



**MİKROKANALLARDA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN  
AKIŞ KAYNAMA KARAKTERİSTİKLERİNE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**İbrahim ATEŞ**

**Doktora Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN**

**2020  
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
DOKTORA TEZİ**

**MİKROKANALLARDA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN AKIŞ KAYNAMA  
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**İbrahim ATEŞ**

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

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Erzurum**

**2020**

**Her hakkı saklıdır**

**T.C.**  
**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**TEZ ONAY FORMU**

---

**MİKROKANALLARDA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN AKIŞ KAYNAMA  
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Bayram ŞAHİN danışmanlığında, İbrahim ATEŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 27 / 03 / 2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ana Bilim Dalı Seçiniz Ana Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **Oy birliği ile (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Kenan YAKUT	<i>İmza</i>	:
Üye	: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN	<i>İmza</i>	:
Üye	: Prof. Dr. Fatih SEVİM	<i>İmza</i>	:
Üye	: Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ	<i>İmza</i>	:
Üye	: Doç. Dr. Eyüphan MANAY	<i>İmza</i>	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

**Prof. Dr. Arzu GÖRMEZ**  
**Enstitü Müdürü**

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 117M223 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **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.

27 / 03 / 2020

İbrahim ATEŞ

## ÖZET

DOKTORA TEZİ

### MİKROKANALLARDA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN AKIŞ KAYNAMA KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

İbrahim ATEŞ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Bu doktora tez çalışmasında, çoklu mikrokanallarda başta yüzey pürüzlülüğü olmak üzere hidrolik çap, ısı akısı ve kütleli akının akış kaynama ısı transferi ve basınç düşümü üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir ve akış görüntüleme ile akış desenleri ortaya çıkarılmıştır. Kanal genişlikleri, 300 µm, 500 µm ve 700 µm iken kanal yüksekliği 450 µm'dir. Deneylerde dört farklı yüzey pürüzlülük değeri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, ortalama yüzey pürüzlülük değeri ( $R_a$ ) değeri ile karakterize edilmiş olup çalışılan yüzey pürüzlülük değerleri, 1-3.0 µm arasındadır. Deneylerde, iş akışkanı olarak saf su kullanılmıştır. Mikrokanallı ısı alıcının tabanından uygulanan ısı akısı 40-160 kW/m<sup>2</sup> aralığında iken kütleli akı aralığı 100-400 kg/m<sup>2</sup>s'dir. Deney sonuçlarına göre, düşük ısı güçlerinde pürüzlülük artışının ısı transfer katsayısını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Düşük ısı güçlerinde kanal içerisinde kabarcıklı kaynama rejimi görüldüğünden, pürüzlülük artışının kabarcıklanma odaklarını arttırarak kaynamalı akış ısı transferini %42'ye varan değerlerde arttırdığı görülmektedir. Yüksek ısı akılarında kanal içerisinde uzun kabarcıklı akış ve halkasal akış görülmesi pürüzlülük etkisini bastırmakta böylelikle pürüzlülüğün ısı transferi üzerindeki etkisi önemsiz hale gelmektedir. Yüksek kütleli akı değerleri için düşük ısı güçlerinde basınç düşümünün yüzey pürüzlülüğü ile arttığı görülmüştür. Düşük kütleli akı ve yüksek ısı güçlerinde yüzey pürüzlülüğünün basınç düşümü üzerindeki etkisi önemsiz hale gelmiştir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen veri tabanı baz alınarak mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi için yüzey pürüzlülüğünü ve yüzey arttırım faktörünü de içeren yeni bir bağıntı önerilmiştir. Önerilen bağıntının MAE değeri %10,9 iken tahmin ettiği verilerin %87,5, %97,7 ve %100'ü sırasıyla  $\pm$  %20,  $\pm$  %30 ve  $\pm$  %40 hata bantları içerisinde yer almaktadır.

2020, 197 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Akış kaynama, Mikrokanal, Yüzey Pürüzlülüğü, Isı Transferi

## ABSTRACT

Ph.D

### INVESTIGATION OF SURFACE ROUGHNESS EFFECT ON FLOW BOILING CHARACTERISTICS IN MICROCHANNELS

İbrahim ATEŞ

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

Supervisor: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

In this PhD thesis, the effects of surface roughness in particular, hydraulic diameter, heat flux and mass flux on boiling flow heat transfer and pressure drop, especially in multiple microchannels, were experimentally investigated and flow patterns with flow visualisation were revealed. The channel widths are 300  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  and 700  $\mu\text{m}$ , while the channel height is 450  $\mu\text{m}$ . Four different surface roughness values were used in the experiments. The surface roughness is characterized by the average surface roughness ( $R_a$ ) while the studied surface roughness values are between 1-3.0  $\mu\text{m}$ . In experiments, deionized water was used as working fluid. While the heat flux applied from the bottom of the microchannel heat sink is in the range 40-160  $\text{kW/m}^2$ , the mass flux range is 100-400  $\text{kg/m}^2\text{s}$ . According to the experimental results, it was seen that the increase in roughness at low heat flux positively affects the heat transfer coefficient. It is observed that the increase in roughness increases flow boiling heat transfer up to 42% by increasing the nucleation sites as the nucleate boiling regime is observed in the channel at low heat flux. The presence of elongated bubbly flow and annular flow in the channel at high heat flux suppresses the roughness effect, thus the effect of the roughness on the heat transfer becomes insignificant. For high mass flux values, it was observed that the pressure drop at low heat flux increased with surface roughness. Based on the database obtained as a result of the experiments conducted in that study, a new correlation is proposed, including surface roughness and surface enhancement factor for flow boiling heat transfer coefficient in microchannels. 87.5%, 97.7% and 100% of the data estimated by the proposed correlation with the MAE value of 10.9% are within the error bands of  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$  and  $\pm 40\%$  respectively.

**2020, 197 pages**

**Keywords:** Flow Boiling, Microchannel, Surface Roughness, Heat Transfer

## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarımın her aşamasında desteklerini esirgemeyen hem kişilik hem de bir akademisyen olarak örnek olarak gördüğüm değerli tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Bayram ŞAHİN'e en içten teşekkürlerimi arz ederim.

Tez izleme komisyonumda yer alan Atatürk Üniversitesi'nden Sayın Prof. Dr. Fatih SEVİM'e teşekkürlerimi sunarım.

TUBİTAK 117M223 no'lu proje kapsamında gerçekleştirdiğim doktora çalışmalarım her aşamasında verdiği önemli katkı ve tecrübeleri için projenin yürütücüsü olan ve tez izleme komisyonumda yer alan Sayın Doç Dr. Eyüphan MANAY'a en samimi teşekkürlerimi sunarım.

Projede bursiyer olarak beraber görev yaptığımız ve özellikle deney sisteminin kurulumunda önemli katkıları olan mesai arkadaşım Arş. Gör. Emre MANDEV'e hassaten teşekkür ederim.

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 117M223 nolu proje ile desteklenmiştir. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) verdiği maddi desteklerden dolayı teşekkür ederim.

İmalat aşamasında ilgi ve alakalarından ötürü Hasemek firmasından Ufuk ve Tuncay Beylere, Harbiye Makineden Ali Usta ve ekibine teşekkür ederim. YÜTAM'da optik profilometre ve optik mikroskobun kullanımında yardımcı olan Öğretim Görevlisi Mustafa YAZICI'ya teşekkür ederim.

Fikir alışverişi yaptığım, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi'nden Dr. Öğr. Üyesi Kadir GELİŞ'e, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi'nden Dr. Öğr. Üyesi Burak MARKAL'a, Marmara Üniversitesi'nden Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Rafet ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında manevi desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Ayşenur'a ve kızım Ayşe Hümeýra'ya; duaları ile hep yanımda olan kıymetli anneme, babama ve büyüklerime şükranlarımı sunarım.

**İbrahim ATEŞ**  
**Mart 2020**

## 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> .....	ix
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1 Mikro Boyutlu Sistemlerde Soğutma Problemi.....	1
1.2. Kanalların Sınıflandırılması.....	4
1.3. Kaynama ile Isı Transferi.....	8
1.4. Kaynamada Kullanılan Boyutsuz Sayılar.....	10
1.5. Kaynama Eğrisi ve Kaynama Rejimleri.....	11
1.6. Makrokanallarda Akış Kaynama.....	15
1.7. Kabarcık Oluşumu.....	17
1.9. Kabarcıklı Kaynama Mekanizmaları.....	24
1.9. Mikrokanallarda Akış Kaynama.....	30
1.10. Yüzey Yapısı.....	32
1.11. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	36
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	40
2.1. Makro ve Mikro Ölçekler Arasındaki Geçiş Kriterleri.....	40
2.2. Mikrokanallarda İki Fazlı Akış Desenleri.....	43
2.3. Mikrokanallarda Akış Kaynama Isı Transfer Karakteristikleri.....	66
2.4. Mikrokanallarda Akış Kaynama Basınç Düşümü ve Kararsızlıklar.....	79
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	93
3.1. Materyal.....	93
3.1.1. Mikrokanallı ısı alıcı üretim teknikleri.....	93
3.1.2. Yüzey karakteristikleri.....	101
3.1.3. Mikrokanallı ısı alıcıların boyutları.....	102
3.1.4. Mikrokanalların yüzey pürüzlülüğü.....	104
3.1.5. Mikrokanallı ısı alıcılarının karakterizasyonu.....	104
3.1.6. Deney düzeneği.....	116
3.1.7 Test bölgesi.....	117

3.2. Yöntem.....	122
3.2.1. Deneylerin yapılışı.....	122
3.2.2. Deneysel hesaplama metodu.....	122
3.2.3. Belirsizlik hesabı.....	131
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>132</b>
4.1. Akış Görüntüleme Sonuçları.....	133
4.1.1. Temel akış desenleri .....	133
4.1.2. Hidrolik çap etkisi.....	138
4.1.3. Isı akısı etkisi .....	140
4.1.4. Kütle akısı etkisi .....	144
4.1.5. Yüzey pürüzlülüğü etkisi .....	147
4.2. Akış Kaynama Isı Transfer Sonuçları.....	149
4.2.1. Hidrolik çap etkisi.....	149
4.2.2. Isı akısı etkisi .....	150
4.2.3. Kütle akısı etkisi .....	153
4.2.4. Yüzey pürüzlülüğü etkisi .....	159
4.3. Akış Kaynama Basınç Düşümü Sonuçları .....	168
4.3.1. Hidrolik çap etkisi.....	169
4.3.2. Isı akısı ve kütle akısının etkisi.....	170
4.3.3. Yüzey pürüzlülüğü etkisi .....	172
4.4. Mikrokanallarda Akış Kaynama Isı Transfer Katsayısı için Bağntı Geliştirilmesi .....	174
4.4.1. Makro kanallar için geliştirilen bağıntıların değerlendirilmesi .....	174
4.4.2. Mikro kanallar için geliştirilen bağıntıların değerlendirilmesi .....	177
4.4.3. Akış kaynama ısı transfer katsayısı için yeni bir bağıntı geliştirilmesi .....	181
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>191</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>198</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>220</b>
EK-1. Isıl Çiftlerin Kalibrasyon Eğrileri.....	220
EK-2. Belirsizlik Analizi.....	222
EK-3. Akış Kaynama Isı Transfer Bağıntıları.....	226
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>230</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$A_b$	Isı alıcı taban alanı
$A_{h,\zeta}$	Çıkış haznesi kesit alanı
$A_k$	Kanatçık yüzey alanı
$A_t$	Isı alıcının toplam ısı transfer yüzey alanı
$B_n$	Bond sayısı
$B_o$	Kaynama sayısı
$c_{p,s}$	Sıvının özgül ısısı
$Co$	Taşınım sayısı
$D_h$	Hidrolik çap
$Eö$	Eötves sayısı
$f$	Fanning sürtünme katsayısı
$G$	Kütlesel akı
$G_{h,g}$	Giriş haznesindeki kütlesel akı
$h$	Mikrokanal yüksekliği
$h_{if}$	İki fazlı ısı transfer katsayısı
$i_{sb}$	Buharlaşma entalpisi
$k_a$	Paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısı
$k_b$	Bakırın ısı iletim katsayısı
$K_d$	Kesit daralma kayıp katsayısı
$K_g$	Kesit genişleme kayıp katsayısı
$l_a$	Mikrokanal tabanı ile ısı alıcı tabanı arasındaki mesafe
$l_b$	Bakır bloğun üst yüzeyi ile ısı çift ölçüm noktası arasındaki mesafe
$L_n$	n noktasındaki mikrokanal uzunluğu
$L_{tf}$	Tek fazlı akış bölgesi uzunluğu
$L$	Isı alıcı uzunluğu
$La$	Kılcallık sayısı
$N$	Isı alıcıdaki mikrokanal sayısı
$m$	Kanatçık parametresi
$\dot{m}$	Kütlesel akı

$P_{\zeta}$	Çıkış haznesindeki basınç
$P_{d,x_e=0}$	$x_e = 0$ olduğu konumda doyma basıncı değeri
$P_g$	Giriş haznesindeki basınç
$P_{mk,\zeta}$	Mikrokanal çıkış basıncı
$P_{mk,g}$	Mikrokanal giriş basıncı
Pr	Prandtl sayısı
$R_a$	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri
$R_{td}$	Temas direnci
Re	Reynolds sayısı
$\dot{Q}$	Isıl güç
$\dot{Q}_k$	Kayıp ısıl güç
$\dot{q}_e$	Efektif ısı akısı
$\dot{q}_w$	Duvar ısı akısı
$S_i$	Yüzey arttırım faktörü
$T_{do,y,x_e=0}$	$x_e = 0$ olduğu konumda doyma sıcaklığı değeri
$T_g$	Akışkanın kanala giriş sıcaklığı
$T_{do,y,n}$	n. noktadaki yerel doyma sıcaklığı
$T_{do,y,o}$	Mikrokanal çıkışındaki doyma sıcaklığı
$T_n$	n. noktadaki ısı çiftten okunan sıcaklık değeri
$T_{y,n}$	n. noktadaki yerel yüzey sıcaklığı
w	Mikrokanal genişliği
W	Isı alıcı genişliği
We	Weber sayısı
x	Kuruluk derecesi
$x_{e,n}$	n noktasındaki yerel kuruluk derecesi
$x_{e,o}$	Mikrokanal çıkışındaki kuruluk derecesi
$\alpha$	Mikrokanal yükseklik/genişlik oranı
$\beta$	Mikrokanal en/boy oranı veya boy en oranı (<1)
$\eta_k$	Kanatçık verimi
$\eta_t$	Toplam yüzey verimi
$\mu$	Tek fazlı akış dinamik viskozitesi
$v_s$	Sıvı özgül hacmi

$v_{s,g}$	Giriş haznesindeki sıvı özgül hacmi
$v_{s,ç}$	Çıkış haznesindeki sıvı özgül hacmi
$\Delta P$	Toplam basınç kaybı
$\Delta P_d$	Kesit daralma basınç kaybı
$\Delta P_g$	Kesit genişleme basınç kazanımı
$\Delta P_{tf}$	Tek fazlı bölgedeki basınç düşümü

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
---------------------------	------------------------

AFM	Atomsal Kuvvet Mikroskobu
ETÜ	Erzurum Teknik Üniversitesi
KKB	Kabarcıklı Kaynama Başlangıcı
PIV	Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü
STM	Taramalı Tünelleme Mikroskobu
YÜTAM	Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezi

<b><u>Alt İndisler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
----------------------------	------------------------

G	Gaz
L	Sıvı
tf	Tek fazlı
if	İki fazlı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı soğutucu akışkanlar ve ısı transfer mekanizmaları için ısı transfer katsayısı aralıkları (Lin et al. 2002) .....	2
Şekil 1.2. Çeşitli uygulamalarda kullanılan kanal boyutları (Kandlikar and Steinke 2003) .....	5
Şekil 1.3. 1 atm basınçta su için tipik havuz kaynama eğrisi (Monde 2017).....	12
Şekil 1.4. Üniform olarak ısıtılan yatay bir boruda akış kaynama ısı transfer katsayısı ve akış desenleri (Ghiaasiaan 2008) .....	16
Şekil 1.5. Kabarcık oluşum döngüsü (Griffin 2008).....	19
Şekil 1.6. Kabarcık çekirdeklenmesi için Hsu modeli (Ghosh et al. 2016) .....	22
Şekil 1.7. Literatürde önerilen kabarcıklı kaynama mekanizmaları şematik gösterimi ..	28
Şekil 1.8. Akış kaynamada hidrolik çapa bağlı olarak kuvvetlerin değişimi (Kandlikar 2010a).....	30
Şekil 1.9. Farklı boyuttaki kanallarda kabarcık oluşum prosesi (Kandlikar 2006).....	31
Şekil 1.10. Akış kaynama rejimleri (Cornwell and Kew 1993).....	32
Şekil 2.1. Farklı kesitli kanallarda oluşan akış desenleri: (a) kabarcıklı (b) tıkaç (c) çalkantılı (d) tıkaç/halkasal (e) halkasal (Triplett et al. 1999) .....	45
Şekil 2.2. Coleman ve Garimella (1999) akış desenleri: (a) dağınık akış (b) kabarcıklı akış (c) halkasal akış (d) dalgalı-halkasal akış (e) tıkaç akış (f) uzun kabarcıklı akış (g) tabakalı akış .....	46
Şekil 2.3. 100 µm çaplı mikrokanalda hava-su iki fazlı akış desenleri (Serizawa, 2002): (a) kabarcıklı akış (b) tıkaç akış (c) geçiş akışı (d) Yakitori akışı (e) sıvı yüzük akış (f) geçiş akışı (g) köpüklü halkasal akış (h) halkasal akış (i) rivulet akış.....	46
Şekil 2.4. En/boy oranı 0,92 olan kanalda oluşan akış desenleri (Choi et al. 2011): (a) kabarcıklı akış (b) tıkaç kabarcıklı akış (d) uzun kabarcıklı akış (e) geçiş akışı ....	48
Şekil 2.5. Wu ve Cheng (2004)'e göre farklı ısı akısı ve kütle akırlarda kararsız kaynama modları: (a) tek fazlı sıvı/iki fazlı salınımlı akış ( $q=13,5 \text{ W/cm}^2$ , $m=14,6 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ) (b) tek fazlı sıvı/iki fazlı salınımlı akış ( $q=16,6 \text{ W/cm}^2$ , $m=12,7 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ) (c) sürekli iki fazlı akış ( $q=18,8 \text{ W/cm}^2$ , $m=11,9 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ) (d) tek fazlı sıvı/iki fazlı/tek fazlı buhar salınımlı akış ( $q=22,6 \text{ W/cm}^2$ , $m=11,2 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ).....	50
Şekil 2.6. 10 bar basınçta farklı çaplı borularda oluşan akış desenleri (Chen et al. 2006): (a) 1,10 mm (b) 2,01 mm .....	52

Şekil 2.7. R-134a soğutucu akışkanına ait akış kaynama desenleri (Revellin ve Thome, 2007b): (a) kabarcıklı akış (b) kabarcıklı/tıkaç akış (c) tıkaç akış (d) tıkaç/yarı halkasal akış (e) yarı-halkasal akış (f) dalgalı halkasal akış (g) halkasal akış.....	54
Şekil 2.8. Mikrokanallarda akış kaynama sırasında görülen akış rejimleri (Harirchian and Garimella 2009a).....	56
Şekil 2.9. Akış kaynama rejimlerinin mikrokanal genişliği, ısı akışı ve kütle akıya göre değişimi (Harirchian and Garimella 2009a).....	57
Şekil 2.10. Celata et al. 2010'a göre akış kaynama desenleri: (a) kabarcıklı akış (b) kabarcıklı-tıkaç akış (c) tıkaç akış (d) tıkaç-halkasal akış (e) halkasal-sisli akış. ..	58
Şekil 2.11. Galvis and Culham (2012) akış kaynama desenleri: (a) kabarcıklı akış (b) tıkaç akış (c) çalkantılı akış (d) halkasal akış (e) dalgalı-halkasal akış (f) ters halkasal akış .....	59
Şekil 2.12. Ali et al. (2013) çalışmasında temel akış kaynama desenleri .....	60
Şekil 2.13. Balasubramanian et al. (2013) tarafından gözlenen temel akış kaynama desenleri .....	60
Şekil 2.14. Li and Hrnjak (2019a) tarafında gözlemlenen R-1234ze(E)'e ait akış kaynama desenleri.....	65
Şekil 2.15. Mikrokanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısının farklı parametrelere göre değişiminin şematik gösterimi (Ribatski 2013) .....	66
Şekil 3.1. Lazerli işleme prosesi (Madou 2011).....	97
Şekil 3.2. Elektro erozyonla işleme prosesinin şematik gösterimi (Markopoulos and Davim 2018) .....	99
Şekil 3.3. Elektro erozyon işlemi sırasında plazma kanalının farklı durumları (Markopoulos and Davim 2018) .....	99
Şekil 3.4. Tel elektro erozyonla işleme yöntemi şematik gösterimi (Kocabaş 2013) ...	100
Şekil 3.5. Yüzey yapısı karakteristikleri (Bhushan 2001).....	101
Şekil 3.6. Fotolitografi yöntemiyle silikon üzerine açılan mikrokanallar.....	105
Şekil 3.7. Fotolitografi yöntemiyle oluşturulan mikrokanallara ait yüzey pürüzlülük ölçümü.....	106
Şekil 3.8. 3D metal yazıcıda lazer atışlarıyla pürüzlülük oluşturma sonuçları .....	107
Şekil 3.9. Fotolitografi ile üretilen silikon mikrokanalların optik mikroskopta alınan profil görüntüleri .....	108
Şekil 3.10. Seçici lazer ergitme yöntemiyle elde edilen kanalların yapısı .....	108

Şekil 3.11. Mikro frezeleme ile üretilen mikrokanallara ait örnek yüzey pürüzlülük ölçümü.....	109
Şekil 3.12. Mikro frezeleme ile üretilen mikrokanalları kesit görüntüleri.....	110
Şekil 3.13. Nano saniye mertebeli lazerlerle üretilen mikrokanalların optik profilometre görüntüleri.....	110
Şekil 3.14. Tel erozyon yöntemiyle üretilen mikokanallara ait örnek optik profilometre görüntüleri.....	111
Şekil 3.15. Dalma erozyonla üretilen mikrokanalların örnek optik profilometre görüntüleri.....	112
Şekil 3.16. Dalma erozyon yöntemiyle üretilen mikrokanalların örnek kesit görüntüleri.....	112
Şekil 3.17. Deneylede kullanılan mikrokanallı ısı alıcılara ait örnek optik profilometre görüntüleri.....	114
Şekil 3.18. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	116
Şekil 3.19. Deney sisteminin laboratuvarından görünümü.....	117
Şekil 3.20. Test bölgesinin detaylı gösterimi.....	118
Şekil 3.21. Deneylede kullanılan ekipmanlar.....	121
Şekil 3.22. Isı kaybı kalibrasyon eğrisi.....	123
Şekil 3.23. Isı transfer katsayısını iteratif olarak hesaplama algoritması.....	126
Şekil 3.24. Tek fazlı bölge basınç düşümünün iteratif çözüm döngüsü.....	129
Şekil 4.1. Akış kaynamada görülen temel akış desenleri ( $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ ): (a) Kabarcıklı akış (b) Tıkaç akış/sınırlandırılmış kabarcıklı akış (c) Çalkantılı akış (d) Halkasal akış.....	134
Şekil 4.2. Tek fazlı buhar akışı ( $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $q_w=150 \text{ kW/m}^2$ , $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ ).....	135
Şekil 4.3. Mikrokanallı ısı alıcılarda görülen çoklu akış desenleri ( $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $q_w=100 \text{ kW/m}^2$ , $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ ): (a) Halkasal akış (b) Tıkaç akış (c) Kabarcıklı akış (d) Tek fazlı buhar akışı.....	135
Şekil 4.4. Periyodik akış rejimi ( $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $q_w=150 \text{ kW/m}^2$ , $D_h=473 \text{ }\mu\text{m}$ ).....	137
Şekil 4.5. $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $q_e=62 \text{ kW/m}^2$ için farklı hidrolik çaplı kanallarda gözlenen akış desenleri: (a) $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ (b) $473 \text{ }\mu\text{m}$ (c) $360 \text{ }\mu\text{m}$ .....	138
Şekil 4.6. $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $q_e=100 \text{ kW/m}^2$ için farklı hidrolik çaplı kanallarda gözlenen akış desenleri (a) $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ , (b) $473 \text{ }\mu\text{m}$ , (c) $360 \text{ }\mu\text{m}$ .....	139
Şekil 4.7 $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $q_e=155 \text{ kW/m}^2$ için farklı hidrolik çaplı kanallarda gözlenen akış desenleri: (a) $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ (b) $473 \text{ }\mu\text{m}$ (c) $360 \text{ }\mu\text{m}$ .....	140

Şekil 4.8. $D_h=547 \mu\text{m}$ kanalda $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için farklı ısı akısı değerlerinde kabarcık oluşumu: (a) $q_w= 40 \text{ kW/m}^2$ (b) $q_w= 45 \text{ kW/m}^2$ (c) $q_w= 50 \text{ kW/m}^2$ .....	141
Şekil 4.9. $D_h=473 \mu\text{m}$ kanalda $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için farklı ısı güç değerleri için tıkaç akış oluşum süresi (a) $Q=70\text{W}$ (b) $60\text{W}$ (c) $50\text{W}$ .....	142
Şekil 4.10. $D_h=473 \mu\text{m}$ kanalda $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için farklı ısı güç değerleri için halka akış-kuruma periyodu: (a) $Q=80\text{W}$ (b) $90\text{W}$ (c) $100\text{W}$ .....	143
Şekil 4.11. $D_h=473 \mu\text{m}$ mikrokanallarda kütleli akının kabarcık oluşumuna etkisi: (a) $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (b) $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (c) $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (d) $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	144
Şekil 4.12. $D_h=473 \mu\text{m}$ mikrokanallarda farklı kütleli akı değerleri için yüzeyden ayrılmadan önceki kabarcık boyutları (a) $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (b) $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (c) $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	145
Şekil 4.13. Kütle akısı, hidrolik çap ve ısı akısına bağlı olarak oluşan akış desenleri. .	146
Şekil 4.14. $D_h=547 \mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanalda $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $G= 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ kütleli akı için, farklı yüzey pürüzlülük değerlerinde kabarcıklanma başlangıcında akış deseni .....	148
Şekil 4.15. $Q=100\text{W}$ ve $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ kütleli akı şartlarında farklı hidrolik çaplı mikrokanallarda yüzey pürüzlülüğünün kabarcıklı kaynamaya etkisi.....	148
Şekil 4.16. Isı transfer katsayısının farklı hidrolik çaplı kanallarda çıkış kuruluk derecesi ile değişimi .....	150
Şekil 4.17. Isı transfer katsayısının farklı hidrolik çaplı kanallarda efektif ısı akısı ile değişimi .....	151
Şekil 4.18. Isı transfer katsayısının farklı ısı güçlerde yerel kuruluk derecesi ile değişimi .....	151
Şekil 4.19. Yerel ısı transfer katsayısının kanal boyunca değişimi.....	153
Şekil 4.20. Yerel ısı transfer katsayısının kanal ortasında ve sonunda ısı akısı ile değişimi .....	154
Şekil 4.21. $D_h=547 \mu\text{m}$ mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ile değişimi .....	155
Şekil 4.22. $D_h=473 \mu\text{m}$ mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ile değişimi. ....	155
Şekil 4.23. $D_h=360 \mu\text{m}$ mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ile değişimi .....	156
Şekil 4.24. $D_h=547 \mu\text{m}$ mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının çıkış kuruluk derecesi ile değişimi.....	156

Şekil 4.25. $D_h=473$ $\mu\text{m}$ mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının çıkış kurulum derecesi ile değişimi.....	157
Şekil 4.26. $D_h=360$ $\mu\text{m}$ mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının çıkış kurulum derecesi ile değişimi.....	157
Şekil 4.27. $D_h=547$ $\mu\text{m}$ mikrokanallarda farklı kütleli akılar için kaynama eğrileri ..	158
Şekil 4.28. $D_h=473$ $\mu\text{m}$ mikrokanallarda farklı kütleli akılar için kaynama eğrileri ..	159
Şekil 4.29. $D_h=547$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=400$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait kaynama eğrileri .....	160
Şekil 4.30. $D_h=547$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=300$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait kaynama eğrileri .....	161
Şekil 4.31. $D_h=547$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=200$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait kaynama eğrileri .....	161
Şekil 4.32. $D_h=547$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=100$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait kaynama eğrileri .....	162
Şekil 4.33. $D_h=547$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=400$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.....	163
Şekil 4.34. $D_h=547$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=300$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.....	163
Şekil 4.35. $D_h=547$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=100$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.....	164
Şekil 4.36. $D_h=473$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=400$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.....	165
Şekil 4.37. $D_h=473$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=300$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.....	165
Şekil 4.38. $D_h=473$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda $G=100$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.....	166
Şekil 4.39. $D_h=547$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda farklı kütleli akı ve ısı güç değerlerinde ısı transfer katsayısının yüzey pürüzlülüğü ile değişimi.....	166
Şekil 4.40. $D_h=473$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda farklı kütleli akı ve ısı güç değerlerinde ısı transfer katsayısının yüzey pürüzlülüğü ile değişimi.....	167
Şekil 4.41. $D_h=473$ $\mu\text{m}$ hidrolik çaplı mikrokanallarda, $G=200$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ kütleli akı için aşırı soğuk ve doymuş kaynamalı akış bölgeleri .....	169
Şekil 4.42. $G=400$ $\text{kg/m}^2\text{s}$ için basınç düşümünün hidrolik çap ile değişimi.....	170

Şekil 4.43. $D_h=473 \mu\text{m}$ çaplı mikrokanallarda basınç düşümünün ısı akısı ve kütle akı ile değişimi. ....	171
Şekil 4.44. $D_h=473 \mu\text{m}$ çaplı mikrokanallarda basınç düşümünün farklı kütle akılar için çıkış kurulum derecesi ile değişimi.....	172
Şekil 4.45. Farklı hidrolik çaplı mikrokanallarda basınç düşümünün farklı çalışma parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü ile değişimi.....	173
Şekil 4.46. Doymuş akış kaynama deneysel ısı transfer katsayısı değerlerinin literatürde mevcut makrokanal bağıntılarının tahmin değerleriyle karşılaştırılması.....	176
Şekil 4.47. Doymuş akış kaynama deneysel ısı transfer katsayısının literatürde mevcut mikrokanal bağıntılarının tahmin değerleriyle karşılaştırılması. ....	178
Şekil 4.48. Farklı kütle akı değerleri için önerilen bağıntı ve literatürde mevcut bağıntılarla tahmin edilen ısı transfer katsayısının ısı akısı ile değişiminin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması: (a) $D_h=547 \mu\text{m}$ (b) $D_h=473 \mu\text{m}$ (c) $D_h=360 \mu\text{m}$ .....	180
Şekil 4.49. Önerilen ısı transfer katsayısı bağıntısıyla yapılan tahminlerin farklı hata band aralıklarında deneysel verilerle karşılaştırılması. ....	184
Şekil 4.50. $G=200$ ve $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ kütle akı değerinde farklı hidrolik çaplı kanallarda efektif ısı akısına bağlı olarak ısı transfer katsayısının deneysel değerleri ve önerilen bağıntı ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması: (a) $D_h=547 \mu\text{m}$ (b) $D_h=473 \mu\text{m}$ (c) $D_h=360 \mu\text{m}$ .....	185
Şekil 4.51. Farklı hidrolik çaplı mikrokanallarda, farklı ısı güç değerlerinde kütle akıya bağlı olarak deneysel ve önerilen bağıntı ile tahmin edilen ısı transfer katsayısı değerleri karşılaştırılması: (a) $D_h=547 \mu\text{m}$ (b) $473 \mu\text{m}$ (c) $360 \mu\text{m}$ .....	187
Şekil 4.52. Farklı ısı güçlerinde hidrolik çapa göre deneysel ve önerilen bağıntı ile tahmin edilen ısı transfer katsayısı değerleri karşılaştırılması .....	188
Şekil 4.53. $D_h=547 \mu\text{m}$ çaplı mikrokanallarda farklı çalışma şartlarında ısı transfer katsayısının pürüzlülükle değişimine ait deneysel sonuçların önerilen bağıntı ile karşılaştırılması .....	189
Şekil 4.54. $D_h=473 \mu\text{m}$ çaplı mikrokanallarda farklı çalışma şartlarında ısı transfer katsayısının pürüzlülükle değişimine ait deneysel sonuçların önerilen bağıntı ile karşılaştırılması. ....	190
Şekil E1.1. Deneysel olarak kullanılan ısı çiftlerinin kalibrasyon eğrileri .....	216

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Farklı soğutma yöntemleri ve akışkanlar için ısı akısı limitleri (Pautsch 2005) .....	3
Çizelge 1.2. Farklı ölçekli kanalların sınıflandırılması (Kandlikar 2002a).....	6
Çizelge 1.3. Farklı ölçekli kanalların sınıflandırılması (Kandlikar and Grande 2003).....	7
Çizelge 1.2. Kaynama ısı transferi ve iki fazlı akış uygulamalarında kullanılan boyutsuz gruplar. ....	10
Çizelge 2.1. $G=200$ kg/m <sup>2</sup> s kütleli akısında oluşan akış desenleri (Mertz et al. 1996)	49
Çizelge 3.1. Yüzey parametreleri .....	103
Çizelge 3.2. Deneysel kullanılan mikrokanallı ısı alıcılarının ölçüleri.....	104
Çizelge 3.3. Mikrokanallı ısı alıcı üretim denemeleri yapılan imalat yöntemlerinin karşılaştırması. ....	113
Çizelge 3.4. Deneysel kullanılan mikrokanallı ısı alıcıların detaylı ortalama yüzey pürüzlülük ve arttırım faktörü ölçüm sonuçları. ....	115
Çizelge 3.5. Deneysel belirsizlikler.....	131
Çizelge 4.1. Seçilen makro bağıntıların tahmin kapasiteleri.....	176
Çizelge 4.2. Seçilen mikro bağıntıların tahmin kapasiteleri .....	179
Çizelge 4.3. Önerilen bağıntının deneysel verileri tahmin kapasitesi .....	183
Çizelge E2.1. Belirsizlik formülleri .....	220
Çizelge E3.1. Akış kaynama ısı transfer katsayısı bağıntıları .....	221

### 1. GİRİŞ

#### 1.1 Mikro Boyutlu Sistemlerde Soğutma Problemi

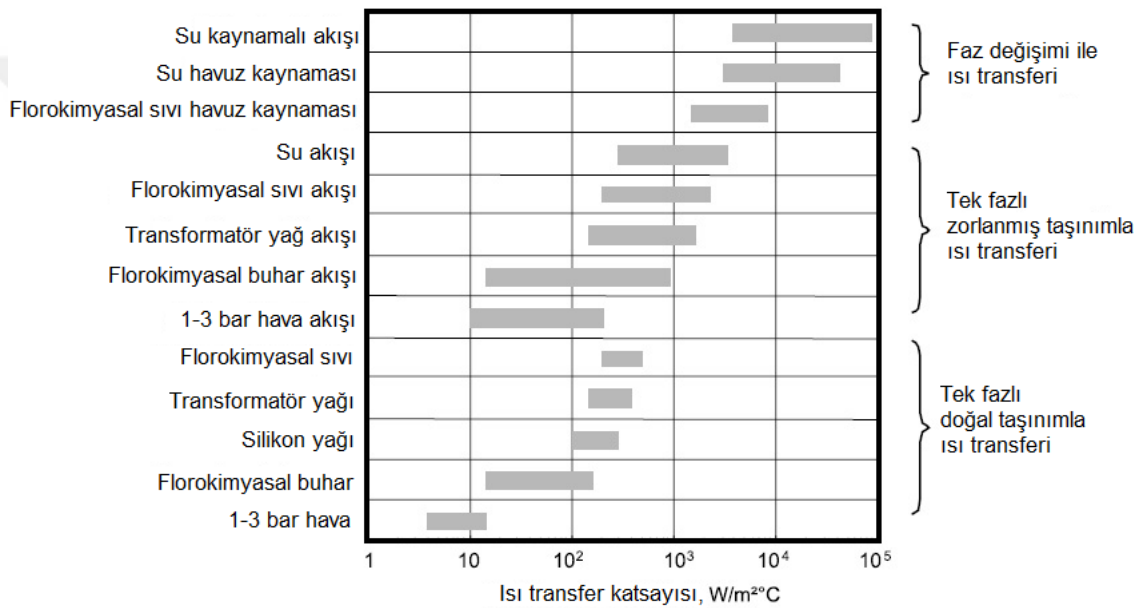
Nobel ödüllü ünlü fizikçi Richard Feynman 1959 yılında yaptığı “There is Plenty of Room at the Bottom” adlı konuşmasında mikro/nano ölçekte üretim ve ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesiyle minyatürize edilmiş yapıların üretilip karakterize edilebileceğini ve bunun birçok yeni keşiflere ve teknolojik gelişmelere yol açabileceğini iddia etmiştir (Feynman 1992). Takip eden yıllarda, malzeme ve üretim teknolojisindeki hızlı ilerlemelerle birlikte 1981’de STM ve 1989’da AFM’nin geliştirilmesi özellikle elektromekanik ve elektronik sistemlerin gittikçe küçülen boyutlarda üretilmesini hızlandırmıştır. Günümüzde, minyatürleşme eğilimi bilgisayar ve cep telefonu gibi elektronik cihazlarda açık bir şekilde görülmektedir. Bu eğilim aynı zamanda cihazların fonksiyonelliğinde de artışı beraberinde getirmiştir. Örneğin bir bilgisayarda aynı anda müzik dinlenebilir, metin yazılabilir, internete bağlanılabilir, kamera kullanılabilir ve bunun gibi birçok işlev aynı anda gerçekleştirilebilir. Elektronik cihazların hem küçülmesi hem de fonksiyonlarının artması söz konusu cihazların birim hacmi başına düşen işlev sayısının üssel olarak artmasına neden olmuştur.

Moore (1965), bir tümleşik devre üzerine yerleştirilen transistör sayısının iki yılda bir iki katına çıkacağını belirtmiştir. Ancak, Moore yasası olarak bilinen bu ifadenin 2010 yılından itibaren güç tüketimine yönelik geçerliliğini yitirmeye başladığı ifade edilmektedir (Dally 2010). Yarıiletkenler için Uluslararası Teknoloji Yol Haritası (ITRS) oluşumu 2010 raporunda, yarım asırdan fazla bir süredir hâkimiyetini sürdüren Moore yasasının 2013 yılı sonuna doğru etkisinin azalacağı ve bunun ardından tümleşik devre üzerine yerleştirilen transistör sayılarının her 3 yılda bir iki katına çıkacağını öne sürmüştür. Krishnan et al. (2007) transistör yoğunluğunun neden olduğu mikroişlemci güç artış eğilimini karşılayacak yüksek performansa sahip ısı yönetim sistemlerinin bulunamamasının elektronik cihazlardan olan ısı transferini sınırladığını belirtmişlerdir. Moore yasasında meydana gelen bu değişiklik, mevcut soğutma sistemlerinin ısı atım kapasitelerinin yetersizliğinin açık bir göstergesidir.

Mikro elektromekanik (MEMS) sistemler üzerine daha fazla transistör yerleştirmek sistem performansını genellikle artırır. Diğer yandan, ilave edilen her bir

## 1. GİRİŞ

transistör daha fazla ısı üretimine neden olur. Bilgisayar çiplerinde ortalama ısı akısının 2-4.5 MW/m<sup>2</sup>'ye ulaşması beklenirken yerel kızgın noktalarda bu değer 12-45 MW/m<sup>2</sup> olması öngörülmektedir (Karayiannis and Mahmoud 2017). Füzyon reaktörleri, lazer diyotları, radar cihazları ve askeri avionik sistemler gibi uygulamalarda 10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> MW/m<sup>2</sup> mertebesinde çok yüksek ısı akısı değerlerine ulaşılacağı rapor edilmiştir (Kadam and Kumar 2014). Günden güne daha kompakt hale gelen modern elektronik sistemlerden olan ısı üretiminin artmaya devam etmesi daha yüksek ısı akılarında ısı atımı ihtiyacına yol açmıştır. Şekil 1.1'de farklı soğutucu akışkanlar ve soğutma teknikleri ile ulaşılabilen ısı transfer katsayısı aralıkları verilmiştir (Lin et al. 2002).



Şekil 1.1. Farklı soğutucu akışkanlar ve ısı transfer mekanizmaları için ısı transfer katsayısı aralıkları (Lin et al. 2002).

En yüksek ısı transfer katsayısı değerlerine faz değişimi ile gerçekleşen ısı transfer mekanizmasında ulaşıldığı görülmektedir. Soğutucu akışkanın su olduğu akış kaynama sistemlerinde 10<sup>5</sup> W/m<sup>2</sup>°C mertebelerinde ısı transfer katsayılarına ulaşmak mümkündür. Florokimyasal grubu olarak bilinen inert akışkanlar sıvı kromatografî, elektronik bileşenlerin sızıntı ve ısıl şok testleri ve yüksek ısı akılı cihazların soğutulması gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir (Mudawar 2001). İki fazlı akış uygulamalarında en çok kullanılan florokimyasal akışkanlar FC-72, FC-87, FC-77, PF-5052'dir. Floro grubu akışkanların en büyük dezavantajı suya kıyasla atmosferik basınçta düşük özgül ısıya ve buharlaşma entalpisine sahip olmalarıdır. Tek fazlı doğal taşınım düşük ısı transfer katsayısı değerlerine sahip olmasına rağmen maliyeti az ve güvenilir olmasından dolayı

## 1. GİRİŞ

düşük ısı atımı gerektiren uygulamalar için tercih edilebilir. Duyulur enerjinin kullanıldığı tek fazlı zorlanmış taşınım mekanizmasında, fan veya pompa kullanımı ek maliyet getirmesine karşın doğal taşınımına göre daha yüksek ısı transfer katsayılarına ulaşmak mümkündür. Hava, soğutma uygulamalarında özellikle de bilgisayar sistemlerindeki elektronik elemanların soğutulmasında yaygın olarak kullanılan ekonomik bir soğutucu akışkan olmasına rağmen düşük ısıl aktarım özelliklerinden dolayı soğutma potansiyeli düşüktür ve kullanımı düşük ısı akısına sahip cihazlarla sınırlıdır. Çizelge 1.1’de farklı CPU soğutma konfigürasyonları ile elde edilebilecek ısı akısı değerleri gösterilmiştir (Pautsch 2005). Tablo 1.1’e göre, zorlanmış hava akışı ve ısı alıcı birleşimi ile ancak  $200 \text{ kW/m}^2$  mertebelerine kadar ısı akısı değerlerine ulaşabilmektedir. Doğal ve zorlanmış taşınımlı hava soğutma sistemlerinin, günümüzdeki mevcut yüksek ısı akısı uygulamaları için yetersiz kaldığı açıkça görülmektedir.

Çizelge 1.1. Farklı soğutma yöntemleri ve akışkanlar için ısı akısı limitleri (Pautsch 2005).

Akışkan tipi	Hava		Florokimyasal grubu			Su		
	Doğal Taşınım	Zorlanmış Taşınım+ısı alıcı	Havuz Kaynama	Sprey Soğutma	Akış Kaynama	Akış Kaynama	Çarpan Jet	Sprey Soğutma
Isı akısı ( $\text{kW/m}^2$ )	0,1-10	1-200	10-500	100-1500	100-1000	1000-10000	10000-1000000	1000-10000

MEMS’lerin küçük yapıda olması nedeniyle yüksek ısı akılarına maruz kalmaları, performans kaybı oluşmadan çalışması için cihazda minimum sıcaklık gradyeninin sağlanması gerekliliği ve güvenli bir maksimum çalışma sıcaklığının altında tutulma zorunluluğu yeni ısıl yönetim sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. MEMS’lerde gelişmiş soğutma teknolojilerine olan bu ihtiyaç, sürekli olarak yeni soğutma tekniklerinin araştırılmasını teşvik etmiştir. Bu noktada, mikrokanallı ısı alıcılar yüksek ısı atımı potansiyeline sahip etkili yöntemlerden biri olarak görülmektedir. Mikrokanallı ısı alıcı basitçe bir plaka veya alttaş üzerine açılmış ve kanatçıklarla birbirinden ayrılmış paralel küçük kanallardan oluşan bir mikro ısı değiştirici olarak düşünülebilir. Mikro ısıl sistemler çok yüksek yüzey alan/hacim oranına sahip olmaları, yüksek hızda momentum, ısı ve kütle aktarımını gerçekleştirebilmeleri, hafif olmaları, daha az yer kaplamaları, daha az soğutucu akışkan gerektirmeleri gibi birçok üstünlüğü

## 1. GİRİŞ

---

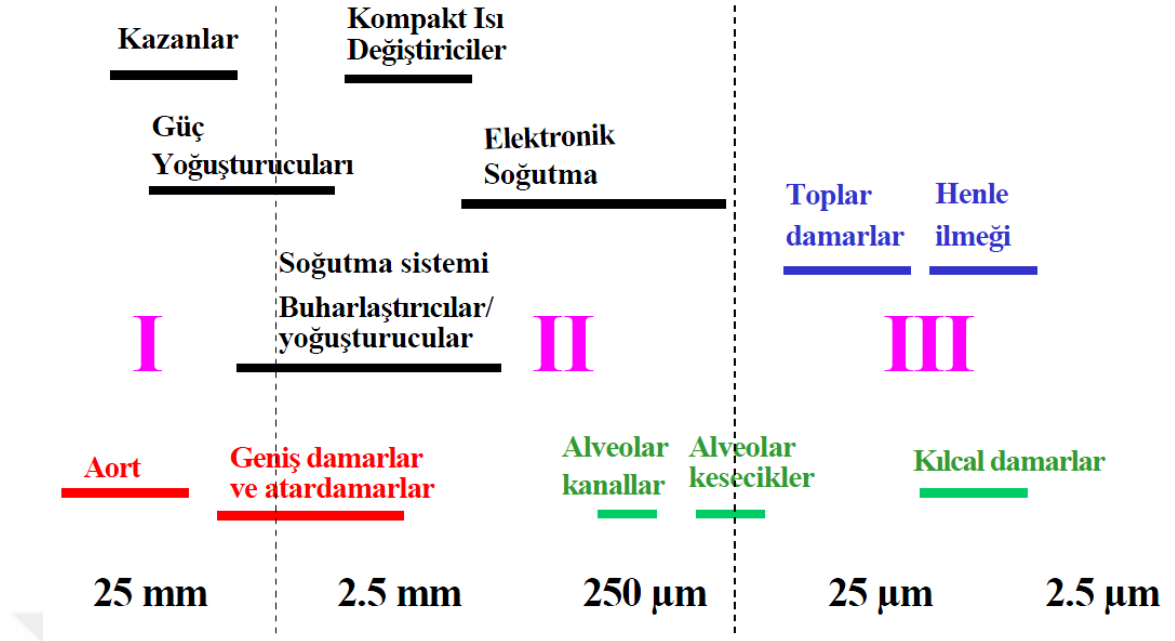
bünyesinde barındırdığından yüksek performanslı ısı yönetim sistemi olarak gelecek vadetmektedir.

Literatürde mikrokanallı ısı alıcıların tarihi 1981 yılında Tuckerman ve Pease (1981)'in yaptığı öncü çalışmaya dayandırılabilir. Tuckerman ve Pease (1981) 10 mm×10 mm boyutlarındaki silikon alttaş üzerine KOH kimyasal aşındırma tekniğini kullanarak 50 µm genişliğinde ve 300 µm derinliğinde 50 µm aralıklarla paralel mikrokanallar açmışlardır. Deneyle su ile laminar akış koşullarında gerçekleştirilmiş olup maksimum 790 W/cm<sup>2</sup> ısı akısına ulaşılmıştır. Bu, Keyes (1975) tarafından makro ölçekli kanallarda elde edilen 20 W/cm<sup>2</sup> değerinden oldukça yüksektir. Bu durum, araştırmacıların mikro boyutlu soğutma sistemlerinin potansiyelini fark etmelerini sağlamıştır. Mikrokanallarda tek fazlı akışta elde edilen yüksek ısı akısı değerleri takip eden yıllarda yüksek güç yoğunluğunun olduğu sistemlerin soğutulmasını sağlamak için geleneksel makro ölçekteki soğutma tekniklerine alternatif olarak mikrokanallarda tek fazlı ve çift fazlı akışın temel davranışını anlamaya yönelik çok sayıda çalışmalar yapılmasının önünü açmıştır.

### 1.2. Kanalların Sınıflandırılması

Uygulamada, nano ölçekteki kanallardan metre mertebesindeki kanallara kadar geniş bir boyut aralığında momentum, ısı ve kütle aktarım prosesleri gerçekleştirilebilir. Şekil 1.2, çeşitli sistemlerde karşılaşılan kanal boyutlarını göstermektedir. Nano mertebesindeki kanallar kütle transferinin önemli olduğu biyolojik sistemlerde yaygın olarak kullanılır ve biyolojik kanallar olarak da adlandırılırlar (Kandlikar et al. 2014). Isı transferi ve akışkanlar mekaniği uygulamaları açısından düşünüldüğünde, kanal çaplarının 25-30 mm'den daha küçük boyutlara doğru kaydığı söylenebilir. Boyutları mikronlarla ifade edilebilecek kanalların mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanması mikro ölçek adı altında bir sınıflandırma ortaya çıkarmıştır.

## 1. GİRİŞ



Şekil 1.2. Çeşitli uygulamalarda kullanılan kanal boyutları (Kandlikar and Steinke 2003).

Literatürde, kanalların sınıflandırılması ile ilgili genel kabul görmüş bir tanımlama olmamakla beraber, mühendislik uygulamalarına bağlı olarak çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Kanal içinde gerçekleşen prosesin karakterine göre farklı ölçeklerdeki kanallar arasında geçiş için birtakım kriterler geliştirmek daha doğru bir yaklaşım olsa da uygulamada karşılaşılan prosesler ve bu prosesleri etkileyen parametrelerin çokluğu göz önüne alındığında bu yaklaşımın pratik açıdan uygulanabilirliği ve genel olarak kabul edilebilirliği tartışılabilir. Bunun yerine literatürde, kanal boyutlarının sınıflandırılması ve ölçekler arasındaki geçişleri belirlemek için prosesin karakterinden tamamen bağımsız boyutsal bir kriter olarak çoğunlukla hidrolik çap kullanılmıştır (Kandlikar et al. 2014).

Makro ve mikro ölçekler arasındaki ilk ayırım Shah (1986) tarafından alan yoğunluğuna bağlı olarak ısı değiştiricilerin sınıflandırılmasıyla yapılmıştır. Alan yoğunluğu, bir ısı değiştiricinin ısı transfer yüzey alanının hacmine oranını ifade eder ve birimi  $m^2/m^3$  olup genellikle  $\beta$  ile gösterilir. Shah (1986),  $\beta > 700 m^2/m^3$  olan ısı değiştiricileri kompakt ısı değiştiriciler olarak sınıflandırmıştır. Bu, bir ısı değiştiricinin kompakt sınıfında yer alması için hidrolik çapının 6 mm'den küçük olmasını gerektirir. Mehendale et al. (2000) bu sınıflandırmayı genişletmiş ve farklı ölçekler arasındaki geçişleri hidrolik çap cinsinden ifade etmiştir. Hidrolik çapın 1-100 µm aralığında olduğu

## 1. GİRİŞ

ısı değiştiricileri mikro ısı değiştiriciler olarak sınıflandırmışlardır. 100 µm-1 mm hidroluk çaplı ısı değiştiriciler meso ısı değiştiriciler olarak kategorize edilmiş olup, hidroluk çapın 1-6 mm aralığında olduğu ısı değiştiriciler kompakt olarak sınıflandırılmıştır. 6 mm'den büyük hidroluk çapa sahip ısı değiştiriciler konvansiyonel ısı değiştiriciler olarak adlandırılmıştır. Yapılan bu sınıflandırma sadece kanalın boyutlarına dayanmaktadır.

Makro ölçekten mini ve mikro ölçekli sistemlere geçilmesinin önünü açan etkenlerden en önemlisi mikro sistemlerin üretim yöntemlerindeki teknolojik gelişmeler olduğu söylenbilir. Özellikle, optik litografi, mikro mekanik işleme, mikro yüzey işleme, lazerli mikro işleme gibi üretim yöntemlerindeki gelişmeler çok fonksiyonlu kompleks mikro boyutlu ısı transferi sistemlerinin yüksek hassasiyetle üretilmesini olanaklı hale getirmiştir. Kandlikar (2002a), mikroelekromekanik sistemler, ısı değiştiricileri, ısı alıcıları gibi minyatrleşmenin önemli olduğu mühendislik uygulamalarındaki küçük sistemlerin üretiminde kullanılan tekniklerinin limitlerini de göz önünde bulundurarak hidroluk çapa göre kanalları izelge 1.2'deki gibi sınıflandırmıştır.

Çizelge 1.2. Farklı lekli kanalların sınıflandırılması (Kandlikar 2002a).

Sınıflandırma	Hidroluk ap, $D_h$
Makrokanallar	> 3 mm
Minikanallar	3mm -200 µm
Mikrokanallar	200 µm-10 µm

Kandlikar and Grande (2003) izelge 1.2'deki sınıflandırmayı genişleterek, mikrokanallardan nanokanallara geçiş ve moleküler nanokanallar adı altında iki yeni kategori eklemişlerdir. Araştırmacılar, gazların moleküler ortalama serbest yoluna bağlı olarak seyrelme etkisini gösteren Knudsen sayısına göre sınıflandırma yapmışlardır. Knudsen sayısı:

$$Kn = \frac{\lambda}{D_h} \quad (1.1)$$

şeklinde tanılanır. Burada  $\lambda$  moleküler ortalama serbest yol olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

## 1. GİRİŞ

$$\lambda = \frac{\mu\sqrt{\pi}}{\rho\sqrt{2RT}} \quad (1.2)$$

burada  $\mu$  gazın dinamik vizkozitesi,  $\rho$  gazın yoğunluğu,  $R$  gaz sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır. Sürekli ortam yaklaşımının kaymamazlık şartında düzenleme yapılmasıyla geçerli olduğu kayma bölgesi olarak adlandırılan  $0,1 < Kn < 0,001$  aralığındaki kanallar mikrokanallar olarak sınıflandırılmıştır. Seyrelme etkilerinin önemli hale geldiği ve moleküler akış koşullarına yaklaşıldığı  $10 > Kn \geq 0,1$  aralığı geçiş bölgesi, daha büyük  $Kn$  sayısına karşılık genel kanallar nanokanallar olarak sınıflandırılmıştır.  $Kn$  sayısına göre yapılan bu sınıflandırmanın hidrolik çap karşılıkları araştırmacılar tarafından Çizelge 1.3'teki gibi verilmiştir.

Çizelge 1.3. Farklı ölçekli kanalların sınıflandırılması (Kandlikar and Grande 2003).

Sınıflandırma	Kriter
Makrokanallar	$D_h > 3 \text{ mm}$
Minikanallar	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \text{ } \mu\text{m}$
Mikrokanallar	$200 \text{ } \mu\text{m} \geq D_h > 10 \text{ } \mu\text{m}$
Geçiş Mikrokanallar	$10 \text{ } \mu\text{m} \geq D_h > 1 \text{ } \mu\text{m}$
Geçiş Nanokanallar	$1 \text{ } \mu\text{m} \geq D_h > 0.1 \text{ } \mu\text{m}$
Moleküler Nanokanallar	$0.1 \text{ } \mu\text{m} \geq D_h$

Kandlikar and Grande (2003) tarafından yapılan sınıflandırma gaz akış koşulları dikkate alınarak yapılırsa da literatürde kanalların sınıflandırmasında bir yeknesaklık sağlamak amacıyla çoğu araştırmacı tarafından bu aralıklar sıvı akışlar, tek fazlı ve çift fazlı akışlar da dâhil olmak üzere sıklıkla kullanılmaktadır.

Yukarıda belirtilen sınıflandırmaların kaynama prosesinin kendine özgü fiziksel mekanizmasını dikkate almadığı, iki fazlı akış etkilerini ve farklı akışkan davranışlarını içermediği için bu çalışmanın da konusu olan mikrokanallarda akış kaynama olayında geçerli olup olmadığı sorgulanabilir (Karayiannis and Mahmoud 2017). Çünkü, mikrokanallarda kabarcık oluşumu kanal boyutları tarafından sınırlandırıldığı için makro boyuttaki kanallardan farklı olarak kaynama sırasında farklı akış desenleri görülür. Ayrıca, kanal boyutları çok küçük olduğundan mikrokanallarda iki fazlı akışta yerçekimi

önemsiz hale gelirken yüzey gerilim kuvvetleri önem kazanmaktadır. Sonuç olarak, mikrokannallarda akış kaynama prosesinde makro ölçekten mikro ölçeğe geçiş için araştırmacılar tarafından farklı kriterler geliştirilmiştir. Bu kriterler ve sınıflandırmalar Bölüm 2.1’de sunulacaktır.

### 1.3. Kaynama ile Isı Transferi

Literatürde çok çeşitli tanımları bulunan kaynama, en temel biçimde, ısı transferi etkisiyle sıvı fazdaki bir akışkanın gaz fazına dönüştüğü fiziksel bir değişim süreci olarak tanımlanabilir. Bu tanımdan, kaynamanın faz değişimiyle ortaya çıkan bir ısı transfer modu olduğu söylenebilir. Bazı araştırmacılar, akışkan hareketi içermesinden dolayı kaynama olayını taşınım ile ısı transfer mekanizmasının faz değişimiyle ilgili olan bir türü olarak değerlendirmişlerdir (Holman 2010; Incropera et al. 2011; Cengel and Ghajar 2015). Buna rağmen kaynama tek fazlı taşınım mekanizmasından oldukça farklı kendine has birtakım özelliklere sahiptir. Sabit sıcaklıkta gerçekte kaynama prosesinde enerji aktarımı esas olarak akışkanın buharlaşma gizli ısısının soğurulmasıyla gerçekte kaynama sırasında özellikle kabarcık oluşumunda önemli olan bir özellikte sıvı-buhar ara yüzeyindeki yüzey gerilmesidir. Ayrıca, akışkanın sıvı ve buhar fazları arasındaki yoğunluk farkı nedeniyle oluşan kaldırma kuvvetleri yüzeyde oluşan kabarcıkların yukarı doğru hareket etmesini sağlayarak ısı enerjisinin düşük sıcaklıktaki sıvıya aktarımında önemli rol oynar. Dolayısıyla, kaldırma kuvvetleri ile desteklenen kabarcık ve sıvı hareketleri ve ısı aktarımında gizli ısının kullanımı nedeniyle kaynamada görülen ısı transfer katsayısı değerleri faz değişiminin olmadığı tek fazlı sistemlerde elde edilen değerlerden çok daha yüksek olmaktadır.

Kaynama akışkan hareketinin varlığına göre iki şekilde sınıflandırılır. Havuz kaynama, başlangıçta durgun olan akışkanın ısıtılması sonucu meydana gelen kaynama modudur. Gündelik hayatta sıkça tecrübe ettiğimiz, bir tencere veya su ısıtıcısına konulan suyun alt yüzeyinden veya bir rezistans vasıtasıyla kaynatılması havuz kaynamaya örnek olarak verilebilir. Akış kaynama/kaynamalı akışta ise kaynama hareketli bir akışkan içinde oluşur. Bu kaynama modu zorlanmış taşınımlı kaynama olarak da isimlendirilir. Yüzeyleri ısıtılan bir kanaldan akan akışkanın kaynaması örnek olarak verilebilir. Havuz kaynamada, akışkan hareketi doğal taşınım akımları ve kabarcığın kaldırma kuvveti

## 1. GİRİŞ

---

etkisiyle ısıtılan yüzeyden ayrılması ile gerçekleşir. Akış kaynamada ise akışkan hareketi kaldırma kuvvetlerinin yanı sıra pompa gibi harici bir kaynak ile sağlanan akışkanın kitlesel hareketinden kaynaklanır. Her iki tip kaynama çeşidi, sıvının yığın sıcaklığına göre aşırı soğutulmuş ve doymuş şeklinde alt sınıflara ayrılabilir. Aşırı soğutulmuş kaynamada sıvının yığın sıcaklığı, doyma sıcaklığının altındadır. Isıtılan yüzeyde oluşan kabarcıklar, yüzeyden ayrıldıktan sonra ısı enerjisini doyma sıcaklığının altındaki akışkana aktarması sonucu sıvı içinde yoğunlaşarak sönerler. Kaynama ısıtılan yüzeye yakın sınırlı bir bölgede gerçekleştiğinden bu tip kaynama ayrıca bölgesel kaynama olarak da adlandırılır. Doymuş kaynamada ise, sıvının yığın sıcaklığı doyma sıcaklığında olup ısıtılan yüzeyde oluşan ve kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle yüzeyden ayrılan kabarcıklar sıvı hacmi boyunca yukarıya doğru hareket eder ve serbest yüzeye ulaşırlar. Kaynamanın tüm sıvı hacminde meydana gelmesi ve kabarcıkların sıvının tamamında görülebilmesinden dolayı bu kaynama tipi literatürde yığın kaynama olarak da isimlendirilir.

Günümüzde ısı sistemlerinin tasarımında kaynama prosesi önemli bir yere sahiptir. Kaynama prosesi, yüksek ısı transfer hızlarının elde edilmesi nedeniyle nükleer reaktörler, soğutma ve iklimlendirme sistemleri, ısı pompaları, güç santralleri, elektronik sistemlerin soğutulması gibi birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak karşımıza çıkar. Bu tip sistemlerin etkin bir şekilde tasarımının yapılabilmesi, kaynamaya özgü kabarcık oluşumu, akış desenleri, kritik ısı akısı, akış kararsızlıkları gibi konuların iyi bir biçimde anlaşılmasını gerektirir. Diğer yandan, 1934'te Nukiyama'nın yaptığı öncü havuz kaynama deneylerinden itibaren kaynama olayının mekanizmalarını ve davranışlarını açığa çıkarmak için çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen bu konuda literatürde tam bir bütünlük sağlanamamıştır. Elde edilen sonuçlar, kaynama olayını açıklığa kavuşturma ve kaynama ısı transferi ile ilgili deneysel verileri ilişkilendirmede yeterli değildir. Kaynama sırasında farklı akış biçimlerinde elde edilen ısı transfer hızlarını belirlemek için halen ampirik ve yarı-ampirik bağıntılar kullanılmaktadır (Cengel and Ghajar 2015).

Kaynama olayının karmaşıklığı, proses sırasında meydana gelen akışkan hareketini ve ısı aktarımını tanımlamak için korunum denklemlerinin oluşturulmasını ve çözümünü imkansı hale getirmiştir (Incropera et al. 2011). Bu durum, söz konusu proses

## 1. GİRİŞ

sırasında görülen farklı kaynama mekanizmalarını tanımlamak ve deneysel verileri temsil eden ampirik ifadeler oluşturmak için boyut analizi yapılmasını zorunlu kılmıştır.

### 1.4. Kaynamada Kullanılan Boyutsuz Sayılar

Boyutsuz gruplar, farklı çalışma koşulları altında, farklı akışkanlar için geçerli olan sistem değişkenleri arasındaki temel ilişkileri ortaya koymada oldukça faydalıdır. Bu grupların çoğu deneysel veriler baz alınarak çoğunlukla ampirik olarak türetilmiştir. Kaynama olayında etkin kuvvetler ve bu kuvvetlerin etkileşimini dikkate alarak oluşturulan boyutsuz sayılar, olayın fiziksel yapısını anlamada önemli bir bakış açısı sağlamaktadır. Kaynama ısı transferi ve iki fazlı akışlarda türetilmiş bazı boyutsuz sayılar Çizelge 1.4’te özetlenmiştir.

Çizelge 1.4. Kaynama ısı transferi ve iki fazlı akış uygulamalarında kullanılan boyutsuz gruplar.

Boyutsuz grup	Formül	Fiziksel anlamı
Weber sayısı, We	$We = \frac{\rho_v V^2 L}{\sigma}$	Atalet kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine oranını temsil eder. Kanal akışlarında $L$ yerine $D_h$ kullanılır.
Jakob sayısı, Ja	$Ja = \frac{\rho_l c_{p,l} \Delta T}{\rho_v h_{fg}}$	Belirli bir hacimdeki sıvının $\Delta T$ ( $T_{doy}-T_s$ ) sıcaklık farkından doyma sıcaklığına ulaşırken gerekli duyulan ısı, aynı hacimdeki buharın buharlaştırılması için gerekli gizli ısıya oranını temsil eder.
Bond sayısı, Bo	$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_g) D^2}{\sigma}$	Kaldırma kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine oranıdır.
Eötves sayısı, Eo	$Eo = \frac{g(\rho_l - \rho_v) L^2}{\sigma}$	Bond sayısına benzer bir boyutsuz sayıdır. Farklı karakteristik boyut için $D$ yerine $L$ uzunluğunun kullanılmasıdır.
Kılcallık sayısı, Ca	$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	Sıvı-buhar arayüzeyi boyunca etki eden viskoz kuvvetlerin yüzey gerilme kuvvetlerine oranını temsil eder.
Kaynama sayısı, Bo	$Bo = \frac{q''}{\rho_g V h_{fg}}$	Isıtılan yüzeydeki buharlaşma hızının yüzeye paralel akış hızına oranıdır. Isı akısının, kütle akısı ve gizli ısı ile boyutsuzlaştırılması ile elde edilmiş olup herhangi bir fiziksel temele dayanmamaktadır.
Euler sayısı, Eu	$Eu = \frac{g \Delta p}{\rho V^2}$	Basınç kuvvetinin atalet kuvvetine oranıdır.

## 1. GİRİŞ

Çizelge 1.4. (devam)

Froud sayısı, Fr	$Fr = \frac{V^2}{gD}$	Atalet kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetlerine oranıdır.
Kaynama Reynolds sayısı veya kabarcık Reynolds sayısı, $Re_b$	$Re_b = \frac{\rho_v V_b D_b}{\mu_l}$	Kabarcık atalet kuvvetinin sıvı viskoz kuvvetine oranıdır. Kabarcık hareketi nedeniyle sıvıda oluşan çalkantı şiddetini gösterir.
Prandtl sayısı, Pr	$Pr = \frac{c_p \mu}{k}$	Kinematik viskozitenin ısı yayılım katsayısına oranıdır.
Kaynama Nusselt sayısı, $Nu_b$	$Nu_b = \frac{\delta q''}{k_l (T_{doy} - T_w)}$	Kaynama ısı transferinin sıvı film tabakası boyunca gerçekleşen ısı iletimine oranıdır.
Martinelli parametresi, X	$X^2 = \frac{\left( \left  \frac{dp}{dz} \right _F \right)_l}{\left( \left  \frac{dp}{dz} \right _F \right)_g}$	Sıvı ve gaz akışındaki sürtünme kaynaklı basınç düşümü oranıdır.
Taşınım sayısı, Co	$Co = \left[ \frac{1-x}{x} \right]^{0.9} \left[ \frac{\rho_G}{\rho_L} \right]^{0.5}$	Kaynamalı akış verilerini ilişkilendirmede kullanılan değiştirilmiş bir Martinelli parametresidir.
Laplace sayısı (Suratman sayısı), La (Su)	$La = Su = \frac{Re^2}{We} = \frac{g_c \sigma}{\mu_l V_b}$	Kabarcık yüzey geriliminin kabarcık hareketinden dolayı oluşan kabarcık yüzeyindeki viskoz kayma kuvvetlere oranıdır.
Aşırı kızdırma oranı, Sr	$Sr = \frac{c_l (T_w - T_{doy})}{h_{fg}}$	Isıtılan yüzeydeki sıvı aşırı kızdırmanın buharlaşma gizli ısısına oranıdır. Tek fazlı akıştaki Stanton sayısının eşdeğeri.
Küresel modül, So	$So = \frac{k_g (T_w - T_{doy}) / \delta}{h_{fg} \rho_g V_g}$	Buhar film tabakasındaki iletim ısı akısının buharlaşma ısı akısına oranıdır. $\delta$ buhar filminin kalınlığıdır.
Kaldırma modülü, Bu	$Bu = \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l}$	Sıvı ve buhar fazı arasındaki yoğunluk farkının sıvı yoğunluğuna oranıdır.
Kandlikar boyutsuz sayısı 1, $K_1$	$K_1 = \left( \frac{q''}{G h_{fg}} \right)^2 \frac{\rho_l}{\rho_g}$	Sıvı-buhar arayüzeyinde buharlaşma momentum kuvvetlerinin atalet kuvvetlerine oranıdır.
Kandlikar boyutsuz sayısı 2, $K_2$	$K_2 = \left( \frac{q''}{h_{fg}} \right)^2 \frac{D}{\rho_g \sigma}$	Sıvı-buhar arayüzeyinde buharlaşma momentum kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine oranıdır.

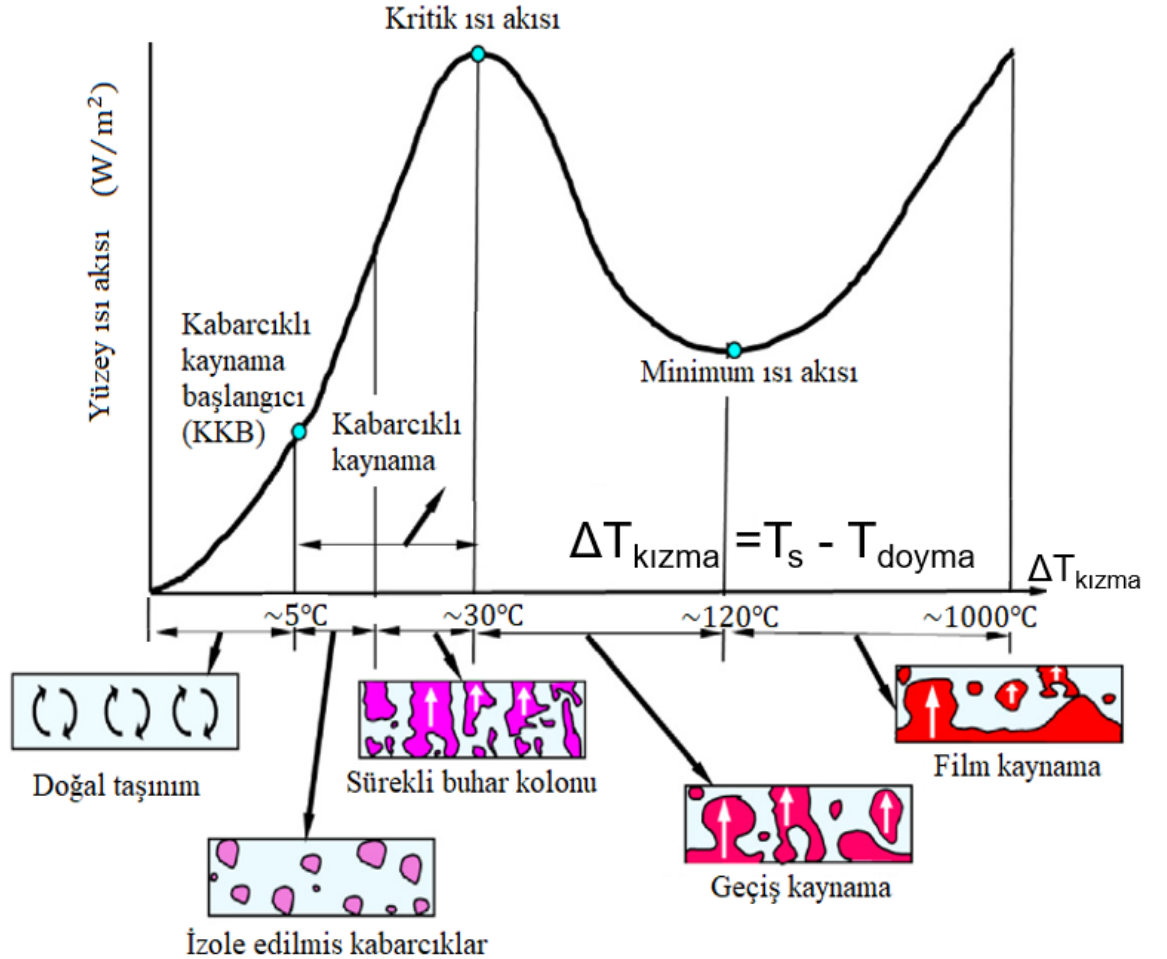
### 1.5. Kaynama Eğrisi ve Kaynama Rejimleri

Kaynama ısı transferi ile ilgili ilk önemli çalışma Nukiyama (1934) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, 1 atm basınçta doyma sıcaklığındaki su, nikrom ve platin teller kullanılarak ısıtılmıştır. Nukiyama, ısıtıcı yüzeyinden suya olan kaynama ısı transfer

## 1. GİRİŞ

hızını yüzey sıcaklığı ile doyma sıcaklığının farkı olarak ifade edilen kızma sıcaklığı ile ( $\Delta T_{kızma}$ ) ilişkilendirmiş ve kaynama sırasında gözlemediği farklı kaynama rejimlerini kaynama eğrisi olarak bilinen  $Q - \Delta T_{kızma}$  grafiği üzerinde göstermiştir.

Kaynama sırasındaki ısıl karakteristikleri etkilediğinden özgün akış desenleri ile birbirinden ayrılan kaynama rejimlerinin tespiti oldukça önemlidir. İki fazlı akışlarda, akış desenleri temel olarak kabarcık dağılımları ve biçimleri ile sınıflandırılır. Kaynama olayında görülen farklı akış desenleri, ısıtılan yüzey civarında hidrodinamik koşullar üzerinde farklı etkiler oluşturarak farklı ısı transferi, basınç düşüşleri ve kaynama krizleri oluşturur (Tong and Tang 1997). Şekil 1.3'te 1 atm basınçta suya ait tipik havuz kaynama eğrisi ve akış desenleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3. 1 atm basınçta su için tipik havuz kaynama eğrisi (Monde 2017).

## 1. GİRİŞ

---

Kaynama eğrisi üzerindeki, kabarcıklı kaynamanın başlangıcı, kritik ısı akısı ve minimum ısı akısı noktaları kaynama olayını karakterize eden önemli noktalardır. Kaynama eğrisi kaynama rejimlerine bağlı olarak doğal taşınım, kabarcıklı kaynama, geçiş kaynama ve film kaynama olmak üzere dört farklı bölgeye ayrılabilir. Doğal taşınım bölgesi, kızma farkının yaklaşık 5°C değerlerine kadar görülür. Bu bölgede ısıtılan yüzeyde kabarcık oluşumu yoktur ve akışkan hareketi doğal taşınım akımlarıyla gerçekleşir. Küçük kızma farkı değerlerinde, ısıtılan yüzeye temas eden kızgın sıvı yoğunluk farkı nedeniyle buharlaşmanın olduğu serbest yüzeye doğru yükselir ve ısı aktarımı gerçekleştirilmiş olur. Bu bölgede ısı transferi mekanizması doğal taşınımdır. Kabarcık oluşumunu başlatmak için yüzey sıcaklığı, doyma sıcaklığından yeterince yüksek olmalıdır. Kızma farkının belli bir değerinde ısıtılan yüzeydeki pürüzlülük ve çizik kaynaklı boşluklar kabarcık çekirdeklenmesi için uygun odak bölgelerini oluştururlar. Buhar kabarcıklarının oluşumu kabarcıklı kaynama başlangıcı (KKB) noktası ile tanımlanır. KKB noktası, ısı transferi mekanizmasının tek fazlı doğal taşınım mekanizmasından kabarcık oluşumu ve taşınımın birlikte etkili olduğu iki fazlı akış ısı transfer mekanizmasına geçiş noktasını temsil eder. KKB noktasından kritik ısı akısının görüldüğü noktaya kadar olan kısım kabarcıklı kaynama bölgesi olarak adlandırılır ve bu kaynama rejiminde kızma farkı 5°C-30°C değerleri arasındadır. Kabarcıklı kaynama bölgesi iki alt bölgede incelenebilir. Kızma sıcaklığının 5-10 °C olduğu bölgede, ısıtılan yüzeydeki kabarcıklanma yerlerinde ayrık kabarcıklar oluşarak yüzeyden ayrılırlar. Yüzeyden ayrılan bu kabarcıklar yükselirken çok küçük olmalarından dolayı sıvı içinde yoğunlaşarak sönerler. Yüzeyden ayrılan kabarcıkların yerini yüzey civarındaki sıvı doldurur ve bu süreç tekrarlanır. Bu durum, yüzeye yakın bölgedeki akışkanın karışmasına ve çalkalanmasına yol açarak ısı transfer katsayısı ve ısı akısının artışına neden olur. Kızma farkının artmasıyla, ısıtılan yüzeyde çok sayıda kabarcıklanma bölgesi aktif hale gelir. Kabarcık oluşum frekansının artması kabarcıklar arası etkileşimi tetikler ve kabarcıkların birleşmesine yol açar. Birleşen kabarcıklar sıvı içerisinde çok sayıda buhar kolonu oluştururlar. Kızma farkının 10-30 °C olduğu bu kabarcıklı kaynama alt bölgesinde, buhar kolonları halinde sıvı serbest yüzeyine ulaşan kabarcıklar burada patlayarak enerji içeriklerini bırakırlar. Sıvı sürüklenmesi ve buharlaşmanın birleşik etkisi bu bölgede yüksek ısı akılarının ve ısı transfer katsayılarının elde edilmesini sağlar (Cengel and Ghajar 2015). Belli bir kızma farkından sonra kabarcıklar arasındaki etkileşim sıvının yüzey civarındaki hareketini engeller ve kaynama eğrisinin davranışında bir değişme gözlenir (Incropera et al. 2011). Bu noktadan sonra kızma farkındaki artışa

## 1. GİRİŞ

---

karşın ısı akısındaki artış daha yavaş gerçekleşir. Bu değişim ısı transfer katsayısında azalmaya neden olur. Yüksek kızma farkı değerlerinde yüzeydeki kabarcık popülasyonu öyle artar ki, sıvının yüzeye ulaşmasını engelleyecek şekilde kabarcıklarla kaplanmasına neden olabilir. Böylece ısıtma yüzeyini kaplayan kabarcıklar bir yalıtım oluşturarak yüzeyden gerçekleşen ısı transferini önler. Sonuç olarak kabarcıklı kaynama bölgesinde ısı akısı sonsuza kadar arttırılamaz ve belli bir noktada maksimum değerine ulaşır. Bu noktadaki ısı akısı değeri genellikle kritik ısı akısı olarak adlandırılır. Literatürde bazen bu nokta yanma noktası veya kabarcıklı kaynamadan ayrılma noktası olarak ta isimlendirilir (Tong and Tang 1997). Kritik ısı akısına ulaşıldıktan sonra kaynama kararsız bir hal alır. Isıtıcı yüzeyi dönüşümlü olarak buhar tabakası ve sıvı film tabakasıyla kaplanır. Bu bölge geçiş kaynama veya kısmi film kaynama bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede, ısı akısı artan kızma farkı ile azalırken yüzey sıcaklıklarında dalgalanmalar görülür. Bu durum, ısıtıcı yüzeyinin büyük kısmının sıvıya göre düşük ısı iletkenliğe sahip buhar tabakası ile örtülü olmasından kaynaklanmaktadır. Kızma farkı değerinin 30-120°C arasında olduğu geçiş kaynama bölgesinde yüzey üzerinde yerel koşullara bağlı olarak hem kabarcıklı kaynama hem de film kaynama gerçekleşir. Yüzeyin tamamen buhar tabakası ile kaplı olması durumunda minimum ısı akısı değeri elde edilir. Leidenfrost noktası olarak ta adlandırılan bu noktadan itibaren film kaynama rejimi başlar. Film kaynama bölgesinde yüzeyden sıvıya ısı transferi buhar tabakasından iletim ve ışınım ile gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda ışınım ile ısı transferinin önemli hale gelmesi sonucu bu bölgede artan kızma farkı ile ısı akısı artar.

Kabarcıklı kaynama, düşük kızma farkı değerlerinde yüksek ısı akısı ve ısı transfer katsayılarının elde edilmesine olanak sağladığından mühendislik uygulamalarında en çok istenen kaynama rejimidir. Ancak, kabarcıklı kaynama bölgesinin sonunda görülen kritik ısı akısı endüstriyel kaynama cihazlarının tasarımında oldukça dikkat edilmesi gereken bir büyüklüktür. Bu noktada yüzeyin büyük bölümünün ısı iletkenliği düşük buhar filmi ile kaplı hale gelmeye başlaması yüzey ısı akısının etkin olarak sıvıya aktarılamamasına yol açar. Kaynama krizi olarak adlandırılan bu durumda ısıtıcı yüzey sıcaklığı ani olarak çok yüksek değerlere çıkar. Eğer bu sıcaklık değerleri yüzeyin ergime noktasından yüksekse yanma olayı gerçekleşir ve cihazın tahribatına neden olabilir. Bu nedenle, kaynama cihazları uygulamada güvenli olacak şekilde kritik ısı akısı değerinin bir miktar altında çalıştırılır (Cengel and Ghajar 2015).

### 1.6. Makrokanallarda Akış Kaynama

Havuz kaynama için yukarıda bahsedilen kaynama rejimleri akış kaynamada da görülür. Bununla birlikte, kaynama sürecine iki fazlı akışın eşlik etmesi kaynamaya özgü süreçleri daha karmaşık hale getirmektedir. Akış kaynamada sıvı ve buhar fazı kanal içerisinde birlikte akmaktadır. Isıtılan kanal yüzeylerinde kaynama oluşur ve kanal boyunca buhar üretimine bağlı olarak kabarcıklı, tıkaç, halka ve sisli akış gibi farklı akış desenleri gelişir. Buhar fazın bir kaynama sistemindeki dağılımı, hem ısı transferini hem de akış özelliklerini önemli derece etkiler. Bu yüzden, akış kaynamada, boru veya kanal boyunca oluşan akış desenlerinin mesafe yerine yerel buhar kalitesi değerine göre gösterimi daha anlamlıdır. Kuruluk derecesi olarak ta bilinen buhar kalitesi, iki fazlı sıvı-buhar akışında buhar fazına karşılık gelen akış kısmını gösterir ve fazlar arasında termodinamik denge oluşması durumunda ısı dengeden elde edilebilir (Denklem 1.3).

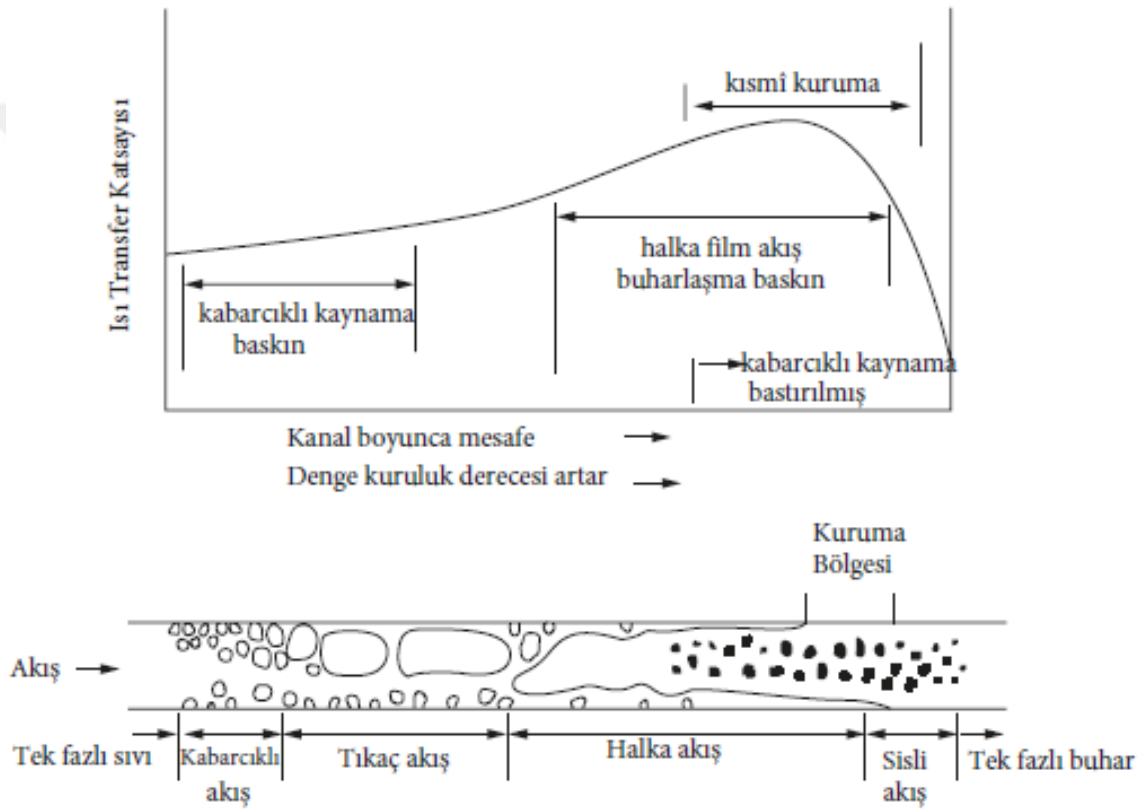
$$x_e = \frac{h - h_f}{h_{fg}} \quad (1.3)$$

Burada,  $h_{fg}$  ve  $h_f$  sırasıyla denge durumundaki buharlaşma gizli ısısı ve doymuş sıvı entalpisidir. Denge buhar kalitesi sıfır ile bir arasında değer aldığı doymuş sıvı-buhar bölgesinde anlamlıdır. Akışkanın hali hakkında kesin bir bilgi vermese de, denge buhar kalitesi değerinin sıfırdan büyük ve küçük olması sırasıyla aşırı kızdırılmış buhar ve aşırı soğutulmuş sıvı fazına karşılık gelir. Şekil 1.4'te sabit akısı altında üniform olarak ısıtılan yatay bir kanal içindeki akış kaynama sırasında oluşan akış desenleri ve ısı transfer katsayısı değişimi gösterilmiştir.

Kanala aşırı soğutulmuş tek fazlı sıvı olarak giren akışkan, yüzeyden olan zorlanmış taşınım ısı transferinin etkisiyle kanal yüzey sıcaklığı ve yüzey civarındaki akışkan sıcaklığının lokal olarak doyma sıcaklığının üstüne çıkması sonucu kuruluk derecesinin sıfırdan küçük olmasına rağmen yüzeylerde kaynamaya başlar. Aşırı soğutulmuş akış kaynama koşullarının hakim olduğu, yüzeylerde kabarcık oluşumunun henüz yeni görülmeye başladığı bu nokta kaynama başlangıcı olarak tanımlanır. Daha sonra, oluşan bu ilk kabarcıklar yüzeyden ayrılarak sıvı akışın içinde sürüklenir. Akış içerisinde buhar fazının görülmeye başladığı bu bölge, ısıtılan yüzeyle kanal merkezi

## 1. GİRİŞ

arasında yüksek sıcaklık değişimleri ile tanımlanır (Incropera et al. 2011). Isıtılan yüzey civarı lokal olarak doyma şartlarında iken kanalın merkezinde aşırı soğutulmuş sıvı akışı söz konusudur. Akış kanal içinde ilerledikçe ısıtılan yüzeydeki kabarcıklı bölge tabakası artar ve belli bir noktada akışkan yığın sıcaklığı doyma sıcaklığına ulaşır. Bu noktada kuruluk derecesi değeri,  $x_e=0$ 'dır ve doymuş akış kaynama bölgesinin başlangıcını ifade eder. Bu noktadan sonra, sadece yüzeye yakın bölgede değil kanal kesiti boyunca herhangi bir bölgede kabarcık gözlenebilir. Kuruluk derecesinin sıfırdan büyük olduğu bu bölgedeki akış kaynama biçimi doymuş akış kaynama olarak adlandırılır.



Şekil 1.4. Üniorm olarak ısıtılan yatay bir boruda akış kaynama ısı transfer katsayısı ve akış desenleri (Ghiaasiaan 2008).

Doymuş akış kaynama bölgesinin başlangıcında kabarcıklı akış rejimi görülür. Buhar fazın özgül hacmi sıvı fazın özgül hacminden oldukça büyük olduğundan az miktarda gerçekleşen faz değişimi kanal içerisinde hacimsel olarak yüksek miktarda buhar üretimine yol açar. Akış kanal boyunca ilerledikçe artan denge buhar kalitesine bağlı olarak kabarcıklar birleşerek kanal içinde buhar yastıklarının oluşmasına neden olur. Kanal hacminin yaklaşık yarısının buharla dolu olduğu bu akış rejimi tıkaç akış olarak tanımlanır. Bir süre sonra kanal merkezinde tamamen buhar fazın aktığı, sıvı fazın

## 1. GİRİŞ

---

ise kanal yüzeylerinden film şeklinde aktığı iki fazlı akış rejimi görülür. Halkasal akış rejimi olarak adlandırılan bu akış biçiminde, ayrıca merkezdeki buhar akışı yüksek hıza sahip olduğundan sıvı film tabakasından kanal merkezine doğru sıvı damlacıklarının sürüklenmesine neden olabilir. Bu akış rejiminde film kalınlığı genellikle o kadar incedir ki kanal cidarından uygulanan ısı, film yüzeyine ısı iletimi ve taşınımı ile transfer edilir ve daha sonra film yüzeyden buharlaşma ile ortama aktarılmış olur. Bu yüzden, ısı transfer mekanizması açısından zorlanmış taşınım buharlaşmasının etkin olduğu akış kaynama rejimi olarak karakterize edilir. Isı akısının veya akış hızının çok yüksek olduğu bazı durumlarda kanal cidarındaki sıvı film tabakasında kabarcık oluşumu gözlenebilir. İki fazlı akış kanal içerisinde ilerledikçe, ısı akısının etkisiyle halka akıştaki sıvı film kalınlığı azalmaya ve belli bir noktadan sonra kanal yüzeylerinde kuru noktalar oluşmaya başlar. Kuru noktalar büyüyerek zamanla yüzeyi kaplar. Geçiş rejimi olarak adlandırılan bu aşama, cidardaki sıvı filmin tamamen buharlaşmasına kadar devam eder. Sıvı film akışının tamamen kaybolmasıyla kuruluk derecesinin artması cidarda geniş kuru alanların oluşmasına ve yüzey sıcaklığının keskin bir şekilde yükselmesine neden olur. Akış rejimindeki bu ani değişim noktası kuruma noktası olarak tanımlanır. Bu noktadan sonra, kanal içinde yüksek hızda akan buhar fazıyla beraber sürüklenen sıvı damlacıklarının olduğu sisli akış rejimi görülür. Bu akış rejiminde, buhar fazı içerisinde dağılmış sıvı damlacıklar olmasına rağmen, cidardaki ısı transferi esas olarak buhar akışı tarafından gerçekleştirilir. Bu nedenle, düşük ısı transfer katsayıları görülür ve buhar aşırı kızdırılmış haldedir. Buhar içerisinde dağınık halde sürüklenen damlacıklar, aşırı kızdırılmış buharın etkisiyle tedricen buharlaşır ve nihayetinde kanal içerisindeki tek fazlı buhar akışı görülür. Kurumanın ortaya çıktığı noktadan tek fazlı buhar akışına kadar olan bölgeye kuruma sonrası bölge denir.

### 1.7. Kabarcık Oluşumu

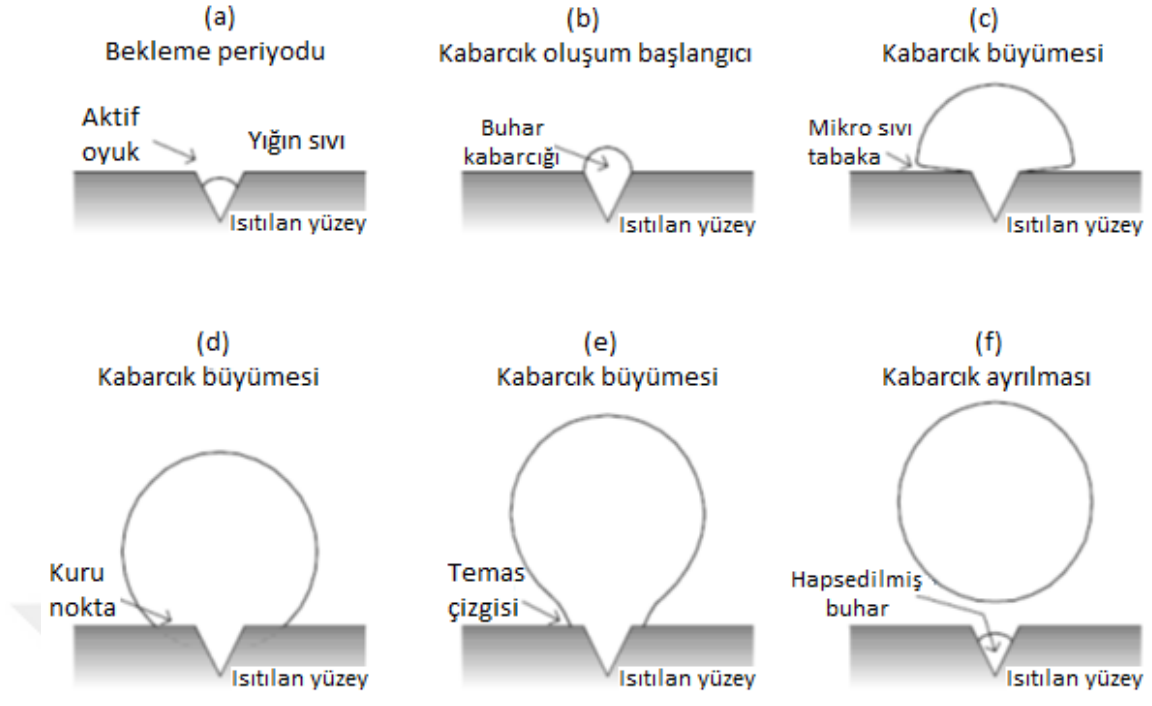
Hem havuz kaynamada hem de akış kaynamada, kaynama olayının ayrıntılı bir şekilde kavranması, öncelikle kabarcık oluşumunun incelenmesini gerektirir. Mühendislik uygulamalarında kabarcık çekirdeklenmesi, kaynama ve kavitasyon olmak üzere iki farklı fiziksel olayda görülür. Kaynama olayında kabarcık oluşumu sıvının aşırı kızdırılması sonucu oluşurken, kavitasyon olayında kabarcık oluşumu yerel sıvı basıncının, buhar basıncının altına düşmesi nedeniyle meydana gelir. Kaynama prosesinde

## 1. GİRİŞ

---

sıcaklıktaki artış, kavitasyon prosesinde ise basınçtaki düşüş kabarcık oluşumuna neden olduğundan iki proses birbirinden farklı karakteristiklere sahiptir. Bu kısımda kaynama olayında görülen kabarcık çekirdeklenmesinden bahsedilecektir. Kabarcık çekirdeklenmesi homojen çekirdeklenme ve heterojen çekirdeklenme olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Homojen çekirdeklenmede, buhar kabarcıklarının oluşumu tamamen saf bir sıvı yığını içinde meydana gelir. Bu tip çekirdeklenmede, doyma sıcaklığının üzerinde aşırı kızdırılmış bir sıvı yığını içerisinde ısıl dalgalanmalar sonucu embriyo çekirdek oluşumu başlar. Teorik olarak sabit basınçta bir sıvı kütlesinin içerisinde homojen çekirdeklenme başlatmak için gerekli aşırı kızdırma üst limiti çok yüksek olup termodinamik açıdan kritik noktaya eşittir. Ancak birçok mühendislik sisteminde, kabarcık oluşumu genel olarak sistem içerisinde katı-sıvı arayüzeyin olduğu herhangi bir yerde veya geometrinin duvarlarında gözlenir. Katı- sıvı arayüzeylerinde meydana gelen bu tip çekirdeklenme heterojen çekirdeklenme olarak isimlendirilir. Birçok deneysel çalışma heterojen çekirdeklenmenin önemli ölçüde düşük kızdırma farkı değerlerinde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum, pratik uygulamalarda kullanılan yüzeylerin çoğunlukla atomik seviyede düzgünlükten çok uzak olması ile ilgilidir. Bir katı yüzey tipik olarak mikro boyutlu çok sayıda oyuklar içerir. Bu oyukların sayısı, boyut aralığı ve geometrik şekilleri, yüzey malzemesine, yüzeyin son işleme yöntemine ve yüzey kirliliğine bağlıdır. Yüzey, bir sıvıya batırıldığında mikro boyuttaki hava paketleri genellikle oyukların içinde tutulur ve bu bölgeler bir gaz-sıvı arayüzeyi oluşturarak embriyo kabarcık oluşumu için bir odak noktası görevi görürler. Böylelikle, odak noktalarında bulunan sıvı-gaz arayüzeyleri sayesinde kaynama sırasında görülen sıvı-buhar faz değişimi için homojen çekirdeklenmeye ihtiyaç olmaz. Sonuç olarak, oyuk içerisindeki sıvı-buhar arayüzeyinde buharlaşma daha kolay olduğundan kabarcıklı kaynamanın başlangıcı için gerekli aşırı kızdırma değerleri daha düşük olur. Çekirdeklenme aslında ısıtılan yüzey civarındaki çok ince aşırı ısıtılmış bir sıvı katmanını içinde başladığından, sıvının yığın sıcaklığı aşırı soğuk olsa bile yüzeydeki oyuklarda embriyo kabarcık oluşumu gerçekleşebilir. Kabarcık odağındaki çekirdeklenme, oyuk içinde veya üstünde bulunan bir embriyo kabarcığının buharlaşarak büyüdüğü zaman meydana gelir. Şekil 1.5'te ısıtılan bir yüzey üzerinde kabarcık oluşum süreci gösterilmiştir. Bu süreç temel olarak, bekleme periyodu, çekirdeklenme başlangıcı, kabarcık büyümesi ve kabarcık ayrılması olarak farklı aşamaların yer aldığı bir döngü olarak idealleştirilebilir (Carey 2008).

## 1. GİRİŞ



Şekil 1.5. Kabarcık oluşum döngüsü (Griffin 2008).

Çekirdeklenmenin henüz başlamadığı bekleme periyodunda, ısıtılan yüzeyden üzerindeki yığın sıvıya ısı transferi gerçekleşir (Şekil 1.5a). Böylelikle ısıtılan yüzeyde aşırı kızdırılmış bir sıvı tabaka oluşur. Isıtılan yüzeydeki oyuklarda hapsedilen buhar aşırı kızdırılmış tabakadan olan enerji transferi etkisiyle genişlemeye başlar. Çekirdeklenme başlangıcı olarak isimlendirilen bu periyot sonunda kabarcık boyutu oyukun ağız kısmını doldurmuştur. (Şekil 1.5b). Kabarcığın oyuktan taşmasıyla kabarcık büyüme periyodu başlar. Büyüme periyodunun ilk aşasında, kabarcığın etrafı aşırı kızgın sıvı ile çevrili olduğundan sıvıdan arayüze doğru çok yüksek hızda ısı transferi gerçekleşir. Kabarcık büyüme hızının yüksek olduğu bu aşamada kabarcık büyüme hızı kabarcık içindeki ve dışındaki basınç farkı ve sıvı atalet kuvvetleri tarafından kontrol edilmektedir. Diğer bir deyişle, momentum transferinin önemli olduğu bu aşama atalet kontrollü kabarcık büyüme periyodu olarak adlandırılır (Carey 2008). Atalet kontrollü kabarcık büyüme periyodunda, kabarcık yarı küresel formda gelişir. Şekil 1.5c’te gösterildiği gibi bu periyotta kabarcık radyal doğrultuda büyürken yüzeyle kabarcığın alt kısmındaki sıvı-buhar arayüzeyi arasında ince mikro sıvı tabakası kalır. Buharlaşıma mikro tabakası olarak da isimlendirilen bu bölge, ısıtılan yüzeyden kabarcığa ısı iletimi için bir ortam oluşturarak sıvı-buhar arayüzeyinde buharlaşmayı sağlar. Sıvı-buhar arayüzeyindeki buharlaşma devam ettikçe çekirdeklenme oyukunun ağız kısmı kurumaya başlar (Şekil 1.5d). Büyüme periyodunun ilerleyen evrelerinde sıvı-buhar arayüzeyi etrafındaki aşırı

## 1. GİRİŞ

---

kızdırılmış sıvının sıcaklığı azalır. Buna bağlı olarak, sıvı-buhar arayüzeyinde gerçekleşen ısı transferi kabarcık büyüme hızı üzerinde etkili olmaya başlar. Büyüme periyodunun bu aşaması ısı transferi kontrollü büyüme periyodu olarak adlandırılır (Carey 2008). Bu aşamada, basınç ve sıvı atalet kuvvetleri etkisi azaldığından, temas çizgisi yüzey gerilim kuvveti kabarcığın daha küresel bir form almasını sağlar (Şekil 1.5e). Nihayetinde, kabarcığı yüzeyden uzaklaştırmaya çalışan kaldırma ve atalet kuvvetleri kabarcığı yüzeyde tutmaya çalışan temas çizgisi yüzey gerilim kuvvetini yendiğinde kabarcık yüzeyden ayrılır (Şekil 1.5f). Kabarcık yüzeyden ayrılır ayrılmaz çekirdeklenme odağı içinde embriyo kabarcık oluşur ve diğer kabarcık oluşum döngüsünün bekleme periyodu başlar.

