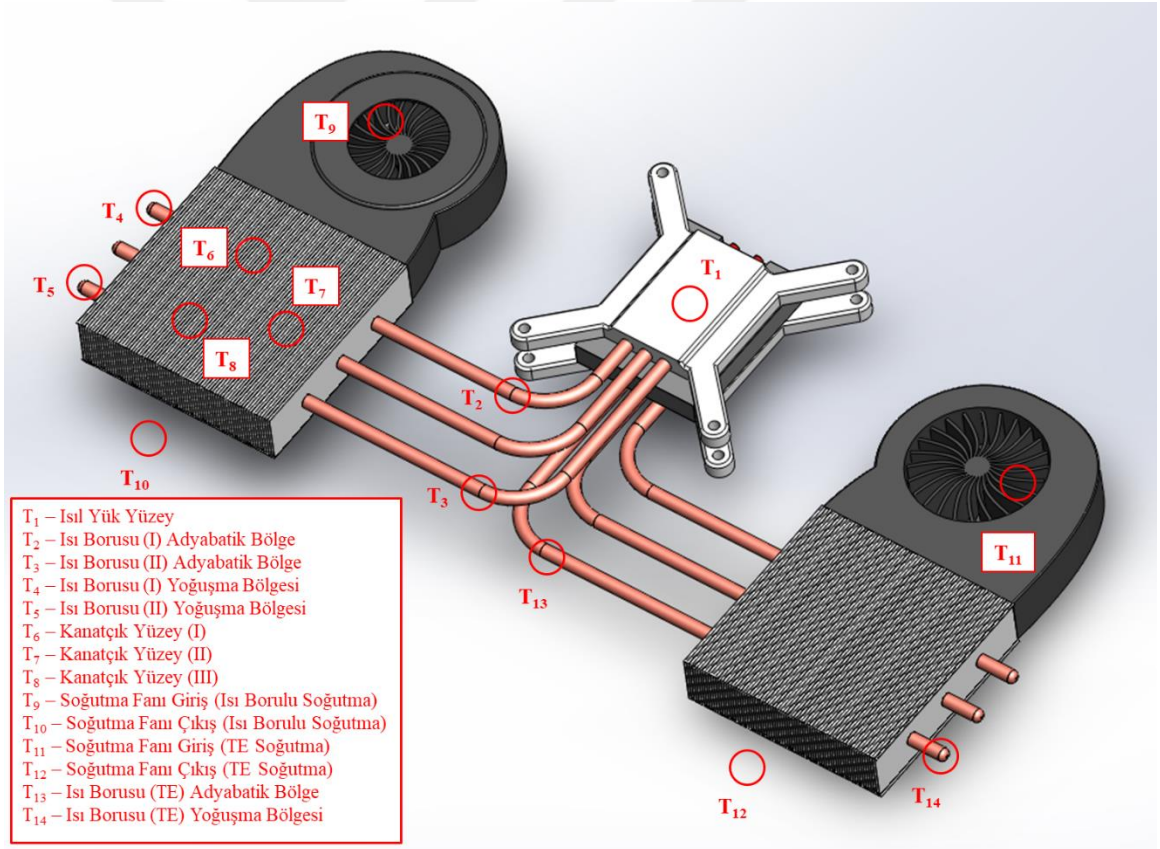


**Şekil 22.** Test Bölgesinin Detayları Açıklamalı Şematik Görsel

Test bölgesinin ikinci aşamasında, ısı yükünün alt yüzeyi bir termoelektrik elemana temas etmektedir. Bu eleman  $40 \times 40 \times 4$  mm boyutlarında olup TEC1-12703 modelidir. Termoelektrik elemanın test bölgesine eklenmesi, sistemin yalnızca pasif taşıyım kapasitesi ile değil, aktif ısı pompalama kabiliyeti ile de değerlendirilmesine imkan verir. Bu çalışmada termoelektrik elemanın varlığı ısı borulu soğutma deneylerinde fiziksel olarak korunmakla birlikte elektriksel olarak beslenmemekte, yani aktif soğutma etkisi oluşturmuyacak şekilde pasif durumda bırakılmaktadır. Termoelektrik soğutma deneylerinde ise eleman doğru akım güç kaynağıyla beslenerek aktif hale getirilmekte ve ısı yük yüzeyinden ısı çekerek soğuk ve sıcak yüzeyler arasında yönlendirilmiş bir ısı transferi başlatmaktadır. Ancak termoelektrik elemanın enerji dengesi gereği, sıcak yüzeyde atılması gereken toplam ısı, yalnızca çekilen ısı yükünü değil, aynı zamanda elemanın tükettiği elektrik gücünün de ısıya dönüşen kısmını içermektedir. Bu nedenle termoelektrik elemanın sıcak yüzeyinde ikinci bir ısı borulu–fanlı soğutma elemanı konumlandırılmıştır. Bu ikinci soğutma hattı, termoelektrik elemanın sıcak tarafındaki

artan ısı atım yükünü ortama iletmeyi ve böylece termoelektrik modülün sürdürülebilir biçimde çalışmasını desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu mimari, sistem düzeyinde termal kazanım–enerji bedeli–hava tarafı ısı atımı dengesini görünür kılması bakımından tezinizin ana değerlendirme eksenleriyle doğrudan uyumludur.

Şekil 23’te, test bölgesinin ısı davranışını temsil edecek şekilde stratejik olarak seçilen termokupl ölçüm noktaları şematik olarak sunulmuştur. Bu noktalar; ısı yük yüzeyi, ısı borularının adyabatik ve yoğuşma bölgeleri, kanatçık dizisi üzerinde farklı konumlardaki yüzey sıcaklıkları ile soğutma fanlarına giren ve çıkan havanın sıcaklıklarını kapsayacak biçimde belirlenmiştir. Böylece hem ısınn kaynaktan ısı borularına aktarımı ve ısı borusu boyunca taşınması, hem de kanatçık–fan hattı üzerinden ortama atımı sırasında oluşan sıcaklık seviyeleri ve sıcaklık farkları eş zamanlı olarak izlenebilmiş; termoelektrik elemanın devreye alınması durumunda ısı yol boyunca ortaya çıkan değişimler karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilir hale getirilmiştir.



**Şekil 23.** Temaslı Ölçüm Termokuplların Yerleşiminin Şematik Gösterimi

### 3.4. Deney Senaryoları ve Deneylerin Yapılışı

Isı borulu–fanlı soğutma sisteminin termal davranışı ile soğutma için harcanan elektrik gücü arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla, kontrollü bir deney senaryoları matrisi oluşturulmuştur. Deney planı, iki temel değişkenin sistematik olarak taranmasına dayanır: (i) ısı yük seviyesi ve (ii) ısı borulu soğutma hattındaki fan çalışma seviyesi. Böylece, aynı ısı yük altında fan işletim şiddetinin etkisi ve aynı fan koşulunda ısı yük artışının sistem tepkisi ayrı ayrı değerlendirilebilir; ayrıca elde edilen sonuçlar enerji tüketimi perspektifinde karşılaştırılabilir hale gelir. Bu bölümde sunulan deney senaryoları, Tablo 6’da listelenen kodlama yapısı üzerinden yürütülmüş ve her bir deney koşulu tekrarlanabilir bir prosedürle uygulanmıştır.

**Tablo 6.** Isı Borulu-Fanlı Soğutucu Deney Planı

| Deney Kodu | Isıtıcı Seviyesi | Isıl Yük (W) | Fan I<br>(Isı Borulu Soğutma) |             | Fan II<br>(TE Soğutma) |             | Toplam Soğutma Tüketimi (W) |
|------------|------------------|--------------|-------------------------------|-------------|------------------------|-------------|-----------------------------|
|            |                  |              | Seviye                        | Tüketim (W) | Seviye                 | Tüketim (W) |                             |
| H1F1       | Maksimum         | 40           | Düşük                         | 0,48        | Sabit                  | 0.12        | 0,60                        |
| H1F2       | Maksimum         | 40           | Orta                          | 0,96        | Sabit                  | 0.12        | 1,08                        |
| H1F3       | Maksimum         | 40           | Yüksek                        | 1,50        | Sabit                  | 0.12        | 1,62                        |
| H1F4       | Maksimum         | 40           | Maksimum                      | 2,16        | Sabit                  | 0.12        | 2,28                        |
| H2F1       | Yüksek           | 30           | Düşük                         | 0,48        | Sabit                  | 0.12        | 0,60                        |
| H2F2       | Yüksek           | 30           | Orta                          | 0,96        | Sabit                  | 0.12        | 1,08                        |
| H2F3       | Yüksek           | 30           | Yüksek                        | 1,50        | Sabit                  | 0.12        | 1,62                        |
| H2F4       | Yüksek           | 30           | Maksimum                      | 2,16        | Sabit                  | 0.12        | 2,28                        |
| H3F1       | Orta             | 20           | Düşük                         | 0,48        | Sabit                  | 0.12        | 0,60                        |
| H3F2       | Orta             | 20           | Orta                          | 0,96        | Sabit                  | 0.12        | 1,08                        |
| H3F3       | Orta             | 20           | Yüksek                        | 1,50        | Sabit                  | 0.12        | 1,62                        |
| H3F4       | Orta             | 20           | Maksimum                      | 2,16        | Sabit                  | 0.12        | 2,28                        |
| H4F1       | Düşük            | 10           | Düşük                         | 0,48        | Sabit                  | 0.12        | 0,60                        |
| H4F2       | Düşük            | 10           | Orta                          | 0,96        | Sabit                  | 0.12        | 1,08                        |
| H4F3       | Düşük            | 10           | Yüksek                        | 1,50        | Sabit                  | 0.12        | 1,62                        |
| H4F4       | Düşük            | 10           | Maksimum                      | 2,16        | Sabit                  | 0.12        | 2,28                        |

Isıl yük dört seviyede seçilmiştir: düşük, orta, yüksek ve maksimum. Bu seviyeler sırasıyla 10 W, 20 W, 30 W ve 40 W güç girişlerine karşılık gelmektedir. Fan işletimi ise dört seviyede tanımlanmıştır: düşük, orta, yüksek ve maksimum. Böylece her bir ısı yük seviyesinde fanın dört farklı çalışma noktasındaki etkisi gözlenebilmiştir. Deney kodları bu iki eksenin birleşimine göre oluşturulmuştur. Örneğin H1 kodu maksimum ısı yük (40 W) seviyesini, H2 yüksek ısı yük (30 W), H3 orta ısı yük (20 W) ve H4 düşük ısı yük (10 W) seviyesini temsil eder. F1–F4 kodları ise fan çalışma seviyesini sırasıyla düşük, orta, yüksek, maksimum olarak göstermektedir. Bu kodlama yaklaşımı, deneylerin hem raporlanmasını hem de sonuçların grafik ve karşılaştırmalı analizlerde izlenmesini kolaylaştırmak üzere seçilmiştir.

Isı borulu soğutma senaryolarında birinci fan (Fan I) değişken olarak işletilmiş ve her senaryoda seçilen fan seviyesine karşılık gelen elektrik tüketimi kaydedilmiştir. İkinci fan (Fan II) ise deney planında sabit bir çalışma noktasında tutulmuştur. Bu yaklaşım, ısı borulu soğutma hattının şartlandırmasının tek bir fan üzerinden sistematik biçimde değiştirilebilmesine ve diğer fanın etkisinin sabitlenerek karşılaştırmaların netleştirilmesine hizmet eder. Tablo 6’da her bir fan seviyesi için ölçülen fan tüketimleri verilmiş; ayrıca Toplam Soğutma Tüketimi sütununda Fan I ve Fan II güçlerinin toplamı raporlanmıştır. Böylece her deney koşulu için, termal performans ölçümleriyle doğrudan ilişkilendirilebilecek bir soğutma enerji girdisi tanımlanmıştır. Bu tanım, ilerleyen bölümlerde yapılacak değerlendirmelerde ısı kazanımının enerji bedeliyle birlikte yorumlanabilmesi açısından referans alınacaktır.

Deneyler, her bir senaryonun aynı prosedürle ve tekrarlanabilir koşullarda yürütülmesini sağlayacak şekilde standartlaştırılmıştır. Her deney öncesinde ısı yük beslemesi, fan beslemeleri ve ölçüm altyapısına ait tüm elektriksel bağlantılar kontrol edilerek sistemin güvenli çalışmaya hazır olduğu doğrulanmıştır. Ardından termokupl okumaları ve termal kamera görüntüsü birlikte değerlendirilerek başlangıç koşullarının kararlı olduğu teyit edilmiştir. Deney başlatılırken önce Fan II sabit çalışma seviyesinde devreye alınmış, bunu takiben Tablo 6’da ilgili senaryo için belirlenen Fan I seviyesi uygulanmıştır; fanların seçilen çalışma noktasına oturabilmesi için kısa bir geçiş süresi beklenmiştir. Fan şartlandırması tamamlandıktan sonra ısı yük, deney koduna karşılık gelecek biçimde 10, 20, 30 veya 40 W seviyesinde ayarlanarak devreye alınmış ve aynı anda tüm sıcaklık kanalları ile termal kamera kaydı eş zamanlı olarak başlatılmıştır.

Isı borulu–fanlı soğutma senaryolarının tamamlanmasının ardından deneyler, termoelektrik elemanın aktif olarak devreye alındığı hibrit çalışma koşullarına genişletilmiştir. Bu aşamada amaç, aynı ısı yük ve fan şartlarında termoelektrik elemanın sisteme eklenmesiyle elde edilen sıcaklık düşüşünü, bunun karşılığında ortaya çıkan ek enerji tüketimiyle birlikte sistem düzeyinde değerlendirebilmektir. Bu nedenle hibrit deneylerde ısı yük seviyesi sabit tutulurken (Hibrit soğutma sistemi deneylerinde maksimum yük olan 40 W tercih edilmiştir), ısı borulu soğutma hattındaki Fan I seviyesi dört kademedede (düşük, orta, yüksek, maksimum) taranmış; termoelektrik elemanın sıcak tarafında yer alan Fan II ise karşılaştırılabilirliği korumak üzere sabit bir çalışma noktasında işletilmiştir. Termoelektrik elemanın elektriksel olarak sürülmesi için iki ayrı besleme koşulu tanımlanmıştır: birinci koşul P1 (8 V × 2,7 A) ve ikinci koşul P2 (10 V × 3,2 A). Böylece, termoelektrik elemanın daha düşük ve daha yüksek güç girdisi altında hibrit sistemin termal yanıtı ve toplam tüketim üzerindeki etkisi aynı deney matrisi içerisinde izlenebilir hale getirilmiştir. Hibrit deneylerin kodlamasında P1 ve P2 ekleri, termoelektrik besleme seviyesini temsil etmekte; örneğin H1F2P1 kodu, 40 W ısı yük altında Fan I’ın orta seviyede ve termoelektrik elemanın P1 koşulunda çalıştırıldığı deney senaryosunu ifade etmektedir.

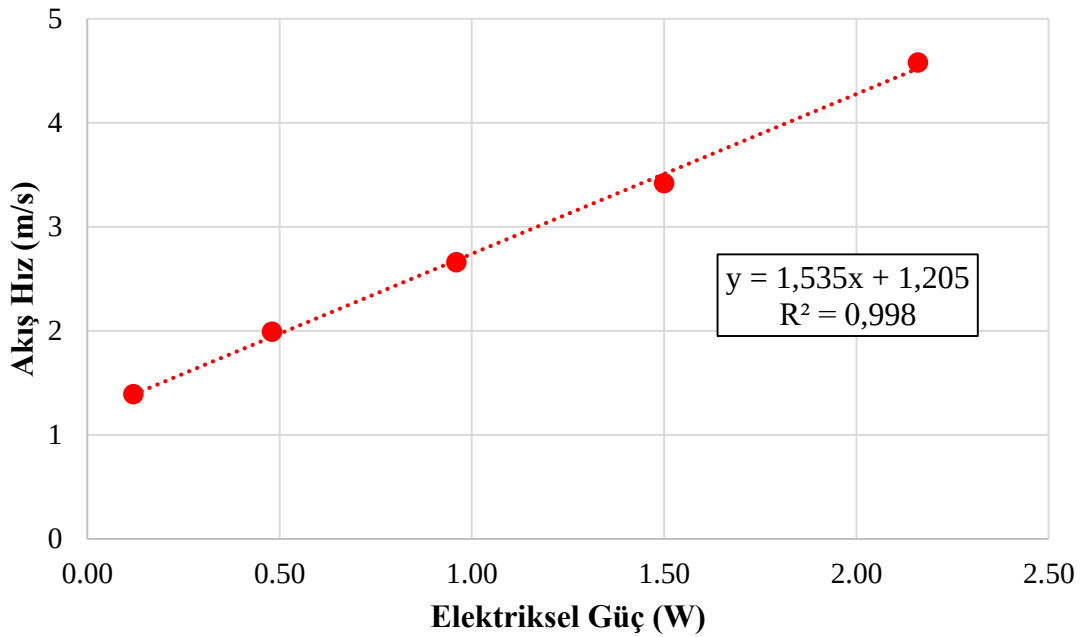
**Tablo 7.** Isı Borulu-Fanlı ve Termoelektrik Hibrit Sistem Deney Planı

| Deney Kodu | Isıl Yük (W) | Fan I (Isı Borulu Soğutma) |             | Fan II (Termoelektrik) |             | Termoelektrik Tüketimi |                 | Toplam Tüketim (W) |
|------------|--------------|----------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|-----------------|--------------------|
|            |              | Seviye                     | Tüketim (W) | Seviye                 | Tüketim (W) | 8V × 2.7A (P1)         | 10V × 3.2A (P2) |                    |
| H1F1P1     | 40           | Düşük                      | 0,48        | Sabit                  | 0,12        | 21,60                  |                 | 22,20              |
| H1F1P2     | 40           | Düşük                      | 0,48        | Sabit                  | 0,12        |                        | 32,0            | 32,60              |
| H1F2P1     | 40           | Orta                       | 0,96        | Sabit                  | 0,12        | 21,60                  |                 | 22,68              |
| H1F2P2     | 40           | Orta                       | 0,96        | Sabit                  | 0,12        |                        | 32,0            | 33,08              |
| H1F3P1     | 40           | Yüksek                     | 1,50        | Sabit                  | 0,12        | 21,60                  |                 | 23,22              |
| H1F3P2     | 40           | Yüksek                     | 1,50        | Sabit                  | 0,12        |                        | 32,0            | 33,62              |
| H1F4P1     | 40           | Maksimum                   | 2,16        | Sabit                  | 0,12        | 21,60                  |                 | 23,88              |
| H1F4P2     | 40           | Maksimum                   | 2,16        | Sabit                  | 0,12        |                        | 32,0            | 34,28              |

Isı borulu-fanlı ve termoelektrik hibrit sistem için oluşturulan deney planı, Tablo 7’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Tabloda her bir senaryo için ısı yük değeri, Fan I ve Fan II’nin çalışma seviyesi ile bunlara karşılık gelen elektrik tüketimleri ayrı ayrı

verilmiştir. Ayrıca termoelektrik elemanın P1 ve P2 koşullarındaki tüketimi ve tüm alt sistemlerin toplamı olarak tanımlanan toplam tüketim değeri raporlanmıştır.

