



**ULTRASONİK SES DALGASI DESTEKLİ  
DALDIRMALI SOĞUTMA TEKNİĞİNİN ISI  
TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Rahim Aytuğ ÖZER**

**Doktora Tezi**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN  
Eş Danışman: Dr. İbrahim ATEŞ**

**2023**

**Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**DOKTORA TEZİ**

**ULTRASONİK SES DALGASI DESTEKLİ DALDIRMALI SOĞUTMA**  
**TEKNİĞİNİN ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Rahim Aytuğ ÖZER**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN**

**Eş Danışman: Dr. İbrahim ATEŞ**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Erzurum**

**2023**

**Her hakkı saklıdır.**

## 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 etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

16 / 06 / 2023

Rahim Aytuğ ÖZER

# ÖZET

DOKTORA TEZİ

## ULTRASONİK SES DALGASI DESTEKLİ DALDIRMALI SOĞUTMA TEKNİĞİNİN ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Rahim Aytuğ ÖZER

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Eş Danışman: Dr. İbrahim ATEŞ

Bu doktora tez çalışmasında, daldırmalı soğutma sistemlerinde başta ultrasonik ses frekansı olmak üzere ısı kaynaklarının havuz içerisindeki konumu, çıkıntı miktarı ve ısı akısının tek fazlı doğal taşınım ve havuz kaynama ısı transferi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Dört eş ısıtıcı ikişerli gruplar halinde 5 farklı kombinasyonda çalıştırılmıştır. Deneysel çalışma, çıkıntısız, 2 ve 4 mm çıkıntılı olmak üzere üç çıkıntı seviyesi için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, ultrasonik ses dalgası sabit genlikte ve 0-24 kHz aralığında uygulanmıştır. Isı kaynaklarına uygulanan ısı akısı  $4 \text{ kW/m}^2$  ile  $166,66 \text{ kW/m}^2$  aralığında değiştirilmiştir. İş akışkanı olarak PF-5060 dielektrik sıvısı kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, ultrasonik ses dalgalarının tek fazlı doğal konveksiyonda ısı transferini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Düşük ısı güçlerinde, ses dalgalarının sıvı moleküllerini itici etkisi ile birlikte sıcak yüzeylerdeki akış sirkülasyonunu artırarak doğal konveksiyon ısı transferi katsayısında %107,49'a varan artış elde edilmiştir. Bütün çalışma durumlarında çıkıntı miktarının artışı ilave sıcak yüzey oluşturduğu için ısı transfer katsayısının azalmasına neden olmuştur. Havuz kaynama rejiminde ise ultrasonik ses dalgası frekansının tek fazlı doğal konveksiyona kıyasla ayırt edici bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu durum, ultrasonik ses dalgası tahriki olmasa dahi, kaynama sırasında oluşan termal kabarcıkların mikro konveksiyon oluşturarak kararsız akışkan hareketleri ile karışım etkisini kuvvetlendirmesinden kaynaklanmıştır. Diğer taraftan aktif ısı kaynağının sıvı serbest yüzeyine ve birbirlerine göre konumunun kızdırma sıcaklığını etkilediği sonucuna varılmıştır. Çıkıntı miktarının ise kabarcık oluşumu ve kaldırma kuvvetleri doğrultusunda kabarcık hareketini engelleyici ekstra yüzey sağladığından dolayı kızdırma sıcaklığını artırıcı etkide bulunmuştur.

2023, 158 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Daldırmalı soğutma, Ultrasonik ses, Akustik akış, Kaviteasyon, Kaynama, Isı transferi.

## ABSTRACT

Ph.D

### DETERMINATION THE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF ULTRASOUND ASSISTED IMMERSION COOLING

Rahim Aytuğ ÖZER

Erzurum Technical University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Co-advisor: Dr. İbrahim ATEŞ

In this Phd thesis, the effects of heat source location, protrusion amount, and heat flux on single and two-phase immersion cooling systems were experimentally investigated, with a focus on the ultrasound frequency. Four heat sources with equal power capacity were operated in pairs in 5 different combinations. The experimental study was conducted for three levels of protrusion: without protrusion, 2 mm protrusion, and 4 mm protrusion. The ultrasonic sound wave used in the experiments had a constant amplitude and ranged from 0 to 24 kHz. The heat flux applied to the heat sources was varied in the range of 4 kW/m<sup>2</sup> to 166.66 kW/m<sup>2</sup>. PF-5060 dielectric fluid was used as the working fluid. According to the experimental results, it was observed that ultrasonic sound waves positively influenced heat transfer in single-phase natural convection. At low heat powers, the circulation of liquid molecules on the hot surfaces increased due to the propelling effect of the sound waves, resulting in an increase in the natural convection heat transfer coefficient of up to 107.49%. In all operating conditions, an increase in protrusion amount led to a decrease in the heat transfer coefficient due to the creation of additional hot surface. In the pool boiling regime, it was observed that the frequency of the ultrasonic sound wave did not have a distinctive effect compared to single-phase natural convection. The reason of this, even without ultrasound, the thermal bubbles formed during boiling was enhanced the mixing effect through unstable fluid motions caused by microconvection. On the other hand, it was concluded that the position of the active heat source relative to the free liquid surface and to each other affected the boiling temperature. The protrusion amount increased the boiling temperature by providing additional surfaces that hinder bubble formation and buoyancy forces.

**2023, 158 page**

**Keywords:** Immersion cooling, Ultrasound, Acoustic flow, Cavitation, Boiling, Heat transfer.

## TEŞEKKÜR

Akademik çalışmalarımın her aşamasında desteklerini benden esirgemeyen hem kişilik hem de bir akademisyen olarak hep örnek olarak gördüğüm değerli danışmanım Prof. Dr. Bayram ŞAHİN'e saygı ve minnetle en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komisyonumda yer alan Sayın Doç. Dr. Ahmet DURLU' ya teşekkürlerimi sunarım.

TÜBİTAK 120R068 no'lu proje ve ETÜ-BAP 2021/02 nolu proje kapsamında gerçekleştirdiğim doktora çalışmalarımın her aşamasında verdiği önemli katkı ve tecrübeleri için projenin yürütücüsü ve eş danışmanım olan Sayın Dr. İbrahim ATEŞ'e, proje ekibinde ve tez izleme komisyonumda yer alan, yapıcı eleştirilerinden faydalandığım Sayın Doç Dr. Eyüphan MANAY'a en samimi teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 120R068 nolu proje ve ETÜ-BAP tarafından 2021/02 nolu proje ile desteklenmiştir. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve Erzurum Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine verdiği maddi desteklerden dolayı teşekkür ederim.

İmalat aşamasında çok defa yardım aldığım, laboratuvar imkanlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Fatih YILDIZ'a ve Sayın Doç. Dr. Salih Akpınar 'a, tez yazım aşamasında manevi destek ve yardımlarını esirgemeneyen Sayın Doç. Dr. Jülide ERKMEN'e teşekkür ederim. Çalışma arkadaşlarım ve sevgili dostlarım Arş. Gör. Murat CEYLAN'a ve Arş. Gör. Resul ŞAHİN' e yardım ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her safhasında benden manevi desteklerini esirgemeyen değerli abim Abdulkerim ÖZER' e, dualarıyla hep yanımda olan kıymetli aileme şükranlarımı sunarım.

**Rahim Aytuğ ÖZER**  
**Haziran 2023**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                            | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>ÖZET</b> .....                                                          | i                   |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                                      | ii                  |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....                                                      | iii                 |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....                                                   | iv                  |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....                                | vi                  |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....                                               | viii                |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....                                             | xi                  |
| <br>                                                                       |                     |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                                      | 1                   |
| 1.1. Yüksek Isı Akıllı Elektronik Bileşenlerin Soğutulma Yöntemleri.....   | 2                   |
| 1.2. Tek Fazlı Daldırmalı Soğutma Uygulamaları .....                       | 6                   |
| 1.3. Çift Fazlı Daldırmalı Soğutma Uygulamaları .....                      | 6                   |
| 1.4. Dielektrik Sıvıların Kaynama Karakteristiği ve Kabarcık Oluşumu ..... | 8                   |
| 1.4.1. Kabarcık oluşumu .....                                              | 11                  |
| 1.4.2. Kabarcıklı kaynama mekanizmaları.....                               | 16                  |
| 1.5. Daldırmalı Soğutma Tekniğinde Kullanılan Akışkanlar.....              | 19                  |
| 1.6. Daldırmalı Soğutma Performansını İyileştirme Yöntemleri .....         | 22                  |
| 1.6.1. Akışkan termodinamik özellikleri .....                              | 23                  |
| 1.6.2. Yüzey yapısı.....                                                   | 25                  |
| 1.6.3. Yüzey oryantasyonu.....                                             | 27                  |
| 1.7. Ultrasonik Ses Dalgalarının Isı Transferini İyileştirme Etkisi .....  | 29                  |
| 1.8. Tezin Amacı, Kapsamı ve Özgün Değeri .....                            | 38                  |
| <b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....                                            | 40                  |
| 2.1. Çift Fazlı Daldırmalı Soğutma .....                                   | 41                  |
| 2.2. Tek Fazlı Daldırmalı Soğutma .....                                    | 59                  |
| 2.3. Ultrasonik Ses Dalgalarının Isı Transferi Performansına Etkisi .....  | 64                  |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....                                         | 70                  |
| 3.1. Deney Düzenliği .....                                                 | 70                  |
| 3.2. Deney Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar .....                          | 72                  |
| 3.2.1. Sirkülasyon pompası .....                                           | 72                  |
| 3.2.2. Veri kartı .....                                                    | 73                  |

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.3. Soğutmalı sirkülatörlü su banyosu .....        | 74         |
| 3.2.4. Güç kaynağı .....                              | 75         |
| 3.2.5. Sıcak yüzey olarak kullanılan ısıtıcılar ..... | 76         |
| 3.2.6. Basınç sensörü.....                            | 77         |
| 3.2.7. Termoelemanlar .....                           | 78         |
| 3.2.8. Yüksek hızlı kamera.....                       | 79         |
| 3.2.9. Graham kondenseri ve emniyet ventili .....     | 80         |
| 3.3. Test yüzeyleri .....                             | 80         |
| 3.4. Yöntem .....                                     | 82         |
| 3.4.1. Parametre seviyelerinin belirlenmesi .....     | 82         |
| 3.4.2. Deney prosedürü .....                          | 84         |
| 3.4.3. Deneysel hesaplama metodu .....                | 85         |
| 3.4.4. Belirsizlik analizi .....                      | 88         |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b> .....       | <b>90</b>  |
| 4.1. Tek Fazlı Daldırmalı Soğutma Sonuçları.....      | 91         |
| 4.1.1. Çıkıntısız (gömülü) ayırık ısı kaynakları..... | 91         |
| 4.1.2. Çıkıntılı ayırık ısı kaynakları.....           | 104        |
| 4.2. Çift Fazlı Daldırmalı Soğutma Sonuçları.....     | 111        |
| 4.2.1. Çıkıntısız (gömülü) ayırık ısı kaynakları..... | 111        |
| 4.2.2. Çıkıntılı ayırık ısı kaynakları.....           | 126        |
| 4.2.3. Akış görselleştirme sonuçları .....            | 132        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....                     | <b>135</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b> .....                                | <b>139</b> |
| <b>EKLER</b> .....                                    | <b>154</b> |
| EK 1 .....                                            | 154        |
| EK 2 .....                                            | 155        |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

### Açıklama

|             |                                                                      |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|
| $A_s$       | Isı transfer yüzey alanı ( $m^2$ )                                   |
| Hz          | Hertz                                                                |
| $h_{sp}$    | Tek fazlı ısı transfer katsayısı ( $kW/m^{20}C$ )                    |
| $h_{2p}$    | Kaynama ısı transfer katsayısı ( $kW/m^{20}C$ )                      |
| $h_u$       | Ultrases varlığında ısı transfer katsayısı ( $kW/m^{20}C$ )          |
| $h_o$       | Ultrases olmadığı durumlarda ısı transfer katsayısı ( $kW/m^{20}C$ ) |
| $h_u - h_o$ | Isı transfer iyileştirmesi ( $kW/m^{20}C$ )                          |
| $k_c$       | Aluminyum ısı iletim katsayısı ( $W/m^{0}C$ )                        |
| $l_a$       | Isı transfer yüzeyi ile termal çift arasındaki mesafe (mm)           |
| $Nu_u$      | Ultrases varlığında Nusselt sayısı                                   |
| $Nu_o$      | Ultrases olmadığı durumlarda Nusselt sayısı                          |
| $T_{w,m}$   | Ortalama yüzey sıcaklığı ( $^0C$ )                                   |
| $T_m$       | Termal çiftler ile belirlenmiş ortalama sıcaklık ( $^0C$ )           |
| $T_{bulk}$  | Havuz sıcaklığı ( $^0C$ )                                            |
| $T_{sat}$   | Akışkan doyma sıcaklığı ( $^0C$ )                                    |
| $Q_t$       | Her bir ısıtıcıya uygulanan güç değeri (W)                           |
| $Q_{eff}$   | Isıtıcı başına efektif güç değeri (W)                                |
| $Q_{loss}$  | Isı kaybı (W)                                                        |
| $q''_{eff}$ | Efektif ısı akısı ( $W/m^2$ )                                        |
| y           | Termal çiftlerden teflon plaka üst yüzeyine olan mesafe (mm)         |
| $\eta_{IR}$ | h- iyileştirme oranı                                                 |
| $\eta_{Nu}$ | Nusselt iyileşme oranı                                               |

### Alt indisler

|      |            |
|------|------------|
| c    | iletkenlik |
| eff  | efektif    |
| loss | kayıp      |

|    |                    |
|----|--------------------|
| m  | ortalama           |
| o  | ultrases yok       |
| s  | yüzey              |
| sp | tek faz            |
| u  | ultrases var       |
| w  | ısı kaynağı yüzeyi |
| 2p | çift faz           |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.1.</b> Veri merkezleri güç tüketiminin yıllara göre değişimi Shinde (2019)' den uyarlanmıştır). .....                                                                               | 2  |
| <b>Şekil 1.2.</b> Farklı soğutma mekanizmalarının kapasiteleri Ali (2013)' den uyarlanmıştır) .....                                                                                            | 3  |
| <b>Şekil 1.3.</b> Dielektrik sıvıların genel havuz kaynama eğrisi (Ali 2013).....                                                                                                              | 9  |
| <b>Şekil 1.4.</b> Sıvıların yüzey boşluğu boyunca hareketi. (a) ıslatma kabiliyeti düşük akışkanlar (b) ıslatma kabiliyeti yüksek akışkanlar. ....                                             | 12 |
| <b>Şekil 1.5.</b> Kabarcık oluşum döngüsü (Ali 2013).....                                                                                                                                      | 14 |
| <b>Şekil 1.6.</b> Kabarcıklı kaynama ısı transfer mekanizmaları. a) Mikrotaşınım modeli, b) Geçici ısı iletim modeli, c) Mikrokatman modeli (Tong and Tang 1997). ..                           | 19 |
| <b>Şekil 1.7.</b> Farklı genlik ve frekans aralıklarında ultrasonik ses dalgalarının uygulama alanları (Legay et al. 2011). ....                                                               | 30 |
| <b>Şekil 1.8.</b> Yoğunluk gradyanına sahip sıvı içerisinde akustik kütle kuvvetlerinin neden olduğu akustik yerdeğiştirme hareketi Kumar et al. (2021)' in çalışmasından uyarlanmıştır). .... | 32 |
| <b>Şekil 1.9.</b> Akustik yer değiştirme ile meydana gelen ısı transfer mekanizması (Kumar et al. (2021)' in çalışmasından uyarlanmıştır).....                                                 | 33 |
| <b>Şekil 1.10.</b> Ultrasonik ses dalgalarının akış alanı içerisinde oluşturduğu etkiler (Legay et al. 2011).....                                                                              | 34 |
| <b>Şekil 2.1.</b> Soğutma mekanizmalarının karşılaştırılması (Cengel 2002).....                                                                                                                | 40 |
| <b>Şekil 2.2.</b> Test bölgesi içerisinde akış yönlendirme uygulaması (Gess et al. 2016a) ...                                                                                                  | 49 |
| <b>Şekil 3.1.</b> Daldırma soğutma deney sistemi, <b>(a)</b> laboratuvar görseli, <b>(b)</b> şematik çizim .....                                                                               | 71 |
| <b>Şekil 3.2.</b> Sirkülasyon pompası.....                                                                                                                                                     | 73 |
| <b>Şekil 3.3.</b> Veri kartı.....                                                                                                                                                              | 74 |
| <b>Şekil 3.4.</b> Sirkülatörlü su banyosu (Anonim 2022a).....                                                                                                                                  | 75 |
| <b>Şekil 3.5.</b> (a) Güç kaynağı, (b) Güç analizörü. ....                                                                                                                                     | 76 |
| <b>Şekil 3.6.</b> Test bölgesinde kullanılan Alüminyum döküm ısıtıcılar.....                                                                                                                   | 77 |
| <b>Şekil 3.7.</b> Basınç sensörü (Anonymous 2022a) .....                                                                                                                                       | 78 |
| <b>Şekil 3.8.</b> Deneysel çalışmada kullanılan termoelemanlar .....                                                                                                                           | 79 |
| <b>Şekil 3.9.</b> Dantec Speed Sense Lab M310 Hızlı Kamera (Anonymous 2022b) .....                                                                                                             | 79 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 3.10.</b> (a) Graham kondenseri (Anonim 2022b) (b) Emniyet ventili .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 80  |
| <b>Şekil 3.11.</b> (a) Test yüzeyi, (b) Test yüzeyinin havuz içerisindeki yerleşim şeması .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 81  |
| <b>Şekil 3.12.</b> (a) Termal çiftlerin teflon plaka ve test yüzeyleri üzerindeki konumları, (b) çalışma durumları.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 82  |
| <b>Şekil 3.13.</b> Doğal taşınım ve kaynama süresince yüzey sıcaklıklarının değişimi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 83  |
| <b>Şekil 3.14.</b> Isı transfer katsayısının ultrasonik ses sinyali genliği ile değişimi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 84  |
| <b>Şekil 3.15.</b> Isı kaybı kalibrasyon eğrisi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 87  |
| <b>Şekil 4.1.</b> Ultrasonik ses dalgası uygulanmadığı çıkıntısız ısı kaynağı koşullarında aktif .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 92  |
| <b>Şekil 4.2.</b> Isı kaynağı yüzeyi ve yığın akışkan sıcaklık farkının ultrasonik ses dalgası frekansı ile değişimi. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 95  |
| <b>Şekil 4.3.</b> Farklı çalışma durumlarında ultrasonik ses frekansı ile ısı transfer katsayısının değişimi, (a)-(b) 1. Durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 2. Isı kaynağı, (c)-(d) 2. Durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 3. Isı kaynağı, (e)-(f) 3. Durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı, (g)-(h) 4. Durum için sırasıyla 2. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı, (i)-(j) 5. Durum için sırasıyla 3. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı. ....       | 97  |
| <b>Şekil 4.4.</b> Çıkıntısız ayırık ısı kaynakları, 1. Durum için ısıl güç ve ultrasonik ses dalgası frekansına karşılık a) h-artış oranı ( $\eta IR$ ) ve b) Nu iyileştirme oranı ( $\eta Nu$ ) değişimi. ....                                                                                                                                                                                                                                                    | 103 |
| <b>Şekil 4.5.</b> Ayırık ısı kaynakları için ısı transfer katsayısının ısıl güç ve çıkıntı miktarına göre değişimi; (a)-(b) 1. durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 2. Isı kaynağı, (c)-(d) 2. durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 3. Isı kaynağı, (e)-(f) 3. durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı, (g)-(h) 4. durum için sırasıyla 2. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı, (i)-(j) 5. durum için sırasıyla 3. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı. .... | 106 |
| <b>Şekil 4.6.</b> Gömülü ayırık ısı kaynakları için kızdırma sıcaklığının ısıl güç ile değişimi, (a) 1. Durum, (b) 2. Durum, (c) 3. Durum, (d) 4. Durum, (e) 5. Durum....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 113 |
| <b>Şekil 4.7.</b> Kaynama ısı transfer katsayısının ultrasonik ses dalgası frekansıyla değişimi, (a) 1. Durum, (b) 2. Durum, (c) 3. Durum, (d) 4. Durum, (e) 5. Durum....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 120 |
| <b>Şekil 4.8.</b> Ultrasonik ses dalgası yok iken farklı çıkıntı miktarlarında kızdırma sıcaklığının ısıl güç ile değişimi, (a) 1. Durum, (b) 2. Durum, (c) 3. Durum, (d) 4. Durum, (e) 5. Durum. ....                                                                                                                                                                                                                                                             | 127 |

- Şekil 4.9.** PF-5060 sıvısının artan ısı akısına göre kaynama görselleri (1. Durum, 4 mm çıkıntı, ultrasonik ses dalgası yok). .....133
- Şekil 4.10.** PF-5060 sıvısının sabit ısı akısında ultrasonik ses dalgası frekansı artışına karşılık kaynama görüntüleri (çıkıntısız 3. Durum, sabit ısı akısı= 23,86 kW/m<sup>2</sup>). .....134



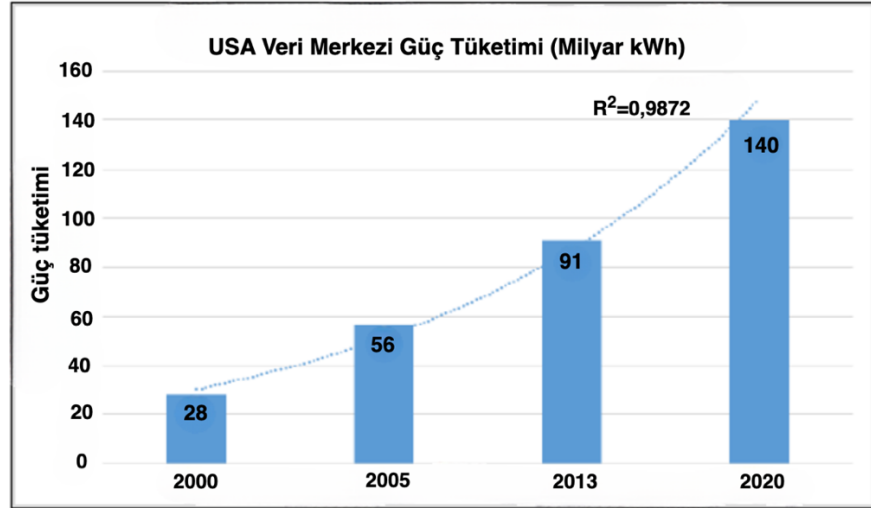
## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                     |                                                                                                            |     |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Çizelge 1.1.</b> | Taşımla ısı transferi mekanizmalarının karşılaştırması.....                                                | 20  |
| <b>Çizelge 1.2.</b> | 1 atm basınç ve 25°C sıcaklığında su ve bazı dielektrik sıvıların termofiziksel özellikleri.....           | 21  |
| <b>Çizelge 2.1.</b> | Çift fazlı daldırılmalı soğutma uygulamaları için özet tablo .....                                         | 53  |
| <b>Çizelge 2.2.</b> | Tek fazlı daldırılmalı soğutma uygulamaları için güncel çalışmalar özet tablosu.....                       | 62  |
| <b>Çizelge 2.3.</b> | Ultrasonik ses dalgalarının ısı transferi üzerindeki etkisini konu alan güncel literatür çalışmaları. .... | 67  |
| <b>Çizelge 3.1.</b> | Sirkülasyon pompası teknik özellikleri .....                                                               | 72  |
| <b>Çizelge 3.2.</b> | Veri kartı teknik özellikleri.....                                                                         | 73  |
| <b>Çizelge 3.3.</b> | Soğutmalı sirkülatörlü su banyosu teknik özellikleri .....                                                 | 74  |
| <b>Çizelge 3.4.</b> | Güç analizörü teknik özellikleri.....                                                                      | 76  |
| <b>Çizelge 3.5.</b> | Basınç sensörü özellikleri .....                                                                           | 77  |
| <b>Çizelge 3.6.</b> | T-tipi termal çift teknik özellikleri .....                                                                | 78  |
| <b>Çizelge 3.7.</b> | DeneySEL belirsizlik değerleri. ....                                                                       | 89  |
| <b>Çizelge 4.1.</b> | Gömülü ayırık ısı kaynaklarının maksimum ısı transfer katsayısı değerleri .....                            | 118 |

### 1. GİRİŞ

Bilgi teknolojisindeki ilerlemeler hızlı ve hassas çalışabilen, az yer kaplayan, yüksek kapasitede veri depolayabilen ve saklayabilen sistemlerin imalatını gerekli kılmıştır. Mikro fabrikasyon teknolojisindeki gelişmelerle birlikte entegre devre boyutları oldukça küçülmüştür. Son yıllarda IBM tarafından üretilen dünyanın ilk 7 nm aparatlı transistörlü çip setleri ve İntel şirketi tarafından 14 nm teknolojisiyle yüksek performanslı çip setlerinin üretilmesi bu durumun açık bir göstergesidir (Gess et al. 2016). Diğer taraftan, işlemci kapasitesini arttırmak ve bilgisayar performansını iyileştirmek için entegre devre kartları içerisindeki transistör sayısı arttırılmıştır. Bu amaçla, 2005 yılında Nvidia firması tarafından NV40 grafik işleme ünitesi (GPU) üretilmiştir. 288 mm<sup>2</sup>'lik bir alana sahip olan bu işlemci ünitesine 222 milyon transistör yerleştirilmiştir (Anonymous 2022c). İntel ise 206 mm<sup>2</sup> alana sahip olan işlemciler üretmiş ve 230 milyon transistör yerleştirmeyi başarmıştır (Intel 2015).

İşlem kapasitesi artırılmış elektronik bileşenler, yüksek miktarda güç tüketmektedir. Veri merkezlerinin geçtiğimiz yirmi yıllık güç tüketim miktarındaki artış bu durumu açıkça ortaya koymaktadır (Şekil 1.1.). Boyutların küçülmesi ve yüksek performanslı bilgisayarların üretilmesi estetik ve veri işlem performansı açısından avantajlı olsa da güç tüketimine paralel olarak elektronik ekipman yüzeyinde açığa çıkan ve sistemden uzaklaştırılması gereken ısı da artmaktadır. Açığa çıkan ısı, efektif bir şekilde sistemden uzaklaştırılmadığı zaman mikroişlemci eklem sıcaklıklarında ciddi sıçramalar meydana gelmektedir. Yüzey sıcaklıklarındaki bu artış mikroişlemcilerin üretildiği malzemelerin termal dayanımını aştığında işlemci arızalarına neden olmaktadır. Öte yandan işlem kapasitesi ve performansına bağlı olarak açığa çıkan ısı, işlem hızını düşürürken aynı zamanda mikroişlemcilerin fiziksel yapısını da olumsuz yönde etkilemektedir.



**Şekil 1.1.** Veri merkezleri güç tüketiminin yıllara göre değişimi Shinde (2019)' den uyarlanmıştır.

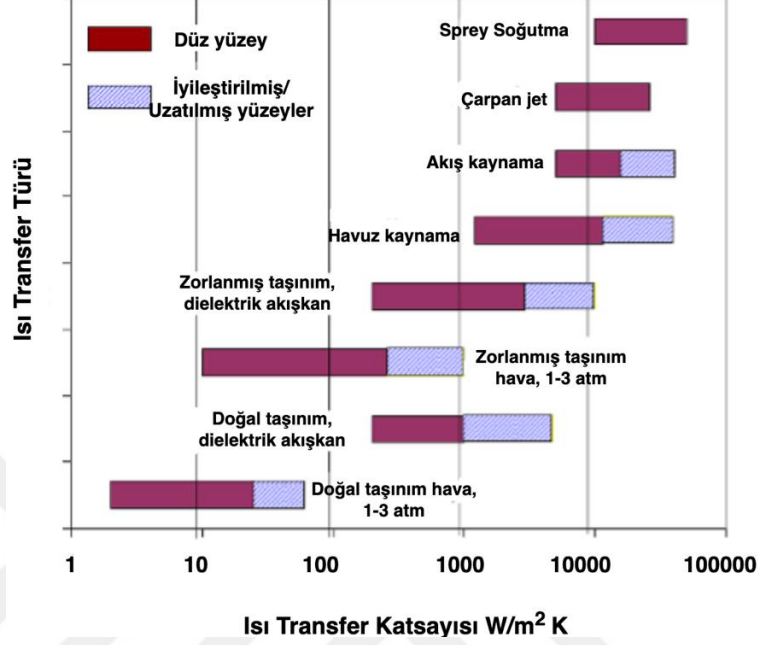
### 1.1. Yüksek Isı Akılı Elektronik Bileşenlerin Soğutulma Yöntemleri

Elektronik bileşenlerde ortaya çıkan ısı farklı yöntemlerle bir akışkana aktarılarak sistemden uzaklaştırılmaktadır. Uygulanacak yöntem; çalışma sıcaklık sınırları, sistem gereksinimleri ve çalışma koşulları göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Isı transferi mekanizmasına bağlı olarak ulaşılabilir maksimum taşınım ile ısı transfer katsayıları Şekil 1.2' de sunulmuştur. Doğal taşınım soğutma sistemlerinde akışkan hareketi sıcaklık farkına bağlı olarak akışkan içindeki yoğunluk gradyanları ve kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile oluştuğu için akış hızı da zorlanmış sistemlere göre görece daha düşüktür. Dolayısıyla, doğal taşınım soğutma düşük güçlü elektronik bileşenlerin soğutulması için uygundur. Daha yüksek termal performans beklenen durumlarda, akış hızı fan veya pompa yardımıyla artırılarak (zorlanmış taşınım) ısı transfer kapasitesi doğal taşınım uygulamalarına kıyasla yükseltilebilmektedir. Şekil 1.2 'de görüldüğü üzere, iş akışkanı olarak sıvı kullanılan sistemler, gaz akışkan kullanılan sistemlere kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir. Zorlanmış hava taşınımı ile ulaşılabilen ısı transfer katsayısı yaklaşık olarak  $100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  değerlerine ulaşabilirken zorlanmış su taşınımı için, ısı transfer katsayıları yaklaşık  $10.000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  'e kadar çıkabilmektedir (Van Oevelen 2014).

Son yıllarda doğal taşınım ve klasik zorlanmış taşınım soğutma sistemlerinin yerine yüksek soğutma kapasiteleri sebebiyle çarpan jet, sprej soğutma, zorlanmış

## 1. GİRİŞ

taşıyım ve daldırmalı soğutma gibi sıvı soğutma sistemleri ilgi odağı haline gelmiştir (Ali 2013). Bu sistemler yüksek soğutma kapasiteleri yanında sızıntı, korozyon, ekstra ağırlık ve yoğunlaşma gibi birtakım olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir.



**Şekil 1.2.** Farklı soğutma mekanizmalarının kapasiteleri Ali (2013)' den uyarlanmıştır

Sprey soğutma, sıvı jetleri veya damlacıkların ısınan yüzey üzerinde akışı vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Yüzeyden yayılan ısı, kaynama veya buharlaşma yoluyla sıvı damlacıklara aktarılarak hedef yüzeyde soğuma sağlanmaktadır. Bu sistemlerde düşük damlacık çapı sebebiyle ısı transfer yüzey alanı artırılarak yüksek ısı transfer performansı elde edilmektedir. Diğer soğutma yöntemlerine kıyasla oldukça verimli sistemler olmasına rağmen, sprej oluşturmak için yüksek güçlü pompa ve damlacık boyutlarında standart yakalamak için özel tasarlanmış nozzle gereksinimi bu sistemleri dezavantajlı hale getirmektedir (Cheng et al. 2016). Yüksek ısı transfer performanslarından dolayı çarpan jet uygulamaları, geniş çalışma alanı bulmuş bir diğer soğutma yöntemidir. Bu soğutma tekniğinde, jet huzmesi bir lüle ya da oluktan püskürtülen akışkanın, ısınan yüzeye çarptırılması sonucunda elde edilmektedir. Bu sistemlerde, akışkan ile yüzey arasındaki sınır tabaka inceltirilerek yüksek yerel ısı transfer performansı elde edilmektedir. Yöntemin çalışma parametreleri; lüle şekli, konfigürasyonu (tekli veya çoklu lüle vb.), yüzeye göre konumu ve soğutucu akışkan koşullarını (lüle giriş-çıkış hızı ve sıcaklığı) içermektedir. Hedef yüzeydeki üniform

olmayan soğutmadan dolayı, termal gerilimlerin oluşumu bu soğutma sisteminin temel handikapları içerisinde yer almaktadır (Demircan ve Türkoğlu 2010).

Mikro kanallı ısı alıcılar, yüksek ısı atımı özelliklerinden dolayı uygulamada sıkça başvurulan sıvı soğutma sistemlerinden bir diğeridir. Bu sistemlerde, bir plaka üzerine açılmış ayrık mikro kanallar ile alan/yüzey oranı artırılarak soğutma sağlanmaktadır. Soğutucu akışkanın mikro kanallara giriş-çıkış hızı, akışkan türü, mikro kanal boyutu ve şekli bu alanda çalışılmış yaygın parametreleri oluşturmaktadır. Mikro kanallı ısı alıcıların kullanıldığı sistemlerde ısı transferini artırmanın bir diğer etkili yolu ise, iş akışkanının akış sırasında faz değişim enerjisinden faydalanmaktır. Bu sayede soğutucu akışkan buhar fazına geçerken yüzeyden büyük miktarda ısı çekmektedir. Basınç kayıplarının fazla olması ve yerel sıcaklık farkları bu tür soğutma sistemlerinin başlıca dezavantajlarından (Ateş 2020).

Sıvı soğutma sistemleri, elektronik ekipmanın iş akışkanıyla temas şekline göre indirekt, direkt ve daldırmalı soğutma sistemleri olmak üzere üç temel sınıfta incelenmektedir. Dolaylı (indirekt) sıvı soğutma sistemlerinde sıvı, sıcak yüzeyle doğrudan temas etmemekte, bir ara ortama ardından sıvıya aktarılmaktadır. Isı transfer kabiliyetlerinden dolayı ara ortam olarak bakır ve alüminyum gibi metal malzemeler kullanılmaktadır. Isı emicisi üzerine cebri hava sirkülasyonu yerine sıvı akışı yapılması durumunda, zorlanmış hava soğutma sistemlerine kıyasla daha iyi ısı transferi sonuçları elde edilebilmektedir. Direkt sıvı soğutma sistemlerinde ise akışkan, aracı bir yüzey kullanılmadan doğrudan ısınan elektronik eleman (baskı devre kartı kısmı hariç) ile temas halindedir. Doğal taşınım, karma taşınım, laminar zorlanmış taşınım ve türbülanslı zorlanmış taşınım mekanizmaları direkt sıvı soğutma sistemlerinde uygulanabilmektedir (Nord and Zhao 2016).

Daldırmalı sıvı soğutma sistemlerinde ise, direkt ve indirekt sıvı soğutma sistemlerinden farklı olarak, ısınan elektronik ekipman tüm parçaları ile iş akışkanı içerisine daldırılmaktadır. Baker (1973)' in yılında küçük elektronik cihazları sıvı içerisine daldırarak tamamlamış olduğu deneyler bu alanda yapılmış öncü çalışmalar içerisinde gösterilebilir. Bu sistemlerde, ısı üreten elektronik bileşenler soğutucu akışkan

ile temas halinde olduğundan dolayı, kullanılan soğutucu akışkanın elektriksel olarak yalıtkan olması gerekmektedir (Warrier et al. 2012).

Elektronik düzeneklerin, uygun bir şekilde yüksek dielektrik mukavemete sahip sıvılara tamamen daldırılması ve yüksek soğutma potansiyeli nedeniyle, geleneksel soğutma uygulamalarına iyi bir alternatif olmuş durumdadır (Bar-Cohen and Schweitzer 1985). Bir dizi işlemcinin Floroinert sıvı ile doldurulmuş tank içerisine doğrudan daldırılması ile çok sayıda işlemcinin aynı anda soğutulabilmesi, daldırılmalı soğutma sistemlerinin soğutma kapasitesinin yanında ekonomik yönünü de gözler önüne sermektedir. Ayrıca, bu termal yönetim sistemi, konvensiyonel soğutma uygulamalarına kıyasla maliyet, ağırlık, boyut ve güvenlik bakımından daha avantajlı olduğu bilinmektedir. Maliyet analizi yapıldığı zaman en büyük kalemi oluşturan dielektrik sıvı gereksinimi için soğutma yükü cinsinden tahminde bulunmak mümkündür (100cc/kW) (Tuma 2010). Dolayısıyla bu sistemler, iş istasyonları, kişisel bilgisayarlar, güvenlik sistemleri, otomasyon sistemleri ve daha birçok uygulamada tercih edilebilecek basit ve son derece güvenilir termal yönetim alternatifidir (Tian et al. 1998).

Bu soğutma yöntemlerinde ısı atımı, ısınan yüzeyin sıcaklığı ile dielektrik akışkan sıcaklığı arasındaki farktan meydana gelmektedir. Eğer yüzey sıcaklığı, dielektrik akışkanın kaynama noktası sıcaklığından düşük ise ısı transferi tek fazda gerçekleşmektedir. Dinçer (1993) tarafından yapılan teorik ve deneysel çalışmada, küresel ve silindirik yüzeye sahip ısıtıcılar üzerine 1°C deki saf su 0,05 m/s hızda uygulayarak tek fazlı daldırılmalı soğutma mekanizması incelenmiştir. Diğer taraftan, eğer yüzey sıcaklığı dielektrik akışkan kaynama noktası sıcaklığının üzerine çıkarsa soğutucu akışkan faz değiştirmeye başlayacak ve sistem içerisinde hem sıvı hem de buhar fazı bulunacaktır. Leland and Chow (1993) FC-72 dielektrik akışkanının kaynama noktası sıcaklığının (56°C) üzerinde çalışarak iki fazlı daldırılmalı soğutma performansını değerlendirmişlerdir. Çift fazlı daldırılmalı soğutma uygulamalarında, havuz kaynama kritik ısı akısı (CHF) ısı transfer katsayısının üst limitini dolayısıyla soğutma yönteminin etkinliğini de belirlemektedir (Shah et al. 2016).

## 1. GİRİŞ

---

Daldırmalı soğutma sistemleri hava soğutma sistemlerine kıyasla ısı transfer katsayısında sağlamış olduğu artış araştırmacıları bu konu üzerine çalışmaya yöneltmiştir. Bu soğutma tekniğinin bazı avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Shah et al. 2019),

- Eklem sıcaklıklarını en aza indirir ve transistör kapı gecikmelerini önler,
- Elektronik ekipman ve bileşenleri için daha düşük çalışma sıcaklıkları sağlar,
- Elektrik oksidasyonu (aşınması) problemini ortadan kaldırır,
- Soğutma sistemi içerisinde fan, pompa vb. hareketli parça bulundurmaz ve sessiz çalışma avantajına sahiptir,
- İşlemcinin temiz bir ortamda çalışmasına olanak sağlar.

### 1.2. Tek Fazlı Daldırmalı Soğutma Uygulamaları

Faz değişimi içermeyen daldırma soğutmalı sistemler, ısı transfer katsayısı ( $<2 \text{ kW}/(\text{m}^2.\text{K})$ ) bakımından faz değişimi meydana gelen sistemlere nazaran daha düşük kapasitededir (Birbarah et al. 2020). Fakat hava soğutma sistemlerine nazaran oldukça etkin bir soğutma yöntemidir. Dielektrik akışkanların kullanıldığı sistemler, çip sıcaklıklarında ciddi derecede düşürebilmektedir.

Birçok ticari kuruluş ve araştırmacı faz değiştiren ve değiştirmeyen sıvı daldırma sistemlerinin termal verim ve güvenilirlik bakımından avantajlı olduğunu ispatlamışlardır. Örneğin; IcetopeTM, geliştirdiği PetaGen sistemi ile güç tüketim etkinliğini 1,05 seviyelerine indirmeyi başardığını belirtmiştir. Diğer taraftan Hong Kong da faaliyet gösteren bir veri merkezinde, daldırmalı soğutma sayesinde güç kullanım etkinliğinin 1,02 dolaylarına ve %95 oranında elektrik tasarrufu sağlandığı bildirilmiştir (Gess et al. 2016).

### 1.3. Çift Fazlı Daldırmalı Soğutma Uygulamaları

Isınan yüzey sıcaklığının, sıvı basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığını aşması durumunda, iş akışkanı, buharlaşmanın meydana gelmesi için gerekli olan buharlaşma gizli ısını yüzeyden soğurarak faz değiştirmeye başlar. Kaynama sırasında katı yüzeyde oluşan buhar kabarcıkları, sıvı ortam içerisinde kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile hareket

ederek ısı enerjisini daha düşük enerjili sıvıya aktarır. Neticede, elektronik ekipmandan çekilen ısı enerjinin, faz değişimi için gerekli olan gizli ısı için kullanımı ve kabarcık hareketini destekleyen kaldırma kuvvetleri nedeniyle, kaynama prosesi içeren sistemlerde ulaşılan ısı transfer katsayısı değerleri hal değişiminin olmadığı sistemlerde elde edilen değerlerden oldukça yüksektir.

Kaynama ihtiva eden ısı transfer uygulamaları mekanizma oluşumuna ve akış hareketine bağlı olarak iki ana gruba ayrılırlar. Bunlardan, mekanizma oluşumuna göre kaynama çeşitleri; çekirdek kaynama, konvektif kaynama ve film kaynama olarak sınıflandırılırlar. Çekirdek kaynama; buhar kabarcıklarının oluştuğu kaynama olarak tanımlanırken, konvektif kaynama; ısınan yüzeyde kabarcık oluşmadan sıvı-buhar ara yüzeyinde oluşan kaynamadır. Son olarak film kaynama ise, kabarcıkların birleşerek yüzeyi kaplaması ile sonuçlanan ve ısının buhar tabakası içerisinde iletildiği kaynama mekanizmasıdır.

Akışkan hareketi içeren kaynama çeşitleri havuz kaynama ve akış kaynama olarak ikiye ayrılırlar. Havuz kaynamada akışkan hareketi, doğal taşınım hareketi ve kaldırma kuvvetleri nedeniyle yüzeyden kopan kabarcıkların hareketiyle meydana gelir. Zorlanmış taşınım kaynaması olarak da bilinen akış kaynamada ise havuz kaynamanın aksine sıvı hareketi cebri olarak (pompa yardımıyla) sağlanır. Sistem tasarımında sağladığı avantajlardan dolayı kaynama mekanizmaları, nükleer santraller, bilgi işlem teknolojileri, güç santralleri, veri depolama merkezleri, savunma sanayi, soğutma ve iklimlendirme sistemleri, elektronik sistemlerin soğutulması vb. birçok alanda uygulanmaktadır.

Kaynama olayının karmaşık fiziği, süreç boyunca meydana gelen akışkan hareketlerini ve ısı aktarım prosesini tanımlamak için korunum denklemlerinin oluşturulmasını imkânsız hale getirmiştir (Incropera et al.2011). Farklı çalışmalardan sağlanan veriler, kaynama fiziğindeki anlamlandırmada ve ilgili deneysel verileri ilişkilendirmede yeterli değildir. Bu sebeple araştırmacılar ısı transfer performansını belirlemek için deneysel çalışmalar yürütmekte veya literatüre sunulmuş ampirik bağıntıları kullanmaktadır (Cengel and Ghajar 2015).

### 1.4. Dielektrik Sıvıların Kaynama Karakteristiği ve Kabarcık Oluşumu

Havuz kaynama süreci, ısıtılan yüzey sıcaklığının aynı basınca karşılık gelen akışkan doyma sıcaklığını aşması ile başlar. Isı kaynağı yüzeyinde kabarcık oluşumu başlamadan önce ( $\Delta T_{kızma} < 5^\circ\text{C}$ ), ısı transferi doğal taşınım ile gerçekleşir. Sıcak yüzey ile yığın sıvı arasındaki sıcaklık farkından dolayı, yüzeye yakın sıvı tabakasında yoğunluk gradyanı oluşur. Yoğunluk farkından kaynaklanan kaldırma kuvveti, yüzeye yakın bölgede ısınarak yukarı yönlü hareket eden sıvı ile yığın akışkan içerisindeki soğuk akışkanın yer değiştirmesine olanak sağlar. Üniform olarak ısıtılan bir yüzeyden doğal taşınım ile transfer edilen ısı, sıcak yüzey ile yığın sıcaklık farkının 1.2 inci kuvveti ile orantılıdır (Chang and You 1996; Rainey and You 2001; El-Genk 2012).

$$q'' \propto (T_d - T_{doyma})^{1.2} \quad (1.2)$$

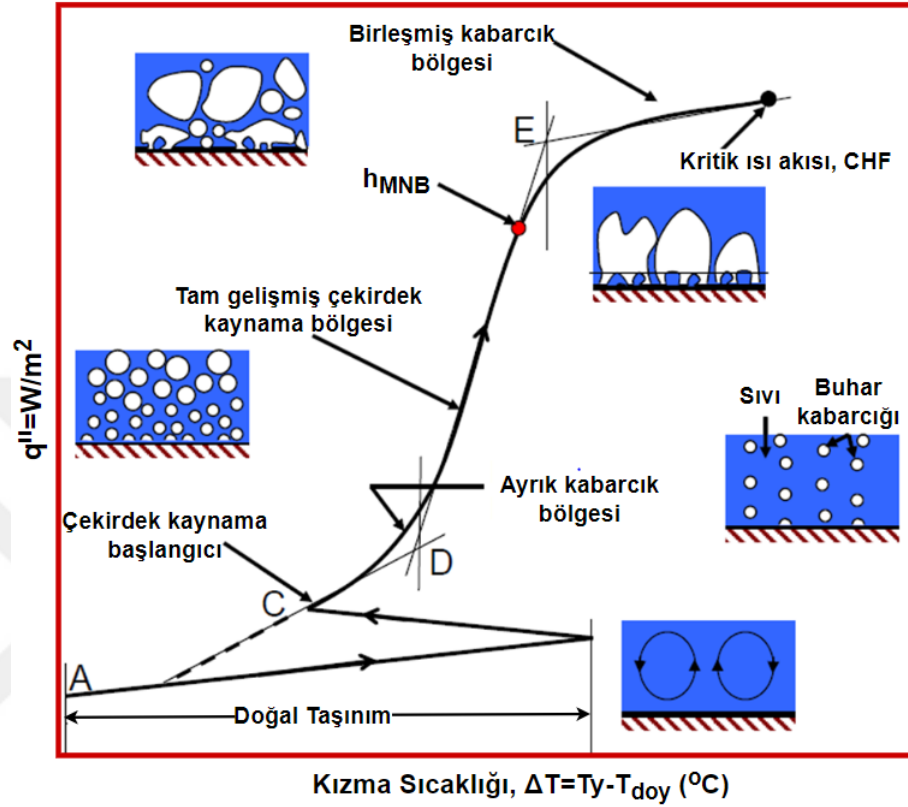
Doğal taşınım, akışkan doyma sıcaklığını aşan yüzey sıcaklıklarında meydana gelse de çekirdek kaynamayı başlatmak için daha yüksek yüzey sıcaklığına ihtiyaç vardır.

Dielektrik akışkanlar termofiziksel özellikleri bakımından geleneksel ısı transfer akışkanlarına göre farklılık gösterirler. Dielektrik akışkanlar düşük yüzey gerilimleri ve yüksek ısılatma kabiliyetlerinden dolayı sıcak yüzey üzerindeki boşlukları daha iyi doldururlar. Yüzey oluklarında daha az miktarda hava hapsedilmesi kabarcıklanmayı geciktirir. Bu gecikme ısı transfer yüzeyinde termal kararsızlık ve ani sıcaklık artışına sebep olur. Ardından kabarcıklı kaynamanın başlamasıyla birlikte yüzey sıcaklığı düşer. Literatürde başlangıç aşımı, sıcaklık kayması ve sıcaklık değişimi olarak tanımlanan bu termal şok durumu, malzemelerin sıcaklık dayanımını aşması nedeniyle bileşen güvenliği bakımından istenmeyen bir durumdur (El-Genk and Bostanci 2003; Bejan and Kraus 2003).

Daldırılmalı soğutma uygulamalarında, elektronik ekipman doğrudan sıvı ile temas halindedir. Dolayısıyla bu sistemlerde elektriksel kısa devre ciddi bir sorundur. Bu bakımdan daldırılmalı soğutma uygulamalarında tercih edilecek olan akışkanların dielektrik katsayıları düşük ve dielektrik dayanımları yüksek olmalıdır. Su ve yağ gibi geleneksel soğutucuların termal performansı dielektrik sıvıların termal performansından

## 1. GİRİŞ

daha iyi olmasına rağmen özellikle elektriksel dayanımlarından dolayı dielektrik sıvılar tercih edilmektedir (Chandrasekaran et al. 2017). Şekil 1.3’ da dielektrik sıvılara ait havuz kaynama eğrisi ve akış desenleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Dielektrik sıvıların genel havuz kaynama eğrisi (Ali 2013)

Dielektrik sıvıların kaynama karakteristiğini belirlemede dört temel akış deseni vardır. Bunlar doğal taşınım bölgesi, ayırık kabarcık bölgesi, tam gelişmiş çekirdek kaynama bölgesi ve birleşmiş kabarcık bölgesi olarak sınıflandırılabilir. Doğal taşınım bölgesinde, sıcak yüzeye uygulanan ısı akısının artırılmasıyla birlikte, yüzey sıcaklığı akışkan havuz sıcaklığından daha fazla yükselir. Bu nedenle, sıcak yüzeye yakın bölgeler ile uzak bölgeler arasında yoğunluk gradyanı oluşur. Yoğunluk gradyanı, mikro akışkan hareketine sebep olan kaldırma kuvvetleri ile sonuçlanır. Kızma sıcaklığı çekirdek oluşumunu destekleyecek seviyelere ulaşınca kadar ısı aktarımı katı sıvı ara yüzeyinde doğal taşınım mekanizmasıyla gerçekleşir. Dielektrik sıvılarda kabarcık oluşumu yüksek kızma sıcaklıklarında meydana gelir. Bunun asıl sebebi, dielektrik sıvıların yüzey üzerindeki boşlukları oldukça iyi bir şekilde doldurması ve buna bağlı olarak hapsolmuş hava hacminin küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Kızma sıcaklığının artışıyla birlikte yüzey boşluklarında birikmiş hacim termal genleşme ile genişleyerek kabarcık

oluşumunu başlatır. Kabarcık çekirdeklenmesi ve gelişmesiyle birlikte yüzey sıcaklığında ani bir düşüş görülür. Çekirdek kaynamanın başladığı noktaya karşılık gelen kızma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda kabarcıklanma hızlanarak devam eder. Kabarcıklanmadan hemen önce yüzey sıcaklığında görülen artış başlangıç aşımı olarak tanımlanmaktadır. Başlangıç aşımı, sistem güvenliğinin temelini oluşturan bir büyüklük olarak değerlendirilmektedir. Yüzey morfolojisi ve akışkan türüne göre değişiklik gösteren bu büyüklüğün kontrolü kaynama sürecinin sürdürülebilirliğinin sağlanması bakımından dikkat edilmesi gereken önemli bir parametredir. Literatürde yapılan çalışmalar, dielektrik özelliği bakımından faydalı olan sıvılarda görülen sıcaklık kayması sorununu kontrol altında tutabilmeye yöneliktir (Rainey and You 2000). Çekirdek kaynamanın başlangıcıyla birlikte yüzeyde oluşan ve gelişen kabarcıklar kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle yüzeyden ayrılırlar. C-D bölgesi olarak ifade edilen kısımda, kabarcık oluşum frekansı düşüktür ve ayrı kabarcıklar serbest yüzeye doğru hareketlerini tamamlayarak sönmülenirler. Artan ısı akısıyla birlikte yüzeydeki aktif kabarcıklanma bölgesi sayısı artar. Dolayısıyla, yüzey üzerindeki kabarcık yoğunluğu artar. Tam gelişmiş çekirdek kaynama bölgesi olarak tanımlanan bu bölge D noktasından ısı transfer katsayısının maksimum değerini aldığı  $h_{MNB}$  noktasına kadar devam eder. Bu bölgede kızma sıcaklığındaki artış sınırlı olmasına rağmen ısı transfer katsayısında ciddi derecede artış sağlanır. Bu bölgede, yüzeyden ayrılan kabarcıklar sıcak yüzey etrafında çalkantı oluşturarak akış düzensizliği oluşturlar. Bu sebeple, tam gelişmiş çekirdek kaynama bölgesi boyunca ısı transfer katsayısı artar ve  $h_{MNB}$  noktasında maksimum değerini alır.  $h_{MNB}$  noktasından sonra artan ısı akısıyla birlikte kabarcık sayısındaki artış büyüyen kabarcıkların birleşmesine olanak sağlar. Bu durum, sıcak yüzey üzerinde lokal kuru bölgeler oluşmasına sebep olur. Yüzey üzerinde ıslanmayan bölgelerin varlığı kızma sıcaklığında anormal artışlara neden olur. Sonuç olarak, Şekil 1.3’ da görüldüğü gibi daha düşük eğim ve daha yüksek kızma sıcaklığı ile karakterize edilen ve kabarcık birleşmesini ihtiva eden çekirdek kaynama eğrisinin dördüncü bölgesi oluşur. Bu bölgenin başladığı  $h_{MNB}$  noktasından itibaren, yüzeyi kaplayan buhar tabakasının oluşturduğu ilave dirençten dolayı ısı transfer katsayısı azalır. Bu bölgenin sonunda yüzey üzerindeki kuru bölgelerin artışı malzemenin sıcaklık dayanımını aşabilecek kızma sıcaklığının oluşmasıyla sonuçlanır. Bu nokta kritik ısı akısı olarak tanımlanır ve soğutma mekanizması için aşılması gereken sınırı ifade eder.

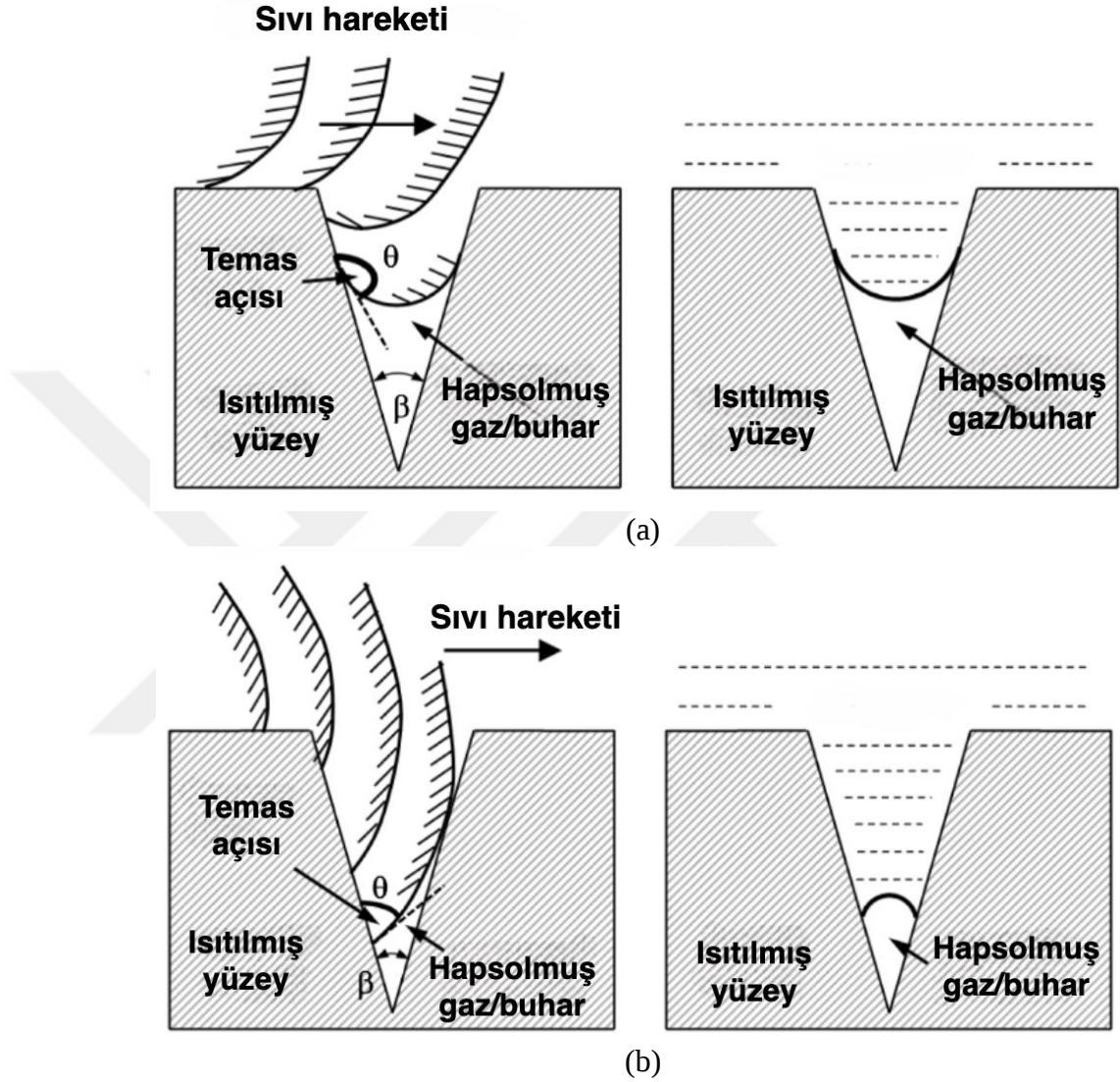
Bir önceki bölümde açıklanan suyun kaynama eğrisi ile dielektrik sıvıların kaynama eğrileri genel anlamda benzer olmalarına rağmen spesifik noktalarda farklı karakter göstermektedirler. Kritik ısı akısı bütün sıvıların kaynama eğrisinde ortak temeli oluşturmaktadır. Akışkan türüne, yüzey yapısına ve sistem şartlarına bağlı olarak farklı değerler alan CHF için birleşim noktası, sistem güvenliği ve termal performans bakımından kritik seviye olmasıdır.

