

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MİKROKANALLARDA KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mak. Yük. Müh. Burak MARKAL**

**OCAK 2016  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Burak MARKAL Tarafından Hazırlanan**

**MİKROKANALLARDA KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 29 /12/2015 gün ve 1633 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**DOKTORA TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Orhan AYDIN**




**Üye : Prof. Dr. Ahmet ÜNAL**



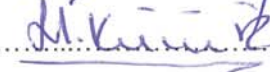
**Üye : Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ**



**Üye : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN**



**Üye : Doç. Dr. Haydar KÜÇÜK**



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Mikrokanallı ısı alıcılarda kaynamalı akış, yüksek miktarda ısı uzaklaştırabilme kapasitesi, nispeten üniform yüzey sıcaklığı sağlayabilmesi, yüzey alanı/hacim oranının yüksek olması ve az miktarda (ml mertebelerinde) soğutucu akışkana gereksinim duyması sebebiyle özellikle son on beş yıldır büyük ilgi görmektedir. Bu alandaki gelişmeler, otomotiv, bilgisayar, biyomedikal ve savunma sektörleri tarafından yakından takip edilmektedir. Ancak, akışın karmaşık fiziksel yapısı sebebiyle mikrokanallarda kaynamalı akışla ilgili hala çok sayıda çözülmemiş konu bulunmaktadır.

Bu doktora tezi kapsamında, yüksek hızlı akış görüntüleme tekniğinden de yararlanarak dikdörtgenel mikrokanallarda kaynamalı akış için geniş parametre aralığında kapsamlı deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışmaların hem literatüre hem de uygulamaya önemli düzeyde katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında, değerli görüş ve önerileriyle beni yönlendiren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Orhan AYDIN'a ve yine desteklerinden dolayı Doç. Dr. Mete AVCI'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 113M408 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Bu çalışmayı biricik kızım Elif Canan MARKAL'a ithaf ediyorum.

Burak MARKAL  
Trabzon 2016

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Mikrokanallarda Kaynamalı Akışın Deneysel İncelenmesi’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Orhan AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/01/2016

Burak MARKAL

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Kaynama .....	2
1.2.1. Kaynama Başlangıcının Mikroskobik Açıdan İncelenmesi .....	3
1.2.2. Kaynamanın Makroskobik İncelenmesi .....	9
1.2.3. Akış Desenleri .....	13
1.2.4. İki Faz Akış Kararsızlıkları .....	15
1.2.4.1. Hızlı Kabarcık Büyüme Kararsızlığı .....	17
1.2.4.2. Paralel Kanal Kararsızlığı.....	18
1.2.4.3. Ledinegg (Akış Gezinti) Kararsızlığı .....	18
1.2.4.4. Giriş Bölgesinde Sıkıştırılabilir Hacim Kararsızlığı .....	19
1.2.4.5. Kritik Isı Akısı Koşulu .....	19
1.3. Makro Ölçekten Mikro Ölçeğe Geçiş.....	21
1.4. Mikrokanallarda Kaynamalı Akıştaki Önemli Boyutsuz Sayılar .....	24
1.5. Literatür Araştırması.....	25
1.5.1. Deneysel Çalışmalar .....	25
1.5.2. Teorik Çalışmalar .....	50
1.6. Tezin Amacı, Kapsamı ve Özgün Niteliği.....	58
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	62
2.1. Deneysel Düzen ve Test Prosedürü.....	62
2.1.1. Deneysel Düzen .....	62
2.1.2. Test Bölgesi .....	65
2.1.3. Deneysel Düzeninin Çalışma Prensipleri .....	65

2.2.	Deneysel Hesaplama Yöntemi.....	68
2.2.1.	Isı Kaybı Kalibrasyonu .....	68
2.2.2.	Isı Transferi.....	69
2.2.3.	Basınç Düşümü.....	73
2.3.	Belirsizlik Analizi.....	78
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	80
3.1.	Mikrokanallarda Doymuş Kaynamalı Akışta Isı Transferi ve Basınç Düşümünün Deneysel Olarak İncelenmesi.....	80
3.1.1.	Kaynama Eğrileri.....	80
3.1.2.	Kaynamalı Akışta Isı Transfer Katsayısı.....	81
3.1.3.	Basınç Düşümü.....	84
3.1.4.	Akış Görüntüleme ve Akış Kararsızlıkları .....	86
3.2.	Genişlik/Derinlik Oranının (AR) Mikrokanallarda Doymuş Kaynamalı Akış Üzerindeki Etkisi.....	94
3.2.1.	Kaynama Eğrileri.....	94
3.2.2.	AR'nin Doymuş Kaynamalı Akış Karakteristikleri Üzerindeki Etkisi .....	95
3.2.3.	Isı Akısı ve Kütle Akısının Doymuş Kaynamalı Akış Karakteristikleri Üzerindeki Etkisi .....	99
3.2.4.	Akış Görüntüleme ve Akış Kararsızlıkları .....	101
3.3.	Mikrokanallarda Kaynamalı Akışlarda Hidrolik Çapın Etkisi.....	105
3.3.1.	Kaynama Eğrileri.....	106
3.3.2.	Hidrolik Çap Etkisi.....	107
3.3.3.	Isı ve Kütle Akısının Etkisi .....	111
3.3.4.	Akış Görüntüleme ve Akış Kararsızlıkları .....	113
3.4.	Mikrokanallarda Doymuş Kaynamalı Akış İçin Yeni Bir Isı Transfer Katsayısı Bağıntısının Geliştirilmesi .....	118
3.4.1.	Mevcut Bağıntılarının Değerlendirilmesi .....	118
3.4.1.1.	Makro Kanal Bağıntılarının Değerlendirilmesi .....	120
3.4.1.2.	Mini/Mikrokanal Bağıntılarının Değerlendirilmesi.....	122
3.4.2.	Mikrokanallarda Doymuş Kaynamalı Akışta Isı Transferi İçin Yeni Bir Bağıntının Geliştirilmesi.....	131
4.	SONUÇLAR.....	136
5.	ÖNERİLER .....	138
6.	KAYNAKLAR .....	139
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

## MİKROKANALLARDA KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ

Burak MARKAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Orhan AYDIN  
2016, 154 Sayfa

Bu doktora tez çalışmasında, mikrokanallarda kaynamalı akış deneysel olarak incelenmiştir. Basınç, sıcaklık, debi ve ısıl güç değerleri ölçülmüş ve yüksek hızlı kamera kullanılarak akış gözleme testleri yapılmıştır. Bu kapsamda, farklı geometriler, kütle akıları ve ısı akılarında çalışılmıştır. Farklı kütle akıları, kuruluk dereceleri, kanal genişlik/kanal derinlik oranı (AR), hidrolik çap ve ısı akısı değerlerinin iki faz ısı transfer katsayısını ve toplam basınç düşümünü nasıl etkilediği incelenmiş ve fiziksel mekanizmayla ilgili özgün bulgular elde edilmiştir. Deneysel iki faz ısı transfer katsayısı verileri, literatürde makro ve mikrokanallar için tanımlanmış mevcut bağıntılarla karşılaştırılmış ve bu bağıntıların genel geçerliliği incelenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında oluşturulan veri tabanı kullanılarak, ısı transfer katsayısı için yeni bir ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Hem deneysel ölçümler hem de akış görüntüleri mikrokanallardaki kaynamalı akışın özgün niteliklere sahip olduğunu ve makro kanal karakteristiklerinden farklı olduğunu göstermiştir. Mikrokanallarda (doymuş) kaynamalı akışın sanki periyodik karaktere sahip olduğu ve temel akış desenlerinin uzun kabarcıklı akış ve halkasal akış olduğu gösterilmiştir. Baskın ısı transfer mekanizması taşınımlı kaynamadır. AR ve hidrolik çapın akış ve ısı geçişini etkileyen önemli geometrik parametreler olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikrokanal, Kaynamalı akış, Akış görüntüleme, Basınç düşümü, Isı transfer katsayısı



PhD. Thesis

SUMMARY

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW BOILING IN MICROCHANNELS

Burak MARKAL

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Orhan AYDIN  
2016, 154 Pages

In this Ph.D. thesis, flow boiling in rectangular microchannels is studied experimentally in detail. Values of pressure, temperature, flow rate and heating power are measured and detailed flow visualization tests are conducted using high-speed camera. In this context, different geometrical dimensions, and various values of mass flux and heat flux are examined. The effects of mass flux, vapor quality, channel width to channel depth ratio (AR), hydraulic diameter and heat flux on the two phase heat transfer coefficient and total pressure drop were investigated and, important results were obtained related to physical mechanism. The experimental results obtained for the heat transfer coefficient were evaluated according to the existing correlations and a new correlation was developed. Both the experimental measurements and flow visualization results show that flow boiling in microchannels has unique characteristics and, it differs considerably from macro channel counterparts. Saturated flow boiling in microchannels has quasi-periodical characteristics. The main flow patterns are observed as elongated bubble flow and annular flow. The dominant heat transfer mechanism is shown to be convective boiling. It is disclosed that the aspect ratio and the hydraulic diameter are important parameters affecting the flow and heat transfer characteristics.

**Key Words:** Microchannel, Flow boiling, Flow visualization, Pressure drop, Heat transfer coefficient

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Mikro tahrik ünitesi (micro thruster) (a), mikrofon (b), lastik basınç sensörü (c).....	1
Şekil 1.2.	Kabarcıklanma odağında oluşan bir kabarcığın şematik resmi (a), kabarcık önündeki durma noktası (b) .....	4
Şekil 1.3.	Havuz kaynamasında, 1 atm basınçta su için, kaynama rejimlerinin şematik gösterimi. A-B: Doğal taşınım, B-C: Kabarcıklı kaynama, C-D: Kısmi film kaynaması, D-E: Kararlı film kaynaması.....	9
Şekil 1.4.	Kaynamalı akıştaki ısı transfer bölgeleri .....	11
Şekil 1.5.	Isıtılan yatay dairesel bir kanalda iki faz akış desenleri .....	14
Şekil 1.6.	Ledinegg kararsızlığı için $\Delta P$ - $G$ değişiminin genel gösterimi .....	19
Şekil 2.1.	Deney düzeneğinin fotoğrafı .....	63
Şekil 2.2.	Deney düzeneğinin şematik resmi .....	64
Şekil 2.3.	Test bölgesinin tam (a) ve kesit görünüşü (b) .....	66
Şekil 2.4.	Tek bir mikrokanal kesiti (a), bir ısı alıcının kesiti (b).....	67
Şekil 2.5.	Isı kaybı kalibrasyon eğrisi.....	68
Şekil 3.1.	Farklı kütle akıları için kaynama eğrileri .....	81
Şekil 3.2.	Farklı kütle akıları için ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı (a) ve yerel kuruluk derecesi (b) ile değişimi .....	82
Şekil 3.3.	Farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün duvar ısı akısı (a) ve çıkış kuruluk derecesi (b) ile değişimi.....	85
Şekil 3.4.	$G=92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=44.1 \text{ W}$ için girişten 41.5 mm ötede akış desenleri .....	86
Şekil 3.5.	$G=92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=44.1 \text{ W}$ için 41.5 mm ötede çoklu akış desenleri .....	87
Şekil 3.6.	$G=92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=48.0 \text{ W}$ için girişten 41.5 mm ötede akış desenleri .....	88
Şekil 3.7.	$G=92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=59.9 \text{ W}$ için girişten 41.5 mm ötede sisli akış deseni .....	89
Şekil 3.8.	Buharlaştırma momentum kuvveti ve atalet kuvveti arasındaki etkileşim, girişten uzaklık 2 mm, $G=92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=44.1 \text{ W}$ .....	89
Şekil 3.9.	$G=51.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=59.9 \text{ W}$ çalışma koşullarında kanal girişinde ters akış.....	90
Şekil 3.10.	Farklı kütle akıları (a) ve ısı yükleri (b) için duvar sıcaklığının zamanla değişimi .....	91
Şekil 3.11.	Toplam basınç düşümünün farklı kütle akıları için zamanla değişimi .....	92

Şekil 3.12. $G = 64.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , ve $\dot{q} = 48.0 \text{ W}$ için toplam basınç düşümü (a) ve giriş-çıkış basınçlarının (b) zamanla değişimi .....	93
Şekil 3.13. $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de farklı AR'ler için kaynama eğrileri.....	94
Şekil 3.14. Farklı AR değerleri için $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı (a) ve efektif ısı akısı (b) ile değişimi .....	96
Şekil 3.15. Farklı AR değerleri için $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de ısı transfer katsayısının yerel kuruluk derecesi ile değişimi .....	97
Şekil 3.16. Farklı AR değerleri için $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de toplam basınç düşümünün duvar ısı akısı (a) ve efektif ısı akısı (b) ile değişimi .....	98
Şekil 3.17. Farklı AR değerleri için $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de toplam basınç düşümünün çıkış kuruluk derecesi ile değişimi .....	99
Şekil 3.18. $AR=0.37$ için ısı transfer katsayısı (a) ve toplam basınç düşümünün (b) farklı ısı yüklerinde kütle akısı ile değişimi .....	100
Şekil 3.19. $G=324 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=57.9 \text{ W}$ ve $AR=3.54$ için girişten 41.5 mm uzakta bir periyodik kaynamadaki akış deseni sırası. ....	102
Şekil 3.20. $G=324 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=57.9 \text{ W}$ ve $AR=1.22$ için girişten 41.5 mm uzakta bir periyodik kaynamadaki akış deseni sırası .....	103
Şekil 3.21. $G=324 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=51.9 \text{ W}$ ve $AR=2.71$ için verilen bir zamanda girişten 41.5 mm uzakta komşu kanallardaki akış deseni dağılımı .....	103
Şekil 3.22. $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=51.9 \text{ W}$ ve $AR=2.71$ için girişten 11.5 mm uzakta akış deseni değişimi.....	104
Şekil 3.23. $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=60.1 \text{ W}$ ve $AR=2.71$ için girişten 11.5 mm uzakta akış deseni değişimi.....	105
Şekil 3.24. $G=78 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de farklı hidrolik çaplar için kaynama eğrileri .....	106
Şekil 3.25. Farklı hidrolik çaplar için ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı (a) ve efektif ısı akısı (b) ile değişimi .....	108
Şekil 3.26. Farklı hidrolik çaplar için ısı transfer katsayısının yerel kuruluk derecesi ile değişimi .....	109
Şekil 3.27. Farklı hidrolik çaplar için toplam basınç düşümünün duvar ısı akısı (a) ve efektif ısı akısı (b) ile değişimi .....	110
Şekil 3.28. Farklı hidrolik çaplar için toplam basınç düşümünün çıkış kuruluk derecesi ile değişimi .....	111
Şekil 3.29. Isı transfer katsayısı (a) ve toplam basınç düşümünün (b) $D_h=150 \mu\text{m}$ için farklı ısı yüklerinde kütle akısı ile değişimi .....	112
Şekil 3.30. $G=78 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=44.1 \text{ W}$ , $D_h=100 \mu\text{m}$ ve girişten 41.5 mm uzakta akış desenleri.....	114
Şekil 3.31. $G=93 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=44.1 \text{ W}$ , $D_h=100 \mu\text{m}$ ve girişten 41.5 mm uzakta akış desenleri.....	114

Şekil 3.32. $G=93 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=52.0 \text{ W}$ , $D_h=100 \text{ }\mu\text{m}$ ve girişten 41.5 mm uzakta akış desenleri.....	115
Şekil 3.33. $G=78 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=44.1 \text{ W}$ , $D_h=200 \text{ }\mu\text{m}$ ve girişten 41.5 mm uzakta akış desenleri.....	115
Şekil 3.34. $G=93 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=52.0 \text{ W}$ ve $D_h=100 \text{ }\mu\text{m}$ çalışma koşulları için kabarcığın kanal girişinden dışarı çıkması .....	116
Şekil 3.35. $G=51 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=59.9 \text{ W}$ , $D_h=200 \text{ }\mu\text{m}$ ve girişten 11.5 mm uzaklıkta ters akış ve kabarcıklı kaynamanın bastırılması .....	117
Şekil 3.36. $G=51 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q}=59.9 \text{ W}$ , $D_h=200 \text{ }\mu\text{m}$ ve girişten 41.5 mm uzakta çalkantılı akış.....	118
Şekil 3.37. Doymuş kaynamalı akışta deneysel ısı transfer katsayısı verilerinin tüm veri tabanı için, seçilen makro kanal bağıntılarının tahminleriyle karşılaştırılması.....	121
Şekil 3.38. Deneysel ısı transfer katsayısı sonuçlarının $G=64.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $AR=1$ , $D_h=150 \text{ }\mu\text{m}$ çalışma koşulları için makro kanal bağıntılarının tahminleriyle karşılaştırılması .....	122
Şekil 3.39. Deneysel verilerin tüm veri tabanı için, seçilen mini/mikrokanal bağıntılarının tahminleriyle karşılaştırılması.....	124
Şekil 3.40. Deneysel ısı transfer katsayısı sonuçlarının $G=64.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $AR=1$ , $D_h=150 \text{ }\mu\text{m}$ çalışma koşulları için mini/mikrokanal bağıntılarının tahminleriyle karşılaştırılması (a ve b) ve yakın tahminlerin detaylı gösterimi (c ve d).....	125
Şekil 3.41. $AR=5$ ve $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi ....	126
Şekil 3.42. $AR=5$ ve $G=195 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi ....	126
Şekil 3.43. $AR=3.54$ ve $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	126
Şekil 3.44. $AR=3.54$ ve $G=195 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	127
Şekil 3.45. $AR=2.71$ ve $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	127
Şekil 3.46. $AR=1.22$ ve $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	127
Şekil 3.47. $AR=1.22$ ve $G=195 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	128
Şekil 3.48. $AR=1.22$ ve $G=238 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	128
Şekil 3.49. $AR=1.22$ ve $G=324 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	128
Şekil 3.50. $AR=0.82$ ve $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	129

Şekil 3.51. AR=0.82 ve $G=195 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	129
Şekil 3.52. AR=0.82 ve $G=238 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	129
Şekil 3.53. AR=0.82 ve $G=324 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	130
Şekil 3.54. AR=0.37 ve $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	130
Şekil 3.55. AR=0.37 ve $G=195 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	130
Şekil 3.56. AR=0.37 ve $G=324 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi .....	131
Şekil 3.57. Önerilen ısı transfer katsayısı bağıntısıyla yapılan tahminlerin $\pm\%30$ hata bantları üzerinden deneysel verilerle karşılaştırılması.....	132
Şekil 3.58. AR=1, $D_h=150 \text{ }\mu\text{m}$ ve dört farklı kütle akı için önerilen ısı transfer katsayısı bağıntısının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması .....	133
Şekil 3.59. Önerilen ısı transfer katsayısı bağıntısının farklı AR (a ve b) ve farklı kütle akıları (c ve d) için deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.....	134

## TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Kanalların fiziksel olarak sınıflandırılması .....	22
Tablo 1.2. Mikrokanallarda kaynamalı akıştaki önemli boyutsuz sayılar .....	25
Tablo 1.3. Deneysel çalışmalardaki kanallara ait geometrik özellikler ve test akışkanı türü .....	47
Tablo 1.4. Kaynamalı akışta yaygın olarak kullanılan akışkanların özellikleri.....	61
Tablo 2.1. Mikrokanallara ait geometrik parametreler .....	67
Tablo 2.2. İki faz ısı transfer katsayısı bağıntıları.....	74
Tablo 2.3. Deneysel belirsizlikler .....	79
Tablo 3.1. Seçilen mevcut bağıntıların ve önerilen bağıntının tahmin kapasitesi .....	122

## SEMBOLLER DİZİNİ

- $A_{ch}$  : Kanal kesit alanı [ $m^2$ ]
- $A_f$  : Tek bir kanadın yüzey alanı [ $m^2$ ]
- $A_p$  : Isı alıcının taban (platform) alanı [ $m^2$ ]
- $AR$  : Boyut oranı,  $AR = W_{ch}/H_{ch}$
- $A_t$  : Mikrokanalların toplam ısı transfer alanı [ $m^2$ ]
- $Bn$  : Bond sayısı,  $Bn = g(\rho_L - \rho_v)D_h^2 / \sigma$
- $Bo$  : Kaynama sayısı,  $Bo = q'' / Gi_{Lv}$
- $Ca$  : Kılcallık sayısı,  $Ca = \mu U / \sigma$
- $C_f$  : Fanning sürtünme faktörü
- $Co$  : Sınırlama sayısı,  $Co = \sigma^{0.5} / (D_h (g(\rho_L - \rho_v))^{0.5})$
- $Co^*$  : Taşınım sayısı,  $Co^* = ((1 - x_e) / x_e)^{0.8} / (v_L / v_g)^{0.5}$
- $c_p$  : Sabit basınçta özgül ısı [ $kJ kg^{-1}K^{-1}$ ]
- $D_h$  : Hidrolik çap [m]
- $E$  : Taşınımlı kaynama düzeltme faktörü
- $Eö$  : Eötvös sayısı,  $Eö = g(\rho_L - \rho_v)D^2 / 8\sigma$
- $F_{PF}$  : Basınç düzeltme faktörü
- $h$  : Isı transfer katsayısı [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]
- $h_{nb}$  : Kabarcıklı kaynamada ısı transfer katsayısı [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]
- $h_{sp}$  : Tek fazlı akışta ısı transfer katsayısı [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]
- $H$  : Derinlik (yükseklik) [m]
- $I_c$  : Isıtılan çevre [m],
- $i_{Lv}$  : Buharlaşma gizli ısı [ $kJ kg^{-1}$ ]
- $k$  : Isı iletim katsayısı [ $W m^{-1}K^{-1}$ ]
- $k_a$  : Silikonun ısı iletim katsayısı [ $W m^{-1}K^{-1}$ ]
- $k_b$  : Bakırın ısı iletim katsayısı [ $W m^{-1}K^{-1}$ ]

- $K_{c1}, K_{c2}$  : Kesit daralması kayıp katsayıları
- $L$  : Mikrokanal uzunluğu [m]
- $L_{cap}$  : Kılcallık uzunluğu,  $L_{cap} = (\sigma / g(\rho_L - \rho_v))^{-0.5}$
- $L_{sp}$  : Tek fazlı bölge uzunluğu [m]
- $M$  : Toplam veri sayısı
- $m$  : Kanatçık parametresi
- $MAE$  : Ortalama mutlak hata
- $\dot{m}$  : kütleli debi [ $\text{kg s}^{-1}$ ]
- $N$  : Kanal sayısı
- $G$  : Kütle akışı [ $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]
- $g$  : Yer çekimi ivmesi [ $\text{m s}^{-2}$ ]
- $ONB$  : Kabarcıklı kaynamanın başlangıcı
- $P$  : Basınç [Pa]
- $P_{ch,i}$  : Mikrokanal girişindeki basınç [Pa]
- $P_{HT}$  : Isıtılan toplam kanal çevresi,  $P_{HT} = N(2H_{ch} + W_{ch})$
- $P_{FT}$  : Toplam kanal ıslak çevresi,  $P_{FT} = 2N(H_{ch} + W_{ch})$
- $P_r$  : İndirgenmiş basınç,  $P_r = P / P_{crit}$
- $q''$  : Isı akışı [ $\text{kW m}^{-2}$ ]
- $q''_{eff}$  : Efektif ısı akışı [ $\text{kW m}^{-2}$ ]
- $\dot{q}_{loss}$  : Kayıp ısı [kW]
- $Re$  : Reynolds sayısı,  $Re = \rho U D_h / \mu$
- $Re_L$  : Yerel sıvı akış miktarına bağlı Re sayısı,  $Re_L = G(1 - x_e) D_h / \mu_L$
- $Re_g$  : Yerel buhar akış miktarına bağlı Re sayısı,  $Re_g = G x_e D_h / \mu_g$
- $Re_{sp}$  : Tek fazlı sıvı akışı için Reynolds sayısı,  $Re_{sp} = G D_h / \mu_{sp}$
- $r_b$  : Kabarcık yarıçapı [m]
- $r_c$  : Kabarcıklaşma odağı yarıçapı [m]
- $r_{c,min}$  : Kabarcıklaşma için gerekli olan minimum oyuk yarıçapı [m]
- $r_{c,max}$  : Kabarcıklaşma için gerekli olan maksimum oyuk yarıçapı [m]
- $r_{c,crit}$  : Kritik oyuk yarıçapı [m]



$S$	: Kabarcıklı kaynama düzeltme faktörü
$T$	: Sıcaklık [K]
$T_B$	: Akışkan yığının sıcaklığı [K]
$T_{sat}$	: Doyma sıcaklığı [K]
$T_{sat,cho}$	: Kanal çıkışındaki doyma sıcaklığı [K]
$U$	: Hız [ $m\ s^{-1}$ ]
$v$	: Özgül hacim [ $m^3\ kg^{-1}$ ]
$\dot{V}$	: Hacimsel debi [ $m^3\ s^{-1}$ ]
$W$	: Genişlik [m]
$We$	: Weber sayısı, $We = D_h G^2 / \rho \sigma$
$W_f$	: Kanatçığın yarı genişliği [m]
$W_T$	: Isı alıcı genişliği [m]
$x$	: Kuruluk derecesi
$x_e$	: Yerel kuruluk derecesi
$x_{eo}$	: Çıkış kuruluk derecesi
$X_{MP}$	: Martinelli parametresi
$X_{tt}$	:Türbülanslı sıvı-türbülanslı buhar akışına dayalı Martinelli parametresi
$X_{vv}$	: Laminer sıvı-laminer buhar akışına dayalı Martinelli parametresi
$y$	: Düşey koordinat eksenini ve düşey uzunluk [m]
$y_b$	: Kabarcık yüksekliği [m]
$y_s$	: Yüzeyden kabarcık durma noktasına olan mesafe [m]
$z$	: Yatay uzunluk [m]

### Yunan sembolleri

$\alpha$	: Boşluk oranı
$\delta_t$	: Isıl sınır tabaka kalınlığı [m]
$\phi_f^2$	: Yerel sıvı debisine bağlı iki faz sürtünme çarpanı
$\mu$	: Viskozite [ $Ns\ m^{-2}$ ]

- $\Delta P$  : Basınç farkı [Pa]  
 $\Delta P_{c1}$  : Kesit daralması basınç kayıpları (büyük hazne-küçük hazne) [Pa]  
 $\Delta P_{c2}$  : Kesit daralması basınç kayıpları (küçük hazne-mikrokanal) [Pa]  
 $\Delta P_{e1}$  : Kesit genişlemesi basınç değişimi (küçük hazne-büyük hazne) [Pa]  
 $\Delta P_{e2}$  : Kesit genişlemesi basınç değişimi (mikrokanal-küçük hazne) [Pa]  
 $\Delta P_{sat}$  : Duvar sıcaklığı ve akışkan sıcaklığına göre hesaplanan doyma basınçları arasındaki fark [Pa]  
 $\Delta T$  : Sıcaklık farkı [K]  
 $\Delta T_{sat}$  : Kızma farkı [K]  
 $\Delta T_{sub}$  : Aşırı soğutma miktarı [K]  
 $\rho$  : Yoğunluk [ $\text{kg m}^{-3}$ ]  
 $\sigma$  : Yüzey gerilmesi [ $\text{N m}^{-1}$ ]  
 $\theta_r$  : Temas açısı [ $^{\circ}$ ]

### Alt indisler

- $cb$  : Taşınımlı kaynama  
 $ch$  : Mikrokanal  
 $crit$  : Kritik  
 $g$  : Buhar  
 $g_o$  : Yalnızca buhar  
 $i$  : Giriş (büyük hazne)  
 $L$  : Sıvı, su  
 $Lo$  : Yalnızca sıvı  
 $P1$  : Büyük hazne  
 $P2$  : Küçük hazne  
 $tot$  : Toplam  
 $nb$  : Kabarcıklı kaynama  
 $o$  : Çıkış (büyük hazne)  
 $sp$  : Tek faz  
 $th$  : Eşik değer

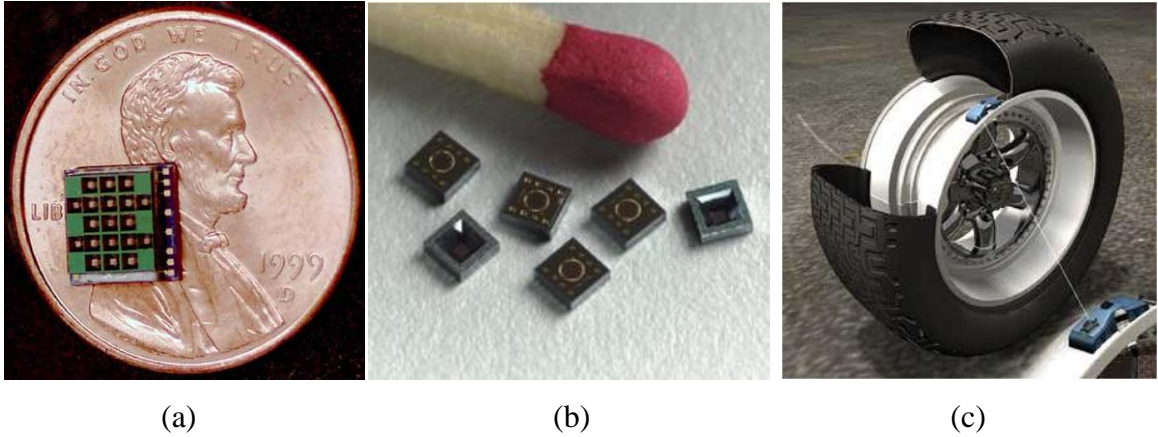
*tp* : İki fazlı  
*v* : Buhar  
*w* : Duvar/cidar

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Gelişen teknoloji, yüksek kapasiteli mini, mikro ve hatta nano boyutlu sistemlerin üretimine olanak vermiştir. Böylelikle, mikro elektromekanik sistemler (MEMS), micro akışkan sistemleri (*microfluidics*) ve mikro elektronik sistemler (*microelectronics*) gibi yeni araştırma ve uygulama alanları ortaya çıkmıştır. Mikro sensörler, mikro türbinler, mikro pompalar ve benzeri mikro cihaz ve sistemler savunma sanayi, tıp, otomotiv, uzay endüstrisi, elektronik ve haberleşme ve benzeri birçok uygulama alanında karşımıza çıkmaktadır.

Mikro üretim tekniklerinin gelişmesi ve böylelikle mikro/nano boyutlu sistemlerin yaygınlaşması, hammaddeye olan bağımlılığı ve üretim maliyetlerini azaltmasının yanısıra yer ve zaman bakımından da kazanç elde edilmesini sağlamaktadır. Uygulamada kullanılan bazı mikro yapıları sistemler Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Mikro tahrik ünitesi (microthruster) (a), Mikrofon (b) (URL-1, 2012), lastik basınç sensörü (c) (URL-2, 2012).