Soğutma fanının değerlendirilmesinde temel bir girdi ise, fanın elektriksel güce bağlı olarak ürettiği zorlanmış taşınım düzeyinin nicel olarak belirlenmesidir. Bu amaçla fan çıkışındaki hava akış hızı farklı besleme koşullarında ölçülerek fan karakteristiği oluşturulmuş ve sonuçlar Şekil 24’te sunulmuştur. Şekil 24, fanın giriş gücü arttıkça hava akış hızının nasıl değiştiğini göstererek, deneylerde gözlenen sıcaklık düşüşlerinin yalnızca güç tüketimi artışından değil, aynı zamanda hava tarafındaki taşınım şiddetinin yükselmesinden kaynaklanabileceğini ayırt etmeye yardımcı olur. Ayrıca şekilde gösterilen veri noktaları üzerinden bir eğri uydurma işlemi gerçekleştirilmiş ve fan giriş gücü ile hava akış hızı arasındaki ilişkiyi temsil eden ampirik bir bağıntı elde edilmiştir. Şekil üzerinde verilen denklem, deneylerde kullanılan fan seviyelerinin yalnızca düşük–orta–yüksek–maksimum gibi nitel tanımlarla değil, sürekli bir fonksiyon üzerinden nicel olarak ifade edilmesine imkan vermektedir.



**Şekil 24.** Soğutma Fanının Güce Bağlı Hava Akış Hızı Karakteristiği

Sonuç olarak her deney, 1200 saniyelik ısıtma ve bunu izleyen 600 saniyelik soğuma periyotlarından oluşan tek bir çevrim halinde yürütülmüştür. Isıtma periyodu boyunca ısı yükü sabit tutularak sistemin geçici rejimden kararlı rejime yaklaşma davranışı izlenmiştir; sıcaklıkların zamana bağlı değişimi üzerinden kararlı rejime erişim süreci değerlendirilmiştir. Isıtma periyodunun sonunda ısı yükü kapatılarak soğuma

periyoduna geçilmiş, bu süreçte fanlar çalışmaya devam ettirilerek sistemin ortam koşullarına geri dönüş davranışı kaydedilmiştir. Böylece her senaryo için hem ısı yük uygulaması altındaki ısınma tepkisi hem de yük kaldırıldıktan sonraki soğuma karakteri aynı veri seti içerisinde elde edilmiştir. Yalnızca ısı borulu-fanlı ve termoelektrik hibrit sistem deneylerinde TE eleman ısınma periyodunun 300. saniyesinde devreye alınmış ve ısı yükün pasif hale getirildiği 1200. saniyede yükle beraber pasif hale getirilmiştir. Tüm çevrim boyunca veri toplama kartı üzerinden termokupl sıcaklıkları sürekli kaydedilmiş, termal kamera ile test bölgesinin sıcaklık dağılımı izlenmiş ve fan işletimine ait ayarlar senaryo koşuluna uygun biçimde korunmuştur.



#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, geliştirilen iki-aşamalı elektronik soğutma mimarisinin deneysel bulguları sistematik biçimde sunulmakta ve ısı kazanımları; enerji tüketimi ve akustik çıktı gibi tasarım kısıtlarıyla birlikte tartışılmaktadır. Test bölgesi, birinci aşamada ısı borulu–kanatçıklı–fanlı ısı atım hattını; ikinci aşamada ise ısı yükün alt yüzeyine temas eden termoelektrik modülü ve bu modülün sıcak tarafındaki artan ısı atım yükünü uzaklaştırmak üzere konumlandırılmış ikincil ısı borulu–fanlı hattı içerecek şekilde kurgulanmıştır. Termoelektrik eleman, referans (yalnızca ısı borulu) deneylerde fiziksel olarak sistem üzerinde korunmuş ancak elektriksel olarak beslenmeyerek pasif durumda bırakılmış; hibrit deneylerde ise tanımlanan besleme koşullarıyla aktif hale getirilmiştir. Bu yaklaşım, aynı mekanik/ısı temas zinciri korunurken yalnızca fan düzeyi ile fan ve termoelektrik entegrasyonu etkilerinin doğrudan karşılaştırılmasına imkan vermektedir.

Deneyler, dört farklı ısı yük (10, 20, 30 ve 40 W) ve dört farklı fan işletim seviyesi üzerinden tanımlanan senaryolarla yürütülmüş; her bir senaryo 1200 saniyelik ısıtma ve bunu izleyen 600 saniyelik soğuma periyodundan oluşan tek çevrimde kaydedilmiştir. Hibrit koşullarda termoelektrik modül, ısınma periyodunun 300. saniyesinde devreye alınarak 1200. saniyede (ısı yüküyle birlikte) pasif hale getirilmiş; böylece termoelektrik entegrasyonun geçici rejim tepkisine ve kararlı duruma oturma davranışına etkisi ayrıştırılabilir hale getirilmiştir. Sıcaklık verileri; ısı yük yüzeyi, ısı borusunun farklı bölgeleri, kanatçık/fan hattı ve hava giriş–çıkış noktalarını kapsayacak şekilde seçilen termokupllardan sürekli toplanmış; ayrıca termal kamera ile yüzey sıcaklık dağılımları görsel olarak doğrulanmıştır.

Bölümün akışı, önce referans ısı borulu–fanlı hattın termal performansının (4.1) ortaya konması; ardından termoelektrik entegrasyonla elde edilen hibrit kazanımın ve bunun tüketim bedelinin (4.2) karşılaştırmalı değerlendirilmesi üzerine kuruludur. Devamında, farklı stratejilerin termal görüntüleme ile kararlı hâl sıcaklık alanları üzerinden mukayesesi (4.3), fan kaynaklı gürültü düzeylerinin nicel karşılaştırması (4.4) ve son olarak kararlı hal sıcaklığı–toplam tüketim–gürültü ekseninde bütünlük tasarım değerlendirmesi (4.5) sunulmaktadır.

#### 4.1. Isı Borulu-Fanlı Soğutucunun Termal Performansı

Isı borulu–fanlı soğutucunun termal performansı, hibrit mimariye geçmeden önce referans çalışma zeminini tanımlamak üzere; ısı yük ve fan işletim seviyelerinin sistematik biçimde tarandığı deney matrisi üzerinden değerlendirilmektedir. Bu kapsamda ısı yük dört seviyede (10, 20, 30, 40 W) seçilmiş; fan işletimi de düşük–orta–yüksek–maksimum olmak üzere dört seviyede tanımlanarak H1–H4 ve F1–F4 kodlarıyla raporlama standardize edilmiştir. Sıcaklık tepkileri ise, ısı yük yüzeyi, ısı borusunun adyabatik ve yoğuşma bölgeleri, kanatçık dizisi üzerindeki farklı noktalar ve fan giriş–çıkış havasını kapsayacak şekilde seçilen termokupl ağıyla izlenerek ısı yol boyunca oluşan seviyeler ve gradyenler birlikte okunabilir hale getirilmiştir.

Bu çerçevede Şekil 25 ve Şekil 26, farklı ısı yüklerde çalışma ve soğuma periyotları boyunca ısı yük yüzey sıcaklığının zamanla değişimini vererek fan seviyesinin tepe sıcaklık ve kararlı duruma yaklaşma üzerindeki etkisini doğrudan görünür kılmaktadır. Şekil 25 ve Şekil 26 birlikte değerlendirildiğinde, ısı yük devreye alındığı anda ısı yük yüzey sıcaklığında belirgin ve hızlı bir yükselme gerçekleştiği görülmektedir. Bu ilk geçici rejim, sistemin ısı ataleti ve ısı üretiminin ani başlaması nedeniyle kaçınılmazdır; ancak soğutma hattının sayesinde sıcaklık artış hızı kısa sürede kırılmakta ve eğriler yaklaşık 450. saniye civarında çoğu çalışma koşulu için kararlı (veya yarı-kararlı) bir seviyeye yaklaşmaktadır. Kararlı hal sıcaklıklarının ısı yüklerle birlikte yükselmesi beklenen bir sonuçtur: 40 W ve 30 W gibi daha yüksek ısı girdilerinde yüzey sıcaklığı daha yüksek bir plato değerine otururken, 20 W ve 10 W seviyelerinde daha düşük sıcaklıklarda dengeye gelinmektedir.

Fan seviyesinin etkisi ise her iki şekilde de açık biçimde seçilebilmektedir. Aynı ısı yük altında fan devrinin artırılması, zorlanmış taşınım katsayısını yükselterek özellikle hava tarafı ısı direncini düşürmekte; bunun sonucu olarak kararlı hal sıcaklıkları anlamlı ölçüde aşağı kaymaktadır. Maksimum fan seviyesi ile düşük fan seviyesi arasında kararlı hâl sıcaklığında yaklaşık 8 °C’ye varan farkların oluşması, sistemin bu çalışma aralığında fan tarafı ısı atım kapasitesinin performans üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Ayrıca fan seviyesinin dramatik katkısı, ısı yük arttıkça daha görünür hale gelmektedir: 40 W koşulunda eğriler fan seviyesine göre daha fazla ayrışırken, 10 W gibi düşük ısı yüklerde sıcaklıklar daha düşük seviyelerde seyrettiği için fan artışının sağladığı ilave kazanım görece sınırlı kalmaktadır. Bu durum, yüksek ısı yüklerde

taşıyım tarafının daha baskın bir sınırlayıcı hale gelmesi ve dolayısıyla fanla artırılan hava debisinin toplam ısı direnci daha fazla etkilemesiyle tutarlıdır.

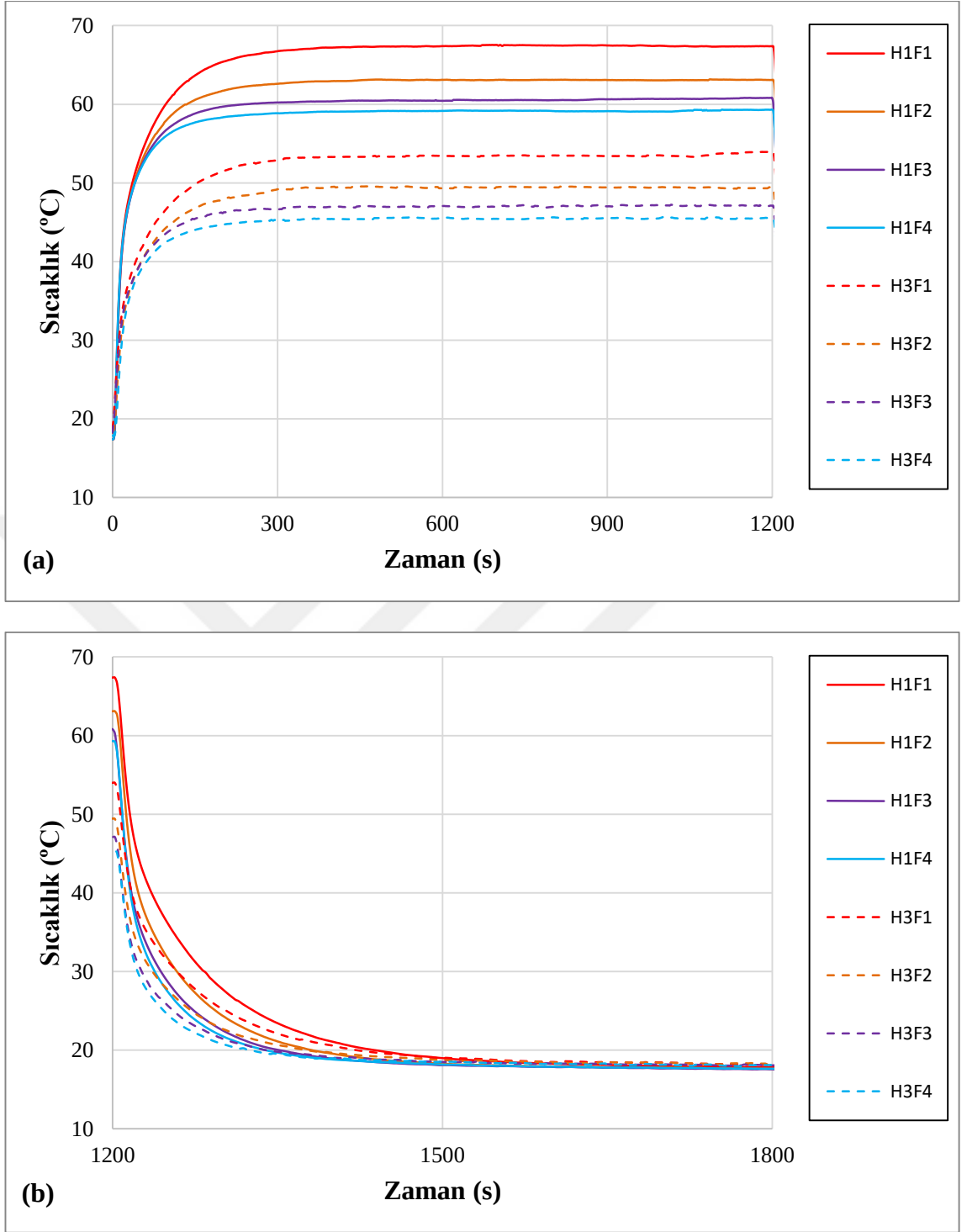
Soğuma periyotlarına bakıldığında, ısı yük devreden çıkarıldıktan sonra yüzey sıcaklığında hızlı bir düşüşün gerçekleştiği ve soğumanın ilk evresinin oldukça etkin olduğu görülmektedir. Isı üretiminin kesilmesiyle birlikte, fanlı taşıyımın devam etmesi sistemde depolanmış enerjinin hızla uzaklaştırılmasını sağlamakta; çoğu senaryoda ilk 100 saniye içinde sıcaklığın güvenli sınırların belirgin biçimde altına indirilebildiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte yüksek ısı yüklerde (özellikle 40 W), sistemin başlangıçta daha yüksek bir sıcaklık seviyesinden soğumaya başlaması ve daha fazla ısı enerji depolanmış olması nedeniyle ortam şartlarına tamamen yaklaşma süresi bir miktar uzamaktadır. Özetle Şekil 25–26, çalışma periyodunda kararlı hal sıcaklığını belirleyen iki temel parametrenin ısı yük ve fan seviyesi olduğunu; soğuma periyodunda ise sistemin ısı ataleti nedeniyle yük arttıkça kuyruk süresinin uzadığını, buna karşın ilk soğuma evresinin tüm koşullarda oldukça hızlı gerçekleştiğini göstermektedir.

Şekil 27 ve Şekil 28’de, seçilmiş uç senaryolar için (H1F1–H1F4 ve H4F1–H4F4) ısı yolun farklı noktalarından alınan zamana bağlı sıcaklıklar birlikte verilerek, ısının kaynaktan ısı borusu üzerinden kanatçıklara ve buradan da hava akımına aktarım süreci bütüncül biçimde izlenebilmektedir. Bu şekillerde, ısı yük yüzey sıcaklığına ek olarak ısı borusunun adyabatik bölgesi ve yoğunlaşma (kondenser) bölgesi sıcaklıkları ile fan giriş/çıkış hava sıcaklıkları yer almaktadır. Öncelikle fan giriş havasının yaklaşık 18–20 °C bandında olması, deneylerin benzer çevresel koşullarda yürütüldüğünü ve soğutma sisteminin kanatçıklarına üflenilen havanın başlangıç sıcaklığının referans olarak sabit kaldığını göstermektedir. Fan çıkış sıcaklığının ise kanatçıklardan geçiş sırasında artması beklenen bir durumdur; çünkü kanatçıklar üzerinde gerçekleşen zorlanmış taşıyım ile ısı, katı yüzeyden akışkana aktarılmakta ve hava akımı bu ısıyı duyulur ısı olarak taşımaktadır. Bu nedenle, fan çıkış sıcaklığındaki artışın hem ısı yük ile hem de fan hızı ile ilişkili olması doğrudan enerji dengesiyle açıklanır: ısı yük arttıkça taşınması gereken ısı miktarı yükselir; fan hızı azaldıkça kütsel debi azalır ve aynı ısı yükünü taşımak için hava başına düşen sıcaklık artışı büyür. Başka bir ifadeyle, yaklaşık olarak  $Q \approx \dot{m} C_p \Delta T_{\text{hava}}$  ilişkisi gereği,  $\dot{m}$  azaldığında aynı  $Q$  için  $\Delta T_{\text{hava}}$  büyüme eğilimindedir. Bu nedenle, Şekil 27 ve 28 birlikte okunduğunda fan çıkış sıcaklıklarının artan ısı yük ve düşen fan seviyesi koşullarında yükselmesi, sistemin ısıyı hava akımıyla uzaklaştırma mekanizmasının fiziksel olarak tutarlı çalıştığını doğrulamaktadır.

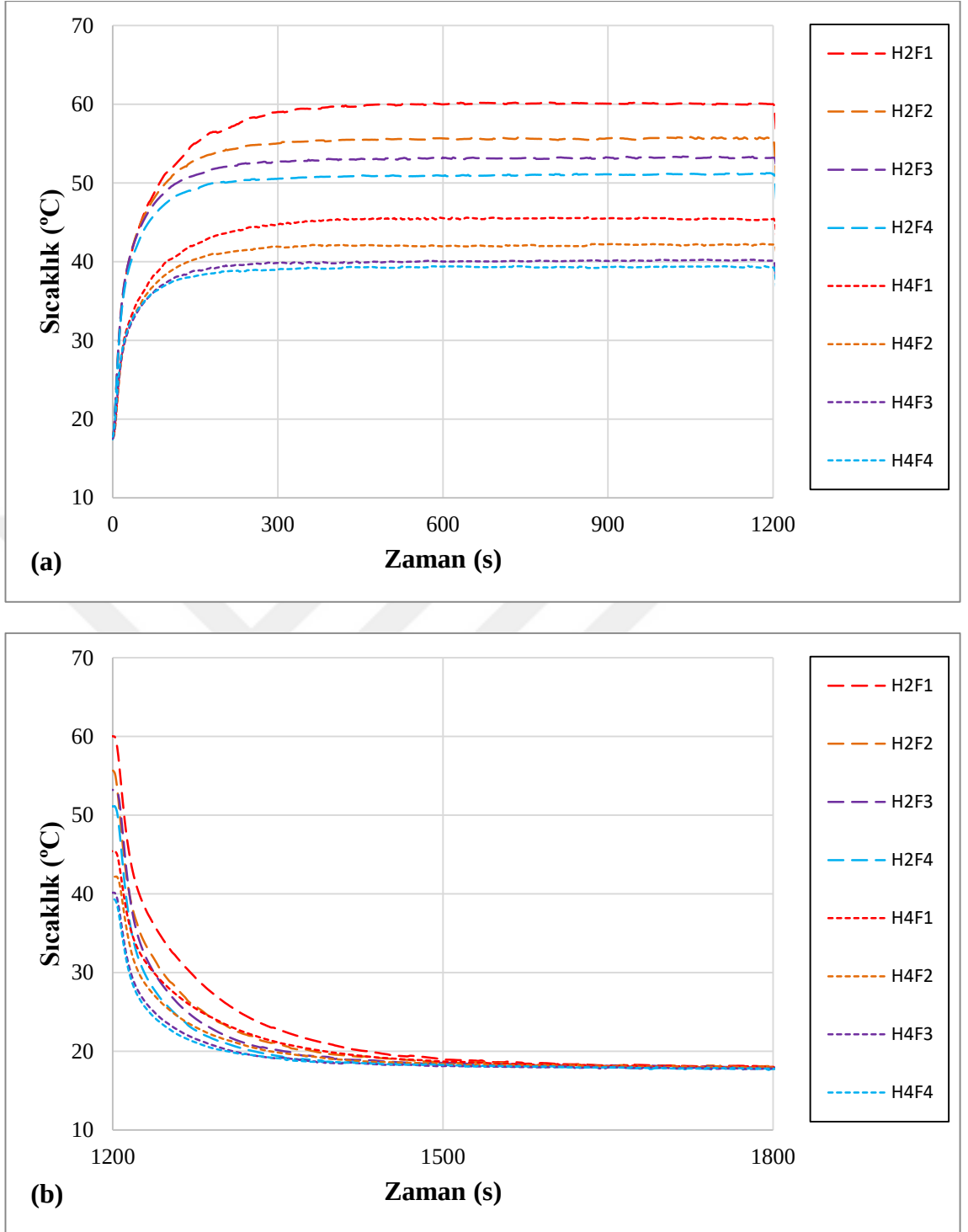
Isı borusu tarafında, adyabatik bölge sıcaklığının yoğuşma bölgesi sıcaklığından bir miktar yüksek olması her iki şekilde de gözlenen ve beklenen bir sonuçtur. Isı borusunda buharlaştırıcı tarafta alınan enerjiyle çalışma akışkanı buhar fazına geçer ve bu buhar adyabatik bölümden yoğuşma bölümüne doğru ilerleyerek ısısını kondenserde bırakır. Yoğuşma bölgesinin adyabatik bölgeye göre daha düşük sıcaklıkta kalması normaldir; bu sıcaklık farkının varlığı, ısı borusunun ısıyı etkin biçimde taşıdığını ve kondenser tarafında ısıl atımın gerçekleştiğini işaret eder. Eğer kondenser yeterince etkin soğutulmasa veya akış geri dönüşü zayıflasa, yoğuşma bölgesi sıcaklığının adyabatik bölgeye yaklaşması ya da sıcaklıkların anormal dalgalanmalar göstermesi beklenirdi. Bu bağlamda, adyabatik–yoğuşma sıcaklık ayrımının korunması, sistemin kararlı halde işleyen bir iki-fazlı ısı taşıma döngüsüne sahip olduğuna dair önemli bir göstergedir.