### 1.4.1. Kabarcık oluşumu

Kaynamalı ısı transfer uygulamalarında gerek termal performans artırıcı yöntemleri uygulamada gerekse kaynama fiziğinin ayrıntılı bir şekilde kavranması için kabarcık oluşumunun incelenmesi oldukça önemlidir. Mühendislik uygulamalarında kabarcık çekirdeklenmesi termal kabarcık ve hidrodinamik kabarcık olmak üzere iki şekilde görülür. Termal kabarcık, sıcak yüzey ile temas halindeki sıvının aşırı kızdırılması ile oluşurken, hidrodinamik kabarcık ise yerel basıncın doyma basıncının altına düşmesi ile meydana gelir. Her iki kabarcık türünü tetikleyen nedenler farklı olduğundan farklı karakteristik özellikler gösterirler. Bu kısımda kaynama prosesinde oluşan termal kabarcıklar üzerinde yoğunlaşılacaktır.

Kabarcık oluşumu, sıvı ile temas halindeki sıcak yüzeyin bazı bölgelerinde birikmiş veya hapsolmuş havanın genleşerek büyümesi ve belirli bir büyüklüğe ulaştıktan sonra yüzeyden ayrılmasıyla sonuçlanan fiziksel bir süreçtir. Kabarcık oluşumu, yüzeyde hapsolmuş gaz miktarı ile doğrudan orantılıdır. Dolayısıyla yüzey boşluklarında biriken gaz miktarı, yüzey morfolojisi ve akışkan türüne bağlıdır. Sıvı içerisine daldırılan bir yüzey, mikro boyuttaki hava cepleri içerisine hapsolmuş gaz ile birlikte gaz-sıvı arayüzeyi oluşturarak çekirdek oluşumu için odak noktası görevi görür. Kabarcık oluşumunu tetikleyen mikro oyuk sayısının artışı düşük kızdırma sıcaklıklarında çekirdek oluşumuna neden olur. Dolayısıyla ısınan gövdeye uygulanan yüzey işlemleri kabarcık oluşumu ve kaynama başlangıcı bakımından oldukça önemlidir. Kabarcık oluşum sürecini etkileyen bir diğer parametre ise akışkanın ıslatma kabiliyetidir. Düşük ıslatma kabiliyetine sahip akışkanlar boşluk boyunca ilerlerken, sıvı boşluk dibine ulaşmadan önce boşluğun karşı duvarına çarpar dolayısıyla yüzey boşluğu içerisinde fazla miktarda hava hapsedilir (Şekil 1.4). Yüksek ıslatma kabiliyetine sahip akışkanlarda ise bu durum

tam tersidir. Dolayısıyla, ıslatma kabiliyeti düşük olan sıvılar yüzey boşluklarında daha fazla hava tutulmasına neden olduğundan kabarcık oluşumu hızlanır ve çekirdek kaynama daha düşük sıcaklıklarda başlar.

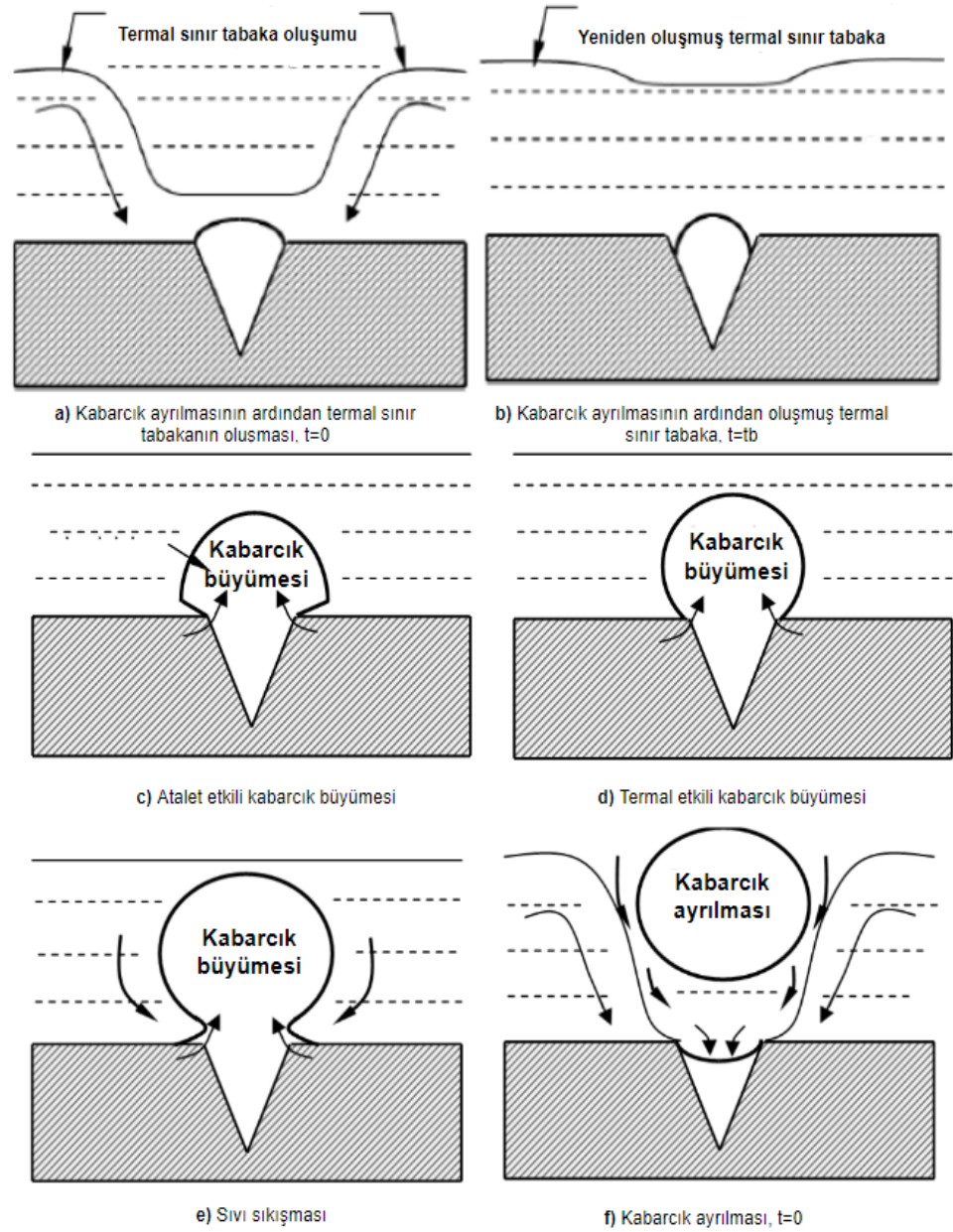


**Şekil 1.4.** Sıvıların yüzey boşluğu boyunca hareketi. (a) ıslatma kabiliyeti düşük akışkanlar (b) ıslatma kabiliyeti yüksek akışkanlar.

Dielektrik sıvılar düşük yüzey gerilimleri ve yüksek ıslatma kabiliyetlerinden dolayı yüzey boşluklarında çok az miktarda hava hapsedilmesine neden olur (Reed and Mudawar 1999). Dolayısıyla kabarcık oluşumu yüksek kızdırma sıcaklıklarında gerçekleşir. Yüzey sıcaklığının artışıyla birlikte boşluklarda sıkışmış gaz hacmi termal genişlemeden dolayı artar ve sonunda çekirdek kaynama başlar. Çekirdek kaynama başlangıcından önce yüzey sıcaklığında görülen artış sıcaklık kayması olarak tanımlanır.

Pürüzsüz yüzeylerde kabarcık oluşumu gecikeceğinden dolayı sıcaklık kayması 35 K seviyelerine kadar çıkabilmektedir (El-Genk and Bostanci 2003).

Şekil 1.5' te sıcak bir yüzey üzerinde kabarcık oluşumu aşamaları gösterilmiştir. Kabarcık oluşumu, gelişimi ve yüzeyden ayrılmasına kadar geçen süreç dört temel aşama ile idealleştirilebilir (Ali 2013). Bunlardan ilki, gelişmiş kabarcığın yüzeyden ayrılmasından hemen sonra başlayan ve yüzey boşluğunda tekrar kabarcık filizlenmesiyle son bulan süredir. Yüzeyden ayrılan kabarcıktan sonra tekrar kabarcık oluşumuna kadar geçen süre bekleme süresi olarak tanımlanır. Bu süreçte, sıcak yüzey yakınındaki termal sınır tabakayı yok ederek ayrılan kabarcığın bıraktığı boşluğu havuz içerisindeki sıvı molekülleri doldurma eğilimindedir. Bekleme periyodunda ısıtılan yüzeyden yığın sıvıya ısı transferi gerçekleşir ve böylelikle ısıtılan yüzeyde aşırı kızdırılmış bir ısı tabaka oluşur (Şekil 1.5b). Sıvı ile dolan boşluk yüzeyinde, termal sınır tabakanın tekrardan oluşması için bir miktar süre geçer. Bu sürenin ardından ikinci aşama olan kabarcık çekirdekleri oluşmaya başlar. Bir sonraki aşamada ise, kabarcık embriyoları büyümeye başlar. Bu aşamada kabarcığın etrafı aşırı kızgın sıvı ile kaplıdır. Bu yüzden sıvıdan arayüzeye doğru ısı transfer hızı oldukça yüksektir. Sıcak yüzey ile sağlanan enerji katı, sıvı ve buhar arayüzeyindeki sıvıyı buharlaştırarak kabarcık büyümesini kuvvetlendirir. Sıvı atalet kuvvetleri kabarcık büyüme hızını önemli ölçüde etkilediğinden dolayı bu aşama atalet kontrollü kabarcık büyüme periyodu olarak adlandırılır (Carey 2008). Şekil 1.5c'te gösterildiği üzere atalet kontrollü büyüme periyodunda kabarcık gelişmesi sırasında sıcak yüzey ile kabarcığın alt kısmındaki sıvı-buhar arayüzeyi arasında ince mikro sıvı tabakası kalır. Mikro sıvı tabakası ısıtılan yüzey ile sıvı-buhar arayüzeyi arasında doğal bir ısı transfer alanı oluşturur ve buharlaşmayı hızlandırır. Kabarcık büyüdükçe sıvı buhar arayüzeyindeki buharlaşma tarafından yönlendirilen büyüme hızı artar (Şekil 1.5d). Büyüme periyodunun bu aşaması termal tahrikli kabarcık büyümesi olarak tanımlanır (Carey 2008). Kabarcık büyüdükçe kaldırma kuvvetleri baskın hale gelerek kabarcığı yüzey boşluğunda tutmaya çalışan yüzey gerilim kuvvetini aşar. Son olarak sıvı sıkışır ve kabarcık yüzeyden ayrılmaya başlar (Şekil 1.5e-f). Kabarcık ayrıldıktan sonra havuz içerisindeki sıvı, yüzeyde oluşan boşluğu doldurur ve döngü tekrar başlar.



**Şekil 1.5.** Kabarcık oluşum döngüsü (Ali 1962)

Isınan yüzey üzerinde kabarcık çekirdeklenmesini konu alan öncü çalışma Hsu (1962) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada çekirdek kaynama sürecinde yüzey yapısının oldukça önemli olduğunu ve çekirdek embriyosunun baloncuk haline gelmesi için gerekli olan şartın, çekirdek embriyosunu çevreleyen sıvının aşırı ısıtılmasına bağlı olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca bu çalışmada, sadece kısıtlı bir aralıktaki boşluk boyutlarının aktif kaynama bölgeleri haline gelebileceği, aktif çekirdeklenme bölgesi oluşturabilecek boşluk boyutlarının tespiti için ise, duvar aşırı kızdırma sıcaklığı ve ısı akısının fonksiyonu olarak yarı teorik bir model sunulmuştur. Bu model ile etkin boşluk boyutları maksimum ve minimum seviyeler için; sistem basıncı, termofiziksel özellikler, aşırı

soğutma ve embriyoyu çevreleyen aşırı ısıtılmış sıvı tabakası kalınlığına bağlı değişimleri karakterize edilmiştir. Isıtılan hedef yüzeyde konik şekildeki aktif çekirdeklenme boşluklarının maksimum ve minimum yarıçap aralığını tanımlayan ve Hsu modeli olarak bilinen model Denklem (1.3)' deki gibi ifade edilmektedir.

$$\left\{ r_{c,\max} \right\} = \frac{\delta}{4} \left[ 1 - \left( \frac{T_s - T_b}{T_s - T_b} \right) \{ \pm \} \sqrt{1 - \left( \frac{T_s - T_b}{T_s - T_b} \right)^2 - \frac{12.8 \sigma T_{doy}}{\rho_v h_{fg} \delta_t (T_s - T_b)}} \right] \quad (1.3)$$

Bu denkleme göre kareköklü ifadeyi sıfıra yaklaştıran durumlarda aktif kabarcıklenme oyuk yarıçapı için maksimum ve minimum değerler eşitlenir. Bu durumun olduğu kızdırma sıcaklığında sadece bir oyuk boyutunda aktif çekirdeklenmenin başlayacaktır. Yani, bu değer altındaki kızdırma sıcaklıklarında, kabarcıklenme için aktif bir oyuk olmadığı anlamına gelmektedir. Carey (2020) tarafından yapılan çalışmada ise yüzey üzerinde bulunan boşlukların aktif çekirdeklenme bölgesi oluşturabilmesi için boşluk ağzı yarıçapının belli bir kritik değerden büyük olması gerektiği savunulmuştur. Bu kritik değeri sistemde kullanılan akışkanın termofiziksel özellikleri ve aşırı kızdırma sıcaklığı cinsinden karakterize ederek Denklem (1.4)' ü literatüre kazandırmıştır.

$$r_c = \frac{2 \sigma T_{doy} \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right)}{h_{fg} - (T_s - T_{doy})} \quad (1.4)$$

Bu denklemde,  $T_s$  yüzey sıcaklığını  $T_{doy}$ , sabit basınçta sıvının doyma sıcaklığını v ve l indisleri ise sırasıyla buhar ve sıvı fazlarını temsil etmektedir. Yukarıda özetlenen her iki yaklaşım da çekirdeklenmenin başlaması için kritik oyuk yarıçapları temelinde matematiksel modeller sunulmuştur. Bu modeller çekirdeklenme sürecini etkileyen parametreler bakımından araştırmacılara fikir sunmaktadır. Kızdırma sıcaklığı, akışkan termofiziksel özellikleri, termal sınır tabaka kalınlığı, yüzey morfolojisi gibi parametrelerin kabarcık oluşumu ve kaynama başlangıcına etkilerinin anlaşılması için temel oluşturmaktadır (Ghosh et al. 2016).

### 1.4.2. Kabarcıklı kaynama mekanizmaları

Isı transfer katsayılarında kayda değer artışlar görülmesinden dolayı kabarcıklı kaynama ısı transfer mekanizmalarını anlamaya ve ilişkilendirme yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, ısı transfer mekanizmalarını anlamaya yönelik temel adımlar atılmış olsa da kaynama ısı transfer hızını etkileyen ve değiştiren mekanizmalar halen daha güncel tartışma konusudur. Öte yandan, kaynama ısı transfer hızını belirlemeye yönelik çeşitli korelasyonlar sunulmuş olmasına rağmen, bu korelasyonlar kesin ve net tahmin olanağı sunmamaktadır. Kaynamalı ısı transferi sırasında görülen faz değişimi ve karmaşık akışkan hareketlerinin varlığı, araştırmacılar arasında birbirlerine muhalif görüşlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

Jacob (1936) tarafından yapılan öncü çalışmada, kaynamada yüksek ısı transfer katsayılarına ulaşılmasının tek kaynağın gizli ısı olmadığını, sıcak yüzeyde kabarcık oluşumu ile yüzey yakınında etkin hale gelen taşınım mekanizmasının da ciddi derecede katkı sağladığını vurgulamıştır. Bu nedenle, yüzeyde oluşan kabarcıkların yüzey etrafında oluşturduğu çalkantı ve karışım hareketinin ısı transfer hızını arttırdığını belirtmiştir. Sıcak yüzey üzerinde büyüyen ve ardından yüzeyden ayrılan kabarcıklar sıvı içerisinde çalkantı ve karışım neden olarak türbülans oluşturur. İvmesi yüksek olan akışkan sıcak yüzeyden aldığı enerjiyi soğuk sıvıya taşıyarak ısı transfer hızının artmasına neden olur. Kabarcık çalkalanması olarak da adlandırılan bu modelde zorlanmış taşınımlı ısı transfer mekanizmasına benzetilerek kabarcıklı kaynama için ısı transfer korelasyonları türetilmiştir. Rohsenow (1952) tarafından, sıcak yüzey yakınındaki kabarcık hareketinin sebep olduğu çalkantı mekanizmasını temel alan kabarcıklı kaynama ısı transferi için bağıntı türetilmiştir (Denklem 1.5). Bu bağıntı, kabarcıklı kaynama uygulamalarında sıkça başvurulmuş korelasyonlardan birisi olarak kullanılmaktadır. Bu denklemde,  $l$  ve  $v$  sırasıyla doymuş sıvı ve buhar fazlarını temsil etmektedir.  $\sigma$ , yüzey gerilimini ifade eder ve (N/m) birimindedir.  $C_{sf}$  sabiti ve  $n$  üssü yüzey-sıvı çiftine bağlı değişen sabit değer olarak tanımlanmıştır.

$$\dot{q}_{kabarcıklı} = \mu_l h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{c_{p,l} \Delta T}{C_{sf} h_{fg} Pr_1^n} \right]^3 \quad (1.5)$$

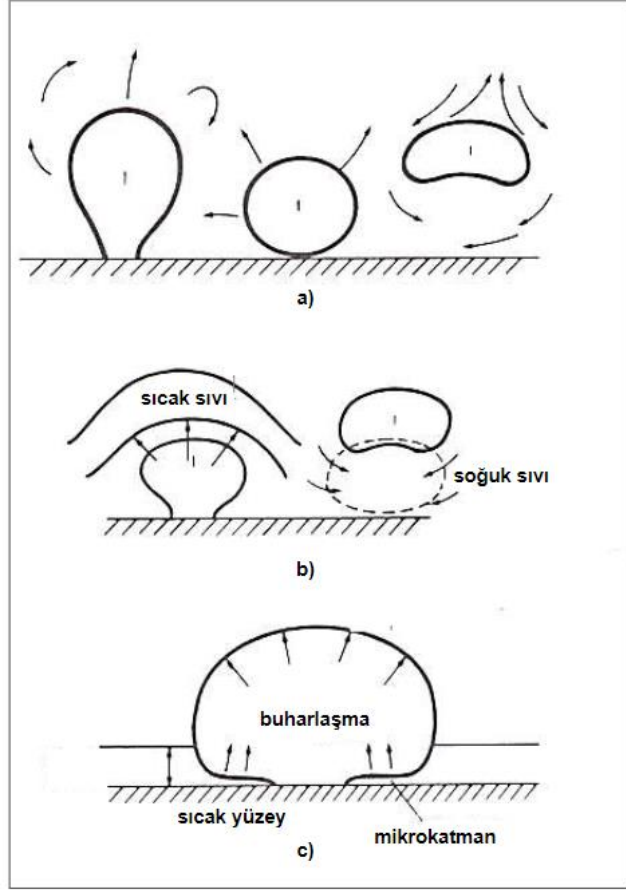
Diğer taraftan, Gunther and Kreith (1950) ve Gunther (1951) tarafından aşırı soğuk kaynama şartlarında yapılan çalışmalarda, oluşan kabarcıkların yüzeyden ayrılmadan sönmüştüğünü görüntülemişlerdir. Buna rağmen ısı transfer hızlarının kabarcıklı doymuş kaynama çalışmalarında elde edilen değerlere yakın olduğunu ileri sürmüşlerdir. Forster and Zuber (1955) tarafından yapılan çalışma ise önceki çalışmaların aksine, kabarcıklanma ile oluşan çalkantı hareketinin doymuş kaynama prosesleri için elverişli bir yaklaşım sunmasına rağmen doymamış kabarcıklı kaynama sürecindeki ısı transfer fiziğini açıklamada yetersiz kaldığını ifade etmişlerdir. Araştırmacılar arasında oluşan fikir ayrılığı çekirdek kaynamalı ısı transferi fiziğinde yeni bir mekanizmanın ileriye sürülmesiyle sonuçlanmıştır. Mikrotaşınım mekanizması olarak isimlendirilen bu mekanizmada, sıcak yüzey etrafındaki sıvı tabakasının sürekli hareket halinde olduğu savunulmaktadır. Kabarcık büyümesi ile, soğuk sıvının sıcak yüzeylere doğru ivmelenmesine dayanan bu yeni çalkantı mekanizmasında, ısı transferi sıvı ve buharın sürekli titreşiminden ileri gelmektedir (Stephan 1977). Moleküler düzeydeki titreşim hareketi şiddetli olduğundan, yüzey bitişikliğindeki sıvı katmanının sıcaklığı bu titreşimden etkilenir. Dolayısıyla mikro taşınım mekanizmasının bir sonucu olarak, bitişik sıvı katmanı ile sıcak yüzey arasında oluşan sıcaklık farkı, ısı transfer miktarını belirlenmesinde yol gösterici bir araçtır.

Konu ile alakalı yapılan bir diğer çalışmada, sıcak yüzeyde oluşan buhar kabarcığı ile ısıtma yüzeyi arasında hiçbir şekilde sıvı tabakasının olmadığı ve kabarcığın yüzeye sıkıca yapıştığı ileri sürülmüştür. Han and Griffith (1965) ile Mikic and Rohsenow (1969) geçici ısı iletim mekanizması olarak tanımlanan bu modelde ısı transferinin, sıcak yüzey ile bitişik sıvı tabakası arasında iletim kaynaklı gerçekleştiği savunulmaktadır. Han and Griffith (1965) sıcak bir yüzeyden havuz kaynama sürecinde yığın ve doğal konveksiyon bölgesi olmak üzere iki bölgeye ayrıldığını ileri sürmüşlerdir. Yığın taşınım bölgesinde ısı transfer mekanizmasının geçici ısı iletim fenomeni ile sürdürüldüğünü vurgulamışlardır. Bu fenomene göre yüzeye bitişik aşırı ısıtılmış katmanın, yüzeyden ayrılarak sıvı içerisinde ivmelenen kabarcık kuvvetinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, gelişen kabarcık yüzeyden ayrıldıktan sonra aşağı akım bölgesinde termal sınır tabaka içerisinde vakum etkisine sebep olan sürüklenme akışının üretildiği ileri sürülmüştür. Vakum etkisiyle termal sınır tabakanın bir bölümünün ayrılarak sıvıya

kariştiğı ve kopan sınır tabaka hacminin kabarcık hacminin yaklaşık yarısına eşit olduğunu vurgulamışlardır.

Stephan (1977) tarafından yapılan çalışmada ısı transfer mekanizmasına etki eden hipotezler sıralanmıştır. Bu çalışmada yapılan değerlendirmede, kabarcıklı kaynama ısı transfer prosesine etki eden üç temel mekanizma vardır. Bu mekanizmalar, mikrotaşınım mekanizması, geçici ısı iletim mekanizması ve mikro tabaka mekanizması olarak sıralanmıştır. Kaynama sürecinde oluşan mekanizmalar ve akış desenleri şekil 1.6' da verilmiştir. Önceki paragraflarda farklı araştırmacılar tarafından öne sürülen ve savunulan mekanizmalardan farklı olarak ısı transfer sürecini etkileyen bir diğer fenomen mikro tabaka teorisidir. Stephan (1977) tarafından yapılan derlemede, mikro tabaka teorisine göre ısıtma yüzeyi ile kabarcık arasındaki ince sıvı tabakasının buharlaşmasıyla kabarcık gelişimi sürdürölür. Bu süreçte, sıvı katman sıcak yüzeyden çektiği ısıyı buhar kabarcığına aktarır bu sayede yüzey sıcaklığı azalır. Kabarcık altında ısı transferine katkı sağlayan bu ince mikro tabakanın kalınlığını belirleme noktasında ciddi sorunlar yaşandığından doğru tahmin edilememektedir.

Katı- sıvı ve sıvı-buhar arayüzeylerinde yüzey gerilimi kuvvetleri, sıvı hareketini tetikleyen ve termokapiler etki olarak tanımlanan bir fenomen oluşturur. Termokapiler etki ısı transfer katsayısında kayda değer artışların oluşmasına sebep olur (Brown (1967) ;Petrovic et al. 2004). Yüzey gerilim kuvvetlerinin oluşturduğu akışkan hareketleri bir başka çalışmada ise marangoni taşınım etkisi olarak isimlendirilmiştir (Tong et al. 1990). Aynı çalışmada, marangoni taşınım etkisinin aşırı soğutulmuş kabarcıklı kaynama uygulamalarında yeteri kadar baskın olmadığını ve ihmal edilebilir seviyelerde olduğu savunulmuştur.



**Şekil 1.6.** Kabarcıklı kaynama ısı transfer mekanizmaları. a) Mikrotaşınım modeli, b) Geçici ısı iletim modeli, c) Mikrokatman modeli (Tong and Tang 1997).

### 1.5. Daldırmalı Soğutma Tekniğinde Kullanılan Akışkanlar

Taşınım ile ısı transferinde ısı transfer mekanizması ve akışkan tipine göre elde edilebilecek ısı transfer katsayısı ve ısı akısı aralığı değerleri Çizelge 1.1’ de özetlenmiştir. Soğutma amaçlı doğrudan sıvı soğutmasının kullanılması durumunda akışkan, sıcak yüzeyle temas halinde olduğu için ısı transferi performansı yüksek olurken ısıtma yüzeyini çevreleyen soğutma sıvısı ile bileşen üzerinde homojen sıcaklık dağılımı sağlanabilir. Ancak, elektronik ekipmanın sıvı ile direkt teması sızıntı veya elektrik arkı oluşma ihtimalini kuvvetlendirmektedir. Bu sebeple, su ve diğer soğutma sıvılarından farklı olarak, dielektrik dayanımları yüksek ve dielektrik katsayıları düşük ve termofiziksel veya kimyasal stabiliteye sahip akışkanların kullanılması oldukça önemlidir.

## 1. GİRİŞ

Dielektrik sıvılar elektriksel direnç ihtiyacının olduğu birçok uygulamada kullanım alanı bulmuştur (lazer ve güç elektroniği endüstrisi, savunma sistemleri, veri işlem merkezleri, uzay ve havacılık sanayisi vb). Daldırma soğutma sistemlerinde kullanılan bazı dielektrik sıvılar ve termofiziksel özellikleri Çizelge 1.2’ de sıralanmıştır. Elektriksel yalıtım gösteren sıvılar kimyasal bileşen temelinde dört ana grup içerisinde sınıflandırılmaktadır. Bunlar; aromatikler, alifatikler, silikon esaslı sıvılar ve florokarbon esaslı sıvılardır. Aromatikler, aril hidrokarbonlar olarak da adlandırılırlar. Halka formundaki karbon grupların ardışık çift ve tek bağ yapısı ile birleşiminden oluşmuş hidrokarbonlardır. Dietil benzen, tolüen, benzen ve ksilen gibi sıvılar bu grubun içerisinde. Alifatikler ise, kovalent bağ ile birbirine bağlanmış atomların oluşturduğu, içerisinde karbon ve hidrojen atomlarını barındıran hidrokarbon grubu sıvılar olarak tanımlanırlar. Bu sıvılar içerisinde mineral yağlar elektronik sistemlerin soğutulmasında yoğun bir şekilde kullanılan popüler sıvılardan birisini temsil etmektedir. Bu sıvıların en önemli avantajı, zincir uzunluğunu değiştirerek viskozite ve donma noktası değerlerinin değiştirilebilir olmasıdır. Böylece sistem gereksinimlerine uygun şekilde modifikasyon yapılabilir. Son olarak florokarbon esaslı sıvılar ise inert yapıda olup soğutma teknolojilerinde kullanılan popüler sıvılardan birisidir. Perflorokarbonlar olarak da bilinen bu sıvılara FC serisi sıvılar örnek olarak gösterilebilir(Murshed and Castro 2017) Hidroflorokarbonlar (HFC’ ler), florokarbonlar (FC’ lar), performans akışkanları (PF’ ler) ve hidrofloroeterler (HFE’ ler) elektronik endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan dielektrik akışkanlar içerisinde yer almaktadır (Danielson et al. 1986).

**Çizelge 1.1.** Taşınım ile ısı transferi mekanizmalarının karşılaştırması

|                                                   | <b>Doğal Taşınım</b> | <b>Zorlanmış hava soğutma</b> | <b>Su soğutma</b> | <b>Daldırma Soğutma</b> |
|---------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------|
| <b>Isı transfer katsayı (<math>W/m^2K</math>)</b> | 5-30                 | 20-400                        | 100-1.600         | 800-10.000              |
| <b>Ortamdan Uzaklaştırılan Isı Kapasitesi (W)</b> | 2-9                  | 6-120                         | 30-480            | 240-3.000               |
| <b>Taşınım Mekanizması</b>                        | Doğal taşınım        | Doğal+zorlanmış taşınım       | Zorlanmış taşınım | Doğal taşınım           |

Dielektrik akışkanlar termal performans bakımından geleneksel ısı transferi akışkanlarından daha kötü olmasına rağmen yüksek elektrik dirençlerinden dolayı tercih edilmektedir (Rainey and You 2000; Medavaram et al. 2005). Elektroniklerin uygun çalışma sıcaklıkları göz önüne alındığında (maksimum 80 °C) genellikle düşük kaynama

## 1. GİRİŞ

noktasına sahip bu akışkanların kullanımı güvenli ve uzun ömürlü çalışma imkânı sunar. Yüzey gerilim seviyelerinin saf suya nazaran daha düşük olması akış alanı içerisinde yüzey üzerindeki mikro/makro boşluklara küçük temas açıları ile tutunma olanağı sağlar. Küçük temas açıları sayesinde ısıtılmış yüzeydeki boşlukların çoğunu doldururlar (Saylor et al. 1988). Bu sayede, kaynama sırasında, daha küçük kabarcık ayrılma çapı ve daha yüksek ayrılma frekansı elde edilebilir ve buhar battaniyesi oluşumu gecikir. Bu sayede ısı transfer hızı artar. Bu alanda yapılmış çalışmalardan bazıları Rainey et al. (2000) ve Rainey et al. (2003) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda, kare kanatçıklı ve mikro gözenekli yüzeyler üzerinden havuz kaynama deneyleri yapılmıştır. Deneylerde düşük kaynama noktası, kimyasal yapısındaki kararlılık ve dielektrik özelliğinden dolayı florokarbon esaslı FC-72 sıvısını kullanmışlardır. Bu sayede, hem sistemin güvenli çalışma sıcaklığını garanti altına almışlardır hem de kaynama sürecinde akışkanın yüzey gerilim özellikleri sayesinde kabarcık oluşum frekansını arttırarak termal performansı iyileştirmeyi başarmışlardır.

**Çizelge 1.2.** 1 atm basınç ve 25°C sıcaklığında su ve bazı dielektrik sıvıların termofiziksel özellikleri.

| Akışkan İsmi                         | HFE-7000 | HFE-7100 | HFE-7300 | FC-72              | PF-5060 | FC-87                | Su                 |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|--------------------|---------|----------------------|--------------------|
| Kaynama Noktası                      | 34       | 61       | 98       | 56                 | 56      | 30                   | 100                |
| Dinamik viskozite ( $c_p$ )          | 0,45     | 0,58     | 1,18     | 0,64               | 0,64    | 0,45                 | 0,89               |
| Yoğunluğu ( $kg/m^3$ )               | 1.400    | 1.520    | 1.660    | 1.680              | 1.680   | 1.650                | 997                |
| Özgül Isı ( $J/kg.^\circ C$ )        | 1.300    | 1.183    | 1.140    | 1.100              | 1.050   | 1.100                | 4.182              |
| Termal iletkenlik ( $W/m.^\circ C$ ) | 0,075    | 0,069    | 0,063    | 0,057              | 0,057   | 0,056                | 0,61               |
| Dielektrik sabit (@ 1 kHz)           | 7,4      | -        | -        | 1,75               | 1,9     | 1,73                 | 80                 |
| Elektriksel direnç (ohm cm)          | -        | -        | -        | $1 \times 10^{15}$ | -       | $5,6 \times 10^{15}$ | $18,2 \times 10^6$ |
| Yüzey gerilimi (dynes/cm)            | 12,4     | 13,6     | 15       | 10                 | 12      | 9                    | 72                 |
| Toxicity profile                     | Düşük    | Düşük    | Düşük    | Düşük              | Düşük   | Düşük                | Düşük              |

Sistem gereksinimlerinden dolayı yapılan çalışmaların bir bölümü dielektrik sıvıların termofiziksel yapılarını ve farklı dielektrik sıvıların termal performansını incelemeye yöneliktir. Bu çalışmalarda, herhangi bir soğutma uygulamasında kullanılacak akışkan seçimi için, çalışma sıcaklık sınırları, dielektrik dayanıklılık ve kimyasal yapı gibi özelliklerin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır (Medavaram et

al. 2005; Lenke et al. 2008; Tuma 2010; Warrier et al. 2012; Birbarah et al. 2020). Lenke et al. (2008) tarafından yapılan çalışmada ise, sekizgen yüzey için midel-7131, FC-40, mineral yağ, silikon yağ ve silika ester akışkanları kullanılmıştır. Bu çalışmada, 120°C ortam sıcaklığındaki silindirik bir tank içerisinde bulunan sıvıya tamamen daldırılmış elektronikten, akışkana olan ısı transferi karakterize edilmeye çalışılmıştır. Soğutucu akışkan cinsinin soğutma performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Diğer taraftan, daldırma soğutma uygulamalarında kullanılmak üzere yeni tip akışkan arayışı devam etmektedir. Bu alanda, bilgisayar destekli molekül tasarım (CAMD) uygulamaları ile türetilerek performans analizi ile uygunluk testleri yapılmıştır (Warriar et al. 2012b).

Dielektrik sıvılar genel itibariyle korozyon olmayan akışkanlardır. Özellikle inert yapıdaki florokarbon bazlı sıvılar kullanıldıkları uygulamalarda katı yüzeylerle tepkimeye girmezler. Bu sayede sistemde korozyona karşı doğal koruma sağlarlar. Toksik etkilerinin olmayışı, insan ve çevre sağlığı bakımından zararsız oluşu bu tip akışkanların kullanımını yaygınlaştırmaya devam etmektedir (Sajjad et al. 2020).

### 1.6. Daldırma Soğutma Performansını İyileştirme Yöntemleri

Daldırma soğutma sistemlerinin kaynama proseslerinde görülen termal kararsızlıklar, araştırmacıları bu alanda araştırma yapmaya yöneltmiştir (Bar-Cohen and Schweitzer 1985; Dincer 1993; Nimkar et al. 2006; Kim et al. 2008; Lenke et al. 2008; Warriar et al. 2012a; Chen et al. 2020). Dielektrik sıvıların termofiziksel özelliklerinden kaynaklı ve kaynama başlangıcından önce görülen ‘başlangıç aşımı, sıcaklık kayması veya sıcaklık değişimi’ olarak tanımlanan termal şok durumu, sistemin en temel sakıncalarından birisidir. Literatür çalışmaları, termal şoku azaltmak veya ortadan kaldırmak ve kritik ısı akısı değerini azaltmaya yönelik yapılmıştır. Bu sayede, ısı transfer hızında artış sağlanırken birleşen güvenliği açısından uygun çalışma sıcaklığı sınırları sağlanmaya çalışılmıştır. Kaynamalı ısı transfer proseslerinde kabarcık oluşum hızı, çapı ve yüzeyden ayrılma frekansı ısı transfer katsayısını etkileyen temel parametrelerdendir. Bu parametreleri değiştiren faktörler sistem termal performansını değiştirir. Dolayısıyla, literatür çalışmalarında, farklı dielektrik akışkanlar kullanılarak, farklı yüzey oryantasyonları ve kaynama yüzeyinde yapılan değişikliklerle ısı iyileşme sağlanmaya çalışılmıştır (Nimkar et al. 2006; Ahmad 2012; Ali 2013; Chandrasekaran et al. 2017).

### 1.6.1. Akışkan termofiziksel özellikleri

Soğutucu sıvının nüfuziyet kabiliyeti özellikle kabarcıklı kaynama sürecini belirleyen önemli parametrelerdendir. Isıtılan yüzey üzerindeki boşlukların doluluk oranı aktif kabarcık odaklarının sayısını, kabarcık oluşum süresini ve aynı zamanda kabarcık döngüsünün hızını etkiler.

Bu alanda yapılan çalışmalar, farklı dielektrik sıvıların kritik ısı akısı, ısı transfer katsayısı ve kabarcık ayrılma frekansı üzerindeki etkilerini araştırmaya yöneliktir. Bhavnani and Jaeger (2000) tarafından yapılan çalışmada, R-113 ve FC-72 sıvıları kullanılarak termal performans kıyaslaması yapılmıştır. Bu çalışmada, oyuk açılmış silikon yüzey kullanılarak kabarcıklanmanın erken başlaması hedeflenmiştir. Aynı yüzey şartlarında, FC-72 sıvısının kullanıldığı durumda başlangıç aşımı sıcaklığının R-113 sıvısının kullanıldığı duruma göre nispeten daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yine Arik and Bar-Cohen (2001) HFE-7100 ve HFE-7200 sıvılarının kaynama karakteristiği ile FC-72 sıvısının kaynama karakteristiğini kıyaslamışlardır. Bu çalışmada edinilen veriler HFE-7100 ve HFE-7200 sıvılarının kritik ısı akısı değerinin aynı yüzey şartlarında FC-72 sıvısına göre %50 ila %60 oranında daha yüksek olduğunu ispatlamıştır. Diğer taraftan, Medavaram et al. (2005) yaptıkları çalışmada ise HFE-7100 ve FC-72 sıvıları kullanılmıştır. Aynı yüzey yapısı için yapılan çalışmada, kabarcık oluşum ağzı genişliği ve kullanılan soğutucu türlerinin kabarcık ayrılma frekansını kayda değer miktarda değiştirmediğini vurgulanmıştır. Aynı dielektrik sıvıları kıyaslayan diğer çalışmalarda ise, Arik and Bar-Cohen (2001) HFE-7100 sıvısının kritik ısı akısı değerinin FC-72 soğutucusuyla yapılan diğer çalışmalarda elde edilen sonuçlardan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. HFE-7100 sıvısı için rapor edilen kritik ısı akısı sonuçları, bakır yüzeylerde El-Genk and Bostanci (2003) tarafından yapılan çalışmada  $24,5 \text{ W/cm}^2$ , Priarone (2005) tarafından yapılan çalışmada  $25,2 \text{ W/cm}^2$  ve El-Genk and Parker (2005) tarafından yapılan çalışmada ise  $22,7 \text{ W/cm}^2$  olarak sunulmuştur. FC-72 sıvısı için ise, Rainey and You (2000) tarafından yapılan çalışmada kritik ısı akısı değeri bakır ve silikon yüzeylerde  $16,3 \text{ W/cm}^2$  olarak belirlenmiştir.

Avedisian and Purdy (1993) ve Lee (1997) elektriksel olarak yalıtkan sıvıları birbirleriyle karıştırarak daha iyi termal özelliklere sahip yeni sıvıları daldırmalı soğutma

teknğinde kullanan öncü araştırmacılar arasında yer almaktadır. Farklı dielektrik akışkanlar kullanarak yapılan diğer çalışmalardan, Arik and Bar-Cohen (2001) FC-40 dielektrik sıvısı ile FC-72 sıvısını farklı oranlarda karıştırarak termal performans değerlendirmesi yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, kritik ısı akısı değeri  $56,8 \text{ W/cm}^2$  seviyesine çıkarılmıştır. Saf FC-72 sıvısıyla karşılaştırıldığı zaman (CHF,  $25,2 \text{ W/cm}^2$ ), ciddi bir artış olduğu not edilmiştir. Meydana gelen bu artışın, FC-40 sıvısının kaynama noktası sıcaklığının (atmosfer basıncı altında), FC-72 sıvısının aynı koşullarda kaynama noktası sıcaklığından daha yüksek olmasına ve yüzey gerilim değerinin %33 oranında daha büyük olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Daldırılmalı soğutmanın en önemli avantajlarından birisi de termal direnci ciddi derecede azaltmasıdır. Bu soğutma sistemlerinde sıcak yüzey ile soğutucu sıvı arasında ara yüzey bulunmaması diğer soğutma sistemlerinde oluşan katı-katı arasındaki direnci tamamen ortadan kaldırırken katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan termal direnci minimum seviyelere düşürür. Barnes and Tumaz (2009) hydrofluoroether ( $\text{C}_3\text{F}_7\text{OCH}_3$ ) dielektrik sıvısı kullanarak yaptıkları çalışmada katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan termal direncin ( $255 \text{ W/cm}^2$  ısı akısı için)  $0,15 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{W/cm}^2)$  olduğunu vurgulamışlardır. Bu direnç değerinin hava soğutma sistemlerine kıyasla %25 ve sıvı soğutma sistemlerine göre ise %30-%50 kadar iyileşme sağladığını vurgulamışlardır. Midel-7131 ve FC-40 dielektrik sıvıları kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada, Lenke et al. (2008) sekizgen tipli ve pim tipli ısı alıcılar kullanarak deneysel veri havuzu oluşturmuşlardır. Çalışmanın dikkat çekici sonuçlarından birisi, sekizgen tipli ısı alıcı modelinde FC-40 sıvısının termal direnç değeri Midel 7131 sıvısından daha büyük olmasıdır. Diğer taraftan, pin tipi ısı alıcısı kullanıldığı durumda ısı transfer hızının sekizgen tipli ısı alıcısı kullanım durumuna göre daha iyi olmasıdır. Bu durumun, florokarbon esaslı FC-40 sıvısının viskozitesinin daha düşük olmasından kaynaklı olduğu rapor edilmiştir.

Yukarıda özetlendiği gibi soğutucu sıvılar farklı termofiziksel özelliklerinden kaynaklı olarak, uygulandıkları sistemlerde farklı termal performans gösterirler. Dolayısıyla, belirli bir sistemde kullanılacak akışkan seçilirken, sistem sınırları ile sıvı özelliklerinin birbirleriyle örtüşmesi gerekmektedir. Bu yüzden, kaynama noktası sıcaklığı, dielektrik direnç, yüzey gerilim değeri, sistem malzemeleri ile kimyasal uygunluk, çevre sağlığı ve maliyet gibi özellikler dikkate alınmalıdır (Lenke et al. 2008).

### 1.6.2. Yüzey yapısı

Direkt ve indirekt soğutma sistemlerinde faydalanan çift faz uygulamalarında ısı transfer performansını etkilediği düşünülen parametreler büyük oranda benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla dolaylı soğutma sistemlerinde ve daldırmalı soğutma sistemlerinde, kaynama durumunda termal performansı artırmaya yönelik çalışmalar paralel ilerlemektedir. Çekirdekli kaynama sistemlerinde kabarcıklanma sürecini etkileyen parametrelerden birisi de yüzey morfolojisidir. Farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip ısıtma yüzeylerinde suyun kabarcıklanma döngüsünü fotografik olarak inceleyen Jakob and Fritz (1931) tarafından yapılan çalışma, bu alanda yapılan öncü çalışmalardan birisidir. Elde edilen sonuçlar pürüzlü yüzeyler üzerinde pürüzsüz yüzeylere kıyasla daha fazla kabarcık oluştuğu belirtilmiştir. Isıtma yüzeyinde, kabarcık sayısını ve oluşumunu hızlandırıcı oyukların artışı, ısı transfer hızını artıran işlemlerin başında gelmektedir. Devam eden yıllarda, pürüzlü yüzeylere uygulanan Freon-113 sıvısının çekirdek kaynaması sırasında kızma sıcaklığını değiştirdiğini fark eden Corty (1955), çekirdek kaynamayı sürdürmek için gerekli kızma sıcaklığının azaldığını ileri sürmüştür. Bu durumun, ilerleyen yıllarda, pürüzlü yüzeylerde aktif çekirdeklenme bölgelerinin artışı sayesinde meydana geldiği belirlenmiştir (Clark et al. 1959). Bir diğer çalışmada ise, pürüzlendirilmiş yüzeylerde n-pentan ( $C_5H_{12}$ ) sıvısı kullanılarak, çekirdek kaynama ısı transfer hızında yaklaşık %600 kadar iyileşme sağlanırken, yüzey pürüzlülüğünün kritik ısı akısını değiştirmede rapor edilmiştir (Berenson 1962).

Yüzey pürüzlülüğünün ısı transfer performansı üzerindeki etkisini araştıran bir diğer çalışma Kurihara and Myers (1960) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kabarcık sayısının pürüzlülüğe bağlı olduğu ve artan kabarcıkların yüzeyden ayrılırken akış yapısını bozduğunu ifade etmişlerdir. Akış desenindeki kararsızlığın kaynama eğrisindeki değişimle ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple, yüzey hazırlama metodunun kabarcıklı kaynama uygulamalarında oldukça önemli olduğunu vurgulamışlardır. Kozitskii (1972) 0,03  $\mu m$  ila 1,3  $\mu m$  aralığında değişen pürüzlü yüzeyler ile yaptığı çalışmada, pürüzlü yüzeyler üzerinde artan kabarcık odaklarının  $h_{MNB}$  seviyesini artırdığını belirtmişlerdir. Fakat pürüzlülük seviyesindeki artışın bir noktadan sonra  $h_{MNB}$  artış hızını azalttığı sonucuna varmışlardır. Bu durum, n-bütan sıvısı kullanılan paslanmaz çelik yüzeyler için 0,95  $\mu m$  olarak tespit edilmiştir. Sauer et al.

(1975) ise, basit bir zımparalama işleminin dahi ısı transfer katsayısını pürüzsüz yüzeylere göre %20 kadar artış sağlayabileceğini ifade etmişlerdir.

Yüzey pürüzlülüğünün artışı, kabarcık oluşumunu hızlandırarak kaynamanın daha küçük aşım sıcaklıklarında gerçekleşmesini sağlar. Bu durum, Dielektrik sıvıların kullanıldığı kaynama proseslerinde, sistem güvenliğinin sağlanması açısından avantaj sağlamaktadır. Rainey and You (2000) pürüzsüz bakır yüzeyler ile bir makine yardımıyla intizami pürüzlendirilmiş yüzeyler üzerinde yaptıkları çalışmada, art arda bir dizi deneme yapmışlardır. İlk denemede, cilalı bakır yüzey kullanılarak kaynama süreci başlatılmıştır ve aşım sıcaklığı 40 K olarak belirlenmiştir. Ardından yapılan ikinci denemede aynı şartlarda, aşım sıcaklığı 19 K' e düştüğünü gözlemlemişlerdir. Pürüzlü yüzeyler için yaptıkları ilk denemede ise, aşım sıcaklığı 27 K ve ikinci denemede 10 K seviyesine düştüğünü rapor etmişlerdir. Aşım sıcaklığındaki bu düşüşün yüzey boşluklarına hapsolan hava hacminden ileri geldiğini vurgulamışlardır. Destekler nitelikteki bir diğer çalışma Ferjančić and Golobič (2002) tarafında yapılmıştır. Aynı soğutucu sıvı kullanılarak yapılan çalışmada paslanmaz çelik 302 ve çelik 1010 kullanılmış ve iki farklı yüzey (zımparalama ve asit içinde dağlama) işlemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kritik ısı akısı, paslanmaz çelik yüzeylerde  $87.6 \text{ kW/m}^2$  'den  $115.4 \text{ kW/m}^2$  ' e çıktığı belirtilmiştir. Aynı ortalama pürüzlülük oranında dağlama uygulanarak oluşturulan yüzeylerde zımparalanarak oluşturulan yüzeylere göre %51 kadar daha iyi sonuçlar elde edildiğini not vurgulamışlardır. Bu bakımdan yüzeye uygulanan son işlem türünün ısı transfer sürecini etkilediği değerlendirilebilir. Honda et al. (2002) FC-72 dielektrik sıvısını kullanarak pürüzlü yüzeyler üzerinde doymuş ve soğutulmuş kaynama ( $\Delta T_{\text{sub}} = 3, 25 \text{ ve } 45 \text{ K}$ ) süreçlerini araştırmışlardır. Rapor edilen sonuçlara göre, pürüzsüz yüzeylerde aşım sıcaklığı 18 K iken pürüzlü yüzeylerde 12 K olarak tespit edilmiştir. Kritik ısı akısında ise, pürüzsüz silikon yüzeylere göre  $\text{SiO}_2$  ile aşındırılmış 25-32 nm ortalama pürüzlülüğe sahip yüzeylerde artış sağlandığı not edilmiştir. Ali (2013) PF-5060 dielektrik sıvısının kaynama karakteristiğine etki eden yüzey pürüzlülüğünü farklı yüzeyler kullanarak değerlendirmişlerdir. Bakır yüzeylerin kullanıldığı çalışmada ortalama pürüzlülük değerleri 0,21-1,79  $\mu\text{m}$  aralığında tutulmuştur. En düşük CHF değerinin pürüzsüz yüzeyde elde edilirken, ortalama pürüzlülük değerinin artışı CHF değerinin artmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Ayrıca ısı transfer katsayısında en yüksek pürüzlülük değerinde yaklaşık iki kat iyileşme sağlandığı vurgulanmıştır.

Yüzey iyileştirmesi için uygulanan metotlardan biriside kaplamadır. Karbon nano tüp veya bakır tellerle yüzey kaplaması ile yapılmış çalışmalarda ısı transfer katsayısının arttığı ve çekirdek kaynama başlangıcında oluşan sıcaklık aşımının azaldığı rapor edilmiştir (Im et al. 2010; McHale and Garimella 2010; Ujereh et al. 2007). Gershen (2004), köpük kaplamalı ve mikro kanatlı bakır yüzeyler kullanarak daldırmalı soğutma uygulaması gerçekleştirmiştir. HFE- 7100 sıvısını kullandığı çalışmada, gözenek yoğunluğu, gözenek yüksekliği, gözenek genişliği ve kanat sayısı parametrik olarak değerlendirilmiştir. Edinilen veriler doğrultusunda gözenek yoğunluğu, gözenek boyutu ve bağ boyutlarının ısı transfer performansını artırdığı vurgulanmıştır. Buna karşın, 1 ila 5 mm aralığında kaplama kalınlığının ise çekirdek kaynama ısı transfer katsayısında dikkate değer bir artışla sonuçlanmadığını ifade etmiştir. PF-5060 dielektrik sıvısıyla nano yapılı silikon yüzeyler için yapılan çalışmada, çıplak yüzeye kıyasla nano yapılı yüzeylerde kritik ısı akısının arttığı sonucuna varılmıştır (Sriraman and Banerjee 2009). Aynı sıvı ile yapılmış bir diğer çalışmada ise, mikro gözenek kaplamalı yüzey ile mikro oluklu bakır yüzey kaynama karakteristiği incelenmiştir. Yüzey oksidasyonu işlemi ile kaplanan yüzey yapısında, kritik ısı akısı değerinde, düzlem yüzeye kıyasla %58 ve mikro oluklu yüzey yapısına göre %30 artış sağlandığı sonucuna varılmıştır.

### 1.6.3. Yüzey oryantasyonu

Endüstriyel uygulamalarda, ısınan elemanın sistem içerisindeki yerleşimi farklı şekillerde olabilir. Veri merkezlerinde veya kişisel bilgisayarlarda, çip ihtiva eden anakartlar, paket içerisine yer çekimi kuvveti referansına göre dikey ya da yatay şekilde yerleştirilebilir. Sistem şartlarına ve çevresel faktörlere bağlı olarak ısınan elemanların sistem normaliyile farklı açılarda yerleştirildiği uygulamalar da vardır. Yerleşim şekli, daldırmalı soğutma uygulamalarında hem tek faz hem de çift faz taşınım mekanizmalarında farklı termal performans etkilerinin oluşmasına sebep olur. Ağırlıklı olarak kaldırma kuvvetlerinin etkin olduğu düşünülürse, sıcak yüzey etrafındaki akışkan hareketini etkileyeceğinden ısı transfer hızının değişmesi doğal bir sonuçtur. Literatürde, daldırmalı soğutma mekanizmasında, yüzey yöneliminin soğutma performansına etkisi inceleyen çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Chang and You 1996; Mudawar et al. 1997; Rainey and You 2001; Priarone 2005; Parker and El-Genk 2009).

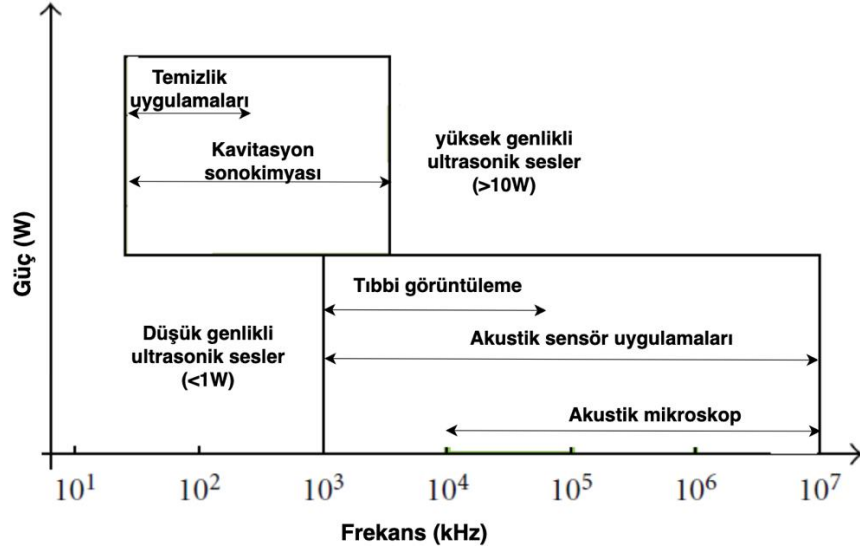
Chang and You (1996), 1 cm× 1 cm ebatlarında bakır yüzey kullanarak yüzey oryantasyonunun ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, sıcak yüzey, yukarı yönlü (0°) konumdan başlayarak dikey (90°) konuma gelecek şekilde kademeli olarak değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük kızma sıcaklıklarında, ısı transfer katsayısının yatay konumdan dikey konuma geçerken arttığını göstermiştir. Yine Rainey and You (2001), 2 × 2 cm ve 5 × 5 cm boyutlarında kare ısıtıcılar kullanarak pürüzsüz bakır yüzeyler için benzer şekilde deneylerini tamamlamışlardır. Yüzey yönelim açısının 90° (dikey) aştığı durumda ısı transfer katsayısının azaldığını rapor etmişlerdir. Buna ek olarak, sıcak yüzey boyutundaki artışın çekirdek kaynama ısı transfer hızı arasındaki farkın azalmasıyla sonuçlandığını belirtmişlerdir. Reed and Mudawar (1999), düşük kızma sıcaklıklarında yatay konumdan dikey konuma doğru ısı transfer katsayısının arttığını ve yüksek kızma sıcaklıklarında azaldığını ifade etmişlerdir. Aynı şekilde, Wei and Honda (2003) FC-72 sıvısı kullanarak pürüzsüz silikon yüzeyler için düşük kızma sıcaklıklarında benzer sonuçları rapor etmişlerdir. Benzer sonuçların elde edildiği El-Genk and Bostanci (2003) tarafından yapılan çalışmada ise HFE-7100 dielektrik sıvısı kullanılmıştır. Bakır pürüzsüz yüzeylerde aşırı soğutulmuş ve doymuş kaynama şartlarında daldırma soğutma performansı araştırılmıştır. Doymuş kaynama şartlarında, düşük kızma sıcaklıklarında eğim açısı 0° dan 180° e doğru değiştirilirken ısı transfer katsayısının arttığını fakat yüksek kızma sıcaklıklarında azaldığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada ek olarak aşırı soğutulmuş kaynama için sıcak yüzeyin yatay konumdan dikey konuma kadar ısı transfer katsayısının bir miktar azaldığını, fakat aşırı soğutma sıcaklığına göre artış sağlandığını vurgulamışlardır. Düşük yüzey sıcaklıklarında ise eğim açısı ile ısı transfer hızı arasında dikkate değer bir değişim olmadığı anlaşılmıştır.

İlerleyen yıllarda, bir önceki bölümde ele alınan yüzey morfolojisi ve yüzey oryantasyonunu birlikte konu alan çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan birisi Ali (2013), tarafından sürdürülmüştür. Bu çalışmada, 80 µm ila 230 µm aralığında değişen yedi mikro gözenekli yapı kullanılmıştır. PF-5060 soğutkanının kaynama karakteristiğinin değerlendirildiği çalışmada, yüzey oryantasyonun CHF değeri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 0°- 180° aralığında 30°lik artımlarla belirlenen sekiz eğim açısında, eğim açısındaki azalış ve mikro gözenekli yapı kalınlığının artışla birlikte kritik ısı akısının azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışma durumunda, aşağı yönlü oryantasyon durumunda

elde edilen CHF değerlerinin, yukarı yönlü oryantasyon durumu değerlerinin %28 i kadar olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, kritik ısı akısının yüzey oryantasyonu ve mikro gözenek kalınlığıyla ilişkisini tanımlayan bir korelasyon türetilmiştir. Bu korelasyonun literatür çalışmalarıyla  $\pm 8$  sapmayla uyumlu olduğu rapor edilmiştir. Suszko (2015) tarafından yapılan doktora tez çalışmasında da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Pürüzlü ve oyuklu bakır yüzeylerin kullanıldığı çalışmada soğutucu akışkan olarak PF-5060 kullanılmıştır. Pürüzlü yüzeylerde eğim açısının ısı transfer performansını etkilemediğini, eğim açısının  $0^\circ$ -  $180^\circ$  aralığındaki değişimi sırasında kritik ısı akısı ve  $h_{MNB}$  değerlerinin düştüğü belirtilmiştir. Ayrıca yukarı yönlü konumlandırma durumunda kritik ısı akısının aşırı soğutma sıcaklığına bağlı olarak artış gösterdiği rapor edilmiştir.