Mini/mikro/nano sistemlerde elde edilen yüksek performans beraberinde yüksek ısı miktarlarının üretilmesine neden olmaktadır. Küçülen boyutlar, güvenilir bir çalışma için açığa çıkan bu yüksek miktarlardaki ısının uzaklaştırılmasını zaruri kılmaktadır.

Bu noktada en etkin yöntem zorlanmış taşınım ile soğutma olacaktır. İki fazlı akış, tek fazlı akışa göre çok daha yüksek ısı transfer katsayıları sunduğundan, yüksek miktarda ısıyı uzaklaştırılması için daha çok tercih edilebilir. Kaynamalı akışla soğutma, yüksek ısı transfer katsayısı değerleri ve yüzeyde sağladığı neredeyse üniform sıcaklık dağılımları ile mikro sistemler için etkin bir yöntemdir.

Mikrokanallarda kaynamalı akış, karmaşık ve anlaşılması zor bir konudur. Konu ile ilgili literatürde var olan bilgiler genelde çelişkilidir. Bu durum ve konunun pratikteki önemi, araştırma ilgisini her geçen gün artırmaktadır. Özellikle son yıllarda farklı mikro geometrilerde, farklı soğutkanların kaynamalı akışı üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu doktora tez çalışmasında, suyun farklı boyut oranlarındaki (*aspect ratio* – AR, kanal genişlik / kanal derinlik oranı) dikdörtgenel mikrokanallarda kaynamalı akışı deneysel olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

## 1.2. Kaynama

Kaynama ve kaynamada ısı transferi literatürde çeşitli şekillerde tanımlanmaktadır: Incropera vd. (2007) kaynama olayını bir katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan buharlaşma olarak ifade etmiştir. Tong ve Tang (1997) kaynamada ısı transferini, sıvı fazdan buhar faza değişimle meydana gelen ısı transfer türü olarak tanımlamıştır. Collier ve Thome (1994) ise taşınımlı kaynamayı açıklarken; akmakta olan bir sıvıya, buhar üretimi gerçekleşecek şekilde ısı verilmesi tanımını kullanmıştır.

Kaynamayı temel olarak iki gruba ayırabiliriz: Havuz kaynaması ve kaynamalı akış (veya zorlanmış taşınımlı kaynama). İkisi arasındaki temel fark, akışkan yığın hareketinin olup olmamasıdır. Havuz kaynamasında akışkan yığın hareketi yoktur ve yüzeyi ısıtılan veya içerisine ısıtıcı yerleştirilmiş bir kap/tank içerisinde bulunan akışkanın kaynamasını ifade etmektedir. Kaynamalı akış ise, duvarları ısıtılan bir kanal içerisinde akmakta olan akışkanın kaynaması olayıdır. Bu tanımlara bakıldığında zaman kaynamalı akışta, zorlanmış taşınım etkilerinin; havuz kaynamasında ise doğal taşınım (kaldırma kuvveti) etkilerinin ön planda olduğu görülmektedir.

Kaynama olayıyla ilgili kavramların ifade edilmesinde genel olarak üç farklı sıcaklık teriminin birbirine göre durumundan yararlanılır. Bunlar; akışkan yığın sıcaklığı, akışkanın doyma sıcaklığı ve ısıtma yüzeyi sıcaklığıdır. Isıtma yüzeyi sıcaklığı, doyma sıcaklığına geçtikten sonra bu iki değer arasındaki fark; sıcaklık aşımı, sıcaklık fazlalığı veya kızma

farkı ( $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$ ) olarak adlandırılır. Bu ifade, kimi kaynaklarda *excess temperature* kimilerinde ise *wall superheat* olarak geçmektedir. Doyma sıcaklığı ile akışkan yığın sıcaklığı arasındaki fark ise aşırı soğutma derecesi veya miktarı ( $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_B$ ) olarak adlandırılır.

Kaynamanın gerçekleşmesi, basit bir şekilde, Incropera vd. (2007) tarafından da ifade edildiği gibi, ısıtma yüzey sıcaklığının sıvı basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığını geçmesi koşuluna bağlanabilir. Ancak, gerçekte bu olay oldukça karmaşıktır. Konunun iyi bir şekilde anlaşılabilmesi, kaynama başlangıcının mikroskobik düzeyde incelenmesini gerekli kılar. Mikroskobik inceleme yapılarak kaynama başlangıcı ve gelişimini etkileyen parametrelerin ve bu süreç üzerinde önemli etkiye sahip kuvvetlerin neler olduğu konusunda bilgi sahibi olunabilir.

### 1.2.1. Kaynama Başlangıcının Mikroskobik Açıdan İncelenmesi

Kabarcık oluşumu, akışkanın temas halinde olduğu ısıtma yüzeyi üzerinde yer alan ve kabarcıklaşma odakları olarak adlandırılan oyuklarda başlar. Kandlikar vd. (2006) kabarcıklaşma/kabarcık oluşumu kriteri açısından mini/mikrokanallar ile konvansiyonel kanallar arasında belirgin farkların olmadığını belirtmiş ve kabarcık oluşum kriterleriyle ilgili temel çalışmaların Hsu ve Graham (1961) ve Hsu (1962) tarafından yapıldığını (havuz kaynamasında kabarcıklaşma) ifade etmişlerdir.

Kabarcıklaşmanın başlamasıyla bir başka ifadeyle kaynamanın temeliyle ilgili farklı modeller geliştirilmiştir. Bu modellerdeki farklılıklar esas itibarıyla ele alınan kabarcık şeklinin ve oyuk yapısının geometrik çeşitliliğinden kaynaklanmaktadır. Bu bölümde Kandlikar vd.'nin (1997) çalışmalarında ele alıp geliştirdikleri modelden yararlanılacaktır (Kandlikar vd., 2006). Modelin şematik resmi Şekil 1.2.'de görülmektedir.

Aşırı soğuk/soğutulmuş bir sıvı, sabit ısı akısı uygulanan bir kanala  $T_{B,i}$  sıcaklığında girerse kanal boyunca herhangi bir  $z$  noktasında akışkanın yığın sıcaklığı, akışkanın entalpisindeki birim zamandaki artışın yüzeyden akışkana geçen veya verilen ısı miktarına eşitlenmesiyle belirlenir. Bu durumda, akışkan sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiş ve akışkan içerisindeki aksel iletim ve viskoz yayılım ihmal edilmiştir. Bu durumda, aksel doğrultuda belirli bir  $z$  mesafesindeki yığın sıcaklık şu şekilde yazılabilir:

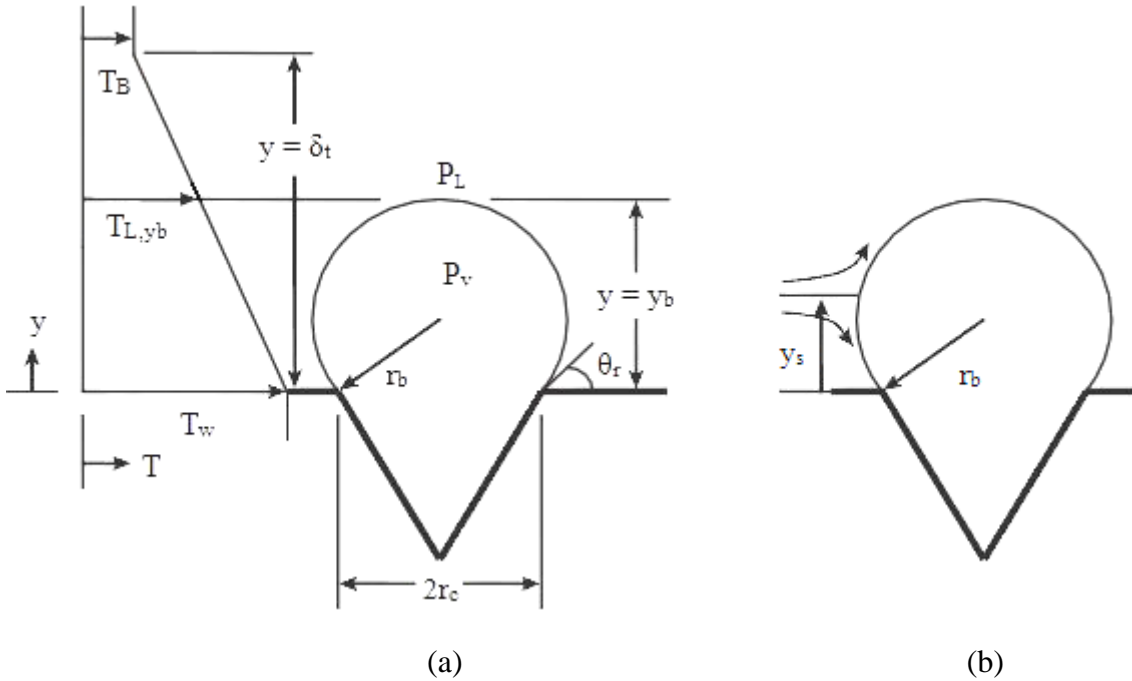
$$T_{B,z} = T_{B,i} + \frac{q'' I_c z}{\dot{m} c_p} \quad (1.1)$$

Burada,  $q''$  ısı akısı;  $I_c$ , ısıtılan çevre ve  $z$  kanal girişinden itibaren ısıtılan uzunluktur. Kanal cidarından akışkana taşınım ile ısı geçişi söz konusudur. Herhangi bir  $z$  mesafesindeki duvar sıcaklığı şu şekilde yazılabilir:

$$T_{w,z} = T_{B,z} + \frac{q''}{h} \quad (1.2)$$

Burada;  $h$ , ısı transfer katsayısıdır. Şekil 1.2a'da görüldüğü üzere kabarcığın içindeki basınç ile onu çevreleyen sıvının basıncı birbirinden farklıdır. Bu basınç farkından kaynaklanan kuvvet yüzey gerilmesi tarafından dengelenir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\Delta P = P_v - P_L = \frac{2\sigma}{r_b} \quad (1.3)$$



Şekil 1.2. Kabarcıklaşma odağında oluşan bir kabarcığın şematik resmi (a), kabarcık önündeki durma noktası alanı (b) (Kandlikar vd., 1997; Kandlikar vd., 2006).

Burada  $P_v$ ,  $P_L$ ,  $\sigma$  ve  $r_b$  sırasıyla buhar basıncı, kabarcık etrafındaki sıvı basıncı, yüzey gerilmesi ve kabarcık yarı çapını ifade etmektedir. Bir kabarcıklaşma odağında kabarcığın oluşabilmesi, sıcaklık dağılımı ile yakından ilgilidir. Sıvı içerisindeki yerel sıcaklığı belirlemek için, Şekil 1.2a'da görüldüğü gibi ısı sınır tabaka kalınlığı ( $\delta_t$ ) ile ısıtma yüzeyi arasında lineer sıcaklık değişimi kabulü yapılır. Bu durumda sınır tabaka kalınlığındaki sıcaklık veya diğer bir deyişle yığın akışkan sıcaklığı ( $T_B$ ) ile duvar sıcaklığı ( $T_w$ ) arasında geometrik benzerlik kurulabilir.

Isıl sınır tabaka kalınlığı,

$$\delta_t = \frac{k_L}{h} \quad (1.4)$$

eşitliği ile ifade edilebilir (Collier ve Thome, 1994; Kandlikar vd., 2006; Kuo ve Peles, 2009). Burada;  $k_L$ , sıvının ısıl iletkenliğidir. Eşitlik (1.4)'ten yararlanarak, herhangi bir  $z$  mesafesinde  $y = y_b$ 'deki sıvı sıcaklığı, geometrik benzerlik kullanılarak belirlenebilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$T_{L,yb} = T_w - \left( \frac{y_b h}{k_L} \right) (T_w - T_B) \quad (1.5)$$

Clapeyron denklemi (Çengel ve Boles, 2013) kullanılırsa ve sıvının özgül hacmi buharın özgül hacmi yanında ihmal edilirse Eş. (1.3)'ten de yararlanarak  $P_v$  basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$T_{L,sat}(P_v) = T_{sat} + \left( \frac{2\sigma}{r_b} \right) \left( \frac{T_{sat}}{\rho_v i_{Lv}} \right) \quad (1.6)$$

Burada;  $T_{sat}$ , sistem basıncı olan  $P_L$ 'ye karşılık gelen kelvin [K] cinsinden doyma sıcaklığı,  $i_{Lv}$  ise  $P_L$  basıncındaki buharlaşma gizli ısıdır. Kabarcıklaşma için gerekli olan koşullardan biri, Eş. (1.5)'te belirtilen  $T_{L,yb}$  sıcaklığının, Eş. (1.6) ile ifade edilen sıcaklık değerinden büyük olmasıdır. Başka bir ifadeyle, buharı çevreleyen sıvının sıcaklığının, sıvının  $P_v$  basıncındaki doyma sıcaklığından büyük olması gerekmektedir. Eş. (1.6) ile



verilen sıcaklık değeri, sıvı-buhar ara yüzündeki herhangi bir noktada buhar kabarcığının sürdürülebilmesi için gerekli minimum sıcaklığı ifade etmektedir (Kandlikar vd., 2006).

Yukarıda ifade edilen koşul, kabarcıklaşmanın gerçekleşebilmesi için tek başına yeterli değildir. Kabarcıklaşma, yüzey üzerindeki oyuklarda meydana geldiği için yüzeyin geometrik özelliklerinin etkisi de söz konusudur. Bir başka ifade ile kabarcıklaşma üzerinde rol oynayan etmenlerden biri de kabarcıklaşma odağı yarıçapıdır. Kabarcıklaşma odağı yarıçapının belli bir değer aralığında olması gerekmektedir. Kabarcık yarıçapı ve kabarcıklaşma odağı yarıçapı Şekil 1.2a'dan yararlanılarak aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir:

$$r_b = \frac{r_c}{\sin \theta_r} \quad (1.7)$$

$$y_b = r_b(1 + \cos \theta_r) \quad (1.8)$$

Ayrıca, Eş. (1.5) ve Eş. (1.6) birleştirilerek aşağıdaki eşitlik elde edilebilir:

$$\left( \frac{y_b}{\delta_t} \right) (T_w - T_B) - (T_w - T_{sat}) + \frac{2\sigma T_{sat}}{r_b \rho_v i_{Lv}} = 0 \quad (1.9)$$

(1.7) ve (1.8) numaralı eşitliklerin, (1.9) numaralı eşitlikte kullanılmasıyla elde edilen denklem çözümlerse, kabarcıklaşma için gerekli olan oyuk yarıçapı aralığı (minimum ve maksimum değerler) elde edilebilir. Kandlikar vd. (2006), Davis ve Anderson'un (1966) elde ettiği sonucu aşağıdaki gibi ifade etmiştir:

$$\begin{aligned} (r_{c,\min}, r_{c,\max}) &= \frac{\delta_t \sin \theta_r}{2(1 + \cos \theta_r)} \left( \frac{\Delta T_{sat}}{\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}} \right) \\ &\times \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{8\sigma T_{sat} (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}) (1 + \cos \theta_r)}{\rho_v i_{Lv} \delta_t \Delta T_{sat}^2}} \right) \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_B \quad (1.11)$$

$$\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat} \quad (1.12)$$

Farklı araştırmacılar, kabarcık yarıçapı, oyuk yarıçapı ve  $T_L$  sıcaklığının belirlendiği konuma yönelik farklı kabuller yaparak (ilişkiler kurarak) değişik yarıçap aralıkları belirlemişlerdir. Hsu (1962) yaptığı çalışmada kabarcığın oluşabilme koşullarını belirtmiştir. Hsu'ya (1962) göre kabarcığın oluşabilmesi için öncelikle sıvı sıcaklığının doyma sıcaklığını geçmesi gerekmektedir. Bu süre bekleme periyodu olarak adlandırılır. Kabarcık büyümeye başlayınca bekleme periyodu sona erer. Bu nedenle kabarcıklaşma için gerekli koşullardan biri bekleme periyodunun bitmesidir. Bekleme periyodunun sonlu olması gerekmektedir. Aksi halde kabarcıklaşma odağı pasif olarak adlandırılacaktır. Ayrıca, oyuk yarıçapının (1.10) numaralı eşitlikte de belirtildiği gibi bu veya buna benzer yöntemlerle elde edilen maksimum ve minimum kabarcıklaşma yarıçapı değerleri arasında olması gerekmektedir. Buna ek olarak, komşu oyuklar arasında bekleme periyodu kısa olan oyukta kabarcıklaşma gerçekteşir. Bekleme periyodu daha uzun olan kabarcıklaşma odağı ise pasifleşir.

Kandlikar vd. (1997), Şekil 1.2.b'de görüldüğü üzere kabarcık etrafında  $y_s$  uzaklığında bir durma noktası olduğunu belirtmiş ve bu noktanın konumuyla ilgili olarak; 20 ile 60° arasındaki temas açılıarı için, aşağıdaki ifadeyi kullanmıştır (Kandlikar et al., 2006).

$$y_s = 1.1r_b = 1.1 \left( \frac{r_c}{\sin \theta_r} \right) \quad (1.13)$$

Akış çizgisi bu noktadan kabarcığı süpürüp gideceği için  $y = y_s$ 'deki sıcaklık  $y = y_b$ 'deki sıvı sıcaklığına eşit olarak alınabilir. Bu koşullar altında (1.9) numaralı eşitlikten yararlanarak kabarcıklaşma odağı yarıçap aralığı için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$(r_{c,\min}, r_{c,\max}) = \frac{\delta_t \sin \theta_r}{2.2} \left( \frac{\Delta T_{sat}}{\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}} \right) \times \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{8.8\sigma T_{sat} (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub})}{\rho_v i_{Lv} \delta_t \Delta T_{sat}^2}} \right) \quad (1.14)$$

Kandlikar vd. (1997), bu modifikasyona ek olarak kabarcıklı kaynamanın başlangıcıyla (ONB) ilgili ifadeler de geliştirmiştir (Kandlikar vd., 2006). (1.14) numaralı

eşitliğin kök içerisindeki terimini sıfıra eşitleyerek; kabarcıklı kaynamanın gerçekleşeceği ilk oyuğun yarıçapını (kritik oyuk yarıçapını) belirlemişlerdir.

$$r_{c,crit} = \frac{\delta_l \sin \theta_r}{2.2} \left( \frac{\Delta T_{sat}}{\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}} \right) \quad (1.15)$$

Verilen bir ısı akısı için kabarcıklı kaynamanın başlangıcındaki kızma farkı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\Delta T_{sat,ONB} = \sqrt{\frac{8.8\sigma T_{sat} q''}{\rho_v i_{Lv} k_L}} \quad (1.16)$$

Yerel kızma farkı, Eş. (1.16) ile belirlenen değerden daha düşük ise kabarcıklaşma meydana gelmeyecektir. ONB'deki yerel aşırı soğutma miktarı ise aşağıdaki şekilde belirlenebilir (Kandlikar vd., 2006):

$$\Delta T_{sub,ONB} = \frac{q''}{h} - \Delta T_{sat,ONB} \quad (1.17)$$

Aşırı soğuk sıvının gönderildiği bir kanalda, kabarcıklaşmanın meydana geldiği bölümdeki yerel aşırı soğutma derecesi, Eş. (1.17) ile belirlenebilir. Kabarcıklaşma başlasa bile sıvının iç kesimlerinde hala doyma sıcaklığından daha düşük sıcaklık değerleri olabilir. Bu ifadenin negatif değerleri ise yüksek kabarcıklaşma miktarlarını ifade etmektedir.

Isıtıcı yüzey üzerinde, Eş. (1.15) ile ifade edilen yarıçapa sahip oyuklar olmayabilir. Böyle bir durumda, herhangi bir  $r_c$  yarıçapına sahip bir oyukta kabarcıklaşmayı başlatmak için gerekli olan kızma farkı aşağıdaki eşitlik ile belirlenebilir (Kandlikar vd., 2006):

$$\Delta T_{sat,ONB,r_c} = \frac{1.1r_c q''}{k_L \sin \theta_r} + \frac{2\sigma \sin \theta_r T_{sat}}{r_c \rho_v i_{Lv}} \quad (1.18)$$

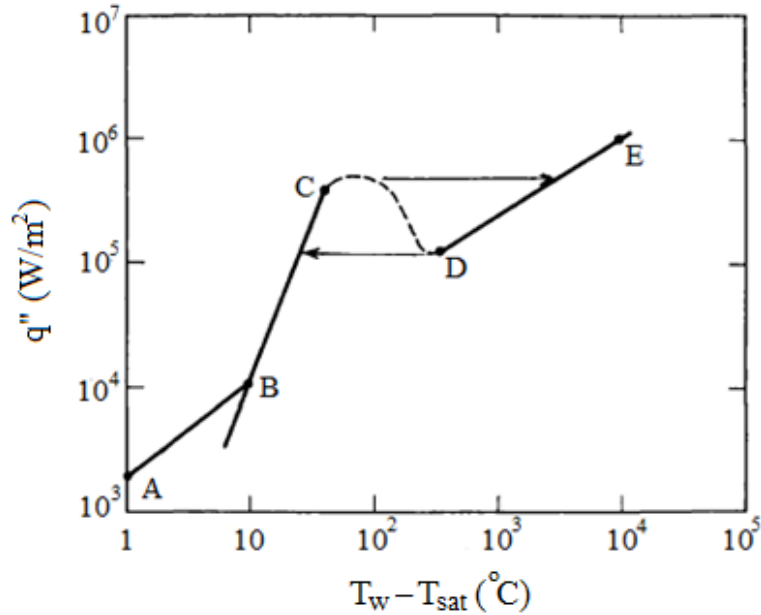
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde kabarcıklaşmanın sınır tabaka kalınlığına, temas açısına, akışkan ve duvar sıcaklığına, akışkanın yoğunluğu ve buharlaşma gizli ısısına ve

kabarcıklaşma odağının geometrisine bağlı olduğu görülmektedir. Özetle, kabarcık oluşumu veya bir başka ifadeyle kaynama başlangıcı; akışkan ve bu akışkanın temas halinde olduğu ısıtma yüzeyinin özelliklerine bağlı, karmaşık bir olaydır.

### 1.2.2. Kaynamanın Makroskobik İncelenmesi

Kaynamanın makroskobik olarak incelenmesinde, kaynama rejimleri ve akış desenlerinin (kaynamalı akışta) belirlenmesi önemlidir. Önceki bölümlerde ifade edildiği üzere akışkanın hareket halinde olup olmamasına göre iki temel kaynama türü vardır: Kaynamalı akış ve havuz kaynaması. Bu bölümde, her iki tür için konvansiyonel yaklaşımlarla elde edilen genel bilgiler verilecektir.

Akış rejimleri, bir kaynama olayında ısı transferinin gerçekleşme mekanizmalarını veya bir başka ifade ile ısı geçişi üzerinde etkin olan mekanizmaları tanımlar. Bu rejimler, ısı akısının kızma farkı ile değişimini gösteren klasik havuz kaynama eğrisinden başlanarak açıklanmıştır. Şekil 1.3.'te havuz kaynaması için tipik bir kaynama eğrisi görülmektedir. Bu egride, ısı akısının kızma farkı ile değişimi verilmiştir.



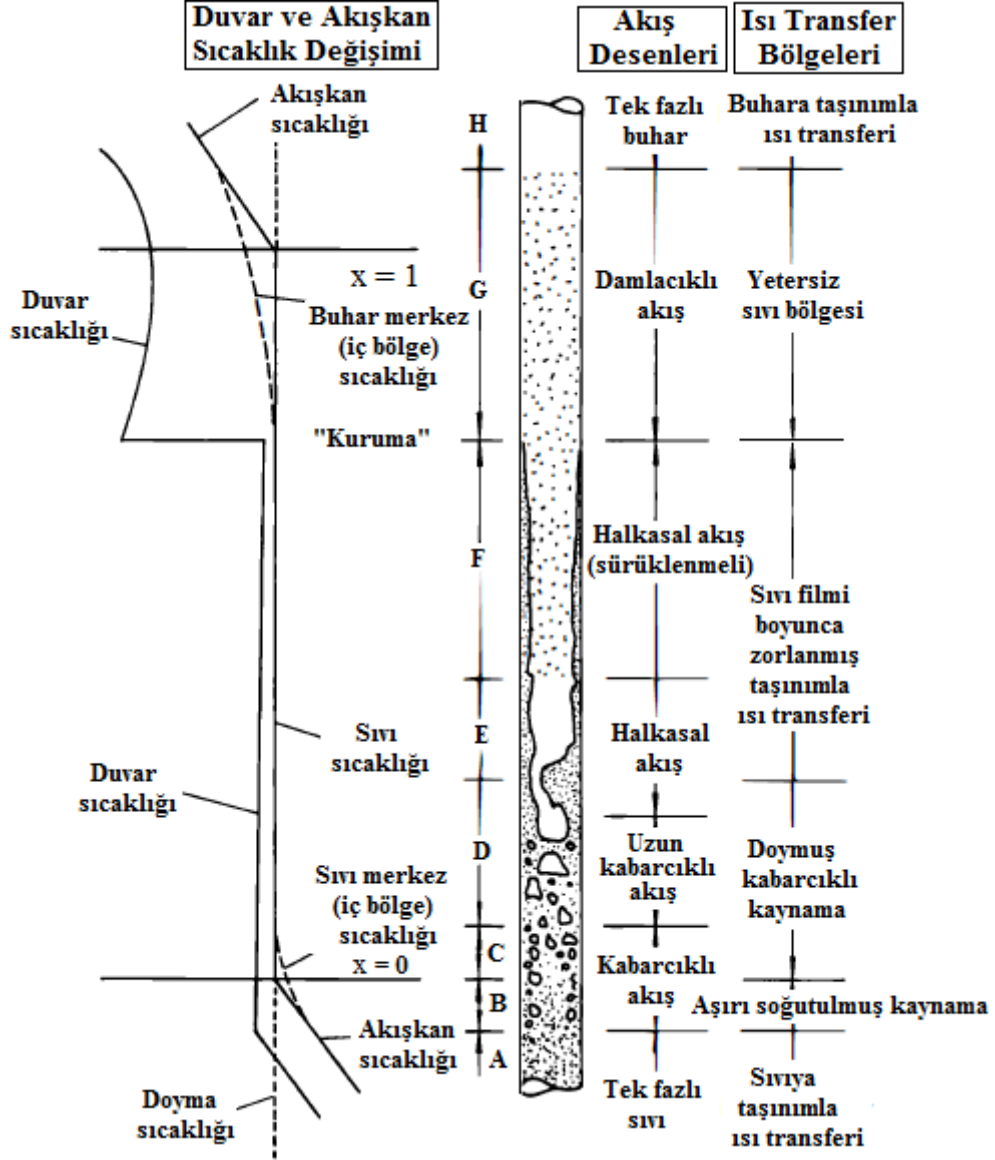
Şekil 1.3. Havuz kaynamasında, 1 atm basınçta su için, kaynama rejimlerinin şematik gösterimi. A-B: Doğal taşınım, B-C: Kabarcıklı kaynama, C-D: Kısmi film kaynaması, D-E: Kararlı film kaynaması (Tong ve Tang, 1997).

A-B bölgesinde ısı transferi doğal taşınım ile gerçekleşir. Yüzeğe ısı akısı uygulandıkça sıvının sıcaklığı sürekli artmaktadır. B-C aralığında ise kabarcıklaşma odaklarında kabarcıklar oluşmaya başlar. Oluşan kabarcıklar, gizli ısı aktararak ve sıvıyı hareketlendirip taşınım ile ısı geçişini iyileştirerek, ısı transferine iki şekilde katkı sağlamış olur. B-C bölgesindeki ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır. Yapılan çalışmalar, genellikle bu bölgeyle ilgilidir. Çünkü, bu bölgede, çok düşük sıcaklık farklarında bile çok yüksek ısı akıları elde edilebilir. Kabarcıklı kaynama, yerel kaynama ve yığın kaynama olmak üzere iki alt rejimden oluşur. İkisi arasındaki fark sıvının aşırı soğuk veya doymuş olmasıyla ilgilidir. Yerel kaynama, aşırı soğuk sıvıdaki kabarcıklı kaynamadır. Isıtma yüzeyinde oluşan kabarcıklar sıvının yığın sıcaklığı henüz doyma sıcaklığına erişmediği için yoğunlaşma eğilimindedir. Yığın kaynama ise doymuş sıvıdaki kabarcıklı kaynamadır. Yığın kaynamada, oluşan kabarcıklar yok olmaz ve kabarcık yoğunluğu sürekli artmaktadır. Bir süre sonra kabarcık yoğunluğu o kadar artar ki ısıtma yüzeyinin büyük bir bölümü buhar kabarcıklarıyla kaplanır. Bu durum, sıvının yüzeyi ıslatmasını büyük ölçüde engeller ve yüzey sıcaklığının aniden artmasına sebep olur. Bu olay, kaynama krizi olarak adlandırılır. Kaynama krizinden hemen önceki maksimum ısı akısı ise kritik ısı akısı (CHF) olarak adlandırılır (Tong ve Tang, 1997). Pratikte, güç kontrollü ısıtma durumunda, karşılaşılan bu olay sonucunda Şekil 1.3'te kesikli çizgilerle gösterilen bölge pasifize olur ve kaynama eğrisi kritik ısı akısından sonra sürekli çizgiyle gösterilen oku takip eder. Kaynamayla ilgili sistemlerin tasarımında temel amaçlardan biri, ani sıcaklık yükselmelerine ve sistemin çökmesine neden olan kritik ısı akısı değerini belirleyip, bu değer altıda çalışma aralıkları tanımlamaktır. C-D aralığı ise kısmi film kaynaması veya geçiş kaynaması olarak adlandırılır. Bu bölgede yüzey, dönüşümlü olarak sıvı veya buhar tabakası ile kaplanır ve bunun sonucu olarak yüzey sıcaklıklarında salınımlar meydana gelir (Tong ve Tang, 1997). Bu bölgede, artan kızma farkına rağmen ısı akısı, *Leidenfrost* noktası olarak da adlandırılan D noktasına kadar azalmaktadır. Bunun nedeni buharın ısı iletim katsayısının, sıvınınkinden düşük olmasıdır. D-E aralığında yüzey tamamen kararlı bir buhar filmiyle kaplanır. Bu nedenle bu bölge, kararlı film kaynaması olarak adlandırılır. Yüzey sıcaklığının daha fazla yükselmesi, ısıl taşınım etkisiyle, ısı akısında artışa sebep olmaktadır.