Ayrıca ısıl yük arttıkça adyabatik ve yoğuşma bölgesi sıcaklıkları arasındaki farkın büyümesi de anlamlıdır. Bunun temel nedeni, ısı borusunun taşıdığı ısı akısı yükseldikçe ısı transfer zincirindeki toplam ısıl direnç üzerinde özellikle kondenser–hava tarafı taşınım direncinin daha belirgin hale gelmesidir. Fan seviyesinin düşük olduğu koşullarda bu etki daha da güçlenir; çünkü daha düşük hava debisi, kanatçıklar üzerindeki taşınım katsayısını düşürür ve kondenser tarafının ısıyı dış ortama verme kabiliyeti sınırlanır. Sonuç olarak, kondenser tarafı sıcaklığı yükselir; adyabatik bölge ise bu sınırlamanın öncesinde yer aldığı için daha yüksek bir seviyeye taşınır ve aradaki sıcaklık farkı büyüme eğilimi gösterir. Bu eğilim, özellikle H1F1 gibi en kritik koşulda (yüksek ısıl yük ve düşük fan seviyesi) en net şekilde gözlenir.

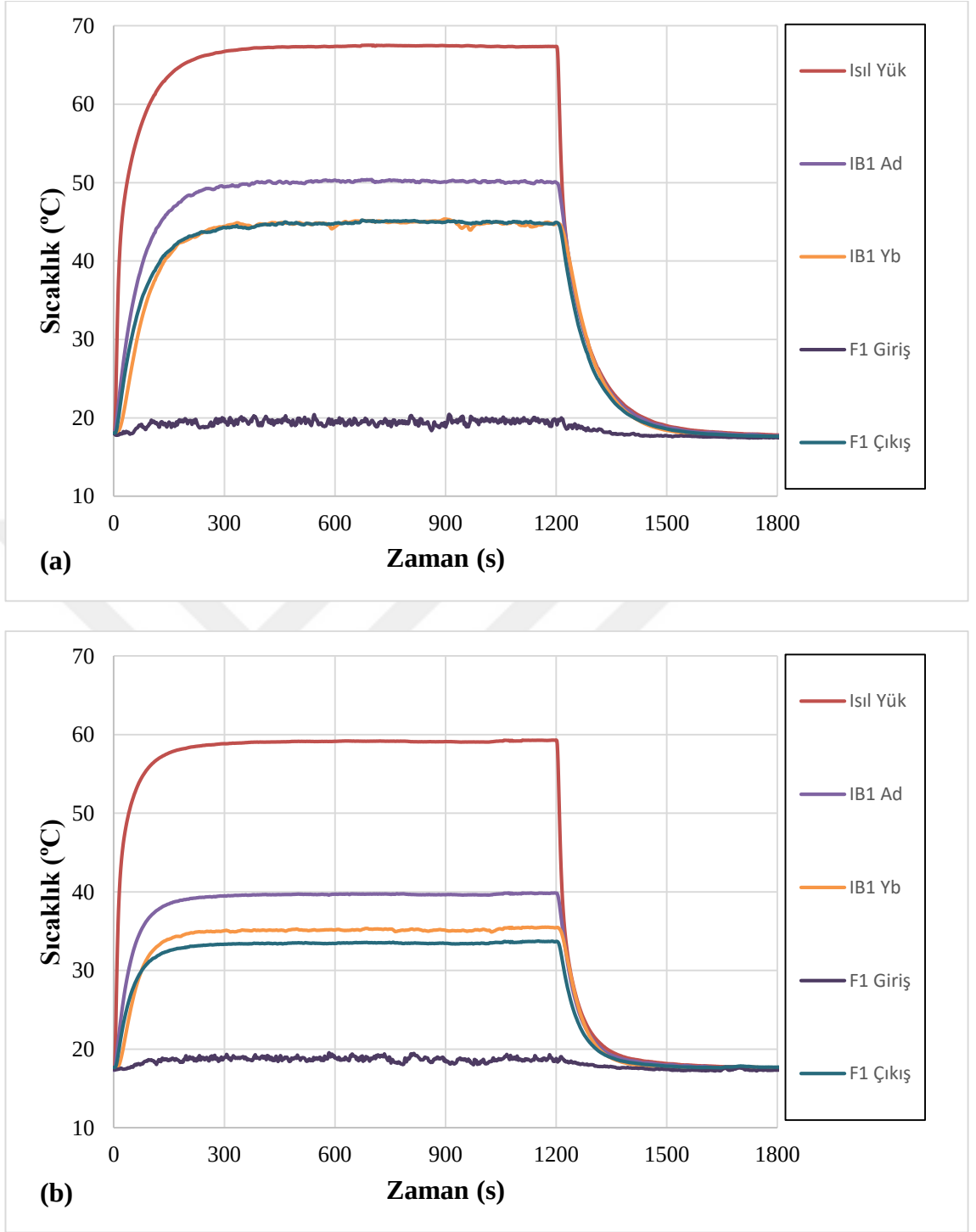
H1F1 senaryosunda adyabatik bölgenin yaklaşık 50 °C, yoğuşma bölgesinin ise yaklaşık 45 °C civarında seyretmesi, su akışkanlı bir ısı borusunun tipik çalışma sıcaklığı aralığıyla uyumlu olup sistemin çalışma penceresi içinde kaldığını göstermektedir. Bu sıcaklık seviyelerinde ısı borusu içinde etkin buharlaşma–yoğuşma döngüsünün sürdürülebilmesi beklenir. Dolayısıyla ölçülen sıcaklıkların kararlı ve fiziksel olarak tutarlı olması, ısı borusunun kuruma veya başlatma problemi gibi istenmeyen rejimlere girmediğine işaret eder. Özetle Şekil 27 ve 28, sistem performansının yalnızca ısıl yük yüzeyinde değil; ısı borusunun taşıma kabiliyeti ve hava tarafı ısı atımı üzerinden de tutarlı biçimde izlenebildiğini göstermektedir. İlgili grafikler bütün olarak ele alındığında, fan seviyesindeki değişimin özellikle hava tarafı taşınım direnci üzerinden etkili olduğunu, ısıl yük arttıkça bu etkinin büyüdüğünü ve en zorlayıcı koşulda dahi ısı borusunun kararlı çalışma davranışını koruduğunu ortaya koymaktadır.

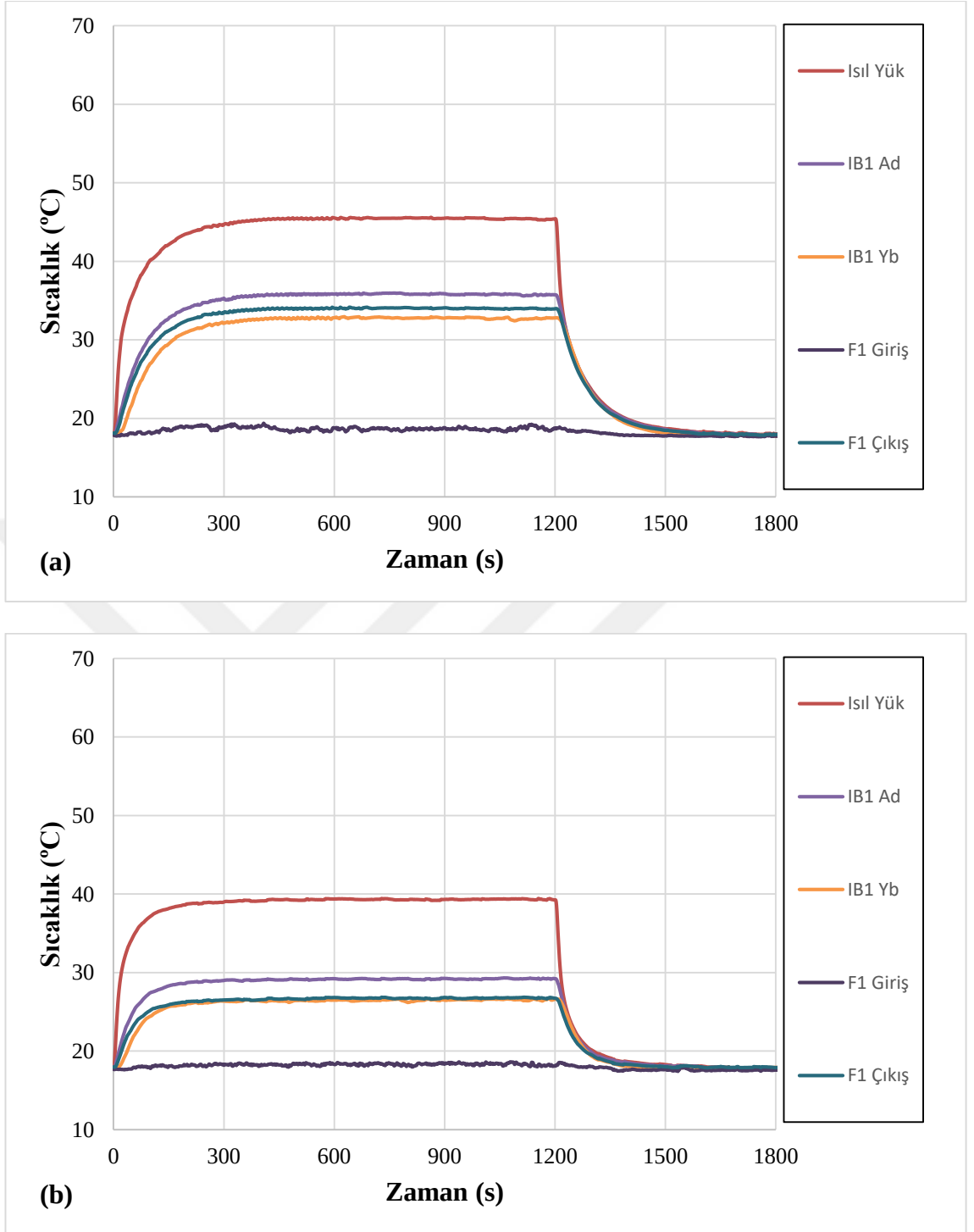


Şekil 25. 40 W ve 20 W Isıtma Yükleri için (a) Çalışma ve (b) Soğuma Periyodunda Isıl Yük Yüzey Sıcaklığının Zamana Göre Değişimi



**Şekil 26.** 30 W ve 10 W Isıtma Yükleri için (a) Çalışma ve (b) Soğuma Periyodunda Isıl Yük Yüzey Sıcaklığının Zamana Göre Değişimi





#### 4.2. Isı Borulu ve Termoelektrik Hibrit Soğutma Sisteminin Termal Performansı

Isı borulu–fanlı referans mimarinin termal davranışı ortaya konduktan sonra, bu bölümde TE modül entegrasyonunun özellikle yüksek ısı yük altında tepe sıcaklıkların bastırılması ve çalışma sıcaklığının daha dar bir aralıkta tutulması üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmektedir. Hibrit mimarinin değerlendirilmesinde temel amaç, yalnızca daha düşük sıcaklık seviyelerine ulaşmak değil, aynı zamanda benzer termal hedeflere daha düşük fan gereksinimiyle erişilebilecek bir işletim penceresi tanımlamaktır. Bu doğrultuda TE modül iki farklı besleme/tüketim modu ile (P1 ve P2) çalıştırılarak, ilave elektrik gücünün termal kazanıma ne ölçüde dönüştüğü ve sistemin doygunluk davranışı karşılaştırmalı biçimde analiz edilmiştir.

Şekil 29, 40 W'lık en kritik ısıtma yükü altında TE modülün iki farklı besleme seviyesinde çalıştırılmasının (P1: 21,6 W ve P2: 32 W) ısı yük yüzey sıcaklığına etkisini, hem çalışma hem de soğuma periyotları boyunca açık biçimde göstermektedir. Deney senaryosu gereği 0–300. saniyeler arasında sistem, ısı borulu soğutma deneyleriyle aynı prensipte ilerlemekte; 300. saniyede TE modül devreye alınarak hibrit işleme geçilmektedir. Bu geçiş anı, tüm koşullarda ısı yük yüzey sıcaklığında ani ve keskin bir düşüşle kendini göstermektedir. Başka bir ifadeyle TE modülün aktivasyonu, özellikle tepe sıcaklıkların bastırılması ve sıcaklık seviyesinin aşağı çekilmesi açısından beklenen aktif soğutma etkisini deneysel olarak doğrulamaktadır.

Bununla birlikte Şekil 29'un en kritik bulgularından biri, besleme gücünün yaklaşık %50 artırılmasının (21,6 W → 32 W) yüzey sıcaklık eğrilerinde anlamlı bir ilave iyileşme üretmemesidir. P1 ve P2 modlarına ait sıcaklık-zaman eğrileri, TE devreye girişinden sonra hem geçici rejimde hem de kararlı rejime yaklaşma sürecinde neredeyse çakışık şekilde ilerlemektedir. Aynı durum soğuma periyodu için de geçerlidir. Bu gözlem, TE modülün bu kurulumda daha fazla elektrik gücü ile sınırsız biçimde daha fazla soğutma sağlayamadığını; sistem performansının başka bir kısıt tarafından sınırlandırıldığını düşündürmektedir. Fiziksel açıdan bu davranış iki temel olguyla tutarlıdır: (i) TE modüllerde akım/güç artırıldıkça Joule ısısı artar ve belirli bir noktadan sonra net soğutma kazanımı doygunluğa yaklaşır, hatta COP düşer; (ii) TE'nin sıcak yüzeyinden atılması gereken toplam ısı, ikinci aşama ısı borulu–fanlı hat tarafından yeterince hızlı uzaklaştırılamıyorsa TE'nin etkin sıcaklık farkı avantajı sınırlanır ve daha yüksek besleme gücü ilave sıcaklık düşüşüne dönüşmez. Bu nedenle P2 modunun, bu deney

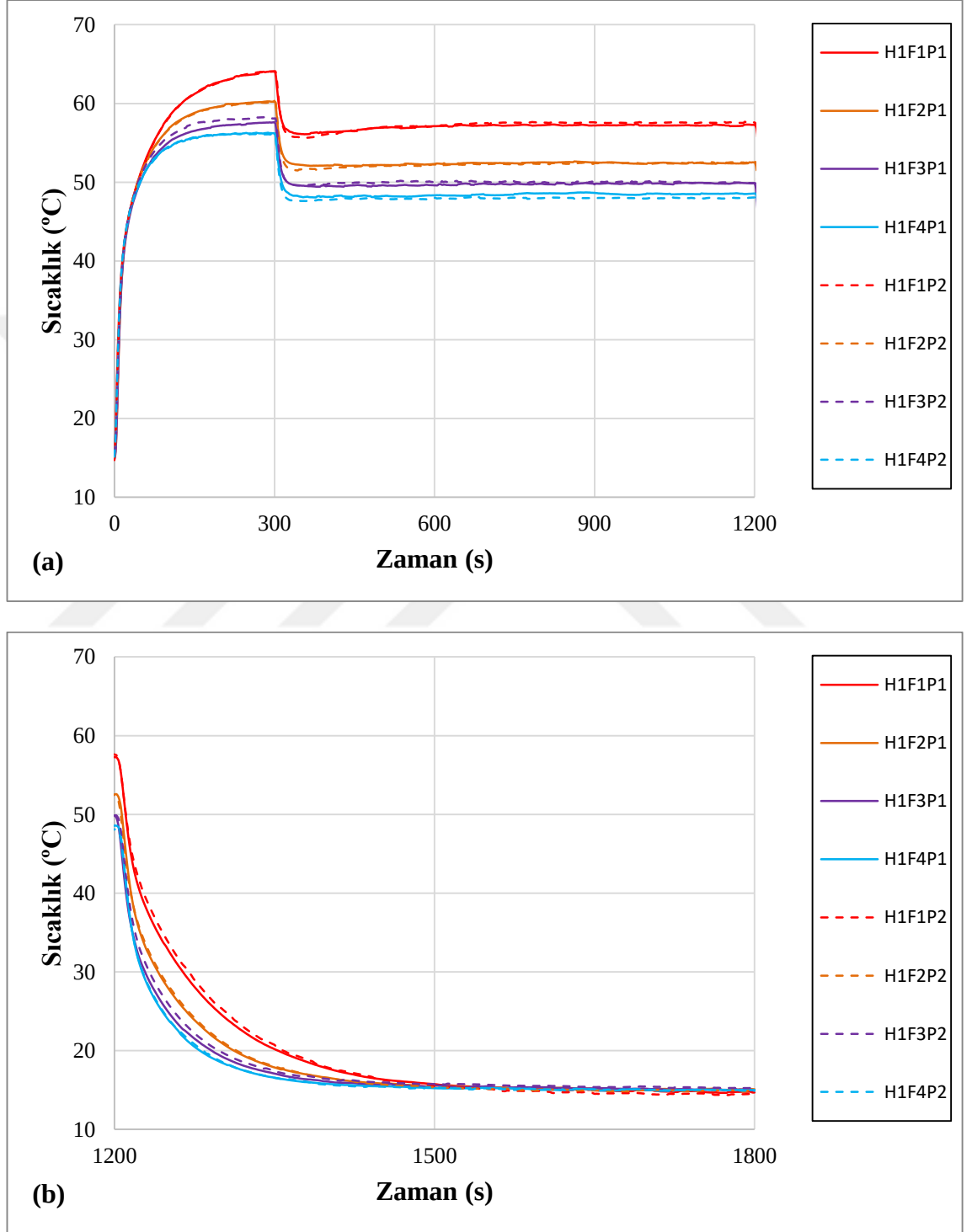
aralığında enerji tüketimini artırıp sıcaklık kazanımı üretmeyen bir işletim noktası olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 29'da ayrıca TE aktivasyonundan sonra sıcaklıkların yaklaşık 600. saniye civarında daha kararlı bir seviyeye oturduğu görülmektedir. Soğuma periyodunda ise TE'nin devreden çıkarılması ve ısı yükün pasiflenmesiyle birlikte, sıcaklıkların hızlı biçimde aşağı çekilebildiği ve hibrit işletimin yük altında tepe bastırma fonksiyonuna ek olarak yük kesilince hızlı geri dönüş karakteristiğini bozmadığı izlenmektedir. Bu değerlendirme, hibrit sistem performansının özellikle maksimum ısı yük olan 40 W koşulunda incelendiğini vurgulamayı gerektirir; çünkü hibrit soğutmanın hedefi çoğunlukla düşük yüklerde değil, tepe sıcaklığın kritik hale geldiği yüksek yük/ani yüklenme senaryolarında termal marj yaratmaktır. Nitekim bu kritik durum Şekil 30'da, ısı borulu sistem ile TE entegreli hibrit sistemin (P1 modu referans alınarak) karşılaştırılmasıyla doğrudan ele alınmıştır. Burada P2 modunun marjinal fayda üretmemesi nedeniyle karşılaştırmaların P1 üzerinden yürütülmesi metodolojik olarak yerindedir. Çünkü amaç aynı sıcaklık kazanımını daha düşük tüketimle sağlayan işletim noktasını ortaya koymaktır.