### 1.7. Ultrasonik Ses Dalgalarının Isı Transferini İyileştirme Etkisi

Çeşitli mühendislik uygulamalarında, ultrasonik ses dalgaları farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Kurutma sistemleri (atık kurutma, gıda kurutma vb.) kaynak işlemleri, kimyasal reaktör hazırlama sistemleri, medikal tedavi sistemleri, temizleme işlemleri gibi sektörler bunlardan bazılarıdır. Legay et al. (2011) çalışmasından alıntılanan Şekil 1.7’ de, ultrasonik ses dalgalarının frekans ve genlik aralığı kullanım alanına göre farklılık gösterdiği görülmektedir. Termal yönetim sistemlerinde ise ultrasonik ses dalgalarının kullanılışı Fand (1965) tarafından yapılan araştırmaya dayanmaktadır. Yatay konumlandırılmış silindirik yüzey kullanılarak yapılan çalışmada, akışkan ortamında oluşturulan akustik alanın doğal konveksiyon ısı transfer katsayısını iyileştirdiği not edilmiştir. Bu çalışmayla birlikte, ultrasonik ses dalgaları vasıtasıyla sıcak yüzeyler üzerinden ısı geçişini iyileştirmeye yönelik çalışmalar devam etmiştir (Kim et al. 2004; Bartoli et al. 2020; Cai et al. 2010; Kiani et al. 2012).



**Şekil 1.7.** Farklı genlik ve frekans aralıklarında ultrasonik ses dalgalarının uygulama alanları (Legay et al. 2011).

Ses sinyallerinin sıvı ortama uygulanması ile birlikte dikkat çeken dört önemli fenomen meydana gelir. Bunlar ısıtma, akustik kavitasyon, akustik akış ve akustik çeşmedir (Şekil 1.10). Lighthill (1978) tarafından araştırılan akustik akışın, sıvı ortam içerisine indüklenen akustik enerjinin ortam içerisinde dağılmasından ileri geldiği belirtilmiştir. Akustik enerjinin dağılmasıyla birlikte sıvı molekülleri arasında momentum gradyanı oluşur. Bu durum, ivmelenen sıvı moleküllerinin akış alanı içerisinde hareketlenmesi ile sonuçlanır. Literatürde farklı tanımları bulunan akustik akış, Boluriaan and Morris (2003) tarafından, ultrasonik ses sinyalleri ile akış ortamında oluşturulan net (ortalama) akış olarak da tanımlanmıştır. Bu tanımda, akışkan hareketleri doğrusal olmadığından ortalama Euler hızı veya ortalama kütle akışı olarak nitelendirilmesi gerektiği vurgusu yapılmıştır. Benzer şekilde, kütle taşıma hızı, ortalama Euler hız alanı, ortalama Lagrange alanı, ortalama parçacık hızı gibi ifadeler akustik akış terimi yerine kullanılmıştır (Rudenko 2014). Akustik akış ile birlikte sıvı ortamda molekül hareketini sağlayan iki tür akış meydana gelmektedir. Bunlar kuvars rüzgârı ve Rayleigh akış olarak isimlendirilmektedir (Rayleigh 1884). Her iki akustik akış türü temelde, kayma gerilmeleri ile atalet kuvvetleri arasındaki ilişkiyi ifade eden Reynolds gerilimlerinden ileri gelmektedir. Kuvars rüzgârı, akustik enerjinin sınırsız sıvı ortam içerisinde dağılmasıyla sıvının ana gövdesinde oluşurken, Rayleigh akış ise akışkan ortamında bulunan katı yüzey sınır tabakası içerisinde akustik enerjinin yayılması ile ilişkilendirilmektedir (Lighthill 1978; Riley 1998).

Akustik akış dolayısıyla akış alanı içerisindeki kütle hareketi, homojen olmayan sıvıya uygulanan akustik kütle kuvvetinden kaynaklanmaktadır (Kumar et al. 2021). Literatürde bazı çalışmalarda bu akustik kütle kuvvetleri, teorik olarak çalışılmış ve ikinci dereceden akustik kütle kuvveti için çeşitli matematiksel ifadeler elde edilmiştir (Karlsen et al. 2016; Kumar et al. 2021; Qiu et al. 2021). Bu matematiksel ifadelerden Karlsen et al. (2016) ve Kumar et al. (2021) tarafından türetilen Denklem (1.6)' de akustik kütle kuvveti, sıcaklık değişiminden kaynaklanan yoğunluk gradyanı, ses hızı gradyanı ve akustik enerji yoğunluğu ( $E_{ac}$ , j/m<sup>3</sup>) ile ilişkilendirilmiştir. Bu denklemde  $\rho_{ort}$ , ortalama akışkan yoğunluğu,  $c_{ort}$ , akışkanın ortalama ses hızı,  $k_\lambda$ , dalga sayısı,  $\lambda$ , dalga uzunluğu olarak tanımlanmıştır. Qiu et al. (2021) tarafından geliştirilen Denklem (1.7)' de ise, akustik yer değiştirmeye sebep olan akustik kütle kuvveti, ses hızı gradyanı ve yoğunluk gradyanı ile birlikte akışkan sıkıştırılabilirlik katsayısının bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Önerilen bu denklemde,  $\kappa_0$ , sıkıştırılabilirlik katsayısı,  $\rho_0$ , akışkan yoğunluğu ve  $c_0$ , ses hızı olarak tanımlanmıştır. Denklem (1.6) ve Denklem (1.7) birlikte değerlendirildiği zaman, akustik kütle kuvvetinin yoğunluk ve ses hızı gradyanının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, akış alanı içerisinde sıcaklık ve ses hızı gradyanı olması durumunda akustik kütle kuvvetlerinin akışkan hareketi oluşturacağı ifade edilmiştir. Bu sebeple, ısıtılan sıvı bir ortam akustik alana maruz bırakıldığı zaman akustik kütle kuvvetinin ısı transferi mekanizmasını tetikleyici yığın akışkan hareketi oluşturacağı savunulmuştur.

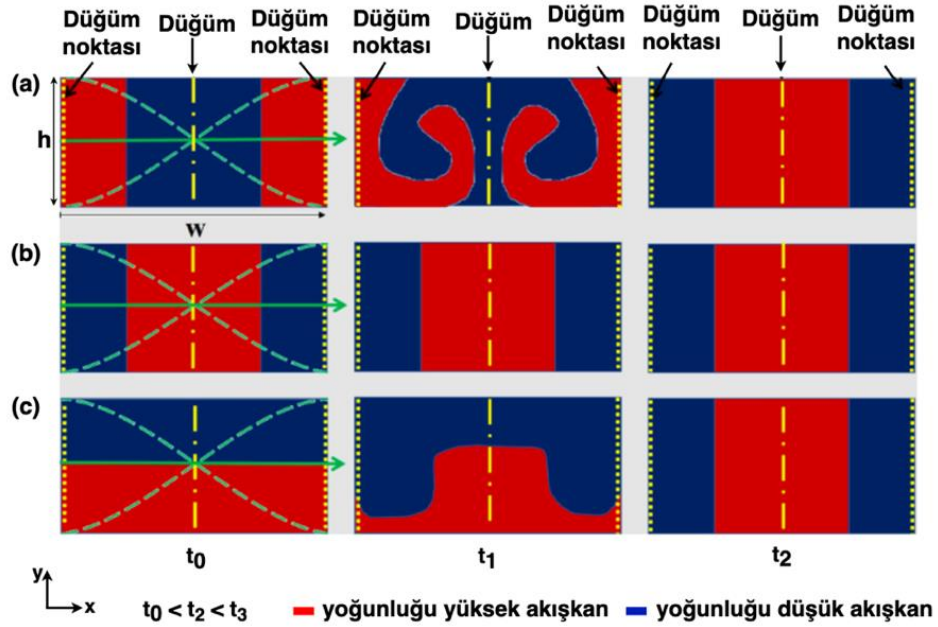
$$f_{ac} = -E_{ac} \nabla T \left( \cos(2k_\lambda x) \frac{1}{\rho_{ort}} \frac{\partial \rho_0}{\partial T} + (1 + \cos(2k_\lambda x)) \frac{1}{c_{ort}} \frac{\partial c_0}{\partial T} \right) \quad (1.6)$$

$$f_{ac} = -\frac{1}{4} (\kappa_0 |p_1|^2 - \rho_0 |v_1|^2) \frac{\nabla \rho_0}{\rho_0} + \frac{1}{2} \kappa_0 |p_1|^2 \frac{\nabla c_0}{c_0} \quad (1.7)$$

Kumar et al. (2021) tarafından yapılan çalışmada, düzensiz sıvı kütlelerinin, akustik kütle kuvvetleri ile kararlı hal konfigürasyonuna geçişi süresinde akustik yer değiştirme davranışı açıklanmıştır. Şekil 1.8' de kanal genişliği  $w$  ve kanal yüksekliği  $h$  olan bir hacim içerisine yerleştirilmiş ve sadece yoğunluk gradyanına sahip sıvı yığını, kanal genişliği yönünde dalga boyu  $2w$  olan akustik yarım dalgaya maruz bırakılmıştır. Şekil 1.8 (a) ve (c) de akışkanın kararlı hal konfigürasyonuna geçişi, akustik kütle kuvveti ile sağlandığı fakat kararlı hal konfigürasyonunda bulunan sıvı yığınının akustik kütle

## 1. GİRİŞ

kuvvetinden etkilenmediği sonucuna varılmıştır (Şekil 1.8 (b)). Akış alanı içerisinde sıcaklık gradyanından kaynaklı yoğunluk gradyanının varlığında ise akustik kütle kuvvetlerinin yığın hareketi döngüsel olarak devam ettirdiği belirtilmiştir (Şekil 1.9). Dolayısıyla akustik kütle kuvvetlerinin oluşturduğu bu sıvı sirkülasyonu sayesinde kaldırma kuvvetleri kaynaklı doğal taşınımından farklı olarak ilave konvektif ısı transferi mekanizmasının oluşmasına neden olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca akustik manipülasyon ile oluşturulan akustik kütle kuvvetlerinin yönü ile kaldırma kuvvetleri neticesinde oluşan hareket yönüne bağlı olarak ısı transferi performansının artırılabilirliği ifade edilmiştir. Isı transfer yönüne dik yönde uygulanan akustik dalgaların akışkanın doğal sirkülasyonunu destekleyici etki oluşturarak ısı transfer katsayısının artmasına neden olacağı belirtilmiştir.

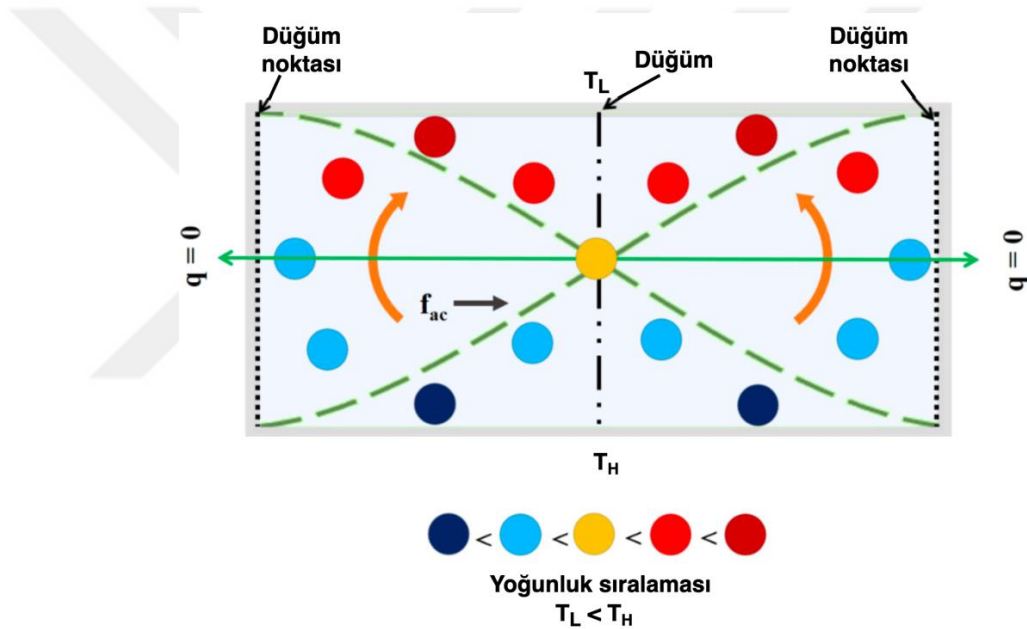


**Şekil 1.8.** Yoğunluk gradyanına sahip sıvı içerisinde akustik kütle kuvvetlerinin neden olduğu akustik yerdeğiştirme hareketi Kumar et al. (2021)' ın çalışmasından uyarlanmıştır).

Ses sinyallerinin akışkan içerisinde ilerleyişi sırasında oluşan bir diğer önemli fenomen akustik kavitasyondur. Sıvı ortam içerisinde yayılan akustik enerji, basınç ve sıcaklık salınımlarının oluşmasına neden olur (Neppiras 1980). Bu durum, alçak basınç bölgelerinde küçük kabarcıkların oluşmasına sebep olur. Dolayısıyla akustik kavitasyon, lokal basınç düşüşü ve artışı nedeniyle akışkan içerisinde oluşan küçük kabarcıklar olarak tanımlanır. Sıvı içerisinde hareket eden bu kabarcıklar yüksek basınç bölgelerinde sıvı-gaz ara yüzeyine etki eden statik basınç ve kohezyon kuvvetlerine yenik düşerek patlarlar.

## 1. GİRİŞ

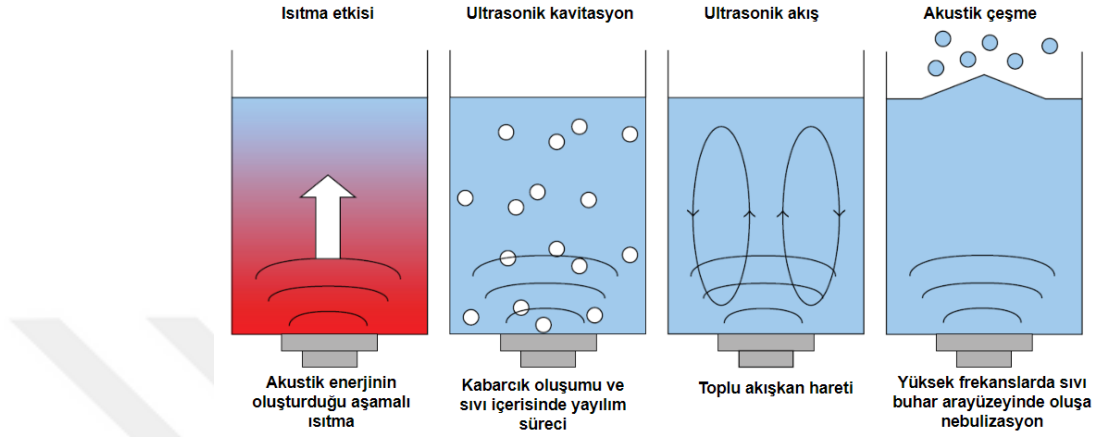
Bu kabarcıkların, katı bir yüzeyin yakınında ya da yüzey üzerinde patlaması şok dalgaları ve mikrojet sıvısı gibi hidrodinamik olayların oluşmasına neden olarak, akış alanı içerisinde iç karışma sebep olur (Legay et al. 2011; Bartoli et al. 2020). Akustik kavitasyon oluşumu sıcaklık, basınç ve gaz çözünürlüğü gibi parametrelere bağlı olduğundan, kabarcıkların meydana geldiği deneysel şartlar tam olarak belirlenmelidir (Legay et al. 2011). Akustik kavitasyon kararlı ve geçici kavitasyon olmak üzere iki kategoride incelenmektedir (Neppiras 1980, 1984). Kararlı kavitasyon, kavitasyon kabarcıklarının dengeli bir şekilde döngü içerisinde salınması olarak tanımlanırken, kabarcıkların birden fazla çevrim içerisinde bulunması durumu ise geçici kavitasyon olarak tanımlanmaktadır (Legay et al. 2011).



**Şekil 1.9.** Akustik yer değiştirme ile meydana gelen ısı transfer mekanizması Kumar et al. (2021)' in çalışmasından uyarlanmıştır.

Sıvı ortam içerisine ultrasonik ses dalgalarını tatbiki ile meydana gelen diğer iki fenomen ise ısıtma etkisi ve nebulizasyon (akustik çeşme)dur. Mekanik enerjinin sıvı içerisinde yayılımı ve dağılması ile yığın akışkan sıcaklığında artış görülür. Bu durum, ısıtma etkisi olarak tanımlanmaktadır. Bu etki ısı transfer hızını etkilemese de kalorimetrik metot olarak bilinen ve sisteme sağlanan ultrasonik enerji miktarının belirlenmesi bakımından oldukça faydalıdır (Legay et al. 2011). Son olarak, ultrasonik ses dalgasının sıvı serbest yüzeyine odaklanması durumunda, yüzeyde meydana gelen deformasyon birçok araştırmacı tarafından akustik çeşme (nebulizasyon) olarak tanımlanmıştır (Wood and Loomis 1927; Li et al. 1997; Simon et al. 2015). Akustik çeşme

oluşumu sırasında sıvı- buhar ara yüzeyinde çok yüksek sıcaklıklar (yaklaşık 250 °C) görülür. Sıvı-buhar ara yüzeyinde akustik çeşmenin oluşup oluşmayacağı ve meydana gelen tahribatın şekli, ses dalgası gücü, dalga boyu, frekans ve tatbik süresi dahil olmak üzere çeşitli parametrelere bağlıdır (Simon et al. 2015).



**Şekil 1.10.** Ultrasonik ses dalgalarının akış alanı içerisinde oluşturduğu etkiler (Legay et al. 2011).

Ultrasonik enerjinin sıvı içerisinde oluşturduğu etkiler birlikte değerlendirildiği takdirde, ısı transfer uygulamalarını ilgilendiren ve yoğunluklu olarak termal performans üzerindeki etkileri araştırılan iki fenomen akustik akış ve akustik kavitasyon olmuştur (Legay et al. 2011). Akustik akışın ısı transfer katsayısını artırmaya yönelik ilk çalışmalardan birisi Fand and Kaye (1960) tarafından yürütülen çalışmadır. Bu çalışmada izotermal akustik akıştan daha etkili olduğu düşünülen termoakustik akış fenomeni ileri sürülmüştür. Devam eden yıllarda, ses dalgası kullanılarak hava ortamı içerisindeki küçük parçacıkların hareketi incelenmiştir. Bu sayede katı yüzey sıcaklığı azaltılarak taşınım ısı transfer katsayısı partikül hızıyla orantılı olarak artırılabilmiştir (Loh et al. 2002; Hyun et al. 2005). Farklı sıcaklardaki katı-sıvı arasında, sıvı veya katı ortama uygulanan ses dalgaları sonucunda aktarılan ısı miktarındaki değişim, araştırmaların genel konusunu oluşturmaktadır (Lin and Farouk 2008).

Doğal taşınım ihtiva eden ısı transfer sistemlerinde ultrasonik ses dalgalarının ısı transfer hızına katkısını pekiştirmek için sıvı içerisinde meydana gelen akış olaylarını irdelemek gerekir. Çünkü akış ortamında oluşabilecek kararsızlıklar sistem performansına olumlu ya da olumsuz etki sağlayabilir. Dolayısıyla tek fazlı doğal taşınım şartlarında ultrasonik titreşimlerin etkilerini araştıran bir dizi çalışma yapılmıştır.

Örneğin, Li and Parker (1967) 20 kHz frekanslı akustik ortamda oda sıcaklığında 0,2 mm çaplı ince bir platin telden suya doğal taşınım ısı transfer hızını araştıran bir çalışma yapmışlardır. Isı transfer katsayısının belli bir ses basıncına kadar arttığını ardından azalmaya başladığını rapor etmişlerdir. Kurbanov and Melkumov (2003) sıvı-sıvı ısı eşanjörüne ultrasonik titreşim uygulayarak ısı transfer katsayısını artırmayı hedeflemiştir. Sonik ses dalgalarının, eşanjör çeperlerine yakın bölgelerde hız vektörlerini düzenlediğini ve neticede sınır bölgelerinde sıvı yüzey gerilimini azalttığını belirtmişlerdir. Bu durumun ısı transfer katsayısının artışı ile sonuçlandığını vurgulamışlardır. Monnot et al. (2007) tarafından yapılan ultrasonik titreşim varlığında ve yokluğunda sürdürülen çalışmada, lokal ve kitlesel akışkan hareketine katkı sağlayan akustik akış ve kavitasyon kabarcıklarının ısı transfer katsayısını %134 - %204 aralığında artırdığı rapor edilmiştir. Cai et al. (2010) ise, ultrasonik ses dalgasının, şekerli su ve tuzlu su çözeltileri ile su ortamında dairesel bakır boru doğal taşınım ısı transfer performansını araştırmışlardır. 18 kHz frekanslı ve 0-250 W aralığında farklı genliklerde uygulanan ses dalgaları ile ısı transfer katsayısını %360 kadar artırmayı başarmışlardır. Ultrasonik kabarcıkların patlaması, yüksek seviyede yerel basınç oluşturarak akışkan hareketini tetikler mikro türbülans oluşmasını sağlar. Yerel çalkantı hareketi termal direncin azalmasını ve sıcak yüzey yakınında oluşan termal ve hız sınır tabakanın bozularak karışımın kuvvetlenmesine neden olur. Akış ortamında meydana gelen bu etkiler sebebiyle ısı transfer katsayısında artış sağlanır.

Doğal ve zorlanmış taşınım mekanizmalarının tek fazlı uygulamalarında elde edilen olumlu sonuçlar, ultrasonik ses dalgalarının daldırılmalı soğutma sistemlerinde kullanılmasının da önünü açmıştır. Diğer soğutma sistemleriyle kıyasla ultrasonik titreşimlerin tek fazlı daldırılmalı soğutma uygulamaları oldukça az sayıdadır. Kiani et al. (2012) sıvı ortam içerisine daldırılmış küre şeklindeki sıcak yüzeyin soğuması sırasında ultrasonik ses dalgalarının etkisini incelemişlerdir. Frekans değeri 25 kHz olan ses sinyalleri, dokuz farklı (0, 120, 190, 450, 890, 1.800, 2.800, 3.400 ve 4.100W/m<sup>2</sup>) güç yoğunluğunda uygulanmıştır. Çalışma verileri, ultrasonik ses dalgalarının, ısı transfer katsayısını önemli ölçüde artırdığı gibi soğutma süresini de azalttığını göstermektedir. Ultrasonik güç yoğunluğunun artışı ise ısı transfer katsayısını artırdığını belirtmişlerdir. Fakat yüksek güç yoğunluklarında küre yüzeyinde ilave ısı oluşturduğunu vurgulamışlardır. Yine Kiani and Sun (2016) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, küre

şeklinde farklı malzemelerden (bakır, patates vb.) oluşan sıcak yüzeyleri sıvı içerisinde ultrasonik dalgalar varlığında ve yokluğunda soğutmaya çalışmışlardır. Deneysel ve sayısal veriler parçacıktan sıvıya ısı transfer hızının ultrasonik dalga etkisiyle arttığını göstermiştir. Bu çalışma gıda endüstrisindeki soğutma işlemlerinde, daldırma soğutma sistemlerinin uygulanabilirliğini göstermek açısından oldukça önemli bir çalışmadır.

Önceki bölümlerde değinildiği gibi kaynama mekanizması, tam olarak açıklanamamış kararsızlıklar ve termal şok durumları içermesine rağmen, çift fazlı soğutma sistemleri yüksek termal kapasitelerinden dolayı sıkça başvurulan yöntemlerden birisidir. Ultrasonik ses dalgalarının termal performans üzerindeki olumlu etkisi, araştırmacıları kaynamalı ısı transfer sistemlerinde ses dalgalarının varlığı durumunu araştırmaya yöneltmiştir. Doymuş ve aşırı soğutulmuş kaynama durumları için ultrasonik etkileri araştıran Park and Bergles (1988) bu alanda yapılan öncü çalışmalardan birisidir. Sonraki yıllarda (Bonekamp and Bier 1997; Lida and Tsutsui 1992; Loh and Lee 2004; Bartoli and Baffigi 2011, 2012), çekirdek kaynama durumu için ultrasonik ses dalgalarının etkisi araştırılmaya devam etmiştir. Fakat ultrasonik ses dalgalarının çift fazlı ısı transfer katsayısını iyileştirdiği noktasında kesin bir fikir birliğine varılamamıştır. Zhou et al. (2002) sıvı içerisinde kavitasyon kabarcıklarının katı yüzeye çarpması ve patlaması, ısının sıvıya etkili bir şekilde dağılmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu sayede, sıcak boru yüzeyi kullandıkları çalışmada, ısı transfer katsayısının akustik kavitasyon etkisiyle arttığını göstermişlerdir. Zhou and Liu (2004) nanoakışkanların akustik ortamda termal özelliklerini incelemiştir. Yatay konumlandırılmış silindirik bakır boru yüzeyinde yapılan deneylerde nanoakışkan konsantrasyonu ve aşırı soğutma sıcaklığı parametrik olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada akustik kavitasyonun tek fazlı doğal taşınım ve kaynamalı taşınım sistemlerinde ısı transferini artırıcı etkisinin olduğunu not etmişlerdir. Ayrıca akustik kavitasyon, kaynama histerizisini azaltmak için tercih edilebilir bir uygulama olduğunu not etmişlerdir.

Diğer taraftan, Wong and Chon (1969) ultrasonik titreşimle alakalı olarak, kaynamalı ısı transfer sistemlerinde, tam gelişmiş çekirdek kaynama rejiminde ihmal edilebilir seviyelerde olduğunu belirtmişlerdir. Lida and Tsutsui (1992), ultrasonik dalgaların doğal taşınım, havuz kaynama ve film kaynama rejimlerindeki etkilerini araştıran bir dizi deney yapmışlardır. Isıtılmış platin tel (çap 0,2 mm) ve 33,6 W genlikli

(28 kHz) ses dalgası kullanarak su ve etil alkole ısı geçişini araştırmışlardır. Ultrasonik ses dalgalarının suyun havuz kaynama değerlerini hiç değiştirmediğini, buna karşılık etil alkol çekirdek kaynama değerlerini çok az miktarda değiştirdiğini rapor etmişlerdir. Doğal taşınım ve film kaynama rejimlerinde ise her iki akışkan türü için de ısı transfer katsayısında %20 lik bir artış olduğuna dikkat çekmişlerdir. Zhou et al. (2002) karbarcıklı kaynama ısı transferinin artması buhar embriyolarının oluşumuna bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Bu sebeple, akustik kavitasyonun kaynama ısı transferini artırıcı yönde etkide bulunması için kaynamayı erken başlatacak yönde etkide bulunması gerektiğini ifade etmişlerdir. Dolayısıyla akustik kabarcıklarının, buhar embriyolarını aktiveleştirecek etkide bulunması ısı transfer katsayısını artıracakını aksi halde termal performansı etkilemeyeceğini düşünmüşlerdir. Kim et al. (2004) ise, FC-72 sıvısını kullanarak 48 kHz frekansta uygulanan ultrasonik ses dalgalarının 0,2 mm çaplı platin tel üzerindeki doğal taşınım ve aşırı soğutulmuş kaynama olaylarını incelemişlerdir. Ultrasonik dalgalar doğal ve aşırı soğutulmuş kaynama durumlarında ısı transferini ciddi derecede artırırken havuz kaynama şartlarında kavitasyon kabarcığının oluşmadığını not etmişlerdir. Bu sebeple, kavitasyon kabarcıklarının şiddetli hareketinden dolayı doğal taşınım şartlarında elde edildiğini rapor etmişlerdir. Tek fazlı doğal taşınım ve havuz kaynama sistemlerinde ultrasonik ses dalgalarını araştıran bir diğer çalışmada ise, ultrasonik dalgaların etkisi aşırı soğutulmuş kaynama durumundan doymuş kaynama şartına geçerken azaldığı vurgulanmıştır. Ayrıca, aşırı soğutma sıcaklığı doyma sıcaklığına yaklaştıkça ısı transfer hızının azaldığı ifade edilmiştir (Baffigi and Bartoli 2012). Benzer çalışmalarda, kaynama ve tek fazlı doğal taşınım ihtiva eden çalışmalarda ultrasonik dalgaların tek fazlı doğal taşınım şartlarında kaynama durumuna göre çok daha baskın olduğunu rapor edilmiştir (Lida and Tsutsui 1992; Kim et al. 2004; Baffigi and Bartoli 2012). Kaynama şartlarında ısı taşınım katsayılarının tek fazlı doğal taşınım durumuna kıyasla daha küçük olması, bazı araştırmacılar tarafından kaynama sırasında termal kabarcık oluşmasıyla ilişkilendirilmektedir. Termal kabarcıklar, ultrasonik kavitasyon olmadan sıcak yüzey etrafında mikro taşınım oluşturarak ısı transfer hızının artmasını sağlar. Başka bir ifadeyle kaynama proseslerinde halihazırda oluşan termal kabarcıklar ultrasonik kabarcıkların oluşturacağı karışım etkisini oluşturmaktadır. Dolayısıyla, kaynama durumunda ultrasonik ses dalgalarıyla ilave ısı transfer iyileşmesi sağlamak için çok güçlü kabarcık hareketinin oluşması gerekmektedir (Kim et al. 2004).

### 1.8. Tezin Amacı, Kapsamı ve Özgün Değeri

Yukarıda özetlendiği gibi başta elektronik cihazlar olmak üzere bataryaların gibi birçok teknolojik alanda sistemde üretilen ısıнын hızlı ve etkili bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Son yıllarda konvansiyonel soğutma yöntemlerine alternatif olarak uygulanmakta olan daldırmalı soğutma tekniği üzerine literatürde çeşitli çalışmalar olmakla birlikte bu yöntemin eksiklik ve belirsizlikleri bulunmakta, performansını geliştirmeye yönelik araştırmalara açık olduğu anlaşılmaktadır. Isı transferi uygulamalarında olumlu etkisinin olduğu bilinen akışkanın ultrasonik manipülasyonu ise uygulamada çok fazla yer bulamamış, literatürde de yeterince araştırılmamıştır. Bu tez kapsamında farklı çalışma koşulları altında daldırmalı soğutmanın ultrasonik manipülasyonla desteklenmesi durumunda performansının artırılmasının mümkün olup olmadığı araştırma sorusu olarak belirlenmiştir. Yapılan literatür taraması sonucunda;

- Daldırmalı soğutma tekniğinde tek fazlı konveksiyonu konu alan çalışmaların oldukça az ve yoğunluklu olarak sayısal çalışmaların olduğu,
- Daldırmalı soğutmanın çift fazlı formu için yapılan çalışmaların kaynama kararsızlığını açıklamada yeterli etkiyi oluşturmadığı, kaynama mekanizması hakkında yorum yapabilmek için deneysel çalışma sayısının artırılması gerektiği,
- Çeşitli soğutma mekanizmalarında ultrasonik ses dalgalarının ısı transfer performansı üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalar bulunmasına rağmen daldırmalı soğutma özelinde bu etkiyi inceleyen çalışma sayısının oldukça az sayıda olduğu,
- Araştırmacılar arasında ultrasonik ses dalgalarının ısı transferini artırıp artırmadığı konusunda net bir fikir birliğine varılamadığı,
- Akış alanına ultrasonik ses dalgalarının katı ara yüzeyler üzerinden uygulandığı tespit edilmiştir.

Bu tespitler göz önünde bulundurularak; tez kapsamında, üzerine dört eş ısıtıcı monte edilen teflon plaka, PF-5060 dielektrik sıvısına daldırılarak tek ve çift fazlı taşınım ile ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında doğal taşınım ve kaynamalı ısı transferinde, soğutma etkinliğini artırmak ve ısı transferi karakteristiğini belirlemek amacıyla sırasıyla aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla

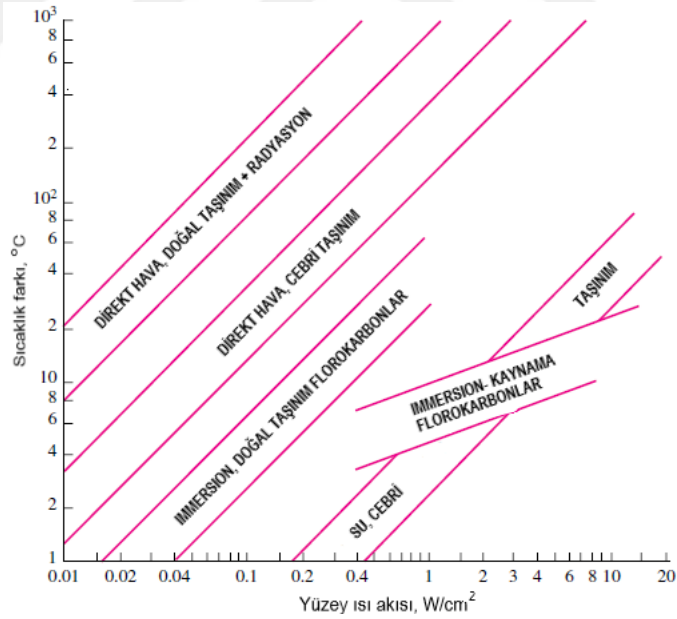
yukarıda bahsedilen literatürdeki eksiklerin kapanmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

- Öncelikle, parametre seviyelerini belirlemek amacıyla her biri aynı uzunluktaki, aynı ısı üretimine sahip ve eşit aralıklarla yerleştirilen ısı kaynakları artan ısı güç ve artan ultrasonik ses dalgası genliği ile yüzey sıcaklıkları deneysel olarak belirlenmiştir.
- Gömülü ısı kaynakları farklı konum konfigürasyonları için ikişerli gruplar halinde çalıştırılarak ultrasonik ses dalgası manipülasyonu olmadan tek fazlı doğal taşınım durumu için deneysel çalışmalar sürdürülmüştür.
- İkinci adımda yürütülen çalışmalar ultrasonik ses dalgası manipülasyonu varlığında tekrarlanmıştır.
- İkinci adımda yürütülen çalışmalar ısı akısı artırılarak çift fazlı (kaynamalı) doğal taşınım durumu için tekrarlanmıştır.
- Dördüncü adımda yürütülen çalışmalar ultrasonik ses dalgası manipülasyonu varlığında tekrarlanmıştır.
- Yukarıda yapılan deneysel çalışmalar her bir çıkıntı durumu için tekrarlanmıştır.

Çalışma sonucunda çıkıntılı ayırık ısı kaynaklarının ve ultrasonik ses dalgası frekansının tek ve çift fazlı ısı transfer performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılarak literatüre geniş bir veri seti sunulmuştur. Ayrıca ultrasonik ses dalgası tahriki aracı yüzey olmadan doğrudan sıvı içerisine uygulanarak literatüre farklı bir bakış açısı kazandırılmıştır. Isı kaynaklarının konum konfigürasyonundaki değişimin termal performans üzerindeki etkisi araştırılmış ve anakart üretimi sırasında ısınan elemanların kart üzerindeki yerleşimi noktasında fikir sunulmuştur. Yürütülen çalışmalar ısı transferi karakteristiğini, akışın fiziksel yapısıyla daha iyi kavrayabilmek amacıyla akış görüntüleme deneyleri ile desteklenmiştir. Akış desenleri ve havuz kaynama ısı transferi katsayısı arasındaki ilişki irdelenmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde daldırmalı ısı transfer uygulamalarına yönelik literatürde yapılmış çalışmalar sunulmuştur. Otomasyon sistemlerinin gelişmesi ile birlikte teknolojik alt yapıyı oluşturan büyük miktarda ki verilerin hassas ve hızlı bir şekilde işlenmesi gerekli hale gelmiştir. Dolayısıyla aynı anda bir veya birden çok işlemi yerine getirebilen bilgisayarlar ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, minyatürleşme ile birlikte entegre devre boyutları küçülürken içerisine yerleştirilen transistör sayısı artmıştır. Sistem içerisinde güç çeken eleman sayısının artışı, transistörler arasındaki mesafenin azalmasına ve transistör eklem sıcaklıklarının artmasına sebep olmuştur. Sıcaklık sıçramaları elektroniklere hasar vermekle birlikte transistör kapı gecikmelerine neden olmakta ve işlemci performansını doğrudan etkilemektedir. Bilgisayarların fonksiyonel yoğunluğundaki sürekli büyüme uygulanabilir termal yönetim ve ısı transferi iyileştirme teknikleri ile sınırlanmaktadır. Tüm bu gelişmeler elektronik endüstrisinde termal yönetim stratejilerinin yeniden gözden geçirilmesine zemin hazırlamıştır.



**Şekil 2.1.** Soğutma mekanizmalarının karşılaştırılması (Cengel 2002)

Herhangi bir sistemdeki elektronik bileşenlerin uygun bir şekilde soğutulması ve güvenli sıcaklık seviyelerinde tutulması için kullanılacak soğutma mekanizması doğru bir şekilde seçilmelidir. Örneğin, ısı akısı düşük olan bir sistem için karmaşık ve yüksek maliyette soğutma mekanizmasının uygulanması doğru değildir. Şekil 2.1' de yüzey-

akışkan sıcaklık farklarına karşılık birim yüzey ısı akı değişimleri, farklı soğutma uygulamaları için verilmiştir. Görüldüğü gibi daldırmalı soğutma tekniği ileri düzey bilgisayarların ve yüksek güç tüketen elektroniklerin soğutulması için uygun bir seçimdir.

### 2.1. Çift Fazlı Daldırmalı Soğutma

Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere çift fazlı soğutma uygulamaları hem gizli ısı kullanımından dolayı hem de akış alanı içerisindeki akış kararsızlıklarının oluşması sebebiyle yüksek ısı transfer katsayılarının elde edildiği soğutma mekanizmalardır. Bu bölümde literature kazandırılmış çift fazlı daldırmalı soğutma uygulamalarına yer verilmiştir.

1985 yılından bu yana Purdue Üniversitesi araştırmacıları yalıtılmış çipler ve çoklu çip konfigürasyonları ile bir dizi iki fazlı daldırmalı soğutma uygulaması yapmaktadırlar. Bu çalışmalarda, benzer özelliklerde ki (FC-72, PF-5060 ve HFE 7100 gibi) dielektrik akışkanlara daldırılan farklı boyutlardaki çiplerin aynı şartlar altında soğuma performansı karşılaştırılmaktadır. Elektronik ekipmanların direkt daldırmalı soğutma uygulamalarında çeşitli tasarım parametreleri ön plana çıkmaktadır. Mudawar (1992) yaptığı çalışmada, bu parametreler üzerinde yoğunlaşmıştır. Sistem boyutlarının, ağırlığının, elektrik bağlantı noktalarının ve kullanıcı çalışma alanının bu soğutma performansı üzerinde sınırlayıcı bir etkisinin olduğunu belirtmiştir. Elektronik cihazların soğutma gereksinimlerini karşılamak için kritik ısı akısını mümkün olduğu kadar artırılması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca, termal yönetim tekniğini seçerken sistem karmaşıklığının ve soğutucu akışkanın çiplerle temasına özellikle dikkat edilmesi gerektiğini açıklamıştır.

Leland and Chow (1993) yaptıkları çalışmada, florokarbon bazlı FC-72 dielektrik akışkanını kullanarak ısıtılmış bir yüzeyi akış kaynama şartlarında soğutmayı hedeflemişlerdir. Bu çalışmada deney parametresi olarak, akış debisi (1-4 m/s), aşırı soğutma sıcaklığı (20°C ve 35°C) ve yüzey yüksekliği (0,127 mm, 0,229 mm, 0,457 mm ve 0,635 mm) araştırılmıştır. İlerleyen yıllarda Leland ve Chow, bakır ve plaka ısıtıcıları kullanarak ısıtıcı şekil faktörünün, soğutma performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Dikdörtgen bir kanal üzerine çıkıntı oluşturacak şekilde yerleştirilmiş

çipin üst ve yanal yüzeyleri çekirdek kaynama şartlarına maruz bırakılmış ve kritik ısı akısı tespit edilmiştir. Çalışma neticesinde, ısıtıcı duvar kalınlığı ve efusivitesi arttıkça CHF değerinin azaldığı sonucuna varmışlardır. Dolayısıyla, termal temas yüzeyi küçük olan çipler için düzgün olmayan ısı üretimi, çift fazlı ısı transferi mekanizmasını kullanan bir çip soğutma tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir.

Çift fazlı daldırmalı soğutma uygulamalarında ısı transferi dielektrik akışkanın kaynama noktası sıcaklığının üzerindeki yüzey sıcaklıklarında gerçekleşir. Soğutucu akışkan sıvı fazdan buhar fazına geçerken buharlaşma gizli ısıdan dolayı yüzeylerden daha fazla ısı çekilmesine sebep olur. Dolayısıyla, kaynama performansını arttıracak parametreler soğutma performansını da doğrudan etkileyecektir. Bu yüzden araştırmacılar, kızdırma sıcaklığı, aşırı soğutulmuş kaynama ve doymuş kaynama sıcaklığı, yüzey malzemesi ve pürüzlülüğü, akışkan cinsi gibi parametrelerin daldırmalı soğutma üzerindeki etkilerini incelemeye yönelmişlerdir. Araştırmacıların özellikle üzerinde yoğunlaştıkları bu parametrelerden birisi, ısı transfer yüzeyidir. Farklı ısı transfer yüzey alanlarında termal performans değerlendirmesi yapılan çalışmalarda hava soğutma uygulamalarına kıyasla daldırmalı soğutma tekniği ile yaklaşık %35 oranında iyileşme sağlanabildiği sonucuna varılmıştır (Ramakrishnan et al. 2014; Wada et al. 2017). Baldwin et al. (2000), FC-72 dielektrik akışkanını kullanarak yüzeylerin mikroskobik özelliklerinin, şeklinin ve doluluk oranının çift fazlı daldırmalı pasif soğutmadaki etkilerini incelemiştir. El-Genk (2012) yaptığı deneysel çalışmada, farklı ısıtıcı yüzeyler (poroz-grafit, bakır ve porozgrafit-bakır karışımı yüzeyler) kullanarak sistem performansını arttırmaya çalışmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, düzlem yüzey ısıtıcıya kıyasla poroz- grafit yüzeyli ısıtıcı ile yaklaşık %12,4 oranında daha fazla ısı atılmıştır. Diğer taraftan, mikro-poroz yüzey kullanımının havuz ve akış kaynama şartlarında ısı transferini artırıcı yönde etkide bulunduğu sonucuna varmışlardır. Gözenekli yüzey yapısının soğutma performansı üzerindeki etkisini araştıran bir diğer çalışma Gershen (2004) tarafından yapılmıştır. Bakır köpük ve bakır kanatlı yapıların çift fazlı daldırmalı soğutma incelemesi yapılan çalışmada bakır köpüklü yüzeylerin ısı performans, gözenek yoğunluğu ve köpük yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre gözenek yoğunluğu arttıkça termal performans da önemli ölçüde artmıştır. Pürüzsüz yüzey ile yapılan karşılaştırma neticesinde yüzey

pürüzlülüğündeki artışın çift faz kaynama ısı transfer katsayısını arttırdığı sonucuna varılmıştır. Yine, Nimkar et al. (2006) tarafından yapılan çalışmada, ısıtıcı üzerine 40 µm ağız genişliğinde mikro-piramidal oyuklar açılarak yüzey pürüzlülük etkileri incelenmiştir. Uygulama sonuçlarına göre kritik ısı akısı değerinin 12,8 W/cm<sup>2</sup>' ye ulaştığı belirtilmiştir. Ramakrishnan et al. (2014) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise, yüksek performanslı bilgisayarlarda çoklu çip modüllerinin sistem ve çalışma parametreleri daldırmalı soğutma için araştırılmıştır. İki farklı dielektrik sıvı kullanarak (Novec 649 ve HFE-7100) yaptıkları çalışmada dört eş ısıtıcı kullanmışlardır. Bu çalışmada akışkan türü ile beraber kare mikro yüzey ve mikro poroz yüzey kullanılarak çekirdek kaynama performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre, ısı akısı dağılımları aşırı soğutulmuş kaynama durumunda, Novec 649 akışkanı için 14,6 W/cm<sup>2</sup> iken HFE 7100 akışkanı için 14,2 W/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Isı transfer yüzey iyileştirmesi neticesinde Novec 649 ve HFE 7100 akışkanlarında ısı akısı değeri, sırasıyla 18,87 W/cm<sup>2</sup> ve 18,31 W/cm<sup>2</sup>' ye yükseltilmiştir. Isıtıcı yüzey parametresinin değerlendirildiği diğer çalışmalar incelendiği zaman yüzey iyileştirmesi ile daldırmalı soğutma uygulamalarında ısı transferinin artırılabilirliği konusunda fikir birliğine varıldığı görülmektedir (Chandrasekaran et al. 2017; Ma et al. 2017; Hsu et al. 2018).

Gershen (2004) tez çalışmasında, bakır köpük ve bakır kanatlı mikro yapılarda çift fazlı daldırmalı soğutma termal performansını araştırmıştır. Soğutucu akışkan olarak HFE 7100 kullanılan bu deneysel çalışmada, bakır köpüklü yüzeylerin ısı performans, gözenek yoğunluğu ve köpük yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak belirlemiştir. Deney sonuçlarına göre gözenek yoğunluğu arttıkça termal performans da önemli ölçüde artmaktadır. Pürüzsüz yüzey ile yapılan karşılaştırmaya neticesinde yüzey pürüzlülüğündeki artışın çift faz kaynama ısı transfer katsayısını arttırdığı sonucuna varılmıştır. Aynı yılda El-Genk and Bostanci (2003), tarafından yapılan çalışmada ise, HFE-7100 akışkanı kullanılarak bakır kare yüzeyler için çift fazlı doğal taşınım daldırmalı soğutma incelemesi yapılmıştır. Hesaplamalar neticesinde kritik ısı akısı 25 W/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Dielektrik akışkan tankı içerisine tamamen daldırılmış test hücresi içerisindeki ısıtıcı döndürülerek (döndürme açıları; 0, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° ve 180°) termal performans değerlendirmesi yapmışlardır.

Bir diğer çalışma da ise El-Genk and Parker (2005), dielektrik akışkan içerisine daldırdıkları foroz granit ve pürüzsüz bakır yüzeyler için daldırmalı soğutma uygulaması yapmışlardır. Bu çalışmada, HFE-7100 dielektrik akışkanı kullanılırken 10, 20 ve 30K aşırı soğutma durumları için ısı transfer analizleri yapmışlardır. Medavaram et al. (2005), anizotropik olarak silikon yüzey üzerinde açılmış 7 $\mu$ m, 19 $\mu$ m ve 25 $\mu$ m boyutların da ki piramidal boşlukların kaynamalı ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelenmiştir. Aşırı soğutulmuş ve doymuş koşullar altında gerçekleştirilen kaynama fiziğinde kabarcıkların yüzeyden ayrılışını görüntülemek için yüksek hızlı fotoğraf makinesi (600 görüntü/s) kullanmışlardır. Görüntü analiz sonuçlarına göre yüzey kavite boşluğunun büyük olduğu yüzeyde (25 $\mu$ m), kabarcık çıkış çapı daha büyük çıkmıştır. Havuz kaynama şartlarında daldırmalı soğutma uygulamasına bir başka örnek Nimkar et al. (2006) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, dielektrik akışkan olarak FC-72 kullanılırken, ısıtıcı üzerine 40  $\mu$ m ağız genişliğinde mikropiramidal oyuklar açılarak yüzey pürüzlülük etkileri incelenmiştir. Kabarcıkların yüzeyden ayrılmasının yüksek hızlı kamera (600 görüntü/s) ile kaydedildiği bu deneysel çalışma neticesinde kritik ısı akısı değeri 12,8 W/cm<sup>2</sup>'ye ulaşmıştır.

Suszko (2015) tarafından yapılan çalışmada ise pürüzlü bakır yüzeyler kullanılmıştır. Bu çalışmada, daldırmalı soğutma tekniğinin çift fazlı doğal taşınım uygulaması detaylı bir şekilde incelenmiştir. Test bölgesi olarak uniform ısıtılmış, dikdörtgen prizma (10mm x 10mm x 1.6 mm) bakır yüzeyler kullanılmıştır. Bilgisayar içerisine anakartların yatay/dikey yönde yerleştirilebildiği düşüncesi ile yüzey yönlendirmesinin etkisini araştırmışlardır. Bu sebeple, bakır yüzey üzerine açılmış oyukların yönelim açısı (0° -180°) deney parametresi olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, eğim açısının bakır yüzeyler üzerindeki çekirdek kaynama fiziğine etkisi yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olduğunu göstermiştir. Ayrıca yüksek hızlı kamera ile akış fiziğinin incelendiği çalışmada, aşırı soğutma miktarı arttıkça CHF'nin arttığı sonucuna varmışlardır.

Yuki et al. (2016) tarafından daldırmalı soğutma tekniği konusunda yapılan bir çalışmada ise test yüzeyi olarak lotus tipi bakır gözenekli yapılar kullanılmıştır. Atmosfer basıncı altında ve doymuş kaynama şartlarında gerçekleştirilen deneylerde, foroz yüzey kalınlığı 1 mm ve 2 mm olan ısıtıcı yüzeyler test edilmiştir. Kaynama eğrileri

değerlendirildiği zaman gözenekli yapıların ısı transferini arttırıcı yönde etkide bulunduğunu belirtmişlerdir. Isıtıcı yüzeyi kızdırma sıcaklığı değiştirilerek (10K-20K) ısı transferi performansı incelenmiştir. Bu sonuçlara göre kızdırma sıcaklığının kaynamalı ısı transfer katsayısını iki üç kat arttırdığı rapor edilmiştir.

Wada et al. (2017) tarafından yapılan çift fazlı daldırmalı doğal taşınım uygulamasında ısınan yüzeyler olarak, bakır yüzey, yaprak yay ve helezon yay kullanmışlardır. Doğal taşınım kaynama karakteristiğini araştırdıkları çalışmada dielektrik akışkan olarak Novec-7100 ve Novec-7200 kullanmışlardır. Isıtıcı yüzey özelliklerinin soğutma performansı üzerindeki etkisini inceleyen diğer çalışmalarda, yine mikro gözenek, foroz yüzey Chandrasekaran et al. (2017) ve siliska tabanlı nano tel dizilimi ile yine silika tabanlı mikro yapılar veya bu yapıların kompozit halleri değerlendirilmiştir (Hsu et al. 2018).

Yüzey geometrisinin, kaynama fiziği, dolayısıyla ısı transfer katsayısı üzerinde ciddi öneme sahip olduğu kadar soğutucu akışkan türü de soğutma performansında büyük pay sahibidir. Akışkan termodinamik özellikleri ısı transfer katsayısını değiştiren önemli parametrelerden birisidir. Bu bakımdan Lenke et al. (2008), sekizgen yüzey için midel-7131, FC-40, mineral yağ, silikon yağ ve silika ester akışkanlarını kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, 120°C 'e ortam sıcaklığındaki silindirik bir tank içerisinde bulunan sıvıya tamamen daldırılmış elektronikten, akışkana olan ısı transferi karakterize edilmeye çalışılmıştır. Soğutucu akışkan cinsinin soğutma performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Ayrıca herhangi bir soğutma uygulamasında kullanılacak akışkan seçimi için, çalışma sıcaklık sınırları, dielektrik dayanıklılık ve kimyasal yapı gibi özelliklerin dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Barnes and Tuma (2009) ise, hidroflorüret ve floroketon bazlı dielektrik akışkan kullanarak çift kutuplu transistör içeren çipleri soğutmaya çalışmışlardır. Hazırladıkları havuz kaynama soğutma sisteminde farklı akışkanlar kullanarak akışkan türünün soğutma performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tuma (2010), daldırmalı soğutma tekniğinin konvensiyonel soğutma uygulamalarına kıyasla maliyet, ağırlık, boyut ve güvenlik bakımından daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca maliyet analizi yapıldığı zamana en büyük kalemi oluşturan dielektrik sıvı gereksinimi için soğutma

yükü cinsinden tahminde bulunmuşlardır (100 cc/kW). Aynı yılda yaptıkları bir diğer çalışmada ise, test yüzeyi olarak mikro-gözenekli yapı kullanarak yüzey karakteristiğinin kaynama fiziği üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Barnes and Tuma 2009).

Sridhar et al. (2013), FC-72 dielektrik akışkanını kullanarak yüksek performanslı sunucu modellerinin daldırmalı soğutma tekniğini kullanarak ısı performansını araştırmışlardır. Deney parametreleri olarak ısıtıcı sayısı ve dielektrik akışkan havuz sıcaklığını incelemişlerdir. Bu çalışmada, 12 W/cm<sup>2</sup> ısı akısı değerine kadar yüzey sıcaklık dağılımı belirlenmiş ve literatüre sunulmuştur. Beş eş güçte ısıtıcının kullanıldığı deneylerde maksimum güç tüketimi 740W ile sınırlandırılmıştır. Bu deneysel çalışmada, kaynama sürecini incelemek için yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, iki kart arası mesafe 3 mm'ye kadar termal performansı azalmadığını göstermiştir.

Yüksek güçlü bilgisayarların çekirdek kaynama performansını inceleyen bir diğer çalışma ise El-Genk (2012) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada akışkan cinsi (HFE-5100 ve FC-72), yüzey eğimi (0°- 180°), aşırı soğutma sıcaklığı (0 K-30 K) ve yüzey cinsinin (bakır 2 mm, foroz granit 2 mm, bakır 1,6 mm-foroz granit 0,4 mm) daldırmalı soğutma uygulamalarında ki etkisi incelenmiştir. Deneysel sırasında yüzey ısı akısı 20W/cm<sup>2</sup>' den küçük tutulmuştur. Maksimum yüzey sıcaklığı 9K fark ile bakır ısı yayıcıda görülmüştür. Doymuş kaynama şartlarında bakır yüzeye sahip ısı emicisinden 51 W ısı çekilmiş ve termal direnç 0,42 ° C/W olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan kompozit yüzeyli ısı emicisinde bu değerler sırası ile 48,4 W ve 0,22 ° C/W olduğu görülmüştür. Sonuç olarak en iyi termal performans kompozit yüzeylerde görülürken en kötü performans foroz grafit yüzeyde görülmüştür.

Warrier et al. (2012b) farklı dielektrik akışkanları karıştırarak (HFE-7200, HFE-7200+Metanol ve HFE-7200+ Etoksibütan) termal performansa etkisini incelemiştir. Ayrıca, bakır kare yüzey (70 µm× 70 µm× 0,25 µm) ve nanotel dizilimi (20 µm uzunluğunda 200 nm çapında) kullanarak yüzey özelliklerinin etkisini araştırmıştır. Ali (2013) tarafından yapılan çalışmada ise, aynı şekilde mikro foroz yüzey kullanılmış ve yüzey kalınlığı ile eğim açısının etkinliği incelenmiştir.

Çip yığınlarının daldırmalı soğutma tekniği ile soğutulması üzerine yapılan bir diğer çalışma Sinha et al. (2013) tarafından yapılmıştır. FC-770 dielektrik akışkanının kullanıldığı bu uygulamada kapalı hacim içerisinde çip yığınının yayılan ısı iletim ve taşınım mekanizmalarıyla dış ortamla bağlantılı olan hava soğutma kısmına iletilmiştir. Bu deneysel çalışmada dört adet film ısıtıcı kullanılarak çip yığını oluşturulmuştur. Kullanılan akışkanın etkisini karşılaştırmak için kapalı hacim FC-770, FC770-bakır yünü ve su ile doldurmuşlardır. 40 W güç uyguladıkları deneysel çalışma sonuçlarına göre kullanılan soğutucu akışkan türüne göre farklı termal direnç değerlerine ulaşmışlardır. Bunlar FC-770 için 1,67-1,96 W/K aralığında, FC-770- bakır yün karışımında 1,47-1,87 W/K aralığında ve su için 1,06-1,50 W/K aralığında değiştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, deney sonuçlarına göre suyun ısı transfer sonuçlarının FC-770' den daha iyi çıkmasında rağmen elektriksel kısa devre sorunundan dolayı dielektrik akışkanların kullanılmasının daha uygun olacağını belirtmişlerdir.

Literatüre konu ile ilgili sunulmuş bazı çalışmalarda ise hem akışkan türü hem de ısı transfer yüzey yapısı incelenirken diğer taraftan da farklı soğutma yöntemleriyle kıyaslama yoluna gidilmiştir. Daldırmalı soğutma tekniğini doğal ve zorlanmış taşınım türleriyle araştıran ve literatüre Patel (2013) tarafından kazandırılan çalışma bu kategoriye güzel bir örnektir. Bu yapılan çalışmada doğal ve zorlanmış taşınım mekanizmalarının performans değerlendirmesi yapılmıştır. Soğutucu akışkan olarak mineral yağ kullanılan çalışmada, sunucu güç tüketimi, CPU kutu tasarımı ve ısı üreten bileşenlerin sıcaklıkları deney parametreleri olarak incelenmiştir. Çalışma verilerine göre daldırmalı soğutma tekniği kullanılarak, transistör eklem sıcaklığında %7,72 'lik bir azalma ve güç tüketiminde %38,79 'lik bir azalma sağlanmıştır.