Konuyla ilgili çalışmalarda sistem tasarımı yapılırken veya çalışma aralıkları belirlenirken kritik ısı akısı değeri göz önüne alınmalıdır. CHF'nin oluşumu, ani sıcaklık

artışlarına ve sistemin çökmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, CHF'yi belirlemek ve ötelemek üzerine çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Kaynamalı akış olayındaki akış rejimleri ise akış etkilerinin de işin içine girmesi nedeniyle biraz daha karmaşık bir hal alır. Isıtılan düşey bir kanaldaki kaynamalı akış olayı ile ilgili olarak akış rejimleri ve akış desenleri Şekil 1.4.'te görülmektedir.



Şekil 1.4. Kaynamalı akıştaki ısı transfer bölgeleri (Collier ve Thome, 1994).

Sıvı, kanala başlangıçta aşırı soğuk olarak; bir başka ifade ile doyma sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta girmektedir. Şekil 1.4'te A bölgesi olarak gösterilen bu bölgede sadece tek fazlı sıvı bulunmakta olup, ısı transferi taşınım ile gerçekleşmektedir. Bu bölge

için duvar sıcaklığı akışkanın doyma sıcaklığının altındadır. Bu bölge boyunca, akışkan ve duvar sıcaklığı artar. B bölgesinde ise duvara yakın kısımlarda akışkan sıcaklığı doyma sıcaklığını geçer ve bu nedenle duvara yakın bölgelerde kabarcıklaşma odaklarında kabarcık oluşumu başlar. Bu durumda, iç bölgelerdeki akışkan sıcaklığı hala doyma sıcaklığına ulaşmamıştır. İlk buhar kabarcıkları, aşırı soğuk sıvı varken meydana gelir. B bölgesindeki ısı transfer mekanizması aşırı soğuk kabarcıklı kaynama olarak adlandırılır. Duvar sıcaklığı doyma sıcaklığının üzerindedir; fakat, akışkanın yığın sıcaklığı doyma sıcaklığına henüz erişmemiştir.

Şekil 1.4'te de görüldüğü üzere iki tane kritik nokta vardır. Bunlardan biri B bölgesinden C bölgesine geçişte yer alan, kuruluk derecesinin (x) sıfır olduğu noktadır. Bu nokta aşırı soğuk kabarcıklı kaynama bölgesinden doymuş kabarcıklı kaynama bölgesine geçişi ifade eder. Şekil 1.4'te sıvı merkez sıcaklık eğrisi olarak gösterilen eğriye dikkat edilirse, bu eğrinin akışkan sıcaklığı eğrisi ile tam olarak örtüşmediği görülür. Bu durum sıvıdaki radyal sıcaklık profilinin bir sonucu olarak meydana gelir. Çünkü radyal sıcaklık dağılımı, ortalama sıvı sıcaklığı doyma sıcaklığına erişmeden önce duvarda buhar oluşumu için şartların olgunlaşmasına imkan sağlar (Collier ve Thome, 1994). D bölgesinde ise etkin ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynama; görülen akış desenleri ise uzun kabarcıklı (*slug*) akış ve (kısmen) halkasal akıştır. Kanal boyunca kabarcık popülasyonu artmaktadır. C bölgesinden sonra, oluşan kabarcıklar birleşerek daha büyük buhar kabarcıklarını oluşturur. Buhar kabarcıkları arasında sıvının bulunduğu bu akış deseni uzun kabarcıklı akış olarak adlandırılır ve D bölgesinde etkindir. E bölgesine doğru duvardaki kabarcıklaşma odaklarında buhar kabarcığı oluşumu durabilir ve bundan sonraki buhar oluşumu sıvı film-buhar ara yüzeyindeki buharlaşmanın neticesinde meydana gelir. Kanal merkezinde buharın kümeleştiği, çevrede ise sıvının ince bir film şekline dönüştüğü akış deseni, halkasal akış olarak adlandırılır.

Buhar merkezinde artan hızlar, sıvının damlacıklar halinde sürüklenmesine neden olur (F Bölgesi). Kabarcıklaşma tamamen bittiği için ısı transferi iki fazlı zorlanmış taşınım ve buharlaşma şeklinde olur. Sıvının film tabakasından sürüklenme ve buharlaşma şeklinde azalması en sonunda filmin tamamen kurummasına neden olur. Bu nokta kuruma noktası olarak adlandırılır (Tong ve Tang, 1997). Kuruma noktasından sonra buhar içerisinde sıvının damlacıklar halinde bulunduğu damlacıklı (veya sisli/*mist*) akış bölgesi gelmektedir (G bölgesi). Sıvı miktarı gittikçe azalmaktadır.

İkinci kritik nokta ise  $x = 1$  noktasıdır. Bu nokta teorik olarak buharlaşmanın sonlandığı noktayı ifade etmektedir. Burada da yine radyal sıcaklık nedeniyle buhar içerisindeki sıvı damlacıklar  $x = 1$  noktasından sonra da bir süre daha devam eder. Kuruluk derecesinin 0 ile 1 değeri arasındaki bölgelerde, özellikle makro düzeyde, ısı transfer mekanizmasını karakterize eden değişken kuruluk derecesidir (Collier ve Thome, 1994). En son bölge ise artık sıvının hiç olmadığı, sadece buharın yer aldığı, buharlaşmanın tamamen sonlandığı H bölgesi olup; bu bölgedeki ısı transfer mekanizması taşınımdır.

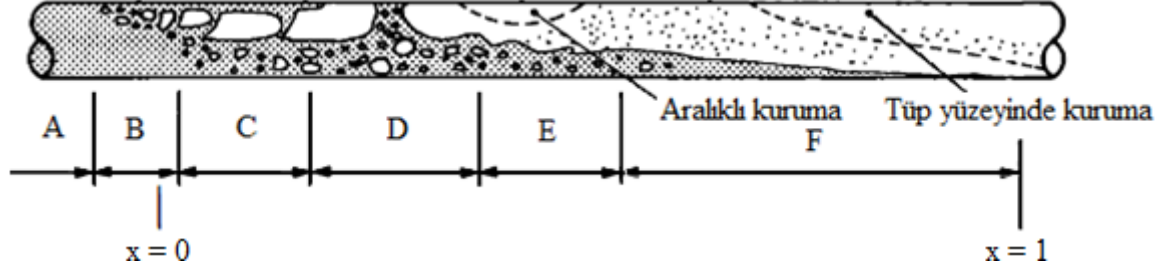
### 1.2.3. Akış Desenleri

İki fazlı akışlarda, buhar/gaz ve sıvı fazının birbirine göre farklı konfigürasyonlardaki dağılımları akış deseni olarak adlandırılır. Akış desenleri sıvı ve gazın karıştırılarak bir kanala gönderilmesi ile ısıtılmayan kanallarda veya kanal duvarlarının ısıtılması sonucunda kaynamalı akış şeklinde, ısıtılan kanallarda meydana gelebilir. Bu bölümde kısaca duvarları ısıtılan yatay bir kanaldaki akış desenleri üzerinde durulmuştur.

Değişik akış desenleri, ısıtılan duvar yakınında hidrodinamik koşullar üzerinde farklı etkiler oluştururlar. Böylece, farklı sürtünme basınç düşümleri, farklı ısı transfer türleri ve kaynama krizlerine neden olurlar. Bu nedenle akış deseni geçişlerini belirleme ve modelleme önemlidir (Tong ve Tang, 1997). Literatürde, faz hızları gibi önemli karakteristik parametreleri kullanarak farklı akış desenlerini belirlemeye yarayan ve akış deseni haritası olarak adlandırılan grafikler mevcuttur.

Şekil 1.5'te duvarları ısıtılan yatay bir kanalda meydana gelen akış desenleri görülmektedir. A bölgesi ile ifade edilen kısım tek fazlı sıvı bölgesidir. B bölgesi ise kabarcıklı akışı (*bubbly flow*) ifade etmektedir. Kabarcıklı akış, yüzeyde oluşarak ayrılan küçük kabarcıklar ile karakterize edilir. Oluşan bu kabarcıklar birleşerek tapa akışını (*plug flow*) oluştururlar (C bölgesi). Bu ismin kullanılmasının nedeni kabarcıkların uç kısımlarının şeklidir. Kabarcıkların daha fazla büyümesi sonucunda D bölgesi ile gösterilen uzun kabarcıklı akış meydana gelir. Buhar hızı arttıkça akış dalgalı bir hal alır ve akış deseni dalgalı akış olarak adlandırılır (E bölgesi). Buhar hızları gittikçe artar ve kenarlarda sıvı; ortada ise buharın bulunduğu F bölgesi ile gösterilen halkasal akış meydana gelir. Daha sonraki bölümlerde sıvı filmi gittikçe incelerek kaybolur ve tek fazlı buhar bölgesi oluşur.





Şekil 1.5. Isıtılan yatay dairesel bir kanalda iki faz akış desenleri (Collier ve Thome, 1994).

Şekil 1.4'te ısıtılan düşey bir kanaldaki akış desenleri verilmişti. Yatay ve düşey kanallardaki akış desenleri birbirine benzer görünse de farklılıklar söz konusudur. Aralarındaki fark ise yer çekimi kuvveti etkilerinden kaynaklanan faz asimetrisidir (Collier ve Thome, 1994). Konvansiyonel bir kanaldaki akış desenlerinin şematik gösterimine karşılık gelen Şekil 1.5 incelendiğinde, oluşan kabarcıkların üst yüzeye yakın bölgelerde kümeleştiği görülmektedir. Ancak mikro boyutlara inildikçe ( $\approx < 200 \mu\text{m}$ ) yer çekimi kuvveti etkisinin azalması nedeniyle akış desenlerindeki bu katmanlaşmanın ortadan kalkıp, kanal içerisinde simetrik bir akış deseni dağılımı görülmesi beklenen bir sonuçtur (Tibiriça, 2011; Tibiriça ve Ribatski, 2014; Kandlikar, 2010a).

Yukarıda tanımlanan akış desenleri genel kabul görmeye birlikte kesin yargılar içermeyip keyfi tanımlamalara açıktır. Akış koşullarına, kanalın boyutuna ve diğer deneysel çalışma şartlarına göre farklı akış desenleri görülebilmektedir. Araştırmacılar tarafından özgün olarak elde edilen yeni görüntüler farklı isimlerle ifade edilebilmektedir. Örneğin Harirchian ve Garimella (2009c), her biri  $400 \mu\text{m}$  derinliğinde (yüksekliğinde) olan genişlikleri ise  $100$  ile  $5850 \mu\text{m}$  arasında değişen kanallara sahip altı farklı ısı alıcıda yaptıkları çalışmada, genel olarak beş farklı akış deseni tanımlamıştır: Kabarcıklı akış, uzun kabarcıklı akış, çalkantılı akış (*churn flow*), iplikçikli-halkasal akış (*wispy-annular flow*) ve halkasal akış (*annular flow*). Elde ettikleri sonuçlara göre kabarcıklı akış,  $250 \mu\text{m}$  genişliğe sahip kanalda,  $400 \mu\text{m}$  ve daha geniş kanallara göre oldukça azalmakta;  $100 \mu\text{m}$  genişliğindeki kanalda ise kabarcıklı akış tamamen bastırılmakta ve direkt uzun kabarcıklı akış, devamında ise çalkantılı/halkasal akış meydana gelmektedir. Ayrıca, her çalışmada belli bir akış deseni sırasından bahsedilmesi oldukça zordur. Kanal boyutu, ısı akışı ve kütle akışı gibi farklı çalışma parametrelerine bağlı olarak kabarcık oluşumu hızlanabilmektedir. Kabarcık gelişim süreci ve akış deseni geçişleri, yapılan çalışmalarda kullanılan yüksek hızlı kameraların çekim sayısına ve objektiflerin türüne bağlı olarak görüntülenmektedir. Bu nedenle, milisaniye veya milisaniyenin de altındaki zaman

periyotlarında gerçekleşen değişimler (eğer varsa) yakalanamayabilir. Bu durum da yanıltıcı yorumların yapılmasına neden olabilir.

#### **1.2.4. İki Faz Akış Kararsızlıkları**

Kaynamalı bir akışta herhangi bir pertürbasyon meydana geldiği zaman yeni çalışma koşulları asimptotik olarak başlangıç koşullarına gitme eğiliminde ise akış, kararlı; farklı bir koşula geçiş söz konusu ise kararsız olarak adlandırılır (Tadrist, 2007; Kakaç ve Bon, 2008). Akış kararsızlığı, hidrodinamik ve termodinamik yapının birleşimi bir olaydır ve kaynamalı akışlarda ortaya çıkan yüksek momentum değişimi nedeniyle oluşur (Tong ve Tang, 1997). İki akışkan (bir akışkanın farklı fazları) bir ara yüz aracılığıyla temas halinde olduğu zaman; atalet, kayma ve kılcallık gibi fiziksel etkiler kararsızlığa neden olabilmektedir (Tadrist, 2007).

Akış kararsızlıkları debi, basınç ve sıcaklık değerlerinde ani ve kimi zaman kontrol edilemeyecek düzeylerde değişimlere neden olur. Bu değişimler nedeniyle, sistemde mekanik titreşimler, kısmi kuruma, akustik ses ve yapısal bozulma, sistem kontrolünde problemler, ısı yorulma, güvenlik sorunları (nükleer sistemlerde radyoaktif maddelerin salınımı vb.) ve ısı transfer katsayılarında azalma meydana gelebilmektedir. Devam eden salınımlar, etki düzeylerine göre, CHF'nin daha erken meydana gelmesine ve böylece ısı transferinin kötüleşmesine, yüzeyde ani ve şiddetli sıcaklık yükselmelerine neden olarak, sistemin çökmesine yol açabilir (Maulbetsch ve Griffith, 1966; Tong ve Tang, 1997; Ozawa vd., 2001; Bergles vd., 2003; Xu vd., 2005; Kakaç ve Bond, 2008; Zhang vd., 2009; Kuo ve Peles, 2009; Zhang vd., 2010; Gepudi vd., 2011; Bogojevic vd., 2013; Qian vd., 2014). Bu durum, cihaz tasarımlarında ve çalışma aralıklarında sınırlandırmalara ve ısı performansını daha düşük sistemlerin elde edilmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı, akış kararsızlıklarını önlemek, ertelemek veya en azından şiddetini azaltmak için gerekli tedbirler alınmalıdır.

İki faz akış kararsızlıkları; soğutma sistemleri, turbo makineler, su kaynamalı reaktörler, ısı değiştiricileri, buhar jeneratörleri ve termosifonlar gibi endüstriyel sistemlerde ortaya çıkabilmektedir (Kakaç ve Cao, 2009; Kakaç ve Bond, 2008). Yirminci yüzyılın başından itibaren kullanılmakta olan bu tür endüstriyel sistemlerde ortaya çıkan sorunlar, araştırmacıları makro ölçekli kanallarda kaynamalı akış kararsızlıklarını incelemeye yöneltmiştir. Konuyla ilgili ilk sistematik çalışma Ledinegg (1938) tarafından

yapılmıştır (Tadrist, 2007). Diğer öncü çalışmalara örnek olarak; Stennig (1962), Maulbetsch ve Griffith (1965), Yadigaroglu ve Bergles (1969 ve 1972) verilebilir. Son dönemlerde ise makro ölçekli kanallarda kaynama kararsızlıklarına yönelik Kakaç ve Bon (2008) ve Kakaç ve Cao (2009) tarafından derleme çalışmaları yapılmıştır.

İlk çalışmalar, kararsızlık türlerinin tanımlanması ve kategorize edilmesi açısından önemli olup, genellikle makro ölçekli tek kanallara yöneliktir. Stenning (1964) ve Stenning ve Veziroglu (1965) üç ayrı iki faz akış kararsızlık türü tanımlamışlardır. Bunlar; yoğunluk dalga tipi salınım, basınç düşümü tipi salınım ve ısıl salınımlardır (Kakaç ve Bon, 2008). Bergles vd. (1967) ve Thurston vd. (1967) ise akustik salınımların varlığını göstermiştir (Tadrist, 2007). Belirtilen kararsızlık türlerine ek olarak, paralel kanallardan oluşan sistemlerde, kanalların girişte ve çıkışta ortak kolektörlere bağlı olmasından dolayı paralel kanal kararsızlıkları da meydana gelebilmektedir (Stenning, 1964). Boure vd. (1973) ise akış kararsızlıklarını statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayırmıştır. Bunları da kendi arasında basit ve bileşik olarak ikiye ayırarak bu konuda temel bir çalışma yapmışlardır (Tadrist, 2007). Yukarıda belirtilen beş farklı kararsızlık türü dinamik kararsızlık grubuna girmektedir. Temel statik kararsızlık türleri ise Ledinegg kararsızlığı, kaynama krizi ve akış deseni geçiş kararsızlığı olarak adlandırılmaktadır (Kakaç ve Bon, 2008).

Yoğunluk dalga tipi salınımlar endüstride en çok karşılaşılan dinamik kararsızlık türü olup, kinematik dalga yayılım olayı ile ilgilidir. Bu tür kararsızlığın periyodu bir yoğunluk dalgasının sistem boyunca gezinmesi için gerekli olan süreye eşit olduğu için yoğunluk dalga tipi salınım olarak adlandırılır (Ding vd., 1995). Debi, buhar üretim hızı/miktarı ve basınç düşümü arasındaki çoklu geri beslemeler nedeniyle meydana gelirler. Girişte meydana gelen akış çalkantıları, tek fazlı bölgede entalpi pertürbasyonlarına neden olur. Entalpi pertürbasyonları kaynama sınırına ulaştığı zaman, boşluk oranı pertürbasyonlarına dönüşür. Boşluk oranı pertürbasyonları kanal boyunca akışla hareket eder ve iki fazlı bölgede dinamik basınç düşümü salınımı oluşturur. Bu iki faz basınç pertürbasyonu tek fazlı bölgede ters işaretli bir pertürbasyon oluşturur. Bu nedenle giriş akışında değişimler meydana gelir (Yadigaroglu ve Bergles, 1969 ve 1972). Basınç düşümü salınımları ise, kanal boyunca olan basınç düşümü artan debi ile azaldığı zaman meydana gelir. Bu kararsızlık türünün frekansları, sistemin hacmi ve sıkıştırılabilirliği ile kontrol edilir ve yalnızca düşük çıkış kurulum dereceli bölgede meydana gelir. Bu bölgede, basınç düşümü debi karakteristiğinin eğimi negatiftir (Yadigaroglu ve Bergles, 1969). Isıl salınımlar ise ısıtma yüzeyi sıcaklığında meydana gelen yüksek çalkantılar ile karakterize edilir ve

yoğunluk dalga salınımları tarafından tetiklenir. Duvara bitişik sıvı filminin kararlı olup olmaması ile yakından ilgilidir. (Ding vd., 1995; Kakaç ve Bon, 2008). Akustik salınımlar ise film kaynaması, aşırı soğuk kaynama ve kroyojenik sistemler gibi durumlarda gözlemlenir. Bu kararsızlıklar, film kalınlığı değişimi ve kabarcık çökmesi tarafından tetiklenir ve basınçta değişime neden olur. Akustik salınımların genliği küçüktür ve frekansları genellikle 10 ile 100 Hz arasında değişir. Genlikleri düşük olduğu için çok önemli değildirler (Tadrist, 2007).

Mikro sistemlerde kaynamalı akışta performans düşüklüğünün en önemli nedeni olarak kaynama kararsızlıkları gösterilmektedir. Bu nedenle mikrokanallarda meydana gelen kaynama kararsızlıkları yaygın bir şekilde çalışılmaktadır. Bu konudaki öncü çalışmalar, Bergles vd. (2003), Qu ve Mudawar (2003a), Kandlikar (2004), Wu ve Cheng (2004), Xue vd. (2005) ve Bergles ve Kandlikar (2005) tarafından yapılmıştır.

Literatürde, mini ve mikrokanallarda beş farklı kaynamalı akış kararsızlığı türünün etkili olabildiğinden bahsedilmektedir (Kandlikar vd., 2013). Bunlar, hızlı kabarcık büyümesi, Ledinegg (*excursive*) kararsızlığı, paralel kanal kararsızlığı, giriş bölgesinde sıkıştırılabilir hacim kararsızlığı (*upstream compressible volume instability*) ve kritik ısı akışı koşuludur. Belirtilen kararsızlık türlerinden sadece hızlı kabarcık büyüme kararsızlığı mikrokanallara özgüdür. Bunun nedeni mikrokanallarda meydana gelen kabarcık sınırlandırılması olayıdır. İlgili kararsızlık türleri aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

#### **1.2.4.1. Hızlı Kabarcık Büyüme Kararsızlığı**

Hızlı kabarcık büyüme kararsızlığı, mikrokanallarda kanal boyutlarının küçük olması nedeniyle kabarcığın çok kısa bir zamanda kanal boyutlarına erişmesi ve beraberinde her iki doğrultuda uzamaya başlamasını ifade etmektedir. Ters akışa neden olmaktadır ve mikrokanallara özgü bir kararsızlık türüdür (Koşar vd., 2006; Kuo ve Peles, 2009). Sistemde kullanılan pompa çıkış basıncının artırılması ters akışı önleyerek veya erteleyerek bu tür bir kararsızlığı bastırmak için kullanılabilir.

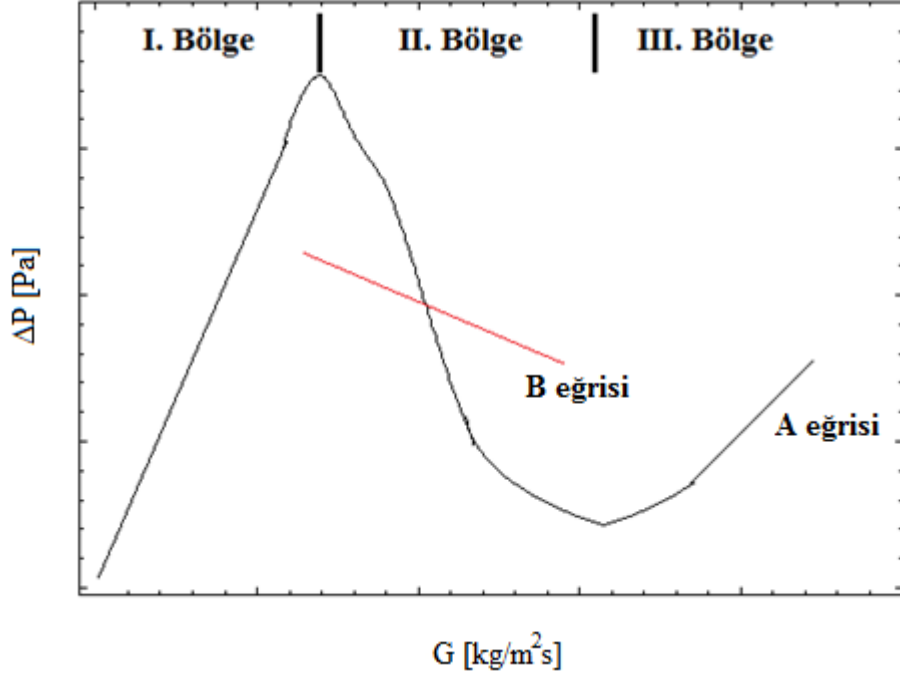
#### 1.2.4.2. Paralel Kanal Kararsızlığı

Çok sayıdaki kanalın, giriş ve çıkışta ortak bir kolektöre bağlanması ile elde edilen paralel kanallı sistemlerde kanallar arasında meydana gelen geri besleme etkileri, iletken yüzeyle birbirinden ayrılan kanallar arasındaki ısıl etkiler ve üretimden kaynaklanan yüzey yapısı farklılıkları (yüzey pürüzlülüğü vb.) gibi nedenlerle meydana gelir. Kaynama sınırı, kanallar arasında farklı konumlarda salınır ve debi, basınç ve sıcaklık değerlerinde düşük genlikli ve geliş güzel salınımlar meydana gelir (Qu ve Mudawar, 2004). Koşar vd. (2006) her bir kanalın girişinde sınırlandırıcı kullanarak paralel kanal kararsızlığının etkisini azaltmıştır.

#### 1.2.4.3. Ledinegg (Akış Gezinti) Kararsızlığı

Bir kanalda gerçekleşen kaynamalı akış olayında, basınç düşümünün kütle akısıyla değişim eğrisinin eğimi, pompa veya basınçlı tanklar vasıtasıyla dışarıdan sisteme sağlanan eğrinin eğiminden (basınç düşümü-kütle akısı arz eğrisi) cebirsel olarak daha küçük ise (negatif eğimli bölgede) sistem Ledinegg kararsızlığına maruz kalabilir (Zhang vd., 2009; Koşar vd., 2006). Konuyu daha net ifade etmek için Şekil 1.6'da genel bir basınç düşümü-kütle akısı eğrisi verilmiştir. Bu eğri üç farklı bölgeye ayrılmıştır. A eğrisi talep; B ise pompanın arz eğrisini ifade etmektedir. İkinci bölgede arz eğrisinin eğimi negatif ve talep eğrisinin eğiminden daha az ise Ledinegg kararsızlığı meydana gelir. Sistem kararsız durumdan kurtulmak için ya birinci ya da üçüncü bölgeye geçiş yapar. Bu nedenle, bu tür kararsızlık, akış gezinti kararsızlığı olarak da adlandırılmaktadır.

Ledinegg kararsızlığı, sabit yer değiştirmeli pompa kullanılarak önlenir. Çünkü bu tür pompalar için arz eğrisi neredeyse sonsuz eğime sahiptir. Bir diğer yöntem ise kanalın girişinde kısma valfi kullanarak talep eğrisinin negatif eğimini azaltmaktır. Birinci ve üçüncü bölgelerde Ledinegg kararsızlığının olma ihtimali yoktur (Zhang vd., 2009). Ledinegg kararsızlığı statik bir kararsızlık türüdür.



Şekil 1.6. Ledinegg kararsızlığı için  $\Delta P$ - $G$  değişiminin genel gösterimi.

#### 1.2.4.4. Giriş Bölgesinde Sıkıştırılabilir Hacim Kararsızlığı

Giriş bölgesindeki sıkıştırılabilir hacim, sürüklenen bir hava kabarcığı, esnek bir hortum (Bergles ve Kandlikar, 2005) veya uzun kanallarda ( $L/D > 150$ ) kendiliğinden oluşabilir. Sıkıştırılabilir hacim ve iki fazlı karışım arasındaki etkileşim yüksek genlikli basınç, kütle akısı ve duvar sıcaklığı salınımlarına neden olur (Ding vd., 1995).  $L/D$  oranı yüksek olan mikrokanallarda bu tür kararsızlığın meydana gelme olasılığı yüksektir.

Qu ve Mudawar (2004) tarafından belirtilen şiddetli basınç düşümü salınımı sıkıştırılabilir hacmin neden olduğu kararsızlık türüdür. Bu salınım oldukça periyodiktir, hem giriş ve çıkış basıncında hem de ısı alıcı sıcaklıklarında yüksek genlikli çalkantılara neden olur ve kanal girişine bir kısma valfi koyularak tamamen önlenebilir (Qu ve Mudawar, 2004).

#### 1.2.4.5. Kritik Isı Akısı Koşulu

Kritik ısı akısı koşulu, Koşar vd. (2006), Kuo ve Peles (2009) ve Kandlikar vd. (2013) gibi çalışmalarda kararsızlık türleri arasında gösterilmektedir. Kritik ısı akısı koşulu, erişilen bir pik ısı akısı değerini ve bu değerden sonra ısı transfer katsayısındaki ani

düşüşü dolayısıyla ısı transferindeki kötüleşmeyi ve bunun sonucunda da yüzeyde kontrolsüz sıcaklık artışlarını ve sistemin çökmesini ifade etmektedir. Aslında, kritik ısı akısı koşulu, diğer kararsızlık türlerinin bir sonucu ve çalışma koşulları açısından gelinmek istenmeyen sınır koşulu olarak tanımlanıp, akış kararsızlığı türlerinin dışında değerlendirilebilir.

Yukarıda açıklanan kararsızlık türleri, literatürde genel olarak kabul gören başlıca kaynamalı akış kararsızlıklarıdır. Ancak bazı araştırmacılar tarafından spesifik kararsızlık türlerinin tanımlandığı görülmektedir. Wang vd. (1996) düşey olarak konumlandırılmış tek bir makro kanalda zorlanmış taşınımlı kaynamada, kaynama başlangıç salınımları (*boiling onset oscillations*) olarak adlandırdıkları yeni bir dinamik kararsızlık türü gözlemlemiştir. Bu yeni tip salınımın iş akışkanının (su) kaynama noktası başlangıcında meydana geldiğini, hem basınç düşümü salınımı hem de yoğunluk dalga salınımindan daha büyük genliğe ve daha uzun periyoda sahip olduğunu belirtmişlerdir. Wu ve Cheng (2004) mikrokanallardaki akış kararsızlıklarını üç farklı başlık altında gruplandırmıştır. Bunlar; düşük ısı akısı ve yüksek kütle akısında sıvı/iki faz değişmeli akış, sürekli iki fazlı akış (orta ısı akısı ve orta kütle akısında) ve sıvı/iki fazlı/buhar değişmeli akış (yüksek ısı akısı ve düşük kütle akısında)'dır. Xu vd. (2005) mikrokanallarda görülen salınımları periyot ve genliklerine göre sınıflandırmıştır. Bunlar; yüksek genlikli/uzun periyotlu salınım, düşük genlikli/kısa periyotlu salınım ve ısıl salınımdır.

Kaynamalı akışlarda meydana gelen kararsızlıkların birbiriyle ilişkili olduğu söylenebilir. Ya biri diğerini tetikler ya da biri diğerinin devamı niteliğindedir. Kaynamalı akışlarda ısı transferi açısından sıvının kanal yüzeyi ile temasının kesilmemesi istenir. Bu nedenle, kanalların sürekli olarak sıvı döngüsüyle beslenmesi gerekmektedir. Ancak, kaynamanın doğal bir sonucu olarak kanal içerisinde buhar oluşumu meydana gelir. Kabarcık sınırlanmasına neden olan boyutlardaki kanallarda oluşan buhar kabarcıkları birleşerek her iki doğrultuda genişler. Buhar öbeğinin, giriş doğrultusunda genişlemesi kanallardaki akış direncini artırır ve kanal içerisine sıvı girmemesi yönünde bir baskı oluşturur. Bu durum kanalların sıvı ile yeterince beslenmesini engeller ve kanal içerisindeki mevcut akışkanın kısa sürede tamamen buhar fazına dönüşmesine neden olarak kurumaya ve beraberinde kritik ısı akısı oluşumuna sebep olur. Kanal içerisinde iki fazlı karışımın oluşmasından itibaren sıvı ve buhar ara yüzlerinde ve dolayısıyla kanal içerisinde basınç salınımları meydana gelmeye başlar. Meydana gelen basınç salınımları da ısı transferiyle bağlantılı olarak sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkilemekte ve erken

CHF oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Kanal boyutlarının küçülmesiyle bahsedilen proseslerin daha erken ve etkin bir şekilde gerçekleşmesi, kararsızlık olasılığını arttırmaktadır.