Yüzeylerde kabarcık çekirdeklenmesi ile ilgili ilk önemli çalışmalar Hsu and Graham (1961) ve Hsu (1962) tarafından yapılmıştır. Hsu (1962) bir havuz kaynamada, çekirdeklenme odağında hapsedilen bir embriyo buhar kabarcığının büyüebilmesi için bu embriyo kabarcığı çevreleyen sıvının sıcaklığının kabarcık içerisindeki buharın doyma sıcaklığından yüksek olması gerektiğini ifade etmiştir. Aşırı kızdırma kriteri olarak da bilinen bu ifade diğer bir deyişle bir yüzeyde çekirdeklenmenin oluşması veya bir kabarcığın bir sıvı içinde yaşaması için birincil gereksinimin sıvının aşırı ısıtılması olduğunu belirtmektedir. Hsu (1962) tarafından önerilen bu model daha sonraki araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (Bergles and Rohsenow 1964; Sato and Matsumura 1964; Kenning and Copper 1965; Davis and Anderson 1966; Kandlikar et al. 1997). Hsu modeli havuz kaynama için geliştirilmesine rağmen basit olması ve gerçekçi tahminler yapması nedeniyle akış kaynamadaki kabarcık oluşum modelleri için de temel oluşturmuştur. Bu modellerde, akış kaynamadaki hız etkisi, akış nedeniyle ısıl sınır tabakadaki azalma dikkate alınarak hesaba katılmıştır (Ghosh et al. 2016). Bu kısımda Hsu (1962) tarafından önerilen yarı-teorik çekirdeklenme modelinden bahsedilecektir.

Hsu modelinde incelenen sistem Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Burada, metal yüzeylerdeki düzensizliklerin enine kesit profillerinin büyük ölçüde konik olduğunu göz önünde bulundurularak (Hsu and Graham 1986), V-şekilli bir oyuktaki çekirdeklenme incelenmiştir. Başlangıçta, oyuğun ağız kısmında küçük bir kabarcık embriyosunun olduğu varsayılır. Çekirdeklenmenin bu ilk aşamasında, ideal olarak, ısıtılan duvara bitişik akışkanın ve embriyo kabarcığın sıcaklığı sıvı yığın sıcaklığına,  $T_{\infty}$ , eşittir.

## 1. GİRİŞ

---

Bekleme periyodunda, duvara bitişik sıvı ısınır ve geçici rejimde ısı iletimin bir sonucu olarak duvar civarında ısı sınır tabaka,  $\delta_t$ , oluşur.  $\delta_t$  gerçek sistemlerde zamana bağlı olarak değişebilse de bu modelde sabit olarak alınmıştır. Ayrıca, duvarın üniform ve sabit bir  $T_w$  sıcaklığında olduğu kabul edilmiştir. Bekleme periyodu boyunca ısı sınır tabakadaki sıcaklık dağılımı yarı sonsuz ortamda bir boyutlu geçici ısı iletim denklemi ile modellenirse:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) \quad (1.4)$$

elde edilir. Burada  $\theta = T - T_\infty$ . Uygun başlangıç ve sınırları yazılırsa:

$t=0$ 'da  $\theta=0$

$t>0$  için,  $x=0$ 'da  $\theta = \theta_w = T_w - T_\infty$  ve  $x=\delta_t$ 'de  $\theta=0$

Bu denklemin çözümü sonucu aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\varepsilon = \frac{\theta}{\theta_w} = \frac{x}{\delta_t} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n} \sin \left[ n\pi \left( \frac{x}{\delta_t} \right) \right] e^{-n^2\pi^2(at/\delta_t)} \quad (1.5)$$

Bu eşitlikte  $\tau = at/\delta_t$  olup bekleme periyodunu gösterir. Clausius-Clapeyron denklemi (Denklem 1.6) ve Young-Laplace denklemi (Denklem 1.7) kullanılarak termodinamik denge durumunda aşırı kızdırma farkı ve kabarcık yarıçapı arasında bir bağıntı (Denklem 1.8) elde edilebilir.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{fg}P_v}{T} \quad (1.6)$$

$$P_v - P_l = \frac{2\sigma}{r_b} \quad (1.7)$$

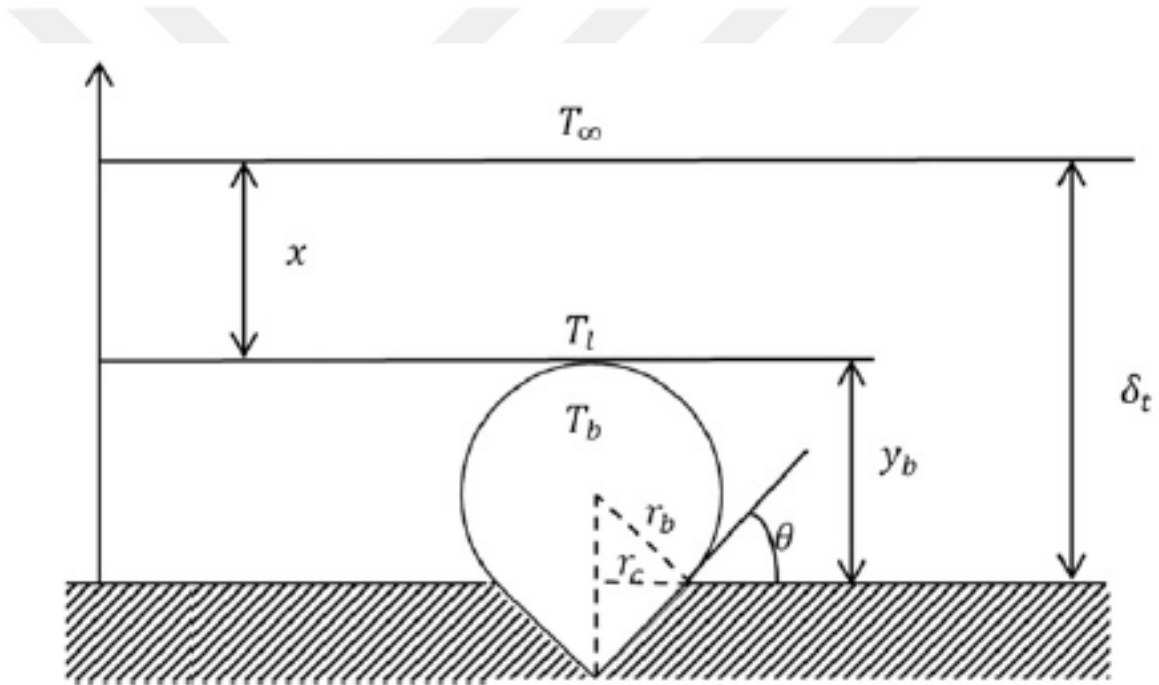
$$\theta_b = T_b - T_{doy}(P_l) = \frac{2\sigma T_{sat}(P_l)}{h_{fg}\rho_v r_b} \quad (1.8)$$

## 1. GİRİŞ

Burada  $P_v$  kabarcık içerisindeki buhar basıncını,  $P_l$  söz konusu kabarcığı çevreleyen sıvının basıncını,  $r_b$  kabarcık çekirdeği yarıçapını,  $\sigma$  yüzey gerilimini,  $T_b$  kabarcık sıcaklığını,  $T_{doy}(P_l)$   $P_l$  basıncındaki doyma sıcaklığını,  $h_{fg}$  buharlaşma gizli ısısını,  $\rho_v$  buhar yoğunluğunu ifade eder. Hsu (1962), kabarcık çekirdeği yarıçapı  $r_b$ 'nin oyuk ağız yarıçapı  $r_c$  ile orantılı olduğu ve ayrıca temas açısına bağlı olduğu kabul ederek kabarcık yüksekliğini,  $y_b$ , Şekil 1.6'daki geometrik ilişkiden hesaplamıştır.

$$y_b = r_b + r_b \cos \theta = (1 + \cos \theta)r_b \quad (1.9)$$

$$y_b = \delta_t - x \quad (1.10)$$



Şekil 1.6. Kabarcık çekirdeklenmesi için Hsu modeli (Ghosh et al. 2016).

Burada  $\theta$  verilen katı yüzey ile sıvının teğeti arasında kalan temas açısıdır. Denklem 1.8 düzenlenirse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\theta_b = \theta_{sub} + \frac{2\sigma T_{doy}}{h_{fg}\rho_v \left( \frac{\delta_t - x}{1 + \cos \theta} \right)} \quad (1.11)$$

## 1. GİRİŞ

Burada  $\theta_{sub} = T_{sat}(P_l) - T_{\infty}$  'dur. Bu denklem  $\theta_w = T_w - T_{\infty}$  ile boyutsuzlaştırılıp,  $C = 1 + \cos \theta$  ve  $\varphi = x/\delta_t$  olduğu dikkate alınır:

$$\varepsilon_b = \frac{\theta_b}{\theta_w} = \frac{\theta_{sub}}{\theta_w} + \frac{2\sigma T_{doyle} C}{h_{fg} \rho_v \delta_t \theta_w (1 - \varphi)} \quad (1.12)$$

elde edilir. Bekleme periyodunun çok uzun olması durumunda, yani  $\tau = \infty$ , Denklem  $\varepsilon = \varphi = x/\delta_t$ 'ye indirgenir. Bu durumda, Denklem 10 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\varphi_b = \frac{\theta_{sub}}{\theta_w} + \frac{2\sigma T_{sat} C}{h_{fg} \rho_v \delta_t \theta_w (1 - \varphi_b)} \quad (1.13)$$

Bu denklemden çözümden,

$$\varphi_b = \frac{\left(1 + \frac{\theta_{sub}}{\theta_w}\right) \mp \sqrt{\left(1 + \frac{\theta_{sub}}{\theta_w}\right)^2 - \frac{8\sigma T_{doyle} C}{h_{fg} \rho_v \delta_t \theta_w}}}{2} \quad (1.14)$$

elde edilir. Hsu (1962), çekirdek kabarcığın Şekil 1.6'daki gibi alt tarafından kesilmiş bir küre şeklinde olduğunu kabul etmiştir. Temas açısını  $\theta = 53.1^\circ$  kabul ederek, oyuk yarıçapı  $r_c$  ve kabarcık yüksekliği  $y_b$  arasındaki geometrik ilişkiden aşağıdaki ifadeyi bulmuştur.

$$y_b = 2r_c \quad (1.15)$$

Sonuç olarak, Denklem (1.10) ve Denklem (1.15) kullanılarak Denklem (1.14) için çözüm yapılırsa çekirdeklenmenin olduğu aktif oyuk boyut aralığı için aşağıdaki ifade edilir.

$$\{r_{c \min}, r_{c \max}\} = \frac{\delta_t}{4} \left( \frac{\theta_w}{\theta_w + \theta_{sub}} \right) \left[ 1 \mp \sqrt{1 - \frac{12.8\sigma T_{sat} \rho_v (\theta_w + \theta_{sub})}{\rho_v h_{fg} \delta_t \theta_w^2}} \right] \quad (1.16)$$

Bu denklemin sağ tarafındaki artı ve eksi işareti sırasıyla ve  $r_{c\ max}$ , ve  $r_{c\ min}$  değerlerine karşılık gelir. Denklem (1.16)'ya göre aşırı kızdırma farkı  $\theta_w$  azaldıkça, karekök içindeki terimlerin sıfıra yaklaşır. Dolayısıyla  $r_{c\ min}$  ve  $r_{c\ max}$  değerleri birbirine eşit olur. Bu durumun meydana geldiği aşırı kızdırma farkında çekirdeklenme için aktif halde bulunan yalnızca bir oyuk büyüklüğü değeri vardır. Bu değer altındaki  $\theta_w$  değerleri için, bu bağıntıdan hesaplanan  $r_{c\ max}$  ve  $r_{c\ min}$  değerleri sanal olacağından, herhangi bir boyuttaki oyuğun aktif olmayacağı anlamına gelir.

Yukarıda özetlenen Hsu çekirdeklenme modeli, matematiksel olarak kabarcık oluşumu için açık bir denklem sunmasının yanında, çekirdeklenme sürecini etkileyen mekanizmalar hakkında önemli ipuçları vermektedir. Hsu modeli, alt soğutma, akışkan özellikleri, yüzey yapısı, aşırı kızdırma farkı, ısı sınır tabaka kalınlığı gibi belli başlı parametrelerin kaynama başlangıcı ve kabarcıklı kaynama üzerindeki etkisinin anlaşılması için bir temel sunmaktadır (Ghosh et al. 2016).

### 1.9. Kabarcıklı Kaynama Mekanizmaları

Yüksek ısı transfer katsayılarının elde edilebilmesi nedeniyle kabarcıklı kaynama rejimi ısı transfer mekanizmasını anlamaya yönelik literatürde muhtelif çalışmalar mevcuttur. Her ne kadar temel ısı transfer mekanizmasını anlamaya yönelik ilerleme kaydedilse de kabarcıklı kaynama ısı transferini etkileyen mekanizmalar önemli bir tartışma konusu olmaya devam etmektedir. Diğer yandan, kabarcıklı kaynama ısı transfer hızını doğru tahmin eden şu ana kadar herhangi bir model ya da korelasyon geliştirilememiştir. Kaynama olayının karmaşıklığı, birbiriyle rekabet eden, birbirini dışlayan hatta kendi içinde çelişkili çok sayıda modelin ortaya çıkmasına yol açmıştır.

Jakob and Fritz (1931) ve Jakob and Linke (1933, 1935) tarafından yapılan kaynama ile ilgili öncü deneysel çalışmalar, kaynama sırasında ısıtıcı yüzeyinin yakınında kayda değer miktarda bir sıvı karışımının meydana geldiğini göstermiştir. Jakob (1936) kabarcıklı kaynamada görülen yüksek ısı transfer katsayılarının gizli ısı transferi ile yeterince açıklanamayacağını ifade etmiştir. Kabarcık oluşumu ile birlikte yüzey civarında etkin olan taşınım ile ısı transfer mekanizmasının ısı transfer katsayısında artışa neden olacağını savunmuştur. Bu nedenle, Jakob (1936) ısıtıcı yüzeyinden ayrılan

## 1. GİRİŞ

---

buhar kabarcıklarının neden olduğu sıvı çalkalanması sonucu kaynama sırasında yüksek ısı transfer hızlarının elde edildiğini ileri sürmüştür. Şekil 1.7a'da gösterildiği gibi, ısıtıcı yüzeyinde büyüyen ve buradan ayrılan kabarcıkların varlığı, karışma veya çalkalanma işlemine neden olur. Kabarcıkların büyüüp ısıtıcı yüzeyden ayrılma döngüsü sıvıda türbülansa neden olarak yüzey ve sıvı arasındaki ısı geçişini artırır. Türbülans seviyesi yüksek sıvı, yüzeydeki ısıyı yığın sıvıya doğru taşır. Kabarcık çalkalanması olarak da adlandırılan bu modelde kabarcık, sıvının çalkalanmasını ve karışmasını sağlayan bir ortam oluşturur ancak ısı transfer işlemine doğrudan dâhil değildir. Bu modele dayanarak, ısı transferini türbülanslı zorlanmış taşınım süreci gibi değerlendirip kabarcıklı kaynama için ısı transferi korelasyonları geliştirilmiştir. Bu korelasyonlarda, Reynolds sayısı için kabarcık büyüme oranları, kabarcık boyutları ve kabarcık yükselme hızları karakteristik büyüklük olarak alınmıştır. Böylelikle, kabarcıklı kaynamaya özgü parametrelerin yer aldığı Reynolds sayısı ve devamında Nusselt sayısı bağıntıları geliştirilmiştir. Isıtılan yüzeyden kabarcık ayrılmasının neden olduğu sıvı çalkalanma mekanizmasına dayanan bu modele göre kabarcıklı kaynama ısı transferi için Rohsenow (1952) tarafından aşağıdaki bağıntı önerilmiştir. Bu bağıntı kabarcıklı kaynama için önerilen ilk korelasyon olmasına rağmen günümüzde sıkça kullanılmaktadır.

$$\dot{q}_{kabarcıklı} = \mu_l h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[ \frac{c_{pl}(T_s - T_{sat})}{C_{sf} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3 \quad (1.17)$$

Diğer yandan, Forster ve Zuber (1955), kabarcık ayrılmasının neden olduğu sıvı çalkalanma mekanizmasının aşırı soğuk kabarcıklı kaynamaya ait deneysel verileri yeterince açıklayamadığını belirtmiştir. Çünkü, Gunter and Kreith (1950) ve Gunter (1951) kaynama ısı transferi ile ilgili yapmış olduğu fotografik çalışmalarda, aşırı soğuk kaynama koşullarında yüzeyde oluşan kabarcığın büyüüp yüzeyden ayrılmadan yok olmasına rağmen doymuş kabarcıklı kaynamadaki ısı transfer katsayılarına yakın değerler elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu yüzden, Forster ve Zuber (1955), ısıtılan yüzeyden ayrılan kabarcıklar ile başlatılan çalkantılardan ziyade Şekil 1.7b'de gösterildiği gibi buhar kabarcıklarının hızlı büyümesine dayanan yeni bir sıvı çalkalanma mekanizması önermiştir. Mikrotaşınım mekanizması olarak ta adlandırılan bu mekanizmaya göre ısıtılan yüzeylerde büyüyen kabarcıkların neden olduğu sıvı akışkan hareketi öyle yüksektir ki yüzeye bitişik sıvı tabakasındaki sıcaklık dağılımını belirler. Mikrotaşınım

## 1. GİRİŞ

---

mekanizması sonucu sıvı tabakada oluşan sıcaklık farkı ( $T_{\text{wall}}-T_{\text{sıvı}}$ ) yüzeyden sıvıya aktarılan ısı akısı değerlerinin belirlenmesinde önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, aşırı soğuk kaynama verileri, ısı transferinde etkin sıcaklık farkının  $T_{\text{wall}}-T_{\text{doy}}$  olduğunu göstermiştir. Bunu dikkate alarak Engelberg-Forster and Greif (1959), yüzeyde kabarcığın büyümesiyle yüzeye bitişik aşırı kızdırılmış sıvı tabakasının düşük sıcaklıktaki sıvı yığınınına doğru hareket ettirildiği ve devamında kabarcığın yüzeyden ayrılması veya sönmesiyle sıvı yığınınından ısıtıcı yüzeye düşük sıcaklıktaki sıvının taşındığı sıvı-buhar değişim mekanizmasını önermişlerdir. Böylelikle, kabarcığın büyümesi, yüzeyden ayrılması ve sönmesinden oluşan her bir döngü sırasında yüksek ısı transfer aktarımı gerçekleşir (Şekil 1.7c). Engelberg-Forster ve Greif (1959) sıvı-buhar değişim modelinin, ısı akısı ve ( $T_{\text{wall}} - T_{\text{doy}}$ ) arasındaki uygun ilişkiyi gösterdiğini ve kabarcıklı kaynama sırasında görülen yüksek ısı transfer hızlarını açıklayabildiğini iddia etmiştir. Bankoff (1961) ve Bankoff and Mason (1962) tarafından, sıvı-buhar değişim modelinin oluşturulması sırasında taşınan sıvı yığınının hacmi ile ilgili yapılan kabullerin geçerliliği sorgulansa da önerilen bu mekanizmanın, kabarcık yüzeyden ayrıldıktan sonra yüzey civarındaki ısı tabakanın tekrar soğuk sıvı ile doldurulmasını açıklamada önemli olduğu kabul edilmektedir.

Han and Griffitt (1965) ve Mikic and Rohsenow (1969) sıvı-buhar değişim mekanizmasını geliştirerek kabarcıklı kaynama ısı transferi için ısı sınır tabakada geçici ısı iletimi modelini önermişlerdir. Bu modele göre, kabarcık ısıtılan yüzeyden ayrılırken arkasında oluşan girdap hareketinin etkisiyle etrafını saran aşırı kızdırılmış sıvı tabakasını yüzeyden uzaklaştırarak soğuk olan sıvı yığının ısıtılan yüzeye temas etmesini sağlar (Şekil 1.7d). Böylelikle, kabarcığın yüzeyden ayrılmasıyla yenilenen ısı sınır tabakada geçici rejim ısı iletim ısı transfer mekanizmasının baskın ısı transfer modu olduğu kabul edilmiştir. Han and Griffitt (1965) etki alanı olarak da bilinen kabarcığın ayrılmasıyla yer değiştiren aşırı kızdırılmış sıvı tabaka miktarını yaklaşık olarak ayrılma sırasındaki kabarcık çapının iki katı kadar olduğunu varsaymıştır. Kabarcığın yüzeyden ayrılması ve aşırı kızdırılmış sıvı tabakasındaki etki alanından çıkmasıyla doyma sıcaklığındaki ( $T_{\text{doy}}$ ) sıvı yığınınından bir miktar akışkan  $T_w$  sıcaklığındaki yüzeye temas eder. Bu açıdan bakıldığında bu mekanizma prosese dahil olan sıvı miktarı hariç sıvı-buhar değişim mekanizmasına benzerlik göstermektedir. Heider and Webb (1997), bu modelin Nakayama et al. (1980a, 1980b) tarafından deneysel olarak elde edilen kaynama ısı akısı

## 1. GİRİŞ

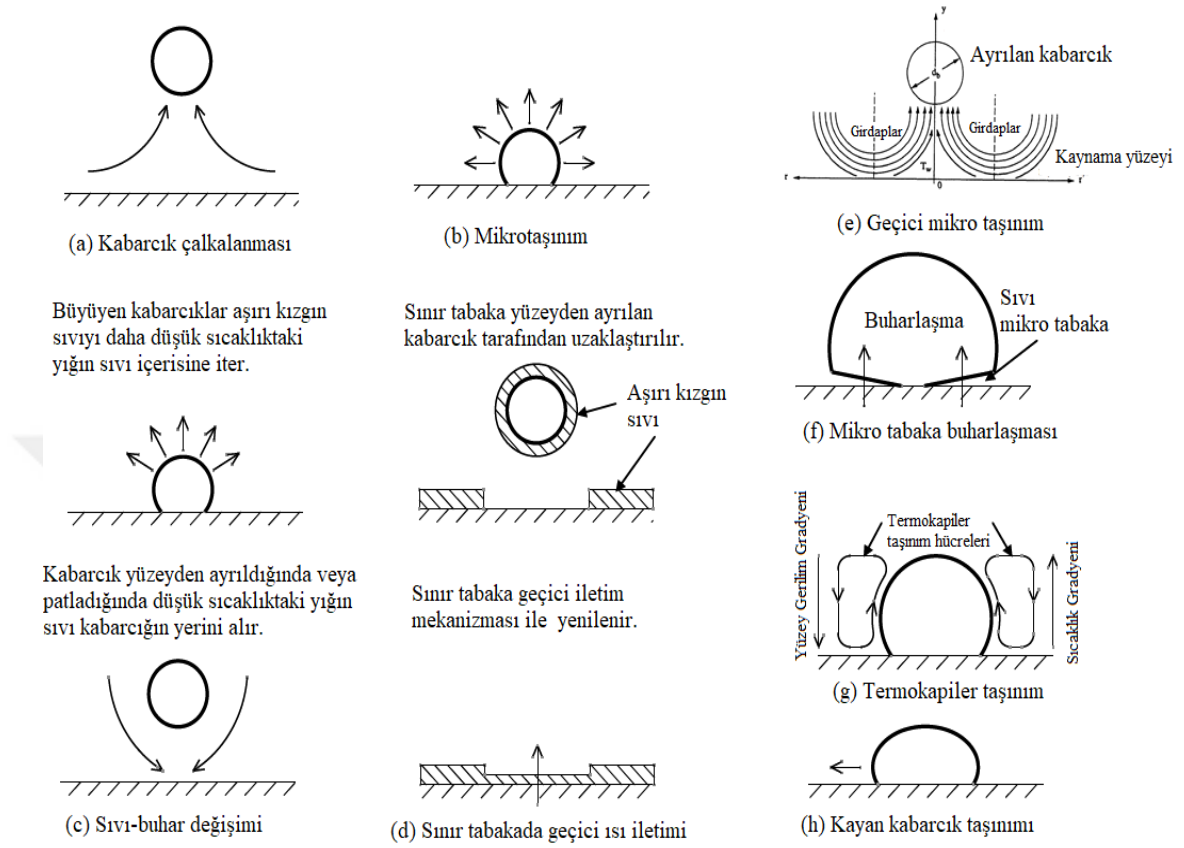
---

değerlerini tahmin etmede yetersiz olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumun, yüzeyden ayrılan kabarcığın oluşturduğu boşluğu doldurmak için sıvı yığınının yüzeye doğru gelen sıvının neden olduğu yerel taşınım etkilerinin ihmal edilmesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Bunun yerine araştırmacılar, geçici taşınım ısı transfer mekanizmasına dayalı bir model önermişlerdir. Şekil 1.7e’de şematik olarak gösterilen bu modelde, ısıtılan yüzeyden ayrılan kabarcığın ard bölgesinde, çekirdeklenme bölgesine hareket eden küçük sıvı girdaplar meydana gelir. Kabarcık tarafından hareket ettirilen bu küçük girdaplar, ısıtılan yüzeyde ters akımların oluşmasına neden olur. Bu durum çekirdeklenme bölgesinden kararsız laminer zorlanmış taşınım mekanizmasıyla ısı transferine yol açar.

Yukarıda bahsedilen kabarcıklanma mekanizmaları temel olarak taşınım ile ısı transfer mekanizmasına dayanmakta olup, faz değişimi sırasında ortaya çıkan gizli ısının kaynamalı ısı transferine olan etkisini ihmal etmiştir. Zira, kaynamalı ısı transferinin öncüsü Jacob (1936) ve diğer araştırmacılar, kabarcık oluşumu sonucu gizli ısı enerjisi aktarımının kaynamada görülen yüksek ısı transfer hızlarını açıklamada yetersiz olduğunu ileri sürmüşlerdir. Gunter ve Greith (1950) kabarcıklı kaynamada, gizli ısı aktarımının toplam ısı akısının yalnızca %2’sini oluşturduğunu ifade etmiştir. Ancak, Bankoff (1961, 1962), bu yaklaşımların kabarcık tabanında ve üst kısmında eşzamanlı olarak buharlaşma ve yoğunlaşma olma olasılığını dikkate almadığından hatalı olduğunu belirtmiştir. Diğer yandan, Moore and Mesler (1961) atmosferik basınçta yaptıkları suyun kabarcıklı kaynama deneylerinde ısıtıcı yüzey sıcaklığının 2 ms içinde 11-17°C arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Yazarlar, yüzey sıcaklığındaki yüksek genlikli ani dalgalanmalardan, kabarcık oluşum bölgelerinde, kabarcığın altında ince mikro sıvı tabakasının bulunduğu sonucuna varmışlardır. Yüzeydeki bu ince mikro sıvı tabakasının buharlaşmasının kabarcıklı kaynamada yüksek ısı akılarının elde edilmesini sağladığı ifade edilmiştir (Şekil 1.7f). Yüzeyde kabarcığın altındaki mikro sıvı tabakasının varlığı ise Sharp (1964); Cooper ve Llyod (1966); Jawurek (1969) tarafından yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Bunu takiben, Cooper and Llyod (1969); Van Ouwerkerk (1971); Cooper and Merry (1973) doymuş kaynamada kabarcık büyüme hızı tahmini için mikro sıvı tabaka buharlaşma mekanizmasını içeren ifadeler geliştirmişlerdir. Graham and Hendrick (1967) ise, ısı sınır tabakada geçici ısı iletimi ve türbülanslı doğal taşınım

## 1. GİRİŞ

mekanizmaları yanı sıra mikro sıvı tabaka buharlaşmasını da içeren bir ısı transfer modeli geliştirmişlerdir.



Şekil 1.7. Literatürde önerilen kabarcıklı kaynama mekanizmaları şematik gösterimi (Jones 2010'dan uyarlanmıştır.)

Brown (1967), ısıtılan yüzeyde oluşan kabarcığın büyümesi sırasında etrafında yüzey gerilim kuvvetlerinin neden olduğu termokapiler etki ile oluşan sıvı sirkülasyonunun kaynama sırasında yüksek ısı transfer hızlarının oluşmasına neden olduğunu ifade etmiştir (Şekil 1.7g). Petrovic et al. (2004) benzer şekilde sıvı-buhar arayüzeyindeki yüzey gerilim kuvvetlerine bağlı olarak oluşan sıvı hareketinin diğer bir ifade ile Marangoni taşınım etkisinin aşırı soğuk kabarcıklı havuz kaynamasında ısı transfer hızını önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Diğer yandan, Tong et al. (1990) teorik olarak, Marangoni taşınımının toplam kaynamalı ısı transferi üzerindeki etkisinin çok aşırı soğuk havuz kaynama koşulları hariç önemsiz olduğunu göstermişlerdir.

Stephan and Hammer (1994) yüzeyde oluşan kabarcığın etrafındaki ısı transferi ve sıvı akışını, menisküs eğriliği, yüzey civarındaki adezyon kuvvetleri ve sıvı-buhar ara

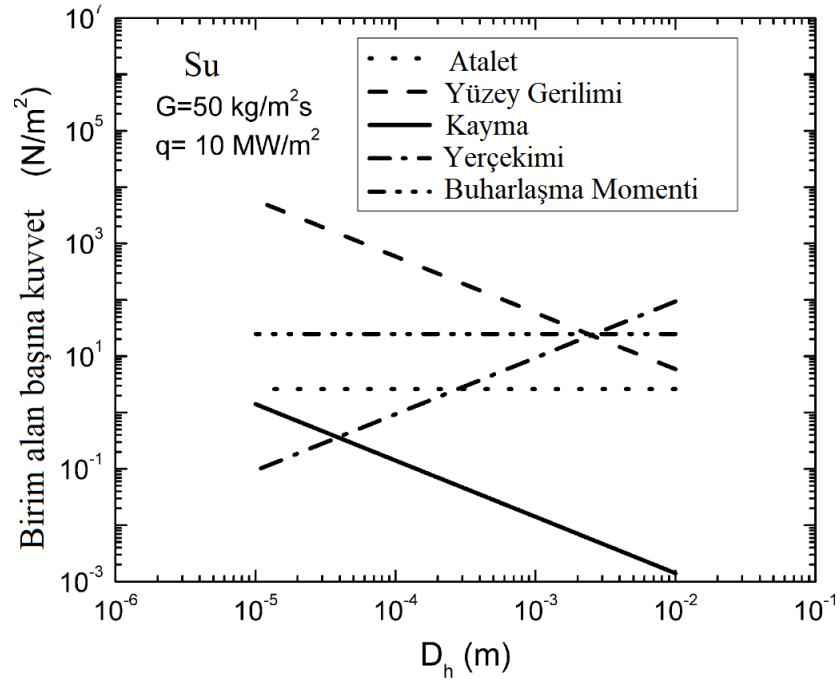
yüzeyindeki ısı direnci dikkate alınarak incelemiştir. Kabarcık civarındaki mikro bölgenin toplam ısı transferi üzerinde belirleyici olduğunu ifade etmişlerdir. Yüzey gerilimi ve adezyon kuvvetleri nedeniyle, sıvı-buhar menisküsünün eğriliği ve sıcaklığının sabit olmadığı ve ara yüzeydeki ısı direncin ihmal edilemeyeceğine dikkat çekmişlerdir. Bu parametrelerin, üçlü temas çizgisindeki ince sıvı menisküsünde meydana gelen buharlaşmayı ve buna bağlı olarak ısı transferini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Benzer şekilde, Mitrovic (1998) kabarcık büyümesi esnasında oluşan kama şeklindeki sıvı tabakasında ısı transferi ve akış özelliklerini incelediği çalışmasında üçlü temas çizgisindeki buharlaşmanın önemli olduğunu belirtmiştir. Diğer yandan, Demiray ve Kim (2004), FC -72 soğutucu akışkanıyla yaptıkları aşırı soğuk kaynama deneylerinde, baskın ısı transfer mekanizmasının geçici ısı iletimi ve mikro taşınım olduğunu belirtmişlerdir. Aşırı soğuk şartlarda, kabarcık büyümesi birincil olarak aşırı kızgın sıvı tabakasından gerçekleşen enerji aktarımından kaynaklanmıştır. Ayrıca, ince sıvı film buharlaşması ve üçlü temas çizgisinde buharlaşma etkilerinin ısı transferi açısından önemsiz olduğu ifade edilmiştir.

Kabarcıklı akış kaynamada ise yüzeyde oluşan kabarcıkların ısıtıcı yüzeyinden ayrılmadan önce yüzey üzerinde kayarak hareket etmelerinin enerji transferinde önemli olduğu bazı araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir (Cooper et al. 1983; Klausner et al. 1993; Bibeau and Salcudean 1994). Thorncroft et al. (1998), özellikle yukarı ve aşağı yönlü düşey akış kaynama deneylerinde ısı transfer değerlerindeki kayda değer farklılığı, yöne bağlı olarak kabarcıkların kayma olayında görülen farklılığa bağlamıştır (Şekil 1.7h). Yukarı yönlü akış kaynamada, yüzeyden ayrılan kabarcıkların ısıtıcı yüzey boyunca kayarak ilerlemelerinin aşağı yönlü akış kaynamaya nazaran daha yüksek ısı transfer hızlarının elde edilmesini sağladığı görülmüştür.

Bu bölümde açıklanan kabarcıklı kaynama mekanizmasına ait başlıca modeller kaynamalı ısı transferini hesaplamada önemli katkılar sağlamasına rağmen, bu modellerin test edilebileceği detaylı deneysel çalışmaların az olması söz konusu modellerin kullanımını sınırlamaktadır. Bu durum ayrıca, kaynamanın fiziksel mekanizmasını temel alan yeni modellerin geliştirilmesini de engellemektedir (Jones 2010).

### 1.9. Mikrokanallarda Akış Kaynama

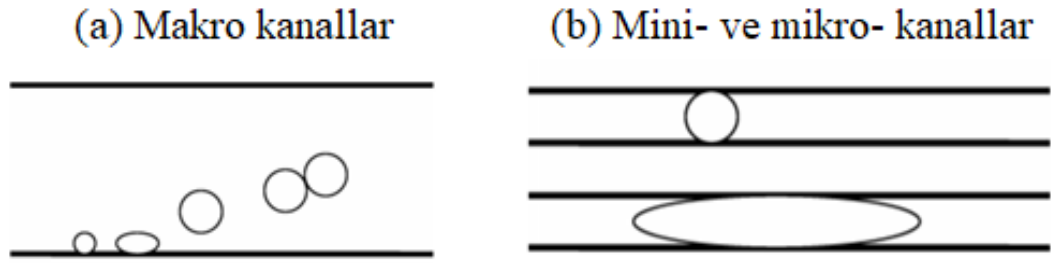
Kanal içinden akış kaynamada, kanal boyutu kabarcık çapına yaklaştıkça, fiziksel sınırlandırma etkileri nedeniyle mikrokanallardaki akış kaynama makrokanallara göre farklılaşmaya başlar. Temel farklılıklardan biri, mikrokanallarda yerçekimi ve kaldırma kuvvetleri önemsiz hale gelirken, yüzey gerilim kuvvetleri ve sınırlandırma etkilerinin ön plana çıkmasıdır. Bunun sonucu olarak, mikrokanallarda akış kaynama sırasında makrokanallara göre farklı akış desenleri oluşmaktadır. Örneğin, makrokanallardan farklı olarak mikrokanallarda yerçekimi etkileri önemsiz olduğundan tabakalı akış oluşmaz ve yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisiyle akış desenleri simetriktir. Ayrıca, sınırlandırma etkilerinden dolayı kanal içerisinde uzun kabarcıklı akış deseni görülür. Kandlikar (2010a), kanal içinden akış kaynama olayında etkin olan kuvvetlerin; atalet, yüzey gerilim, kayma, yerçekimi ve buharlaşma momentum kuvvetleri olduğunu ifade etmiştir. Şekil 1.8,  $10 \text{ MW/m}^2$  ısı akısı ve  $G=50 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı değerleri için suyun akış kaynamasında, kanal hidrolik çapına bağlı olarak etkin kuvvetlerin mertebelerindeki değişimi göstermektedir. Grafik incelendiğinde, kanal hidrolik çapı küçüldükçe yüzey gerilim kuvveti artarken yerçekimi kuvveti azalmaktadır. Aynı zamanda, buharlaşma momentum kuvvetinin atalet ve kayma kuvvetlerine göre mertebeye daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 1.8. Akış kaynamada hidrolik çapa bağlı olarak kuvvetlerin değişimi (Kandlikar 2010a).

## 1. GİRİŞ

Mikrokanallarda kabarcıklanma teorisi makrokanallara benzer olsa da kabarcık büyüme süreci farklılıklar içermektedir. Şekil 1.9'da, makro ve mikro kanallarda kabarcık büyüme süreci gösterilmiştir (Kandlikar 2006). Makrokanallarda, kabarcık sadece oluştuğu yüzeye etkileşime girer ve yüzeyden ayrılır. Mikrokanallarda ise, kanal yüzeyinde oluşan kabarcık büyür ve kanal kesitini tamamen doldurur ve kanalın diğer yüzeyi ile de etkileşime girer. Kandlikar (2006) bu süreç sırasında, kabarcık etrafında aşırı kızdırılmış yığın sıvıdan sıvı-buhar arayüzeyine olan enerji aktarımı ve mikrokanal yüzeyinden kabarcık tabanına gerçekleşen enerji aktarımı sonucu yüksek ısı transfer hızlarının elde edildiğini belirtmiştir.

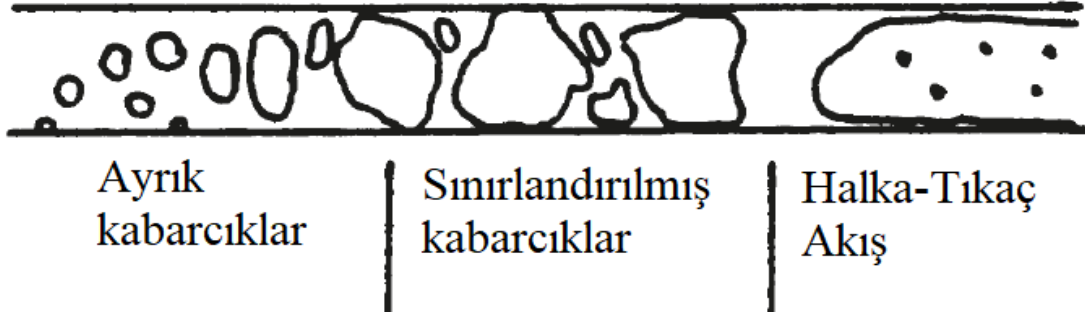


Şekil 1.9. Farklı boyuttaki kanallarda kabarcık oluşum prosesi (Kandlikar 2006).

Küçük boyutlu kanallarda akış kaynama sırasında oluşan tipik akış desenleri Şekil 1.10'da gösterilmiştir (Cornwell and Kew 1993). Büyük ölçekli kanallardan farklı olarak, küçük boyutlu kanallarda, kabarcıkların sınırlandırılması kabarcık büyüme sürecini etkileyerek farklı akış desenlerinin oluşmasına neden olur. Cornwell and Kew (1993),  $1,2 \times 0,9 \text{ mm}^2$  kesit alanına sahip dikdörtgen kesitli kanallarda R-133 soğutucu akışkanı ile yapmış oldukları akış kaynama deneylerinde, temel olarak ayırık kabarcıklı akış, sınırlandırılmış akış ve tıkaç/halka akış olmak üzere üç akış deseni gözlemlemişlerdir. Ayrıca, yazarlar akış desenlerinin ısı transfer katsayısını güçlü bir şekilde etkilediği ifade etmiştir. Kuruluk derecesinin nispeten küçük olduğu ayırık kabarcıklı akış bölgesinde ısı transfer katsayısının ısı akısının 0,7 kuvvetiyle orantılı olduğu bulunmuştur. Isı transfer katsayısının ısı akısına bağımlılık göstermesi bu bölgede kabarcıklı kaynama rejiminin baskın olması ile ilişkilendirilmiştir. Kabarcıkların kanal kesitini tamamen kaplamasıyla sınırlandırılmış kabarcık deseni oluşmuştur. Sınırlandırılmış akış deseninin hâkim olduğu bölgede ısı transfer katsayısının ısı akısına bağımlılığı azalmıştır. Yüzeye dik yönde büyüemeyen kabarcıklar aksel yönde büyümeye devam ederek halkasal-tıkaç akış

## 1. GİRİŞ

desenini oluşturmuşlardır. Taşınım etkilerin önem kazandığı bu bölgede taşınım kaynama rejiminin baskın olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 1.10. Akış kaynama rejimleri (Cornwell and Kew 1993).

Makrokanallarda akış kaynama ısı transferinde, kabarcıklı kaynama ve taşınım kaynama olmak üzere başlıca iki mekanizma olduğu kabul edilir. Kabarcıklı kaynamada, ısı transfer katsayısı ısı akısına ve doyma basıncına bağlı iken, kütleli akı ve kuruluk derecesinden bağımsızdır. Taşınım kaynamada ise, ısı transfer katsayısı ısı akısından bağımsız iken, kütleli akı ve kuruluk derecesine bağlıdır. Literatürde, mikrokanallarda akış kaynama çalışmalarının çoğunda da bu yaklaşım kabul edilmiştir. Ancak, makrokanallardaki bu yaklaşımın mikrokanallarda da geçerliliği tartışmalı bir konudur (Kakaç et al. 2010). Bunun nedeni, literatürde mevcut deneysel çalışmaların sonuçları arasındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Bazı araştırmacılar (Bao et al. 2000; Kandlikar 2004; Revellin et al. 2006), mikrokanallarda kabarcıklı kaynamanın baskın olduğunu ifade ederken bazıları (Jiang et al. 2001; Qu and Mudawar 2003a) ise taşınımlı kaynamanın baskın olduğunu belirtmektedir. Jacobi and Thome (2002), ısı transfer katsayısının ısı akısına bağımlı olmasının kabarcıklı kaynamanın mevcut veya baskın olduğunu kanıtlamayacağını ifade etmiştir. Buna rağmen, literatürde mevcut çok sayıdaki akış kaynama ısı transfer korelasyonlarının çoğunda kabarcıklı kaynama ve taşınım kaynama mekanizmaları dikkate alınarak oluşturulmuştur.

### 1.10. Yüzey Yapısı

Yüzey, bir ortamı veya maddeyi diğer bir ortamdan veya maddeden ayıran sınır bölgesi olarak tanımlanabilir. Ayırdığı ortamların cinsine bağlı olarak katı-sıvı, katı-gaz veya katı-katı ara yüzeyi olarakta adlandırılabilen katı yüzeyler, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, yüzeyin elde edilme yöntemine, yüzeyin diğer ortamlarla ve çevresiyle olan etkileşimine bağlı olarak karmaşık bir yapıya sahiptir. Isı ve kütle

## 1. GİRİŞ

---

transferi, aşınma, yağlama, korozyon, ıslatabilirlik, yorulma, kaplama, birleştirme, kabarcık oluşumu gibi yüzey etkileşiminin önemli olduğu süreçleri içeren birçok mühendislik uygulamalarında sistemin performansı yüzey yapısı ile yakından ilişkilidir (Bhushan 2001). Yüzey yapısını etkileyen birincil faktör ise seçilen üretim yöntemi ve işleme parametreleridir. Katı yüzeyler, üretim yöntemi ne olursa olsun tanımlanan geometrik şekilden sapmalar veya düzensizlikler içerir (Whitehouse 1994). Bu düzensizlikler makro boyutlardaki form sapmalarından mikro boyutlardaki düzgünlüklere ve nano mertebelerdeki atomlararası düzensizliklere kadar geniş bir ölçek aralığında olabilir. İşleme yönteminin karakteristik özellikleri ve prosesdeki hatalar moleküler seviyede pürüzsüz, düz mükemmel denilenebilecek yüzeyler elde edilmesini engellemektedir. Dolayısıyla, bir katı yüzey, belli bir üretim prosesi için kendine özgü bir yüzey yapısına sahiptir. Bu yüzden, yüzey yapısının karakterizasyonu ve istenen yapıya sahip yüzeylerin elde edilmesi için araştırmacılar tarafından birçok çalışma yapılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğünün kaynama üzerinde etkisinin olduğu kaynama çalışmalarının başladığı ilk dönemlerden itibaren bilinmektedir. Jacob (1936), yüzey pürüzlülüğünün ve kimyasal yapısının (korozyon, oksitlenme vb. olup olmaması) kaynama eğrisi üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Corty and Foust (1955) farklı polisaj işlemi yapılmış bakır ve nikel yüzeylerde yapmış olduğu kaynama deneylerinde, aynı ısı akısında pürüzlülüğü fazla yüzeylerde kaynamanın daha düşük kızdırma farklarında başladığını gözlemlemişlerdir. Bu durum, pürüzlülüğü fazla olan yüzeylerde ıslatılmamış daha büyük oyukların bulunmasıyla ilişkilendirilmiştir. Westwater (1959) kabarcık oluşumunun yüzeydeki oyuklarda başladığını ileri sürmüştür. Clark et al. (1959) tarafından yapılan fotoğrafik kabarcıklı kaynama deneylerinde, yüzeydeki pürüzlülük bölgelerinin kabarcıklanma odakları olarak görev yaptığını tespit etmişlerdir. Bankoff (1957, 1958) ise teorik olarak, sadece ıslatılmamış ve belli şekle sahip oyukların kabarcık odakları olarak görev yapabileceğini ispat etmiştir. Kurihari and Myers (1960) farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip bakır yüzeylerde su ve organik sıvılarla yaptıkları kaynama deneylerinde kabarcıklanma bölgelerinin yoğunluğu arttıkça ısı transfer katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Isı transfer katsayısının aktif kabarcıklanma alan yoğunluğunun 0,43'üncü kuvveti ile orantılı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmalar, kabarcıklı kaynamanın mekanizmasını anlamaya yönelik çalışmaları arttırmıştır. Nihayetinde, kaynama başlangıcını ve kabarcık oluşumunu

## 1. GİRİŞ

---

yüzeydeki pürüzlülük noktalarında gazın hapsedilmesiyle ilişkilendiren kabarcıklanma teorilerinin öne sürülmesine yol açmıştır.

Yüzey pürüzlülüğünün kaynamalı ısı transferine etkisini belirlemek için yapılan çalışmaların çoğu havuz kaynama ile ilgilidir. Jones et al. (2009) bu çalışmaları özetlemiştir. Literatürde, akış kaynamada yüzey pürüzlülüğün etkisini inceleyen çok az sayıda çalışma mevcuttur. Kandlikar and Howell (1996) mikro kanatçık bulunan bir ısıtıcı yüzeyde akış kaynamayı incelemiştir. Düz yüzeye göre mikro kanatçıklı yüzeyde kabarcık aktivitesinde artış olduğu ifade edilmiştir. Howell (1996) akış kaynamada, yüzey pürüzlülüğü arttıkça kabarcıklanmayı başlatmak için daha az kızdırma sıcaklık farkına ihtiyaç olduğunu rapor etmiştir. Wadekar (1998) R-113 soğutucu akışkanı ile yaptığı akış kaynama deneylerinde, gözenekli yüzeyden olan ısı transferinin düz yüzeye göre yaklaşık bir mertebe kadar yüksek olduğunu ifade etmiştir. Yu et al. (1999), 8,4 mm ve 7,99 mm iç çapa sahip borularda beş farklı soğutucu akışkana (HCF-134a, HCFC-123, HCFC-22, CFC-114, ve CFC-12) ait akış kaynama deneylerinde yüzey pürüzlülüğünün ısı transferini arttırdığını gözlemlemiştir. Isı transfer katsayısındaki artışın kabarcıklı kaynama bileşeninin artmasından kaynaklandığını; bu durumu da yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla aktif kabarcıklanma bölgelerinin artmasıyla açıklamışlardır. Kandlikar and Spiesman (1998) yüzey pürüzlülüğü parametresinin kaynamalı ısı transferi üzerindeki etkisinin belirsiz olduğu ancak ısı transferinin aktif kabarcıklanma bölgelerinin sayısına ve dağılımına bağlı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Yüzey üzerinde pürüzlülük, üretim yöntemine ve nihai yüzey yapısına göre deterministik ve rastlantısal olmak üzere iki farklı şekilde olabilir. Periyodik desenler ve şekillerden oluşan yüzeyler deterministik olarak kabul edilir. Deterministik yüzeyler, üretimden önce tasarlanmış yüzeylerdir. Rastlantısal pürüzlülüğe sahip yüzeyler üretim prosesi sonucu elde edilen doğal yüzeylerdir. Mühendislik yüzeylerinin çoğu rastlantısal pürüzlülüğe sahiptir. Yüzey yapısının kaynama prosesindeki etkisinin anlaşılmasıyla birlikte mikrokanallarda ilk olarak deterministik olarak oluşturulmuş yüzeylerde akış kaynama çalışmaları önem kazanmıştır. Kandlikar et al. (2005) kaynama yüzeyine lazerle 5-30  $\mu\text{m}$  çaplı suni kabarcıklanma odakları oluşturarak kabarcıklanma aktivitesini arttırmayı amaçlamışlardır. Böylelikle, kabarcıklanmanın daha düşük kızdırma farklarında başladığı ve maksimum 110  $\text{kW/m}^2\text{C}$  ısı transfer katsayısına ulaşıldığı rapor

edilmiştir. Kuo and Peles (2008) mikrokanal yan yüzeylerinde 10 µm genişliğinde yarıklar oluşturarak kabarcıklanma bölgelerini arttırmışlardır. Yüksek kütleli akılarda düz yüzeye göre daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilirken düşük kütleli akılarda, ısı transfer katsayısı düz yüzeye göre azalmıştır. Koşar et al. (2006) ise kanal girişine kısıtlayıcı yerleştirmişlerdir. Giriş kısıtlayıcıları, akış kararsızlıklarını azaltırken, basınç kayıplarını arttırmıştır. Isı transfer katsayısında önemli bir değişiklik oluşturmamıştır. Qu and Siu-Hu (2009a, 2009b) şaşırtmalı mikro kanatçık, Koşar and Peles (2007) hidrofoil kanatçık, Krishnamurty and Peles (2010) silindirik iğne tip kanatçık, Law et al. (2014) oblik kanatçık kullanılarak mikrokanallarda akış kaynama ısı transferini incelemişlerdir. Akış kaynama yüzeyinde bu tip mikro yapıların oluşturulması ısı transfer yüzey alanını artırması ve kabarcıklanma için yeni alanlar sağlaması nedeniyle ısı transferini arttırdığı görülmüştür. Ancak, yüzeyde oluşturulmuş bu tip yapılar akışa karşı direnç oluşturduğundan basınç kayıplarını önemli derecede arttırmıştır. Ayrıca, mikrokanallarda bu tip yapıların oluşturulması yüksek üretim maliyetlerine neden olmaktadır. Silikon alttaş üzerine litografi yöntemiyle mikro yapılar oluşturulsa da, metal alttaşlar için bu durum oldukça zor ve maliyetlidir (Kandlikar 2016). Bunun yerine, mikrokanal üretimi sırasında işleme parametrelerini değiştirerek rastlantısal pürüzlülüğe sahip yüzeyler oluşturarak kaynamalı ısı transferinde artırım sağlamak daha kolay ve az maliyetli bir seçenektir. Her ne kadar Webb (1981) standart yüzey işleme yöntemleri ile elde edilen rastlantısal yüzeylerin makro ölçekte kaynama transferini arttırmada yetersiz olduğunu ifade etse de gelişen mikro üretim yöntemleriyle birlikte farklı pürüzlülük seviyelerine sahip yüzeylerinin üretiminin mümkün hale gelmesi rastlantısal yüzey pürüzlülüğünün özellikle mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi üzerindeki etkisini dikkate almayı gerektirmiştir (Jones and Garimella 2009). Literatürde mikrokanallarda akış kaynama ile yapılan çalışmaların birkaçı hariç (Jones and Garimella 2009; Jafari et al. 2016) hiçbirisinde yüzey pürüzlülüğü etkisi dikkate alınmamıştır. Bu durum mikro ölçekte pürüzlülüğü tanımlamanın zor olmasından kaynaklanabilir. Bununla birlikte, mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi karakteristiklerine etki eden ısı akısı, kütleli akı, hidrolik çap, aşırı soğutma, kuruluk derecesi, pürüzlülük vb. parametreler arasında yüzey üzerinde rastlantısal bir dağılım gösteren pürüzlülüğün etkisini analiz etmek diğer parametrelere göre zor olmaktadır. Diğer yandan, birçok araştırmacı literatürde sunulan çalışmalarda mikrokanallarda akış kaynama karakteristikleri arasında önemli farklılıkların olmasını yüzey pürüzlülüğünün göz ardı edilmesinden kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir (Wu and Cheng 2003; Kandlikar et al. 2003; Shen et al. 2006; Thome

and Consolini 2010; Karayiannis and Mahmoud 2017). Bütün bunlar göz önüne alındığında, pürüzlülüğün mikrokanallarda akış kaynama karakteristiklerine olan etkisini açığa çıkarmak ve kaynama prosesinin fiziksel temellerini daha iyi anlamak için diğer çalışma ve tasarım parametrelerinin yanında pürüzlülüğünde dikkate alındığı deneysel çalışmalar yapılması gerekliliği çok açıktır.

### 1.11. Tezin Amacı ve Kapsamı

Elektronik cihazların performanslarının artması, boyutlarının küçülmesi ve daha kompakt hale gelmesi bu cihazların birim alanından olan ısı transferinin önemli ölçüde artmasına yol açmıştır. Havacılık, savunma, uzay, tıp gibi yüksek teknoloji alanlarında kullanılan elektronik ekipmanların artan ısı akısı değerleri nispeten daha az yüzey sıcaklık artışının görüldüğü iki fazlı soğutma uygulamalarını cazip hale getirmektedir (Manay 2017).

Mikrokanalların yüksek ısı transfer alan/hacim oranına sahip olması ve akış ve ısı transfer karakteristiklerinde makro ölçekteki kanallara kıyasla farklı kuvvetlerin öneme sahip olması yeni bir taşınım prosesinin oluşmasına neden olmuştur. Mikrokanallar yüksek ısı transfer alan/hacim değerine sahip olduklarından dolayı küçük yüzeylerden yüksek miktarda ısı transferi gerçekleştirmektedirler. Bu ise, ısı transfer sistemlerinde daha az miktarda akışkan ile daha fazla ısı transferi elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, kaynama sırasında sıvı-gaz faz değişiminde buharlaşma gizli ısının kullanılması, yüzey sıcaklığının neredeyse sabit kalması yüksek ısı transfer katsayılarının elde edilmesine yol açmaktadır (Manay 2017). Mikrokanallarda iki fazlı akışlarda elde edilen ısı transfer katsayısı değerlerinin tek fazlı akışlara göre daha yüksek olması, endüstride yüksek ısı akısı gerektiren uygulamalarda akış kaynaması önemli hale getirmektedir.

Mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi açısından yüksek performans potansiyeline sahip olmasına karşın, kaynama prosesi sırasında görülen akış kararsızlıkları, basınç dalgalanmaları ve yüksek basınç düşüşü mikrokanalların endüstriyel olarak yaygınlaşmasının önünde en büyük engellerden biridir. Kanal boyutlarının küçük olması kabarcıkların kanal içerisinde büyümesini engelleyerek akış

doğrultusunda kanal boyutlarıyla sınırlandırılmış uzayan kabarcıkların oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum ise akış kaynama sırasında kabarcık oluşumunu, akış rejimlerini, ısı transfer karakteristiklerini ve basınç düşümünü önemli ölçüde değiştirmektedir (Ribatski et al., 2006; Cheng and Zou 2010; Cheng and Liu 2011; Tibiriça and Ribatski 2014). Literatürde birçok araştırmacı tarafından belirtildiği üzere mikrokanallarda akış kaynama ısı transfer mekanizması, basınç düşümü ve karasızlıklar ile ilgili belirsizlikler ve çelişkiler mevcuttur (Kandlikar 2010b; Chen and Garimella 2011; Ribatski 2013; Tibirica et al. 2015; Cheng and Xia 2017). Bu durum, kaynama prosesini etkileyen parametrelerin çokluğu, karmaşık akış yapısı, deneysel verilerin yetersizliği, mikro boyutlarda deneysel verilerin yeterli doğrulukta ölçülmesinin zorluğundan kaynaklanabilir. Bu yüzden, mikrokanallarda akış kaynama sistemlerinin güvenilir bir şekilde tasarlanması ve uygulamada kullanılması için hem deneysel hem de teorik kapsamlı çalışmalara hâlen ihtiyaç vardır.

Bu tez çalışmasının amacı, pürüzlü yüzeylere sahip mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri ile ilgili geniş bir deneysel veri tabanı oluşturarak literatürde mevcut çelişkileri ve eksiklikleri ortadan kaldırmaktır. Bu amaçla, 9 farklı mikrokanallı ısı alıcıda akış kaynama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kanal genişlikleri, 300  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  ve 700  $\mu\text{m}$  iken kanal yüksekliği 450  $\mu\text{m}$ 'dir. Deneylerde dört farklı yüzey pürüzlülük değeri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, ortalama yüzey pürüzlülük değeri ( $R_a$ ) ile karakterize edilmiştir. Çalışılan yüzey pürüzlülük değerleri, 1-3,0 $\mu\text{m}$  arasındadır. Yüzey pürüzlülüğü ve hidrolik çapın yanı sıra çalışma parametreleri olan ısı akısı ve kütle akının mikrokanallı ısı alıcılarda, akış kaynama ısı transferi basınç düşümü karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve akış görüntüleme ile akış desenleri ortaya çıkarılmıştır. Deneylerde, iş akışkanı olarak su kullanılmış olup, suyun mikrokanallı ısı alıcıya giriş sıcaklığı 85°C'dir. Mikrokanallı ısı alıcının tabanından uygulanan ısı güç 50-100W ve çalışılan ısı akısı değerleri 50-160 kW/m<sup>2</sup> aralığındadır. Deneyler, 100, 200, 300 ve 400 kg/m<sup>2</sup>s olmak üzere dört farklı kütle akıda gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması ile literatüre aşağıdaki katkılar sunulmuştur:

- Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi ve basınç düşümü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Zira, bu konuda literatürde

yeterince çalışma bulunmamaktadır. Birçok araştırmacı tarafından, akış kaynama ısı transferiyle ilgili literatüre sunulan sonuçlar arasındaki farklılıkların ve çelişkilerin yüzey pürüzlülüğü etkisinin ihmal edilmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir (Thome and Consolini 2010, Karayiannis and Mahmoud 2017). Kabarcık çekirdeklenmesinin pürüzlülük bölgelerinde başlaması bu parametrenin göz ardı edilmemesi gerektiğini açıkça göstermektedir.

- Literatürde yüzey pürüzlülüğü etkisinin ihmal edilmesinin temel nedeni mikrokanaallarda kontrollü ve homojen dağılımlı bir yüzey pürüzlülüğe sahip yüzeylerin elde edilmesinin güçlüğünden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada farklı üretim metodları ile mikrokanaallı ısı alıcı üretimi ve yüzey pürüzlendirme işlemi yapılarak, bu üretim tekniklerinin üstünlükleri ve zayıf noktaları tespit edilmiştir. Böylelikle, mikrokanaallı ısı alıcı üretimi için kullanılan üretim tekniklerinin değerlendirmesi açısından literatüre önemli katkı sağlanmıştır.
- Yüzey pürüzlülüğü ile beraber, hidrolik çapın, kanal genişliğinin, ısı akısı ve kütsel akının çoklu mikrokanaallarda akış kaynama karakteristikleri üzerindeki etkisi geniş bir parametre aralığında çalışılarak literatüre detaylı bir veri tabanı sunulmuştur. Ayrıca, deneylerde tekli mikrokanaal yerine çoklu mikrokanaallı elemanlar kullanılarak, kanallar arası etkileşiminin akış ve ısı transferi karakteristiklerine olan etkisi incelenmiştir.
- Literatürdeki çalışmalarda iş akışkanı olarak çoğunlukla kaynama noktası nispeten düşük fluorinert grubu soğutucu akışkanların kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise iş akışkanı olarak su kullanılmıştır. Suyun soğutucu akışkanlara göre oldukça yüksek buharlaşma entalpisine sahip olması kaynama ile yüksek miktarlarda ısı transferi elde edilmesi açısından oldukça avantajlıdır. Diğer yandan, suyun sağlık ve çevre açısından zararsız ve temininin kolay olması uygulamada kullanım potansiyelini arttırmaktadır.
- Deneylerde, sıcaklık ve basınç verisi alınırken eş zamanlı olarak CCD kamera ile akış görüntüleri alınmıştır. Akış desenleri ve akış kaynama ısı transferi ve basınç

## 1. GİRİŞ

---

karakteristikleri arasında ilişki analiz edilmiştir. Böylelikle mikrokanallarda akış kaynamanın fiziğine yönelik önemli bulgular elde edilmiştir.

- Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler kullanılarak mikrokanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısı için; kaynama sayısı, sıvı Weber sayısı, Bond sayısı, sıvı Reynolds sayısı, sıvı Prandtl sayısı, kuruluk derecesi, fazların yoğunluk oranı kanal yükseklik/genişlik oranı, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve yüzey arttırım faktörünü dikkate alan özgün bir bağıntı oluşturulmuştur.



### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, mikrokannallarda akış kaynama ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. İlk olarak akış kaynama uygulamalarında kannalların sınıflandırılması için önerilen kriterler derlenmiştir. Daha sonra, sırasıyla mikrokannallarda akış kaynamaya özgü akış desenleri, ısı transferi, basınç düşümü ve kararsızlıklarla ilgili yapılmış deneysel çalışmalar sunulmuştur.

#### 2.1. Makro ve Mikro Ölçekler Arasındaki Geçiş Kriterleri

Kaynamalı akış olayı, makro ve mikro ölçekteki kannallarda oldukça farklı karakteristiklere sahip olduğundan makro ve mikro kannallar arasındaki geçiş kriterinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Ancak, literatürde kaynamalı akışla ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen, makro ve mikro ölçekler arasındaki geçiş kriteri konusunda fikir birliği sağlanamamıştır. Genel olarak, makro ve mikro arasındaki ayrımı yapan çalışmalar iki gruba ayrılabilir. İlk gruptaki çalışmalarda, hidrolik çap veya yüzey alanı gibi geometrik parametrelere göre bir sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırma metoduna göre yapılan önemli çalışmalar Bölüm 1.2’de verilmiştir. Bu sınıflandırmalar, küçük ölçekli kannallarda kaynamalı akışa özgü kabarcık sınırlanması, yüzey gerilim kuvvetleri, tabakalı akış yapısının olmaması gibi fiziksel mekanizmaları dikkate almaması nedeniyle eleştirilmiştir. Bu yüzden, ikinci gruptaki sınıflandırma çalışmalarında, fiziksel mekanizmaya dayalı kriterler geliştirilmiştir. Bu çalışmaların temel özelliği sınıflandırmaların boyutsuz sayılara göre yapılmış olmasıdır. Kaynamada kullanılan başlıca boyutsuz sayılar Bölüm 1.4’te verilmiştir.

İki fazlı akışlarda, kabarcık sınırlanması ve bunun neden olduğu fiziksel değişikliğe bağlı olarak büyük ve küçük kannallar arasındaki ilk ayrım Suo and Griffith (1964) tarafından yapılmıştır. Yazarlar, yatay kılcal tüplerde yaptığı adyabatik iki fazlı akış deneylerinde tıkaç akış oluşumunu incelemiştir. Kapiler boyutta, yerçekimi kuvvetlerinin önemini kaybettiği, yüzey gerilim kuvvetlerinin önemli hale geldiğini belirtmişlerdir.  $Bd^{0.3} < 0,3$  olduğu durumda tüp içerisinde sınırlanmış uzun kabarcıkların sıvı kütleleriyle ayrıldığı tıkaç akış rejiminin oluştuğu görülmüştür. Bir başka çalışmada, Brauner and Marom (1992) adyabatik iki fazlı akışlarda, farklı boyuttaki

tüpler için tabakalı ve tabakasız akış desenleri arasındaki geçiş sınırı için lineer kararlılık analizine dayanarak Eötves sayısını (Eö) önermişlerdir. Akış desenleri arasındaki geçiş dikkate alındığında, yüzey gerilim kuvvetlerinin yanı sıra, kanal boyutu, faz yoğunlukları arasındaki fark ve yerçekimi kuvvetinin kanalın küçük ölçekli olarak sınıflandırılmasında önemli olduğunu belirtmişlerdir.  $Eö > 1$  değerlerinde yüzey gerilim kuvvetlerinin önemli hale geldiği ve kanalın küçük çaplı olarak kabul edilebileceği ifade edilmiştir. Diğer taraftan, Cornwell and Kew (1993), çoklu kanallı bir ısı değiştiricide R-113 ile yaptıkları kaynamalı akış deneylerinde, farklı ölçekteki kanallar arasındaki geçiş için sınırlama sayısını ( $Co$ ) önermişlerdir. Sınırlandırılmış kabarcık oluşumunun başladığı  $Co = 0,5$  değeri kriter olarak alınmıştır.  $Co > 0,5$  değerlerinde sınırlandırılmış kabarcıklı akış deseninin görüldüğü, ve kanalın mikro boyutlu kanal olarak değerlendirileceğini ifade etmişlerdir. Triplett et al. (1999) ise, kanal hidrolik çapının Laplace ( $La$ ) sayısına eşit veya küçük olduğu durumda, kanalı küçük ölçekli kanal olarak değerlendirmişlerdir. Li and Wang (2003) ise, küçük çaplı yatay borularda yoğuşma sırasında, yerçekimi etkilerinin ihmal edildiği simetrik akış ile yerçekimi etkilerinin önemli olduğu simetrik olmayan akış desenleri arasındaki geçişi dikkate alarak farklı ölçekler için kılcallık uzunluğuna bağlı kritik çap ( $d_{cr}$ ) ve eşik çap ( $d_{th}$ ) tanımlamaları yapmışlardır. Kılcallık uzunluğu ( $L_{cap}$ ), kritik çap ( $d_{cr}$ ) ve eşik çap ( $d_{th}$ ) denklemleri Eşitlik 2.1'de verilmiştir. Buna göre, kanal hidrolik çapı,  $d \leq d_{cr}$  olduğunda, yerçekimi etkileri önemsizleşir ve akış desenleri simetrik hale gelir.  $d_{cr} \leq d \leq d_{th}$  olması halinde, yüzey gerilim kuvvetleri ve yerçekimi kuvvetlerinin aynı oranda etki eder ve simetrik akış desenlerinden sapmalar görülür.  $d > d_{th}$  durumunda, yüzey gerilim kuvvetleri yerçekimi kuvvetlerine göre önemsizleşir ve akış desenleri makrokanallardaki ile benzerdir.

$$L_{cap} = \left( \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (2.1a)$$

$$d_{cr} = 0,224L_{cap} \quad (2.1b)$$

$$d_{th} = 1.75L_{cap} \quad (2.1c)$$

Brauner and Ullman (2007), büyük ve küçük boyutlu kanallardaki adyabatik iki fazlı akış desenlerinin farklılaşmasında kaldırma kuvvetlerinin yüzey gerilim

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

kuvvetlerine oranı olan Eötves sayısının (Eö) önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Eö~0,2 değerini makro ve mikro kanallar arasında geçiş kriteri olarak belirlemişlerdir.

Ong and Thome (2009) R-134a, R-236fa ve R-245fa soğutucu akışkanları kullanarak en küçüğü 1,03 mm çapına sahip muhtelif boyutlu kanallarda yaptığı akış kaynama deney sonuçlarına göre makro ve mikro ölçekler arasındaki geçişin yavaş yavaş gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Yerçekimi kuvvetleri  $Co < 0,34$  değerlerinde baskın iken  $Co > 1,0$  değerlerinde etkisini yitirmiştir. Makro ölçeğin üst sınırı için  $Co < 0,3-0,4$  kriterini, mikro ölçeğin alt sınırı için  $Co > 1$  kriterini önermişlerdir.  $0,3-0,4 < Co < 1$  bölgesini geçiş bölgesi olarak adlandırmışlardır.

Harirchian and Garimella (2010) FC-77 akışkanı ile farklı kesit alanına sahip kanallarla yaptıkları kapsamlı akış kaynama deneylerinde, sınırlanmış kabarcıklı akış ve sınırlanmamış kabarcıklı akış arasında geçiş kriteri olarak,  $Bo^{0.5}Re$  şeklinde tanımladıkları ve taşınım sınırlama sayısı adı verdikleri yeni bir parametre kullanmışlardır.  $Bo^{0.5}Re < 160$  değerlerinde kabarcıkların kanal içinde sınırlandırıldığını ve kanalın mikrokanal olarak değerlendirilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Son zamanlarda, Tibirica and Ribatski (2015) makro ölçekten mikro ölçeğe geçiş için iki kriter önermişlerdir. Birinci kriter, dairesel kesitli bir kanalda, tıkaç akışın olduğu maksimum çapta statik dengenin olduğu yaklaşımıyla elde edilmiştir. Bu modelde, sıvı buhar ara yüzeyindeki hidrostatik basınç ve yüzey gerilme kuvvetlerinin dengesinden makro/mikro geçiş kriteri  $D = La\sqrt{8 \cos \theta}$  olarak bulunmuştur. Bu denklemde  $\theta$  temas açısıdır ve diğer kriterlerden farklı olarak ilk kez bu kriterde kullanılmıştır. Yazarların önerdikleri ikinci kriter, halkasal akışta kanal çapının azalması ve buhar faz hızının artmasıyla sıvı filmin düzgünlüğünün artması yaklaşımına dayanır. Buna göre, geçiş kriterinin  $D = La\sqrt{1/20}$  olarak ifade etmişlerdir. Bu değer altında, yüzey gerilim kuvveti, yerçekimi kuvvetine karşı üstün hale gelmekte sıvı film kalınlığı kanal boyunca üniform olmaktadır.

Buraya kadar bahsedilen literatüde görüldüğü gibi, makro ölçekten mikro ölçeğe geçiş için önerilen genel kabul görmüş bir kriter bulunmamaktadır. Bu nedenle, iki fazlı akış uygulamalarında, kanal boyutlarının sınıflandırılması güncelliğini korumaktadır.

### 2.2. Mikrokanallarda İki Fazlı Akış Desenleri

Mikrokanallarda kanal boyutlarının sınırlayıcı etkileri iki fazlı akışlarda kabarcık gelişimi ve akış desenlerinin makrokanallara göre farklılaşmasına yol açmaktadır. Akış desenleri ve kabarcık dinamiğindeki değişim mikrokanallarda hidrodinamik ve termal karakteristikleri büyük ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden, iki fazlı akışlarda, ısı transfer prosesinin ve basınç düşümünün fiziksel temelini anlamak için akış görüntüleme yardımıyla farklı tasarım ve çalışma parametrelerinde elde edilen akış deseni haritaları oluşturulmuştur. Diğer yandan, iki fazlı akışlarda, kütle, momentum ve enerji aktarımının kanal içinde fazların dağılımına ve geometrik biçimlerine bağlı olması mühendislik uygulamalarında kullanılan cihaz tasarımları için, akış desenlerinin karakterize edilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Mikrokanallarda sıvı/gaz bileşenli iki fazlı akışlar adyabatik ve diabatik olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Adyabatik iki fazlı akışlarda, kanal yüzeyi ile akışkan arasında ısı transferi söz konusu değildir. Diabatik iki fazlı akışlarda ise, kanal yüzeyi ile akışkan arasında ısı transferi gerçekleşir. Akış kaynama, diabatik iki fazlı akışların uygulamada karşılaşılan en yaygın örneğidir. Literatürde, mikrokanallarda hem adyabatik hem de diabatik iki fazlı akışlarda akış desenlerinin belirlenmesi ile ilgili muhtelif çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların çoğu adyabatik akışlardaki akış desenleri ile ilgili olmakla beraber son yıllarda, akış kaynamada akış görüntüleme çalışmalarının arttığı görülmektedir. Diğer yandan, adyabatik iki fazlı akış desenlerinin akış kaynama desenlerini tanımlamak için uygun olup olmadığı henüz açıklığa kavuşmamıştır. Ancak, Kandlikar (2002b), Balasubramanian et al. (2013) gibi bazı araştırma grupları, küçük farklılıklar hariç akış kaynamada görülen akış desenlerinin adyabatik akışlarda görülen akış desenleri ile benzer olduğunu ifade etmişlerdir. Bu kısımda, çoğunlukla akış kaynama ile ilgili yapılmış çalışmalar özetlenmekle birlikte konu bütünlüğü oluşturması açısından adyabatik iki fazlı akışlarda akış desenleri ile ilgili yapılmış önemli çalışmalara da yer verilmiştir.

Küçük boyutlu kanallarda iki fazlı akış desenleri ile ilgili ilk öncü çalışma Suo and Griffith (1964) tarafından yapılmıştır. Deneylerde, sıvı faz için su veya heptan, gaz fazı için helyum veya nitrojen gazları kullanılmışlardır. 1,03 ve 1,60 mm hidrolik çaplı yatay kapiler tüplerde gerçekleştirdikleri adyabatik iki fazlı akış deneylerinde yazarlar,

tıkaç akış, kabarcıklı-tıkaç akış ve halkasal akış rejimlerini gözlemlemişlerdir. Yazarlar, tıkaç akış desenini uzun sınırlandırılmış kabarcıklar olarak tanımlarken, kabarcıklı-tıkaç akış rejimini uzun kabarcıkların arka kısmındaki ara yüzeyin bozulmasıyla sıvı fazın küçük kabarcıklarla dolu olduğu akış deseni olarak tanımlamışlardır. Kapiler tüpte, tıkaç akış rejiminde yüzey gerilim kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetlerine üstün geldiği ifade edilmiştir.

Damianides and Westwater (1988) çapları 1, 2, 3, 4 ve 5 mm olan dairesel kesitli yatay kanallarda su-hava iki fazlı adyabatik akışında kanal çapının akış rejimlerine olan etkisini incelemişlerdir. Deneylerde, kabarcıklı, halkasal ve çalkantılı akış desenleri gözlenmiştir. Yazarlar, yüzey gerilim kuvvetlerinin çapı 5 mm'nin altındaki kanallarda önemli hale geldiğini ifade etmişlerdir. Tabakalı akış bölgesinin çap azaldıkça azaldığı ve 1 mm'lik kanalda tamamen yok olduğu görülmüştür. Kanal çapı azaldıkça, kabarcıklı akış-çalkantılı akış geçişi sıvı fazın daha düşük akış hızlarında meydana gelirken, çalkantılı-halkasal akış geçişi daha yüksek gaz akış hızlarında meydana gelmiştir.

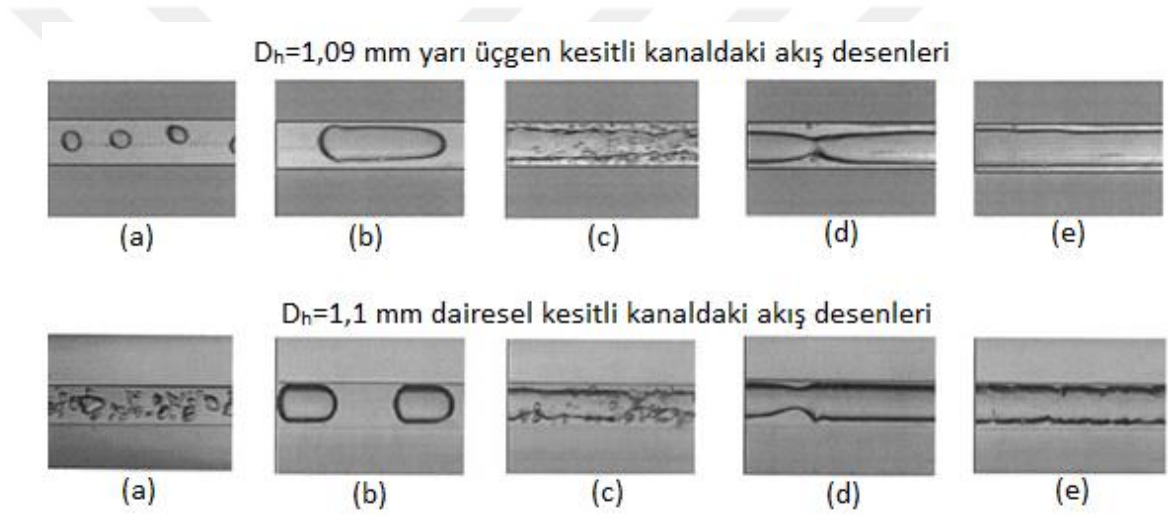
Barajas and Panton (1993), 1,6 mm yatay boruda temas açısının adyabatik iki fazlı akış üzerine etkisini incelemişlerdir. Deneylerde, su-hava karışımı kullanılmıştır. Borular, pyrex, polietilen, poliüretan ve florlanmış etilen profilden üretilmiş olup temas açıları sırasıyla 34°, 61°, 74° ve 106° olarak ölçülmüştür. Deneylerde, farklı olarak boru boyunca su arkı gibi kıvrılarak akan bir sıvı akış biçimi gözlemlemişlerdir. Bu akış desenini "rivulet" akış biçimi olarak isimlendirmişlerdir. Rivulet akış deseninin büyük temas açısı değerlerinde dalgalı akışın yerini aldığı ifade edilmiştir. Temas açısının 90 dereceden küçük olduğu durumlarda rivulet akış deseninin oluşması dışında akış desenleri arasındaki geçişlerde bir fark görülmemiştir.  $\theta=74^\circ$  ve yüksek gaz fazı hızlarında kanal içinde birden fazla rivulet akış deseni oluşmuştur.

Fukano and Kariyasaki (1993), çapları 1 mm ile 26 mm arasında değişen yatay ve düşey olarak konumlandırılmış kapiler borularda su-hava karışımı kullanarak adyabatik iki fazlı akış deneyleri gerçekleştirmişlerdir. 1 mm ve 2,4 mm'lik borularda, sınırlandırılmış kabarcıkların daha kısa ve simetrik olduğu görülmüştür. Yazarlar, çapı 5-9 mm arasında olan borularda, yüzey gerilim kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetlerine karşı üstünlük sağladığını belirtmişlerdir. Boru çapı azaldıkça sıvı film kalınlığının daha

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

düzgün olduğu ve simetrik halkasal akışın olduğu görülmüştür. Ayrıca, boru çapı azaldıkça sıvı film kalınlığı azalmıştır.

Triplett et al. (1999), 1,1 mm ve 1,45 mm iç çaplı dairesel kesitli borular ve 1,09 ve 1,49 mm hidrolik çaplı yarı üçgen kesitli yatay kanallarda gaz ve sıvı kolon hızlarının sırasıyla 0,02-80 m/s ve 0,02-8 m/s aralıklarında oluşan akış desenlerini kamera yardımıyla görsel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, kabarcıklı, çalkantılı, tıkaç, tıkaç/halkasal ve halkasal akış desenleri görülmüştür (Şekil 2.1). Deneylerde, tabakalı akışın görülmemesi yazarlar tarafından yüzey etkilerinin baskın olmasıyla ilişkilendirilmiştir.

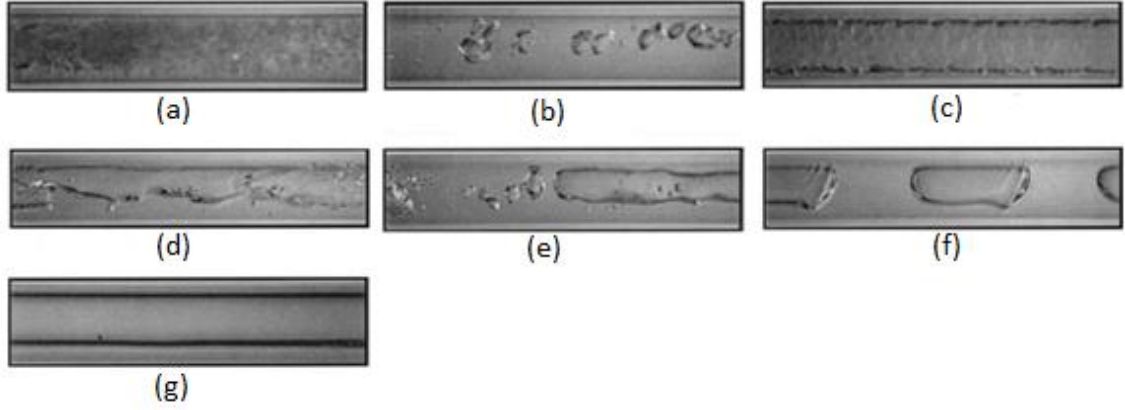


Şekil 2.1. Farklı kesitli kanallarda oluşan akış desenleri: (a) kabarcıklı (b) tıkaç (c) çalkantılı (d) tıkaç/halkasal (e) halkasal (Triplett et al. 1999).

Coleman ve Garimella (1999), hidrolik çapı 1,3-5,5 mm arasında değişen pyrex camdan imal edilmiş yatay kanallarda hidrolik çapın adyabatik iki fazlı akışlarda görülen akış rejimlerine etkisini incelemişlerdir. Gaz ve sıvı fazların kolon hızları sırasıyla 0,1-100 m/s ve 0,01-10 m/s aralığında olup akış rejimleri arasındaki geçişler yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiştir. Deneylerde, kabarcıklı, dağınık, uzun kabarcıklı, tıkaç, tabakalı, dalgalı, halkasal-dalgalı ve halkasal akış biçimleri gözlenmiştir (Şekil 2.2). Yazarlar hidrolik çapın akış rejimleri üzerinde önemli etkileri olduğunu belirtmişlerdir. Hidrolik çap azaldıkça dağınık akıştan kabarcıklı akışa geçişin daha yüksek sıvı kolon hız değerlerinde gerçekleştiği görülmüştür. Hidrolik çap azaldıkça yüzey kuvvetleri etkisiyle

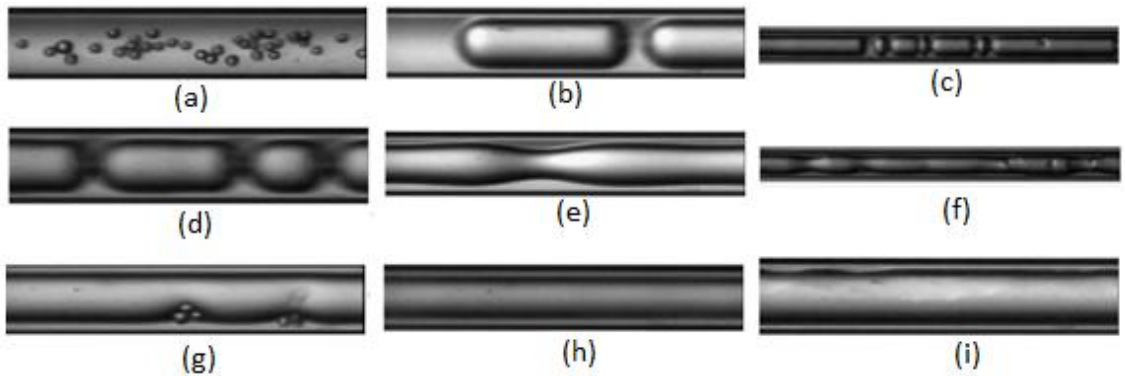
## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

tabakalı akış rejiminin bastırıldığı ve 5,5 mm'den küçük hidrolik çaplı kanallarda tabakalı akış rejiminin oluşmadığı ifade edilmiştir.



Şekil 2.2. Coleman ve Garimella (1999) akış desenleri: (a) dağınık akış (b) kabarcıklı akış (c) halkasal akış (d) dalgalı-halkasal akış (e) tıkaç akış (f) uzun kabarcıklı akış (g) tabakalı akış.

Serizawa et al. (2002), hidrolik çapları 20-100  $\mu\text{m}$  arasında değişen dairesel kesitli mikrokanallarda hava-su, ve buhar-su iki fazlı akışlarındaki akış desenlerini mikroskop ve yüksek hızlı kamera yardımıyla incelemişlerdir. Sıvı fazın kolon hızı 0,003-17,52 m/s aralığında iken, gaz fazın kolon hızı 0,0012-295,6 m/s aralığındadır. Deneyleerde, dağınık kabarcıklı akış, tıkaç akış, sıvı yüzük akış, sıvı yığın akış, halkasal akış, köpüklü halkasal akış, rivulet akış, sıvı damlacıklı akış desenleri görülmüştür (Şekil 2.3). Yazarlar, kanaldaki yüzey koşullarının akış desenlerini etkilediğini belirtmişlerdir. Yüksek hızlarda, kararlı bir halkasal akış ve gaz tıkaçları oluşurken, düşük hızlarda, gaz tıkaçları ve kanal duvarı arasında kuru ve ıslak bölgeler görülmüştür.



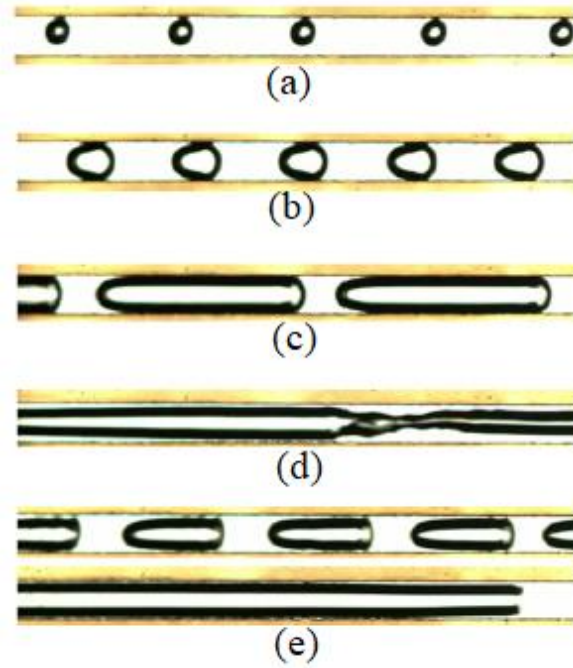
Şekil 2.3. 100  $\mu\text{m}$  çaplı mikrokanalda hava-su iki fazlı akış desenleri (Serizawa, 2002): (a) kabarcıklı akış (b) tıkaç akış (c) geçiş akışı (d) Yakitori akışı (e) sıvı yüzük akış (f) geçiş akışı (g) köpüklü halkasal akış (h) halkasal akış (i) rivulet akış.

Qu et al. (2004), 120 mm uzunluğunda ve  $0,406 \times 2,032$  mm<sup>2</sup> dikdörtgen kesitli bir kanalda adyabatik nitrojen-su iki fazlı akışını incelemişlerdir. Deneyleerde, nitrojen ve suyun kolon hızları sırasıyla 0,08-81,92 m/s ve 0,04-10,24 m/s aralığındadır. Akış görüntüleme sonuçlarına göre baskın akış desenleri tıkaç ve halkasal akış olup bazı durumlarda kabarcıklı akış deseni görülmüştür. Deneyleerde, tabakalı ve çalkantılı akış desenleri gözlenmemiştir. Tıkaç ve halkasal akışlar arasındaki geçiş makrokanallara göre daha düşük gaz fazı kolon hızı değerlerinde gerçekleşmiştir. Yazarlar, mikrokanallardaki akış desenlerinin makrokanallara göre oldukça farklı olduğunu ve mikrokanallarda iki fazlı akış için üniversal akış deseni haritası oluşturmanın zor olduğunu ifade etmiştir.

Venkatesan et al. (2010), iç çapı 0,6-3,4 mm arasında değişen borularda, hava-su iki fazlı akışında hidrolik çapın akış desenlerine olan etkisini incelemişlerdir. Gaz fazı kolon hızı 0,01-50 m/s aralığında iken sıvı faz kolon hızı 0,01-3 m/s aralığındadır. Deneyleerde iki fazlı akış desenleri yüksek hızlı CMOS kamera ile kaydedilmiştir. Farklı deneysel koşullara göre, dağınık kabarcıklı, kabarcıklı, tıkaç, tıkaç-halka, dalgalı-halka, tabakalı ve halkasal akış desenleri gözlenmiştir. Çapı 2 mm'nin altında olan borularda tabakalı akış gözlenmemiştir. 1,7, 1,2 ve 0,6 mm çaplı borularda dalgalı-halka akış gözlenmezken, 0,6 mm çaplı boruda halkasal akış oluşmamıştır. 2,6 ve 3 mm çaplı kanallarda kaldırma kuvveti etkilerinin görüldüğü ifade edilmiştir.

Choi et al. (2011), hidrolik çapları 490, 490, 322 ve 143 µm olan ve en/boy oranı sırasıyla 0,92, 0,67, 0,47 ve 0,16 olan dikdörtgen kesitli mikrokanallarda en/boy oranının iki fazlı akış desenlerine olan etkisini incelemişlerdir. Deneyleerde sıvı fazı için su, gaz fazı için nitrojen kullanılmış olup her iki fazın kolon hızları sırası ile 0,06-1 m/s ve 0,06-71 m/s aralığındadır. Mikrokanallar ışığa duyarlı camdan imal edilmiş olup kanal içindeki akış yapısını görüntülemeye izin vermektedir. Akış desenlerinin görüntülenmesi, yüksek hızlı kamera ve uzun mesafe mikroskobu yardımıyla yapılmıştır. Deneyleerde karakteristik olarak kabarcıklı akış, tıkaç kabarcıklı akış, geçiş akışı ve sıvı halkasal akış desenleri oluşmuştur (Şekil 2.4). Kanalın en/boy oranı azaldıkça, kabarcıklı akış rejimi baskın hale gelmiştir. Bu durum sınırlama etkilerinin önemli hale gelmesi ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, en/boy oranı azaldıkça kanal köşelerindeki sıvı film kalınlığı azalmıştır. En/boy oranı arttıkça uzun kabarcıklı akıştan sıvı halka akışa geçişin daha yüksek gaz kolon

hızlarında meydana geldiği, kabarcıklı akıştan tıkaç akışa geçişin ise daha düşük gaz kolon hızlarında meydana geldiği gözlenmiştir.



Şekil 2.4. En/boy oranı 0,92 olan kanalda oluşan akış desenleri (Choi et al. 2011): (a) kabarcıklı akış (b) tıkaç kabarcıklı akış (d) uzun kabarcıklı akış (e) geçiş akışı.

Yukarıda özetlenen adyabatik iki fazlı akış çalışmalarından görüleceği üzere, kanal hidrolik çapının akış desenleri üzerinde etkisi oldukça fazladır. Kanal hidrolik çapı azaldıkça makrokanallarda görülen tabakalı akış ve dalgalı akış gibi bazı akış desenleri oluşmazken, uzun kabarcıklı akış gibi mikrokanallara özgü farklı akış desenleri görülmektedir. Kanal boyutları küçüldükçe yüzey gerilme kuvvetlerinin baskın hale gelmesi iki fazlı akışlarda görülen akış rejimlerini ve desenlerini önemli derecede etkilemektedir.

Mikrokanallarda kaynamanın olduğu iki fazlı akışlarda ise, adyabatik iki fazlı akış desenlerinde göre birtakım farklılıklar olabilir. Cornwell and Kew (1993), R-113 soğutucu akışkanı kullanarak 1,03 mm ve 2,09 mm hidrolik çaplı dikdörtgen kesitli çoklu kanallarda yapmış olduğu akış kaynama deneylerinde, izole edilmiş kabarcıklı akış, sınırlandırılmış kabarcıklı akış ve halkasal akış rejimlerini gözlemlemişlerdir. Mertz et al. (1996) ise, düşey konumlandırılmış, dar dikdörtgen kesitli çoklu mikrokanallarda, farklı çalışma koşullarında akış kaynama ısı transferini ve akış rejimlerini incelemişlerdir. Deneyler, su ve R-141b soğutucu akışkanı ile yapılmıştır.  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

değerinde ısı akısına bağlı olarak Çizelge 2.1'de verilen akış desenleri elde edilmiştir. Temel olarak, izole kabarcıklı akış, sınırlandırılmış akış ve halkasal akış rejimleri gözlenmiştir. Kanal boyutu küçüldükçe ve ısı akısı artıka kabarcık oluşum hızının arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, düşük kütleel debilerde ve yüksek ısı akılarında hem tek kanalda hem de çoklu kanallarda ters akış görülmüştür.

Çizelge 2.1.  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleel akısında oluşan akış desenleri (Mertz et al. 1996).

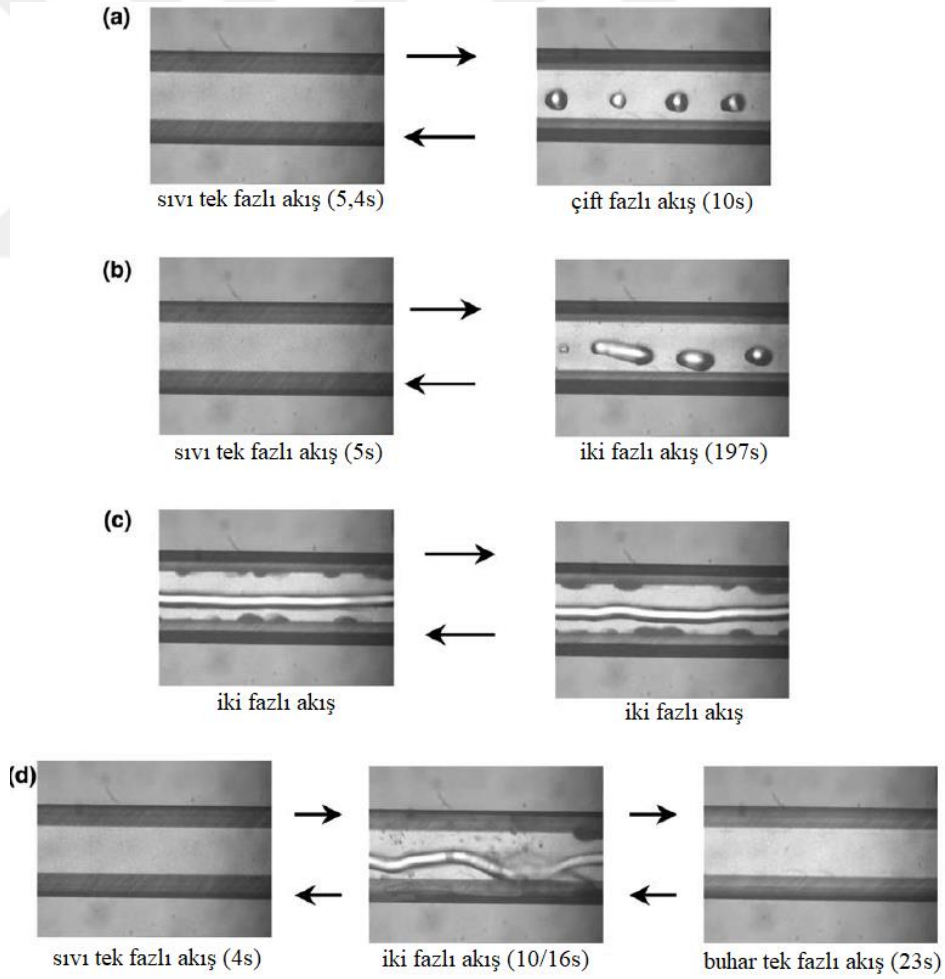
Akış deseni	Su	R-141b
İzole kabarcıklar	$q \leq 20 \text{ kW/m}^2$	$q \leq 7 \text{ kW/m}^2$
Sınırlandırılmış kabarcıklar	$20 \leq q \leq 100 \text{ kW/m}^2$	$7 \leq q \leq 20 \text{ kW/m}^2$
Halkasal akış	$q \geq 100 \text{ kW/m}^2$	$q \geq 20 \text{ kW/m}^2$

Steinke and Kandlikar (2003) hidrolik çapı  $207 \text{ }\mu\text{m}$  olan altı adet paralel mikrokanaldan oluşan bir ısı alıcıda yaptıkları akış kaynama deneylerinde akış desenlerini gözlemlemişlerdir. Yazarlar, mikrokanallarda akış kaynamada görülen akış desenlerinin makro boyuttaki kanallarla aynı olduğunu ifade etmişlerdir. Deneylerde, kabarcıklı akış, tıkaç akış, halkasal akış, ince sıvı tabakasında kabarcıkların olduğu halkasal akış, çalkantılı akış desenleri ve kuruma periyodu görülmüştür. Ayrıca, bazı çalışma koşullarında ters akış oluşumu gözlenmiştir. Ters akış, buhar fazın akış yönüne zıt, yani kanal girişine doğru ilerlemesi olup benzer durum Kandlikar et al. (2001) tarafından çoklu minikanallarda kaynamalı akış sırasında gözlenmiştir. Steinke and Kandlikar (2004) bu durumun kabarcık oluşumu ve bunu takiben kabarcığın hızlı bir şekilde büyümesi sonucu sıvı-buhar arayüzeyin akış yönüne zıt yönde hareket etmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Wu and Cheng (2003b),  $158,8 \text{ }\mu\text{m}$  ve  $82,2 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı trapez kesitli silikon mikrokanallarda yaptığı akış kaynama deneylerinde kaynama başladığında akış desenlerinin tek fazlı sıvı akışı ve iki fazlı akış arasında periyodik olarak salınım yaptığını gözlemlemişlerdir. Basıncadaki dalgalanmaların periyodik akışa neden olduğu ifade edilmiştir. Aynı zamanda, periyodik akış rejimiyle eş zamanlı olarak yüzey sıcaklıklarında da dalgalanmaların olduğu görülmüştür. Aynı deney şartlarında, ( $q=7,83 \text{ W/cm}^2$ ,  $\dot{m}=16,8 \text{ g/cm}^2\text{s}$  için)  $D_h=82,2 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanalda tıkaç akış ve çalkantılı akış desenlerinin  $D_h=158,8 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallara kıyasla daha sık

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

oluştugu görülmüştür. Kabarcıklı akış, tıkaç akış, çalkantılı akış desenlerinin yanı sıra  $D_h=158,8 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda daha önce tanımlanmayan halkasal akışa benzer akış desenleri oluştuğu ifade edilmiştir. Yazarlar, bu tip farklı akış desenlerinin oluşmasını, küçük kanallarda yan yüzeylerin akış desenleri üzerinde önemli etkisi olabileceğinin göstergesi olarak yorumlamışlardır. Bir diğer çalışmada Wu and Cheng (2004), 30 mm uzunluğunda ve hidrolik çapı  $186 \mu\text{m}$  olan trapez kesitli çoklu silikon mikrokanallarda akış kaynama olayını incelemişlerdir. Periyodik akış yapısının büyük ölçüde ısı akısı ve kütle akıya bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Düşük ısı akısı ve yüksek kütle akılarda tek fazlı sıvı/iki fazlı akış desenleri; orta büyüklükteki ısı akısı ve kütle akılarda sürekli iki fazlı akış desenleri; yüksek ısı akısı ve düşük kütle akılarda tek fazlı sıvı/iki fazlı/tek fazlı buhar akış desenleri arasında değişen periyodik akış yapısı gözlenmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Wu ve Cheng (2004)'e göre farklı ısı akısı ve kütle akılarda kararsız kaynama modları: (a) tek fazlı sıvı/iki fazlı salınımlı akış ( $q=13,5 \text{ W/cm}^2$ ,  $m=14,6 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ) (b) tek fazlı sıvı/iki fazlı salınımlı akış ( $q=16,6 \text{ W/cm}^2$ ,  $m=12,7 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ) (c) sürekli iki fazlı akış ( $q=18,8 \text{ W/cm}^2$ ,  $m=11,9 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ) (d) tek fazlı sıvı/iki fazlı/tek fazlı buhar salınımlı akış ( $q=22,6 \text{ W/cm}^2$ ,  $m=11,2 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ).

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

Pettersen (2004), 0,8 mm iç çaplı 0,5 mm uzunluğunda 25 adet kanaldan oluşan bir mikrokanallı boruda CO<sub>2</sub> akış kaynamasını  $G= 190-570 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $q=5-20 \text{ kW/m}^2$  çalışma aralığında deneysel olarak incelemiştir. Dalgalı halkasal akışın baskın akış rejimi olduğu ve merkezden akan buhar fazı içerisinde çok sayıda sıvı damlacığının sürüklendiği görülmüştür. Kütleli akının artmasıyla sıvı damlacık sürüklenmesinin artması ve yüzeydeki sıvı filminin düzensizleşmesinin kurumaya yol açtığı ifade edilmiştir.