Ramakrishnan et al. (2014) yüksek performanslı bilgisayarlarda çoklu çip modüllerinin sistem ve çalışma parametreleri daldırmalı soğutma için araştırmışlardır. İki farklı dielektrik sıvı kullanarak (Novec 649 ve HFE-7100) yaptıkları çalışmada dört eş ısıtıcı kullanmışlardır. Bu çalışmada akışkan türü ile beraber kare mikro yüzey ve mikro foroz yüzey kullanılarak çekirdek kaynama performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre, ısı akısı dağılımları aşırı soğutulmuş kaynama durumunda, Novec 649 akışkanı için 14,6 W/cm<sup>2</sup> iken HFE 7100 akışkanı için 14,2 W/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir.

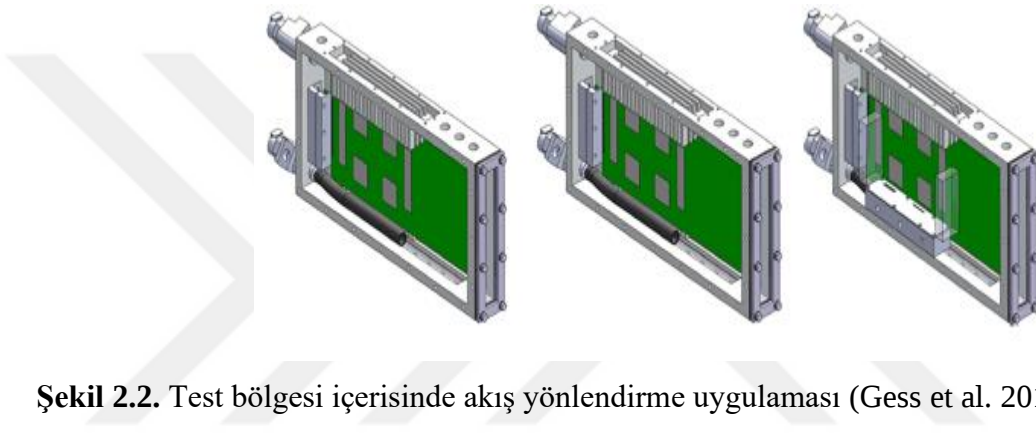
Isı transfer yüzey iyileştirmesi neticesinde Novec 649 ve HFE 7100 akışkanlarında ısı akısı değeri, sırasıyla  $18,87 \text{ W/cm}^2$  ve  $18,31 \text{ W/cm}^2$  ye yükseltilmiştir.

McWilliams (2014) soğutucu akışkan olarak mineral yağ kullanarak zorlanmış taşınım şartlarında daldırmalı soğutma etkinliğini incelemişlerdir. Bu çalışmada, akışkan debisi, ısıtıcı gücü ve ısı alıcı yüksekliği deney parametreleri olarak kullanılmıştır. Çalışma neticesinde, daldırmalı soğutma uygulamalarında güçlü sınır tabakalarının oluştuğu ve akışkan viskozitesinin soğutma performansı üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, sistem tasarımı yapılırken basınç düşüşünü azaltacak şekilde mümkün olduğunca basit bir tasarım yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Kullanılan soğutucu akışkanın çip yüzey malzemeleri ile uyumu araştırılması gereken bir diğer parametredir. Bu amaçla, Nagilla (2015), Shah et al. (2016) ve Thakkar (2016) tarafından daldırmalı soğutma mekanizmalarında kullanılan mineral yağların, korozyon gibi termal olmayan özellikleri incelenmiştir. Mineral yağ içerisine uzun süre daldırılarak kullanılan bilgisayar işlemcilerinin yüzeylerindeki deformasyon incelenmiştir. Malzemelerin özellikle plastiklerin dielektrik akışkan içerisinde liçlenme durumundan dolayı akışkan-yüzey uyumunun dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Yüksek güçlü elektronik sistem prototipi üzerinde direkt daldırmalı sıvı soğutma yöntemi için deneysel bir çalışma Gess et al. tarafından (2016b) ve (2015)'da yapılmıştır. Çalışma sırasında elektronik ekipmanların bulunduğu test bölgesi ( $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$ ) içerisine FC-72 ve Novec 649 dielektrik akışkanları farklı debilerde uygulanmıştır. Zorlanmış taşınım mekanizmasının değerlendirildiği çalışmalarda parametre olarak akışkan türü, akışkan debisi ve ısıtıcı gücü kullanılmıştır. Akış kaynama şartlarında ısı transfer katsayısını  $11,5 \text{ W/mK}$  olarak bulmuşlardır. Isıtıcı yüzey sıcaklıkları incelenen bu çalışmada  $320 \text{ W}$  güç beslemesinde yaklaşık  $58^\circ\text{C}$  de kalmıştır. Ayrıca, doğal konveksiyona kıyasla test bölgesi içerisine dielektrik akışkan gönderilmesi ( $1.250 \text{ mL/dk.}$ ) ile maksimum güç dağılımının  $605 \text{ W}$  seviyelerine çıktığını belirtmişlerdir ( $0,354 \text{ W/cm}^3$ ).

Gess et al. (2015) tarafından yapılan bir başka çalışmada ısınan elektronikler üzerine gönderilen dielektrik akışkanın test bölgesi içerisindeki yönelimine dikkat çekilmiştir. Bu çalışmada, akışkan üç farklı yöntem ile test bölgesine gönderilmiştir (Şekil 2.2). Termal performans karşılaştırması yapıldığı takdirde her bir akış düzeninde termal performans değişiklik göstermiştir. Bu anlamda, akışkan türü ve fiziksel uygunluğunun yanı sıra akış dağılımının da önemli bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma neticesinde akışkan moleküllerinin daha fazla ısınan yüzeyler üzerine doğru hareket ettiği sonucuna varılmıştır. Bu sebeple elektronik cihaz içerisindeki ekipman yerleşim yerinin önemi vurgulanmıştır.



**Şekil 2.2.** Test bölgesi içerisinde akış yönlendirme uygulaması (Gess et al. 2016a)

Daldırmalı soğutma tekniğini geleneksel hava soğutma uygulamalarıyla kıyaslayan bir çalışma Mohammed (2017) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada iki fazlı daldırmalı soğutma tekniği ARM tabanlı bilgisayar kümelerini soğutmak için kullanılmıştır. Bilgisayar kümeleri Raspberry Pi kullanılarak tasarlanmıştır. HFE 7000 ve HFE-7100 dielektrik akışkanları kullanılarak yapılan çalışma aynı zamanda hava soğutma sistemi uygulanarak yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada, cihaz eklem sıcaklığı, çalışma frekansı, işlem süresi, hesaplama performansı ve enerji tüketimi parametrelerini incelemişlerdir. Elde edilen veriler ile cihaz sıcaklığının hesaplama performansı ve enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermişlerdir. Çalışma neticesinde, yüksek ısı transfer kabiliyetine sahip iki fazlı daldırmalı soğutma yönteminin, özellikle geleneksel hava soğutma yöntemlerinin başarısız olacağı yüksek performanslı hesaplama uygulamalarında birçok yönden üstünlük gösterdiğini (enerji tasarrufu, işlem hızı ve güvenilirlik gibi) vurgulamışlardır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiği zaman daldırmalı soğutma tekniğinin güncelliğinin giderek arttığı görülmektedir. Kanbur et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada, daldırmalı sistemlerinin kullanılmasının termo-ekonomik avantajları değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, 3,43 kW ila 9,17 kW aralığında altı dinamik çalışma yükü altında iki fazlı daldırmalı soğutma sisteminin termal performansı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre maksimum çalışma yükünde performans katsayısı (COP) ve güç kullanım etkinliği (PUE) değerlerinin sırasıyla 6,67 ve 1,15 olduğu, en düşük çalışma yükünde ise sırasıyla 2,5 ve 1,4 olarak hesaplandığı belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada yürütülen çalışmada bileşen bazlı ekserji analizi yapılarak enerji maliyeti ve karbon maliyetlerine göre kurutma kulesinin en baskın bileşen olduğu vurgulanmıştır. Farklı çalışma yüklerinde ekserji verimliliği %8 ila %18,9 aralığında değiştiği ve çalışma sıcaklıklarının ekserji performansı üzerinde çok önemli pay sahibi olduğunu ifade etmişlerdir.

Dielektrik sıvıların termodinamik tepki sürelerini ve kaynama sınırını ihtiva eden bir çalışma Li et al. (2021) tarafından tamamlanmıştır. Deneysel olarak yürütülen çalışmada, etanol, FC-72 ve R113 dielektrik sıvıları kullanılmış ve performans karşılaştırması yapılmıştır. Doğal konveksiyon şartlarında ve etanol kullanımı durumunda minimum termal direnç toplam 0,2 °C/W (300W ısıtıcı gücünde) olarak belirlenmiştir. Ayrıca ısı transfer sınırları ve kaynama riskleri deneysel olarak araştırılmış ve her bir soğutucu için kritik ısı akısı değerleri teorik olarak analiz edilmiştir. Teorik modelleme sonucunda Rohsenow denkleminde iyileştirmeler yapılarak düzeltilmiş Rohsenow denkleminin literatüre sunulduğu belirtilmiştir.

Ramakrishnan et al. (2021), yüksek performanslı Intel hız aşırı ısıtıcı i9-9900k CPU kullanarak hava soğutma, soğuk plaka ve iki fazlı daldırmalı soğutma yöntemlerinin termal performanslarını kıyaslamışlardır. Yüksek ısı taşıma kapasitelerinden dolayı soğuk plaka (%41) ve iki fazlı daldırmalı soğutma (%51) yöntemlerinin hava soğutma metoduna kıyasla daha iyi performans gösterdiklerini belirtmişlerdir. Ayrıca bu iki soğutma yöntemiyle çok yüksek CPU saat hızlarına ulaşmanın mümkün olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışma sırasında soğuk plaka ve daldırmalı soğutma yöntemleri için su ve HFE 7000 sıvıları kullanılmıştır. Hem kaynamalı daldırma soğutma yönteminde hem de soğuk plaka kullanımında en düşük termal direnç 0,247 °C/W' ye kadar düşürülebildiği

vurgulanmıştır. Bu bakımdan hava soğutma sistemlerine göre hesaplama performansının artırılabilirdiği ve verimlilik sağlandığı ifade edilmiştir.

Gözenekli yapıların doymuş kaynama şartlarında çift fazlı daldırmalı soğutma ısı transfer performansı üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışma Terada et al. (2022) tarafından yapılmıştır. Farklı gözenek oranlarına sahip bakır yapıların kullanıldığı çalışmada, lotus kalınlığı 1 mm ve 3 mm olarak seçilmiştir. Sunulan sonuç değerlerine göre, 1 mm lotus kalınlığında (ortalama gözenek boyutu 0,65 mm) kritik ısı akısı değerinin 492 W/cm<sup>2</sup> olduğu diğer taraftan, 3 mm kalınlığında ise (ortalama gözenek boyutu 0,77 mm) kritik ısı akısı değerinin 409 W/cm<sup>2</sup> olduğu açıklanmıştır. Dolayısıyla soğutma performansını arttırmak için lotus bakır kalınlığının azaltılması gerektiğini ve ortalama gözenek boyutunun küçültülmesi gerektiğini savunmuşlardır. Aynı yılda yapılan bir diğer çalışma ise Zhou et al. (2022) tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmada veri merkezi sunucuları için tasarlanmış buhar odasında ısı yayıcı kullanılarak iki fazlı daldırmalı soğutma performansı araştırılmıştır. İş akışkanının sirkülasyonunu kolaylaştırmak ve ısı transfer performansını iyileştirmek adına buhar odası kılcal yapılarla yeniden düzenlenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen verilere göre, buhar odasının 85 °C' nin altındaki ısı kaynağı sıcaklığı ile 500 W ısı yükü kapasitesine sahip olduğunu, ayrıca kuruma olmadan maksimum 900 W ısı yüküne dayanabileceğini ve bu esnada buhar odası termal direncinin 0,046 °C/W olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca diğer gelişmiş soğutma mekanizmalarıyla kıyaslandığı zaman, buhar odası kullanılan iki fazlı sıvı daldırma soğutma yönteminin daha yüksek termal performans sağladığını ve yüksek güçlü veri merkezi sunucularının soğutulmasında umut verici bir sonuç verdiğini vurgulamışlardır.

Kibushi et al. (2021), oluklu ısı transfer yüzeyi ile birlikte kullanılan lotus bakırından dolayı oluşan solunum fenomeni ile doymuş kaynama şartlarında kritik ısı akısının artırılmasına yönelik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, iş akışkanı olarak su ve FC-72 dielektrik sıvısı kullanılmıştır. En yüksek kritik ısı akısı değeri 534 W/cm<sup>2</sup> olarak soğutma sıvısı su olduğu ve kenar uzunluğu 1 mm olan kare oluk durumunda belirlendiği açıklanmıştır. Nefes alma fenomeninde lotus içerisindeki buharın bakır yüzeyde bulunan oluklardan dışarıya çıktığını bu yüzden kritik ısı akısını geliştirmek için optimum bir oluk boyutunun olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca su için elde edilen

verilere göre maksimum ısı transfer katsayısı değerinin  $126 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$  olduğu ve FC-72 sıvısı için alınan verilere göre ise maksimum ısı transfer performansının  $1,5 \text{ mm}$  kenar uzunluğuna sahip kare oluk durumunda  $104 \text{ W}/\text{cm}^2$  olduğu belirtilmiştir. Ayrıca deneysel çalışma sonucunda gözenekli yapılar kullanılarak doymuş havuz kaynama şartlarında her iki tür soğutucu akışkanın da hem kritik ısı akısı değerini hem de kaynama ısı transfer performansını iyileştirilebileceği ifade edilmiştir. Benzer bir çalışmada Yuki et al. (2020), yüksek ısı akısına sahip ( $500 \text{ W}/\text{cm}^2$ ) SiC tabanlı otomotiv invertörlerinin gözenekli lotus yapısı varlığında ve yokluğunda ısı yönetiminde ortaya çıkan termal direnç problemini nicel olarak değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, termal direnci en aza indirmek için daldırmalı soğutma yöntemi kullanılmıştır. Bakır lotus ısı alıcılarının kullanılmadığı durumda dahi daldırmalı soğutma mekanizmasıyla oldukça yüksek kritik ısı akısı değerine çıkıldığı belirtilmiştir. Söz konusu çalışmada kritik ısı akısı değeri  $500 \text{ W}/\text{cm}^2$  olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ısı transfer yüzeyine birleştirilmiş gözenekli yapılarıyla kendiliğinden oluşan ‘nefes fenomeni’ sayesinde daha yüksek kritik ısı akısı ( $534 \text{ W}/\text{cm}^2$ ) seviyelerine ulaşabildiğini vurgulamışlardır.

Liu and Yu (2022), CPU modülünü doğrudan HFE 7100 dielektrik sıvısı içerisine daldırarak doymuş kaynama durumu için ısı transferi ve enerji tüketimi verilerini almışlardır. Çalışmada önerilen sistemin ortalama güç kullanım etkinliğinin (pPUE)  $1,035$ - $1,036$  aralığında olduğunu ve geleneksel hava soğutma sistemlerine kıyasla önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlandığını belirtmişlerdir. Ayrıca soğutucu ile doğrudan temas eden CPU yüzeyinde homojen bir ısı dağılımının olduğu bu yönüyle daldırmalı soğutma yönteminin avantajlı olduğunu vurgulamışlardır. Diğer taraftan sunulan  $q$ - $\Delta T_{\text{sat}}$  grafiğinin tipik kaynama eğrisinden farklı olmasını, gerçek zamanlı CPU çalıştırılmasına bağlı olarak frekans değişimlerinden kaynaklı güç ve dolayısıyla yüzey sıcaklıklarındaki dalgalanmalardan kaynaklandığını vurgulamışlardır.

Sun et al. (2022), iki fazlı daldırmalı soğutma yöntemiyle veri merkezi termal yönetim uygulamaları için kabin şartlarını değerlendiren bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada termal güvenlik ve ısıl homojenlik bakımından soğutucunun kabine giriş hızı, akışkan türü ve kabin iç yapısının soğutma performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, giriş sıcaklığının ve akışkan türünün elektronik güvenliği için oldukça önemli parametreler olduğu belirtilmiştir. Sabit giriş sıcaklığında, akışkan

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

debisinin artışıyla birlikte elektronik ekipman sıcaklığının düşme aralığının kademeli olarak azaldığı ifade edilmiştir. Giriş hızı 0,6 m/s'den büyük olduğu durumlarda düşüş aralığının değişmediği araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır. Ayrıca aynı giriş sıcaklığında ve aşırı soğutma sıcaklığında kaynama noktası sıcaklığı daha düşük olan Novec 7000 sıvısının kullanıldığı durumlarda elektronik ekipman sıcaklığı Novec 649 sıvısının kullanıldığı durumlara kıyasla daha düşük değerler aldığı sonucuna varılmıştır. Ek olarak gizli buharlaşma ısısının sıcaklık düşüş aralığını önemli ölçüde etkilediği ve ortalama çip sıcaklığını yaklaşık 17,32 °C azalttığını belirtmişlerdir. Diğer taraftan kabin tasarımında ısınan yüzeyler arasına bölme eklenmesi akışkan sıcaklığındaki homojenliği artırdığını ve dolayısıyla çip yüzeyinin sıcaklık homojenlik katsayısını %55,64 oranında azaltabileceğini ifade etmişlerdir. Bu sayede güvenli ve karalı çalışma şartlarının sağlandığını ileri sürmüşlerdir.

Literatürde daldırılmalı soğutma tekniği konusunda yapılmış deneysel çalışmalar incelendiği takdirde, araştırmacıların ısı transferi katsayısını arttırmak için yoğunlaştığı parametreler belirlenebilmektedir. Bu anlamda yapılan araştırmaların kısa bir özeti Çizelge 2.1' de sunulmuştur.

**Çizelge 2.1.** Çift fazlı daldırılmalı soğutma uygulamaları için özet tablo

| Araştırmacılar              | İş Akışkanı         | Isı transfer Mekanizması | Test Yüzeyi                          | Parametreler                             | Kamera |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------|
| Mudawar (1992)              | FC-72               | Doğal taşınım            | Kare ve silindirik kanatçık dizilimi | Yüzey şekli, kanat doluluk oranı         | -      |
| Leland and Chow (1993)      | FC-72               | Zorlanmış taşınım        | -                                    | Yüzey uzunluğu, Akışkan hızı             | -      |
| Leland and Chow (1998)      | FC-72               | Zorlanmış taşınım        | -                                    | Isıtıcı türü (bakır, ince folyo ısıtıcı) | -      |
| Baldwin et al. (2000)       | FC-72               | Pasif soğutma            | Silikon kanat                        | Boşluk oran ve şekli                     | -      |
| Bhavnani and Jaeger (2000)  | R-113<br>FC-72      | Doğal taşınım            | Silikon kanat                        | Kanat boşluk oranı, Soğutucu türü        | HSC    |
| El-Genk and Bostanci (2003) | Saf su,<br>HFE-7100 | Doğal taşınım            | Konik, sarmal, yatay, asimetrik      | Soğutucu yüzey                           | -      |

Çizelge 2.1. (devam)

| Araştırmacılar            | İş Akışkanı                                         | Isı transfer Mekanizması | Test Yüzeyi                            | Parametreler                                                                          | Kamera     |
|---------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Gershen (2004)            | HFE 7100                                            | Doğal taşınım            | Bakır köpük, bakır mikrokanaatlı yüzey | Gözenek yoğunluğu, yüksekliği, genişliği ,kanat sayısı, boy/en oranı, duvar sıcaklığı | -          |
| Medavaram et al. (2005)   | HFE-7100<br>FC-72                                   | Doğal taşınım            | Piramid yüzey boşluğu                  | Aşırı soğutma sıcaklığı, Boşluk boyutu                                                | HSC        |
| El-Genk and Parker (2005) | HFE-7100                                            | Doğal taşınım            | Foroz grafit, Pürüzsüz bakır           | Aşırı soğutma sıcaklığı, yüzey türü                                                   | -          |
| Nimkar et al. (2006)      | FC-72                                               | Doğal taşınım            | Mikro-pramid yüzey                     | Sıcaklık                                                                              | HSC        |
| Stoebener and Goch (2006) | Yağ                                                 | Doğal taşınım            | -                                      | Ultrasonik ses kaynağının konumu                                                      | CCD kamera |
| Lenke et al. (2008)       | Midel-7131<br>FC-40<br>M. Yağ,<br>S. yağ<br>S.ester | Pasif soğutma            | Pin yüzey, sekizgen yüzey              | Akışkan türü<br>Isıtıcı gücü                                                          | -          |
| Barnes and Tuma (2009)    | HFE<br>FK                                           | Pasif soğutma            | -                                      | -                                                                                     | -          |
| Barnes and Tuma (2009a)   | HFE                                                 | Pasif soğutma            | Mikro gözenekli yüzey                  | -                                                                                     | -          |
| Suszko (2015)             | PF- 5060                                            | Doğal taşınım            | Pürüzlü/oyuklu bakır yüzeyler          | Yüzey türü, yerleşim açısı,                                                           | HSC        |
| Tuma (2010)               | HFE<br>FK<br>PFC                                    | Doğal taşınım            | -                                      | Akışkan türü                                                                          | -          |
| Sridhar et al. (2013)     | FC-72                                               | Doğal taşınım            | Kare yüzey                             | Isı akısı, dielektrik sıvı havuz şartları, ısıtıcı sayısı                             | HSC        |

Çizelge 2.1. (devam)

| Araştırmacılar             | İş Akışkanı                                          | Isı transfer Mekanizması | Test Yüzeyi                                                                                                            | Parametreler                                                 | Kamera |
|----------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| El-Genk (2012)             | HFE-7100<br>FC-72                                    | Doğal taşınım            | Bakır, Foroz granit,<br>Bakır+Foroz Granit                                                                             | Yüzey eğimi, aşırı soğutma miktarı, yüzey cinsi              | -      |
| Ali (2013)                 | PF-5060                                              | Doğal taşınım            | Mikro-foroz yüzey                                                                                                      | Yüzey kalınlığı/eğim açısı                                   | -      |
| Nagilla (2015)             | Mineral yağ                                          | -                        | işlemci                                                                                                                | Akışkana daldırma süresi                                     | -      |
| Warrier et al. (2012b)     | HFE-7200<br>HFE 7200+Metanol<br>HFE 7200+etoksibütan | Doğal taşınım            | Bakır kare oluk yüzey (70µm derinlik 70µm genişlik 0,25mm uzunluk) Nanotel dizilimi (20µm yüksekliğinde 200nm çapında) | Akışkan türü<br>Isı transfer yüzeyi                          | -      |
| Ramakrishnan et al. (2014) | Novec 649<br>HFE 7100                                | Doğal taşınım            | Kare mikro yüzey, mikro foroz yüzey                                                                                    | Doymuş ve aşırı soğutulmuş kaynama, yüzey türü, akışkan türü | HSC    |
| McWilliams (2014)          | Mineral yağ                                          | Zorlanmış taşınım        | işlemci                                                                                                                | Debi, giriş sıcaklığı, ısıtıcı gücü, ısı alıcı yüksekliği    | -      |
| Gess et al. (2015)         | Novec-649<br>FC-72                                   | Zorlanmış Taşınım        | Mikro gözenek/Foroz yapı                                                                                               | Debi, akışkan türü, ısı transfer yüzeyi                      | PIV    |
| Gess et al. (2015)         | Novec-649<br>FC-72                                   | Zorlanmış Taşınım        | Kare yüzey                                                                                                             | Debi, ısıtıcı gücü                                           | PIV    |

Çizelge 2.1. (devam)

| Araştırmacılar               | İş Akışkanı                                                  | Isı transfer Mekanizması           | Test Yüzeyi                                | Parametreler                                                      | Kamera |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------|
| Shah et al. (2016)           | Mineral yağ                                                  | -                                  | Kare yüzey                                 | Daldırma süresi, aşınma durumu                                    | -      |
| Yuki et al. (2016)           | Saf su                                                       | Doğal taşınım                      | Bakır Foroz yüzey                          | Aşırı kızdırma sıcaklığı                                          | -      |
| Qiu et al. (2017)            | Saf su                                                       | Zorlanmış taşınım                  | -                                          | Isıtıcı gücü, debi                                                | -      |
| Wakabayashi et al. (2017)    | Novec-7300                                                   | Doğal taşınım                      | -                                          | Isıtıcı gücü                                                      | -      |
| Ma et al. (2017)             | Saf su<br>%30 EG +<br>saf su<br>karışımı<br>LLC<br>Solüsyonu | Zorlanmış taşınım                  | -                                          | Soğutucu türü                                                     | HSC    |
| Wada et al. (2017)           | Novec-7100<br>Novec-7200                                     | Doğal taşınım                      | Bakır yüzey,<br>yaprak yay,<br>helezon yay | Soğutucu türü,<br>doluluk oranı, ısıtıcı<br>cinsi, ısıtıcı sayısı | -      |
| Chandrasekaran et al. (2017) | Novec-649<br>FC-72                                           | Zorlanmış Taşınım                  | Mikro gözenek/Foroz yapı                   | Sıcaklık, debi                                                    | PIV    |
| Mohammed (2017)              | HFE 7000<br>HFE 7100                                         | Doğal taşınım                      | Raspberry Pi işlemci                       | Akışkan türü                                                      | -      |
| Tuma et al. (2018)           | FK                                                           | Doğal taşınım                      | -                                          | -                                                                 | -      |
| Hsu et al. (2018)            | Novec-649                                                    | Pasif soğutma                      | SiNW,<br>(SiMP) ve<br>SiMP + SiNW.         | Isı transfer yüzeyi                                               | CCD    |
| Kanbur et al. (2020)         | HFE-7100                                                     | Doğal taşınım (çift faz)           | -                                          | Isıtıcı gücü (termodinamik ve termoeconomik analiz)               | -      |
| Yuki et al. (2020)           | De-iyonize su                                                | Doğal taşınım (çift faz)           | Gözenekli yapı                             | Performans karşılaştırması                                        | -      |
| Li et al. (2021)             | Etanol FC-72 R113                                            | Doğal taşınım<br>Zorlanmış taşınım | Kanatçıklı yapı                            | Akışkan türü, taşınım mekanizması                                 | -      |

Çizelge 2.1. (devam)

| Araştırmacılar             | İş Akışkanı           | Isı transfer Mekanizması      | Test Yüzeyi                | Parametreler                                     | Kamera |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|--------|
| Kibushi et al. (2021)      | FC-72<br>Su           | Doğal taşınım<br>(çift faz)   | Gözenekli yapı             | Oyuk boyutu ve akışkan türü                      | -      |
| Ramakrishnan et al. (2021) | Su<br>HFE 7000        | Doğal taşınım<br>(IC, AC, CP) | CPU soğutma                | Performans karşılaştırması                       | -      |
| Terada et al. (2022)       | su                    | Doğal taşınım<br>(çift faz)   | Gözenekli yapı             | Gözenek boyutu, lotus yapı kalınlığı             | -      |
| Zhou et al. (2022)         | HFE-7100              | Doğal taşınım<br>(çift faz)   | -                          | Buhar odası yapısı                               | -      |
| Liu and Yu (2022)          | HFE 7100              | Doğal taşınım<br>(çift faz)   | CPU soğutma                | Güç kullanım etkinliği (PUE) değerlendirmesi     | -      |
| Sun et al. (2022)          | Novev 649<br>HFE 7000 | Zorlanmış Taşınım 2faz        | Veri merkezi kabin soğutma | Akışkan giriş hızı, akışkan türü, kabin tasarımı | -      |

Literatürde daldırılmalı soğutma tekniği kullanılarak yapılmış sayısal çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, Joshi and Majumdar (1993) sıvı dolu kare tankın alt yüzeyine yerleştirdikleri ısı kaynağı ile doğal taşınım ısı transferi mekanizmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Geniş aralıktaki Rayleigh ve Prandtl sayıları için alt tabaka ve ısı kaynağının içindeki ısı iletimini tanımlamaya çalışmışlardır. Alt yüzeyden sıvıya ve ısı kaynağından sıvıya ısı iletkenlik katsayıları sırasıyla  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'in üzerine çıktığı zaman sıcaklıklarda çok az miktarda azalma olduğu sonucuna varmışlardır.

Behnia et al. (1998) tarafından yapılan çalışmada ise, FC-72 akışkanı kullanılmış ve iki ısı kaynağının doğal taşınım ile soğutulması durumu incelenmiştir. Düşük termal iletkenliğe sahip bakalit ve yüksek termal iletkenliği olan alüminyum-seramik yüzey malzemeleri kullanılarak yüzey malzemesinin ısı transferi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmişlerdir. Ayrıca, tek ve çift ısı kaynağı kullanılarak karşılaştırma yaptıkları çözümleme de ısı kaynaklarının boyutsuz sıcaklık ve Nusselt sayıları, Rayleigh sayısının bir fonksiyonu olarak sunmuşlardır.

Geisler and Bar-Cohen (2007) daldırılmalı soğutma tekniğinin sistem tasarımında çeşitli avantajlarının (kurulum kolaylığı, soğutma kapasitesi ve sistem hacmi vb.

olduğunu belirtmişlerdir. FC-72 akışkanını kullanarak hem iki fazlı soğutma hem de tek fazlı soğutma için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Bir dizi kalıbı birleştirerek yaptıkları çalışmada optimum kalıp kalınlığının tipik mikroelettronik geometriler için 0,5 mm civarında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, bu geometrilerde doğal konveksiyonda 10-50 W/cm<sup>3</sup> ve kaynama durumunda 100-500 W/cm<sup>3</sup> olarak belirlemişlerdir.

Ali and El-Genk (2012) merkezi sıcak bir nokta için bir bilgisayar chipinin çekirdek kaynamalı daldırmalı soğutma çalışmasını yapmışlardır. Bu sayısal çalışmada, 2×2 mm merkezi sıcak noktaya sahip 10×10 mm boyutlarında bilgisayar chipi tasarımı kullanmışlardır. Farklı kalınlıklardaki bakır yüzeyler (1,6mm- 3,2mm) ve mikro-foroz bakır yüzeyler (80µm- 197 µm) kullanmışlardır. Doymuş çekirdek kaynama şartlarında dielektrik akışkan olarak PF-5060 kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, bakır yüzey kalınlıklarının azalması veya bakır mikro-foroz yüzeylerinin artması sistemden uzaklaştırılan termal gücün artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Suszko and El-Genk (2015) 20×20 mm boyutlarındaki kompozit bir ısı yayıcısını sayısal olarak modelleyerek daldırmalı soğutma tekniğini uygulamışlardır. Bu kompozit ısı yayıcısını 0,5 mm kalınlığındaki bakır ve 0,25mm- 1 mm kalınlığındaki poligrafit malzemeden oluşturmuşlardır. Bu çift fazlı daldırmalı soğutma çalışmasında soğutucu akışkan olarak PF-5060 kullanılmıştır. Sayısal çalışma sonuçlarına göre, maksimum sıcaklık 120 oC iken 1 mm kalınlığındaki poligrafit malzemeden oluşturulan ısı yayıcısı, kritik ısı akısının %90' nını aşmadan 318 W ısı çekmiştir. Çekilen ısı miktarının aynı şartlarda bakır ısı alıcısından çekilen ısıya kıyasla çok daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Kompozit ısı yayıcılar için ise bu değerlerin poligrafit kalınlığına göre (0,25, 0,5 ve 0,75 mm) sırasıyla 160 W ( $T_{max}= 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de), 228 W ( $T_{max}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de) ve 292 W ( $T_{max}= 115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de) olduğunu belirtmişlerdir.

Matsuoka et al. (2017) yaptıkları çalışmada veri merkezlerinin daldırmalı sıvı soğutma teknolojisiyle soğutulmasını doğal taşınım mekanizması ile incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmada, soğutucu akışkanlar olarak silikon yağı, soya fasulyesi yağı ve perflorokarbon yapılı termal ve kimyasal olarak sabit özelliklere sahip sıvılar kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, CPU sıcaklığının artan

Rayleigh sayısıyla azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, daha akışkan sıvıların kullanılmasının soğutma performansını olumlu yönde etkileyeceğini vurgulamışlardır.

An et al. (2018) tarafından yürütülen sayısal çalışmada, yüksek güçlü elektronik bileşenlerin iki fazlı daldırmalı soğutma performansı araştırılmıştır. Bu çalışmada, 5 cm × 5 cm boyutlarındaki iki ısıtıcı farklı oryantasyonlarla Novec 7000 dielektrik akışkanı içerisinde simüle edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, iki ısı kaynağı üst üste (seri) akışkan içerisine daldırıldığı zaman üstte kalan ısı kaynağının yüzey sıcaklığının alttakine kıyasla daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü altta kalan ısıtıcı yüzeyindeki sıvı kabarcıklarının üstteki ısıtıcı yüzeyine yöneldiğini ve bu yüzden ısı transferini azalttığını vurgulamışlardır. Ayrıca, Novec 7000 akışkanı içerisine dikey olarak konumlandırılmış tek bir ısıtıcı (5 × 5 cm) için maksimum 225 W ısı atılabildiğini buna karşın üst üste yerleştirilerek sıvı içerisine daldırılmış durumda üstteki ısıtıcıdan maksimum 185 W ısı çekilebildiğini vurgulamışlardır.

### 2.2. Tek Fazlı Daldırmalı Soğutma

Daldırmalı soğutma tekniğinin tek faz içeren sistemlere de uygulanması mümkündür. Çift faz uygulamalarına kıyasla daha düşük termal performans sağlanmasına rağmen hava soğutma mekanizmalarına nazaran daha yüksek güç yoğunluklarına ulaşılabilirdiği literatürde kabul görmüş bir gerçektir. Önceki çalışmalar dikkatle incelendiği zaman tek faz uygulamalarının çift faz uygulamalarına göre oldukça az sayıda olduğu ve yoğunluklu olarak sayısal çözümlemeleri içerdiği görülmektedir. Güç elektroniğinde daldırmalı soğutmanın Pires et al. (2020) tarafından değerlendirildiği bir çalışmada, transformatör yağı içerisine daldırılan güç elektroniğinin termal performansı araştırılmıştır. Deneysel ve sayısal olarak sürdürülen çalışma sonuçlarına göre yağa daldırma yöntemiyle elektronik üzerinde homojen ısı dağılımının elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca düzgün ısı yayılımı sayesinde hava soğutma sistemlerine nazaran daha iyi bir soğutma performansı sağlandığı vurgulanmıştır. Diğer taraftan sıcaklık dağılımlarına göre tank tabanındaki yüzeyler ortam sıcaklığı ile hemen hemen aynı kalmıştır. Daha iyi termal performans sağlamak için güç elektroniği cihazının tank tabanına yakın bir yere yerleştirilmesi gerektiği not edilmiştir. Tek fazlı daldırmalı soğutmanın ısı performans bakımından kullanışlı bir termal yönetim tekniği olduğunu

savunan bir diğer çalışma Cheng et al. (2020) tarafından yapılmıştır. Sayısal ve deneysel olarak yürütülen çalışmada soğutma sıvısı olarak Novec-7100 dielektrik sıvısı kullanılmıştır. Düz kanatlı ısı alıcılar CPU üzerine yerleştirilerek üç farklı akış hızı için çalışma verileri düzenlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek debi değerlerinde CPU yüzeyinden daha fazla miktarda ısı uzaklaştırıldığı ve ısıtılmış yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımının homojen bir görüntü aldığı belirtilmiştir. Diğer taraftan düşük debi değerlerinde hedef yüzey üzerindeki soğutucu sirkülasyonu sınırlandığından dolayı yüzey sıcaklıklarında sıçrama meydana geldiği ve düzensiz ısı dağılımının gözlemlendiği ifade edilmiştir.

Artan güç kayıpları ve çevresel etkilerden dolayı hava soğutma sistemleri yerini daldırılmalı soğutma sistemlerine bırakmaktadır. Cebri hava soğutma yerine daldırma sistemlerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Yüksek güçlü elektroniklerin hidrokarbon soğutucu kullanılarak soğutulduğu bir diğer çalışma Luiten (2021) tarafından yapılmıştır. Sayısal olarak yürütülen çalışmada, soğutma yüzeyi olarak yüksek güçlü çip modellenmiş ve farklı ısı alıcı tasarımlarıyla optimizasyon yapılmıştır. Optimum kanatçık modelini belirlemek için yüzey yanıt yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar cebri hava soğutma ile kıyaslanarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Optimum kanat modelinde 3 m/s debili zorlanmış hava taşınım sistemlerine göre daha iyi ısı performans elde edildiği belirtilmiştir. Optimizasyon içeren bir diğer çalışma ise Saini et al. (2022) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak sabit pompa gücünde zorlanmış ve doğal konveksiyon sayısal çözümü gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan sayısal model, optimizasyon parametresi olarak basınç düşüşü ve termal direnç kullanılarak hem alüminyum hem de bakır ısıtıcı yüzeyleri için çözümlemeyi içermektedir. Geometrik şekil faktörünün hem basınç düşüşü hem de termal direnç üzerinde oldukça etkili olduğu vurgulanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, optimum kanat yapısında basınç düşüşü ve termal direnç bakımından %15 iyileşme sağlandığı ifade edilmiştir. Ayrıca doğal konveksiyonla soğutma durumunda, soğutucu yüksekliğinin kanat kalınlığından daha büyük bir değişime sebep olduğunu vurgulamışlardır.

Elektrikli araç endüstrisi, direkt soğutma sistemlerinin popüler olduğu alanlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle son yıllarda yürütülen çalışmalar, elektrikli

araçlarda kullanılan lityum iyon pillerinin daldırmalı soğutma tekniği ile etkin bir şekilde soğutulması temelinde yapılmıştır. Bu soğutma mekanizmaları sürücü güvenliği ve yüksek soğutma kapasitesi nedeniyle araştırmacılara umut veren bir tekniktir. Elektriksel olarak yalıtkan sıvıların kullanıldığı ve bu sayede sürücü güvenliğinin garanti edildiği daldırmalı soğutma tekniğinin termal yönetim kabiliyeti araştırılan çalışmalardan birisi Jithin and Rajesh (2022) tarafından yapılmıştır. Sayısal olarak yürütülen çalışmada, lityum iyon pillerinin tek fazlı daldırmalı soğutma tekniği kullanılarak soğutulması ve akışkan türünün (de-iyonize su, mineral yağ ve mühendislik akışkanı) termal performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu sayede akü modülünün farklı debilerde ve farklı deşarj seviyelerinde davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bütün durumlarda lityum iyon pil hücrelerinin homojen sıcaklık dağılımı gösterdiği vurgulanmıştır. Ayrıca daha yüksek özgül ısı ve termal iletkenliğe sahip dielektrik sıvıların yüksek deşarj koşullarında lityum iyon pil hücrelerinin soğutulması için uygun olacağını belirtmişlerdir. Benzer çalışma, Trimbake et al. (2022) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmada lityum iyon pilleri mineral yağ tankı içerisine daldırılarak soğutma performansı deneysel olarak araştırılmıştır. 2C şarj ve 3C deşarj süreçlerinde hücreler arasında maksimum sıcaklık farkının 2° C ve hücreler içinde sıcaklık gradyeninin oluşmadığı rapor edilmiştir. Ayrıca yağ soğutma uygulamasının elektrik depolama ve nakliye sistemlerine uygulanabilecek mükemmel bir paket soğutma çözümü olduğunu vurgulamışlardır.

Gandhi (2019) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, HP ProLiant DL160G6 sunucu modeli daldırmalı soğutma mekanizması kullanılarak soğutulmuş ve hava soğutma sistemiyle performans karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışmada, 6SigmaET kullanılarak CFD modeli oluşturulmuş ve sunucu sistem direnci veya sistem direnç eğrisi deneysel olarak karakterize edilmiştir. Soğutucu debisi ve modüle giriş sıcaklığı değiştirilerek ısı transfer katsayısındaki değişim incelenmiştir. EC-100 ve mineral yağ kullanılarak sürdürülen çalışmada en iyi termal performans mineral yağ kullanımında elde edilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

**Çizelge 2.2.** Tek fazlı daldırmalı soğutma uygulamaları için güncel çalışmalar özet tablosu.

| Araştırmacı         | Çalışma özeti                                                                                                                                                                           | Sonuçlar                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pires et al. (2020) | Soğutucu akışkan olarak transformatör yağı kullanılarak, doğal taşınım şartlarında sayısal ve deneysel çalışma yürütülmüştür.                                                           | Hava soğutma sistemlerine kıyasla daha iyi termal performans elde edilmiştir. Uygulanan sistemde termal performansın iyileştirmesi için ısı üreten ekipmanın tank tabanına yerleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.                                                                                                   |
| Cheng et al. (2020) | Zorlanmış taşınım şartlarında ısı alıcı yüzeyler kullanılarak CPU soğutması yapılmıştır. Çalışma deneysel ve sayısal olarak yürütülmüştür.                                              | Yüksek debilerde CPU yüzey sıcaklık dağılımı homojen bir form alırken düşük akış oranlarında yüzey sıcaklıklarının arttığı ve ısı transfer katsayısının azaldığı belirtilmiştir. 1.2, 0.8 ve 0.4 m/s akış hızları için soğutma sıvısı çıkış sıcaklıkları sırasıyla 300.01K, 300.10K ve 300.20 K olarak kaydedilmiştir. |
| Luiten (2021)       | Sayısal olarak yürütülen çalışmada, yüzey yanıt yöntemi kullanılarak optimum kanat geometrisi belirlenmiştir.                                                                           | Cebri hava soğutma sistemlerine kıyasla hidrokarbon sıvılara daldırma işleminin termal performansı daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca optimum kanat yapısında 3 m/s hava debisi uygulanan zorlanmış taşınım soğutma sistemine kıyasla daha iyi termal performans elde edildiği not edilmiştir.                  |
| Saini et al. (2022) | Doğal ve zorlanmış konveksiyon şartlarında daldırmalı soğutma performansı incelenmiştir. Geometrik şekil faktörünün basınç düşüşü ve termal direnç üzerindeki etkileri araştırılmıştır. | Analiz sonuçlarına göre optimum kanat yapısıyla basınç düşüşü ve termal direnç için %15 iyileşme sağlanabilmektedir.                                                                                                                                                                                                   |

Çizelge 2.2. (devam)

| Araştırmacı              | Çalışma özeti                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Sonuçlar                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jithin and Rajesh (2022) | Farklı dielektrik sıvılar kullanarak lityum iyon pillerinin termal yönetimi için tek fazlı sıvı daldırma sistemi kullanılmıştır. Çalışma, zorlanmış taşınım koşullarında sayısal olarak yürütülmüştür. Farklı akışkan debilerinde ve 3 farklı dielektrik sıvı kullanılmıştır.                       | İncelenen bütün dielektrik sıvılar, 0,05 kg/s debi için 2-C deşarj sürecinde sıcaklık artış miktarını 5 °C'nin altında kalacak şekilde sınırlamıştır. Ayrıca, deiyonize su aynı akış hızında 3C deşarj sürecinde 0,52 mW güç tüketimi ile sıcaklık artışını 2,2 °C'nin altında sınırlamıştır. |
| Trimbacke et al. (2022)  | Lityum iyon pilleri minarel yağa daldırarak soğutulması hedeflenmiştir. Deneysel çalışmada edinilen verileri doğrultusunda daldırılmalı soğutma sistemlerinin lityum iyon pil hücrelerinde sıcaklık dağılımlarını homojen hale getirdiği ve uygun bir termal yönetim sistemi olduğu belirtilmiştir. | 2C şarj ve 3C deşarj süreçlerinde hücreler arasında maksimum sıcaklık farkının 2° C ve hücreler içinde sıcaklık gradyeninin oluşmadığı rapor edilmiştir.                                                                                                                                      |
| Gandhi (2019)            | Farklı soğutma sıvıları kullanılarak tek fazlı daldırılmalı soğutma uygulaması gerçekleştirilmiştir. EC-100 ve mineral kullanılmıştır. Soğutma sıvısının modül içerisine giriş sıcaklığı deney parametresi olarak değerlendirilmiştir.                                                              | Çalışma sonuçlarına göre en yüksek termal performans yüksek ısı kapasitesi sebebiyle mineral yağ kullanımı durumunda elde edilmiştir.                                                                                                                                                         |

### 2.3. Ultrasonik Ses Dalgalarının Isı Transferi Performansına Etkisi

Ultrasonik ses dalgaları günümüzde çeşitli amaçlarla birçok uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Ultrasonik karıştırıcılar, ultrasonik temizleme, gıda endüstrisi, ultrasonik radar ve güvenlik sistemleri, balıkçılık, tıbbi muayene cihazları, kurutma sistemleri, kimyasal reaktör hazırlama sistemleri, kaynak işlemleri ve savunma sanayi sistemleri ses dalgalarının kullanıldığı uygulamalardan birkaçını oluşturmaktadır. Akışkan tahrik mekanizmalarının ısı transferi katsayısını artırdığı bilinen bir gerçektir. Sistem içerisindeki akışkan pompa ya da fan yardımıyla sirküle edilebilir bu sayede sıcak yüzey etrafında akışkan hareketi hızlandırılarak termal performans artırılabilir. Ultrasonik ses dalgaları, sıvı ortam içerisinde ilerlerken akustik akış ve kavitasyon fenomenlerinin oluşmasına neden olduğu ve bu sayede ısı transfer performansını iyileştirici etkide bulunduğu önceki bölümlerde ifade edilmişti. Ses dalgalarının termal yönetim sistemlerinde kullanılışı 1965' li yıllara dayanmaktadır. Teknolojik gelişmeleri takiben elektronik sistemlerde artan güç yoğunluğu enerjinin tasarruflu ve verimli kullanılmasının yanı sıra termal yönetim sistemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu bölümde ultrasonik ses dalgalarının termal performansı arttırmaya yönelik yapılmış güncel çalışmalar daldırmalı soğutma tekniği özelinde sunulmuştur.

Ultrasonik titreşim kaynaklı akış davranışının doğal taşınım ve havuz kaynama rejimlerinde ısı transferi katsayısına etkilerini FC 72 dielektrik sıvısı kullanarak inceleyen bir çalışma Kim et al. (2004) tarafından yürütülmüştür. Isı kaynağı ve sıcaklık sensörü olarak ince platin tel kullanılan çalışmada, kavitasyon ve termal kabarcıkların davranışını gözlemlemek için yüksek hızlı kamera kullanılmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, ultrasonik titreşimin akış davranışı üzerindeki etkilerinin, ısı transfer rejimine ve çözünmüş gaz miktarına bağlı olarak büyük ölçüde değiştiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca doğal taşınım ve aşırı soğutulmuş kaynama rejimlerinde, kavitasyon kabarcıklarının davranışı, ısı transferindeki artış derecesini önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir. Diğer taraftan doymuş kaynama rejiminde kavitasyon oluşmadığını bu nedenle termal kabarcık boyutu ve akustik akış ısı transferini artıran temel faktörler olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca en yüksek iyileşme oranının kavitasyon kabarcıklarının şiddetli hareketi ile doğal konveksiyon rejiminde elde edildiğini not etmişlerdir.

Monnot et al. (2007) sarmal bir boru içerisinde geçen akışkan ile sıvı ortamı arasındaki ısı transferi performansını ultrasonik ses dalgaları varlığında ve yokluğunda araştırmışlardır. Bu çalışmada, ultrasonik titreşim frekansı 1.600 kHz olarak uygulanmıştır. Sonuçlara göre en büyük iyileşme faktörü değeri, 800 kHz frekans ve 57,6 W genlikli ultrasonik ses dalgasında 2,04 olarak hesaplanmıştır.

Rahimi et al. (2012) tarafından yapılan çalışmada yüksek frekanslı ultrasonik dalga dönüştürücü konumunun ısı transfer performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla hem ısıtıcı hem de sensör olarak kullanılan ince platin tel deiyonize su içerisine daldırılmıştır. Ultrasonik dönüştürücüler, su tankı yan yüzeylerine ve tabanına yerleştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre yan yüzeye yerleştirilmiş tek bir dönüştürücünün ısı transferini iyileştirmede diğer düzenlere kıyasla daha etkili olduğu ifade edilmiştir.

Baffigi and Bartoli (2012), tek fazlı doğal taşınım ve doymuş havuz kaynama mekanizmalarında ultrasonik ses dalgalarının ısı transferi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 40 kHz sabit frekans değerinde uygulanan ses dalgalarının genliği 300W ile 500W aralığında değiştirilmiştir. Deneysel çalışmada soğutucu akışkan olarak deiyonize su kullanmışlardır. Sıcak yüzey olarak sıvı içerisine daldırılmış bakır tel yüzeyi kullanılmıştır. Çalışma sonuçları göre, ultrasonik ses dalgaları ısı transferi katsayısını aşırı soğutulmuş kaynama durumunda daha fazla iyileştirdiği ifade edilmiştir. Ayrıca doymuş kaynama sınırına yaklaşırken ultrasonik ses dalgaları ısı transferini azalttığını not etmişlerdir.

Kiani et al. (2012) ultrasonik ses dalgalarının uygulandığı sıvı ortam içerisinde soğumaya bırakılan küre şeklindeki sıcak yüzeyin termal sürecini araştırmışlardır. Sabit frekans değerinde (25 kHz) fakat farklı güç yoğunluklarında (0, 120, 190, 450, 890, 1800, 2.800, 3.400 ve 4.100 W/m<sup>2</sup>) uygulanan ultrasonik ses dalgalarının soğuma sürecini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. İlgili çalışmada, ultrasonik ses dalgalarının, ısı transfer katsayısını önemli ölçüde artırdığı gibi soğutma süresini de azalttığı sonucuna varmışlardır. Fakat yüksek güç yoğunluklarında sıcak yüzey üzerinde ilave ısı oluştuğunu vurgulamışlardır. Yine Kiani et al. (2013), ultrasonik ısımanın bakır bir küre ile soğutucu akışkan arasındaki taşınım ile ısı transferi üzerindeki etkilerini farklı Reynolds ve Prandtl

sayıları için deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmaya konu olan parametreler; bakır küre çapı (0,01 ve 0,02 m), akışkan hızı ( $1,67 \times 10^{-5}$ ,  $2,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), akışkan sıcaklığı ( $0^\circ\text{C}$ ,  $5^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$  ve  $20^\circ\text{C}$ ) ve 25 kHz sabit frekansta değişken güç yoğunluğu (0, 190, 890 ve  $2.800 \text{ Wm}^{-2}$ ). Bu parametre değerleri ile Re sayısı 0,98 ila 3,4 aralığında ve Pr sayısı ise 68,3 ila 188,9 aralığında hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ultrasonik ses dalgası uygulanmadığı durumda Nusselt sayısı 6,8 ila 9 aralığında hesaplanırken, ses üreticinin  $890 \text{ Wm}^{-2}$  güç yoğunluğunda Nusselt sayısı 11 ila 31 aralığına yükselmiştir. Işıma olan durumlarda iyileştirme faktörü %30 ila %119 aralığında değiştiği not edilmiştir. Bu çalışmada, en büyük iyileştirme faktörü değerinin düşük Reynolds ve Prandtl değerlerinde gözlendiğini ifade etmişlerdir. Bu durumun temel sebebi olarak yüksek viskozitelerde ve daha düşük akış hızlarında karıştırma ve kavitasyon etkilerinin daha belirgin olmasından kaynaklandığını vurgulamışlardır. Çalışma sonucunda ultrasonik ısıma sayesinde sıvı ortam ile sıcak yüzey arasında konvektif ısı transferinin artırılabilceği ispatlanmıştır. Ayrıca ultrasonik ısımanın ısı transferi üzerindeki etkisinin küre çapından bağımsız olduğunu fakat ultrason yoğunluğu ile Nusselt sayısı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmada elde edilen veriler doğrultusunda ultrasonik ısıma varlığında ve yokluğunda Nusselt sayısının hesaplanabilmesi için Reynolds ve Prandtl sayılarına bağlı olarak korelasyon önerilmiştir. Bir diğer çalışmada ise Kiani and Sun (2016) bakır ve patates gibi küre şekilli yüzeyleri sıvı içerisine daldırarak soğutmayı hedeflemişlerdir. Bu çalışmada ısı transferini iyileştirmek için ultrasonik ses dalgaları kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal olarak yürütülen çalışma sonuçlarına göre ısı transfer hızının ses dalgası etkisiyle arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışma ile araştırmacılar, daldırma soğutma mekanizmalarının gıda endüstrisinde termal yönetim uygulaması olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Ultrasonik dalgaların ısı transferini iyileştirme yönündeki etkisini araştıran bir diğer çalışma Tam et al. (2017), tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada yatay bir boruya uygulanan ultrasonik titreşimin boru içi akış durumunda ısı transferine etkisi incelenmiştir. Reynolds sayısı 600 ila 3.000 aralığında değiştiği belirtilmiştir. Boru üzerine farklı noktalara yerleştirilmiş dönüştürücüler arasında en iyi sonucun laminar akış bölgesinde elde edildiği belirtilmiştir. Giriş ve tam gelişmiş akış bölgelerinde de ısı transferinin önemli ölçüde iyileştirildiği vurgulanmıştır.

Chen et al. (2018) ultrasonik titreşim varlığında ısı transferi katsayısının değişimini inceleyen deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada akışkan içerisine daldırılan helisel ısıtıcı ile yığın akışkan arasındaki ısı transferi incelenmiştir. 3 adet ultrasonik jeneratör (40 kHz sabit frekans ve 50W/adet) sıvı tankı dış yüzeyine (taban) yerleştirilerek ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Isıtıcı hedef yüzeyi ile ultrasonik jeneratörler arasındaki mesafe, ısı akısı ( $7,6 \times 10^3 - 7,1 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ ) ve havuz aşırı soğutma sıcaklığı (50 K-70 K) deney parametresi olarak değerlendirilmiştir. Elden edilen sonuçlara göre maksimum ısı transferi artışının  $1557 \text{ W/m}^2\text{K}$  olduğu ve maksimum h-artış oranının yaklaşık 3,01 olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca çalışma sonucunda, ısı transferi hesabı için korelasyon geliştirmişlerdir ve mevcut korelasyonlara kıyasla %14,1 hata payı ile hesaplama kabiliyeti sunduğunu belirtmişlerdir.