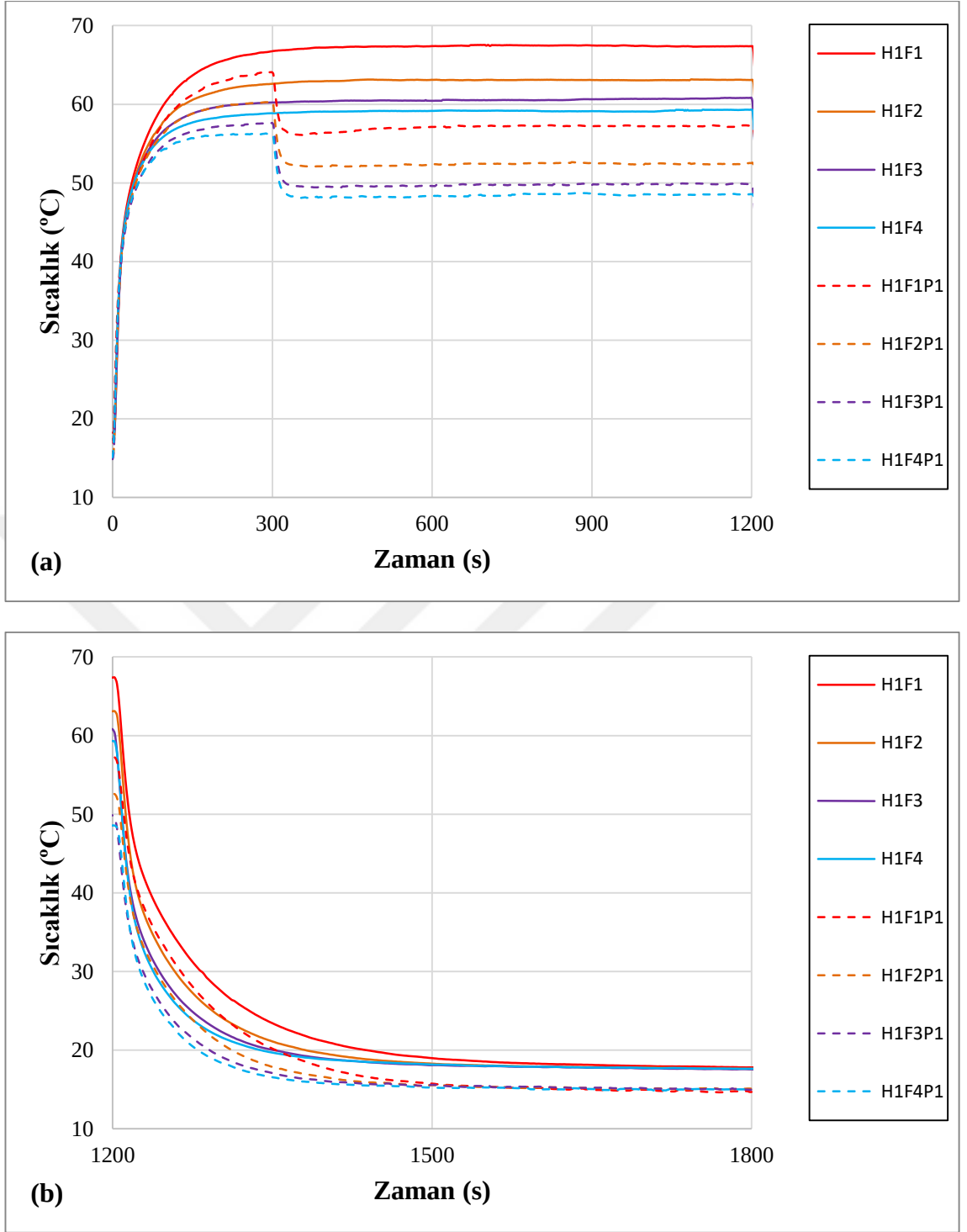
Şekil 30'un işaret ettiği en önemli sonuç, TE entegrasyonunun yalnızca sıcaklığı düşürmekle kalmayıp, fan gereksinimi açısından da tasarım serbestliği yaratabilmesidir. H1F1P1 hibrit modunda ısı yüzey sıcaklığının 56,7 °C seviyesinde kalması; buna karşın yalnızca ısı borulu sistemin maksimum fan hızındaki H1F4 modunda sıcaklığın 59,2 °C seviyesinde olması, dikkat çekici bir performans göstergesidir. Burada düşük fan seviyesinde çalışan hibrit yapının, fan hızını maksimuma çıkarılmış pasif referans sistemden bile daha düşük yüzey sıcaklığı sağlayabildiğini göstermektedir. Diğer taraftan H1F4P1 hibrit modunda ısı yük yüzey sıcaklığının 47,1 °C seviyesine kadar indirilebilmesi, bazı elektronik bileşenler için pratik bir hedef kabul edilen 50 °C eşiğinin altına inilebildiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla TE entegrasyonu; (i) aynı fan seviyesinde daha düşük tepe sıcaklık, (ii) aynı sıcaklık hedefi için daha düşük fan hızı (dolayısıyla daha düşük gürültü ve fan tüketimi) veya (iii) yüksek yükte daha geniş güvenli çalışma aralığı gibi üç farklı tasarım kazanımına dönüştürülebilecek bir avantaj sunmaktadır.

Sonuç olarak Şekil 29–30 birlikte okunduğunda, hibrit mimarının 40 W gibi kritik yükte tepe sıcaklığı belirgin biçimde bastırdığı; ancak TE besleme gücünü P1'den P2'ye yükseltmenin bu kurulumda ölçülebilir bir ek sıcaklık kazanımı üretmediği

görülmektedir. Bu bulgu, hibrit sistemin optimizasyonunun maksimum TE gücü yaklaşımıyla değil; TE işletim noktasının (akım/güç), sıcak taraf ısı atım kapasitesinin ve fan seviyesinin birlikte ele alındığı bir sistem düzeyi dengeyle yapılması gerektiğini göstermektedir.



**Şekil 29.** P1 ve P2 TE Tüketim Modlarında 40 W Isıtma Yüğü İçin (a) Çalışma ve (b) Soğuma Periyodunda Isıl Yük Yüzey Sıcaklığının Zamana Göre Değişimi

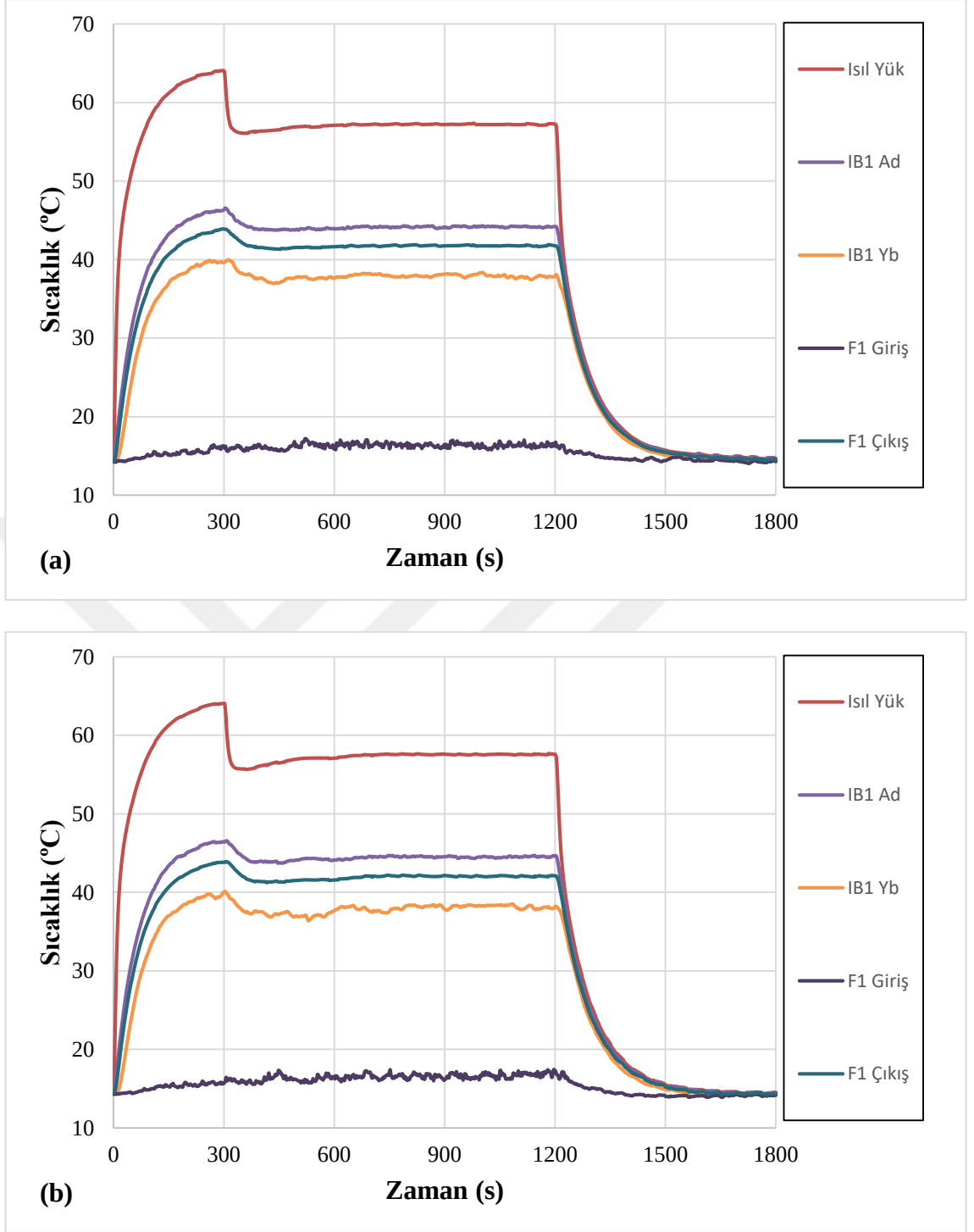


**Şekil 30.** Isı Borulu ve TE Engtegreli Soğutma Sistemlerinin (a) Çalışma ve (b) Soğuma Periyodunda Isıl Yük Yüzey Sıcaklıklarının Karşılaştırılması

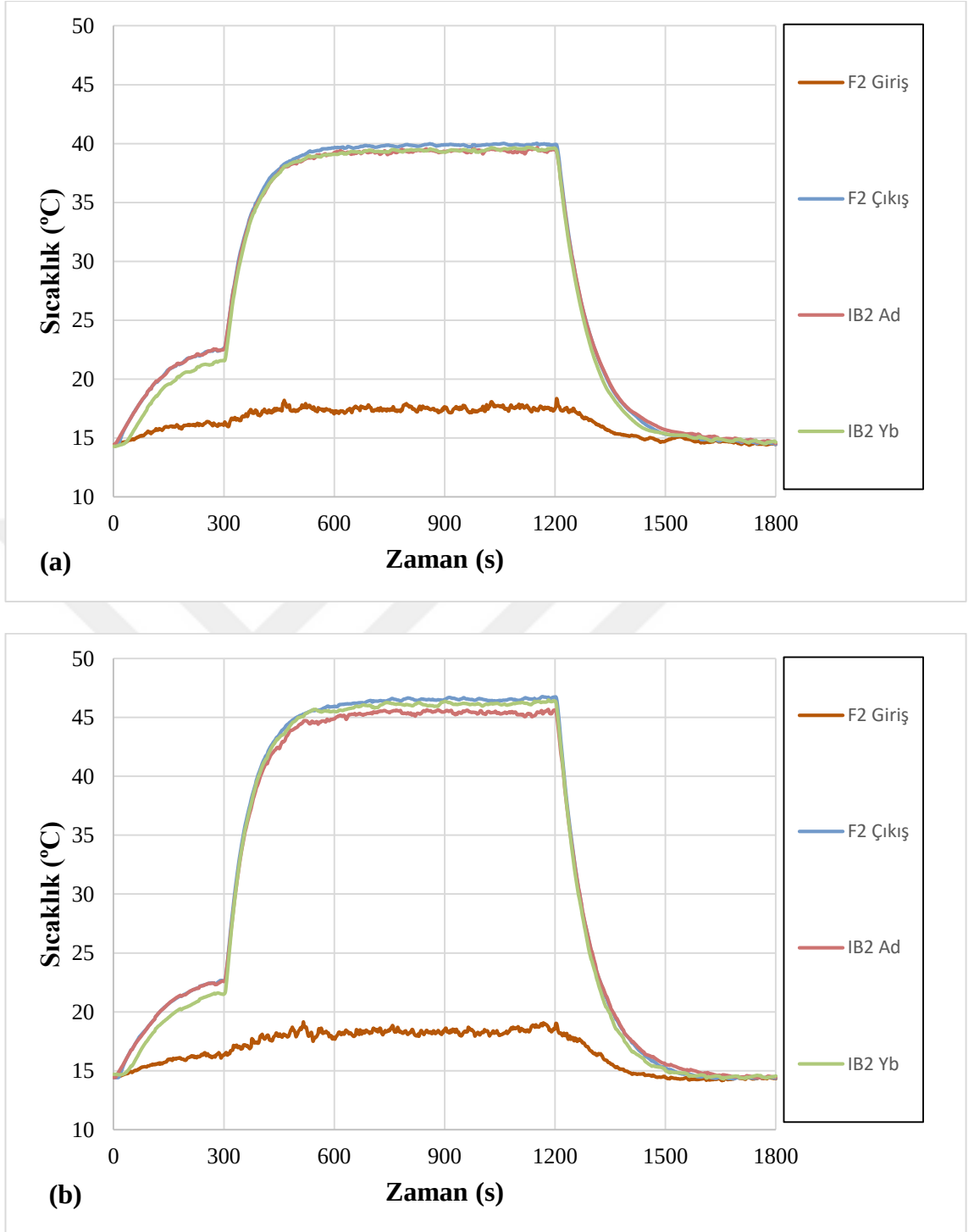
Şekil 31’de ısı yük yüzeyi, birincil ısı borusunun adyabatik ve yoğuşma bölgeleri sıcaklıkları ve ayrıca ısı borulu soğutma sisteminin fan giriş ve çıkış havası sıcaklıkları birlikte verilmiştir. P1–P2 karşılaştırmasının kritik sonucu, ısı yük yüzey sıcaklığı ve birincil ısı borusunun adyabatik ve yoğuşma bölgesi sıcaklıklarının, TE devreye girdikten sonra neredeyse çakışık seyretmesidir. Yani TE besleme gücünün yaklaşık %50 artırılması (P1’den P2) referans kurulum olan ısı borulu soğutma tarafında ölçülebilir bir ek sıcaklık düşüşüne dönüşmemektedir. Başka bir deyişle Şekil 31, P1 ve P2’nin referans sistem üzerinden alınan sıcaklıklar açısından eşdeğer sonuç ürettiğini; dolayısıyla bu mimaride TE beslemesini artırmanın belirgin bir kazanım getirmediğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, P2’nin enerji tüketimi artışına rağmen soğutma çıktısında marjinal kaldığını ve optimum işletimin P1’e yakın bir bölgede oluştuğunu yönünde öncek bölümde yapılan tartışmayı destekler.

Şekil 32, hibrit yapının TE tarafını temsil eden ikinci hatta odaklanmaktadır. İkincil fanın giriş/çıkış havası ile ikinci ısı borusunun adyabatik ve yoğuşma bölgelerindeki sıcaklıklar verilmiştir. Burada en belirgin olgu, ısı yük ilk devreye alındığında ikinci hat sıcaklıklarının görece düşük bir seviyede seyretmesi; TE devreye girdikten sonra ise adyabatik ve yoğuşma bölgeleri ile ikinci fan çıkış sıcaklığının ani bir sıçramayla daha yüksek bir plato seviyesine oturmasıdır. Bu, beklenen bir enerji dengesi sonucudur. Şekil 32’nin P1–P2 ayrımı çok net görünmektedir; P2’de (daha yüksek TE gücü) ikinci hat plato sıcaklıkları belirgin biçimde daha yukarı taşınmaktadır. Bu durum önemli bir fiziksel çıkarım üretir. P2’de harcanan ek TE gücü, birincil tarafta ek bir soğutma kazanımı olarak görünmemekte (Şekil 31’deki çakışma), bu enerji büyük ölçüde sıcak tarafta ilave ısı yük olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 32’deki daha yüksek ısı borusu ve fan çıkış sıcaklıkları).

Şekil 31 ve Şekil 32 birlikte değerlendirildiğinde, P2’deki ek gücün soğutma kazanımı olarak değil, atılması gereken ek ısı olarak sisteme bindiğini ve bu nedenle P2’nin sistem verimi (COP/etkinlik) açısından elverişli bir bölge olmadığını netleştir. Bu yorum, önceki Şekil 29–30 çıkarımlarıyla da tutarlı şekilde hibrit işletimde daha yüksek TE gücü yerine uygun TE işletim noktası ve sıcak taraf ısı atım kapasitesi eşleştirmesinin belirleyici olduğunu destekler.