### 1.3. Makro Ölçekten Mikro Ölçeğe Geçiş

Mikro ve mini ölçekli sistemlerdeki kaynama, makro ölçekli sistemlerdekine göre farklılıklar göstermektedir. Bu değişikliklerin temelinde, geometrik kısıtlamalar ile akışkanın saflığı ve yüzey pürüzlülüğünün, özellikle mikro ölçekli sistemlerde, sistem boyutlarıyla kıyaslanabilir değerlere gelmesi yatmaktadır. Kanal boyutları küçüldükçe, herhangi bir kabarcıklaşma odağında oluşan kabarcık, akış pasajı içerisinde sınırlanabilir ve gelişmeden hem akış doğrultusunda hem de akışa ters doğrultuda uzayabilir. Kabarcığın yüzeyden ayrılma durumu bu sınırlamadan etkilenebilir. Yüzey gerilmesinin etkisi artar ve yer çekimi kuvveti etkisi azalır. İki faz akış desenleri, ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinde değişimler meydana gelebilir. Kaynama kararsızlıkları tetiklenerek kritik ısı akısının erken oluşmasına neden olabilir. Makro ölçekten mikro ölçeğe geçişte meydana gelen değişimler, konuyla ilgili olarak literatürde yer alan çalışmalarda ifade edilmiş ve bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

Vandervort vd. (1992) ve Wang ve Peng (1994) mikrokanallarda aşırı soğuk kaynamada duvar yakınındaki sıcaklık ve hız gradyanlarının, makro kanallara kıyasla çok daha yüksek olabileceğini ve aşırı soğuk kaynama ve doymuş kaynama esnasında oluşan kabarcıkların çok daha küçük olabileceğini belirtmişlerdir (Chedester ve Ghiaasiaan, 2002). Qu ve Mudawar (2003b) makro kanallardan farklı olarak mikrokanallarda ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığını belirtmiştir. Thome (2006) mikrokanallardaki iki faz akış desenlerinin makro kanallardakinden farklı olduğunu ve makro yaklaşımla mikrokanallardaki kaynamalı akışta ısı transfer katsayılarının sağlıklı bir şekilde belirlenemeyeceğini ifade etmiştir. Benzer bir şekilde, Balasubramanian vd. (2013) makro kanallara yönelik geliştirilen ısı transfer katsayısı ve basınç düşümü modellerinin mikrokanallarda kaynamalı akış için kullanılmasının hatalı olacağını belirtmiş ve bunun nedenini, azalan kanal boyutlarıyla birlikte yer çekimi kuvvetinin zayıflaması ve yüzey gerilme kuvvetinin artması sonucu fiziksel mekanizmanın büyük oranda değişmesi olarak açıklamıştır. Kandlikar (2002) mikrokanallarda pompalama güç gereksiniminin daha yüksek olduğunu ve yüzey gerilmesinin daha etkin olduğunu belirtmiştir. Steinke ve



Kandlikar (2004) ise mikrokanalda meydana gelen yüksek basınç düşümünün yerel doyma sıcaklığının kanal boyunca değişmesine neden olduğunu ifade etmiştir. Benzer bir şekilde, Lee ve Mudawar (2005b) mikrokanallardaki yüksek basınç düşümünün elektronik sistemlerde istenmeyen bir durum olan güç tüketimindeki artışa neden olduğunu, mikrokanallardaki akışın neredeyse sürekli laminer olduğunu ve ısı transfer katsayısının makro kanallardakinden farklı eğilimler gösterdiğini belirtmiştir. Kandlikar (2010a) skala analizini kullanarak makro ölçekten mikro ölçeğe geçişte viskoz ve yüzey gerilme kuvvetlerinin etkisinin arttığını; kaldırma kuvvetlerinin etkisinin ise azaldığını belirtmiştir. Ong ve Thome (2011a) da benzer şekilde, kanal sınırlaması arttığı zaman yüzey gerilmesinin arttığını bunun sonucunda da yer çekimi kuvvetlerinin etkisinin azaldığını belirtmiştir.

Özellikle son on yıldır mikrokanallar üzerine yapılan çalışmaların yoğunlaşmasına rağmen, henüz mikrokanal kavramını tanımlayacak evrensel bir ifade oluşmamıştır. Kanal boyutları veya kabarcık sınırlanmasına dayalı çeşitli parametreler üzerinden farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Bu karmaşa, özellikle mini ve mikro kelimelerinin farklı anlamlarda kullanılmasına neden olmaktadır. Bu durum da, bazı çalışmalarda kullanılan mikrokanal ifadesinin farklı araştırmacılar tarafından mini kanal kategorisinde değerlendirilmesine neden olabilmektedir. Farklı ölçekler arasındaki geçişlerle ilgili kanal boyutlarına dayalı fiziksel sınıflandırmalardan en yaygın olanları Mehendale vd. (2000), Kandlikar ve Grande (2002) ve Kandlikar (2002) tarafından yapılmıştır. Bu sınıflandırmalar Tablo 1.1’de verilmiştir. Kandlikar ve Grande (2002) ayrıca mikro ile nano ölçek arasındaki geçiş için de aralık vermiştir ve yaptıkları sınıflandırma kriteri; temelde gazların yaklaşık 1 atm basınçtaki seyrelme etkisine dayanmaktadır (Kandlikar, 2004). Bunlara ek olarak, Qu ve Mudawar (2003b) 10 µm ile 1 mm arasında hidrolik çapa sahip kanalları mikrokanal olarak tanımlarken, Yarin vd. (2009) bu aralığı 5 ile 500 µm olarak kabul etmiştir.

Tablo 1.1. Kanalların fiziksel olarak sınıflandırılması

Mehendale vd. (2000)		Kandlikar ve Grande (2002) ve Kandlikar (2002)	
Mikrokanallar	$1 \mu\text{m} \leq D_h \leq 100 \mu\text{m}$	Konvansiyonel kanallar	$D_h > 3 \text{ mm}$
Mezo kanallar	$100 \mu\text{m} < D_h \leq 1 \text{ mm}$	Mini kanallar	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \mu\text{m}$
Kompakt kanallar	$1 \text{ mm} < D_h \leq 6 \text{ mm}$	Mikrokanallar	$200 \mu\text{m} \geq D_h > 10 \mu\text{m}$
Konvansiyonel kanallar	$D_h > 6 \text{ mm}$		

Fiziksel sınıflandırmanın yanı sıra yukarıda belirtilen değişimleri göz önüne alarak kabarcık sınırlanması ve bunun neden olduğu termo-fiziksel değişimlere dayalı olarak çeşitli boyutsuz parametreler tanımlanmak suretiyle de sınıflandırmalar yapılmıştır.

Kew ve Cornwell (1997) farklı boyutlar arasındaki geçişi ifade etmek için sınırlama sayısı (*confinement number*,  $Co$ ) olarak adlandırılan bir boyutsuz parametre tanımlamıştır.

$$Co = \frac{1}{D_h} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}} \quad (1.19)$$

Burada  $\sigma$  yüzey gerilmesi,  $\rho$  yoğunluk,  $g$  yer çekimi ivmesi olup;  $L$  ve  $v$  alt indisleri ise sırasıyla sıvı ve buhar fazlarını ifade etmektedir. Makrodan mikroya geçiş için sınır değerini  $Co = 0.5$  olarak belirlemiştir.  $Co > 0.5$  mikro ölçeği ifade etmektedir.

Brauner ve Ullmann (2006) ve Li ve Wang (2003) tarafından da boyut sınıflandırmasıyla ilgili ifadeler geliştirilmiştir (Ong ve Thome, 2011a). Brauner ve Ullmann (2006) kaldırma kuvvetlerinin yüzey gerilme kuvvetlerine oranını ifade eden Eötvös sayısını kullanarak sınıflandırma yapmıştır. Eötvös sayısının yaklaşık olarak 0.2'ye eşit olduğu değer mikrokannallar için eşik değeri ifade etmektedir (Ong ve Thome, 2011a).

$$Eö = \frac{g(\rho_L - \rho_v)D^2}{8\sigma} \quad (1.20)$$

Li ve Wang (2003) akış üzerinde yer çekimi kuvveti etkisini çalışmış ve boyut sınıflandırması için kılcallık uzunluğu ( $L_{cap}$ ) olarak ifade ettikleri boyutsuz bir parametre tanımlamıştır.

$$L_{cap} = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}} \quad (1.21)$$

Literatürdeki makro, mezo veya mini ve mikro tanımlamalarına karşılık gelecek şekilde üç ayrı bölge oluşturmuşlardır. Kanal çapı olarak dairesel bir kanalın iç çapını ( $D$ ) ele almışlar ve sınıflandırma için kritik çap değeri ( $D_{crit} = 0.224L_{cap}$ ) ve eşik çap değeri ( $D_{th} = 1.75L_{cap}$ ) üzerinden değerlendirme yapmışlardır.  $D < D_{crit}$  olduğu durum için yüzey gerilme kuvvetlerinin etkin olduğunu,  $D_{crit} < D < D_{th}$  aralığında yüzey gerilme kuvvetleri

ile yer çekimi kuvvetlerinin birbirini dengelediğini,  $D_{th} < D$  durumu için ise yer çekimi kuvvetlerinin baskın olduğunu belirtmişlerdir. Bütün aralıklara karşılık gelen  $Co$  sayıları diğer sınıflandırmalardakinden farklıdır.

Ong ve Thome (2011a) yaptıkları çalışmada  $Co < 0.3 - 0.4$  için makro ölçeği;  $0.3-0.4 < Co < 1$  için mezo/mini ölçeği ve  $Co > 1$  için ise mikro ölçeği tanımlamıştır.

Görüldüğü üzere, birbirinden tamamen farklı tanımlamalar söz konusudur. Bu nedenle, boyut sınıflandırması hala açık bir konudur ve yapılan her çalışmada farklı eşik değerler ortaya çıkmaktadır.

Bu tez kapsamında mikrokanallı ısı alıcıların tasarımı aşamasında, boyut sınıflandırması olarak; Kandlikar ve Grande (2002) tarafından ifade edilen sınıflandırma esaslarına bağlı kalınmaya çalışılmıştır. Kullanılan kanalların geometrik ölçüleri, literatürde mikro başlık altında verilen birçok çalışmadakine kıyasla oldukça küçüktür. Ancak, daha önce de belirtildiği üzere boyut sınıflandırması kesin hükümler içerebilecek bir kavram değildir.

#### **1.4. Mikrokanallarda Kaynamalı Akıştaki Önemli Boyutsuz Sayılar**

Kaynamalı akışta, makro boyutlardan mikro boyutlara inildikçe akışa etki eden kuvvetlerde ve/veya bu kuvvetlerin etki düzeylerinde değişimler meydana gelmektedir. Genel olarak, viskoz ve yüzey gerilme kuvvetlerinin etkisi artarken yer çekimi (kaldırma) kuvvetlerinin etkisi azalır ve kanal boyutuna bağlı olarak ihmal edilebilecek seviyeye gelir. Kandlikar (2004) mikrokanallarda kaynamalı akış prosesinde etkili olan kuvvetlerin; atalet kuvveti, viskoz kuvvet, yüzey gerilme kuvveti ve buharlaşma momentum kuvveti olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, kanal boyutları küçüldükçe kabarcıklaşmanın başlaması için gerekli olan kızma farkı da artar (Yen vd., 2003; Kandlikar, 2004; Wang ve Wang, 2014). Kanal boyutuna bağlı olarak gerçekleşen değişikliklerden bir önceki bölümde de bahsedilmişti. Sonuç itibariyle mikrokanallarda kaynamalı akışta farklı bir yapı söz konusudur. Bu nedenle mikrokanallarda kaynamalı akış süreci ile ilgili olarak, yüzey gerilmesi, atalet kuvveti ve viskoz kuvvetler gibi farklı kuvvetleri ifade eden parametreleri ve bunların birbiriyle olan ilişkilerini kapsayan boyutsuz sayılar önem kazanmaktadır. Bu sayılardan literatürde yaygın olanları Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2. Mikrokanallarda kaynamalı akıştaki önemli boyutsuz sayılar

Boyutsuz sayı	Fiziksel anlamı
Kaynama sayısı ( <i>boiling number, Bo</i> ) $Bo = \frac{q''}{Gi_{Lv}}$	Boyutsuz ısı akısıdır. Isı akısının kütle akısı ve buharlaşma gizli ısısına bölümünden elde edilir.
Weber sayısı ( <i>We</i> ) $We = \frac{D_h G^2}{\rho \sigma}$	Atalet kuvvetlerinin yüzey gerilme kuvvetlerine oranıdır.
Reynolds sayısı ( <i>Re</i> ) $Re = \frac{GD_h}{\mu}$	Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır.
Kılcallık sayısı ( <i>capillary number, Ca</i> ) $Ca = \frac{\mu U}{\sigma}$	Viskoz kuvvetlerin yüzey gerilme kuvvetlerine oranıdır.

### 1.5. Literatür Araştırması

Mikrokanallarda kaynamalı akış üzerine yapılan çalışmaların büyük bir bölümü deneyseldir. Özellikle 2005 yılından sonra bu alanda, sayısal çalışmaların da yapılmaya başlandığı görülmektedir. Son birkaç yıldır, sayısal çalışma sayısında artış görülmesine rağmen; çoklu kabarcık oluşumunun eş zamanlı modellenmesi ve sıvı-buhar ara yüzündeki değişimlerin simülasyonu gibi konuların zorluğu nedeniyle mevcut sayısal çalışma sayısı az olup; güvenilirlikleri de sorgulanacak düzeydedir. Bu bölümde; literatürdeki çalışmalar, deneysel ve teorik olmak üzere iki farklı (ana) başlık altında gruplandırılmıştır. Tez kapsamı tamamen deneysel olduğu için ağırlıklı olarak deneysel çalışmaların üzerinde durulmuştur.

#### 1.5.1. Deneysel Çalışmalar

Kew ve Cornwell (1997), yüksek performanslı kompakt ısı değiştiricileri geliştirilebilmesi için, bu tür cihazların tasarımına yönelik teknik bilgi sunmak amacıyla bir

çalışma yapmıştır. Uzunlukları 500 mm olan ve çapları 1.39 ile 3.69 mm arasında değişen tüpler kullanarak yaptıkları deneylerde, R141b akışkanı için elde ettikleri basınç düşümü ölçümlerini ve kaynamada ısı transfer katsayısı değerlerini kullanarak literatürde mevcut olan ve kaynamada ısı transfer katsayısını tahmin etmek için geliştirilen bağıntıları değerlendirmişlerdir. Mevcut kaynamalı akışta ısı transfer bağıntılarının  $Co = 0.5$  veya daha büyük sınırlama sayısına sahip küçük çaplı kanallara uygulandığı zaman iyi sonuçlar vermediğini belirtmiş ve tek bir kanalda buharlaşan bir akışkan için ısı transfer katsayısını belirlemeye yönelik bir model geliştirmişlerdir. Bu modelin film buharlaşması ve kabarcıklı kaynamaya dayalı olduğunu ve aralıklı kuruma bölgesi hariç başarılı olduğunu göstermişlerdir.

Wongwises vd. (2000), düz yatay bir tüp içerisinde zorlanmış akış koşullarında HFC-134a'nın buharlaşması esnasında iki faz ısı transfer katsayısı karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Soğutucu içerisine %5 oranında polialkilen glikol yağı karıştırmış ve test bölgesi olarak ters akışlı iç içe çift borulu bir ısı değiştiricisi kullanmışlardır. Soğutucu akışkan içindeki tüpte, ısıtıcı akışkan olan su ise halkasal bölümde hareket etmektedir. Isı akışı, kütle akışı, buharlaşma basıncı ve makine yağının ısı transfer katsayıları üzerindeki etkilerini incelemiş ve deney sonuçlarını literatürde belirtilen bağıntılarla karşılaştırmışlardır. Pratik uygulamalar için, ısı transfer katsayısıyla ilgili yeni bağıntılar önermişlerdir.

Hestroni vd. (2002), ikizkenar üçgen kesite sahip 21 paralel mikrokanaldan oluşan bir ısı alıcıda Vertrel XF akışkanının kaynamalı akışı için kütle akışı ve buhar kuruluğunun ısı transferi üzerindeki etkilerini deneysel olarak çalışmıştır. Tek fazlı (akışkan olarak su) ve iki fazlı akışları, ısı uzaklaştırabilme kapasiteleri açısından karşılaştırmışlardır. İki fazlı akışta maksimum yüzey sıcaklığı farkı 4 - 5 K iken bu değeri tek fazlı su akışı için yaklaşık 20 K olarak bulmuşlardır. İki faz akış kararsızlıklarını tespit etmiş ve bunların ısı transfer katsayısında azalmaya ve basınç salınımlarına neden olduğunu belirtmişlerdir. Artan kütle akışı ve azalan kuruluk derecesinin ısı transferini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Qu ve Mudawar (2003a), yaptıkları deneysel çalışma ile 21 paralel mikrokanal içeren su soğutmalı iki fazlı mikrokanallı ısı alıcıda hidrodinamik kararsızlıkları ve basınç düşümünü incelemiştir. Paralel kanal kararsızlığı ve şiddetli basınç düşümü salınımı olmak üzere iki çeşit, iki fazlı hidrodinamik kararsızlık tanımlamışlardır. Kritik ısı akısının erken oluşmasına neden olan şiddetli basınç düşümü salınımının, kanalın giriş kısmında kısıtlama yapılarak basit bir şekilde önlenebileceğini belirtmişlerdir. İki faz basınç düşümünün

belirlenmesi için mikrokanal ısı alıcı tasarımına uygun olacak şekilde farklı yöntemler geliştirmişlerdir. Öncelikle makro, mini ve mikrokanallar için geliştirilen mevcut iki faz basınç düşümü bağıntılarını değerlendirmişlerdir. Bu bağıntıların yetersiz olduğunu belirterek; hem kanal boyutu hem de soğutucunun kütle akısının etkilerini içeren yeni bir bağıntı önermişlerdir. Ayrıca, iki faz basınç düşümünü belirlemek için alternatif olarak halkasal akış modelini geliştirmişlerdir.

Qu ve Mudawar (2003b), su soğutmalı mikrokanal ısı alıcıda doymuş kaynamalı akışta ısı transferini incelemiştir. Termodinamik kuruluk derecesinin sifıra yakın değerlerinde, aniden halkasal akışa geçiş olduğunu ve baskın ısı transfer mekanizmasının zorlanmış akışta kaynama olduğunu belirtmişlerdir. Makro kanal eğilimlerinin aksine, ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığını; bu eğilimin, halkasal akış rejimi gelişiminin başlangıcında kayda değer düzeyde damlacık sürüklenmesine ve çıkış tarafında damlacık birikmesi ile halkasal filmin kütleli debi miktarında artışına katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Literatürdeki ilgili bağıntıları değerlendirmiş ve bu bağıntıların kuruluk derecesi ile ısı transfer katsayısının değişimini doğru yakalayamadığını göstermişlerdir. Bunun nedeninin ise mikrokanallardaki kaynamalı akışın özgün yapısı ve su soğutmalı mikrokanal ısı alıcıların çalışma şartlarının, çoğu bağıntı için önerilen uygulama aralıklarının dışına düşmesi olduğunu ifade etmişlerdir.

Wu ve Cheng (2003), trapez kesitli paralel mikrokanallardan oluşan ısı alıcılarda suyun kaynamalı akışında, duvar ve akışkan sıcaklığının ve akışkan basıncı ile kütle akısının zamanla değişimini ölçmüştür. Çalkantı periyotlarının kanal boyutuna, ısı akısına ve kütle akısına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Yüksek genlikli-uzun periyotlu kaynama çalkantılarının, basınç düşümü ve kütle akısı çalkantıları faz farkına sahip olduğu zaman sürdürülebileceğini belirtmiş ve akış desenlerini görüntülemişlerdir.

Wu ve Cheng (2004), trapez kesitli paralel mikrokanallardan oluşan bir ısı alıcıda kaynamalı akış kararsızlıklarını incelemiştir. Akışkanın faz geçişlerine dayalı olarak üç farklı kararsızlık türü tanımlamışlardır. Duvar sıcaklığı, giriş ve çıkış su sıcaklıkları ve basınçlarının periyodik salınımları ile anlık kütle akısı ölçümü almışlardır. Salınım periyodunun ısı ve kütle akısına önemli derecede bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Steinke ve Kandlikar (2004), paralel mikrokanallı bir ısı alıcıda suyun kaynamalı akış karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Mikrokanallarda kaynamalı akış esnasındaki akış desenlerini görüntülemiş ve ters akışın hızlı kabarcık büyümesi nedeniyle

meydana geldiğini belirtmişlerdir. Kaynamalı akışta yerel ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığını göstermişlerdir.

Qu ve Mudawar (2004), iki fazlı paralel mikrokanallı ısı alıcılarda taşınımli kaynamayla ilgili karmaşık aktarım olayını anlamak amacıyla hidrodinamik kararsızlık, iki fazlı akış desenleri, basınç düşümü ve taşınımli kaynamada ısı transferini incelemiştir. Baskın akış desenlerini belirlemek ve hidrodinamik kararsızlıkları karakterize etmek için akışı görüntülemişlerdir. Mevcut basınç düşümü ve ısı transferi bağıntılarını deneysel sonuçlara göre değerlendirmiş ve mikrokanallar için uygun olmadıklarını belirtmişlerdir. Kaynamanın başlamasıyla meydana gelen, aniden uzun kabarcıklı akışa geçiş ve halkasal akışta yüksek miktarda sıvı sürüklenmesi olaylarının, mikrokanallara özgü olduğunu ve yeni tahmin yöntemlerine ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir.

Koşar vd. (2005), yan duvarları üzerinde 7.5  $\mu\text{m}$  çapında oyuklar bulunan ve 227  $\mu\text{m}$  hidrolik çapa sahip kanallarda suyun kaynamalı akışını deneysel olarak incelemiştir. Farklı ısı akısı ve kütle akıları için ortalama iki faz ısı transfer katsayısı ve CHF koşulları elde etmişlerdir. Kaynama sayısı ve Reynolds sayısının yüksek değerlerinin taşınımli kaynamayı arttırdığını göstermişlerdir. Düşük Reynolds ve kaynama sayılarında ise kabarcıklı kaynamanın baskın olduğunu belirtmişlerdir. Mevcut korelasyonların ısı transfer katsayılarını belirlemede çok başarılı olmadığını; fakat kritik ısı akısı şartlarını tahmin etmede iyi olduğunu ifade etmişlerdir.

Balasubramanian ve Kandlikar (2005), her biri 333  $\mu\text{m}$  hidrolik çapa sahip altı paralel dikdörtgen kesitli mini kanalda akış deseni, basınç düşüm salınımları ve akış kararsızlıklarını çalışmıştır. Basınç salınımlarını kaydetmiş ve baskın frekans ve genlikleri bulmak için sinyal analizi yapmışlardır. Basınç salınımlarını bunlara karşılık gelen akış desenleri için haritalandırmış ve yüksek sıcaklıklarda uzun kabarcıklı akışı baskın akış deseni olarak gözlemlemişlerdir.

Lee ve Mudawar (2005a), yaptıkları deneysel çalışma ile bir soğutma çevriminde buharlaştırıcı olarak kullanılan mikrokanal ısı alıcıda iki faz basınç düşümünü ölçmüştür. Mikrokanallar, bakır bir bloğun yüzeyine mikro işleme ile açılmıştır. Homojen denge akış modeli ve literatürdeki ayrık akış modelleri ile bağıntıların basınç düşümünü iyi bir şekilde belirleyemediğini ifade ederek; ayrık akış modelinin iki faz basınç düşümü çarpanında sıvı viskozitesi ve yüzey gerilmesini birleştiren yeni bir bağıntı önermişlerdir. Toplam basınç düşümünün genellikle artan kütle akısı veya ısı akısı ile arttığını, ancak mikrokanal içerisinde tamamen buhar fazı kaldığı zaman artış hızının azaldığını belirtmişlerdir.

Lee ve Mudawar (2005b), geniş bir kütle akısı aralığı için kuruluk derecesi ve ısı akısını kontrol ederek kaynamada ısı transfer katsayılarını belirlemiştir. Etkin ısı transfer mekanizmasının kuruluk derecesinin düşük, orta ve yüksek değerleriyle ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Kabarcıklı kaynamanın yalnızca düşük ısı akılarına karşılık gelen kuruluk derecelerinde ( $x < 0.05$ ) meydana geldiğini, yüksek ısı akılarının ise orta ( $0.05 < x < 0.55$ ) ve yüksek değerdeki ( $x > 0.55$ ) kuruluk derecelerine yol açtığını ve burada halkasal film buharlaşmasının baskın olduğunu belirtmişlerdir. R134a ve su için daha iyi sonuçlar veren yeni bir ısı transfer katsayısı bağıntısı önermişlerdir. Makro kanallar için geliştirilen bağıntılarda kullanılan Martinelli parametresinin her üç bölge için de önemli olduğunu ve orta düzeyli kuruluk derecelerinde farklı akışkanların etkilerine cevap verebilmek için kaynama ve Weber sayılarının göz önüne alınması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Liu vd. (2005), yaptıkları deneysel çalışmada bir mikrokanallı ısı alıcısındaki su akışında yüksek hızlı görüntüleme sistemi ile kabarcıklı kaynamanın başlangıcını incelemiş ve değişik akış koşulları için bu noktadaki ısı akısını belirlemiştir. Kaynamanın başlangıcındaki buhar boyutu ve ısı akısını tahmin etmek için analitik bir model geliştirmiş ve bu modelle yapılan tahminlerin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Xu vd. (2005), kaynama kararsızlığı başlangıcını ve dinamik akış kararsızlığını deneysel olarak incelemiştir. Salınımların periyot ve genliklerini dikkate alarak üç farklı kararsızlık tanımlamışlardır: yüksek genlikli/uzun periyotlu salınım, düşük genlikli/kısa periyotlu salınım ve ısıl salınım.

Huh ve Kim (2006), tek, yatay, dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda su için kaynamalı akış karakteristiklerini incelemiş ve akış görüntülemesi yapmıştır. Kaynamada yerel ısı transfer katsayılarını hesaplamış ve ısı transfer mekanizmalarını açıklamak için tek bir kabarcığın oluşması, büyümesi ve ayrılmasını analiz etmişlerdir. Ayrıca kütle akısı, ısı akısı ve kuruluk derecesinin kaynamalı akışta ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda test bölgesinin orta bölümünde baskın ısı transfer mekanizmasının kabarcıklı kaynama olduğunu, test bölgesinin çıkışına yakın bölümlerde uzun kabarcıklar görüldüğünü ve bunların halkasal akış gibi davrandığını, kabarcıklı kaynamanın baskın olduğu bölgede ısı transfer katsayısının kuruluk derecesi ile değişiminin mini/mikrokanal bağıntıları ile, taşınımlı kaynamanın baskın olduğu bölgede ise makro kanal bağıntılarıyla doğru olarak belirlenebildiğini ifade etmişlerdir.



Koşar vd. (2006), paralel mikrokanallardan oluşan bir ısı alıcıda her bir kanal girişinde orifis kullanımının (üretim aşamasında bütünleşik olarak) kaynamalı akış esnasında yaygın olarak görülen paralel kanal kararsızlığı ve giriş bölgesinde sıkıştırılabilir hacim kararsızlığı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Giriş sınırlandırıcıları nedeniyle ortaya çıkan basınç düşümünü hesaba katan boyutsuz bir sayı tanımlayarak, bu sayıyı akış kararsızlığının bastırılması kapsamında bağıntı oluşturulmasında kullanmışlardır. Kararsız kaynama başlangıcının  $M$  olarak tanımladıkları sayı ile asimptotik olarak arttığını, yüksek  $M$  değerlerinde paralel kanal ve giriş bölgesinde sıkıştırılabilir hacim kararsızlığının tamamen bastırılabilirdiğini; ancak, bu durumun kritik ısı akısının erken gerçekleşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir.

Kuo ve Peles (2007), oyuklu yapıdaki paralel mikrokanallarda kaynamalı akışı deneysel olarak incelemiştir. Yaptıkları deneysel çalışmada elde ettikleri akış morfolojileri, kaynama başlangıçları, ısı transfer katsayıları ve kritik ısı akılarını analiz etmişlerdir. İyileştirilmiş ve düz duvarlı mikrokanalların performanslarını karşılaştırmışlardır. Oyuklu-boşluklu mikrokanalların, kabarcık oluşumunu arttırdığını ve buhar üretimini daha düzgün ve üretken hale getirdiğini, kaynamanın daha erken gerçekleşmesini sağladığını ve kritik ısı akısını iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Huh ve Kim (2007), yatay, dikdörtgen kesitli tek bir mikrokanalda suyun iki fazlı basınç düşümü ve kaynamada ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Kütle akısı ve kuruluk derecesinin yerel kaynamalı akış ısı transfer katsayısı ve iki fazlı sürtünme basınç gradyanı üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Elde edilen deneysel verileri mevcut korelasyonlarla karşılaştırmışlardır. Deneysel ısı transfer katsayısının kütle akısı ve kuruluk derecesinden neredeyse bağımsız olduğunu ve konvansiyonel bağıntıların güvenilir olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca, baskın akış desenini halkasal akışa benzer olarak gözlemlemiş ve mikrokanallardaki kaynamalı akışı hızlı ve uzun buhar kabarcıkları ile karakterize etmişlerdir.

Liu ve Garimella (2007), mikrokanallarda kaynamalı akışta suya olan ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Maksimum ısı akısını  $129 \text{ W/cm}^2$  ve çıkış kuruluk derecesi 0.2 olarak elde etmişlerdir. Taşınımlı kaynamada ısı transfer katsayısını belirlemiş ve daha büyük çaplı kanallar için önerilen bağıntılardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Doymuş kaynama rejimindeki ısı transfer verilerini bağıntı haline getirmek için yeni bir superpozisyon modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde, taşınımında iyileştirme faktörü ve

kabarcıklı kaynama baskı faktörü için analitik çözümler türetilip; kaynamalı akışın özgün nitelikleri ile birleştirmişlerdir.