Martinez-Ramos et al. (2021), ultrasonik ses dalgaları ile desteklenen ısıtma ve soğutma uygulamaları için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir ve Nusselt sayısı hesabında kullanılabilecek korelasyon türetmişlerdir. Sıcak yüzey geometrisi (küp, küre ve silindir), akışkan hızı ( $0,93 - 5,00 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ), sıcaklıklar (5–60 °C) ve ultrasonik ses dalgası güç yoğunluğu ( $0 - 6.913 \text{ W/m}^2$ ) parametrik olarak incelenmiştir. Soğutucu akışkan olarak deiyonize su kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre ısı transfer katsayısı 0, %30 ve %100 ultrasonik ses güç yoğunluğu değerlerinde sırasıyla  $368,6 - 1.887 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ,  $562,1 - 2.508,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  ve  $409,0 - 1.386,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 2.3.** Ultrasonik ses dalgalarının ısı transferi üzerindeki etkisini konu alan güncel literatür çalışmaları.

| Araştırmacı       | Çalışma özeti                                                                                                            | Sonuçlar                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kim et al. (2004) | Ultrasonik titreşimin doğal taşınım ve havuz kaynama rejimlerinde ısı transferi katsayısına etkilerini araştırmışlardır. | En yüksek ısı transfer iyileşmesinin doğal taşınım rejiminde görüldüğü, doymuş kaynama rejiminde kavitasyon oluşmadığından ısı transferini artıran etkinin termal kabarcık boyutu ve akustik akış tarafından sağlandığı sonucuna varmışlardır. |

Çizelge 2.3. (devam)

| Araştırmacı                | Çalışma özeti                                                                                                                                                                                                                                                                       | Sonuçlar                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Monnot et al. (2007)       | Sarmal boru içerisinde akıtılan akışkan ile sıvı ortam arasındaki ısı transferi performansı, ultrasonik titreşim yardımıyla iyileştirilmiştir.                                                                                                                                      | En yüksek iyileşme faktörü 2,04 (800 kHz ve 57,6W için) ve en düşük iyileşme faktörü 1,01 (1.600 kHz 42,3W için) olarak hesaplanmıştır.                                                                                                                                                                       |
| Kiani et al. (2012)        | Sabit frekansta ve farklı güç yoğunluğuna sahip ultrasonik ses dalgalarının daldırılmalı soğutma performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. sıcak yüzey olarak küre eleman kullanılmıştır.                                                                                    | Ultrasonik ses dalgalarının ısı transfer katsayısını artırdığı ve soğutma süresini azalttığını belirtmişlerdir. Artan güç yoğunluğu ile yüzey üzerinde ilave ısı artışı görüldüğü ifade edilmiştir.                                                                                                           |
| Rahimi et al. (2012)       | Yüksek frekanslı (1,7 MHz) ultrases kullanılarak ses üreticinin konumunun ısı transferi performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.                                                                                                                                              | Maksimum ısı transfer iyileştirmesi yan yüzeye yerleştirilmiş üreteçten %595,3 ve minimum iyileşme %82,4 olduğu belirtilmiştir.                                                                                                                                                                               |
| Baffigi and Bartoli (2012) | Ultrasonik dalgaların tek fazlı ve çift fazlı ısı transferine etkisini araştırmışlardır.                                                                                                                                                                                            | Tek fazlı ısı transferi durumunda maksimum %24 iyileşme sağlanırken, aşırı soğutulmuş kaynama durumunda %57 iyileşme sağlandığı belirtilmiştir.                                                                                                                                                               |
| Kiani et al. (2013)        | Soğutucu içerisine daldırılmış bakır küre yüzeyinden olan ısı transferi performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla soğutucu tank yüzeyine ultrasonik jeneratörler yerleştirilmiştir. Küre çapı, akışkan hızı, ultrasonik ses yoğunluğu parametrik olarak araştırılmıştır. | Ultrasonik ısıma varlığında ısı transfer iyileştirme faktörü %30 ila %119 aralığında olduğu belirtilmiştir. Düşük Re ve Pr sayılarında iyileştirme faktörü değerinin daha büyük olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca Pr ve Re sayılarına bağlı olarak Nusselt sayısının hesaplanması için korelasyon önerilmiştir. |

Çizelge 2.3. (devam)

| Araştırmacı          | Çalışma özeti                                                                                                                                  | Sonuçlar                                                                                                                                                                             |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kiani and Sun (2016) | Hedef yüzey olarak bakır ve patates küre elemanlar kullanılmıştır. Ses dalgalarının daldırmalı soğutma performansına etkileri araştırılmıştır. | Gıda endüstrisinde daldırma soğutma mekanizmasının kullanımının olumlu sonuç verdiği ve ultrasonik ses dalgalarının ısı transfer hızını önemli ölçüde arttırdığını vurgulamışlardır. |
| Tam et al. (2017)    | İç akışta giriş bölgesi, laminar akış bölgesi ve tam gelişmiş akış bölgelerinde ses dalgalarının ısı transferine etkisi araştırılmıştır.       | Laminer akış bölgesinde ultrasonik ses dalgalarıyla daha iyi ısı transfer iyileştirmesi sağlandığı ifade edilmiştir.                                                                 |
| Chen et al. (2018)   | Ultrasonik titreşimin ısı transferi performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.                                                             | Isı transfer katsayısında maksimum 1.557 W/m <sup>2</sup> K artış sağlandığı ve h-artış oranının %301 olduğu belirtilmiştir.                                                         |

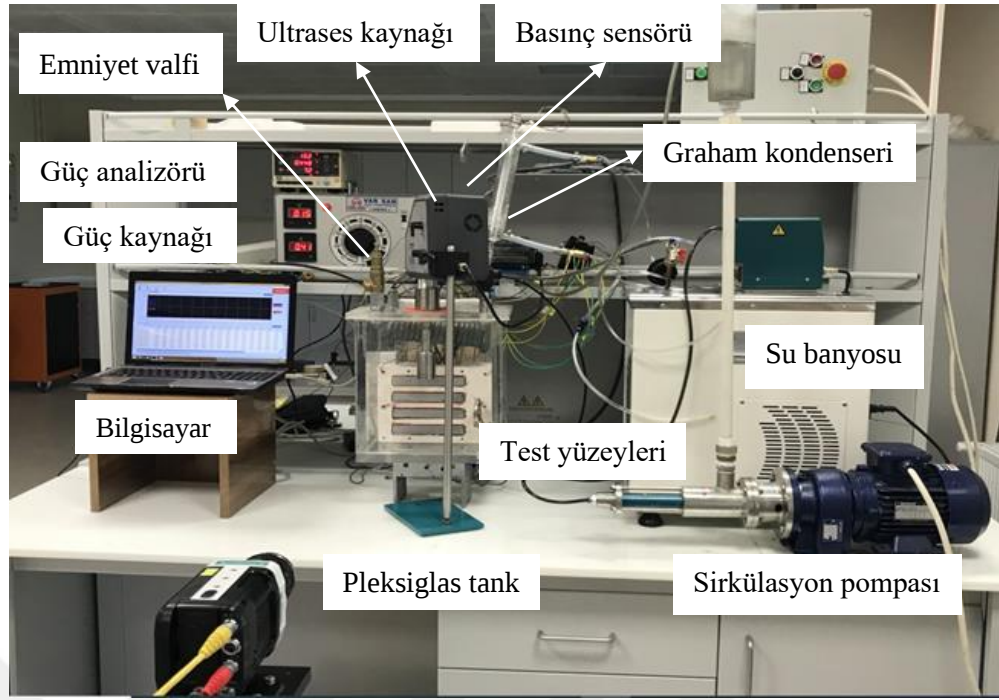
Detaylı literatür taramasında da görüldüğü üzere daldırmalı soğutma tekniğini konu alan çalışmalarda termal performansı arttırmaya yönelik çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Bu yöntemler çoğunlukla dielektrik akışkan türü, yüzey yapısı, ısı alıcı ilavesi ve aşırı soğutma sıcaklığı gibi klasik iyileştirme metodlarını kapsamaktadır. Yine literatür taraması neticesinde ulaşılan bir diğer sonuç akışkan tahrik mekanizmalarından birisi olan ultrasonik ses dalgalarının daldırmalı soğutma sistemlerinde detaylı olarak araştırılmamış olmasıdır. Ayrıca, özellikle çift fazlı soğutma uygulamalarında ultrasonik ses dalgalarının etkileri konusunda araştırmacılar tarafından tam bir fikir birliğine varılamamıştır. Bu tez çalışmasında yeni nesil yüksek soğutma kapasitesine sahip daldırmalı soğutma sistemleri kullanılarak ısınan yüzeylerin havuz içerisindeki konumu, çıkıntı miktarı ve ultrasonik ses dalgası frekansının ısı performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu sayede hem ısınan elemanların havuz içerisindeki yüzey-konum konfigürasyon etkileri hem de ultrasonik ses dalgalarının ısı transfer performansı üzerindeki etkileri değerlendirilerek literatüre yeni bir veri seti sunulmuştur.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

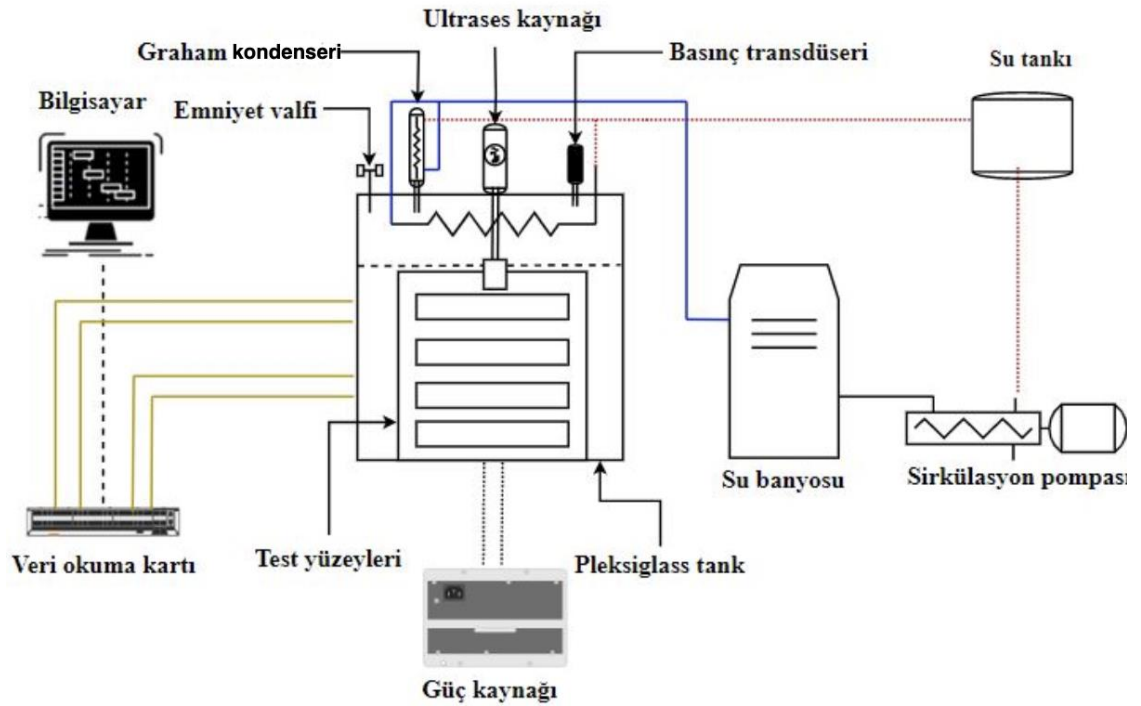
#### 3.1. Deney Düzenegi

Bu deneysel çalışmada, ultrasonik ses dalgası destekli daldırmalı soğutma tekniğinin ısı transferi karakteristiği tek ve çift faz için araştırılmıştır. Parametrik olarak yürütülen çalışmada ultrasonik ses dalgası frekansı, ısıtıcı konumu ve yüzey oryantasyonunun ısı transferi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın yürütüldüğü sistemin şematik gösterimi Şekil 3.1’ de verilmiştir. Bu deney sistemi, Erzurum Teknik Üniversitesi, YÜTAM’da (Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) kurulmuştur. Deney sistemi test bölgesi, veri depolama ve akış görüntüleme olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır.

Test bölgesi, içerisi dielektrik akışkan bulunan 30×25×20 cm (yükseklik × boy × en) ebatlarındaki pleksiglas tank, pompa, su banyosu, ultrasonik jeneratör ve test yüzeylerinden oluşmaktadır. Tankın üst kısmında dielektrik akışkanın kaynamasıyla buharlaşan akışkanın tekrar sıvı faza dönmesini sağlamak ve sıvı seviyesini kontrol etmek için dahili yoğuşturucu kullanılmıştır. Ayrıca, tank iç basıncını kontrol altında tutabilmek için harici bir kondenser (graham kondenseri) yerleştirilmiştir. Yoğuşturuculara soğutucu su sirkülasyonunu pompa ile sağlanmıştır. Yoğuşturucu sıcaklığını kontrol altında tutabilmek için su, pompadan sonra istenilen sıcaklığa set edilmiş bir su banyosuna geçirilerek kondensere iletilmiştir. Pleksiglas tank basıncını ölçmek için bir adet basınç sensörü ve dielektrik akışkan havuz sıcaklığını belirlemek için üç adet K-tipi çubuklu termoeleman kullanılmıştır. Sistem basıncı pleksiglas tank içerisine yerleştirilmiş olan bir basınç sensörü ile ölçülerek yine aynı veri toplama kartı üzerinden kaydedilmiştir. Sistem basıncı kararlılık şartlarının oluşturulabilmesi için oldukça önemlidir. Bu yüzden her bir parametre değişiminin ısı transferi katsayısı üzerindeki etkinliğinin doğru olarak belirlenmesi için sistem basıncının sabit tutulması gerekmektedir. Tank basıncındaki dalgalanmaları ve ani basınç artışlarını önlemek için tank kapağı üzerine emniyet valfi yerleştirilmiştir. Ultrasonik ses dalgalarını üretmek için UP 400S transdüser cihazı kullanılmıştır. Dielektrik tankın üst kısmından sıvı içerisine daldırılan ultrasonik prob ile jeneratörde üretilen ses sinyali sıvı içerisine aktarılmıştır.



(a)



(b)

**Şekil 3.1.** Daldırma soğutma deney sistemi, **(a)** laboratuvar görseli, **(b)** şematik çizim

Isıtıcılara güç beslemesi varyak yardımıyla kontrollü olarak yapılmıştır. Test tankı içerisine ve teflon plaka üzerinde farklı noktalara yerleştirilen T ve K tipi termal çiftler yardımıyla sıcaklık verileri, veri toplama kartı kullanılarak işlenmek üzere kaydedilmiştir.

Akış görüntüleme bölümünde ise kaynama sırasında meydana gelen kabarcık oluşum ve gelişim sürecini incelemek için mikro-PIV sistemine ait yüksek hızlı kamera ile akış görüntüleme işlemi yapılmıştır. Yüksek hızlı kamera olarak Dantec marka SpeedSense Lab M310 model CCD tip kamera kullanılmıştır. Kameranın maksimum çözünürlükteki (1.280x800) çekim sayısı 3.600 fps'dır. Alınan görüntüler bağlantı kablolarıyla bilgisayara aktarılmış ve analiz edilmiştir.

## 3.2. Deney Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar

### 3.2.1. Sirkülasyon pompası

Deneyler yapılırken akışın sürekliliğini sağlamak için Şekil 3.2'de gösterilen pozitif yer değiştirmeli ve frekans kontrollü pompadan yararlanılmıştır. Bu pompayla sisteme atımsız ve sürekli akış sağlanmaktadır. Akış debisi pompa kontrol ünitesi üzerindeki frekans kontrolü yardımıyla manuel olarak ayarlanabilmektedir. Böylece değişken hızlı kullanım imkânı sunmaktadır ve maksimum 12 barlık çalışma basıncına sahiptir.

**Çizelge 3.1.** Sirkülasyon pompası teknik özellikleri

| Parametre                        | Özellik                              |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| Debi ayarı                       | Frekans kontrollü yapılabilmektedir. |
| Maksimum çalışma basıncı         | 12 bar                               |
| Maksimum çalışma ortam sıcaklığı | 50°C                                 |
| Maksimum iş akışkanı sıcaklığı   | 120°C                                |
| Çalışma frekansı                 | 50 Hz                                |



**Şekil 3.2.** Sirkülasyon pompası

#### 3.2.2. Veri kartı

Test yüzeyleri ve temsili ana kart üzerinde 18 farklı noktadan T tipi termal çiftler kullanılarak sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Bu termal çiftler LR8402-20 model Hioki marka data kartına bağlanmıştır. Veri kartının bilgisayar bağlantısı mevcut olup veriler bilgisayar yazılımı ile anlık olarak kayıt altına alınmaktadır. Şekil 3.3’ de görseli sunulan data kartının teknik detayları Çizelge 3.2. de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Veri kartı teknik özellikleri

| Parametre                          | Özellik                          |
|------------------------------------|----------------------------------|
| Kanal sayısı                       | Standart 30 analog /8 puls kanal |
| Dijital giriş                      | Mevcut                           |
| Örnekleme hızı                     | Maksimum 10 ms                   |
| Maksimum giriş                     | $\pm 100$ V DC                   |
| Otomatik termokupl tanıma özelliği | K, J, E, T, N, R, S, B, W        |
| Ani güç kesintilerine karşı koruma | Mevcut                           |
| Dahili USB ve LAN arayüzü          | Mevcut                           |
| Datalogger kontrol                 | Uzaktan kontrol ve ayarlama      |



**Şekil 3.3.** Veri kartı

#### 3.2.3. Soğutmalı sirkülatörlü su banyosu

Yoğuşturuculara beslenen suyun sıcaklığı Şekil 3.4’ de verilen JSR marka JSRC-13 model soğutmalı sirkülatörlü su banyosu kullanılarak ayarlanmıştır. Su yoğuşturuculara girmeden önce önce su banyosu içerisindeki serpantinden geçirilerek istenilen sıcaklığa getirilmektedir. Sistemde kullanılan serpantin 2 m uzunluk ve 10 mm dış çapa sahip bakır borudan imal edilmiştir. Cihaz içerisinde bulunan paslanmaz çelik sirkülasyon pompası yardımıyla banyo içerisinde yüksek sıcaklık hassasiyeti sağlanabilmektedir. Kullanılan cihazın teknik özellikleri Çizelge 3.3’ de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Soğutmalı sirkülatörlü su banyosu teknik özellikleri

| Parametre                             | Özellik                                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Kontrol paneli                        | $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ LED Ekranlı Dijital PID        |
| Ayarlanabilir zamanlayıcı ölçeği      | 99dk 59sn / 99sa 59dk / 99gün 23sa / sürekli             |
| Otomatik START/STOP zamanlayıcı       | Mevcut                                                   |
| Sıcaklık aralığı                      | $-20^{\circ}\text{C}$ ’ den $120^{\circ}\text{C}$ ’ ye   |
| Kontrol doğruluğu                     | $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$                                |
| Termal homojenlik                     | $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$                                |
| Sirkülasyon pompa debisi              | 10 litre/dak.                                            |
| Akışkan basıncı                       | 0,5 bar                                                  |
| Harici sirkülasyon için bağlantı çapı | 9 mm                                                     |
| Maks. Sıcaklık Cut-Off                | Set sıcaklığının $+1^{\circ}\text{C}$ üzerinde olduğunda |

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

|                      |                                          |
|----------------------|------------------------------------------|
| Sesli ve görsel ikaz | Set sıcaklığının +1°C üzerinde olduğunda |
| Isıtma kapasitesi    | 800 Watt                                 |
| Elektrik gereksinimi | 220 ± 10% VAC, 50/60Hz, tek faz          |
| Güç derecesi         | 7,1 amps                                 |
| Banyo kapasitesi     | 11 litre                                 |



**Şekil 3.4.** Sirkülatörlü su banyosu (Anonim 2022a)

#### 3.2.4. Güç kaynağı

Test bölgesinde sabit ısı akısı şartları Şekil 3.5a’da verilen güç kaynağı yardımıyla sağlanmıştır. Manuel kontrollü güç kaynağına entegre çalışan bir güç analizörü (wattmetre) bulunmaktadır Şekil 3.5b). Bu analizör, güç kaynağı akım ve gerilim değerlerinin daha hassas ayarlanabilmesine olanak sağladığından, test bölgesine verilen güç daha sağlıklı şekilde belirlenebilmiştir. Güç analizörüne ait teknik detaylar Çizelge 3.4’ de verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Güç analizörü teknik özellikleri

| Parametre                          | Özellik                                   |
|------------------------------------|-------------------------------------------|
| Ölçüm hassasiyeti                  | $\pm\%0,1$ rdg $\pm\%0,1$                 |
| Gerilim ölçümü                     | 300V rms ya da 425 V pik gerilimine kadar |
| Akım ölçümü                        | 30A' ya kadar                             |
| Frekans ölçümleri                  | 5 kHz                                     |
| D/A Çıkışı                         | Mevcut                                    |
| İkaz sistemi                       | Kademe dışına çıkınca                     |
| Ölçüm sistemi                      | True RMS                                  |
| Aktif güç, görünür güç, güç faktör | Mevcut                                    |
| Akım ölçüm aralığı yükseltme       | Akım trafosu ile                          |
| Gerilim ölçüm aralığı yükseltme    | Gerilim trafosu ile                       |
| Çıkış portu                        | D/A                                       |
| Bilgisayara bağlanabilme           | RS-232 bağlantı soketiyle                 |



(a)



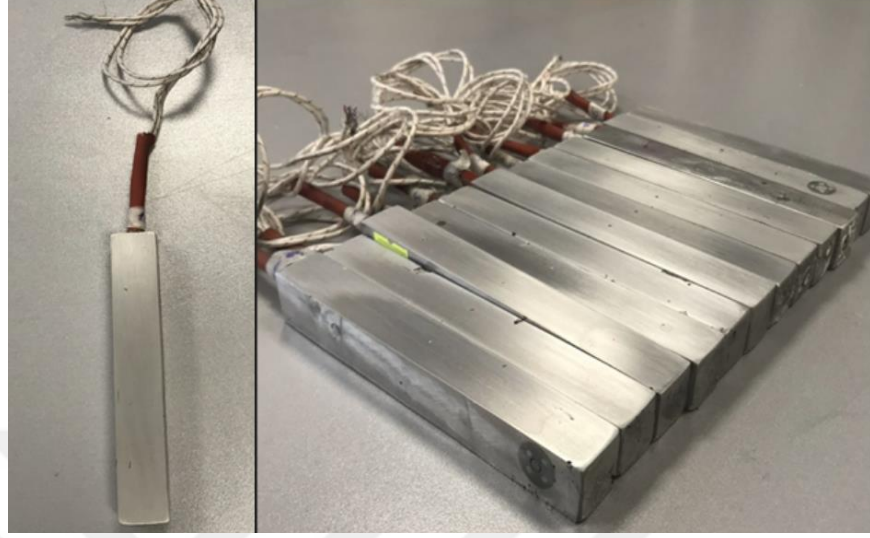
(b)

**Şekil 3.5.** (a) Güç kaynağı, (b) Güç analizörü

#### 3.2.5. Sıcak yüzey olarak kullanılan ısıtıcılar

Test yüzeyleri başlıklı bölümde de değinildiği üzere, test bölgesinde alüminyum döküm yöntemiyle üretilmiş 500 W gücünde 2 cm × 2 cm × 15 cm ebatlarında eş ısıtıcılar kullanılmıştır. Silindirik fişek ısıtıcılar üzerine eriyik haldeki alüminyum dökülerek imal edilmiş ısıtıcıların kullanılması temas yüzeyi artmasına ve termal direncin minimum

seviyelere indirilmesine olanak sağlamıştır. Temsili anakart modelinde sıcak yüzeyleri temsil eden ısıtıcılar Şekil 3.6’ da verilmiştir.



**Şekil 3.6.** Test bölgesinde kullanılan Alüminyum döküm ısıtıcılar

#### 3.2.6. Basınç sensörü

Test bölgesi basıncını ölçmek için TRAFAG marka VF-EPI8287 model basınç transdüseri kullanılmıştır. Sensör, data kartına bağlanarak tank basıncı eş zamanlı kontrol edilebilmiştir. Kullanılan basınç sensörünün görseli Şekil 3.7’ de ve teknik detayları Çizelge 3.5’ de verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Basınç sensörü özellikleri

| Parametre                 | Özellik                                          |
|---------------------------|--------------------------------------------------|
| Ölçüm aralığı             | 0-25 bar                                         |
| Hassasiyet                | $\pm \%0,5$                                      |
| Çalışma sıcaklığı aralığı | $-40^{\circ}\text{C}$ ila $+125^{\circ}\text{C}$ |
| Ortam sıcaklığı aralığı   | $-40^{\circ}\text{C}$ ila $+125^{\circ}\text{C}$ |
| Çıkış sinyali             | 0- 10 VDC                                        |



**Şekil 3.7.** Basınç sensörü (Anonymous 2022a)

#### 3.2.7. Termoelemanlar

Dielektrik tank içerisinde bulunan akışkanın yığın sıcaklığını ölçmek için K-tipi çubuklu termokupllar kullanılmıştır. Çubuklu termokupl kullanılmasının sebebi pleksi tank yüzeyine kolay bir şekilde sabitlenmesi ve sızdırmazlık sorunu oluşturmamasıdır. K tipi termokuplların çalışma aralığı -200 ila 1.200 °C ve tel kalınlıkları 0.2 mm<sup>2</sup>'dir. Kablo yapısının silikon, cam elyaf ve çelik örgülü olması sayesinde deformasyon dayanımı oldukça yüksektir. Test yüzeylerinin sıcaklık ölçümünde ise T-tipi (Cu-CuNi) ısı çiftleri kullanılmıştır. T-tipi termal çiftlere ait teknik bilgiler Çizelge 3.6' da görselleri ise Şekil 3.8' de verilmiştir. Termal çiftler, deney sistemine yerleştirilmeden önce su banyosunda kalibre edilerek kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir. Kalibrasyon deneyleri, JSR marka JSRC-13 soğutmalı sirkülatörlü su banyosunda 20°C-70°C sıcaklık aralığında 10°C artışlarla sıcaklık ölçüm değerleri alınarak gerçekleştirilmiştir. Her bir termal çift için tekrar edilerek elde edilen kalibrasyon eğrileri EK 2' de verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** T-tipi termal çift teknik özellikleri

| Parametre         | Özellik               |
|-------------------|-----------------------|
| Kesit alanı       | 2x0,50mm <sup>2</sup> |
| İletken izolasyon | Floropolimer (PFA)    |
| Kılıf izolasyon   | Floropolimer (PFA)    |
| Çalışma aralığı   | -90°C / +260°C        |



**Şekil 3.8.** Deneysel çalışmada kullanılan termoelemanlar

#### 3.2.8. Yüksek hızlı kamera

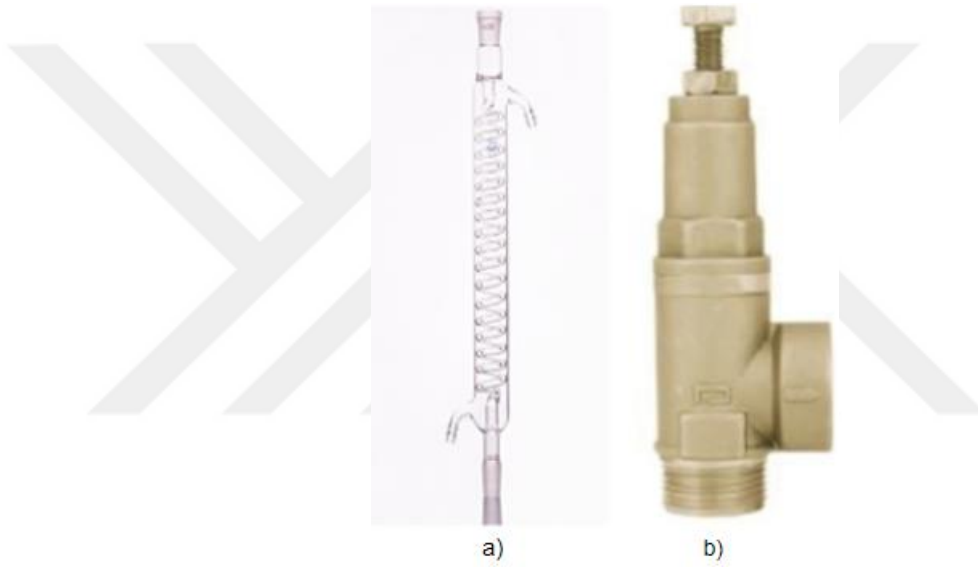
Kaynama çok hızlı gelişen bir fiziksel olay olduğundan dolayı havuz içerisindeki kabarcık oluşum ve gelişim prosesinin nanosaniye mertebelerinde incelenmesi gereklidir. Bunun için sistemde maksimum çözünürlükte (1.280×800) saniyede 3.600 adet görüntü alabilen 1 adet Dantec Speed Sense Lab M310 yüksek hızlı kamera kullanılmıştır (Şekil 3.9). Alınan görüntüler bağlantı kabloları yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılarak incelenmiştir.



**Şekil 3.9.** Dantec Speed Sense Lab M310 Hızlı Kamera (Anonymous 2022b)

#### 3.2.9. Graham kondenseri ve emniyet ventili

Kaynama süreci ısı kaynağı sıcaklığının soğutucu doyma sıcaklığını aştığı sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Doyma sıcaklığını değiştiren en önemli etki ise basınçtan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla deneyler sırasında sabit basınç şartlarının sağlanması sağlıklı sonuçlar alınması bakımından oldukça önemlidir. Bu sebeple buharlaşan sıvıyı yoğunlaştırmak ve sıvı seviyesini sabit tutabilmek graham kondenseri kullanılmıştır (Şekil 3.10). Diğer taraftan ani basınç yükselmelerine karşı koruma sağlamak için tank kapağına bir adet basınç ayarlı emniyet ventili yerleştirilmiştir.

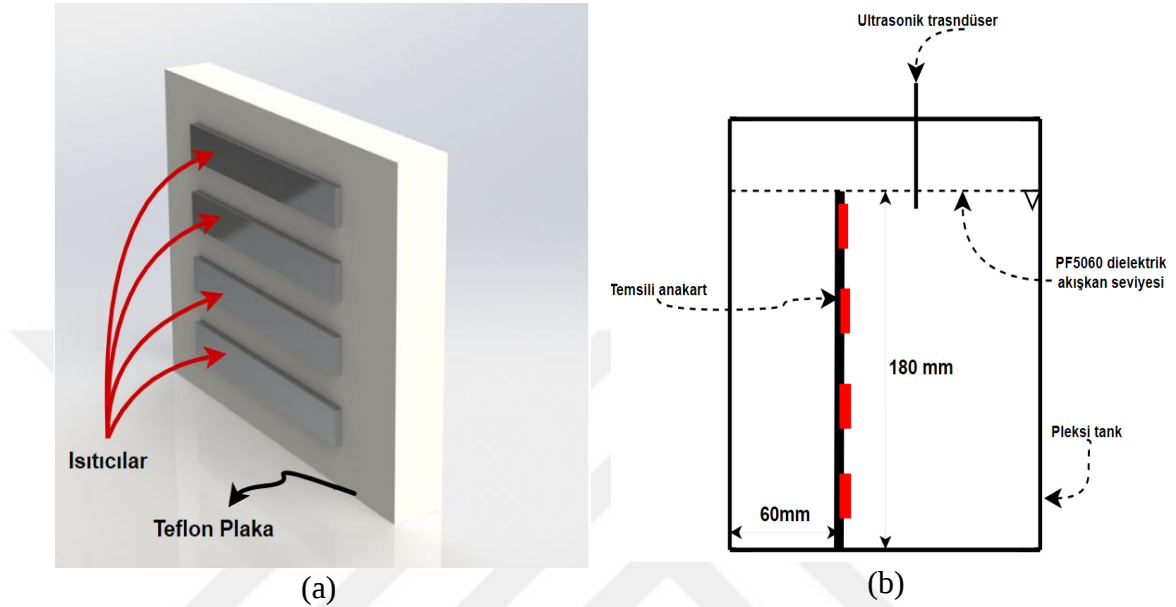


**Şekil 3.10.** (a) Graham kondenseri (Anonim 2022b) (b) Emniyet ventili

#### 3.3. Test yüzeyleri

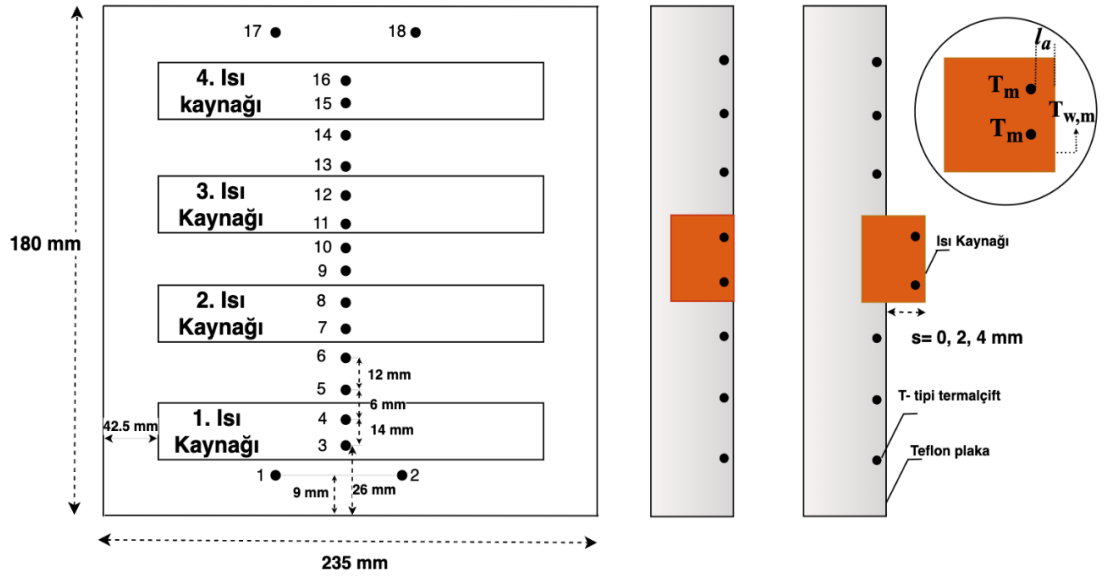
Test bölümünde ısı kaynakları teflon plaka üzerine yerleştirilmiştir. Teflon levhalar 235mm × 180 mm × 30 mm ve her bir ısı kaynağı 150mm × 20mm × 20mm ebatlarındadır. Isı kaynakları, içerisinde kartuş ısıtıcı bulunan kalıp üzerine eriyik haldeki alüminyumun dökülmesiyle (yani alüminyum döküm yöntemiyle) imal edilmiştir. Bu sayede kartuş ısıtıcı ile alüminyumun temas yüzeyi artırılarak termal direnç oluşumu engellenmiştir. Deneysel çalışmanın parametrelerinden birisi olan konum oryantasyonu (ayrık ısıtıcılar) koşullarını oluşturmak için dört adet ısı kaynağı kullanılmıştır. Bu ısıtıcılar teflon plaka üzerinde belirlenen bölgelere eşit aralıkla yerleştirilmiştir. Çalışma parametrelerinden bir diğeri olan yüzey oryantasyonu (çıkıntılı ısıtıcılar) koşulunu

sağlamak için ise, ısıtıcılar teflon plaka içerisine gömülü (çıkıntısız), 2 mm çıkıntılı ve 4 mm çıkıntılı olmak üzere üç farklı şekilde yerleştirilmiştir. Dolayısıyla deneysel parametre koşullarını oluşturmak için üç adet test yüzeyi oluşturulmuştur. Test yüzeyi görseli Şekil 3.11’de verilmiştir.

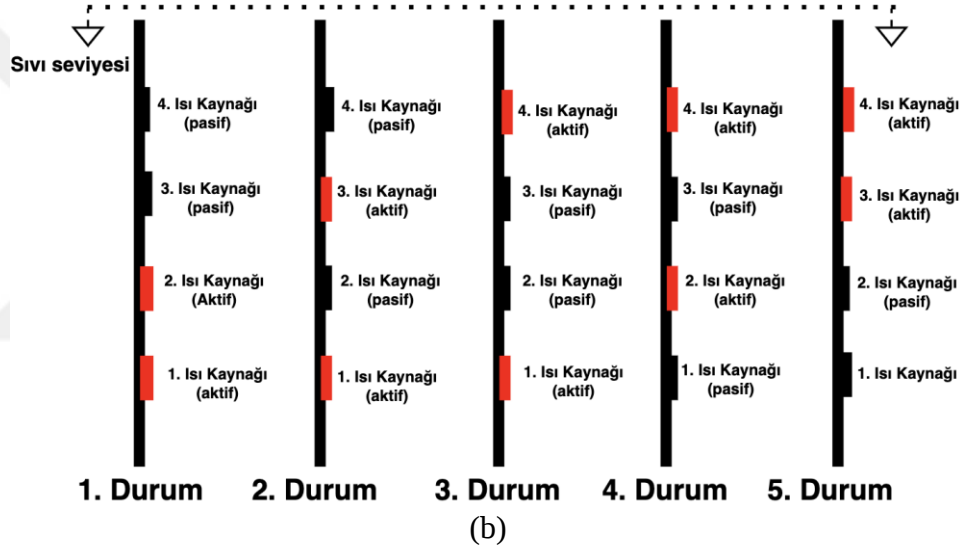


**Şekil 3.11.** (a) Test yüzeyi, (b) Test yüzeyinin havuz içerisindeki yerleşim şeması

Deneylerde iş akışkanı olarak PF-5060 performans akışkanı kullanılmıştır. Deney tasarımında planlanmış ve tamamlanmış durumlar Şekil 3.12’ te sunulmuştur. 1. Durum, 2. Durum ve 3. Durumda sıvı serbest yüzeyi referansına göre en uzakta konumlandırılmış 1. Isı kaynağı sabit tutulurken, ikinci ısı kaynağının konumu değiştirilmiştir. 1. Durum, 4. Durum ve 5. Durum da ise sıvı serbest yüzeyine en yakın olan 4. Isı kaynağı sabit tutularak diğer ısı kaynağının konumu değiştirilmiştir. Çalışılan bütün durumlarda, aktif ısıtıcı sayısı ve toplam ısı transfer yüzeyi sabit tutulmuştur. Deneyler ultrasonik ses sinyallerinin varlığında (9,6 kHz, 14,4 kHz, 19,2 kHz ve 24 kHz) ve yokluğunda değerlendirilerek ısı transfer katsayısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Her bir çalışma durumu ısıtıcı yüzeylerin teflon plakaya göre 3 farklı (çıkıntısız, 2 mm ve 4 mm) konumda tekrarlanarak çıkıntı miktarının ısı transfer hızı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.12. (a) Termal çiftlerin teflon plaka ve test yüzeyleri üzerindeki konumları, (b) çalışma durumları.

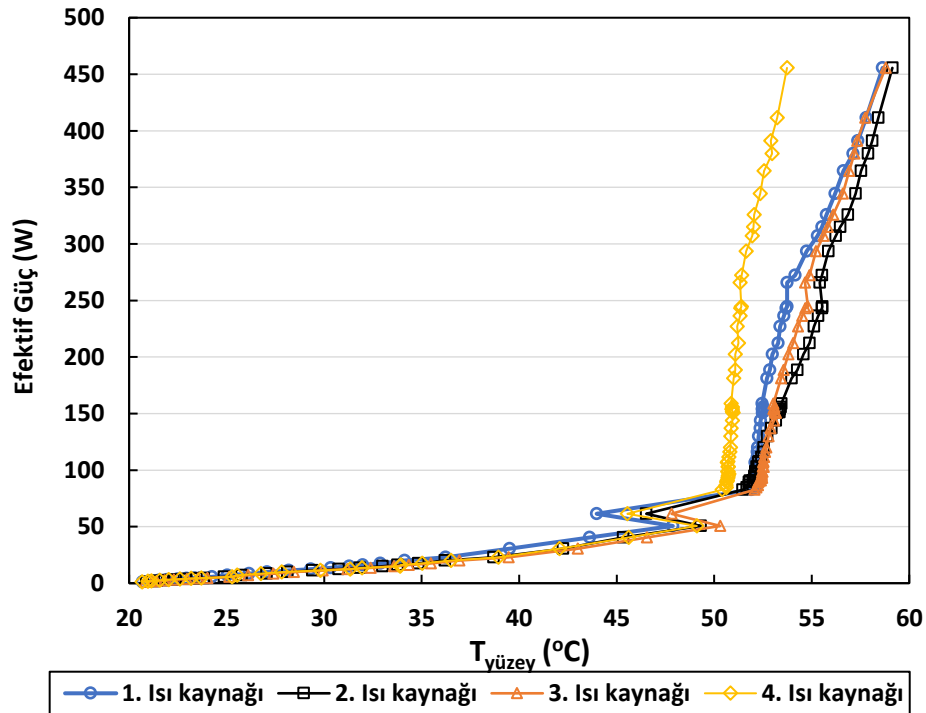
### 3.4. Yöntem

#### 3.4.1. Parametre seviyelerinin belirlenmesi

Deney parametre seviyelerinin belirlenmesi aşamasında test bölgesi içerisinde farklı noktalara konumlandırılmış dört ısıtıcı eş zamanlı olarak çalıştırılmıştır. Bu aşamada, her bir ısıtıcıya eşit güç beslemesi yapılmıştır. 1,2 W ila 495 W aralığında gerçekleştirilen ön deneyler sırasında aritmetik olmayan artış miktarlarıyla 75 farklı güç seviyesinde ölçüm sonuçları kaydedilerek değerlendirilmiştir. Deneyler sırasında PF-

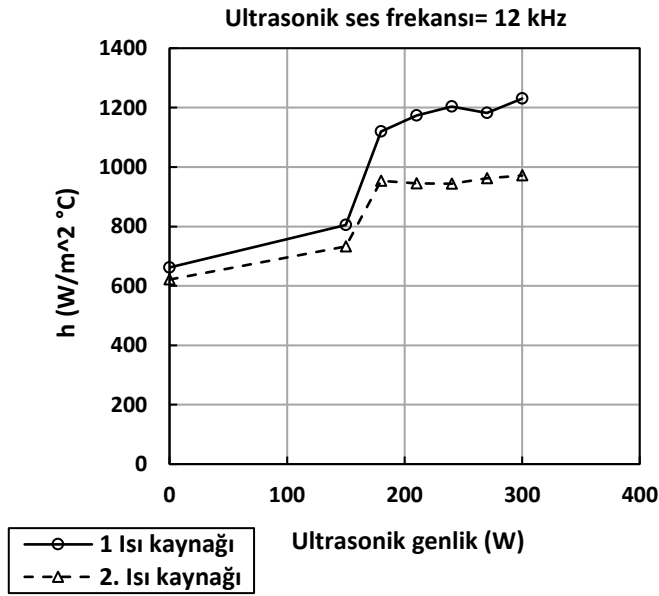
5060 dielektrik akışkanının kaynama noktası sıcaklığı  $49,6^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Şekil 3.13’de her bir ısıtıcıya verilen efektif gücün kızdırma sıcaklığı farkına karşılık gelen grafiği sunulmuştur. Doğal taşınım, PF-5060 soğutucusunun doyma sıcaklığı altındaki yüzey sıcaklıklarında etkin ısı transfer mekanizmasıdır. Deneysel çalışmamız için yüzey sıcaklıklarının, soğutucu sıvının doyma sıcaklığı olan  $49,6^{\circ}\text{C}$ ’ dan düşük olduğu efektif güç aralığı 1,2 W ila 40 W aralığında olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla tek fazlı doğal taşınım deneyleri için ısıtıcılara uygulanacak efektif güç değerleri 12, 20 ve 30W olarak seçilmiştir.

Ön deneyler sırasında dört ısıtıcının her birinde kaynama başlangıcı belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir (Şekil 3.13). Bu aşamada ısıtıcıların yüzey sıcaklıkları ani bir şekilde düşmüştür. Kaynama başlangıcından önce, yüzey sıcaklığındaki artışın (sıcaklık kayması/sıcaklık kararsızlığı) ardından sıcaklıktaki ani düşüş bu parametrik çalışmada, ısıtıcı gücünün 50 W seviyelerine karşılık gelmektedir. Ön deneyler sırasında kaynama eğrisi eğilimi tespit edildiğinden, daldırılmalı havuz kaynama deneyleri kritik noktalar göz önünde bulundurularak yüzey sıcaklıklarına karşılık gelen 8 ila 13 farklı güç değerleri için yapılmıştır.



Şekil 3.13. Doğal taşınım ve kaynama süresince yüzey sıcaklıklarının değişimi

Deneyisel çalışmanın bir diğer parametresi olan ultrasonik ses frekansı genlik değişimlerinin, ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 3.14 'de sunulmuştur. 1. Durum (sadece 1. ve 2. Isı kaynakları aktif) durumunda ultrasonik ses dalgası genliğinin termal performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu ön çalışmada ısıtıcı yüzeylere 14,8 W sabit güç uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre ultrasonik sinyalin sisteme uygulanmasıyla birlikte ısı transfer hızının arttığı görülmektedir. Bu durum, sıcak yüzeye yakın kısımlarda, sıcaklık gradyeninin tetiklediği doğal sirkülasyon alanının ses sinyalleri ile güçlendirilerek daha hızlı molekül hareketi ve titreşimine sebep olması ile açıklanabilir. Yine aynı grafikte, sabit ultrasonik frekansta, 180W genlikten yüksek değerlerde ses sinyali genliğinin etkisinin stabil kaldığı dramatik bir artış göstermediği tespit edilmiştir. Bu sebeple, ön deneyler neticesinde uygulanan ses sinyali genliği 180W olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.14. Isı transfer katsayısının ultrasonik ses sinyali genliği ile değişimi

### 3.4.2. Deney prosedürü

Deney prosedürü ilgili literatür incelenerek (Bergles 1988; Barnes and Tuma, 2009b; Park and Suszko 2015; Hsu et al. 2018) aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- Dielektirik sıvı (PF-5060) pleksiglas tank içerisine doldurularak akışkanın hava ile teması kesilerek sızdırmazlık sağlanmıştır. Daha sonra ısıtıcılar çalıştırılarak

akışkan kaynama noktasına kadar ısıtılmıştır (Erzurum için 0,809 atm, 49,6 °C). Akışkan sıcaklığındaki artışla birlikte sıvı serbest yüzeyinde karışım halinde bulunan dielektrik akışkan buharını çözülmüş gazlardan arındırmak için dahili yoğunlaştırıcı devreye alınmıştır. Bu şekilde buhar fazındaki akışkan yoğunlaştırularak sıvı fazına dönüştürülerek tank içerisindeki sıvı seviyesi kontrol altında tutulmuştur. Sistem kararlılığının sağlanması için tank içerisinde bulunan çözülmüş gazların sistemden uzaklaştırılması gerekmektedir. Bunun için graham kondenseri kullanılmıştır. Graham kondenserinden geçirilen atık gaz dielektrik sıvıdan ayrıştırılarak Graham kondenseri çıkışından tahliye edilmiştir. Bu işlem çözülmüş gazlar sistemden tam olarak arındırılincaya kadar yaklaşık 5 saat devam ettirilmiştir. Gaz giderme işleminden sonra ısıtıcılar kapatılarak akışkanın soğuması sağlanmıştır.

- Daha sonra test edilen Durum için ısıtıcı on/off seviyesi ayarlanmıştır. Ardından aktif ısıtıcılara güç beslemesi yapılmıştır. Testler sırasında her bir termoeleman ve basınç sensörü için tarama frekansı 1 Hz olarak ayarlanmıştır ve her veri noktası için kayıt süresi 3.000 s'nin üzerinde tutulmuştur. Deneyler her bir testin başlangıcında, ilk kararlı (denge) hale ulaşmak için 1.800 s (30 dk.) boyunca ultrasonik ses dalgası olmadan (durağan koşul) sürdürülmüştür. İlk denge halinden sonra 120 s (2 dk.) kayıt alındıktan sonra ultrasonik prob aktifleştirilmiştir. Bu halde ikinci denge durumu için, yaklaşık olarak 600 s (10 min) boyunca ultrasonik ses dalgası tatbik edilmiştir. Frekans seviyesi en düşük olan 9,6 kHz' den başlayarak uygulanan işlem adımları her bir denge koşulunda veriler kaydedildikten sonra diğer frekans seviyeleri (14,4 kHz, 19,2 kHz ve 24 kHz) için de aynı şekilde tekrarlanmıştır. Benzer test adımları, deneysel kurulum koşullarına bağlı olarak (Chen et al. 2018; Liu et al. 2018; Tajik et al. 2013) tarafından yapılan çalışmalarda da uygulanmıştır.
- Parametreler test matrisine uygun olarak değiştirilerek aynı işlemler uygulanmış ve çalışma devam ettirilmiştir.

#### 3.4.3. Deneysel hesaplama metodu

Test bölümünde bulunan ısıtıcılara uygulanan güç Denklem (3.1) yardımıyla hesaplanabilir.

$$Q_t = I \times V \quad (3.1)$$

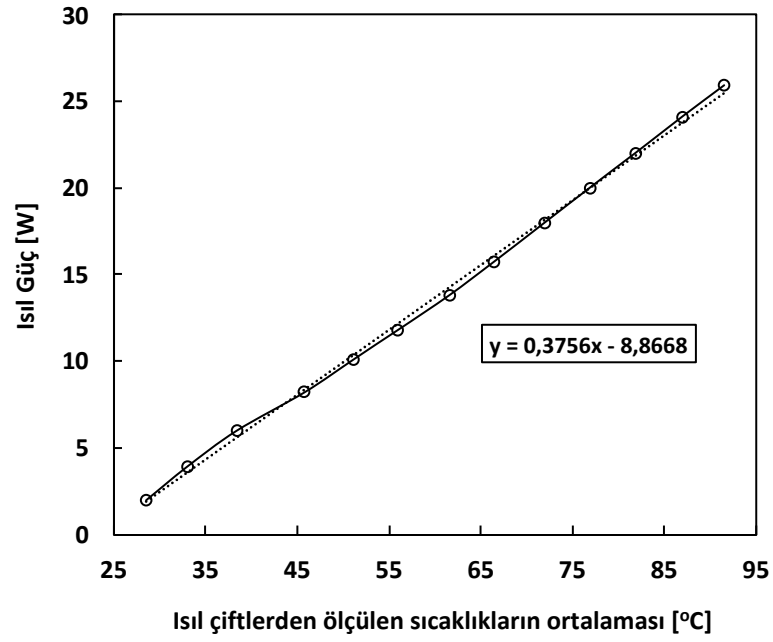
eşitliği ile belirlenmektedir. Burada;  $V$ , uygulanan gerilimi,  $I$ , ise ısıtıcılara uygulanan akımı ifade etmektedir. Her bir ısıtıcıdan havuz içerisindeki akışkana aktarılan ısı akısı ise,

$$q''_{eff} = \frac{Q_t - Q_{loss}}{A_s} \quad (3.2)$$

Burada;  $Q_{loss}$ , ısı kaybını,  $A_s$  ise ısı transfer yüzey alanını ifade etmektedir. Isı transfer yüzey alanının hesaplanmasında aşağıdaki Denklem (3.3) kullanılmıştır.

$$A_s = L \times W \quad (3.3)$$

Burada;  $L$ , ısıtıcı uzunluğu ve  $W$ , ısı alıcının genişliğini ifade etmektedir.  $Q_{kayıp}$ , sistemden ortama olan ısı kaybını temsil etmektedir. Bu çalışmada ısı kaybı hesabı için Harirchian and Garimella (2008) ve Wang and Peles (2015) tarafından kullanılan yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemle göre, pleksiglass tank akışkan ile doldurulmadan önce yani sistem kuru iken, güç kaynağı sabit bir değere ayarlanarak ısıtıcı elemanlar ile sisteme güç uygulanmıştır. Teflon plaka ve sıcak yüzey sıcaklıkları dahil olmak üzere 21 farklı noktadan alınan sıcaklık değerleri kararlı hale gelince bu sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması hesaplanarak ısıl güç değerine karşılık sistem sıcaklığı belirlenmiştir. Bu işlem farklı ısıl güç değerleri için uygulanarak Şekil 3.15' de sunulan ısı kaybı kalibrasyon eğrisi elde edilmiştir.



**Şekil 3.15.** Isı kaybı kalibrasyon eğrisi

Isı transfer yüzeyinin ortalama sıcaklığı ( $T_{w,m}$ ), tek boyutlu ısı iletimi kabülü yapılarak hesaplanmaktadır.

$$T_{w,m} = T_m - q''_{eff} \left( \frac{l_a}{k_c} \right) \quad (3.4)$$

Yukarıdaki formülde;  $T_m$ , termoelemanlar vasıtasıyla belirlenen ortalama sıcaklık değerlerini,  $l_a$ , alimünyum ısıtıcının akışkanla temas ettiği yüzey ile termoeleman arasındaki uzaklığı,  $k_c$  alimünyum ısı iletim katsayısını göstermektedir. Tek Fazlı doğal taşınım şartlarında ısı taşınım katsayısı ( $h_{sp}$ ), ısı akısı, yüzey ve akışkan yığın sıcaklığı ( $T_{bulk}$ ) dikkate alınarak Denklem (3.5) yardımıyla, kaynama rejiminde ısı transfer katsayısı ( $h_{2p}$ ) ise, Denklem (3.6) dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$h_{sp} = \frac{q''_{eff}}{(T_{w,m} - T_{bulk})} \quad (3.5)$$

$$h_{2p} = \frac{q''_{eff}}{(T_{w,m} - T_{sat})} \quad (3.6)$$

Kararlı haller için elde edilen sıcaklık değerleri ve ısı akısı değeri ile ultrasonik ses dalgasız ( $h_o$ ) ve ultrasonik ses dalgasılı ( $h_u$ ) durumlar için ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Buna dayanarak ısı transfer artışı, ısı transfer katsayısı artış oranı (h-increment ratio), farklı açılardan ısı transferi artışını nicel olarak ifade etmek için aşağıdaki gibi belirlenebilir,

$$\text{Isı transfer artışı, } h_u - h_o \quad (3.7)$$

$$\text{h- artış oranı, } \eta_{IR} = \frac{h_u - h_o}{h_o} \quad (3.8)$$

Denklem (3.9) ve (3.10) 'de ısı transfer katsayısı ( $\text{W/m}^2\text{C}$ ) birimindedir.  $\eta_{IR}$  Birimsizdir ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen et al. 2018). Isı transfer etkilerini boyutsuz Nusselt sayısı cinsinden tanımlamak mümkündür. Pratiklik açısından geliştirme oranı Nusselt sayısının ultrasonik tahrikli/tahriksiz oranı olarak da tanımlamak mümkündür.

$$\text{İyileşme oranı, } \eta_{Nu} = \frac{Nu_u}{Nu_o} \quad (3.9)$$

$$Nu_u = \frac{h_u L}{k} \text{ ve } Nu_o = \frac{h_o L}{k} \quad (3.10)$$

Burada  $Nu_u$  ve  $Nu_o$  sırasıyla ultrasonik ses dalgası varlığında ve yokluğunda elde edilen Nusselt sayılarını ifade etmektedir. Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) önceki çalışmalarda, ısı transferindeki iyileşmeyi ifade etmek için kullanılan ifadelerdir. Isı transferi iyileştirme performansı karşılaştırılırken eşit şartları sağlamak için iyileştirme performansı ya da oranlarının tanımları dikkatle kontrol edilmelidir.

#### 3.4.4. Belirsizlik analizi

Belirsizlik analizi, deneysel ölçümlerden kaynaklı hataların birleşerek gerçek sonuçtan en fazla ne ölçüde uzaklaşıldığı konusunda önemli bir yaklaşımdır. Literatürde belirsizlik analizi için farklı metotlar bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında yayılmalı

belirsizlik analizi metodu kullanılmıştır. Yayılmalı belirsizlik analizi Kline and McClintock (1953) tarafından geliştirilen yöntemle göre yapılmıştır. Belirsizlik analizi hesaplamalarında kullanılan denklemler Ek 1’de verilmiştir. Formülasyonda ölçüm cihazları ve ekipmanlar için kullanılan belirsizlik değerleri üretici firmaların kataloglarından temin edilmiştir. Yayılmalı belirsizlik analizi ile hesaplanan belirsizlik değerleri Çizelge 3.7’te verilmiştir.

$$\frac{W_R}{R} = \left[ \left( \frac{W_1}{X_1} \right)^2 + \left( \frac{W_2}{X_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{W_n}{X_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

Bu yöntem kullanılarak araştırılan ısı transfer katsayısı (h), ısı transfer katsayısı artış oranı ( $\eta_{IR}$ ), Nusselt sayısına ve iyileştirme oranına ( $\eta_{Nu}$ ) ait belirsizlikler; h değeri için %2,44,  $\eta_{IR}$  için ise %4,05, Nu sayısı için %2,64 ve %3,73 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplanan parametrelerin belirsizliklerine etki eden alt parametrelerin hassasiyetleri Çizelge 3.7’ de verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Deneysel belirsizlik değerleri

| Parametre                                | Belirsizlik (%) |
|------------------------------------------|-----------------|
| Uzunluk, (L, W)                          | 0,01 mm         |
| Sıcaklık, T                              | 0,02 °C         |
| Isıl güç, Q                              | 0,1             |
| Isı transfer yüzey alanı, A <sub>s</sub> | 1,4             |
| Isı iletim katsayısı, k                  | 0,1             |

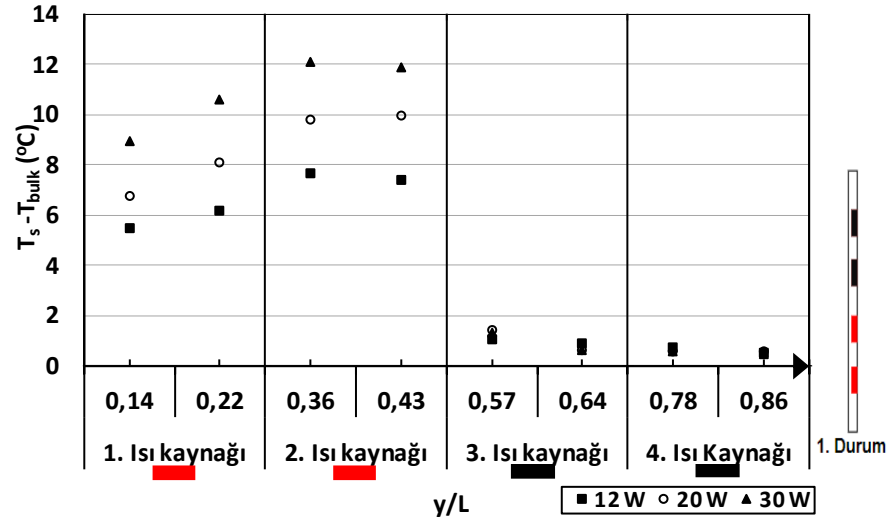
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında daldırmalı soğutma tekniği kullanılarak tek faz ve çift faz ısı transferi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dört eş ısıtıcı ikiyeşerli gruplar halinde beş farklı durumda çalıştırılmış olup aktif ısıtıcı sayısı ve toplam ısı transfer yüzeyi sabit tutulmuştur. Aktif ısıtıcı kombinasyonu sayesinde ısıtıcıların havuz içerisindeki konumu ve birbirlerine göre mesafelerinin ısı transfer performansı üzerindeki etkisi incelenebilmiştir. Konum kombinasyonu yanı sıra değerlendirilen bir diğer parametre ise çıkıntı miktarıdır. Ayırık ısıtıcılar teflon plaka üzerine gömülü, 2 mm ve 4 mm olmak üzere üç farklı çıkıntı miktarında yerleştirilmiştir. Ayrıca havuz içerisine sabit genlikte ve değişken frekansta ultrasonik ses dalgaları tatbik edilerek termal performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışılan ultrasonik ses dalgaları 9,6 kHz, 14,4 kHz, 19,6 kHz ve 24 kHz frekans değerlerinde ve 180 W güç uygulanmıştır. Ultrasonik ses dalgalarının varlığında ve yokluğunda yürütülen deneylerde iş akışkanı olarak PF-5060 performans akışkanı kullanılmıştır. Çıkıntı miktarı, konum konfigürasyonu ve ultrasonik ses dalgası frekansı yanı sıra ısı akısı da çalışma parametresi olarak değerlendirilmiştir. Isıtıcılara uygulanan ısı akısı değerleri  $4 \text{ kW/m}^2 - 166,6 \text{ kW/m}^2$  aralığında yer almaktadır. Deneylerde elde edilen sonuçların tamamının sunulması imkânsız olduğundan havuz kaynama ve tek faz doğal taşınım genel karakteristiklerini temsil eden ve konuya özgün değerleri yansıtan bulgular üzerinde durulmuştur. Bu bölüm üç alt bölümden oluşmaktadır. İlk olarak, tek fazlı daldırmalı soğutma uygulaması için elde edilen ısı transferi sonuçları sunulmuştur. Yüzey çıkıntı miktarı, konum konfigürasyonu ve ultrasonik ses sinyali frekansının tek fazlı doğal taşınım ısı transferine etkileri tartışılmıştır. İkinci kısımda çift fazlı daldırmalı soğutma (havuz kaynama) uygulaması için elde edilen ısı transferi sonuçları değerlendirilerek parametrelerin etkileri tartışılmıştır. Üçüncü kısımda ise havuz kaynama sırasında elde edilen akış desenleri incelenmiştir.