**Şekil 31.** Isıl Yük, Isı Borusu ve Fan Bölgelerinden Alınan Zamana Bağlı Sıcaklıklar  
(a) H1F1P1 (b) H1F1P2

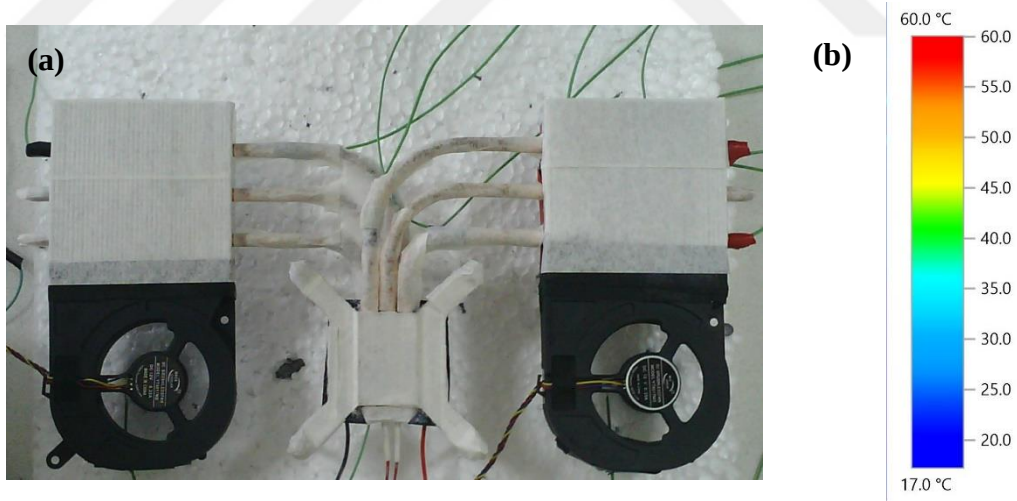


**Şekil 32.** İkincil (TE) Isı Borusu ve Fan Bölgelerinden Alınan Zamana Bağlı Sıcaklıklar  
(a) H1F1P1 (b) H1F1P2

#### 4.3. Farklı Soğutma Stratejilerinin Termal Görüntüleme İle Mukayesesi

Bu başlık altında, termokupllarla elde edilen zamana bağlı sıcaklık eğrilerine ek olarak, sistemin kararlı hal sıcaklık dağılımı termal kamera ile görsel olarak doğrulanmaktadır. Termal görüntüleme, tek bir noktanın sıcaklığından ziyade, ısı yol üzerindeki farklı bileşenlerin (ısıl yük bölgesi, ısı borusu hatları ve kanatçık bölgeleri) aynı anda hangi sıcaklık seviyelerinde çalıştığını ve sıcaklığın konuma bağlı nasıl yayıldığını göstermesi açısından tamamlayıcıdır. Bu nedenle burada amaç, yeni bir fiziksel mekanizma tartışmaktan çok; 4.1 ve 4.2’de sunulan ölçümlerde gözlenen eğilimlerin alan bazlı teyidini vermektir. Termal kamera görüntülerinin, termokupl verileriyle birlikte kullanıldığı da tezde açıkça belirtilmektedir.

Şekil 33’te (a) termal kameranın gördüğü ölçüm alanının gerçek görüntüsü, (b) ise görüntülerin yorumlanmasında kullanılan renk–sıcaklık skalası verilmektedir. Bu skala (yaklaşık 17–60 °C bandı) kullanılarak sonraki şekillerde yer alan termal görüntülerde sıcak ve soğuk bölgeler renk değişimi üzerinden karşılaştırılabilmektedir. Böylece Şekil 34 ve Şekil 35’te farklı deney koşulları için kararlı halde oluşan sıcaklık alanları, aynı referans renk skalası çerçevesinde okunabilir hale gelmektedir.



**Şekil 33.** Isı Borulu Soğutma Sistem İçin Termal Kamera Görüntülemeleri

(a) Gerçek Görüntü (b) Sıcaklık Skalası

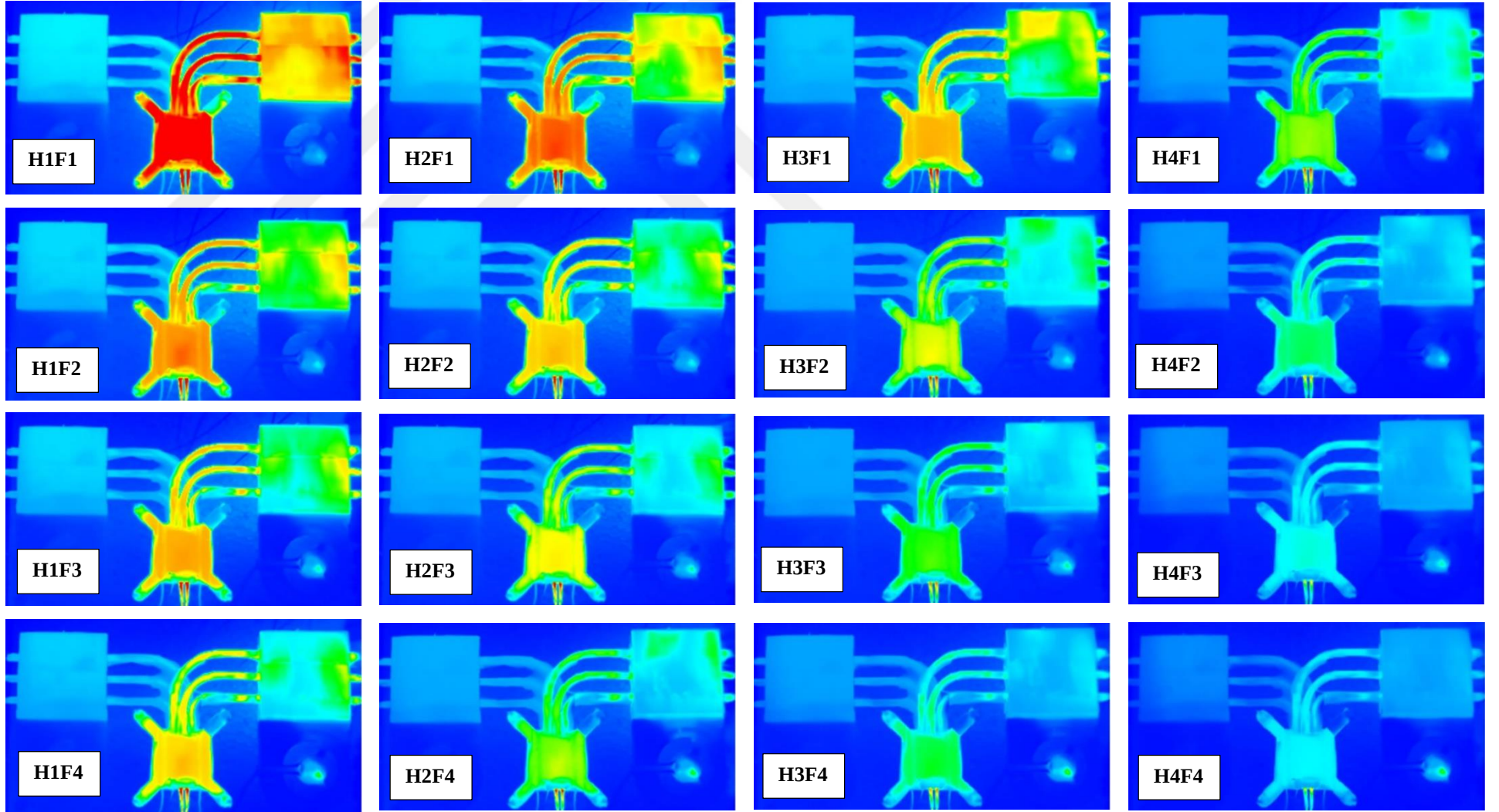
Şekil 34, ısı borulu soğutma sistemi için dört ısı yük seviyesi (H1–H4) ile 4 fan seviyesi (F1–F4) kombinasyonundan oluşan toplam 16 deney koşulunun kararlı hal termal görüntülerini göstermektedir. Burada H1–H4 kodları sırasıyla 40–30–20–10 W ısı yük seviyelerini; F1–F4 kodları ise fanın düşük–orta–yüksek–maksimum işletim seviyelerini ifade etmektedir. Görüntüler genel olarak iki temel eğilimi açık biçimde doğrulamaktadır; (i) Isı yük arttıkça (H4→H1) sıcak bölgelerin genişlediği ve sıcaklık seviyesinin yükseldiği, (ii) Fan seviyesi arttıkça (F1→F4) sıcak bölgelerin daraldığı ve sıcaklığın daha düşük seviyelere çekildiği.

Bu eğilim, 4.1’de Şekil 25–28 üzerinden yapılan ısı yük ve fan seviyesi ile kararlı hal sıcaklığı yorumlarıyla aynı yöndedir. Dolayısıyla termal kamera görüntüleri, termokupllarla elde edilen zaman alanı bulgularını konumsal dağılım açısından desteklemektedir. Ayrıca termal görüntülerde en sıcak bölgenin ısı yük/temas bölgesi çevresinde yoğunlaşması ve ısı borusu hatları boyunca kanatçık alanına doğru daha düşük sıcaklıklara geçiş görülmesi, kararlı hal rejiminde ısı yolunun (i) kaynak, (ii) ısı borusu, (iii) kanatçıklar ve (iv) hava sıralamasında çalıştığını görsel olarak teyit eden bir gösterge niteliğindedir.

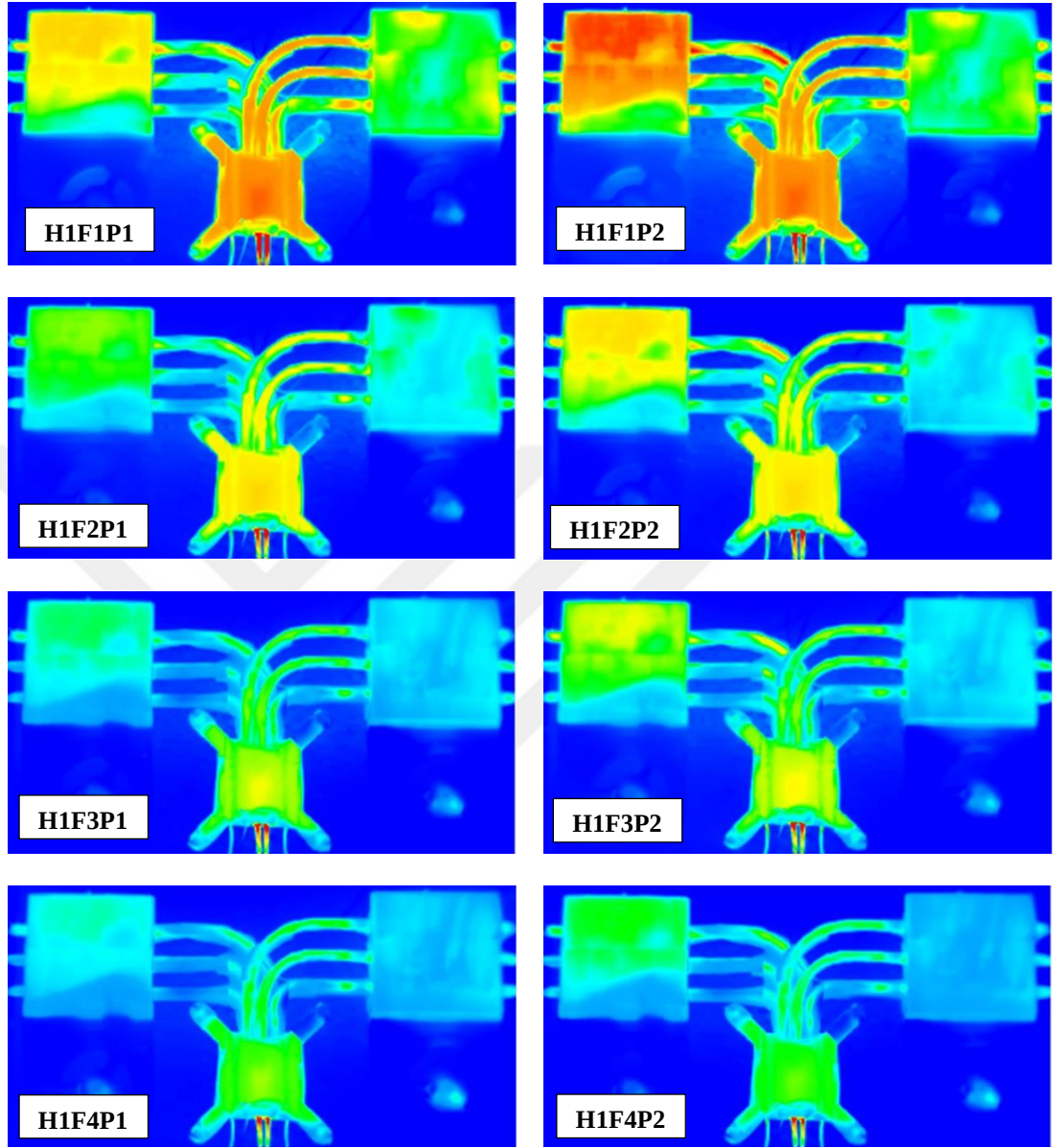
Şekil 35’te hibrit sistem için 40 W (H1) koşulunda, F1–F4 fan seviyeleri ve P1–P2 TE besleme modlarıyla oluşturulan toplam 8 durumun kararlı hal termal görüntüleri yer almaktadır. Bu görüntüler ise, 4.2’deki zaman-sıcaklık sonuçlarıyla tutarlı biçimde iki noktayı netleştirir; (i) TE entegrasyonu sonrasında ısı yük bölgesindeki sıcak alanın bastırıldığı ve renklerin daha düşük sıcaklık seviyelerine kaydığı görülmektedir. Bu, Şekil 30–31’de termokupl ölçümlerinde gözlenen TE devreye girince ani sıcaklık düşüşü eğilimiyle uyumludur.

P1 ve P2 modları arasında ısı yük bölgesi açısından belirgin bir görsel ayrışma oluşmadığı, yani kararlı hal sıcaklık alanlarının büyük ölçüde benzer kaldığı izlenmektedir. Bu da Şekil 29 ve Şekil 31’de raporlanan P2’nin P1’e göre marjinal fayda üretmemesi sonucunu termal görüntüleme tarafında destekleyen bir doğrulama niteliğindedir.

Özetle Şekil 35, hibrit sistemin 40 W gibi kritik yükte sıcaklık alanını aşağı çekebildiğini görsel olarak gösterirken; P1→P2 güç artışının kararlı hâl sıcaklık dağılımında belirgin bir iyileşmeye dönüşmediğini de açık biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 34. Isı Borulu Soğutma Sistem İçin Farklı Deney Koşullarında Kararlı Hal Sıcaklık Dağılımları



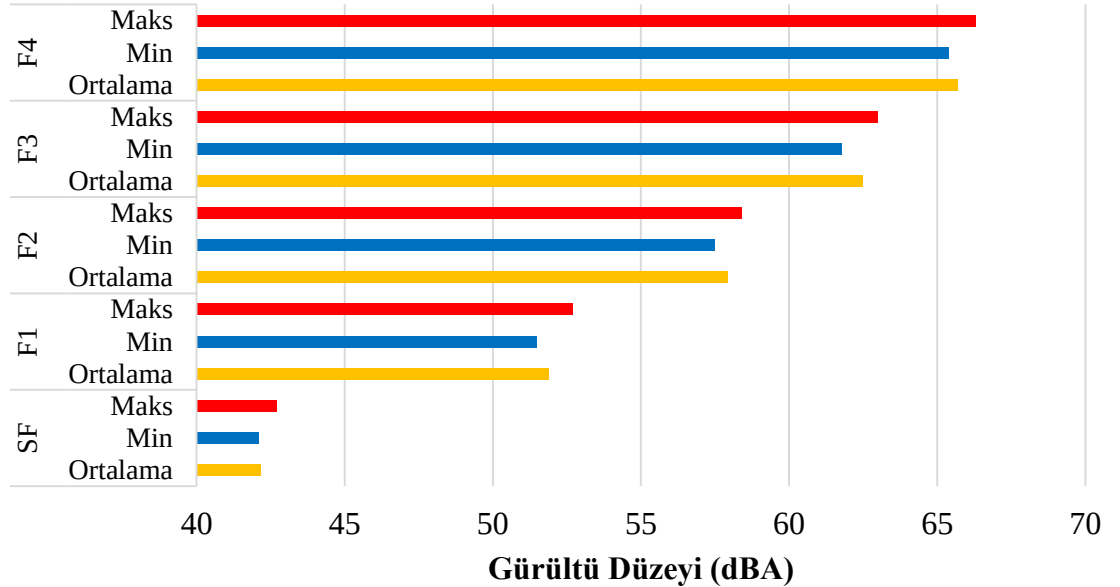
**Şekil 35.** Hibrit Soğutma Sistem İçin Farklı Deney Koşullarında Kararlı Hal Sıcaklık Dağılımları

#### 4.4. Soğutucu Fanın Gürültü Seviyesinin Değerlendirilmesi

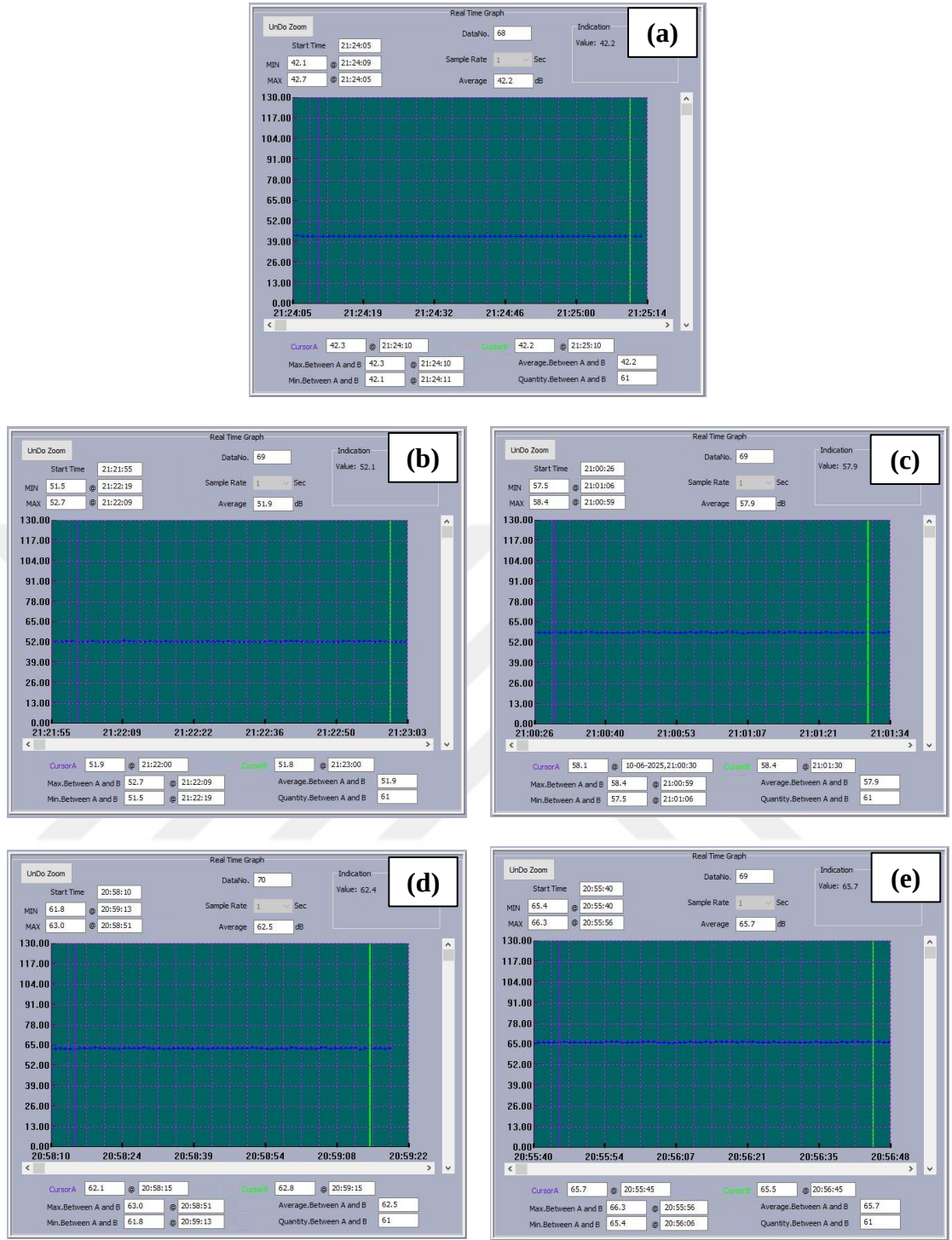
Gürültü ölçümleri, önceki alt bölümlerde termal performans açısından fan seviyesi artırıldıkça sıcaklığın düşmesi şeklinde görülen kazanımın, akustik tarafta hangi bedelle satın alındığını nicel olarak ortaya koymaktadır. Bu noktada önemli bir husus, Şekil 36 ve Şekil 37’de SF olarak verilen durumun fanın tamamen kapalı olduğu bir arka plan ölçümü değil; TE bölümündeki Fan II’nin çok düşük bir güçte (0,12 W) çalıştığı

temel işletim koşulu olmasıdır. Dolayısıyla SF seviyesi, sistemin minimum akustik tabanı gibi düşünülmelidir. F1–F4 seviyelerinde gözlenen gürültü artışlarının esas kaynağı ise Isı borulu soğutma tarafındaki Fan I’ın kademeli olarak yükseltilmesidir. Fan I düşük–orta–yüksek–maksimum seviyelerde sırasıyla 0,48–0,96–1,50–2,16 W güç tüketirken, Fan II tüm deneylerde sabit biçimde 0,12 W seviyesinde tutulmaktadır. Bu nedenle, gürültü karşılaştırmaları temelde Fan I seviyesi üzerinden okunmalı; SF ise Fan II’nin oluşturduğu düşük düzeyli temel gürültü olarak kabul edilmelidir.