Diaz ve Schmidt (2007), akışkan olarak su ve etanol kullanarak dikdörtgen bir mikrokanalda kaynamalı akışta ısı transferini deneysel olarak incelemiş, kanal dış duvar sıcaklıklarını kızıl ötesi fotoğraflama yöntemi ile kaydetmiş, zaman ortalamalı dış duvar sıcaklıklarından yerel ısı transfer katsayılarını hesaplamış ve deneysel sonuçları yaygın olarak kullanılan bağıntılarla karşılaştırmıştır. Su ve etanol için, kuruluk derecesi arttıkça ısı transfer katsayısının sırasıyla azaldığını ve arttığını ve yüksek kuruluk derecelerinde, akışta düzenli salınımlar görüldüğünü belirtmişlerdir.

Chen vd. (2007), yaptıkları deneysel çalışmada, her birinin yüksekliği 3 mm; genişlikleri ise sırasıyla 3, 6 ve 9 mm olan üç farklı dikdörtgen kesitli kanalda, tek fazlı ve iki fazlı sürtünme basınç düşümü verileri elde etmiştir. Adyabatik hava-su karışımı akışını çalışmışlardır. Çalıştıkları kütle akısı ve kuruluk derecesi aralığı sırasıyla  $100 - 700 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $0.001 - 0.8$ 'dir. Tek fazlı sürtünme faktörünün laminar ve türbülanslı akış tahminleriyle uyumlu olduğunu, iki faz sürtünme basınç düşümü verilerinin ise literatürdeki mevcut yöntemlerle uyumlu olmadığını belirtmişlerdir. Literatürdeki bağıntılardan yararlanarak eğri uydurma yöntemi ile yeni bir bağıntı önermişler ve bu bağıntının, kütle akısının  $50 - 700 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , gaz kuruluğunun  $0.001 - 0.95$ , Martinelli parametresinin  $0.05$  ile  $20$  ve kanal yükseklik/kanal genişlik oranının ( $H_{ch}/W_{ch}$ )  $0.1 - 1$  arasında olduğu geniş deneysel aralıklar için uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Chang ve Pan (2007), paralel mikrokanallardan oluşan ısı alıcıda iki faz akış kararsızlıklarını deneysel olarak incelemiştir. Kararlı ve kararsız çalışma koşulları altında farklı akış desenlerinin ortaya çıktığını, kararlı durumda kabarcık oluşumundan sonra uzun kabarcıklı akış ve halkasal akışın meydana geldiğini; kararsız durumda ise, her bir kanalda ileri veya geri yönde hareket eden uzun kabarcıklı/halkasal akış desenlerinin değişimli olarak görüldüğünü ve basınç düşümü salınım genliğinin ters akışın ortaya çıkışı için bir gösterge olarak kullanılabileceğini belirtmiş ve bir kararlılık haritası oluşturmuşlardır.

Huh vd. (2007), tek yatay bir mikrokanalda kaynamalı akış esnasında meydana gelen periyodik basınç düşümü, kütleli debi ve sıcaklık salınımlarını deneysel olarak incelemiştir. Periyodik salınımların birbirini izleyen iki akış deseninin geçişleri ile eşleştiğini belirtmişlerdir. Bunlar: kabarcıklı akıştan uzun kabarcıklı akışa geçiş ve uzun kabarcıklı akıştan yarı halkasal akışa geçiştir. Bu nedenle, akış deseni geçiş kararsızlığının

duvar sıcaklığı, basınç düşümü ve kütle akısının döngüsel davranışına sebep olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve Cheng (2008), alt tarafı pyrex cam duvar olan 155 µm hidrolik çaplı, yatay tek bir mikrokanalda, saf suyun kararlı ve kararsız akış kaynaması olayını incelemek için eş zamanlı akış görüntüleme ve ölçüm çalışması yapmıştır. Giriş sıcaklığı, kütle ve ısı akılarının kaynamalı akış kararsızlığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çıkış kuruluk derecesinin 0.013'den büyük olduğu durumda mikrokanalda kararsız kaynamalı akış olduğunu belirtmişlerdir.

Choi ve Kim (2008), tek, cam bir mikrokanalın üretimi ve su geçirmez yüzeyin oluşumu için yöntemler geliştirmiştir. Işığa duyarlı cam kullanarak, saydam tek bir dikdörtgen kesitli mikrokanal üretmişlerdir. Saf su kullanarak mikrokanallarda kaynamalı akış deneyleri yapmışlardır. Yüksek hızlı kamera ve uzun mesafe mikroskobu kullanarak iki fazlı akış görüntüleri almışlardır. Su iten yüzeyde yeni bir akış deseni gözlemlemişler ve bunu damlalı uzun kabarcıklı akış (*dropwise slug*) olarak adlandırmışlardır.

Singh vd. (2008), kaynamalı akışta AR'nin basınç düşümü üzerindeki etkisini incelemiştir. Mikrokanallardaki iki fazlı akıştaki basınç düşümünün AR'nin 1.6 olduğu durumda minimuma sahip olduğunu, bu minimum değerinin nedeninin sürtünme ve ivmelenme basınç düşümlerinin AR'ye bağlı olarak karşı eğilim göstermesi olduğunu, belli bir ısı ve kütle akısı aralığında, iki fazlı basınç düşümünün tek fazlıdan daha düşük olduğunu göstermişlerdir.

Lee ve Pan (2008), silikon dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda, hızlı kabarcık büyümeli kaynamayı (*eruptive boiling*) deneysel olarak incelemiştir. Mikrokanalı SOI (*silicon on insulator*) katmanından yapmış ve hacimsel mikro işleme ve anotsal yapıştırma ile hazırlamışlardır. Yüksek hızlı kamera ile bir kabarcığın gelişim sürecini incelemişlerdir. Isı akısının kabarcık frekansı, kabarcıklı kaynamanın başladığı konum ve kritik kabarcıklaşma odağı yarıçapı üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Sabit bir kütle akısı için, artan ısı akısı ile kabarcıklı kaynama başlangıcının kanal girişine yaklaştığını, kabarcık frekansının ve kritik yarıçapın azaldığını belirtmişlerdir.

Harirchian ve Garimella (2008), yaptıkları deneysel çalışmada, FC-77 akışkanı için, kütle akısı ve kanal kesiti boyutlarının iki faz ısı transfer katsayısı ve basınç düşümü üzerindeki etkisini incelemiştir. 400 µm'den daha geniş mikrokanallar için ısı transfer katsayısının ve kaynama eğrisinin kanal boyutundan bağımsız olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, ısı transfer katsayısının belli bir kanal boyutu için kabarcıklı kaynama bölgesinde

kütle akısından da bağımsız olduğunu, ancak taşınım baskın olduğunda kütle akısının etkin bir parametre haline geldiğini belirtmişlerdir. Basınç düşümünün ise kütle akısı ve kanal boyutlarına önemli derecede bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Wang vd. (2008), paralel mikrokanallarda giriş/çıkış konfigürasyonlarının kaynamalı akışlar üzerindeki etkilerini incelemek için eş zamanlı akış görüntüleme ve ölçüm çalışmaları yapmıştır. Üç farklı akış pasajı tasarlamışlardır: Kanal giriş ve çıkışında sınırlandırıcı olan durum, herhangi bir sınırlandırıcı olmayan durum ve sadece girişte sınırlandırıcı olan durum. Kanal çıkışında sınırlandırıcı olan konfigürasyonda şiddetli basınç ve sıcaklık salınımları ile ters akış olayı gözlemlenmiş ve en uygun düzenlemenin sadece girişte sınırlandırıcı kullanımı olduğunu belirtmişlerdir.

Kuo ve Peles (2009), akışkan olarak de-iyonize su kullandıkları çalışmalarında mikrokanallarda kaynamalı akış kararsızlıkları üzerinde basıncın etkisini deneysel olarak incelemiştir. Makro ve mikrokanallarda tanımlı olan sıkıştırılabilir hacim ve hızlı kabarcık büyümesi gibi kararsızlıkları incelemiştir. Farklı basınçlarda kritik ısı akısı koşulu, kabarcık ayrılma çapı ve yerel sıcaklık ölçümlerini alarak karşılaştırmışlardır. Verilen bir kurulum derecesinde, sistem basıncındaki artışın boşluk oranını ve kanal kesitindeki momentum basınç düşümünü azalttığını, yüksek basınçlarda kaynamalı akışta hızlı kabarcık büyüme kararsızlığının ve kritik ısı akısı koşuluna erken geçişin önlendiğini, kabarcık çekirdeklenmesini harekete geçirmek için düşük kızma farklarına ihtiyaç duyulduğunu, kabarcık ayrılma çaplarının daha küçük olduğunu, bu durumun hızlı kabarcık büyüme kararsızlığını azalttığını ve yerel zamana bağlı sıcaklık ölçümlerinin daha düşük salınım genliği ve daha yüksek frekans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Barber vd. (2009), 727  $\mu\text{m}$  hidrolik çapa sahip mikrokanalda, iki faz akış kararsızlıklarını incelemiştir. Dikdörtgen kesitli mikrokanalların üst kısmında, transparan, metalik ve iletken Tantalum depozit geliştirilerek eş zamanlı olarak görüntüleme ve ısıtmaya olanak sağlamışlardır. Kızılötesi kamera kullanarak mikrokanalın dış yüzeyi üzerindeki sıcaklık profillerini kaydetmişlerdir. Mikrokanallarda kaynamalı akış esnasında gözlemlenen çeşitli kararsızlıkların zaman ölçütünü karakterize etmişler ve nicelleştirmişlerdir. Yüksek hızlı kamera görüntülerinden yararlanarak, bazı fiziksel mekanizmaların kontrolünün gözlemlenen akış kararsızlıklarıyla ilgili olduğunu göstermişlerdir.

Qu ve Siu-Ho (2009), yaptıkları deneysel çalışmada, 200 x 200  $\mu\text{m}^2$  kesit alanına ve 670  $\mu\text{m}$  yüksekliğe sahip, kademeli olarak yerleştirilmiş kare kesitli mikro kanatçık

dizilerinden oluşan bir ısı alıcıda doymuş kaynamalı akışta ısı transferini çalışmıştır. Akışkan olarak de-iyonize su kullanmışlar ve 30, 60 ve 90 °C olmak üzere üç farklı giriş sıcaklığında çalışmışlardır. Yüksek kuruluk derecelerinde ısı transfer katsayısının neredeyse sabit olduğunu, kuruluk derecesine ve kütle akısına bağlı olmadığını ve düşük kuruluk derecelerinde girişteki aşırı soğutma ile ısı transferinin iyileştirildiğini göstermişlerdir. Halkasal akışla ilgili iki fazlı zorlanmış taşınımın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişler ve buhar içerisinde sürüklenen sıvı damlacıklarının önemli rol oynadığını ifade etmişlerdir.

Harirchian ve Garimella (2009a), mikrokanallardaki akış desenleri ve kaynamalı akışta ısı transferini etkileyen kritik geometrik parametreleri tanımlamak için FC-77 (Fluorinert) akışkanı ile deneyler yapmıştır. Isı transfer katsayısı ve basınç düşümünün eş zamanlı yerel ölçümleri ile birlikte akış rejimlerini belirlemek için akış görüntüleme deneyleri yapmışlardır. Mikrokanallarda kaynamada ısı transferi üzerinde kesit alanı, kanal genişliği ve derinliği etkisini çalışmışlardır. Kanal kesit alanının mikrokanallardaki kaynama ve ısı transferini belirleyen önemli bir parametre olduğunu göstermişlerdir. Belli bir değere erişmiş kesit alanına sahip kanallarda, kabarcıklı kaynamanın etkin mekanizma olduğunu ve kaynamada ısı transfer katsayısının kanal boyutlarından bağımsız olduğunu, kesit alanı eşik değerinin altında ise, bütün ısı akısı değerlerinde bütün kanallarda kabarcık sınırlamasının görüldüğünü ve kanal sınırlaması nedeniyle erken kuruma meydana gelmeden önce, mikrokanal kesit alanı azaldıkça ısı transfer miktarının arttığını belirtmişlerdir.

Harirchian ve Garimella (2009c), yüksek hızlı fotoğraflama yöntemiyle FC-77 akışkanı için, kanal boyutu ve kütle akısının mikrokanallarda kaynamalı akış rejimleri üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Paralel mikrokanallardan oluşan yedi farklı test bölgesi kullanmışlardır. 400 µm ve daha geniş kanallar için, geniş bir ısı akısı aralığında kabarcıklı kaynamanın baskın olduğunu, daha küçük boyutlar için ise duvarlardaki kabarcık oluşumunun düşük ısı akısı değerlerinde bastırıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, akış haritaları önermişlerdir.

Zhang vd., (2009), yatay mikrokanallarda Ledinegg kararsızlığına yönelik deneysel ve sayısal bir çalışma yapmıştır. Atmosfer basıncından daha düşük bir basınçtaki su (70°C doyma sıcaklığında) ve atmosfer basıncında HFE-7100 soğutucu akışkanının kaynamalı akış davranışını incelemiştir. Akış kararsızlığının başlangıcını belirlemişler ve sistemin Ledinegg kararsızlığına olan yatkınlığını nicelleştirmek için basınç düşümü–kütle akısı

eğrisinin eğimini incelemişlerdir. Momentum denkleminde türetilen talep eğrisi eğimine bağlı olarak, kararsızlığa olan yatkınlığı ölçmek için sistematik parametrik çalışmalar vermişlerdir. Artan sistem basıncı ve azalan kanal sayısının akışı kararlı hale getirdiğini; ısı akısı, giriş aşırı soğutma sıcaklığı ve kanal hidrolik çapının akış kararlılığı üzerindeki etkilerinin genellikle kuruluk derecesine bağlı olduğunu; düşük kuruluk derecelerinde akış kararsızlığı başlangıcı yakınında düşük aşırı soğutma derecesi, artan ısı akısı ve azalan kanal çapının akışı kararsız yapma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir.

Karayiannis vd. (2010), paslanmaz çelikten üretilmiş ve düşey konumlandırılmış beş farklı dairesel kanalda ( $D = 0.52 - 4.26$  mm) R134a'nın kaynamalı akışını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda, 1.1 mm'den 4.26 mm'ye kadar olan kanal çaplarında ısı transfer katsayısının sistem basıncı ve ısı akısı ile arttığını, düşük kuruluk derecelerinde ( $< 0.4 - 0.5$ ) ise kuruluk miktarı ile değişmediğini, yüksek kuruluk derecelerinde, ısı transfer katsayılarının artan kuruluk derecesi ile azaldığını ve bu durumun yerel geçici kurulukların varlığını işaret ettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, yüksek hızlı kamera ile akışı görüntülemişlerdir.

Celata vd. (2010), tek yatay dairesel bir kanalda, FC-72'nin ( $C_6F_{14}$ ) aşırı soğuk kaynamalı akışta ısı transfer karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Her bir kaynamalı akış durumu için taşınım ile ısı transfer katsayılarını hesaplamışlardır. Kararlı ve kararsız akış kaynama rejimlerini görüntülemişlerdir. Düşük ısı ve kütle akısı durumlarında, akış kararsızlıkları ile ileri-geri salınımlar gözlemlendiğini, yüksek ısı akıları ( $> 150$  kW/m<sup>2</sup>) ile düşük ve orta kütle akılarında ( $< 1500$  kg/m<sup>2</sup>s), yüksek kuruluk derecelerinde kuruluk derecesinin artması ile ısı transfer katsayısının arttığını, ancak düşük kuruluk derecelerinde, ısı transfer katsayısının ısı akısından neredeyse bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.

Harirchian ve Garimella (2010), kanal boyutları ve akış özelliklerinin, mikrokanallarda kaynamalı akışta kabarcık sınırlanma etkilerini belirlemek için tek başına yeterli olmadığı belirtmiştir. Bu nedenle mikrokanallardaki kaynamalı akışta, fiziksel sınırlama için konvektif sınırlama sayısı (*convective confinement number*) olarak adlandırılan yeni bir kriter önermişlerdir. FC-72'nin kaynamalı akışı için kapsamlı bir akış rejimi haritası geliştirmiş ve fiziksel sınırlamanın olmadığı durumda, ısı transfer katsayısının kanal boyutlarından bağımsız olduğunu ve kabarcıklı havuz kaynaması bağıntısıyla elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Fu vd. (2010), iç çapı yaklaşık 1.5 mm olan düşey konumlandırılmış mini dairesel bir kanalda (sıvı azot için) kabarcık döngüsü ve akış deseni geçişlerini görüntülemiş ve eş zamanlı ölçümler almıştır. Kabarcık periyodunu kabarcığın ayrılma çapıyla ilişkilendirerek ampirik bir bağıntı elde etmişlerdir. Kabarcık büyümesini en fazla atalet kuvvetinin etkilediğini, kabarcık ayrılma olayının makro kanallardakiyle benzer olduğunu, baskın ısı transfer mekanizmasının ince sıvı filmi buharlaşması olduğunu, kabarcık ayrılma çapının kütle akısı arttıkça azaldığını, ısı akısı arttıkça arttığını belirtmiş ve kritik ısı akısı ile ısıtma uzunluğu arasında lineer bir ilişki elde etmişlerdir.

Choi vd. (2011), dikdörtgen kesitli mikrokanallarda, ıslanabilirliğin kaynamalı akış üzerindeki etkisini incelemek için, su çeken (*hydrophilic*) ve iten (*hydrophobic*) yüzeylere sahip kanallarda su için deneyler yapmış ve akışı görüntülemiştir. Su iten kanallardaki kaynamada ısı transfer katsayısının, basınç düşümünün ve kabarcık sayısının su çeken yapılarıdakine kıyasla daha yüksek olduğunu, ıslanabilirliğin, iki fazlı akışla ilgili olan ve akış deseni üzerinde etkili olan bir parametre olduğunu, düşük kuruluk derecelerinde etkin ısı transfer mekanizmasının kabarcıklı kaynama; yüksek kuruluk derecelerinde ise film buharlaşması olduğunu belirtmişlerdir.

Ong ve Thome (2011a), kanal çapları, 1.03, 2.20 ve 3.04 mm olan küçük çaplı kanallarda kaynamalı akış esnasında makro ölçekten mikro ölçeğe geçişi incelemiştir. İş akışkanı olarak R134a, R236fa ve R245fa kullanmışlardır. Sınırlama sayısının yaklaşık olarak 0.3 ve 0.4 arasındaki değerlerinde makro ölçekli uzun kabarcıklı akışa geçişi kapsayan çeşitli koşullar altında akış deseni geçişlerini belirleyerek gelişmiş akış deseni haritası önermişlerdir. Makro ölçekteki akışların alt sınırı ve mikro ölçekteki akışların üst sınırına uygulanması için yer çekimi, atalet ve yüzey gerilmesi etkilerini hesaba katan ek boyutsuz parametreleri içeren yeni bir makro-mikro ölçek akış deseni haritası önermişlerdir. Sıvı filmi kalınlıklarını karşılaştırarak  $Co$  sayısı 1'e yaklaştığı zaman yer çekimi kuvvetlerinin tamamen bastırıldığını ve yüzey gerilmesi ve kesme kuvvetlerinin baskın olduğunu, makro ölçekli bir akış için eşik değerinin  $Co$ 'nun 0.3 ile 0.4 arasındaki değerleri olduğunu, simetrik mikro ölçekli akışın üst limit değerinin ise  $Co$ 'nun yaklaşık olarak 1 değeri olduğunu belirtmişlerdir.

Ong ve Thome (2011b), kanal sınırlaması, ısı akısı, akış deseni, doyma sıcaklığı, aşırı soğutma miktarı ve iş akışkanı özelliklerinin iki faz ısı transferi ve CHF üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kaynamalı akışta ısı transfer katsayılarının iki faz akış deseni türünün belirgin bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, yüksek kuruluk

derecelerinde monotonik olarak artan ısı transfer katsayısının halkasal akışa karşılık geldiğini ve küçük ölçekli kanallarda taşınımın kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir. Tek dairesel kanallar, dikdörtgen kesitli çoklu kanallar ve ayırık akışlı dikdörtgen çoklu kanallarda R134a, R236fa ve R245fa akışkanları için kritik ısı akısını belirlemek üzere  $Co$ 'yu içeren yeni bir kritik ısı akısı bağıntısı önermişlerdir.

Liu vd. (2011), mini/mikrokanallarda buharlaşan su akışında, ısı transfer katsayısını deneysel olarak incelemiştir. Isı transfer katsayısının ısı akısı ve kuruluk derecesiyle olan ilişkilerini analiz etmişlerdir. Mini/mikrokanallarda buharlaşmalı akışlarda ısı transfer katsayısının artan ısı akısı ile arttığını ve artan kuruluk derecesi ile azaldığını ve sabit kütle akısı ve ısı akısı değerleri altında mikrokanallardaki ısı transfer katsayısının mini kanallardakinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel ısı transfer katsayılarını mevcut bağıntılarla karşılaştırmışlar ve Bond sayısının etkisini içeren yeni bir bağıntı önermişlerdir.

Chen ve Garimella (2011), FC-77 akışkanının, silikon ısı alıcı içindeki kaynamalı akışını incelemiş ve kanal boyunca olan basınç düşümünü ölçmüştür. Akışkanın sürtünme ve ivmelenmesi arasındaki denge nedeniyle mikrokanallardaki iki fazlı akış esnasında basınç düşümünün artan ısı akısı ile neredeyse lineer olarak arttığını, kritik ısı akısı meydana gelene kadar akış debisine çok az bağlı olduğunu ve kritik ısı akısının artan debi ile arttığını göstermişlerdir.

Soupremanien vd. (2011), aynı hidrolik çapa ( $D_h = 1.4$  mm) fakat farklı  $H_{ch}/W_{ch}$  değerine sahip yatay, iki adet tek dikdörtgen kesitli mikrokanalda,  $H_{ch}/W_{ch}$  oranının kaynamalı akış üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Akışkan olarak Forane 365 HX kullanmışlar ve 15 °C'lik aşırı soğutma miktarında çalışmışlardır. Isı transfer katsayısı ve basınç düşümü değerlerinin her iki kanal için de farklı olduğunu, düşük ısı akısı koşulunda, düşük  $H_{ch}/W_{ch}$  oranlı kanalda ( $H_{ch}/W_{ch} = 0.143$ ) daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edildiğini, yüksek ısı akısı koşulunda, ısı transfer katsayısının yüksek  $H_{ch}/W_{ch}$  oranlı (0.43) kanalda maksimum olduğunu, bunun nedeninin düşük  $H_{ch}/W_{ch}$  oranlı kanalda kurumanın erken başlamasıyla açıklanabileceğini ve iki fazlı akışın basınç düşümünün düşük  $H_{ch}/W_{ch}$  oranlı kanalda daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Bogojevic vd. (2011), düzensiz dağılımlı olarak ısıtılan paralel mikrokanallardan oluşan bir ısı alıcıda suyun kaynamalı akışını incelemiştir. Giriş ve çıkış basınçları ile kanal üzerinde beş farklı noktadan duvar sıcaklık ölçümlerini zaman ortalamalı ve zaman



bağımlı olarak almışlar ve akışı görüntülemişlerdir. Mikrokanallarda üniform olmayan aksenal ısıtmanın enine doğrultuda üniform olmayan yüksek sıcaklıklara yol açtığını ve kaynama başlangıcının yarı kararlı üniform olmayan akış dağılımına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Harirchian ve Garimella (2012), paralel mikrokanallarda FC-77'nin kaynamalı akışı esnasındaki yerel ısı transfer katsayısı ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemiş ve akış görüntülemesi yapmıştır. Kaynamada mikro ölçek etkilerinin önemli, makro ölçek yaklaşımının ise yetersiz olduğu yeri tanımlamak için yeni bir geçiş kriteri geliştirmiş ve ayrıca, akış rejimi haritası önermişlerdir.

Saraceno vd. (2012), aşırı soğuk ve doymuş kaynamalı akış rejimleri için yerel ısı transfer katsayıları elde etmiştir. Isı akısı arttıkça ısı transfer katsayısının arttığını ve kuruluk derecesine çok az bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Megahed (2012), silikon bir mikrokanal ısı alıcısındaki kaynama başlangıcı ve kaynamalı akışta ısı transfer karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Yüzey sıcaklık dağılımlarını elde etmek için TLCs (*Un-encapsulated thermochromic liquid crystals*) tekniği kullanmıştır. İki faz ısı transfer katsayısının makro ve mini kanallardaki eğiliminin aksine, çıkış kuruluk derecesi arttıkça azaldığını belirtmiştir. Düşük çıkış kuruluk derecelerinde kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ve çıkış kuruluk derecesi arttıkça kabarcıklı kaynamanın etkisini kaybettiğini belirtmiştir.

Del Col ve Bortolin (2012), 0.96 mm çapındaki tek dairesel bir mikrokanalda R245fa, R134a ve R32 akışkanlarının kaynaması esnasında meydana gelen kuruma olayını incelemiştir. Kanal boyunca üniform olmayan ısı akısı sağlamışlardır. Duvar sıcaklığının kuruma olan bölgelerde daha büyük salınımlar gösterdiğini ve bu salınımların düşük kuruluk derecelerinde görülmediğini ifade etmişlerdir.

Park vd. (2012), dikdörtgen kesitli paralel mikrokanallarda FC-72 akışkanı için iki faz basınç düşümü ve ısı transfer katsayılarını belirlemeye yönelik deneyler yapmış ve elde ettikleri sonuçları mevcut bağıntılarla karşılaştırmıştır. Basınç düşümünün artan kuruluk derecesi ve kütle akısı ile arttığını, ısı akısının basınç düşümü üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu, kuruluk derecesinin 0.2 – 0.4 aralığından büyük değerleri için, ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığını belirtmişlerdir.

Liu vd. (2012), bir metanol dönüştürücünün yüksek sıcaklıklı egzost gazından nasıl faydalanılabileceğini göstermek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Her iki yüzünde de mikrokanallar açılmış silikon bir test bölgesinde paralel ve ters akışlı mikro ısı değiştirici

uygulaması yapmışlardır. Isı deęiřtiricisindeki akıřkanlar Helyum gazı ile sıvı metanoldur. Akıř kararsızlıęı ile iki fazlı akıř desenlerini incelemiřler ve metanolun dūřuk kūtleli debilerinde eř yūnlū akıřın, yūksək debilerde ise ters yūnlū akıřın daha verimli olduęunu belirtmiřlerdir. Ayrıca, ısı akıřının kūtle akıřıyla deęiřimini gūsteren bir akıř haritası çizmiřler ve ters yūnlū akıřta kūtle akıřıyla verimin arttıęını buna karřın aynı yūnlū akıřta kūtle akıřının etkisinin belirsiz olduęunu ifade etmiřlerdir.

Wang ve Sefiane (2012), farklı AR'li mikrokanallarda ısı akışı, kuruluk derecesi ve kanal hidrolik çapının kaynamalı akışta ısı transferi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. FC-72 akışkanını kullanmışlar ve ūç farklı hidrolik çap (571, 762 ve 1454  $\mu\text{m}$ ) ve AR'ye (20, 20, 10) sahip tek kanallı test būlgesinde çalışmışlardır. Uzun kabarcıklı-halkasal akış ve halkasal akışın ana akış rejimleri olduğunu, taşınımli kaynamanın ana ısı transfer mekanizması olduğunu, yerel ısı transfer katsayısının azalan hidrolik çap ile arttığını, ısı transfer katsayısının kūtle akışına bağlı olduğunu, yūksək kūtle akışı değerlerinde kabarcıklı kaynamanın daha geç başladığını ve kritik ısı akışının artan hidrolik çap ile arttığını belirtmişlerdir.

Fu vd. (2013a), genişleyen kesite sahip bakır mikrokanallı ısı alıcıda, ortalama  $H_{\text{ch}}/W_{\text{ch}}$  oranının HFE-7100 akışkanının kaynamalı akışta ısı transferi ve kritik ısı akışı üzerindeki etkisini incelemiştir. İki fazlı būlgede  $H_{\text{ch}}/W_{\text{ch}}$  oranının ısı akışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu,  $H_{\text{ch}}/W_{\text{ch}} < 1$  için,  $H_{\text{ch}}/W_{\text{ch}}$  arttıķa kritik ısı akışının arttığını,  $H_{\text{ch}}/W_{\text{ch}}$  yaklaşık olarak 0.99 iken bu değerin maksimuma eriştiğini ve bu noktadan sonra kritik ısı akışının artan  $H_{\text{ch}}/W_{\text{ch}}$  ile yavaşca azaldığını ve artan kūtle akışı ile belirgin bir şekilde arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, kritik ısı akışı için  $H_{\text{ch}}/W_{\text{ch}}$  etkisini içeren yeni deneysel bir bağıntı önermişlerdir.

Fu vd. (2013b), üzerinde yapay oyuklar açılmıř geniřleyen kesitli bir mikrokanalda etanol-su karıřımının kaynamalı akıřı esnasındaki basınç dūřūmūnū deneysel olarak incelemiřtir. Tek fazlı tařınım būlgelerinde, basınç dūřūmūnū artan kızma farkı ve ısı akıřı ile azaldıęını, buna karřın kaynamalı akıř esnasında, kızma farkındaki artıř ile basınç dūřūmūnū hızlı bir řekilde arttıęını gūstermiřlerdir.

Bogojevic vd. (2013), dikdūrtgen kesitli paralel kanallardan oluşan mikrokanal ısı alıcıda kabarcık dinamiğinin akış kaynama kararsızlıķları ve ısı transferi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Kabarcık ayrılma çapının Re sayısı arttıķa azaldığını, kabarcığın var olma sūresinin ısı ve kūtle akışı ile eksponansiyel bir azalma gūsterdięini,

meydana gelen bu azalmanın akış kararsızlıklarını arttırdığını ve ısı akısının artması ile sıvı filmi kalınlığının azaldığını belirtmişlerdir.

Zhuan ve Wang (2013), bir plaka üzerinde her iki yönde bir dizi şeklinde yer alan kübik kanatçıklarla oluşturulan mikrokanal ısı alıcıda R-134a'nın kaynama olayını deneysel olarak incelemiştir. Isı transfer katsayısının ısı akısı ile belirgin bir şekilde arttığını, girişteki aşırı soğutma miktarındaki artışının ısı transferini arttırdığını, yarı halkasal ve halkasal akışlarda ısı transfer katsayısının ısı akısından bağımsız olduğunu, ısı transfer katsayısının kısmen kütle akısı ile artıp, kuruluk derecesindeki artışla azaldığını, halkasal akışta taşınımın etkin ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişler ve ısı transfer katsayısını belirlemek için iki bağıntı önermişlerdir.