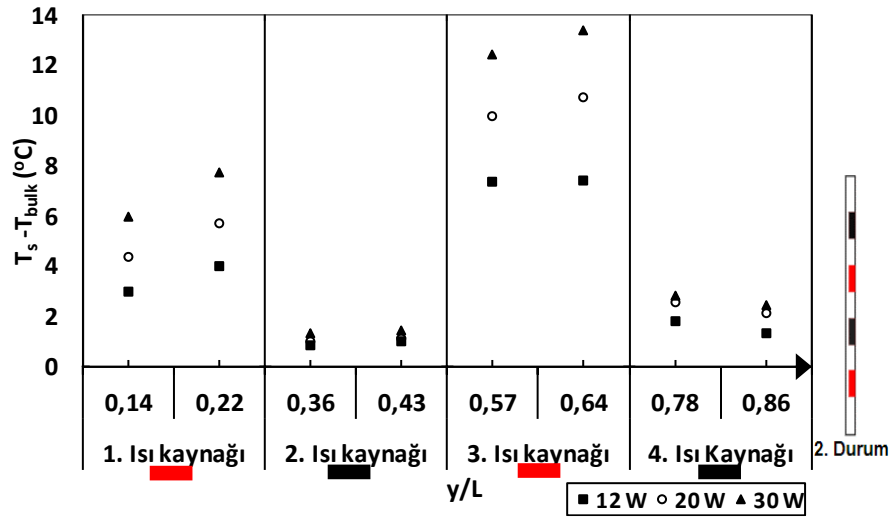
### 4.1. Tek Fazlı Daldırmalı Soğutma Sonuçları

#### 4.1.1. Çıkıntısız (gömülü) ayrık ısı kaynakları

Bu kısımda, bir önceki bölümde belirtilen deneysel çalışma koşullarında gömülü ısı kaynakları için elde edilen veriler sunulmuştur. Ultrasonik ses dalgalarının olmadığı durumlarda, ısı kaynağı yüzey sıcaklığı ile akışkan yığın sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının, ısı kaynakları boyunca değişimi Şekil 4.1’ de sunulmuştur. Isıtılan durağan sıvı ortamlarda meydana gelen yerel değişimler sıvı hareketini tetikleyen doğal etkenlerdir. Sıcaklığın bir fonksiyonu olan termofiziksel özelliklerin ısıtılan ortamda değişmesi yerel farklılıklar oluşmasına sebep olur. Sıcaklık gradyanı, yoğunluk gradyanı, viskozite gradyanı ve termal iletkenlik akış ortamında homojenliği bozan durumlardır. Bütün çalışma durumlarında birinci ısı kaynağına temas eden akışkan molekülleri yüzey sıcaklığına yakın ve/veya eşit sıcaklığa ısınır. Isınan sıvı molekülünün hacmindeki artışa bağlı olarak yoğunluğu azalır. Bu durumun doğal bir sonucu olarak kütle kuvveti kaldırma kuvvetini dengeleyemez ve akışkan molekülü kaldırma kuvveti doğrultusunda harekete zorlanır. Enerjisi yüksek akışkan molekülü ile bitişindeki daha düşük enerjili akışkan molekülü arasında ilk önce sıcaklık ve yoğunluk gradyanı oluşur. Ardından yüksek enerjili akışkan molekülünün kaldırma kuvveti doğrultusunda hareketi ile hız gradyanı oluşur. Isınmış akışkan molekülleri yukarıya doğru sürüklenirken ikinci ısı kaynağı ile temasıyla yüzeyden bir miktar daha ısı çekerek sıvı serbest yüzeyine ulaşır. Sıcak yüzeylere temas ederek ısınan ve kaldırma kuvvetleri yönünde yüzeyi terk eden sıvı moleküllerinin yerini daha düşük enerjili (nispi soğuk) sıvı molekülleri alır ve doğal döngüsel hareket bu şekilde devam eder. Isı kaynaklarına temas eden sıvı molekülleri arasındaki sıcaklık gradyanı sebebiyle ikinci ısı kaynağı yüzey sıcaklığı bütün durumlarda birinci ısı kaynağına kıyasla daha yüksektir (Şekil 4.1). Çoklu ısı kaynaklarının kullanıldığı çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir (Matsuoka et al. 2017; An et al. 2018; Sarper et al. 2018).

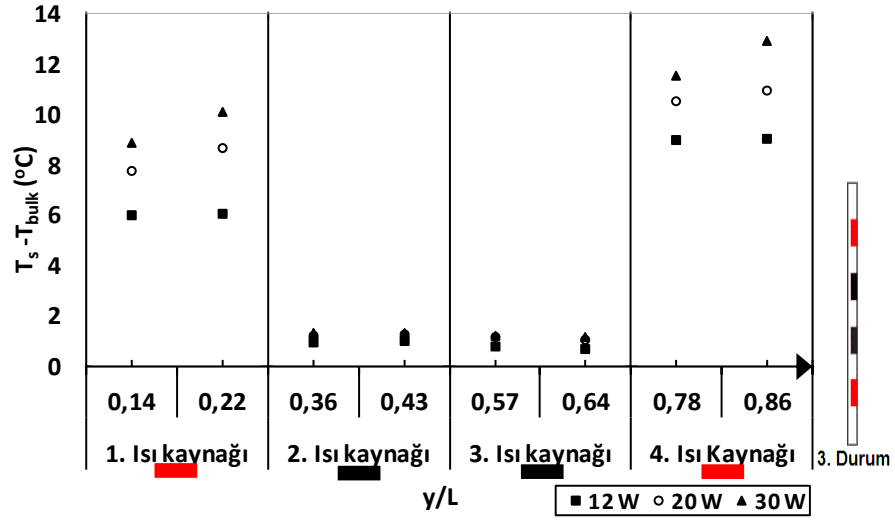


(a)

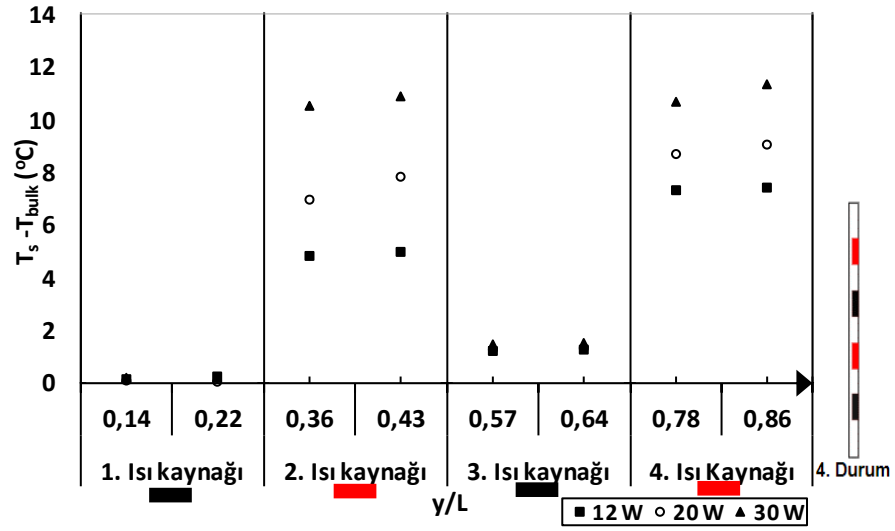


(b)

**Şekil 4.1.** Ultrasonik ses dalgası uygulanmadığı çıkıntısız ısı kaynağı koşullarında aktif ve inaktif kaynaklar boyunca sıcaklık değişimi, (a) 1. Durum, (b) 2. Durum, (c) 3. Durum, (d) 4. Durum, (e) 5. Durum.

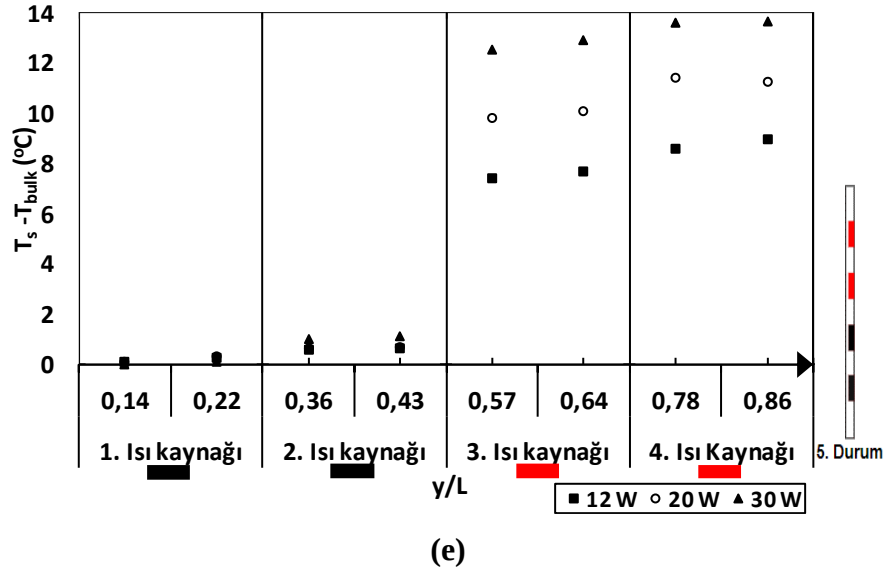


(c)



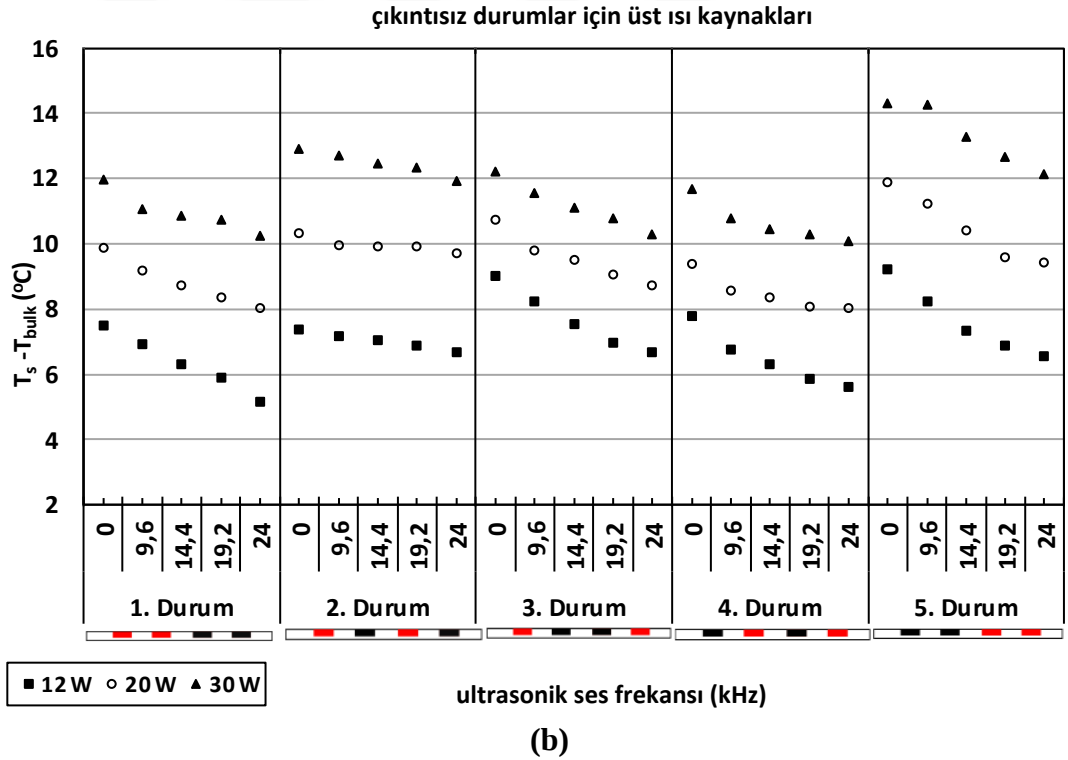
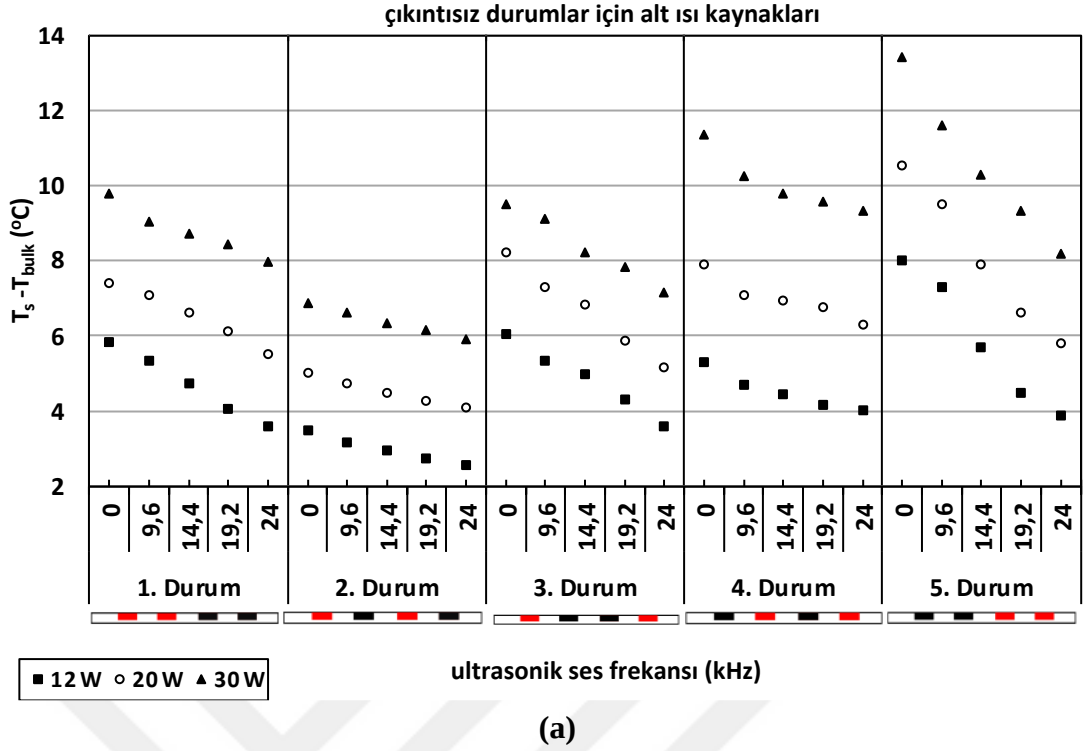
(d)

Şekil 4.1. (devam)



Şekil 4.1. (devam)

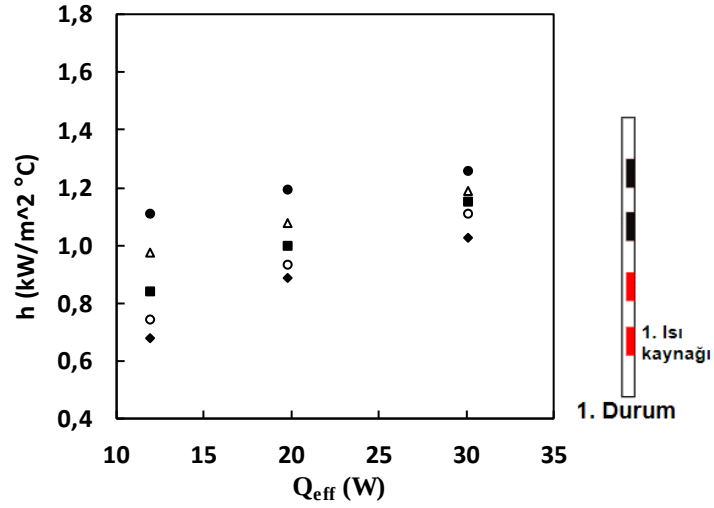
Havuz içerisindeki durağan akışkanı ısıtarak sağlanan doğal hareket, akış alanına uygulanan akustik kuvvet ile şiddetlendirilebilir. Akustik alana maruz kalan sıvı ortamda dört önemli fenomen oluşmaktadır. Bunlar, akustik akış, hidrodinamik kavitasyon, ısıtma ve nebulizasyon (akustik çeşme) fenomenleridir. Bu fenomenlerden akustik akış ve hidrodinamik kavitasyon akış alanı içerisinde düzensizliği tetikleyerek ısı transfer hızını etkileyen olgulardır (Bartoli et al. 2020). Akustik enerjinin dağılmasıyla birlikte sıvı molekülleri arasında momentum gradyanı oluşur. Bu durum sıcak yüzeye temas eden sıvı moleküllerinin sirkülasyonunu artırarak taşınımı desteklemektedir. Bu sebeple çıkıntısız ayrık ısı kaynakları için yürütülen beş durumda yüzey-yığın akışkan arasındaki sıcaklık farkı azalmıştır (Şekil 4.2). Ayrıca bütün durumlar birlikte değerlendirildiği zaman ultrasonik ses sinyalindeki artışla birlikte eğimlerin değiştiği görülmektedir. Şekil 4.2’ de görüldüğü üzere birinci ısı kaynakları için 5. Durum’ da her üç ısıtıcı gücünde de eğri eğimi diğer bütün durumlara göre daha büyüktür. Bunun sebebi kaldırma kuvvetleri doğrultusunda sıvı molekülleri ile temas eden ilk ısı kaynağının ultrasonik dalga üreticine yaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Isı kaynağı ile sinyal üretici arasındaki mesafenin azalması hidrodinamik kabarcıklar ve akustik akış fenomenleri ile birlikte akustik alan içerisinde oluşan yerel basınç değişimlerinin sinyal üretici civarında daha şiddetli olması ile açıklanabilir.



**Şekil 4.2.** Isı kaynağı yüzeyi ve yığın akışkan sıcaklık farkının ultrasonik ses dalgası frekansı ile değişimi.

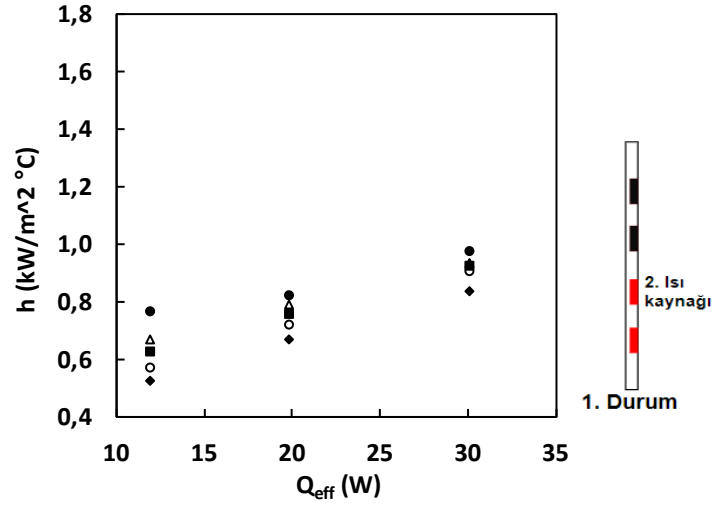
Doğal taşınım şartlarında ısı transfer katsayısının ısıl güç ve ultrasonik ses frekansına bağlı olarak değişimi Şekil 4.3’ de görülmektedir. Ultrasonik ses dalgalarının olmadığı (no ultrasonik ses dalgası) durumlarda akışkan hareketi ısınan yüzeylere temas

eden sıvı molekülleri ile yığın akışkan arasındaki yoğunluk gradyanından kaynaklanmaktadır. Her bir durumda aktif haldeki ilk ısıtıcı yüzeyine temas eden sıvı molekülleri kaldırma kuvvetleri etkisiyle sıvı serbest yüzeyine doğru hareket etmektedir. Isınmış akışkan molekülleri yukarıya doğru sürüklenirken ikinci ısı kaynağı ile temasıyla yüzeyden bir miktar daha ısı çekerek sıvı serbest yüzeyine ulaşmıştır. Şekil 4.3’ de bütün durumlar kendi içerisinde değerlendirildiği zaman birinci ısı kaynağından olan ısı transferi ikinci ısı kaynağından daha büyüktür. Benzer eğilim An et al. (2018) ve Matsuoka et al. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilmiştir. Bu durum, soğutma sıvısının tank tabanından sıvı serbest yüzeyine doğru hareketi sırasında sıcak yüzeylerden ısı çekmesinden kaynaklanmaktadır (Matsuoka et al. 2017). Isınarak sıvı serbest yüzeyine doğru hareket eden akışkan moleküllerinin sıcaklık artışından dolayı ısı transferi hızı düşer dolayısıyla, sıvı serbest yüzeyine yaklaşırken ısınan yüzeylerdeki ısı transfer katsayısı artış hızı azalmıştır.



◆ ultrasans yok ○ 9.6 kHz ■ 14.4 kHz ▲ 19.2 kHz ● 24 kHz

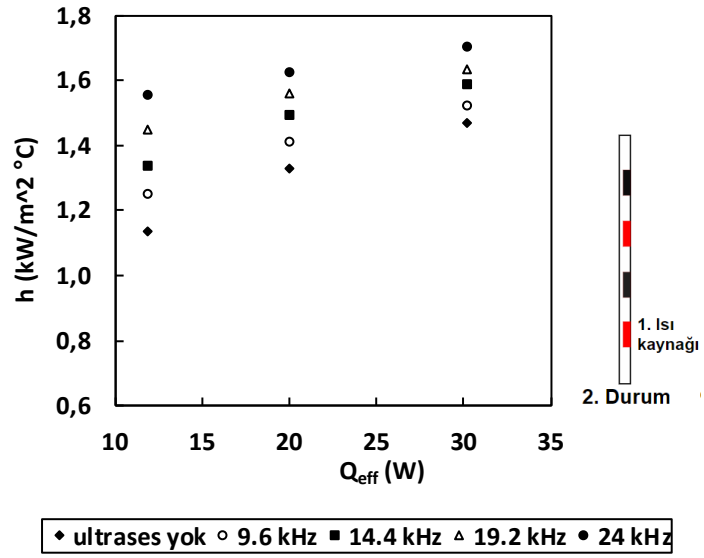
(a)



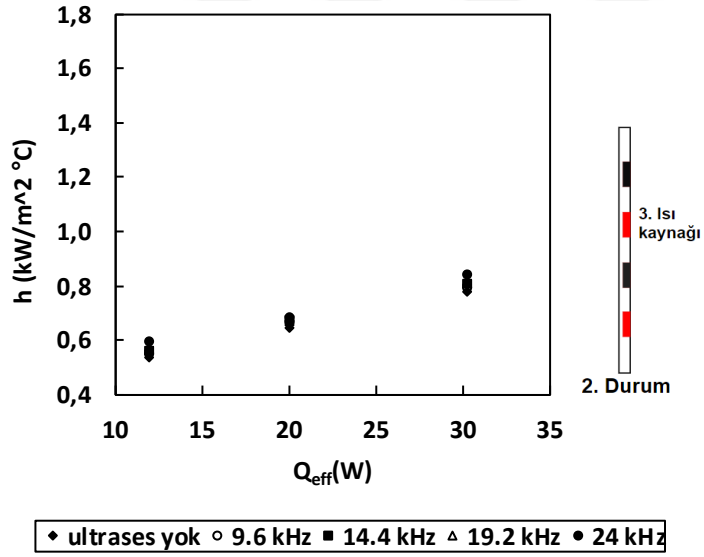
◆ ultrasans yok ○ 9.6 kHz ■ 14.4 kHz ▲ 19.2 kHz ● 24 kHz

(b)

**Şekil 4.3.** Farklı çalışma durumlarında ultrasonik ses frekansı ile ısı transfer katsayısının değişimi, (a)-(b) 1. Durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 2. Isı kaynağı, (c)-(d) 2. Durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 3. Isı kaynağı, (e)-(f) 3. Durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı, (g)-(h) 4. Durum için sırasıyla 2. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı, (i)-(j) 5. Durum için sırasıyla 3. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı.

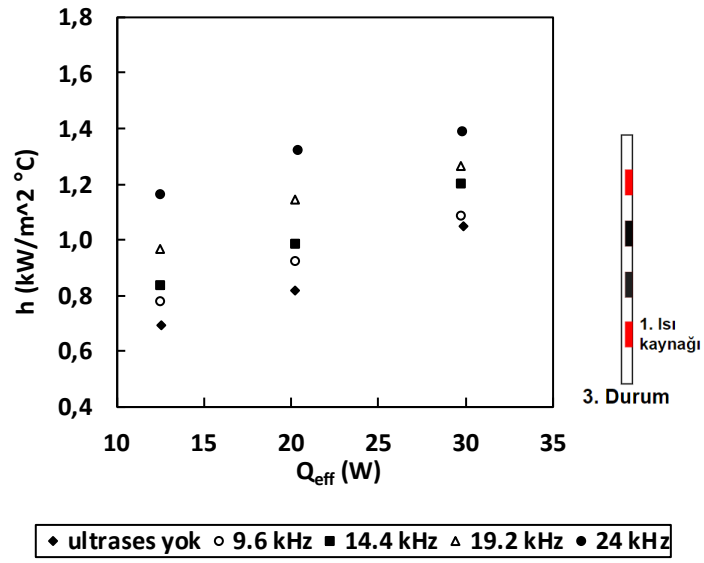


(c)

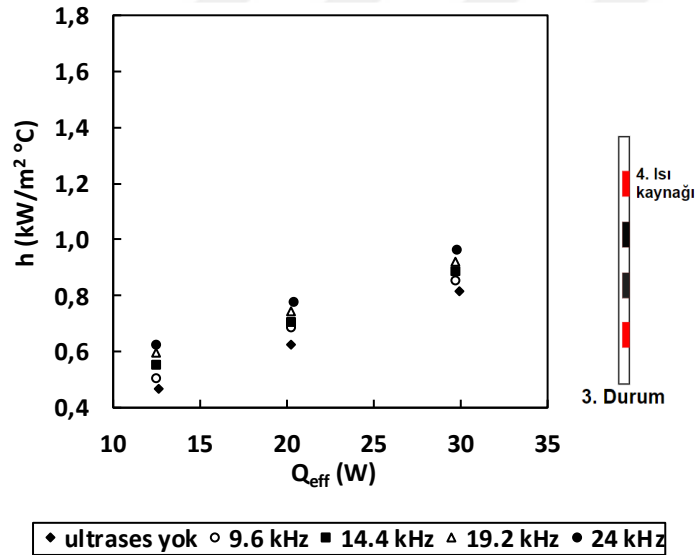


(d)

Şekil 4.3. (devam)

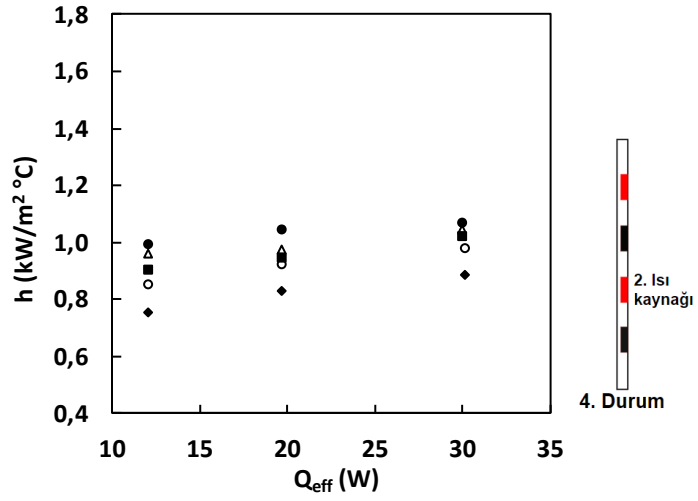


(e)



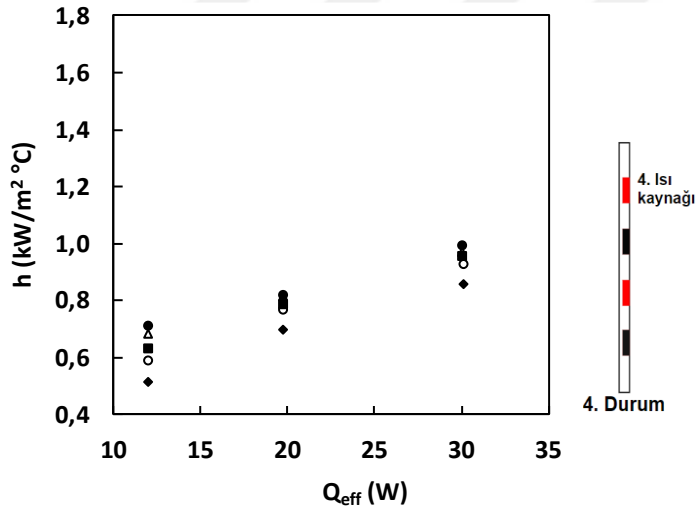
(f)

Şekil 4.3. (devam)



◆ ultrasones yok ○ 9.6 kHz ■ 14.4 kHz △ 19.2 kHz ● 24 kHz

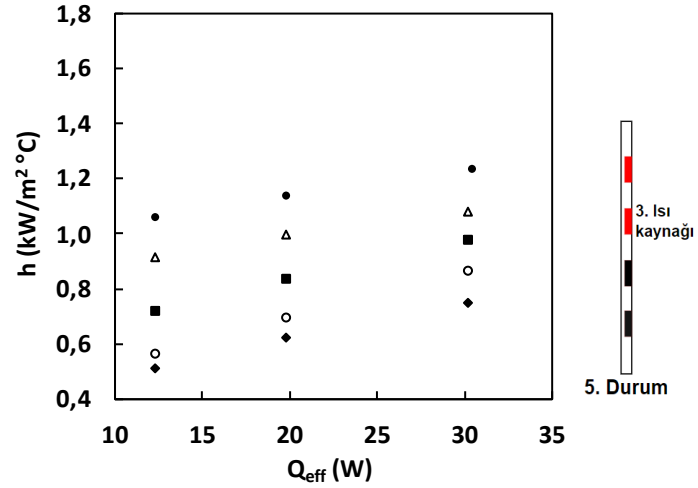
(g)



◆ ultrasones yok ○ 9.6 kHz ■ 14.4 kHz △ 19.2 kHz ● 24 kHz

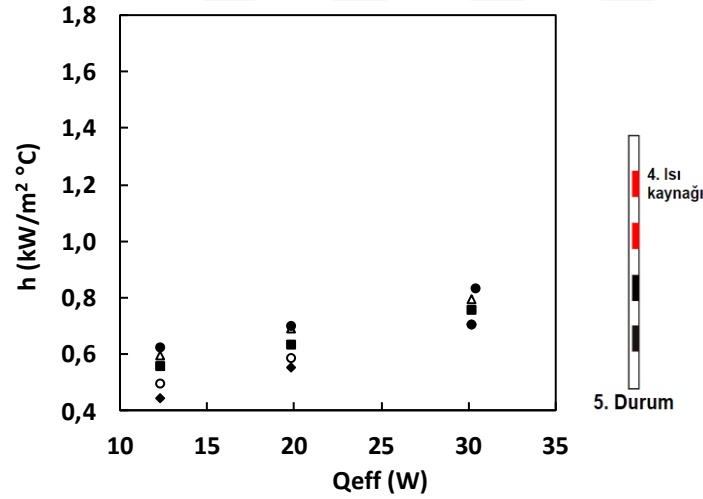
(h)

Şekil 4.3. (devam)



◆ ultrases yok ○ 9.6 kHz ■ 14.4 kHz ▲ 19.2 kHz • 24 kHz

(i)



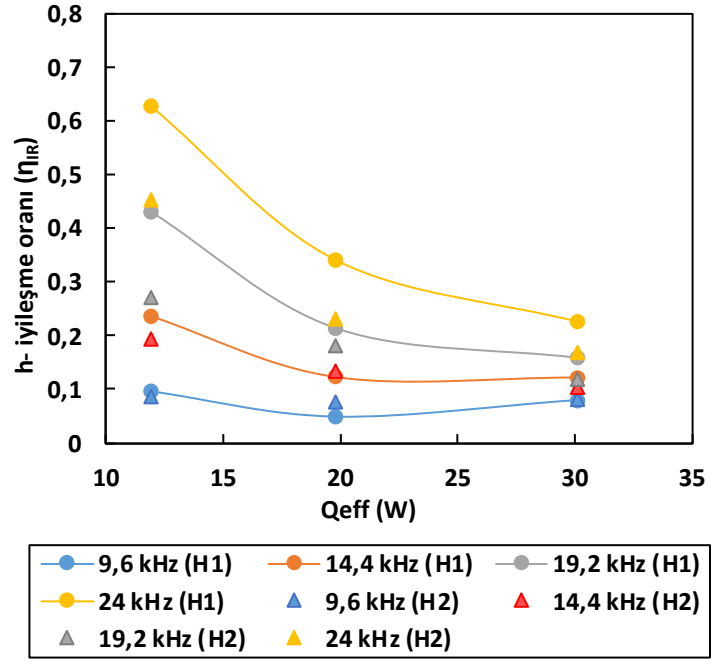
◆ ultrases yok ○ 9.6 kHz ■ 14.4 kHz ▲ 19.2 kHz • 24 kHz

(j)

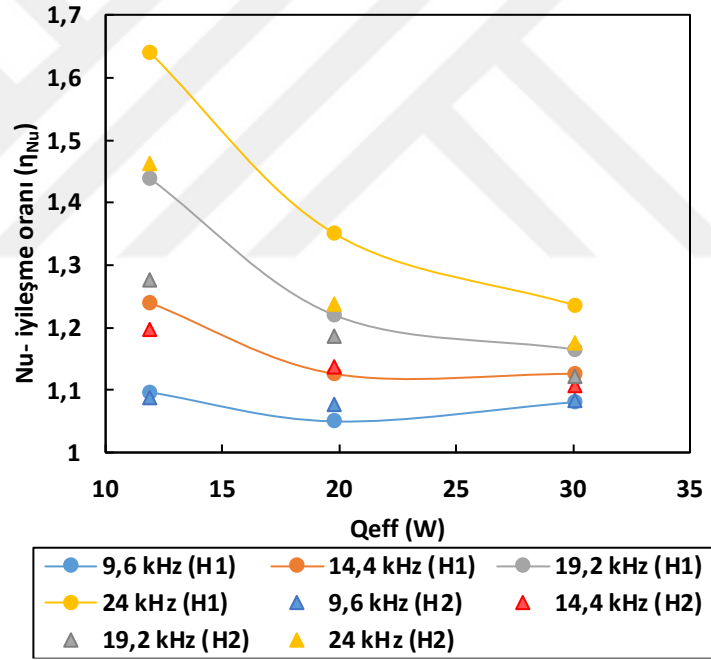
Şekil 4.3. (devam)

Ayrıca Şekil 4.3' de net bir şekilde görüldüğü üzere ısıtıcıların havuz içerisindeki konumları yüzey sıcaklıkları üzerinde önemli bir etkisi vardır. 1. Durum ile 5. Durum durumu birlikte değerlendirildiği zaman bu etki açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Doğal taşınım şartları için aktif ısıtıcılar sıvı serbest yüzeyinden uzaklaştıkça yüzey sıcaklıkları azalmaktadır. Bu durum ısınan akışkanın yoğunluklu olarak serbest yüzeye yakın bölgelerde kümelenmesi ve kaldırma kuvvetlerinin sıcaklık gradyeninin artan eğilim yönünde olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla ısıtıcılar arasında eşit mesafe bulunan durumlar kendi arasında karşılaştırıldığı zaman sıvı serbest yüzeyinden daha uzakta olan durumda sıcaklık farkından dolayı ısı transfer hızı daha büyüktür. Diğer

tarafından bütün durumlarda ve bütün ısıtıcı yüzeylerinde ultrasonik frekansın ısı transfer katsayısını artırıcı yönde etkide bulunduğu açıktır. Aynı ısı gücü de ultrasonik ses dalgalarının frekansı (birim saniyedeki titreşim sayısı) arttıkça ısı transferi katsayısında artış gözlemlenmiştir. Ultrasonik ses dalgasının akış alanı içerisinde neden olduğu akustik akış ve hidrodinamik kavitasyon fenomenleri ısı transferi katsayısındaki artışta büyük rol oynadığı düşünülmektedir. Akış alanı içerisinde oluşturulan hidrodinamik kavitasyon ile meydana gelen kabarcıklar, hedef yüzeyler etrafında düzensiz hareket ederek soğuk sıvı moleküllerinin yüzeylere taşınmasına yardım eder (Kim et al. 2004). Diğer taraftan akustik enerjinin dağılmasıyla birlikte sıvı molekülleri arasında momentum gradyanı oluşur (Boluriaan and Morris 2003). Başka bir deyişle, ses dalgası sıvı içerisinde ilerlerken önünde bulunan sıvıyı sürükleyerek kitlesel bir akışa sebep olmaktadır (Nakagawa 2004). Bu durum, ivmelenen sıvı moleküllerinin akış alanı içerisinde hareketlenmesi ile sonuçlanır. Akustik akış ve hidrodinamik kavitasyon ile meydana gelen toplu sıvı hareketleri ısınan yüzeydeki akışkan hızını arttırarak ısı transfer performansını yükseltir. Ayrıca, deneysel çalışmada, havuz tabanı normalinde sıvı serbest yüzeyinden tatbik edilen ultrasonik ses dalgalarının oluşturduğu akustik akış akımları, kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle saat ibresi yönünde hareket eden sıvı hareketini destekleyici yönde olduğu düşünülmektedir. Bu durum sıvı serbest yüzeyinde bulunan sıcak akışkanın havuz tabanına hareket etmesini ve soğuk sıvıyla karışımını kolaylaştırmıştır. Dolayısıyla havuz tabanındaki ısı kaynağının ısı transfer katsayısı bütün durumlarda daha büyük değerler almıştır.



(a)



(b)

**Şekil 4.4.** Çıkıntısız ayırık ısı kaynakları, 1. Durum için ısıl güç ve ultrasonik ses dalgası frekansına karşılık a) h-artış oranı ( $\eta_{IR}$ ) ve b) Nu iyileştirme oranı ( $\eta_{Nu}$ ) değişimi.

Test verilerine ve literatüre dayanarak ses frekansı, ses genliği ve ses üreticinin sıcak yüzeye göre konumu gibi çeşitli şartlarda ısı transferi katsayısını belirli ölçülerde artırabilir. Ultrases uygulanan durumları ultrases uygulanmayan durumlara göre kıyaslamak ve ultrasesin ısı transfer katsayısındaki artış oranını nicel olarak ifade etmek için h-artış oranı ve iyileştirme oranı kullanılabilir (Chen et al. 2018). Çıkıntısız ayırık ısı

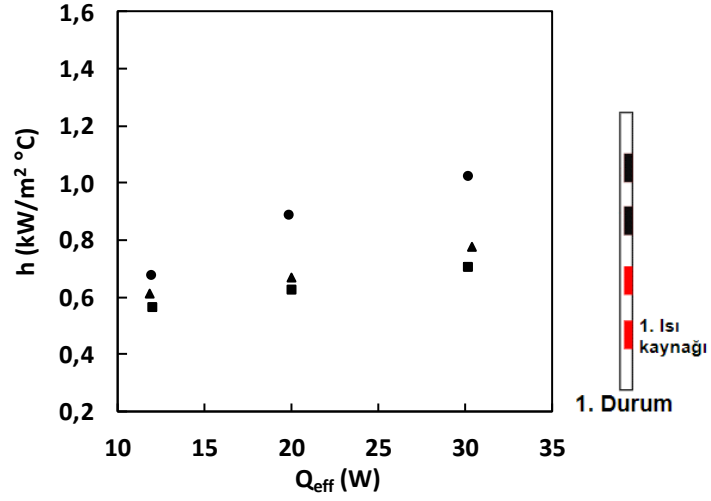
kaynakları için 1. Durumda elde edilen veriler, h-artış oranı ve iyileştirme oranı ifadeleri temelinde kıyaslanarak Şekil 4.4' de verilmiştir. Çalışmayı kapsayan deney parametresi fazla olduğu için geniş bir veri seti oluşturulmuştur. Dolayısıyla bütün durumlar için elde edilen sonuçların bütünüyle sunulması mümkün değildir. Dikkat edilmesi gereken nokta, sunulmayan durumlarda da Şekil 4.4' de verilen karakteristiğe benzer eğilim gözlemlenmiştir. Şekil 4.4 (a)' da açıkça görüldüğü üzere sabit ısı gücünde en yüksek h-artış oranı 24 kHz frekans seviyesinde elde edilirken en düşük h-artış oranı 9,6 kHz frekans seviyesinde elde edilmiştir. Diğer taraftan sabit frekans seviyesinde ısı gücündeki artışın h-artış oranının azalmasıyla sonuçlandığı görülmektedir. Ayrıca düşük ısı güçlerinde h-artış oranları arasındaki farkın, yüksek ısı güçlerinde hesaplanan h-artış oranı değerleri arasındaki farktan büyüktür. Bu durumun, güç artışıyla birlikte sıvı moleküllerinin halihazırda ivmelenmesi ve ultrasonik ses dalgası ile sağlanan ilave kuvvetin etkisinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.4 (a)-(b)' den görüldüğü gibi akışkan havuzu tabanına en yakın olan ısıtıcının (H1, 1. Isı kaynağı) hem h-artış oranı hem de iyileşme oranı serbest yüzeye ve ultrasonik ses dalgası üreticine daha yakın olan ısıtıcıya (H2, 2. Isı kaynağı) kıyasla bütün frekans değerlerinde daha büyüktür. Bu eğilim, literatüre sunulmuş Liu et al. (2018) tarafından yapılan deneysel çalışmayla örtüşmezken, Chen et al. (2018) Tarafından yapılan çalışma ile uyum içerisinde. Liu et al. (2018) Ultrasonik titreşimin ısı transferinin artırılması üzerindeki etkisinin sadece mesafeye bağlı olduğunu belirtmiştir. Fakat diğer taraftan Chen et al. (2018) mesafenin yanı sıra ortamda yayılan dalga formlarının da etkili olabileceğini vurgulamışlardır. Elde edilen sonuç ultrasesin ısı transferi üzerindeki etkisinin sadece mesafe, dalga formları ile değil ultrasonik ses dalgası üreticinin uygulanma biçimi (dahili veya harici) ve sıcak yüzeyin yönelimine bağlı olarak da değişebileceğini göstermektedir.

##### 4.1.2. Çıkıntılı ayırık ısı kaynakları

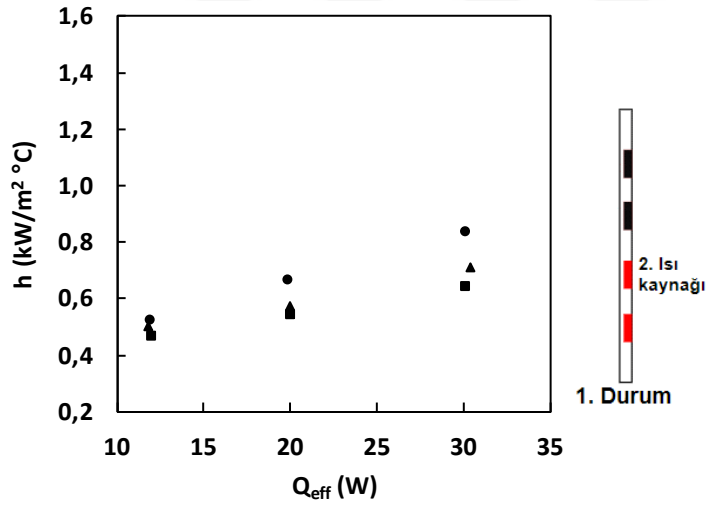
Çıkıntı miktarına bağlı olarak ısı transfer katsayısının değişimi Şekil 4.5' de sunulmuştur. Kanal içi akışta (doğal taşınım şartlarında) ayırık ve çıkıntılı ısıtıcılara yönelik yapılan bazı literatür çalışmalarında çıkıntılı ısıtıcı ile kanal çeperi arasındaki mesafeye bağlı olarak ısıtıcılar arasında oluşan resirkülasyon alanından dolayı ısı transferi katsayısının arttığı yorumu yapılmıştır (Heindel et al. 1995). Resirkülasyon alanının ve şiddetinin artışı zorlanmış taşınım veya kanal akışını içeren doğal taşınım

uygulamalarında, akışkan hareketine ivme ve düzensizlik kazandırdığından dolayı istenen bir durumdur. Fakat tek fazlı daldırmalı soğutma uygulamasında ısınan eleman ve ısınmayan elemanlar yekpare sıvı içerisine daldırıldığından dolayı havuz içerisindeki toplu akışkan hareketleri veya düzensizlikleri ısı transferini daha çok etkilemektedir. Ayrıca en yüksek çıkıntı miktarında dahi ısıtıcı yüzeyi ile soğutucu sıvı tankı iç çeperi arasındaki mesafe oldukça büyük olduğundan resirkülasyon akışı oluşmamıştır. Resirkülasyon bölgesinin oluşmamasının bir diğer sebebi ise ısıtıcılar arasındaki mesafenin az olmasından kaynaklanmış olabilir. Diğer taraftan sıvı molekülleri hedef yüzeye ulaşmadan önce ısıtıcıların çıkıntılı kısımlarına temas ederek akışkan moleküllerinin hedef yüzeyler üzerindeki sirkülasyonu azalmıştır. Bu sebeple çıkıntı miktarındaki artış, ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının artışı ile sonuçlanmıştır.

Şekil 4.5’ de açık bir şekilde görüldüğü üzere bütün çalışma durumlarında artan çıkıntı miktarıyla hedef yüzeydeki ısı transfer katsayısının azaldığı görülmektedir. Gömülü ısı kaynaklarının aksine çıkıntılı ısı kaynaklarında, ısınmış blokların alt yüzeyine temas eden akışkanın kaymama koşulu sebebiyle kaldırma kuvvetlerine direnme eğilimindedir. Bu durum, soğuk sıvının hedef yüzeye ulaşmadan önce bir miktar ısınmasına neden olur. Sonuçta, ısı transfer yüzeyinde sıcaklık farkının azalması ısı transfer hızının düşmesine sebep olmuştur. Diğer taraftan, bütün çalışma durumlarında çıkıntı miktarındaki artışın ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisinin azaldığı görülmektedir.

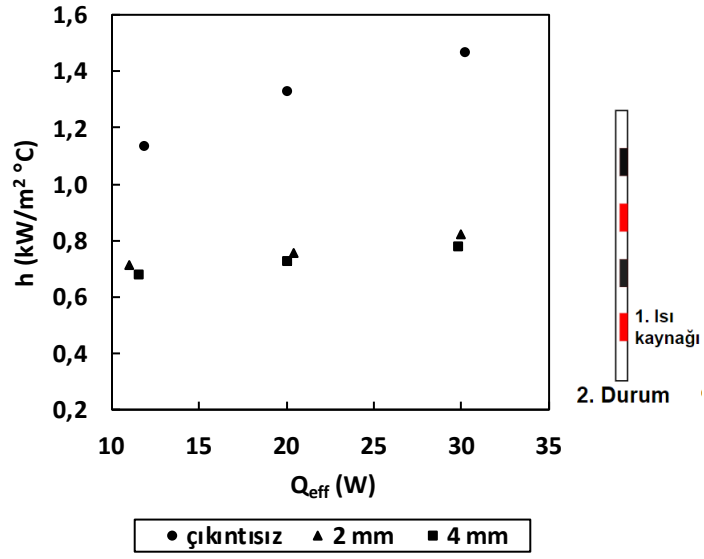


(a)

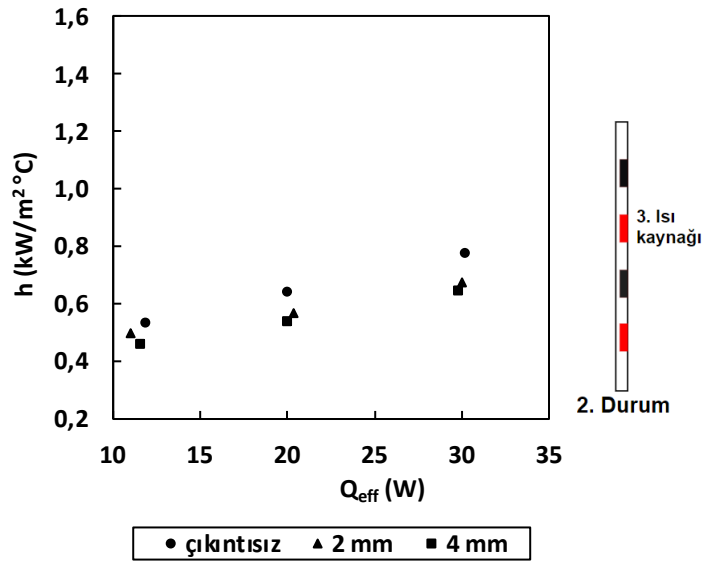


(b)

**Şekil 4.5.** Ayrık ısı kaynakları için ısı transfer katsayısının ısı güç ve çıkıntı miktarına göre değişimi; (a)-(b) 1. durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 2. Isı kaynağı, (c)-(d) 2. durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 3. Isı kaynağı, (e)-(f) 3. durum için sırasıyla 1. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı, (g)-(h) 4. durum için sırasıyla 2. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı, (i)-(j) 5. durum için sırasıyla 3. Isı kaynağı ve 4. Isı kaynağı.

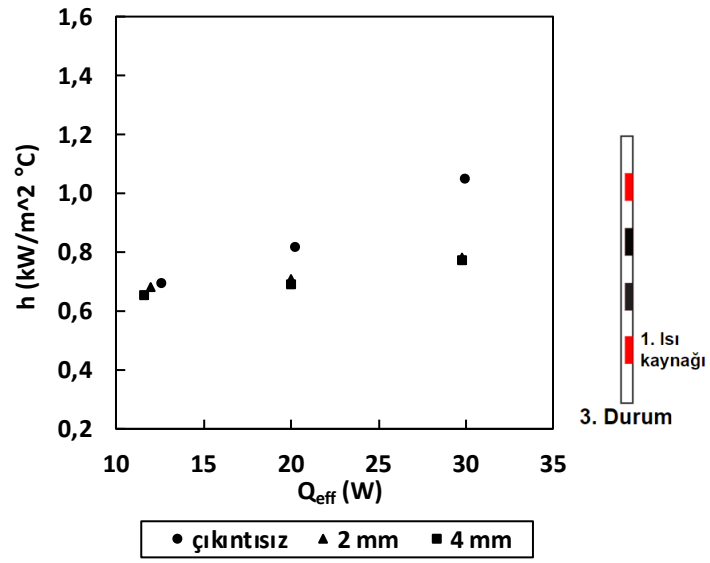


(c)

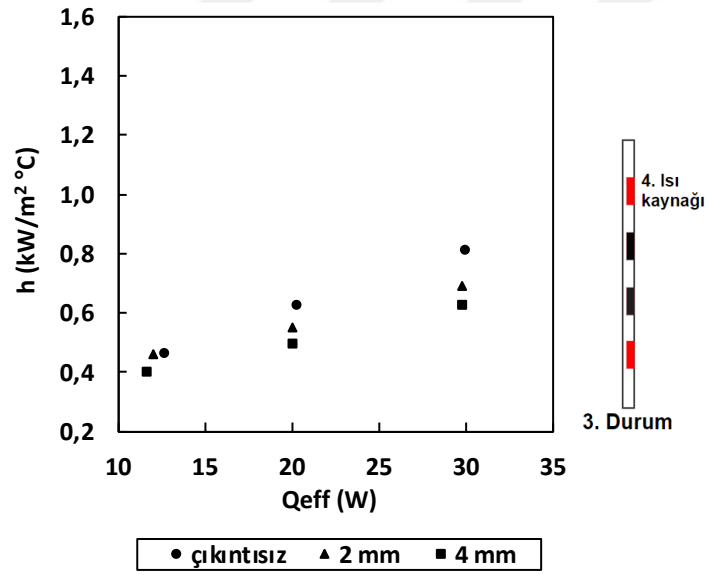


(d)

Şekil 4.5. (devam)

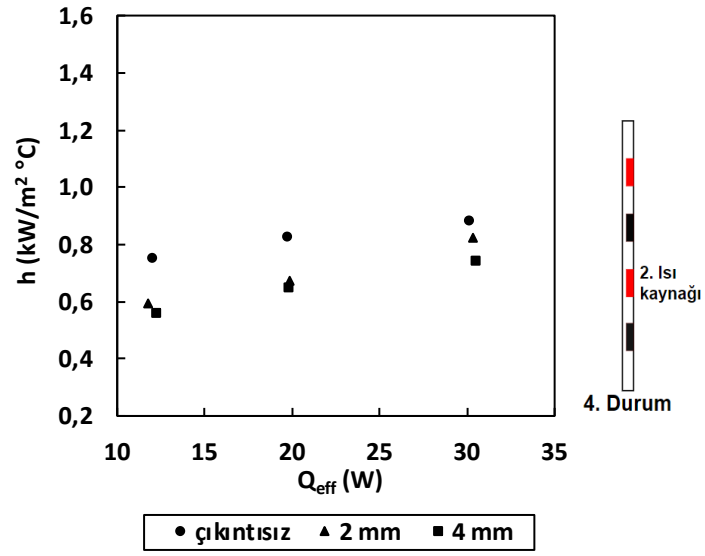


(e)

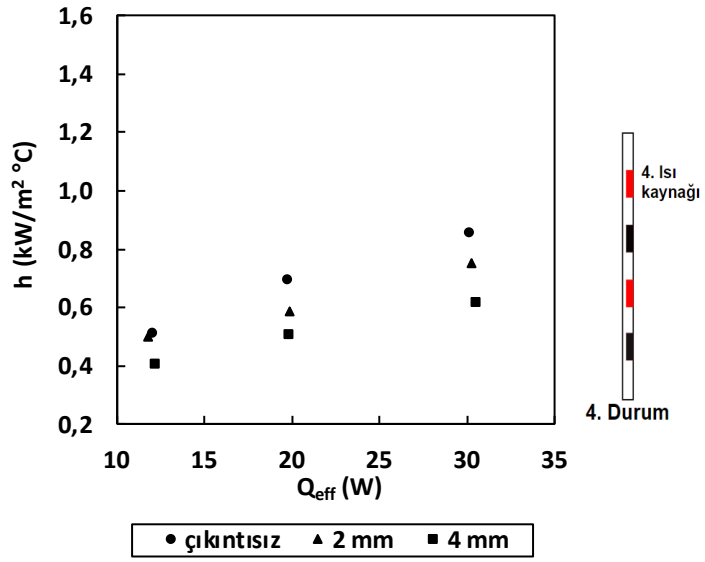


(f)

Şekil 4.5. (devam)

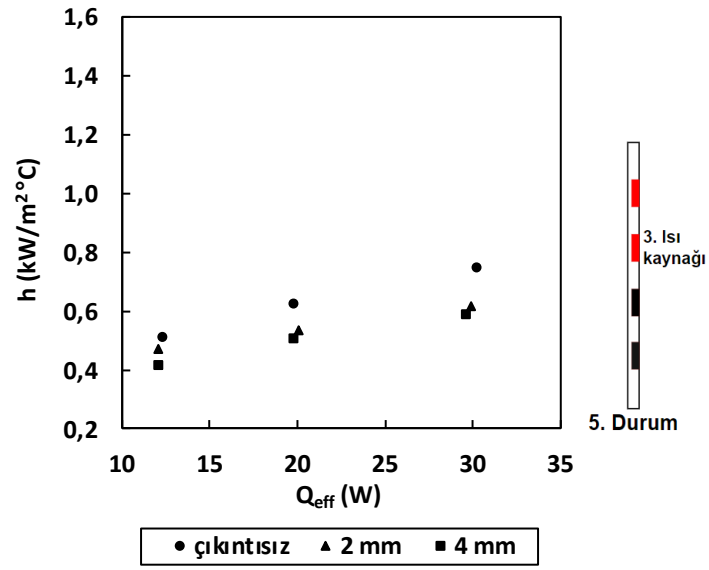


(g)

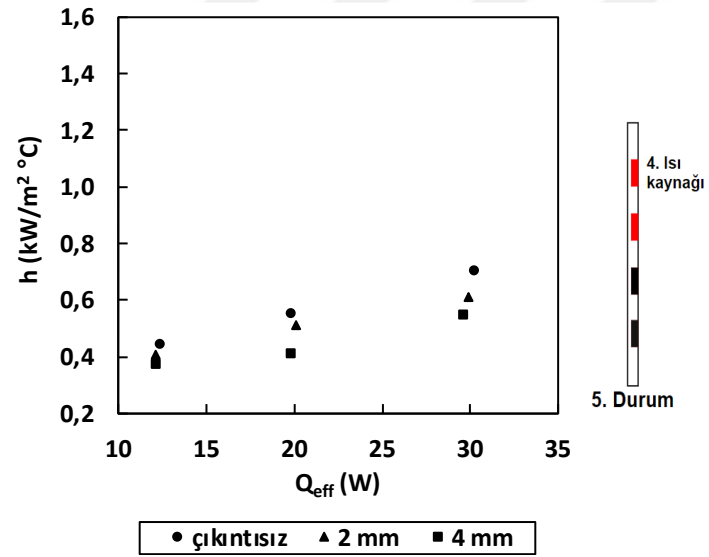


(h)

Şekil 4.5. (devam)



(i)



(j)

Şekil 4.5. (devam)

### 4.2. Çift Fazlı Daldırmalı Soğutma Sonuçları

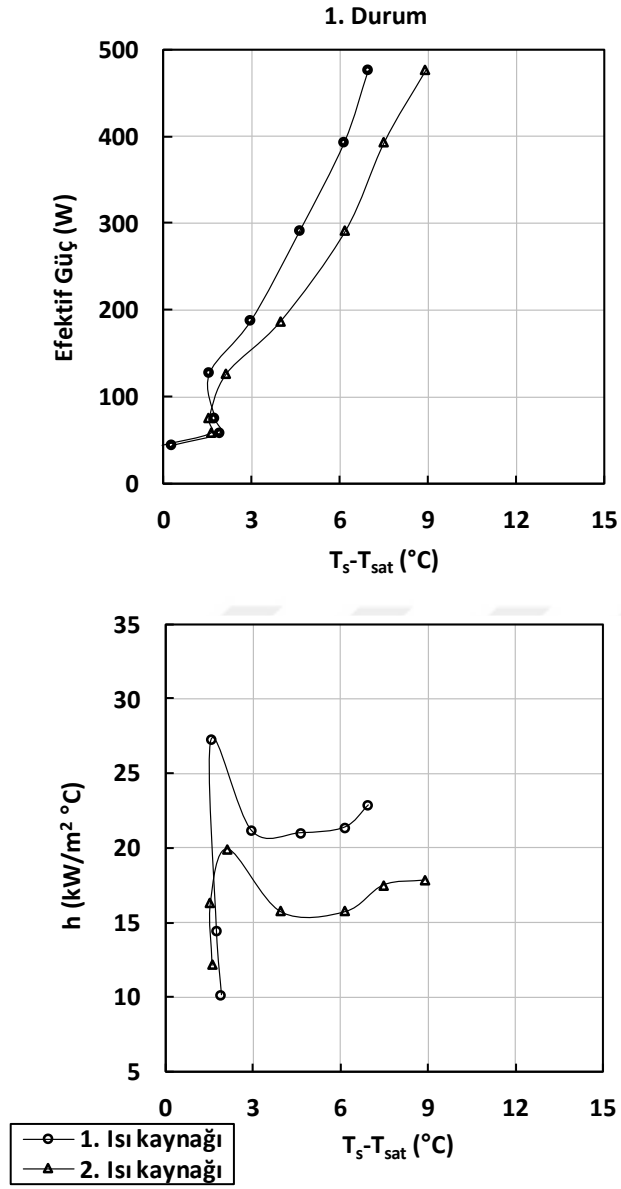
#### 4.2.1. Çıkıntısız (gömülü) ayırık ısı kaynakları

Kaynama deneyleri beş farklı durum, üç farklı çıkıntı miktarı (gömülü, 2mm ve 4 mm çıkıntılı) ve beş farklı ultrases frekansı (ultrases yok, 9,6 kHz, 14,4 kHz, 19,6 kHz ve 24 kHz) için yapılmıştır. Bu bölümde gömülü ısı kaynaklarının ses frekansının olmadığı durumlarda havuz içerisindeki konumuna bağlı olarak ısı transferi katsayısındaki değişimi incelenmiştir. Bütün durumlarda ısı kaynaklarının kaynama eğrilerinin benzer eğilimde olduğu görülmektedir. Kaynama deneyleri boyunca ısıtıcılara  $12,3\text{kW/m}^2$  ila  $163,04\text{ kW/m}^2$  aralığında efektif güç uygulanmıştır. Her bir durum için ısıtma yüzeylerinde elde edilen kızdırma sıcaklığının ısıl güç ile değişimi Şekil 4.6' da sunulmuştur. Çekirdek kaynamayı başlatmak ve sürdürebilmek için duvar sıcaklığının sıvının doyma sıcaklığını aşması gerekir. Artan ısı akısıyla birlikte kızdırma sıcaklığının yaklaşık olarak  $2^\circ\text{C}$ ' yi aştığı anda bütün durumlarda çekirdeklenmin başladığı ve yüzey sıcaklığında bir miktar artışa neden olduğu görülmektedir (Şekil 4.6). Çekirdek embriyolarının oluşumu ve kaynama başlangıcından önce yüzey sıcaklığındaki bu artış sıcaklık kayması (başlangıç aşımı) olarak tanımlanır (Ali 2013; Bejan and Kraus 2003) Başlangıç aşımı evresi aslında yüzey üzerindeki boşluklara nüfus ederek ince bir film tabakası oluşturan sıvı moleküllerinin doyma sıcaklığına ulaşarak faz değişim sürecinin başladığını gösteren kritik bir aşamadır. Sıcaklık aşımı, buhar embriyolarının oluşumu, gelişimi ve yüzeyden ayrılma süresine bağlı olarak değişebilir. Dolayısıyla çekirdeklenme başlangıcını tetikleyen ve süreci etkileyen yüzey morfolojisi, mikro gözenekli yapılar ve sıvının termofiziksel özellikleri sıcaklık aşımı seviyesini değiştiren faktörlerdir. Sıcak yüzeye mikro gözenekli yapıların ilave edilmesi çekirdek odaklarının sayısını arttıracığından sıcaklık aşımını azaltırken yüksek ısılatma kabiliyeti olan sıvıların kullanılması yüzey boşluklarında daha az havanın hapsolmesine sebep olacağından kaynamayı başlatabilmek için daha yüksek yüzey aşırı ısısı gerekir (Ali 2013).