Şekil 36, her fan modu için maksimum–minimum–ortalama gürültü düzeylerini tek bakışta özetleyerek seviyeler arasındaki ayrımı netleştirir. Görüldüğü üzere gürültü düzeyi Fan I seviyesi yükseldikçe düzenli biçimde artmakta; SF’den F1’e geçişte belirgin bir sıçrama oluşmakta, F1’den F4’e doğru ise artış devam etmekle birlikte artış basamakları görece küçülmektedir. Bu eğilim, dBA ölçeğinin logaritmik yapısı ile de uyumludur. Aynı fiziksel kaynağın daha yüksek devirlerde çalışması gürültüyü artırır. Ancak dBA cinsinden artışlar doğrusal bir güç artışı gibi okunmamalıdır. Bu çerçevede Şekil 36, termal tarafta fanı yükseltmenin sağladığı kazanımların (4.1’deki sıcaklık düşüşleri) akustik tarafta belirgin bir maliyeti olduğunu, özellikle yüksek fan kademelerine çıkıldığında gürültünün kullanıcı/uygulama konforunu sınırlayabilecek bantlara yaklaşabildiğini göstermesi açısından kritik bir sonuç sunar.



**Şekil 36.** Farklı Fan Çalışma Modlarında Maks-Min-Ortalama Olarak Gürültü Düzeyleri (dBA)



**Şekil 37.** dBA Cinsinden Gürültü Düzeyi Ölçümleri (a) SF (b) F1 (c) F2 (d) F3 (e) F4

Şekil 37 ise aynı ölçümlerin zamana bağlı izlerini vererek, Şekil 36'daki özet istatistiklerin kararlı bir akustik davranıştan türediğini doğrulamaktadır. Zaman serilerinin genel karakteri dar bir bant içerisinde küçük dalgalanmalar şeklindedir. Başka bir ifadeyle, modlar arasındaki fark rastlantısal sıçramalar veya düzensiz titreşim davranışları ile değil, doğrudan fan hız seviyesinin belirlediği kararlı gürültü seviyesi ile

oluşmaktadır. Bu da ölçümlerin tekrarlanabilirliği ve karşılaştırmaların güvenilirliği açısından önemlidir.

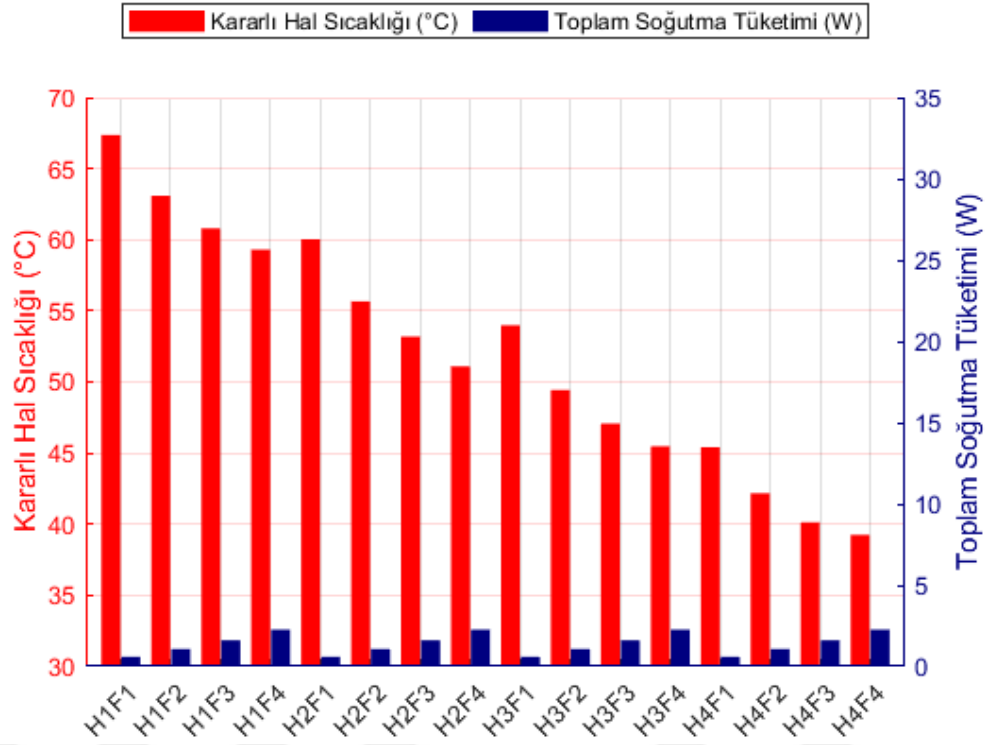
Fan I seviyesi yükseldikçe sıcaklıkların düşmesi beklenen bir sonuçtur. Ancak Şekil 36–37, bu düşüşün akustik bedelinin ihmal edilemeyecek düzeyde arttığını gösterir. Bu nedenle, yalnızca ısı borulu sistemde tepe sıcaklığı bastırmak için fanı sürekli yüksek seviyelerde çalıştırmak, gürültü açısından yeni bir kısıt oluşturur. Tam da bu noktada hibrit yaklaşımın (TE entegrasyonu) önceki bölümlerde işaret edilen potansiyeli daha anlamlı hale gelir. Aynı sıcaklık hedeflerine daha düşük Fan I seviyeleriyle erişebilmek, gürültüyü doğrudan aşağı çekebilecek bir tasarım serbestliği sağlar. Yüksek fan seviyeleri termal olarak etkili olsa da akustik açıdan maliyetlidir; bu nedenle tepe sıcaklık kontrolünde “yalnız fan artırımı” yerine hibrit/aktif destekli stratejilerin değerlendirilmesi rasyonel bir gereklilik haline gelmektedir.

#### **4.5. Soğutma Enerji Tüketimleri ve Kararlı Hal Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi**

Bu bölümün amacı, aynı deney platformunda elde edilen kararlı hâl sıcaklığı, toplam soğutma enerji tüketimi ve fan gürültüsü çıktılarının bir arada değerlendirilerek, tasarımın hangi işletim noktalarında anlamlı kaldığının nicel biçimde gösterilmesidir. Şekil 38 ve Şekil 39 sırasıyla ısı borulu referans mimarinin ve TE entegre hibrit yapının sıcaklık–tüketim eksenindeki davranışını ortaya koyarken, Şekil 40 bu tabloya akustik maliyeti ekleyerek karar vermeyi kolaylaştıran bir özet sunmaktadır.

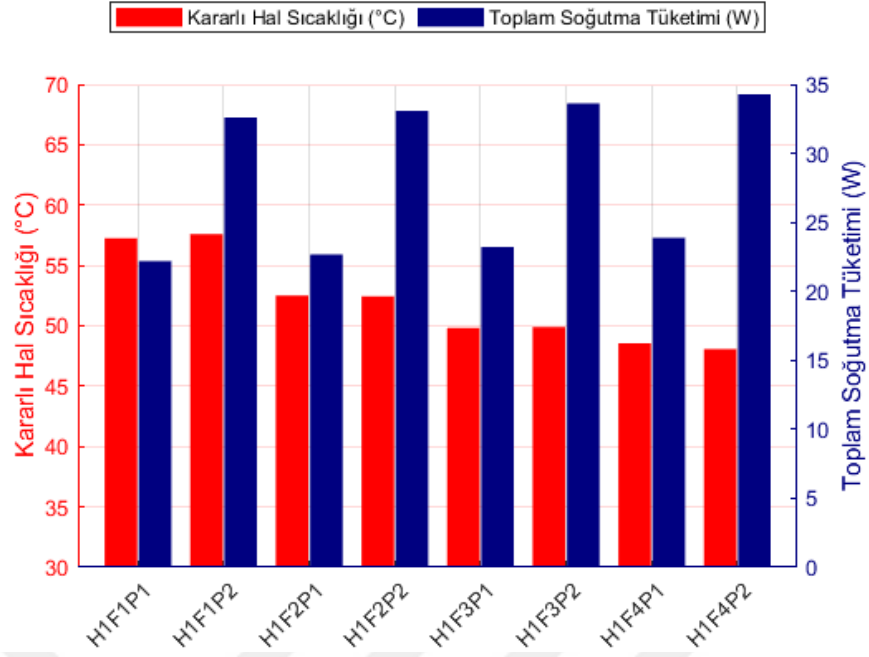
Şekil 38’de ısı borulu–fanlı mimarinin 10–40 W aralığında, fan seviyesine bağlı olarak öngörülebilir ve kademeli bir sıcaklık kontrolü sağladığı görülür. Özellikle 40 W (H1) koşulu, sistemin sınır davranışını okumak için en kritik referanstır. Toplam soğutma tüketimi 0,60 W’dan 2,28 W’a artırıldığında kararlı hal sıcaklığı 67,37 °C’den 59,31 °C seviyesine düşmektedir. Yani 8,06 °C’lik bir iyileşme, 1,68 W ilave tüketimle elde edilmektedir. Ancak bu iyileşme doğrusal değildir. Fan gücü yükseldikçe kazanımın azaldığı açıkça görülür. F1–F2 aralığında güç 0,60 W’dan 1,08 W’a yükselirken (+0,48 W), sıcaklık 67,37 °C’den 63,09 °C’ye düşmüştür (–4,28 °C). F2–F3 aralığında ise güç 1,08 W’dan 1,62 W’a yükselirken (+0,54 W), sıcaklık 63,09 °C’den 60,80 °C’ye düşmüştür (–2,29 °C). Benzer şekilde F3–F4 aralığında güç 1,62 W’dan 2,28 W’a yükselirken (+0,66 W), sıcaklık 60,80 °C’den 59,31 °C’ye düşmüştür (–1,49 °C). Bu tablo, ısı borusunun ısıyı etkin biçimde taşıyan bir omurga sunduğunu ve nihai sıcaklık seviyesinin giderek artan biçimde kanatçık–hava tarafı taşınım kapasitesiyle

sınırlandığını gösterir. Isıl yük azaldıkça (H2–H4 grupları) kararlı sıcaklıklar doğal olarak daha düşük banda iner ve fan yükseltmenin mutlak sıcaklık kazancı da daha sınırlı hale gelir.

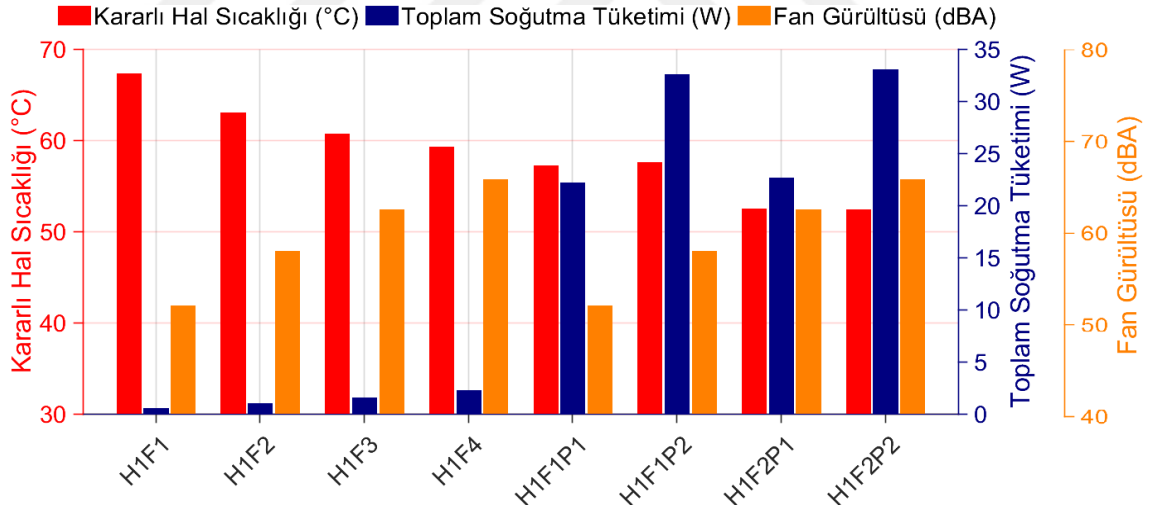


**Şekil 38.** Isı Borulu Soğutma Sistemi için Kararlı Hal Sıcaklıklarıyla Toplam Soğutma Tüketimlerinin Mukayesesi

Şekil 39, 40 W koşulunda hibrit mimarinin kararlı hal sıcaklığını belirgin biçimde aşağı çektiğini, fakat bunun karşılığında toplam tüketim seviyesinin tamamen farklı bir banda sıçradığını gösterir. P1 modunda toplam tüketim 22,20–23,88 W aralığında iken P2 modunda 32,60–34,28 W aralığına çıkmaktadır. Buna karşılık kararlı hal sıcaklıkları P1’de 57,26 °C’den 48,56 °C’ye, P2’de 57,60 °C’den 48,08 °C’ye inmektedir. Buradaki kritik bulgu şudur: P1’den P2’ye geçişi yaklaşık +10,4 W ek tüketim üretmesine rağmen sıcaklıkta ölçülebilir bir ek kazanç üretmemektedir. Sayısal olarak aynı fan seviyelerinde farklar ihmal edilebilir düzeydedir. H1F1 konfigürasyonunda P1 ve P2 noktaları arasında sıcaklıklar neredeyse aynı seviyede kalmış, P2’de çok sınırlı bir artış (57,26 °C’den 57,60 °C’ye) gözlenmiştir. H1F2 ve H1F3 durumlarında P1–P2 sıcaklık farkları ihmal edilebilir düzeyde olup, sırasıyla yaklaşık 0,07 °C ve 0,06 °C olarak belirlenmiştir.



**Şekil 39.** Hibrit Soğutma Sistemi için Kararlı Hal Sıcaklıklarıyla Toplam Soğutma Tüketimlerinin Mukayesesi



**Şekil 40.** Isı Borulu ve Hibrit Soğutma Sistemlerinin Kararlı Hal Sıcaklığı-Soğutma Tüketimi-Gürültü Yönüyle Değerlendirilmesi

Bu davranış, hibrit sistemin bu kurulumda TE gücü artırıldıkça mutlaka daha soğuk olur rejiminde değil, büyük ölçüde sıcak tarafta atılması gereken toplam ısı yükü ile sınırlandırıldığı rejimde çalıştığını düşündürür. TE modülün çektiği elektrik güç arttıkça, sıcak tarafta taşınması gereken yük büyür; dolayısıyla 40 W'lık ısıl yükte P1'de sıcak tarafta atılması gereken yük kabaca ~60 W mertebesine, P2'de ~70 W mertebesine yaklaşır. Eğer ısı borusu-kanatçık-fan hattı bu ek yükü aynı etkinlikle boşaltamıyorsa,

TE'nin teorik soğutma potansiyeli pratikte doyuma gider ve P2'nin beklenen avantajı görünmez olur.

Aynı düşük fan koşulunda ısı borulu sistem  $67,37\text{ }^{\circ}\text{C} / 0,60\text{ W}$  iken hibrit P1  $57,26\text{ }^{\circ}\text{C} / 22,20\text{ W}$  düzeyindedir. Yani yaklaşık  $10,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık düşüşü, yaklaşık  $+21,6\text{ W}$  ek tüketimle elde edilmektedir. Buna karşılık ısı borulu sistemde yalnızca fan yükseltmek, daha küçük tüketim artışlarıyla anlamlı kazanım üretir; fakat hibritin sağladığı daha düşük sıcaklık bandına iniş (örneğin  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  altı) ısı borulu mimaride bu  $40\text{ W}$  senaryosunda mümkün değildir. Nitekim  $49,84\text{ }^{\circ}\text{C}$  (H1F3P1) ve  $48,56\text{ }^{\circ}\text{C}$  (H1F4P1) seviyeleri, hibritin kritik avantaj bandını göstermektedir.

Şekil 40, karar mekanizmasına üçüncü eksenin bir seksenin eklenmesiyle oluşturulmuştur ve bu fan gürültüsüdür. Fan seviyesi yükseldikçe sıcaklık düşer, fakat gürültü de artar. Isı borulu sistemde fan moduna bağlı gürültü seviyesi  $51,88\text{ dBA}$  (F1)'den  $65,72\text{ dBA}$  (F4)'ye çıkarken, aynı anda sıcaklık  $67,37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $59,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye inmektedir. Bu, ısı borulu mimaride sıcaklık düşürmenin iki maliyetini aynı anda görünür kılar. Enerji tüketimi artışı ( $0,60$ 'dan  $2,28\text{ W}$ 'a) ve akustik maliyet ( $\approx 52$ 'den  $\approx 66\text{ dBA}$ 'ya). Hibrit noktalar grafiğe eklendiğinde ise sıcaklığın belirgin biçimde düştüğü; fakat toplam tüketimin  $\sim 22\text{--}34\text{ W}$  bandına sığradığı çok net biçimde görülür. Önemli bir ayrıntı şudur; hibrit kullanımda TE modül akustik açıdan yeni bir gürültü kaynağı oluşturmaz. Gürültüyü belirleyen esas unsur yine fan işletim seviyesidir. Dolayısıyla Şekil 40'ın verdiği mesaj, klasik sıcaklık–gürültü değiş tokuşuna hibritte üçüncü bir değişkenin eklendiğidir. Sıcaklığı düşürmek için artık gürültüyü değil, enerji tüketimini çok daha sert biçimde artırma seçeneği sisteme dahil olur.