Morshed vd. (2013), etanol esaslı alüminyum oksit nano akışkanının havuz kaynaması ile bakır bir mikrokanalın yüzey morfolojisini modifiye etmiş ve alüminyum oksit nano parçacığı kaplı mikrokanalın kaynamalı akış performansını de-iyonize su kullanarak incelemiştir. Hem tek fazlı hem de iki fazlı ısı transfer katsayılarının nano parçacıklarla kaplı yüzeylerde çıplak yüzeylere kıyasla belirgin bir şekilde düştüğünü ve modifiyeli yüzeylerde kritik ısı akısının arttığını göstermişlerdir.

Yang vd. (2013), kanal geometrisi üzerinde düzenlemeler yaparak kaynamalı akışta ısı transferini iyileştirmiştir. Kanal girişlerinden önce akış kısıtlayıcıları kullanmışlar ve ana kanallarla bağlantılı tali kanallar açarak kabarcık büyüme ve çökme prosesinin hızlı ve sürdürülebilir hale gelmesini sağlamışlardır. Isı transfer katsayısını arttırmış ve basınç düşümünü azaltmışlardır.

Nascimento vd. (2013), mikrokanallardan oluşan ısı alıcıda R-134a akışkanının kaynamalı akış ısı transfer karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Kütle akısı ve girişteki aşırı soğutma miktarı azaldıkça, ısı alıcı performansının arttığını ve sabit kuruluk derecesi için ısı transfer katsayısının artan kütle akısı ile arttığını belirtmişlerdir.

Kaya vd. (2013), farklı çapa sahip iki dairesel mikrokanalda, yüksek kütle akılarında, de-iyonize suyun kaynamalı akışı esnasındaki kritik ısı akısını incelemiştir. CHF'nin kütle akısı ile yakından ilişkili olduğunu ve ısıtılan kanal uzunluğunun kanal çapına oranı arttıkça CHF'nin azalacağını belirtmişlerdir. Ayrıca, deneysel verileri kullanarak yeni bir ampirik CHF bağıntısı elde etmişlerdir.

Tuo ve Hrnjak (2013), paralel mikrokanallardan oluşan bir buharlaştırıcıda R-134a akışkanı için periyodik ters akış olayını ve kaynamadaki salınımları deneysel olarak incelemiş ve eş zamanlı akış görüntüleme deneyleri yapmıştır. Ters akışın basınç

düşümünde senkronize salınımlara neden olduğunu ve bu salınımların periyodunun ısı akısıyla arttığını ifade etmişlerdir. Ters akışın ayrıca, ısı transfer katsayısını azalttığını ve sıvının dengesiz dağılımına neden olduğunu belirtmişlerdir. Bunu önlemek için geri dönen buhar akışının tahliye edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Alam vd. (2013), mikro boşluklu ısı alıcı ile klasik mikrokanallı ısı alıcıların karşılaştırmasını deneysel olarak incelemiştir. Mikro boşluklu ısı alıcı performansının yüksek ısı akısı ve düşük kütle akısında daha yüksek olduğunu, mikro boşluklu yapının yerel kuruma noktalarını, akış kararsızlıklarını ve ters akış olayını azalttığını, duvar sıcaklıklarının ısıtılan yüzey boyunca üniform kalmasını sağladığını belirtmiş ve mikro boşluklu ısı alıcısındaki basınç düşümünün daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Ali vd. (2013), 781  $\mu\text{m}$  iç çapa sahip yatay tek bir mikrokanalda, kaynamalı akış esnasında akış görüntüleme çalışmaları yapmıştır. Gaz ve sıvı hızları ile Re sayısı ve kuruluk derecesine göre akış deseni haritaları oluşturmuşlardır. Elde ettikleri akış desenlerini, literatürdeki mevcut makro ve mikro ölçekli kanallar için geliştirilen bazı akış deseni haritaları ile karşılaştırmışlardır. Küçük kanal çapının kabarcık büyümesini sınırlandırdığını gözlemlemişlerdir. Bu durumun silsile olarak akış desenlerinin erken gelişmesine neden olduğunu ve düşük kuruluk derecelerinde bile halkasal akışın gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Kabarcık frekansının ısı ve kütle akısı ile arttığını ve daha geniş parametre aralığında daha fazla akış görüntüleme çalışması yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Balasubramanian vd. (2013), 300  $\mu\text{m}$  genişlik ve 1200  $\mu\text{m}$  derinliğe sahip düz, paralel, dikdörtgen kesitli mikrokanallardan oluşan iki farklı bakır mikrokanallı ısı alıcıda (40 ve 16 kanaldan oluşan), kaynamalı akış deneyleri yapmıştır. Orta ve yüksek ısı akılarında ince film buharlaşmasının baskın ısı transfer mekanizması olduğunu, ısı transfer katsayısının çıkış kuruluk derecesi ile M şekli yapacak şekilde değiştiğini, halkasal akış rejiminin en kararlı akış rejimi olduğunu, basınç düşümü salınım genliğinin yüksek olduğu zaman ısı transfer katsayısının düştüğünü belirtmişler ve kararsızlıkla ilgili sayısal bir yaklaşım sunmuşlardır. Akışkan olarak de-iyonize su kullanmışlardır.

Liu vd. (2013), farklı ısısal zaman sabitlerine sahip iki farklı mini kanalda (0.9 mm ve 2 mm çapındaki), kanal girişinde uyguladıkları sıkıştırılabilirlik etkileri altında su ve n-hexane akışkanlarının kaynamalı akışını deneysel olarak incelemiştir. Girişteki sıkıştırılabilirliğin ısı transfer katsayısını hem büyüklük hem de davranış bakımından etkilediğini, sıkıştırılabilirlik olmayan durumda ısı transfer katsayısının kütle akısına bağlı

olup, duvar ısı akısına bağlı olmadığını; sıkıştırılabilirlik olan durumda ise tam tersinin geçerli olduğunu belirtmişlerdir.

Yang vd. (2014a ve b), genişlikleri, yükseklikleri ve uzunlukları sırasıyla 200  $\mu\text{m}$ ; 250  $\mu\text{m}$  ve 10 mm olan silikon mikrokanallardan oluşan ısı alıcılarda kaynamalı akışta ısı transferi, basınç düşümü ve kritik ısı akısı üzerine deneysel olarak çalışmıştır. Kanal duvarlarında 5 nm çapında ve 5  $\mu\text{m}$  uzunluğunda silikon nano teller oluşturmuşlardır. Geometrik olarak iyileştirdikleri konfigürasyonu, girişinde kısıtlayıcı olan ve olmayan paralel düz kanal geometrileri ile karşılaştırmışlardır. Silikon nano telli geometride tek halkasal akış ismiyle yeni bir akış rejimi tanımlamışlardır. Silikon nano tellerin kullanılmasıyla, kabarcıklı kaynamanın iyileştiğini, sıvı filmde periyodik olarak yenilenme meydana geldiğini, sıvı filmi buharlaşmasının arttığını ve bu nedenle ısı transferinin iyileştiğini; yeni tanımlanan akış deseni sonucu sıvı ve buhar fazlarının birbirinden ayrıldığını, ara yüz profilinin oldukça düz olduğunu, bunun sonucunda da sürüklenen damlacık miktarının azaldığını ve bunun da sürtünme basınç düşümünde azalmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Ritche vd. (2014), üniform olarak ısıtılmayan silikon mikrokanal ısı alıcıda sıcak noktaların ısı transfer katsayısı, duvar sıcaklığı ve kaynamanın başladığı konum üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Silikon mikrokanal ısı alıcıyı 12.7 mm x 12.7 mm boyutlarında ve yaklaşık 650  $\mu\text{m}$  kalınlıkta olacak şekilde tasarlamışlardır. Silikon üzerinde dikdörtgen kesitli, paralel düz ve her biri 240  $\mu\text{m}$  genişliğe, 370  $\mu\text{m}$  derinliğe sahip 35 adet mikrokanal bulunmaktadır. Hem akış doğrultusuna hem de akışa dik doğrultulara beşer adet bağımsız ve eş ısıtıcı yerleştirmişlerdir. Farklı konumlara dağıtılan aynı değerdeki toplam güç girdisinin, maksimum ısı akıları ve duvar sıcaklıkları üzerinde farklı limitlere neden olduğunu, akış doğrultusundaki pik ısıtma bölgesi üzerinde kanallarda kurumaya neden olan belirgin bir ters akış gözlemlendiğini, yerel ısı transfer katsayıları ve duvar sıcaklıklarının üniform olarak ısıtılan duruma göre belirgin bir şekilde sapma gösterdiğini belirlemişlerdir.

Yin vd. (2014), de-iyonize su kullanarak 0.5 mm genişliğinde ve 1 mm yüksekliğindeki dikdörtgen kesitli bir kanalda farklı aşırı soğutma miktarı, kütle akısı ve ısı akısı değerleri altında kaynamalı akış esnasındaki kabarcık sınırlanması ve kabarcığın kanal boyunca aksel doğrultuda uzamasını yüksek hızlı kamera kullanarak deneysel olarak incelemiştir. Serbest büyüme periyodundaki kabarcık büyüme hızının, sınırlandırılmış durumdaki büyüme hızından daha az olduğunu, her iki periyottaki kabarcık

büyüme hızının azalan kütle akısı ve girişteki aşırı soğutma miktarı ile arttığını, serbest büyüme periyodu ve kabarcık büyümesinin ilk evrelerinde hızın, artan ısı akısı ile arttığını fakat kabarcık eksenel doğrultuda belli bir uzunluğa geldikten sonra ısı akısının kabarcık uzaması üzerindeki etkisinin kaybolduğunu, kabarcığın ilk şeklinin sınırlandırma ve uzama olayları üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Deng vd. (2014a), geleneksel sinterleme yöntemi ile üretilmiş, 786  $\mu\text{m}$  hidrolik çapa ve  $\Omega$  şeklinde kesit alanına sahip gözenekli mikrokanallardan oluşan ısı alıcıda kaynamalı akışta ısı transferi performansını deneysel olarak çalışmıştır. Akışkan olarak de-iyonize su kullanmışlar ve gözenekli kanallar için elde ettikleri sonuçları aynı geometriye sahip bakır mikrokanaldan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Gözenekli kanallarda kabarcık oluşumunda belirgin bir artış olduğunu, kabarcıklı kaynamanın başlama sıcaklığının azaldığını, düşük ve orta ısı akısı değerlerinde ( $\approx < 370 \text{ kW/m}^2$ ) ısı transferinde iyileşme olduğunu, gözenekli yapıdaki ısı transfer mekanizmasının ısı akısına ve girişteki aşırı soğutma miktarına bağlı olduğunu, düşük ısı akısı ve kuruluk derecelerinde kabarcıklı kaynamanın baskın olduğunu, orta ve yüksek ısı akılarında ise ince film buharlaşmasının etkin olduğunu belirtmişlerdir. Gözenekli yapıdaki mikrokanalda, iki faz akış kararsızlıklarının ertelenmekte ve azalmakta olduğunu göstermişlerdir.

Wang vd. (2014), tek bir mikrokanalda kaynamalı akış esnasındaki iki faz basınç düşümü salınımlarını deneysel olarak incelemiştir. Kullandıkları akışkan FC-72 olup, üç farklı hidrolik çapta kanal kullanmışlardır (571, 762 ve 1454  $\mu\text{m}$ ). İki faz basınç düşümleri, akış görüntüleme ve termal kamera ile yaptıkları yüzey sıcaklık ölçümlerini kullanarak akış kararsızlıklarını analiz etmişlerdir. Basınç salınımlarını düşük frekanslı yüksek genlikli ve yüksek frekanslı düşük genlikli olarak gruplandırmışlardır. Düşük kütle akısı değerlerinde ( $11.28 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) ara yüz hareketinin buharlaşma momentum kuvveti etkisinde olduğunu, yüksek kütle akılarında ise atalet kuvvetinin etkili olduğunu, ortalama basınç düşümünün artan ısı akısı/kütle akısı oranı ile arttığını, düşük frekanslı yüksek genlikli salınımın frekansının artan ısı akısı ile arttığını fakat artan kütle akısı ile azaldığını, yüksek frekanslı düşük genlikli salınımın ise ısı akısına çok az bağlı olduğunu ve artan kütle akısı ile arttığını belirtmişlerdir.

Anwar vd. (2014), düşey doğrultuda konumlandırılmış, 1.6 mm iç çapa ve 245 mm ısıtma uzunluğuna sahip paslanmaz çelik mini kanalda ısı transferi ve kuruma karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Akışkan olarak R152a kullanmışlar ve elde ettikleri sonuçları R134a için elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Kuruluk

derecesinin 0.9 değerine kadar ısı transferinin ısı akısına bağlı olduğunu; kütle akısı ve kuruluk derecesine çok az bağlı olduğunu, R134a ile benzer ısı transfer sonuçları elde edildiğini, çalışma basıncındaki değişimin kritik ısı akısını etkilemediğini, kritik kuruluk derecesinin yaklaşık 0.9 olduğunu ve kuruma olayının muhtemel nedeninin ince sıvı filminin bozulması olduğunu ifade etmişlerdir.

Mahmoud vd. (2014) düşey konumlandırılmış paslanmaz çelik dört farklı tüp için, R134a akışkanının kaynamalı akışındaki basınç düşümünü deneysel olarak incelemiştir. Tüplerden biri 0.52 mm iç çapa ve 100 mm ısıtma uzunluğa sahipken, diğer üç tüp 1.1 mm iç çapa ve üç farklı (150, 300 ve 450 mm) ısıtma uzunluğuna sahiptir. Toplam iki faz basınç düşümünün artan kütle akısı ve ısı akısı ile arttığını, sistem basıncı ve tüp iç çapındaki artışla azaldığını göstermiştir. Sürtünme basınç düşümü bileşeninin; kaldırma ve ivmelenme basınç düşümü bileşenlerinden daha fazla katkısı olduğunu, çap azaldıkça sürtünme basınç düşümü etkisinin arttığını, aynı çıkış kuruluk derecesinde, ısıtma uzunluğu ne kadar kısa olursa, birim uzunluk başına ölçülen basınç düşümünün de o kadar yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Basınç düşümü sonuçlarını mikro ve makro ölçek için geliştirilen bağıntılarla karşılaştırmışlardır.

Tuo ve Hrnjak (2014), hava şartlandırma sistemleri için kullanılan paralel mikrokanallardan oluşan bir buharlaştırıcıda akış görüntüleme ve eş zamanlı ölçüm çalışması yaparak kaynama salınımları ve periyodik ters akış incelemesi yapmıştır. Kullandıkları akışkan R134a'dır. Oluşan kabarcıkların, kanal duvarları tarafından sıkıştırılana kadar, zamanla lineer olarak; sıkışma işleminden sonra ise exponansiyel olarak büyüdüğünü gözlemlemişlerdir. Akış deseni değişiminin periyodik olduğunu ( $\sim 1.5$  s), kaynama salınımlarının ters akış davranışına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu ve ısı akısı arttıkça salınım periyodunun azaldığını belirtmişlerdir. Beş farklı akış deseni görüntülemişlerdir: kabarcıklı akış, uzun kabarcıklı akış, sıvı kümesi akışı (*liquid lump flow*), halkasal akış ve sisli akış.

Tibirić ve Ribatski (2014), yüksek hızlı akış görüntülemesi ile 400  $\mu\text{m}$  çaplı dairesel bir kanalda R134a ve R245fa akışkanlarının kaynamalı akış karakteristiklerini incelemiştir. Bütün akış desenleri boyunca aktif kabarcıklaşma odakları gözlemlendiğini, kabarcıkların tüp çapından çok daha küçük çaplarda yüzeyden ayrıldığını, 400  $\mu\text{m}$  çaplı kanalda kaldırma etkilerinin hala önemli olduğunu, kabarcık büyümesinin zamanın kareköküyle orantılı olduğunu belirtmişler ve sıvı sürüklenmesi gözlemlemişlerdir. Halkasal ve uzun

kabarcıklı akışlarda ara yüzün düzgün olmadığını ifade etmişlerdir. Kabarcık ayrılma frekansı, kabarcık ayrılma çapı ve ısı akısı için yeni bağıntılar önermişlerdir.

Law vd. (2014), diyagonal (*oblique*) kesimli ( $30^\circ$ ) kanatçıklardan oluşan mikrokanal ısı alıcı geometrisinin kaynamalı akış esnasında ısı transferi ve basınç düşümü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Düşük ısı akılarında ( $\approx 6 - 50 \text{ W/cm}^2$ ) kabarcıklı kaynamanın; orta ve yüksek ısı akılarında ( $\approx 50 - 120 \text{ W/cm}^2$ ) ise ince film buharlaşmalı taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ve eğik kanatçıklardan oluşan yapıda giriş basınç çalkantılarının oldukça azaldığını ve kaynamalı akışın daha kararlı hale geldiğini belirtmişlerdir.

Deng vd. (2014b), sinterleme yöntemi ile ürettikleri  $\Omega$  şekilli kesite sahip mikrokanallardan oluşan ısı alıcıda toz tipi ve boyutunun iki faz ısı transferi, basınç düşümü ve akış kararsızlıkları üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Gözenekli mikrokanalların kabarcıklı kaynamaya başlangıç için gerekli olan kızma farkını belirgin bir şekilde azalttığını, küresel tozlu gözenekli mikrokanallar için parçacık boyutundaki artışla ısı transferinin iyileştiğini, düzensiz tozlarda ise tam tersinin söz konusu olduğunu, en yüksek ısı transferi ve en düşük basınç kaybının en küçük parçacık boyutuna sahip düzensiz tozlu girintili gözenekli mikrokanallarda görüldüğünü belirtmişlerdir.

Kalani ve Kandlikar (2014), kanal çıkışına doğru kesit genişlemesi sağlayacak şekilde, açık mikrokanallar üzerine yerleştirdikleri kapağın geometrisinde (manifold şeklindeki) değişiklik yaparak bu yeni geometrinin kaynamalı akış performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Manifoldun giriş yüksekliği  $127 \mu\text{m}$  iken, çıkış yüksekliği  $727 \mu\text{m}$ 'dir. Elde ettikleri sonuçları düz manifoldlu mikrokanallar ve mikrokanal olmayan durumla karşılaştırmış ve ısı transferinde ve basınç düşümünde iyileşme olduğunu belirtmişlerdir.

Leão vd. (2014), paralel dikdörtgen kesitli kanallardan oluşan ısı alıcıda R407C'nin kaynamalı akışını deneysel olarak incelemiştir. Farklı kütle akıları, ısı akıları ve giriş sıcaklıklarında çalışmışlardır. Azalan kütle akısı ve aşırı soğutma miktarı ile daha düşük kızma farklarında aynı ısı miktarının elde edilebildiğini ve sabit bir kuruluk derecesinde ortalama ısı transfer katsayısının artan kütle akısı ile arttığını belirtmişlerdir. R407C için elde ettikleri sonuçları R134a ile karşılaştırmışlardır. Benzer deneysel koşullar altında, R134a'nın daha yüksek ısı transfer katsayıları sağladığını, ancak R407C'nin kaynamalı akışı esnasında daha düşük genlikli ve frekanslı basınç salınımlarının oluştuğunu belirtmişlerdir.



Deng vd. (2015a, b, c ve d), dikdörtgen ve  $\Omega$  şekilli kesite sahip pürüzsüz mikrokanallar ile bakır tozlarının sinterlenmesiyle oluşturulan  $\Omega$  şekilli kesite sahip pürüzlü mikrokanallardan oluşan farklı geometri ve hidrolik çaplardaki ısı alıcılarda, su ve etanol için kaynamalı akış deneyleri yapmıştır.  $\Omega$  şekilli geometrinin ısı transferinde iyileşme sağladığını, basınç düşümünü ve akış kararsızlıklarını azalttığını; suyun hem ısı transferi hem de basınç düşümü açısından etanolden daha iyi sonuçlar verdiğini; gözenekli yüzey yapısının kabarcıklaşma odaklarını arttırdığını ve ONB'nin başlaması için gerekli kızma farkını azalttığını; ısı transfer performansının ısı akısına bağlı olduğunu, kütle akısına çok az bağlı olduğunu ve kanal hidrolik çapı ile monotonik bir artış veya azalış göstermediğini belirtmişlerdir.

Law ve Lee (2015), düz kanatçıklı mikrokanallar ile yaklaşık aynı hidrolik çapa sahip diyagonal kesimli kanatçıklı mikrokanalları kaynamalı akışta basınç ve ısı transferi karakteristikleri açısından karşılaştırmıştır. FC-72 akışkanını kullanmışlardır. Diyagonal kesimli kanatçıkların, standart dikdörtgen kesitli kanallara göre ısı transferinde iyileşme sağladığını, kritik ısı akısını arttırdığını, duvar sıcaklık gradyanını ve basınç çalkantılarını azalttığını belirlemişlerdir. Ancak ilgili geometri için basınç düşümü daha fazladır. Akış görüntüleme yaparak diyagonal kesimli kanatçıklı mikrokanallarda taşınımli kaynama bölgesinde ince sıvı filminin sürekli geliştiğini ve kabarcıklı kaynama bölgesinde daha fazla kabarcıklaşma sağlandığını belirtmişlerdir.

Wang ve Peles (2015), tek bir mikrokanalda aşırı soğuk kaynamada jet akışı etkisini deneysel olarak incelemiştir. Aşırı soğuk kaynamada baskın ısı transfer mekanizmasının kabarcıklı kaynama olduğunu, ısı transfer katsayısının artan ısı akısı ile arttığını ve kütle akısından bağımsız olduğunu ve jet akışının etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Prajapati vd. (2015), düz dikdörtgen kesitli, genişleyen kesitli ve diyagonal kesimli mikrokanallardan oluşan ısı alıcıların kaynamalı akış performanslarını deneysel olarak incelemiş ve karşılaştırma yapmıştır. Diyagonal kesimli kanalların ısı transfer performansının diğer kanal türlerinden daha iyi ancak basınç düşümünün daha kötü olduğunu; diyagonal kanatçıklı kanalda ters akış ve kabarcık sınırlanması görülmediğini, bütün kanal türlerinde artan kütle akısı ile ısı transfer performansının azaldığını ve basınç düşümünün arttığını belirtmişlerdir.

Tibirica vd. (2015); 380  $\mu\text{m}$  iç çapa sahip paslanmaz çelik, yatay, dairesel bir kanalda doymuş kaynamalı akış esnasında kritik ısı akısına yönelik deneyler yapmıştır. Akışkan olarak R134a kullanmışlar ve sonuçları daha önce 1.1 ve 2.2 mm çaplı kanallar

için elde ettikleri değerlerle karşılaştırmışlardır. 1 mm'den büyük çaplı kanallar için iyi sonuçlar veren bağıntıların 0.38 mm için elde edilen sonuçları tahmin etmede başarısız olduğunu, bunun nedeninin kanal boyutlarının küçülmesi sonucunda meydana gelen daha baskın akış kararsızlıklarıyla ilgili olduğunu, girişte sınırlandırıcı kullanarak kararsızlıkların azaltılabileceğini ve bu durumda mevcut bağıntıların güvenilirliğinin artacağını belirtmişlerdir.

Bu bölümde özeti verilen deneysel çalışmalarda kullanılan kanallara ait geometrik özellikler ve deneylerde kullanılan test akışkanları Tablo 1.3.'te özet halinde verilmiştir.

Tablo 1.3. Deneysel çalışmalardaki kanallara ait geometrik özellikler ve test akışkanı türü

<b>Araştırmacılar</b>	<b>Kesit Alanı</b>	<b>Hidrolik Çap/ Çap (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Kanal Sayısı</b>	<b>Test Akışkanı</b>
Kew ve Cornwell (1997)	Dairesel	1390-3690	1	R-141b
Wongwises vd. (2000)	Dairesel	7200	1	HFC-134a + PAG yağı(%5)
Hetsroni vd. (2002)	Üçgen	$\approx 130$	21	Vertrel XF
Qu ve Mudawar (2003a,b)	Dikdörtgen	349	21	De-iyonize su
Wu ve Cheng (2003)	Trapez	158.8 ve 82.8	8 ve 15	De-iyonize su
Wu ve Cheng (2004)	Trapez	186	8	De-iyonize su
Steinke ve Kandlikar (2004)	Trapez	207	6	De-iyonize su
Qu ve Mudawar (2004)	Dikdörtgen	349	21	De-iyonize su
Liu vd. (2005)	Dikdörtgen	384	25	De-iyonize su
Balasubramanian ve Kandlikar (2005)	Dikdörtgen	333	6	De-iyonize su
Koşar vd. (2005)	Dikdörtgen	228	5	De-iyonize su
Lee ve Mudawar (2005a, b)	Dikdörtgen	349	53	R134a
Xu vd. (2005)	Dikdörtgen	436	26	Su ve metanol
Huh ve Kim (2006)	Dikdörtgen	103.5 ve 133	1	De-iyonize su
Koşar vd. (2006)	Dikdörtgen	227	5	De-iyonize su
Diaz ve Schmidt (2007)	Dikdörtgen	586	1	Su ve etanol
Liu ve Garimella (2007)	Dikdörtgen	384 ve 588	25	De-iyonize su
Kuo ve Peles (2007)	Dikdörtgen	223	5	De-iyonize su
Huh ve Kim (2007)	Kare	100	1	De-iyonize su
Chang ve Pan (2007)	Dikdörtgen	86.3	15	De-iyonize su
Huh vd. (2007)	Dikdörtgen	103.5	1	De-iyonize su

Tablo 1.3'ün devamı

<b>Araştırmacılar</b>	<b>Kesit Alanı</b>	<b>Hidrolik Çap/ Çap (µm)</b>	<b>Kanal Sayısı</b>	<b>Test Akışkanı</b>
Lee ve Pan (2008)	Dikdörtgen	33.7	1	De-iyonize su
Wang ve Cheng (2008)	Trapez	150	1	De-iyonize su
Choi ve Kim (2008)	Kare	500	1	De-iyonize su
Wang vd. (2008)	Trapez	186	8	De-iyonize su
Harirchian ve Garimella (2008)	Dikdörtgen-kare	160-749	2-60	FC-77
Kuo ve Peles (2009)	Dikdörtgen	223	5	De-iyonize su
Barber vd. (2009)	Dikdörtgen	727	1	n-pentan
Harirchian ve Garimella (2009a)	Dikdörtgen	100-749	2-61	FC-77
Harirchian ve Garimella (2009c)	Dikdörtgen-kare	160-749	2-60	FC-77
Zhang vd. (2009)	Dikdörtgen	100, 220, 337	25, 40, 100	De-iyonize su ve HFE-7100
Celata vd. (2010)	Dairesel	480	1	FC-72
Karayiannis vd. (2010)	Dairesel	520-4260	1	R134a
Zhang vd. (2010)	Dikdörtgen	100	100	De-iyonize su
Fu vd. (2010)	Dairesel	1500	1	Sıvı azot
Chen ve Garimella (2011)	Dikdörtgen	159	60	FC-77
Choi vd. (2011)	Dikdörtgen	505.5 ve 508.1	1	De-iyonize su
Ong ve Thome (2011a, b)	Dairesel	1030, 2200, 3040	1	R134a, R236fa ve R245fa
Liu vd. (2011)	Dikdörtgen	293 ve 1200	61 ve 20	De-iyonize su
Soupremanien vd. (2011)	Dikdörtgen	1400	1	Forane 365HX
Bogojevic vd. (2011)	Dikdörtgen	193.6	40	De-iyonize su
Harirchian ve Garimella (2012, 2010)	Dikdörtgen	96-707	2-61	FC-77
Saraceno vd. (2012)	Dairesel	1000	1	FC-72
Megahed (2012)	Dikdörtgen	248	45	FC-72
Del Col ve Bortolin (2012)	Dairesel	960	1	R245fa, R134a ve R32
Park vd. (2012)	Dikdörtgen	61-278	190 ve 95	FC-72
Wang ve Safiane (2012)	Dikdörtgen	571, 762, 1454	1	FC-72
Fu vd. (2013a)	Dikdörtgen/ (Genişleyen)	400-1120	6	HFE-7100

Tablo 1.3'ün devamı

<b>Araştırmacılar</b>	<b>Kesit Alanı</b>	<b>Hidrolik Çap/ Çap (µm)</b>	<b>Kanal Sayısı</b>	<b>Test Akışkanı</b>
Fu vd., 2013b	Dikdörtgen/ (Genişleyen)	147 (ortalama)	1	Etanol-su
Bogojevic vd., 2013	Dikdörtgen	194	40	De-iyonize su
Zhuan ve Wang, 2013	Dikdörtgen	230	40	R134a
Morshed vd., 2013	Dikdörtgen	672	1	De-iyonize su
Yang vd., 2013	Dikdörtgen	222 (ana kanal)	4	De-iyonize su
Nascimento vd., 2013	Dikdörtgen	167	50	R-134a
Kaya vd.,2013	Dairesel	249 ve 494	1	De-iyonize su
Tuo ve Hrnjak, 2013	Dikdörtgen	1000	25	R-134a
Alam vd., 2013	Dikdörtgen	385.7	30	De-iyonize su
Ali vd., 2013	Dairesel	781	1	R134a
Balasubramanian vd. (2013)	Dikdörtgen	480	40 ve 16	De-iyonize su
Liu vd. (2013)	Dairesel	900 ve 2000	1	De-iyonize su ve n-hexane
Yang vd. (2014a, b)	Dikdörtgen	222	5	De-iyonize su
Ritchey vd. (2014)	Dikdörtgen	291	35	FC-77
Yin vd. (2014)	Dikdörtgen	666	1	De-iyonize su
Deng vd. (2014a)	Ω şeklinde	786	14	De-iyonize su
Wang vd. (2014)	Dikdörtgen	571, 762, 1454	1	FC-72
Anwar vd. (2014)	Dairesel	1600	1	R152a
Mahmoud vd. (2014)	Dairesel	520 ve 1100	1	R-134a
Tibiriça ve Ribatski (2014)	Dairesel	400	1	R134a, R245fa
Law vd. (2014)	Dikdörtgen	480	40	FC-72
Deng vd. (2014b)	Ω şeklinde	800	13	De-iyonize su
Leão vd. (2014)	Dikdörtgen	167	50	R407C
Deng vd (2015a)	Ω ve Dikdörtgen	781 ve 776	14	De-iyonize su ve etanol
Deng vd. (2015b)	Ω-gözenekli	786	14	Etanol
Deng vd. (2015c)	Ω şeklinde	671, 786, 871	14	De-iyonize su
Deng vd. (2015d)	Ω-pürüzlü	798 ve 781	14	De-iyonize su ve etanol
Law ve Lee (2015)	Dikdörtgen ve diyagonal	541	40	FC-72
Wang ve Peles (2015)	Dikdörtgen	391	1	HFE-7000
Prajapati (2015)	Dikdörtgen, genişleyen ve diyagonal	522	12	De-iyonize su
Tibiriça vd. (2015)	Dairesel	380	1	R134a

### 1.5.2. Teorik Çalışmalar

Lockhart ve Martinelli (1949), literatürden derledikleri verileri kullanarak geniş bir veri tabanı oluşturmuş ve makro kanallarda basınç düşümüne yönelik öncü çalışmalardan birini yapmıştır. Veri tabanı, çapları 1.49 ile 25.8 mm arasında değişen dairesel kanallarda izotermal, iki fazlı, iki bileşenli akışlara ait (hava-su, hava-benzin, hava-kerosen ve hava-çeşitli yağlar) verilerden oluşmaktadır. Basınç düşümünü, literatürde Lockhart-Martinelli parametresi olarak adlandırılan bir parametre ile bağıntı haline getirmişlerdir. Tanımladıkları bu parametre, boru içerisinde yalnızca sıvı aktığı durumdaki basınç düşümünün, yalnızca gaz aktığı durumdaki basınç düşümüne oranının karekökü olarak ifade edilir. Lockhart-Martinelli parametresi günümüzde mikrokanallar için geliştirilen basınç düşümü bağıntılarında da sıklıkla kullanılmaktadır.