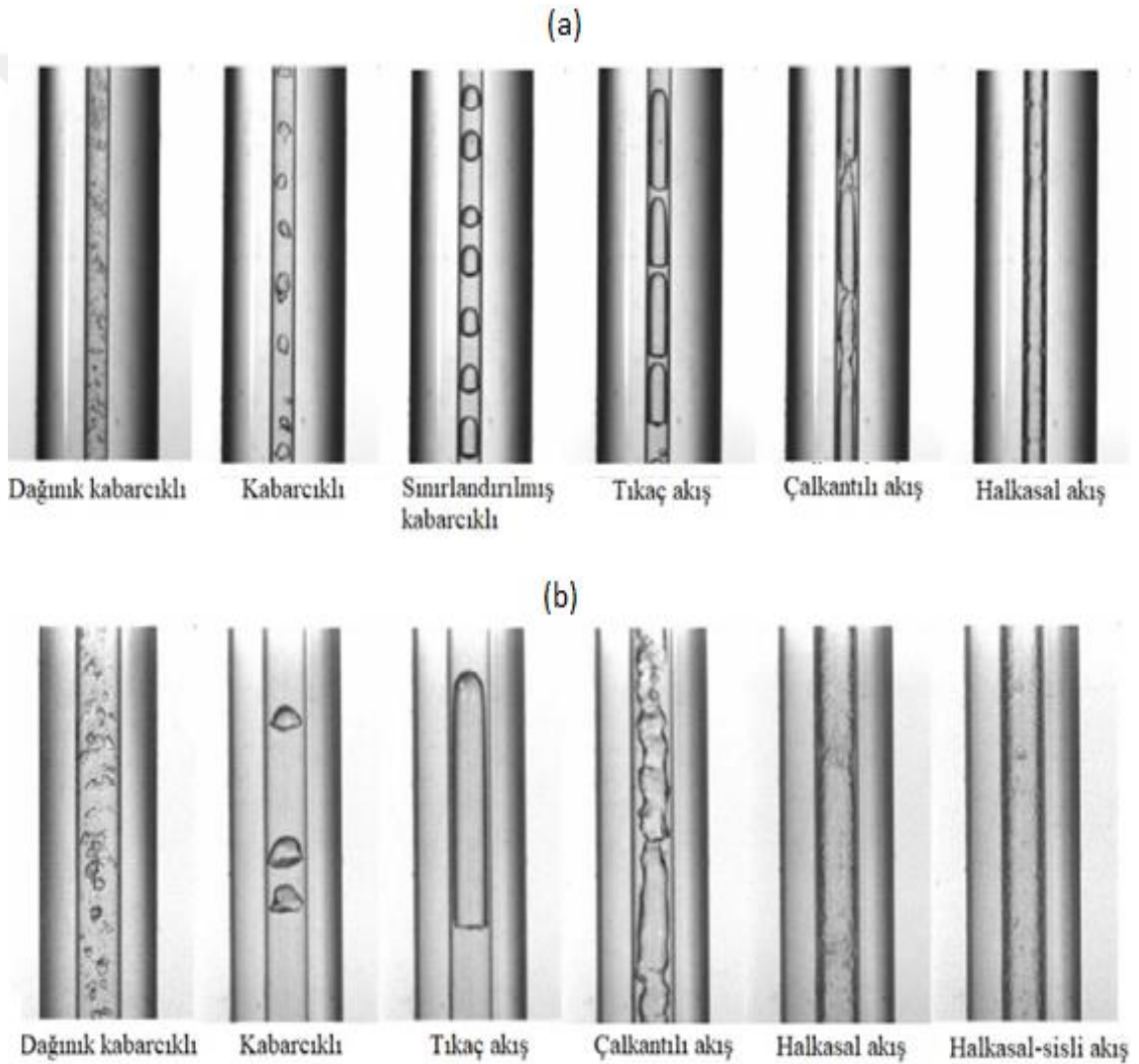
Balasubramanian ve Kandlikar (2005), 63,5 mm uzunluğunda 333 µm hidrolik çaplı dikdörtgen kesitli çoklu kanallarda su ile yaptıkları akış kaynama deneylerinde akış rejimlerini incelemiştir. Yığın sıvı akışı içinde ve buhar tıkaçını çevreleyen yüzeydeki ince sıvı filminde kabarcıklı kaynama rejimi görülmüştür. Halkasal akış deseninde, yüzeydeki ince sıvı tabakadaki kabarcık oluşumunun küçük boyutlu kanallarda akış kaynama modellerinde dikkate alınması gerektiği yazarlar tarafından ifade edilmiştir. Yüksek yüzey sıcaklık değerlerinde kanal içinde tıkaç akış deseninin hâkim olduğu ve kanal içinde bazı durumlarda ters akış oluşmasına neden olduğu ifade edilmiştir.

Li ve Peterson (2005) cam alttaş üzerine açtıkları trapez kesitli 56 µm hidrolik çaplı mikrokanallarda mikroskop ve CCD video kamera yardımıyla suyun akış kaynamasını  $35 \text{ g/mm}^2\text{dk}$ ,  $112 \text{ g/mm}^2\text{dk}$  ve  $584 \text{ g/mm}^2\text{dk}$  olmak üzere farklı kütleli akılar için incelemiştir. Deneylerde, kabarcıklı, dalgalı ve halkasal olmak üzere üç farklı akış deseni gözlenmiştir. Düşük kütleli akı ve buhar kuruluk derecesinde kabarcıklı akış; orta kütleli akı ve buhar kuruluk derecesinde dalgalı akış; yüksek kütleli akı ve kuruluk derecesinde halkasal akış desenleri oluşmuştur. Kanal içinde oluşan akış desenlerinin uzun bir periyot boyunca kararlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, sıvı akış hızı arttıkça sıvı-buhar arayüzeyinin daha kararlı hale geldiği tespit edilmiştir.

Chen et al. (2006) çapı 1,10, 2,01, 2,88 ve 4,26 mm olan dairesel kesitli düşey konumlandırılmış kanallarda R-134a soğutucu akışkanı ile akış kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, dağınık kabarcıklı akış, kabarcıklı akış, sınırlandırılmış kabarcıklı akış, tıkaç akış, çalkantılı akış, halkasal akış ve sisli akış desenleri görülmüştür (Şekil 2.6). 2,88 mm ve 4,26 mm çaplı borulardaki akış karakteristikleri normal boyuta sahip kanallarla benzer iken 1,10 mm ve 2,01 mm çaplı

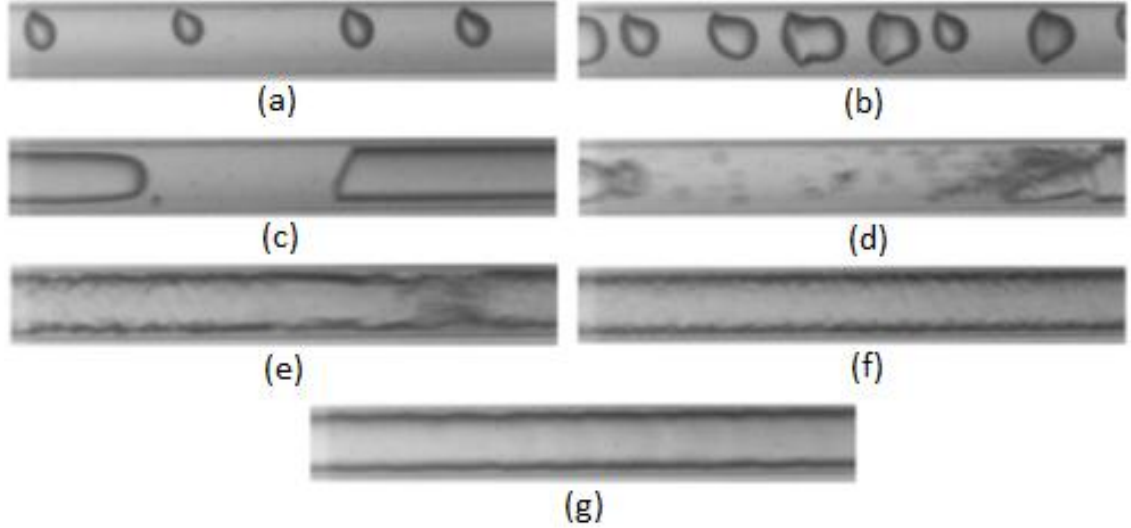
## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

borulardaki akış desenleri küçük boyutlu kanallara özgü karakteristikler göstermiştir. Buna bağlı olarak yazarlar normal ve küçük ölçekler arasındaki geçiş kriteri olarak  $D_h=2$  mm değerini önermişlerdir. Boru çapı, tıkaç-çalkantılı ve çalkantılı-halkasal akış desenleri arasındaki geçiş sınırlarını önemli ölçüde etkilerken, dağınık kabarcıklı akış-çalkantılı akış ve kabarcıklı akış-tıkaç akış geçiş sınırları üzerinde önemli bir etki oluşturmamıştır. Boru çapının azalmasıyla yüzey kuvvetleri ve sınırlama etkileri önem kazanmıştır. Bunun sonucu olarak, daha ince ve uzun buhar tıkaçlarının oluştuğu, buhar tıkaçları etrafında daha ince sıvı film tabakasının bulunduğu ve çalkantılı akışta sıvı-buhar arayüzeyinin daha düzgün olduğu araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir.



Şekil 2.6. 10 bar basınçta farklı çaplı borularda oluşan akış desenleri (Chen et al. 2006): (a) 1,10 mm (b) 2,01 mm.

Revellin et al. (2006), 0,5 mm çaplı camdan yapılmış bir kanalda R-134a soğutucu akışkanına ait doymuş akış kaynama deneylerinde kabarcıklı akış, tıkaç akış, yarı-halkasal akış ve halkasal akış olmak üzere dört akış deseni gözlemlemiştir. Kabarcık birleşme hızının mikrokanallarda akış desenleri arasındaki geçişi kontrol ettiği ifade edilmiştir. Küçük kabarcık birleşmesi ve uzatılmış kabarcık birleşmesi olmak üzere iki çeşit birleşme tanımlanmıştır. Kütleli akı arttıkça uzatılmış kabarcık birleşme hızı artarken küçük kabarcık birleşme hızının ise azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, kütleli akı arttıkça halkasal akışa geçiş daha erken gerçekleşmiştir. Diğer yandan, yüksek kütleli akı değerlerinde kabarcıklı akışın kısa sürede yerini uzun kabarcıklı akışa bıraktığı gözlenmiştir. Bu durum, yüksek kütleli akılarda oluşan kabarcıkların küçük olması ve hızlı bir şekilde birleşmesiyle açıklanmıştır. Benzer bir diğer çalışmada Revellin and Thome (2007a), 0,5 ve 0,8 mm çaplı kanallarda R-134a ile birlikte R-245fa soğutucu akışkanının aşırı soğuk ve doymuş akış kaynamasını incelemiştir. Aşırı soğutma derecesi ve doyma basıncının akış desenleri üzerinde herhangi bir değişime neden olmadığı belirtilmiştir. Farklı çaptaki borularda oluşan akış desenleri arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. R-245fa için akış desenleri arasındaki geçiş kütleli akıdan daha az etkilenmiştir. Revellin and Thome (2007b), 0,509 mm ve 0,79 mm çaplara sahip mikro-evaporatörlerde R-134a ve R-245fa akış kaynamasında, akış deseni verileri ve kabarcık ölçümlerine dayanarak akış deseni haritası sunmuşlardır. Giriş aşırı soğutma derecesi 2-15°C arasında iken kütleli akı 200-2000 kg/m<sup>2</sup>s arasında değiştirilmiştir. 26, 30 ve 35°C olmak üzere üç farklı doyma sıcaklığında deneyler yapılmıştır. Deneylerde maksimum 597 kW/m<sup>2</sup> ısı akısı değerine ulaşılmıştır. Temel olarak, ayrık kabarcıklı akış rejimi, birleşen kabarcıklı akış rejimi ve halkasal akış rejimi olmak üzere üç farklı akış kaynama rejimi belirlenmiştir. Ayrık kabarcıklı akış rejiminde, kabarcık oluşum hızı kabarcık birleşme hızından büyük olup kabarcıklı ve tıkaç akış desenlerini kapsar. Birleşen kabarcıklı akış rejimi, kabarcık birleşme hızının kabarcık oluşum hızından büyük olduğu akış rejimi olup birleşme periyodunun sonuna kadar devam eder. Bundan sonra ise, halkasal akış rejimi görülür ve kritik ısı akısına kadar devam eder. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, deneylerde kabarcıklı akış, kabarcıklı/tıkaç akış, tıkaç akış, tıkaç/yarı-halkasal akış, yarı-halkasal akış, dalgalı halkasal akış ve halkasal akış desenlerinin oluştuğu görülmüştür.



Şekil 2.7. R-134a soğutucu akışkanına ait akış kaynama desenleri (Revellin ve Thome, 2007b): (a) kabarcıklı akış (b) kabarcıklı/tıkaç akış (c) tıkaç akış (d) tıkaç/yarı halkasal akış (e) yarı-halkasal akış (f) dalgalı halkasal akış (g) halkasal akış.

Harirchian and Garimella (2009a) dielektik akışkan FC-77 kullanarak genişliği 100-5850  $\mu\text{m}$  arasında değişen, derinliği 400  $\mu\text{m}$  olan paralel mikrokanallardan oluşan  $12,7 \times 12,7 \text{ mm}^2$  ölçülerindeki silikon bir mikrokanallı ısı alıcıda, mikrokanal boyutlarının, ısı akısının ve kütesel debinin akış kaynamada görülen akış rejimleri üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Akış kaynama rejimlerini genel olarak kabarcıklı akış, tıkaç akış, çalkantılı akış, ince halka akış ve halka akış olmak üzere beş ana sınıfa ayırmışlardır. Aynı zamanda yüzeyde kısmî kurumanın başladığı ve mikrokanal içerisinde sıvı fazla gaz fazın yer değiştirdiği ters halka akış rejimi tanımlanmıştır. Deneyler sırasında gözlemlenen akış rejimleri Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

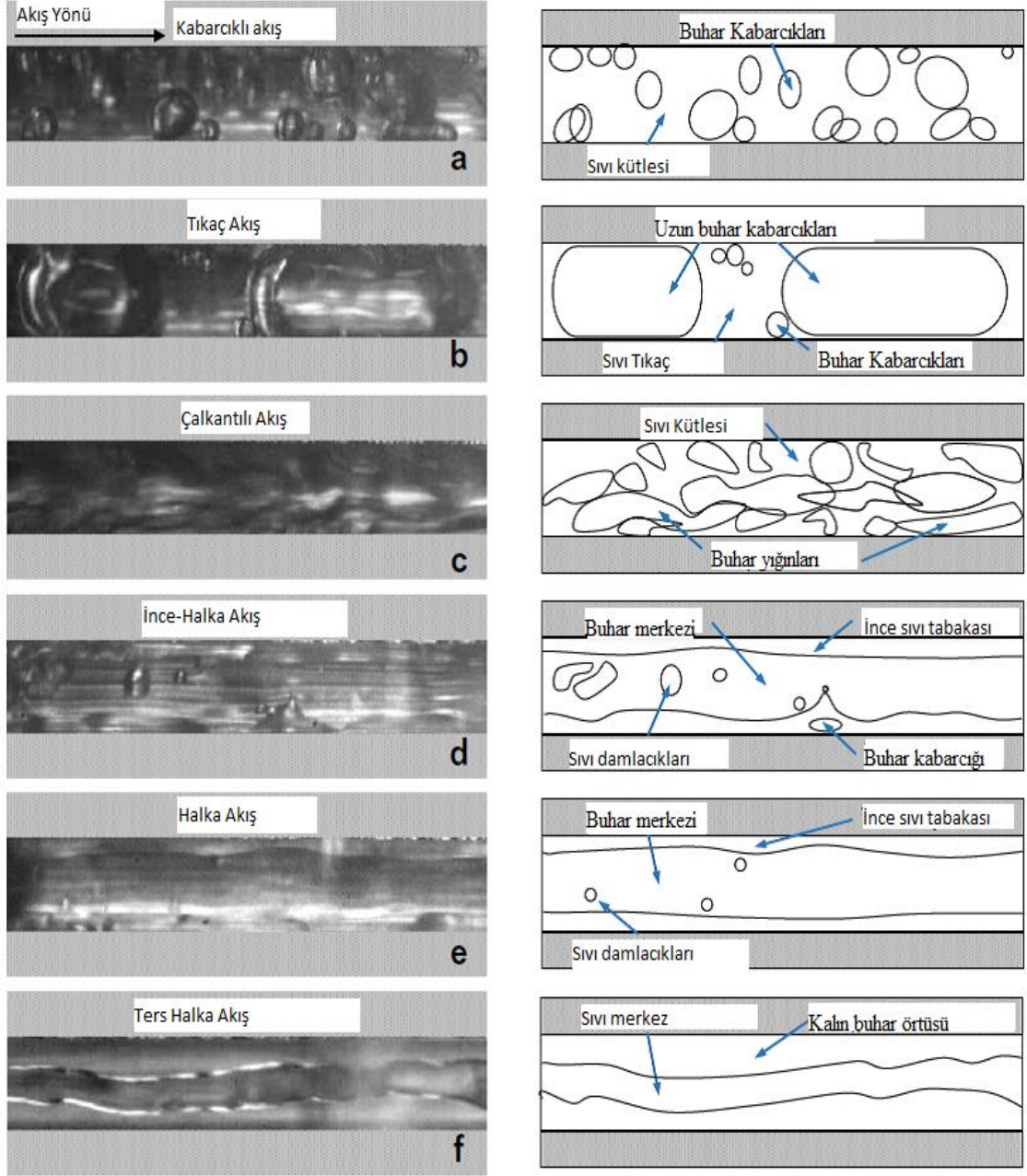
- a) Kabarcıklı akış: Bu akış rejiminde kanal yüzeyinde oluşmaya başlayan kabarcıklar büyüyerek yüzeyden ayrılırlar ve münferit olarak akış doğrultusunda hareket ederler. Kabarcıklı akış rejimini karakteristik özelliği, kabarcık büyüklüğünün mikrokanal boyutundan küçük olmasıdır.
- b) Tıkaç akış: Artan ısı akısıyla beraber yüzeyde kabarcık oluşum hızı ve kabarcık büyüme hızı artar. Kabarcık boyutu yüzeyden ayrılmaya fırsat bulamadan mikrokanal büyüklüğüne ulaşır. Akış doğrultusunda büyümeye devam eder ve diğer kabarcıklarla birleşerek mikrokanal içerisinde uzun kabarcık oluşmasına neden olur. Bu akış biçimine tıkaç akış denir ve en önemli karakteristik özelliği mikrokanal içerisinde uzun kabarcıklı yapıların görülmesidir.

- c) Çalkantılı akış: Tıkaç akış ile halka akışı arasında görülen akış rejimi olup artan ısı akısıyla beraber uzun kabarcıklı yapıların bütünlüğünü kaybetmesiyle başlar. Mikrokanal yüzeyinde oluşan büyük kabarcıklar yüzeydeki sıvı tabakasını rahatsız ederek dalgalı bir akış yapısına neden olurlar. Mikrokanal merkezinde düzensiz olarak buhar yığınları görülür. Kaynama sırasında görülen diğer akış biçimlerine göre karmaşık bir yapıya sahip olan çalkantılı akış rejimini tanımlamak oldukça güçtür.
- d) İnce halka akış: Mikrokanal merkezinde ince buhar fazı yer alırken mikrokanal yüzeyi kalın sıvı tabakasıyla kaplıdır. Merkezdeki buhar akışı içerisinde büyük düzensiz şekilli sıvı damlacıkları bulunur. Mikrokanal yüzeyinde kabarcık oluşumu oldukça azalmış olup sıvı tabaka içerisinde çok az sayıda küçük çaplı kabarcıklar görülebilir.
- e) Halka akış: Mikrokanal yüzeyinde artan ısı akısıyla beraber sıvı tabakasının kalınlığı azalırken merkezdeki buhar fazının kalınlığı artar. Yüzeydeki ince sıvı film içinde kabarcık oluşumu gözlenmezken buhar fazı içerisinde nadiren küçük sıvı damlacıkları görülebilir.
- f) Ters halka akış: Harirchian and Garimella (2009a) kritik ısı akısına yaklaşıldığı bazı deneylerde, artan ısı akısıyla beraber, mikrokanal cidarlarının kurduğu ve yüzeyin tamamen kalın buhar tabakası ile örtülü olup sıvı fazın mikrokanal merkezinde aktığı akış biçimini gözlemlemişlerdir. Dolayısıyla mikrokanal içerisinde sıvı-buhar fazının yer değiştirdiği halka şeklindeki bu akış biçimi ters halka akış olarak adlandırılmıştır. Bu akış rejiminde, yüzeydeki kalın buhar tabakası mikrokanal yüzeyinden olan ısı transfer miktarını önemli derecede azaltır ve kanal yüzey sıcaklığında önemli bir artış görülür.

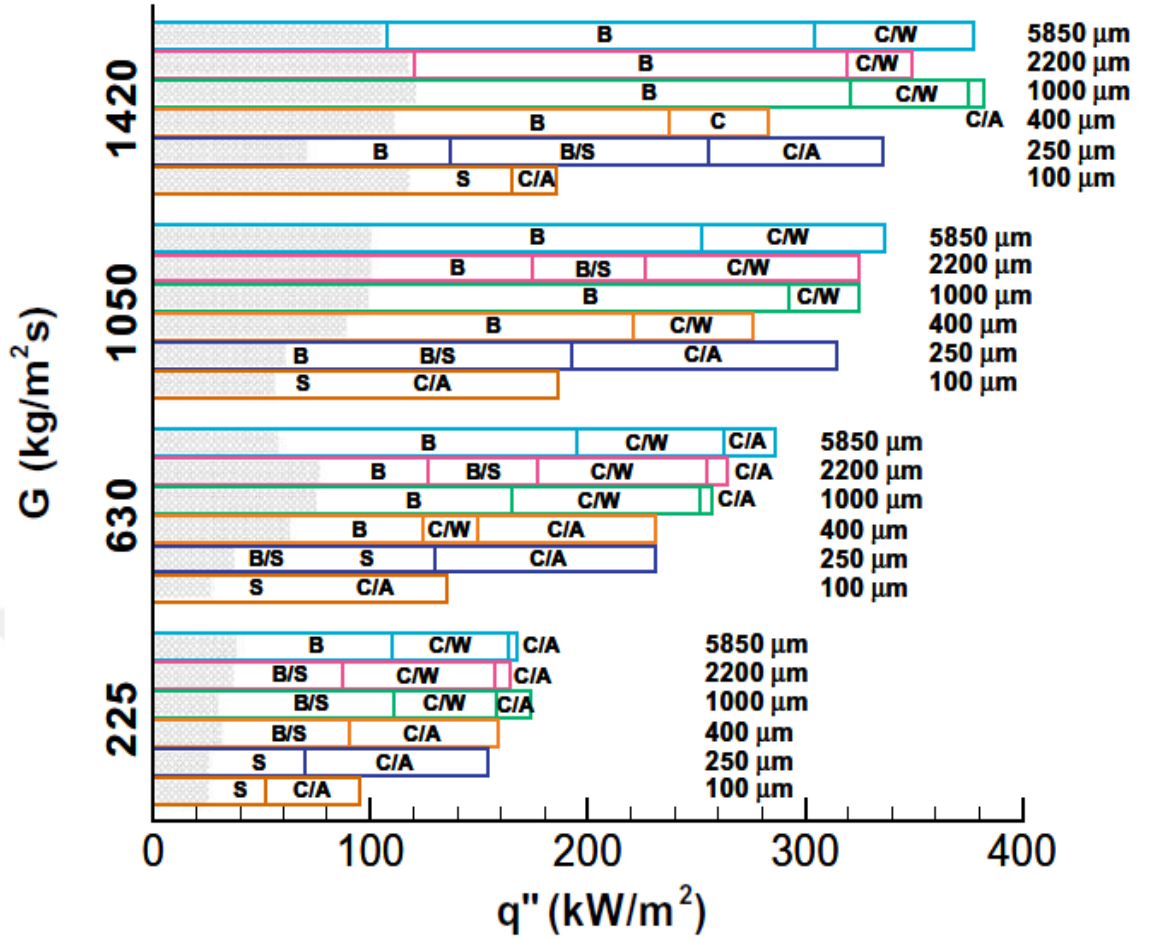
Araştırmacılar, akış biçimlerinin 100  $\mu\text{m}$ -250  $\mu\text{m}$  genişliğindeki mikrokanallar için benzer olduğunu, 400  $\mu\text{m}$  den geniş mikrokanallar için akış rejiminin farklılaşmaya başladığını gözlemlemişlerdir. Artan kanal genişliğiyle beraber kabarcıklı akış rejiminin tıkaç akışın yerini aldığı, düzensiz çalkantılı akış/ince halka akış biçiminin düzensiz çalkantılı akış/halka akışın yerini aldığı görülmüştür. Kabarcıklı kaynama rejiminde,

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

kütlesel debi arttıkça kabarcıkların daha küçük ve uzun hale geldiği görülmüştür. Halka akış rejimlerinde ise ince sıvı film tabakası artan kütleli debi ile birlikte azalmıştır. Aynı zamanda yüksek kütleli akı değerleri için akış rejimleri arasındaki geçiş daha yüksek ısı akısı değerlerinde gerçekleşmiştir. Şekil 2.9, farklı genişlikteki mikrokanallar için ısı akısı ve kütleli akıya bağlı olarak elde edilen akış kaynama rejimlerini göstermektedir. Yazarlar, ayrıca yüzey pürüzlülüğü etkisinin de araştırılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

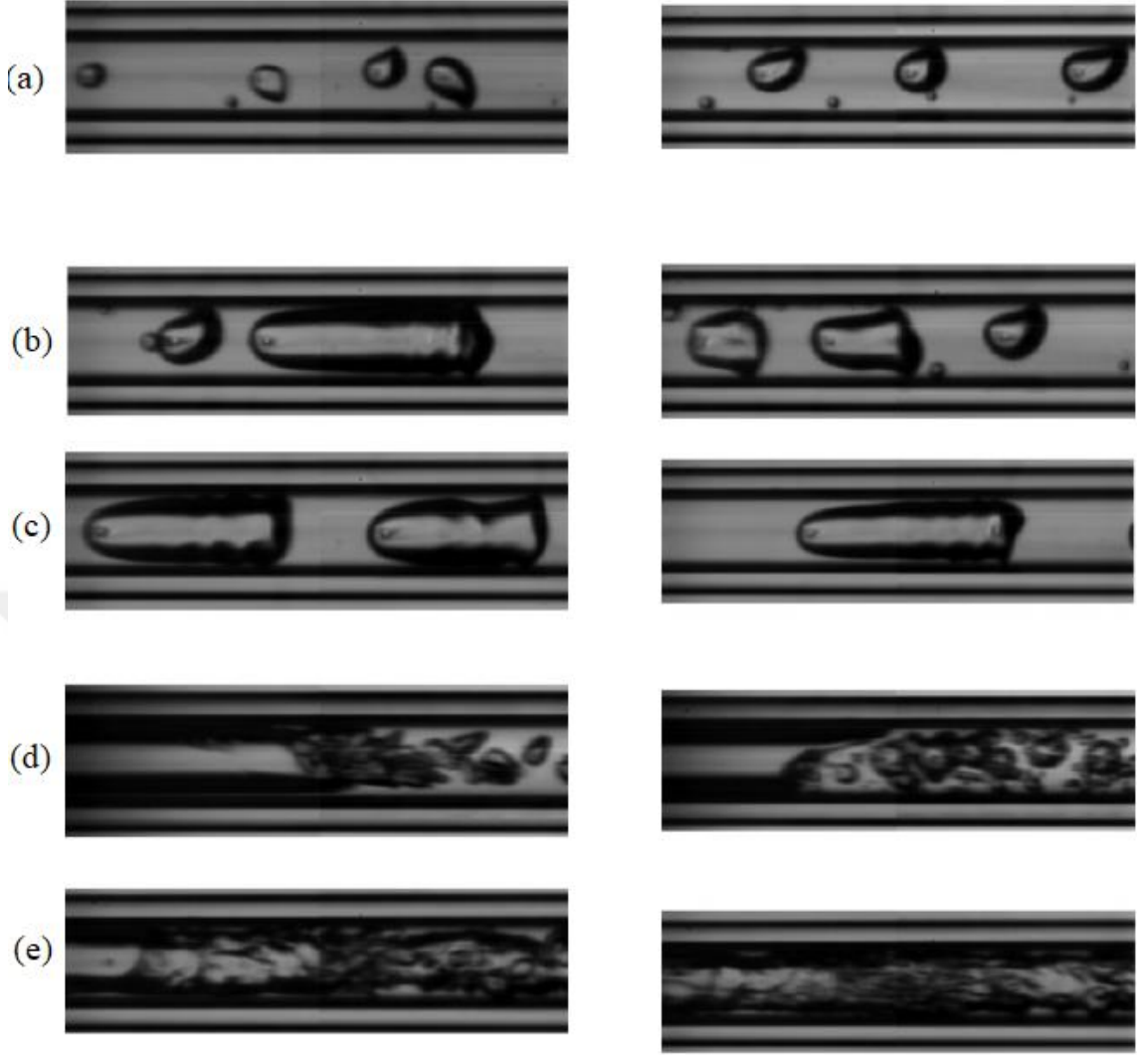


Şekil 2.8. Mikrokanallarda akış kaynama sırasında görülen akış rejimleri (Harirchian and Garimella 2009a).



Şekil 2.9. Akış kaynama rejimlerinin mikrokanal genişliği, ısı akısı ve kütleli akıya göre değişimi (Harirchian and Garimella 2009a).

Celata et al. (2010) ve Celata et al. (2012) 480  $\mu\text{m}$  iç çapa sahip 102 mm uzunluğunda yatay dairesel kesitli bir mikrokanalda FC-72 soğutucu akışkanının aşırı soğuk akış kaynamasını incelemişlerdir. Deneylerde kararlı ve kararsız akış kaynama rejimleri görüntülenmiştir. Kabarcıklı akış, kabarcıklı-tıkaç akış, tıkaç akış, tıkaç akış-halkasal akış, halkasal akış-sisli akış desenleri temel akış desenleri olarak belirtilmiştir (Şekil 2.10). Kararlı akış kaynama rejiminde, 150  $\text{kW}/\text{m}^2$  ve üzerindeki ısı akısı ve 1500  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  ve üzerindeki kütleli akı değerlerinde kabarcıklı-tıkaç akış, tıkaç-halkasal akış ve halkasal akış-sisli akış arasında değişen bir akış yapısı gözlenmiştir. Aşırı soğuk kaynama bölgesinde bile, yani kuruluk derecesinin sıfırdan küçük olduğu durumda, tıkaç akış deseni görülmüştür. Akış kaynama desenlerinin mikro borularda nispeten daha az karmaşık olduğu ve düzenli sıvı-buhar arayüzeyinin olduğu ifade edilmiştir. Dolayısıyla, çalkantılı akış deseni gözlenmemiştir.



Şekil 2.10. Celata et al. 2010'a göre akış kaynama desenleri: (a) kabarcıklı akış (b) kabarcıklı-tıkaç akış (c) tıkaç akış (d) tıkaç-halkasal akış (e) halkasal-sisli akış.

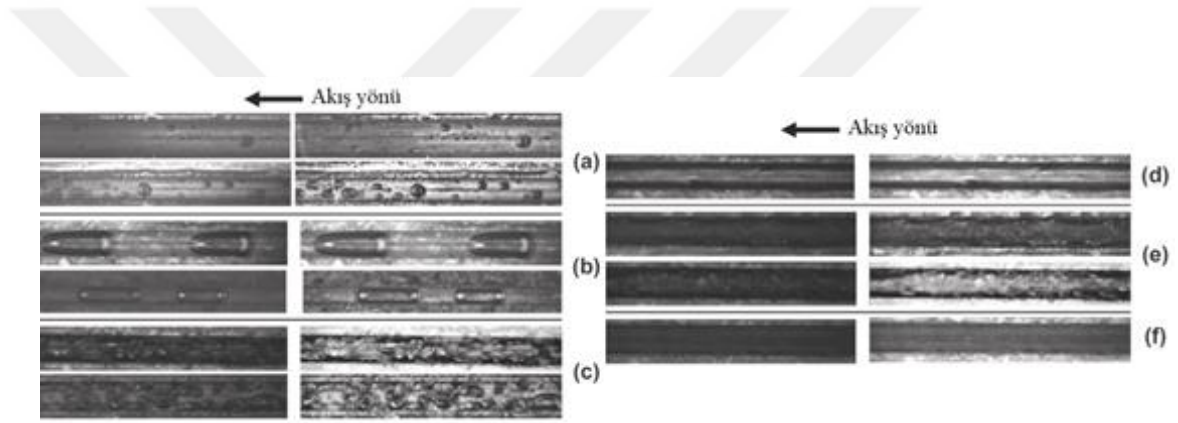
Soupremanien et al. (2011) 1,4 mm hidrolik çaplı kanalda iki farklı en/boy oranı için Forane-365HX akışkanına ait akış kaynama karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneyleerde her iki tip kanalda, benzer ısı akısı ve kütlelel akı değerlerinde kabarcıklı akış, tıkaç akış, dalgalı akış ve halkasal akış desenleri gözlenmiştir. Büyük en/boy oranına sahip kanalda, kabarcıklı akış rejiminde daha küçük çaplı kabarcıkların olduğu görülmüştür.

Wang and Sefiane (2012), hidrolik çapları 571, 762 ve 1454  $\mu\text{m}$  olan kanallarda kanal en/boy oranının FC-72'ye ait akış kaynama karakteristiklerine olan etkisini incelemişlerdir. 11,2, 22,4 ve 44,8  $\text{kg/m}^2\text{s}$  olmak üzere üç farklı ısı akısında çalışılmış olup ısı akısı 0-18,6  $\text{kW/m}^2$  aralığındadır. Deneyleerde, tek fazlı akıştan ani olarak tıkaç-

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

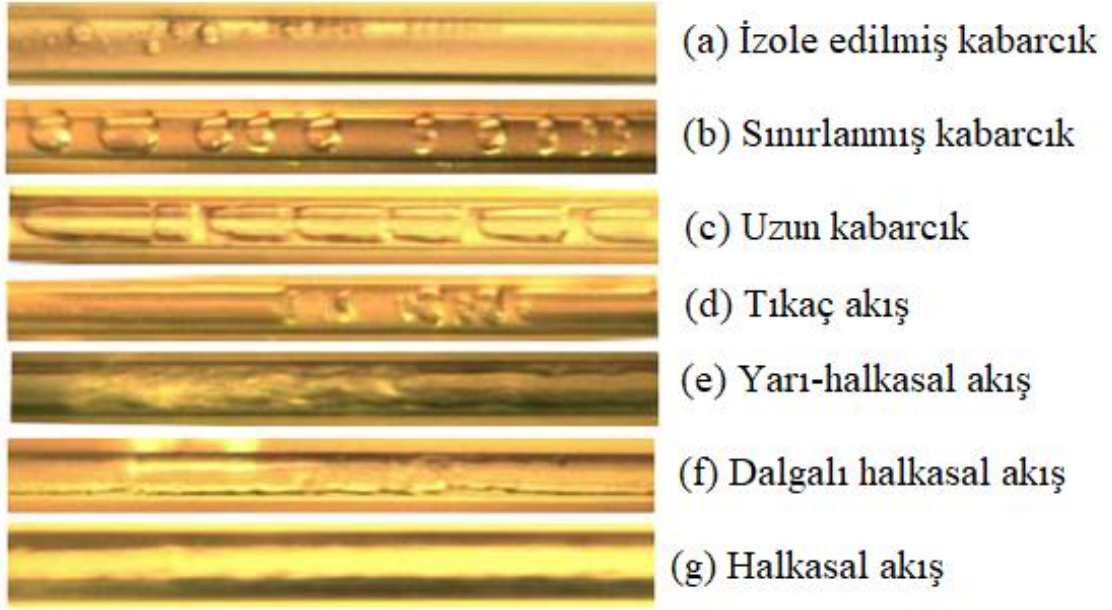
halkasal akış ve halkasal akış desenlerine geçiş olduğu ifade edilmiştir. Bu akış desenlerinde, sıvı film tabakasının geniş kanallarda daha kalın olduğu ifade edilmiştir. Bu durumun daha zayıf buharlaşmaya neden olduğu belirtilmiştir.

Galvis and Culham (2012),  $198 \times 241 \mu\text{m}^2$  ve  $378 \times 471 \mu\text{m}^2$  kesitli tek kanala sahip mikro evaporatörlerde akış kaynama sırasında oluşan akış desenlerini görüntülemiştir. Deneyleerde kabarcıklı, tıkaç, çalkantılı, halkasal, dalgalı halkasal ve ters halkasal akış desenleri gözlenmiştir (Şekil 2.11). Düşük ısı akılarında kabarcıklı akış oluşurken, artan ısı akısıyla beraber tıkaç, çalkantılı ve halkasal akış desenleri gözlenmiştir. Halkasal akış rejimi devamında kısmi kuruma görülmüştür. Yazarlar kütleli akı arttıkça akış desenleri arasındaki geçişin yüksek ısı akılarında meydana geldiğini ifade etmişlerdir.



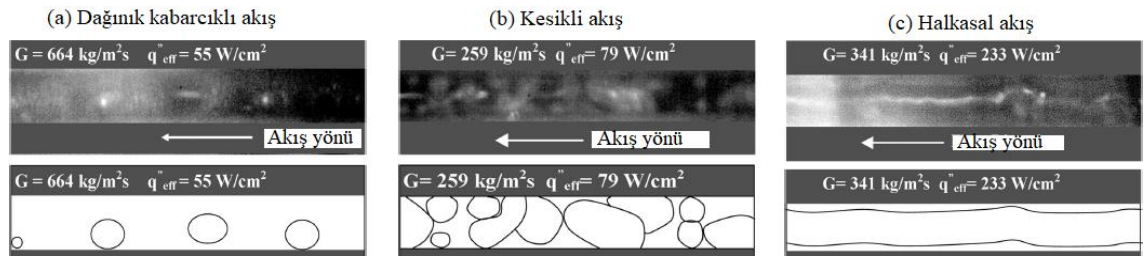
Şekil 2.11 Galvis and Culham (2012) akış kaynama desenleri: (a) kabarcıklı akış (b) tıkaç akış (c) çalkantılı akış (d) halkasal akış (e) dalgalı-halkasal akış (f) ters halkasal akış.

Ali et al. (2013),  $781 \mu\text{m}$  iç çapa sahip dairesel kesitli bir kanalda R-134a soğutucu akışkanına ait akış kaynama olayını deneysel olarak incelemişler ve akış deseni haritası oluşturmuşlardır. Deneyleerde, kütleli akı  $100-400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  aralığında iken ısı akısı  $5-45 \text{ kW/m}^2$ 'dir. Akış görüntüleme sistemi ile elde edilen temel akış desenleri Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Kanal hidrolik çapının küçük olmasının kabarcık büyümesini kısıtladığı ve buna bağlı olarak sınırlandırılmış kabarcıklı akıştan uzun kabarcıklı akışa ve tıkaç akıştan halkasal akışa geçişin daha erken gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum, mikrokanallarda düşük buhar kuruluk derecelerinde bile halkasal akış rejiminin görülmesi ile ilişkilendirilmiştir. Kütleli akı ve ısı akısı arttıkça kabarcık oluşum frekansının arttığı ve buna bağlı olarak kabarcık birleşme hızının arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek kütleli akılarda yüzeyden ayrılan kabarcıkların daha küçük çaplı olduğu görülmüştür.



Şekil 2.12. Ali et al. (2013) çalışmasında temel akış kaynama desenleri.

Balasubramanian et al. (2013), 300  $\mu\text{m}$  genişliğine ve 1200  $\mu\text{m}$  yüksekliğe sahip paralel mikrokanallardan oluşan bakırdan imal edilmiş mikrokanallı ısı alıcılarda su ile yaptığı akış kaynama deneylerinde Şekil 2.13'te gösterildiği gibi temel olarak dağınık kabarcıklı akış, kesintili akış ve halkasal akış desenlerini gözlemlemiştir. Kesikli akış rejimi uzun kabarcıklı akış ve tıkaç akış desenlerinin periyodik olarak görüldüğü akış rejimi olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.13. Balasubramanian et al. (2013) tarafından gözlenen temel akış kaynama desenleri.

Bogojevic et al. (2013), 194  $\mu\text{m}$  hidrolik çaplı 40 adet paralel mikrokanaldan oluşan bir ısı alıcıda suya ait akış kaynamada kabarcık dinamiğini incelemiştir. Deneylerde kütleli akı, 71-204  $\text{kg/m}^2\text{s}$  aralığındadır. Kabarcık, ısıtılan yüzeydeki aşırı kızgın sıvı tabakasına yaklaştığında kabarcık büyüme hızının arttığı gözlenmiştir. Kabarcık ayrılma çapının yüksekliğe oranı artan Reynolds sayısı ile azalmıştır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

Kabarcığın çekirdeklenmesinden patlamasına kadar geçen yaşam süresinin ısı akısı ve kütleli akı ile birlikte üstel olarak azaldığı tespit edilmiştir.

Law et al. (2014), 30° kesimli diyagonal kanatçıklardan oluşan mikrokanallı bir ısı alıcısında FC-72 soğutucu akışkanına ait akış kaynama deneylerinde halkasal akışın oluşmadığını belirtmişlerdir. Bu durum, eğik kesilmiş kısımlardan geçen ikincil buhar akışının kanatçıkları çevreleyen sıvı filmini kesmesi ile ilişkilendirilmiştir.

Yin et al. (2014), mikrokanallarda akış kaynama sırasında görülen kabarcık büyümesinin sınırlandırılması ve uzun kabarcık oluşumunu ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Mikrokanal, 120 mm uzunluğunda 30 mm genişliğinde ve 2 mm kalınlığında bakır bir plaka üzerine 0,5 mm genişliğe, 1 mm yüksekliğe ve 100 mm uzunluğa sahip mikro freze kullanılarak açılmıştır. Kanalin hidrolik çapı 667 µm olup sınırlama sayısı  $Co=3.9$  'dur. Deneylerde, kanal yüzeyi sabit ısı akısına maruz bırakılmış olup akışkan olarak su kullanılmıştır. Belli bir kütleli akı değerinde giriş alt soğutma sıcaklığındaki artışın, kabarcık oluşumunu ve büyümesini geciktirerek sınırlandırılmış kabarcık oluşumu için gerekli ısı akısının artmasına neden olduğu ve hapsedilmiş kabarcık akışının hâkim olduğu ısı akısı aralığını arttırdığı rapor edilmiştir. Benzer olarak sabit bir giriş alt soğutma sıcaklık değeri için artan kütleli akı ile birlikte sınırlandırılmış kabarcıkların görülmesi için gerekli minimum ısı akısı değerinin de yükseldiği görülmüştür. Ancak, artan kütleli akıyla birlikte sınırlandırılmış kabarcıklı akışın görüldüğü ısı akısı aralığı azalmıştır. Artan kütleli akı, genellikle yüzeyden ayrılan kabarcıkların çapının azalmasına ve yüzeyden kabarcık ayrılma frekansının artmasına neden olarak sınırlandırılmış kabarcıkların oluşumunu zorlaştırmış ve halkasal akışın yüksek ısı akısı değerlerinde görülmesine yol açmıştır. Yazarlar, sınırlandırılmış kabarcık oluşumundan önceki kabarcık büyüme hızının sınırlandırılmış kabarcık oluştuktan sonraki büyüme hızına göre oldukça yavaş olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durum sınırlandırılmış kabarcıklı akışta, kanal boyunca uzayan kabarcığın etrafındaki ince sıvı tabakasının buharlaşmasının başlıca ısı transfer mekanizması olması ile açıklanmıştır. Diğer yandan, sınırlandırılmamış kabarcığın büyüme hızının kabarcık boyutunun artmasıyla azaldığı belirtilmiştir.

Kalani and Kandlikar (2015), açık mikrokanallar üzerine yerleştirilen konik manifold ile kanal çıkışına doğru kesit genişlemesinin olduğu bir geometride akış kaynamada oluşan akış desenlerini incelemiştir. Deneylede akışkan olarak su kullanılmıştır. 196, 393 ve 688 kg/m<sup>2</sup>s olmak üzere üç farklı kütlele akıda deneyler gerçekleştirilmiştir. Konik manifoldlu mikrokanallarda kabarcıklı akış, tıkaç akış, aralıklı tıkaç/kabarcıklı akış, halkasal akış ve ters halkasal akış olmak üzere beş farklı akış yapısı görülmüştür. Mikrokanalların tabanında oluşan kabarcıklar manifold bölgesinde kanatçıkların üzerinde büyümüşlerdir. Tabandan ayrılan kabarcıklar manifold bölgesindeki alanı kaplamış olup koniklik sayesinde akış doğrultusunda genişlemiştir. Kanallar sıvı ile dolu kalırken büyük kabarcıklar mikrokanallar üzerindeki manifoldda hareket ettiği görülmüştür. Bu yüzden, manifold bölgesi buhar fazı ile dolu iken mikrokanal tabanında kabarcık oluşumu devam etmiştir.

Rao and Peles (2015), hidrolik çapı 370 µm olan bir mikrokanalda G=200 kg/m<sup>2</sup>s kütlele akı değerinde HFE-7000 soğutucu akışkanına ait akış kaynama karakteristiklerini zamana bağlı olarak incelemiştir. Yüzeyden ayrılan kabarcıkların kanal boyunca ilerlerken büyüdüğü gözlenmiştir. Yüksek ısı akılarında daha büyük buhar tıkaçlarının oluştuğu görülmüştür. Halkasal akış rejimi, sıvının yüzeyi tekrar ıslatması (0-4.99 ms), sıvı film buharlaşması (4.99-7.99 ms) ve kuruma (7.99-18.98 ms) periyodu olmak üzere üç farklı aşamadan meydana gelen bir çevrim olarak tanımlanmıştır. Kuruma periyodunda, kuruyan yüzeyden sıvı film kalıntılarının sıçraması şeklinde tanımlanan Leindenfrost etkisi görülmüştür.

Yin and Jia (2016) 0,5mm × 1mm kesit alanına sahip dikdörtgen profilli tek bir mikrokanalda, su ile yaptıkları akış kaynama deneylerinde yüksek hızlı CCD kamera ile kabarcık büyüme prosesini incelemiştir. Deneyle, 64,7 kW/m<sup>2</sup>-104,2 kW/m<sup>2</sup> ısı akısı aralığında 20 kg/m<sup>2</sup>s ve 40 kg/m<sup>2</sup>s kütlele akılarında yapılmıştır. Kabarcık büyüme periyodunda, ısı akısına bağlı olarak iki farklı büyüme modeli önerilmiştir. Düşük ve orta ısı akısı değerlerinde, kabarcık büyüme prosesinin güç yasasına uyduğu ( $D_{eq}=kt^n$ ) ifade edilmiştir. Sınırlandırılmış kabarcık periyodunda ise, eşdeğer kabarcık çapının ( $D_{eq}$ ) zamanla değişimi lineer olarak modellenmiştir ( $D_{eq}=kt+n$ ). Buna göre, sınırlandırılmış kabarcıklı akış periyodunda, kabarcık büyümesinin daha hızlı gerçekleştiği söylenebilir.

Yüksek ısı akısı değerlerinde, sınırlandırma etkilerinin azaldığı ve güç yasası modelinin tüm kabarcık büyüme prosesinde geçerli olduğu belirtilmiştir.

Fayyadh et al. (2017), 300  $\mu\text{m}$  genişliğinde ve 700  $\mu\text{m}$  derinliğinde 25 adet mikrokanallardan oluşan bir ısı alıcıda R-134a soğutucu akışkanı ile akış kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Isı akısı ve kütleli akı sırasıyla 11,46-403,1  $\text{kW/m}^2$  ve 50-300  $\text{kg/m}^2\text{s}$  aralığındadır. Yüksek hızlı akış görüntüleme yardımıyla akış desenlerini gözlemlemişlerdir. Deneylerde, artan ısı akısına bağlı olarak kabarcıklı, tıkaç ve dalgalı-halkasal akış desenleri oluşmuştur. Tıkaç ve dalgalı-halkasal akış rejimlerinde yüzeydeki sıvı filmde kabarcık oluşumunun görüldüğü rapor edilmiştir. Isı akısı arttıkça kabarcık ayrılma çapı ve frekansı artarken kabarcık ayrılma çapının kütleli akı arttıkça azaldığı görülmüştür.  $G=50 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı değerinde ısı akısının bütün çalışma aralığı değerlerinde kanal içerisinde ters akış oluşumu gözlenmiştir.

Zhu et al. (2017a), 1 mm ve 2 mm yatay minikanallarda R-32 soğutucu akışkanına ait akış kaynama desenlerini incelemişlerdir. Deneyler, 50-600  $\text{kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı aralığında ve 10-30  $\text{kW/m}^2$  ısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Çalışma aralığında, tıkaç akış, çalkantılı akış, halkasal akış, kuruma, sisli akış ve tabakalı akış desenlerinin olduğu ifade edilmiştir. Tıkaç akış bölgesi artan kütleli akı ile beraber azalırken artan doyma sıcaklığı ve ısı akısıyla beraber artmıştır. Halkasal akış bölgesinin, artan doyma sıcaklığı, kütleli akı ve ısı akısıyla beraber küçüldüğü, sisli akış bölgesinin ise artan doyma sıcaklığı, kütleli akı ve ısı akısıyla büyüdüğü görülmüştür.

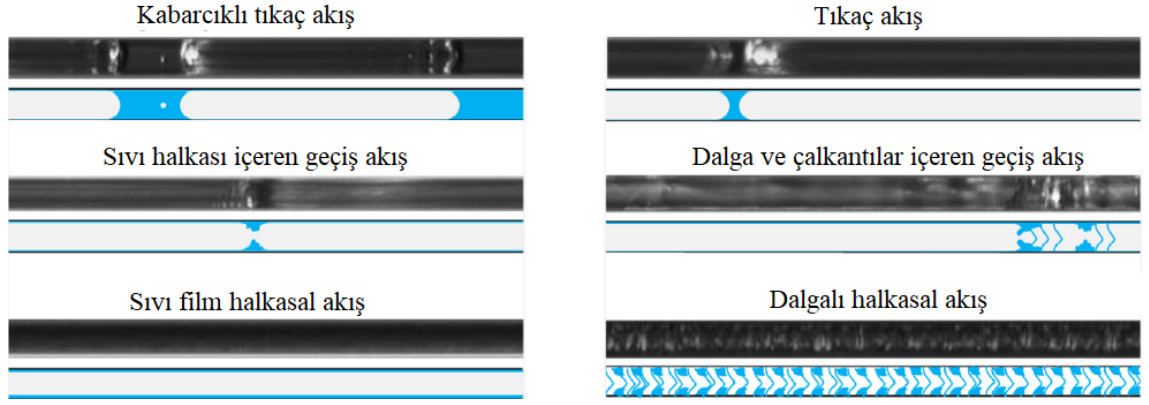
Li et al. (2018), mikrokanallı ısı alıcıda akış kaynama sırasında oluşan R-134a soğutucu akışkanına ait temel akış desenleri ve bunlar arasındaki geçişi yüksek hızlı akış görüntüleme ile incelemişlerdir. Mikrokanallı ısı alıcı 500  $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}^2$  kesit alanına sahip, 60 mm uzunluğunda 20 adet paralel mikrokanaldan oluşmaktadır. Çalışılan ısı akısı ve kütleli akı aralığı sırasıyla 1-200  $\text{kW/m}^2$  ve 164-573  $\text{kg/m}^2\text{s}$ 'dir. Deneylerde, kabarcıklı akış, tıkaç akış, çalkantılı akış, sıvı yığın akış ve halkasal akış desenleri gözlenmiş olup kuruluk derecesi ve kütleli akıya bağlı olarak akış deseni haritaları oluşturulmuştur. Aktif çekirdeklenme alan yoğunluğunun ( $N_a$ ) kabarcıklı akış-tıkaç akış ve tıkaç akış-çalkantılı akış arasındaki geçişlerde etkili bir parametre olduğu ifade

edilmiştir. Aktif çekirdeklenme alan yoğunluğu ve kaynama sayısına ( $Bo$ ) dayanarak kabarcıklı akış-tıkaç akış geçişi için bir kriter önerilmiştir.

Markal et al. (2016a, 2016b, 2018), çoklu mikrokanallı ısı alıcılarda geniş bir parametre aralığında suyun doymuş akış kaynama karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Mikrokanalların hidrolik çapı 100, 150, 200, 250  $\mu\text{m}$  iken  $D_h=100 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanalların genişlik/derinlik oranı 0,37-5.00 aralığındadır. Deneysel kütlesel akı 51-729  $\text{kg/m}^2\text{s}$  aralığında olup, mikrokanal tabanına uygulanan ısı güç 44-100 W aralığındadır. Yazarlar, akış görüntüleme sonuçlarına dayanarak mikrokanallarda kaynamalı akışın sanki-periyodik karaktere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Periyodik kaynama süreci, ıslatma aşaması, kısmi/tam kuruma aşaması ve buharlaşma ve uzun kabarcıklı-halkasal akış aşaması olma üzere üç kısma ayrılmıştır. Periyodik kaynamalı akış sırasında gözlemlenen ana akış desenlerinin uzun kabarcıklı akış ve halkasal akış olduğu ifade edilmiştir. Isı akısı, kütlesel akı ve kanallar arasındaki etkileşime bağlı olarak çaklanti akış ve sisli akış rejimleri de gözlemlenmiştir. Hidrolik çap arttıkça yüzeydeki sıvı film kalınlığı arttığından kuruma periyodunun kısaldığı ifade edilmiştir. Yüksek mikrokanal genişlik/yükseklik değerlerinde kuruma periyodunun daha kısa ve ıslatma periyodu ile buharlaşma periyodunun ise daha uzun olduğu gözlemlenmiştir. Bütün çalışma koşullarında, kabarcıklı kaynamanın hızlı kabarcık büyümesi ve kanal tarafından sınırlandırılan kabarcığın hem kanal çıkışına hem de kanal girişine doğru uzamasından dolayı bastırıldığı görülmüştür.

Li and Hrnjak (2019a, 2019b), çapı 643 $\mu\text{m}$  olan mikro tüplerde R-1234ze(E) soğutucu akışkanının akış kaynama özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel 50-225  $\text{kg/m}^2\text{s}$  kütlesel akı aralığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel, tıkaç akış, geçiş akış ve halkasal akış rejimleri gözlemlenmiştir (Şekil 2.14). Kuruluk derecesi arttıkça geçiş akışının meydana geldiği görülmüştür. Geçiş akışında, yüksek kütlesel akı değerlerinde akış deseninde dalgalı bir yapı oluşmuştur. Düşük kütlesel akılarda sıvı-buhar ara yüzeyinin belirgin olmadığı gözlemlenmiştir. Yüksek ısı akısı ve kütlesel akı değerlerinde mikro tüp içinde halkasal akış rejiminin hakim olduğu belirtilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ



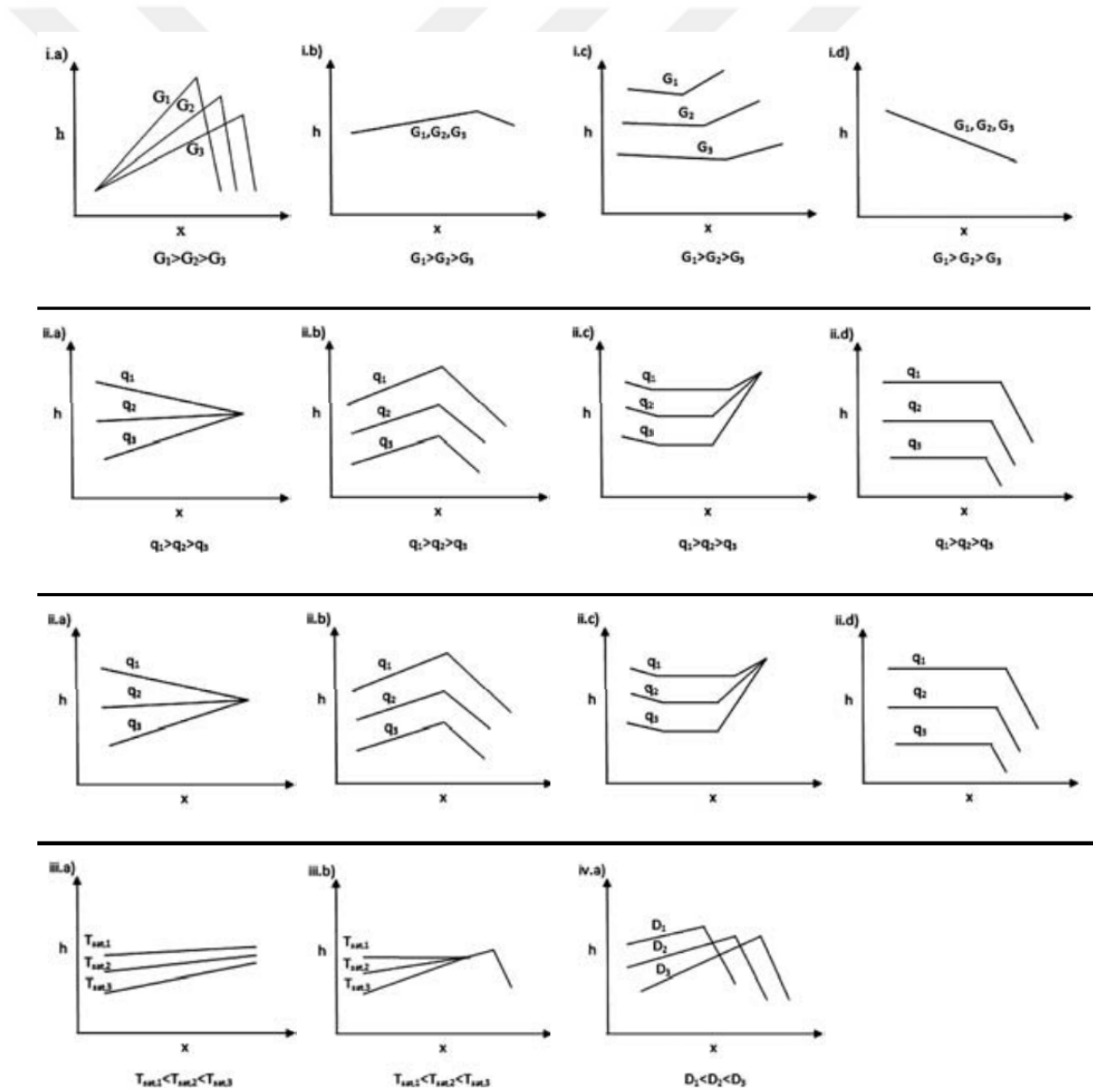
Şekil 2.14. Li and Hrnjak (2019a) tarafında gözlemlenen R-1234ze(E)'e ait akış kaynama desenleri.

Talebi et al. (2019), elektriksel algılayıcılar kullanarak tek bir mikrokanalda akış kaynama rejimlerini incelemiştir. Kanal, 750  $\mu\text{m}$  hidrolik çapında ve 63,5 mm uzunluğundadır. Kütleli debi, 0,5-4 ml/dk, ısı gücü ise 20-32,3 W aralığındadır. Deneysel kabarcıklı, tıkaç, dalgalı/çalkantılı ve halkasal akış desenleri gözlemlenmiştir. Düşük kütleli akılarda, kabarcıklı akış yerine tıkaç ve halkasal akış desenlerinin baskın olduğu görülmüştür. Kütleli akı arttıkça düşük ısı akılarında bile kabarcıklı akış rejimi oluşmuştur. Isı akısı arttıkça kanal içinde çalkantılı akış ve halkasal akış desenleri gözlemlenmiştir.

Özdemir et al. (2020), 560  $\mu\text{m}$  hidrolik çaplı tek bir mikrokanalda kanal genişlik/yükseklik oranının akış kaynama karakteristiklerine olan etkisini deneysel olarak incelemiştir. Test akışkanı olarak saf su kullanılmış olup, test elemanlarının kanal genişlik/yükseklik oranı 0,5, 2,56 ve 4,94'tür. Deneysel, ısı akısı 480-500  $\text{kW}/\text{m}^2$  aralığında iken kütleli akı 200-800  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  aralığındadır. Kabarcıklı akış, tıkaç akış, çalkantılı akış ve halkasal akış deneylerde gözlemlenen başlıca kaynamalı akış desenleridir. Düşük kanal genişlik/yükseklik oranına sahip iki mikrokanalda ters akış oluştuğu belirtilmiştir. En küçük genişlik/yükseklik oranına sahip kanalda ( $\beta=0,5$ ) kabarcıklı akış deseni oluşmamıştır.  $\beta=4,94$  olan mikrokanalda, kabarcıklar kanal içinde dağılmış halde iken genişlik/yükseklik oranının azalmasıyla ( $\beta=2,56$ ) sınırlama etkilerinden dolayı kanal içinde uzun kabarcıkların oluştuğu görülmüştür.  $\beta=4,94$  olan mikrokanal hariç diğer kanallarda periyodik akış yapısının oluştuğu yazarlar tarafından ifade edilmiştir.

### 2.3. Mikrokanallarda Akış Kaynama Isı Transfer Karakteristikleri

Literatürde, makro boyuttaki kanallarda akış kaynama ısı transferinin temel olarak kabarcıklı kaynama ve taşınımlı kaynama olmak üzere iki farklı mekanizmayla gerçekleştiği kabul edilir (Collier and Thome 1994). Kabarcıklı kaynama mekanizması, kanal yüzeylerinde kabarcık oluşum süreci ile ilgilidir ve ısı transferi ısı akısına bağımlılık gösterir. Taşınımlı kaynama, yüzeyde oluşan sıvı film boyunca gerçekleşen iletim ve taşınım ile birlikte sıvı-buhar arayüzeyinde oluşan buharlaşma ile ilgili süreci içerir. Taşınımlı kaynamada ısı transferi önemli ölçüde kütleli akıya ve kuruluk derecesine bağlıdır. Düşük buhar kuruluk derecelerinde kabarcıklı kaynama etkinken, yüksek kuruluk derecelerinde taşınımlı kaynama etkileri önemli hale gelir (Carey 2008).



Şekil 2.15. Mikrokanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısının farklı parametrelere göre değişiminin şematik gösterimi (Ribatski 2013).

Mikrokanallardaki akış kaynama ısı transfer mekanizması makrokanallara göre oldukça karmaşık olup hem kabarcıklı kaynama hem de taşınımlı kaynama etkileri akış rejimlerine bağlı olarak bir arada görülebilir (Bergles et al. 2003; Lee and Mudawar 2005b; Liu and Garimella 2007; Bertsch 2009; Li and Wu 2010; Kim and Mudawar 2014). Mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi kanal boyutlarına ve geometrisine, ısı akısına ve kütleli akıya bağlı olabilir. Ribatski (2013) mikrokanallarda kaynamalı ısı transfer katsayısının değişik deneysel parametrelere göre değişimini Şekil 2.15'teki gibi özetlemiştir.

Qu and Mudawar (2003a),  $231 \times 713 \mu\text{m}^2$  kesit alanına sahip 21 adet paralel mikrokanaldan oluşan bir mikrokanallı ısı alıcıda doymuş akış kaynama ısı transfer özelliklerini incelemiştir. Deneyler su ile gerçekleştirilmiş olup kütleli akı değerleri  $135\text{-}402 \text{ kg/m}^2\text{s}$  aralığındadır. Deneysel sonuçlar, termodinamik denge kurulum derecesinin sifira yakın değerlerinde ani olarak halkasal akış rejiminin oluştuğunu ve buna bağlı olarak baskın ısı transfer mekanizmasının zorlanmış taşınımlı kaynama olduğunu göstermiştir. Makrokanallardaki akış kaynamanın aksine, ısı transfer katsayısının artan termodinamik kurulum derecesi ile azaldığı belirtilmiştir. Bu durumun halkasal akış rejiminde görülen sıvı damlacık sürüklenmesi ve birikmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Akış kaynama ısı transfer katsayısının, kütleli akıya önemli derecede bağlı olduğu, ısı akısına bağlılığının zayıf olduğu görülmüştür. Bu gözlemlere dayanarak yazarlar, mikrokanallarda akış kaynama sırasında halkasal akış rejiminin ve taşınımlı kaynama ısı transfer mekanizmasının baskın olduğu sonucuna varmışlardır. Steinke and Kandlikar (2004) ise,  $214 \times 200 \mu\text{m}^2$  kesit alanına sahip 57 mm uzunluğunda kanallardan oluşan çoklu mikrokanallı bir ısı alıcıda suyun akış kaynamasını incelemiştir. Deneylerde kütleli akı  $157\text{-}1782 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , ısı akısı  $5\text{-}930 \text{ kW/m}^2$  aralığındadır. Deneylerde maksimum akış kaynama ısı transfer katsayısı  $192 \text{ kW/m}^2\text{K}$  olarak elde edilmiştir. Yerel ısı transfer katsayısının artan kurulum derecesi ile azaldığı görülmüştür. Yazarlar buna bağlı olarak mikrokanallarda akış kaynama sırasında kabarcıklı kaynama ısı transfer mekanizmasının baskın olduğunu belirtmişlerdir. Diğer yandan, Koşar et al. (2005),  $227 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı ve yan yüzeylerine  $7,5 \mu\text{m}$  çaplı girintiler içeren mikrokanallarda suyun akış kaynama ısı transfer karakteristiklerini incelemiştir. Deneylerde, ısı akısı  $25\text{-}445 \text{ W/cm}^2$  aralığında iken kütleli akı  $41\text{-}302 \text{ kg/m}^2\text{s}$  aralığındadır. Yazarlar, ısı akısı ve kütleli akı değerlerine bağlı olarak

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

mikrokanallarda akış kaynama prosesinde hem kabarcıklı kaynama hem de taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Kabarcıklı kaynama ve taşınımlı kaynama arasındaki geçiş Reynolds sayısı ve kaynama sayısına göre belirlenmiştir. Düşük Reynolds sayısı ve kaynama sayılarında kabarcıklı kaynama etkin iken, yüksek Reynolds sayısı ve kaynama sayısı değerlerinde baskın ısı transfer mekanizmasının taşınımlı kaynama olduğu ifade edilmiştir.

Lee and Mudawar (2005b), mikrokanallarda R-134a soğutucu akışkanını kullanarak mikrokanallı ısı alıcılarda akış kaynama ısı transfer karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel olarak, ısı akısı aralığı  $15-93,8 \text{ W/cm}^2$ , kütle akı aralığı  $127-654 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'dir. Yazarlar, mikrokanallarda akış kaynamada baskın ısı transfer mekanizmasının çıkış kurulum derecesine ( $x_e$ ) önemli derecede bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.  $x_e < 0,05$  olduğu düşük kurulum derecelerinde kabarcıklı kaynamanın,  $x_e > 0,05$  durumunda ise halkasal film buharlaşmanın baskın ısı transferi mekanizması olduğu belirtilmiştir.

Huh and Kim (2006), hidrolik çapı  $103,5 \mu\text{m}$  ve  $133 \mu\text{m}$  olan mikrokanallarda ısı akısı ve kütle akının sırasıyla  $180-500 \text{ kW/m}^2$  ve  $77,5-309,8 \text{ kg/m}^2\text{s}$  aralığında olduğu şartlarda suyun akış kaynama karakteristiklerini incelemişlerdir. Isı transfer katsayısının kanal ortasında kurulum derecesinden bağımsız olduğu, kanal çıkışında ise kurulum derecesiyle birlikte çok az arttığı görülmüştür. Deneysel sonuçlar, kanalın orta kısmında ısı transfer katsayısının ısı akısına bağlı olduğu, kütle akıdan ise bağımsız olduğunu göstermiştir. Yazarlar, bu durumu, kanalın orta kısmında kabarcıklı kaynamanın baskın olmasıyla ilişkilendirmişlerdir. Kanal çıkışına yakın uzun kabarcıkların ve halkasal akış desenlerinin oluştuğu ve bu bölgede baskın ısı transfer mekanizmasının taşınımlı kaynama olduğu ifade edilmiştir.

Liu and Garimella (2007),  $275 \times 636 \mu\text{m}^2$  ve  $406 \times 1063 \mu\text{m}^2$  kesit alanına sahip mikrokanallarda suyun akış kaynamasını incelemişlerdir. Deneysel olarak kütle akı  $221-1283 \text{ kg/m}^2\text{s}$  aralığında iken maksimum ısı akısı ve çıkış kurulum derecesi sırasıyla  $129 \text{ W/cm}^2$  ve  $0,2$ 'dir. Akışkanın kanala giriş şartları ve kütle akının kabarcıklı kaynama başlangıcını etkilediği ancak kabarcıklı kaynama başladıktan sonra kaynama eğrisi üzerinde çok az etkisi olduğu ifade edilmiştir. Yazarlar deneysel verilere dayanarak,

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

doymuş akış kaynama ısı transfer katsayısı için zorlanmış taşınım iyileştirme faktörü ve kabarcıklı kaynama baskılama faktörünü yeniden tanımlayıp yeni bir bağıntı önermişlerdir.

Harirchian and Garimella (2008), FC-77 dielektrik sıvı kullanarak yüksekliği 400  $\mu\text{m}$ , genişliği 100-5850  $\mu\text{m}$  aralığında değişen çoklu mikrokanallı ısı alıcılarda geniş bir kütleli akı aralığında ( $G=250-1600 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) akış kaynama karakteristiklerini incelemişlerdir. Belli bir kanal boyutu için kabarcıklı kaynama bölgesinde kaynama eğrileri ve ısı transfer katsayısının kütleli akıdan bağımsız olduğu; artan ısı akısı ile taşınımlı kaynamanın baskın hale geldiği ve buna bağlı olarak kaynama eğrilerinin artan kütleli akı ile farklılaşmaya başladığı ifade edilmiştir. Taşınımlı kaynama bölgesinde artan kütleli akı ile beraber kaynamalı akış ısı transfer katsayısı artmıştır. Sabit bir duvar ısı akısı değerinde, ısı transfer katsayısının kanal genişliğinin 400  $\mu\text{m}$  ve büyük olduğu mikrokanallarda kanal genişliğinden bağımsız olduğu görülmüştür. Bir diğer çalışmada Harirchian and Garimella (2009b), bir önceki çalışmadaki parametrelere ek olarak, yüksekliği 100  $\mu\text{m}$  ve 250  $\mu\text{m}$  ve genişliği 100-1000  $\mu\text{m}$  aralığında olan mikrokanallı ısı alıcılar kullanarak kesit alanının akış kaynamaya olan etkisini araştırmışlardır. Yazarlar, akış görüntüleme ve ısı transferi sonuçlarına göre, mikrokanal genişliği, mikrokanal yüksekliği veya mikrokanal en/boy oranının tek başına kaynama mekanizmasını ve ısı transfer katsayısını belirleyemeyeceğini; bunun yerine kesit alanının akış kaynama ısı transfer mekanizması ve ısı transfer katsayısı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Kesit alanının 0,089  $\text{mm}^2$ 'den küçük olduğu mikrokanallarda, kaynama başlangıcında tıkaç akışın olduğu ve düşük ısı akılarında bile çalkantılı/halkasal akış deseninin olduğu ifade edilmiştir. Kabarcıklı kaynama ve sıvı film buharlaşma mekanizmalarının birlikte görüldüğü bu tip mikrokanallarda yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmiştir. Kesit alanı 0,089  $\text{mm}^2$ 'den büyük olan mikrokanallarda, yüksek ısı akılarında bile kabarcıklı kaynama etkisinin devam etmekte olduğu ve ısı transfer katsayısının kanal boyutlarından bağımsız olduğu belirtilmiştir.

Jones and Garimella (2009) yüzey pürüzlülüğünün mikrokanallarda akış kaynama ısı transferine olan etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler, 500×500  $\mu\text{m}^2$  kesit alanına sahip 25,4 mm uzunluğunda 10 adet mikrokanaldan oluşan bakırdan imal edilmiş bir ısı alıcıda saf su ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kütleli akı değerleri

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

200, 600, 1000 kg/m<sup>2</sup>s iken ısı alıcı tabanından uygulanan ısı akısı değeri 3000 kW/m<sup>2</sup>'ye kadar ulaşmıştır. Deneysel  $R_a=1,4, 3,9$  ve  $6,7 \mu\text{m}$  olmak üzere üç farklı değerde yüzey pürüzlülüğünün etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, belirli koşullar altında, yüzey pürüzlülüğünün, mikrokanallarda akış kaynama karakteristikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olabileceğini ve bu nedenle pürüzlülüğün mikrokanallı ısı alıcı tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir parametre olduğunu göstermiştir. Mevcut test yüzeyleri için, pürüzlülüğün kaynama başlangıcındaki yüzey sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmemiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün kritik ısı akısına çok az etkisi olduğu tespit edilmiştir. 700 kW/m<sup>2</sup>'nin altındaki ısı akıları için, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan doymuş kaynama ısı transfer katsayısında sadece küçük farklar ölçülmüştür. Bununla birlikte, daha yüksek ısı akılarında  $R_a= 3,9 \mu\text{m}$  ve  $6,7 \mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip yüzeylerin  $R_a=1,4 \mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip yüzeylere göre daha yüksek ısı transfer katsayılarına sahip olduğu görülmüştür. Daha yüksek ısı akılarında,  $R_a= 3,9 \mu\text{m}$  ve  $6,7 \mu\text{m}$  pürüzlülüğüne sahip yüzeylerin benzer ısı transfer katsayısı değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir. 1500 kW/m<sup>2</sup>'nin üzerinde sabit bir ısı akısı için,  $R_a= 3,9 \mu\text{m}$  ve  $6,7 \mu\text{m}$  pürüzlüklü yüzeylerin  $R_a=1,4 \mu\text{m}$  pürüzlüklü yüzeye kıyasla %20 ila %35 daha yüksek ısı transfer katsayılarına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Karayiannis et al. (2010), iç çapı 0,52 mm ile 4,26 mm arasında değişen düşey kanallarda R-134a soğutucu akışkanı ile akış kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel, kütleli akı değerleri 100-700 kg/m<sup>2</sup>s arasında yer alırken, ısı akısı 1,6-135 kW/m<sup>2</sup> aralığında değiştirilmiştir. İç çapın 1,1 mm'den büyük olduğu tüplerde, ısı transfer katsayısının ısı akısı ve sistem basıncı ile yükseldiği; düşük kuruluk derecelerinde ise buhar kalitesinden bağımsız olduğu görülmüştür. Yüksek kuruluk derecelerinde, ısı transfer katsayısı artan buhar kalitesi ile artmıştır. Bu durum kanal içinde yerel geçici kuruma görülmesiyle açıklanmıştır. Tüp çapının 0,52 mm olduğu durumda, akış ve ısı transfer karakteristiklerinin önemli ölçüde farklılaştığı görülmüştür. Düşük ısı akılı bölgede, ısı transfer katsayısı kuruluk derecesi ile artarken, orta ve yüksek ısı akısı değerlerinde ısı akısı ile artmıştır. Yüksek kuruluk derecelerinde ( $x>0,4-0,5$ ) kanal çıkışında ısı transfer katsayısı buhar kalitesi ile yavaşça artarken ısı akısının bir etkisi gözlenmemiştir. Ayrıca bu bölgede, ısı transfer katsayısı kütleli akı ile beraber artmıştır. Isı transfer katsayısındaki bu değişimler, tüp içinde halkasal akış rejiminin hâkim olduğu; buna bağlı olarak taşınımlı kaynama ısı transfer mekanizmasının baskın olmasıyla

ilişkilendirilmiştir. Celata et al. (2010) ise 0,48 mm iç çaplı 102 mm uzunluğundaki mikro tüpler kullanarak FC-72 akışkanına ait akış kaynama ısı transfer özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, yüksek kuruluk derecelerinde ısı transfer katsayısı buhar kalitesinin artmasıyla artmıştır. Düşük kuruluk derecelerinde ise ısı transfer katsayısının ısı akısından bağımsız olduğu görülmüştür.

Liu et al. (2011), 293  $\mu\text{m}$  çaplı çoklu mikrokanallarda ve 1,2 mm hidrolik çaplı çoklu minikanallarda suyun akış kaynama ısı transferini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, kütleli akı değerleri mikrokanallarda 11,09-44,36  $\text{kg/m}^2\text{s}$  aralığında iken minikanallarda 49,59-198,37  $\text{kg/m}^2\text{s}$  aralığındadır. Uygulanan efektif ısı akısı 5-50  $\text{W/cm}^2$  aralığında değişirken çıkış kuruluk derecesi 0-0,8 aralığında değerler almıştır. Deneysel sonuçlar, akış kaynama ısı transfer katsayısının mini/mikro kanallarda artan kütleli akı ile arttığını göstermiştir. Bu durum artan kütleli akı ile zorlanmış taşınım ısı transfer etkisinin artmasıyla açıklanmıştır. Isı transfer katsayısı maksimum değerinin buhar kuruluk derecesinin düşük olduğu kabarcıklı kaynama başlangıcında almıştır. Daha sonra, artan kuruluk derecesi ile ısı transfer katsayısı azalmıştır. Sabit bir kütleli akı değerinde, artan ısı akısı ile birlikte ısı transfer katsayısı ilk olarak azalmış; minimum değere ulaştıktan sonra ise artan ısı akısı ile sürekli artmıştır. Yazarlar ısı akısı ile ısı transfer katsayısında meydana gelen bu değişimi, azalan bölgede kabarcıklı kaynamanın baskın olması, artan bölgede ise taşınımlı kaynamanın baskın olmasıyla ilişkilendirmiştir. Sabit bir ısı akısı ve kütleli akı değerinde mikrokanallardaki ısı transfer katsayısının minikanallara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca yazarlar, deneysel sonuçlara dayanarak akış kaynama ısı transfer katsayısı için Bond sayısını da içeren bir bağıntı önermişlerdir.

Balasubramanian et al. (2011) düz ve genişleyen mikrokanallı ısı alıcılarda akış kaynama karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Mikrokanallar 300  $\mu\text{m}$  genişliğinde olup genişlik/yükseklik oranı 4'tür. Deneysel sonuçlar, benzer çalışma şartlarında genişleyen mikrokanalların daha üstün ısı transfer performansına sahip olduğunu göstermiştir. Genişleyen mikrokanalların daha az ısı transfer yüzey alanına sahip olmasına karşın düz mikrokanallara göre daha iyi ısı transfer performansına sahip olması; genişleyen mikrokanallarda kaynamalı akışın daha kararlı olması sonucu kısmi kurumanın azalmasıyla açıklanmıştır. Bir diğer çalışmada Balasubramanian et al. (2013), akış kaynama yerel ısı transfer katsayısının çıkış kuruluk derecesiyle M şeklinde

değiştiğini ifade etmişlerdir. Yazarlar bu değişimi kanal içerisinde oluşan akış desenleri ile açıklamışlardır. Isı transfer katsayısının kabarcıklı kaynama rejiminde, kuruluk derecesi ile artarak pik yaptığı; daha sonra kesikli akış desenine geçişle beraber azalmaya başladığı ve halkasal akışa geçişten önce yaklaşık sabit hale geldiği; halkasal akışa geçişle beraber ince film buharlaşmasının etkisiyle tekrar artmaya başladığı ve pik değere ulaştığı; devamında ise kısmi kurumunun başlaması ve kritik ısı akısına yaklaşılması dolayısıyla tekrar azalarak M şeklinde bir eğilime sahip olduğu görülmüştür. Orta ve yüksek ısı akısı değerlerinde ince sıvı film buharlaşma mekanizmasının baskın olduğu sonucuna varılmıştır.

Wang ve Sefiane (2012), farklı mikrokanal genişlik/yükseklik oranlarına sahip mikrokanallı ısı alıcılarda, hidrolik çapın, ısı akısının ve kuruluk derecesinin akış kaynama ısı transferine olan etkisini incelemişlerdir. Taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğu ve yerel ısı transfer katsayısının azalan hidrolik çapla beraber arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, yüksek kütleli akı değerlerinde hidrolik çap etkisinin önemli olduğu belirtilmiştir. Sıvı film tabakasının daha ince olduğu bölgelerde düşük ısı transfer katsayısı değerleri gözlenmiştir. Kısmi kurumunun yerel ısı transfer katsayısını düşürdüğü öne sürülmüştür. Megahed (2012), 276 µm derinliğinde 225 µm genişliğinde 16 mm uzunluğunda 45 adet kanaldan oluşan mikrokanallı bir ısı alıcıda FC-72 akışkanı kullanarak akış kaynama deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneylerde, ısı akısı 55,5-154,2 kW/m<sup>2</sup> aralığında iken kütleli akı değerleri 341-531 kg/m<sup>2</sup>s arasında değişmiştir. Deneysel sonuçlar, ısı transfer katsayısının düşük kuruluk derecelerinde aniden azaldığı; devamında artan kuruluk derecesiyle neredeyse sabit kaldığını göstermiştir. Düşük çıkış kuruluk derecelerinde ısı transfer katsayısı ısı akısına bağımlılık göstermiş olup bu durum kabarcıklı kaynamanın baskın olmasıyla açıklanmıştır. Çıkış kuruluk derecesi arttıkça kabarcıklı kaynama etkisinin azaldığı görülmüştür. Mevcut ısı transfer modellerinin düşük kuruluk derecelerinde ısı transfer katsayısını tahmin etmede yetersiz olduğu ifade edilmiştir. Saraceno et al. (2012), iç çapı 1 mm olan 60 mm uzunluğundaki yatay bir tüpte FC-72 soğutucu akışkanına ait akış kaynama karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneylerde çalışılan kütleli akı ve ısı akısı aralıkları sırasıyla 1000-2000 kg/m<sup>2</sup>s ve 10-150 kW/m<sup>2</sup>s'dir. Çalışma basıncı 3-7 bar aralığında değişmekte olup hem aşırı soğuk hem de doymuş akış kaynama şartlarında deneyler yapılmıştır. Aşırı soğuk akış kaynamada ısı transfer katsayısı artan ısı akısı ile artarken,

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

doymuş akış kaynamada ise ısı transfer katsayısının ısı akısına bağımlılığı azalmıştır. Yazarlar, doymuş kaynamalı akışta ısı transfer katsayısının kuruluk derecesinden bağımsız olmasını kabarcıklı kaynama rejiminin kanal içinde baskın olmasıyla ilişkilendirmiştir.

Zhuan and Wang (2013), 500 µm genişliğinde 150 µm derinliğinde mikrokanallı ısı alıcılarda düşük kütleli akı değerlerinde (10-35 kg/m<sup>2</sup>s) R-134a soğutucu akışkanının akış kaynama özelliklerini incelemiştir. Deneylerde, taşınımli kaynama ve buharlaşma bölgesinde baskın olan akış rejiminin kabarcıklı/tıkaç akış olduğu; ısı transferinin kabarcıklı kaynama, ince sıvı film buharlaşması ve tek fazlı taşınım ile kontrol edildiği görülmüştür. Bu şartlarda, ısı transfer katsayısının ısı akısı ile beraber kayda değer bir artış gösterdiği; artan kütleli akı ile ise az bir artış gösterdiği ifade edilmiştir. Taşınımli buharlaşma bölgesinde yarı-halkasal ve halkasal akış rejimlerinin baskın olduğu; buna bağlı olarak ısı transfer katsayısının ısı akısından bağımsız olduğu görülmüştür. Kesikli kuruma rejimine ulaşıldığında, ısı transferinin kötüleşmeye başladığı ifade edilmiştir. Bu bölgede, ısı transfer katsayıları artan buhar kuruluk derecesi ile azalmış, kütleli akı ile az bir artış göstermiştir.

Do Nascimento et al. (2013), 100 µm genişlikli, 500 µm derinlikli ve 15 mm uzunluklu bir mikrokanallı ısı alıcıda R-134a soğutucu akışkanını ile akış kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, kütleli akı 400-1500 kg/m<sup>2</sup>s aralığında değişirken maksimum 310 kW/m<sup>2</sup> ısı akısına ulaşılmıştır. Deneylerde, maksimum 36 kW/m<sup>2</sup>C değerinde ısı transfer katsayısı elde edilmiştir. Kütleli akı değerinin 1000 kg/m<sup>2</sup>s'nin altında olduğu durumlarda, duvar aşırı kızdırma farkı sıvı aşırı soğutma derecesi ile beraber artmıştır. 1000 kg/m<sup>2</sup>s'nin üzerindeki kütleli akı değerlerinde duvar kızdırma farkının etkisi önemsiz hale gelmiştir. Kütleli akı ve aşırı soğutma değerlerinin azalması ısı alıcının performansını arttırmıştır. Sabit bir ortalama buhar kuruluk derecesi için, ortalama ısı transfer katsayısının artan kütleli akı ile beraber arttığı görülmüştür. Leão et al. (2014) ise aynı ölçülere sahip mikrokanallarda aynı ısı akısı ve kütle akısı değerlerinde R-407C soğutucu akışkanını ile akış kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde elde edilen maksimum ısı transfer katsayısı 30 kW/m<sup>2</sup>C'dir. Isı alıcının girişinde akışkan aşırı soğutma değerinin ve kütleli akının azalmasıyla kaynama eğrisinin sola doğru kaydığı görülmüştür. Düşük buhar kuruluk derecelerinde kabarcıklı

kaynama ana ısı transfer mekanizması iken, yüksek kuruluk derecelerinde zorlanmış taşınımın ana ısı transfer mekanizması olduğu ifade edilmiştir. Ancak, mikrokanallarda kaynamalı akış sırasında, ısı transfer mekanizması konusunda genel kabul görmüş bir görüş olmadığı da yazarlar tarafından vurgulanmıştır. Deneylerde ortalama kuruluk derecesi 0,16 iken çıkış kuruluk derecesi 0,32 olarak ölçülmüştür. Mikrokanallar içerisinde halkasal akış deseni çok az görülmüştür. Bu kabarcıklı kaynama etkilerinin ana ısı transfer mekanizması olduğunu göstermektedir.

Ritchey et al. (2014), 240  $\mu\text{m}$  genişliğinde, 370  $\mu\text{m}$  yüksekliğinde sahip mikrokanallı ısı alıcıda üniform olmayan ısıtmanın akış kaynama ısı transferine olan etkisini incelemişlerdir. Deneylerde FC-77 soğutucu akışkan kullanılmış olup, kütleli akı değeri yaklaşık  $890 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'dir.  $12,7 \times 12,7 \text{ mm}^2$ 'lik taban alanına,  $5 \times 5$  düzene sahip tekil olarak kontrol edilebilen ısıtma elemanları yerleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, ısı akısında non-üniform dağılım arttıkça ısı alıcının merkezinde akış yönüne dik doğrultudaki ısıtıcı elemanlardan akışkana olan ısı transferi artmaktadır. Enine yerleştirilen ısıtıcıların öncesindeki ısı akısının, girişteki ısı transfer katsayısının yüksek olmasından dolayı daha yüksek olduğu görülmüştür. Non-üniform ısıtma arttıkça ısıtıcı elemanlarda daha yüksek yüzey sıcaklık değerleri görülmüştür.

Law et al. (2014) oblik şekilli kanatçıklardan oluşan bir mikrokanallı ısı alıcıda akış kaynama karakteristiklerini çeşitli çalışma parametreleri için incelemişlerdir. Isı alıcı,  $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 'lik toplam alana sahip bakırdan yapılmış blok üzerine 0,15 mm aralıklarla yerleştirilmiş  $30^\circ$  açıyla kesilmiş 0,3 mm genişliğe sahip oblik kanatçıklardan oluşan 40 adet paralel mikrokanaldan oluşmaktadır. Mikrokanallar elektro erozyon tekniğiyle üretilmiş olup deneylerde FC-72 dielektrik akışkan kullanılmıştır. Deneylerde, ısı transfer katsayısının düşük ısı akısında maksimum olup artan ısı akısıyla beraber mikrokanal içerisinde kısmi kurumanın ve kritik ısı akısının görüldüğü noktaya kadar azaldığı görülmüştür. Düşük ısı akısı değerleri ve düşük kuruluk derecelerinde kabarcıklı kaynamanın başlıca ısı transfer mekanizması olduğu belirtilmiştir. Bu bölgede ısı transfer katsayısının ısı akısına duyarlı olduğu kuruluk derecesi ve kütleli akıdan bağımsız olduğu görülmüştür. Bu bölgede kabarcıkların oluşmaya başladığı ve büyüyüp eğik kanatçıkların yüzeylerinden ayrıldığı gözlenmiştir. Orta miktardaki ısı akısı ve kuruluk derecesi değerlerinde kabarcıklı kaynama ile beraber ince film buharlaşmasının başladığı

görülmüştür. Yüksek ısı akısı değerlerinde ısı transfer katsayısı sabit kütle akısı için neredeyse ısı akısı değerinden bağımsız olurken aynı ısı akısı değeri için artan kütle akısı ile beraber artmıştır. Yüksek kuruluk derecelerinde ısı transfer katsayıları buhar kuruluk derecesine duyarlı hale gelmiştir. Bu durum taşınımlı kaynama mekanizmasının baskın hale gelmesi ile açıklanmıştır.

Rao and Peles (2015), 370 µm çaplı tek bir mikrokanalda yaptıkları akış kaynama deneylerinde, yüzey sıcaklığının ve ısı transfer katsayısının zamanla değişiminin periyodik tekrar eden bir değişim olduğunu tespit etmişlerdir. Geçici yerel ısı transfer katsayısının maksimum değeri tek kabarcık geçişinde 19000 W/m<sup>2</sup>K iken kabarcık birleşmesi sonrasında bu değer 32000 W/m<sup>2</sup>K olmuştur. İnce sıvı film üzerinde meydana gelen buharlaşmanın, zaman ortalamalı ısı transfer katsayısının yaklaşık 4 katı kadar fazla yerel ısı transfer katsayılarının elde edilmesini sağladığı ifade edilmiştir. Mikrokanal yüzeyinin halkasal akış rejiminde aralıklı olarak sıvı faz ile tekrar ıslatılmasının yerel ısı transferi üzerinde kısa süreli bir etkisi olduğu görülmüştür.

Law and Lee (2015), FC-72 dielektrik akışkanı kullanarak düz kanatçıklı ve oblik kanatçıklı çoklu mikrokanallarda 175-350 kg/m<sup>2</sup>s kütleli akı aralığında akış kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Oblik kanatçıklı mikrokanallı ısı alıcının düz kanatçıklı ısı alıcıya göre daha üstün ısı transfer performansına sahip olduğu belirtilmiştir. Oblik kanatçıklı ısı alıcıda elde edilen kaynamalı akış ısı transfer katsayısı değerlerinin düz kanatçıklı ısı alıcıya göre 1,2-6,2 arasında daha fazla olduğu görülmüştür. Akış görüntüleme verilerine göre, oblik kanatçıklı ısı alıcılarda kabarcıklı kaynama rejiminde kabarcık yoğunluğunun daha fazla olması ve taşınımlı kaynama rejiminde ince sıvı filmin sürekli olarak gelişmesinin ısı transferinde iyileşme sağladığı belirtilmiştir. Benzer şekilde, Prajapati et al. (2015), üniform kesitli, genişleyen kesitli ve kesikli oblik kanatçıklara sahip üç farklı tip mikrokanallı ısı alıcıda suyun akış kaynama karakteristiklerini incelemiştir. Deneylerde, ısı akısı ve kütleli akı aralıkları sırasıyla 10-350 kW/m<sup>2</sup> ve 100-350 kg/m<sup>2</sup>s'dir. Kesikli oblik kanatçıklar içeren mikrokanallı ısı alıcının daha yüksek ısı transfer katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, kesikli oblik kanatçıklar içeren mikrokanallı ısı alıcının daha fazla çekirdeklenme alanına sahip olması, ısı sınır tabakanın parçalanmasını sağlaması, yan kanallar vasıtasıyla

kabarcıkların ana kanallar arasında geçişine izin vermesi ve bu tip ısı alıcıda minimum seviyede geri akış olayının görülmesi ile açıklanmıştır.

Markal et al. (2016b) hidrolik çapı 150  $\mu\text{m}$  olan 29 adet paralel silikon kanaldan oluşan bir mikrokanallı ısı alıcıda suyun akış kaynama karakteristiklerini araştırmışlardır. Deneyleerde, ısı akısı 59,3-84,1  $\text{kW/m}^2$  aralığında iken çalışılan kütleleel akı değerleri 51, 64,5, 78 ve 92,6  $\text{kg/m}^2\text{s}$ 'dir. Deneyle sonuçlarına göre, yerel ısı transfer katsayısının ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile azaldığı; kütleleel akı ile önemli derecede arttığı görülmüştür. Akış görüntülemenin de yapıldığı çalışmada kaynamalı taşınımın mikrokanallarda baskın ısı transfer mekanizması olduğu belirtilmiştir. Aynı yazarlar bir başka çalışmada, (Markal et al. 2016a) mikrokanal genişlik/derinlik oranının akış kaynama ısı transferi üzerindeki etkisini incelemiştirlerdir. Deneyleerde, hidrolik çap sabit olmak üzere ( $D_h=100\mu\text{m}$ ), mikrokanal genişlik/derinlik oranı 0,37-5 arasında değiştirilmiştir. Deneyle sonuçlarına göre, ısı transfer katsayısı genişlik/derinlik oranı ile 3,54 değerine kadar artmış, genişlik/derinlik oranının bu değerinden sonra düşüş göstermiştir. Bu durum, akış görüntüleme verilerine dayanarak, artan mikrokanal genişlik/derinlik oranıyla beraber kuruma periyodunun uzaması ile ilişkilendirilmiştir.

Jagirdar and Lee (2016),  $0,42 \times 2,54 \text{ mm}^2$  kesit alanlı 25,4 mm uzunluğunda tek bir mikrokanalda akış kaynama desenleri ile ısı transfer katsayısı arasındaki ilişkiyi akış görüntüleme ile incelemiştirlerdir. Deneyle sonuçlarına göre, kanalın buhar tıkaçları ile dolu olduğu durumda, ince sıvı film buharlaşma mekanizmasının ısı transfer katsayısında pik görülmesine yol açtığı belirtilmiştir. Kaynamanın başladığı yerin ve kanal çıkışındaki akış şartlarının maksimum ısı transfer katsayısı değerini etkilediğı ifade edilmiştir. Kanalın sıvı tıkaçları ile dolu olduğu durumda ise, ısı transfer katsayısının ince sıvı film buharlaşmasına göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Kuznetzov and Shamirzaev (2016),  $335 \times 930 \mu\text{m}^2$  kesit alanına sahip 21 adet paralel mikrokanaldan oluşan bir ısı alıcıda R-134a soğutucu akışkanına ait akış kaynama karakteristiklerini incelemiştirlerdir. Deneyleler, ısı akısı ve kütleleel akının sırasıyla 50-500  $\text{kW/m}^2$  ve 200-600  $\text{kg/m}^2\text{s}$  değerlerinde yapılmıştır. Sonuçlar, ısı akısının ısı transfer katsayısı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ve kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu göstermiştir. Yüksek kuruluk derecelerinde kabarcıklı

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

kaynamanın bastırıldığı görülmüştür. Buna bağlı olarak yazarlar, yüksek kuruluk derecelerinde kabarcıklı kaynamanın bastırılması ve sıvı film buharlaşmasını dikkate alan yeni bir ısı transfer modeli önermişlerdir.

Huang and Thome (2016) çoklu mikrokanallı evaporatörlerde geniş bir parametre aralığında soğutucu akışkanların akış kaynama ısı transfer karakteristiklerini incelemişlerdir. Yerel ısı transfer katsayısı akış yönü boyunca farklı değişimler göstermiştir. Kanalin başlangıç bölgesinde, ısı transfer katsayısındaki azalma tek fazlı gelişen akış olmasıyla açıklanmıştır. Daha sonra, yerel ısı transfer katsayısı aşırı soğuk kaynamanın başlangıcından doymuş akış kaynamanın başlamasına kadar artmıştır. Bunu takiben, yerel ısı transfer katsayısı halkasal akış rejimine kadar azalma eğilimi göstermiştir. Halkasal akış rejimiyle bereber yerel ısı transfer katsayısı önemli derecede artmıştır. Yerel ısı transfer katsayısının giriş aşırı soğutma sıcaklığının azalmasıyla azaldığı, doyma sıcaklığı ile arttığı belirtilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, R-1233xd(E) soğutucu akışkanı en düşük ısı transfer katsayısına sahip iken en yüksek ısı transfer katsayısına sahip soğutucu akışkan R-236fa olmuştur. Huang et al. (2016) çalışmasını da dikkate alarak, yazarlar yerel ısı transfer katsayısının tahmini için akış desenlerine dayalı yeni bir model önermişlerdir.

Jafari et al. (2016) mikro evaporatörlerde yüzey pürüzlülüğünün akış kaynama ısı transferine olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Mikro evaporatörler, yüksekliği 700  $\mu\text{m}$ , genişliği 250  $\mu\text{m}$ , uzunluğu 19 mm olan 40 adet paralel mikrokanaldan oluşmaktadır. Deneylerde soğutucu akışkan olarak R-134a kullanılmıştır. Mikro evaporatör tabanından uygulanan ısı akısı aralığı 1-48  $\text{W}/\text{cm}^2$  aralığında değişmekte olup, deneyler 85 ve 200  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  kütleli akı değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Tel elektro erozyon yöntemiyle üretilen üç farklı mikro evaporatörün yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla  $R_z=2,03$ , 6,8 ve 15,86  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar, yüzey pürüzlülüğü arttıkça, düşük ve orta ısı akısı değerlerinde iki fazlı ısı transfer katsayısında %45'e kadar bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Deneylerde akış görüntüleme yapılmamıştır.

Deng et al. (2017), lazer mikro işleme ile yüzeyinde mikro iğne tip kanatçıkların oluşturulduğu dikdörtgen mikrokanallarda akış kaynama performansını incelemişlerdir.

Test akışkanı olarak su ve etanol kullanmışlardır. Kütleli akı değerleri 200-300 kg/m<sup>2</sup>s aralığında olup 1067 kW/m<sup>2</sup>'ye kadar olan ısı akısı aralığında çalışılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, mikro iğne kanatçıkların mikrokanallarda kullanılmasıyla su için %10-104 arası; etanol için %90-175 arası ısı transfer iyileşmesi sağlanmıştır. Mikrokanal tabanında oluşturulan mikro yapıların, çok sayıda kararlı kabarcıklanma alanları oluşturması, kanalın tekrar ıslatılmasını sağlaması ve yerel kuruma olayını engelleyerek ısı transferinde artış sağladığı belirtilmiştir.

Markal et al. (2018), hidrolik çapın 100-250 µm arasında değiştiği dikdörtgen kesitli çoklu mikrokanallı ısı alıcılarda su ile akış kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, ısı akısı aralığı 35,9-105,6 kW/m<sup>2</sup> iken kütleli akı değerleri, 51, 65, 78 ve 93 kg/m<sup>2</sup>s'dir. Deneysel sonuçlara göre hidrolik çapın ısı transfer katsayısı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Hidrolik çapla beraber ısı transfer katsayısında monotonik artış veya azalış olmamasına rağmen optimum ısı transfer performansının çalışma şartlarına bağlı olarak uygun hidrolik çaplı mikrokanallar seçilerek elde edileceği yazarlar tarafından belirtilmiştir. Isı transfer katsayısı artan kütleli akı ile artarken ısı akısı ile azalmıştır. Sabit bir ısı akısı ve kütleli akı değerinde yerel kuruluk derecesinin azalan hidrolik çapla beraber arttığı görülmüştür. Pratik uygulamalar açısından, düşük hidrolik çaplı mikrokanallarda, yüksek ısı akısı ve düşük kütleli akısı çalışma şartlarının en riskli durum olduğu ifade edilmiştir.

Al-Zaidi et al. (2019), 700 µm genişliğinde, 350 µm derinliğinde paralel dikdörtgen kesitli 25 kanaldan oluşan bir mikrokanallı ısı alıcıda HFE-7100 dielektrik akışkanı ile ısı akısı ve kütleli akının akış kaynama karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneylerde, kütleli akı 50-250 kg/m<sup>2</sup>s aralığında değişmiştir. Maksimum kaynamalı akış ısı transfer katsayısı ısı akısının 250 kg/m<sup>2</sup>s değerinde 12,71 kW/m<sup>2</sup>K olarak elde edilmiştir. Yerel ısı transfer katsayısının ısı akısıyla arttığı görülmüştür. Yerel kuruluk derecesi arttıkça ısı transfer katsayısının azaldığı; kütleli akının ısı transfer katsayısı üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğu görülmüştür.

Li and Hrnjak (2019b), R-1234ze(E) soğutucu akışkanı ile 0,643 mm hidrolik çaplı mikro tüpte yaptığı akış kaynama deneylerinde, ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesiyle beraber taşınım etkilerinin artmasından ötürü ilk olarak yükseldiği;

orta kuruluk derecesi değerlerinde ise kabarcıklı kaynamanın etkisini yitirmesi ve kuruma olayından dolayı azaldığını ifade etmişlerdir. Kütleli akı  $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  değerinden  $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  değerine yükselmesi durumunda yerel maksimum ısı transfer katsayısı değeri  $3,65 \text{ kW/m}^2\text{K}$  değerinden  $3,95 \text{ kW/m}^2\text{K}$  değerine yükselirken; kuruluk derecesi  $0,55$ 'ten  $0,7$  değerine çıkmıştır. Yazarlar akış görüntülerine dayanarak, türbülans etkilerinin maksimum yerel ısı transfer katsayısını tayin ettiğini belirtmişlerdir.

Dang et al. (2020), sürekli ve kesikli yapılara sahip iki tip çoklu mikrokanallı ısı alıcılarda HFE-7000 soğutucu akışkanının akış kaynama karakteristiklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Kütleli akı  $300\text{-}500 \text{ kg/m}^2\text{s}$  aralığında değişirken, ısı akısı  $30\text{-}300 \text{ kW/m}^2$  değerleri arasındadır. Deneysel sonuçlara göre, kesikli yapıların olduğu mikrokanallarda sürekli mikrokanallara göre daha yüksek ısı transfer hızlarına ulaşılmıştır. Isı transfer katsayısındaki artışın, tıkaç ve halkasal akış rejimlerinde kabarcıklı akış rejimine kıyasla daha az olduğu görülmüştür. Isı transfer katsayısındaki kötüleşmenin başlaması kesikli yapılara sahip mikrokanallarda geciktirilmiştir. Böylece bu tip mikrokanallarda daha yüksek kritik ısı akısı değeri elde edilmiştir.

Özdemir et al. (2020), dikdörtgen metalik mikrokanallarda kanal genişlik/yükseklik oranının suyun akış kaynamasına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, düşük ve orta ısı akısı değerlerinde, yerel ısı transfer katsayısının ısı akısı ile artarken yerel kuruluk derecesinden bağımsız olduğu görülmüştür. Yüksek ısı akılarında ise, ısı akısının ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi önemsiz hale gelmiştir. Isı akısının  $480\text{-}500 \text{ kW/m}^2$  değerlerinde, ısı transfer katsayısının kanal genişlik/yükseklik oranı arttıkça azaldığı; daha yüksek ısı akısı değerlerinde kanal genişlik/yükseklik oranının etkisi olmadığı belirtilmiştir.

### 2.4. Mikrokanallarda Akış Kaynama Basınç Düşümü ve Kararsızlıklar

Mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi açısından yüksek performans potansiyeline sahip olmasına karşın, kaynama prosesi sırasında görülen akış kararsızlıkları, basınç dalgalanmaları ve yüksek basınç düşümü mikrokanalların endüstriyel olarak yaygınlaşmasının önünde en büyük engellerden biridir. Akış

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

kararsızlıkları sistemin güvenilirliğini etkilerken yüksek basınç düşümü aynı zamanda yüksek pompalama gücü gerektirmektedir.