Üç şekil birlikte okunduğunda ortaya çıkan sonuç, performans–enerji–gürültü eksenindeki ana değerlendirmeyi güçlü biçimde destekler. (i) Isı borulu–fanlı mimari düşük tüketimle ( $0,60\text{--}2,28\text{ W}$ ) kararlı ve güvenilir bir referans performans sunar; ancak  $40\text{ W}$  senaryosunda sıcaklığı  $\sim 59\text{ }^{\circ}\text{C}$  altına indiremez ve fan yükseltmenin kazancı azalan marjinal fayda karakteri taşır. (ii) Termoelektrik entegrasyon,  $40\text{ W}$  gibi kritik yükte sıcaklığı  $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  mertebesinde aşağı çekerek daha düşük bir işletim bandı açar ve  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  altı gibi daha sıkı hedefleri mümkün kılar; fakat bunu toplam tüketimi bir büyüklük mertebesi artırarak yapar ( $\sim 22\text{--}34\text{ W}$ ). (iii) Bu kurulumda TE beslemesini P1'den P2'ye yükseltmek, tüketimi yaklaşık  $+10\text{ W}$  artırmasına rağmen kararlı hal sıcaklığında anlamlı bir kazanım üretmemiştir; bu da hibrit sistemin iyileştirme önceliğinin TE gücünü artırmak değil, sıcak taraf ısı atım hattını güçlendirmek (ısı borusu yoğunlaştırucu tasarımı,

kanatçık kapasitesi, hava debisi/akış yolu ve temas dirençleri) olduğunu işaret eder. (iv) Akustik eksen dikkate alındığında fan seviyesi, termal performansla birlikte sistemin kullanılabilirlik sınırını da belirleyen birincil tasarım değişkenidir: 40 W koşulunda F1'den F4'e çıkıldığında kararlı hal sıcaklığı 67,37 °C'den 59,31 °C'ye inerken fan gürültüsü 51,88 dBA'dan 65,72 dBA'a yükselmekte; dolayısıyla sıcaklık kazanımı, belirgin bir gürültü maliyetiyle birlikte elde edilmektedir. (v) Hibrit mimaride TE modülün devreye alınması gürültüyü doğrudan artırmaz; gürültü yine fan kademesi tarafından belirlenir. Bu nedenle hibrit yaklaşımın akustik açıdan asıl değeri, aynı veya daha düşük sıcaklık hedeflerine daha düşük fan seviyelerinde erişme olanağı sağlamasıdır. Örneğin yalnız ısı borulu sistemde H1F4 noktasında 59,31 °C için 65,72 dBA gerekirken, hibrit H1F1P1 noktasında daha düşük bir sıcaklık olan 57,26 °C, 51,88 dBA seviyesinde elde edilebilmektedir. Bu sonuç, gürültü kısıtının baskın olduğu uygulamalarda fanı yükseltmek yerine, sınırlı bir TE işletim noktasının (P1 bandı) fan gereksinimini azaltacak şekilde stratejik olarak kullanılmasının daha rasyonel bir tasarım yaklaşımı olabileceğini göstermektedir.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

- Çalışma kapsamında ısı borulu–fanlı referans soğutma mimarisi ile termoelektrik eleman entegre hibrit mimari, aynı deney platformunda karşılaştırılabilecek şekilde kurgulanmış ve değerlendirme kararlı hal sıcaklığı, toplam soğutma tüketimi ve fan gürültüsü çıktılarının birlikte okunmasına dayandırılmıştır.
- Isıl yük 10–20–30–40 W (H4–H3–H2–H1) seviyelerinde, fan işletimi F1–F4 kademelerinde sistematik olarak değiştirilmiştir. Her senaryo 1200 s ısıtma ve 600 s soğuma çevrimi ile yürütülerek karşılaştırmaların aynı zaman ölçeğinde yapılması sağlanmıştır. Hibrit soğutma sistemi deneylerinde TE'nin 300. saniyede devreye alınması, TE etkisinin geçici ve kararlı rejimde ayrı ayrı izlenmesine imkan vermiştir.
- Test bölgesinin ısı davranışı yalnızca ısı yük yüzeyi üzerinden değil; ısı borusunun adyabatik/yoğuşma bölgeleri ve fan giriş–çıkış hava sıcaklıklarını kapsayan çok noktalı termokupl yerleşimiyle izlenmiş, termal kamera görüntüleri ise kararlı hal sıcaklık dağılımlarını alan bazlı doğrulama amacıyla kullanılmıştır.
- Fan giriş gücü–hava akış hızı ilişkisi deneysel olarak karakterize edilerek fan kademelerinin nicel karşılığı oluşturulmuştur. Böylece sıcaklık değişimlerinin yalnız seviye değil hava tarafı taşınım şiddeti üzerinden de gözlenebilmesi sağlanmıştır.
- Referans ısı borulu–fanlı soğutma sisteminde ısı yük aktif edildiğinde yüzey sıcaklığında hızlı yükseliş gözlenmiş, fanlı taşınımın etkisiyle sıcaklıklar çoğu senaryoda yaklaşık 450. saniye civarında kararlı rejime yaklaşmıştır. Isıl yük devreden çıkarıldığında soğuma hızlı gerçekleşmiş ve fanlı taşınım sürdüğü için sistemde depolanan ısınn etkin şekilde uzaklaştırıldığı görülmüştür.
- Adyabatik bölge sıcaklığının yoğuşma bölgesinden yüksek olması ve bu farkın ısı yük arttıkça büyümesi, iki-fazlı ısı taşıma döngüsünün kararlı biçimde sürdüğünü ve sınırlayıcı etkinin artan ölçüde kondenser–hava tarafı taşınım direncinde yoğunlaştığını işaret etmiştir. Kritik H1F1 koşulunda adyabatik ( $\sim 50^{\circ}\text{C}$ ) ve yoğuşma ( $\sim 45^{\circ}\text{C}$ ) değerleri, su akışkanlı ısı borusu çalışma penceresiyle uyumlu bulunmuştur.
- Referans mimaride fan seviyesi arttıkça kararlı hal sıcaklığı düşmüş, ancak azalan marjinal fayda davranışı sergilenmiştir. Örneğin 40 W koşulunda toplam soğutma tüketimi 0,60'dan 2,28 W'a artırıldığında kararlı hal sıcaklığı  $67,37^{\circ}\text{C}$ 'den  $59,31^{\circ}\text{C}$ 'ye düşmüştür ( $8,06^{\circ}\text{C}$  iyileşme). Kademeler bazında sıcaklık düşüşü F1'den F2'ye

-4,28 °C iken F3'den F4'e -1,49 °C'ye gerilemiştir. Bu sonuç, yalnız fan yükseltmeyle daha düşük sıcaklık elde edilebilse de bunun giderek azalan verimle gerçekleştiğini göstermiştir.

- 40 W yük altında hibrit mimari işletimde TE aktivasyonu sonrasında ısı yük yüzey sıcaklığında ani ve belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Hibrit yapı, referans mimarinin ulaşamadığı daha düşük sıcaklık bandını açabilmiştir. Bu bağlamda hibrit yaklaşım, özellikle kritik yük koşullarında tepe sıcaklık bastırma açısından işlevsel bir araç olarak değerlendirilmiştir.
- TE beslemesinin P1'den (21,6 W) P2'ye (32 W) artırılması toplam tüketimi yaklaşık +10 W mertebesinde yükseltmesine rağmen kararlı hal sıcaklığında anlamlı bir ek kazanım üretmemiştir. Bu, P2'deki ilave gücün net soğutma kazanımına dönüşmek yerine, sıcak tarafta atılması gereken ilave ısı yükü olarak sisteme bindiğini ve hibrit yapının bu çalışma aralığında TE gücünden ziyade sıcak taraf ısı atım kapasitesiyle sınırlandığını göstermiştir. Dolayısıyla bu platform için P2 işletim bölgesi sistem verimi açısından elverişli olmamıştır.
- Termal kamera görüntüleri, referans ve hibrit senaryolarda kararlı hal sıcaklık alanlarının deney koşullarına göre anlamlı biçimde ayrıştığını göstermiş. Özellikle hibrit mimaride P1–P2 arasında görsel ayrışmanın zayıf kalması, P2'nin marjinal faydasını nitel olarak da desteklemiştir. Böylece termal görüntüleme, termokupl eğilimlerini doğrulayan tamamlayıcı bir kanıt seti sağlamıştır.
- Referans sistemde akustik maliyetin nicel karşılığı değerlendirilmiştir. Fan seviyesi yükseldikçe gürültü artmış, 40 W koşulunda F1'den F4'e geçişte gürültü 51,88 dBA'dan 65,72 dBA'a yükselmiştir. Bu, referans mimaride sıcaklık kazanımının yalnız enerji tüketimiyle değil, aynı zamanda belirgin bir akustik maliyetle karşılandığını ortaya koymuştur.
- Hibrit mimarinin kullanımı TE kaynaklı yeni bir gürültü üretmemektedir. Gürültüyü belirleyen ana unsur yine fan seviyesidir. Bu nedenle hibrit yaklaşımın akustik açıdan asıl katkısı, sıcaklık hedefini tutturmak için fanın daha yüksek kademelere çıkma ihtiyacını azaltabilme potansiyeli olmuştur. Ancak bunun karşılığında sistem toplam tüketimi 22–34 W bandına taşınmaktadır. Başka bir ifadeyle hibrit, gürültüyü artırmadan sıcaklığı düşürme yönünde bir tasarım serbestliği sunarken bu serbestliği çoğunlukla enerji tüketimi üzerinden karşılamaktadır.

- Hibrit mimaride TE modülün devreye alınması gürültüyü doğrudan artırmamaktadır; gürültü seviyesi yine fan kademesi tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle hibrit yaklaşımın akustik açıdan temel katkısı, aynı veya daha düşük sıcaklık hedeflerine daha düşük fan seviyelerinde erişebilme potansiyelidir. Bu etki, 40 W senaryosunda sayısal olarak açık biçimde görülmüştür: yalnız ısı borulu sistemde H1F4 noktasında 59,31 °C için 65,72 dBA gerekirken, hibrit H1F1P1 noktasında daha düşük bir sıcaklık olan 57,26 °C, 51,88 dBA seviyesinde elde edilebilmiştir.
- Gürültü kısıtının baskın olduğu uygulamalarda fanı beslemesini yükseltmek yerine, TE'nin yüksek güçte sürekli işletilmesinden kaçınarak sınırlı bir TE işletim noktasının (P1 bandı) stratejik biçimde kullanılmasının daha rasyonel olabileceğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle hibrit sistem, gürültü sınırlarını aşmadan sıcaklık bandını aşağı çekmek için bir tasarım serbestliği sunmaktadır. Bu serbestliğin pratikte anlamlı hale gelmesi ise TE'nin doğru güç penceresinde ve doğru kontrol stratejisiyle kullanılmasına bağlıdır.
- Uygulama hedefi seçimi, hangi mimarinin rasyonel olduğuna doğrudan yön vermektedir ve beticede hedef fonksiyon işletim noktasını belirlemektedir. Eğer tasarım hedefi öncelikle mutlak sıcaklık eşliğini aşağı çekmek (ör. kritik bileşen sıcaklığını daha düşük banda bastırmak) ise hibrit mimari anlamlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık hedef yüksek enerji verimliliği ve/veya fan gürültüsü nispeten önemsiz ise sürdürülebilir işletim için, ısı borulu–fanlı mimari daha rasyonel bir çözüm ailesi sunmaktadır.
- Sonuç olarak bu tez, elektronik soğutma tasarımında kararın tek boyutlu olmadığını ve en azından kararlı hal sıcaklığı–toplam tüketim–fan gürültüsü eksenlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Özellikle gürültü hassasiyeti olan uygulamalarda, hibrit yaklaşım daha düşük sıcaklık için daha yüksek fan beslemesi yerine sınırlı TE desteği ile daha düşük fan beslemesi ve gürültüsü alternatifininin mümkün olduğunu göstermektedir.

## 5.2. Öneriler

- Hibrit mimaride P1' den P2'ye geçişinin sıcaklık kazancı üretmemesi, iyileştirmenin ilk hedefinin TE beslemesini artırmak değil, sıcak taraf ısı atım hattını güçlendirmek olması gerektiğini göstermektedir. Bu kapsamda yoğunlaştırıcı kanatçık geometrisinin

büyütülmesi, hava geçiş kesitinin dar boğazlarının azaltılması ve temas dirençlerini düşüren ara yüz iyileştirmeleri birincil geliştirme alanları olarak değerlendirilmelidir.

- TE modül işletimi için sürekli yüksek güç yerine, sıcaklık hedefi temelli kademeli bir stratejiyle ele alınmalıdır. Burada amaç TE'yi yalnızca tepe sıcaklıkların bastırılması gereken aralıkta devreye alıp, enerji tüketimini sınırlayarak hibrit yaklaşımı sistem düzeyinde anlamlı hale getirmektir. Hibrit mimaride işletim noktası optimizasyonu sistemi soğutma enerjisi tüketimi yönünden daha kullanılabilir hale getirebilir.
- Isı borulu referans mimaride fan beslemesini yükseltmenin azalan marjinal fayda göstermesi nedeniyle, uygulama hedefi belirli bir sıcaklığa inmek ise fanı sürekli üst seviyede çalıştırmak yerine, orta seviye ve uygun hava yönlendirme/kanal optimizasyonu gibi çözümlerle daha düşük gürültüde benzer performans hedeflenmelidir.
- Gürültünün ürün algısı ve uzun süreli kullanım açısından bir tasarım kısıtı oluşturduğu değerlendirilmesi temel alınarak, ileriki çalışmalarda fan seçimi yalnız debi üzerinden değil; gürültü–debi–güç üçlüsü ile ve mümkünse titreşim izolasyonu, akış düzenleyiciler gibi pasif akustik iyileştirmelerle birlikte optimize edilmelidir.
- Sistem düzeyi karar verme için, bu tezde birlikte ele alınan sıcaklık–tüketim–gürültü çıktıları bir çok amaçlı optimizasyon çerçevesine taşınmalıdır. Örneğin hedef fonksiyon; ısı yük yüzey sıcaklığı minimizasyonu altında güç ve gürültü için üst sınırlar (veya ağırlıklandırılmış maliyet) içerecek şekilde tanımlanabilir. Böyle bir yaklaşım, en iyi işletim noktasını tartışmayı nitel değil nicel hale getirebilir.
- TE modülün sistem verimine etkisini daha açık göstermek için, ileriki çalışmalarda yalnız elektrik tüketimi değil, mümkünse TE'nin etkinliği ile ilişkilendirilebilecek ölçütler (ör. sıcak/soğuk yüzey  $\Delta T$ , sıcak taraf ısı atım kapasitesi göstergeleri ve performans katsayısı) raporlanabilir. Böylece hibrit mimarinin hangi rejimde doyuma girdiği daha net ortaya koyulabilir.
- Son olarak, elektronik soğutma uygulamalarında çevresel koşulların (ortam sıcaklığı, bağıl nem, hava giriş sıcaklığı vb.) önemli ölçüde değişkenlik göstermesi nedeniyle, farklı çalışma koşulları altında tekrarlı ve sistematik testlerin gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır. Bu ek testler ile sonuçların genellenebilirliği ve önerilen işletim stratejilerinin saha koşullarındaki dayanıklılığını hususlarında ilerleme kaydedilebilir.

## KAYNAKÇA

- Ahmad, I., Pathak, M., & Khan, M. K. (2021). Electrowetting induced microdroplet oscillation over interdigitated electrodes for hotspot cooling applications. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 125, 110372.
- Amer, M., & Abbas, N. (2025). Advancements in electronics cooling techniques: focus on graphene's prospects, challenges, and future directions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150(4), 2407-2457.
- Ando, T. (2023). Effect of Mistuning and Blade Passing Frequencies on a Turbine's Integral Mode Blade Vibration Detection Using a Pulsation Probe. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, 8(4), 37.
- Anonim, 2025a. Web Sitesi: <https://www.testo.com/en-FI/testo-885-kit/p/0563-0885-X2>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonim, 2025b. Web Sitesi: <https://unitekteknoloji.com/urun/hioki-lr-8402-20-cok-amacli-30-kanalli-datalogger-4/>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonim, 2025c. Web Sitesi: [https://tr.farnell.com/gw-instek/psw-30-72/power-supply-1ch-30v-72a-prog/dp/2460240?srsltid=AfmBOOpDVVkfFEUKqDB8ePT44vDLWQYm-SRSZ1AtUdlqrWS\\_fZgPSXNo5](https://tr.farnell.com/gw-instek/psw-30-72/power-supply-1ch-30v-72a-prog/dp/2460240?srsltid=AfmBOOpDVVkfFEUKqDB8ePT44vDLWQYm-SRSZ1AtUdlqrWS_fZgPSXNo5), Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonim, 2025d. Web Sitesi: <https://www.elektrodepo.com/urun/tt-technic-kxn-3010d-30v-10a-dc-switch-modlu-guc-kaynagi?srsltid=AfmBOOql01W9KwsWJf2ZN8GDpoW4YXbaYU31YEkuFu8cJ-tpWTqRI8vK>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonim, 2025e. <https://www.testo.com/en-VN/testo-425/p/0560-4251>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonim, 2025f. <https://www.e-olcum.com/pce-322a-ses-olcum-ve-kayit-cihazl?srsltid=AfmBOOqh7HS5XLRwCQGHbyG03rD0Jc269qL7Ys59l-CYiDA1VUu435Jv>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonim, 2025g. Web Sitesi: [https://tr.farnell.com/gw-instek/gps-4303/dc-power-supply-adj-4o-p-30v-3a/dp/2748523?srsltid=AfmBOOp4kIGM9T7GWcXnS\\_GYjfOiDzruhOq7UPmQBuj4fIGKH0e0qThJ](https://tr.farnell.com/gw-instek/gps-4303/dc-power-supply-adj-4o-p-30v-3a/dp/2748523?srsltid=AfmBOOp4kIGM9T7GWcXnS_GYjfOiDzruhOq7UPmQBuj4fIGKH0e0qThJ), Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 1974. Web Sitesi: <https://www.epa.gov/archive/epa/aboutepa/epa-identifies-noise-levels-affecting-health-and-welfare.html>, Erişim Tarihi: 11.11.2025.
- Anonymous, 2011. Web Sitesi: <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/noise>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2019a. Web Sitesi: <https://blog.partstat.com/the-incredible-shrinking-component-what-do-smaller-components-mean-for-the-electronics-manufacturing-industry/>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2019b. Web Sitesi: <https://notebookspec.com/web/490156-laptops-101-understanding-what-goes-into-designing-an-efficient-laptop-cooling-solution>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.