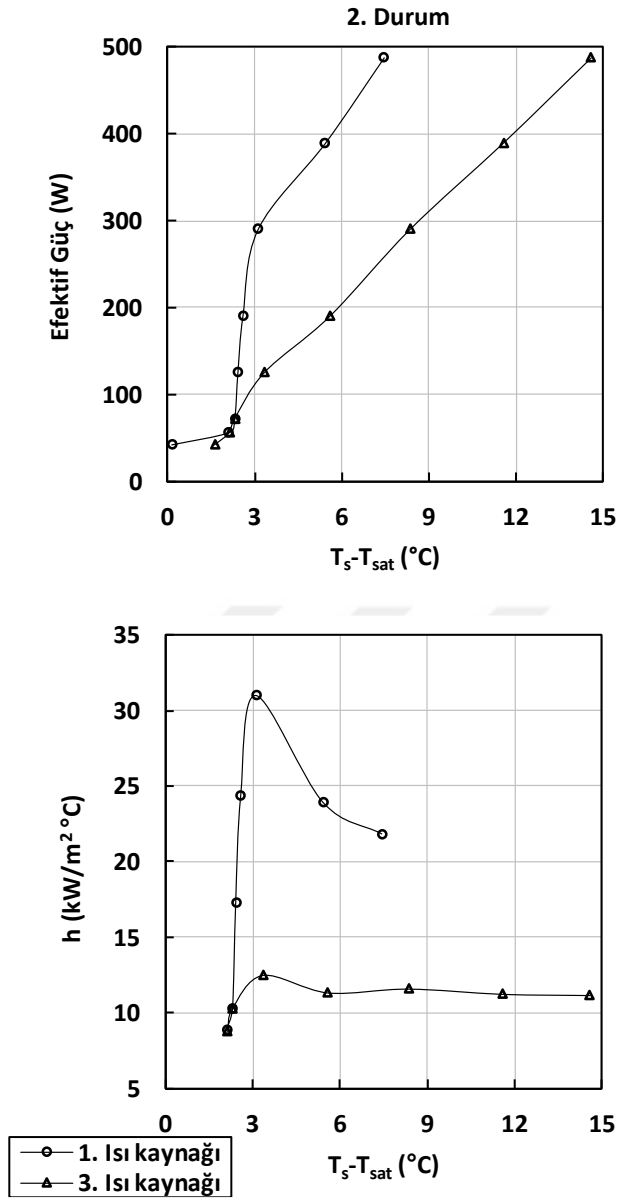
Sıcaklık farkı ısı kaynaklarının birbirine yakın olduğu durumlarda daha az iken, kaynaklar arasındaki mesafenin artışıyla daha belirgin hale gelmiştir (Şekil 4.6). Kabarcık oluşumundan itibaren bütün durumlarda, üst seviyedeki ısı kaynağının yüzey sıcaklığı daha yüksektir. Bu durum, ısı kaynaklarında oluşan kabarcıkların yüzeyden ayrılma

süresiyle açıklanabilir. Havuz tabanına yakın olan ısıtıcı yüzeyi ile temas eden sıvı molekülleri doyma sıcaklığına ulaşarak buhar fazına geçer ve genleşirler. Hacim artışıyla birlikte yoğunluğu azalan buhar molekülleri kaldırma kuvvetleri etkisiyle havuz içerisinde yukarı yönlü hareket etmeye başlarlar. Alt ısı kaynağı yüzeyinden ayrılan buhar kabarcığı havuz içerisinde yükselir. Kaldırma kuvvetleri yönünde oluşan buhar hareketi üst ısı kaynağının yüzeyini kaplar. Dolayısıyla ikinci ısı kaynağında sıvı hacim fraksiyonu önemli ölçüde azalır. Bu sebeple akış alanında yukarı yönlü sıvı-buhar akışı, üst ve alt ısı kaynakları arasında sıcaklık farkına neden olmuştur. Benzer durum Sun et al. (2022) tarafından yürütülen çalışmada görülmüştür.

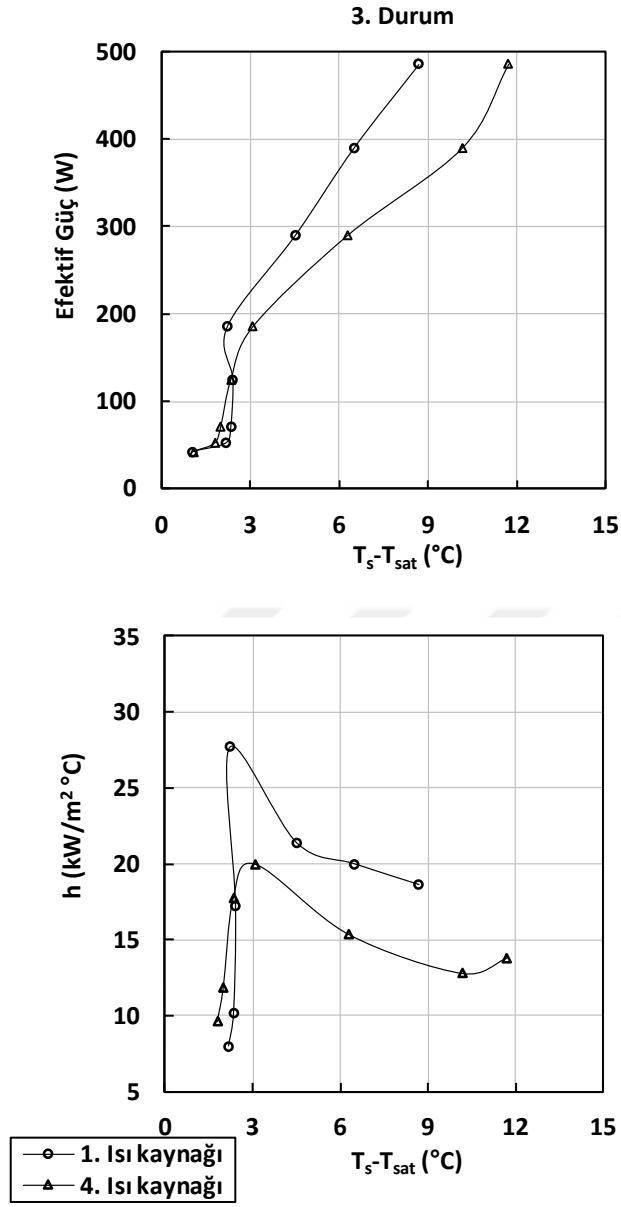




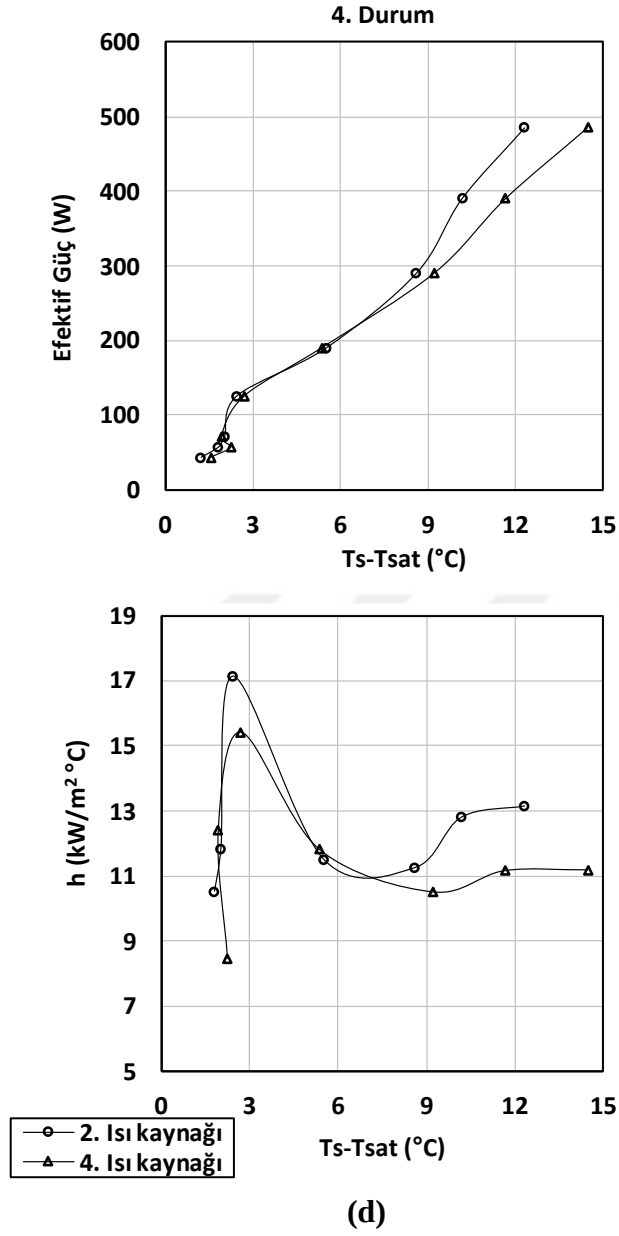
**Şekil 4.6.** Gömülü ayırık ısı kaynakları için kızdırma sıcaklığının ısıl güç ile değişimi, (a) 1. Durum, (b) 2. Durum, (c) 3. Durum, (d) 4. Durum, (e) 5. Durum.



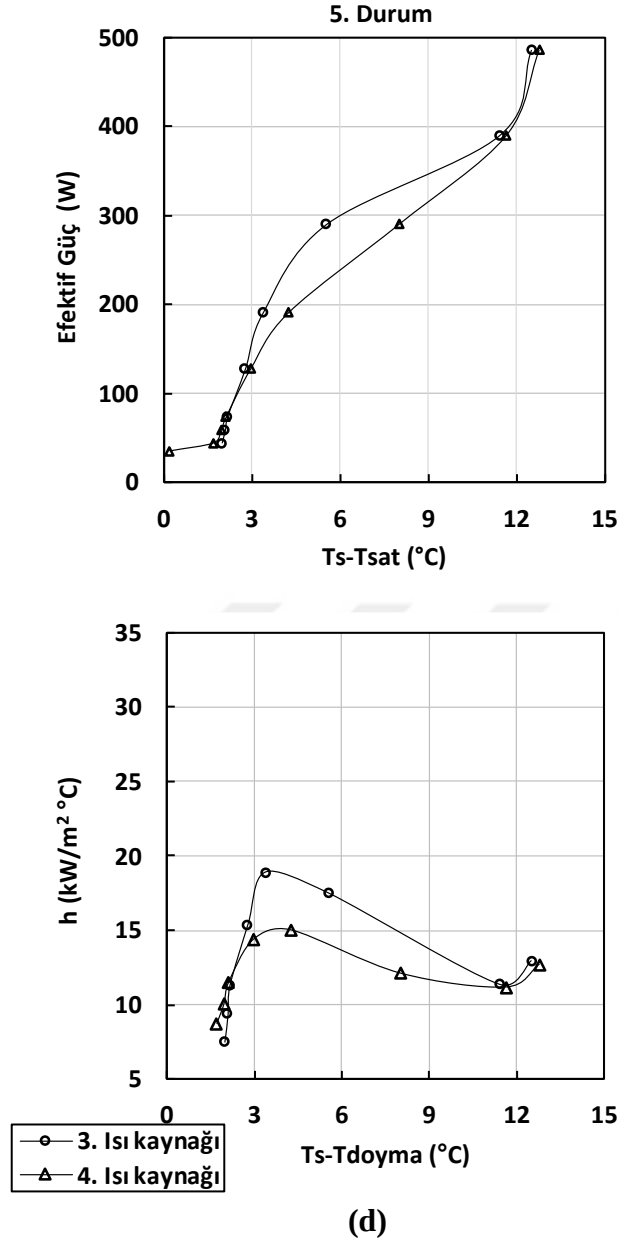
Şekil 4.6. (devam)



Şekil 4.6. (devam)



Şekil 4.6. (devam)



Şekil 4.6. (devam)

Yine Şekil 4.6' da çift fazlı daldırma soğutma deneylerinde elde edilen ısı transfer katsayısının gömülü ısı kaynakları için beş farklı durumda kızdırma sıcaklığı ile değişimi sunulmuştur. Isı transfer katsayısı seviyeleri karşılaştırıldığı zaman tek fazlı daldırma soğutma sonuçlarına göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Faz değişimi ve sıvı-buhar gizli ısının ısı kaynağı üzerinden çekilmesi bu sonucun başlıca sebebidir. Her bir durumda alt ısı kaynağının ısı transfer katsayısı üst ısı kaynağına göre daha yüksektir. Bu durum, havuz tabanından yoğunluk farkı ve kaldırma kuvvetleri nedeniyle yukarıya doğru hareket eden sıvı moleküllerinin sıcak yüzeye temasıyla, bir kısmının buhar fazına geçmesi ve dolayısıyla sıvının yığın hareketini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Üst ısı

kaynağı yüzeyindeki sıvı fraksiyonun azalması (kabarcık yoğunluğunun artması) ısı transfer hızını azaltarak yüzey sıcaklığının artmasına sebep olmuştur (An et al. 2018). Diğer taraftan, ısıtıcılar arasındaki mesafenin artışı birinci ısı kaynağının termal performansını arttırmıştır. Sıvı serbest yüzeyindeki güçlü sıvı hareketleri havuz tabanında akış hızlarını arttırarak ısı transfer hızının yükselmesine neden olmuştur. Bu durumda mikro konveksiyon fenomeninin etkili olduğu düşünülmektedir.

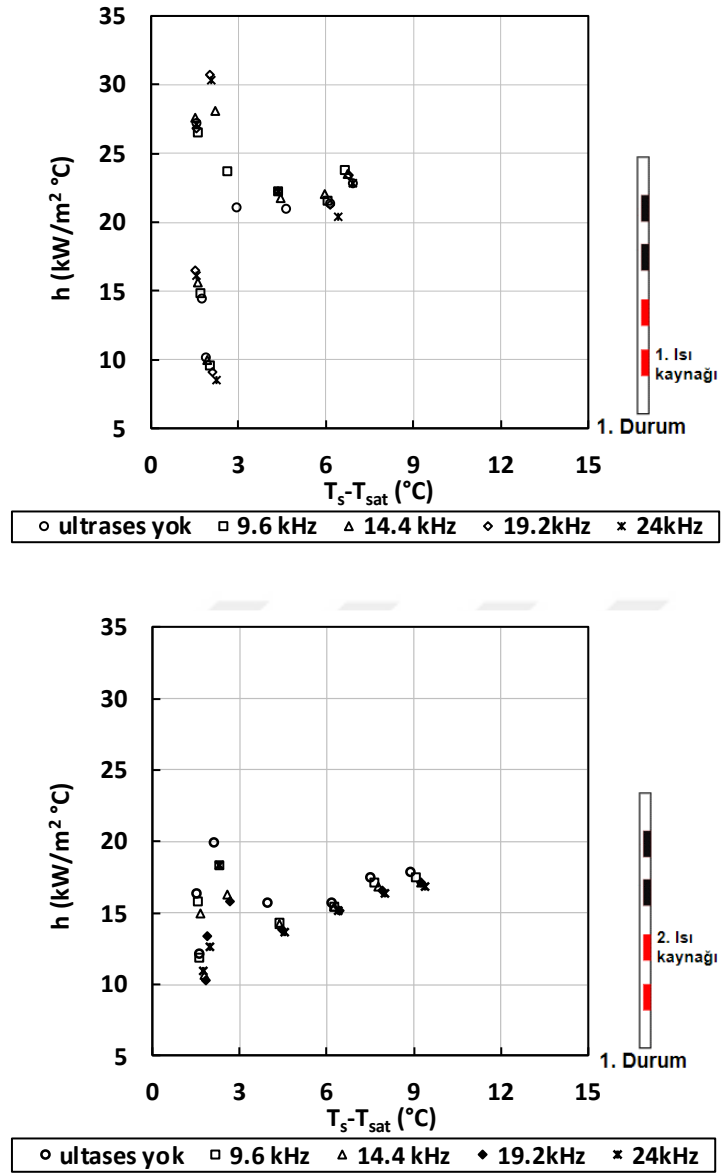
**Çizelge 4.1.** Gömülü ayrık ısı kaynaklarının maksimum ısı transfer katsayısı değerleri

|          | 1. Isı Kaynağı                    |                            | 2. Isı Kaynağı                    |                            |
|----------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
|          | $h_{MNB}$<br>kW/m <sup>2</sup> °C | $q''$<br>kW/m <sup>2</sup> | $h_{MNB}$<br>kW/m <sup>2</sup> °C | $q''$<br>kW/m <sup>2</sup> |
| 1. Durum | 27,225                            | 42,26                      | 19,893                            | 42,26                      |
| 2. Durum | 31,023                            | 96,73                      | 11,584                            | 96,73                      |
| 3. Durum | 27,734                            | 61,88                      | 19,962                            | 61,88                      |
| 4. Durum | 17,134                            | 41,86                      | 15,422                            | 41,86                      |
| 5. Durum | 18,901                            | 63,63                      | 14,993                            | 63,63                      |

Şekil 4.6’ de verilen eğrilerde dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta  $\Delta T_{kızdırma} \approx 4^\circ \text{C}$  olduğu zaman ısı transfer katsayısı maksimum değerini almasıdır ( $h_{MNB}$ ). Isı transfer katsayısının tepe noktasına ulaştığı bu nokta tam gelişmiş çekirdek kaynama sürecinin sonuna gelindiğinin bir göstergesidir (Ali and El-Genk 2012). Maksimum ısı transfer katsayısının görüldüğü noktaya karşılık gelen ısı akısı değeri çalışma durumları için farklılık göstermektedir. Bu değerler gömülü ısı kaynakları için Çizelge 4.1’ de verilmiştir. Eğrilerin pik yaptığı bu noktadan sonra ısıl güçteki artışla birlikte ısı transfer katsayısı azalmaya başlamıştır. Aynı zamanda bu noktadan sonra ısıl güçteki küçük artışlar dahi kızma sıcaklığının büyük ölçüde artmasıyla sonuçlanmıştır. Sıcak yüzey üzerinde oluşan buhar kabarcıklarının yüzeyi kaplaması bu durumun bir sebebidir. Gazların ısı taşınım katsayısı sıvılardan daha düşüktür. Dolayısıyla yüzeyi kaplayan buhar kabarcıkları sıcak yüzey ile soğutma sıvısı arasında direnç oluştur ve ısı transfer katsayısı belirgin bir şekilde azalır.

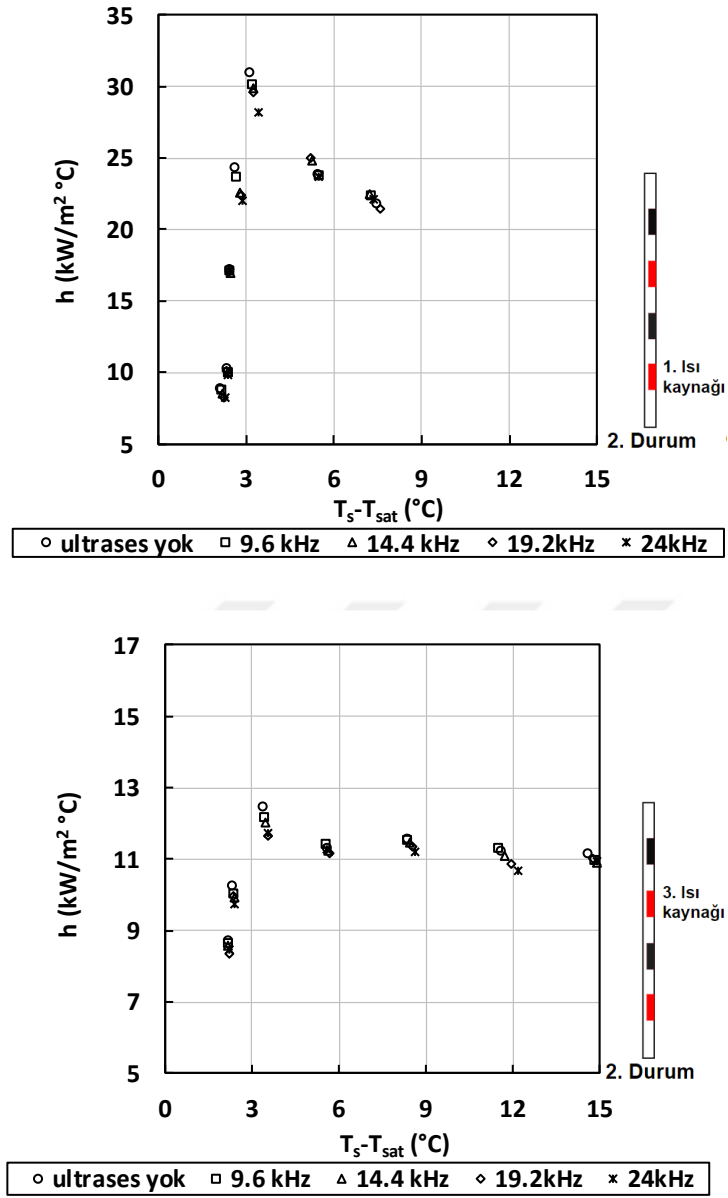
Kaynamalı ısı transferi fiziği gereği ısıtılan yüzeyden buhar kabarcıklarının büyümesi ve ayrılmasını içerir. Bu hareket sadece ısıtılan yüzeyin yakınında yerel

türbülans oluşturmakla kalmayıp aynı zamanda sıvıyı çok yüksek frekansta sıcak yüzeye doğru çeker. Diğer taraftan, havuz içerisine ultrasonik ses dalgası gönderilerek oluşturulan sistemlerde ısı transferine etki eden iki önemli fenomene önceki bölümlerde değinilmiştir. Bu fenomenlerin tek fazlı soğutma şartlarında ısı transferini arttırıcı yönde etkide bulunduğu konusunda literatürde fikir birliğine varılmasına karşın çift fazlı daldırılmalı soğutma sistemleri için ortak kanaat oluşmamıştır. Zhou and Liu (2004) boru etrafındaki kaynama ısı transferi üzerindeki kavitasyon alanın etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, kavitasyon kabarcıklarının sıcak yüzeye çarpması ile buhar embriyolarını aktifleştirdiği ve çekirdeklenme bölgesinin arttığı belirtilmiştir. Bu sayede ultrasonik kavitasyon ile ısı transfer performansının arttırıldığı ifade edilmiştir. Diğer taraftan, Kim et al. (2004) tarafından yapılan çalışmada ise ultrasonik kavitasyonun, doğal taşınımında kaynama rejimine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak, kaynama rejiminde ultrasonik kavitasyona ihtiyaç olmadan ısı transferini destekleyen ve mikro kavitasyona sebep olan termal kabarcıkların oluşması gösterilmiştir. Bartoli and Baffigi (2012) tarafından sunulan görüşe göre ise, akışkan yığın sıcaklığı doyma sıcaklığına yakın olduğu durumlarda, ultrasonik titreşimin ısı transferi üzerindeki etkisini sınırlandıracağı ve hatta ısı transferi katsayısını azaltacağı belirtilmiştir.



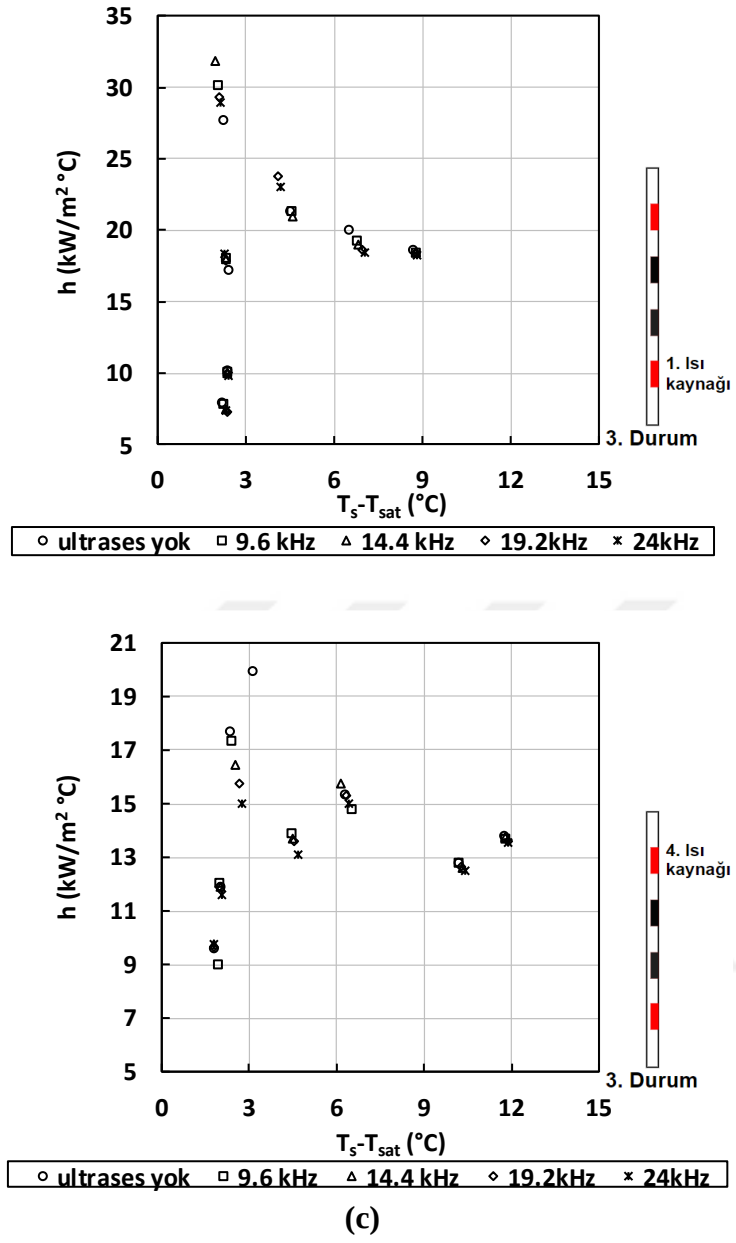
(a)

Şekil 4.7. Kaynama ısı transfer katsayısının ultrasonik ses dalgası frekansıyla değişimi, (a) 1. Durum, (b) 2. Durum, (c) 3. Durum, (d) 4. Durum, (e) 5. Durum.

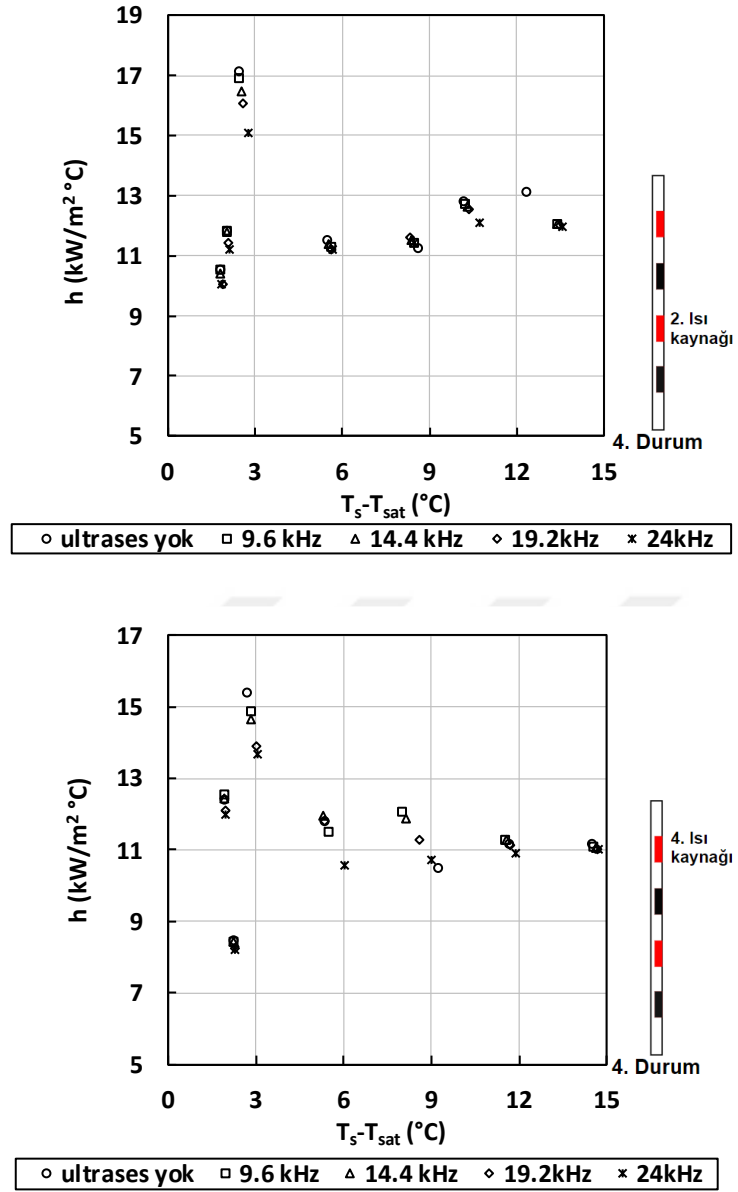


(b)

Şekil 4.7. (devam)

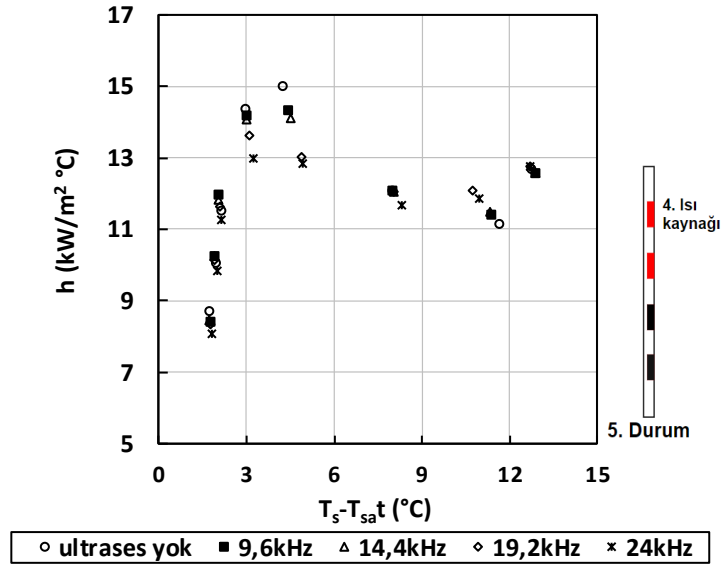
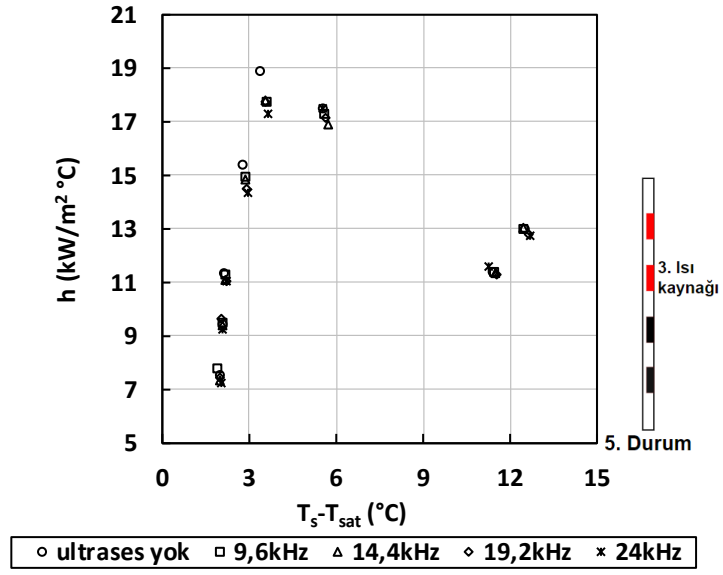


Şekil 4.7. (devam)



(d)

Şekil 4.7. (devam)



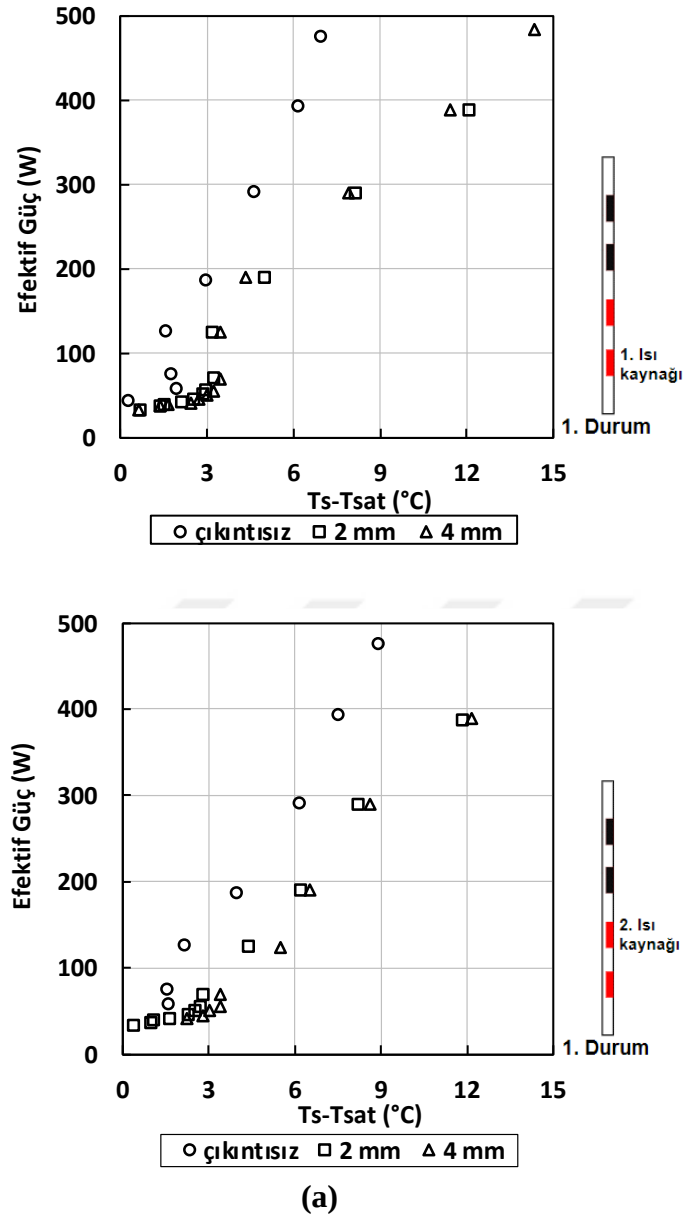
(e)

Şekil 4.7. (devam)

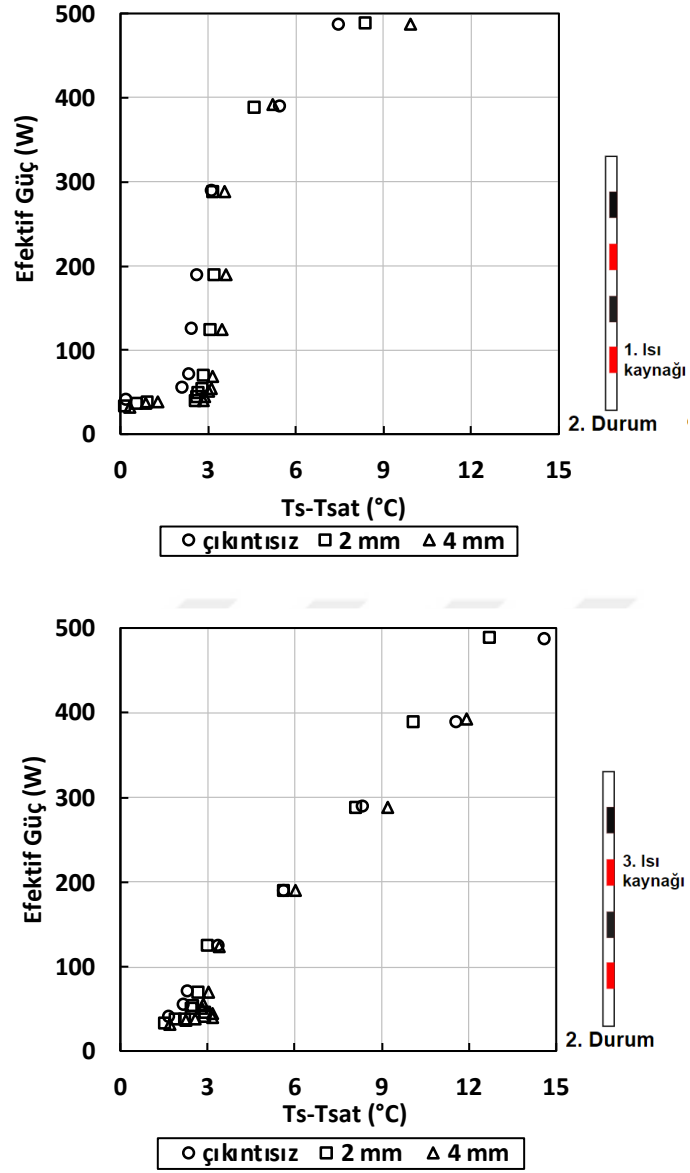
Şekil 4.7’ de kaynama ısı transfer katsayısının ultrasonik ses dalgası frekansı ile değişimi sunulmuştur. Her bir durum için ayrı kabarcık bölgesinde ısı akısı ve dolayısıyla yüzey sıcaklığındaki artışla kabarcıklanma noktası sayısı artar. Dolayısıyla kaynama eğrisinin eğimi ve ısı transfer katsayısı artmıştır. Artan ısı akısıyla birlikte ısı taşınım katsayısının maksimum seviyeye ulaşmıştır. Yüzeyde oluşan kabarcıkların birleşmesi ve yüzeyin kabarcıklarla kaplı olması durumunda, ısı akısındaki küçük değişimlerin yüzey sıcaklığında ani sıçramalara ve dolayısıyla ısı transfer katsayısının düşmesine sebep olmuştur. Ultrasonik ses dalgalarının sıvı içerisinde ilerleyişi ile meydana gelen akustik akış ve akustik kavitasyon fenomenleri tek fazlı ısı transferi uygulamasından ısı transfer katsayısını artırıcı yönde etkide bulunduğu bir önceki başlıkta vurgulanmıştır. Fakat kaynama durumunda aynı etki görülmemiştir. Çalışılan durumlarda, ultrasonik ses frekansının varlığında ve yokluğunda ısı transfer katsayısı değişimi stabil olduğu görülmektedir. Bu durumun iki önemli sebebi vardır. Bunlardan birincisi, sıvı molekülüne etki eden akustik kütle kuvvetlerinin ısı transfer yönüne dik ve kaldırma kuvvetleriyle zıt yönlü olmasıdır. Havuz tabanı normalinde (ısı transfer yönünde dik) sıvı serbest yüzeyinden tatbik edilen ultrasonik ses dalgaları buhar kabarcıklarının kaldırma kuvveti doğrultusundaki hareketini baskılayıcı bir etki oluşturmuştur. Benzer yaklaşım Kumar et al. (2021) tarafından yürütülen çalışmada elde edilmiştir. İkincisi ise, kaynama sırasında oluşan termal kabarcıkların ultrasonik kavitasyon ile oluşan hidrodinamik kabarcıkların meydana getireceği karışım etkisini oluşturmasıdır. Kaynama sırasında sıcak yüzey civarında oluşan yerel türbülans ile birlikte oluşan güçlü akışkan hareketleri kararsız akışkan hareketleri ve çalkantı oluşmasına neden olur. Dolayısıyla ultrasonik ses dalgası yardımıyla ilave ısı transfer iyileştirmesi sağlamak için akış alanı içerisinde çok güçlü kabarcık hareketinin oluşturulması gerekmektedir (Kim et al. 2004). Bu nedenle tek fazlı ısı transferinde ultrasonik ses dalgası etkili bir parametre iken, kaynama rejiminde hali hazırda oluşan güçlü akışkan hareketleri sebebiyle ultrasonik ses dalgalarının etkisi ihmal edilebilir seviyelerde kalmıştır.

##### 4.2.2. Çıkıntılı ayırık ısı kaynakları

Bu bölümde çift fazlı daldırılmalı soğutma durumunda çıkıntılı ısı kaynaklarının ısı transferi performansı üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Bu amaçla, bir önceki bölümde yüzeye gömülü şekilde konumlandırılmış ısı kaynakları 2 mm ve 4 mm çıkıntılı olacak şekilde yerleştirilmiştir. İç akış durumunda ayırık ve çıkıntılı ısı kaynakları için yürütülen çalışmalarda akış bölgesi etrafında oluşan resirkülasyon alanına bağlı olarak ısı transfer katsayısının çıkıntılı ısıtıcı kullanımında artış göstereceği sonucuna varılmıştır (Heindel et al. 1995; Sarper et al. 2018). Resirkülasyon alanının sıvı moleküllerinin ivme kazanmasını ve düzensiz hareket etmesine sebep olarak yerel türbülans alanları oluşturmaktadır. Moleküllerin rastlantısal hareketi ise ısı transfer performansının artmasına yol açmaktadır. Bu bakımdan çıkıntı miktarının artışı kanal içi akış ihtiva eden doğal ve zorlanmış taşınım uygulamalarında yoğunluklu olarak tercih edilen bir ısı transfer iyileştirme yöntemidir. Fakat çift fazlı daldırılmalı soğutma uygulamalarında hem kaynama fiziği gereği halihazırda oluşan güçlü konvektif akışkan hareketleri hem de çıkıntılı ısı kaynağı ile havuz iç çeperi arasındaki mesafenin resirkülasyon oluşturacak kadar küçük olmaması ısı transfer artışı yönünde pozitif etki olmasını engellemiştir. Şekil 4.8’ da yüzey pozisyonlarına göre ısı kaynaklarının sıcaklık değişimleri sunulmuştur. Çıkıntı miktarındaki artış, sabit termal güç altında kızdırma sıcaklığının dolayısıyla ısı kaynağı yüzey sıcaklığının artışı ile sonuçlanmıştır. Bu durum, kaynama başlangıcından itibaren hedef yüzeyin altında (çıkıntı yüzeyinde) oluşan buhar embriyolarının gelişmesinden ileri geldiği düşünülmektedir. Çıkıntı yüzeyinde oluşan buhar embriyoları artan ısı akısıyla birlikte gelişir ve kaldırma kuvvetleri katı-gaz ara yüzündeki atalet kuvvetini yeninceye kadar yüzeyde kalır. Yüzey üzerini kaplayan buhar kabarcıkları yüzey ile sıvı arasında termal direnç bölgesi oluşturarak ısı transfer hızının azalmasına sebep olmuştur. Bu durum, kabarcıklar yüzeyden ayrılıncaya kadar ısı transfer hızının düşmesine dolayısıyla yüzey sıcaklığının artmasına sebep olur. Isı kaynağına beslenen ısı gücünün artmasıyla birlikte hedef yüzeyde kabarcık oluşum frekansı arttığından kızdırma sıcaklığındaki artış belirgin hale gelmiştir.

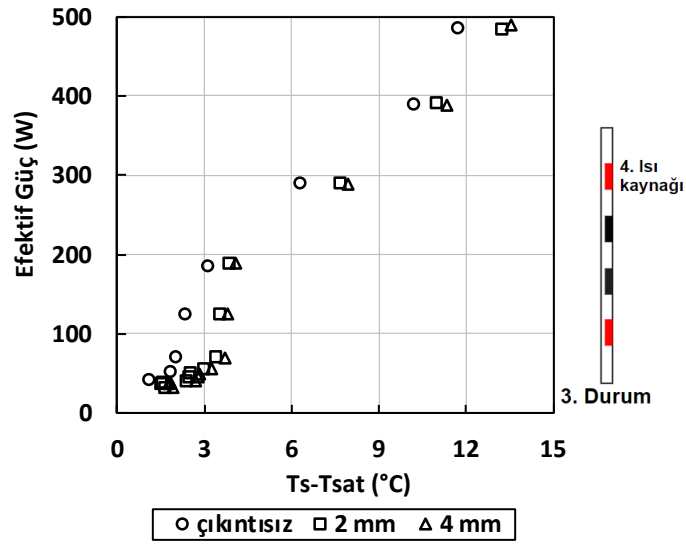
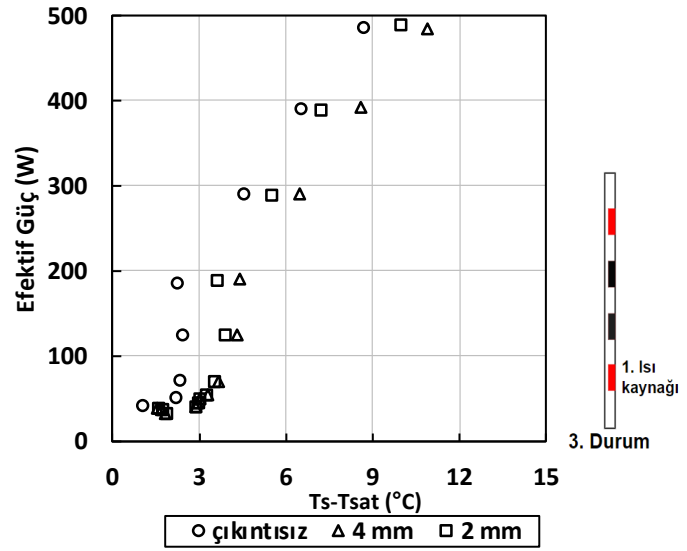


Şekil 4.8. Ultrasonik ses dalgası yok iken farklı çıkıntı miktarlarında kızdırma sıcaklığının ısı gücü ile değişimi, (a) 1. Durum, (b) 2. Durum, (c) 3. Durum, (d) 4. Durum, (e) 5. Durum.



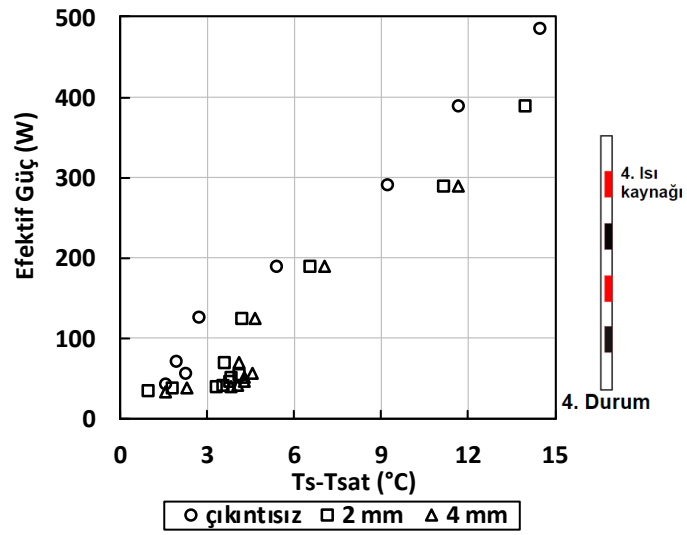
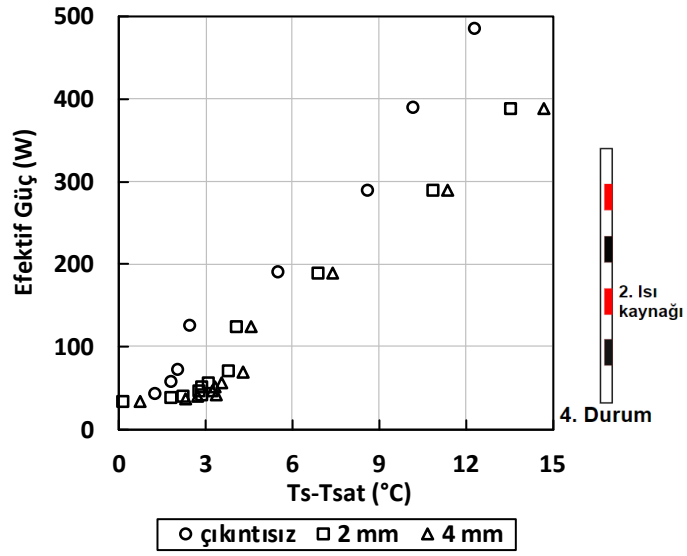
(b)

Şekil 4.8. (devam)



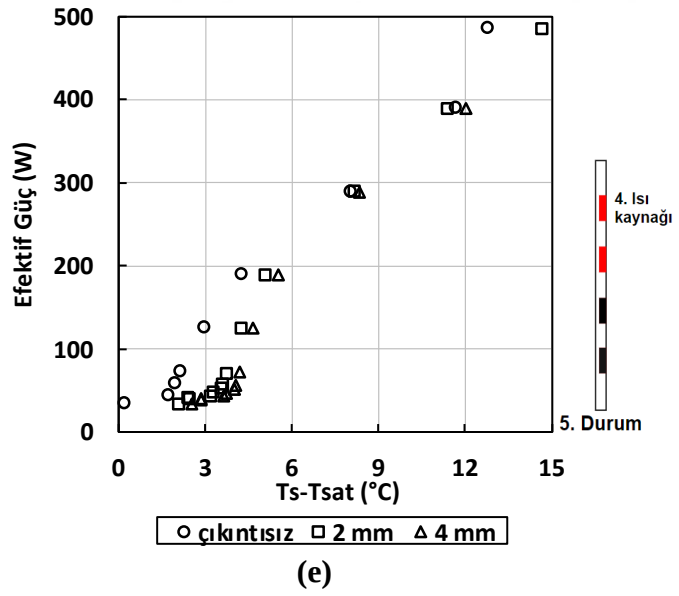
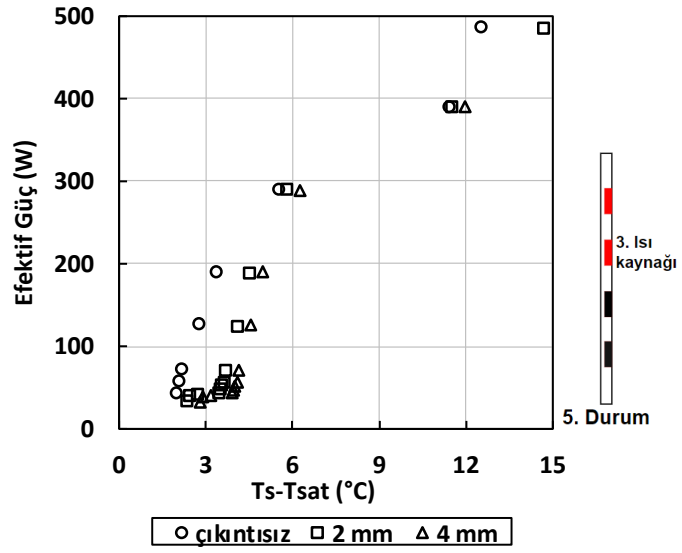
(c)

Şekil 4.8. (devam)



(d)

Şekil 4.8. (devam)



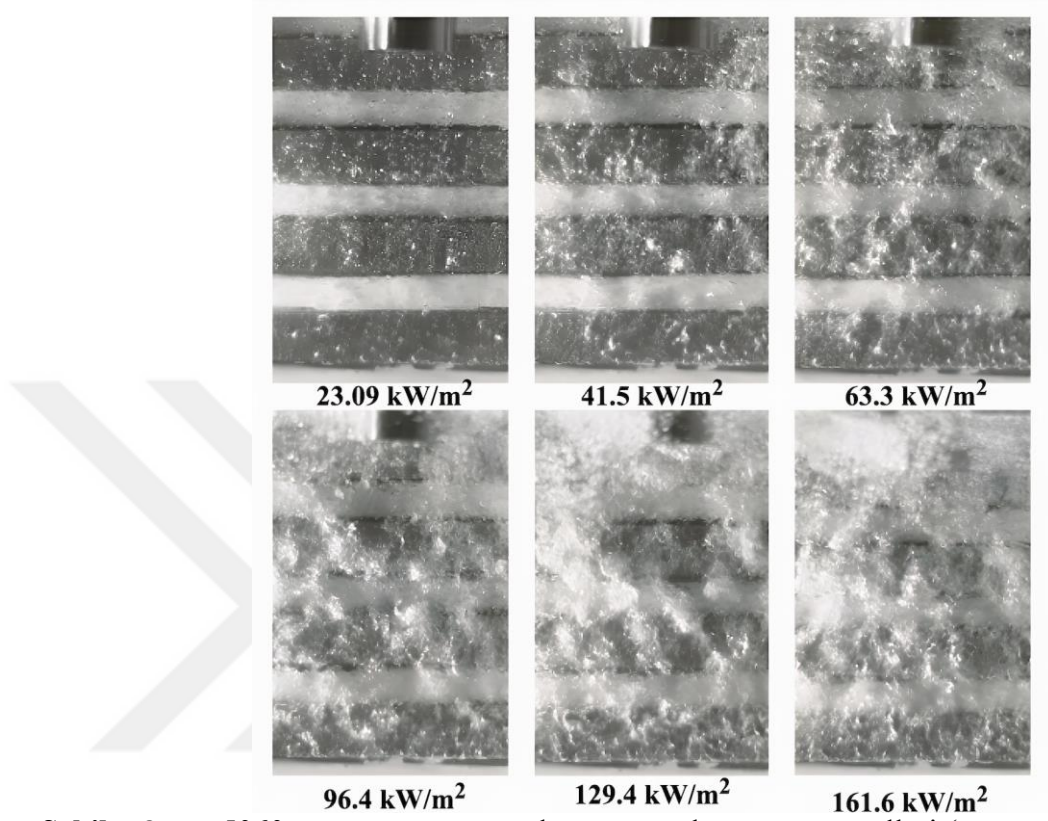
Şekil 4.8. (devam)

##### 4.2.3. Akış görselleştirme sonuçları

Kaynama olayı, hızlı gelişen akışkan hareketleri sebebiyle yüksek ısı transfer katsayılarının elde edildiği termal bir süreci içermektedir. Artan ısı akısıyla birlikte değişen akış desenleri akış alanında kararsızlıklara neden olarak termal performansı önemli ölçüde etkilemektedir. Literatür çalışmalarında kaynama fiziği kaynama sürecinde oluşan kabarcıkların moduna göre ilişkilendirilerek tanımlanmıştır. Bu bölümde deneyler sırasında alınan görüntüler ile havuz kaynama sürecini etkileyen akışkan hareketleri tartışılacaktır.