Qu and Mudawar (2003b, 2004), dikdörtgen kesitli su soğutmalı çoklu mikrokanallı ısı alıcılarda akış kaynama basınç düşümünü ve hidrodinamik kararsızlıklarını incelemişlerdir. Yazarlar, basınç düşümü salınımları ve paralel kanal kararsızlığı olmak üzere iki tip hidrodinamik kararsızlık tanımı yapmışlardır. Basınç düşüm salınımlarının yüksek genlikli ve periyodik yapıda olduğu; bu durumun kanallardaki buhar üretimi ve ısı alıcının giriş kısmında yer alan sıkıştırılabilir hacim arasındaki etkileşimden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Sert basınç düşümü salınımlarının kritik ısı akısının erken oluşmasını tetiklediği ve bu tip kararsızlığın ısı alıcının giriş tarafına akış kısıtlayıcılar yerleştirilerek engellenebileceğini ifade etmişlerdir. Her bir kanalda oluşan basınç salınımları ve kanallar arasındaki etkileşimden kaynaklanan paralel kanal kararsızlığının akışta hafif salınımlara neden olduğu görülmüştür. Deneysel verilere göre, mikrokanallardaki basınç düşümü kaynamanın başlamasıyla kayda değer bir artış göstermiştir. Orta ve yüksek ısı akısı değerlerinde akışın kanal giriş bölgesinde tıkaç ve halkasal akış desenleri arasındaki salınım yaptığı, kanalın çıkış bölgesinde ise halkasal akış deseninin baskın olduğu belirtilmiştir. Yazarlar, iki fazlı bölgedeki basınç düşümünü sonuçlarını, 6 adet makrokanal bağıntısı ve 4 adet mini/mikro-kanal bağlantısı tahminleriyle karşılaştırmışlardır. Makrokanal bağıntıları içerisinde, türbülanslı akışa dayanan bağıntıların deneysel verileri yüksek tahmin ettiği, laminer sıvı ve laminer buhar akışını birlikte içeren bağıntıların daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Mini/mikrokanallardaki basınç düşümü için geliştirilen bağıntılar ile yapılan tahminlerin daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmüştür.

Wu and Cheng (2003a), akış görüntüleme ile eş zamanlı olarak sıcaklık ve basınç ölçümleri yaparak trapez kesitli silikon mikrokanallarda periyodik akış kaynama karakteristiklerini incelemişlerdir. Mikrokanallarda görülen periyodik akış yapısının sıcaklık, basınç ve kütle akı değerlerinde yüksek genlikli/uzun periyotlu salınımlara yol açtığı belirtilmiştir. Mikrokanallar içinde tek fazlı akış periyodunda basınç düşümünün azaldığı, anlık kütle akının ise arttığı; iki fazlı akış periyodunda ise basınç düşümünün arttığı, anlık kütle akının azaldığı görülmüştür. Kaynamada görülen yüksek genlikli/uzun periyotlu dalgalanmaların basınç düşümü ve kütle akısı

çalkantılarının faz farkına sahip olduğu durumlarda varlığını devam ettirebileceği belirtilmiştir. Mikrokanal giriş basıncı yükselirken kütleli akının düşmesi sırasında giriş sıcaklığı ve anlık kütleli akı değerlerinde küçük genlikli/kısa süreli salınımlar oluşmuştur. Bu duruma, iki fazlı akımlarda görülen kabarcık dinamiği kararsızlığının neden olduğu ifade edilmiştir. Aynı araştırmacılar benzer bir çalışmada, silikon mikrokanallarda farklı ısı akısı değerlerinde kaynama kararsızlıklarını incelemiştir. Wu and Cheng (2004) deneysel çalışmalarında, ısı akısı ve kütleli akı değerlerine bağlı olarak mikrokanallarda üç farklı kararsız kaynama modu gözlemlemiştir. Bu modlar, düşük ısı akısı ve yüksek kütleli akılarda görülen sıvı/iki faz arasında değişen akış yapısı; orta ısı akısı ve kütleli akı değerlerinde gözlemlenen sürekli iki fazlı akış yapısı; yüksek ısı akısı ve düşük kütleli akılarda oluşan iki faz/buhar arasında değişen akış yapısı olarak adlandırılmıştır. Kararsız kaynama periyotlarının önemli derecede ısı akısı ve kütleli akıya bağlı olduğu görülmüştür.

Balasubramanian and Kandlikar (2005), basınç düşümü dalgalanmaları ile akış desenleri arasındaki ilişkiyi araştırmak için 333 µm çaplı paralel çoklu kanallarda akış kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde basınç dalgalanmaları kaydedilmiş ve sinyal işleme yardımıyla basınç düşümü dalgalanmalarına ait baskın frekans ve genlikler tespit edilmiştir. Basınç düşümü salınımlarına ait baskın frekansın yüzey sıcaklığındaki artışla arttığı görülmüştür. Bu durum aynı zamanda kabarcık oluşum frekansındaki artışın bir işareti olarak yorumlanmıştır. Yüzey sıcaklığı 109°C'yi aştığında baskın frekansın azalan bir eğilime sahip olduğu görülmüştür. Basınç düşümü baskın frekansındaki bu azalma mikrokanallar içinde kabarcık oluşum frekansına göre nispeten daha düşük frekanslı tıkaç akış deseninin oluşmasıyla açıklanmıştır.

Lee and Mudawar (2005a), R-134a soğutucu akışkanının kullanıldığı bir soğutma çevriminde evaporatör olarak görev yapan dikdörtgen kesitli paralel mikrokanallarda basınç düşümü karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel sonuçlar, basınç düşümünün artan kütleli akı ve ısı akısı ile arttığını göstermiştir. Diğer yandan, mikrokanalların içi tamamen buhar fazı ile kaplandığında basınç düşüm hızında kayda değer bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca, deneysel basınç düşüm verileri hem homojen denge akış hem de ayrık akış modelleri baz alınarak oluşturulan bağıntıların tahmin değerleriyle karşılaştırılmıştır. İki fazlı viskozite modelleri kullanılarak oluşturulan

homojen denge modelleri daha düşük tahminler yaparken, makrokanal ayrık akış modellerinin bazı mini/mikro-kanal bağıntılarına kıyasla daha iyi tahminler yaptığı görülmüştür. Yazarlar, sıvı atalet etkileri, viskoz kuvvetler ve yüzey geriliminin iki fazlı basınç düşüm çarpımı üzerindeki etkilerini de içeren yeni bir bağıntı önermişlerdir. Yüksek ısı akılarında çalışan mikrokanallı ısı alıcılarda tıkaç ve halkasal akış desenlerinin baskın olmasından dolayı önerilen bağıntının ayrık akış modeli dikkate alınarak oluşturulduğu belirtilmiştir.

Koşar et al. (2006) paralel mikrokanallarda kaynama sırasında görülen paralel kanal ve kanal girişindeki sıkıştırılabilir hacim tipi akış kararsızlıklarını bastırmak için kanalların girişine yerleştirilen orifislerin etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Mikrokanalların girişine yerleştirilen akış sınırlayıcıların neden olduğu basınç düşümünü hesaba katan boyutsuz basınç düşüm çarpanı tanımlamışlardır. Giriş akış sınırlayıcıların kullanımı sonucu kararsız kaynama başlangıcına karşılık gelen ısı akılarının basınç düşüm çarpanı ile asimptotik olarak arttığı görülmüştür. Yüksek boyutsuz basınç düşüm çarpanı değerlerinde, paralel kanal ve giriş sıkıştırılabilir hacim kararsızlıklarının tamamen ortadan kalktığı ifade edilmiştir. Ancak böyle bir durumda, başka bir kararsızlık tipi olan kritik ısı akısı koşullarına daha erken ulaşma probleminin ortaya çıktığı ifade edilmiştir.

Huh and Kim (2007) hidrolik çapı 100  $\mu\text{m}$  olan 40 mm uzunluğundaki yatay dikdörtgen kesitli tek bir mikrokanalda suyun akış kaynama karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneylerde ısı akısı 500-500  $\text{kW/m}^2$  aralığında değişirken kütle akı değerleri 90, 169, 267  $\text{kg/m}^2\text{s}$  olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre basınç düşümünün ısı akısı ile arttığı görülmüştür. Makrokanallar için geliştirilen basınç düşümü korelasyonlarının deneysel verileri tahmin etmede yetersiz olduğu görülmüştür. Bir diğer çalışmada, Huh et al. (2007) mikrokanallarda akış kaynama sırasında görülen periyodik basınç düşümü, kütle akı ve sıcaklık çalkantılarını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, ısıtılan yüzey sıcaklığı, basınç düşümü ve kütle akının uzun periyotlu (100-200s) ve yüksek genlikli olarak salınım yaptığını göstermiştir. Periyodik karakterli çalkantıların mikrokanal içinde değişimli olarak birbirinin yerini alan kabarcıklı/tıkaç ve uzun tıkaç/halkasal akış desenleri ile eşleştiği belirtilmiştir. Yazarlar, akış desenleri arasındaki

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

geçiş kararsızlıklarının mikrokanallarda akış kaynama sırasında basınç düşümü, yüzey sıcaklığı ve kütleli akı çalkantılarına neden olduğu sonucuna varmışlardır.

Chang and Pan (2007) hidrolik çapı 86,3  $\mu\text{m}$  olan 15 adet paralel mikrokanaldan oluşan bir ısı alıcıda iki fazlı akış kararsızlıklarını incelemişlerdir. Kararlı ve kararsız durumda akış kaynama desenlerinin önemli derecede farklılaştığı ifade edilmiştir. Kararsız durumda mikrokanalların hepsinde ters akış oluşmuştur. Ters akışla beraber sınırlandırılmış kabarcık uzunluğunun kanal içinde ileri-geri yönlü salınım yapması basınç alanının kabarcık büyümesini bastırmasının göstergesi olabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, basınç düşüm dalgalanmalarının ters akış oluşumu ile ilişkilendirilebileceği belirtilmiştir.

Singh et al. (2008) 20 mm uzunluğundaki silikon mikrokanallarda hidrolik çapı sabit tutarak ( $D_h=142 \mu\text{m}$ ) kanal genişlik/yükseklik oranının akış kaynama karakteristiklerine etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, iki fazlı basınç düşümü kanal genişlik/yükseklik oranının 1,56 değerinde minimum değerini almıştır. Artan kanal genişlik/yükseklik oranı ile toplam basınç düşümünü oluşturan sürtünme ve ivmelenme bileşenlerinin birbirine zıt değişim göstermesinin bu duruma sebep olabileceği belirtilmiştir. Sabit bir kütleli akı ve ısı akısı değerinde iki fazlı basınç düşümünün tek fazlı basınç düşümüne göre daha az olduğu görülmüştür.

Harirchian and Garimella (2008, 2009b) mikrokanallarda akış kaynama karakteristikleri ile ilgili yapmış oldukları kapsamlı çalışmalarda aynı zamanda basınç düşümünü de incelemişlerdir. Tek fazlı akış bölgesinde basınç düşümü artan ısı akısıyla beraber az miktarda artarken, iki fazlı akışta ani olarak yükselmiştir. Tek fazlı akışta basınç kayıplarındaki azalmanın, sıvı fazın sıcaklığındaki artışla birlikte viskozitesinde meydana gelen düşüştü kaynağı ifade edilmiştir. İki fazlı akış bölgesinde ise artan ısı akısıyla beraber kuruluk derecesi artmış; buna bağlı olarak mikrokanal içerisinde daha fazla buhar fazı oluşmaya başlamıştır. Buhar fazın viskozitesi ise artan ısı akısıyla beraber artmıştır. Bu durum iki fazlı akış bölgesinde basınç düşüşünde hızlı bir yükseliş olarak deneysel verilere yansımıştır. Sabit bir yüzey ısı akısı değerinde basınç düşümünün mikrokanal kesit alanındaki azalmayla birlikte arttığı belirtilmiştir. İki fazlı akış

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

bölgesinde basınç düşüm eğrisinin eğimi daha büyük olup tek fazlı akışa göre daha yüksek basınç düşümü meydana geldiği görülmüştür.

Kuo and Peles (2009) hidrolik çapı 223  $\mu\text{m}$  olan mikrokanallarda yaptıkları deneylerde basıncın akış kaynama kararsızlıkları üzerinde önemli etkisi olduğunu görmüşlerdir. Deneyler saf su ile gerçekleştirilmiş olup, kütsel akı ve sistem basınç aralıkları sırasıyla 86-520  $\text{kg/m}^2\text{s}$  ve 50-205 kPa'dır. Belli bir buhar kuruluk derecesinde sistem basıncı arttıkça boşluk oranı ve momentum basınç düşümünün azaldığı görülmüştür. Bu durum sıkıştırılabilir hacim kararsızlığının geciktirilmesini sağlamıştır. Yüksek basınçlarda kabarcık oluşumunu başlatmak için daha düşük aşırı kızdırma farklarına ihtiyaç olduğundan, kabarcık büyüme kararsızlığı ve kritik ısı akısı koşullarına erken geçiş önlenmiştir. Akış görüntüleme sonuçlarına göre, yüksek sistem basınçlarında kabarcık ayrılma çapının azalması hızlı kabarcık büyüme salınımlarını azaltmıştır.

Jones and Garimella (2009) yüzey pürüzlülüğünün mikrokanallarda akış kaynama karakteristiklerine etkisini araştırmak için yaptıkları deneylerde,  $R_a=1,4 \mu\text{m}$  ve  $3,9 \mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğüne sahip mikrokanallarda, pürüzlülüğün ölçülebilir bir artışa neden olmadığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte,  $R_a=6,7 \mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip mikrokanallarda  $R_a=1,4 \mu\text{m}$  ve  $3,9 \mu\text{m}$  yüzeylere kıyasla pürüzlülüğün basınç düşümü üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu ifade etmişlerdir.

Zhang et al. (2009) yatay çoklu mikrokanallarda akış kaynamada farklı çalışma koşulları altında test akışkanı olarak HFE-7100 ve su kullanarak statik iki fazlı akış kararsızlığı olarak ta bilinen Ledinegg kararsızlığını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sistem basıncının statik akış kararsızlıklarını kontrol etmede önemli bir parametre olduğu; yüksek sistem basınçlarında akış kaynama sistem kararlılığının iyileştiği görülmüştür. Bu yüzden, kaynamalı su akışıyla elektronik cihazların soğutulması sırasında, düşük sistem basınçlarında çalışılmasının suyun kaynaması için daha düşük yüzey sıcaklıkları gerektireceğinden akış kararsızlıklarının azaltılması açısından önemli olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, paralel kanal sayısının azaltılmasının akışın statik kararlılığını arttıracığı belirtilmiştir. Isı akısı, giriş sıcaklığı ve kanal hidrolik çapının akış kararlılığına olan etkisinin büyük ölçüde buhar kuruluk derecesine bağlı olduğu görülmüştür. Düşük kuruluk dereceleri için, akış kararsızlığı başlangıcı civarında,

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

aşırı soğutma değerinin azalması; ısı akısının ve kanal hidrolik çapının artmasıyla akışın kararsızlığa eğilimli olduğu; tam tersi durumun yüksek kuruluk dereceleri için geçerli olduğu ifade edilmiştir.

Wang and Sefiane (2010), hidrolik çapı 727  $\mu\text{m}$ , kanal genişlik/yükseklik oranı 10 olan dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda akış kaynama sırasında oluşan basınç düşümü salınımlarını ve sıvı-buhar arayüzeyinin davranışını incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre, ısı akısı ve kütleli akının basınç düşüm salınım frekansı üzerinde etkisi olduğu bulunmuştur. Artan ısı akısının daha yüksek frekansta salınımlara neden olduğu; artan kütleli akının ise basınç düşüm salınım frekansını düşürdüğü görülmüştür.

Koşar et al. (2010), mikro iğne kanatçıklardan oluşan ısı alıcılarda kararsız kaynama koşullarında su ve R-123 soğutucu akışkanına ait basınç düşüm karakteristiklerini incelemiştir. Akış görüntüleri ve akış kaynama sırasında basınç sinyallerine ait hızlı Fourier dönüşüm (FFT) verileri kararsızlıkları açıklamak için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, kararsız kaynamanın başlamasıyla basınç sinyallerinde basamak atlama şeklinde bir değişim görülmüştür. Ayrıca, kararsız kaynamanın başlamasıyla birlikte R-123 akışkanına ait FFT profillerinde keskin bir yükselme meydana gelirken suya ait FFT profillerinde önemli bir değişim görülmemiştir. Kaynamanın başlamasıyla birlikte akış desenleri ile yüzey sıcaklıkları periyodik bir davranış göstermiştir. R-123 verilerinde görülen yüksek frekanslı salınımların hızlı kabarcık büyüme kararsızlıkları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Suyu ait verilerde ise periyodik akış deseni oluşumunun daha düşük frekansa sahip olduğu; bu durumun giriş sıkıştırılabilir hacim kararsızlığına işaret ettiği belirtilmiştir.

Balasubramanian et al. (2010), paralel ve diyagonal kesimli kanatçıklardan oluşan mikrokanallı ısı alıcılarda akış kaynama basınç düşümü karakteristiklerini ve kararsızlıkları incelemiştir. Kaynamalı akış basınç düşüm karakteristiklerinin her iki tip mikrorokanallı ısı alıcıda benzer eğilime sahip olmasına rağmen sabit ısı akısı ve kütleli akı değerinde diyagonal kesimli kanatçıklara sahip mikrokanallı ısı alıcıda basınç düşümünün yaklaşık %10 daha fazla olduğu görülmüştür. Bir diğer çalışmada, Balasubramanian et al. (2011) düz ve genişleyen mikrokanallarda su kullanarak akış

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

kaynama basınç düşümünü incelemişlerdir. Düz mikrokanalların genişliği 300 µm derinliği 1200 µm olup, genişleyen mikrokanallar düz mikrokanallarda belli yerlerdeki kanatçıkların kaldırılmasıyla elde edilmiştir. Deneylerde su giriş sıcaklığı 90°C olup kütleli akı 100-133 kg/m<sup>2</sup>s aralığındadır. Yüzey ısı akısı 140 W/cm<sup>2</sup>'ye kadar değiştirilmiştir. Deneylerde, basınç düşümünün hem tek fazlı hem de iki fazlı akış bölgesinde ısı akısıyla doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Aynı ısı akısı değerinde artan kütleli akıyla basınç düşüşünde gözle görülür bir azalma meydana gelmiştir. Genişleyen mikrokanallar iki fazlı akışta, belli bir ısı akısı değeri için artan kütleli akıyla beraber daha az basınç kaybına neden olmuştur. Aynı ısı akısı değeri için genişleyen mikrokanallarda önemli ölçüde düşük basınç düşüm değerleri elde edilmiştir. Aynı çalışma şartlarında genişleyen mikrokanallarda düz mikrokanallara göre basınç kayıplarının yaklaşık %30 azaldığı belirtilmiştir.

Chen and Garimella (2011), 100 µm genişliğinde, 389 µm derinliğinde 60 paralel mikrokanaldan oluşan bir ısı alıcıda FC-77 dielektrik akışkanı kullanarak akış kaynama basınç düşümünü araştırmışlardır. Deneyler, 20-80 ml/dk arasında yer alan beş farklı akış debisinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, debi değerine bağlı olarak 30,5-62,3 W/cm<sup>2</sup> ısı akısı aralığında akış kararsızlıkları oluşmaya başlamıştır. Basınç düşüm ölçümleri, akışkanın ivmelenme ve sürtünme terimleri arasındaki denge dolayısıyla akış kaynama basınç düşümünün artan ısı akısı ile doğrusal olarak arttığını; akış debisine ise kritik ısı akısı koşullarının oluşmasına kadar çok az bağlılık gösterdiğini ortaya koymuştur.

Park et al. (2012) hidrolik çapları 61 ve 278 µm olan dikdörtgen kesitli mikrokanallarda FC-72 dielektrik akışkanına ait akış kaynama basınç düşüm karakteristiklerini incelemişlerdir. Kütleli akı 188-1539 kg/m<sup>2</sup>s aralığında iken ısı akısı aralığı 0,6-45,1 kW/m<sup>2</sup>'dir. Deneysel veriler, basınç düşümünün artan buhar kuruluk derecesi ve kütleli akı ile yükseldiğini göstermiştir. Aynı kütleli akı ve buhar kuruluk derecesinde basınç düşümünün ısı akısından bağımsız olduğu görülmüştür. Bu durum, toplam basınç düşümünün büyük bir kısmının sürtünmeden kaynaklandığının bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Fu et al. (2013) tabanında yapay oyukların oluşturulduğu genişleyen bir mikrokanalda etanol-su karışımının akış kaynama basınç düşümünü incelemişlerdir.

Deneysel sonuçlar, tek fazlı ve kaynamalı iki fazlı basınç düşümünün mol kesrine önemli derecede bağlı olduğunu göstermiştir. Belli bir duvar kızdırma farkında, iki fazlı basınç düşümünün karışımın mol kesrinin 0,1 değerinde maksimum olduğu görülmüştür. Bu durum, daha yüksek ısı akılarının Marangoni etkisi oluşturmasıyla açıklanmıştır. Tek fazlı taşınımında, artan duvar kızdırma farkı ile sıvı viskozitesinin azalmasından dolayı basınç düşümünün azaldığı, kaynamalı akışta ise duvar kızdırma farkı ile basınç düşümünün hızla arttığı ifade edilmiştir.

Balasubramanian et al. (2013) çoklu mikrokanallarda akış kaynama kararsızlıklarını deneysel olarak incelemiştir. Deneysel sonuçlar, basınç düşüm çalkantı genliklerinin yüksek olduğu anlarda ısı transfer katsayısının azaldığını göstermiştir. Akış rejimlerinin kararsızlıkları etkilediği, en kararlı akış kaynama prosesinin halkasal akış rejiminde elde edildiği belirtilmiştir.

Wang et al. (2014), hidrolik çapları 571, 762, 1454  $\mu\text{m}$  olan mikrokanallarda FC-72 akışkanı ile akış kaynama sırasında oluşan iki fazlı basınç düşüm salınımlarını incelemiştir. Isı akısı 0-18,31  $\text{kW/m}^2$  aralığında iken çalışılan kütle akı değerleri 11,2, 22,4 ve 44,8  $\text{kg/m}^2\text{s}$ 'dir. Deneylede gözlemlenen basınç salınımları düşük frekanslı yüksek genlikli salınımlar ve yüksek frekanslı düşük genlikli salınımlar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Düşük kütle akılarda, düşük frekanslı yüksek genlikli salınımların başlıca salınım modu olduğu; bu durumun periyodik ters akış ve tekrar ısılatan akış oluşumuna neden olduğu belirtilmiştir. Düşük frekanslı yüksek genlikli basınç çalkantılarının artan ısı akısı ile arttığı, artan kütle akısı ile ise büyük ölçüde bastırıldığı görülmüştür. Kanal içindeki buhar tıkaçlarının yüksek frekanslı düşük genlikli salınımlara neden olduğu; ısı akısının bu salınımlar üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu; kütle akının ise bu tip salınımlar üzerinde kayda değer etkisi olduğu belirtilmiştir. Yüksek kütle akı değerlerinde, yüksek frekanslı düşük genlikli salınımların başlıca çalkalanma modu olduğu görülmüştür. Kanal hidrolik çapı azaldıkça basınç düşüm verilerinin kaotik bir durum aldığı; FFT çözümlerine göre küçük boyutlu mikrokanallarda düşük frekanslı basınç salınımların ısı akısına daha duyarlı olduğu görülmüştür. Ortalama basınç düşümünün artan  $q/G$  oranı (ısı akısı/kütle akı) ile arttığı belirtilmiştir.

Mahmoud et al. (2014), dikey yerleştirilmiş mikro tüplerde R-134a soğutucu akışkanının akış kaynama basınç düşümü karakteristiklerini incelemiştir. Isı akısı, kütle akı ve sistem basınç değerleri sırasıyla 1-140 kW/m<sup>2</sup>, 200-500 kg/m<sup>2</sup>s ve 6-10 bar aralığındadır. Deneysel sonuçlar, toplam iki fazlı basınç düşümünün artan kütle akı ve kuruluk derecesi ile arttığını, artan sistem basıncı ve mikro tüp çapı ile azaldığını göstermiştir. Ayrıca, ısıtılan test bölümü uzunluğunun basınç düşümü üzerinde önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir. Isıtılan test bölümü uzunluğu arttıkça birim uzunluk başına ölçülen basınç düşümünün arttığı görülmüştür. Toplam iki fazlı basınç düşümünün sürtünme, yerçekimi ve ivmelenme olmak üzere üç bileşenden oluştuğu, sürtünme basınç düşümü bileşeninin toplam basınç düşümü üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu ve azalan hidrolik çapla birlikte söz konusu bileşenin büyüklüğünün arttığı ifade edilmiştir.

Kalani and Kandlikar (2014), açık mikrokanallar üzerine yerleştirdikleri manifold ile oluşturdukları konik mikrokanallı geometrilerde akış kaynama basınç düşümünü incelemiştir. Mikrokanalların giriş yüksekliği 127 µm iken çıkış yüksekliği konik manifold sayesinde 127-727 µm arasında değiştirilmiştir. Deneysel olarak su kullanılmış olup akışkan debisi 80 ml/dk'dır. Basınç düşümü uniform mikrokanallarda 150 kPa iken konik yapıya sahip manifold içeren mikrokanallarda 60 kPa ölçülmüştür. En düşük basınç düşümü manifold yüksekliği 727 µm olan mikrokanalda elde edilmiştir. Konik manifoldlu mikrokanal kullanımıyla basınç düşümünde meydana gelen azalmanın nedeni, artan kesit alanıyla beraber kanal boyunca üretilen buhar fazının mikrokanalların üst tarafında konik olarak genişleyen manifoldda yer almasıyla açıklanmıştır.

Yang et al. (2014), 220 µm genişliğinde, 250 µm derinliğindeki mikrokanallardan oluşan bir silikon ısı alıcının yüzeylerini 20 nm çaplı 5 µm uzunluğunda silikon nano teller ile kaplayarak akış kaynamada halkasal akış karakteristiklerini incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre, silikon nano tel kullanımının düz kanallara göre basınç düşümünü %48 azalttığı görülmüştür. Basınç düşümündeki azalmanın, silikon nano tel kullanımı ile halkasal akış rejiminde sıvı ve buhar fazlarının birbirinden ayrılması ve sıvı-buhar ara yüzeyinin daha düzgün hale gelmesi sonucu sıvı damlacık sürüklenmesinin azalmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Miner et al. (2014), akış yönünde genişleyen çoklu mikrokanallarda akış kaynama basınç düşüm özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Kanalların genişleme açısı 0-2° arasında değişmektedir. Deneyler R-134a soğutucu akışkanı ile gerçekleştirilmiş olup, kütleli debi ve ısı akısı aralıkları sırasıyla 2-4 g/s ve 0-5 W/mm<sup>2</sup>'dir. Deneysel sonuçlara göre, mikrokanal genişleme açısı arttıkça basınç düşümünün azaldığı; basınç eğrilerinin kanal kesitindeki genişlemeyle beraber nonlineer olarak değiştiği görülmüştür. Artan genişleme oranlarının basınçtaki dalgalanmaları azalttığı görülmüştür. 1° genişleme açısına sahip kanalın diğer kanallara göre daha fazla basınç kararsızlığına yol açtığı görülmüştür. Bunun için herhangi bir neden belirtilmemiştir. Fakat düz kanala göre genişleyen kanallarda basınç dalgalanmalarında azalma görülmüştür. Yazarlar, genişleyen kanal kullanımıyla basınç düşümü karakteristiklerinin ısı akısına olan bağlılığının düz kanallara göre azaldığını belirtmişlerdir. Kanal boyunca olan genişlemenin ısı akısının basınç düşümü üzerindeki olumsuz etkilerini azaltarak daha yüksek ısı transfer oranlarının nispeten daha düşük basınç düşüm değerlerinde elde edilmesini sağladığı sonucuna varılmıştır.

Deng et al. (2015a) dikdörtgen ve  $\Omega$  kesitli mikrokanallarda su ve etanol ile yaptığı deneylerde akış kaynama karakteristiklerini incelemişlerdir. Dikdörtgen kesitli mikrokanalların hidrolik çapı 776  $\mu\text{m}$  iken  $\Omega$  kesitli mikrokanalların hidrolik çapı 781  $\mu\text{m}$ 'dir. Deneylerde kütleli akı değerleri 200-300 kg/m<sup>2</sup>s aralığındadır. Deneysel sonuçlar,  $\Omega$  kesitli mikrokanallarda, dikdörtgen kesitli mikrokanallara göre iki fazlı basınç düşümünde su için %40 azalma etanol için %70 azalma meydana geldiğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca,  $\Omega$  kesitli mikrokanallarda giriş basınç ve sıcaklık dalgalanmalarının bastırıldığı, iki fazlı kararsızlıkların azaldığı görülmüştür. Deng et al. (2015b) bir diğer çalışmalarında,  $\Omega$  şekilli kesite sahip mikrokanalların yüzeylerinde bakır tozların sinterlenmesiyle gözenekli bir yapı oluşturmuşlar ve çalışma parametrelerinin kaynamalı akış karakteristiklerine olan etkilerini incelemişlerdir.  $\Omega$  kesitli gözenekli mikrokanallarda doymuş akış kaynama bölgesinde iki fazlı basınç düşümünün artan buhar kuruluk derecesi ve ısı akısı ile arttığı tespit edilmiştir. Giriş aşırı soğutma derecesindeki azalmayla basınç düşümü artmıştır. Orta ısı akısı ve yüksek giriş aşırı soğutma değerlerinde şiddetli iki fazlı akış kararsızlıkları gözlemlenirken, giriş aşırı soğutma değerinin düşmesiyle kararlı bir kaynama prosesi elde edildiği belirtilmiştir. Üçüncü çalışmalarında ise Deng et al. (2015c)  $\Omega$  kesitli gözenekli mikrokanallarda ısı

akısı, kütleli akı ve hidrolik çapın suyun akış kaynamasına olan etkisini araştırmışlardır. Deneylede kullanılan mikrokanalların hidrolik çapları sırasıyla 671, 786, 871  $\mu\text{m}$  olup, kütleli akı değerleri 160-300  $\text{kg/m}^2\text{s}$  aralığındadır. Hidrolik çap azaldıkça giriş basıncındaki salınımların keskin bir şekilde arttığı görülmüştür. Hidrolik çap azaldıkça, kabarcığın büyüeyebileceği alanın azalması ve sınırlanma etkilerinin güçlü hale gelmesi sonucu kabarcığın kanal giriş ve çıkışına doğru uzaması ve akış desenleri arasında hızlı geçişin bu duruma yol açtığı ifade edilmiştir.

Law and Lee (2015) düz mikrokanallarda ve oblik kanatçıklardan oluşan mikrokanallarda FC-72 akışkanına ait akış kaynama basınç düşümü karakteristiklerini karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, oblik kanatçıklı mikrokanallardaki basınç düşümünün düz mikrokanallara kıyasla maksimum ısı akısında 1,7 kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu artışın muhtemelen oblik kanatçıklı yapıda akış yönünün aniden değişmesi ve akışkanın ikincil akış pasajlarına yönlendirilmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Buna rağmen, oblik kanatçıklı mikrokanallarda basınç düşümü salınımlarının daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, oblik kanatçıklardaki keskin köşelerin büyük kabarcıkların sürekli olarak bölünmesini sağlayarak kabarcıkların mikrokanal içinde hapsedilme ihtimalinin minimize edilmesiyle açıklanmıştır.

Buchling and Kandlikar (2016) akış sirkülasyonunun yerçekimi etkisiyle sağlandığı konik yapılı manifold içeren açık mikrokanallarda etanolün akış kaynama karakteristiklerini incelemiştir. Deneyle, 200×200  $\mu\text{m}^2$  ve 200×400  $\mu\text{m}^2$  giriş kesit alanına sahip iki farklı mikrokanallı çipte gerçekleştirilmiş olup çalışılan debi aralığı 20-80 ml/dk'dır. Manifoldun koniklik açısı arttıkça basınç geri kazanımının arttığı, buna bağlı olarak basınç düşümünün azaldığı görülmüştür. En düşük basınç düşümü %6 koniklik açısında kritik ısı akısı koşullarında 8,8 kPa olarak ölçülmüştür. Akış görüntülerinde, kabarcık çekirdeklenmesi oluşur oluşmaz kabarcıkların yüzeyden ayrılarak konik manifold tarafından sağlanan boşluğa doğru büyüdüğü görülmüştür. Kabarcıkların manifoldda doğru büyümesi, mikrokanal yüzeyinin sürekli olarak sıvı tarafından kaplanmasını sağlamaktadır. Böylelikle, buharlaşma devam ederken kabarcıklar da büyümeye devam etmektedir. Bu durum ısı transferinde iyileşme sağlamakla birlikte basınç kayıplarının azalmasına neden olmaktadır.

Jafari et al. (2016), farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip mikro evaporatörlerde R-134a soğutucu akışkanının akış kaynama basınç düşümü karakteristiklerini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça mikrokanallardaki toplam basınç düşümünün arttığı görülmüştür. Basınç düşümü ısı akısı ile doğrusal artış göstermesine karşın basınç sensörlerinin ölçüm hassasiyeti dikkate alındığında farklı yüzey pürüzlülük değerleri için basınç düşümünde kayda değer bir farklılık olmadığı ifade edilmiştir. Literatürle uyumlu olarak, basınç düşümünün artan kütleli akı ile arttığı belirtilmiştir.

Markal et al. (2016b) hidrolik çapı 150 µm olan 29 adet kare mikrokanaldan oluşan bir silikon ısı alıcıda su ile yaptıkları akış kaynama deneylerinde toplam basınç düşümünün ısı akısıyla beraber artarken sabit bir ısı akısı değeri için artan kütleli akısıyla beraber azaldığını gözlemlemişlerdir. Bir başka çalışmada Markal et al (2018), toplam basınç düşümünün azalan hidrolik çap ile arttığını gözlemlemişlerdir. Bu durum, kabarcık sınırlanma etkileri ve kabarcıkların kanal boyunca ileri-geri yönlü uzamasının hidrolik çap azaldıkça baskın hale gelmesinin göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Zhu et al. (2017b) 1 ve 2 mm iç çaplı yatay minikanallarda yaptığı R-32 soğutucu akışkanına ait akış kaynama deneylerinde basınç düşümünün ilk olarak kuruluk derecesi ile arttığını, devamında ise azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, azalan kanal çapı veya doyma sıcaklığı ile basınç düşümü azalırken artan kütleli akı veya ısı akısı ile basınç düşümünün azaldığını belirtmişlerdir.

Li and Hrnjak (2019b) ise 0,643 mm çaplı bir mikro tüpte R-1234ze(E) soğutucu akışkanı ile yaptıkları akış kaynama deneylerinde basınç gradyeninin buhar kuruluk derecesi ve kütleli akı ile arttığını; doyma basıncı ile azaldığını tespit etmişlerdir. R-134a soğutucu akışkanına ait verilerle karşılaştırıldığında basınç gradyeninin R-1234ze(E) soğutucu akışkanında biraz daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Dang et al. (2020) HFE-7000 soğutucu akışkanı kullanarak sürekli ve parçalı mikrokanallardaki akış kaynama karakteristiklerini karşılaştırmışlardır. Deneylerde genel olarak, sürtünme basınç düşümü bileşeninin ilk olarak artan ısı akısı ile arttığı; devamında artış hızının azaldığı; hatta yüksek ısı akısı değerlerinde ise düşme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Parçalı mikrokanallarda, yerel kuruma oluşumundan önce sürtünme

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

basınç düşümünün azaldığı görülmüştür. Sürtünme basınç düşümü salınımlarının sürekli mikrokanallarla karşılaştırıldığında, özellikle kabarcıklı ve tıkaç akış rejimlerinde olmak üzere parçalı mikrokanallarda daha küçük olduğu görülmüştür. Ayrıca, yüksek kütleli akılarda basınç salınımlarının azaldığı belirtilmiştir.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Mikrokanallı ısı alıcı üretim teknikleri

Mikrokanallar, mikroelektronik, MEMS, kimyasal ve biyolojik cihazlar gibi mikro ve nano akışkan uygulamalarının yaygın olduğu sistemlerin temel bileşenlerinden biridir. Temel olarak, üretilecek parçaların malzemesine, boyutsal üretim hassasiyetine, yüzey yapısına, istenen mekanik ve termal özelliklerine bağlı olarak çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Diğer yandan, mikro ölçekli üretimlerde istenen hassasiyet ve kaliteye ulaşabilmek için konvansiyonel üretim tekniklerinde birtakım değişiklikler yapmak gerekir. Çünkü çoğu üretim metodunda aynı prosesi kullanarak hem makro hem de mikro ölçekte istenen özelliklerde ürün elde etmek mümkün değildir (Kockman 2013).

Bu tez çalışması kapsamında, mikrokanallı ısı alıcı imalatında önemli olan temel husus pürüzlülüğünün kontrollü bir şekilde elde edilmesidir. Bunun için ilk olarak farklı mikro üretim metotları ile mikrokanallı ısı alıcı numuneleri ürettirilmiştir. Daha sonra, üretilen mikrokanalların boyut ve pürüzlülükle ilgili karakterizasyonu YÜTAM'da bulunan Bruker marka Contour GTK 3D optik profilometre ve Carl Zeiss marka optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Nihai üretim prosesine karar verirken şu kriterler göz önüne alınmıştır:

- Boyutsal hassasiyetin yüksek olması, her bir mikrokanal için aynı üretim toleransının yakalanabilmesi.
- Mikrokanal yan yüzeylerinin mümkün olduğunca dik olması, yani dikdörtgen kesitli bir profil elde edilebilmesi.
- Mikrokanal köşelerinin mümkün olduğunca keskin olması, köşelerde radyüs olmaması.
- Üretim prosesine bağlı olarak oluşacak pürüzlülük değerinin kontrol edilebilmesi ve farklı boyutlardaki mikrokanallar için benzer pürüzlülük değerlerinin elde edilebilmesi.

- Mikrokanal taban yüzeyinde homojen bir yüzey yapısının (pürüzlülüğün) elde edilebilmesi.

Yukarıda verilen kriterlerin hepsini sağlayan bir üretim prosesi geliştirmek oldukça zor, zaman alıcı ve yüksek maliyetlidir. Bu çalışma kapsamında, litografi, tel erozyon, dalma erozyon, mikrofrezleme, nanosaniye lazerle işleme, seçici lazerli ergitme yöntemleriyle mikrokanallı ısı alıcı imalat denemeleri yapılmıştır. Aşağıda bu yöntemlerden kısaca bahsedilmiştir.

**Litografi:** Litografi, mikrokanal üretiminde yaygın olarak kullanılan başlıca üretim metotlarından biridir. Litografi temelde, bir maske üzerindeki geometrik desenin fotorezist adı verilen ışığa duyarlı bir polimer malzeme ile kaplanmış silikon gibi yarı iletken bir alttaş üzerine aktarılması işlemidir. Uygulamada farklı tipte litografi yöntemleri bulunmakla birlikte mikrokanal üretiminde yaygın olanı fotolitografi yöntemidir.

1950’li yıllarda çok küçük ve karmaşık devre elemanlarına sahip tümleşik devrelerin silikon alttaş üzerine desenlenmesi ile başlayan fotolitografi uygulamaları modern yarı iletken üretim teknolojisinin başlıca üretim yöntemi olmayı günümüzde de sürdürmektedir. Fotolitografik bir üretim prosesi temel olarak, alttaş hazırlama/temizleme, oksidasyon, fotorezist döndürmeli kaplama, ön pişirme, maske hizalama, ultra-viole ışınlarına maruz bırakma, geliştirme, ard pişirme, fotorezisti çıkarma işlem adımlarından oluşur (Madou 2011). Fotolitografi ile alttaş üzerine aktarılan geometrik desen eklemeli (örneğin biriktirme ve lift-off işlemi) veya çıkarmalı (örneğin aşındırma işlemi) mikro üretim işlemine tabi tutularak istenen ölçü ve biçimde nihai ürün elde edilmiş olur. Fotolitografi yöntemi hakkında daha detaylı bilgiler muhtelif kaynaklarda bulunabilir (Campell 2008; Mack 2008; Madou 2011; Lutge 2016).

**Aşındırma:** Aşındırma prosesi, yaygın olarak kullanılan çıkarmalı mikro üretim yöntemlerindedir. Aşındırma, bir alttaş üzerindeki malzemenin kimyasal veya fiziksel yollarla uzaklaştırılması ile istenen yapının elde edilmesidir. Islak ve kuru olmak üzere aşındırma prosesi iki kategoriye ayrılabilir. Kimyasal aşındırma olarak ta bilinen ıslak aşındırma prosesinde, yüzey üzerinden malzeme kaldırma işlemi potasyum hidroksit,

tetra metil amonyum hidroksit gibi kimyasal aşındırıcı sıvı solüsyonlar ile gerçekleştirilir. Literatürde uygulamaya bağlı olarak kimyasal aşındırma için birçok reçete bulmak mümkündür (Anonymous 2003). Fiziksel aşındırma olarak da bilinen kuru aşındırma yönteminde malzeme kaldırma işlemi plazma halindeki muhtelif gazların yüzey üzerine bombardıman yapılmasıyla elde edilir. Her iki yöntemde izotropik ve anizotropik biçimde aşındırma yapmak mümkündür. İzotropik aşındırmada, aşındırma hızı yönden bağımsız olup bütün yönlerde aynı oranda malzeme kaldırma işlemi gerçekleşir. Bu yöntemle yuvarlak profile sahip şekiller elde edilir. Islak anizotropik aşındırma işleminde, malzemenin kristal düzlemlerine bağlı olarak farklı yönlerde farklı aşındırma hızları elde edilir. Bu metotla, üçgen ve trapez kesitli şekiller elde edilebilir. İzotropik ve ıslak anizotropik aşındırma teknikleri ile birbirine paralel olmayan yan yüzeyler elde edilirken kuru anizotropik aşındırma temelli yöntemler ile birbirine paralel dik yüzeyler elde etmek çoğu malzeme için mümkündür. Günümüzde ticari olarak mikro üretiminde en çok kullanılan, aynı zamanda Bosch aşındırma olarak bilinen, dik yan yüzeyler elde edilmesini sağlayan kuru anizotropik yöntemi derin tepkili iyon aşındırma yöntemidir (Laermer and Schlip 1996). Bu yöntemle, en/boy oranı oldukça yüksek (~30:1) dik yan duvarlara sahip kanallar elde etmek mümkündür (Wasilik and Chen 2004). Aşındırma ile mikro üretim tekniği hakkında detaylı bilgiler çeşitli kaynaklarda bulunabilir (Campell 2008; Mack 2008; Madou 2011; Lutge 2016).

Genel olarak ıslak aşındırmanın kimyasallarla iyi reaksiyona giren metal malzemeler için uygun olduğu, kuru aşındırmanın ise düşük reaktif enerji gereksiniminden dolayı cam ve polimer bazlı malzemelerde daha uygun olduğu söylenebilir (Madou 2011).

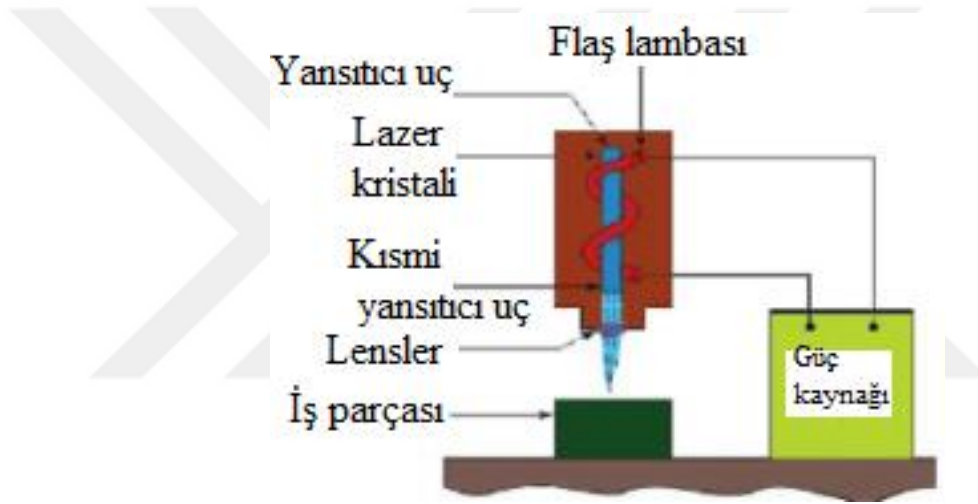
**Mikro mekanik işleme:** Silikon gibi yarı iletken malzemeli mikro cihazların ve mikro sistemlerin üretiminde genellikle litografi ve aşındırma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tip üretim metotlarında, litografi temelli yöntemlerle altaşa iki boyutlu desen aktarımı yapılır ve takiben aşındırma yöntemleriyle geometrik desene derinlik kazandırıldığından bu yöntemler temelde düzlemsel 2,5 boyutlu üretim teknikleri olarak değerlendirilir. Dolayısıyla bu yöntemlerle elde edilen yapılar genellikle bütünlük olup, serbest şekilli gerçek üç boyutlu sistemler değildir. Ayrıca, bu yöntemlerle mikron altı çok küçük boyutlu yapılar elde etmek mümkün olmasına rağmen

bağıl üretim hassasiyeti 0,1-0,01 mertebesindedir (Madou 2011). Bu değer, bağıl üretim hassasiyetin 0,0001 ve altı olduğu hassas mekanik üretim tekniklerine göre oldukça yüksek bir değerdir. Günümüzde elektronikten tıpa, avionik sistemlerden termal uygulamalara kadar her alanda kullanımı hızla artan minyatürleştirilmiş sistemlerin 0,001-0,00001 mertebesinde bağıl üretim hassasiyeti gerektirdiği düşünülürse litografi temelli metotların bazı uygulamalarda yetersiz kaldığı görülmektedir (Madou 2011).

Temelde mekanik imalat yöntemlerini, frezeleme, tornalama, delme ve taşlama olarak dört sınıfa ayırabiliriz. Bu yöntemlere ait mikro işleme teknolojisindeki makineler geleneksel makro boyuttaki mekanik işlemede kullanılan makinelerin küçültülmüş versiyonu olarak düşünülebilir. Ancak makro boyuttaki mekanik işleme ile mikro boyuttaki mekanik işleme yöntemleri talaş oluşumu, kesme kuvvetleri, takım geometrisi, titreşim, proses kararlılığı gibi konularda temel farklılıklara sahiptir (Liu et al. 2004). Diğer bir deyişle, boyutsal büyüklüğe bağlı olarak üretim prosesinin temel mekanizması ve prosesi etkileyen parametrelerdeki farklılıklar mekanik imalat yöntemlerinin farklı ölçeklerde sınıflandırılmasını gerektirmiştir. Mikro mekanik işleme, yarı iletken üretim yöntemlerine göre, alüminyum, çelik, pirinç, bakır, polimer gibi çok farklı malzemelerden imalata izin vermesine karşın, işleme sürecini etkileyen parametreler ve üretim sırasında karşılaşılan problemler ve çözümlerine yönelik çalışmalar diğer mikro üretim yöntemlerine göre oldukça azdır (Madou 2011).

**Lazerli mikro üretim:** İlk olarak 1970'li yıllarda üretim teknolojisinde uygulanmaya başlanan lazerli işleme günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Neredeyse bütün malzemeler için uygun olması, karmaşık mikro yapıların kalıp veya maske gerektirmeden direkt üretilebilmesi, işleme süresinin kısa ve ekonomik olması, seri üretime uygunluğu lazer tabanlı üretim tekniklerinin yaygınlaşmasında önemli rol oynamıştır. Temel kullanım alanları olarak; ısıtma işlemi, kaynak, metal, plastik, yarı iletken, seramik gibi malzemelerin kesilmesi, malzeme biriktirme veya kaldırma, lazer destekli kimyasal aşındırma, litografi, ameliyat, foto polimerleştirme gibi uygulamalar sayılabilir (Madou 2011). Bu örneklerden de anlaşılacağı gibi lazerli üretim hem eklemeli hem de çıkarmalı üretim yöntemi olarak uygulanabilir. Bu kısımda, çıkarmalı üretim yöntemi olarak lazerli işleme üzerinde durulacaktır.

Lazer ile uzaklaştırma yöntemi, yüksek enerjili lazer ışın demetinin iş parçası üzerine odaklanması ve bu ışın demetini oluşturan fotonların iş parçası tarafından emilmesi sonucu ısınan bölgenin buharlaşması veya süblimleşmesi ile malzeme kaldırma işlemidir. Dolayısıyla, bu yöntemde malzeme kaldırma işlemi, litografi, aşındırma ve mikro mekanik işlemeden farklı olarak ısıl enerji etkisiyle gerçekleşmektedir. Şekil 3.1’de örnek bir lazerli işleme düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Bir lazer ünitesinin başlıca elemanları, ışın demetinin oluşturulduğu, gaz, sıvı veya katı halde olabilen, aktif ortam, ışın yayılımını tetiklemek için lazer ortamına gerekli enerjiyi sağlayan güç kaynağı, ışın karakteristiklerinin belirleyen optik düzen ve oyuk sayılabilir (Madou 2011).



Şekil 3.1. Lazerli işleme prosesi (Madou 2011).

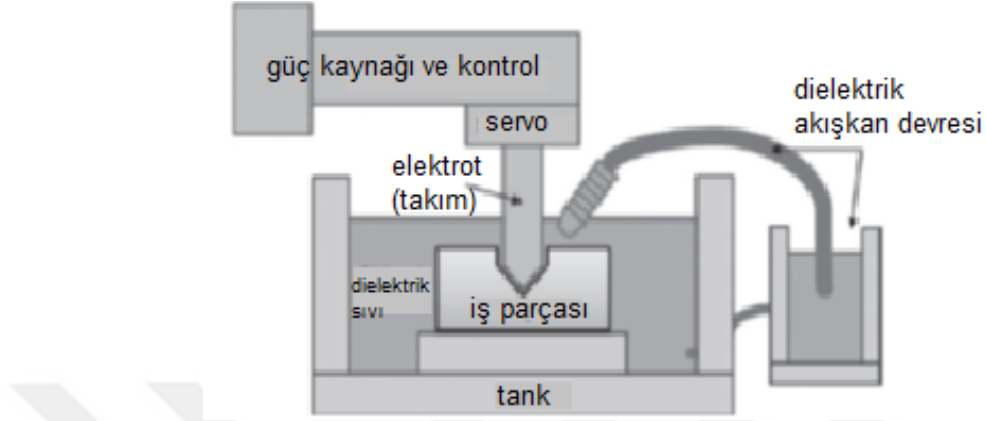
Endüstride ilk lazer uygulamaları metal kesme ve kaynakla birleştirme şeklinde makro ölçekli işlemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Lazer ışın demetinin yüzeyden malzeme kaldırma işlemiyle ilgili öncü çalışmalardan biri IBM’de yapılmıştır. Srinivasan and Mayne-Banton (1982), 193 nm dalga boylu darbeli ArF eksimer lazer kullanarak bir çeşit organik polimer olan polietilen tereftalat filminin yüzeyinden kontrollü bir şekilde herhangi bir farklı işleme gerek kalmadan mikron mertebesinde malzeme kaldırmayı başarmışlardır. Takip eden yıllarda, lazerli işleme prosesi üzerine yapılan temel çalışmalarla birlikte günümüzde dalga boyu 157 nm’den (UV lazerler) 10 µm’ye (IR lazerler) ve darbe aralığı mikrosaniyeden femtosaniyelere kadar değişen lazerlerle işleme yapmak mümkün hale gelmiştir (Prakash and Kumar 2015).

**Seçici lazer sinterleme/ergitme:** Seçici lazer sinterleme/ergitme yöntemleri, temelde hızlı prototipleme ihtiyacını karşılamak için geliştirilen eklemeli üretim yöntemlerindedir. 1990'lı yıllarda hızlı prototipleme yöntemlerindeki gelişmelerle birlikte bu yöntemler nihai, fonksiyonel parçaların üretiminde de kullanılmaya başlanmıştır (Duman ve Kayacan 2017). 1989 yılında Dr. Carl Deckard tarafından geliştirilen ve patenti alınan Seçici Lazer Sinterleme işlemi, esas olarak, toz halindeki malzemelerin yüksek enerjili lazerler ile ısıtılması sonucu birbiriyle birleşmesi esasına dayanan katmalı üretim tekniğidir. Bu yöntemde, çelik, titanyum, kalay, krom, poliamid, seramik malzemeler, elastomerler, polikarbonatlar gibi çok çeşitli malzemeler işlenebilir.

Seçici lazer sinterleme ile aynı konseptte sahip, direk metal lazer sinterleme veya seçici lazerli ergitme yönteminde ise toz malzemelerin birleşmesi için lazerle sinterleme yerine tamamen ergitme yapılır. Bu yöntem, 1990'lı yılların ikinci yarısında F&S Streolithographietechnik GmbH firmasından Dr. M. Fockele ve Dr. D. Schwarze ve Fraunhofer ILT şirketinden Dr. W. Meiners, Dr. K. Wissenbach ve Dr. G. Andres tarafından metal parçaların üretilmesi için geliştirilmiştir. Seçici lazerli ergitme yöntemi ile ilgili kapsamlı bir literatür taraması Yap et al. (2015) tarafından yapılmıştır.

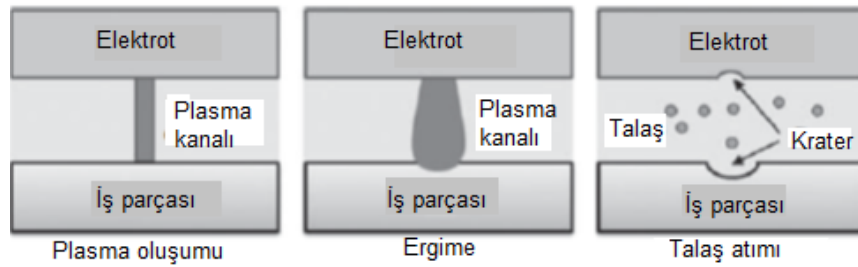
**Elektro erozyon işleme yöntemi:** Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin ilklerinden biri olan elektro erozyonla işleme yöntemi, dielektrik sıvı ortam içerisinde elektrot ve elektriksel olarak iletken iş parçası arasında oluşturulan kontrollü, yüksek frekanslı kıvılcımlar sonucu açığa çıkan ısı enerjisi ile malzeme kaldırma işlemidir. Bir elektro erozyon tezgâhının şematik gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir. Temel olarak, güç kaynağı, servo kontrol sistemi, tank ve dielektrik sıvı ünitesinden oluşur (Markopoulos and Davim 2018). Güç kaynağı, iş parçası ve elektrot arasında yapılacak işleme uygun olarak gerilim oluşumunu sağlar ve tezgâhın giriş akımını düzenler. Servo kontrol ünitesi, elektrotların hareketini kontrol eder. İş parçası ve elektrot arasında istenen özelliklerde kıvılcım oluşumu için işlem süresince aradaki mesafenin korunmasını sağlayacak şekilde elektrot beslemesinin yapılmasını sağlar. Tank, işlem sırasında dielektrik sıvı ile takım elektroduna ev sahipliği yapar. Çalışma sırasında, iş parçası tankın içinde bulunan tablaya sabitlenir. Dielektrik sıvı ünitesi, dielektrik akışkanın sistemde dolaşımını sağlar. Ayrıca, işleme sırasında oluşan talaşları filtreleme görevini yapar. Dielektrik sıvı elektrik arkının oluşmasını ve dar bir alanda yoğunlaşmasını sağlar. Normal şartlarda yalıtkan olan

dielektrik sıvı, elektrot ile iş parçası arasındaki yoğun elektriksel alandan dolayı iletken hale gelerek kıvılcım oluşumu için ortam oluşturur. Dielektrik akışkan ayrıca soğutucu olarakta görev yapar.



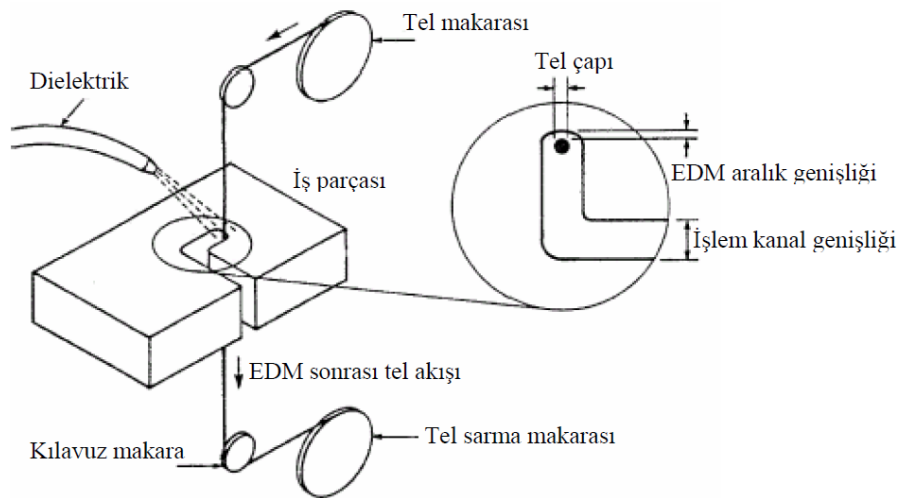
Şekil 3.2. Elektro erozyonla işleme prosesinin şematik gösterimi (Markopoulos and Davim 2018).

Elektro erozyonla işleme prosesinde ısıl enerji ile malzeme kaldırma gerçekleşir. Isı, elektrot ve iş parçası arasındaki elektrik akımıyla bir kıvılcım şeklinde oluşturulur. Elektrot ve iş parçasında, kıvılcımın olduğu ve sonlandığı en yakın bölgedeki malzeme ısının etkisiyle ergitilir ve buharlaştırılarak iş parçasından uzaklaştırılır. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, dielektrik sıvının içinde kıvılcım oluştuğunda, ilk olarak, elektriksel yükler tarafından taşınan enerjinin transfer edildiği bir plazma hattı oluşur. Daha sonra, plazma hattının etkilediği alan boyunca sıcaklıkta yükselme meydana gelir. Yüksek sıcaklık, hem iş parçasının hem de elektrotun kısmî olarak ergimesine yol açar. Sonuçta, iş parçasında küçük oyuklar oluşturacak şekilde malzeme yüzeyden kaldırılır ve oluşan talaşlar dielektrik akışkan sirkülasyonu ile işlem bölgesinden uzaklaştırılır. Mikro saniye mertebelerinde meydana gelen bu işlemler tekrar ederek iş parçası üzerinde takım elektrotu şeklinin negatifi oluşturulur (Markopoulos and Davim 2018).



Şekil 3.3. Elektro erozyon işlemi sırasında plazma kanalının farklı durumları (Markopoulos and Davim 2018).

Üretimde yaygın olarak kullanılan iki tip elektro erozyonla işleme yöntemi vardır. Bunlar, dalma elektro erozyonla işleme ve tel elektro erozyonla işleme yöntemleridir. İki yöntemde de elektriksel erozyon ile malzeme kaldırma gerçekleşmesine rağmen çalışma şekli ve kullanım yerleri açısından farklılar vardır. Dalma elektro erozyonla işleme yöntemi ilk geliştirilen yöntem olup geleneksel elektro erozyonla işleme yöntemi olarak ta bilinir. Tel elektro erozyonla işleme yöntemi, 1960-1970'li yıllarda, dalma elektro erozyonda kullanılan elektrotların daha az işçilik gerektiren ve maliyeti düşük elektrotlarla değiştirilmesine yönelik çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır (Markopoulos and Davim 2018). Tel elektro erozyonla işleme yönteminde, genellikle bakır, molibden, tungsten gibi elektriksel iletkenliği yüksek olan malzemeden imal edilmiş çapı 0.05-0.4 mm arasında değişen teller elektrot olarak kullanılır. Şekil 3.4'de örnek bir tel elektro erozyonla işleme sisteminde gösterildiği gibi bir makaradan belli bir hızda beslenen tel, iş parçası boyunca hareket eder. İşleme sırasında uygulanan voltaja bağlı olarak, dielektrik sıvı içerisinde bulunan elektrotla iş parçası arasında oluşan kıvılcımlar sonucu malzeme kaldırma işlemi gerçekleşir (Çaydaş ve Haşçalık). Tel elektro erozyonla işleme yönteminde, dalma elektro erozyondaki gibi takım, elektrot şeklinin iş parçasına izdüşümü söz konusu değildir. Dalma elektro erozyon yöntemi ile üç boyutlu karmaşık şekilli geometrilerin imalatı ve kör deliklerin açılması mümkündür. Tel elektro erozyonla işleme yönteminde ise iş parçasının tüm kesiti boyunca olan profillerin oluşturulması için uygundur (Kocabaş 2013).



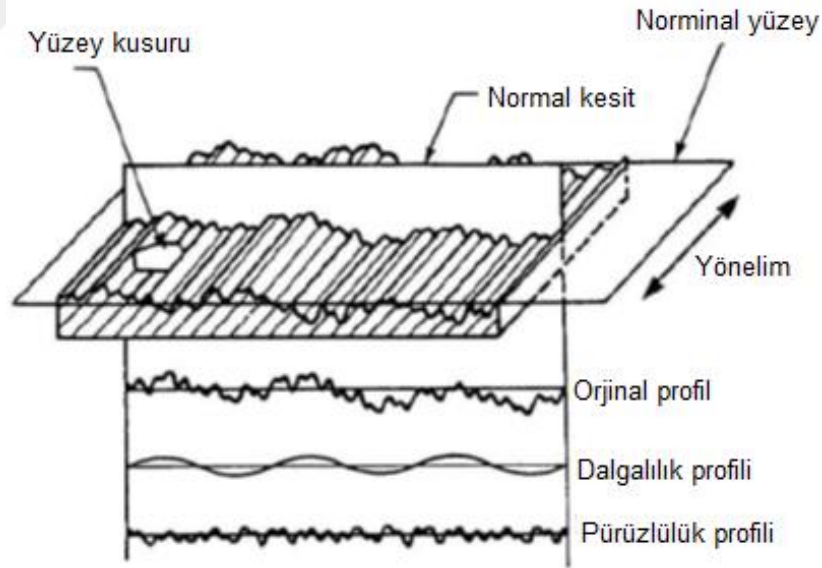
Şekil 3.4. Tel elektro erozyonla işleme yöntemi şematik gösterimi (Kocabaş 2013).

Literatürde, elektro erozyonla işleme yönteminin üretim performansını etkileyen parametrelerle ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu parametreler genel olarak,

elektriksel parametreler, kıvılcım oluşum karakteristikleri, dielektrik akışkan özellikleri, iş parçasının ve takım elektrodunun termofiziksel özellikleri olarak sınıflandırılabilir (Dursun 2007). Detaylı çalışmalar ilgili kaynaklarda (Tosun 2001; Ho and Newman 2003; Çaydaş ve Hasçalık 2004; Mahendran et al. 2010; Kocabaş 2013; Choudhary and Jadoun 2014; Banu and Ali 2016) bulunabilir.

### 3.1.2. Yüzey karakteristikleri

Yüzey yapısı veya tekstürü, nominal yüzeyden olan tekrarlayan ve rastlantısal sapmalar sonucu yüzeyin sahip olduğu üç boyutlu topografya olarak tanımlanabilir. Nominal veya ideal yüzey tasarlanan yüzey biçimi olup boyutları teknik resimde ölçülerle gösterilen yüzeylerdir. Gerçek yüzeyler ise, malzemenin sınırlarını içerirler ve yüzey yapısı hakkında bilgi verirler (Inamdar, 2006). Yüzey yapısındaki sapmaları karakterize eden başlıca fiziksel parametreler, pürüzlülük (nano ve mikro pürüzlülük), dalgalılık (makro pürüzlülük), yönelim (desen yönü) ve hata olarak sıralanabilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Yüzey yapısı karakteristikleri (Bhushan 2001).

Farklı tipteki sapmalar birbirinden dalga boyu ile ayrılır. Pürüzlülük yüzeydeki kısa dalga boylu mikro/nano ölçekli dalgalanmaları gösterir. Yüzey üzerinde farklı büyüklük ve aralıklarla bulunan yükseltiler ve vadiler pürüzlülüğe ait temel karakteristik yapılarıdır. Dalgalılık ise daha uzun dalga boylu yüzey düzensizlikleri olup makro pürüzlülük olarak ta adlandırılır. Makine veya iş parçasındaki bir hata, titreşimler, ısı

işlem, çarpılma gibi etkenlerden kaynaklanabilir. Yönelim, üretim prosesine özgü baskın yüzey deseninin yönünü ifade eder. Hatalar, yüzeydeki istenmeyen, beklenmedik yapılardır. Bunların haricinde, yüzeyde normalden çok büyük dalga boylu sapmaların olduğu form hataları da görülebilir (Bhushan, 2001).

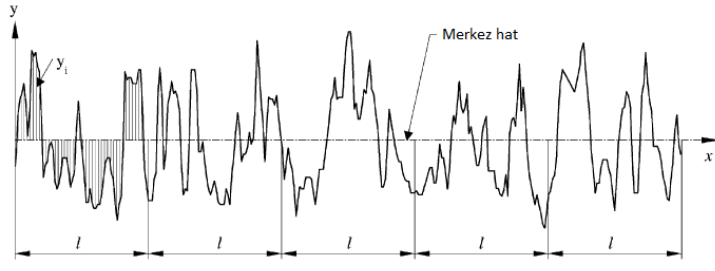
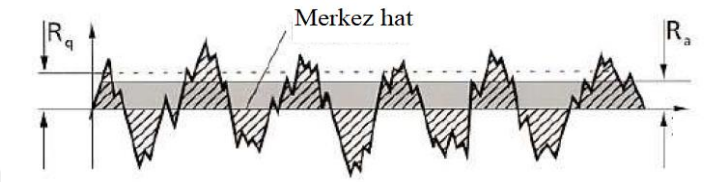
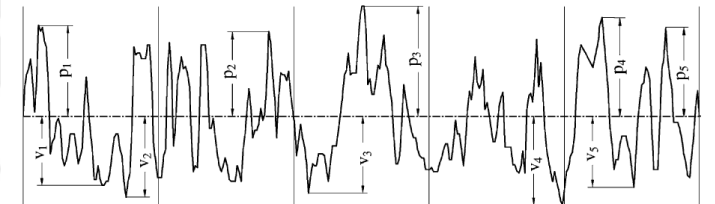

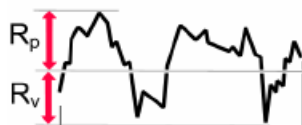

Gerçek yüzeyler çok karmaşık olduğundan yüzeyin özelliklerini tanımlayan çok çeşitli pürüzlülük parametresi vardır. Uygulamaya bağlı olarak bazı parametreler önem kazanabilir. Karakterizasyonda kullanılan pürüzlülük parametre sayısı arttıkça yüzey hakkında daha fazla bilgi edinilmiş olunur. Yüzey pürüzlülük parametreleri genlik parametreleri, uzaklık parametreleri ve hibrit parametreler olmak üzere genel olarak üç kategoride incelenebilir (Gadelmawla vd. 2002). Genlik parametreleri, yüzeyin düşey yöndeki yüzey sapmalarını tanımlarken uzaklık parametreleri ise yatay yöndeki sapmaları tanımlar. Hibrit parametreler ise, genlik ve uzaklık parametrelerinin birleşimi olup triboloji gibi farklı mühendislik uygulamalarında yüzeyi karakterize etmede kullanılır. Gadelmawla et al. (2002), literatürde kullanılan pürüzlülük parametrelerini ayrıntılı bir şekilde tanımlamıştır. Çizelge 3.1’de, önemli pürüzlülük parametreleri özetlenmiştir.

### 3.1.3. Mikrokanallı ısı alıcıların boyutları

Deneylerde kullanılan mikrokanallı ısı alıcılar, 12 mm genişliğinde, 30 mm uzunluğunda ve 2,3 mm kalınlığındadır. Isı alıcılar üzerinde birden fazla mikrokanal bulunması, akış kaynama sırasında birbirine paralel çoklu kanalların kaynama karakteristiklerine ve akış biçimlerine etkisini inceleme olanağı vermiştir. Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, 30 mm uzunluğunda kanalların kullanımı akış kaynama sırasında farklı akış biçimlerinin oluşmasına olanak sağlayacaktır. Literatürde deneysel çalışmalarda kullanılan mikrokanal uzunluklarının genellikle 10-200 mm aralığında olduğu görülmektedir (Ribatski 2013). Isı alıcılar, üretim metodunun imkân verdiği ölçüde düşük kalınlıklı olarak üretilmiştir. 2,3 mm kalınlık kullanılmasının nedeni daha düşük kalınlık değerlerinde kanalların açılacağı malzemenin tezgâha bağlanmasındaki zorluklardan kaynaklanmaktadır. Mikrokanal genişliği için ise 300 µm alt sınır değeri seçilmiştir. Bunun nedeni, daha küçük genişlikteki kanallarda kabarcık gelişimini izlemedeki zorluklardan kaynaklanmaktadır (Jones 2010). Çizelge 3.1, deneylerde kullanılan mikrokanallı ısı alıcıların boyutlarını göstermektedir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

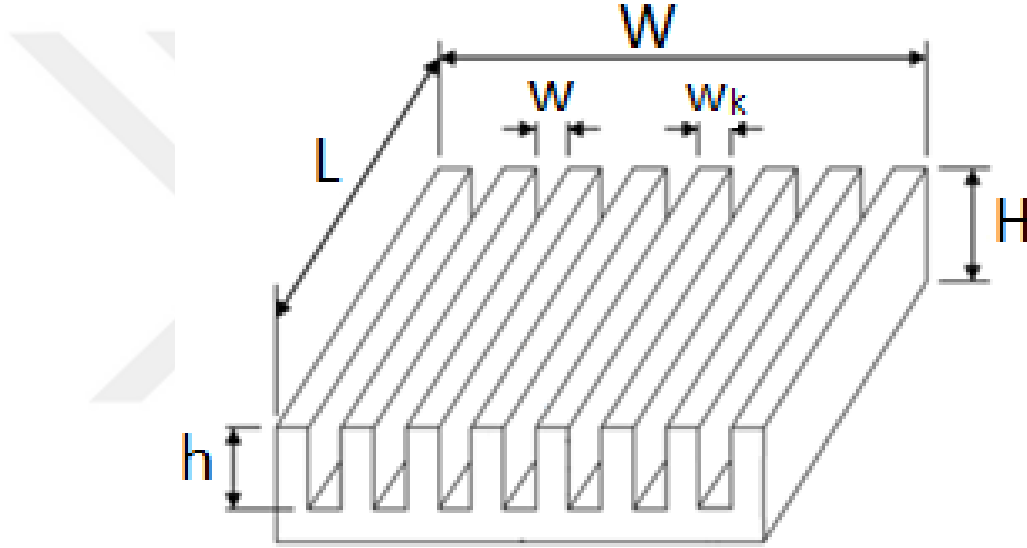
Çizelge 3.1. Yüzey parametreleri.

Parametre	Tanım	Formül
Aritmetik ortalama yükseklik (Profil sapmalarının aritmetik ortalaması), $R_a$	 <p>Profil sapmalarının aritmetik ortalamasını belirtir. Merkez hat ortalaması (CLA) olarak da bilinir. En çok kullanılan parametredir.</p>	$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_i $
Profil sapmalarının kareler ortalamasının karekökü pürüzlülüğü, $R_q$	 <p>RMS olarak da bilinir. Yüzey yükseklik dağılımının standart sapmasını temsil eder.</p>	$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$
On nokta yüksekliği, $R_z$	 <p>ISO sistemine göre, profilin değerlendirme uzunluğu boyunca en yüksek beş tepenin ortalaması ve en düşük beş vadinin ortalaması arasındaki yükseklik farkı olarak tanımlanır. DIN sistemi, profilin değerlendirme uzunluğu boyunca en yüksek beş tepenin ve en düşük beş vadinin toplamının ortalaması olarak tanımlar.</p>	$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right)$ $R_{z(DIN)} = \frac{1}{2n} \left( \sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i \right)$
Maksimum tepe yüksekliği, $R_p$	Değerlendirme uzunluğu içinde profilin merkez hat çizgisinin üzerindeki maksimum yüksekliği olarak tanımlanır. 	$R_p$
Maksimum vadi yüksekliği, $R_v$	Değerlendirme uzunluğu içinde profilin merkez hat çizgisinin altındaki maksimum derinliği olarak tanımlanır. 	$R_v$
Maksimum profil yüksekliği, $R_t$	Profilin değerlendirme uzunluğu boyunca en yüksek ve en düşük vadi arasındaki dikey uzaklık olarak tanımlanır. 	$R_t = R_p + R_v$

### 3.1.4. Mikrokanalların yüzey pürüzlülüğü

Bu çalışmada kullanılan mikrokanallı ısı alıcılarda, üretim prosesi sonrası yüzeylerinde ortalama pürüzlülük değeri ( $R_a$ ) 1  $\mu\text{m}$ -3  $\mu\text{m}$  aralığında olacak şekilde random pürüzlülük elde edilmiştir. Mikrokanallı ısı alıcılar dört farklı yüzey pürüzlülük değerinde üretilmiştir. Üretim sırasında pürüzlülük parametresi olarak  $R_z$  kullanılmıştır. Örnekleme boyu içerisinde en yüksek 5 tepenin ve en derin 5 vadinin yüksekliklerinin ortalaması şeklinde tanımlanan  $R_z$ 'nin kullanılma nedeni üretimde kullanılan dalma erozyon makinesinin işleme parametrelerini belirlerken  $R_z$  değerini kullanmasıdır.

Çizelge 3.2. Deneysel olarak kullanılan mikrokanallı ısı alıcılarının ölçüleri.



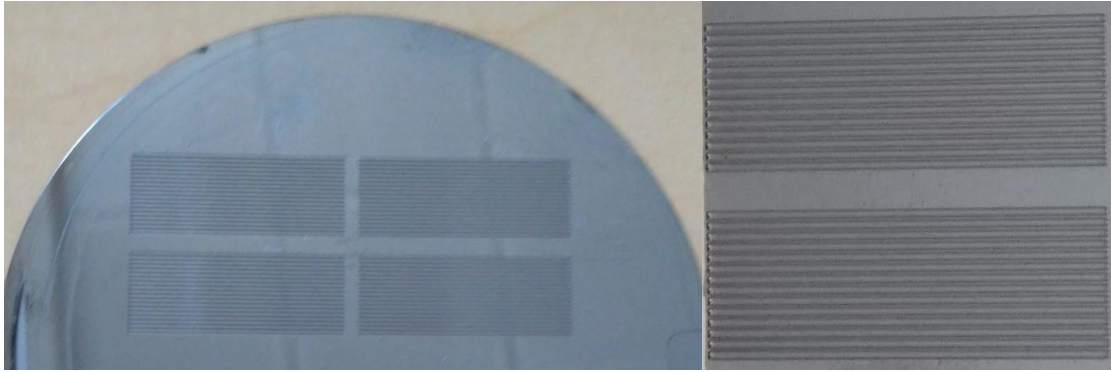
ÖLÇÜLER						
No	Isı alıcı genişliği, W (mm)	Isı alıcı uzunluğu, L (mm)	Isı alıcı kalınlığı, H (mm)	Mikrokanal genişliği, w ( $\mu\text{m}$ )	Mikrokanal yüksekliği, h ( $\mu\text{m}$ )	Hidrolik çap, $D_h$ ( $\mu\text{m}$ )
1	12	30	2,3	300	450	360
2	12	30	2,3	500	450	473
3	12	30	2,3	700	450	547

### 3.1.5. Mikrokanallı ısı alıcılarının karakterizasyonu

Üretilen mikrokanallı ısı alıcıların boyut ve yüzey karakterizasyonu Bruker marka Contour GTK 3D optik profilometre ve Carl Zeiss marka optik mikroskop yardımıyla yapılmıştır. Mikrokanal tabanındaki yüzey pürüzlülük değerleri optik profilometre ile ölçülmüştür. Her bir mikrokanalın başlangıç, orta ve son bölgelerinden olmak üzere üç

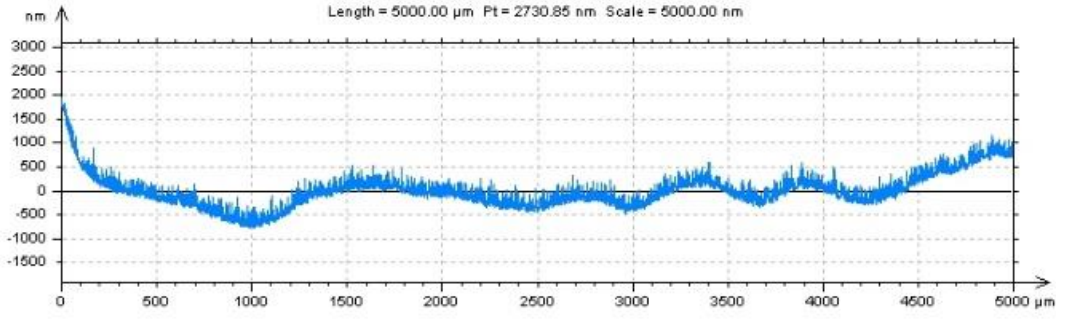
farklı noktasından yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmış olup, elde edilen değerlerin ortalaması mikrokanalın pürüzlülük değeri olarak belirlenmiştir. Bir ısı alıcısındaki bütün mikrokanalların yüzey pürüzlülük ölçüm değerlerinin ortalaması söz konusu ısı alıcının yüzey pürüzlülük değeri olarak alınmıştır. Mikrokanalların genişlik ve yükseklik ölçümleri optik mikroskopla karakterize edilmiştir. Optik mikroskopta ayrıca, mikrokanalların yan yüzeylerinin dikliği ve mikrokanal tabanındaki köşelerin yapısı kontrol edilmiştir.

Bu kısımda ilk olarak, Bölüm 3.1.1’de özetlenen üretim yöntemleri ile elde edilen mikrokanalların boyut ve yüzey karakterizasyonu sonuçları sunulmuştur. İlk olarak Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi’nde (SUNUM) Şekil 3.6’da gösterildiği gibi silikon alttaş üzerine fotolitografi yöntemiyle değişik boyutlarda mikrokanallar açılmıştır. Kanalların yüzey pürüzlülük ölçümleri KLA-TENSOR P6 profilometre ile yapılmıştır. Örnek yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları Şekil 3.7’de verilmiştir. Mikrokanalların ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin 0,1 mikronun altında olduğu görülmüştür. Oldukça pürüzsüz olan yüzeylerde pürüzlülük oluşturmak için Oxford PlasmaLab System 100 ICP 300 Deep RIE cihazında kuru aşındırma (etching) işlemi uygulanmıştır. Fiziksel aşındırma olarak da bilinen bu yöntemde malzeme kaldırma işlemi plazma halindeki muhtelif gazların yüzey üzerine bombardıman yapılmasıyla elde edilmektedir. Cihaz üzerinde, çalışma parametreleri olan gaz cinsi, debi, basınç sıcaklık, RF, aşındırma süresi değiştirilerek farklı aşındırma reçeteleri uygulanmıştır. Bu işlemler sonunda yüzey pürüzlülüğünde kayda değer bir değişim görülmemiştir.



Şekil 3.6. Fotolitografi yöntemiyle silikon üzerine açılan mikrokanallar.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
<b>Rp</b>	545.15	nm	Gaussian filter, 0.8 mm
<b>Rv</b>	297.15	nm	Gaussian filter, 0.8 mm
<b>Rz</b>	842.30	nm	Gaussian filter, 0.8 mm
<b>Rc</b>	280.75	nm	Gaussian filter, 0.8 mm
<b>Rt</b>	842.30	nm	Gaussian filter, 0.8 mm
<b>Ra</b>	96.67	nm	Gaussian filter, 0.8 mm
<b>Rq</b>	123.08	nm	Gaussian filter, 0.8 mm
<b>Rsk</b>	0.52		Gaussian filter, 0.8 mm
<b>Rku</b>	3.35		Gaussian filter, 0.8 mm
Material Ratio parameters - Roughness profile			
<b>Rmr</b>	100.00	%	c = 1000 nm under the highest peak, Gaussian filter, 0.8 mm
<b>Rdc</b>	199.43	nm	p = 20%, q = 80%, Gaussian filter, 0.8 mm

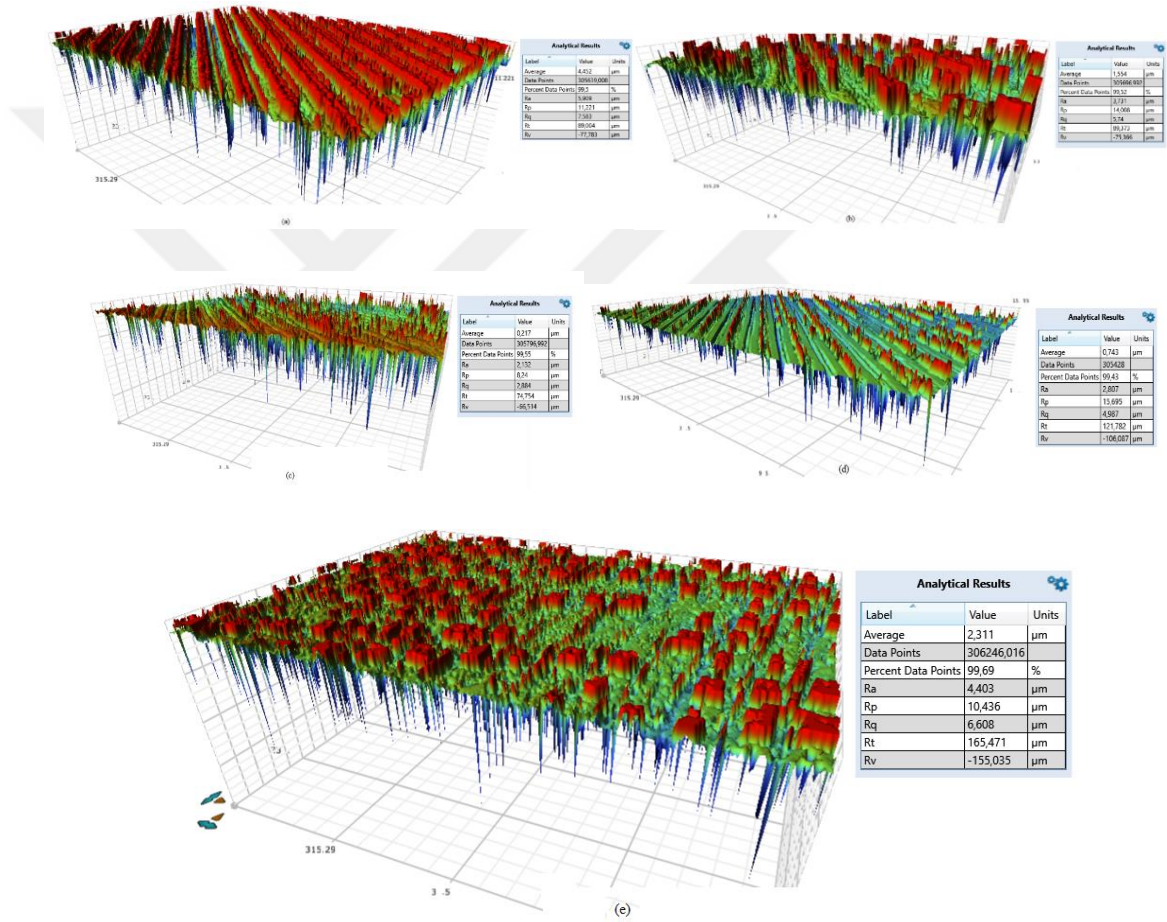
Şekil 3.7. Fotolitografi yöntemiyle oluşturulan mikrokanallara ait yüzey pürüzlülük ölçümü.

Bu yönteme alternatif olarak, ıslak aşındırma yöntemiyle pürüzlülük elde edilmeye çalışılmıştır. Kimyasal aşındırma olarak bilinen ıslak aşındırma prosesinde, yüzey üzerinden malzeme kaldırma işlemi potasyum hidroksit, tetra metil amonyum hidroksit gibi kimyasal aşındırıcı sıvı solüsyonlar ile gerçekleştirilir. Pürüzlendirme sağlamak için silikon mikrokanallar 70°C'deki saf su, amonyum hidroksit ve hidrojen peroksit karışımının 5:1:1 hacimsel oranındaki kimyasal çözeltisi içine atılmıştır. Bu yöntemde de istenen pürüzlülük değerleri elde edilememiştir. Bu yöntemin ayrıca dezavantajı kanalın bütün yüzeylerinden aşındırma yapmasıdır ki bu da kanal boyutlarının değişmesi anlamına gelmektedir. Bu yüzden, literatürde uygulamaya bağlı olarak kimyasal aşındırma için birçok reçete bulunmasına rağmen bu yöntemle daha fazla pürüzlendirme yapılmamıştır.

Fotolitografi ile üretilen silikon mikrokanalların pürüzlendirilmesi için kuru ve ıslak aşındırmadan başka farklı metotlar da denemiştir. İlk olarak, Conceptlaser marka 3D metal yazıcıda kanalların pürüzlendirme denemeleri yapılmıştır. Bunun için farklı lazer atım konfigürasyonuna bağlı olarak silikon alttaş üzerinde farklı yüzey

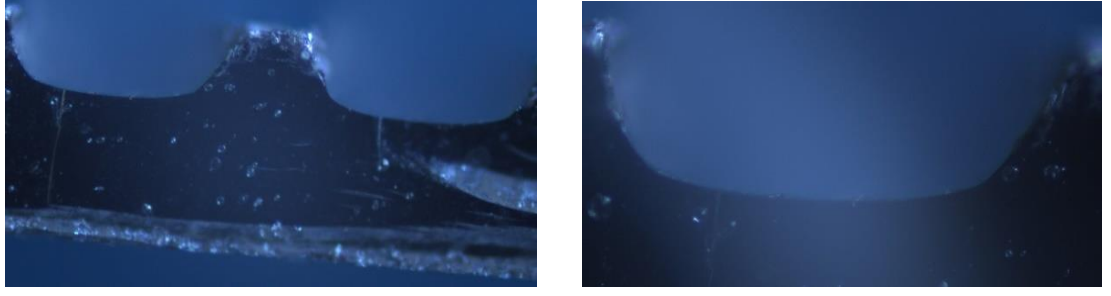
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

pürüzlülüklerinin oluşturulması hedeflenmiştir. Elde edilen pürüzlülük sonuçları Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bu yöntemde, 2-6 µm aralığında olacak şekilde yüzey pürüzlülük artışı sağlansa da Şekil 3.8’ den görüleceği gibi homojen olmayan bir yüzey yapısı elde edilmiştir. Homojen olmayan bir yüzey yapısı deneysel verileri etkileyip sonuçların yanlış olarak değerlendirilmesine yol açacağından bu yöntemle pürüzlendirme işleminden vazgeçilmiştir. Ayrıca, 3D yazıcıda parça sabitleme işlemi yapılamadığından kanalların üretilip sonradan sadece kanalların içine isabet edecek şekilde lazer gönderimi oldukça zor gözükmemektedir.



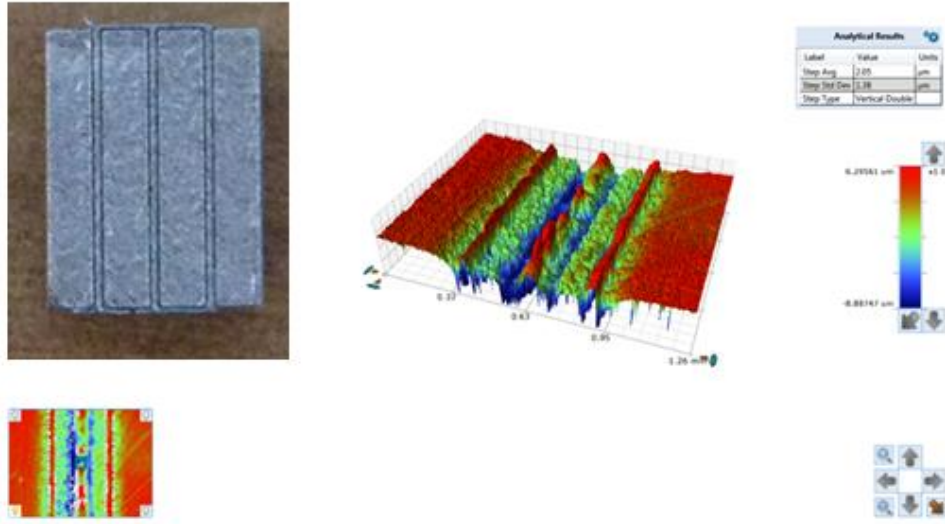
Şekil 3.8. 3D metal yazıcıda lazer atışlarıyla pürüzlülük oluşturma sonuçları.

Litografi yönteminin bir diğer dezavantajı, elde edilen kanalların dikdörtgen yerine trapez veya oval kesite sahip olmasıdır. Şekil 3.9’da kanalların optik mikroskop ile elde edilen kesit görüntüleri verilmiştir. Bu durum, kaynama karakteristiklerini etkileyeceğinden litografi ile mikrokanailli ısı alıcı üretimi bu çalışma için uygun gözükmemektedir.



Şekil 3.9. Fotolitografi ile üretilen silikon mikrokanalların optik mikroskopta alınan profil görüntüleri.

İstenen özelliklerde mikrokanallar elde etmek için kullanılan yöntemlerden biri de Seçici Lazerli Ergitme yöntemi olmuştur. Bu amaçla, ConceptLaser marka 3D metal yazıcıda, 0,3 mm genişliğinde ve 0,45 mm derinliğinde paslanmaz çelik malzemedan üç adet mikrokanal üretimi yapılmıştır. Toz çapı 25-100 mikron arasında değişmektedir. Elde edilen parça ve optik profilometre ölçümleri Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Optik profilometre görüntüleri incelendiğinde efektif bir kanal yapısının, özellikle de kanal derinliğinin oluşmadığı görülmektedir. Diğer yandan, tam olarak ergimeyen tozlar kanalın ortasında birikerek iki bölmeli bir kanal oluşumuna neden olmuştur. Kanal boyutlarının küçük olması bu tür sonuçlara yol açmış olabilir.

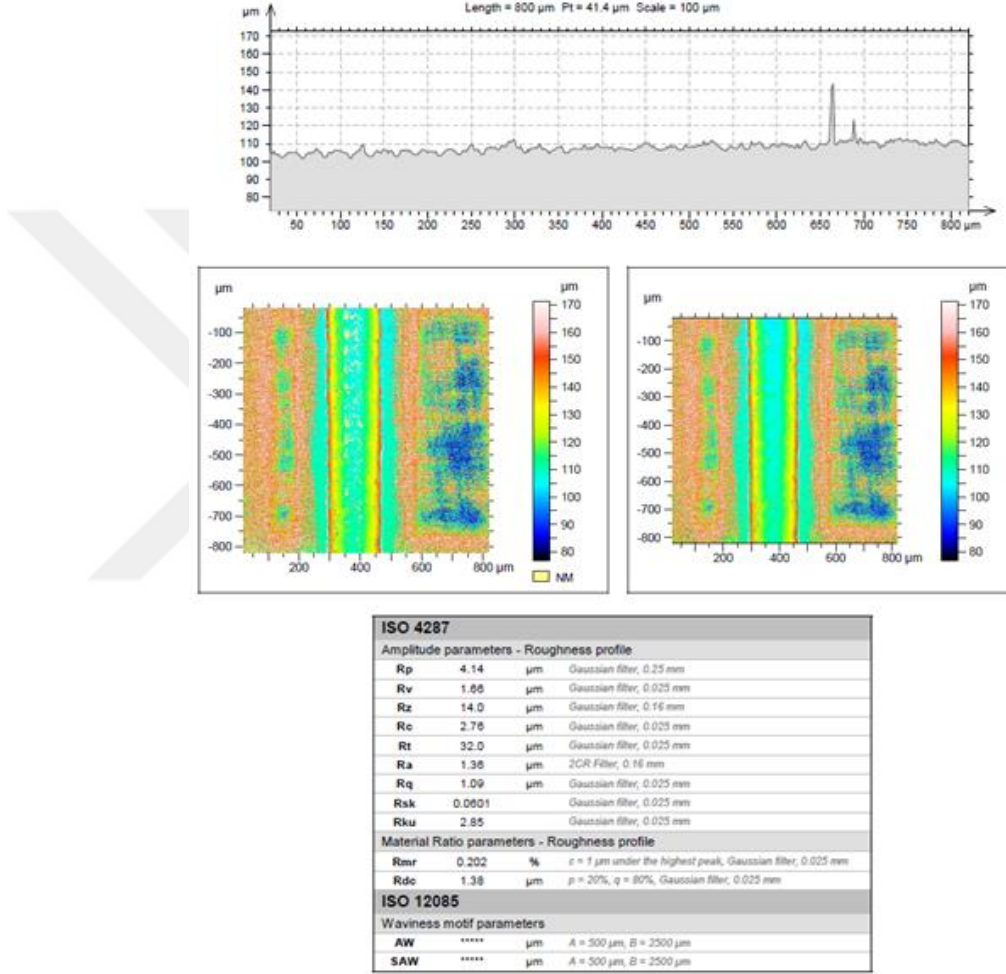


Şekil 3.10. Seçici lazer ergitme yöntemiyle elde edilen kanalların yapısı.

Mikrokanallı ısı alıcı üretim denemelerinde kullanılan yöntemlerden bir diğeri de mikro (ultra hassas) frezeleme yöntemi olmuştur. Maxima Mühendislik firmasında mikro CNC frezeleme makinesinde, farklı işleme parametreleriyle alüminyum malzeme üzerine

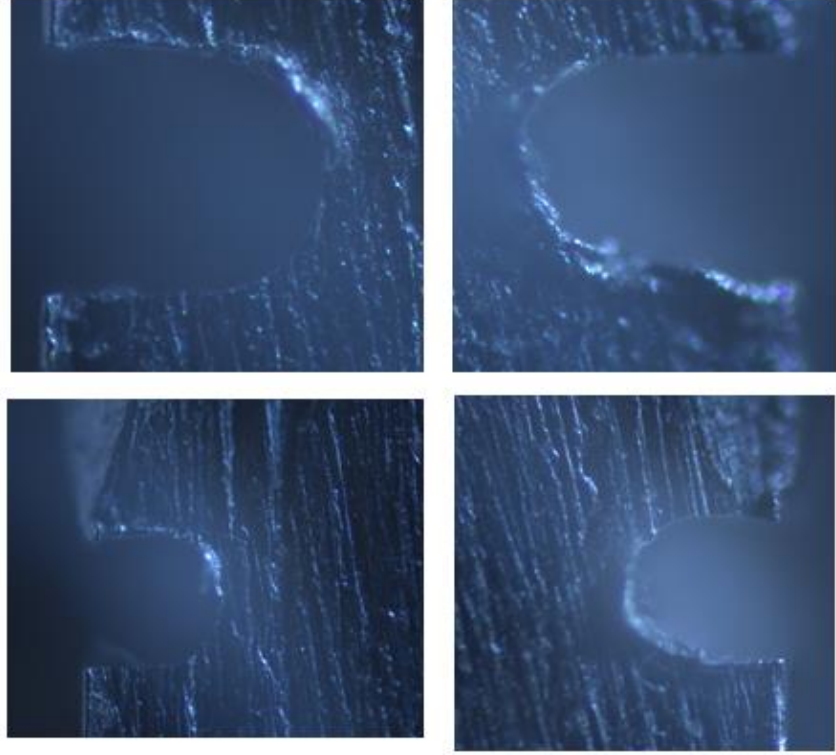
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

on adet mikrokanal açılmıştır. Böylelikle, işlem parametrelerini değiştirerek farklı yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Yüzey karakterizasyonu Nanofocus µsurf explorer cihazı ile yapılmıştır. Örnek bir yüzey ölçüm görüntüsü Şekil 3.11’de verilmiştir. Pürüzlülük ölçümleri sonucu üretilen mikrokanallardaki pürüzlülüğün 1 µm-7 µm aralığında olduğu görülmüştür. Ancak bazı kanallardaki ölçümlerde pürüzlülük değerlerinde 2 mikronu aşan farklılıklar olduğu görülmüştür.



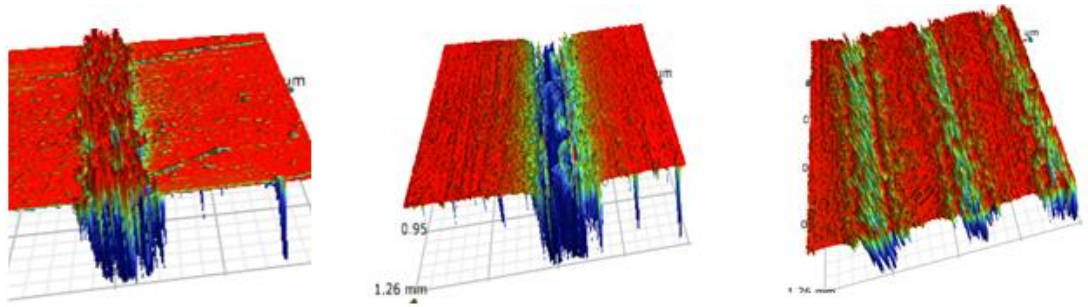
Şekil 3.11. Mikro frezeleme ile üretilen mikrokanallara ait örnek yüzey pürüzlülük ölçümü.

Diğer yandan, optik mikroskopla elde edilen kesit yapısı incelemelerinde ise Şekil 3.12’de gösterildiği gibi üretilen kanalların neredeyse yarı dairesel kesite sahip olup dikdörtgen yapıdan uzak olduğu görülmüştür. Ayrıca kanalların giriş ve çıkışlarında çapakların olduğu gözlenmiştir. Bu problemlerle birlikte, farklı boyutlardaki mikrokanallarda benzer yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesindeki zorluklar mikro mekanik işlemenin bu çalışma için uygun olmadığını göstermiştir.



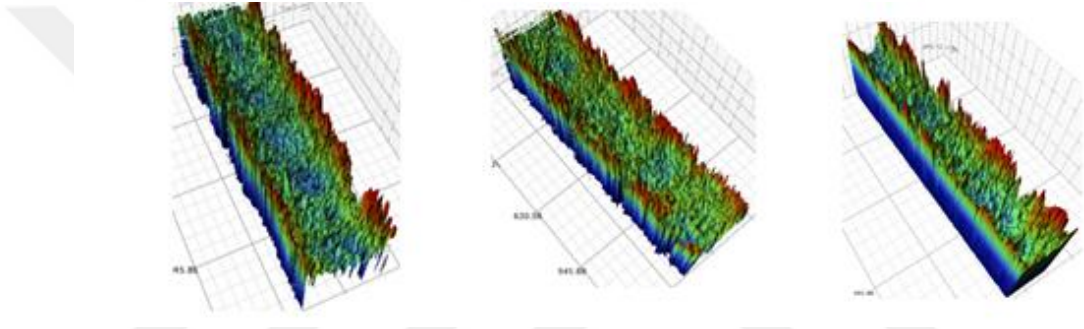
Şekil 3.12. Mikro frezeleme ile üretilen mikrokanalları kesit görüntüleri.

Mikrokanalların üretim yöntemleri ile literatür incelendiğinde mikro/nano/femto saniye lazerlerin bu amaçla kullanıldığını görülmektedir (Prakash and Kumar 2015). Bu çalışma kapsamında, bakır, alüminyum ve paslanmaz çelik malzemeler üzerine nanosaniye mertebelerinde atım yapabilen lazerlerle farklı çalışma parametreleriyle (lazer gücü, frekansı, ilerleme hızı) muhtelif ölçüde mikrokanal açma denemeleri yapılmıştır. Şekil 3.13'te kanalların optik profilometre ile alınmış görüntüleri verilmiştir. 3D metal yazıcı ile üretilen kanallardakine benzer problemlerle karşılaşmıştır. Optik profilometre görüntüleri incelendiğinde efektif bir kanal yapısının oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 3.13. Nano saniye mertebeli lazerlerle üretilen mikrokanalların optik profilometre görüntüleri.

Bu çalışmada, elektro erozyonla mikrokanal üretimi ilk olarak tel elektro erozyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14'te tel erozyonla elde edilen kanalların optik profilometre ile elde edilen yüzey yapısı gösterilmiştir. Bu yöntemde, daha önce bahsedilen yöntemlere nazaran homojen bir yüzey pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir. Ancak, pürüzlülüğün nispeten yüksek değerlerde (5-12  $\mu\text{m}$ ) olduğu görülmüştür. Bu durum, seçilen işleme parametrelerinden kaynaklanmış olabilir. Çünkü literatürde çok daha düşük pürüzlülük değerinin elde edildiği tel erozyon çalışmaları mevcuttur (Jones and Garimella 2009; Jafari et al. 2016). Kanal yan yüzeylerinin dik olduğu, ancak taban yüzeyiyle yan yüzeylerin birleşim köşelerinin yuvarlatılmış olduğu görülmüştür. Tel elektrotun belli bir çapa sahip olması köşelerde radyüs oluşmasına neden olmuştur. Benzer durum Jafari et al. (2016) tarafından da rapor edilmiştir.