Hsu (1962), kabarcık oluşumu üzerine çalışmıştır. Kabarcıklaşmanın gerçekleşebileceği, kabarcıklaşma odağı yarıçap aralığının; aşırı soğuma miktarı, sistem basıncı, akışkanın termo-fiziksel özellikleri ve kızgın sıvı tabakası kalınlığının fonksiyonu olduğunu göstermiştir.

Chen (1966), makro kanallarda, kaynamalı akış için ısı transfer katsayısını belirlemek üzere bir bağıntı geliştirmiştir. Bu bağıntıda, taşınımlı kaynama ve kabarcıklı kaynamanın etkilerini süperimpoze etmiştir. Altı farklı kaynaktan topladığı 600'ün üzerinde veriyi kullanmıştır. Veri tabanı, düşey olarak yerleştirilmiş dairesel ve halkasal kanallarda altı farklı akışkana (Su, metanol, sikloheksan, pentan, heptan ve benzin) ait yukarı ve aşağı yönlü akış için verileri kapsamaktadır.

Peng vd. (1998), mikrokanallarda, kaynama karakteristiklerini ve bu durumun altında yatan koşulları daha iyi anlayabilmek için sıvıların faz değişimini termodinamik açıdan analiz etmiştir. Mikrokanallardaki faz geçişini belirleyen boyutsuz bir parametre türetmişlerdir. Mikrokanal yeterince küçük olduğu zaman, oldukça yüksek ısı akıları ve kızma farklarının ortaya çıktığını belirtmiş ve sıvının termo-fiziksel özelliklerinin kabarcıklaşma üzerindeki etkilerini tanımlamışlardır.

Celata vd. (2001), üniform olarak ısıtılan düşey dairesel bir kanalda, doymuş kaynamalı akışta kritik ısı akısını belirlemek için analitik bir model geliştirmiştir. Elde ettikleri modeli deneysel verilerle karşılaştırmış ve özellikle kuruluk derecesinin 0.2 – 1 aralığı için hassas sonuçlar elde etmişlerdir.

Ghiaasiaan ve Chedester (2002), mikro tüplerde suyun kaynama başlangıcıyla ilgili verileri analiz etmiştir. Mikro tüpleri, çapı 0.1 mm ile 1 mm arasındaki tüpler olarak tanımlamışlardır. Makro ölçekli model ve bağıntıların mikro tüplerde kaynamanın başlangıcına neden olan ısı akısını olduğu değerden daha düşük olarak tahmin ettiğini belirtmişlerdir. Mikrokanallardaki kaynama başlangıcının duvar boşluklarında oluşan mikro kabarcıkları bastırma eğiliminde olan termo kapiler kuvvet ile kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir. Bunun için de mikro tüplerdeki kaynamanın başlangıcını tahmin etmek için yarı ampirik bir yöntem önermişlerdir.

Kandlikar (2004), mikrokanallarda kaynamalı akışlarda meydana gelen iki faz akış desenleri ve ısı transfer karakteristiklerini kontrol eden kuvvetleri incelemiştir. Bu kuvvetlerin yüzey gerilme kuvveti, buharlaşma momentum kuvveti, viskoz kuvvet ve atalet kuvvetinden oluştuğunu göstermiştir. Kaynamalı akışlarla ilgili olarak  $K_1$  (buharlaşma momentum kuvvetinin atalet kuvvetine oranı) ve  $K_2$  (buharlaşma momentum kuvvetinin yüzey gerilme kuvvetine oranı) olmak üzere iki yeni boyutsuz parametre tanımlamıştır. Mikrokanallarda kabarcıklaşma için gerekli olan kızma farkının kanal çapı küçüldükçe akışkan türüne bağlı olarak artacağını (2 ile 10 °C arası); sıvı içerisindeki çözünmüş gazlar, kanal geometrisindeki keskin köşeler ve akış salınımlarının kızma farkını azaltacağını ve mikrokanallarda kaynamalı akış esnasında baskın olan ısı transfer mekanizmasının kabarcıklı kaynama olduğunu ifade etmiştir.

Mosdorf vd. (2005), kararsız kaynama durumlarını *correlation coefficient*, *attractor reconstruction*, *correlation dimension* ve *largest Lyapunov exponent* yöntemlerini kullanarak analiz etmiştir. Mikrokanallardaki düzensiz salınımların ortaya çıkmasına neden olan süreçleri tartışmışlardır. Belirli şartlar altında mikrokanal sisteminin ısıl osilatör gibi çalıştığını, mikrokanallara sağlanan ısının, ısıtma yüzey sıcaklığını arttırdığını; buna karşın, kanallar içerisinde iki fazlı akışın ortaya çıkmasının ısıtma yüzey sıcaklığını azalttığını belirtmişlerdir.

Mukherjee ve Kandlikar (2005), bir mikrokanal içerisinde büyüyen buhar kabarcığı etrafındaki akış ve termal alanları elde etmek, sıvı-buhar ara yüz davranışını ve bunun kanal duvarlarıyla etkileşimini incelemek ve sıvının aşırı ısı (superheat), Reynolds sayısı ve yer çekimi kuvvetinin kabarcık büyüme hızı üzerindeki etkisini belirlemek için sayısal bir çalışma yapmıştır. Korunum denklemlerinin çözümünde SIMPLER (*semi-implicit method for pressure-linked equations revised*); sıvı-buhar ara yüzü için ise seviye düzenleme yöntemini (*level set method, LSM*) kullanmışlardır. Kabarcığın kanal duvarı

boyutlarına gelene kadar sabit bir hızla büyüdüğünü, sınırlama meydana geldikten sonra aksel doğrultuda hızlanarak büyümeye devam ettiğini, bunun nedeninin ince sıvı filminde meydana gelen buharlaşma olduğunu, kabarcık büyüme hızının sıvının sahip olduğu kızma ısısı ile arttığını, fakat artan Reynolds sayısı ile azaldığını, yer çekimini kuvvetinin kabarcık büyüme hızı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu (200 µm hidrolik çaplı kare kesitli kanal) belirtmişlerdir.

Dhir vd. (2007), hem havuz kaynaması hem de kaynamalı akışta tek ve çoklu kabarcık oluşumunu sayısal olarak modelleyerek kabarcık dinamiği ve ısı transferini incelemiştir. Kaynamalı akışları modellemedeki en büyük problemin ara yüz şeklini tanımlamadaki zorluk olduğunu belirtmişler ve bunun için seviye düzenleme yöntemini kullanmışlardır. Büyüyen kabarcığın şekli, kabarcık ayrılma çapı ve kabarcık büyüme periyodu için elde ettikleri sonuçları literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Ayrıca, yer çekimi kuvveti ve temas açısı etkisini de incelemiştir.

Thome ve Consolini (2010), iki fazlı mikrokanal akışları için önerilen kaynama mekanizmalarını analiz etmiş, tanımlamış ve bunları mevcut deneysel ısı transferi sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Isı transfer katsayılarının ısı akısına güçlü bir şekilde bağlı olmasının ince sıvı filmi buharlaşması ile açıklanabileceğini belirtmişlerdir.

Kandlikar (2010a), mikrokanallarda kaynamalı akışta etkili olan kuvvetleri ve bu kuvvetlerin etki düzeylerini belirlemek üzere skala analizini kullanmıştır. Yüzey gerilmesi ve buharlaşma momentum kuvvetinin mikro ölçekte baskın olduğunu, kaldırma kuvveti etkisinin ihmal edilebilecek seviyelerde olduğunu (100 – 200 µm'nin altındaki çap değerleri için) ve etkili akış deseninin uzun kabarcıklı akış olduğunu belirtmiştir. Uzun kabarcıklı kaynamalı akış ile havuz kaynamasında oluşan bir kabarcık etrafındaki ısı transferi arasında benzerlik olduğunu ve uzun kabarcıklı akışta geçici rejimde iletim ve mikro taşınımın baskın ısı transfer mekanizmaları olduğunu ifade etmiştir.

Zhang vd. (2010), mikrokanal akış salınımlarının aktif kontrolü ve zaman bağımlı analizi için sistematik bir yapı vermiştir. Giriş bölgesindeki akış sıkıştırılabilirliğini ve mikrokanal kaynamalı akış sisteminde bununla ilişkili geçici salınımları sayısal olarak ifade etmek için, momentum denge denkleminde yığın ösilatör modeli (*lumped oscillator model*) türetmişler ve hem analitik hem de sayısal lineer olmayan parametre tanımlama yöntemleri önermişlerdir.

Kandlikar (2010b), havuz kaynaması ve kaynamalı akış arasındaki farkları ve benzerlikleri incelemiştir. Mikrokanallarda kaynamalı akışlardaki uzun kabarcıklı akış

deseninde geçici rejimde iletim, mikro taşınım ve mikro tabaka buharlaşmasının havuz kaynamasındakiyle benzer olduğunu, akış hızı arttıkça mikrokanallardaki akışın mini ve makro boyutlardakine benzeyeceğini, mikrokanallardaki basınç düşümünün yüksek olduğunu (çalışma basıncı dikkate alındığında göreceli olarak), mikro kabarcık oluşumunu iyileştirerek ve uzun kabarcıklı akış desenini erteleyerek ısı transferinde iyileşme sağlanacağını belirtmiştir.

Megahed ve Hassan (2010), mini ve mikrokanallı ısı alıcılarda halkasal akış rejimindeki kaynamalı akış ısı transfer katsayılarını tahmin etmek için analitik bir model önermiştir. Bu model, Reynolds benzeşimine dayalı olarak akışkanın yerel termo-fiziksel karakteristiklerini ve duvardaki kayma gerilmesine dayalı olarak ısı transfer katsayısını belirleyecek şekilde oluşturulmuştur. Bu model, ayrıca, sürtünme ve ivmelenme basınç değişimleri etkilerini de içermektedir. Literatürdeki farklı çalışmalarını dikkate alarak modelin doğruluğunu test etmişlerdir. Model oluşturulması aşamasında, sıvı-buhar ara yüzünün pürüzsüz olduğu, duvardaki ince sıvı filminde bir boyutlu sürekli ve laminar akış olduğu, sıvı ve buhar özelliklerinin doyma sıcaklığında sabit olduğu ve kanal içerisinde her iki fazın da ayrı aktığı kabulü yapılmıştır.

Kandlikar (2010c), mini ve mikrokanallarda kaynamalı akışta CHF'ye neden olan kuvvetlerin tanımlanması için skala analizini kullanmış ve CHF'yi tahmin etmek için yerel parametrik bir model geliştirmiştir. Weber, Kılcallık ve  $K_2$  sayılarının, mini ve mikrokanallardaki CHF'yi belirlemek için temel boyutsuz sayılar olduğunu ve 200  $\mu\text{m}$  hidrolik çapın altındaki kanallarda düşük kütle akılarında yüzey gerilmesinin daha etkili olduğunu belirtmiştir.

Gedupudi vd. (2011), giriş haznesinde sıkıştırılabilir hacim bulunan tek bir mikrokanalda kabarcık büyümesi için basit 1 boyutlu bir model geliştirmiştir. Dikdörtgen kesitli tek bir kanalda kısmi ve tam olarak sınırlandırılmış kabarcık büyümesini hesaba katmışlardır. Bu model ile kanal boyutlarının ve akışkan özelliklerinin basınç çalkantısı genliği, ters akış ve buharlaşan ince sıvı filmi ile kaplanan kanal bölümleri için geçen süre belirlenebilmektedir.

Mukherjee vd. (2011), kare kesitli ( $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ) bir mikrokanal içerisinde buhar kabarcığının gelişimi sırasında duvardaki ısı transfer mekanizmalarını incelemiştir. Duvardaki ısı transferinin artan kızma farkı ve kabarcık büyüme hızı ile arttığını ve kütle akısından neredeyse bağımsız olduğunu; yüzey gerilmesinin kabarcık büyümesi üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğunu, fakat kabarcık şekillerini etkilediğini ve duvardaki ısı



transferi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu; kabarcık arayüz hareketlerinin temas açısına bağlı olduğunu, en küçük temas açısına sahip (bu çalışma için 20°) kabarcıkta en yüksek büyüme hızı ve ısı transferi gerçekleştiğini ve duvardaki ısı transferini etkileyen en önemli faktörün sıvı-buhar arayüz hareketi olduğunu belirtmişlerdir.

Lee vd. (2012b), kanatçıklı yapıdaki bir mikrokanalda kaynamalı akışla ilgili kanatçık geometrisi ve yerleşiminin ısı transferi ve kabarcık büyümesi üzerindeki etkisini incelemek üzere direkt sayısal simülasyonlar (*direct numerical simulations*) yapmıştır. Lee vd. (2010, 2012a) tarafından faz arayüzleri için geliştirilen keskin arayüz seviye düzenleme (*sharp-interface level-set*) yöntemini, sıvı-buhar arayüzünde faz değişim etkisini içerecek ve kanatçık yüzeyleri üzerinde kaymasız (*no-slip*) ve temas açısı koşullarını uygulayacak şekilde geliştirmişlerdir. Kanatçıklı mikrokanalda kaynamada ısı transferinin düz mikrokanallara göre %77'ye kadar iyileşebileceğini, deneysel çalışmalara gerek duyulmadan optimum kanatçık konfigürasyonlarının sayısal olarak geliştirilebileceğini, optimum kanatçık yüksekliğinin 0.03 mm olduğunu ve azalan kanatçık uzunluğu ile ısı transferinin iyileştiğini belirtmişlerdir.

Costa-Patry ve Thome (2013), yaptıkları teorik çalışma ile mikrokanallardaki ısı transfer katsayıları için akış desenine dayalı yeni bir tahmin yöntemi geliştirmiştir. Uzun kabarcıklı ve halkasal akışlar arasında ısı akısına bağlı yeni bir geçiş kriteri kullanmış ve önerdikleri modelin ısı transfer katsayısını başarılı bir şekilde tahmin edebildiğini belirtmişlerdir.

Kim ve Mudawar (2013a, b ve c), literatürden topladıkları verileri kullanarak, sırasıyla, doymuş kaynamalı akışta sürtünme basınç gradyanı, kuruma başlangıcı ve kuruma öncesi ısı transfer katsayılarının tahmini için genel bağıntılar önermiştir.

Magnini vd. (2013a), mikrokanallarda çoklu kabarcıklı durumunu sayısal olarak modellemiştir. Birbirini takip eden kabarcıklar ile bu kabarcıklar arasında kalan sıvı öbeğinin (uzun kabarcıklı akış durumu) hidrodinamik ve ısı etkileşimini incelemişlerdir. Ticari bir program olan ANSYS 12 (*Volume Of Fluid interface capturing method*) kullanmış ve yüzey gerilme kuvvetleri ve faz değişimi için programa harici fonksiyon tanıtmışlardır. Isı transfer katsayılarının yerel değerlerini belirlemek üzere çoklu kabarcıklı durumu kapsayan bir ısı transfer modeli önermişlerdir. Kaynamalı akış esnasında kabarcık hareketi nedeniyle ısı etkilerinin hidrodinamik etkilerden daha geniş bölgeyi kapsadığını, kabarcıklar arasındaki sıvıda vorteks oluştuğunu, bu vorteksin kanal duvarları üzerindeki

sıvıyı besleyerek ısı transferini iyileştirdiğini ve kabarcıklar arasındaki sıvı bölgesinin toplam ısı transferi performansına katkısının yüzey üzerindeki sıvı filmiyle kıyaslanabilir düzeylerde olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, ısının yüzey üzerindeki ince sıvı filminden geçici rejimde aktarılmasına dayalı yeni bir ısı transfer modeli önermişlerdir.

Magnini vd. (2013b), kaynamalı akış durumundaki kabarcık dinamiği ve ısıl etkileri incelemek için mikrokanallarda tek bir kabarcığın sayısal simülasyonunu yapmıştır. Sayısal simülasyon için FLUENT kullanmış ve kılcallık etkilerini ve arayüzdeki kütle ve enerji değişimini programa tanıtmışlardır. Böylelikle, bir mikrokanalda kaynamalı akış esnasında duvardaki ısı transferini etkileyen yerel olayları ve kabarcık dinamiğini ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir. Kabarcığın akış doğrultusunda zamanla eksponansiyel olarak ivmelendiğini, kabarcıkla duvar arasındaki ince sıvı filmi bölgesinde baskın mekanizmanın film buharlaşması olduğunu ve sıvı/buhar yoğunluk oranı arttıkça kabarcığın çok daha hızlı geliştiğini belirtmişlerdir.

Kim ve Mudawar (2014a), üniform bir şekilde çevresel olarak ısıtılan mini/mikrokanallarda halkasal kaynamalı akışla ilişkili iki faz ısı transfer karakteristiklerini incelemek için teorik bir model geliştirmiştir. Bu modelde halkasal sıvı filmi ve merkezi buhar bölgesi arasındaki ara yüzün düz olduğu ve film kalınlığının da çevresel olarak pürüzsüz olduğu kabulüne dayalı bir kontrol hacmi tasarlamışlardır. Damlacık sürüklenmesi, damlacık birikmesi ve yüzey gerilmesi nedeniyle ara yüz çalkantılarının bastırılması etkileri model içerisine dahil edilmiştir. Ara yüzdeki türbülans çalkantılarının sönümlenmesi özellikle türbülanslı kayma zorlamalı-filmlere göre geliştirilen eddy difüzyon modeli yardımıyla model içerisine dahil edilmiştir.

Lee ve Son (2014), iyileştirilmiş yüzeyli bir mikrokanalda kaynamalı akış için direkt sayısal simülasyon yöntemini uygulamıştır. Ara yüzdeki faz değişim etkisi, temas açısı ve kayma olmaması koşulunu dikkate almışlardır. Mikrokanallar içerisinde kanatçıkları enine ve boyuna doğrultularda yerleştirmiş ve düz kanallı mikrokanallara göre ısı transferinde iyileşme gözlemlemişlerdir. Uzunlamasına yerleştirilen kanatçık konfigürasyonunun daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Gong ve Cheng (2014), mikrokanallardaki kabarcık oluşumunu, sayısal olarak modellemiştir. Duvarında sabit ısı akısı koşulu altında, akışkan giriş hızı, kabarcık temas açısı ve ısıtıcı boyutunun etkisini, sabit yüzey sıcaklığı koşulu altında ise giriş sıcaklığı, temas açısı ve kızma farkının etkisini incelemişlerdir. Giriş hızı arttıkça veya ısıtıcı uzunluğu azaldıkça kabarcık öbeğinin uzunluğunun azaldığını, kabarcık ayrılma çapının

temas açısından neredeyse bağımsız olduğunu, Nusselt sayısının temas açısı arttıkça azaldığını belirtmişler ve elde ettikleri sonuçlarda gerçek gazlar için hal denkleminin kullanılması nedeniyle bazı noktalarda yüksek basınç salınımları ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Mikro ve/veya mini kanallarda kaynamalı akışla ilgili çalışmaların sayısı arttıkça, çok kapsamlı derleme çalışmaları (Kandlikar, 2002; Thome, 2004; Bergles ve Kandlikar, 2005; Kandlikar, 2005; Cheng ve Mewes, 2006; Thome, 2006; Tadriss, 2007; Tibirica ve Ribatski, 2013; Kandlikar vd., 2013; Szczukiewicz vd., 2014; Kadam ve Kumar, 2014; Kim ve Mudawar, 2014b ve 2014c; Asadi vd., 2014; Wang and Wang, 2014; Zhou vd., 2015; Kalani ve Kandlikar, 2015) literatürde yer bulmuştur. Bu çalışmalar, kaynamalı akışla ilgili literatürde oluşan bilgi birikimini ayrıntılı bir şekilde sunmaktadır.

Literatür özetinden de görüldüğü üzere, mikrokanallarda kaynamalı akış, akış fiziğinin karmaşık yapısı nedeniyle birçok belirsizliği içeren açık bir konudur. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar veya sonuçlar üzerinden yapılan yorumlara bakıldığında zaman birbiriyle çelişkili ifadelerin olduğu görülmektedir. Üzerinde görüş birliği sağlanamamış bazı konular aşağıda kısa özet halinde verilmiştir.

Tran vd.'ne (1996) göre; ısı transfer katsayısı artan ısı akısı ile artar; kütle akısı ve kuruluk derecesinden ise bağımsızdır. Ayrıca, kabarcıklı kaynama baskın ısı transfer mekanizmasıdır. Qu ve Mudawar (2003b), kütle akısının doymuş kaynamalı akışta önemli bir parametre olduğunu, ısı transfer katsayısının artan kütle akısı ile arttığını, artan kuruluk derecesi ile azaldığını ve ısı akısına çok az bağlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir. Steinke ve Kandlikar (2004), ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığını ve kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmiştir. Huh ve Kim (2007), ısı transfer katsayısının kütle akısı ve kuruluk derecesinden neredeyse bağımsız olduğunu ifade etmiştir. Saraceno vd. (2012), ısı transfer katsayısının ısı akısı ile arttığını ve kuruluk derecesine çok az bağlı olduğunu belirtmiştir. Zhuan ve Wang (2013), kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akışta ısı transfer katsayısının ısı akısı ile arttığını; yarı halkasal ve halkasal akışta ise ısı transfer katsayısının ısı akısından bağımsız olduğunu ve kütle akısı ile artıp, kuruluk derecesi ile azaldığını belirtmiştir. Leão vd. (2014) ise sabit ortalama bir kuruluk derecesinde ortalama ısı transfer katsayısının artan kütle akısı ile arttığını ifade etmiştir. Qu ve Mudawar (2003b), Collier ve Thome'a (1994) atıfta bulunarak literatürde yaygın olarak kanallardaki doymuş kaynamalı akışı iki etkin

mekanizmanın gerçekleştirdiğini ve bunların kabarcıklı kaynama ve zorlanmış taşınımı kaynama olduğunu ifade etmiştir. Kabarcıklı kaynama bölgesinin, kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akışlarla; taşınımı kaynama bölgesinin ise halkasal akış deseniyle ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Taşınımı kaynamanın baskın olduğu bölgede ısı transferinin ince halkasal sıvı filmi boyunca tek fazlı taşınım ve sıvı-buhar ara yüzünde buharlaşma ile gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Lee ve Mudawar (2005b), yaptıkları deneysel çalışmada kabarcıklı kaynamanın yalnızca çıkış kurulum derecesinin 0.05'ten küçük olduğu durumlarda gerçekleştiğini bu durumun düşük ısı akılarına karşılık geldiğini, diğer kurulum derecelerinde ise halkasal film buharlaşmasının etkin olduğunu belirtmişlerdir. Koşar vd. (2005), yüksek kaynama ve Re sayıları için taşınımı kaynamanın; bu sayıların düşük değerleri için ise kabarcıklı kaynamanın baskın olduğunu belirtmiştir. Harirchian ve Garimella (2010), kaynamalı akış için fiziksel bir sınırlama değeri tanımlamış ve bu değerin altındaki, yani fiziksel sınırlamanın olduğu durumda etkin ısı transfer mekanizmasının kabarcıklı kaynama ve ince sıvı filmi buharlaşması; fiziksel sınırlama olmayan durum için ise sadece kabarcıklı kaynamanın etkin mekanizma olduğunu belirtmiştir. Deng vd. (2014a) ve Law vd. (2014), düşük ısı akısı ve kurulum derecelerinde kabarcıklı kaynamanın; orta ve yüksek ısı akılarında ise ince film buharlaşması ile ilişkili zorlanmış taşınımı kaynamanın etkin olduğunu belirtmiştir.

Etkin ısı transfer mekanizmasıyla ilgili elde edilen bulguların kendi içerisinde tutarsız olmasının yanı sıra, mekanizmanın belirlenmesine yönelik yapılan kabullerde de farklı görüşler vardır. Bazı araştırmacılar (Lazerek ve Black, 1982; Tran vd. 1996; Huh ve Kim, 2006 ve 2007) yerel ısı transfer katsayısının ısı akına bağlı olup, kütleli akı ve kurulum derecesine bağlı olmamasını kabarcıklı kaynamanın baskın olduğunu gösteren bir kriter olarak değerlendirmiştir. Qu ve Mudawar (2005b), bu şekilde ayırım yapan çalışmaları kabarcıklı kaynamanın ve taşınımı kaynamanın baskın olduğunu savunanlar olmak üzere iki gruba ayırmıştır. Kandlikar (2010a), söz konusu yargıyı savunan araştırmacıların, taşınım ile ısı transferinin kütleli debi ile arttığı kabulünden hareketle bu kanıya vardıklarını; hâlbuki bu durumun türbülanslı akış için geçerli olup, laminer akış durumunda (mikrokanallardaki akışın genellikle laminer olduğu düşüncesiyle) ısı transfer katsayısının genellikle kütleli debiden bağımsız olduğunu ifade etmiş ve ısı transfer katsayısıyla kurulum derecesinin değişiminin kaynama sayısı ve yoğunluk oranına bağlı olduğunu belirtmiştir. Tibiriça ve Ribatski (2014) de benzer bir şekilde bu tür yargıların genellikle havuz kaynama deneylerinde tanımlanan eğilimlere dayalı yapıldığını ve

tek başına yeterli bir yaklaşım olmadığını belirtmiştir. Isı transfer katsayısı eğilimleri ve baskın ısı transfer mekanizmasının türüne yönelik yapılan farklı değerlendirmelere ek olarak; akış desenleri, kaynamalı akış kararsızlıkları ve bunların sıcaklık ve basınç karakteristikleri üzerindeki etkileri gibi konularda ortaya koyulan farklılıklar, literatür özetinde ve önceki bölümlerde detaylı bir şekilde verilmiştir.

Belirtilen nedenlerle, sadece kütleli debi veya kuruluk derecesine olan bağıllık seviyesiyle, etkin mekanizma hakkında karar verip, oluşturulan bağıntıları bu kabule dayandırmak doğru değildir. Deney düzeneğinin hassas bir şekilde kurulması, ölçümlerin doğru alınması, deneysel çalışma koşullarının çeşitliliği, veri aralığının genişliği ve özellikle ölçümlerle paralel akış görüntüleme deneylerinin yapılması ve verilerin akış görüntüleme sonuçlarına bağlı olarak yorumlanıp, ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri hakkında karar verilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında mikrokanallarda doymuş kaynamalı akış için belirtilen kriterler bir bütün olarak ele alınarak tartışılmalı konular sonlandırılmaya çalışılmıştır.

## **1.6. Tezin Amacı, Kapsamı ve Özgün Niteliği**

Elektro-mekanik cihazların artan kapasitelerine karşı fiziksel boyutlarının küçülmesi, yüksek ısı yoğunluğu problemlerine sebep olmaktadır. Minyatür cihazların yüzeyinden, yüksek ısı akılarını uzaklaştırmak ve böylece aşırı ısınma problemlerini önlemek için en ilgi çekici çözümlerden biri mikrokanallarda kaynamalı akıştır.

Özellikle son on beş yıldır, mikrokanallarda kaynamalı akış yaygın bir şekilde çalışılmaktadır. Bu yöntem şu üç avantajı birlikte sunmasından dolayı gözdedir: (1) Yüksek yüzey alanı-hacim oranı, (2) oldukça az miktarda (ml mertebelerinde) iş akışkanı gereksinimi ve (3) buharlaşma gizli ısıısının kullanımı. Bu nedenle, mikrokanallarda kaynamalı akış, yüzey sıcaklıkları nispeten sabit kalırken, yüksek miktarlarda ısı akısı uzaklaştırabilme potansiyeline sahiptir. Bu alandaki gelişmeler, özellikle otomotiv, bilgisayar, biyomedikal ve savunma sektörleri tarafından yakından takip edilmektedir. Ancak, Kandlikar (2010a ve b) tarafından da belirtildiği üzere yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar henüz beklentileri karşılayabilecek düzeyde değildir. Temel sebep, akışın karmaşık yapısıdır. Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, ısı transfer mekanizmaları, basınç düşümü karakteristikleri ve iki fazlı akış kararsızlıklarıyla ilgili hala çok sayıda çözülmemiş konu vardır (Liu ve Garimella, 2007; Chen ve Garimella, 2011; Wang ve

Wang, 2014; Deng vd., 2015a; Tibiriça vd., 2015). Bu sebeple, literatürdeki belirsizliklerin ve çelişkilerin giderilebilmesi için yüksek hızlı akış görüntüleme teknikleriyle desteklenen yeni ve kapsamlı deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır.