Şekil 4.9’ da farklı ısı akılarında 4 mm çıkıntılı ayırık ısı kaynaklarının 1. Durum için kaynama fotoğrafları sunulmuştur. Bu fotoğraflar ısınan yüzeylerdeki buhar kabarcığı sayısının artan ısı akısıyla birlikte arttığını göstermektedir. Kaynama başlanıcı ile sıcak yüzeylerde çekirdeklenen kabarcıklar düşük frekanslarda yüzeyden ayrılarak havuz içerisinde salınım hareketi yapmaktadırlar. Kaynama eğrisinde ayırık kabarcık bölgesi olarak tanımlanan bu akış deseninde sıvı-buhar faz dönüşümü için yüzeyden yüksek miktarda ısı çekilir ve ısı transfer katsayısı artar. Ayırık iki ısı kaynağı kullanımı nedeniyle alt ısı kaynağı yüzeyinden ayrılan kabarcıklar salınım hareketi sırasında üst ısı kaynağı yüzeyinden ayrılan kabarcıkların hareket doğasını değiştirmiştir. Çalışma durumuna göre alt ısı kaynağı konumundaki 1.ısı kaynağı yüzeyinin alt kısımlarından ayrılan kabarcıkların kaldırma kuvveti ile sürüklenerek üst kısımlardaki kabarcıklarla birleşerek iki fazlı sınır tabakanın sıcak yüzeylere paralel olacak şekilde genişlemesine neden olmuştur. Benzer sonuç El-Genk (2012) tarafından yürütülen çalışmada görülmüştür. Bu çalışmada, dikey yerleştirilmiş ısı kaynakları yüzeyinde oluşan iki fazlı sınır tabaka kalınlığının kabarcık birleşmesiyle aksel yönde arttığı belirtilmiştir. Isı kaynağı yüzeyleri boyunca yükselen ve ayrılan kabarcıklar kitlesel sıvı hareketleri ve karışım nedeniyle akış kararsızlıklarının oluşmasına dolayısıyla kaynama ısı transfer katsayısının artmasına neden olmuştur. Artan ısı akısıyla birlikte kabarcık odağı ve kabarcık sayısı artarak oluşan kabarcıklar birleşmeye başlamıştır. Kabarcıklanma frekansının artışı yüzeyde biriken buhar filmi ilave termal direnç oluşturarak ısı transfer katsayısını azaltmıştır. 1. Isı kaynağı ve 2. Isı kaynağı yüzeyinde oluşan ve birleşen kabarcık yoğunluğu ısı kaynaklarının termal performansını etkileyen önemli bir faktör olduğu açıkça görülmektedir. 1. Isı kaynağı yüzeyinden ayrılan kabarcıklar üst ısı kaynağı

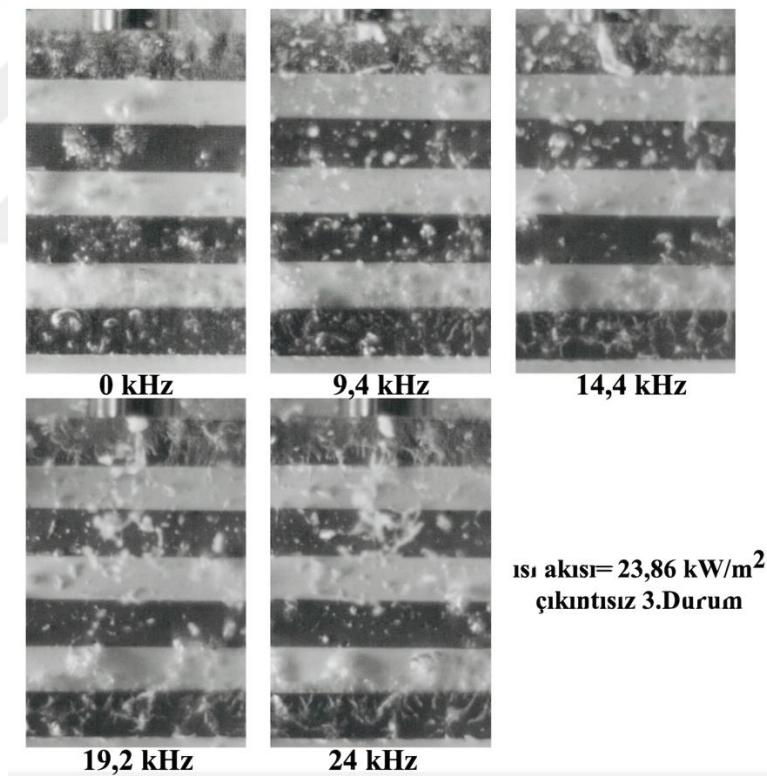
konumundaki 2. Isı kaynağı yüzeyindeki kabarcıklarla birleşerek daha yoğun bir form oluşturmuştur (Şekil 4.9). Bu nedenle üst ısı kaynağının kızdırma sıcaklığı bütün durumlarda alt ısı kaynağı kızdırma sıcaklığına kıyasla daha büyüktür.



**Şekil 4.9.** PF-5060 sıvısının artan ısı akısına göre kaynama görselleri (1. Durum, 4 mm çıkıntı, ultrasonik ses dalgası yok).

Isıtılan sıvı kütlelerinde yoğunluk, viskozite, ses hızı gibi fiziksel özelliklerde yerel gradyanlar oluşur. Bu tür sıvılar termodinamik olarak heterojen sıvı olarak adlandırılır. Heterojen sıvılara uygulanan ultrasonik ses dalgaları akustik kütle kuvvetleri ile sıvının hareket etmesine neden olur. Sıvı moleküllerinin akustik enerji vasıtasıyla yer değiştirmesi olayı akustik yer değiştirme fenomeni olarak tanımlanmaktadır (Kumar et al. 2021). Bu akustik dalgalar sıvı hareketini kuvvetlendirdiği zaman ısı transferi katsayısı artış gösterir. Dolayısıyla ısıtılan bir sıvıda ısı transferindeki artış, akustik kütle kuvvetlerinin kaldırma kuvvetlerini desteklemesine bağlıdır. Ultrasonik ses dalgaları, ısı transfer yönüne dik yönde uygulandığı zaman yer çekimi ihtiva eden akış alanlarında akustik kütle kuvvetleri ile ısı transfer katsayısında iyileşme sağlayabilir. Diğer taraftan, ısı transfer yönüne paralel yönde uygulandığında ise kaldırma kuvvetini baskılayıcı bir etki oluşturarak ısı transfer hızını baskılayabilir (Kumar et al. 2021). Şekil 4.10.'da sabit

ısı akısında çıkıntısız 3. Durum için ultrasonik ses dalgası frekansının artışı ile birlikte değişen akış alanı görselleri sunulmuştur. Isı transfer yönünde dik ve sıvı serbest yüzeyinden uygulanan ultrasonik ses dalgası ile sıvı serbest yüzeyine doğru hareket eden kabarcıkların, havuz içerisinde yayılmasına neden olduğu görülmektedir. Sıvı moleküllerinin doğal sirkülasyon yönüne ters yönde etki eden akustik kütle kuvvetleri buhar kabarcıklarının hareketini yavaşlatıcı bir etki oluşturduğundan ısı transferini baskılamıştır. Diğer taraftan, Şekil 4.10’ da belirtilen şartlarda, aktif ısıtıcılardan ultrases üreticisine en uzak mesafedeki 1. Isı kaynağı yüzeyinde oluşan ayrık kabarcık desenleri birleşerek buhar kolonu oluşturmuştur ve ses frekansının artışıyla belirgin hale gelmiştir. Sıvı serbest yüzeyine yakın konumda bulunan 4. Isı kaynağı etrafında oluşan kabarcık yoğunluğu 1. Isı kaynağına kıyasla daha fazladır. Bu durumun bir sonucu olarak, 4. Isı kaynağı yüzey sıcaklığı daha yüksektir.



**Şekil 4.10.** PF-5060 sıvısının sabit ısı akısında ultrasonik ses dalgası frekansı artışına karşılık kaynama görüntüleri (çıkıntısız 3. Durum, sabit ısı akısı= 23,86 kW/m<sup>2</sup>).

### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, daldırmalı soğutmada başta ultrasonik kavitasyon ve akustik akış olmak üzere, ayrık ısı kaynaklarının yüzey ve konum konfigürasyonlarının tek ve çift fazlı durumlarda ısı transferi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca havuz kaynama fiziğini açıklayabilecek akış görüntülerinden yararlanılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

#### Tek Fazlı Daldırmalı soğutma

- Çıkıntısız ısı kaynağı durumlarında, birinci ısı kaynağı yüzey sıcaklığının ikinci ısı kaynağından daha düşük olduğu görülmektedir. Aktif ısıtıcılar arasında en yüksek sıcaklık farkı (ısıtıcı gücü 30 W) 2. Durum da yaklaşık olarak 6,05 °C olarak olduğu ve artan ısıl güç ile sıcaklık farkının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, düşük ısı akılarında akışkan hareketlerinin daha yavaş olması ve moleküler düzeyde titreşimin az olmasından kaynaklanmaktadır. Isı akısının artırılması yoğunluk farkını artırarak akışkan hareketlerini kuvvetlendirmektedir.
- Isı kaynaklarının birbirlerine göre konumları ve havuz içerisindeki konumları yüzey sıcaklıklarını dolayısıyla ısı transfer katsayısını etkileyen önemli bir etken olduğu görülmektedir. Isı kaynakları sıvı serbest yüzeyine yaklaştıkça yüzey sıcaklıkları artma eğilimi göstermiştir. Bu durum ısınan akışkanın yoğunluklu olarak serbest yüzeye yakın bölgelerde kümelenmesi ve kaldırma kuvvetlerinin sıcaklık gradyeninin artan eğilim yönünde olmasından kaynaklanmaktadır.
- Bütün durumlarda ve bütün ısıtıcı yüzeylerinde ultrasonik frekansın ısı transfer katsayısını artırıcı yönde etkide bulunmuştur.
- Aynı ısıl güç de ultrasonik ses dalgalarının frekansı (birim saniyedeki titreşim sayısı) arttıkça ısı transferi katsayısında artış gözlemlenmiştir. Ses dalgaları sayesinde sıvı içerisinde oluşturulan kavitasyon ve akustik akış ile meydana gelen kabarcıklar, hedef yüzeyler etrafında düzensiz hareket ederek akış geçişlerini kuvvetlendirmiştir.
- Elde edilen sonuçlara göre en yüksek ısı transfer katsayısı 24 kHz frekansında tank tabanına en yakın gömülü ısı kaynağı için 1.703,36 W/m<sup>2</sup>°C olarak

hesaplanmıştır. Ayrıca daldırma soğutma ısı transfer katsayısı ultrasonik ses dalgası ile %107,49 oranında artırılmıştır.

- Çıkıntılı ısı kaynaklarının kullanılması durumunda ısı transfer hızı azalmıştır. Bu durum ısınmış blokların alt yüzeyine temas eden akışkanın, kaymama koşulu sebebiyle kaldırma kuvvetlerine direnme eğiliminin bir sonucu olarak, soğuk sıvının hedef yüzeye ulaşmadan önce bir miktar ısınmasından kaynaklanmaktadır.
- Tank üst kısmına en yakın ısı kaynağındaki maksimum çıkıntı için ve ultrason manipülasyonu uygulanmadığında en düşük ısı transfer katsayısı  $373,28 \text{ W/m}^2\text{C}$  olarak hesaplanmıştır.
- Bütün çalışma durumlarında çıkıntı miktarındaki artışın ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisinin azaldığı görülmektedir.

### Çift Fazlı Daldırmalı soğutma

- Kaynaklar arasındaki sıcaklık farkı ısı kaynaklarının birbirine yakın olduğu durumlarda daha az iken, kaynaklar arasındaki mesafenin artışıyla daha belirgin hale gelmiştir.
- Bütün durumlarda ısı kaynaklarının kaynama eğrileri benzer eğilim göstermiştir.
- Kabarcık oluşumundan itibaren, üst seviyedeki ısı kaynağının yüzey sıcaklığı daha yüksektir. Bu durum, ısı kaynaklarında oluşan kabarcıkların yüzeyden ayrılma süresiyle açıklanabilir.
- Artan ısı akısıyla birlikte, ikinci ısı kaynağı yüzey sıcaklığı birinci ısı kaynağına kıyasla daha fazla olmuştur. Bunun sebebi Alt ısı kaynağı yüzeyinden ayrılan buhar kabarcıkları ikinci ısı kaynağı yüzeyine eriştiği zaman bu kaynak üzerinde ekstra buhar örtüsü oluşturmamasından kaynaklanmaktadır.
- Diğer taraftan aktif ısı kaynağının sıvı serbest yüzeyine ve birbirlerine göre konumunun kızdırma sıcaklığını etkilediği sonucuna vardık. Maksimum ısı transfer katsayısı ısıtıcılar arası mesafenin 56mm olduğu çalışma durumunda alt ısı kaynağında  $31,023 \text{ kW/m}^2$  olarak hesaplanmıştır. Çıkıntı miktarının ise kabarcık oluşumu ve kaldırma kuvvetleri doğrultusunda kabarcık hareketini engelleyici ekstra yüzey sağladığından dolayı kızdırma sıcaklığını arttırıcı etkide bulunmuştur.

- Çift fazlı daldırmalı soğutma ısı transfer katsayısı seviyeleri karşılaştırıldığı zaman tek fazlı daldırmalı soğutma sonuçlarına göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, faz değişimi ile sıvı-buhar gizli ısısının ısı kaynağı üzerinden çekilmesi ve havuz içerisindeki kabarcık hareketinin oluşturduğu düzensiz akış rejimi ile açıklanabilir.
- Çalışılan durumlarda, ultrasonik ses frekansının varlığında ve yokluğunda ısı transfer katsayısı değişimi stabil olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, tek fazlı ısı transferinde ultrasonik kavitasyon etkili bir parametre iken, kaynama rejiminde hali hazırda oluşan güçlü akışkan hareketleri sebebiyle ultrasonik ses dalgalarının etkisi ihmal edilebilir seviyelerde olduğu sonucuna varılmıştır.
- Çıkıntı miktarındaki artış, kızdırma sıcaklığının dolayısıyla ısı kaynağı yüzey sıcaklığının artışı ile sonuçlanmıştır. Bu durum, kaynama başlangıcından itibaren hedef yüzeyin altında (çıkıntı yüzeyinde) oluşan buhar embriyolarının gelişmesinden ileri geldiği düşünülmektedir. Kabarcıklar yüzeyden ayrılincaya kadar ısı transfer hızının düşmesine dolayısıyla yüzey sıcaklığının artmasına sebep olmuştur.
- Isı akısındaki artışla birlikte özellikle ikinci ısı kaynaklarında kızdırma sıcaklığı farkında sıçramalar meydana gelmiştir. Kabarcık embriyolarının sayısı ve oluşum frekansının artışı bu durumun nedenidir.
- 2 mm çıkıntıya sahip ısı kaynaklarıyla yapılan 1. Durum deneylerinde 50W'ta kabarcık oluşumunun başladığı ve artan ısı gücüyle beraber giderek arttığı görülmektedir. Kabarcık oluşum hızındaki artış sonucu yüzeyde oluşan kabarcıklar birbirleriyle birleşerek daha büyük yapıların oluşmasına nihayetinde akışkanda şiddetli çalkantılara neden olmuştur.
- Düşük ısı güçlerinde ultrases etkisinin akış yapısında önemli bir değişime neden olmadığı görülmektedir. Yüksek ısı güçlerinde ise artan frekansla beraber çalkantıların arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, ultrases frekansındaki artışın kaynama sırasında görülen karasızlıkları arttırdığının önemli bir göstergesidir.

Daldırmalı soğutma tekniğinin ısı transferi karakteristiği üzerinde çalışmak isteyen araştırmacılar için öneriler aşağıda verilmiştir:

- Bu çalışmada, yüzey sıcaklık değerleri, ısı kaynağı üzeyine en yakın noktadaki termo elemanlar yardımıyla bir boyutlu ısı iletimi yaklaşımıyla elde edilmiştir. Bu yaklaşım yerine ısı kaynağı yüzey sıcaklık değerleri akış alanını etkilemeyecek şekilde yeni ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi ile daha hassas sonuçlar elde edilecektir.
- Farklı akışkanlar kullanılarak termofiziksel özelliklerin ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Isı transferi katsayısını değiştirebilecek yüzey yapısı ve ısı alıcı ilavesi gibi pasif yöntemler kullanılarak ısı transferi karakteristiği araştırılabilir.
- Akış kaynama ve tek fazlı zorlanmış taşınım ısı transferi performansı incelenebilir.
- Bu çalışmada ultrasonik ses dalgası sıvı serbest yüzeyinden ısı transferi yönüne dik olacak şekilde uygulanmıştır. Havuz içerisinde farklı noktalardan ultrasonik ses dalgası frekansı uygulanabilir ve ısı kaynaklarının ultrasonik sinyal üretene göre yüzey yönelimi değiştirilerek ısı transferi performansı araştırılabilir.
- Bu çalışmada akış alanı sadece ısı kaynakları yüzey normali doğrultusuna yerleştirilen yüksek hızlı kamera görüntülenmiştir. Kaldırma kuvveti ve akustik kütle kuvveti ile oluşan akışkan hareketi farklı doğrultulardan görüntülenerek sınır tabaka boyunca akışkan hareketi izlenebilir.
- Daldırılmalı soğutma yönteminin yaygınlaşması için deneysel çalışmalarla desteklenen sayısal analizler yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Ahmad, S. W. 2012. Combined effect of electric field and surface modification on pool boiling of R-123. Phd Thesis, Brunel University, Engineering and Design Faculty, 247, London.
- Ali, A. F. 2013. Enhancement of saturation boiling of PF-5060 dielectric liquid on microporous surfaces. Phd Thesis, The University of New Mexico, 166, New Mexico.
- Ali, A. F. and El-Genk, M. S. 2012. Spreaders for immersion nucleate boiling cooling of a computer chip with a central hot spot. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 259-267.
- An, X., Arora, M., Huang, W., Brantley, W. C. and Greathouse, J. L. 2018. 3D numerical analysis of two-phase immersion cooling for electronic components. *Proceedings of the 17th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm 2018)*, 29 May- 01 June, 609-614, San Diego, USA.
- Anonim, 2022a. Web Sitesi: <https://www.sanayideposu.com>, Erişim Tarihi: 01.10.2022.
- Anonim, 2022b. Web Sitesi: <https://www.dhgate.com>, Erişim Tarihi: 02.10.2022.
- Anonymous, 2022a. Web Sitesi: <https://www.trafag.com>, Erişim Tarihi: 01.11.2022.
- Anonymous, 2022b. Web Sitesi: <https://www.dantecdynamics.com>, Erişim Tarihi: 01.11.2022.
- Anonymous, 2022c. Web Sitesi: <https://www.techpowerup.com>, Erişim Tarihi: 03.11.2022.
- Arik, M. and Bar-Cohen, A. 2001. Ebullient cooling of integrated circuits by Novec fluids. *Electronics Packaging Conference*, July, 18-23, Hawaii, USA.
- Ateş, İ. 2020. Mikrokanallarda yüzey pürüzlülüğünün akış kaynama karakteristiklerine etkisinin incelenmesi. Doktora Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 197, Erzurum.
- Avedisian, C. T. and Purdy, D. J. 1993. Experimental study of pool boiling critical heat flux of binary fluid mixtures on an infinitive horizontal surface. *Advances in Electronic Packaging*, 4(2), 909-915.
- Baffigi, F. and Bartoli, C. 2012. Influence of the ultrasounds on the heat transfer in single phase free convection and in saturated pool boiling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36, 12-21.
- Baldwin, C. S., Bhavnani, S. H. and Jaeger, R. C. 2000. Toward optimizing enhanced surfaces for passive immersion cooled heat sinks. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 23(1), 70-79.

- Bar-Cohen, A. and Schweitzer, H. 1985. Convective immersion cooling of parallel vertical plates. *IEEE Transactions on Component, Hybrids and Manufacturing Technology*, 3, 343-351.
- Barnes, C. M. and Tuma, P. E. 2009a. Immersion cooling of power electronics in segregated hydrofluoroether liquids. 2008 Proceedings of the ASME Summer Heat Transfer Conference (HT 2008), 2, 719-725.
- Barnes, C. M. and Tuma, P. E. 2009b. Practical considerations relating to immersion cooling of power electronics in traction systems. 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC '09), Institute of Electrical and Electronics Engineers, 614-621.
- Bartoli, C. and Baffigi, F. 2011. Effects of ultrasonic waves on the heat transfer enhancement in subcooled boiling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(3), 423-432.
- Bartoli, C. and Baffigi, F. 2012. Use of ultrasonic waves in sub-cooled boiling. *Applied Thermal Engineering*, 47, 95-110.
- Bartoli, C., Franco, A. and Macucci, M. 2020. Ultrasounds Used as Promoters of Heat-Transfer Enhancement of Natural Convection in Dielectric Fluids for the Thermal Control of Electronic Equipment. *Acoustics*, 2(2), 279-292.
- Behnia, M., Parneix, S. and Durbin, P. A. 1998. Prediction of heat transfer in an axisymmetric turbulent jet impinging on a flat plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(12), 1845-1855.
- Bejan, A. and Kraus, A. D. 2003. *Heat transfer handbook*, J. Wiley and Sons, 1479, New Jersey.
- Berenson, P. J. 1962. Experiments on pool-boiling heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5(10), 985-999.
- Bhavani, S. H. and Jaeger, R. C. 2000. Direct immersion cooled microelectronics heat sinks: Effect of test fluid and bonding technique. *Journal of Electronics Manufacturing*, 10(4), 271-281.
- Birbarah, P., Gebrael, T., Foulkes, T., Stillwell, A., Moore, A., Pilawa-Podgurski, R. and Miljkovic, N. 2020. Water immersion cooling of high power density electronics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 147(118918).
- Boluriaan, S. and Morris, P. J. 2003. Acoustic streaming: from Rayleigh to today. *International Journal of Aeroacoustics*, 2(3), 255-292.
- Bonekamp, S. and Bier, K. 1997. Influence of ultrasound on pool boiling heat transfer to mixtures of the refrigerants R23 and R134A. *International Journal of Refrigeration*, 20(8), 606-615.

- Brown, W. T. 1967. A Study of Flow Surface Boiling. Phd Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Thechnology, 152, New Mexico.
- Cai, J., Huai, X., Liang, S. and Li, X. 2010. Augmentation of natural convective heat transfer by acoustic cavitation. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 4(3), 313-318.
- Carey, V. P. 2008. *Liquid-vapor phase-change phenomena* (2nd ed.). Taylor & Francis Group, 730, Boca Raton.
- Carey, V. P. 2020. *Liquid-vapor phase-change phenomena: an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment*. In CRC Press, 730, Boca Raton.
- Cengel, Y. A. 2002. *Heat Transfer: A practical approach* (2 nd Edition). McGraw-Hill, 921.
- Cengel, Y. A., and Ghajar, A. J. 2015. *Heat and mass transfer*. McGraw Hill, 874.
- Chandrasekaran, S., Gess, J. and Bhavnani, S. 2017. Effect of Subcooling Flow Rate and Surface Characteristics on Flow Boiling Performance of High Performance Liquid Cooled Immersion Server Mode. 16th IEEE InterSociety Conference on Thermal Phenomena in Electronic Systems, Institue of Electrical and Electronics Engineers, 905-912, 30 May- 02 June, Orlando, USA.
- Chang, J. Y. and You, S. M. 1996. Heater orientation effects on pool boiling of micro-porous-enhanced surfaces in saturated FC-72. *Journal of Heat Transfer*, 118(4), 937-943.
- Chen, P., Harmand, S. and Ouenzerfi, S. 2020. Immersion cooling effect of dielectric liquid and self-rewetting fluid on smooth and porous surface. *Applied Thermal Engineering*, 180, 115862.
- Chen, S. W., Liu, F. C., Lin, H. J., Ruan, P. S., Su, Y. T., Weng, Y. C., Wang, J. R., Lee, J. and Lin, W. K. 2018. Experimental test and empirical correlation development for heat transfer enhancement under ultrasonic vibration. *Applied Thermal Engineering*, 143, 639-649.
- Cheng, C. C., Chang, P. C., Li, H. C. and Hsu, F. I. 2020. Design of a single-phase immersion cooling system through experimental and numerical analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 160, 120203.
- Cheng, W. L., Zhang, W. W., Chen, H. and Hu, L. 2016. Spray cooling and flash evaporation cooling: The current development and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 614-628.
- Clark, H. B., Streng, P. S. and Westwater, J. W. 1959. Active Sites For Nucleate Boiling. *Chemical Engineering Progress*, 55(29).

- Corty, C. 1955. Surface variables in nucleate boiling. Chemical Engineering Progress Symposium Series, 51, 1-12.
- Danielson, R. D., Krajewski, N. and Brost, J. 1986. Cooling a superfast computer. Electronic Packaging and Production, 26(7), 44-45.
- Demircan, T., ve Türkoğlu, H. 2010. Çarpan osilasyonlu jetlerde osilasyon karakteristiklerinin ve çarpma mesafesinin akış ve ısı transferine etkilerinin sayısal olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25(4), 895-904.
- Dincer, I. 1993. Heat transfer rates during immersion cooling of spherical and cylindrical products. International Communications in Heat and Mass Transfer, 20(3), 445-456.
- El-Genk, M. S. 2012. Immersion cooling nucleate boiling of high power computer chips. Energy Conversion and Management, 53(1), 205-218.
- El-Genk, M. S. and Bostanci, H. 2003. Saturation boiling of HFE-7100 from a copper surface, simulating a microelectronic chip. International Journal of Heat and Mass Transfer, 46(10), 184-1854.
- El-Genk, M. S. and Parker, J. L. 2005. Enhanced boiling of HFE-7100 dielectric liquid on porous graphite. Energy Conversion and Management, 46(15-16), 2455-2481.
- Fand, R. M. 1965. The influence of acoustic vibrations on heat transfer by natural convection from a horizontal cylinder to water. Journal of Heat Transfer, 87(2), 309-310.
- Fand, R. M. and Kaye, J. 1960. Acoustic streaming near a heated cylinder. The Journal of the Acoustical Society of America, 32(5), 579-584.
- Ferjančič, K. and Golobič, I. 2002. Surface effects on pool boiling CHF. Experimental Thermal and Fluid Science, 25(7), 565-571.
- Forster, H. K. and Zuber, N. 1955. Dynamics of vapor bubbles and boiling heat transfer. AIChE Journal, 1(4), 531-535.
- Gandhi, D. V. 2019. Computational Analysis for Thermal Optimization of Server for Single Phase Immersion Cooling. Phd thesis, The University of Texas at Arlington, 157, Texas, USA.
- Geisler, K. J. L. and Bar-Cohen, A. 2007. Passive immersion cooling of 3-D stacked dies. In International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, 1, 439-452.
- Gershen, L. E. 2004. Performance characterization of pool boiling on inovative foams and micro structured surfaces application to direct immersion cooling of electronics. University of Maryland, Department of Mechanical Engineering, 70, Maryland.

- Gess, J., Bhavnani, S. and Wayne Johnson, R. 2016a. Single-and two-phase particle image velocimetry characterization of fluid flow within a liquid immersion cooled electronics module. *Journal of Electronic Packaging*, 138(4), 1–11.
- Gess, J., Bhavnani, S. and Wayne Johnson, R. 2016b. Single-and two-phase particle image velocimetry characterization of fluid flow within a liquid immersion cooled electronics module. *Journal of Electronic Packaging*, 138(4).
- Gess, J., Dreher, T., Bhavnani, S. and Johnson, W. 2015. Effect of Flow Guide Integration on The Thermal Performance of High Performance Liquid Cooled Immersion Server Modules. 13th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 6-9 July, Vol 56888, 1-10, San Francisco, California, USA
- Gess, J. L., Bhavnani, S. H. and Johnson, R. W. 2015. Experimental investigation of a direct liquid immersion cooled prototype for high performance electronic systems. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 5(10), 1451-1464.
- Ghosh, D. P., Raj, R., Mohanty, D. and Saha, S. K. 2016. Onset of nucleate boiling, void fraction and liquid film thickness. *Microchannel Phase Change Transport Phenomena*, 5–90.
- Gu, J., Lau, D. and Pecht, M. 2009. Health assessment and prognostics of electronic products. *Proceedings of 2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS 2009)*, 912–919.
- Gunther, F. C. 1951. Photographic study of surface-boiling heat transfer to water with forced convection. *Journal of Fluids Engineering*, 73(2), 115–123.
- Gunther, F. C. and Kreith, F. 1950. Report, Photographic study of bubble formation in heat transfer to subcooled water progress report. Jet Propulsion Laboratory Progress Report No: 4(20), California Institute of Technology, 1-29, California.
- Han, C.-Y. and Griffith, P. 1965. The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling—Part I: Bubble initiation, growth and departure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 8(6), 887-904.
- Harirchian, T. and Garimella, S. V. 2008. Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(15–16), 3724–3735.
- Heindel, T. J., Incropera, F. P. and Ramadhyani, S. 1995. Laminar natural convection in a discretely heated cavity: II—comparisons of experimental and theoretical results. *Journal of Heat Transfer*, 117(4), 910–917.
- Honda, H., Takamatsu, H. and Wei, J. J. 2002. Enhanced boiling of fc-72 on silicon chips with micro-pin-fins and submicron-scale roughness. *Journal of Heat Transfer*, 124(2), 383–390.

- Hsu, Y. T., Li, J. X. and Lu, M. C. 2018. Enhanced immersion cooling using two-tier micro- and nano-structures. *Applied Thermal Engineering*, 131, 864–873.
- Hsu, Y. Y. 1962. On the size range of active nucleation cavities on a heating surface. *Journal of Heat Transfer*, 84(3), 207–213.
- Hyun, S., Lee, D. R. and Loh, B. G. 2005. Investigation of convective heat transfer augmentation using acoustic streaming generated by ultrasonic vibrations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(3–4), 703–718.
- Iida, Y. and Tsutsui, K. 1992. Effects of ultrasonic waves on natural convection, nucleate boiling and film boiling heat transfer from a wire to a saturated liquid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 5(1), 108–115.
- Im, Y., Joshi, Y., Dietz, C. and Lee, S. S. 2010. Enhanced boiling of a dielectric liquid on copper nanowire surfaces. *International Journal of Micro-Nano Scale Transport*, 1(1), 79–96.
- Incropera, P. F., Dewitt, P. D., Bergman, L. T. and Lavine, S. A. 2011. *Introduction to Heat Transfer*-sixth edition, John Wiley & Sons, 767, Hoboken.
- Jacob, M. 1936. Heat transfer in evaporation and condensation-I. *Mechanical Engineering*, 58, 643–660.
- Jakob, M. and Fritz, W. 1931. Versuche über den verdampfungsvorgang. *Forschung Auf Dem Gebiete Des Ingenieurwesens*, 2(12), 435–447.
- Jithin, K. V. and Rajesh, P. K. 2022. Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 188, 122608.
- Joshi, A. A. and Majumdar, A. 1993. Transient ballistic and diffusive phonon heat transport in thin films. *Journal of Applied Physics*, 74(1), 31–39.
- Kadam, S. T. and Kumar, R. 2014. Twenty first century cooling solution: microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 85, 73–92.
- Kanbur, B. B., Wu, C., Fan, S., Tong, W. and Duan, F. 2020. Two-phase liquid-immersion data center cooling system: experimental performance and thermoeconomic analysis. *International Journal of Refrigeration*, 118, 290–301.
- Karlsen, J. T., Augustsson, P. and Bruus, H. 2016. Acoustic force density acting on inhomogeneous fluids in acoustic fields. *Physical Review Letters*, 117(11), 114504.
- Kiani, H. and Sun, D. W. 2016. Numerical modeling of particle to fluid heat transfer during ultrasound assisted immersion cooling. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 99, 25–32.

- Kiani, H., Sun, D. W. and Zhang, Z. 2012. The effect of ultrasound irradiation on the convective heat transfer rate during immersion cooling of a stationary sphere. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(6), 1238–1245.
- Kiani, H., Sun, D. W. and Zhang, Z. 2013. Effects of processing parameters on the convective heat transfer rate during ultrasound assisted low temperature immersion treatment of a stationary sphere. *Journal of Food Engineering*, 115(3), 384–390.
- Kibushi, R., Yuki, K., Unno, N., Ogushi, T., Murakami, M., Numata, T., Ide, T. and Nomura, H. 2021. Enhancement of the critical heat flux of saturated pool boiling by the breathing phenomenon induced by lotus copper in combination with a grooved heat transfer surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 179, 121663.
- Kim, H.-Y., Kim, Y. G. and Kang, B. H. 2004. Enhancement of natural convection and pool boiling heat transfer via ultrasonic vibration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2831–2840.
- Kim, Y. H., Lee, K. J. and Han, D. 2008. Pool boiling enhancement with surface treatments. *Heat and Mass Transfer*, 45(1), 55–60.
- Kline, S. J. and McClintock, F. A. 1953. Analysis of uncertainty in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(3), 3-8.
- Kozitskii, V. I. 1972. Heat transfer coefficients for boiling of n-butane on surfaces of various roughness. *Chemical and Petroleum Engineering*, 8(1), 23–24.
- Kumar, V., Azharudeen, M., Pothuri, C. and Subramani, K. 2021. Heat transfer mechanism driven by acoustic body force under acoustic fields. *Physical Review Fluids*, 6(7), 073501.
- Kurbanov, U. and Melkumov, K. 2003. Use of ultrasound for intensification of heat transfer process in heat exchangers. In *Proceedings of The International Congress of Refrigeration*, 1–5.
- Kurihara, H. M. and Myers, J. E. 1960. The effects of superheat and surface roughness on boiling coefficients. *AIChE Journal*, 6(1), 83–91.
- Lee, T. Y. T. 1997. Application of dielectric binary mixtures in electronic cooling- nucleate pool boiling regime. *Journal of Electronics Manufacturing*, 7(2), 93–103.
- Legay, M., Gondrexon, N., Le Person, S., Boldo, P. and Bontemps, A. 2011. Enhancement of heat transfer by ultrasound: Review and recent advances. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011, 17.
- Leland, J. E. and Chow, L. C. 1993. Forced convection boiling from a nonflush simulated electronic chip. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 7(4), 588–594.
- Leland, J. E. and Chow, L. C. 1998. Immersion cooling of a simulated electronic chip protruding into a flow channel. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 12(3), 398–405.

- Lenke, R. U., Christoph, M. and De Doncker, R. W. 2008. Experimental Characterization of Immersion-cooled Devices at Elevated Ambient Temperatures. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 15-19 June, 493-497, Rhodes, Greece.
- Li, H., Li, Y. and Li, Z. 1997. The heating phenomenon produced by an ultrasonic fountain. *Ultrasonics Sonochemistry*, 4(2), 217-218.
- Li, K. W. and Parker, J. D. 1967. Acoustical effects on free convective heat transfer from a horizontal wire. *Journal of Heat Transfer*, 89(3), 277-278.
- Li, X., Lv, L., Wang, X. and Li, J. 2021. Transient thermodynamic response and boiling heat transfer limit of dielectric liquids in a two-phase closed direct immersion cooling system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 100986.
- Lighthill, S. J. 1978. Acoustic streaming. *Journal of Sound and Vibration*, 61(3), 391-418.
- Lin, Y. and Farouk, B. 2008. Heat transfer in a rectangular chamber with differentially heated horizontal walls: effects of a vibrating sidewall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(11-12), 3179-3189.
- Liu, C., and Yu, H. 2022. Experimental investigations on heat transfer characteristics of direct contact liquid cooling for CPU. *Buildings*, 12(7), 913.
- Liu, F. C., Chen, S. W. and Lee, J. D. 2018. Feasibility study of heat transfer enhancement by ultrasonic vibration under subcooled pool condition. *Heat Transfer Engineering*, 39(7-8), 654-662.
- Loh, B. G. and Lee, D. R. 2004. Heat transfer characteristics of acoustic streaming by longitudinal ultrasonic vibration. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 18(1), 94-99.
- Loh, B.-G., Hyun, S., Ro, P. I. and Kleinstreuer, C. 2002. Acoustic streaming induced by ultrasonic flexural vibrations and associated enhancement of convective heat transfer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(2), 883.
- Luiten, W. 2021. Single Phase Passive Hydrocarbon Immersion Cooling of High-power ICs. 27th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC 2021), 23-23 September, 1-6, Berlin, Germany.
- Ma, T., Yuki, K., Furusho, T., Kibushi, R., Unno, N. And Suzuki, K. 2017. Immersion Cooling Technology of Sic-Based on-Vehicle Inverter by Anti-Freezing Liquid with Subcooled Boiling. 2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP 2017), 19-22 April, 199-201, Yamagata, Japan.
- Martínez-Ramos, T., Corona-Jiménez, E. and Ruiz-López, I. I. 2021. Analysis of ultrasound-assisted convective heating/cooling process: development and application of a nusselt equation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 74, 1-11.

- Matsuoka, M., Matsuda, K. and Kubo, H. 2017. Liquid Immersion Cooling Technology with Natural Convection in Data Center. Proceedings of the 2017 IEEE 6th International Conference on Cloud Networking (CloudNet 2017), 25-27 September, 1-7, Prague, Czech Republic.
- McHale, J. P. and Garimella, S. V. 2010. Bubble nucleation characteristics in pool boiling of a wetting liquid on smooth and rough surfaces. *International Journal of Multiphase Flow*, 36(4), 249-260.
- McWilliams, T. 2014. Evaluating heat sink performance in an immersion-cooled server system. Master of Science Thesis, The University of Texas at Arlington, Master of Science in Mechanical Engineering, 74, Texas.
- Medavaram, G. L., Bhavnani, S. H. and Jaeger, R. C. 2005. Ebullition characteristics of an isolated surface microstructure for immersion cooled heat sinks. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 28(2), 263-271.
- Mikic, B. B. and Rohsenow, W. M. 1969. A new correlation of pool-boiling data including the effect of heating surface characteristics. *Journal of Heat Transfer*, 91(2), 245-250.
- Mohammed, A. S. 2017. Investigation of immersion cooled ARM-Based computer clusters for Low-Cost, High-Performance Computing. Master of Science Thesis, University of North Texas, 61, USA.
- Monnot, A., Boldo, P., Gondrexon, N. and Bontemps, A. 2007. Enhancement of cooling rate by means of high frequency ultrasound. *Heat Transfer Engineering*, 28(1), 3-8.
- Mudawar, I. 1992. Direct-immersion cooling for high power electronic chips. 1992 Proceedings Intersociety Conference on Thermal Phenomena in Electronic Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 74-84, Austin.
- Mudawar, I., Howard, A. H. and Gersey, C. O. 1997. An analytical model for near-saturated pool boiling critical heat flux on vertical surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(10), 2327-2339.
- Murshed, S. S. and 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.
- Nagilla, S. R. 2015. Non thermal reliability considerations for oil cooled data centers and its serviceability. Master of Science Thesis, The University of Texas at Arlington, Master of Science in Mechanical Engineering, 50, Texas.
- Nakagawa, M. 2004. Analyses of acoustic streaming generated by four ultrasonic vibrators in a vessel. *Japanese Journal of Applied Physics*, 43(5), 2847-2851.
- Nimkar, N. D., Bhavnani, S. H. and Jaeger, R. C. 2006. Benchmark heat transfer data for microstructured surfaces for immersion-cooled microelectronics. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 29(1), 89-97.

- Nord, A. and Zhao, Y. 2016. Immersed cooling of electronics. Master of Science Thesis, Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management, 52, Stockholm.
- Nukiyama, S. 1934. Film boiling water on thin wires. *Society of Mechanical Engineering*, 37.
- Park, K. A. and Bergles, A. E. 1988. Ultrasonic enhancement of saturated and subcooled pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31(3), 664-667.
- Parker, J. L. and El-Genk, M. S. 2009. Saturation boiling of HFE-7100 dielectric liquid on copper surfaces with corner pins at different inclinations. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 16(2), 103-122.
- Patel, H. 2013. Immersion cooling of high end data center server and validation through experiments. Master Science of Thesis, The University of Texas at Arlington, 54, Texas.
- Petrovic, S., Robinson, T. and Judd, R. L. 2004. Marangoni heat transfer in subcooled nucleate pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(23), 5115-5128.
- Pires, I. A., Silva, R. A., Pereira, I. T. O., Faria, O. A., Maia, T. A. C. and Filho, B. D. J. C. 2020. An assessment of immersion cooling for power electronics: an oil volume case study. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 3231-3237.
- Priarone, A. 2005. Effect of surface orientation on nucleate boiling and critical heat flux of dielectric fluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(9), 822-831.
- Prof, R.W. and Loomis, A. L. 1927. The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 4(22), 417-436.
- Qiu, D., Cao, L., Wang, Q., Hou, F. and Wang, X. 2017. Experimental and numerical study of 3D stacked dies under forced air cooling and water immersion cooling. *Microelectronics Reliability*, 74, 34-43.
- Qiu, W., Joergensen, J., Corato, E., Bruus, H. and Augustsson, P. 2021. Fast microscale acoustic streaming driven by a temperature-gradient-induced nondissipative acoustic body force. *American Physical Society*, 127(6).
- Rahimi, M., Dehbani, M. and Abolhasani, M. 2012. Experimental study on the effects of acoustic streaming of high frequency ultrasonic waves on convective heat transfer: Effects of transducer position and wave interference. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(5), 720-725.
- Rainey, K. N. and You, S. M. 2000. Pool boiling heat transfer from plain and microporous, square pin-finned surfaces in saturated FC-72. *Journal of Heat Transfer*, 122(3), 509-516.

- Rainey, K. N. and You, S. M. 2001. Effects of heater size and orientation on pool boiling heat transfer from microporous coated surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(14), 2589–2599.
- Rainey, K. N., You, S. M. and Lee, S. 2003. Effect of pressure, subcooling, and dissolved gas on pool boiling heat transfer from microporous, square pin-finned surfaces in FC-72. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(1), 23–35.
- Ramakrishnan, B., Alissa, H., Manousakis, I., Lankston, R., Bianchini, R., Kim, W., Baca, R., Misra, P., Goiri, I., Jalili, M., Raniwala, A., Warriar, B., Monroe, M., Belady, C., Shaw, M. and Fontoura, M. 2021. CPU overclocking: a performance assessment of air, cold plates, and two-phase immersion cooling. *IEEE Transactions on Components- Packaging and Manufacturing Technology*, 11(10), 1703-1715.
- Ramakrishnan, B., Bhavnani, S. H., Gess, J., Knight, R. W., Harris, D. and Johnson, R. W. 2014. Effect of system and operational parameters on the performance of an immersion-cooled multichip module for high performance computing. *Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 24-28, San Jose.
- Rayleigh, Lord. 1884. On the circulation of air observed in kundt's tubes, and on some allied acoustical problems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.
- Reed, S. J. and Mudawar, I. 1999. Elimination of boiling incipience temperature drop in highly wetting fluids using spherical contact with a flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(13), 2439-2454.
- Riley, N. 1998. Acoustic streaming. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 10(1–4), 349-356.
- Rohsenow, W. M. 1952. A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids. *Journal of Fluids Engineering*, 74(6), 969–975.
- Rudenko, O. V. 2014. Theoretical foundations of nonlinear acoustics. In *Studies in Soviet Science*, 274.
- Saini, S., Wagh, T., Bansode, P., Shahi, P., Herring, J., Lamotte-Dawaghreh, J., Shah, J. M., and Agonafer, D. 2022. A numerical study on multi-objective design optimization of heat sink for forced and natural convection cooling of immersion-cooled servers. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 29(8), 15-35.
- Sajjad, U., Sadeghianjahromi, A., Ali, H. M. and Wang, C. C. 2020. Enhanced pool boiling of dielectric and highly wetting liquids-a review on enhancement mechanisms. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 119, 1-27.
- Sarper, B., Saglam, M. and Aydin, O. 2018. Experimental and numerical investigation of natural convection in a discretely heated vertical channel: effect of the blockage ratio of the heat sources. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 894-910.

- Sauer, H. J., Medrow, R. A. and Sinnarwalla, A. M. 1975. Effects of surface condition on nucleate boiling of refrigerant-11. A.S.H.R.A.E. TRANS., 81(2), 274-281.
- Saylor, J. R., Bar-cohen, A., Member, S., Lee, T., Simon, T. W., Saylor, J. R., Lee, T. Y., Simon, T. W., Tong, W. and Wu are, P. S. 1988. Fluid selection and property effects in single- and two-phase immersion cooling of electronic components. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Transaction on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 11(4), 557-565.
- Shah, J. M., Eiland, R., Rajmane, P., Siddarth, A., Agonafer, D. and Mulay, V. 2019. Reliability considerations for oil immersion-cooled data centers. Journal of Electronic Packaging, 141(2), 1–9.
- Shah, J. M., Rizvi, S. H. I., Kota, I. S., Nagilla, S. R., Thakkar, D. and Agonafer, D. 2016. Design Considerations Relating to Non-thermal Aspects of Oil Immersion Cooling. Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11–17, Vol 10, Phoenix, Arizona, USA
- Shinde, P. A. 2019. Experimental analysis for optimization of thermal performance of a server in single phase immersion cooling. Master Science of Thesis, The University of Texas at Arlington, Mechanical Engineering, 57, Texas.
- Simon, J. C., Sapozhnikov, O. A., Khokhlova, V. A., Crum, L. A. and Bailey, M. R. 2015. Ultrasonic atomization of liquids in drop-chain acoustic fountains. Journal of Fluid Mechanics, 766, 129–146.
- Sinha, A., Kota, K., Hidalgo, P., Joshi, Y. and Glezer, A. 2013. Novel Immersion Cooling Technique for A 3D Chip Stack. ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (InterPACK 2013), 16-18 July, 1-7, Burlingame, California, USA.
- Sridhar, A., Styslinger, S., Duron, C., Bhavnani, S. H., Knight, R. W., Harris, D. And Johnson, R. W. 2013. Cooling of High-Performance Server Modules Using Direct Immersion. ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, 8-12 July, Vol 2, 759–765, Rio Grande, Puerto Rico, USA.
- Sriraman, S. R. and Banerjee, D. 2009. Pool boiling studies on nano-structured surfaces. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings, 8 Part A, 317–324, Washington.
- Stephan, K. 1977. Bubble formation and heat transfer in natural convection boiling. Heat Transfer in Boiling, 1, Hemisphere Publishing Corporation.
- Stoebener, D. and Goch, G. 2006. Wet-state ultrasonic measurements of cylindrical workpieces during immersion cooling. Materials Science and Engineering Technology, 37(1), 69-75.
- Sun, X., Han, Z. and Li, X. 2022. Simulation study on cooling effect of two-phase liquid-immersion cabinet in data center. Applied Thermal Engineering, 207, 118142.

- Suszko, A. 2015. Enhancement of nucleate boiling on rough and dimpled surfaces with application to composite spreaders for microprocessors immersion cooling. Phd Thesis, The University of New Mexico, Mechanical Engineering, 216, Albuquerque.
- Suszko, A. and El-Genk, M. S. 2015. Saturation boiling of PF-5060 on rough Cu surfaces: Bubbles transient growth, departure diameter and detachment frequency. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 363-373.
- Tajik, B., Abbassi, A., Saffar Avval, M., Abdullah, A. and Mohammad Abadi, H. 2013. Heat transfer enhancement by acoustic streaming in a closed cylindrical enclosure filled with water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 60(1), 230-235.
- Tam, H. K., Tam, L. M., Ghajar, A. J. and Chen, I. P. 2017. Experimental study of the ultrasonic effect on heat transfer inside a horizontal mini-tube in the laminar region. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1300-1308.
- Tantolin, C., Lallemand, M. and Ekkep, U. 1994. Experimental study of immersion cooling for power components. *International Conference on Control, Institution of Engineering and Techonolgy*, 723-727, Coventry.
- Terada, M., Yuki, K., Unno, N., Kibushi, R., Ogushi, T., Murakami, M., Numata, T., Ide, T. and Nomura, H. 2022. Heat Transfer Performance of Two-Phase Immersion Cooling by Breathing Phenomena with Different Pore Structures of Lotus Copper. *International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*, 11-14 May, 103-104, Sapporo, Japan.
- Thakkar, D. H. 2016. Performance enhancement of raspberry pi server for the application of oil immersion cooling. Master of Science Thesis, The University of Texas, Mechanical Engineering, 43, Arlington.
- Tian, S.R., Takamatsu, H. and Honda, H. 1998. Experimental study on the immersion cooling of an upward-facing multichip module with an opposing condensing surface. *Heat Transfer Japanese Research*, 27(7), 497–508.
- Tong L. S. and Tang Y. S. 1997. Boiling heat transfer and two phase flow. In *Taylor & Francis*, 536, Abington, Oxon, UK.
- Tong, W., Bar-Cohen, A., Simon, T. W. and You, S. M. 1990. Contact angle effects on boiling incipience of highly-wetting liquids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33(1), 91–103.
- Trimbake, A., Singh, C. P. and Krishnan, S. 2022. Mineral oil immersion cooling of lithium-ion batteries: an experimental investigation. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 19(2), JEECS-21-1107.
- Tuma, P. E. 2010. The Merits of Open Bath Immersion Cooling of Datacom Equipment. 26th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 21-25 February, 123-131, Santa Clara, USA.

- Tuma, P., Schulz, J., Bonk, J., Roy, R., DeLorme, M. and Logan, P. 2018. An exposure assessment approach for potential thermal degradation compounds in 2-phase immersion cooling operations. *Process Safety Progress*, 37(3), 369-375.
- Ujereh, S., Fisher, T. and Mudawar, I. 2007. Effects of carbon nanotube arrays on nucleate pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(19-20), 4023-4038.
- Van Oevelen, T. 2014. Optimal heat sink design for liquid cooling of electronics. Phd Thesis, Arenberg Doctoral School, Faculty of Engineering Science, 244, Heverlee.
- Wada, M., Matsunaga, A., Hachiya, M., Chiba, M., Ishihara, K. and Yoshikawa, M. 2017. Feasibility Study of Two-phase Immersion Cooling in Closed Electronic Device. *Proceedings of the 16th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm 2017)*, 30 May- 02 June, 899–904, Orlando, USA.
- Wakabayashi, D., Yu, Q. and Nakamura, Y. 2017. Development of The High Efficiency Cooling Structure of The Liquid Immersion Cooling SR Motor. *19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 06-09 December, 1-4, Singapore.
- Wang, Y. and Peles, Y. 2015. Subcooled flow boiling in a microchannel with a pin fin and a liquid jet in crossflow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 165-173.
- Warrier, P., Sathyanarayana, A., Bazdar, S., Joshi, Y. and Teja, A. S. 2012a. Selection and evaluation of organosilicon coolants for direct immersion cooling of electronic systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(31), 10517-10523.
- Warrier, P., Sathyanarayana, A., Patil, D. V., France, S., Joshi, Y. and Teja, A. S. 2012b. Novel heat transfer fluids for direct immersion phase change cooling of electronic systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(13-14), 3379-3385.
- Wei, J. J. and Honda, H. 2003. Effects of fin geometry on boiling heat transfer from silicon chips with micro-pin-fins immersed in FC-72. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(21), 4059-4070.
- Wong, S. W. and Chon, W. Y. 1969. Effects of ultrasonic vibrations on heat transfer to liquids by natural convection and by boiling. *AIChE Journal*, 15(2), 281-288.
- Yuki, K., Hara, T., Ikezawa, S., Anju, K., Suzuki, K., Ogushi, T., Ide, T. and Murakami, M. 2016. Immersion cooling of electronics utilizing lotus-type porous copper. *Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging*, 9, E16-013-1-E16-013-7.
- Yuki, K., Kibushi, R., Tsuji, R., Takai, K., Unno, N., Ogushi, T., Murakami, M., Numata, T., Nomura, H. and Ide, T. 2020. Thermal management of automotive SiC-based on-board inverter with 500 W/cm<sup>2</sup> in heat flux, and two-phase immersion cooling by breathing phenomenon spontaneously induced by lotus porous copper jointed onto

a grooved heat transfer surface. *Journal of Thermal Science and Technology*, 15(1), JTST0012.

Zhou, D. W. and Liu, D. Y. 2004. Heat Transfer Characteristics of Nanofluids in an Acoustic Cavitation Field. *Heat Transfer Engineering*, 25(6), 54-61.

Zhou, D. W., Liu, D. Y., Hu, X. G. and Ma, C. F. 2002. Effect of acoustic cavitation on boiling heat transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(8), 931-938.

Zhou, G., Zhou, J., Huai, X., Zhou, F. and Jiang, Y. 2022. A two-phase liquid immersion cooling strategy utilizing vapor chamber heat spreader for data center servers. *Applied Thermal Engineering*, 210, 118289.



## EKLER

### EK 1 Belirsizlik Denklemleri

Deneyisel çalışmalarda kullanılan fiziksel büyüklük ölçümleri; ölçü aleti hassasiyeti, deneyisel kabuller ve çevresel faktörlerden kaynaklı olarak bir miktar hata içerir. Ölçüm hatası ölçülen değer ile gerçek değer arasındaki fark olarak tanımlanır. Hatalı olarak yapılan ölçümlerden kaynaklı hesaplanan büyüklüklerin hata aralığının belirlenmesi işlemi belirsizlik analizi olarak tanımlanır. Yapılan ölçümde oluşan hatalar sistematik ve rastlantısal hataların toplamını içerir. Sistematik hatalar, ölçme cihazından kaynaklanan ve bütün ölçüm boyunca değişmeyen sürekli hatalardır. Sistematik hatalar ölçüm cihazının sıfırlama ve kalibrasyon işlem adımlarının doğru bir şekilde sürdürülmesiyle minimum seviyeye düşürülebilir. Rastlantısal (random) hatalar ise, dağılmaya neden olan kararsız etkilerden kaynaklanan belirsizlikleri kapsayan hatalardır. Belli bir zaman diliminde birden fazla ölçüm okuması yapılarak random hata seviyesi azaltılabilir. Bu tez çalışmasında yayılmalı belirsizlik analizi yöntemi kullanılmış olup bütün sonuç parametreleri için belirsizlik değerleri hesaplanmıştır. Bazı önemli parametreler için elde edilmiş belirsizlik formülleri Çizelge E1’de verilmiştir.

#### EK 1. Belirsizlik denklemleri.

| Büyüklik                                        | Belirsizlik Denklemi                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Isı transfer yüzey alanı, $A_s$                 | $\frac{W_{A_s}}{A_s} = \left[ \left( \frac{w_a}{a} \right)^2 + \left( \frac{w_b}{b} \right)^2 \right]^{1/2}$                                                                                                                        |
| Termal güç, $Q$                                 | $\frac{W_Q}{Q} = \left[ \left( \frac{w_I}{I} \right)^2 + \left( \frac{w_V}{V} \right)^2 \right]^{1/2}$                                                                                                                              |
| Isı transfer katsayısı, $h$                     | $\frac{W_h}{h} = \left[ \left( \frac{w_Q}{Q} \right)^2 + \left( \frac{w_{A_s}}{A_s} \right)^2 + \left( \frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2}$                                                                       |
| Isı transfer katsayısı artış oranı, $\eta_{IR}$ | $\frac{W_{\eta_{IR}}}{\eta_{IR}} = \left[ \left( \frac{w_{h_u}}{h_u - h_o} \right)^2 + \left( \frac{h_u w_{h_o}}{h_o (h_u - h_o)} \right)^2 \right]^{1/2}$                                                                          |
| Nusselt sayısı, $Nu$                            | $\frac{W_{Nu}}{Nu} = \left[ \left( \frac{w_Q}{Q} \right)^2 + \left( \frac{w_{A_s}}{A_s} \right)^2 + \left( \frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + \left( \frac{w_L}{L} \right)^2 + \left( \frac{w_k}{k} \right)^2 \right]^{1/2}$ |
| İyileştirme oranı, $\eta_{Nu}$                  | $\frac{W_{\eta_{Nu}}}{\eta_{Nu}} = \left[ \left( \frac{w_{Nu_u}}{Nu_u} \right)^2 + \left( \frac{w_{Nu_o}}{Nu_o} \right)^2 \right]^{1/2}$                                                                                            |

## EK 2 Termal Çiftlerin Kalibrasyon Eğrileri.