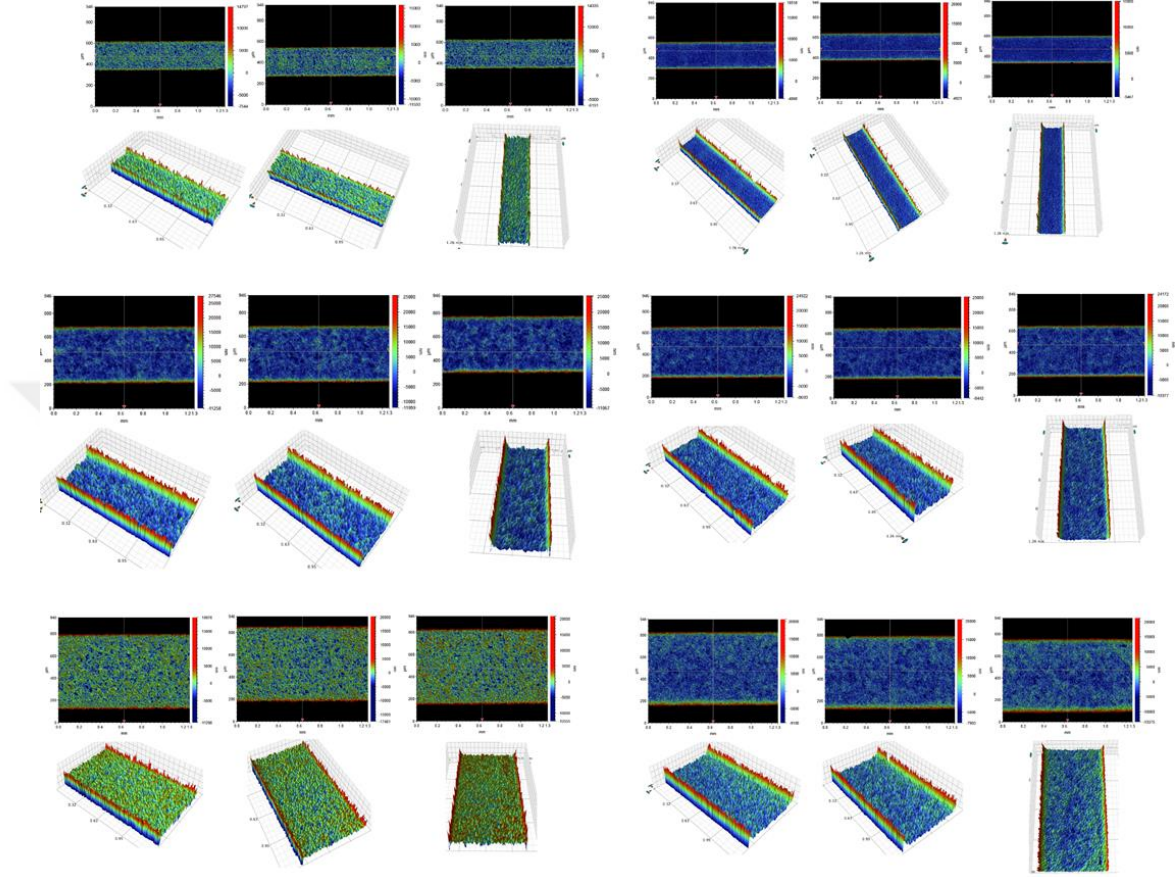


Şekil 3.14. Tel erozyon yöntemiyle üretilen mikrokannallara ait örnek optik profilometre görüntüleri.

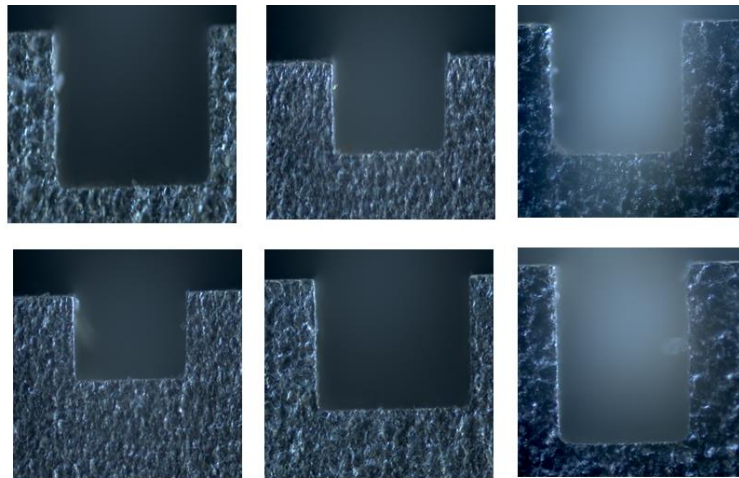
Tel elektro erozyonla üretilen mikrokannallar, homojen yüzey yapısına sahip olması ve kanal yan yüzeylerinin dik olması açısından üstünlüklere sahiptir. Ancak, yüzeylerin birleşme yerlerinin radyüslü olması tel çapından dolayı kaçınılmazdır. Tel elektro erozyon yönteminin diğer yöntemlere nazaran daha iyi sonuçlar vermesi endüstride tel erozyon kadar yaygın olmasa da özellikle kalıp üretiminde tercih edilen, keskin köşelerin elde edilebileceği bir diğer elektro erozyon yöntemi olan dalma elektro erozyon ile mikrokanal üretimini ön plana çıkarmıştır. Bu amaçla, Ankara'da bulunan Hasemek firmasına, ilk olarak deneme amaçlı farklı ölçülerde ve yüzey pürüzlülük değerlerine 20 adet mikrokanal ürettirilmiştir. Üretilen mikrokannalların boyut ve yüzey karakterizasyonu optik profilometre ve optik mikroskop ile yapılmıştır. Şekil 3.15'te görüldüğü gibi üretilen mikrokannalların homojen bir pürüzlülüğe sahiptir. Yüzey pürüzlülük değerleri 0.75  $\mu\text{m}$ -3  $\mu\text{m}$  aralığında olduğu görülmüştür. Aynı boyuttaki kanallarda farklı yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda, farklı boyutlardaki kanallarda benzer yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.16'da

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

kanalların optik mikroskoptan alınmış kesit görüntüleri verilmiştir. Kanalların dikdörtgen bir profile sahip olduğu, köşelerde yok denecek kadar bir radyüs olduğu görülmüştür. Diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırdığımızda en iyi profil bu metotla elde edilmiştir.



Şekil 3.15. Dalma erozyonla üretilen mikrokanalların örnek optik profilometre görüntüleri.



Şekil 3.16. Dalma erozyon yöntemiyle üretilen mikrokanalların örnek kesit görüntüleri.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

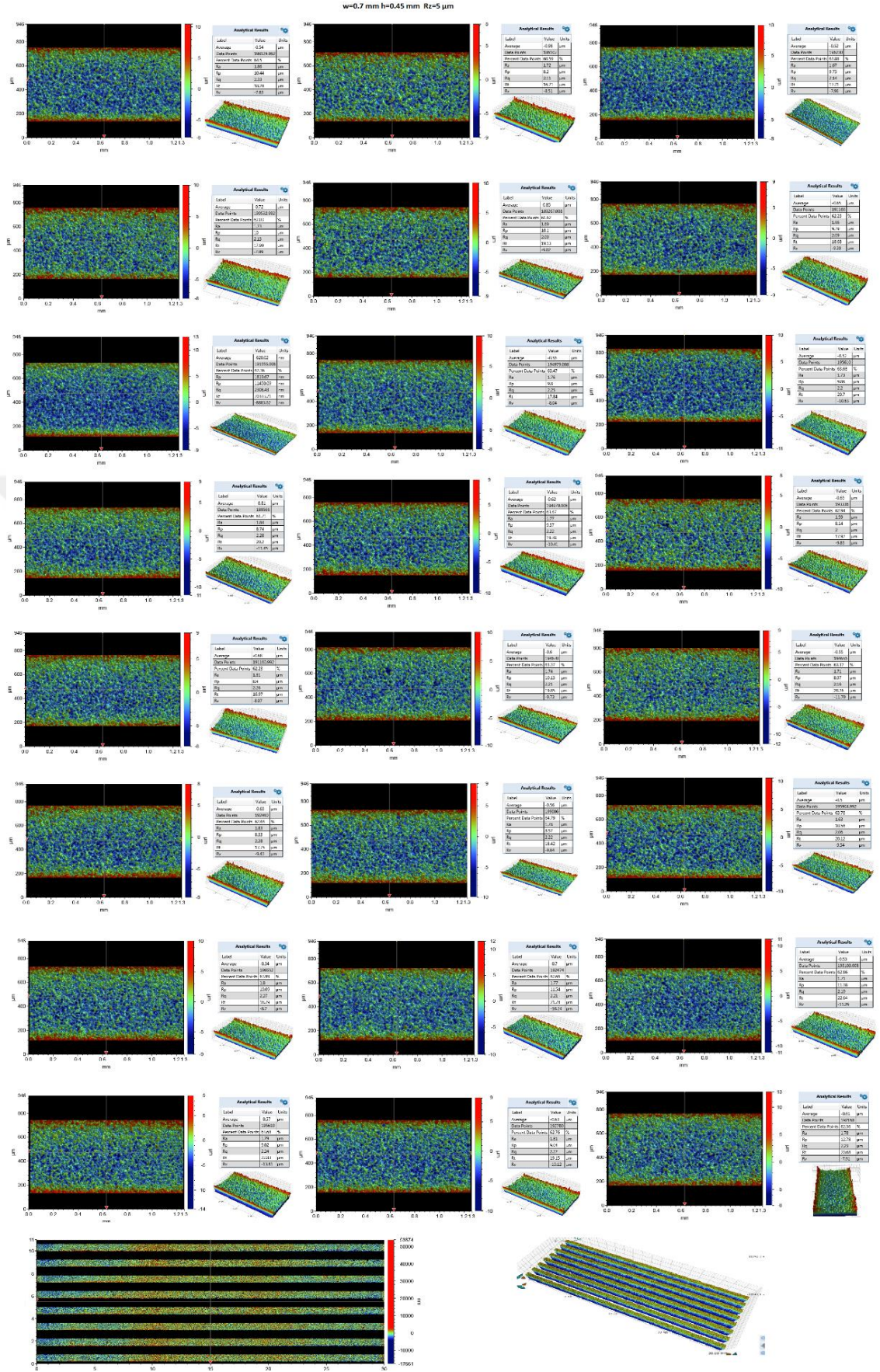
Yukarıda ayrıntılarıyla verilen imalat denemeleri sonucu bu çalışma kapsamında mikrokanallı ısı alıcı imalatında kullanılan farklı üretim metotlarının karşılaştırması Çizelge 3.3'te verilmiştir. Sonuç olarak, en uygun yöntemin dalma elektro erozyon üretim metodunun olduğu görülmüştür. Dalma elektro erozyon yöntemiyle, homojen yüzey yapısına sahip, boyutsal hassasiyeti yüksek, dikdörtgen kesit profilli 1 µm – 3 µm ortalama yüzey pürüzlülüğüne sahip mikrokanal üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.3. Mikrokanallı ısı alıcı üretim denemeleri yapılan imalat yöntemlerinin karşılaştırması.

Üretim Yöntemi	Boyutsal hassasiyet	Homojen yüzey yapısı	Dik ve keskin köşeli profil	Yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilebilirliği
Litografi ve aşındırma	✓	✓	✗	✗
Lazer temelli işleme	✗	✗	✗	✗
Mikro mekanik işleme	✓	✗	✗	✗
Tel erozyon	✓	✓	✗	✓
Dalma erozyon	✓	✓	✓	✓

Deneylerde kullanılacak mikrokanallı ısı alıcılar ISO 2083 paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Şekil 3.17'de deneylerde kullanılmak üzere üretilen mikrokanallı ısı alıcılara ait optik profilometre ile yapılan örnek yüzey pürüzlülük ölçümleri gösterilmiştir. Çizelge 3.4'te ise, üretilen her bir mikrokanallı ısı alıcı için optik profilometrede elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri ( $R_a$ ) ve yüzey alanı arttırım faktörü değerleri ( $S_i$ ) ayrıntılı olarak gösterilmiştir.  $S_i$  değeri ölçüm yapılan yüzeyin gerçek yüzey alanının pürüzsüz yüzey alanına oranını ifade eder. Ölçümler, mikrokanallı ısı alıcılar üzerindeki tüm kanallar için, kanalların başlangıç, orta ve son bölgelerinden olmak üzere üç farklı noktadan yapılmıştır. Herhangi bir ısı alıcı yüzeylerinde yapılan tüm pürüzlülük ölçümlerinin ortalaması söz konusu ısı alıcının ortalama yüzey pürüzlülük değeri olarak alınmıştır. Çizelge 3.4'te,  $w$  kanal genişliğini,  $h$  kanal yüksekliğini,  $R_a$  ortalama yüzey pürüzlülüğünü, B, O ve S sırasıyla ölçüm alınan kanalın başlangıç, orta ve son bölgelerini gösterir.  $R_z$  parametresi, mikrokanalları üreten firma tarafından kullanılan ve dalma erozyon makinesinin ayarlarının yapıldığı değeri gösterir. Tablonun en son satırında yer alan ortalama değerler, söz konusu ısı alıcının ortalama yüzey pürüzlülük değerini ifade eder. Çizelgede, ayrıca, her bir mikrokanallı ısı alıcıya ait yüzey alanı arttırım faktörünün ortalama değerleri verilmiştir. Karakterizasyon işleminde kullanılan optik profilometre ve optik mikroskop Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 3.17. Deneylerde kullanılan mikrokanallı ısı alıcılara ait örnek optik profilometre görüntüleri.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 3.4. Deneylerde kullanılan mikrokanallı ısı alıcıların detaylı ortalama yüzey pürüzlülük ve arttırım faktörü ölçüm sonuçları.

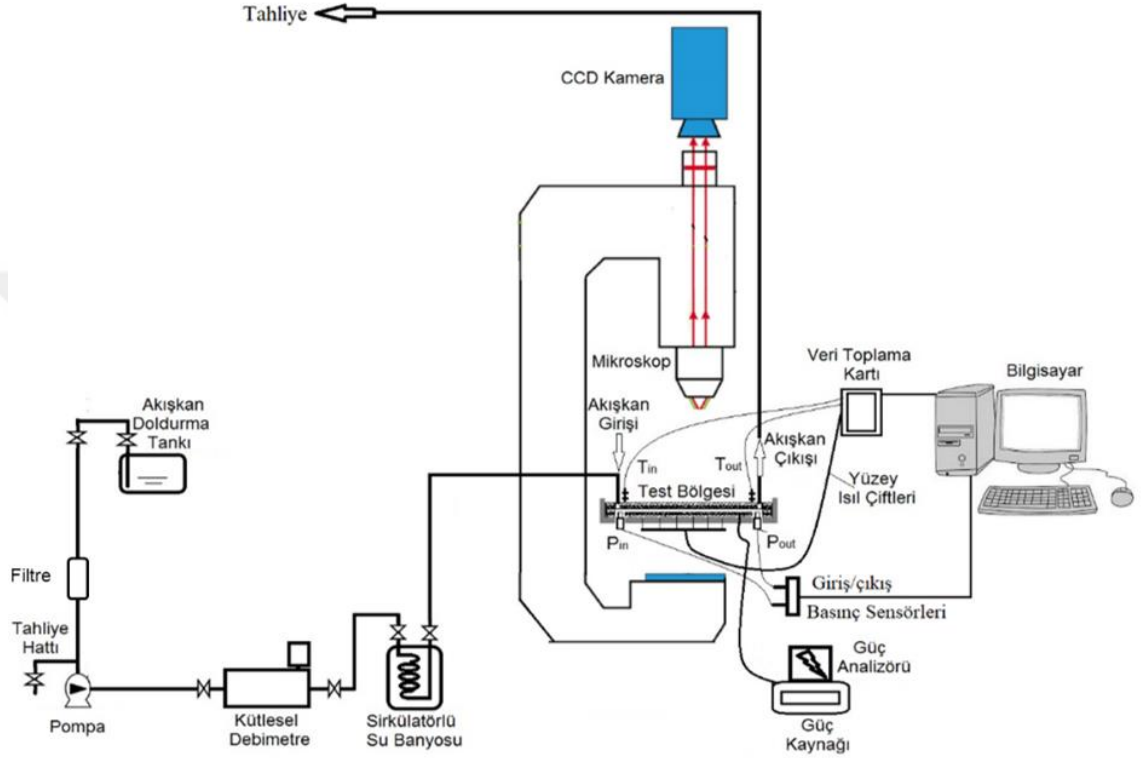
Kanal No	Konum	$R_a$								
		w=300 $\mu$ m h=450 $\mu$ m $R_z=1 \mu$ m	w=500 $\mu$ m h=450 $\mu$ m $R_z=1 \mu$ m	w=500 $\mu$ m h=450 $\mu$ m $R_z=5 \mu$ m	w=500 $\mu$ m h=450 $\mu$ m $R_z=10 \mu$ m	w=500 $\mu$ m h=450 $\mu$ m $R_z=12 \mu$ m	w=700 $\mu$ m h=450 $\mu$ m $R_z=1 \mu$ m	w=700 $\mu$ m h=450 $\mu$ m $R_z=5 \mu$ m	w=700 $\mu$ m h=450 $\mu$ m $R_z=10 \mu$ m	w=700 $\mu$ m h=450 $\mu$ m $R_z=12 \mu$ m
1	B	1,1	0,50	1,87	2,58	3,21	1,12	1,86	2,67	2,81
	O	1,03	0,49	1,81	2,66	3,15	1,02	1,72	2,52	3,06
	S	1,09	0,51	1,74	2,69	3,3	0,97	1,67	2,57	2,95
	Ort	<b>1,07</b>	<b>0,50</b>	<b>1,81</b>	<b>2,64</b>	<b>3,22</b>	<b>1,04</b>	<b>1,75</b>	<b>2,59</b>	<b>2,94</b>
2	B	1,28	0,70	1,88	2,77	3,1	1,09	1,73	2,60	3,00
	O	1,25	0,72	1,70	2,82	3,26	1,02	1,69	2,47	2,92
	S	1,34	0,68	1,68	2,59	3,21	1,15	1,66	2,44	2,91
	Ort	<b>1,29</b>	<b>0,70</b>	<b>1,75</b>	<b>2,73</b>	<b>3,19</b>	<b>1,09</b>	<b>1,69</b>	<b>2,50</b>	<b>2,94</b>
3	B	1,34	0,87	1,87	2,72	3,13	1,05	1,86	2,63	2,92
	O	1,38	0,92	1,70	2,69	3,05	1,15	1,76	2,64	3,32
	S	1,39	0,93	1,62	2,83	3,14	1,29	1,73	2,60	3,21
	Ort	<b>1,37</b>	<b>0,91</b>	<b>1,73</b>	<b>2,75</b>	<b>3,11</b>	<b>1,16</b>	<b>1,78</b>	<b>2,62</b>	<b>3,15</b>
4	B	0,86	1,03	1,79	2,44	3,06	0,76	1,84	2,54	3,19
	O	0,86	0,70	1,56	2,35	2,89	0,85	1,77	2,55	3,29
	S	0,89	0,85	1,54	2,61	2,79	0,95	1,59	2,44	3,13
	Ort	<b>0,87</b>	<b>0,86</b>	<b>1,63</b>	<b>2,47</b>	<b>2,91</b>	<b>0,85</b>	<b>1,73</b>	<b>2,51</b>	<b>3,20</b>
5	B	1,07	1,01	1,84	2,62	2,96	1,05	1,81	2,46	3,02
	O	1,06	0,87	1,64	2,53	2,75	0,98	1,74	2,47	3,18
	S	1,04	1,01	1,58	2,62	2,89	1,05	1,71	2,41	2,86
	Ort	<b>1,06</b>	<b>0,96</b>	<b>1,69</b>	<b>2,59</b>	<b>2,87</b>	<b>1,03</b>	<b>1,75</b>	<b>2,45</b>	<b>3,02</b>
6	B	1,14	0,95	1,86	2,43	3,03	0,93	1,83	2,50	2,84
	O	1,2	0,96	1,57	2,45	2,9	0,89	1,78	2,45	3,06
	S	1,14	0,97	1,51	2,57	2,89	0,99	1,63	2,53	3,09
	Ort	<b>1,16</b>	<b>0,96</b>	<b>1,65</b>	<b>2,48</b>	<b>2,94</b>	<b>0,94</b>	<b>1,75</b>	<b>2,49</b>	<b>3,00</b>
7	B	1,14	1,16	1,90	2,31	3,47	1,06	1,80	2,46	2,89
	O	1,00	1,26	1,66	2,34	3,29	1,05	1,77	2,45	2,91
	S	0,85	1,19	1,55	2,46	3,22	1,13	1,71	2,47	2,82
	Ort	<b>1,00</b>	<b>1,20</b>	<b>1,70</b>	<b>2,37</b>	<b>3,33</b>	<b>1,08</b>	<b>1,76</b>	<b>2,46</b>	<b>2,87</b>
8	B	0,90	1,40	1,89	2,41	3,28	1,17	1,79	2,44	2,86
	O	0,78	1,46	1,69	2,43	3,1	1,28	1,81	2,47	3,09
	S	0,96	1,58	1,60	2,50	3,32	1,23	1,78	2,44	2,66
	Ort	<b>0,88</b>	<b>1,48</b>	<b>1,73</b>	<b>2,45</b>	<b>3,23</b>	<b>1,23</b>	<b>1,79</b>	<b>2,45</b>	<b>2,87</b>
9	B	0,76	1,17	2,03	2,52	3,1				
	O	0,91	1,12	2,08	2,49	2,86				
	S	1,18	1,14	1,91	2,67	2,82				
	Ort	<b>0,95</b>	<b>1,14</b>	<b>2,01</b>	<b>2,56</b>	<b>2,93</b>				
10	B	0,66	1,46	2,02	2,56	2,99				
	O	0,83	1,44	2,03	2,49	2,95				
	S	1,01	1,37	1,83	2,71	2,98				
	Ort	<b>0,83</b>	<b>1,42</b>	<b>1,96</b>	<b>2,59</b>	<b>2,97</b>				
11	B	1,02	1,83	2,12	2,55	2,97				
	O	0,89	1,68	2,17	2,55	2,71				
	S	1,06	1,61	1,86	2,64	2,61				
	Ort	<b>0,99</b>	<b>1,71</b>	<b>2,05</b>	<b>2,58</b>	<b>2,76</b>				
12	B	0,71								
	O	0,57								
	S	0,83								
	Ort	<b>0,70</b>								
13	B	0,62								
	O	0,54								
	S	0,71								
	Ort	<b>0,62</b>								
14	B	0,83								
	O	0,80								
	S	0,93								
	Ort	<b>0,85</b>								
15	B	1,13								
	O	1,26								
	S	1,18								
	Ort	<b>1,19</b>								
16	B	1,03								
	O	1,18								
	S	1,03								
	Ort	<b>1,08</b>								
17	B	1,25								
	O	1,28								
	S	1,3								
	Ort	<b>1,28</b>								
18	B	1,13								
	O	1,21								
	S	1,22								
	Ort	<b>1,19</b>								
19	B	1,22								
	O	1,31								
	S	1,31								
	Ort	<b>1,28</b>								
Ortalama		<b>1,03</b>	<b>1,08</b>	<b>1,79</b>	<b>2,56</b>	<b>3,04</b>	<b>1,05</b>	<b>1,75</b>	<b>2,51</b>	<b>3,00</b>

Kanal ölçüleri	Yüzey arttırım faktörü ( $S_i$ )
w=700 $\mu$ m, h=450 $\mu$ m, $R_z=1 \mu$ m	1,032
w=700 $\mu$ m, h=450 $\mu$ m, $R_z=5 \mu$ m	1,110
w=700 $\mu$ m, h=450 $\mu$ m, $R_z=10 \mu$ m	1,145
w=700 $\mu$ m, h=450 $\mu$ m, $R_z=12 \mu$ m	1,168
w=500 $\mu$ m, h=450 $\mu$ m, $R_z=1 \mu$ m	1,036
w=500 $\mu$ m, h=450 $\mu$ m, $R_z=5 \mu$ m	1,117
w=500 $\mu$ m, h=450 $\mu$ m, $R_z=10 \mu$ m	1,146
w=500 $\mu$ m, h=450 $\mu$ m, $R_z=12 \mu$ m	1,166
w=300 $\mu$ m, h=450 $\mu$ m, $R_z=1 \mu$ m	1,031

## 3.1.6. Deney düzeneği

Deneylerin yapıldığı düzenek şematik olarak Şekil 3.18’de verilmiştir. Deney sistemi, akış sirkülasyon ünitesi, test bölgesi ve veri toplama ve akış görselleştirme ünitesi olmak üzere üç bölüme ayrılabilir.



Şekil 3.18. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Akış sirkülasyon ünitesi, sistemde iş akışkanı olan suyun dolaşımını sağlayan kısım olup, su deposu, filtre, pompa, debimetre, sıcak su banyosu ve borulardan oluşur. 10 lt’lik akışkan besleme deposundan alınan su, bir mikro filtreden geçtikten sonra mikro dişli pompa vasıtasıyla sirkülatörlü su banyosuna gönderilir. Mikro dişli pompanın çıkışına daha düşük debilere inebilmek için hassas ayar vanası konulmuştur. Su banyosundan önce, sisteme gönderilen akışkan debisini ölçmek için kütleli debimetre kullanılmıştır. Akışkan sirkülatörlü su banyosunda istenen sıcaklığa şartlandırıldıktan sonra test bölgesine ulaşır. Test bölgesini sıvı/buhar fazda terk eden iş akışkanı borular vasıtasıyla tahliye edilir. Deney sisteminde akışkan dolaşımı açık devre olarak gerçekleşir. Şekil 3.19’da deney sisteminin laboratuvardan bir görünüşü verilmiştir.



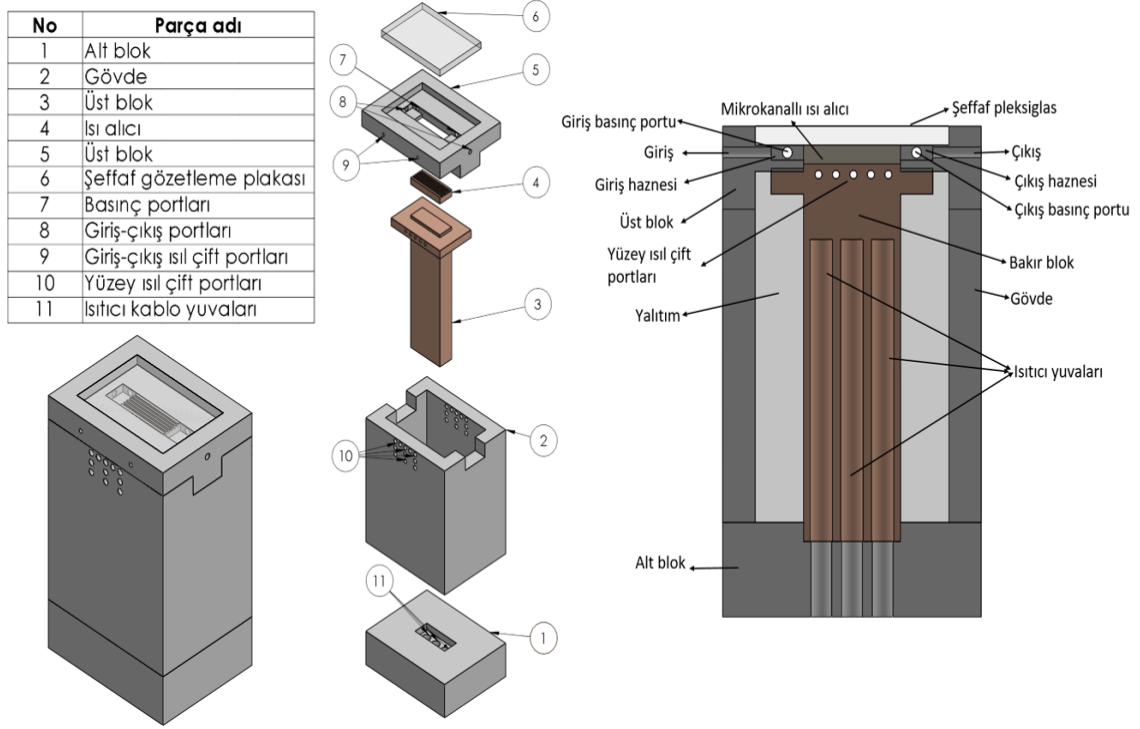
Şekil 3.19. Deney sisteminin laboratuvarından görünümü.

### 3.1.7 Test bölgesi

Şekil 3.20’de gösterilen test bölgesi, mikrokanallı ısı alıcı, PEEK malzeme, bakır blok, ısıtıcı elamanlar, polikarbonat plaka, giriş-çıkış hazneleri, sıcaklık ve basınç ölçüm portları ve yalıtım malzemesini içerir. Test modülünün gövdesi PEEK malzemedен yapılmış olup üç parçadan oluşmaktadır. Mikrokanallı ısı alıcının yerleştirildiği yuva, akışkan giriş/çıkış portları, mikrokanal giriş/çıkış hazneleri, şeffaf gözetleme plakası, sıcaklık ve basınç ölçüm portları üst blokta yer alır. Akış görüntülemeye izin vermek için ısı alıcının üst yüzeyine şeffaf pleksglas plaka yerleştirilmiştir. Isı alıcının giriş ve çıkış haznelerindeki akışkan sıcaklıkları K-tipi ısı çiftleri ile ölçülmüştür. Ayrıca, giriş ve çıkış haznelerindeki basınçlar Kobold marka basınç sensörleri ile elde edilmiştir. Mikrokanallı ısı alıcının yüzeyindeki sıcaklık dağılımını elde etmek için üst bloğun yan yüzeylerinde karşılıklı olarak her iki tarafta 5’er adet olmak üzere toplam 10 adet sıcaklık portu bulunmaktadır. Yüzey sıcaklık ölçümleri için T-tipi ısı çifti kullanılmıştır. Mikrokanallı ısı alıcı, her biri 200 W kapasiteye sahip 3 adet kartuş ısıtıcı ile alt yüzeyinden üniform olarak ısıtılmıştır. Kartuş ısıtıcılar bakır blok içerisinde yerleştirilmiştir. Test bölgesinin gövde kısmında yer alan bakır bloğun etrafı ısı kaybını engellemek için seramik bez ile

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

yalıtılmıştır. Üst blok ile gövde arasında sızdırmazlık elemanı olarak klingrit levha konularak akışkanın test bölgesinin alt kısımlarına sızması engellenmiştir. Alt blok kartuş ısıtıcıların kablolarını içerir. Test bölgesi üst ve alt kısımlarından alüminyum plakalar arasında yerleştirilmiş, saplama ve somunlar yardımıyla sıkıştırılarak tek bir parça haline getirilmiştir.



Şekil 3.20. Test bölgesinin detaylı gösterimi.

#### 3.1.8. Deney sisteminde kullanılan ekipmanlar

Deneylerde kullanılan ekipmanlar Şekil 3.21’de gösterilmiş olup aşağıda tanımlanmıştır.

**Mikro dişli pompa:** Deney sisteminde, akışkan hareketini sağlamak için Longer marka WT3000-1JB model mikro dişli pompa kullanılmıştır. Mikro dişli pompa, 85,7 mL/dk-857,1 mL/dk aralığında akışkan debisi sağlayabilmektedir. Mikro dişli pompa kullanımını darbesiz sürekli sabit hızda akışkan transfer etme kabiliyetine sahip olmasından dolayı tercih edilmiştir.

**Debimetre:** Deney sistemindeki akışkan debisi, Simens marka Sitrans FC-MASS2100 model kütleli debimetre ile ölçülmüştür. Debimetre, Simens Sitrans FC-MASS6000 model indikatöre sahip olup, debi değerleri göstergeden okunabildiği gibi RS-232 bağlantı kablosu aracılığıyla bilgisayara aktarılabilir. Kullanılan debimetre 0-10 l/h aralığında %0.05 hassasiyetle debi ölçümüne olanak sağlamaktadır. Kütleli debimetreler çok düşük hızlardaki akışları dahi yüksek hassasiyetle okuyabildikleri için özellikle mikro ölçekte gerçekleşen hassas akışlar için oldukça elverişlidirler.

**Sirkülatörlü Su Banyosu ve Serpantin:** Deneyler sırasında iş akışkanının mikrokanal giriş haznesine istenen sıcaklıkta girmesini sağlamak için sabit sıcaklıklı su banyosu kullanılmıştır. Akışkan test bölgesine girmeden önce su banyosu içinde yer alan bakır borudan imal edilmiş 10 mm çapında 8 sarıma sahip bir serpantinden geçirilerek şartlandırma işlemi yapılmıştır. Deneylerde, WiseCircu marka WCR-P8 model hem ısıtma hem de soğutma yapabilen bir sirkülatörlü su banyosu kullanılmıştır.

**Mikro Filtre:** Akışkan deposunda bulunabilecek partikül maddelerin sisteme gitmesini engellemek için mikro pompa girişine devre tipi 10 µm ağ boyutuna sahip filtresi değiştirilebilen bir mikro filtre kullanılmıştır.

**Güç kaynağı:** Isı alıcının alt yüzeyine üniform ısı akısı uygulamak için bakır blok içerisine yerleştirilen elektrikli kartuş ısıtıcılar, sisteme entegre edilen VARSAN marka güç kaynağı ile beslenmiştir. Güç kaynağı manuel olarak ayarlanmakta, akım ve voltaj değerlerine göre istenen miktarda enerji sağlanmaktadır.

**Güç analizörü:** Kartuş ısıtıcıların sistemden çektiği akım ve gerilim değerlerinin hassas bir şekilde ayarlanması ısı alıcının yüzeyinde sabit ısı akısı sınır şartının sağlanması açısından önem arz etmektedir. Sistemden çekilen akım değerleri yüksek olduğu durumlarda multimetre ile veri almak sağlıklı olmayacağından daha hassas ölçüm için deney sisteminde HIOKI marka 3333 Power Histester model güç analizörü kullanılmıştır.

**Veri okuma kartı:** Test bölgesinde toplam 12 noktadan sıcaklık ölçümü iki noktadan ise basınç ölçümü yapılmıştır. Isıl çiftlerden ve basınç sensörlerinden alınan

veriler HIOKI marka LR8501 model veri okuma kartı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Veri okuma kartı 60 kanala sahip olup 10 ms örnekleme hızına sahiptir.

**Akışkan besleme haznesi:** İş akışkanının depolanması ve sistem içerisine alınması için 10 litrelik akışkan besleme haznesi kullanılmıştır. Haznedeki akışkan mikro dişli pompa tarafından emilerek sistem içerisine gönderilmektedir.

**Basınç sensörleri:** Test bölgesi giriş ve çıkışındaki gösterge basınçları Kobold marka basınç elemanları ile ölçülmüştür. Basınç sensörlerinin elektrik beslemesi 4 çıkışa sahip GW INSTEK marka GPS-4303 model güç kaynağından sağlanmıştır.

**Akış görselleştirme sistemi:** Kaynamalı akış olayı doğası gereği çok hızlı gelişen bir fiziksel olaydır. Mikrokanal içerisinde kabarcık oluşum ve gelişim sürecinin mikro saniye mertebelerinde incelenmesi gereklidir. Bu tez kapsamında, Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM'da (Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) bulunan mikro-PIV sistemine ait yüksek hızlı kamera ve mikroskop ile akış görüntüleme işlemi yapılmıştır. Yüksek hızlı kamera olarak Dantec marka SpeedSense Lab M310 model CCD tip kamera kullanılmıştır. Kameranın maksimum çözünürlükteki (1280x800) çekim sayısı 3600 fps'dır. Akış görüntüleme sisteminde Leica marka M165-FC model mikroskop kullanılmıştır. Alınan görüntüler bağlantı kablolarıyla bilgisayara aktarılmış ve analiz edilmiştir.

**Isıl çiftler:** Isı alıcı giriş ve çıkış haznelerindeki akışkan sıcaklık ölçümleri K tipi ısı çiftleri ile yapılmış olup, yüzeylerdeki sıcaklık ölçümleri için T-tipi ısı çiftleri kullanılmıştır. Giriş ve çıkışta K-tipi ısı çifti kullanılmasının nedeni bu noktadaki sıcaklık portlarının küçük çaplı olmasından kaynaklanmaktadır. K tipi ısı çiftleri 0,20 mm iç çap ve 0,5 mm dış çapı sahipken, T tipi ısı çiftleri 0,25 mm iç çap 0,75 mm dış çapı sahiptir. Isıl çiftler deney sisteminde kullanılmadan önce su banyosunda kalibre edilip kalibrasyon denklemleri elde edilmiştir. Kalibrasyon işlemi Wise Circu marka su banyosunda 30°C-90°C sıcaklık aralığında 10°C artışlarla sıcaklık ölçüm değerleri alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde her bir ısı çiftine ait elde edilen kalibrasyon eğrileri EK1'de gösterilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



No	Ekipman
(a)	Longer WT3000-1JB Mikro Dişli Pompa
(b)	Sitrans FC-MASS2100 model kütleli debimetre ve FC-MASS6000 model indikatör
(c)	WiseCircu marka WCR-P8 model sirkülatörlü su banyosu ve bakır serpantin
(d)	HIOKI marka LR8501 model veri okuma kartı
(e)	HIOKI marka 3333 Power Histester model güç analizörü
(f)	HIOKI marka LR8501 model veri okuma kartı
(g)	Kobold basınç sensörü
(h)	GW INSTEK marka GPS-4303 model basınç sensörü güç kaynağı
(i)	Leica M165-FC Mikroskop
(j)	Dantec Speed Sense Lab M310 CCD Kamera
(k)	Bruker marka Contour GTK 3D optik profilometre
(l)	Carl Zeiss marka optik mikroskop
(m)	Mikro filtre
(n)	Akışkan besleme haznesi

Şekil 3.21. Deneyleerde kullanılan ekipmanlar.

### 3.2. Yöntem

#### 3.2.1. Deneilerin yapılışı

Akış kaynama deneyleri aşağıdaki işlem sırası takip edilerek yapılmıştır.

- İlk olarak mikro pompa açılır ve manuel olarak istenen debi değerini sağlayacak şekilde devir sayısı ayarlanır. Bu aşamada, gerekli durumlarda pompa çıkışına yerleştirilen ince ayar vanasından yararlanılabilir.
- Sirkülatörlü su banyosu çalıştırılır ve akışkanın test bölgesine giriş sıcaklığını sağlayacak şekilde çalışma sıcaklığı ayarlanır.
- Test bölümüne giren akışkanın sıcaklığı istenen değere ulaştığında güç kaynağı açılır ve istenen sabit bir değere ayarlanır.
- Test bölgesindeki ısı çiftlerinden alınan bütün sıcaklık verileri kararlı hale geldiğinde veri toplama kartı ile sıcaklık ve basınç verileri alınır ve bilgisayara kaydedilir. Bu aşamada eş zamanlı olarak akış görüntüleme işlemi yapılır ve videolar bilgisayara kaydedilir.

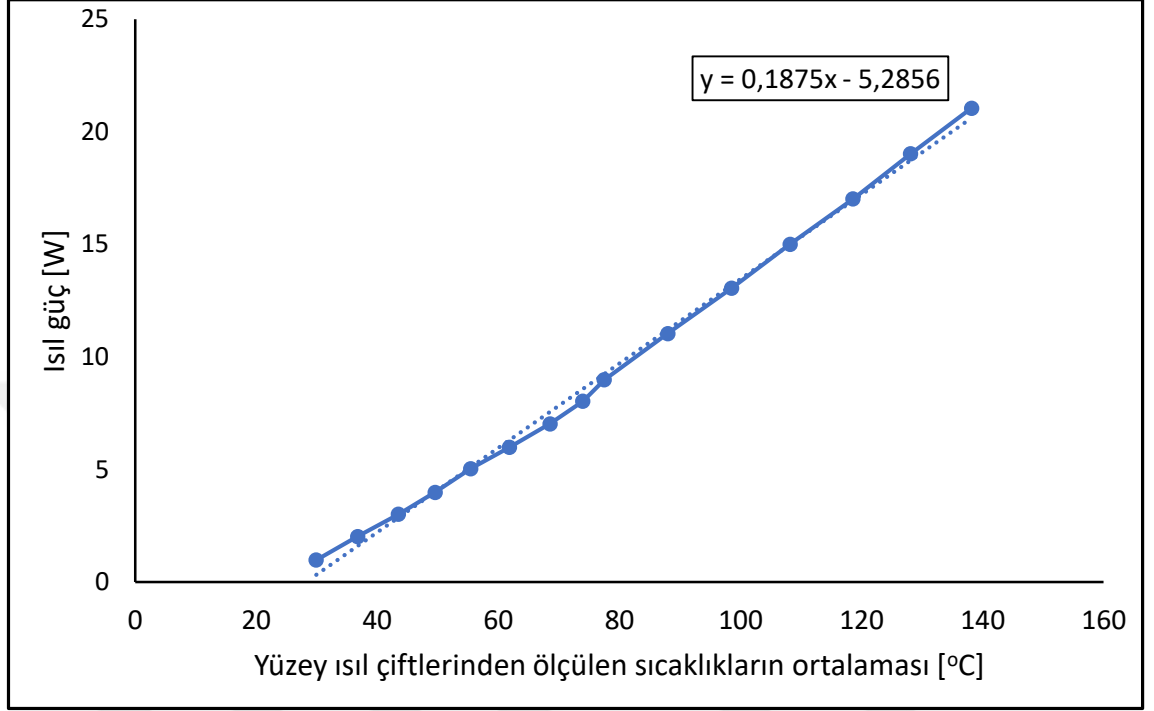
#### 3.2.2. Deneysel hesaplama metodu

##### *Isı kaybı hesabı*

Deneiler sırasında mikrokannalı ısı alıcıya uygulanan ısıl gücün doğru olarak belirlenmesi için sistemden çevreye olan ısı kayıplarının tespit edilmesi gerekir. Bu çalışmada, deneiler sırasında oluşan ısı kayıplarının tespitinde Harirchian and Garimella (2008) ve Wang and Peles (2015) tarafından kullanılan metot takip edilmiştir. Bu yöntemeye göre, sistemde akışkan yokken, yani test bölgesi kuru iken, güç kaynağı sabit bir değere ayarlanarak ısıtıcı elemanlar ile ısı alıcının yüzeyinden ısıl güç uygulanır. Üst bloğun yan yüzeylerindeki 10 adet ısıl çiftten alınan sıcaklık değerleri kararlı hale gelince,

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

bu sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması uygulanan ısı güç değerinin karşısına yazılır. Bu proses, ısı güç arttırılarak farklı değerler için tekrar edilerek Şekil 3.22’de gösterilen sıcaklığa karşı ısı kaybı eğrisi elde edilir.



Şekil 3.22. Isı kaybı kalibrasyon eğrisi.

#### *Isı transfer katsayısı hesabı*

Mikrokanallı ısı alıcının yüzeyine gelen efektif ısı güç, ısı kaybı miktarının güç kaynağı tarafından uygulanan ısı güçten çıkarılması ile elde edilir. Efektif ısı akısı ise,

$$\dot{q}'_e = \frac{\dot{Q} - \dot{Q}_k}{A_b} \quad (3.1)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Burada;  $\dot{Q}$  ısıtıcı elemanlar tarafından birim zamanda sisteme verilen ısı miktarını,  $\dot{Q}_k$  ısı kaybını gösterir.  $A_b$  ise ısı alıcının taban alanı olup aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$A_b = L \times W \quad (3.2)$$

Burada;  $L$  ısı alıcının uzunluğunu,  $W$  ısı alıcının genişliğini ifade eder. Isı alıcının taban yüzeyinde herhangi bir noktadaki yerel sıcaklık,  $T_{y,n}$ , bir boyutlu ısı iletim yaklaşımı ile aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$T_{y,n} = T_n - \dot{q}'_e \left( \frac{l_a}{k_a} + \frac{l_b}{k_b} + R_{td} \right) \quad (3.3)$$

Bu denklemde;  $T_n$  ısı çiftten okunan değeri,  $k_a$  ve  $k_b$  sırasıyla paslanmaz çeliğin ve bakırın ısı iletim katsayılarını,  $l_a$  mikrokanalların alt yüzeyi ile ısı alıcının tabanı arasındaki mesafeyi,  $l_b$  ise sıcaklık değeri bilinen ısı çift ile bakır bloğun üst yüzeyi arasındaki mesafeyi gösterir.  $R_{td}$ , bakır-paslanmaz çelik arasındaki temas direncini ifade eder.

Isı transfer katsayısının belirlenmesi için duvar ısı akısının bilinmesi gerekir. Mikrokanallı ısı alıcı kanatçıklı bir yapıya sahip olduğundan kanatlı yüzeylerden gerçekleşen ısı transferi yaklaşımı kullanılarak duvar ısı akısı tanımlanabilir.

$$\dot{q}'_w = \frac{\dot{Q} - \dot{Q}_k}{A_t} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte,  $A_t$  ısı alıcı üzerindeki mikrokanalların toplam ısı transfer alanı olup aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$A_t = NL(2h + w) \quad (3.5)$$

Burada,  $N$  ısı alıcıdaki mikrokanal sayısını,  $h$  mikrokanal yüksekliğini,  $w$  ise mikrokanal genişliğini gösterir. Mikrokanallı ısı alıcının üst yüzeyi ısı iletkenliği düşük şeffaf plaka ile kapatıldığından kanatçıkların ucundan olan ısı transferi ihmal edilmiştir. Bu durumda adyabatik uçlu kanat yaklaşımı kullanılarak, kanatçık verimi ( $\eta_k$ ) ve toplam yüzey verimi ( $\eta_t$ ) aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilir.

$$\eta_k = \frac{\tanh mh}{mh} \quad (3.6)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{NA_k}{A_t} (1 - \eta_k) \quad (3.7)$$

Burada,  $A_k$  kanatçık yüzey alanını ifade eder ve Eşitlik (3.8) ile hesaplanır. Kanatçık parametresini ifade eden  $m$  Eşitlik 3.9'dan hesaplanır.

$$A_k = 2Lh \quad (3.8)$$

$$m = \sqrt{\frac{h_{if}}{k_a w_k / 2}} \quad (3.9)$$

Eşitlik (3.9)'daki  $w_k$  kanatçık genişliğini belirtir. Sonuç olarak, akış kaynamada yerel iki fazlı ısı transfer katsayısı  $h_{if}$ :

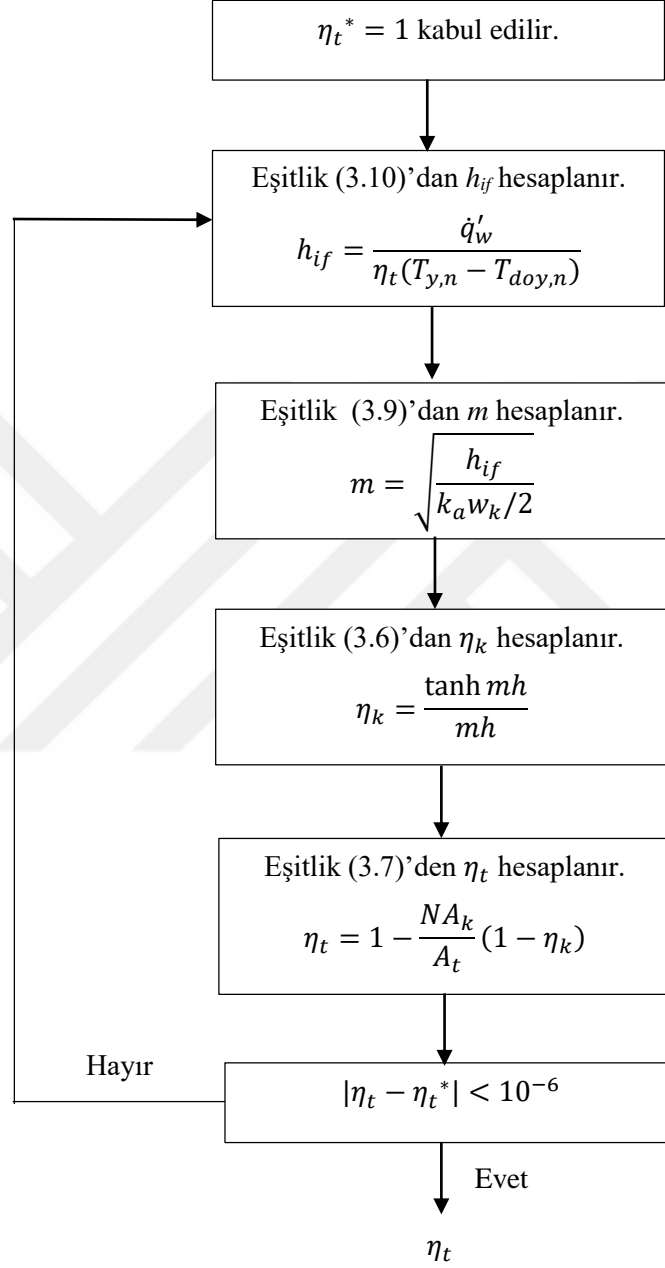
$$h_{if} = \frac{\dot{q}'_w}{\eta_t (T_{y,n} - T_{doym,n})} \quad (3.10)$$

denklemiyle hesaplanır. Burada,  $T_{doym,n}$  yerel doyma sıcaklığını gösterir. İki fazlı ısı transfer katsayısının hesaplanması Eşitlik (3.7) ve Eşitlik (3.10)'nun eş zamanlı iteratif olarak çözülmesini gerektirir. Bunun için, Şekil 3.23'te verilen işlem adımları uygulanmıştır.

#### ***Kuruluk derecesi hesabı***

Deneylerde iş akışkanı olarak kullanılan su, mikrokanallı ısı alıcıya doyma sıcaklığının altında yani aşırı soğuk halde girmektedir. Dolayısıyla, mikrokanallarda tek fazlı ve çift fazlı olmak üzere iki farklı akış bölgesi oluşur. Akış bölgeleri arasındaki geçiş noktası kuruluk derecesi ile belirlenebilir. Kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktada akış doyma şartlarına ulaşmış olup bu noktadan itibaren mikrokanal içinde sıvı/buhar karışımı iki fazlı akış görülür. Mikrokanal içinde iki fazlı bölgenin herhangi bir noktasında doyma sıcaklığının tespiti söz konusu bölgedeki basınç dağılımının bilinmesi gerektirir. Ancak, mikrokanallı ısı alıcı ve test bölgesindeki yer kısıtlamaları mikrokanal içindeki basınç

ölçümlerinin yapılmasını olanaksız hale getirmektedir. Bu yüzden, Markal (2016), Özdemir (2015)'de olduğu gibi, iki fazlı bölgede yerel basınç dağılımının hesaplanmasında lineer basınç düşümü olduğu kabulü yapılmıştır.



Şekil 3.23. Isı transfer katsayısını iteratif olarak hesaplama algoritması.

Çift fazlı akış bölgesinin başlangıç noktasında basınç, mikrokanal girişindeki basınç değerinden tek fazlı bölge boyunca oluşan basınç kaybının çıkarılmasıyla elde edilir. Tek fazlı bölgedeki basınç düşümü:

$$\Delta P_{tf} = \frac{2f_{tf}G^2L_{tf}v_s}{D_h} \quad (3.11)$$

eşitliğiyle bulunur. Burada,  $f_{tf}$  tek fazlı akışta Fanning sürtünme katsayısı olup Shah ve London (1978) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{tf} = \frac{24}{Re_{tf}} (1 - 1,3553\beta + 1,9467\beta^2 - 1,7012\beta^3 + 0,9564\beta^4 - 0,2537\beta^5) \quad (3.12)$$

Bu denklemde,  $Re_{tf}$  tek fazlı akıştaki Reynolds sayısı olup Eşitlik (3.13)'ten bulunur.  $\beta$  ise değeri 0 ile 1 arasında olacak şekilde mikrokanalın genişlik/yükseklik veya yükseklik/genişlik oranını ifade eder.  $G$  kütleli akı değeri Eşitlik (3.14)'ten hesaplanır.

$$Re_{tf} = \frac{GD_h}{\mu_{tf}} \quad (3.13)$$

$$G = \frac{\dot{m}}{NA_k} \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.11'de,  $L_{tf}$  tek fazlı akış bölgesinin uzunluğunu ifade eder. Bu bölgenin uzunluğu, kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktada enerji dengesi yazılırsa;

$$L_{tf} = \frac{\dot{m}c_{p,l}(T_{doy,x_e=0} - T_g)}{\dot{q}'_e W} \quad (3.15)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitlikte,  $T_{doy,x_e=0}$  akışkanın kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki doyma sıcaklığı,  $T_g$  akışkanın kanala giriş sıcaklığıdır.  $T_{doy,x_e=0}$  değerinin tespiti için akışkanın bu noktadaki basınç ( $P_{d,x_e=0}$ ) değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değer, Eşitlik (3.16)'da ifade edildiği gibi kanal girişindeki basınçtan ( $P_{mk,g}$ ) tek fazlı bölgede meydana gelen basınç kaybının çıkarılmasıyla elde edilir.

$$P_{d,x_e=0} = P_{mk,g} - \Delta P_{tf} \quad (3.16)$$

Eşitlik (3.11) ve (3.16) incelendiğinde, tek fazlı bölge uzunluğunun belirlenebilmesi için iki denklem iteratif olarak çözülmelidir. Bunun için, ilk olarak tek fazlı bölge uzunluğunun sıfır olduğu kabul edilmiştir. Daha sonra, Eşitlik (3.16) yardımıyla, kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki basınç değeri hesaplanmıştır. Bu basınç değerine karşılık gelen doyma sıcaklığı termodinamik tablolardan okunmuştur. Bu değere bağlı olarak Eşitlik (3.15)'ten tek fazlı bölge uzunluğu hesaplanmıştır. Daha sonra, Eşitlik (3.11)'den  $\Delta P_{tf}$  değeri hesaplanmıştır. Bu değer, başlangıçta kabul edilen  $\Delta P_{tf}$  değeriyle karşılaştırılmıştır. Bu şekilde iki değerler arasında  $10^{-6}$  mertebesinde yakınsamasa kriteri sağlanana kadar iterasyona devam edilmiştir. Sözel olarak ifade edilen bu iterasyon döngüsü Şekil 3.24'te şematik olarak gösterilmiştir.

Doymuş kaynama bölgesindeki basınç dağılımı, bu bölgede basıncın mikrokanal boyunca çıkışa doğru mesafe ile doğrusal olarak azaldığı yaklaşımı ile belirlenmiştir. Benzer yaklaşım literatürde, Özdemir (2016) ve Markal (2016) tarafından da uygulanmıştır. İteratif olarak hesaplanan kuruluk derecesinin sıfır olduğu, diğer bir ifadeyle, iki fazlı bölgenin başlangıcındaki basınç değeri ve mikrokanal çıkışındaki basınç değeri ( $P_{mk,\zeta}$ ) arasında lineer interpolasyon yaklaşımı uygulanarak, bu bölgenin herhangi bir noktasındaki yerel basınç değeri Eşitlik (3.17) ile hesaplanabilir.

$$P_{d,n} = P_{d,x_e=0} - \left( \frac{P_{d,x_e=0} - P_{mk,\zeta}}{L - L_{tf}} \right) (L_n - L_{tf}) \quad (3.17)$$

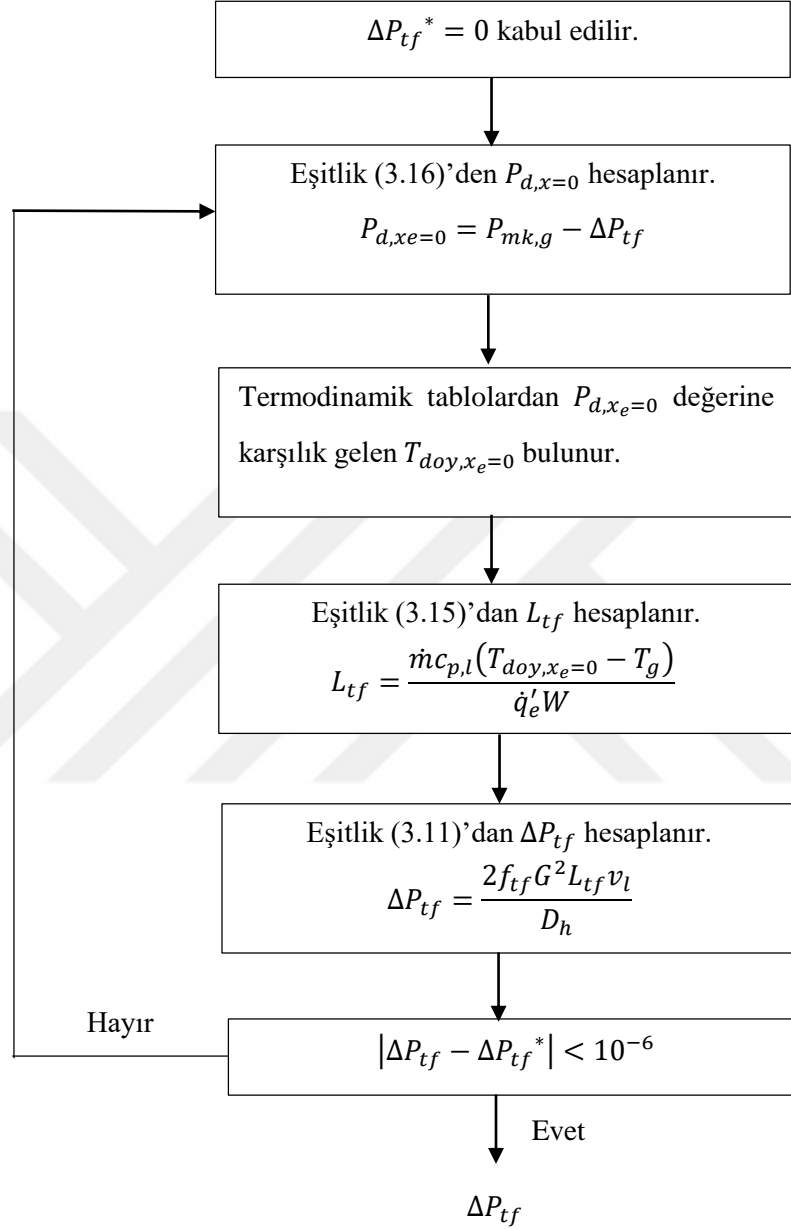
İki fazlı bölgede yerel kuruluk derecesi ( $x_{e,n}$ ):

$$x_{e,n} = \frac{\left( \frac{q'_w A_t L_n}{L} - \dot{m} c_{p,s} (T_{doy,n} - T_g) \right)}{\dot{m} i_{sb}} \quad (3.18)$$

eşitliği ile hesaplanır. Mikrokanal çıkışındaki kuruluk derecesi ise Eşitlik (3.19)'den bulunur.

$$x_{e,o} = \frac{q'_w A_t - \dot{m} c_{p,s} (T_{doy,o} - T_g)}{\dot{m} i_{sb}} \quad (3.19)$$

Bu denklemlerdeki  $i_{sb}$  buharlaşma gizli ısısını  $T_{doy,o}$  mikrokanal çıkışındaki basınç değerine karşılık gelen doyma sıcaklığıdır.



Şekil 3.24. Tek fazlı bölge basınç düşümünün iteratif çözüm döngüsü.

### **Basınç düşümü hesabı**

Test bölgesindeki toplam basınç kaybı ( $\Delta P_{top}$ ), ısı alıcının giriş ve çıkışındaki haznelerin yan yüzeylerine yerleştirilen basınç sensörleri ile ölçülmektedir.

$$\Delta P_{top} = P_g - P_{\zeta} \quad (3.20)$$

Burada,  $P_g$  ve  $P_{\zeta}$  sırasıyla giriş ve çıkış sensörlerinden okunan basınç değerleridir. Akışkanın giriş haznesinden mikrokanallara geçişi sırasında kesit daralmasından dolayı yerel basınç kaybı oluşur. Mikrokanalların girişindeki basınç değeri ise, giriş haznesinde okunan basınç değerinden kesit daralması nedeniyle oluşan bu basınç kaybının çıkarılmasıyla elde edilir. Mikrokanal girişindeki basınç ( $P_{mk,g}$ ):

$$P_{mk,g} = P_g - \Delta P_d \quad (3.21)$$

denklemleriyle hesaplanır. Burada,  $\Delta P_d$  kesit daralması nedeniyle oluşan basınç kaybını ifade eder ve aşağıda verilen bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$\Delta P_d = \frac{v_{s,g}}{2} (G^2 - G_{h,g}^2) + \frac{K_d v_{s,g}}{2} G^2 \quad (3.22)$$

Burada, kesit daralma kayıp katsayısı  $K_d$ , Eşitlik (3.23)'den hesaplanır.  $G_{h,g}$  giriş haznesindeki kütle akı değerini,  $v_{s,g}$  ise girişteki sıvı özgül hacmini belirtir.

$$K_d = 0,6740 + 1,2501\beta + 0,3417\beta^2 - 0,8358\beta^3 \quad (3.23)$$

Benzer yaklaşımla, mikrokanalların çıkışındaki basınç değeri:

$$P_{mk,\zeta} = P_{\zeta} + \Delta P_g \quad (3.24)$$

denklemleriyle hesaplanır. Burada,  $\Delta P_g$  kesit genişlemesi nedeniyle elde edilen basınç kazanımını ifade eder ve aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\Delta P_g = \frac{v_{s,\zeta} + x_{e,o} v_{s,\zeta}}{2} (G_{h,\zeta}^2 - G^2) + \frac{K_g (v_{s,\zeta} + x_{e,o} v_{s,\zeta})}{2} G^2 \quad (3.25)$$

Bu denklemde,  $K_g$ , kesit genişleme kazanç katsayısı olup Eşitlik (3.26)'dan hesaplanır.  $G_{h,g}$  çıkış haznesindeki kütleli akı değerini,  $v_{s,\zeta}$  ise çıkışta sıvı özgül hacmini belirtir. Bu eşitlikteki  $A_{h,\zeta}$ , çıkış haznesinin kesit alanını ifade eder.

$$K_g = \left(1 - \frac{NA_k}{A_{h,\zeta}}\right)^2 \quad (3.26)$$

### 3.2.3. Belirsizlik hesabı

Belirsizlik analizi için literatürde farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada, yayımlı belirsizlik analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, her bir deneysel parametrenin ayrı ayrı etkileri nedeniyle oluşan birleşik belirsizliği hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Yayımlı belirsizlik analizi, Coleman and Steele (2018) tarafından açıklanan yöntemle yapılmıştır. Belirsizlik analizi ile ilgili detaylı bilgi EK-2'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının ve ekipmanların belirsizlik değerleri üretici firmaların katalog değerlerinden alınmıştır. Çizelge 3.5'te, bu çalışma için yayımlı belirsizlik analizi ile hesaplanan belirsizlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. Deneysel belirsizlikler.

Büyüklik	Belirsizlik
Uzunluk, $(L, W, h, w)$	$\pm 0,1 \mu\text{m}$
Sıcaklık, $T$	$\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$
Basınç, $P$	$\pm \%0,25$
Kütleli debi, $\dot{m}$	$\pm \%0,1$
Isıl güç, $\dot{Q}$	$\pm \%0,1$
Duvar ısı akısı, $\dot{q}_w$	$\pm \%0,17-0,20$
Hidrolik çap, $D_h$	$\pm \%0,015-0,022$
Kütleli akı, $G$	$\pm \%0,103-0,108$
Çıkış kurulum derecesi, $x_{e,o}$	$\pm \%0,43-7,04$
Isı transfer katsayısı, $h_{if}$	$\pm \%0,53-4,69$

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, mikrokanallı ısı alıcılarda akış kaynama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kanal genişlikleri, 300 µm, 500 µm ve 700 µm iken kanal yüksekliği 450 µm'dir. Deneylerde dört farklı yüzey pürüzlülük değeri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü  $R_a$  değeri ile karakterize edilmiştir. Çalışılan yüzey pürüzlülük değerleri, 1-3,0µm aralığındadır. Yüzey pürüzlülüğü ve hidrolik çapın yanı sıra çalışma parametreleri olan ısı akısı ve kütleli akısının mikrokanallı ısı alıcılarda akış kaynama ısı transferi, basınç düşümü karakteristiklerine etkileri incelenmiş ve akış görüntüleme ile akış desenleri ortaya çıkarılmıştır. Deneylerde, iş akışkanı olarak saf su kullanılmış olup, suyun mikrokanallı ısı alıcıya giriş sıcaklığı 85°C'dir. Mikrokanallı ısı alıcının tabanından uygulanan ısı gücü 50-100W aralığındadır. Çalışılan ısı akısı aralığı değerleri 40-160 kW/m<sup>2</sup> aralığında yer almaktadır. Deneyler, 100, 200, 300, ve 400 kg/m<sup>2</sup>s olmak üzere dört farklı kütleli akıda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, doymuş akış kaynama incelendiğinden, ısı transfer katsayısı ve kuruluk derecesi belirlenirken, en yüksek doymuş kaynama bölgesine karşılık gelen, aksi belirtilmediği takdirde, mikrokanal çıkışından 3 mm önce yerleştirilen ısı çiftten alınan veriler kullanılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçların tamamının sunulması imkânsız olduğundan akış kaynama ile ilgili genel karakteristikleri temsil eden ve konuya özgün değerleri yansıtan bulgular üzerinde durulmuştur. Bu bölüm dört alt bölüme ayrılmıştır. İlk olarak, deneylerde elde edilen akış desenleri incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, hidrolik çap, ısı akısı ve kütleli akının akış kaynama rejimlerine olan etkisi tartışılmıştır. İkinci kısımda, akış kaynamaya ait ısı transferi sonuçları sunulmuştur. Üçüncü alt bölümde ise, akış kaynamada basınç düşümü karakteristikleri incelenmiştir. Son bölümde, deneysel verileri kullanarak, mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi için yüzey pürüzlülüğü ve yüzey artırım parametrelerini de içeren özgün bir bağıntı sunulmuş ve bu bağıntının deneysel verileri tahmin etme başarısı irdelenmiştir.

### 4.1. Akış Görüntüleme Sonuçları

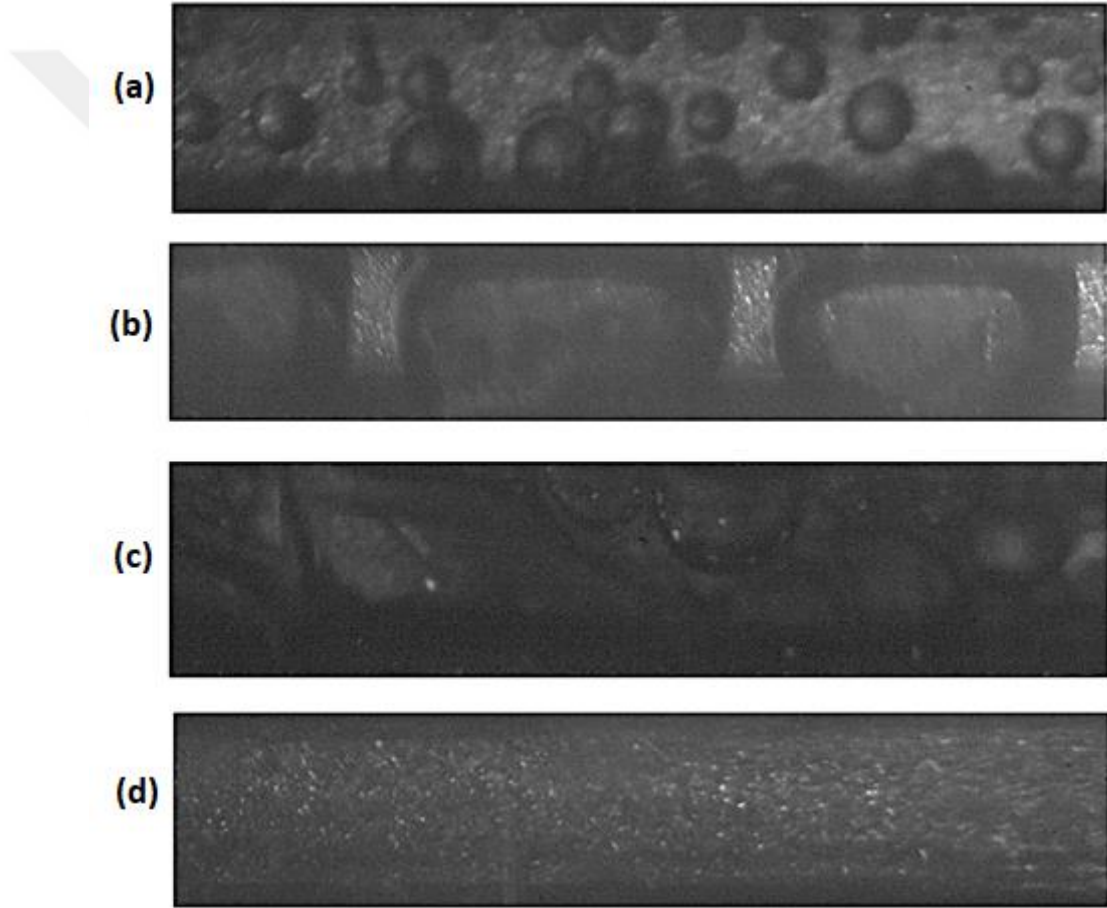
#### 4.1.1. Temel akış desenleri

Mikrokanallarda akış kaynamada görülen akış desenleri ısı transfer mekanizması ve basınç düşümü karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu kısımda, farklı deney şartlarında gözlemlenen akış rejimleri tartışılmıştır. Bu çalışmada doymuş akış kaynama özellikleri incelendiğinden aksi belirtilmediği sürece görüntüler kanalın çıkış bölgesinden alınmıştır. Ayrıca, sunulan tüm görüntülerde akış yönü soldan sağa doğrudur.

Literatürde, kaynamalı akış desenleri için yapılmış genel tanımlamalar mevcut değildir. Farklı araştırmacılar tarafından, farklı akış rejimleri rapor edilmekle beraber benzer akış desenleri farklı şekilde isimlendirilmiştir. Bu çalışmada, deneylerde temel olarak, kabarcıklı akış, tıkaç akış ve halkasal akış rejimleri gözlenmiştir. Deney parametrelerine bağlı olarak bazı deneylerde çalkantılı akış rejimi gözlenmiştir. Benzer durum literatürde farklı araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. Kandlikar (2002a) mikrokanallarda yaygın olarak görülen akış desenlerinin kabarcıklı akış, tıkaç akış ve halkasal akış olduğunu ifade etmiştir. Diğer yandan, Sobierska et al. (2006) çalkantılı akış deseninin mikrokanallarda önemini kaybettiğini, ana akış desenlerinin kabarcıklı, tıkaç ve halkasal akışlar olduğunu belirtmiştir. Kavram ve terim karmaşasını engellemek için, ilk olarak, bu çalışmada gözlemlenen karakteristik akış desenleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Kabarcıklı akış rejiminde (Şekil 4.1a), mikrokanal tabanından uygulanan ısı akısının etkisiyle kanal yüzeylerinde oluşan buhar kabarcıkları yüzeyden ayrılarak sıvı içerisinde akış doğrultusunda hareket eder. Bu akış rejiminde, kabarcık büyüklüğü ve şekli kütleli akı ve ısı akısı değerlerine göre farklı olsa da karakteristik olarak kabarcık boyutları kanal boyutundan küçüktür. Artan ısı akısıyla birlikte, yüzeyde kabarcık oluşum frekansı ve büyüme hızı artar. Artan büyüme hızı sonucu, kabarcık büyüklüğü yüzeyden ayrılmadan kanal boyutlarına ulaşır. Ayrıca, çevredeki diğer kabarcıklarla birleşerek kanal boyunca uzun kabarcıklı akış desenini oluştururlar. Mikrokanal boyutlarıyla sınırlandırılmış uzun kabarcıklı yapıların sıvı tıkaçlarıyla ayrıldığı bu akış rejimi tıkaç

akış rejimi olarak adlandırılır (Şekil 4.1b). Kanal boyutları ve çalışma şartlarına bağlı olarak sınırlandırılmış kabarcıkların uzunluğu değişebilir. Mikrokanal tabanından uygulanan ısı akısının daha da arttırılmasıyla, yüzeyde hızlı bir şekilde oluşan büyük kabarcıklar tıkaç akıştaki sınırlandırılmış kabarcıkları rahatsız eder. Bütünlüğünü kaybeden bu yapılar, kanal içerisinde düzensiz şekilli buhar paketlerinin oluşturduğu akış desenini oluşturur. Düzensiz şekilli buhar yığınlarının kanal içerisinde gelişigüzel hareket etmeleri, birbirleri ve kanal yüzeyindeki sıvı filmi ve yeni oluşan kabarcıklarla etkileşimi karmaşık ve kararsız bir akış rejimine yol açar. Bu akış rejimine çalkantılı akış denir (Şekil 4.1c).



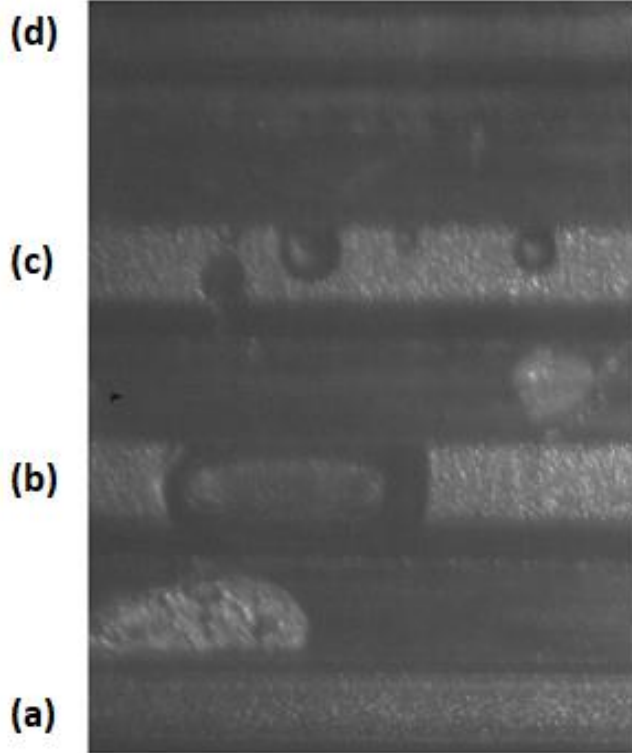
Şekil 4.1. Akış kaynamada görülen temel akış desenleri ( $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ ): (a) Kabarcıklı akış (b) Tıkaç akış/sınırlandırılmış kabarcıklı akış (c) Çalkantılı akış (d) Halkasal akış.

Yüksek ısı akılarında, artan buharlaşma momentum kuvvetinin etkisiyle kanal yüzeylerindeki kabarcık oluşumu bastırılabilir. Bu durumda kanal içinde, kanal yüzeyi ince sıvı film tabakası ile kaplı iken, kanal merkezinde buhar akışının olduğu halkasal akış deseni oluşur (Şekil 4.1d). Artan ısı akısıyla birlikte yüzeydeki sıvı filmi

buharlaşarak incelikir. Bazı durumlarda sıvı tabakası tamamen buharlaşarak kanal içerisinde tek fazlı buhar akışının görülmesine yol açar. Bu çalışmada, düşük kütleli akı ve yüksek ısı akısı değerlerinde periyodik akış sırasında tek fazlı buhar akışı görülmüştür (Şekil 4.2). Kuruma olarak adlandırılan bu olay kritik ısı akısına yaklaşıldığının bir göstergesi olup, yüzeyde ani sıcaklık artışlarına neden olacağından kaçınılması gereken bir durumdur. Ancak, çoklu mikrokanallı ısı alıcılarda, kanallar arası etkileşim, aynı anda komşu kanallarda farklı akış rejimlerinin oluşmasına yol açtığından kritik ısı akısının görülmesini engeller. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi bir kanalda tek fazlı buhar akışı söz konusu iken komşu kanallarda kabarcıklı akış, tıkaç akış ve halkasal akış desenleri görülmektedir.

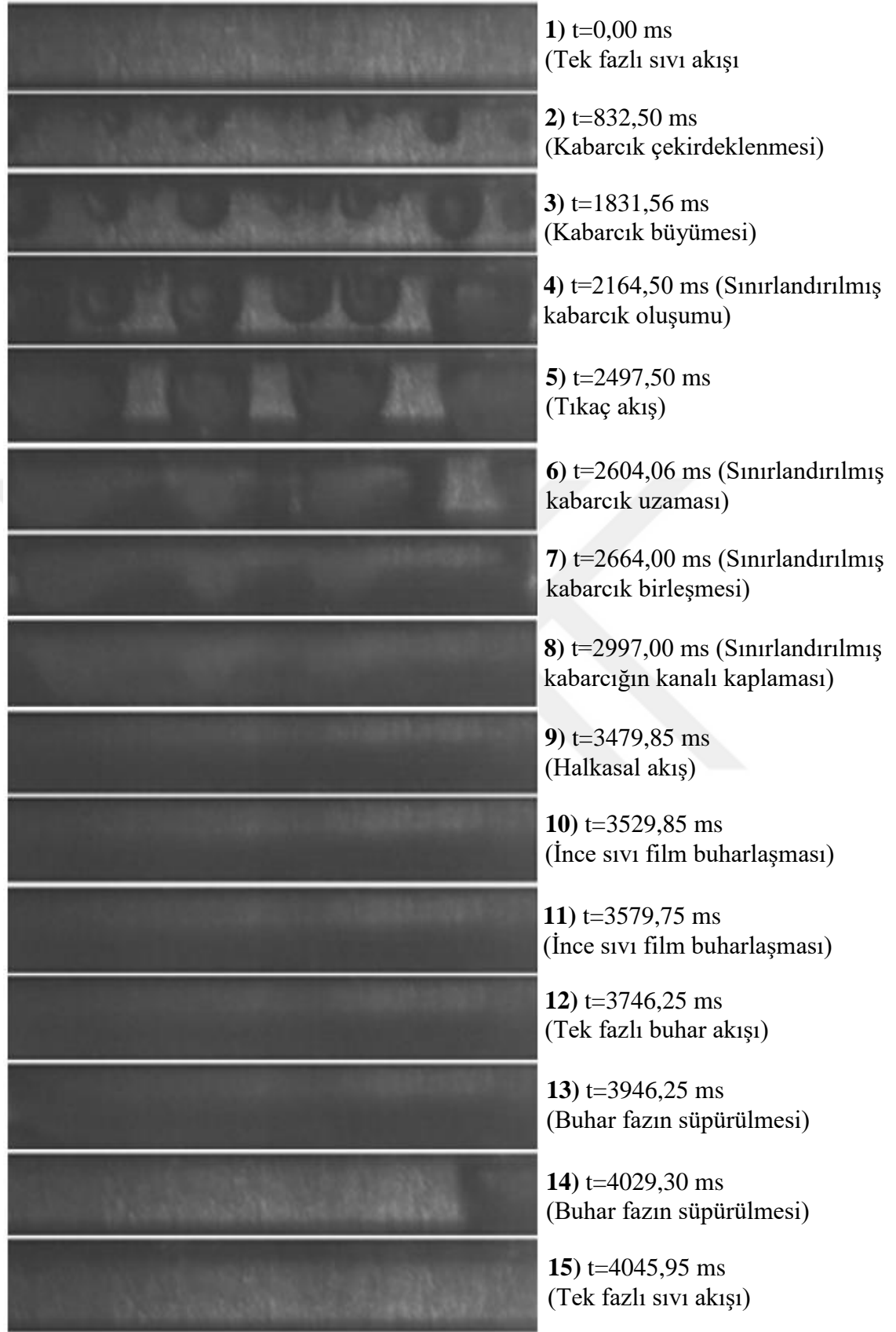


Şekil 4.2. Tek fazlı buhar akışı ( $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $q_w=150 \text{ kW/m}^2$ ,  $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ ).



Şekil 4.3. Mikrokanallı ısı alıcılarda görülen çoklu akış desenleri ( $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $q_w=100 \text{ kW/m}^2$ ,  $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ ): (a) Halkasal akış (b) Tıkaç akış (c) Kabarcıklı akış (d) Tek fazlı buhar akışı.

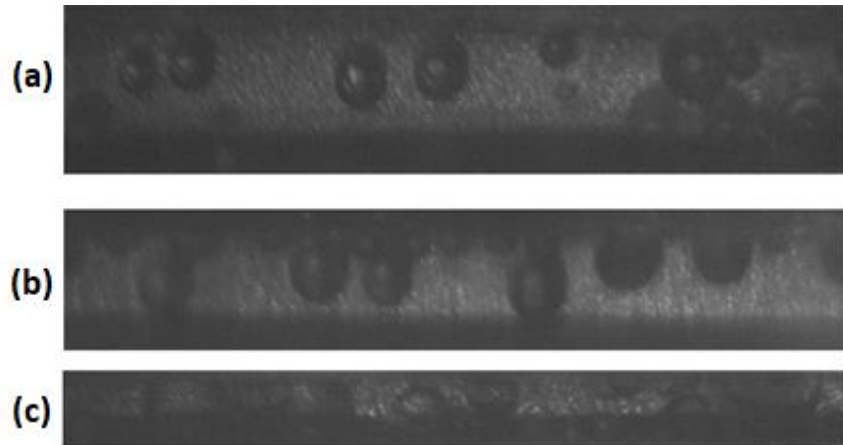
Literatürde, Harirchian and Garimella (2010), Balasubramanian et al. (2013) Markal et al. (2016a), Özdemir et al. (2020) gibi pek çok yazar tarafından, yukarıda verilen akış desenlerinin mikrokanallarda akış kaynamada periyodik olarak tekrarladığı ifade edilmiştir. Periyodik akış yapısı kanal boyutları ve çalışma parametrelerine bağlıdır. Bu çalışmada, özellikle en düşük kütleli akı deneylerinde, kararsız sanki periyodik akış yapısı gözlenmiştir. Şekil 4.4'te  $D_h = 473 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda,  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı değeri ve  $q_w=150 \text{ kW/m}^2$  ısı akısı değeri için akış desenlerinin periyodik gelişimi gösterilmiştir. Periyodik akış rejimi, ıslatma periyodu, sınırlandırılmış kabarcık oluşum periyodu, sıvı film buharlaşma periyodu ve kuruma periyodu olmak üzere dört farklı aşamaya ayrılabilir. Şekil 4.4'te verilen periyodik akış rejiminde, kanalın tamamen sıvı ile dolu olduğu an  $t=0.00 \text{ ms}$  alınarak periyodik akış deseninin oluşumu incelenmiştir. Kanal yüzeylerinde oluşmaya başlayan kabarcıklar uygulanan ısı akısının etkisiyle büyüyerek  $t=2164 \text{ ms}$  sonra kanal boyutlarına ulaşmıştır. Sınırlandırılmış kabarcıklar birleşerek  $t=2497 \text{ ms}$ 'de kanal içinde sıvı bölgelerinin buhar fazı ile ayrıldığı tıkaç akış rejiminin görülmesine yol açmıştır. Tıkaç akış rejiminde, kabarcıklar kanal boyunca büyür ve uzatılmış kabarcıklı akış rejimi oluşur. Bir süre sonra ( $t=3479 \text{ ms}$ ) uzatılmış kabarcıklar kanalı kaplayarak halkasal akışa dönüşür. Halkasal akış rejiminde, sıvı-buhar ara yüzeyinde meydana gelen buharlaşma sonucu yüzeydeki sıvı film kalınlığı azalır ve tamamen buharlaşarak  $t=3746 \text{ ms}$ 'den itibaren kanal içinde tek fazlı buhar akışının görülmesiyle sonuçlanır. Kanala giren taze akışkanın atalet kuvveti etkisiyle kanal içindeki buhar  $t=3946 \text{ ms}$  sonra kanal çıkışına doğru süpürülmeye başlanır. Yaklaşık  $100 \text{ ms}$  süren süpürme işleminden sonra  $t=4046 \text{ ms}$ 'de buhar fazı kanaldan tamamen uzaklaştırılır ve kanal içinde tek fazlı sıvı akış rejimi görülür.



Şekil 4.4. Periyodik akış rejimi ( $G=100$  kg/m<sup>2</sup>s,  $q_w=150$  kW/m<sup>2</sup>,  $D_h=473$   $\mu$ m).

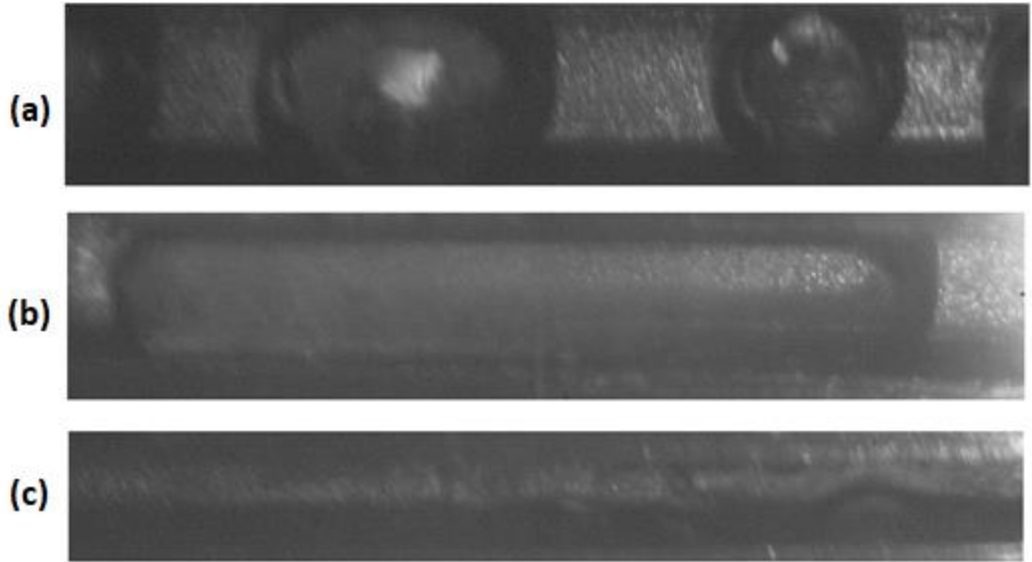
#### 4.1.2. Hidrolik çap etkisi

Şekil 4.5'te,  $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı ve  $q'_e=62 \text{ kW/m}^2$  ısı akısı değerinde farklı hidrolik çaplı kanallarda görülen akış desenleri sunulmuştur.  $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda (Şekil 4.5a), düşük ısı akısı değerlerinde, kabarcıklı akış rejimi görülmüştür. Kabarcık büyüme hızının düşük olması ve kanala giren taze akışın ataleti nedeniyle kabarcıklar kanal boyutlarına ulaşmadan yüzeyden ayrılmaktadırlar. Böylelikle, kanal kesitini dolduramayan kabarcıklar sıvı faz içerisinde birbirinden bağımsız hareket etmektedirler.  $D_h=473 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanallarda ise (Şekil 4.5b), düşük ısı akılarında, kabarcıklı akış rejimi görülmesine karşın, yüzeylerde oluşan kabarcıklar, kanal genişliği azaldığından, kanal içerisinde daha fazla yer kaplamaktadırlar. Bu durum kabarcıkların, yüzeyden ayrılmadan önce birbirleriyle birleşerek kanal kesitini doldurma imkânı sağlamaktadır. Böylelikle, kabarcıklı akış rejimini kısa sürede tıkaç akışa dönüşme eğilimindedir.  $D_h=360 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanallarda (Şekil 4.5c), akış deseni yapısı diğer hidrolik çaplı kanallardan farklıdır. En küçük kanal genişliğine sahip bu kanallarda, sürdürülebilir bir kabarcıklı akış rejimi görülemez. Özellikle, kaynama başlangıcında, kabarcıklı akış yerini hemen tıkaç akışa bırakmıştır. Kanal yüzeylerinde oluşan kabarcıklar, kanal içerisinde sürüklenme yerine, birbiriyle birleşerek tıkaç akış desenini oluşturma eğilimi göstermişlerdir. Bu durum, sınırlama etkilerinin baskın hale geldiğinin bir göstergesidir. Benzer gözlemler, Harircihan and Garimella (2009) tarafından da yapılmıştır. Yazarlar,  $400 \text{ }\mu\text{m}$  altındaki hidrolik çaplı mikrokanallarda, kabarcıklı akışın oluşmadığını, bunun yerine kaynamanın ilk aşamalarında tıkaç akış deseninin oluştuğunu ifade etmişlerdir.



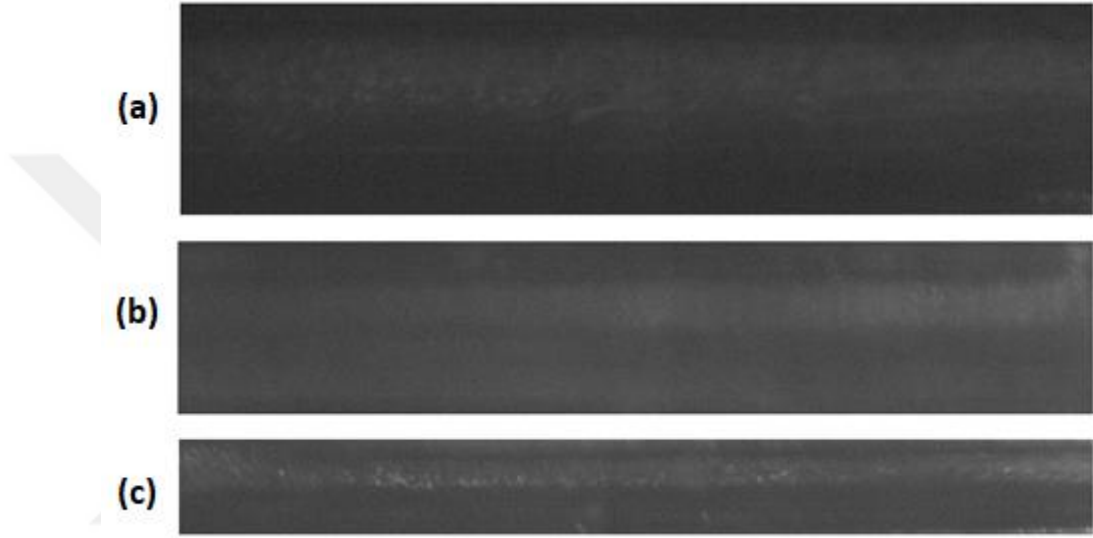
Şekil 4.5.  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $q'_e=62 \text{ kW/m}^2$  için farklı hidrolik çaplı kanallarda gözlenen akış desenleri: (a)  $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$  (b)  $473 \text{ }\mu\text{m}$  (c)  $360 \text{ }\mu\text{m}$ .

Hidrolik çapın akış desenlerine olan etkisi için bir başka örnek Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.6,  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $q'_e=100 \text{ kW/m}^2$  değerlerinde, farklı hidrolik çaplı kanallara ait akış desenlerini göstermektedir. Bu çalışma şartlarında,  $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda tıkaç akış rejimi hâkimdir. Artan ısı akısıyla beraber, münferit kabarcıkların birleşerek daha büyük yapıda kabarcıklar oluşturduğu görülmüştür. Kanal kesit büyüklüğüne ulaşan kabarcıkların büyümesi yüzeyler tarafından sınırlandırılır. Diğer yandan, sınırlandırılmış kabarcıklar yüzeyde kabarcık oluşumunu bastırır. Bu durumda, sınırlandırılmış kabarcık ile yüzeydeki sıvı tabaka arasında buharlaşma meydana gelir. Sıvı film buharlaşmasının etkisiyle sınırlandırılmış kabarcık kanal boyunca büyümeye devam eder ve uzun kabarcıklı yapıya dönüşür. Böylelikle, mikrokanallardaki karakteristik akış yapısı olan tıkaç akış rejimi elde edilmiş olur.  $D_h=473 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda ise tıkaç akış yapısı olmakla birlikte, sınırlandırılmış kabarcıklı yapıların daha uzun olduğu görülmüştür. Ayrıca, kanal girişine doğru büyümeye çalışan sınırlandırılmış kabarcık ile kanala giren taze akışkan arasındaki etkileşim sıvı-buhar ara yüzeyinin sürekli yer değiştirmesine neden olmuştur.  $D_h=360 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanalda bu ısı akısında çalkantılı akış rejimi gözlenmiştir. Yüzeydeki sıvı film tabakası ile buhar fazı arasındaki ara yüzey dalgalı bir yapıya sahiptir. Ayrıca sıvı film tabakasında, kabarcıkların olduğu yerlerde süreksizliklerin olduğu görülmüştür.



Şekil 4.6.  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $q'_e=100 \text{ kW/m}^2$  için farklı hidrolik çaplı kanallarda gözlenen akış desenleri (a)  $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$ , (b)  $473 \text{ }\mu\text{m}$ , (c)  $360 \text{ }\mu\text{m}$ .

Yüksek ısı akısı değerlerinde, her üç hidrolik çaplı mikrokanallarda baskın olarak halka akış rejimi görülmüştür. Şekil 4.7’de  $q'_e=155 \text{ W/m}^2$  ısı akısında farklı hidrolik çaplara ait akış desenleri gösterilmiştir. Bu durumda, kanallarda yüzeyin sıvı film ile kaplandığı görülmüştür. Hidrolik çap azaldıkça yüzeydeki sıvı filmin daha düzgün hale geldiği görülmüştür. Bu durum, kanal boyutları arttıkça yüzey gerilme kuvvetlerinin artmasından kaynaklanabilir. Kanal boyutları küçüldükçe yüzey gerilme kuvveti  $D_h^2$  ile doğrusal olarak arttığı Miner et al. (2014) tarafından ifade edilmiştir.



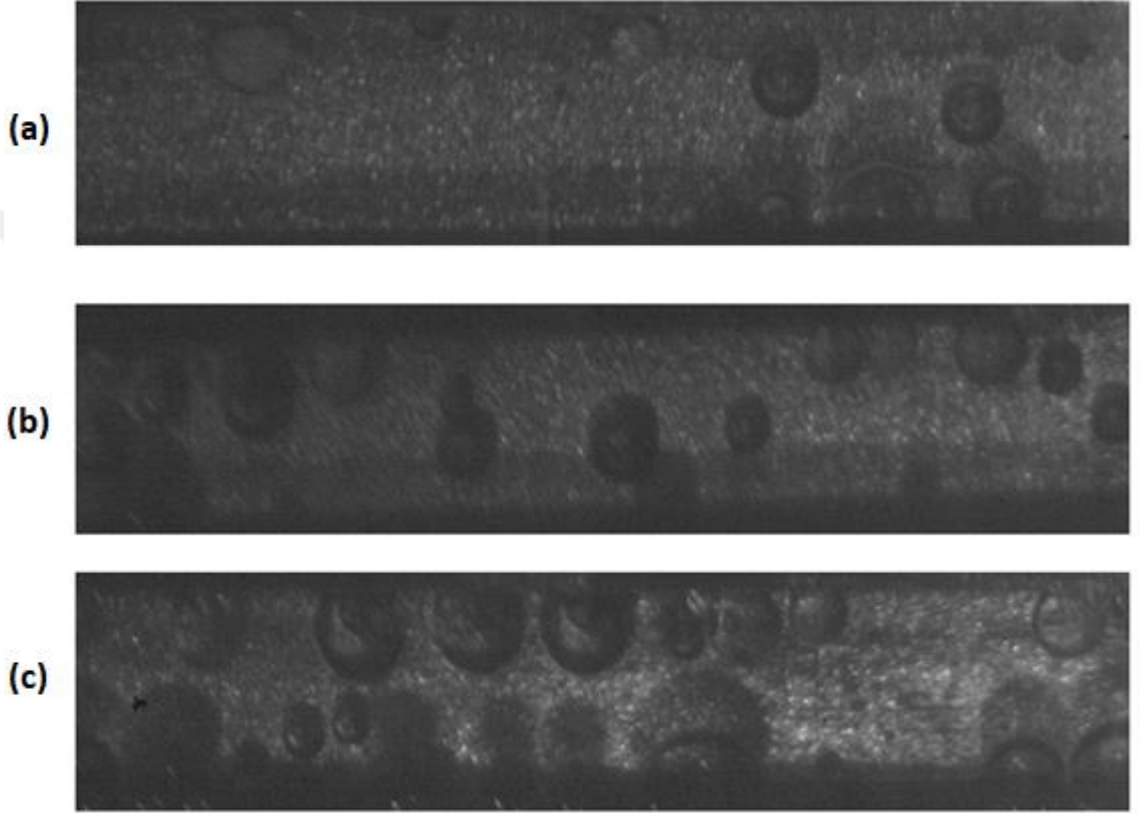
Şekil 4.7.  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $q'_e=155 \text{ kW/m}^2$  için farklı hidrolik çaplı kanallarda gözlenen akış desenleri: (a)  $D_h=547 \text{ µm}$  (b)  $473 \text{ µm}$  (c)  $360 \text{ µm}$ .

Özet olarak bu çalışmada, hidrolik çap azaldıkça, akış rejimleri arasındaki geçişin (kabarcıklı/tıkaç ve tıkaç/halkasal) daha düşük ısı akılarında gerçekleştiği görülmüştür. En düşük hidrolik çaplı kanalda kabarcık oluşumu bastırılmış olup net bir kabarcıklı akış rejimi oluşmamıştır.

#### 4.1.3. Isı akısı etkisi

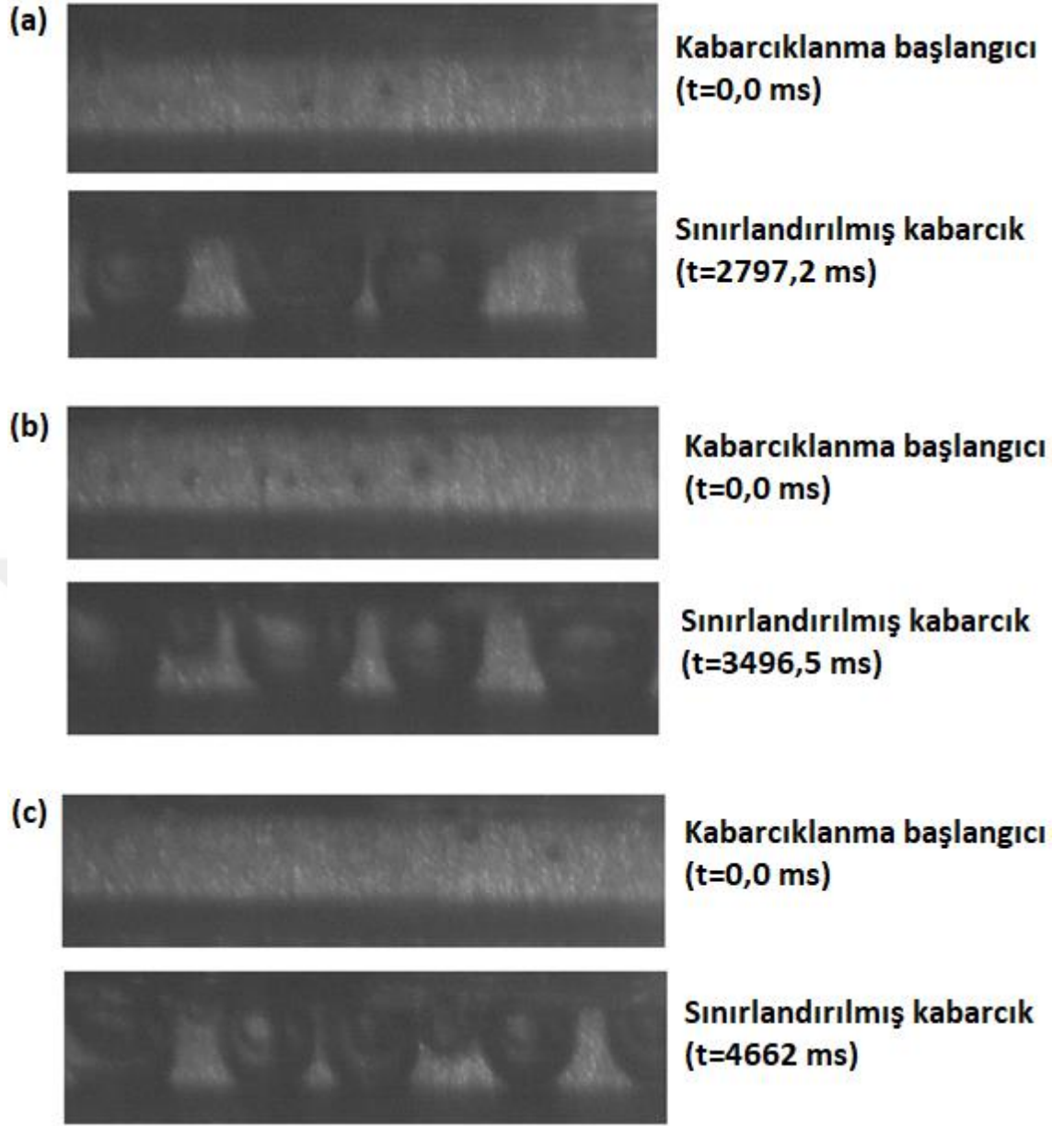
Farklı hidrolik çaplı kanallarda benzer akış rejimleri görülmesine rağmen, oluşan akış desenlerinin biçimini belirleyen önemli parametrelerden birisi ısı akısı olmuştur. Genel olarak, artan ısı akısı ile akış rejimi kabarcıklı akıştan, tıkaç akışa, tıkaç akıştan halkalı akışa doğru değişmiştir. Ancak, ısı akısının her bir akış rejim üzerindeki etkisi farklı olmuştur. Şekil 4.8’de  $D_h= 547 \text{ µm}$  hidrolik çaplı kanalda,  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli

akı değeri için, 40-50 kW/m<sup>2</sup> ısı akısı değerlerinde kabarcık oluşumu gösterilmiştir. Artan ısı akısıyla beraber yüzeydeki kabarcık oluşum bölgeleri artmıştır. Bu durum artan yüzey sıcaklığına bağlı olarak aktif kabarcık oluşum bölgelerinin artmasıyla açıklanabilir. Diğer yandan, artan ısı akısının başlangıçta yüzeyde oluşmaya başlayan kabarcık boyutu üzerinde etkisi belirsizdir. Benzer durum, Tibirica and Ribatski (2014) tarafından da gözlenmiştir.