- Anonymous, 2020a. Web Sitesi: <https://rogerscorp.com/blog/2020/rogers-micro-channel-coolers-mcc-applications-in-several-different-markets-guess-which-ones>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2020b. Web Sitesi: <https://www.eurekalert.org/news-releases/745540>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2022. Web Sitesi: [https://www.global.dnp/biz/column/detail/10162360\\_4117.html](https://www.global.dnp/biz/column/detail/10162360_4117.html), Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2024a. Web Sitesi: <https://www.gigabyte.com/bo/Laptop/G6X--2024>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2024b. Web Sitesi: <https://earinc.com/glossary/decibel-db/?srsltid=AfmBOopswQxoiQ7o9nk2gLTekLviHJnPheEeSp1tbiam7R65Tw5SrTsG>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2025a. Web Sitesi: <https://www.allpcb.com/blog/pcb-design/the-impact-of-component-selection-on-smt-assembly-cost-and-performance.html>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2025b. Web Sitesi: <https://www.datacenterknowledge.com/cooling/immersion-cooling-lagging-today-leading-tomorrow>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2025c. Web Sitesi: [https://alliedthermaldesigns.com/?page\\_id=31](https://alliedthermaldesigns.com/?page_id=31), Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Anonymous, 2025d. Web Sitesi: <https://coolingfans.blog/how-to-reduce-system-noise-via-fan-design/>, Erişim Tarihi: 10.11.2025.
- Arshad, A., Jabbal, M., Sardari, P. T., Bashir, M. A., Faraji, H., & Yan, Y. (2020). Transient simulation of finned heat sinks embedded with PCM for electronics cooling. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100520.
- Bai, J., Li, Y., Zhao, Y., Luo, F., Sun, T., Liang, Y., ... & Zhang, S. (2024). Experimental study of an integrated aluminum flat plate heat pipe for lightweight thermal management in electronic devices. *Applied Thermal Engineering*, 257, 124332.
- Barrubeeah, M., Rady, M., Attar, A., Albatati, F., & Abuhabaya, A. (2021). Design, modeling and parametric optimization of thermoelectric cooling systems for high power density electronic devices. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(3), 1060-1076.
- Bies, D. A., Hansen, C. H., Howard, C. Q., & Hansen, K. L. (2023). *Engineering noise control*. CRC press.
- Birbarah, P., Gebrael, T., Foulkes, T., Stillwell, A., Moore, A., Pilawa-Podgurski, R., & Miljkovic, N. (2020). Water immersion cooling of high power density electronics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 147, 118918.
- Brahim, T., & Jemni, A. (2021). CFD analysis of hotspots copper metal foam flat heat pipe for electronic cooling applications. *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106583.
- Byon, C. (2016). Heat pipe and phase change heat transfer technologies for electronics cooling. *Electronics Cooling*, 31.

- Cai, Y., Liu, D., Zhao, F. Y., & Tang, J. F. (2016). Performance analysis and assessment of thermoelectric micro cooler for electronic devices. *Energy Conversion and Management*, 124, 203-211.
- Cai, Y., Wang, Y., Liu, D., & Zhao, F. Y. (2019). Thermoelectric cooling technology applied in the field of electronic devices: Updated review on the parametric investigations and model developments. *Applied Thermal Engineering*, 148, 238-255.
- Chein, R., Huang, G. (2004). Thermoelectric cooler application in electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, 24(14-15), 2207-2217.
- Chen, G., Tang, Y., Wan, Z., Zhong, G., Tang, H., & Zeng, J. (2019). Heat transfer characteristic of an ultra-thin flat plate heat pipe with surface-functional wicks for cooling electronics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 100, 12-19.
- Chen, H., Jiang, P., Cheng, H., Ma, P., & Liu, Y. (2024). Experimental investigation on aerodynamic noise of a small-scale multi-blade centrifugal fan. *Applied Acoustics*, 225, 110184.
- Chen, X., Ye, H., Fan, X., Ren, T., & Zhang, G. (2016). A review of small heat pipes for electronics. *Applied Thermal Engineering*, 96, 1-17.
- Corsini, A., Rispoli, F., Sheard, A. G., & Tezduyar, T. (2012). Computational analysis of noise reduction devices in axial fans with stabilized finite element formulations. *Computational Mechanics*, 50(6), 695-705.
- Deng, D., Huang, Q., Xie, Y., Huang, X., & Chu, X. (2017). Thermal performance of composite porous vapor chambers with uniform radial grooves. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1334-1344.
- Dhumal, A. R., Kulkarni, A. P., & Ambhore, N. H. (2023). A comprehensive review on thermal management of electronic devices. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1), 140.
- Du, X., Kong, Y., Ye, Y., Zhu, H., Liu, R., Zhang, G., ... & Jiao, B. (2025). Dual-embedded cooling for thermoelectric coolers in electronics thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 128568.
- Ebadian, M. A., & Lin, C. X. (2011). A review of high-heat-flux heat removal technologies. ASME. *J. Heat Transfer*, 133(11), 110801.
- Faghri, A. (1995). *Heat pipe science and technology*. Global Digital Press.
- Fan, S., & Duan, F. (2020). A review of two-phase submerged boiling in thermal management of electronic cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150, 119324.
- Fan, W., Wu, Z., Hong, S., & Sheng, K. (2025). High-performance integrated thermoelectric coolers for electronics cooling. *Communications Materials*, 6(1), 114.
- Feng, C., Gibbons, M. J., Marengo, M., & Chandra, S. (2020). A novel ultra-large flat plate heat pipe manufactured by thermal spray. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115030.

- Feng, J., Bian, T., Han, Q., & Wang, B. (2023). A numerical investigation on the influence of the circular ring on the aerodynamic noise generated by a cooling fan. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 19(1).
- Gan, K., Li, R., Zheng, Y., Xu, H., Gao, Y., Qian, J., ... & Zhang, H. (2024). Development and experimental study of a 3-dimensional enhanced heat pipe radiator for cooling high-power electronic devices. *Applied Thermal Engineering*, 238, 121924.
- Gibbons, M. J., Marengo, M., & Persoons, T. (2021). A review of heat pipe technology for foldable electronic devices. *Applied Thermal Engineering*, 194, 117087.
- Goldsmid, H. J. (2010). *Introduction to thermoelectricity*. Berlin: Springer.
- Hahad, O., Kuntic, M., Al-Kindi, S., Kuntic, I., Gilan, D., Petrowski, K., ... & Münzel, T. (2025). Noise and mental health: evidence, mechanisms, and consequences. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 35(1), 16-23.
- Hou, F., Wang, W., Zhang, H., Chen, C., Chen, C., Lin, T., ... & Ferreira, J. A. (2019). Experimental evaluation of a compact two-phase cooling system for high heat flux electronic packages. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114338.
- Hsieh, J. C., Huang, H. J., & Shen, S. C. (2012). Experimental study of microrectangular groove structure covered with multi mesh layers on performance of flat plate heat pipe for LED lighting module. *Microelectronics Reliability*, 52(6), 1071-1079.
- Hu, X., Hu, C., Xu, H., He, Y., & Tang, D. (2023). Polyethersulfone wick and metal wick based loop heat pipe for LED street light thermal management. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103175.
- Huang, J., Huang, H., Dong, B., Chang, L., Wang, J., & Yang, T. (2024). Experimental investigation on a flat loop heat pipe coupled with thermoelectric cooler. *Applied Thermal Engineering*, 240, 122270.
- Ivanov, K., Aleksandrov, A., & Belovski, I. (2019, October). Synthesis and Study on Waste Heat Thermoelectric Generator. In *2019 II International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)* (pp. 1-4). IEEE.
- Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal science and engineering progress*, 6, 268-289.
- Jouhara, H., Reay, D., McGlen, R., Kew, P., & McDonough, J. (2023). *Heat pipes: theory, design and applications*. Butterworth-Heinemann.
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of acoustics*. John Wiley & sons.
- Krishnan, A., Sivan, S., Midhun, V. C., & Behera, S. R. (2023). Experimental and numerical investigation of solid-solid phase change material assisted heat sink with integrated heat pipe for electronic cooling. *Journal of Energy Storage*, 59, 106494.
- Kyeremateng, N. A., Brousse, T., & Pech, D. (2017). Microsupercapacitors as miniaturized energy-storage components for on-chip electronics. *Nature nanotechnology*, 12(1), 7-15.

- Lee, K. H., Kim, H., Kim, O. J. (2010). Effect of thermoelectric and electrical properties on the cooling performance of a micro thermoelectric cooler. *Journal of Electronic Materials*, 39(9), 1566-1571.
- Li, L., Du, X., Chen, J., & Wu, Y. (2024). Thermal fatigue failure of micro-solder joints in electronic packaging devices: a review. *Materials*, 17(10), 2365.
- Li, W. Q., Li, Y. X., Yang, T. H., Zhang, T. Y., & Qin, F. (2023). Experimental investigation on passive cooling, thermal storage and thermoelectric harvest with heat pipe-assisted PCM-embedded metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 201, 123651.
- Liao, Y., Gan, Y., Liu, F., Tang, R., Cai, B., & Li, Y. (2026). Performance analysis of a two-stage heat pipe heat sink integrated with high-density pn-junction thermoelectric cooler for CPU transient cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 255, 127739.
- Lin, C., Ma, X., Liang, K., Xu, Y., Yang, H., Wang, J., ... & Mao, J. (2025). Miniaturized Mg<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>-based thermoelectric cooler for localized electronic thermal management. *Nature Communications*, 16(1), 7779.
- Ling, L., Xia, Y., Zhao, L., Hu, Q., Zhang, Z., Xiang, Z., & Song, D. (2024). Experimental investigation on the thermal performance of a novel loop heat pipe (LHP) with micro-channel structure. *Applied Thermal Engineering*, 238, 122046.
- Liu, X., Zheng, F., Fu, Q., Song, G., & Xiong, Y. (2024). Thermoelectric cooler with embedded teardrop-shaped milli-channel heat sink for electronics cooling. *Applied Thermal Engineering*, 244, 122763.
- Lu, H., Xiao, Y., Liu, Z., Yuan, Y., & Zhou, P. (2024). The effect of tip clearance on the rotor-stator interaction and noise of marine 1.5-stage compressor. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 23(1), 33-46.
- Lu, S., & Vafai, K. (2016). A comparative analysis of innovative microchannel heat sinks for electronic cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 271-284.
- MacDonald, D. K. C. (2006). *Thermoelectricity: an introduction to the principles*. Courier Corporation.
- Murshed, S. S., & De Castro, C. N. (2017). A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 821-833.
- Nolas, G. S., Sharp, J., & Goldsmid, J. (2013). *Thermoelectrics: basic principles and new materials developments*. Springer Science & Business Media.
- Özdemir, F., Akdemir, Ö., & Güngör, A. (2024). A review of oscillating heat pipes: general consideration and latest applications. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(4), 436-450.
- Pambudi, N. A., Sarifudin, A., Firdaus, R. A., Ulfa, D. K., Gandidi, I. M., & Romadhon, R. (2022). The immersion cooling technology: Current and future development in energy saving. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 9509-9527.
- Pastukhov, V. G., & Maydanik, Y. F. (2023). Temperature control of a heat source using a loop heat pipe integrated with a thermoelectric converter. *International Journal of Thermal Sciences*, 184, 108012.

- Patra, S., Chen, D., & Geiger, R. (2013, May). Reliability degradation with electrical, thermal and thermal gradient stress in interconnects. In *2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* (pp. 1063-1066). IEEE.
- Peng, Y. I., Liu, W., Liu, B., Liu, J., Huang, K., Wang, L., & Chen, W. (2015). The performance of the novel vapor chamber based on the leaf vein system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 656-666.
- Putra, N., & Iskandar, F. N. (2011). Application of nanofluids to a heat pipe liquid-block and the thermoelectric cooling of electronic equipment. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(7), 1274-1281.
- Rangasamy, S., Raghavan, R. R. V., Elavarasan, R. M., & Kasinathan, P. (2023). Energy analysis of flattened heat pipe with nanofluids for sustainable electronic cooling applications. *Sustainability*, 15(6), 4716.
- Rashidi, S., Hormozi, F., & Doranehgard, M. H. (2021). Abilities of porous materials for energy saving in advanced thermal systems. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 143(3).
- Sajid, M., Hassan, I., & Rahman, A. (2017). An overview of cooling of thermoelectric devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 15-22.
- Salah, W. A., & Abuhelwa, M. (2020). Review of thermoelectric cooling devices recent applications. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(1), 455-476.
- Sarkar, S., Gupta, R., Roy, T., Ganguly, R., & Megaridis, C. M. (2023). Review of jet impingement cooling of electronic devices: Emerging role of surface engineering. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 206, 123888.
- Saucedo-Dorantes, J. J., Elvira-Ortiz, D. A., Manriquez-Padilla, C. G., Jaen-Cuellar, A. Y., & Perez-Cruz, A. (2022). New Trends and Challenges in Condition Monitoring Strategies for Assessing the State-of-charge in Batteries. *Industry 4.0- Perspectives and Applications*.
- Septiadi, W. N., Prasetya, K. W. T., Murti, M. R., Sukadana, I. G. K., Rahman, F., Putra, G. J. P., & Marianti, K. M. (2020). Investigated on Thermal Design of Computer Cooling System with the Effective Length of Cascade Heat Pipe. *Int. J. Technol*, 11, 1388-1396.
- Shabany, Y. (2009). *Heat transfer: thermal management of electronics*. CRC press.
- Shaeri, M. R., Attinger, D., & Bonner, R. (2017). Feasibility study of a vapor chamber with a hydrophobic evaporator substrate in high heat flux applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 86, 199-205.
- Shi, R., Li, X., Jiang, T., & Zhu, K. (2025). Impact of bias wick on heat dissipation capacity of heat pipe assisted CPU cooler. *Applied Thermal Engineering*, 271, 126366.
- Silverstein, C. (2020). *Design and technology of heat pipes for cooling and heat exchange*. CRC press.
- Solomon, A. B., Ramachandran, K., & Pillai, B. C. (2012). Thermal performance of a heat pipe with nanoparticles coated wick. *Applied Thermal Engineering*, 36, 106-112.

- Sun, X., Yang, Y., Zhang, H., Si, H., Huang, L., Liao, S., Gu, X. (2017). Experimental research of a thermoelectric cooling system integrated with gravity assistant heat pipe for cooling electronic devices. *Energy Procedia*, 105, 4909-4914.
- Sun, Z., & Qiu, H. (2014). An asymmetrical vapor chamber with multiscale micro/nanostructured surfaces. *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 58, 40-44.
- Tang, H., Tang, Y., Wan, Z., Li, J., Yuan, W., Lu, L., ... & Tang, K. (2018). Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling. *Applied energy*, 223, 383-400.
- Thompson, R., Smith, R. B., Karim, Y. B., Shen, C., Drummond, K., Teng, C., & Toledano, M. B. (2022). Noise pollution and human cognition: An updated systematic review and meta-analysis of recent evidence. *Environment international*, 158, 106905.
- Tian, W., Li, F., He, M., Ji, H., & Chen, S. (2025). Reliability Analysis of Complex PCB Assemblies Under Temperature Cycling and Random Vibration. *Micromachines*, 16(2), 212.
- Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y., & Li, B. (2016). A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement. *Renewable and sustainable energy reviews*, 65, 698-726.
- Velardo, J., Date, A., Singh, R., Nihill, J., Date, A., Phan, T. L., & Takahashi, M. (2019). Experimental investigation of a vapour chamber heat spreader with hybrid wick structure. *International journal of thermal sciences*, 140, 28-35.
- Vér, I. L., & Beranek, L. L. (2005). *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. John Wiley & Sons.
- Wang, C., Liu, Z., Zhang, G., & Zhang, M. (2013). Experimental investigations of flat plate heat pipes with interlaced narrow grooves or channels as capillary structure. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 48, 222-229.
- Wolff, F., Weyer, D., Papachristou, C., & Clay, S. (2021). Design for reliability: Tradeoffs between lifetime and performance due to electromigration. *Microelectronics Reliability*, 117, 114025.
- Wong, S. C., Huang, S. F., & Hsieh, K. C. (2011). Performance tests on a novel vapor chamber. *Applied Thermal Engineering*, 31(10), 1757-1762.
- Xie, Y., Su, J., Bao, J., Wu, H., Chen, L., & Zhang, H. (2025). Experimental investigation on active temperature control performance of a loop heat pipe integrated with thermoelectric coolers. *Applied Thermal Engineering*, 279, 127476.
- Xin, F., Ma, T., Wang, Q., Yan, Y., & Tian, W. (2022). Thermal characterization and wick optimization of mini-grooved flat heat pipe for electronics cooling. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(24), 14859-14872.
- Xiong, K., Luo, Y., Hu, Y., & Wang, S. (2024). Advanced thermal management system based on a novel flat evaporator loop heat pipe with high-efficiency condenser for electronic cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 196, 108719.
- Xiong, K., Meng, L., Wang, S., & Zhang, L. W. (2022). Experimental investigation on thermal characteristics of a novel loop heat pipe for cooling high heat flux electronic chips. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 187, 122569.

- Yang, H., Li, M., Jiang, Y., Ren, F., Wang, Z., & Liang, J. (2024). Performance enhancement of a novel thermoelectric self-cooling system for electronic devices. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 159, 108286.
- Yang, T., King, W. P., & Miljkovic, N. (2021). Phase change material-based thermal energy storage. *Cell Reports Physical Science*, 2(8).
- Yang, X. H., Tan, S. C., He, Z. Z., & Liu, J. (2018). Finned heat pipe assisted low melting point metal PCM heat sink against extremely high power thermal shock. *Energy Conversion and Management*, 160, 467-476.
- Ye, F., Dong, Y., Opolot, M., Zhao, L., & Zhao, C. (2024). Assessment of Thermal Management Using a Phase-Change Material Heat Sink under Cyclic Thermal Loads. *Energies*, 17(19), 4888.
- Yu, Z. Q., Li, M. T., & Cao, B. Y. (2024). A comprehensive review on microchannel heat sinks for electronics cooling. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 6(2), 022005.
- Yule, L., Harris, N., Hill, M., Zaghari, B., & Grundy, J. (2024). Temperature hotspot detection on printed circuit boards (pcbs) using ultrasonic guided waves—a machine learning approach. *Sensors*, 24(4), 1081.
- Zeghari, K., Louahlia, H., & Le Masson, S. (2019). Experimental investigation of flat porous heat pipe for cooling TV box electronic chips. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114267.
- Zhang, C., Xia, Z., Wang, B., Gao, H., Chen, S., Zong, S., & Luo, K. (2020). A Li-ion battery thermal management system combining a heat pipe and thermoelectric cooler. *Energies*, 13(4), 841.
- Zhang, H. Y., Mui, Y. C., Tarin, M. (2010). Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages. *Applied Thermal Engineering*, 30(6-7), 561-568.
- Zhang, Z., Wang, X., & Yan, Y. (2021). A review of the state-of-the-art in electronic cooling. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 1, 100009.
- Zhao, R., Zhang, Z., Zhao, S., Cui, H., Liu, Z., & Liu, W. (2021). Experimental study of flat-disk loop heat pipe with R1233zd (E) for cooling terrestrial electronics. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117385.
- Zhong, G., Qiu, Y., Wu, J., Rao, L., & Tang, Y. (2024). A novel coaxial heat pipe with an inner vapor tube for cooling high power electronic devices. *Applied Thermal Engineering*, 254, 123924.
- Zhou, G., Li, J., & Jia, Z. (2019a). Power-saving exploration for high-end ultra-slim laptop computers with miniature loop heat pipe cooling module. *Applied Energy*, 239, 859-875.
- Zhou, H., & Li, J. (2025). An energy-efficient gravity-insensitive loop heat pipe integrated with thermoelectric module for cooling high power mobile electronic chips in harsh environment. *Energy Conversion and Management*, 346, 120434.
- Zhou, W., Li, Y., Chen, Z., Deng, L., & Gan, Y. (2019b). A novel ultra-thin flattened heat pipe with biporous spiral woven mesh wick for cooling electronic devices. *Energy Conversion and Management*, 180, 769-783.

- Zhou, Y., & Yu, J. (2012). Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices. *International journal of refrigeration*, 35(4), 1139-1144.
- Zhu, L., Tan, H., Yu, J. (2013). Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy Conversion and Management*, 76, 685-690.
- Zohuri, B. (2011). Heat pipe design and technology. FL: Taylor and Francis Group, LLC.
- Zohuri, B. (2020). *Functionality, advancements and industrial applications of heat pipes*. Academic Press.