Şekil 4.8.  $D_h=547 \mu\text{m}$  kanalda  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı ısı akısı değerlerinde kabarcık oluşumu: (a)  $q_w= 40 \text{ kW/m}^2$  (b)  $q_w= 45 \text{ kW/m}^2$  (c)  $q_w= 50 \text{ kW/m}^2$ .

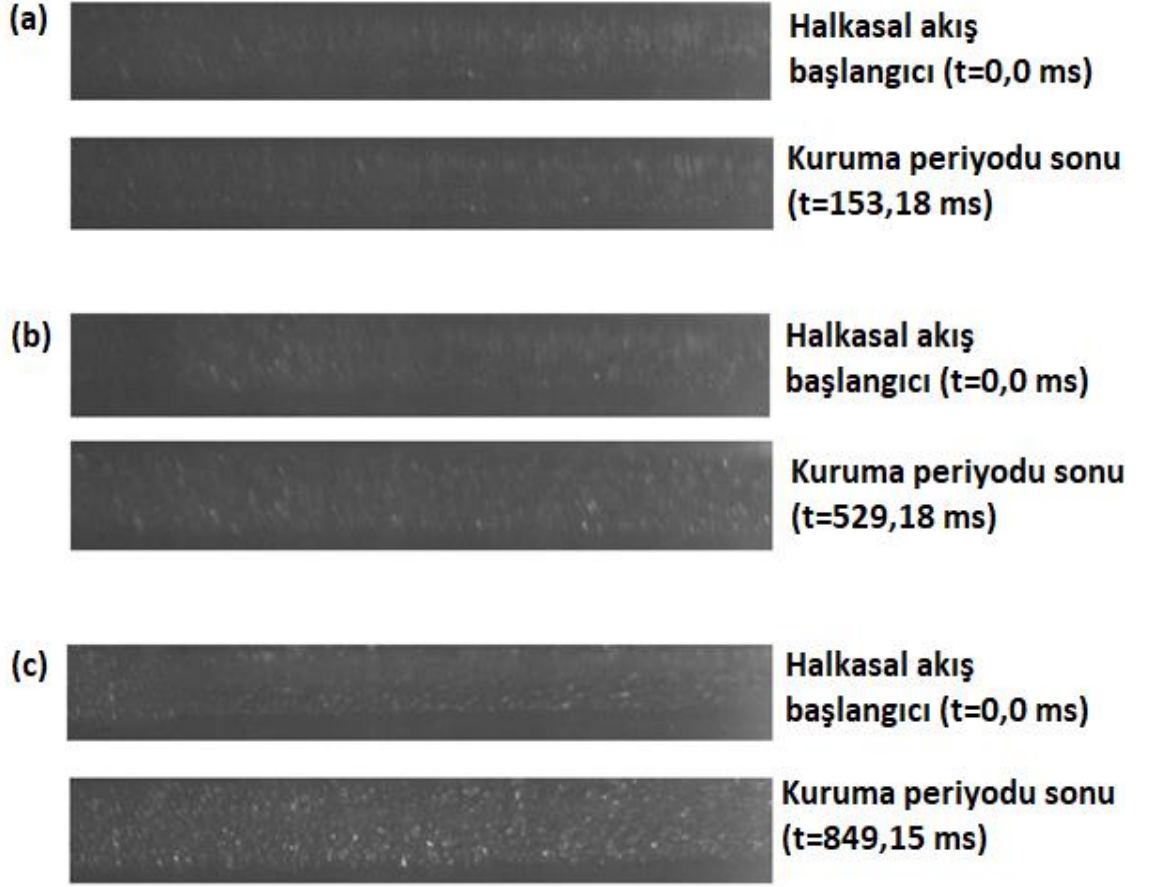
Kabarcıklı akış rejiminde, ısı akısındaki artışla beraber kabarcıkların daha kısa sürede kanal boyutlarına ulaştığı gözlenmiştir. Şekil 4.9’da,  $D_h=473 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanallarda,  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı değerinde farklı ısı akısı değerlerinde tıkaç akışa kadar kabarcık oluşum süreci verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi,  $Q=70\text{W}$ ’ta kabarcıklanma başlangıcından sınırlandırılmış kabarcık oluşumuna kadar geçen süre 2797,2 ms iken, bu değer 60W ve 50W için sırasıyla 3496,5 ms ve 4662 ms’dir. Bu değişim, artan ısıl gücün kabarcık büyüme hızını arttırdığının bir göstergesidir.



Şekil 4.9.  $D_h=473 \mu\text{m}$  kanalda  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı ısı güç değerleri için tıkaç akış oluşum süresi (a)  $Q=70\text{W}$  (b)  $60\text{W}$  (c)  $50\text{W}$ .

Halkasal akış rejiminde, merkezde akan buhar fazı ile yüzeydeki sıvı film ara yüzeyindeki buharlaşma hızı artan ısı akısı ile artmıştır. Sıvı film hızla buharlaşarak, kanal içinde, kuruma görülmüştür. Şekil 4.10'da,  $D_h=473 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanallarda,  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı ısı akıları için halka akış başlangıcı ile kuruma periyodu sonu arasındaki süreler gösterilmiştir.  $Q=80\text{W}$  için bu periyod  $153,18 \text{ ms}$  iken halka akış  $Q=100\text{W}$  için  $849,15 \text{ ms}$  olarak ölçülmüştür. Bu durum, kuruma periyodunun ısı akısındaki artışla arttığını göstermektedir. Isı akısının artması, hızlı buharlaşmaya neden olarak buharlaşma momentum kuvvetinin artmasına yol açmıştır. Artan buharlaşma

momentumu, kanala gelen taze sıvının buhar fazını kanal dışına sürükleyip kanalın tekrar sıvı ile dolması için geçen sürenin artmasına yol açmıştır.



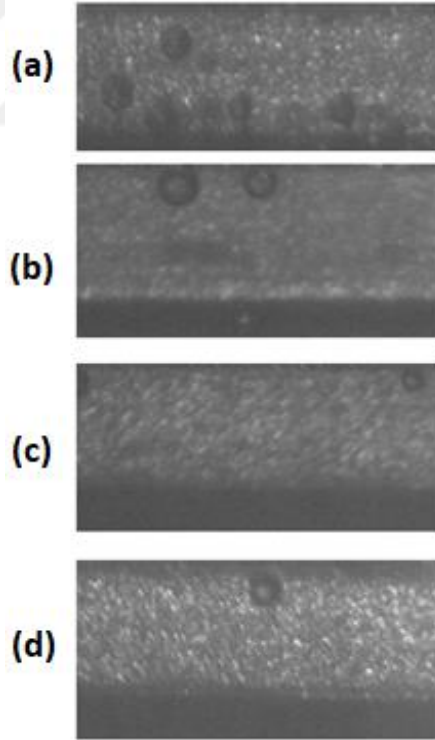
Şekil 4.10.  $D_n=473 \mu\text{m}$  kanalda  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı ısı güç değerleri için halka akış-kuruma periyodu: (a)  $Q=80\text{W}$  (b)  $90\text{W}$  (c)  $100\text{W}$ .

Tıkaç akış rejiminde, artan ısı akısı sınırlandırılmış kabarcığın büyümesini etkilediği literatürde ifade edilmiştir. Yin et al. (2014), artan ısı akısının sınırlandırılmış kabarcığın büyümesini ilk aşamada arttırırken daha sonra herhangi bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Bu duruma, kabarcığın çevresindeki ince sıvı filmdeki buharlaşma ve kabacık menisküs ara yüzeyinde meydana gelen yoğuşma arasındaki dengenin yol açtığı ifade edilmiştir. Bu çalışmada, çoklu mikrokanallar arasındaki etkileşim ve sınırlandırılmış kabarcığın diğer kabarcıklarla birleşerek uzaması böyle bir durum tespiti yapılmasını zorlaştırmıştır. Ancak artan ısı akısının tıkaç akıştan halka akışa geçiş süresini arttırdığı gözlenmiştir.

##### 4.1.4. Kütle akısı etkisi

Bu çalışmada, deneyler 100, 200, 300 ve 400 kg/m<sup>2</sup>s olmak üzere dört farklı kütleli akı değerinde gerçekleştirilmiştir. Isı akısında olduğu gibi, artan ya da azalan kütleli akının akış desenlerini değiştirdiği görülmüştür.

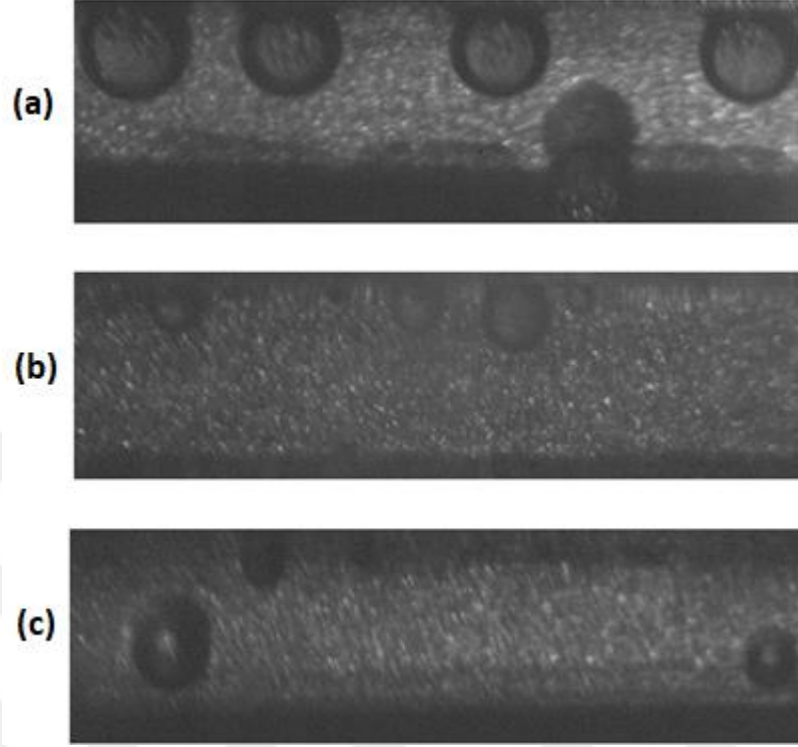
Şekil 4.11’de  $D_h = 473 \mu\text{m}$  için, dört farklı kütleli akı değeri için, kaynama başlangıcındaki akış deseni gösterilmiştir. Kütleli akı arttıkça kaynamanın daha yüksek ısı akılarında meydana geldiği görülmüştür.  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı için kabarcık oluşumu için gerekli ısı akısı 42,5 kW/m<sup>2</sup> iken,  $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı için bu değer 51,9 kW/m<sup>2</sup>’dir. Ayrıca, kütleli akı arttıkça kaynama başlangıcındaki kabarcıklanma bölgelerinin arttığı görülmüştür. Özellikle, 100 kg/m<sup>2</sup>s kütleli akısında aynı alan içerisinde daha fazla kabarcık oluşum bölgesi olması dikkat çekmektedir. Kütleli akı arttıkça, artan sıvı atalet kuvveti etkisiyle kabarcık oluşumu bastırılmaktadır.



Şekil 4.11.  $D_h=473 \mu\text{m}$  mikrokanallarda kütleli akının kabarcık oluşumuna etkisi: (a) 100 kg/m<sup>2</sup>s (b) 200 kg/m<sup>2</sup>s (c) 300 kg/m<sup>2</sup>s (d) 400 kg/m<sup>2</sup>s.

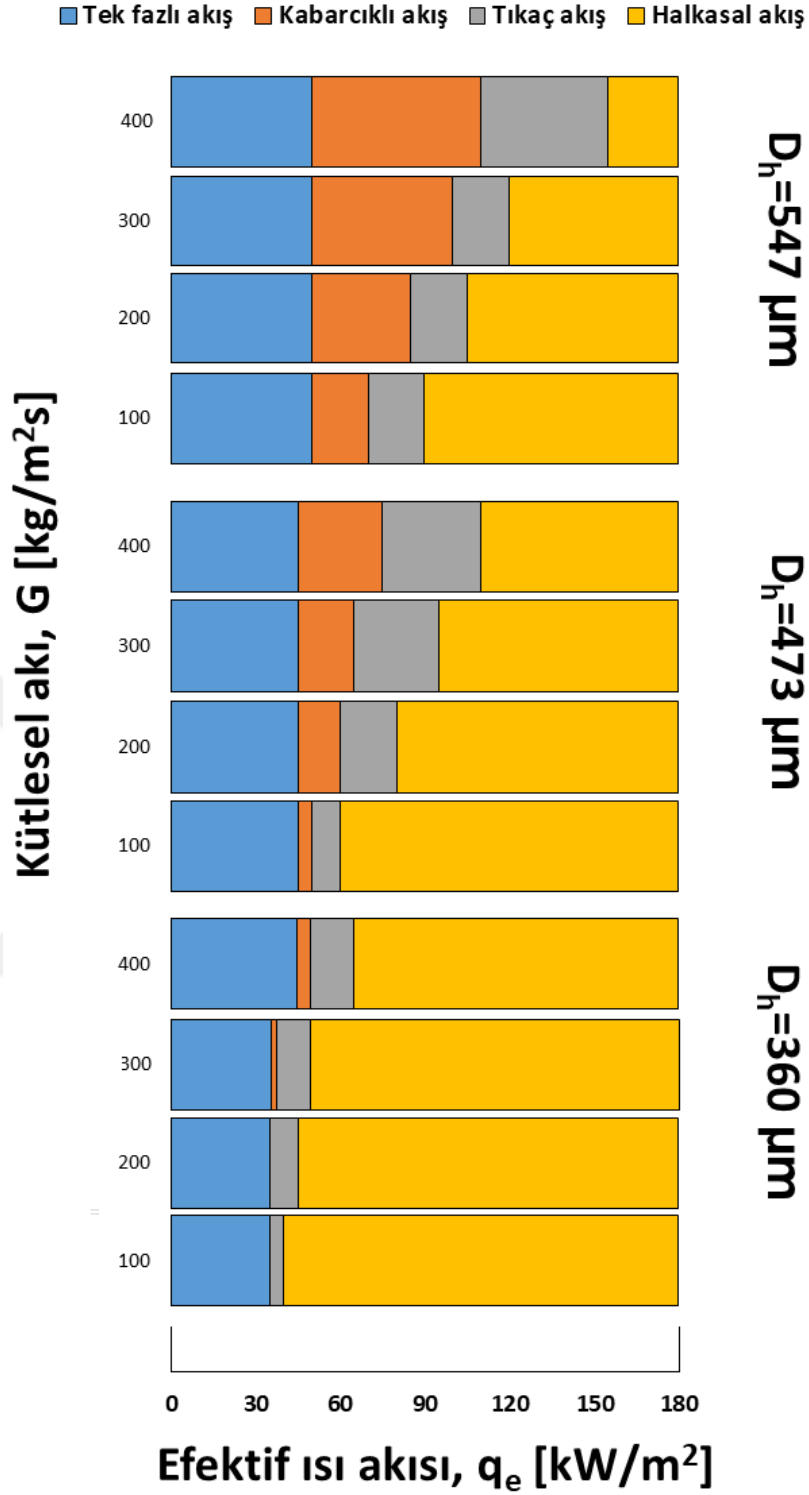
$G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akısında, yüzeyden ayrılan kabarcıkların boyutu, diğer kütleli akılara kıyasla daha büyüktür (Şekil 4.12). Mikrokanal içerisinde sıvının artan

ataleti kabarcıkların yüzeyden erken ayrılmasına; dolayısıyla daha küçük boyutlu olmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.12.  $D_h=473 \mu\text{m}$  mikrokanallarda farklı kütleli akı değerleri için yüzeyden ayrılmadan önceki kabarcık boyutları (a)  $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (b)  $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (c)  $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Kütleli akının her bir akış rejimine etkisi farklı olmuştur. Kütleli akı arttıkça kabarcıklı akış rejim periyodu uzamıştır. Diğer bir deyişle artan kütleli akı ile beraber tıkaç akışın görüldüğü ısı akısı değeri artmıştır. Bu durum, artan kütleli akının kabarcık büyüme hızını azaltmasından kaynaklanmaktadır. Diğer yandan, artan kütleli akı ile birlikte tıkaç akışın görüldüğü ısı akısı aralığı azalmıştır. Akış görüntüleme, 300 ve  $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı değerlerinde,  $D_h=543 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanallar içerisinde halka akış rejiminin görünümü yüksek ısı akılarında oluşmuştur. Özetlemek gerekirse, hidrolik çapla birlikte, akış desenlerinin oluşumunda hem ısı akısı hem de kütleli akı birlikte etkili olmaktadır. Şekil 4.13'te farklı hidrolik çaplı kanallarda geniş bir ısı akısı ve kütleli akı değeri için gözlenen temel akış desenleri verilmiştir.



Şekil 4.13. Kütle akısı, hidrolik çap ve ısı akısına bağlı olarak oluşan akış desenleri.

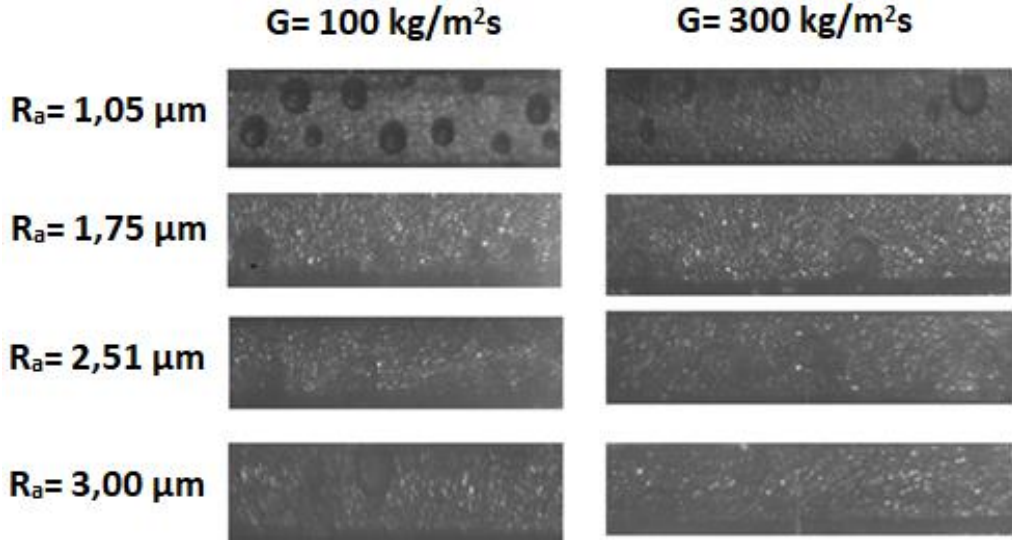
Mikrokanallarda akış kaynama sırasında görülen akış desenlerinin bazı durumlarda periyodik özellik gösterdiği daha önce belirtilmiştir. Bu çalışmada  $G=100$  ve  $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  akış debilerinde periyodik akış yapısı gözlenmiştir. Yüksek akış hızlarında periyodik akış yapısı gözlenmemiştir. Bu durum, Lee et al. (2010) tarafından kanal

girişine doğru sınırlandırılmış kabarcığın büyümesini sağlayan buharlaşma momentum kuvvetinin yüksek kütleli akılarda giren sıvının atalet kuvvetinden daha az olması ile açıklanmıştır. Benzer durum, diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir. Markal et al. (2016a)  $G=151-324 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı aralığında, Hetsroni et al. (2006)  $G=32-340 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı aralığında periyodik akış yapısının oluştuğunu ifade etmişlerdir.

##### 4.1.5. Yüzey pürüzlülüğü etkisi

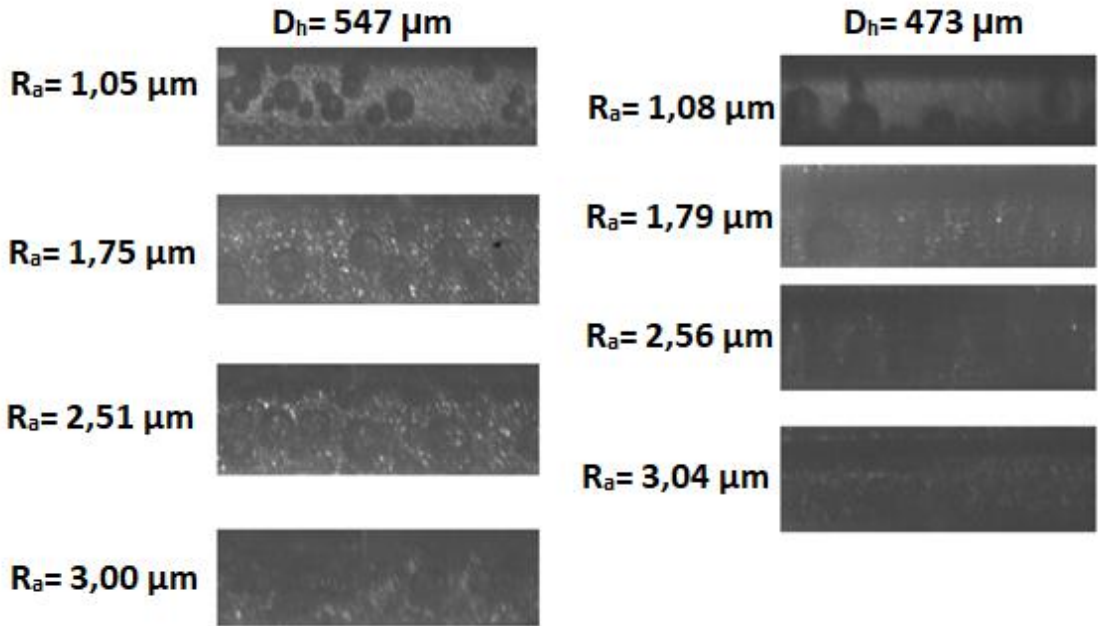
Kaynamalı akışta yüzey pürüzlülüğünün etkisi olabileceği birçok araştırmacı tarafından ifade edilse de bu konuda çok az sayıda çalışma mevcuttur. Özellikle havuz kaynamada, kaynama başlangıcında yüzey pürüzlülüğünün etkili olduğu ifade edilmiştir. Çünkü, kaynama ilk olarak yüzeydeki pürüzlülük bölgelerinde başlamaktadır. Pürüzlülükler, kabarcık çekirdeklenmesi için ortam oluşturmaktadırlar. Ancak, yüzeyde çok fazla pürüzlülük olması her zaman daha fazla kabarcıklanma olacağı anlamına gelmemektedir. Literatürde, test koşullarına bağlı olarak, kabarcıklanmanın meydana geldiği aktif çekirdeklenme aralığı tanımlanmıştır.

Şekil 4.14'te,  $D_h=547 \text{ }\mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanalda  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $G= 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı için, farklı yüzey pürüzlülük değerlerinde kabarcıklanma başlangıcında akış desenleri gösterilmiştir.  $R_a=1,05 \text{ }\mu\text{m}$  pürüzlülük değerine sahip kanallarda, kabarcık oluşumu kanal ortasında başlarken, diğer pürüzlülük değerlerine sahip kanallarda kabarcık oluşumu genellikle kanal yan yüzeylerinde başlamıştır. Pürüzlülük arttıkça, kabarcık boyutunun arttığı görülmüştür. Bu durum, pürüzlü yüzeylerde kabarcıklanma alanlarının fazla olması nedeniyle yüzeyde kabarcık birleşmesinin artmasından kaynaklanmaktadır. Kütleli akı arttıkça, kaynama başlangıcında görülen kabarcık boyutlarının azaldığı görülmüştür. Kanal içinde sıvı ataletinin artması yüzeyde oluşan kabarcıkların yüzeyden kısa sürede ayrılıp akış içerisinde sürüklenmesine yol açmıştır.  $R_a=1,05 \text{ }\mu\text{m}$  pürüzlülük değerine sahip kanallarda, kütleli akıdaki artışla beraber, kabarcık oluşumunun kanal ortasında değil de kanal yüzeylerinde başladığı görülmüştür. Bu durum kanal cidarlarındaki sıvı ataletinin düşük olmasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 4.14.  $D_h=547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanalda  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $G= 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı için, farklı yüzey pürüzlülük değerlerinde kabarcıklanma başlangıcında akış deseni.

$D_h=547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda artan ısı akısı ile birlikte, yüzeylerde kabarcık oluşumu ve kabarcık büyüklüğünün yüzey pürüzlülüğü ile arttığı gözlenmiştir.  $R_a=3,00 \mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip mikrokanallarda kabarcıklar mikrokanal genişliğine yakın boyutlara ulaşmıştır. (Şekil 4.15).  $D_h=473 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda ise kabarcık oluşumu ve boyutları ısı akısıyla beraber artmış ancak pürüzlülüğü yüksek kanallarda ( $R_a=3,04 \mu\text{m}$ ) kabarcık oluşumu azalmıştır.



Şekil 4.15.  $Q=100\text{W}$  ve  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı şartlarında farklı hidrolik çaplı mikrokanallarda yüzey pürüzlülüğünün kabarcıklı kaynamaya etkisi.

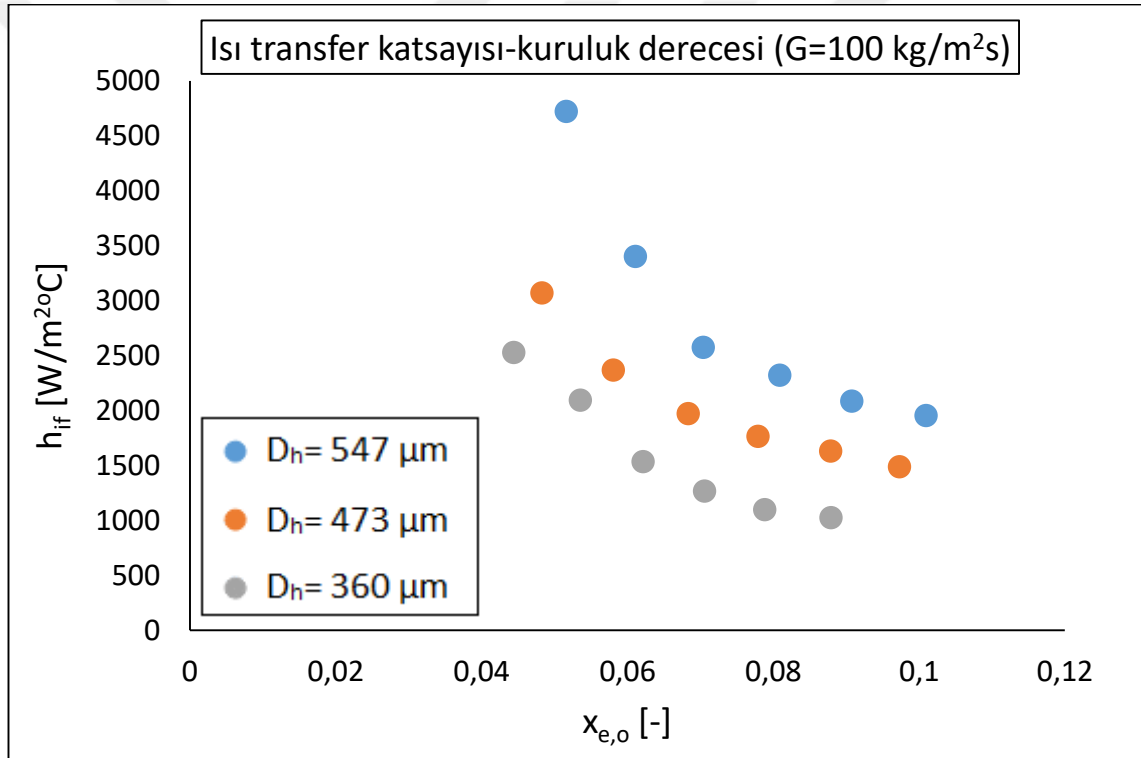
### 4.2. Akış Kaynama Isı Transfer Sonuçları

#### 4.2.1. Hidrolik çap etkisi

Şekil 4.16'da, iki fazlı kaynamalı akış ısı transfer katsayısının farklı hidrolik çaplara sahip mikrokanallarda kuruluk derecesi ile değişimi gösterilmiştir. İncelenen bütün hidrolik çap değerleri için, ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığı görülmektedir. Deneylede, kuruluk derecesi değerlerinin %10 ve altında kaldığı, kuruluk derecesinin %8'den büyük değerleri için ısı transfer katsayısındaki değişimin önemsiz olduğu görülmektedir. Benzer bir durum Mirmanto (2013) tarafından rapor edilmiştir. Düşük kuruluk derecesi değerlerinde, ısı transfer katsayısındaki değişimin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum, kabarcıklı kaynama ısı transfer mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir. Özellikle,  $D_h=547\mu\text{m}$ 'lik mikrokanallarda, kuruluk derecesinin yaklaşık %2 gibi az bir değişimiyle ısı transfer katsayısında meydana gelen %40'lık artış görülmektedir. Artan kuruluk derecesiyle birlikte, ısı transfer katsayısının kuruluk derecesine bağımlılığı azalmaktadır. Bu durum, mikrokanal içinde taşınımlı kaynama ısı transfer mekanizmasının etkin olduğu anlamına gelir. Elde edilen akış görüntüleme sonuçları bu durumu desteklemektedir. Küçük hidrolik çaplı mikrokanallarda ( $D_h=473\mu\text{m}$  ve  $360\mu\text{m}$ ), ısı transfer katsayısının kuruluk derecesi ile genel eğilim olarak azalmakla birlikte değişimin çok fazla olmadığı görülmüştür. Mikrokanal boyutlarının küçülmesi, kanal içerisinde hızlı bir şekilde sınırlandırılmış akış oluşumuna neden olarak, kabarcık oluşumunu engellemektedir. Böylelikle, yüksek ısı transfer katsayılarının elde edildiği kabarcıklı akış rejimi yerini taşınımlı kaynamaya bırakmaktadır.  $D_h=360\mu\text{m}$  kanallarda yapılan akış görüntüleri de bu durumu desteklemektedir.

Şekil 4.17'de, iki fazlı ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ile değişimi farklı hidrolik çaplı mikrokanallar için verilmiştir. Genel olarak her üç kanalda da düşük ısı akılarında daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmiştir. Isı transfer katsayısının artan ısı akısı ile azaldığı, yüksek ısı akısı değerlerinde ise ısı akısından bağımsız olduğu görülmüştür.  $D_h=360\mu\text{m}$  ve  $D_h=473\mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanallarda ısı transfer katsayısı, ısı akısıyla birlikte nispeten monotonik bir azalış göstermektedir.  $D_h=547\mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanalda düşük ısı akılarında, ısı transfer katsayısındaki azalma göze çarpmaktadır.

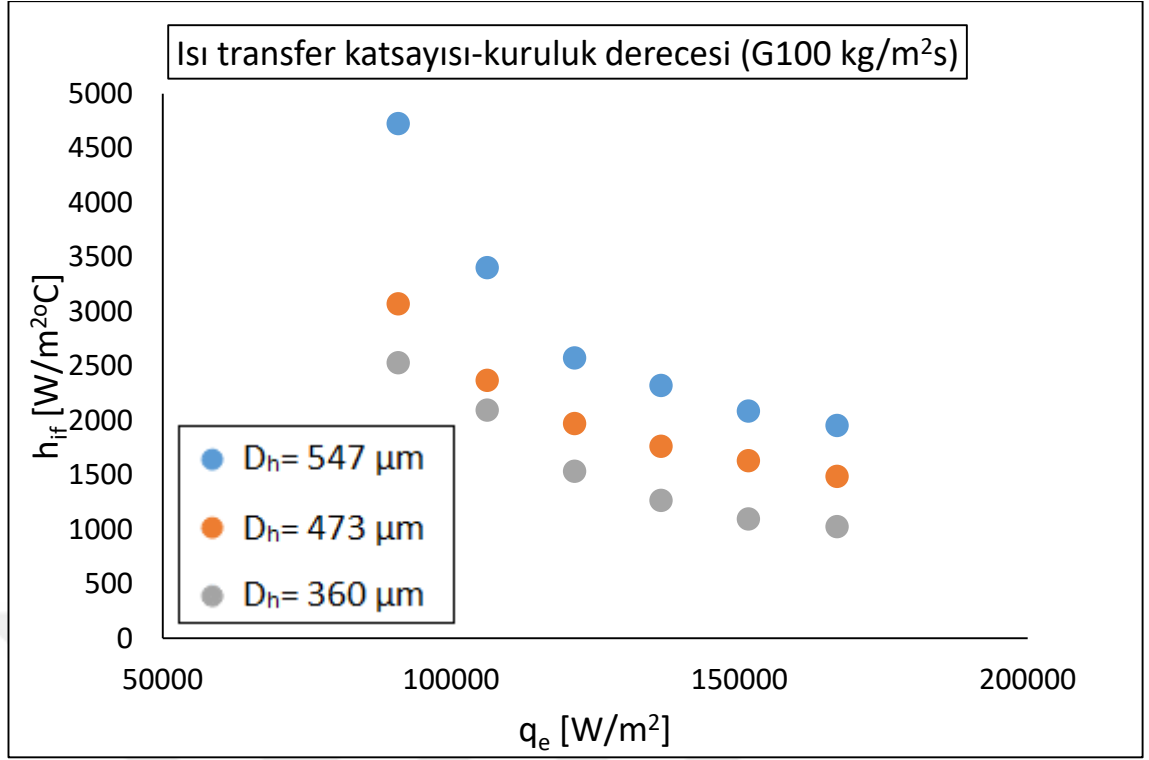
Düşük ısı güçlerinde, hidrolik çapın artmasıyla ısı transfer katsayısında %50'ye varan artışlar görülmektedir. Verilen akış görüntüleme fotoğraflarında görüldüğü gibi (Şekil 4.5), hidrolik çapın azalmasıyla, sınırlandırma etkileri baskın hale gelmektedir. Bunun sonucu olarak, kanal içerisinde, sınırlandırılmış kabarcıklı akış, halkasal akış biçimleri öne çıkmaktadır. Taşınımlı kaynamaya özgü olan bu akış desenleri yüksek ısı akısı değerlerinde  $D_h=547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda da baskın hale gelmektedir. Artan ısı akısıyla birlikte kanallardaki sıvı film tabakası hızlı bir şekilde buharlaşarak incelmekte ve kanal içerisinde kısmi veya tam kurumaya neden olmaktadır. Sonuç olarak, yüksek ısı akılarında kurumayla birlikte, hidrolik çaptan bağımsız olarak ısı transfer katsayısı benzer eğilime sahip olarak değişmektedir.



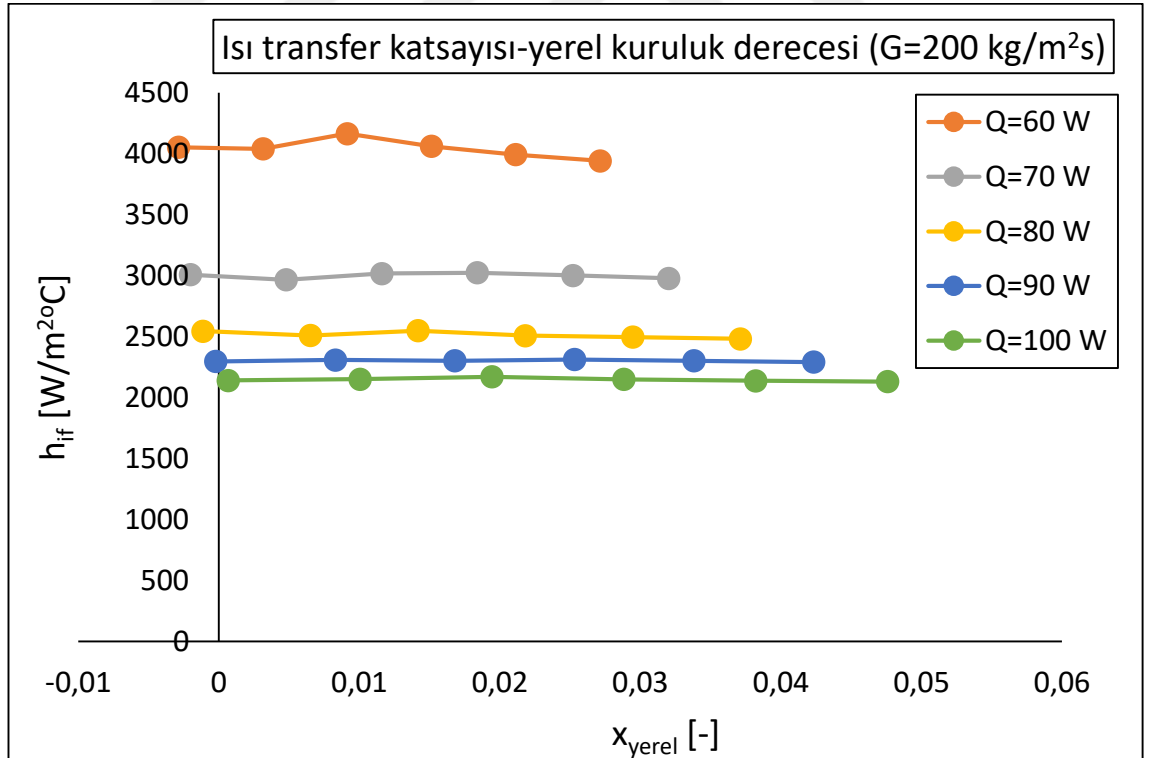
Şekil 4.16. Isı transfer katsayısının farklı hidrolik çaplı kanallarda çıkış kuruluk derecesi ile değişimi.

#### 4.2.2. Isı akısı etkisi

Akış kaynamada baskın olan ısı transfer mekanizmasının belirlenebilmesi için uygulanan ısı güç etkisinin incelenmesi gerekir. Şekil 4.18,  $D_h = 547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda,  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akısında, uygulanan ısı gücünün ve yerel kuruluk derecesinin ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 4.17. Isı transfer katsayısının farklı hidrolik çaplı kanallarda efektif ısı akısı ile değişimi.

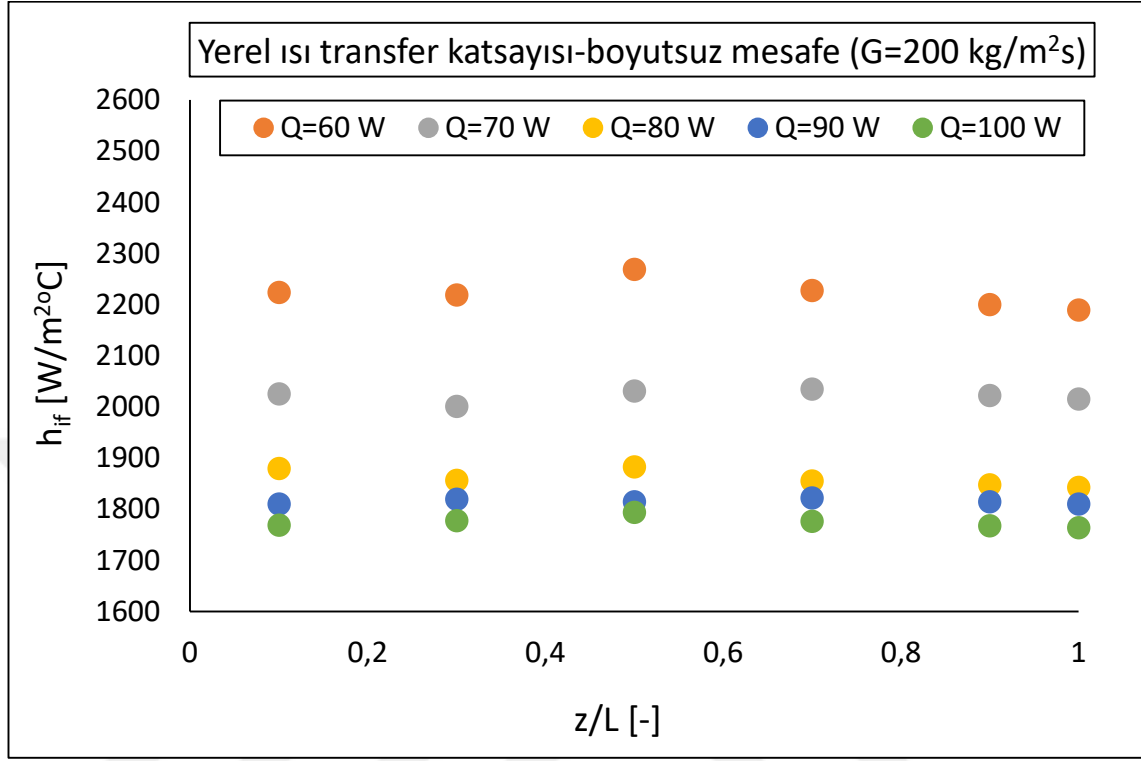


Şekil 4.18. Isı transfer katsayısının farklı ısı güçlerinde yerel kuruluk derecesi ile değişimi.

Test bölümüne aşırı soğutulmuş şartlarda giren (yaklaşık 8 °C) test akışkanı su, ısı alıcının tabanından uygulanan ısı akısı etkisiyle kanal boyunca ısıtılmaktadır. Dolayısıyla, grafiğin sol tarafında kalan kısım aşırı soğutulmuş kaynama bölgesini, sağ taraftaki kısım ise doymuş kaynama bölgesini temsil eder. Isıl güçteki artışla beraber çıkışta daha yüksek kuruluk dereceleri elde edilmektedir. Bu, ısı akısıyla beraber artan buharlaşma momentum kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Böylelikle, kanal içerisinde daha fazla buhar üretimi gerçekleşmektedir. Diğer yandan, ısı transfer katsayısı uygulanan ısıl güç ile beraber azalmaktadır. Düşük ısıl güçlerde (50-70W), ısı transfer katsayısının ısı akısına bağımlılığı fazla iken, yüksek ısıl güçlerde (80-100 W) bu bağımlılık azalmaktadır. Düşük ısıl güçlerde, ısı transfer katsayısı sıfır kuruluk derecesi civarında ani olarak artmakta, daha sonra artan kuruluk derecesi ise azalmaktadır. Buna benzer eğilim Wang et al. (2008) tarafından rapor edilmiştir. Akış görüntüleme, düşük ısıl güç değerlerinde, kabarcıklı akış ve sınırlandırılmış kabarcıklı akış desenlerinin görülmesi bu durumu desteklemektedir. Akış kanal boyunca ilerlerken kanal tabanından uygulanan ısı akısı etkisiyle kuruluk derecesi ve buna bağlı olarak, kanal içerisindeki buhar fazı artmakta ve akış biçimi çalkantılı ve halkasal akışa dönüşmektedir. Yüksek ısıl güçlerde ise, ısı transfer katsayısının kuruluk derecesine bağımlılığı net değildir. Isı transfer katsayısının, kuruluk derecesi ile neredeyse sabit kalması, kaynama başlangıcından sonra çalkantılı ve halkasal akış sırasında bile duvardaki ince sıvı film içerisinde kabarcık oluşumundan kaynaklanabilir (Balasubramanian and Kandlikar 2005). Diğer taraftan, mikrokanallardaki kaynamalı akışlarda, buharlaşma momentum kuvveti ile sıvının atalet kuvveti arasındaki etkileşim ısı transferi ve oluşan akış desenini önemli ölçüde etkilemektedir. Uygulanan ısıl gücün artması, buharlaşma momentum kuvvetini arttırarak kanala giren sıvıya karşı bir direnç kuvveti uygulayarak kanaldaki sıvı akışını yavaşlatır. Bunun yanı sıra, diğer kanallarla olan etkileşim kaynama mekanizmasını karmaşık hale getirmektedir. Isı transfer katsayısının değişiminin etkileyen bu hususlar artan ısıl güçle beraber önemli hale gelmektedir.

Şekil 4.19, farklı ısıl güç değerlerinde, yerel ısı transfer katsayısının boyutsuz mesafe ile olan değişimini göstermektedir. Grafikte,  $z/L=0$  kanal girişini gösterirken  $z/L=1$  kanal çıkışını ifade etmektedir. Isı transfer katsayısı, kanalın ilk kısmında az da olsa artış eğilimi göstermektedir. Isı transfer katsayısı ısı akısıyla beraber azalması ve

yüksek ısı güçlerinde ısı akısına bağımlılığın azalması, akış görüntülemeye mikrokanaalların genelinde halkasal akış deseninin görülmesi ile uyumludur.

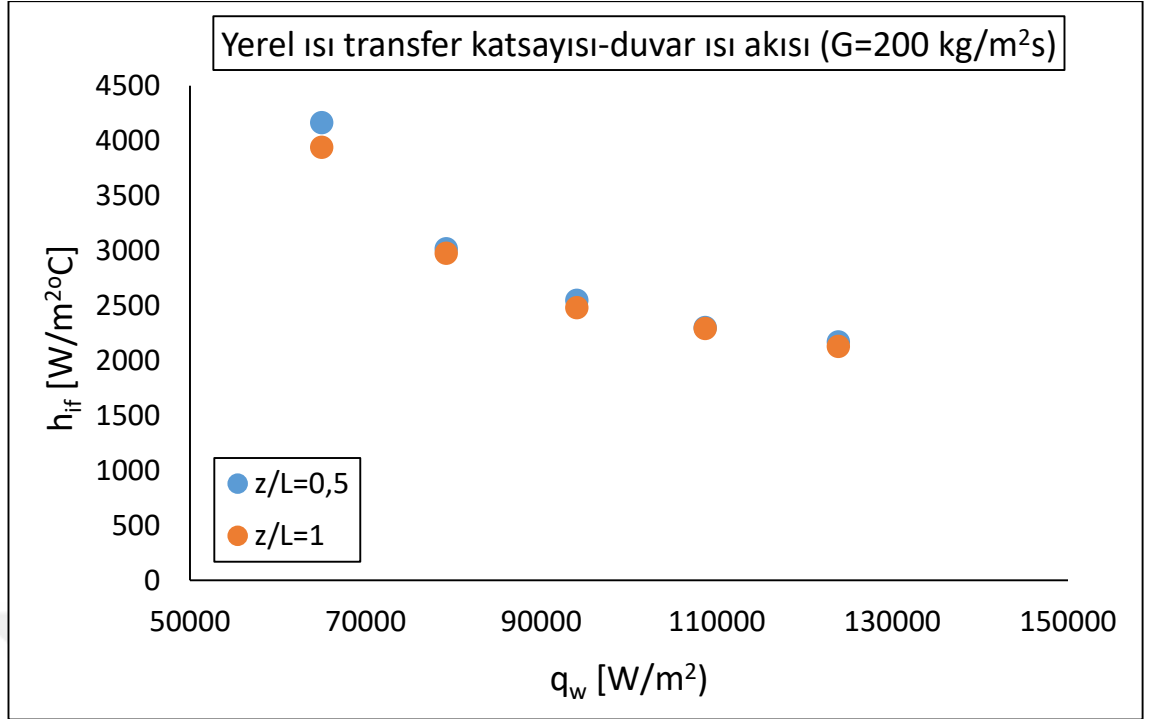


Şekil 4.19. Yerel ısı transfer katsayısının kanal boyunca değişimi.

Şekil 4.18 ve 4.19 incelendiğinde yerel ısı transfer katsayısının kanal boyunca keskin bir değişim göstermediği, ortalama bir değer civarında seyrettiği görülmektedir. Bu durum Şekil 4.20'de açıkça görülmektedir. Burada, yerel ısı taşınım katsayısının kanal ortasında ( $z/L=0.5$ ) ve kanal çıkışında ( $z/L=1$ ) ısı akısıyla değişimi gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi aynı ısı akısında kanal boyunca yerel ısı transfer katsayısındaki değişim yok denecek kadar azdır. Deneylede kullanılan ısı alıcıların uzunluklarının kısa olması ve eksenel yönde ısı yayınımindan dolayı yüzey sıcaklıklarının kanal boyunca birbirine çok yakın olması bu duruma sebep olmuş olabilir.

#### 4.2.3. Kütle akısı etkisi

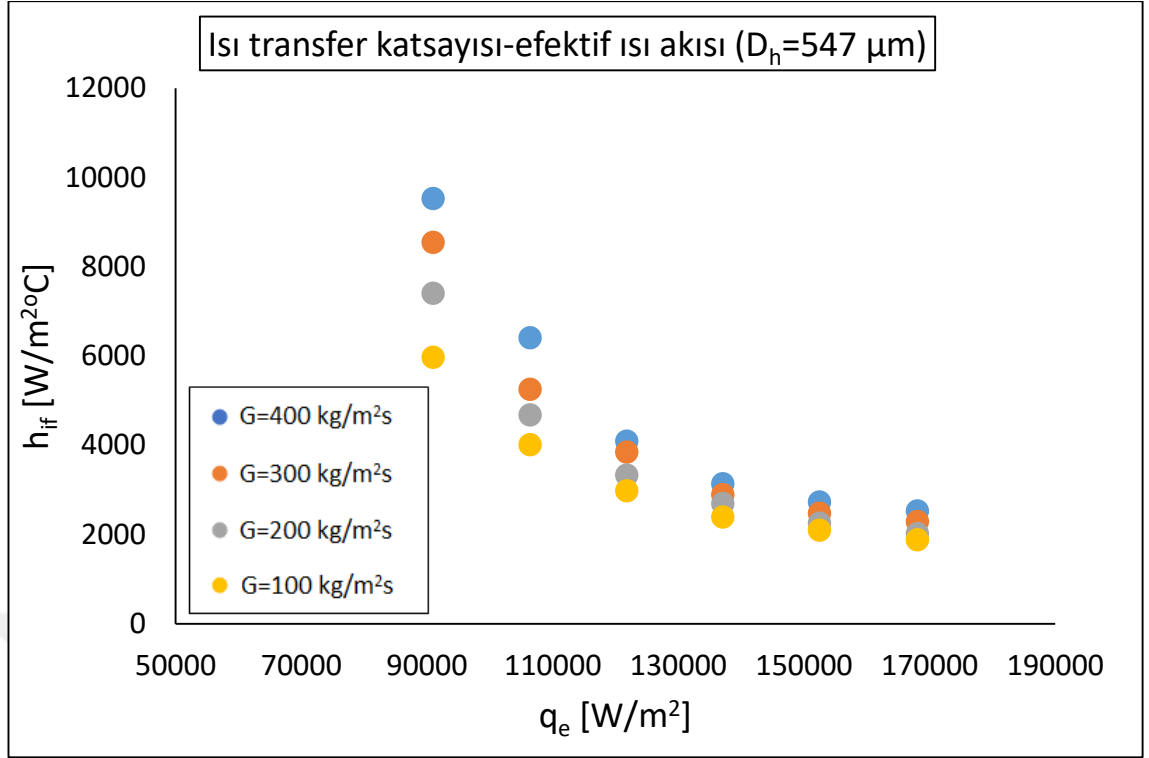
İki fazlı ısı transfer katsayısının farklı kütle akısı değerleri için, efektif ısı akısı ile değişimi Şekil 4.21-4.23'te, çıkış kuruluk derecesi ile değişimi ise Şekil 4.24-26'de verilmiştir.



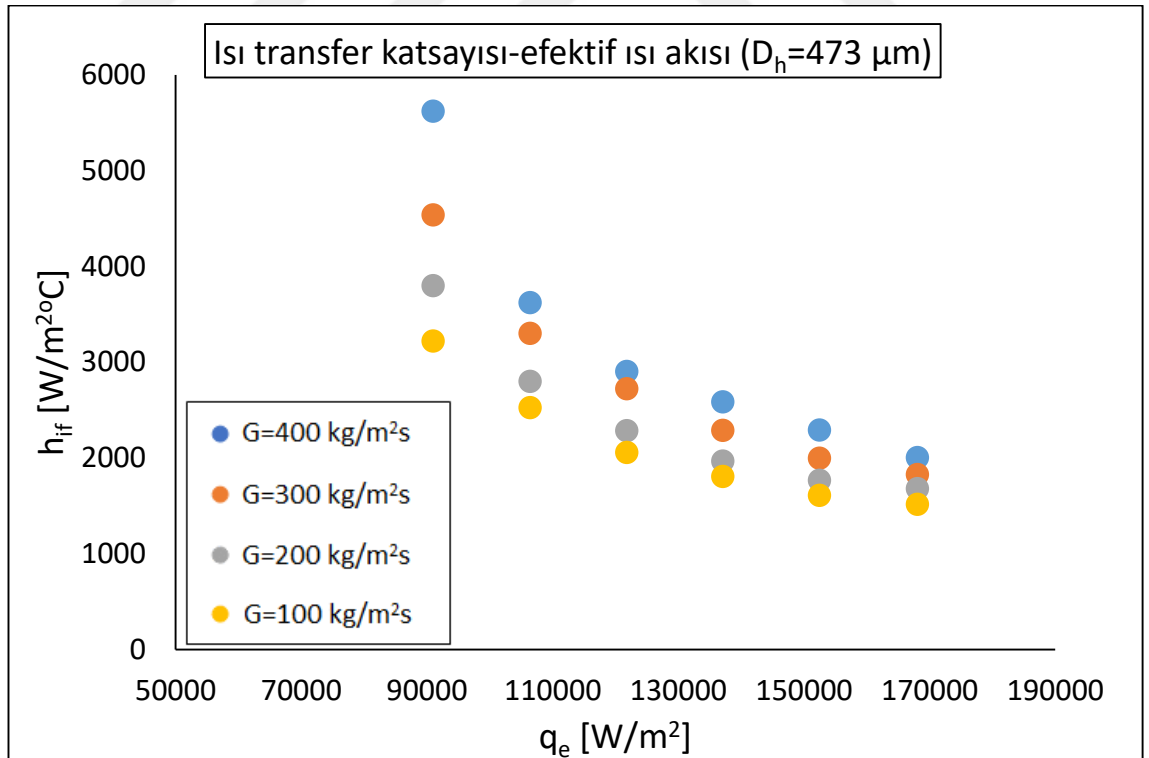
Şekil 4.20. Yerel ısı transfer katsayısının kanal ortasında ve sonunda ısı akısı ile değişimi.

Yapılan bütün deneylerde, sabit bir ısı akısı değerinde ısı transfer katsayısının kütleli akı ile birlikte arttığı gözlenmiştir. Literatürde, Liu et al. (2011) ve Deng et al. (2015a) tarafından benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Yüksek ısı akısı değerlerinde, ısı transfer katsayısının kütleli akıya bağımlılığının azaldığı görülmüştür. Diğer yandan, ısı transfer katsayısının tüm kütleli akı değerlerinde kuruluk derecesi ile azaldığı tespit edilmiştir. Literatürde çoğu araştırmacı bu durumu kanal cidarlarında görülen kuruma ile ilişkilendirmiştir (Zhuan and Wang 2013; Wang et al, 2008). Huh and Kim (2007) bu durumu artan kuruluk derecesi ile çok hızlı hareket eden uzun kabarcıklara bağlamışlardır. Qu and Mudawar (2003a) bu eğilimi halka akış rejiminde görülen sıvı damlacık sürüklenmesi ile ilişkilendirmişlerdir. Buharlaşmalı taşınım kaynamasının baskın ısı transferi mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir. Bütün bu açıklamalara karşın yazarlar herhangi bir kanıt ortaya koymamışlardır.

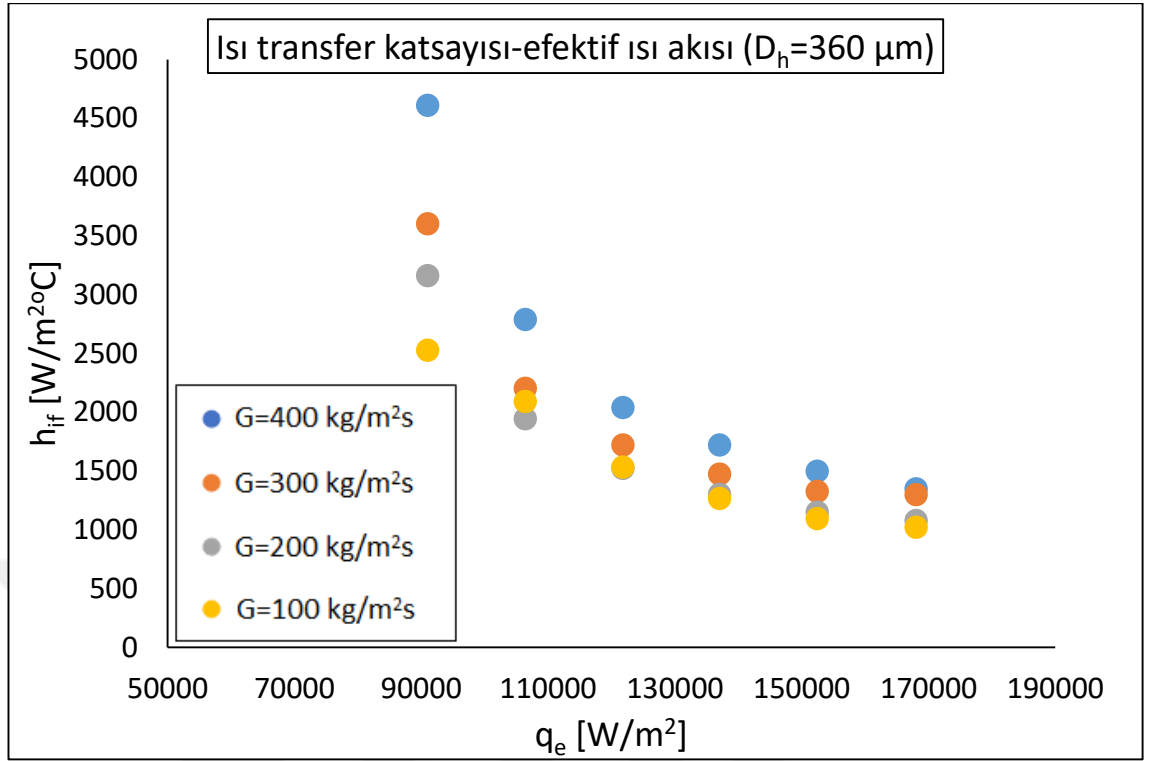
Kütle akısındaki azalma ile birlikte, kanal çıkışında daha yüksek kuruluk dereceleri elde edilmiştir. Kütleli akının azalması ile gelen sıvı atalet kuvveti azaldığından kabarcık, buharlaşma momentum kuvvetinin etkisiyle daha fazla büyümekte ve kanal içinde daha fazla yer işgal etmektedir. Bu durum, daha yüksek kuruluk derecelerine ulaşılmasını mümkün kılmaktadır.



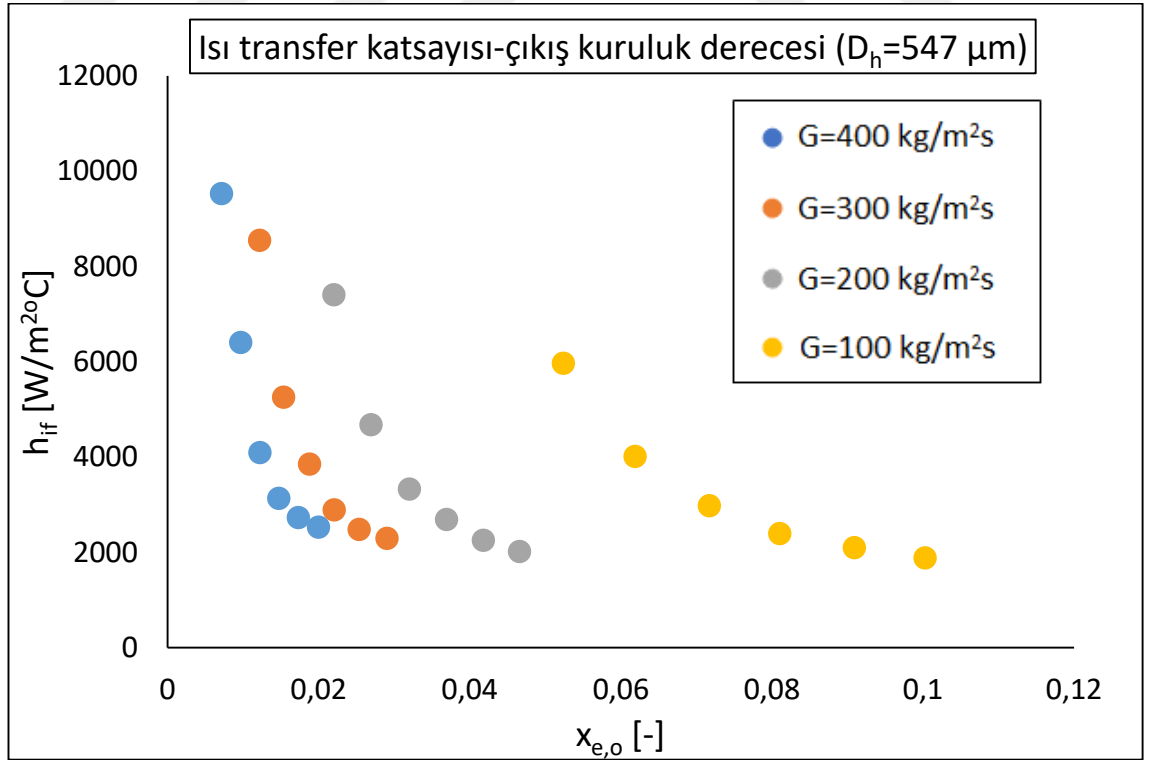
Şekil 4.21.  $D_h=547 \mu\text{m}$  mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ile değişimi.



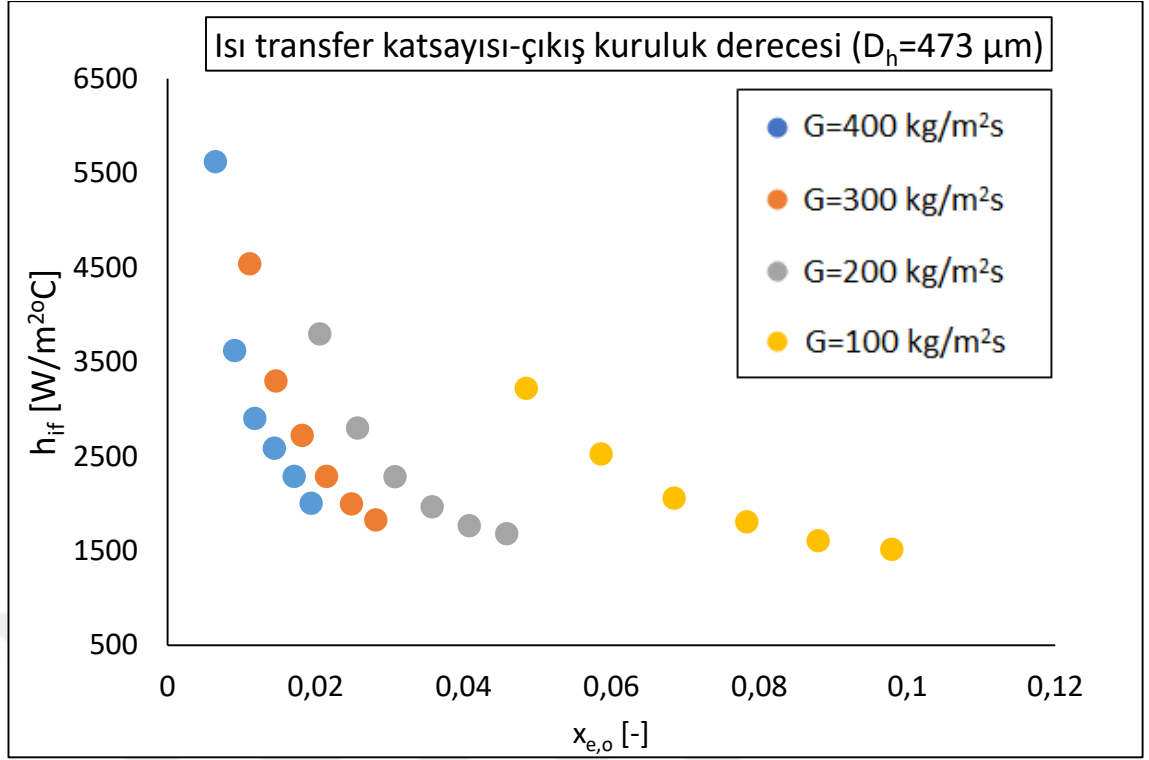
Şekil 4.22.  $D_h=473 \mu\text{m}$  mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ile değişimi.



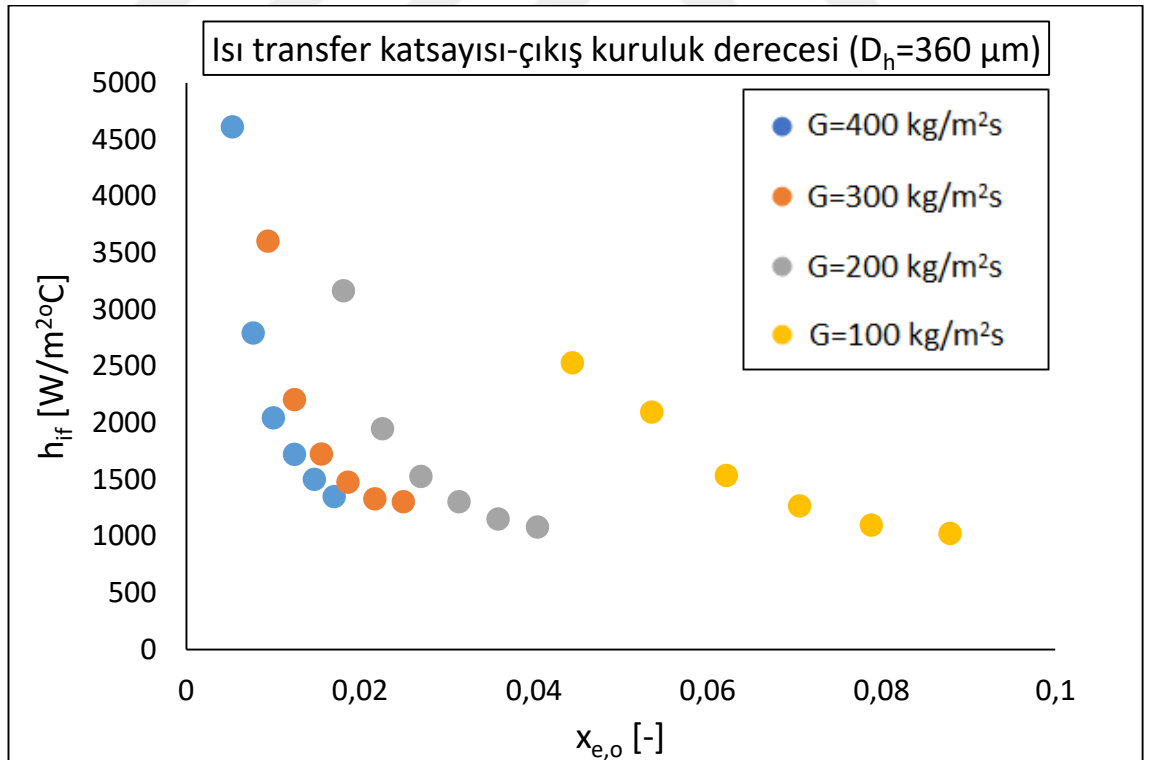
Şekil 4.23.  $D_h=360 \mu\text{m}$  mikrokanaallarda farklı kütle akılar için ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ile değişimi.



Şekil 4.24.  $D_h=547 \mu\text{m}$  mikrokanaallarda farklı kütle akılar için ısı transfer katsayısının çıkış kuruluk derecesi ile değişimi.



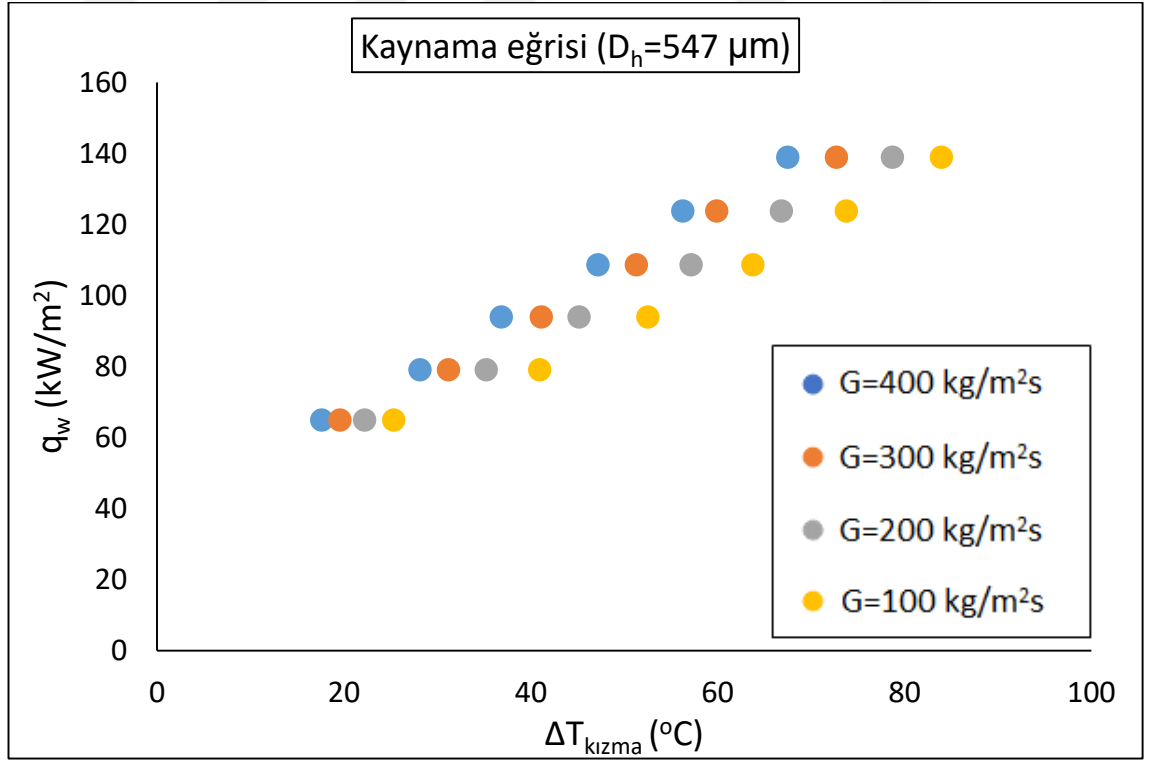
Şekil 4.25.  $D_h=473 \mu\text{m}$  mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının çıkış kuruluk derecesi ile değişimi.



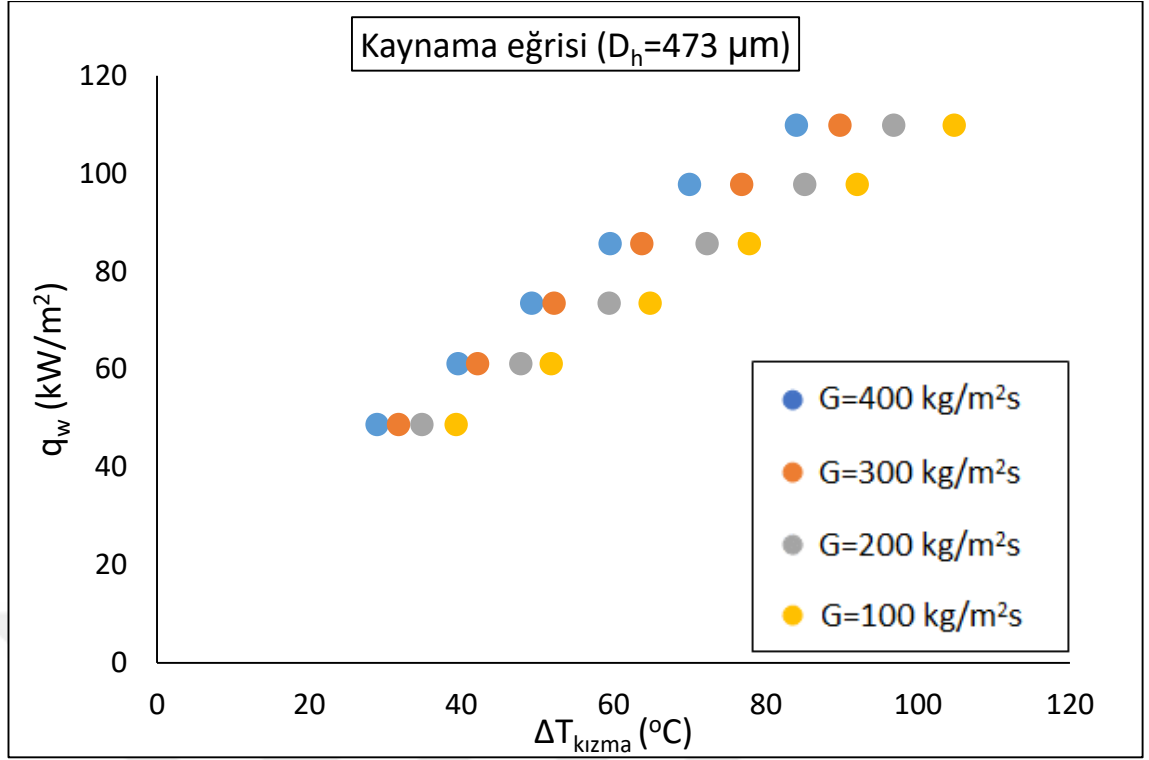
Şekil 4.26.  $D_h=360 \mu\text{m}$  mikrokanallarda farklı kütleli akılar için ısı transfer katsayısının çıkış kuruluk derecesi ile değişimi.

Bu çalışmada, akış kaynama karakteristikleri incelenmiş olsa da, kaynama eğrisinden bahsetmek faydalı olabilir. Kaynama eğrisi havuz kaynama için çıkarılmış olup, kızdırma farkına bağlı olarak ısı akısı değişimi gösterir. Şekil 4.27 ve 4.28’de farklı hidrolik çaplı kanallar için verilen kaynama eğrileri incelendiğinde, artan kütleli akıyla beraber kızma farkının azaldığı, yani aynı ısı akısı değerlerinin daha küçük kızdırma farkında elde edildiği görülmektedir. Kütleli akının artmasıyla boyutça küçük ancak daha fazla sayıda kabarcığın ayrılması, yüzeyden akışkana daha fazla ısı transferi gerçekleştiğinin göstergesidir.

Grafikler incelendiğinde, belli bir kütleli akıda artan ısı akısı ile birlikte kızma farkının doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Yüksek ısı akılarında ve küçük hidrolik çaplı kanallarda, daha yüksek kızma farkı değerlerine ulaşılmıştır. Bu, mikrokanal çapı küçüldükçe yüzeyde oluşan kabarcıkların daha kısa sürede kanal boyutlarına ulaşması ve kuruma süresinin uzamasından kaynaklanmaktadır (Markal et al. 2018). Dolayısıyla, kanala giren taze akışkan tarafından yüzeyin tamamen ıslatılmaması yüzey sıcaklığının artmasına ve buna bağlı olarak yüksek kızma farkına neden olmaktadır.



Şekil 4.27.  $D_h=547 \mu\text{m}$  mikrokanallarda farklı kütleli akılar için kaynama eğrileri.



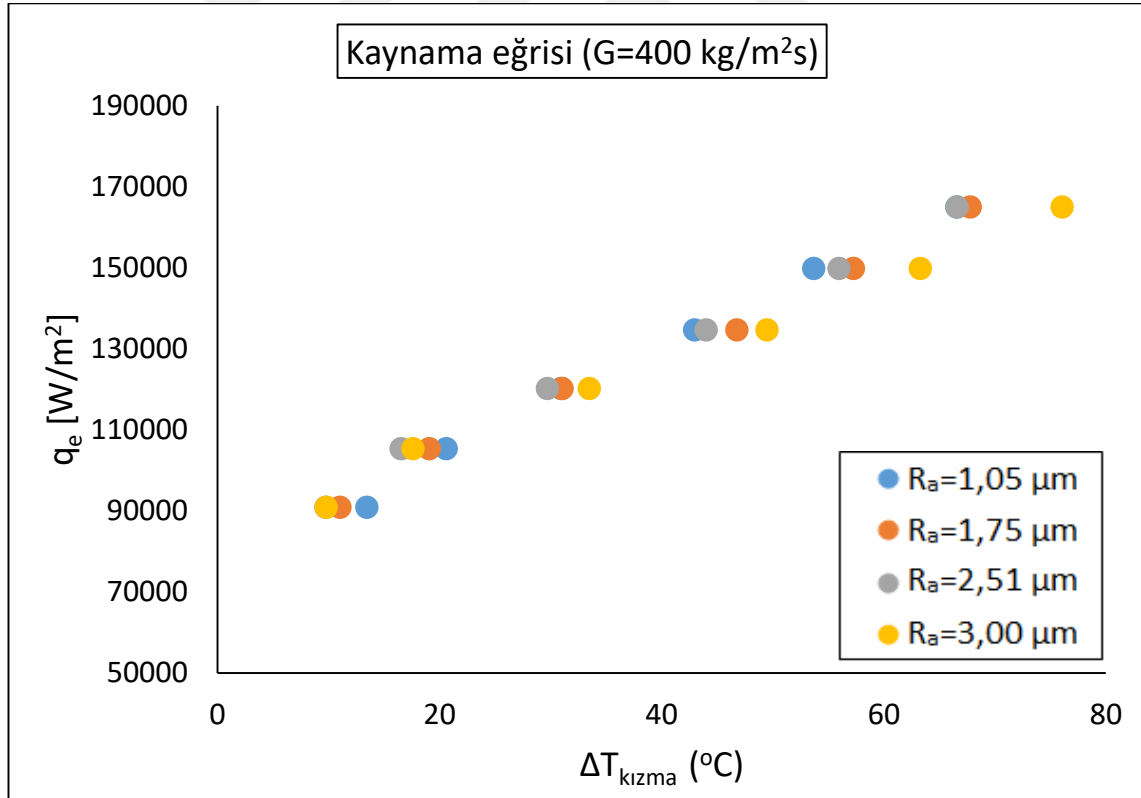
Şekil 4.28.  $D_h=473$  µm mikrokanallarda farklı kütleli akılar için kaynama eğrileri.

#### 4.2.4. Yüzey pürüzlülüğü etkisi

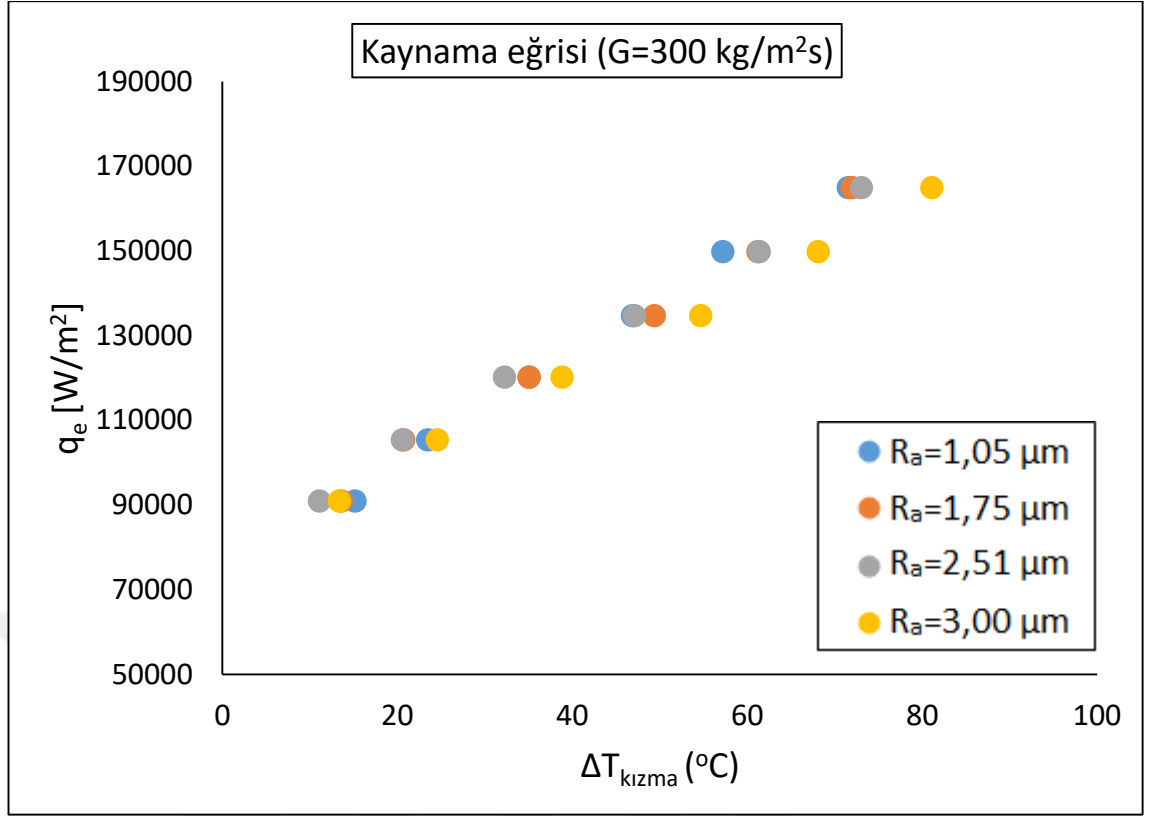
Literatürde mikro ölçekli kanallarda akış kaynama karakteristikleri ile ilgili kayda değer sayıda çalışma olmasına rağmen, henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Araştırmacılar tarafından birbiriyle çelişen muhtelif çalışmalar literatüre sunulmuştur. Bunun nedeni olarak, yüzey karakteristiklerinin göz ardı edilmesi, deneysel koşulların çalışmadan çalışmaya değişmesi sayılabilir (Karayiannis and Mahmoud 2017; Thome and Consolini 2010). Bu çalışmada, 547 µm ve 473 µm hidrolik çaplı mikrokanallı ısı alıcılar dört farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip olacak şekilde üretilmişlerdir. Böylelikle, yüzey pürüzlülüğünün akış kaynama ısı transfer karakteristiklerine olan etkisi de dikkate alınmıştır.

Şekil 4.29-4.32’te  $D_h=547$  µm hidrolik çaplı mikrokanallarda, farklı kütleli akı değerleri için kaynama eğrilerinin yüzey pürüzlülüğü ile değişimi gösterilmiştir. Düşük ısı güçlerinde, yüksek pürüzlülüğe sahip mikrokanallarda, belirli bir duvar ısı akısı değeri daha düşük kızdırma farklarında elde edilmiştir. Düşük ısı akılarında kaynama rejimi kabarcıklı kaynamadır. Pürüzlülüğün artması, kabarcık oluşum bölgelerinin arttırarak,

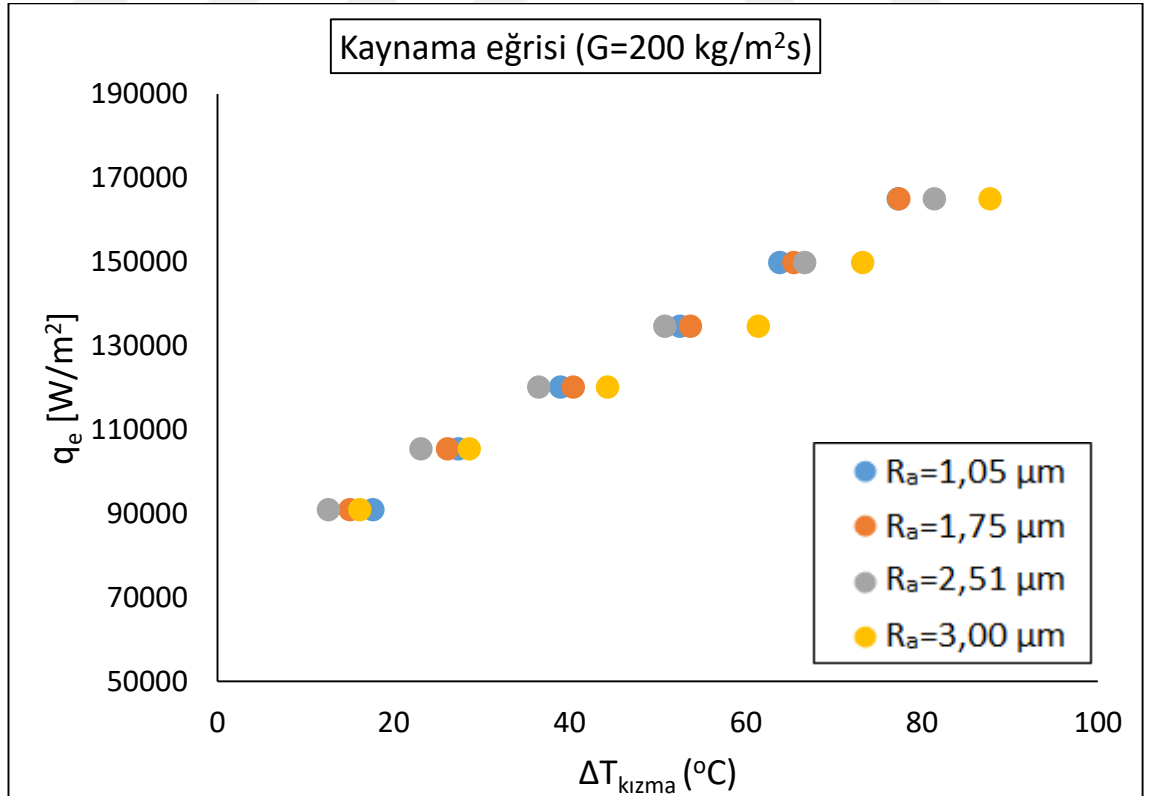
yüzeyden daha fazla ısının uzaklaştırılmasını sağlayarak daha düşük kızdırma farklarının oluşmasına neden olmuştur. Yüksek ısı güçlerinde ise, pürüzlü yüzeylerde, aynı duvar ısı akısının daha yüksek kızdırma farklarında elde edildiği görülmektedir. Daha çok kabarcık oluşum noktalarına sahip pürüzlü yüzeylerde kabarcıklar ısıl gücün artmasıyla ani olarak büyür ve kanal içerisinde uzun kabarcıklar oluşur. Kanal boyutlarıyla sınırlandırılmış kabarcıklar yüzeyde kısmi kuruma bölgeleri oluşturarak, yüzeyden olan ısı transferini azaltır. Böylelikle, kızdırma sıcaklığının artmasına neden olur. Diğer yandan, yüksek ısı akılarında, pürüzlülüğü az olan yüzeylerde daha üniform ince film tabakasının bulunması bu duruma yol açmış olabilir. Bütün bunlarla birlikte, yüksek ısı akılarında taşınımlı kaynama ısı transfer mekanizmasının etkin olduğu göz önünde bulundurulursa, kaynama eğrilerindeki bu değişim normaldir. Kütleli akı azaldıkça, düşük ısı akılarında,  $R_a=2,51$   $\mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip mikrokanallar daha düşük kızdırma farkına sahip iken, yüksek ısı akılarında  $R_a=1,05$   $\mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip mikrokanallar daha düşük kızdırma farkına sahiptir.



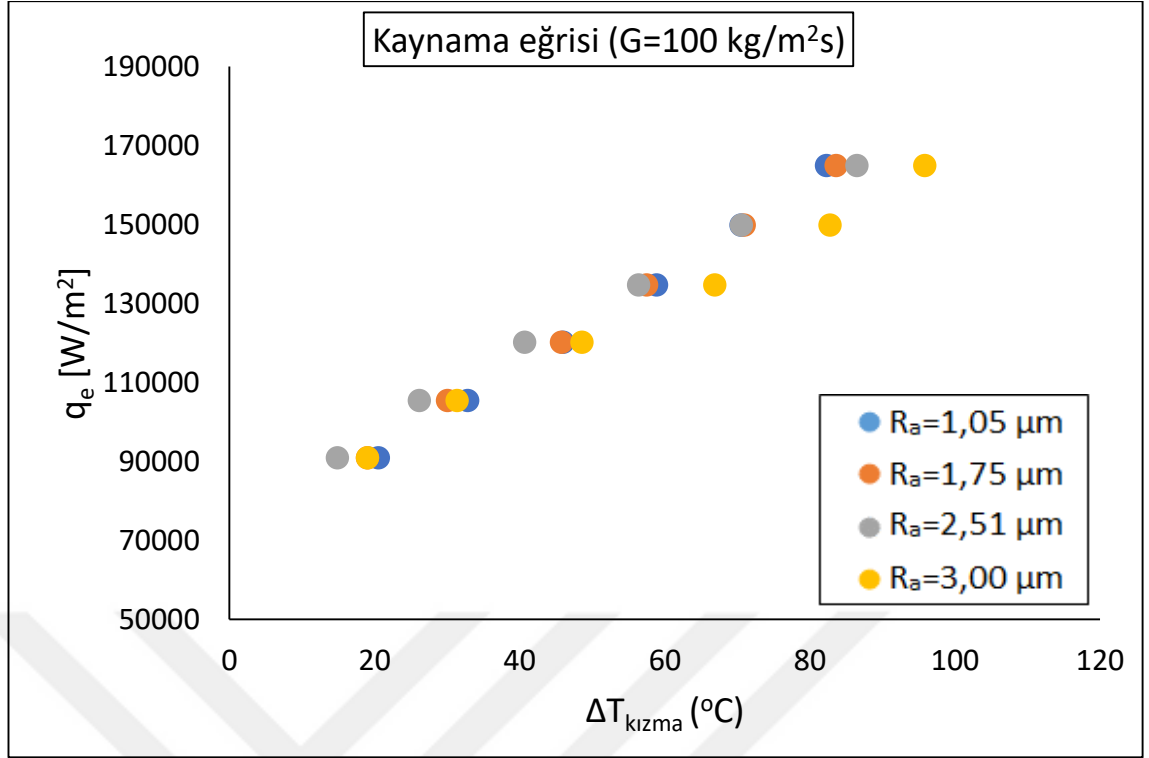
Şekil 4.29.  $D_h=547$   $\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=400$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait kaynama eğrileri.



Şekil 4.30.  $D_h=547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait kaynama eğrileri.

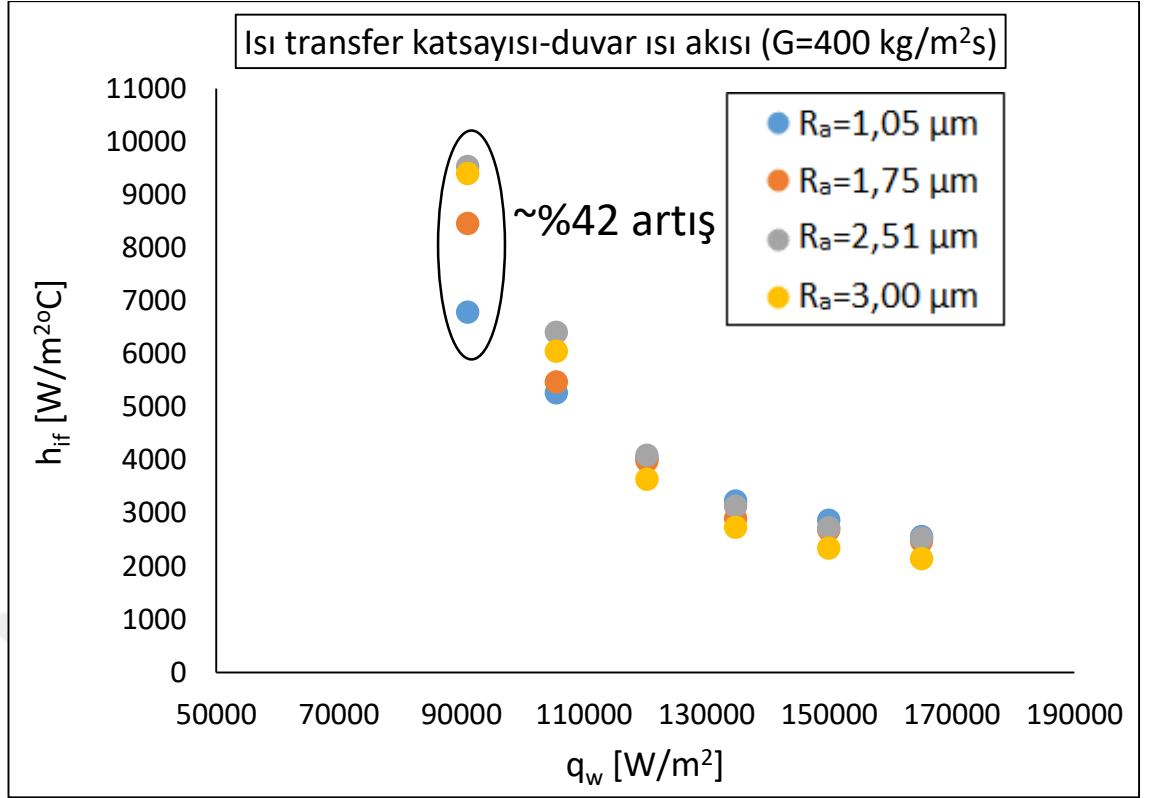


Şekil 4.31.  $D_h=547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait kaynama eğrileri.

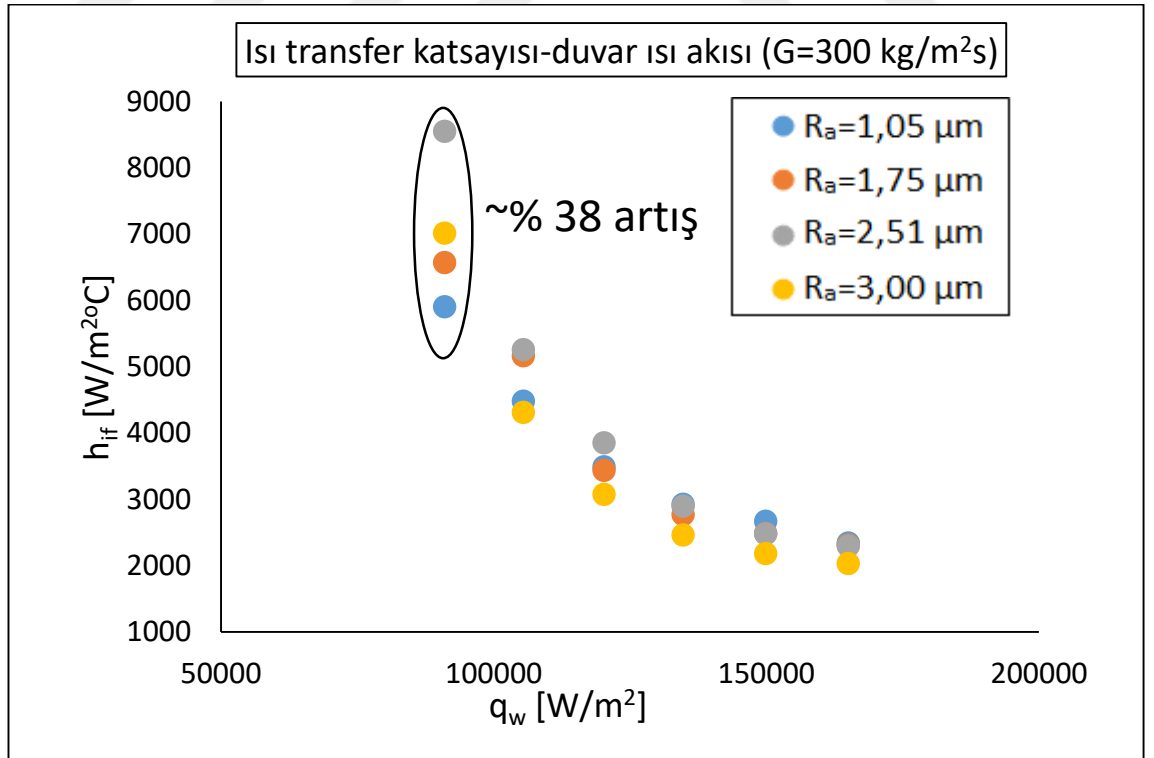


Şekil 4.32.  $D_h=547 \mu m$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait kaynama eğrileri.

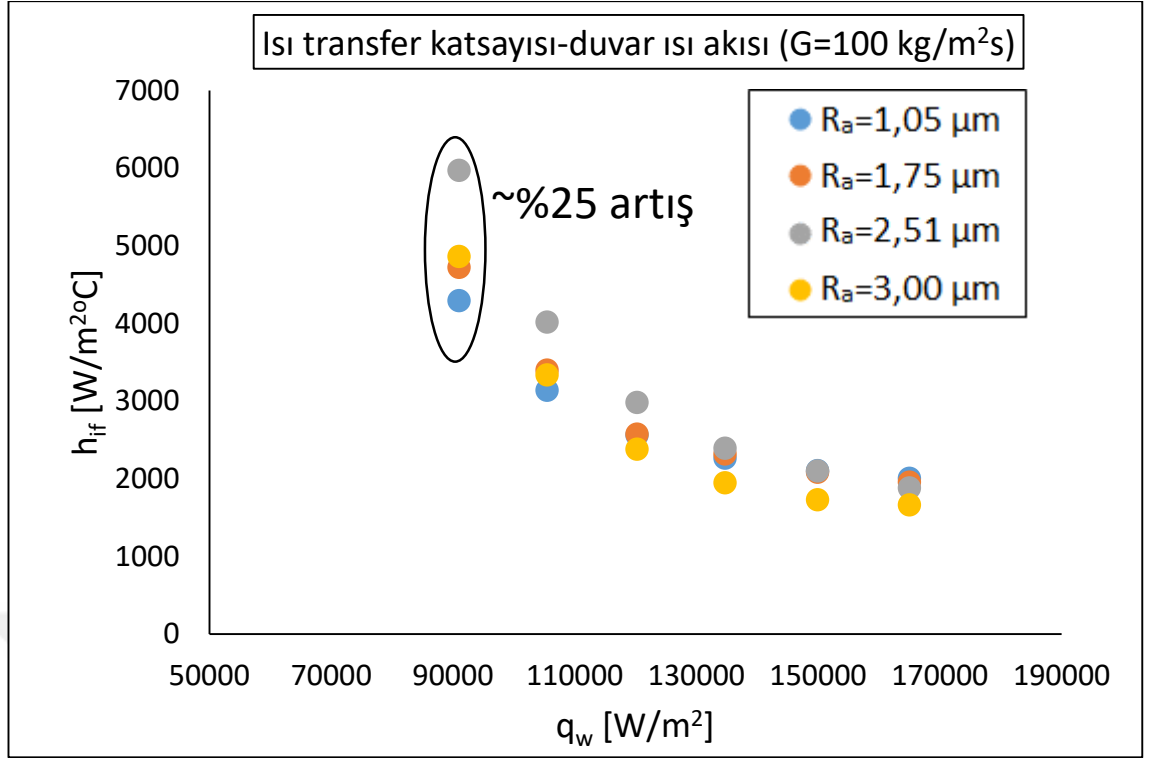
Şekil 4.33-4.35 arasında  $D_h=547 \mu m$  hidrolik çaplı mikrokanallarda, farklı kütleli akı değerleri için ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı ve pürüzlülük değerleriyle değişimi gösterilmiştir. Bütün kütleli akı değerlerinde, düşük duvar ısı akısı değerlerinde, daha pürüzlü yüzeylerdeki ısı transfer katsayısının yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin, Şekil 4.33'te,  $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $q_w=70 \text{ kW/m}^2$  ısı akısı değerinde,  $R_a=1,05 \mu m$ 'lik pürüzlülüğe sahip mikrokanallar yaklaşık  $7000 \text{ W/m}^2\text{°C}$  ısı transfer katsayısına sahipken  $R_a=2,51 \mu m$ 'lik pürüzlülüğe sahip mikrokanallarda bu değer  $10000 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 'ye ulaşmaktadır. Pürüzlülüğün  $1,05 \mu m$ 'den,  $2,51 \mu m$ 'ye çıkması ısı transfer katsayısında yaklaşık %42'lik artış sağlamıştır.  $G=300$  ve  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akıları için ısı transfer katsayısındaki artış değerleri sırasıyla yaklaşık %38 ve %25'tir. Bu durum, düşük ısı akılarında, kabarcıklı kaynama rejiminin baskın ısı transfer modu olduğunu göstermektedir. Kabarcıklı kaynama rejiminde, pürüzlülük artışı, kabarcıklanma bölgelerini artırarak ısı transfer katsayısında artışa neden olmaktadır. Yüksek ısı akılarında ise, pürüzlülüğün ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi oldukça az olup eğriler birbirine yaklaşmaktadır. Bu da ısı transfer mekanizmasının taşınımlı kaynama olduğunu göstermektedir. Kütleli akı azaldıkça  $R_a=2,51 \mu m$  pürüzlülüğe sahip mikrokanalların ısı transferi açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 4.33.  $D_h=547 \text{ µm}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.

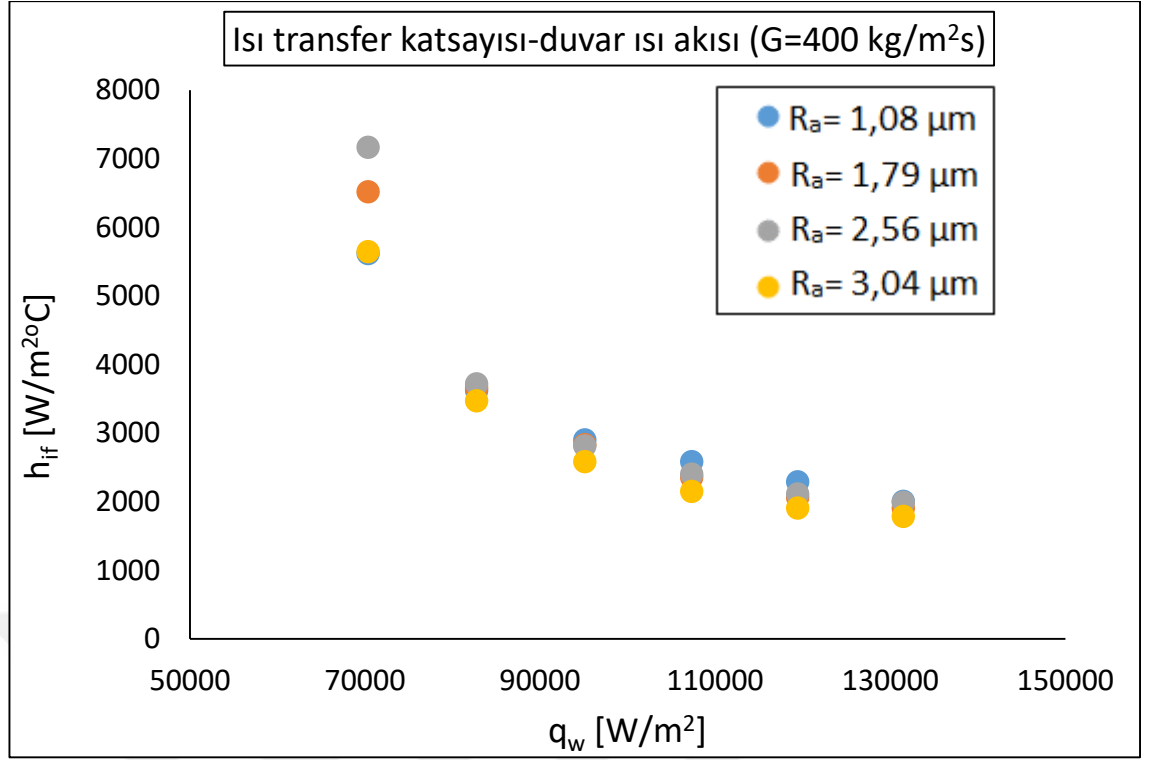


Şekil 4.34.  $D_h=547 \text{ µm}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.

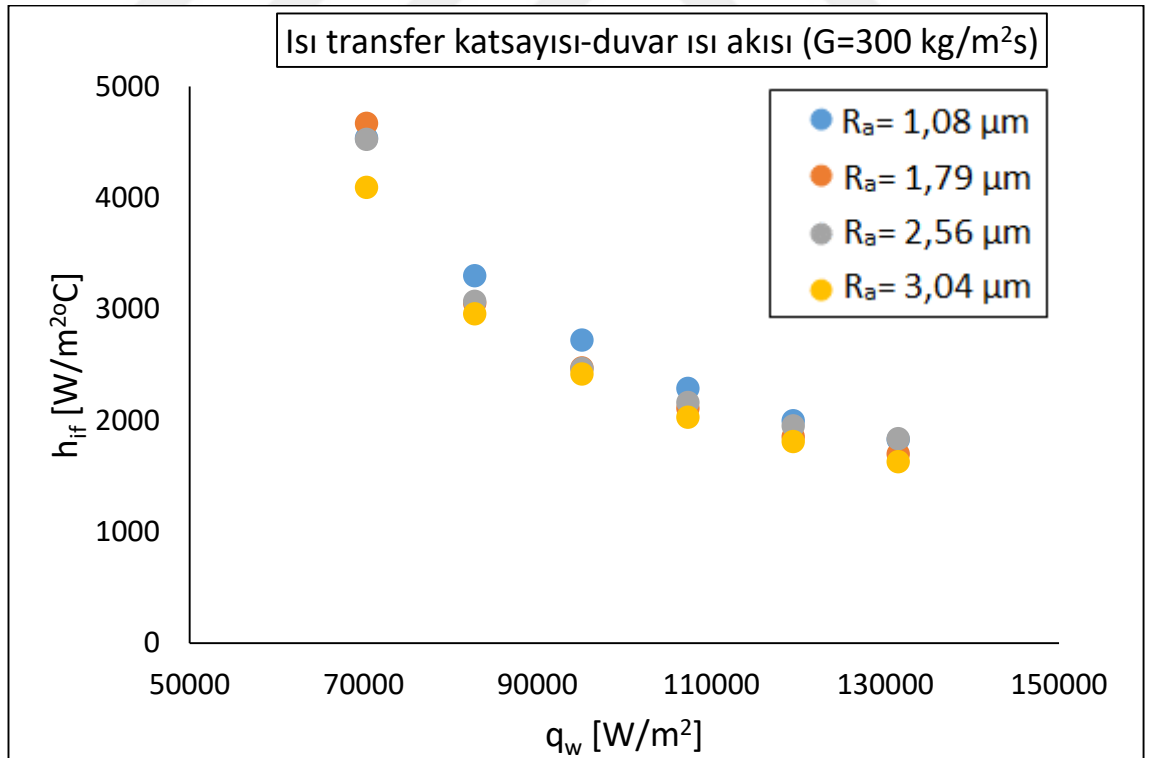


Şekil 4.35.  $D_h=547 \mu m$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.

Şekil 4.36-4.38 arasında ise  $D_h=473 \mu m$  hidrolik çaplı mikrokanallarda, farklı kütle akı değerleri için ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı ve pürüzlülük değerleriyle değişimi gösterilmiştir.  $q_w=70 \text{ kW/m}^2$  ve  $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için en yüksek ısı transfer katsayısı yaklaşık  $7200 \text{ W/m}^2\text{C}$  olarak  $R_a=2,56 \mu m$ 'de elde edilmiştir.  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için maksimum ısı transfer katsayısı yaklaşık  $4800 \text{ W/m}^2\text{C}$  iken  $R_a=1,79 \mu m$  pürüzlülük değerinde elde edilmiştir.  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütle akı değerinde ise, maksimum ısı transfer katsayısı  $3300 \text{ W/m}^2\text{C}$  olup bu değer  $R_a=1,08 \mu m$ 'de elde edilmiştir. Düşük ısı akılarında, kütle akı değeri azaldıkça maksimum ısı transfer katsayısı düşük pürüzlülük değerinde elde edilmiştir. Düşük kütle akı değerlerinde, halkasal akışa geçişin erken gerçekleşmesi ve pürüzlülük artışıyla beraber yüzeylerin tam olarak ıslatılamaması nedeniyle mikrokanal yüzeylerinde bölgesel olarak kuru noktaların oluşması yüzeyde kızgın noktalar oluşturarak büyük ölçüde ısı transferinde azalmaya neden olmuştur. Yüksek ısı akılarında ise, yüzey pürüzlülüğünün ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durumu daha net hale getirmek farklı kütle akılarda, ısı transfer katsayısının farklı hidrolik çaplı mikrokanallarda pürüzlülük ve ısı akısı ile değişimini veren grafikler Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta verilmiştir.

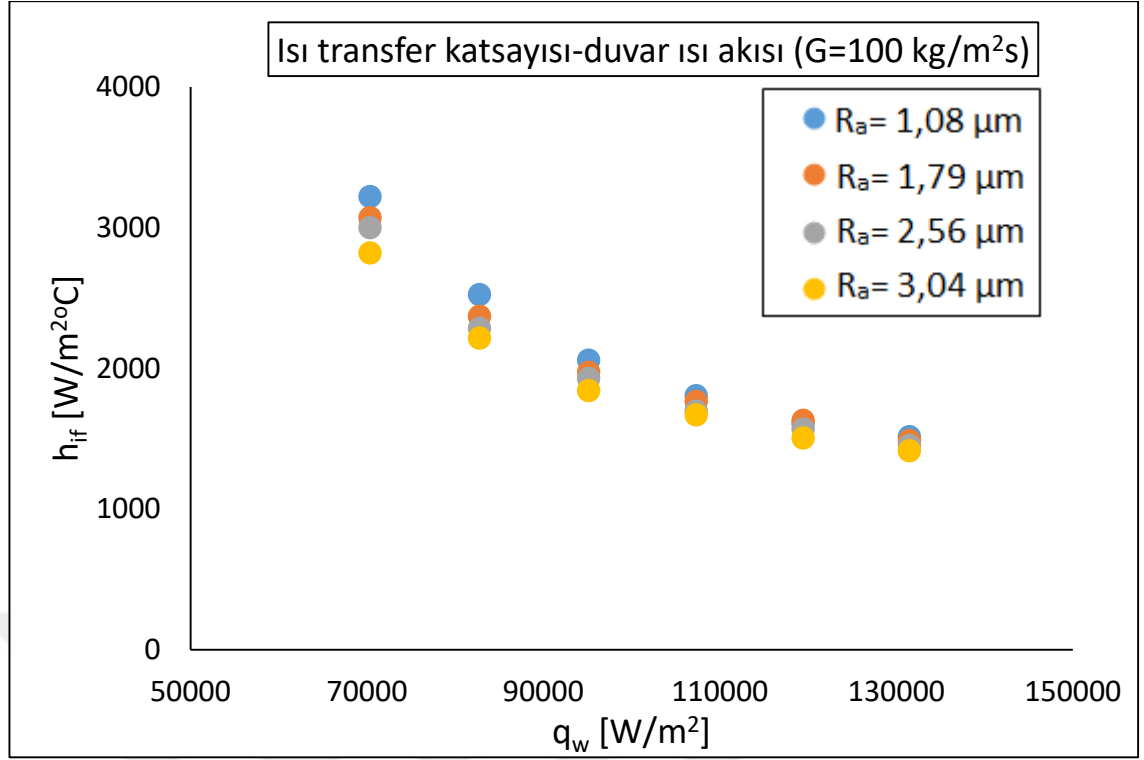


Şekil 4.36.  $D_h=473 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.

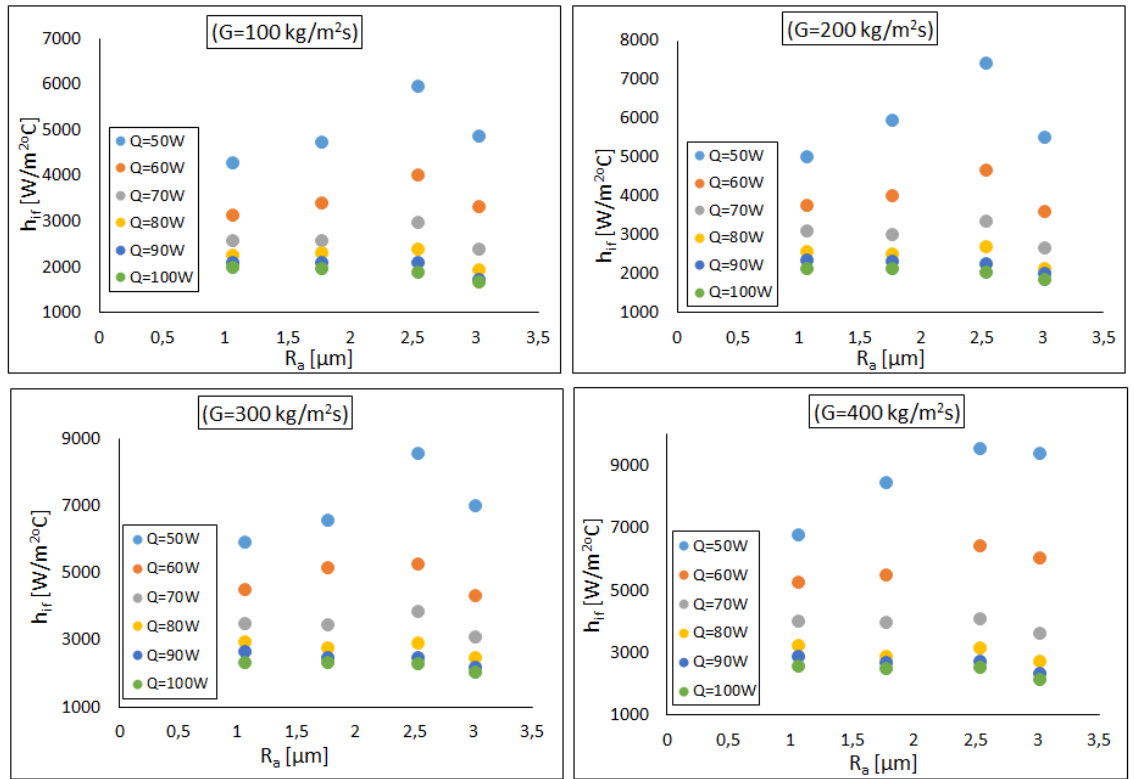


Şekil 4.37.  $D_h=473 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

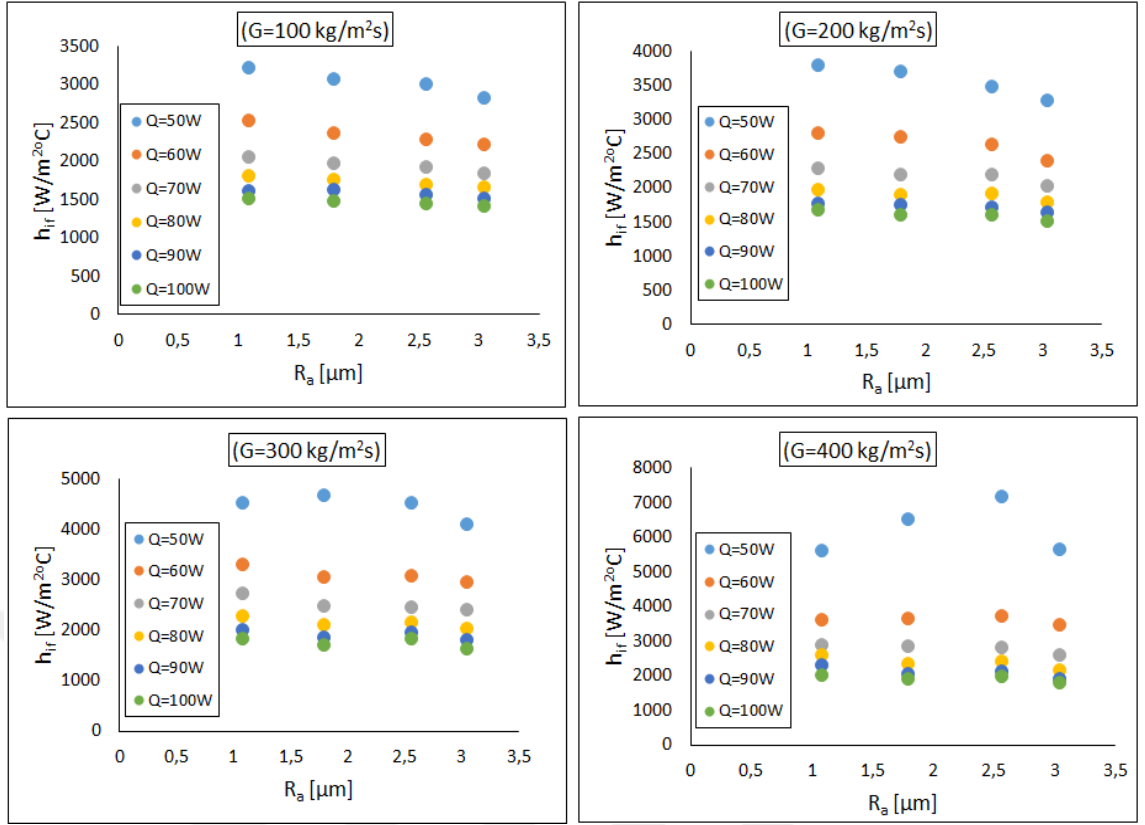


Şekil 4.38.  $D_h=473 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı pürüzlülük değerlerine ait ısı transfer katsayısı-duvar ısı akısı değişimi.



Şekil 4.39.  $D_h=547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda farklı kütleli akı ve ısıl güç değerlerinde ısı transfer katsayısının yüzey pürüzlülüğü ile değişimi.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.40.  $D_h=473$  µm hidrolik çaplı mikrokanallarda farklı kütle akı ve ısı güç değerlerinde ısı transfer katsayısının yüzey pürüzlülüğü ile değişimi.

Şekil 4.39 incelendiğinde,  $D_h=547$  µm hidrolik çaplı mikrokanallarda, bütün kütle akı değerlerinde, 50-80W ısı güç aralığında ısı transfer katsayısı artan pürüzlülük ile birlikte artmaktadır ve  $R_a=2,51$  µm pürüzlülüğe sahip kanallarda maksimum değerine ulaşmaktadır. Yüksek ısı akılarında ise, (90-100W) ısı transfer katsayısının artan pürüzlülük değeriyle azalma eğilimi gösterse de pürüzlülükten bağımsız olduğu görülmektedir. Buradan düşük ısı güçlerinde pürüzlülük artışının ısı transfer katsayısını olumlu yönde etkilediği söylenebilir. Düşük ısı güçlerinde kanal içerisinde kabarcıklı kaynama rejimi görüldüğünden, pürüzlülük artışının kabarcıklanma odaklarını artırarak kaynamalı akış ısı transferini arttırdığı düşünülmektedir. Yüksek ısı akılarında kanal içerisinde uzun kabarcıklı akış ve halkasal akış görülmesi pürüzlülük etkisini bastırmakta böylelikle pürüzlülüğün ısı transferi üzerindeki etkisi önemsiz hale gelmektedir.

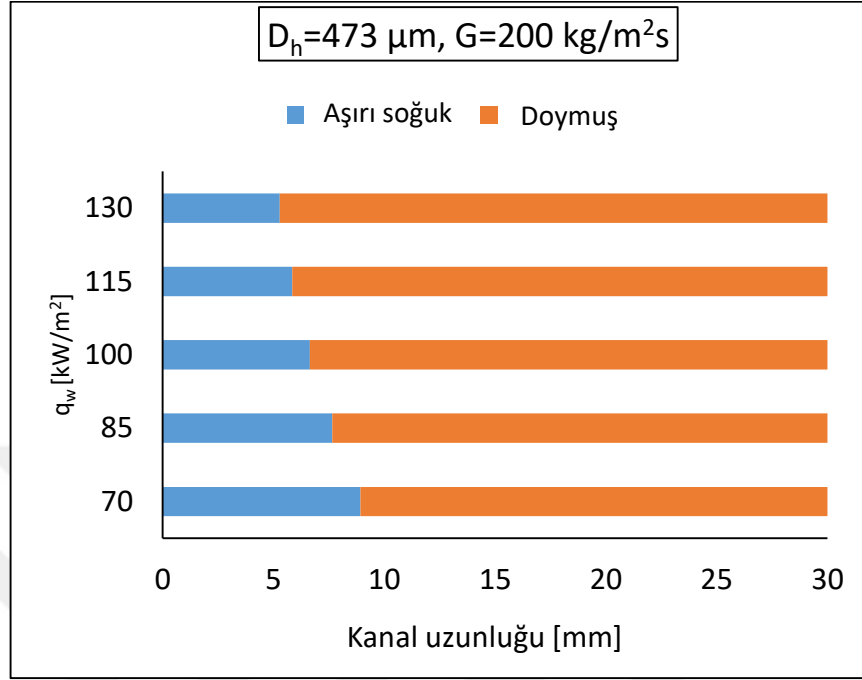
$D_h=473$  µm hidrolik çaplı mikrokanallarda ise (Şekil 4.40), özellikle azalan kütle akı ve artan ısı güç ile birlikte ısı transfer katsayısının pürüzlülükten bağımsız olduğu görülmektedir. Bu durum azalan hidrolik çapla beraber halkasal akış rejiminin hâkim olmasıyla açıklanabilir. Yüzey pürüzlülüğü, kabarcık oluşumunda etkili olduğu

için halkasal akış rejiminde önemsiz hale gelmektedir.  $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akısında,  $D_h=547 \text{ } \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallara benzer olarak, ısı transfer katsayısı pürüzlülükle artmış ve  $R_a=2,56 \text{ } \mu\text{m}$ 'de maksimum değerine ulaşmıştır. Azalan kütleli akı ile birlikte, daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerinde daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmiştir.  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için ısı transfer katsayısı  $R_a=1,79 \text{ } \mu\text{m}$ 'de maksimum olurken  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akılarında ısı transfer katsayısı artan pürüzlülükle beraber azalmıştır. En yüksek ısı transfer katsayısı  $R_a=1,08 \text{ } \mu\text{m}$  pürüzlülük değerinde elde edilmiştir.

### 4.3. Akış Kaynama Basınç Düşümü Sonuçları

Deneylerde, test akışkanı aşırı soğutulmuş olarak kanala girdiğinden, mikrokanal içerisinde, aşırı soğuk ve doymuş kaynama bölgeleri oluşmaktadır. Aşırı soğuk bölgede, münferit kabarcık oluşumu gözlemlense de bu kısımda basınç düşümü tek fazlı sıvı akış bölgesi yaklaşımıyla hesaplanmıştır. Kuruluk derecesinin sıfıra eşit olduğu noktada doymuş kaynama başlar ve bu bölgede meydana gelen basınç düşümü iki fazlı akış basınç düşümü olarak değerlendirilmiştir. Bu iki bölgenin kapladığı bölge çalışma parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.41'de,  $D_h=473 \text{ } \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda,  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı için aşırı soğuk ve doymuş kaynama bölgeleri uzunlukları verilmiştir. Doymuş kaynama bölgesi uzunluğu belli bir kütleli akı için ısı akısı ile artmaktadır.  $130 \text{ kW/m}^2$  duvar ısı akısında kanalın yaklaşık %18'ini aşırı soğuk bölge oluşturmaktadır. Doymuş akış kaynama bölgesindeki basınç düşümü, kanalda meydana gelen toplam basınç düşümünden tek fazlı akış bölgesinde, yani aşırı soğuk bölgede, meydana gelen basınç düşümünün çıkarılmasıyla elde edilir. Elde edilen kaynamalı akış basınç düşümü, sürtünme bazlı akış kaynama basınç düşümü ve ivmelenme bazlı akış kaynama basınç düşümü olmak üzere iki bileşenden oluşur. Toplam doymuş akış kaynama basınç düşümündeki sürtünme terimi, akışkan ile kanal yüzeyleri arasındaki duvar kayma gerilmesinden kaynaklanır. İvmelenme terimi ise, kaynamalı akış sırasında kabarcıkların hareketi sonucu oluşur. Deneysel olarak, bu iki terimin tespit edilmesi oldukça güçtür ve bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Literatürde, her iki terim için korelasyonlar geliştirilmiştir. Burada, hidrolik çap, ısı akısı, kütleli akı ve pürüzlülük parametrelerinin mikrokanallarda akış kaynama basınç karakteristiklerine

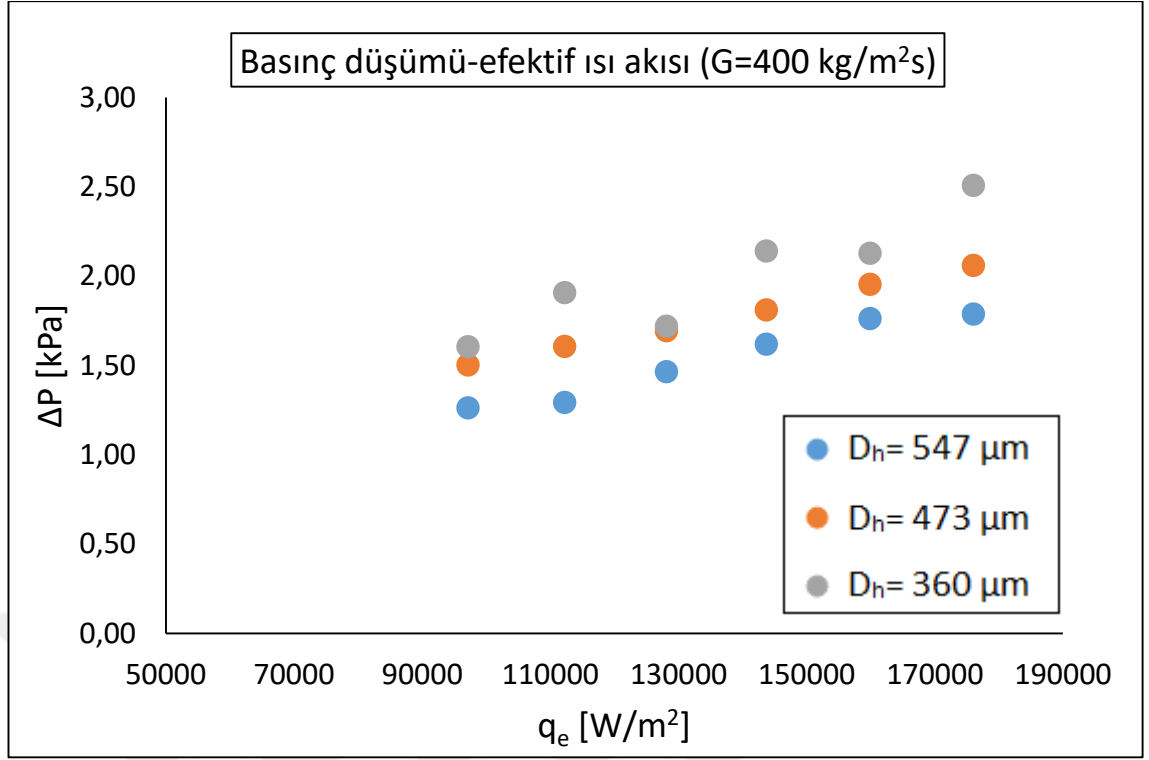
olan etkileri, kanal içinde meydana gelen toplam basınç düşümü ve iki fazlı akış basınç düşümü özellikleri dikkate alınarak incelenecektir.



Şekil 4.41.  $D_h=473\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda,  $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı için aşırı soğuk ve doymuş kaynamalı akış bölgeleri.

#### 4.3.1. Hidrolik çap etkisi

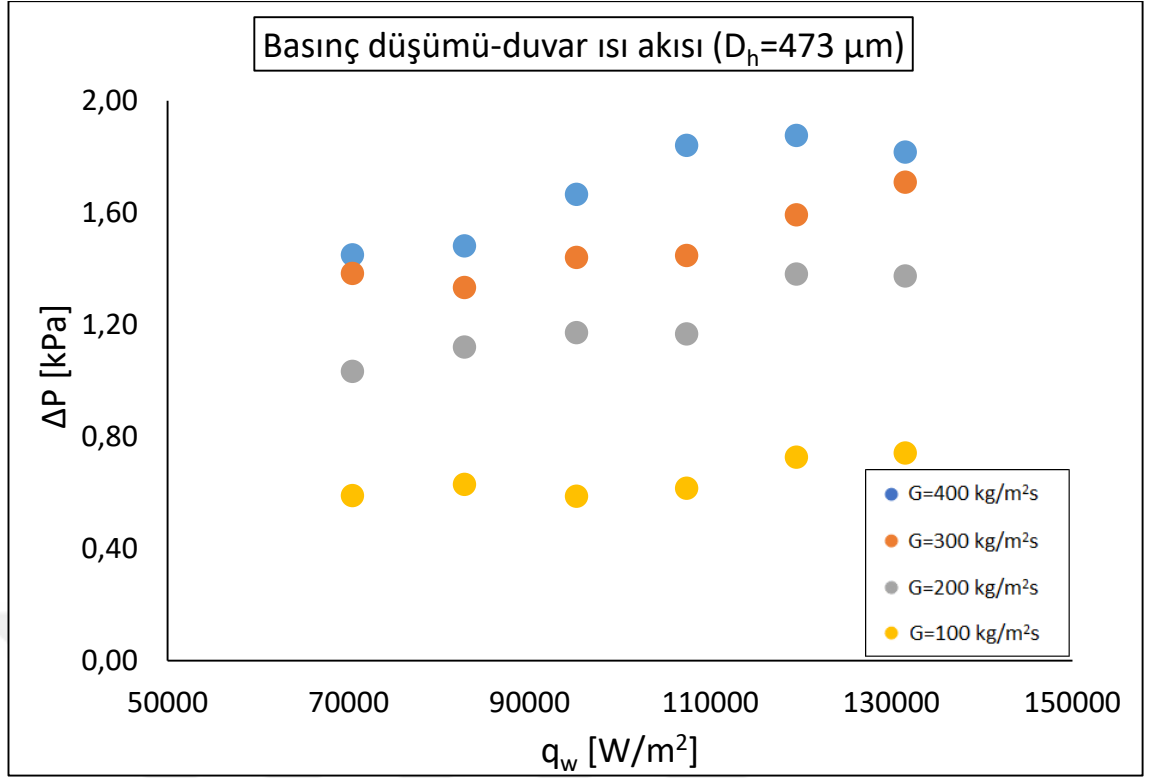
Şekil 4.42’de  $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı için toplam basınç düşümünün hidrolik çap ve efektif ısı akısıyla değişimi gösterilmiştir. Belli bir ısı akısı değeri için basınç düşümünün azalan hidrolik çap ile arttığı görülmektedir. Basınç düşümü hidrolik çapın tersiyle orantılı olduğundan bu hem tek fazlı hem de iki fazlı akışlarda beklenen bir durumdur. Ayrıca, mikrokanallarda iki fazlı akış kaynamada azalan hidrolik çapla beraber kabarcık sınırlanma etkilerinin artması daha fazla basınç düşümüne yol açmaktadır. Hidrolik çap küçüldükçe, yüzeyde oluşan kabarcıklar daha düşük ısı akılarında kanal yüzeyleri tarafından sınırlandırılmaktadır. Kanal eksenine boyunca uzayan kabarcık gelen sıvı akışına karşı direnç oluşturarak basınç kayıplarını arttırmaktadır. Hidrolik çap azaldıkça basınç düşümünde %45’e varan artışlar görülmüştür.



Şekil 4.42.  $G = 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için basınç düşümünün hidrolik çap ile değişimi.

#### 4.3.2. Isı akısı ve kütle akısının etkisi

Şekil 4.43 incelendiğinde, basınç düşümünün ısı ve kütle akısına bağlı olduğu görülmektedir. Basınç düşümü, genel olarak artan ısı akısı ve kütle akısı ile artmaktadır. Benzer sonuçlar literatürde birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Qu and Mudawar 2003b; Lee and Garimella 2008; Harirchian and Garimella 2008; Markal et al. 2016b). Isı akısı arttıkça kanal içinde daha fazla kabarcık oluşumu gerçekleşmektedir. Artan buharlaşma momentum kuvvetinin etkisiyle, kanala giren sıvıya karşı uygulanan direnç artar. Dolayısıyla sabit bir kütle akısı değerinde, basınç düşümü ısı akısı ile artma eğilimindedir. Diğer yandan, artan kütle akısı ile sıvı fazın atalet kuvvetleri artar. Bu durum, aynı zamanda sürtünme basınç kaybının artması anlamına gelir. Şekil 4.43'te görüldüğü gibi, sabit bir ısı akısı değerinde, basınç düşümü kütle akısı ile artmaktadır.

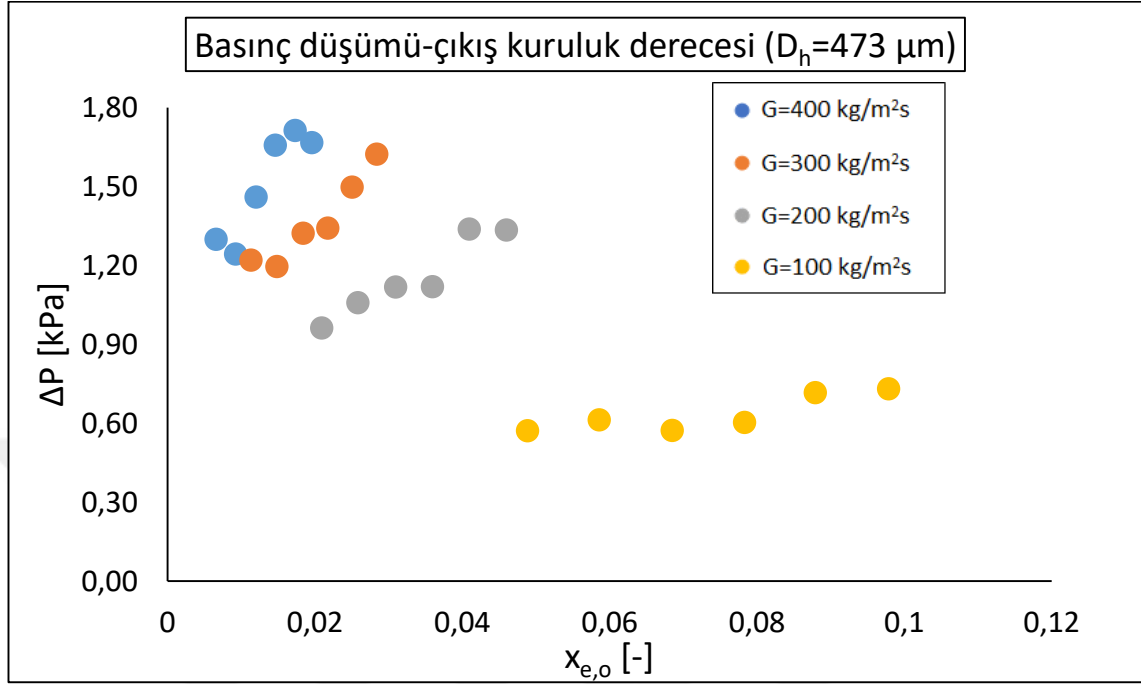


Şekil 4.43.  $D_h=473 \mu\text{m}$  çaplı mikrokanallarda basınç düşümünün ısı akısı ve kütle akı ile değişimi.

Şekil 4.44’te farklı kütle akı değerleri için çıkış kuruluk derecesine bağlı olarak, iki fazlı akış basınç düşümü verilmiştir. Belli bir kütle akıda, kuruluk derecesi arttıkça basınç düşümü artmaktadır. İki fazlı basınç düşümünün, ivmelenme ve sürtünme olmak üzere iki bileşeni olduğu daha önceden ifade edilmişti. Artan kuruluk derecesi ile akışkanın efektif viskozitesi düşer. Bu sürtünme basınç kaybının azalmasına anlamına gelir. Bununla birlikte, yüksek kuruluk derecelerinde, baskın akış deseni halkasal akış olduğundan, ivmelenme bileşeni artar. Bu iki basınç bileşeni arasındaki denge, toplam basınç düşümünü belirler (Özdemir 2016). Diğer taraftan, düşük kuruluk derecelerinde kütle akı arttıkça daha yüksek basınç düşümü görülmektedir. Bu, sürtünme basınç kayıplarının önemli olduğunu göstermektedir. Çünkü kütle akı artışı aynı zamanda kanalda akışkan hızının artması anlamına geldiğinden, artan sıvı atalet kuvvetleri basınç kaybını arttıracaktır.

Mikrokanallarda akış kaynamada yüzey kuvvetlerinin yanı sıra, kabarcıkların kanal duvarları tarafından sınırlandırılmasıyla buharlaşma momentum kuvveti ile sıvının atalet kuvveti arasındaki etkileşim önemli hale gelir. Ayrıca, komşu kanallardaki akış

deseni ve kanalların birbiriyle olan etkileşimi de basınç düşümünü etkiler. Bütün bu parametreler arasındaki etkileşim, nihai basınç düşüm karakteristiklerini oluşturur.



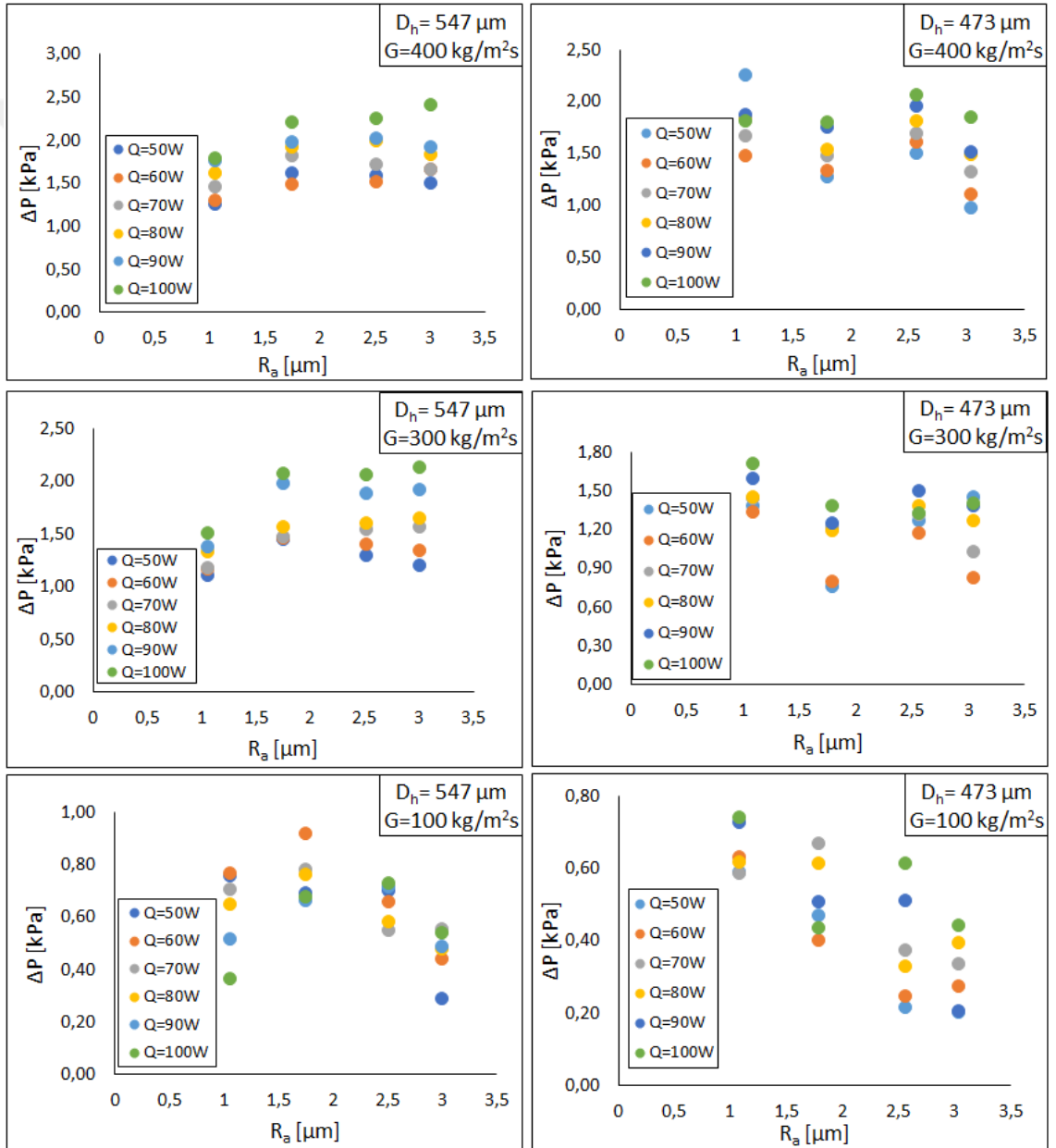
Şekil 4.44.  $D_h=473 \mu\text{m}$  çaplı mikrokanallarda basınç düşümünün farklı kütleli akılar için çıkış kuruluk derecesi ile değişimi.

### 4.3.3. Yüzey pürüzlülüğü etkisi

Şekil 4.45'te  $D_h=547 \mu\text{m}$  ve  $D_h=473 \mu\text{m}$  çaplı mikrokanallarda farklı ısı güç ve kütleli akılarda yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak basınç düşümü eğrileri verilmiştir.  $547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda,  $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı değerleri için düşük ısı güçlerinde basınç düşümünün yüzey pürüzlülüğü ile arttığı görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün  $R_a=1,05 \mu\text{m}$ 'den  $R_a=3,00 \mu\text{m}$ 'ye çıkmasıyla basınç düşümünde yaklaşık %40'a varan artışlar gözlenmiştir. Genel olarak, düşük kütleli akı ve yüksek ısı güçlerinde yüzey pürüzlülüğünün basınç düşümü üzerindeki etkisi hakkında bir şey söylemek güçtür. Düşük kütleli akılarda, sınırlandırılmış kabarcıkların kanal eksenine boyunca ileri-geri yönlü hareketleri ve periyodik akış deseninin görülmesi basınç ölçümlerinde dalgalanmalara yol açmış olabilir.  $D_h=473 \mu\text{m}$  çaplı mikrokanallarda, basınç düşümünün, yüksek kütleli akı değerlerinde ( $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olduğu, düşük kütleli akı değerlerinde ise  $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ise artan yüzey pürüzlülüğü ile azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Mikrokanallarda akış kaynamada, kabarcıkların kanal boyutlarıyla sınırlandırılması, kanala giren sıvının atalet kuvvetleri ile buharlaşma momentum kuvvetleri arasındaki etkileşim ve çoklu mikrokanallar arasındaki etkileşim basınç düşümü karakteristiklerinde dalgalanmalara yol açabilir. Ayrıca, doymuş akış kaynama bölgesinde lineer bir basınç düşümü kabulü, pürüzlülüğün etkisinin basınç düşümü üzerindeki etkisini önemsizleştirebilir. Daha doğru bir basınç dağılımı elde etmek için, kanal boyunca akış alanından basınç sensörleri ile yerel basınç ölçümü yapmak gerekir. Ancak, bu çalışmada test bölgesinin oldukça küçük olması bu durumu imkânsız kılmaktadır.



Şekil 4.45. Farklı hidrolik çaplı mikrokanallarda basınç düşümünün farklı çalışma parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü ile değişimi.

#### 4.4. Mikrokanallarda Akış Kaynama Isı Transfer Katsayısı için Bağntı Geliştirilmesi

Tez kapsamında, akış kaynama ısı transfer katsayısı için farklı çalışma koşullarında toplam 216 adet veri setinden oluşan önemli bir veritabanı oluşturulmuştur. Bu kısımda, ilk olarak elde edilen deneysel sonuçlar literatürdeki mevcut makro- ve mikro- kanal bağıntılarının tahmin değerleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra, bu çalışmadaki deneysel koşullar dikkate alınarak, mikrokanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısı tahmini için yeni bir bağıntı sunulmuştur.

Deneysel sonuçların karşılaştırıldığı bağıntılar EK-3'te sunulmuştur. Bunlardan ilk dördü makro kanallardaki akış kaynama için geliştirilmişken diğerleri mini/mikro kanallardaki akış kaynama için geliştirilmiştir. Karşılaştırma yapılan korelasyonların deney verilerini tahmin etmedeki başarısının tespiti için ortalama mutlak hata (MAE) yöntemi kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, deneysel verilere göre, literatürle uyumlu olarak,  $\pm 30$  hata bandı içinde kalan tahmin verilerinin yüzdesi dikkate alınmıştır. Ortalama mutlak hata Eşitlik (4.1)'de tanımlanmıştır. Bu denklemde M, toplam veri sayısıdır.

$$MAE = \frac{1}{M} \sum \frac{|h_{if,tahmin} - h_{if,deneysel}|}{h_{if,deneysel}} \times 100 \quad (4.1)$$

##### 4.4.1. Makro kanallar için geliştirilen bağıntıların değerlendirilmesi

Deneysel akış kaynama ısı transfer katsayısı sonuçlarının literatürde mevcut bazı makro kanal bağıntıları ile elde edilen tahminlerle karşılaştırılması Şekil 4.46'da gösterilmiştir. Geleneksel kanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısı için önerilen Chen (1966), Shah (1982), Kandlikar (1990) ve Liu and Winterton (1991) korelasyonları bu amaçla kullanılmıştır.

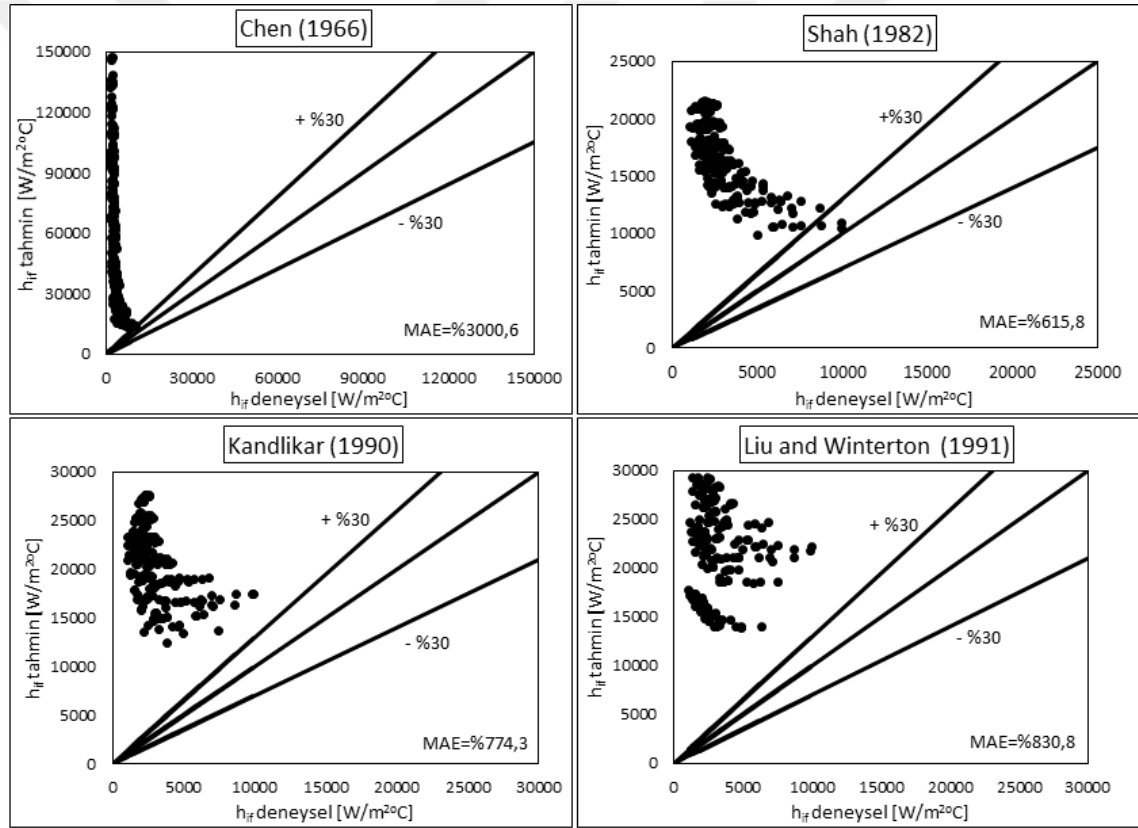
Akış kaynama ısı transferinde genel olarak kabarcıklı kaynama ve taşınımlı kaynama olmak üzere iki mekanizmanın etkili olduğu konu ile ilgili ilk çalışmalardan beri bilinmektedir. Akış kaynamada ısı transfer bağıntılarının birçoğu bu iki mekanizmanın etkisini içerecek şekilde geliştirilmiştir. İlk olarak, Chen (1966), su, metanol, pentan, heptan, benzen ve sikloheksan akışkanlarına ait düşey yukarı, düşey

aşağı ve halkasal kanallarda akış kaynamaya ait yaklaşık 600 veriye dayanarak kaynamalı akış ısı transfer katsayısı için bir bağıntı önermiştir. Önerilen bağıntı, kabarcık oluşumu ile ilişkili mikro taşınım mekanizması ve akış hızından kaynaklanan makro taşınım mekanizmasını içermektedir. Kabarcıklı kaynama terimi Forster and Zuber (1955) tarafından önerilen havuz kaynama korelasyonu ile hesaplanırken, taşınım terimi Dittus and Boelter (1930) bağıntısı ile hesaplanmıştır. Havuz kaynama terimi, akışın kabarcıklanma üzerindeki etkisini dâhil etmek için kabarcık baskılama faktörü (S) ile çarpılmıştır. Taşınım terimi ise Martinelli parametresine bağlı olarak değeri 1 veya birden büyük olan arttırım faktörü (F) ile düzeltilmiştir. İki fazlı ısı transfer katsayısı bu iki terimin toplamından oluşmaktadır. Chen (1966)'nin bu öncü çalışmasından sonra, kabarcıklı kaynama ve taşınımlı kaynama terimlerinin ısı transferi üzerindeki katkısını farklı şekilde ifade eden bağıntılar geliştirilmiştir. Shah (1982) 19 farklı deneysel çalışmadan 780 veri kullanarak akış kaynama ısı transfer katsayısı için bir bağıntı geliştirmiştir. Kabarcıklı kaynama terimi kaynama sayısı (Bo) ile ilişkilendirilirken, taşınım kaynama terimi taşınım sayısı (N<sub>co</sub>) ile ifade edilmiştir. Shah (1982), kabarcıklı kaynama ve taşınımlı kaynama terimlerinden büyük olanını kaynamalı akış ısı transfer katsayısı olarak kabul etmiştir. Kandlikar (1990), Shah (1982) ile benzer bir yaklaşım kullanarak, su ve farklı soğutucu akışkanların olduğu 24 farklı kaynaktan toplam 5264 adet deneysel veri kullanarak yatay ve düşey kanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısı için bir bağıntı önermiştir. Baskın olan kaynama mekanizması taşınım sayısı ile belirlenmiştir. Taşınım katsayısının 0,65'ten küçük olduğu durumda taşınım kaynama baskın iken taşınım katsayısının 0,65'ten büyük olduğu durumda kabarcıklı kaynama baskın ısı transfer modudur. Akışkan tipinin etkisini dahil etmek için kabarcıklı kaynama teriminde akışkan parametresi tanımlanmıştır. Liu and Winterton (1991) ise öncekilerin aksine kabarcıklı kaynama terimini kaynama sayısı ile ilişkilendirmek yerine kabarcıklı kaynama bileşeni için Cooper (1984) tarafından önerilen havuz kaynama bağıntısını kullanmıştır. Yazarlar, akış kaynama ısı transfer katsayısı için bağıntı oluştururken yedi farklı kaynaktan 4200 doymuş kaynama verisi ve yaklaşık 1000 aşırı soğuk kaynama verisi kullanmışlardır.

Şekil 4.46 incelendiğinde, seçilen makro bağıntılarla tahmin edilen değerlerin deneysel sonuçlara kıyasla oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Çizelge 4.1'de söz konusu makro bağıntıların mutlak ortalama hata yüzdeleri ve  $\pm\%30$ ,  $\pm\%40$  ve  $\pm\%50$  hata

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

bantlarındaki tahmin yüzdeleri verilmiştir. En iyi durumda bile  $\pm\%50$  hata bandındaki tahmin verilerinin sayısı  $\%3$ 'ten azdır. Bu durumun birkaç önemli sebebi olabilir. Makro ölçekten, mikro ölçeğe geçildiğinde, yüzey gerilimi ve sınırlama etkileri dolayısıyla farklı fiziksel kuvvetlerin ortaya çıkması hem hidrodinamik hem de ısı karakteristikleri önemli ölçüde değiştirmektedir. Makrokanallarda kaynamalı akış bağıntılarının genellikle herhangi bir fiziksel temele dayanmayan ve akışkan özelliklerini yeterince temsil etmeyen kaynama sayısı ile ilişkilendirilmesi büyük sapmaların oluşmasına yol açabilir. Diğer yandan, makro bağıntıların elde edildiği deneysel koşulların bu çalışmadaki deneysel koşullardan farklı olması da deneysel verilerin makro bağıntılarla tahminini önemli derecede etkilemiş olabilir.



Şekil 4.46. Doymuş akış kaynama deneysel ısı transfer katsayısı değerlerinin literatürde mevcut makrokanal bağıntıların tahmin değerleriyle karşılaştırılması.

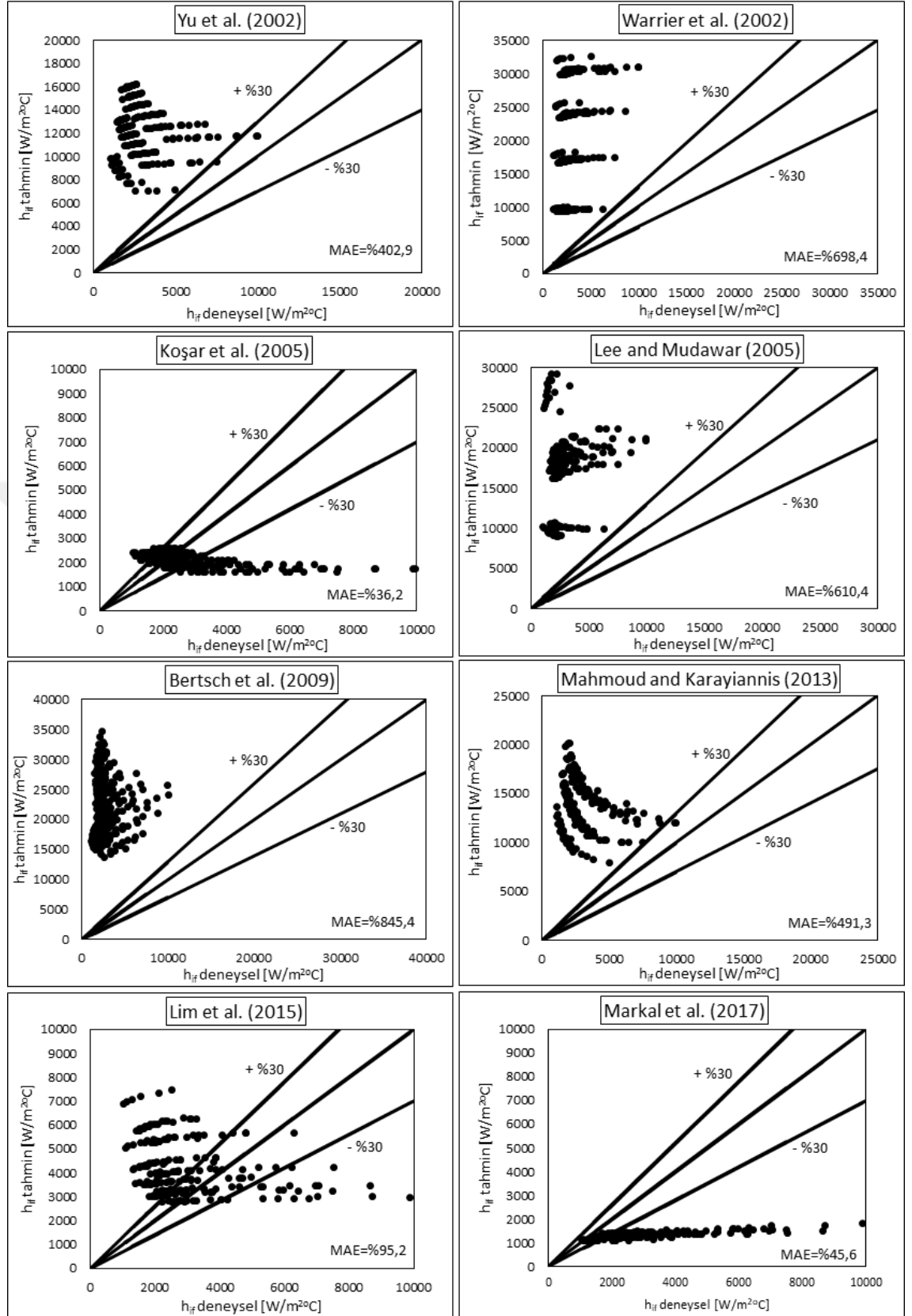
Çizelge 4.1. Seçilen makro bağıntıların tahmin kapasiteleri.

Bağıntı	MAE (%)	$\pm\%30$	$\pm\%40$	$\pm\%50$
Chen (1966)	3000,6	0	0,5	0,9
Shah (1982)	615,8	1,4	2,3	2,8
Kandlikar (1990)	774,3	0	0	0
Liu and Winterton (1991)	830,8	0	0	0

##### 4.4.2. Mikro kanallar için geliştirilen bağıntıların değerlendirilmesi

Yukarıda belirtildiği gibi, makrokanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısı için önerilen bağıntılar bu çalışmaya ait deneysel verileri tahmin etmede yetersiz kalmıştır. Bu bağıntılar, mikrokanallarda akış kaynamaya özgü kabarcık sınırlanması ve kanal boyunca uzaması, ince sıvı film tabakasının oluşması ve kabarcık oluşumunun bastırılması gibi etkilerini içermemektedir. Literatürde mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi için geliştirilmiş çok sayıda bağıntı vardır. Bu kısımda, Yu et al. (2002), Warrier et al. (2002), Koşar et al. (2005), Lee and Mudawar (2005b), Bertsch et al. (2009), Mahmoud and Karayiannis (2013), Lim et al. (2015) ve Markal et al. (2017) olmak üzere literatürden seçilmiş sekiz bağıntının deneysel verileri tahmin etme kapasitesi değerlendirilmiştir. Şekil 4.47’de söz konusu bağıntılar ile tahmin edilen deneysel verilerin  $\pm\%30$  hata bandı içerisindeki dağılımları ve mutlak ortalama hata değerleri gösterilmiştir. Çizelge 4.2’de ise, bağıntıların mutlak ortalama hata değerleri ve farklı hata bandı aralıklarında deneysel verileri tahmin etme yüzdesi verilmiştir. Şekil 4.48 ve Çizelge 4.2 incelendiğinde, en düşük mutlak ortalama hata değerine sahip bağıntının  $\%36.2$  ile Koşar et al. (2005) bağıntısı olduğu görülmektedir. Bunu, Markal et al. (2017) ve Lim et al. (2015) bağıntıları sırasıyla  $\%45.6$  ve  $\%95.2$  mutlak ortalama hata değerleri ile izlemektedir. Diğer yandan en iyi tahmin kapasitesine sahip bağıntının Koşar et al. (2005) bağıntısı olduğu görülmektedir. Koşar et al. (2005) bağıntısına göre  $\pm\%30$ ,  $\pm\%40$  ve  $\pm\%50$  hata bantlarındaki tahmin verileri yüzdesi sırasıyla  $\%41,6$ ,  $\%56,9$  ve  $\%71,3$ ’tür. Markal et al. (2017)’ye göre ise tahmin verilerinin  $\%20,8$ ,  $\%39,4$  ve  $\%59,3$ ’ü sırasıyla  $\pm\%30$ ,  $\pm\%40$  ve  $\pm\%50$  hata bantlarında yer alırken, Lim et al. (2015) bağıntısına göre  $\pm\%30$ ,  $\pm\%40$  ve  $\pm\%50$  hata bantlarındaki tahmin verileri sırasıyla  $\%24,5$ ,  $\%32,4$  ve  $\%42,1$  olarak hesaplanmıştır. Diğer bağıntıların deneysel verileri tahmin etmede oldukça zayıf olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, söz konusu bağıntıların elde edildiği veri tabanının farklılığı ile açıklanabilir. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmaların kapsamı ve uygulanan metotlar arasındaki farklılıklar bu duruma yol açmış olabilir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.47. Doymuş akış kaynama deneysel ısı transfer katsayısının literatürde mevcut mikrokanal bağıntılarının tahmin değerleriyle karşılaştırılması.

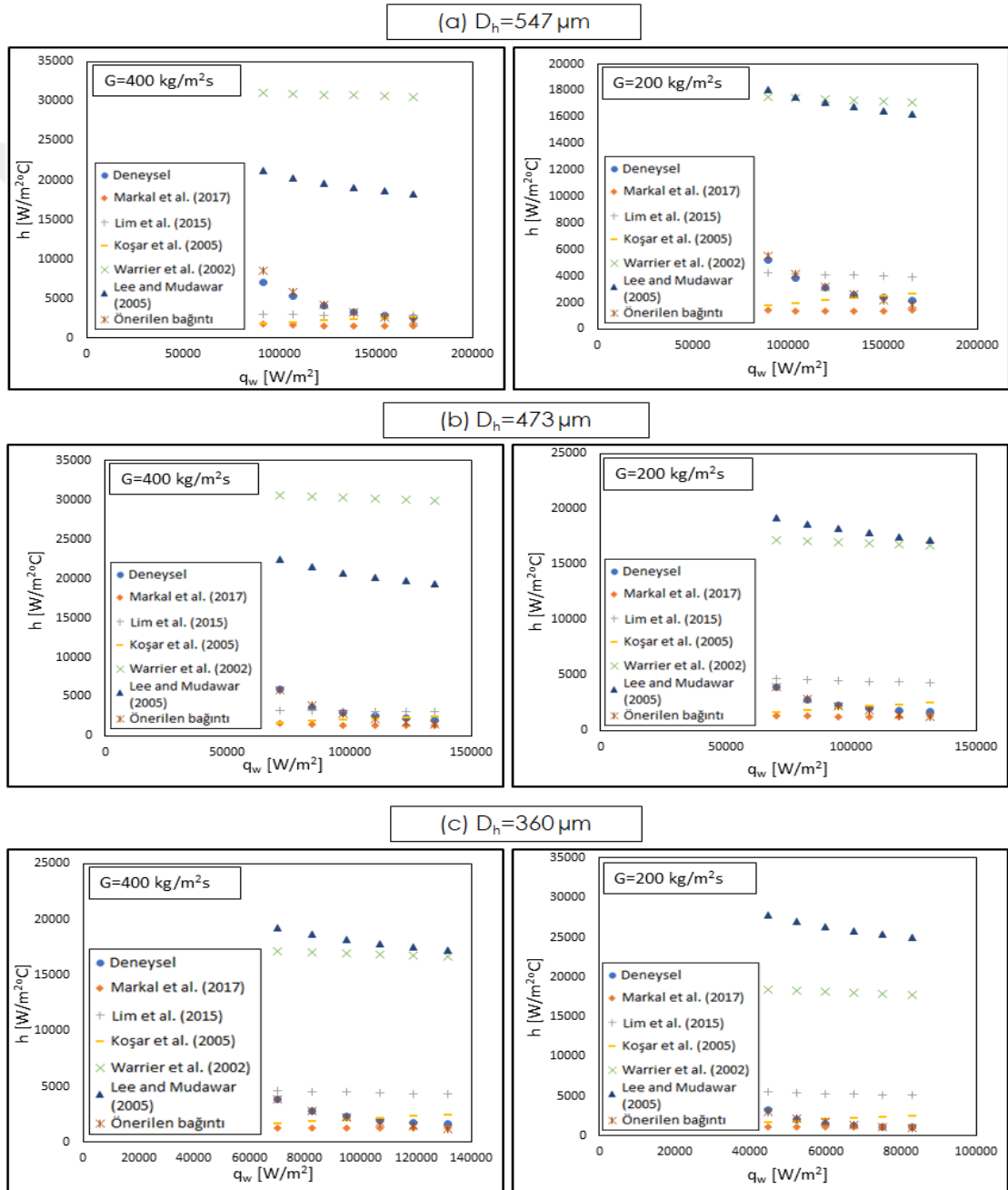
Çizelge 4.2. Seçilen mikro bağıntıların tahmin kapasiteleri.

Bağıntı	MAE (%)	± %30	± %40	± %50
Yu et al. (2002)	402,9	1,4	2,3	2,7
Warrier et al. (2002)	698,4	0	0	0,5
Koşar et al. (2005)	36,2	41,6	56,9	71,3
Lee and Mudawar (2005b)	610,4	0	0	0,5
Bertsch et al. (2009)	845,4	0	0	0
Mahmoud and Karayiannis (2013)	491,3	0,9	1,8	2,3
Lim et al. (2015)	95,2	24,5	32,4	42,1
Markal et al. (2017)	45,6	20,8	39,4	59,3

Şekil 4.48’de, farklı çalışma koşullarına ait deneysel sonuçlar, seçilen bağıntılarla karşılaştırılmıştır. Şekiller incelendiğinde, genel olarak Koşar et al. (2005) bağıntısı hariç diğer bağıntıların ısı akısına bağlı olarak ısı transfer katsayısındaki değişim eğrilerinin deneysel sonuçlara yakın olduğu söylenebilir. Diğer bir ifade ile deneysel sonuçlara göre ısı transfer katsayısı ısı akısı ile beraber azalmakta olup Koşar et al. (2005) bağıntısı hariç diğer bağıntılarda da ısı transfer katsayısının ısı akısı ile azaldığı görülmüştür. Koşar et al. (2005) bağıntısında ise ısı transfer katsayısı artan ısı akısı ile artmaktadır. Warrier et al. (2002) ve Lee and Mudawar (2005b) bağıntıları deneysel sonuçlara göre çok yüksek tahminler yapmasına karşın eğilim olarak deneysel sonuçlara benzerdir. Warrier et al. (2002) bağıntısı FC-84 akışkanına ait veritabanı için oluşturulmuştur. Su ile kıyaslandığında, FC-84’ün termofiziksel özellikleri oldukça farklıdır. Özellikle, FC-84’ün yüzey gerilimi suyun yaklaşık altıda biridir. Yüzey geriliminin küçük olması ısıtılan yüzeyden ayrılan kabarcıkların daha küçük olmasını ve buna bağlı olarak daha yüksek ısı transferi elde edilmesini sağlar (Stephan and Abdelsalam 1980). Lee and Mudawar (2005b) ise bağıntı için 207 su ve diğerleri R134a olmak üzere toplam 318 adet kaynamalı akış verisi kullanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan deneysel metot ile Lee and Mudawar (2005b)’in kullandığı deneysel metot oldukça farklıdır. Bu çalışmada, sabit basınç ve kütleli akıda ısı akısı artırılarak veriler toplanırken Lee and Mudawar (2005b) ısı akısı ve basıncı sabit tutup kütleli akıyı değiştirmişlerdir. Sonuç olarak bu farklılar, deneysel sonuçlar ile söz konusu bağıntıların tahminleri arasında önemli sapmalara yol açmış olabilir. Hidrolik çap azaldıkça Markal et al. (2017) bağıntısının deneysel verileri tahmin etme kapasitesi artmaktadır. Bu durum, Markal et al. (2017) bağıntısının çıkarıldığı deneysel veri tabanının  $D_h \leq 250 \mu\text{m}$  mikrokanallara ait olmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, deneylerde hidrolik çap küçüldükçe taşınımlı kaynama mekanizmasının baskın hale gelmesi ve Markal et al. (2017) bağıntısının oluşturulduğu

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

deneylerde de baskın ısı transfer mekanizmasının taşınımlı kaynama olması deneysel sonuçlara yakın tahmin verilerinin elde edilmesini sağlamış olabilir. Lim et al. (2015) ve Koşar et al. (2005) bağıntıları ağırlıklı olarak kabarcıklı kaynamanın baskın olduğu veri tabanına dayanmasına rağmen deneysel verilere yakın tahminler yapmışlardır. Bu bağıntıların genellikle yüksek kütleli akı değerleri için deneysel verilere yakın tahmin değerleri verdiği görülmektedir. Bu durum, düşük kütleli akılarda taşınımlı kaynamanın baskın hale gelmesinden kaynaklanabilir.



Şekil 4.48. Farklı kütleli akı değerleri için önerilen bağıntı ve literatürde mevcut bağıntılarla tahmin edilen ısı transfer katsayısının ısı akısı ile değişiminin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması: (a)  $D_h=547 \mu\text{m}$  (b)  $D_h=473 \mu\text{m}$  (c)  $D_h=360 \mu\text{m}$ .

##### 4.4.3. Akış kaynama ısı transfer katsayısı için yeni bir bağıntı geliştirilmesi

Yukarıda verilen makro ve mikro bağıntıların bu deneysel çalışmaya ait akış kaynama ısı transfer sonuçlarını tahmin etmede yeterince başarılı olduğu söylenemez. Koşar et al. (2005) bağıntısı MAE değeri ve %30 hata bandındaki tahmin kapasitesi açısından iyi olmasına karşın deneysel verilerle kıyaslandığında ısı transfer katsayısının ısı akışı ile değişimini belirlemede yetersizdir. Literatürdeki bağıntıların tahmin kapasiteleri arasındaki farklılıklar, kullanılan akışkan, uygulanan deneysel metot, çalışma parametrelerinin yanı sıra yüzey pürüzlülüğü gibi mikrokanallarda kaynamalı akış üzerinde etkisi henüz yeterince çalışılmamış parametrelerden de kaynaklanabilir. Zira literatürde birçok araştırmacı bu durumu ifade etmiştir (Thome and Consolini 2010; Mahmoud and Karayiannis, 2017).

Literatürde, makrokanallarda yüzey pürüzlülüğünün kaynamalı ısı transferine etkisini içeren bağıntılar mevcuttur. Bu bağıntıların çoğu havuz kaynama verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Çoğu araştırmacı, ısı transfer katsayısı ile yüzey pürüzlülüğü arasında  $h \propto R^n$  olacak şekilde üstel bir ilişki tanımlamışlardır. Bağıntılarda,  $n$  üs katsayısının 0-1 ile 0,2 arasında değişmektedir. Pürüzlülüğün hangi parametre ile temsil edilmesinin daha doğru olacağı belirsizliğini korumakla birlikte pürüzlülük parametresi olarak genellikle  $R_a$ ,  $R_z$  ve  $R_p$ 'nin (DIN 4762/1:1960'a göre) kullanıldığı görülmektedir. Stephan (1963) R-11 için  $h \propto R_p^{0,133}$ , Danilova and Belskii (1965) R-12 ve R-13 için  $h \propto R_z^{0,2}$ , Ribatski and Jabardo (2003) soğutucu akışkan grubu (R-11, R-123, R-12, R-134a ve R-22) için  $h \propto R_a^{0,2}$ , Jones (2010) su için  $h \propto R_a^{0,1}$  ilişkisini önermişlerdir. Bunların yanı sıra indirgeniş basınca ( $P_r$ ) bağlı olarak önerilen daha karmaşık bağıntılarda mevcuttur. Nishikawa et al. (1982) R-21, R-113, R-114 soğutucu akışkanlar ve  $0,08 < P_r < 0,9$  aralığı için  $h \propto R_p^{0,2(1-P_r)}$  bağıntısını, Cooper (1984) ise geniş akışkan tipi ve indirgenmiş basınç aralığından oluşan veri tabanı için  $h \propto P_r^{-0,2 \log_{10} R_p}$  ilişkisini önermiştir. Özellikle bazı araştırmacılar, kabarcıklı havuz kaynama rejimi için oluşturulan Cooper (1984) bağıntısının akış kaynama verilerini tahmin etmede de kaynamalı akış bağıntılarından daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir (Bao et al. 2000; Bertsch et al. 2008; Harirchian ve Garimella 2008). Bertsch et al. (2009) 14 farklı kaynaktan 12 farklı akışkana ait toplam 3899 veri noktasını kullanarak küçük boyutlu kanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısı için önerdiği, kabarcıklı kaynama ve

taşınımlı kaynama mekanizmalarını içeren modelde kabarcıklı kaynama terimini Cooper (1984) bağıntısı ile hesaplamışlardır. Çizelge 4.2 incelendiğinde, Bertsch et al. (2009) bağıntısının MAE değeri %845,4 olduğu,  $\pm\%50$  hata bandında bile hiçbir deneysel veri tahmini bulunmadığı görülmektedir. Cooper (1984) kabarcıklı kaynama bağıntısının düşük indirgenmiş basınç değerleri ve  $R_p=1 \mu\text{m}$ 'den (yaklaşık olarak  $R_a \approx 0,4 \mu\text{m}$ ) sapmaların önemli olduğu durumlar için uygun olmaması tahmin verilerini kötüleştirilmiş olabilir. Benzer durum Jones (2010) tarafından ifade edilmiştir. Bu çalışmada  $P_r$  değeri 0,0037 iken Cooper (1984) bağıntısının geçerli olduğu en düşük  $P_r$  değeri 0,08'dir. Ayrıca, çıkarılan bağıntı için çok farklı veritabanının kullanılmasının yanı sıra akış kaynama ısı transfer katsayısı için hem kabarcıklı kaynama hem de taşınımlı kaynama etkilerinin birleştirilmesi yüksek tahmin değerlerinin elde edilmesine yol açmış olabilir.

Yukarıda sunulan bilgiler ışığında, mikrokanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısı tahmini için yüzey pürüzlülüğü etkisini de içeren bağıntılara ihtiyaç vardır. Bu çalışma sonucunda, mikrokanallarda doymuş akış kaynamaya ait toplam 216 adet ısı transfer katsayısı verisi ile kayda değer bir veri tabanı sunulmuştur. Bu veritabanı baz alınarak mikrokanallarda akış kaynama ısı transfer katsayısı için Eşitlik 4.2'de verilen yeni bir bağıntı önerilmiştir. Eşitlik (4.2)'deki katsayı ve üs değerleri çok parametrelili lineer olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

$$h = \frac{0,0079 Re_L^{0,224} Pr_L^{0,333} \left(\frac{1-x_e}{x_e}\right)^{0,85} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0,65} \left(\frac{k_L}{D_h}\right)^{0,0672} \left(\frac{R_a}{L}\right)^{0,12}}{Bo^{0,7024} We_L^{0,869} Bn^{1,9357} \alpha^{3,7578} S_i^{0,6122}} \quad (4.2)$$

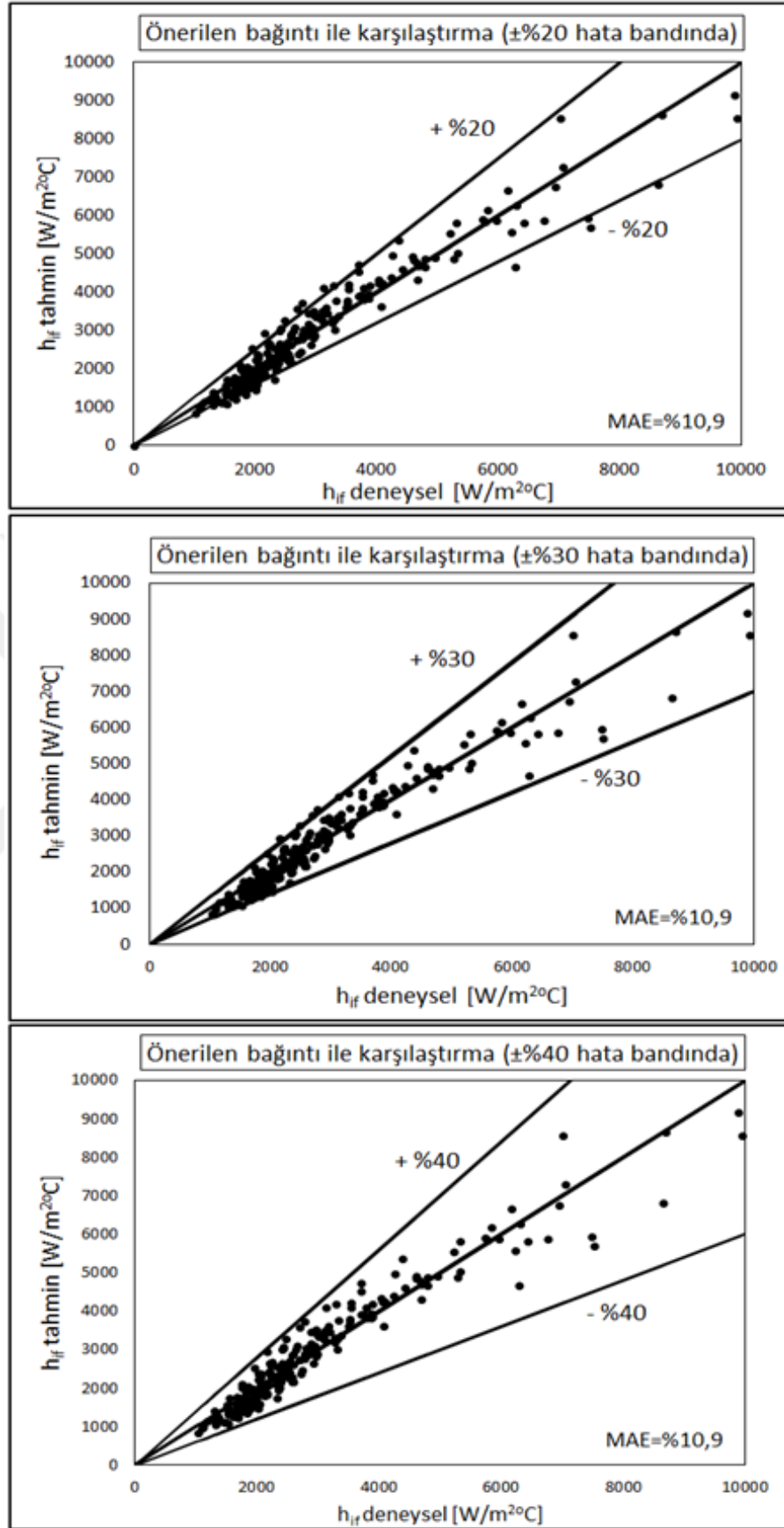
Deneysel ısı transfer katsayısı, kaynama sayısı (Bo), sıvı Weber sayısı ( $We_L$ ), Bond sayısı (Bn), sıvı Reynolds sayısı ( $Re_L$ ), sıvı Prandtl sayısı ( $Pr_L$ ), kuruluk derecesi ( $x_e$ ), fazların yoğunluk oranı ( $\rho_G/\rho_L$ ), kanal yükseklik/genişlik oranı ( $\alpha$ ), ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ve yüzey arttırım faktörü ( $S_i$ ) ile ilişkilendirilmiştir. Kaynama sayısı, ısı akışı ve kütle akı etkilerini, Weber sayısı atalet kuvvetleriyle yüzey gerilim etkilerini, Reynolds sayısı atalet ve viskoz kuvvetleri etkilerini dikkate alır. Bond sayısı kaldırma kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine oranı olup hidrolik çapın azalmasına bağlı olarak akış kaynamada oluşan kabarcık sınırlanması etkilerini temsil eder.  $[(1-x_e)/x_e](\rho_G/\rho_L)$  terimi üs değerleri farklı olmakla beraber literatürde akış kaynama verilerini ilişkilendirmede sıkça kullanılan boyutsuz taşınım sayısına benzer

yapıya sahiptir. Kanal yükseklik/genişlik oranı ( $\alpha$ ), diğer bir ifade ile kanal genişlik/yükseklik oranı, bazı araştırmacılar tarafından (Lee and Mudawar 2008; Markal et al. 2017) ısı transfer bağıntısı oluşturmada kullanılmıştır. Pürüzlü yüzeylerde pürüzsüz yüzeylere göre çekirdeklenme bölgeleri daha fazla olmakla birlikte aynı zamanda pürüzlülük dolayısıyla ısı transfer yüzey alanı artmaktadır. Ortalama pürüzlülük parametresi ve yüzey arttırım faktörü yüzey yapısının ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini ilişkilendirmek için kullanılmıştır.  $R_a$  ve  $S_i$  değerleri 3D optik profilometre ile elde edilmiştir.  $S_i$ , ölçüm yapılan yüzeyin gerçek yüzey alanının pürüzsüz yüzey alanına oranını ifade eder.

Şekil 4.49’da, önerilen yeni bağıntının deneysel verileri yüzde  $\pm\%20$ ,  $\pm\%30$  ve  $\pm\%40$  hata bantları içerisinde tahmin etme kapasitesi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, önerilen bağıntının MAE değeri  $\%10,9$ ’dur. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırıldığında oldukça iyi bir değerdir. Çizelge 4.3’te ise önerilen bağıntının farklı hata bantları içerisindeki tahmin yüzdeleri verilmiştir. Önerilen korelasyonun  $\pm\%30$ ,  $\pm\%25$  ve  $\pm\%20$  hata bantları içerisindeki tahmin yüzdeleri sırasıyla  $\%97,7$ ,  $\%92,6$  ve  $\%87,5$ ’tir. Önerilen bağıntı deneysel verilerin tamamını  $\pm\%40$  hata bandında tahmin edebilmektedir. Şekil 4.50-4.54 arasında farklı çalışma koşullarında, deneysel sonuçların önerilen bağıntıyla elde edilen tahmin değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.3. Önerilen bağıntının deneysel verileri tahmin kapasitesi.

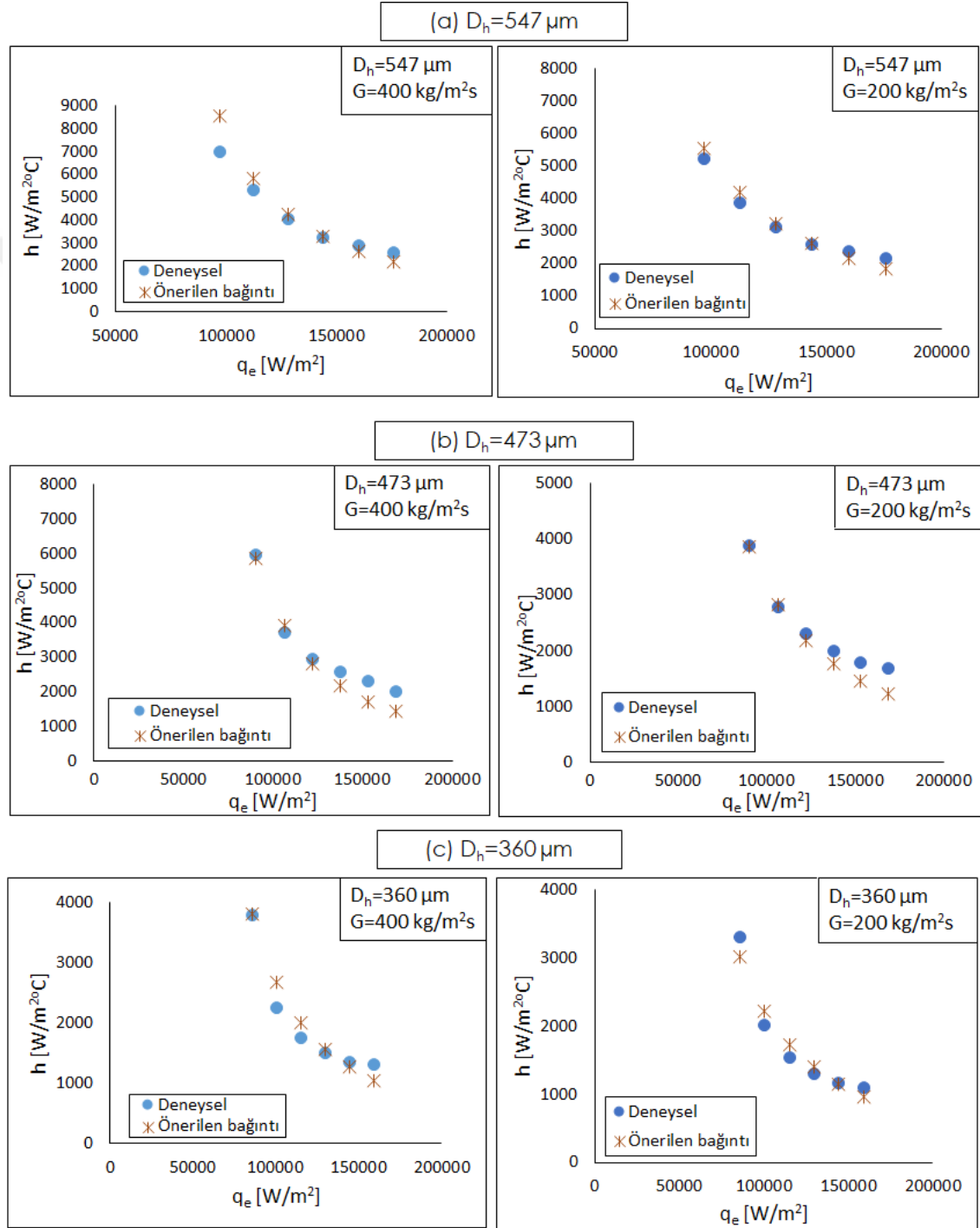
<b>Bağıntı</b>	<b>MAE (%)</b>	<b><math>\pm\%20</math></b>	<b><math>\pm\%25</math></b>	<b><math>\pm\%30</math></b>	<b><math>\pm\%40</math></b>
Önerilen bağıntı	10,9	87,5	92,6	97,7	100



Şekil 4.49. Önerilen ısı transfer katsayısı bağıntısıyla yapılan tahminlerin farklı hata band aralıklarında deneysel verilerle karşılaştırılması.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.50’de, farklı hidrolik çaplı mikrokannalarda  $G=200$  ve  $400$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı değerleri için efektif ısı akısına bağlı olarak ısı transfer katsayısının deneysel değerleri ve önerilen bağıntı ile tahmin edilen değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikler incelendiğinde önerilen bağıntının farklı hidrolik çaplarda ısı akısına bağlı olarak ısı transfer katsayısındaki değişimi başarılı bir şekilde temsil edebildiği görülmektedir.



Şekil 4.50.  $G=200$  ve  $400$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  kütleli akı değerinde farklı hidrolik çaplı kanallarda efektif ısı akısına bağlı olarak ısı transfer katsayısının deneysel değerleri ve önerilen bağıntı ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması: (a)  $D_h=547 \mu\text{m}$  (b)  $D_h=473 \mu\text{m}$  (c)  $D_h=360 \mu\text{m}$ .

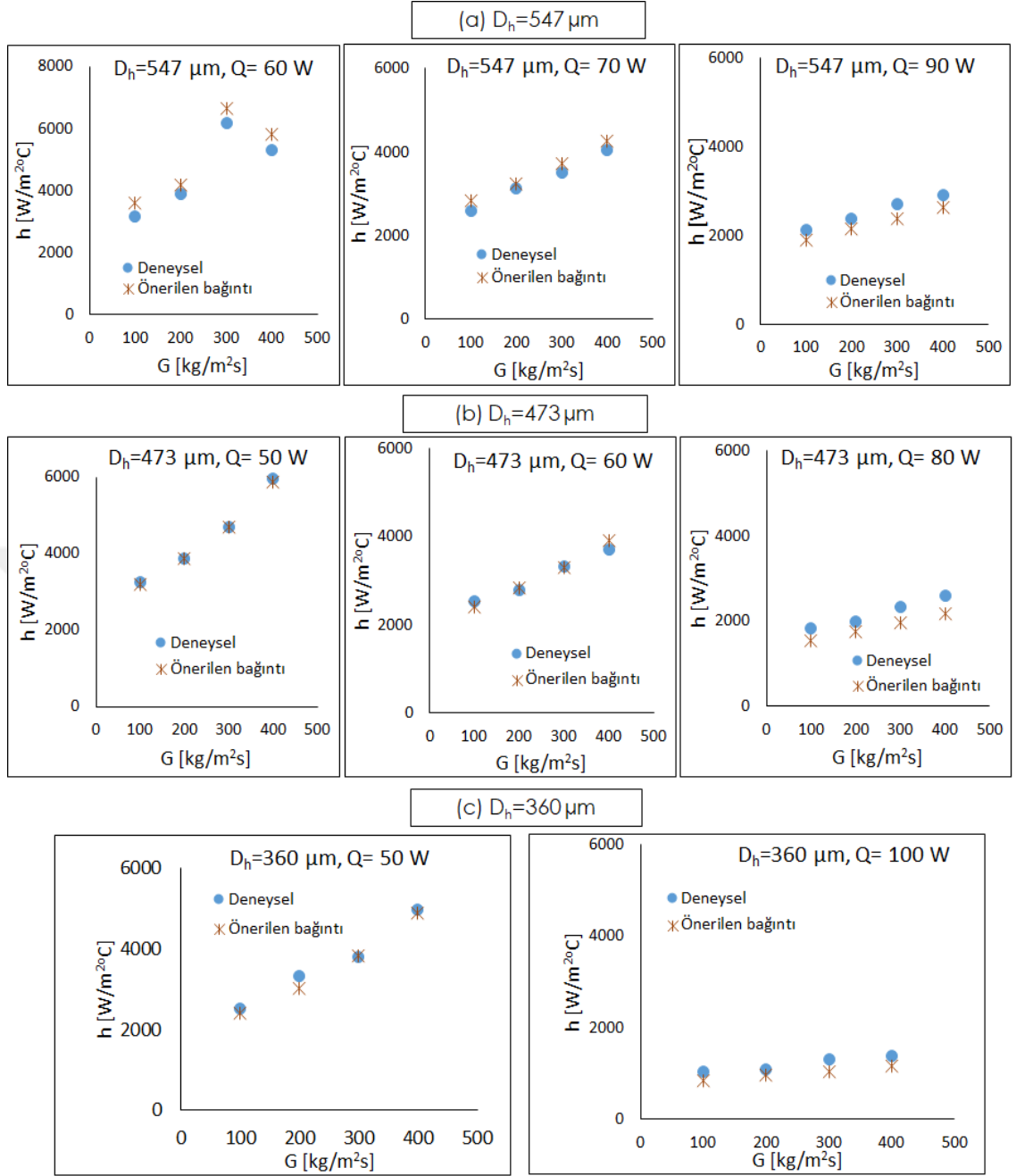
Şekil 4.51’de ise, farklı hidrolik çaplı mikrokanallarda, farklı ısı güç değerlerinde kütleli akıya bağlı olarak deneysel ve tahmin edilen ısı transfer katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Önerilen bağıntı farklı ısı güçler için kütleli akı ile ısı transfer katsayısındaki değişimi yakalamakla birlikte, deneysel sonuçlara oldukça yakın tahminler yaptığı görülmektedir.

Şekil 4.52’te, farklı ısı güç ve kütleli akı değerlerinde hidrolik çapa göre deneysel ve tahmin edilen ısı transfer katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Önerilen bağıntıya göre ısı transfer katsayısı deneysel sonuçlara benzer şekilde artan hidrolik çapla birlikte artmıştır. Önerilen bağıntının hidrolik çaptaki değişime bağlı olarak ısı transfer katsayısındaki değişimi yakalamada başarılı olduğu görülmektedir. Önerilen korelasyonun orta büyüklükteki ısı güç değerlerinde tahmin kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Şekil 4.53’te  $D_h=547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanallarda farklı kütleli akı ve ısı güç değerlerinde önerilen bağıntının yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak ısı transfer katsayısını tahmin etme kapasitesi deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Önerilen bağıntıya göre yüzey pürüzlülüğü arttıkça ısı transfer katsayısı artmıştır. Yüksek ısı güçlerde kütleli akı azaldıkça önerilen bağıntı ile yapılan tahminler deneysel sonuçlara yaklaşmıştır. Önerilen bağıntının  $R_a= 1-2,5\mu\text{m}$  arasında deneysel verileri tahmin etmede başarılı olduğu görülmektedir.

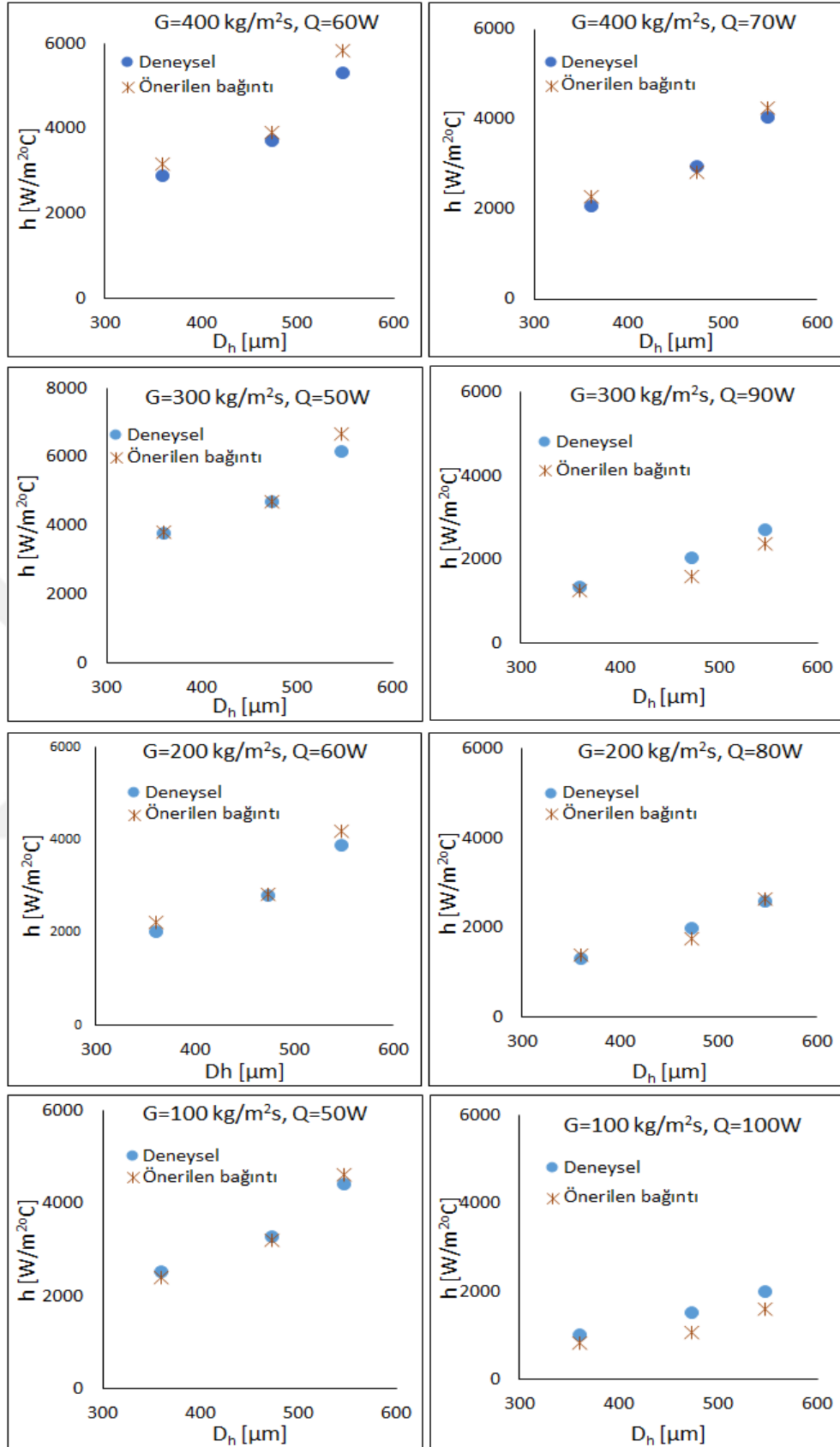
Hidrolik çap azaldıkça, önerilen bağıntının yüzey pürüzlülüğü etkisini daha iyi tahmin ettiği görülmektedir. Şekil 4.54,  $D_h=473 \mu\text{m}$  çaplı mikrokanallarda farklı çalışma şartları için ısı transfer katsayısının pürüzlülükle değişimi gösterilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



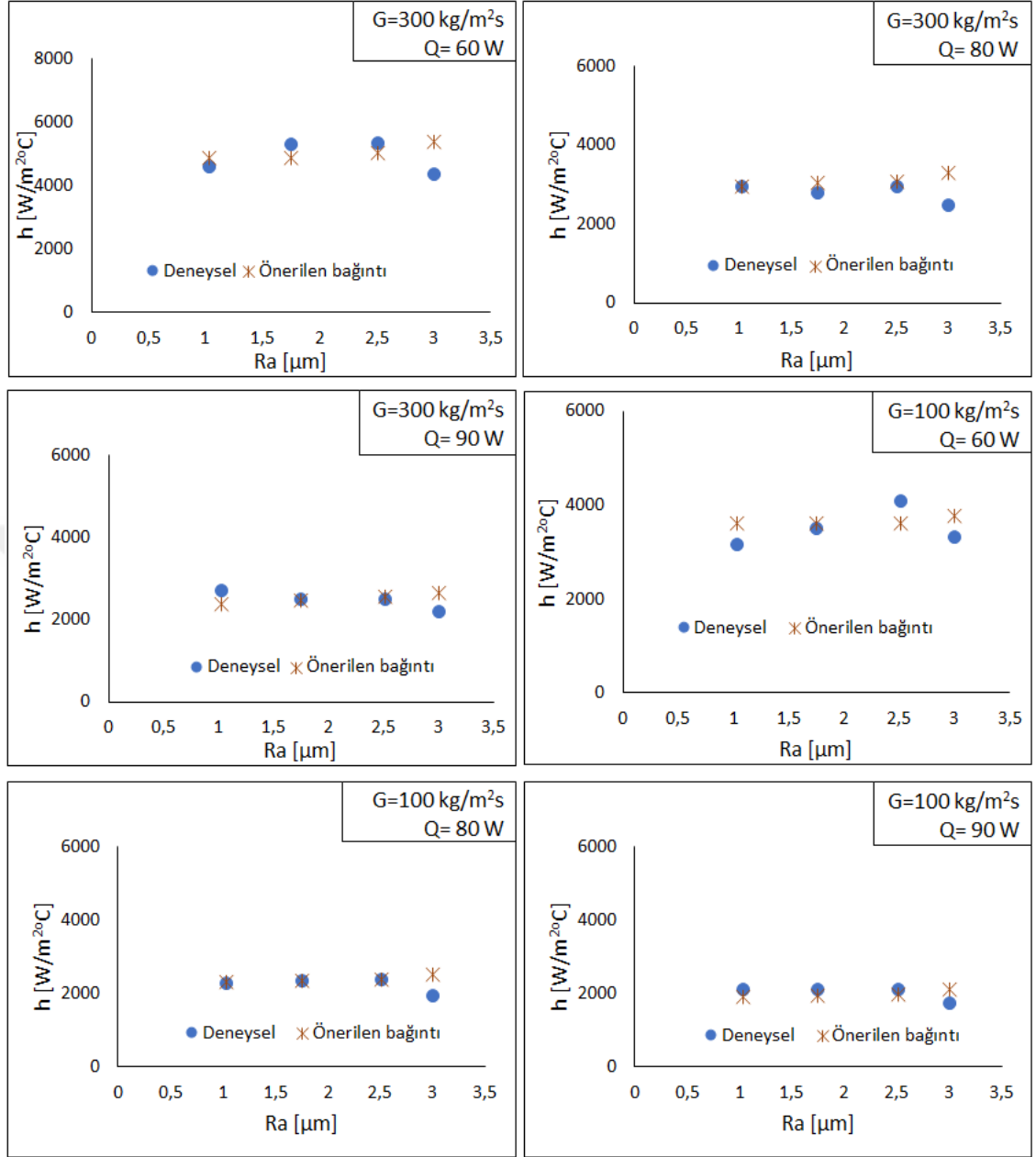
Şekil 4.51. Farklı hidrolik çaplı mikrokanallarda, farklı ısı güç değerlerinde kütleli akıya bağlı olarak deneysel ve önerilen bağıntı ile tahmin edilen ısı transfer katsayısı değerleri karşılaştırılması: (a)  $D_h=547 \mu\text{m}$  (b)  $D_h=473 \mu\text{m}$  (c)  $D_h=360 \mu\text{m}$ .

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



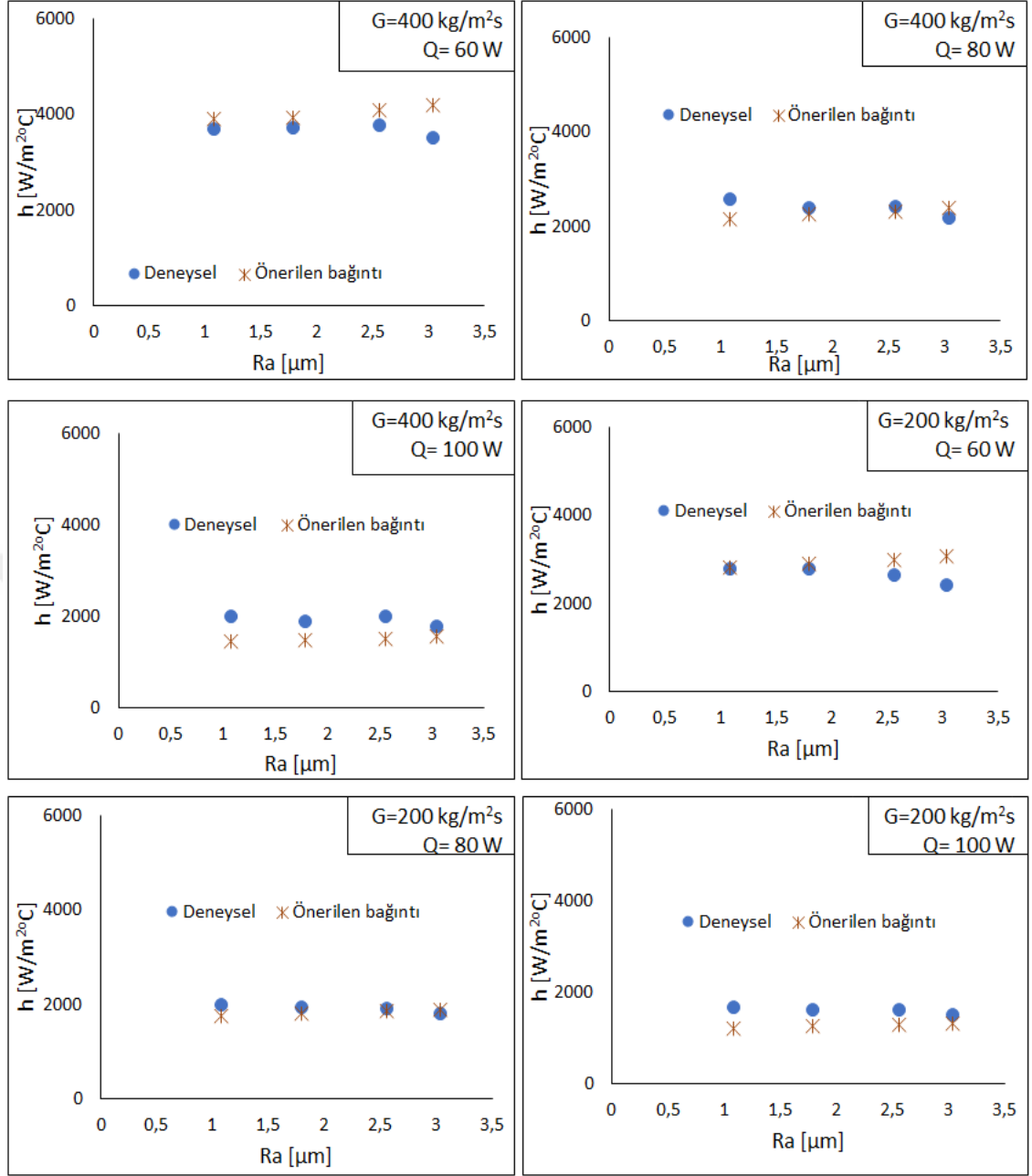
Şekil 4.52. Farklı ısı güçlerinde hidrolik çapa göre deneysel ve önerilen bağıntı ile tahmin edilen ısı transfer katsayısı değerleri karşılaştırılması.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.53.  $D_h=547$  μm çaplı mikrokanallarda farklı çalışma şartlarında ısı transfer katsayısının pürüzlülükle değişimine ait deneysel sonuçların önerilen bağıntı ile karşılaştırılması.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.54.  $D_h=473$   $\mu\text{m}$  çaplı mikrokannallarda farklı çalışma şartlarında ısı transfer katsayısının pürüzlülükle değişimine ait deneysel sonuçların önerilen bağıntı ile karşılaştırılması.

### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, çoklu mikrokanallarda başta yüzey pürüzlülüğü olmak üzere hidrolik çap, ısı akısı ve kütleli akının akış kaynama ısı transferi ve basınç düşümü üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, mikrokanallarda kaynamalı akış fiziğini açıklayabilmek için akış görüntülerinden faydalanılmıştır. Elde edilen bulgular özet halinde aşağıda verilmiştir.

#### Akış Desenleri

- Deneysel olarak, kabarcıklı akış, tıkaç akış ve halkasal akış rejimleri gözlemlenmiştir.
- $D_h=547\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda, düşük ısı akısı değerlerinde, kabarcıklı akış rejimi görülmüştür.  $D_h=360\mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanallarda, akış deseni yapısı diğer hidrolik çaplı kanallardan farklıdır. En küçük kanal genişliğine sahip bu kanallarda, sürdürülebilir bir kabarcıklı akış rejimi görülebilmiştir. Yüksek ısı akısı değerlerinde, her üç hidrolik çaplı mikrokanallarda baskın olarak halka akış rejimi görülmüştür.
- Hidrolik çap azaldıkça, daha düşük ısı akılarında akış rejimleri arasındaki geçiş (kabarcıklı/tıkaç ve tıkaç/halka) gerçekleşmiştir. En düşük hidrolik çaplı kanalda kabarcık oluşumu bastırılmış olup net bir kabarcıklı akış rejimi görülmemiştir.
- Kabarcıklı akış rejiminde, ısı akısındaki artışla beraber kabarcıkların daha kısa sürede, kanal boyutlarına ulaştığı gözlemlenmiştir. Halkasal akış rejiminde, merkezde akan buhar fazı ile yüzeydeki sıvı film ara yüzeyindeki buharlaşma hızı artan ısı akısı ile artmıştır. Sıvı film hızla buharlaşarak, kanal içinde, kuruma görülmüştür.
- Kütleli akı arttıkça kaynamanın daha yüksek ısı akılarında meydana geldiği görülmüştür. Kütleli akı arttıkça, sıvının atalet kuvveti arttığından kabarcık oluşumu bastırılmaktadır. Mikrokanal içerisinde sıvının artan ataleti kabarcıkların

yüzeyden erken ayrılmasına dolayısıyla daha küçük boyutlu olmasına sebep olmuştur.

- Kütleli akı arttıkça kabarcıklı akış rejimi periyodu uzamıştır. Bu durum, artan kütleli akının kabarcık büyüme hızını azaltmasından kaynaklanmaktadır.
- $G=100$  ve  $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  akış debilerinde periyodik akış yapısı gözlenmiştir. Yüksek kütleli akılarda periyodik akış yapısı gözlenmemiştir.
- $R_a=1,05 \text{ } \mu\text{m}$  pürüzlülük değerine sahip kanallarda, kabarcık oluşumu kanal ortasında başlarken, diğer pürüzlülük değerlerine sahip kanallarda kabarcık oluşumu genellikle kanal yan yüzeylerinde başlamıştır. Pürüzlülük arttıkça, kabarcık boyutunun arttığı görülmüştür.
- $D_h=547 \text{ } \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda, artan ısı akısı ile birlikte, yüzeylerde kabarcık oluşumu ve kabarcık büyüklüğünün yüzey pürüzlülüğü ile arttığı gözlenmiştir.  $D_h=473 \text{ } \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda ise, artan ısı akısıyla birlikte yüzey pürüzlülüğüne göre akış deseninde çok fazla bir değişim meydana gelmemiştir.

### Isı Transferi

- İncelenen bütün hidrolik çap değerleri için, ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığı görülmektedir. Deneilerde, kuruluk derecesi değerlerinin %10 altında kaldığı, kuruluk derecesinin %8'den büyük değerleri için ısı transfer katsayısındaki değişimin önemsiz olduğu görülmektedir.
- Artan kuruluk derecesiyle birlikte, ısı transfer katsayısının kuruluk derecesine bağımlılığı azalmıştır.

- Düşük ısı akılarında daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmiştir. Isı transfer katsayısının artan ısı akısı ile azaldığı, yüksek ısı akısı değerlerinde ise ısı akısından bağımsız olduğu görülmüştür.
- Düşük ısı güçlerinde, ısı transfer katsayısının ısı akısına bağımlılığı fazla iken, yüksek ısı güçlerinde bu bağımlılık azalmaktadır. Düşük ısı güçlerinde, ısı transfer katsayısı sıfır kuruluk derecesi civarında artmakta, daha sonra artan kuruluk derecesi ise azalmaktadır. Yüksek ısı güçlerinde ise, ısı transfer katsayısının kuruluk derecesine bağımlılığı önemsizdir.
- Aynı ısı akısında kanal boyunca yerel ısı transfer katsayısındaki değişim yok denecek kadar azdır.
- Kütle akısındaki azalma ile birlikte, kanal çıkışında daha yüksek kuruluk dereceleri elde edilmiştir.
- Yüksek ısı akılarında ve küçük hidrolik çaplı kanallarda, daha yüksek kızma farkı değerlerine ulaşılmıştır. Bu, mikrokanal çapı küçüldükçe yüzeyde oluşan kabarcıkların daha kısa sürede kanal boyutlarına ulaşması ve kuruma süresinin uzamasından kaynaklanmaktadır.
- Düşük ısı güçlerinde, yüksek pürüzlülüğe sahip mikrokanallarda, belirli bir duvar ısı akısı daha düşük kızdırma farklarında elde edilmiştir.
- $D_h=547 \mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda, bütün kütle akı değerlerinde, düşük duvar ısı akısı değerlerinde, pürüzlülüğü fazla olan yüzeylerdeki ısı transfer katsayısının yüksek olduğu görülmektedir.
- $G=400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $q_w=70 \text{ kW/m}^2$  ısı akısı değerinde,  $R_a=1,05 \mu\text{m}$ 'lik pürüzlülüğe sahip mikrokanallar yaklaşık  $7000 \text{ W/m}^2\text{°C}$  ısı transfer katsayısına sahipken  $R_a=2,51 \mu\text{m}$ 'lik pürüzlülüğe sahip mikrokanallarda bu değer  $10000 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 'ye ulaşmaktadır. Pürüzlülüğün  $1,05 \mu\text{m}$ 'den,  $2,51 \mu\text{m}$ 'ye çıkması ısı transfer

katsayısında yaklaşık %42'lik artış sağlamıştır.  $G=300$  ve  $G=100$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  kütleli akıları için ısı transfer katsayısındaki artış değerleri sırasıyla yaklaşık %38 ve %25'tir. Bu durum, düşük ısı akılarında, kabarcıklı kaynama rejiminin baskın ısı transfer modu olduğunu göstermektedir. Kabarcıklı kaynama rejiminde, pürüzlülük artışı, kabarcıklanma bölgelerini arttırarak ısı transfer katsayısında artışa neden olmaktadır. Yüksek ısı akılarında ise, pürüzlülüğün ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi oldukça az olup eğriler birbirine yaklaşmaktadır. Bu da ısı transfer mekanizmasının taşınımlı kaynama olduğunu göstermektedir. Kütleli akı azaldıkça  $R_a=2,51$   $\mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip mikrokanalların ısı transferi açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

- $D_h=473$   $\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallarda, özellikle azalan kütleli akı ve artan ısı güç ile birlikte ısı transfer katsayısının pürüzlülüğün bağımsız olduğu görülmektedir. Bu durum azalan hidrolik çapla beraber halkasal akış rejiminin hâkim olmasıyla açıklanabilir. Yüzey pürüzlülüğü, kabarcık oluşumunda etkili olduğu için halka akış rejiminde önemsiz hale gelmektedir.  $G=400$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  kütleli akısında,  $D_h=547$   $\mu\text{m}$  hidrolik çaplı mikrokanallara benzer olarak, ısı transfer katsayısı pürüzlülükle artmış ve  $R_a=2,56$   $\mu\text{m}$ 'de maksimum değerine ulaşmıştır. Azalan kütleli akı ile birlikte, daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerinde daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmiştir.  $G=300$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  için ısı transfer katsayısı  $R_a=1,79$   $\mu\text{m}$ 'de maksimum olurken  $G=200$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  ve  $G=100$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  kütleli akılarında ısı transfer katsayısı artan pürüzlülükle beraber azalmıştır. En yüksek ısı transfer katsayısı  $R_a=1,08$   $\mu\text{m}$  pürüzlülük değerinde elde edilmiştir.
- Düşük ısı güçlerinde pürüzlülük artışının ısı transfer katsayısını olumlu yönde etkilediği söylenebilir. Düşük ısı güçlerinde kanal içerisinde kabarcıklı kaynama rejimi görüldüğünden, pürüzlülük artışının kabarcıklanma odaklarını arttırarak kaynamalı akış ısı transferini arttırdığı düşünülmektedir. Yüksek ısı akılarında kanal içerisinde uzun kabarcıklı akış ve halka akış görülmesi pürüzlülük etkisini bastırmakta böylelikle pürüzlülüğün ısı transferi üzerindeki etkisi önemsiz hale gelmektedir.

- Literatürde mevcut makro ve mikrokanallarda akış kaynama ısı transferi için geliştirilmiş çeşitli bağıntılar değerlendirilmiştir. Koşar et al. (2005), ve Markal et al. (2017) bağıntılarıyla yapılan tahminlerin belirli çalışma koşulları için deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu; ancak, mevcut bağıntıların tüm veritabanı dikkate alındığında, yetersiz kaldığı görülmüştür.
- Mikrokanallarda doymuş akış kaynamada ısı transfer katsayısını belirlemek için kaynamada önemli boyutsuz sayıları, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey arttırım faktörünü de içeren yeni bir bağıntı önerilmiştir. Önerilen bağıntının tüm veri tabanı (216 veri noktası) üzerinden MAE değeri %10,9 olup; tahmin ettiği verilerin %87,5, %97,7 ve %100'ü sırasıyla  $\pm$  %20,  $\pm$  %30 ve  $\pm$  %40 hata bantları içerisinde yer almaktadır.

### **Basınç Düşümü**

- Doymuş kaynama bölgesi uzunluğu belli bir kütle akı için için ısı akısı ile artmaktadır.
- Belli bir ısı akısı değeri için basınç düşümünün hidrolik çap ile arttığı görülmektedir. Mikrokanallarda iki fazlı akış kaynamada, azalan hidrolik çapla beraber kabarcık sınırlanması etkilerinin artması daha fazla basınç düşümüne neden olmuştur. Hidrolik çap azaldıkça basınç düşümünde %45'e varan artışlar görülmüştür.
- Basınç düşümü, genel olarak artan ısı akısı ve kütle akı ile artmaktadır
- Belli bir kütle akıda, kuruluk derecesi arttıkça basınç düşümü artmaktadır.
- 547  $\mu$ m hidrolik çaplı mikrokanallarda,  $G=400$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  ve  $G=300$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  kütle akı değerleri için düşük ısı güçlerinde basınç düşümünün yüzey pürüzlülüğü ile arttığı görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün  $R_a=1,05$   $\mu\text{m}$ 'den  $R_a=3,00$   $\mu\text{m}$ 'ye çıkmasıyla basınç düşümünde yaklaşık %40'a varan artışlar gözlenmiştir. Genel

olarak, düşük kütleli akı ve yüksek ısı güçlerinde yüzey pürüzlülüğünün basınç düşümü üzerindeki etkisi hakkında bir şey söylemek güçtür. Düşük kütleli akılarda, sınırlandırılmış kabarcıkların kanal eksenini boyunca ileri-geri yönlü hareketleri ve periyodik akış deseninin görülmesi basınç ölçümlerinde dalgalanmalara yol açmış olabilir.

- $D_h=473$   $\mu\text{m}$  çaplı mikrokanallarda ise, basınç düşümünün, yüksek kütleli akı değerlerinde ( $G=400$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  ve  $G=300$   $\text{kg/m}^2\text{s}$ ) yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olduğu, düşük kütleli akı değerlerinde ise ( $G=100$   $\text{kg/m}^2\text{s}$ ) ise artan yüzey pürüzlülüğü ile azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Mikrokanallarda akış kaynamada, kabarcıkların kanal boyutlarıyla sınırlandırılması, kanala giren sıvının atalet kuvvetleri ile buharlaşma momentum kuvvetleri arasındaki etkileşim ve çoklu mikrokanallar arasındaki etkileşim basınç düşümü karakteristiklerinde dalgalanmalara yol açabilir. Ayrıca, doymuş kaynamalı akış bölgesinde lineer bir basınç düşümü kabulü, pürüzlülüğün etkisinin basınç düşümü üzerindeki etkisini önemsizleştirebilir.

Mikrokanallarda akış kaynama üzerinde çalışmayı düşünen araştırmacılar için bazı tavsiyeler aşağıda verilmiştir:

- Bu çalışmada, mikrokanalların tabanındaki yüzey sıcaklık değerleri, tek boyutlu ısı iletimi yaklaşımıyla ısı alıcıya en yakın noktadaki ısı çiftleriyle elde edilen sıcaklık değerleri yardımıyla elde edilmiştir. Benzer şekilde, iki fazlı bölgedeki basınç değerleri lineer basınç düşümü yaklaşımıyla elde edilmiştir. Bu yaklaşımların yerine, mikrokanallarda akışı rahatsız etmeyecek şekilde mikrokanal tabanındaki yerel sıcaklık değerlerini ve kanal içindeki yerel basınç değerlerini elde etmeye olanak sağlayacak ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi ve kullanımı daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.
- Bu çalışmada görüntüleme sadece kanal çıkışına yakın doymuş kaynama şartlarının hâkim olduğu bölgeden yapılmıştır. Kanalın farklı bölgelerinden de akış görüntüleme yapılarak akış kaynama desenlerinin kanal boyunca gelişimi izlenebilir.

- Farklı test akışkanları ile benzer deneyler gerçekleştirilip, yüzey yapısı ve akışkan özellikleri ile birlikte akış kaynama ısı transfer karakteristiklerinin değişimi incelenebilir.
- Kaynama uygulamaları açısından önemli olan konulardan birisi de kritik ısı akısı ve kararsızlıklardır. Yüzey karakteristiklerinin hem tek hem de çoklu mikrokanallarda kritik ısı akısına ve kaynama kararsızlıklarına etkisi incelenebilir.
- Akış görüntüleme ile birlikte parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniği kullanılarak, mikrokanallar içindeki sıvı ve buhar fazlarına ait hız alanları belirlenebilir. Böylelikle, mikrokanallarda akış kaynamada etkin olan kuvvetler ve buna bağlı olarak kabarcık oluşum dinamiği ve akış desenlerinin gelişimi ayrıntılı olarak incelenebilir.
- Literatürde uzun süreli çalışma şartlarında yaşlanma nedeniyle yüzey pürüzlülüğünün etkisinin azalabileceği ifade edilmiştir. Pratik uygulamalar açısından oldukça önemli olan bu durumun anlaşılabilmesi için mikrokanallarda uzun çalışma şartlarında yüzey yapısındaki değişim ve bu değişimin akış kaynama karakteristiklerine etkilerinin araştırılması gerekmektedir.
- Literatürde, mikrokanallarda akış kaynamanın hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile çözümlenmesine yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Mikrokanallarda akış kaynama uygulamalarının yaygınlaşması için deneysel çalışmalarla desteklenen sayısal çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bunun için de akış kaynamaya ait temel fiziksel karakteristikleri ihtiva eden teorik çalışmaların yapılması oldukça önemlidir.

## KAYNAKLAR

- Ali, R., Palm, B., Martin-Callizo, C., and Maqbool, M. H. 2013. Study of Flow Boiling Characteristics of a Microchannel Using High Speed Visualization. *ASME Journal of Heat Transfer*, 135, 081501.
- Al-Zaidi, A. H., Mahmoud, M. M., and Karayiannis, T. G. 2019. Flow Boiling of HFE-7100 in Microchannels: Experimental Study and Comparison with Correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 100-128.
- Anonymous, 2003. Wet-Chemical Etching and Cleaning of Silicon. Virginia Semiconductor, Web sitesi: [https://www.virginiasemi.com/?cont\\_uid=54](https://www.virginiasemi.com/?cont_uid=54), Erişim Tarihi: 26.01.2020.
- Balasubramanian, P, and Kandlikar, S. G. 2005. Experimental Study of Flow Patterns, Pressure Drop and Flow Instabilities in Parallel Rectangular Minichannels. *Heat Transfer Engineering*, 26(3), 20-27.
- Balasubramanian, K., Lee, P. S., Hawlader, M. N. A., and Gao, S. 2010. Pressure Drop Characteristics and Instabilities During Flow Boiling in Parallel and Oblique Finned Microchannels – A Comparative Study. 12th Electronics Packaging Technology Conference, 8-10 December, In Proceedings, 273-278, Singapore.
- Balasubramanian, K., Lee, P. S., Jin, L. W., Chou, S. K., Teo, C. J., and Gao, S. 2011. Experimental Investigations of Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop in Straight and Expanding Microchannels – A Comparative Study. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(12), 2413-2421.
- Balasubramanian, K., Jagirdar, M., Lee, P. S., Teo, C. J., and Chou, S. K. 2013. Experimental Investigation of Flow Boiling Heat Transfer and Instabilities in Straight Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 655-671.
- Bankoff, S. G. 1957. Ebullition from Surfaces in the Absense of a Pre-existing Gaseous Phase. *Transactions of ASME*, 79, 735-740.
- Bankoff, S. G. 1958. Entrapment of Gas in the Spreading of a Liquid over a Rough Surface. *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 4(1), 24-26.
- Bankoff, S. G. 1961. On the Mechanism of Subcooled Nucleate Boiling. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 57(32), 156-172.
- Bankoff, S. G. 1962. A Note on Latent Heat Transport in Nucleate Boiling. *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 8(1), 63-65.
- Bankoff, S.G., and Mason, J. P. 1962. Heat Transfer from the Surface of a Steam Bubble in Turbulent Subcooled Liquid Stream. *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 8(1), 30-33.

- Banu, A., and Ali, M. Y. 2016. Electrical Discharge Machining (EDM): A Review. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 1(1), 3-10.
- Bao, Z. Y., Fletcher, D. F., and Haynes, B. S. 2000. Flow Boiling Heat Transfer of Freon R11 and HCFC123 in Narrow Passages. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(18), 3347-3358.
- Barajas, A. M., and Panton, R. L. 1993. The Effects of Contact Angle on Two-Phase Flow in Capillary Tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 19(2), 337-346.
- Bergles, A. E., and Rohsenow, W. M. 1964. The Determination of Forced-Convection Surface-Boiling Heat Transfer. *ASME Journal of Heat Transfer*, 86(3), 365-372.
- Bergles, A.E., Lienhard, J.H., Kendall, G.E., and Griffith, P. 2003. Boiling and Evaporation in Small Diameter Channels. *Heat Transfer Engineering*, 24(1), 18-40.
- Bertsch, S. S., Groll, E. A., and Garimella, S. V. 2008. Review and Comparative Analysis of Studies on Saturated Flow Boiling in Small Channels. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 12(3), 187–227.
- Bertsch, S.S., Groll, E.A. and Garimella, S.V. 2009. A Composite Heat Transfer Correlation for Saturated Flow Boiling in Small Channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8), 2110-2118.
- Bhushan, B. 2001. Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques. In: *Modern Tribology Handbook*, Bhushan B. (eds), CRC Press, 1, 49-119, USA.
- Bibeau, E. L., and Salcudean, M. 1994. A Study of Ebullition in Forced Convection Subcooled Nucleate Boiling at Low Pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37(15), 2245-2259.
- Bogojevic, D., Sefiane, K., Duursma, G., and Walton, A. J. 2013. Bubble Dynamics and Flow Boiling Instabilities in Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58(1-2), 663-675.
- Brauner, N., and Moalem-Maron, D. 1992. Identification of the Range of Small Diameter Conduits regarding Two-Phase Flow Pattern Transitions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 19(1), 29-39.
- Brauner, N., and Ullman, A. 2007. The Prediction of Flow Boiling Maps in Minichannels. *Multiphase Science and Technology*, 19(1), 49-73.
- Brown, W. T. 1967. A Study of Flow Surface Boiling. Phd Thesis. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Thechnology, USA.
- Buchling, P., and Kandlikar, S. 2016. Enhanced Flow Boiling of Ethanol in Open Microchannels With Tapered Manifolds in a Gravity-Driven Flow. *Journal of Heat Transfer*, 138(3), 031503.

- Campbell, S. E. 2008. *Fabrication Engineering at the Micro- and Nanoscale*. Oxford University Press, New York.
- Carey, V., P. 2008. *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena*. Second Edition, CRC Press, New York, USA.
- Celata, G. P., Saha, S.K., Zummo, D., and Dossevi, D. 2010. Heat Transfer Characteristics of Flow Boiling in a Single Horizontal Microchannel. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(7), 1086-1094.
- Celata, G. P., Cumo, D., Dossevi, Jilisen, R. T. M., Saha, S. K., and Zummo, G. 2012. Flow Pattern Analysis of Flow Boiling inside a 0,48 mm Microtube. *International Journal of Thermal Sciences*, 58, 1-8.
- Cengel, Y. A., and Ghajar, A. J. 2015. *Heat and Mass Transfer*. Fifth Edition, McGraw Hill, USA.
- Chang, K. H., and Pan, C. 2007. Two-Phase Flow Instability for Boiling in a Microchannel Heat Sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(11-12), 2078–2088.
- Chen, J. C. 1966. Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 5(3), 322–329.
- Chen, L., Tian, Y. S., and Karayiannis, T. G. 2006. The Effect of Tube Diameter on Vertical Two-Phase Flow Regimes in Small Tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(21-22), 4220-4230.
- Chen, T., and Garimella, S. V. 2011. Local Heat Transfer Distribution and Effect of Instabilities during Flow Boiling in a Silicon Microchannel Heat Sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(15-16), 3179-3190.
- Cheng, L., and Zou, H. 2010. Evaluation of Flow Boiling Heat Transfer Correlations with Experimental data of R134a, R22, R410A and R245fa in Microscale Channels. *International Journal of Microscale Nanoscale Thermal Fluid Transport Phenomena*, 1, 363-380.
- Cheng, L., and Liu, L. 2011. Analysis and Evaluation of Gas-Liquid Two-Phase Frictional Pressure Drop Prediction Methods for Microscale Channels. *International Journal of Microscale Nanoscale Thermal Fluid Transport Phenomena*, 2, 259-280.
- Cheng, L., and Xia, G. 2017. Fundamental Issues, Mechanism and Models of Flow Boiling Heat Transfer in Microscale Channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108 (Part A), 97-127.
- Choi, C. W., Yu, D. I., and Kim, M. H. 2011. Adiabatic Two-Phase Flow in Rectangular Microchannels with Different Aspect Ratios: Part I- Flow Pattern, Pressure Drop,

- and Void Fraction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1-3), 616-624.
- Choudhary, S. K., and Jadoun, R. S. 2014. Current Advanced Research Development of Electric Discharge Machining (EDM): A Review. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2(3), 273-297.
- Clark, H. B., Streng, P. S., and Westwater, J. W. 1959. Active Sites for Nucleate Boiling. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 55(29), 103-110.
- Coleman, J. W., and Garimella, S. 1999. Characterization of Two-Phase Flow Patterns in Small Diameter Round and Rectangular Tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(15), 2869-2881.
- Coleman, H. W., and Steele, W. G. 2018. *Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Cooper, M. G., and Lloyd, J. P. 1966. Transient Local Heat Flux in Nucleate Boiling. Third International Heat Transfer Conference, 7-12 August, In Proceedings, 3, 193-203, Chicago, USA.
- Cooper, M. G., and Lloyd, J. P. 1969. The Microlayer in Nucleate Boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 12(8), 895-913.
- Cooper, M. G., and Merry, J. M. D. 1973. A General Expression for the Rate of Evaporation of a Layer of Liquid on a Solid Body. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16(9), 1811-1815.
- Cooper, M. G., Mori, K., and Stone, C. R. 1983. Behaviour of Vapour Bubbles Growing at a Wall with Forced Flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 26(10), 1489-1507.
- Cooper, M. G. 1984. Heat Flow Rates in Saturated Nucleate Pool Boiling-A Wide-Ranging Examination Using Reduced Properties. *Advances in Heat Transfer*, 157-239.
- Cornwell, K., and Kew, P. A. 1993. Boiling in Small Parallel Channels, In: *Energy Efficiency in Process Technology*. Pilavachi, P. A. (eds), Elsevier, 624-638, Essex, UK.
- Corty, C., and Foust, A. S., 1955. Surface Variables in Nucleate Boiling. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 51(17), 1-12.
- Cummins, G. 2011. *Fabrication of Microchannels for Use in Micro-Boiling Experiments*. Phd Thesis, Edinburgh University, School of Engineering, Edinburgh, UK.
- Çaydaş, U., and Hasçalık, A. 2004. CNC Tel Erozyon Tezgahlarında Farklı Malzemelerin İşlenebilirliğinin Araştırılması. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6, 201-214.

- Dally, B. 2010. Life After Moore's Law, Web sitesi: <https://www.forbes.com/2010/04/29/moores-law-computing-processing-opinions-contributors-bill-dally.html#358ae4a12a86>, Erişim Tarihi: 13.01.2020.
- Damianides, C. A., and Westwater, J. M. 1988. Two-Phase Flow Pattern in a Compact Heat Exchanger and in Small Tubes, Second UK National Conference on Heat Transfer, 14-16 September, Proceedings, 2, 1257-1268, Glasgow, Scotland.
- Dang, C., Jia, L., Peng, Q., Yin, L., and Qi, Z. 2020. Comparative Study of Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of HFE-7000 in Continuous and Segmented Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 148, 119038.
- Danilova, G. N., and Belskii, V. K. 1965. Study of Heat Transfer on Boiling on Freon 133 and Freon 12 on Pipes of Different Roughness, *Kholodilnaya Tekhnika*, 4, 24-28.
- Davis, E. J., and Anderson, G. H. 1966. The Incipience of Nucleate Boiling in Forced Convection Flow. *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 12(4), 774-780.
- Demiray, F., and Kim, J. 2004. Microscale Heat Transfer Measurements during Pool Boiling of FC-72: Effect of Subcooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(14-16), 3257-3268.
- Deng, D., Wan, W., Tang, Y., Wan, Z., and Liang, D. 2015a. Experimental Investigations on Flow Boiling Performance of Reentrant and Rectangular Microchannels – A Comparative Study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 435-446.
- Deng, D., Wan, W., Shao, H., Tang, Y., Feng, J., and Zeng, J. 2015b. Effects of Operation Parameters on Flow Boiling Characteristics of Heat Sink Cooling Systems with Reentrant Porous Microchannels. *Energy Conversion and Management*, 96, 340-351.
- Deng, D., Chen, R., He, H., Feng, J., Tang, Y., and Zhou, W. 2015c. Effects of Heat Flux, Mass Flux and Channel Size on Flow Boiling Performance of Reentrant Porous Microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 64, 13-22.
- Deng, D., Wan, W., Qin, Y., Zhang, J., and Chu, X. 2017. Flow Boiling Enhancement of Structured Microchannels with Micro Pin Fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 105, 338-349.
- Dittus, F.W. and Boelter, L.M.K. 1930. Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type. University of California, Berkeley, Publications in Engineering, 2(13), 443-461.
- Do Nascimento, F. J., Leão, H. L. S. L., and Ribatski, G. 2013. An Experimental Study on Flow Boiling Heat Transfer of R134a in a Microchannel-based Heat Sink. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 45, 117-127.

- Duman, B., ve Kayacan, M. C. 2017. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme Yöntemi ile Kanal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 7(1), 12-28.
- Dursun, K. 2007. Elektroerozyon ile İşlemede Tel Demeti Elektrodun Performansının Deneysel ve Teorik olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Engelberg-Forster, K., and Greif, R. 1959. Heat Transfer to a Boiling Liquid – Mechanism and Correlations. *Journal of Heat Transfer*, 81(1), 43-52.
- Fayyadh, E. M., Mahmoud, M. M., Sefiane, K., and Karayiannis, T. G. 2017. Flow Boiling Heat Transfer of R134a in Multi Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 422-436.
- Feynman, R. P. 1992. There's Plenty of Room at the Bottom [data storage]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1(1), 60-66.
- Forster, H. K., and Zuber, N. 1955. Dynamics of Vapor Bubbles and Boiling Heat Transfer. *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 1(4), 531-535.
- Fu, B.-R., Tsou, M.-S., and Pan, C. 2013. Flow-Pattern-Based Correlations for Pressure Drop during Flow Boiling of Ethanol-Water Mixtures in a Microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 61, 332-339.
- Fukano, T., and Kariyasaki, A. 1993. Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Capillary Tube. *Nuclear Engineering and Design*, 141(1-2), 59-68.
- Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elawa, I. M., and Soliman, H. H. 2002. Roughness Parameters. *Journal of Material Processing Technology*, 123(1), 133-145.
- Galvis, E., and Culham, R. 2012. Measurements and Flow Pattern Visualisations of Two-Phase Flow Boiling in Single Channel Microevaporators. *International Journal of Multiphase Flow*, 42, 52-61.
- Ghiaasiaan, S. M. 2008. *Two Phase Flow, Boiling and Condensation*. Cambridge University Press, UK.
- Ghosh, D. P., Raj, R., Mohanty, D., and Saha, S. K. 2016. Onset of Nucleate Boiling, Void Fraction, and Liquid Film Thickness, In: *Microchannel Phase Change Transport Phenomena*. Saha, S. K (eds), Butterworth-Heinemann, 1-29, Oxford, UK.
- Graham, R. W, and Hendricks, R. C. 1967. Assessment of Convection, Conduction and Evaporation in Nucleate Boiling. NASA TN D-3943, Lewis Research Center, Ohio, USA.

- Griffin, A. 2008. Fundamental Study of FC-72 Pool Boiling Surface Temperature Fluctuations and Bubble Behavior. Phd Thesis. Department of Mechanical Engineering, University of Central Florida, Florida, USA.
- Gunther, F. C., and Kreith, F. 1950. Photographic Study of Bubble Formation in Heat Transfer to Subcooled Water. Jet Propulsion Laboratory Progress Report No: 4-20, 1-29.
- Gunther, F. C. 1951. Photographic Study of Surface-Boiling Heat Transfer to Water with Forced Convection. Transactions of ASME, 73, 115-123.
- Haider, S. I., and Webb, R. L. 1997. A Transient Micro-convection Model of Nucleate Pool Boiling. Journal of Heat and Mass Transfer, 40(15), 3675-3688.
- Han, C.-T. Y., and Griffith, P. 1965. The Mechanism of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling – Part I: Bubble Initiation, Growth and Departure. Journal of Heat and Mass Transfer, 8(6), 887-994.
- 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.
- Harirchian, T., and Garimella, S. V. 2009a. Effect of Channel Dimension, Heat Flux and Mass Flux on Flow Boiling Regimes in Microchannels. International Journal of Multiphase Flow, 35(4), 349-362.
- Harirchian, T., and Garimella, S. V. 2009b. The Critical Role of Channel Cross-sectional Area in Microchannel Flow Boiling Heat Transfer. International Journal of Multiphase Flow, 35(10), 904-913.
- Harirchian, T., and Garimella, S. V. 2010. A Comprehensive Flow Regime Map for Microchannel Flow Boiling with Quantitative Transition Criteria. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(13-14), 2694-2702.
- Hetsroni, G., Mosyak, A., Pogrebnyak, E., and Segal, Z. 2006. Periodic Boiling in Parallel Micro-Channels at Low Vapor Quality. International Journal of Multiphase Flow, 32(10-11), 1141–1159.
- Ho, K. H., and Newman, S. T. 2003. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM). International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43(11), 1287-1300.
- Holman, J. P. 2010. Heat Transfer. Tenth Edition, McGraw Hill, USA.
- Howell, M. 1996. Investigation of Nucleation and Heat Transfer during Subcooled Flow Boiling on Augmented Surfaces. MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Rochester Institute of Technology, New York, USA.

- Hsu, Y. Y., and Graham, R. W. 1961. An Analytical and Experimental Study of the Thermal Boundary Layer and the Ebullition Cycle in Nucleate Boiling. NASA TN-D-594, USA.
- Hsu, Y. Y. 1962. On the Range of Active Nucleation Cavities on a Heating Surface. ASME Journal of Heat Transfer, 84(3), 207-216.
- Hsu, Y. Y., and Graham, R. W. 1986. Transport Processes in Boiling and Two-Phase Systems. American Nuclear Society, Illinois, USA.
- Huang, H., Borhani, N., and Thome, J. R. 2016. Experimental Investigation on Flow Boiling Pressure Drop and Heat Transfer of R1233zd(E) in a Multi-Microchannel Evaporator. International Journal of Heat and Mass Transfer, 98, 596-610.
- Huang, H., and Thome, J. R. 2016. Local Measurements and a New Flow Pattern Based Model for Subcooled and Saturated Flow Boiling Heat Transfer in Multi-Microchannel Evaporators. International Journal of Heat and Mass Transfer, 103, 701-714.
- Huh, C., and Kim, M. H. 2006. An Experimental Investigation of Flow Boiling in an Asymmetrically Heated Rectangular Microchannel. Experimental Thermal and Fluid Science, 30(8), 775-784.
- Huh, C., and Kim, M. H. 2007. Pressure Drop, Boiling Heat Transfer and Flow Patterns during Flow Boiling in a Single Microchannel. Heat Transfer Engineering, 28(8-9), 730-737.
- Huh, C., Kim, J., and Kim, M. H. 2007. Flow Pattern Transition Instability during Flow Boiling in a Single Microchannel. International Journal of Heat and Mass Transfer, 50(5-6), 1049-1060.
- Inamdar, K. H. 2006. Some Studies on the Analysis of Surface Quality of Flat Metal Surfaces Using Image Processing Techniques. Doktora Tezi, Shivaji University, Kolhapur, India.
- Incropera, P. F., Dewitt, P. D., Bergman, L.T., and Lavine, S.A. 2011. Introduction to Heat Transfer. Sixth Edition, John Wiley & Sons, USA.
- Jacob, M., and Fritz, W. 1931. Versuche über den Verdampfungsvorgang. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 2, 435-447 (in German).
- Jacob, M., and Linke, W. 1933. Der Wärmeübergang von einer waagerechten Platte an siedendes Wasser. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 4, 75-81 (in German).
- Jacob, M., and Linke, W. 1935. Der Wärmeübergang beim Verdampfen von Flüssigkeiten an senkrechten und waagerechten Flächen. Physikalische Zeitschrift, 36, 267-280 (in German).
- Jacob, M. 1936. Heat Transfer in Evaporation and Condensation-I. Mechanical Engineering, 58, 643-660.

- Jacobi, A. M., and Thome, J. R. 2002. Heat Transfer Model for Evaporation of Elongated Bubble Flows in Microchannels. *ASME Journal of Heat Transfer*, 124(6), 1131-1136.
- Jafari, R., Okuyucu-Özyurt, T., Ünver, H. O., and Bayer, O. 2016. Experimental Investigation of the FLOW Boiling of R134a in Microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Sciences*. 79, 222-230.
- Jagirdar, M., and Lee, P. S. 2016. Study of Transient Heat Transfer and Synchronized Flow Visualizations during Sub-cooled Flow Boiling in a Small Aspect Ratio Microchannel. *International Journal of Multiphase Flow*, 83, 254-266.
- Jameson, E. C. 2001. *Electrical Discharge Machining*. Society of Manufacturing Engineers, Michigan, USA.
- Jawurek, H. H. 1969. Simultaneous Determination of Microlayer Geometry and Bubble Growth in Nucleate Boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 12(8), 843-848.
- Jiang, P. X., Fan, M. H., Si, G. S., and Ren, Z. P. 2001. Thermal-hydraulic Performance of Small Scale Microchannel and Porous Media Heat Exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(5), 1039-1051.
- Jones, B. J., and Garimella, S. V. 2009. Surface Roughness Effect on Flow Boiling in Microchannels. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 1(4), 041007.
- Jones, B. J., McHale, J. P., and Garimella, S. V. 2009. The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer. *ASME Journal of Heat Transfer*, 131(2), 121009.
- Jones, B. J. 2010. *Fundamental Studies of Thermal Transport and Liquid-Vapor Phase Change Using Microscale Diagnostic Techniques*. Phd Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Kadam, S., and Kumar, R. 2014. Twenty First Century Cooling Solution: Microchannel Heat Sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 85, 73-92.
- Kakaç, S., Kosoy, B., Li, D., and Pramuanjaroenkij, A. 2010. *Microfluidics Based Microsystems: Fundamentals and Applications*. Springer, Netherlands.
- Kalani, A., and Kandlikar, S. G. 2014. Evaluation of Pressure Drop Performance During Enhanced Flow Boiling in Open Microchannels With Tapered Manifolds. *ASME Journal of Heat Transfer*, 136(5), 051502.
- Kalani, A., and Kandlikar, S. G. 2015. Flow Patterns and Heat Transfer Mechanisms during Flow Boiling over Open Microchannels in Tapered Manifold (OMM). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 494-504.

- Kandlikar, S. G. 1990. A General Correlation for Saturated Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer Inside Horizontal and Vertical Tubes. *Journal of Heat Transfer*, 112(1), 219-228.
- Kandlikar, S. G., and Howell, M. J. 1996. Investigation of Nucleation and Heat Transfer for Subcooled Flow Boiling on Microfin Surfaces. The Second European Thermal-Sciences and the fourteenth UIT National Heat Transfer Conference, 29-31 May, 1, 241-247, Roma, Italy.
- Kandlikar, S. G., and Spiesman, P. H. 1998. Effect of Surface Finish on Flow Boiling Heat Transfer. ASME Heat Transfer Division Publications, 361, 157-163.
- Kandlikar, S. G., Mizo, V. R., Cartwright, V. R., and Ikenze, E. 1997. Bubble Nucleation and Growth Characteristics in Suncooled Flow Boiling of Water. Thirty-Second National Heat Transfer Conference, 8-12 August, In Proceedings, 4, HTD-342, 11-18, Baltimore, USA.
- Kandlikar, S. G., Steinke, M. E., and Campbell, L. A. 2001. High-Speed Photographic Observation of Flow Boiling of Water in Parallel Microchannels, 35th National Heat Transfer Conference, 10-12 June, Proceedings, NTC01-11262, Anaheim, California, USA.
- Kandlikar, S. G. 2002a. Fundamental Issues Related to Flow Boiling in Minichannels and Microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(2-4), 389-407.
- Kandlikar, S. G. 2002b. Two-Phase Flow Patterns, Pressure Drop, and Heat Transfer during Boiling in Minichannel Flow Passages of Compact Evaporators. *Heat Transfer Engineering*, 23(1), 5-23.
- Kandlikar, S. G., and Grande, W. J. 2002. Evolution of Microchannel Flow Passages- Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology. *Heat Transfer Engineering*, 24(1), 3-17.
- Kandlikar, S. G., Joshi, S., and Tian, S. 2003. Effect of Surface Roughness on Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics at Low Reynolds Number in Small Diameter Tubes. *Heat Transfer Engineering*, 24(3), 4-16.
- Kandlikar, S. G., and Steinke, M. E. 2003. Examples of Microchannel Mass Transfer Processes in Biological Systems, ASME 1st International Conference on Microchannels and Minichannels, 24-25 April, In: Proceedings, 933-943, Rochester, New York, USA.
- Kandlikar, S. G. 2004. Heat Transfer Mechanism during Flow Boiling in Microchannels. *ASME Journal of Heat Transfer*, 126(1), 8-16.
- Kandlikar, S. G., Willistein, D. A., and Borrelli, J. 2005. Experimental Evaluation of Pressure Drop Elements and Fabricated Nucleation Sites for Stabilizing Flow Boiling in Minichannels and Microchannels, ASME 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels, 13-15 June, In Proceedings, 115-124, Toronto, Canada.

- Kandlikar, S. G. 2006. Effect of Liquid-Vapor Phase Distribution on the Heat Transfer Mechanism during Flow Boiling in Minichannels and Microchannels. *Heat Transfer Engineering*, 27(1), 4-13.
- Kandlikar, S. G. 2010a. Scale Effects on Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels: A Fundamental Perspective. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(7), 1073-1085.
- Kandlikar, S. G. 2010b. Similarities and Differences between Flow Boiling in Microchannels and Pool Boiling. *Heat Transfer Engineering*, 31(3), 159-167.
- Kandlikar, S. G., and King, M. R. 2014. Chapter 1, In: *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*. Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd., 1-9, Oxford, UK.
- Kandlikar, S. G. 2016. Mechanistic Considerations for Enhancing Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels, *ASME Journal of Heat Transfer*, 138(2), 021504.
- Karayiannis, T. G., Shiferaw, D., Kenning, D. B. R., and Wadekar, V. V. 2010. Flow Patterns and Heat Transfer for Flow Boiling in Small to Micro Diameter Tubes. *Heat Transfer Engineering*, 31(4), 257-275.
- Karayiannis, T. G., and Mahmoud, M. M. 2017. Flow Boiling in Microchannels: Fundamentals and Applications. *Applied Thermal Engineering*, 115, 1372-1397.
- Kenning, D. B. R., and Cooper, M. G. 1965. Flow Patterns near Nuclei and the Initiation of Boiling during Forced Convection Heat Transfer. Symposium on Boiling Heat Transfer in Steam Generating Units and Heat Exchangers, 15-16 September, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering: London, 180(3), 112-123, Manchester, UK.
- Keyes, R. W. 1975. Physical Limits in Digital Electronics, *Proceedings of the IEEE*, 63(5), 740-767.
- Kim, S.-M., and Mudawar, I. 2013. Universal Approach to Predicting Saturated Flow Boiling Heat Transfer in Mini/Micro-Channels – Part II. Two-Phase Heat Transfer Coefficient. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 1239–1256.
- Kim, S.-M., and Mudawar, I. 2014. Review of Databases and Predictive Methods for Heat Transfer in Condensing and Boiling Mini/Micro-Channel Flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 627-652.
- Klausner, J. F., Mei, R., Bernhard, D. M., and Zeng, L. Z. 1993. Vapor Bubble Departure in Forced Convection Boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36(3), 651-662.
- Krishnamurty, S., and Peles, Y. 2010. Flow Boiling Heat Transfer in Micro Pin Fins Entrenched Microchannel. *ASME Journal of Heat Transfer*, 132(4), 041007.

- Krishnan, S., Garimella, S. V., Chrysler, G. M., and Mahajan, R. V. 2007. Towards a Thermal Moore's Law. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 30(3), 462-474.
- Kocabaş, Ş. 2013. Elektroerozyonla İşlemede İşlem Parametrelerinin Malzeme Giderilmesi ve Yüzey Kalitesine Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kockman, N. 2013. *Micro Process Engineering*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- Koizumi, Y. 2017. Chapter 1, In: *Boiling*. Koizumi, Y., Shohi, M., Monde, M., Takata, Y., and Nagai, N. (eds), Elsevier Ltd., 4-8, Oxford, UK.
- Koşar, A., Kuo, C.-J., and Peles, Y. 2005. Boiling Heat Transfer in Rectangular Microchannels with Reentrant Cavities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(23-24), 4867-4886.
- Koşar, A., Kuo, C. J., and Peles, Y. 2006. Suppression of Boiling Flow Oscillations in Parallel Microchannels by Inlet Restrictors. *ASME Journal of Heat Transfer*, 128(3), 251-260.
- Koşar, A., and Peles, Y. 2007. Boiling Heat Transfer in a Hydrofoil-Based Micro Pin Fin Heat Sink. *International Journal of Heat Transfer*, 50(5-6). 1018-1034.
- Koşar, A., Rafet Özdemir, M., and Keskinöz, M. 2010. Pressure Drop across Micro-Pin Heat Sinks under Unstable Boiling Conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(7), 1253-1263.
- Kuo, C. J., and Peles, Y. 2008. Flow Boiling Instabilities in Microchannels and Means for Mitigation by Reentrant Cavities. *ASME Journal of Heat Transfer*, 130(7), 072402.
- Kuo, C. J., and Peles, Y. 2009. Pressure Effects on Flow Boiling Instabilities in Parallel Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(1-2), 271-280.
- Kurihari, H. M., and Myers, J. E. 1960. Effect of Superheat and Roughness on the Boiling Coefficient. *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 6(1), 83-91.
- Kuznetsov, V. V., and Shamirzaev, A. S. 2016. Flow Boiling Heat Transfer of Refrigerant R-134a in Copper Microchannel Heat Sink. *Heat Transfer Engineering*, 37(13-14), 1105-1113.
- Laermer, F., and Schlip, A. 1996. A Method of Anisotropically Etching Silicon. US Patent No: 5,501,893.
- Law, M., Lee, P. S., and Balasubramanian, K. 2014. Experimental Investigation of Flow Boiling Heat Transfer in Novel Oblique-Finned Microchannels. *International Journal of Heat Transfer*, 76, 419-431.

- Law, M., and Lee, P.-S. 2015. A Comparative Study of Experimental Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Characteristics in Straight- and Oblique-Finned Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 797-810.
- Leão, H. L. S. L., do Nascimento, F. J., and Ribatski, G. 2014. Flow Boiling Heat Transfer of R407C in a Microchannels Based Heat Spreader. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 59, 140-151.
- Lee, J., and Mudawar, I. 2005a. Two-Phase Flow in High-Heat-Flux Micro-Channel Heat Sink for Refrigeration Cooling Applications: Part I-Pressure Drop Characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(5), 928-940.
- Lee, J., and Mudawar, I. 2005b. Two-Phase Flow in High-Heat-Flux Micro-Channel Heat Sink for Refrigeration Cooling Applications: Part II-Heat Transfer Characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(5), 941-955.
- Lee, P.-S., and Garimella, S. V. 2008. Saturated Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop in Silicon Microchannel Arrays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(3-4), 789-806.
- Lee, H. J., Liu, D. Y., Alyousef, Y., and Yao, S. 2010. Generalized Two-Phase Pressure Drop and Heat Transfer Correlations in Evaporative Micro/Minichannels. *ASME Journal of Heat Transfer*, 132(4), 041004.
- Li, J., and Wang, B. 2003. Size Effect on Two-Phase Flow Regime for Condensation in Micro/Mini Tubes. *Heat Transfer-Asian Research*, 32(1), 65-71.
- Li, J., and Peterson, G. P. 2005. Boiling Nucleation and Two Phase Flow Patterns in Forced Liquid Flow in Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(23-24), 4797-4810.
- Li, W. and Wu, Z. 2010. A General Correlation for Evaporative Heat Transfer in Micro/Mini-Channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(9-10), 1778-1787.
- Li, X., Jia, L., Dang, C., An, Z., and Huang, Q. 2018. Visualization of R134a Flow Boiling in Micro-Channels to Establish a Novel Bubbly-Slug Flow Transition Criterion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 91, 230-244.
- Li, H., and Hrnjak, P. 2019a. Flow Visualization of R1234ze(E) in a 0.643 mm Microchannel Tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 136, 950-961.
- Li, H., and Hrnjak, P. 2019b. Heat Transfer Coefficient, Pressure Drop, and Flow Patterns of R1234ze(E) Evaporating in Microchannel Tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 138, 1368-1386.
- Lim, T.-W., You, S.-S., Choi, J.-H., and Kim, H.-S. 2015. Experimental Investigation of Heat Transfer in Two-phase Flow Boiling. *Experimental Heat Transfer*, 28(1), 23-36.

- Lin, S., Sefiane, K., and Christy, J. R. E. 2002. Prospects of Confined Flow Boiling in Thermal Management of Microsystems. *Applied Thermal Engineering*, 22(7), 825-837.
- Liu, Z., and Winterton, R. H. S. 1991. A General Correlation for Saturated and Subcooled Flow Boiling in Tubes and Annuli, Based on a Nucleate Pool Boiling Equation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(11), 2759-2766.
- Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., and Ehmann, K. F. 2004. The Mechanism of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(4), 666-678.
- Liu, D., and Garimella, S.V. 2007. Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels. *ASME Journal of Heat Transfer*, 129(10), 1321-1332.
- Liu, D., Weng, X., and Xu, X. 2011. Experimental Study on the Heat Transfer Coefficient of Water Flow Boiling in Mini/Microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(7), 1392-1397.
- Luttge, R. 2016. *Nano- and Microfabrication for Industrial and Biomedical Applications*. Elsevier, Oxford.
- Mack, C. 2008. *Fundamental Principles of Optical Lithography*. John Wiley&Sons, West Sussex.
- Madou, M. J. 2011. *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology*. CRC Press, Vol. 2, Florida.
- Mahendran, S., Devarajan, R., Nagarajan, T., and Madji, A. 2010. A Review of Micro-EDM. *International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, 17-19 March, Proceedings, Vol. 2, 981-986, Hong Kong.
- Mahmoud, M. M., and Karayiannis, T. G. 2013. Heat Transfer Correlation for Flow Boiling in Small to Micro Tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 553-574.
- Mahmoud, M. M., Karayiannis, T. G., and Kenning, D. B. R. 2014. Flow Boiling Pressure Drop of R134a in Microdiameter Tubes: Experimental Results and Assessment of Correlations. *Heat Transfer Engineering*, 35(2), 178-192.
- Manay, E. 2017. Mikrokanallarda Nanoakışkanların Kaynamalı Akış Karakteristikleri. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 237-249.
- Markal, B. 2016. Mikrokanallarda kaynamalı akışın deneysel incelenmesi. *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye*.
- Markal, B., Aydın, O., and Avcı, M. 2016a. Effect of Aspect Ratio on Saturated Flow Boiling in Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 130-143.

- Markal, B., Aydin, O., and Avci, M. 2016b. An Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop in Square Microchannels. *International Journal of Refrigeration*, 65, 1-11.
- Markal, B., Aydin, O., and Avci, M. 2017. Prediction of Heat Transfer Coefficient in Saturated Flow Boiling Heat Transfer in Parallel Rectangular Microchannel Heat Sinks: An Experimental Study. *Heat Transfer Engineering*, 38(16), 1415–1428.
- Markal, B., Aydin, O., and Avci, M. 2018. Effect of Hydraulic Diameter on Flow Boiling in Rectangular Microchannels. *Heat and Mass Transfer* 55(4), 1033-1044.
- Markopoulos, A. P., and Davim, J. P. *Advanced Machining Processes: Innovative Modeling Techniques*. Taylor & Francis, London, UK.
- Megahed, A. 2012. Local Flow Boiling Heat Transfer Characteristics in Silicon Microchannel Heat Sinks using Liquid Crystal Thermography. *International Journal of Multiphase Flow*, 39, 55-65.
- Mehendale, S. S., Jacobi, A. M., and Shah, R. K. 2000. Fluid Flow and Heat Transfer at Micro- and Meso-scales with Application to Heat Exchanger Design. *ASME Applied Mechanics Reviews*, 53(7), 175-193.
- Mertz, R., Wein, A., and Groll, M. 1996. Experimental Investigation of Flow Boiling Heat Transfer in Narrow Channels. *International Journal of Heat and Technology*, 14(2), 47-54.
- 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.
- Miner, M. J., Phelan, P. E., Odom, B. A., and Ortiz, C. A. 2014. An Experimental Investigation of Pressure Drop in Expanding Microchannel Arrays. *ASME Journal of Heat Transfer*, 136(3), 031502.
- Mirmanto, M. 2013. Single-phase flow and flow boiling of water in horizontal rectangular microchannels. Phd thesis, Brunel University, UK.
- Mitrovic, J. 1998. Flow and Heat Transfer in the Wedge-shaped Liquid Film Formed during the Growth of a Vapour Bubble. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(12), 1771-1785.
- Monde, M. 2017. Chapter 1, In: *Boiling*. Koizumi, Y., Shohi, M., Monde, M., Takata, Y., and Nagai, N. (eds), Elsevier Ltd., 1-4, Oxford, UK.
- Moore, F. D., and Mesler, R. B. 1961. The Measurement of Rapid Surface Temperature Fluctuations during Nucleate Boiling of Water. *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 7(4), 620-624.

- Moore, G. E. 1965. Cramming More Components onto Integrated Circuits. *Electronics*, 38(8), 114-117.
- Mudawar, I. 2001. Assessment of High-heat-flux Thermal Management Schemes. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 24(2), 122-141.
- Nishikawa, K., Fujita, Y., Ohta, H., and Hidaka, S. 1982. Effect of The Surface Roughness on the Nucleate Boiling Heat Transfer over the Wide Range of Pressure. In: *Proceedings of the International Heat Transfer Conference, München, Germany*, 4, 61-66.
- Nakayama, W., Daikoku, T., Kuwahara, H., and Nakajima, T. 1980a. Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surfaces Part I: Experimental Investigation. *Journal of Heat Transfer*, 102(3), 445-450.
- Nakayama, W., Daikoku, T., Kuwahara, H., and Nakajima, T. 1980b. Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surfaces Part II: Analytical Modeling. *Journal of Heat Transfer*, 102(3), 451-456.
- Nukiyama, S. 1934. The Maximum and Minimum Values of the Heat  $Q$  Transmitted from Metal to Boiling Water Under Atmospheric Pressure. *The Journal of Japan Society of Mechanical Engineers*, 37, 367-374, (In Japanese). Translated to English by C.J. Lee. 1966. in: *International Journal of Mass Transfer*, 9(12), 1419-1433.
- Ong, C. L., and Thome, J. R. 2009. Flow Boiling Heat Transfer of R134a, R236fa and R245fa in a Horizontal 1,03 mm Circular Channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(4), 651-663.
- Özdemir, M.F. 2016. Single phase flow and flow boiling of water in rectangular metallic microchannels. Phd Thesis, College of Engineering, Design and Physical Sciences, Brunel University, UK.
- Özdemir, M. R., Mahmoud, M. M., and Karayiannis, T. G. 2020. Flow Boiling of Water in a Rectangular Metallic Microchannel. *Heat Transfer Engineering*, DOI: 10.1080/01457632.2019.1707390
- Park, C. Y., Jang, Y., Kim, B., and Kim, Y. 2012. Flow Boiling Heat Transfer Coefficients and Pressure Drop of FC-72 in Microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 39, 45-54.
- Pautsch, G. 2005. Thermal Challenges in the Next Generation of Supercomputers, CoolCon MEECC Conference, 16-17 May, In: *Proceedings*, 1-3, Scottsdale, Arizona, USA.
- Petrovic, S., Robinson, T., and Judd, R. L. 2004. Marangoni Heat Transfer in Subcooled Nucleate Boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(23), 5115-5128.

- Pettersen J. 2004. Flow Vaporization of CO<sub>2</sub> in Microchannel Tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(2-3), 111-121.
- Prajapati, Y. K., Pathak, M., and Kaleem Khan, M. 2015. A Comparative Study of Flow Boiling Heat Transfer in Three Different Configurations of Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 711-722.
- Prakash, S., and Kumar, S. 2015. Fabrication of Microchannels: A Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacturing*, 229(8), 1273-1288.
- Qu, W., and Mudawar, I. 2003a. Flow Boiling Heat Transfer in Two-Phase Microchannel Heat Sinks – I. Experimental Investigation and Assessment of Correlation Methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(15), 2755-2771.
- Qu, W., and Mudawar, I. 2003b. Measurement and Prediction of Pressure Drop in Two-Phase Micro-Channel Heat Sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(15), 2737-2753.
- Qu, W., and Mudawar, I. 2004. Transport Phenomena in Two-Phase Micro-Channel Heat Sinks. *ASME Journal of Electronic Packaging*, 126(2), 213-224.
- Qu, W., Yoon, S. M., and Mudawar, I. 2004. Two-Phase Flow and Heat Transfer in Rectangular Microchannels. *Journal of Electronic Packaging*, 126(3), 288-300.
- Qu, W., and Siu-Ho, A. 2009a. Experimental Study of Saturated Flow Boiling Heat Transfer in an Array of Staggered Micro-Pin-Fins. *International Journal of Heat Transfer*, 52(7-8). 1853-1863.
- Qu, W., and Siu-Ho, A. 2009b. Measurement and Prediction of Pressure Drop in a Two-Phase Micro-Pin-Fin Heat Sink. *International Journal of Heat Transfer*, 52(21-22). 5173-5184.
- Rao, S. R., and Peles, Y. 2015. Spatiotemporally Resolved Heat Transfer Measurements for Flow Boiling in Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 482-493.
- Revellin, R., Dupont, V., Ursenbacher, T., Thome, J. R., and Zun, I. 2006. Characterization of Diabatic Two Phase Flows in Microchannels: Flow Parameter Results for 134a in a 0,5 mm Channel. *International Journal of Multiphase Flows*, 32(7), 755-774.
- Revellin, R., and Thome, J. R. 2007a. Experimental Investigation of R-134a and R-245fa Two-Phase Flow in Microchannels for Different Flow Conditions. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(1), 63-71.
- Revellin, R., and Thome, J. R. 2007b. New Type of Diabatic Flow Pattern Map for Boiling Heat Transfer in Microchannels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(4), 788-796.

- Ribatski, G., and Jabardo, J. M. S. 2003. Experimental Study of Nucleate Boiling of Halocarbon Refrigerants on Cylindrical Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(23), 4439-4451.
- Ribatski, G., Wojtan, L., and Thome, J. R. 2006. An Analysis of Experimental Data and Prediction Methods for Two-Phase Frictional Pressure Drop and Flow Boiling. *Heat Transfer in Microscale Channels. Experimental Thermal and Fluid Science*, 31(1), 1-19.
- Ribatski, G. 2013. A Critical Overview on the Recent Literature concerning Flow Boiling and Two-phase Flows inside Microscale Channels. *Experimental Heat Transfer*, 26(2-3), 198-246.
- Ritchey, S. N., Weibel, J. A., and Garimella, S. V. 2014. Local Measurement of Flow Boiling Heat Transfer in an Array of Non-uniformly Heated Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 206-216.
- Rohsenow, W. M. 1952. A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling Liquids. *Transactions of ASME*, 74, 969-976.
- Saraceno, L., Celata, G. P., Furrer, M., Mariani, A., and Zummo, G. 2012. Flow Boiling Heat Transfer of Refrigerant FC-72 in Microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, 53, 35-41.
- Sato, T., and Matsumura, H. 1964. On the Condition of Incipient Subcooled Boiling with Forced Convection. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineering*, 7(26), 392-398.
- Serizawa, A., Feng, Z., and Kawara, Z. 2002. Two-Phase Flow in Microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(6-7), 703-714.
- Shah, R. K., and London, A. R. 1978. *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*. Academic Press, New York, USA.
- Shah, M. M. 1982. Chart Correlation for Saturated Boiling Heat Transfer: Equations and Further Study. *ASHRAE Transactions*, 88, 185-196.
- Shah, R. K. 1986. Classification of Heat Exchangers, In: *Heat Exchangers: Thermal Hydraulic Fundamentals and Design*. Kakac, S., Bergles, A. E., and Mayinger, F. (eds), Hemisphere Publishing Corp., 9-46, Washington DC, USA.
- Sharp, R. R. 1964. Nature of Liquid Film Evaporation during Nucleate Boiling. NASA TN D-1997, Lewis Research Center, Ohio, USA.
- Shen, S., Xu, J. L., Zhou, J. J., and Chen, Y. 2006. Flow and Heat Transfer in Microchannels with Rough Wall Surface. *Energy Conversion and Management*, 47(11-12), 1311-1325.

- Singh, S. G., Kulkarni, A., Duttagupta, S. P., Puranik, B. P., and Agrawal, A. 2008. Impact of Aspect Ratio on Flow Boiling of Water in Rectangular Microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(1), 153–160.
- Sobierska, E., Kulenovic, R., Mertz, R., and Groll, M. 2006. Experimental Results of Flow Boiling of Water in a Vertical Microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31(2), 111–119.
- Soupremanian, U., Person, S. L., Favre-Marinet, M., and Bultel, Y. 2011. Influence of the Aspect Ratio on Boiling Flows in Rectangular Mini Channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(5), 797-809.
- Srinivasan, R., and Mayne-Banton, V. M. 1982. Self-developing Photoetching of Poly(ethylene terephthalate) Films by Far-Ultraviolet Excimer Laser Radiation. *Applied Physics Letters*, 41(6), 576-578.
- Steinke, M. E., and Kandlikar, S. G. 2003. Flow Boiling and Pressure Drop in Parallel Flow Microchannels, ASME First International Conference on Microchannels and Minichannels, 24-25 April, Proceedings, 567-569, Rochester, New York, USA.
- Steinke, M.E., and Kandlikar, S. G. 2004. An Experimental Investigation of Flow Boiling Characteristics of Water in Parallel Microchannels. *ASME Journal of Heat Transfer*, 126(4), 518-526.
- Stephan, K. 1963. Mechanismus und Modellgesetz des Wärmeübergangs bei der Blasenverdampfung. *Chemie Ingenieur Technik*, 35(11), 775–784.
- Stephan, K., and Abdelsalam, M. 1980. Heat Transfer Correlations for Natural Convection Boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23(1), 73–87.
- Stephan, P., and Hammer, J. 1994. A New Model for Nucleate Boiling Heat Transfer. *Warme Und Stoffubertragung*, 30, 119-125.
- Suo, M., and Griffith, T. 1964. Two-Phase Flow in Capillary Tubes. *Journal of Basic Engineering*, 86(3), 576-582.
- Talebi, M., Sadir, S., Cobry, K., Stroh, A., Dittmeyer, R., and Woias, P. 2019. Investigation of Water Microchannel Boiling Flow Regimes using Electrical Sensing Elements along a Single Microchannel. *Measurement Science and Technology*, 30, 125301.
- Tibirica, C. B., and Ribatski, G. 2014. Flow Patterns and Bubble Departure Fundamental Characteristics during Flow Boiling in Microscale Channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 59, 152-165.
- Tibirica, C. B., Czelusniak, L. E., and Ribatski, G. 2015. Critical Heat Flux in a 0,38 mm Microchannel and Actions for Suppression of Flow Boiling Instabilities. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 67, 48-56.

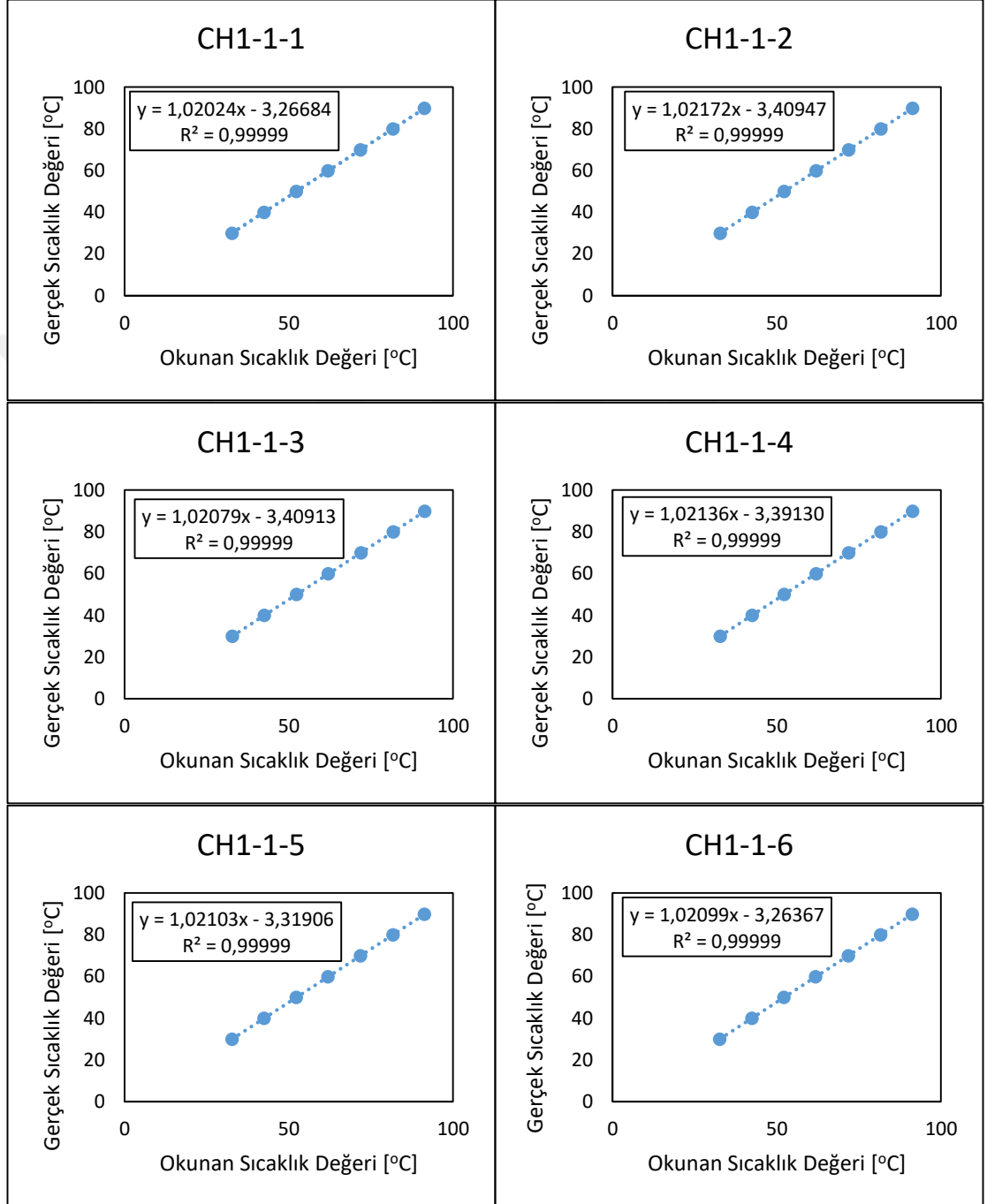
- Tibirica, C. B., and Ribatski, G. 2015. Flow Boiling Phenomenological Differences between Micro- and Macroscale Channels. *Heat Transfer Engineering*, 36(11), 937-942.
- Thome, J. R. (2004). Boiling in Microchannels: A Review of Experiment and Theory. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25(2), 128–139.
- Thome, J. R., and Consolini, L. 2010. Mechanism of Boiling in Micro-channels: Critical Assessment. *Heat Transfer Engineering*, 31(4), 288-297.
- Thorncroft, G. E., Klausner, J. F., and Mei, R. 1998. An Experimental Investigation of Bubble Growth and Detachment in Vertical Upflow and Downflow Boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(23), 3857-3871.
- Tong, W., Bar-Cohen, A., and Simon, T. W. 1990. Contact Angle Effects on Boiling Incipience of Heighly-Wetting Liquids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33(1), 91-104.
- Tong, L. S, and Tang, Y. S. 1997. *Boiling Heat Transfer and Two Phase Flow*. Second Edition, Taylor and Francis, USA.
- Tosun, N. 2001. Tel Erozyon Tezghasında Tel Aşınmasının ve Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel olarak İncelenmesi ve Modellenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elâzığ.
- Triplett, A. K., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-Khalik, S. I., and Sadowski, D. L. 1999. Gas-Liquid Two-Phase Flow in Microchannels Part I: Two-Phase Flow Patterns. *International Journal of Multiphase Flow*, 25(3), 377-394.
- Tuckerman, D. B., and Pease, R. F. W. 1981. High Performance Heat Sink for VLSI. *IEEE Electronic Device Letters*, 2(5), 126-129.
- Van Quwerkerk, H. J. 1971. The Rapid Growth of a Vapor Bubble at a Liquid-Solid Interface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 14(9), 141-1424.
- Venkatesan, M., Das, S. K., and Balakrishnan, A. R. 2010. Effect of Tube Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Mini Tubes. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 88(6), 936-944.
- Wadekar, V. V. 1998. A Comparative Study of In-Tube Boiling Plain and High Flux Coated Surfaces. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 5(4), 257-264.
- Wang, G., Cheng, P., and Bergles, A. E. 2008. Effects of Inlet/Outlet Configurations on Flow Boiling Instability in Parallel Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(9-10), 2267–2281.
- Wang, Y., Sefiane, K., and Bennacer, R. 2010. Pressure Drop and Two Phase Flow During Boiling of FC-72 in a High Aspect Ratio Micro-Channel. 14th International Heat Transfer Conference, 8-13 August, In Proceeding, 1, 727-734, Washington, DC, USA.

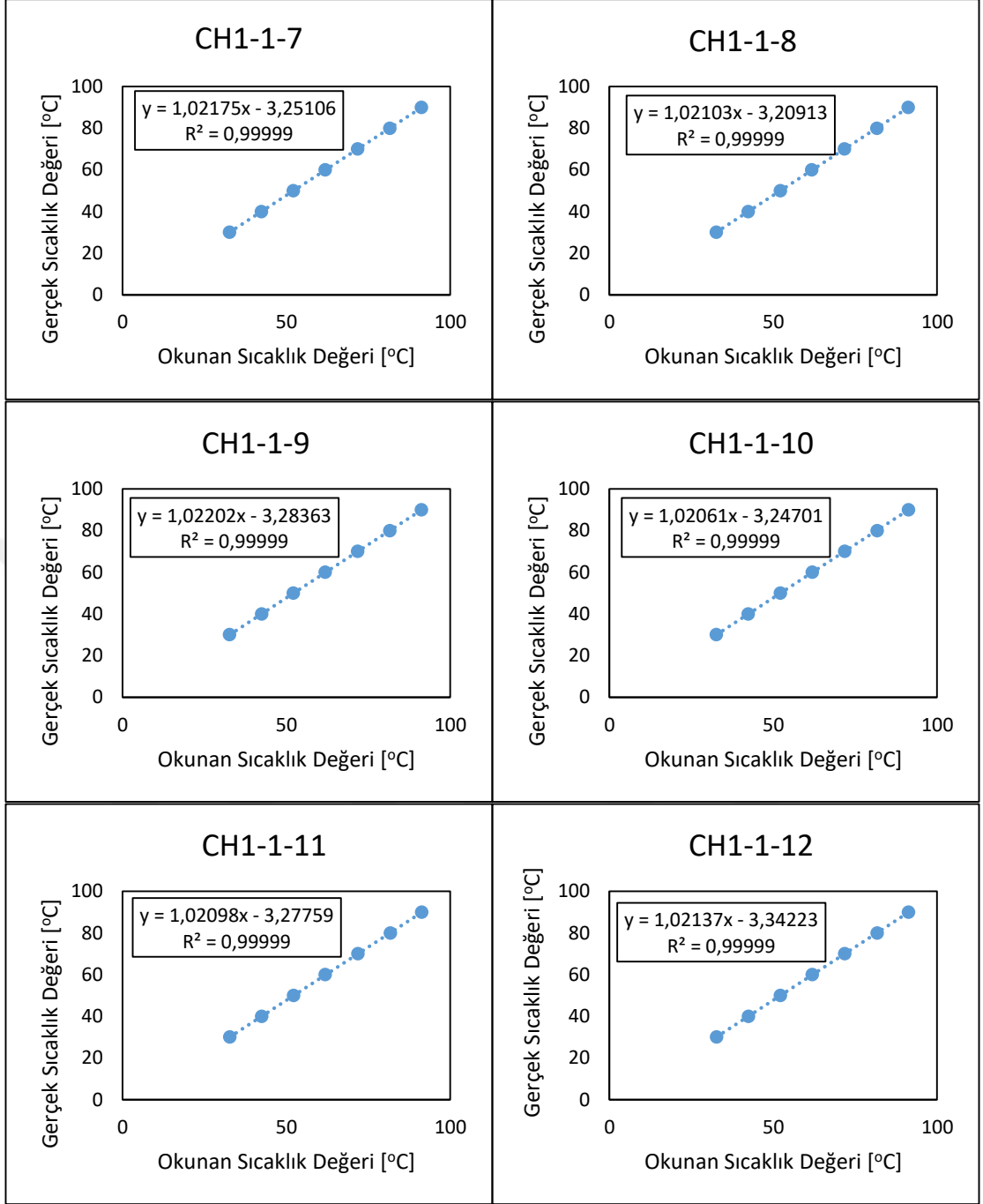
- Wang, Y., and Sefiane, K. 2012. Effects of Heat Flux, Vapor Quality, Channel Hydraulic Diameter on Flow Boiling Heat Transfer in Variable Aspect Ratio Microchannels using Transparent Heating. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 55(9-10), 2235-2243.
- Wang, Y., Sefiane, K., Wang, Z., and Harmand, S. 2014. Analysis of Two-Phase Pressure Drop Fluctuations during Micro-Channel Flow Boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 353–362.
- 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, G. R., Dhir, V. K., and Momoda, L. A. 2002. Heat Transfer and Pressure Drop in Narrow Rectangular Channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(1), 53–64.
- Wasilik, M., and Chen, N. 2003. Deep Reactive Ion Etch Conditioning Recipe, Micromachining and Microfabrication Process Technology IX, 30 December, Proceedings of SPIE, Vol. 5342, 103-110, California, USA.
- Webb, R. L. 1981. The Evolution of Enhanced Surface Geometries for Nucleate Boiling. *Heat Transfer Engineering*, 2(3-4), 46-69.
- Westwater, J. W. 1959. Boiling Heat Transfer. *American Scientist*, 47(3), 427-446.
- Whitehouse, D. J. 1994. *Handbook of Surface Metrology*, Taylor & Francis, London, UK.
- Wu, H. Y., and Cheng, P. 2003a. An Experimental Study of Convective Heat Transfer in Silicon Microchannels with Different Surface Conditions. *International Journal of Heat Transfer*, 46(14), 2547-2556.
- Wu, H. Y., and Cheng, P. 2003b. Visualization and Measurements of Periodic Boiling in Silicon Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(14), 2603-2614.
- Wu, H. Y., and Cheng, P. 2004. Boiling Instability in Parallel Silicon Microchannels at Different Heat Flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(17-18), 3631-3641.
- Yang, F., Dai, X., Peles, Y., Cheng, P., Khan, J., and Li, C. 2014. Flow Boiling Phenomena in a Single Annular Flow Regime in Microchannels (II): Reduced Pressure Drop and Enhanced Critical Heat Flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68, 716-724.
- Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., and Sing, S. L. 2015. Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications. *Applied Physics Reviews*, 2(4), 041101.

- Yin, L., Jia, L., Guan, P., and Liu, D. 2014. Experimental Investigation on Bubble Confinement and Elongation in Microchannel Flow Boiling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 290-296.
- Yin, L., and Jia, L. 2016. Confined Bubble Growth and Heat Transfer Characteristics during Flow Boiling in Microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98, 114-123.
- Yu, J., Momoki, S., and Koyama, S. 1999. Experimental Study of Surface Effect on Flow Boiling Heat Transfer in Horizontal Smooth Tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(10), 1909-1918.
- Yu, W., France, D. M., Wambsganss, M. W., and Hull, J. R. 2002. Two-Phase Pressure Drop, Boiling Heat Transfer, and Critical Heat Flux to Water in a Small-Diameter Horizontal Tube. *International Journal of Multiphase Flow*, 28(6), 927-941.
- Zhang, T., Tong, T., Chang, J.-Y., Peles, Y., Prasher, R., Jensen, M. K., T. J. Wen, Phelan, P. 2009. Laminar Instability in Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(25-26), 5661-5674.
- Zhu, Y., Wu, X., and Zhao, R. 2017a. R32 Flow Boiling in Horizontal Mini Channels: Part I. Two-Phase Flow Patterns. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 1223-1232.
- Zhu, Y., Wu, X., and Zhao, R. 2017b. R32 Flow Boiling in Horizontal Mini Channels: Part II Flow-Pattern Based Prediction Methods for Heat Transfer and Pressure Drop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 1233-1244.
- Zhuan, R., and Wang, W. 2013. Boiling Heat Transfer Characteristics in a Microchannel Array Heat Sink with Low Mass Flow Rate. *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2), 65-74.

## EKLER

### EK-1. Isıl Çiftlerin Kalibrasyon Eğrileri





Şekil E1.1. Deneylerde kullanılan ısı çiftlerinin kalibrasyon eğrileri.

## EK-2. Belirsizlik Analizi

Herhangi bir fiziksel büyüklüğün ölçümü her zaman belli bir miktar hata içerir. Bir ölçümdeki hata ölçülen değer ile gerçek değer arasındaki farktır. Belirsizlik analizi, deneysel ölçüm veya sonuçlarda hata içeren bu aralığın tespit edilmesidir. Deneysel belirsizlikler, cihazların ölçüm hassasiyetinin düşük olması, deney prosedüründeki kabuller ve çevresel faktörlerden kaynaklanabilir. Bir ölçümdeki toplam hata, sistematik ve random hataların toplamıdır. Sistematik hatalar, ölçme cihazlarından kaynaklanan ve ölçüm sırasında değişmeyen sabit hatalardır. Ölçüm cihazlarındaki hatalar, cihazların düzenli olarak ve doğru kalibrasyon yönteminin uygulanmasıyla azaltılabilir. Ancak bu tip hatalar, eksik ve uygun olmayan kalibrasyon standartları veya metotları, kalibrasyon denklemleri oluşturma hataları, cihaz kurulumu ve çevresel etki nedeniyle kalıcı olabilir. Diğer yandan, random hatalar, yapılan ölçüme özgüdür. Bu tip hatalar, ölçümlerde dağılmaya neden olan kararsız etkilerden ve buna bağlı oluşan belirsizlikten kaynaklanır. Random hatalar, ölçüm sırasında, uygun bir zaman aralığı içinde birden fazla okuma yapılarak azaltılabilir.

Bu çalışmada, yayımlı belirsizlik analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, her bir deneysel parametrenin ayrı ayrı etkileri nedeniyle oluşan birleşik belirsizliği hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Yayımlı belirsizlik analizi, Coleman and Steele (2018) tarafından açıklanan yöntemine göre yapılmıştır. Buna göre, ölçülen bir  $X$  değişkenine ait random belirsizlik hesabında, elde edilen ölçüm değerlerinin Gauss dağılımına sahip olduğu ve güvenilirlik seviyesinin %95 olduğu kabul edilmiştir. Sonuç olarak,  $X$  değişkenine ait random hata ( $u_{random}$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{random} = t_{\%95} S_x \quad (E2.1)$$

Burada,  $S_x$ ,  $N$  adet ölçüm örneğine sahip  $X$  değişkeninin standart sapmasıdır ve Eşitlik (E2.2) ile hesaplanır.

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (E2.2)$$

Bu denklemde,  $\bar{X}$ ,  $N$  adet ölçümün aritmetik ortalamasıdır ve Eşitlik (E2.3)'den hesaplanır.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (\text{E2.3})$$

Diğer yandan,  $X$  değişkenin sistematik belirsizliği, Eşitlik (E2.4)'te verildiği gibi kareler toplamının karekökü alınarak hesaplanır:

$$B_x = \sqrt{\sum_{k=1}^M (B_x)_k^2} \quad (\text{E2.4})$$

Burada;  $B_x$ , ölçüm cihazlarından gelen sistematik hata olup üreticilerinin verdiği cihaz özelliklerinden veya kalibrasyon verilerinden elde edilebilir. Sistematik belirsizliğin standart sapması ( $S_{B_x}$ ):

$$S_{B_x} = \frac{B_x}{2} \quad (\text{E2.5})$$

eşitliğiyle elde edilir. Random ve sistematik bileşenlerin oluşturduğu birleşik belirsizlik ( $u_c$ ) aşağıdaki denklemden belirlenir.

$$u_c = \sqrt{S_x^2 + S_{B_x}^2} \quad (\text{E2.6})$$

Sonuç olarak, %95 güvenilirlik düzeyi ile ölçülen bir değişkene ait toplam belirsizlik ( $U$ ):

$$U = t_{\%95} u_c \quad (\text{E2.7})$$

eşitliğinden hesaplanır.  $r$ , ölçümü yapılan  $j$  adet bağımsız  $X$  değişkeninin fonksiyonu olan bir deneysel sonuç olmak üzere:

$$r = r(X_1, X_2, \dots, X_j) \quad (\text{E2.8})$$

şeklinde ifade edilebilir. Bağımsız değişkenlere ait belirsizlik değerleri,  $U_{X_1}, U_{X_2}, \dots, U_{X_j}$  biçiminde tanımlanırsa,  $r$ 'nin toplam belirsizliği,  $U_r$ , aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$U_r = \sqrt{\left(\frac{\partial r}{\partial X_1}\right)^2 U_{X_1}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2}\right)^2 U_{X_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_j}\right)^2 U_{X_j}^2} \quad (\text{E2.9})$$

Eşitlik (E2.9) ile hesaplanan  $U_r$  mutlak belirsizliktir. Alternatif olarak, bu denklem  $r$  değeriyle boyutsuzlaştırılarak bağıl belirsizlik elde edilir.

$$\frac{U_r}{r} = \sqrt{\left(\frac{X_1}{r} \frac{\partial r}{\partial X_1}\right)^2 U_{X_1}^2 + \left(\frac{X_2}{r} \frac{\partial r}{\partial X_2}\right)^2 U_{X_2}^2 + \dots + \left(\frac{X_j}{r} \frac{\partial r}{\partial X_j}\right)^2 U_{X_j}^2} \quad (\text{E2.10})$$

Bu deneysel çalışmada, yukarıda ayrıntılı olarak tanımlanan yayılmalı belirsizlik analizi yöntemi kullanılarak bütün sonuç parametreler için belirsizlik değerleri hesaplanmıştır. Çizelge E2.1'de önemli parametreler için yukarıda açıklanan yöntem kullanılarak elde edilen belirsizlik formülleri verilmiştir.

Çizelge E2.1. Belirsizlik formülleri.

Büyüklik	Belirsizlik denklemi
Hidrolik çap, $D_h$	$\frac{U_{D_h}}{D_h} = \sqrt{\left[\left(\frac{h}{w+h}\right)^2 \left(\frac{U_w}{w}\right)^2\right] + \left[\left(\frac{w}{w+h}\right)^2 \left(\frac{U_h}{h}\right)^2\right]}$
Mikrokanal kesit alanı, $A_c$	$\frac{U_{A_c}}{A_c} = \sqrt{\left(\frac{U_w}{w}\right)^2 + \left(\frac{U_h}{h}\right)^2}$
Mikrokanalların toplam ısı transfer alanı, $A_t$	$\frac{U_{A_t}}{A_t} = \sqrt{\left(\frac{U_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{2U_h}{2h+w}\right)^2 + \left(\frac{U_w}{2h+w}\right)^2}$
Isı alıcı taban alanı, $A_b$	$\frac{U_{A_b}}{A_b} = \sqrt{\left(\frac{U_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{U_w}{W}\right)^2}$
Kanatçık yüzey alanı, $A_k$	$\frac{U_{A_k}}{A_k} = \sqrt{\left(\frac{U_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{U_h}{h}\right)^2}$
Yükseklik/genişlik veya genişlik/yükseklik oranı, $\beta$	$\frac{U_\beta}{\beta} = \sqrt{\left(\frac{U_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{U_w}{w}\right)^2}$
Isıl güç, $\dot{Q}$	$\frac{U_{\dot{Q}}}{\dot{Q}} = \sqrt{\left(\frac{U_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{U_I}{I}\right)^2}$
Üst ısı çiftlerin ortalama sıcaklığı, $T_{ort}$	$U_{T_{ort}} = \frac{1}{10} \sqrt{(U_{T_1})^2 + (U_{T_2})^2 \dots + (U_{T_{10}})^2}$
Isı kaybı, $\dot{Q}_k$	$U_{\dot{Q}_k} = 0,1875 U_{T_{ort}}$
Çıkış kuruluk derecesi, $x_{e,o}$	$U_{x_{e,o}} = \sqrt{\left(\frac{A_t}{\dot{m}i_{sb}}\right)^2 U_{\dot{q}_w}^2 + \left(\frac{\dot{q}_w}{\dot{m}i_{sb}}\right)^2 U_{A_t}^2 + \left(-\frac{\dot{q}_w A_t}{\dot{m}^2 i_{sb}}\right)^2 U_m^2 + \left(\frac{c_{p,l}}{i_{sb}}\right)^2 U_{T_g}^2}$
Efektif ısı akısı, $\dot{q}_w$	$\frac{U_{\dot{q}_e}}{\dot{q}_e} = \sqrt{\left(\frac{U_{\dot{Q}}}{\dot{Q} - \dot{Q}_k}\right)^2 + \left(\frac{U_{\dot{Q}_k}}{\dot{Q} - \dot{Q}_k}\right)^2 + (U_{A_b})^2}$
Duvar ısı akısı, $\dot{q}_w$	$\frac{U_{\dot{q}_w}}{\dot{q}_w} = \sqrt{\left(\frac{U_{\dot{Q}}}{\dot{Q} - \dot{Q}_k}\right)^2 + \left(\frac{U_{\dot{Q}_k}}{\dot{Q} - \dot{Q}_k}\right)^2 + (U_{A_t})^2}$
Kanatçık verimi, $\eta_k$	$\frac{U_{\eta_k}}{\eta_k} = \text{csch } mh \sqrt{(m^2 h - m \cosh mh \sinh mh)^2 U_h^2 + (mh^2 - h \cosh mh \sinh mh)^2 U_m^2}$
Toplam kanat verimi, $\eta_k$	$U_{\eta_t} = \sqrt{\left[\frac{(1 - \eta_k)N}{A_t}\right]^2 U_{A_k}^2 + \left[\frac{(1 - \eta_k)NA_k}{A_t^2}\right]^2 U_{A_t}^2 + \left[\frac{NA_k}{A_t}\right]^2 U_{\eta_k}^2}$
Kanatçık parametresi, $m$	$\frac{U_m}{m} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{U_{h_{if}}}{h_{if}}\right)^2 + \left(\frac{U_{w_k}}{w_k}\right)^2}$
Kaynamalı akış ısı transfer katsayısı, $h_{if}$	$\frac{U_{h_{if}}}{h_{if}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\dot{q}_w}}{\dot{q}_w}\right)^2 + \left(\frac{U_{\eta_t}}{\eta_t}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{y,n}}}{(T_{y,n} - T_{doyn})}\right)^2}$

### EK-3. Akış Kaynama Isı Transfer Bağıntıları

Çizelge E3.1. Akış kaynama ısı transfer katsayısı bağıntıları.

Referans	Bağıntı	Açıklama
Chen (1966)	$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} (E h_{sp} + S h_{nb})$ $h_{sp} = 0,023 Re_L^{0,8} Pr_L^{0,4} \left( \frac{k_L}{D_h} \right)$ $E = \left( 1 + \frac{1}{X_{tt}^{0,5}} \right)^{1,78}$ $h_{nb} = 0,00122 \left( \frac{k_L^{0,79} c_{p,L}^{0,45} v_g^{0,24}}{\sigma^{0,5} \mu_L^{0,29} \nu_L^{0,49}} \right) \Delta T_{sat}^{0,24} \Delta P_{sat}^{0,75}$ $S = 0,9622 - 0,5822 \left[ \tan^{-1} \left( \frac{Re_L E^{1,25}}{6,18 \times 10^4} \right) \right]$ $Re_L = \frac{G(1 - x_e) D_h}{\mu_L}, \quad Re_g = \frac{G x_e D_h}{\mu_g}$ $Pr_L = \frac{c_{p,L} \mu_L}{k_L}$ $X_{tt} = \left( \frac{\mu_L}{\mu_g} \right)^{0,1} \left( \frac{1 - x_e}{x_e} \right)^{0,9} \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0,5}$	Su, metanol, pentan, heptan, benzen ve sikloheksan akışkanlarına ait düşey yukarı, düşey aşağı ve halkasal kanallarda kaynamalı akışa ait yaklaşık 600 veriye dayanarak kaynamalı akış ısı transfer katsayısı için önerilmiş bir bağıntıdır.
Shah (1982)	$h_L = 0,023 Re_L^{0,8} Pr_L^{0,4} \frac{k_L}{D_h}$ $N_{CO} = \left( \frac{1 - x_e}{x_e} \right)^{0,8} \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0,5}$ $Bo = \frac{\dot{q}_w}{G h_{fg}}$ $h_{cb} = \frac{1,8}{N_{CO}^{0,8}} h_L$ <p><math>N_{CO} &gt; 1</math> için;</p> $h_{nb} = \begin{cases} 230 Bo^{0,5} & Bo > 0,0003 \\ 1 + 46 Bo^{0,5} & Bo < 0,0003 \end{cases}$ <p><math>0,1 &lt; N_{CO} &lt; 1</math> ise;</p> $h_{nb} = h_L F Bo^{0,5} \exp(2,74 N_{CO} - 0,1)$ $F = \begin{cases} 14,7 & Bo > 0,0011 \\ 15,43 & Bo < 0,0011 \end{cases}$ <p><math>N_{CO} &lt; 0,1</math> ise;</p> $h_{nb} = h_L F Bo^{0,5} \exp(2,74 N_{CO} - 0,15)$ $h_{tp} = MAX(h_{cb}, h_{nb})$	19 farklı deneysel çalışmadan 780 veri kullanılmıştır.

<p>Kandlikar (1990)</p>	$Co^* > 0,65 \rightarrow h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} E h_{sp}$ $Co^* < 0,65 \rightarrow h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} S h_{sp}$ $Co^* = \left( \frac{1 - x_e}{x_e} \right)^{0,8} \left( \frac{v_L}{v_g} \right)^{0,5}$ $S = 1,136 Co^{*-0,9} f(Fr_L) + 667,2 Bo^{0,7}$ $E = 0,6683 Co^{*-0,2} f(Fr_L) + 1058 Bo^{0,7}$ $f(Fr_L) = \begin{cases} 1 & Fr_L \geq 0,04 \\ (25 Fr_L)^{0,3} & Fr_L < 0,04 \end{cases}$ $h_{sp} = 0,023 Re_L^{0,8} Pr_L^{0,4} \left( \frac{k_L}{D_h} \right)$ <p><math>Co^* &gt; 0,65</math> kabarcıklı kaynama; <math>Co^* &lt; 0,65</math> taşınımlı kaynama</p>	<p>Su, R-11, R-12, R-22, R-113, R-134a, R-152a D=4-32 mm <math>q_w=0,3-228 \text{ kW/m}^2</math> <math>G=13-8179 \text{ kg/m}^2\text{s}</math></p>
<p>Liu and Winterton (1991)</p>	$h_{tp} = \sqrt{(E h_L)^2 + (S h_{Cooper})^2}$ $h_L = 0,023 Re_L^{0,8} Pr_L^{0,4} \left( \frac{k_L}{D_h} \right)$ $h_{Cooper} = 55 P_r^{0,12-0,434 \ln R_p} (-\log P_r)^{-0,55} M^{-0,5} \dot{q}_w^{0,67}$ $E = \left[ 1 + x Pr_L \left( \frac{\rho_L}{\rho_g} - 1 \right) \right]^{0,35}$ $S = \frac{1}{1 + 0,055 F^{0,1} Re_L^{0,16}}$	<p><math>G=12,4-8179 \text{ kg/m}^2\text{s}</math> D=2,95-32 mm <math>q_w=0,35-2620 \text{ kW/m}^2</math> x=0-0,948</p>
<p>Yu et al. (2002)</p>	$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} \left[ 6400000 (Bo^2 We_L)^{0,27} \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0,2} \right]$ $We_L = \frac{G^2 D_h}{\rho_L \sigma}$ $Bo = \frac{\dot{q}_w}{G i_{Lv}}$	<p>Su, etilen, glikol <math>G=50-200 \text{ kg/m}^2\text{s}</math> D=2,98 çaplı yatay tüp</p>
<p>Warrier et al. (2002)</p>	$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} (E h_{sp})$ $h_{sp} = 0,023 Re_L^{0,8} Pr_L^{0,4} \left( \frac{k_L}{D_h} \right)$ $E = 1 + 6 Bo^{1/16} - 5,3(1 - 855 Bo)x^{0,65}$	<p>FC-84 D<sub>h</sub>=0,75 mm çaplı yatay 5 adet paralel mikrokana, üniform ısı akısı, kanalın altından ve üstünden ısıtma</p>
<p>Koşar et al. (2005)</p>	$Re_{cr} = 163,59 - 2,73 \times 10^4 Bo > Re_L$ <p style="text-align: center;">→ Kabarcıklı kaynama baskın</p> $h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} 1,068 (\dot{q}_{eff})^{0,64}$ $Re_{cr} < Re_L \rightarrow \text{Taşınımlı kaynama baskın}$	<p>Su D<sub>h</sub>=227 µm hidrolik çaplı oyuklu 5 adet paralel dikdörtgen kesitli kanal</p>

	$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} 4,068 \times 10^4 Re_L^{0,12} (1-x)^{0,8} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,02}$ $Re_L = \frac{G(1-x)D_h}{\mu_L}; \quad Bo = \frac{\dot{q}_w}{Gi_{Lv}}$	
Lee and Mudawar (2005b)	$0 < x < 0,05$ $h_{tp} = 3,856 X_{MP}^{0,267} h_{sp}$ $0,05 < x < 0,55$ $h_{tp} = 436,48 X_{MP}^{0,665} h_{sp} Bo^{0,522} We_L^{0,351}$ $h_{sp} = \begin{cases} Nu_3 \left(\frac{k_L}{D_h}\right) & \text{3 yüzeyinden ısıtılıyorsa} \\ Nu_4 \left(\frac{k_L}{D_h}\right) & \text{4 yüzeyinden ısıtılıyorsa} \end{cases}$ $X_{MP} = \begin{cases} X_{vv} & Re_L < 2000 \text{ ve } Re_g < 2000 \\ X_{vt} & Re_L < 2000 \text{ ve } 2000 < Re_g < 20000 \end{cases}$ $X_{vv} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_g}\right)^{0,5} \left(\frac{\vartheta_L}{\vartheta_g}\right)^{0,5}$ $X_{vt} = \left(\frac{f_L Re_g^{0,25}}{0,079}\right)^{0,5} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,5} \left(\frac{\vartheta_L}{\vartheta_g}\right)^{0,5}$ $Re_g = \frac{Gx D_h}{\mu_g}; \quad Re_L = \frac{G(1-x) D_h}{\mu_L};$ $Bo = \frac{\dot{q}_w}{Gi_{Lv}}; \quad We_L = \frac{G^2 D_h}{\rho_L \sigma}$	Su, R-134a D <sub>h</sub> =350 µm 318 veri noktası
Bertsch et al. (2009)	$h_{FB} = Sh_{nb} + F h_{conv,tp}$ $F = 1 + 80(x^2 - x^6)e^{-0,6Co}$ $S = 1 - x$ $h_{nb} = 55 P_r^{0,12-0,2 \log R_p} (-\log P_r)^{-0,55} M^{-0,55} \dot{q}_w^{0,67}$ $h_{conv,tp} = h_{conv,l}(1-x) + h_{conv,v}x$ $h_{conv,l} = \left( 3,66 + \frac{0,0668 \frac{D_h}{L} Re_L Pr_L}{1 + 0,04 \left[\frac{D_h}{L} Re_L Pr_L\right]^{2/3}} \right) \frac{k_L}{D_h}$ $h_{conv,v} = \left( 3,66 + \frac{0,0668 \frac{D_h}{L} Re_v Pr_v}{1 + 0,04 \left[\frac{D_h}{L} Re_v Pr_v\right]^{2/3}} \right) \frac{k_v}{D_h}$ $Co = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v) D_h^2}}; \quad Re_L = \frac{G D_h}{\mu_L};$ $Re_v = \frac{G D_h}{\mu_v}; \quad Pr = \frac{P}{P_{cr}}$ <p>R<sub>p</sub>: DIN 4762'ye göre yüzey pürüzlülük parametresi</p>	14 farklı çalışmadan 12 farklı akışkana ait 3899 adet doymuş kaynama verisi Yatay ve düşey konumlandırılmış tek ve çoklu paralel mikrokanallar İç çap: 0,16-2,92 mm Co=0,3-4 G=20-3000 kg/m <sup>2</sup> s q <sub>w</sub> =4-1150 kW/m <sup>2</sup> T <sub>sat</sub> =-194-97 °C

<p>Mahmoud and Karayiannis (2013)</p>	$x \leq 0,3$ $h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} 3414 \frac{Bo^{0,625} We_L^{0,2} Re_L^{0,1} k_L}{Co^{0,6} D_h}$ $x > 0,3$ $h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} 5324 \left( \frac{Bo^{0,3} We_L^{0,25}}{N_{co}^{0,25}} \right)^{1,79} \frac{k_L}{D_h}$ $N_{co} = \left( \frac{1-x_e}{x_e} \right)^{0,8} \left( \frac{\rho_L}{\rho_g} \right)^{0,5}$ $Bo = \frac{\dot{q}_w}{Gi_{Lv}} ; Re_L = \frac{G(1-x)D_h}{\mu_L} ; We_L = \frac{G^2 D_h}{\rho_L \sigma}$	<p>R134a 8561 veri G=100-500 kg/m<sup>2</sup>s D=0,52-4,26 mm P=600-1400 kPa</p>
<p>Lim et al. (2015)</p>	$h_{tp} = \frac{Re^{0,196} k_L}{Bo^{0,117} C_{FR}^{0,42} D_h}$ $C_{FR} = 0,4905 + Fr_L (1 - x^{3,134})$ $Fr_L = \frac{G}{\rho^2 g D_h}$	<p>Su G=200-600 kg/m<sup>2</sup>s D<sub>h</sub>=0,5 mm q<sub>w</sub>=100-400 kW/m<sup>2</sup> x=0-0,2 P=110-170 kPa</p>
<p>Markal et al. (2017)</p>	$h_{tp} = \frac{0,054 Re_L^{0,214} Bo^{0,913} AR^{0,552} \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0,7} \left( \frac{k_L}{D_h} \right)^{1,959}}{We_L^{0,094} Pr_L^{0,333}}$ $AR = \frac{W_{ch}}{H_{ch}}$	<p>213 adet doymuş kaynamalı akış verisi G=51-728,7 kg/m<sup>2</sup>s q<sub>w</sub>=36-221,7 kW/m<sup>2</sup> D<sub>h</sub>=100-250 µm AR=0,37-5.00</p>

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : İbrahim ATEŞ  
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti  
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.01.1986 - İnegöl  
Medeni Hali : Evli  
Telefon : 444 4 388/2302  
e-mail : ibrahim.ates@erzurum.edu.tr

### Eğitim

<u>Derece</u>	<u>Üniversite</u>	<u>Mezuniyet Yılı</u>
Yüksek Lisans	Manchester Üniversitesi	2014
Lisans	Uludağ Üniversitesi	2007
Lise	İnegöl Turgutalp Anadolu Lisesi	2003

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar

	<u>Yıl</u>
İNTEŞ Doğalgaz ve Isıtma Sistemleri Ltd. Şti.	2008-2009
KGM Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü	2009-2012
Erzurum Teknik Üniversitesi	2015-Devam ediyor

### Yayınlar (SCI, SCI-Expanded)

Sahin, B., Ates, I., Manay, E., Bayrakceken, A., and Celik, C. 2019. Optimization of Design Parameters for Heat Transfer and Friction Factor in a Heat Sink with Hollow Trapezoidal Baffles. Applied Thermal Engineering, 154, 76–86.

### Hakemli Dergiler

Şahin, B., Özer, R. H., Ateş, İ., Manay, E. 2019. Mikrokanallı ısı alıcıda SiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanının karma taşınım özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10(1), 180-169.

Manay, E., Sahin, B., Mandev, E., Ates, I., Yetim, T. 2016. Determination of Thermophysical Properties of Water Based Magnetic Nanofluids. International Journal of Chemical and Molecular Engineering, 10(8), 1089 - 1095.

### **Ulusal Kongre Sunum**

Şahin, B., Manay, E., Ateş, İ., Ceylan, M. 2017. Su bazlı  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ferroakışkanının termofiziksel özellik ölçümleri. 21. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

### **Uluslararası Kongre Sunum**

Ateş, İ., Mandev, E., Şahin, B., Gezirici, B. 2019. An Experimental Study on Heat Transfer Augmentation with Porous Elements Inserted in a Rectangular Duct. 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, 17-19 December, İstanbul, Türkiye (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Manay, E., Ateş, İ., Mandev, E., Arslan, G. 2019. Experimental Investigation of the Effect of Channel Height on Flow Boiling Characteristics in Microchannels. 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, 17-19 December, İstanbul, Türkiye (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Ateş, İ., Afshari, F., Tuncer, A. D., Şahin, B., Khanlari, A. 2019. Experimental Study on Airfoil Angles in Horizontal Axis Wind Turbine. 2nd International Conference on Technology and Science, 14-16 Kasım 2019, Burdur, Türkiye. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

Ateş, İ., Şahin, B., Manay, E. 2019. An experimental Investigation of Water Flow Boiling Characteristics in a Microchannel Heat Sink. 22nd Congress on Thermal Science and Technology (ULIBTK 2019), September 11-14 2019, Kocaeli, Türkiye. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Şahin, B., Ateş, İ., Manay, E., Gezirici, B. 2018. The Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Lattice-structured Heat Sinks in a Rectangular Channel. 4th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, İstanbul, Türkiye (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Şahin, B., Özer, R. A., Manay, E., Ateş, İ., Mandev, E. 2018. Experimental Investigation of Mixed Convection Heat Transfer in Microchannels. VI. Uluslararası GAP Mühendislik Kongresi 2018, Şanlıurfa, Türkiye (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Şahin, B., Bayrakçeken, A., Manay, E., Ateş, İ. 2017. Analysis of Turbulent Convective Heat Transfer from Rectangular Baffles by Taguchi Method. 2nd Thermal and Fluid Engineering Conference, Las Vegas, ABD (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)