Bu doktora tezinin amacı, mikrokanallarda kaynamalı akış olayı ile ilgili olarak literatürdeki eksikliklerin ve çelişkilerin giderilmesine yönelik geniş parametre aralığında, kapsamlı bir deneysel çalışma yapmaktır. Bu kapsamda, farklı geometriler, kütle akıları ve ısı akılarında çalışılmıştır. Paralel mikrokanallardan oluşan ısı alıcılarda, kanal uzunluğu boyunca termoelemanlarla sıcaklık ölçümleri alınmış ve yerel ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Test bölgesi giriş ve çıkış haznelere basınç ölçümleri alınarak basınç düşümü belirlenmiştir. Eş zamanlı akış görüntüleme çalışmaları ile destekleyerek farklı kütle akıları, kuruluk dereceleri ve ısı akısı değerlerinin iki faz ısı transfer katsayısını ve toplam basınç düşümünü nasıl etkilediği incelenmiş ve fiziksel mekanizmayla ilgili özgün bulgular elde edilmiştir. Deneysel iki faz ısı transfer katsayısı verileri, literatürde makro ve mikrokanallar için tanımlanmış mevcut bağıntılarla karşılaştırılmış ve bu bağıntıların genel geçerliliği incelenmiştir. Ayrıca, ısı transfer katsayısı için yeni bir ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Sıcaklık ve basınç ölçümlerine ek olarak, eş zamanlı yapılan yüksek hızlı akış görüntüleme çalışmaları ile kaynama kararsızlıkları, akış desenleri ve kısaca fiziksel mekanizmayla ilgili bulgular elde edilmiştir. 60 ile 300 µm arasında farklı genişlik ve derinlik değerlerine sahip dikdörtgen/kare kesitli paralel mikrokanallardan oluşan ısı alıcılarda AR ve hidrolik çapın doymuş kaynamalı akışta ısı transferi ve toplam basınç düşümü üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Literatürdeki en büyük eksikliklerden biri AR etkisinin detaylı bir şekilde incelenmemiş olmasıdır. Singh vd. (2008), dikdörtgen kesitli tek bir mikrokanalda suyun kaynamalı akış olayı için toplam basınç düşümü üzerinde AR etkisini incelemiştir. Harirchian ve Garimella (2009a, b), di-elektrik akışkan olan FC-77'nin kaynamada ısı transferi üzerinde kanal kesit alanının etkisini incelemiştir. Soupremanien vd. (2011),  $H_{ch}/W_{ch}$  oranının mini kanallarda kaynamalı akışlarda basınç düşümü ve ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Mini kanal kategorisine giren ölçülerde iki farklı tek kanalda çalışmışlardır. Kanalların genişlik ve derinlik değerleri sırasıyla 5.6 mm ve 0.8 mm ile 2.3 mm ve 1 mm'dir. İki farklı  $H_{ch}/W_{ch}$  değeri için Forane 365 HX akışkanıyla çalışma yapmışlardır. Fu vd. (2013a), HFE-7100 akışkanı için kaynamalı akış deneyleri yapmıştır. Kullandıkları kanalların çoğu genişleyen kesitli olup, kanal genişlikleri 300 µm ile 1590 µm arasında değişmektedir.

Hidrolik ap etkisi açısından da benzer durum söz konusudur. Wang ve Sefiane (2012), hidrolik çapları sırasıyla 571, 762 ve 1454  $\mu\text{m}$ ; AR oranları ise sırasıyla 20, 20 ve 10 olan kanallarda FC-72'nin kaynamalı akışını incelemiştir. Wang vd. (2014), aynı geometri ve akışkan için hidrolik çapın basınç karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Deng vd. (2015c), sırasıyla 671, 786 ve 871  $\mu\text{m}$  hidrolik çaplara sahip yeniden girişli (*reentrant*) ve gözenekli mikrokanallarda de-iyonize suyun kaynamalı akışını incelemiştir.

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak, ilk kez, dikdörtgen kesitli paralel mikrokanallarda (hidrolik çap sabit tutulmak koşuluyla) AR'nin de-iyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Benzer şekilde, hidrolik çap etkisi için de aynı durum söz konusudur (sabit AR değerlerinde).

Paralel kanallı düzenlemeler, kanallar arası etkileşim nedeniyle tek kanallı yapılardan farklıdır. Çoklu kanal konfigürasyonlarında paralel kanal kararsızlığının görülmesi, tek mikrokanal düzenlemelerinde debi değerlerinde meydana gelen ekstra kısıtlamalar ve yine kabarcık sınırlanması meydana gelen tek kanal durumunda yüksek genlikli sıcaklık ve basınç salınımlarının görülmesi gibi farklılıklar söz konusudur. Bu farklılıklar, ısı transfer katsayısı, kritik ısı akısı, kuruma, basınç düşümü ve sıcaklık-basin salınımları gibi kaynamalı akıştaki karakteristikleri etkilemektedir.

Literatürdeki çalışmalarda genellikle, soğutucu akışkanlar, Fluorinert türevleri veya HFE-7100 gibi akışkanlar kullanılmaktadır. Bu akışkanlar genellikle kaynama noktalarının suya göre daha düşük olması nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak, bu akışkanların buharlaşma gizli ısı değerleri suyunkine göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, bu çalışmada, temini en kolay, gizli ısı belirtilen akışkanlara göre çok daha yüksek ve zararsız bir akışkan olan su kullanılmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan bazı akışkanlara ait termo-fiziksel özellikler Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tez kapsamında hem parametre çeşitliliği hem de veri sayısı bakımından geniş bir veri tabanı oluşturulmuştur. Ayrıca, sıcaklık ve basınç ölçümlerine ek olarak, eş zamanlı elde edilen akış görüntüleri aracılığıyla akışın fiziksel mekanizması hakkında önemli bulgular elde edilmiştir. Ayrıca, dikdörtgen/kare kesitli mikrokanallarda kaynamalı akışta ısı transferi için özgün bir bağıntı geliştirilmiştir.

Tablo 1.4. Kaynamalı akışta yaygın olarak kullanılan akışkanların özellikleri (1atm, 25°C)

	Su	HFE-7100	FC-72	FC-77
Kaynama noktası (°C)	100	61	56	97
Buharlaşma entalpisi (kJ kg <sup>-1</sup> )	2442.4	111.6	88	83.74
Isı iletim katsayısı (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.610	0.062	0.057	0.063
Özgül ısı, c <sub>p</sub> (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	4180	1255	1100	1046
Yoğunluk (kg m <sup>-3</sup> )	997	1370	1680	1780
Yüzey gerilmesi (N m <sup>-1</sup> )	0.0721	0.01019	0.0105	0.015

Su (Incropera vd., 2007); HFE7100 (El-Genk ve Bostanci, 2003); FC-72 (Barber vd., 2010) ve FC-77 (URL-3, 2014).



## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, farklı geometrik konfigürasyonlara sahip paralel mikrokanallarda, de-iyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Her biri, yirmi dokuz paralel mikrokanaldan oluşan on farklı silikon ısı alıcı kullanılmıştır. Isı alıcıların uzunluk ( $L$ ) ve genişlikleri ( $W_T$ ) sırasıyla 48 mm ve 13.5 mm'dir. Kanalların genişlik ve derinlik değerleri ise sırasıyla 100 – 300  $\mu\text{m}$  ve 60 – 250  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. AR etkisinin incelenmesi için hidrolik çapları aynı (100  $\mu\text{m}$ ) kanallardan oluşan altı farklı ısı alıcı kullanılmıştır. Benzer şekilde, hidrolik çap ( $D_h$ ) etkisinin incelenmesi için aynı AR değerlerine sahip ( $AR = 1$ ) kanallardan oluşan dört farklı ısı alıcı kullanılmıştır. Farklı kütle akımlarında (51 – 728.7  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ), ısı yüklerinde (44.1 – 100.2 W) ve sabit akışkan giriş sıcaklığında ( $50 \pm 1$  °C) çalışılmıştır. Deneyler boyunca ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 22 °C'de sabit tutulmuştur.

### 2.1. Deney Düzenegi ve Test Prosedürü

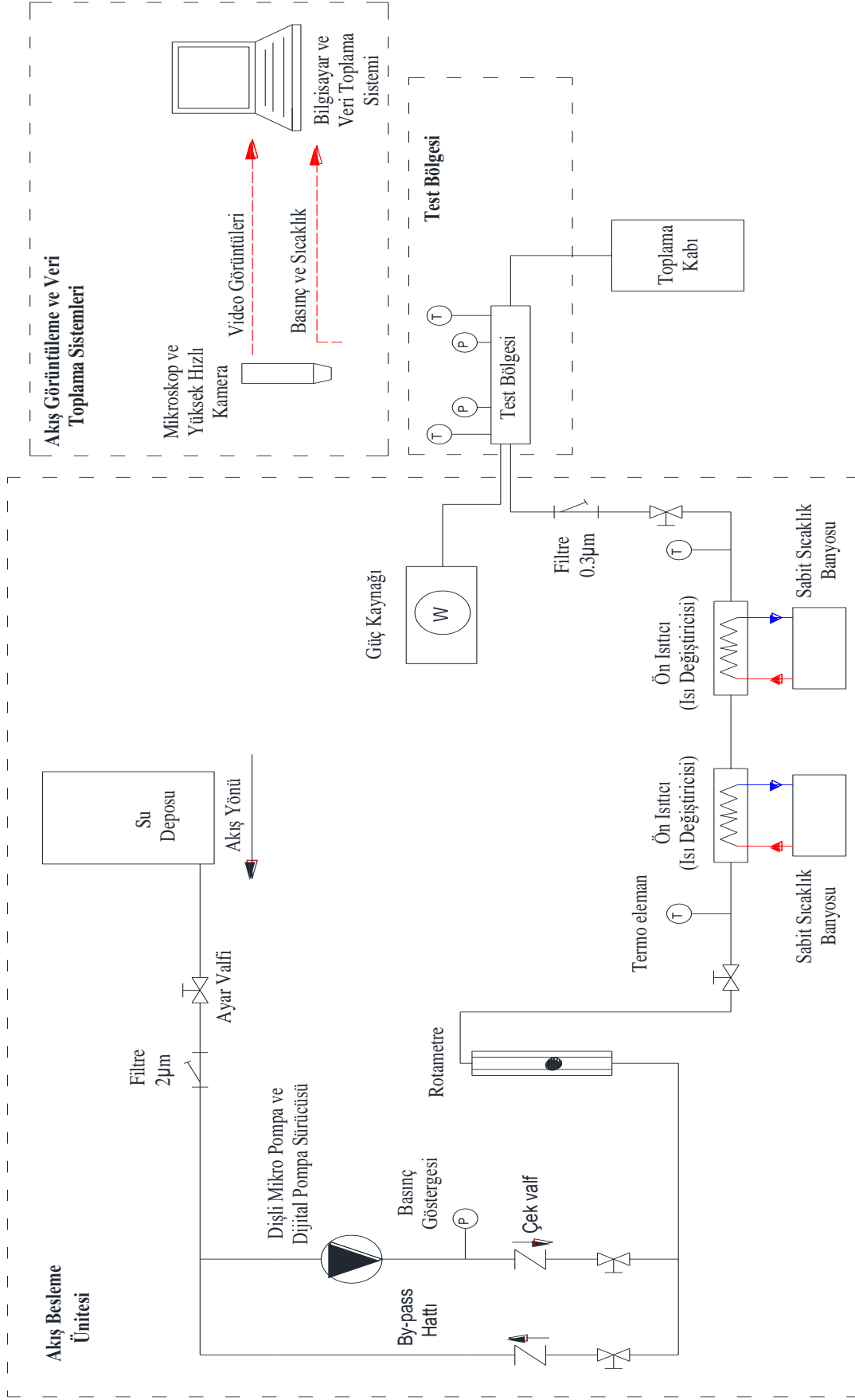
#### 2.1.1. Deney Düzenegi

Deney düzeneginin fotoğrafı ve şematik resmi sırasıyla Şekil 2.1 ve Şekil 2.2' de verilmiştir. Deney düzenegi dört ana bölümden oluşmaktadır: (1) Akış besleme ünitesi, (2) test bölgesi, (3) akış görüntüleme sistemi ve (4) veri toplama sistemi. Paslanmaz çelik su tankında depolanan de-iyonize su, bir mikro dişli pompa (Cole Parmer TW-07002-25 Micropump®) yardımıyla sisteme gönderilmektedir. Mikro pompa programlanabilir dijital bir pompa sürücüsü (Cole Parmer TW-78008-10) ile bütünleşiktir ve akışkan debisi bu sürücü kullanılarak hassas bir şekilde istenilen debi değerine ayarlanabilmektedir. Debi, ayrıca hassas bir rotametre (Omega FL-3102SA veya FL-3104SA) ile de eş zamanlı olarak kontrol edilmektedir. Rotametreden geçen su, iki özdeş minyatür ısı değiştiricisinden (Exergy, Shell and Tube, 00268-02) geçerek istenilen giriş sıcaklığına ayarlanmaktadır. Isı değiştiricilerinin girişinde ve çıkışında birer adet K-tipi termoeleman yer almaktadır. Sistem bileşenlerinin zarar görmemesi ve deney sonuçlarının olumsuz etkilenmemesi için, sistemde, 2  $\mu\text{m}$  ve 0.3  $\mu\text{m}$  gözenek çapına sahip iki farklı mikro filtre kullanılmıştır.

Giriş ve çıkış haznelerindeki sıcaklık ve basınçlar, bu bölümlere (büyük hazneler) yerleştirilen mutlak basınç sensörleri (Omega- PX209-030A5V) ve K-tipi termoelemanlar ile ölçülmüştür. Test bölgesi, hassas bir güç kaynağı (Agilent 6812B) tarafından beslenen dört adet kartuş ısıtıcı ile ısıtılmaktadır. Kaynamalı akışta etkili olan fiziksel mekanizmaların belirlenmesi için yüksek hızlı kamera (Fastec Hi-Spec 4 Color-maksimum çözünürlük: 1696 x 1710 ve maksimum çekim sayısı: 298.851 fps) ve bir mikroskoptan (Nikon LV-IM Microscope) oluşan akış görüntüleme sistemi kullanılmıştır. Mikroskopta Nikon CFI TU Plan Fluor Epi 5X ve CFI TU Plan Epi ELWD 20X objektifleri yer almaktadır. Test bölgesindeki sıcaklık ve basınç ölçümleri, veri toplama sistemi (Keithley 2701 ve 7708 Modülü) ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.1. Deney düzeneğinin fotoğrafı



Şekil 2.2. Denei düzeneginin şematik resmi

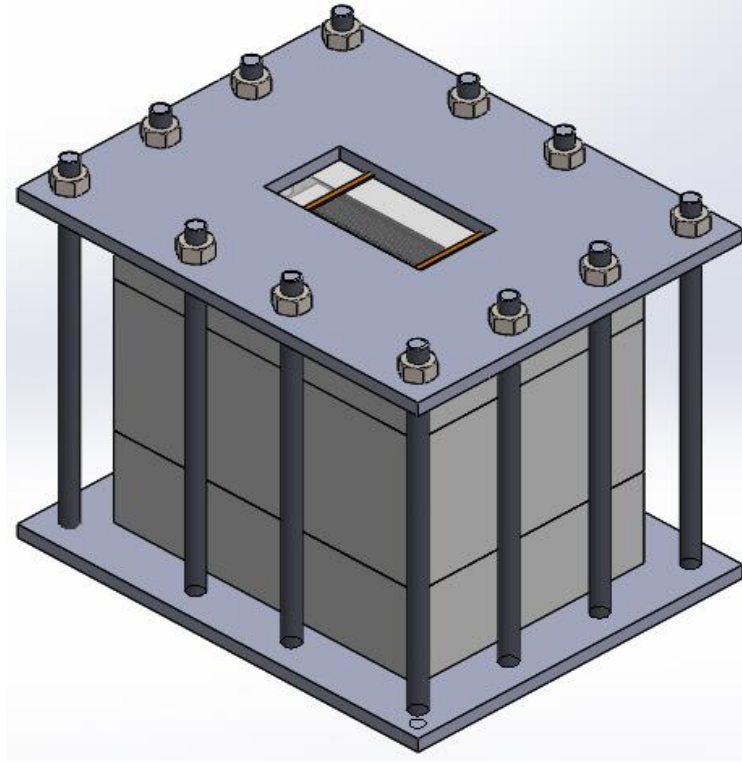
### 2.1.2. Test Bölgesi

Şekil 2.3a ve b'de test bölgesinin montaj ve kesit görünüşü verilmiştir. Test bölgesi üç parça halindeki teflon (PTFE) gömlek, bakır blok, şeffaf polikarbonat plaka, seramik bez, mikrokanallı ısı alıcı ve sızdırmazlık malzemelerinden oluşmaktadır. Test bölgesindeki malzemeler ısı kaybını en aza indirecek şekilde seçilmiştir. PTFE parçalardan en üste yerleştirileni, giriş ve çıkış hazneleri ile akışkan giriş-çıkış bağlantı bölümlerini içermektedir. Bakır bloğun ön yüzünde termoeleman yuvaları, alt kısmında ise kartuş ısıtıcı kanalları bulunmaktadır. Isı kaybını azaltmak amacıyla bakır blok seramik beze sarılmıştır. Isı alıcı, bakır bloğun üzerine konulmuş ve akış görüntüleme yapılabilmesi için üst kısmına şeffaf polikarbonat plaka yerleştirilmiştir. Test bölgesi, paslanmaz çelik levhalar arasına yerleştirilmiş ve saplama-somun takımları ile sıkıştırılmıştır.

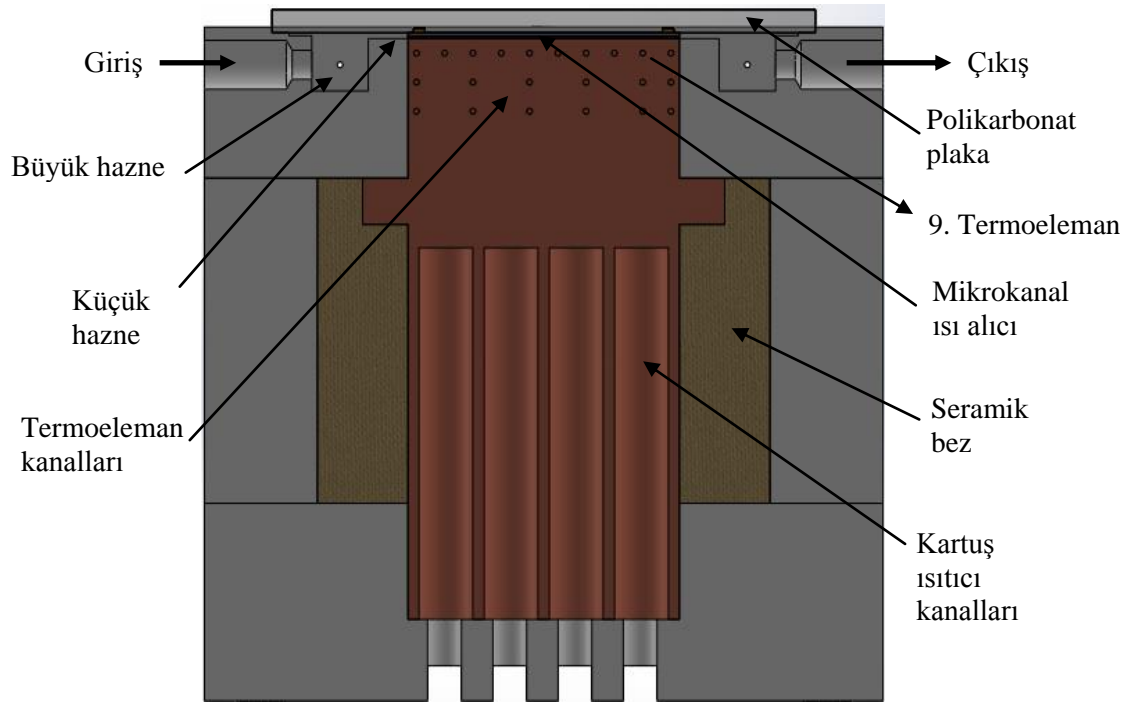
Mikrokanallar iki yüzeyi parlatılmış, n-tipi <100>, tek kristalli ve 500 µm kalınlığındaki silikon tabaka üzerine mikro işleme teknikleri (DRIE/Bosch yöntemi) ile açılmıştır. Mikrokanallara ait geometrik parametreler Tablo 2.1'de verilmiştir. Kanallar açıldıktan sonra silikon test parçası, hem akışın görüntülenebilmesini sağlamak, hem de tamamen sızdırmaz bir yapı oluşturmak için anotsal yapıştırma kullanılarak 500 µm kalınlığındaki borosilikat/pyrex camla birleştirilmiştir. 0.06 µm ortalama yüzey pürüzlülüğüne sahip, yirmi dokuz paralel mikrokanaldan oluşan silikon ısı alıcının genişliği ve uzunluğu sırasıyla 13.5 mm ve 48 mm'dir. Örnek bir mikrokanal ve ısı alıcı kesiti, Şekil 2.4a ve b'de verilmiştir. Mikrokanallı ısı alıcıların üretimleri, yürütülen TÜBİTAK projesi kapsamında, hassas mikro işleme mekanizmalarını bünyesinde barındıran iX-factory isimli firmada (Almanya) hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir.

### 2.1.3. Deney Düzenliğinin Çalışma Prensibi

Mikro pompa çalıştırılır ve dijital pompa sürücüsü kullanılarak istenilen debi değeri ayarlanır. Sabit sıcaklık banyoları, akışkanın test bölgesine giriş sıcaklığını sağlayacak şekilde düzenlenir. Güç kaynağı istenilen ısıl güç değerine getirilir. Sabit ısıl güç altında, test bölgesindeki bütün sıcaklık sensörlerinin kararlı hale ( $\pm 0.5$  °C) gelmesi, yaklaşık 20-25 dk sürmektedir. Sistem kararlı hale geldikten sonra, veri toplama cihazı aracılığıyla sıcaklık ve basınç verileri kayıt edilir ve eş zamanlı olarak akış görüntüleme yapılır. Daha sonra farklı çalışma koşulları için işlemler tekrar edilir.



(a)

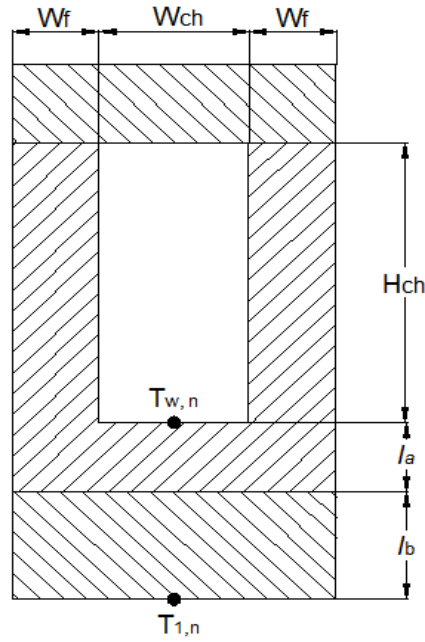


(b)

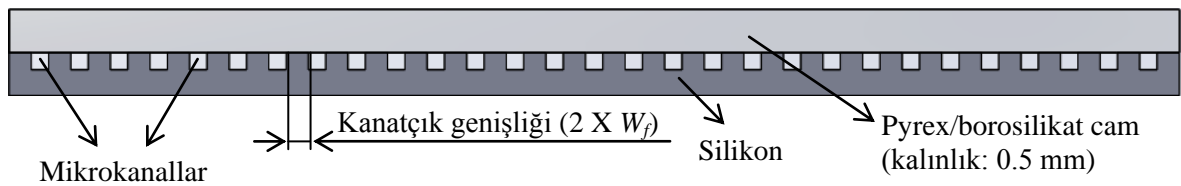
Şekil 2.3. Test bölgesinin tam (a) ve kesit görünüşü (b)

Tablo 2.1. Mikrokanallara ait geometrik parametreler

Etki	Kanal genişliği (mm)	Kanal derinliği (mm)	Kanal kesit alanı (mm <sup>2</sup> )	Kanatçık genişliği (mm)	Kanal genişlik/derinlik oranı ( $W_{ch}/H_{ch}$ )	Hidrolik çap (mm)
AR	0.070	0.190	0.0133	0.382	0.37	0.100
	0.090	0.110	0.0099	0.363	0.82	0.100
	0.110	0.090	0.0099	0.344	1.22	0.100
	0.190	0.070	0.0133	0.266	2.71	0.100
	0.230	0.065	0.0150	0.228	3.54	0.100
	0.300	0.060	0.0180	0.160	5.00	0.100
$D_h$	0.250	0.250	0.0625	0.208	1.00	0.250
	0.200	0.200	0.0400	0.257	1.00	0.200
	0.150	0.150	0.0225	0.305	1.00	0.150
	0.100	0.100	0.0100	0.353	1.00	0.100
<b>Kanal uzunluğu (mm)</b>			48	<b>Isıtılan alan (mm<sup>2</sup>)</b>		648
<b>Isı alıcı genişliği (mm)</b>			13.5	<b>Kanal sayısı</b>		29



(a)



(b)

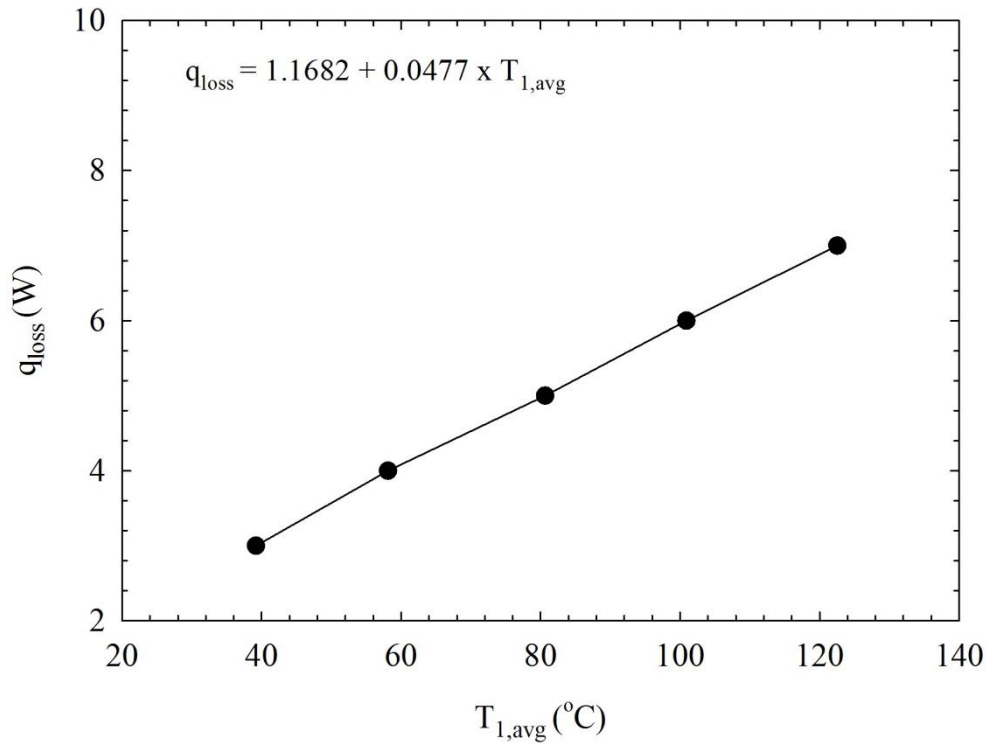
Şekil 2.4. Tek bir mikrokanal kesiti (a), bir ısı alıcının kesiti (b)

## 2.2. Deneysel Hesaplama Yöntemi

### 2.2.1. Isı Kaybı Kalibrasyonu

Farklı ısı yüklemeler altında, mikrokanallı ısı alıcının maruz kaldığı net ısı gücünün tespiti, ısı karakteristiklerin doğru bir şekilde belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, ısı kaybının belirlenmesinde literatüre uygun olarak (Chen ve Garimella, 2011; Lee ve Garimella, 2008; Harirchian ve Garimella, 2008; Chen ve Garimella, 2006; Choi vd., 2011; Alam vd., 2012; Wang ve Peles, 2015) kullanılan yöntem, kısaca aşağıda belirtilmiştir.

Test bölgesine iş akışkanı gönderilmeden, bir başka ifade ile test bölgesi boşken, güç kaynağı sabit bir ısı gücü değerine ayarlandı. Bakır bloğa yerleştirilen termoelemanlardan okunan sıcaklık değerleri kararlı hale gelince ( $\pm 0.5$  °C), üst sırada yer alan on farklı termoelemandan okunan sıcaklık değerinin aritmetik ortalaması, ilgili güç değeri ile kaydedildi. Bu uygulama, farklı ısı gücü değerleri için tekrarlanarak, Şekil 2.5'te verilen ısı kaybı kalibrasyon eğrisi elde edildi.



Şekil 2.5. Isı kaybı kalibrasyon eğrisi

### 2.2.2. Isı Transferi

Mikro boyutlara sahip kanal akışlarında, gerek imalat gerekse ölçüm imkânsızlıkları, kanal cidarında yerel sıcaklık ve basınçların doğrudan belirlenmesini olanaksız kılmaktadır. Çalışmada hacimsel debi, sıcaklık, basınç ve ısı güç olmak üzere dört temel büyüklük ölçülmüştür. Her bir fiziksel büyüklüğün ölçümüne ait yöntem ve hesaplama prosedürü aşağıda detaylı olarak verilmektedir. Isı alıcının birim kesit alanından geçen kütleli debi (kütle akısı,  $G$ ), digital pompa sürücüsünden (ve eş zamanlı olarak rotametreten) ölçülen hacimsel debi kullanılarak,

$$G = \frac{\dot{V}\rho_L}{NA_c} \quad (2.1)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada;  $\dot{V}$ , akışkanın hacimsel debisini,  $\rho_L$ , sıvı yoğunluğunu,  $N$ , kanal sayısını ve  $A_c$ , tek bir kanalın kesit alanını ifade etmektedir.

Isı alıcı taban yüzeyine uygulanan net efektif ısı akısı, güç kaynağı tarafından aktarılan ısı miktarı ve kayıp ısı değeri dikkate alınarak,

$$q_{eff}'' = \frac{\dot{q} - \dot{q}_{loss}}{A_p} \quad (2.2)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada;  $\dot{q}$ , ısıtıcılar tarafından birim zamanda sisteme olan ısı geçişini,  $\dot{q}_{loss}$ , ısı kaybını ve  $A_p$ , ısı alıcının taban alanını ( $A_p = L \times W_T$ ) ifade etmektedir.

Efektif ısı akısı dikkate alınarak, mikrokanal yerel taban yüzeyi sıcaklığı,  $T_{W,n}$  bir boyutlu ısı iletimi kabulü yapılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$T_{W,n} = T_{1,n} - q_{eff}'' \left( \frac{l_a}{k_a} + \frac{l_b}{k_b} \right) \quad (2.3)$$

Burada;  $k_a$  ve  $k_b$ , sırasıyla, silikon ve bakırın ısı iletim katsayısı;  $l_a$ , mikrokanal alt yüzeyi ile silikon malzeme tabanı arasındaki uzaklık;  $l_b$ , bakır blok içerisinde, üst sıradaki ilgili termoelemanla silikon malzeme tabanı arasındaki uzaklık ve  $T_{1,n}$  bakır bloğun üst



sırasında yer alan ilgili termoelemandan okunan sıcaklık değeridir. Mikrokanallı ısı alıcı kanatçıklı bir yapıya sahiptir. Kanatçık analiz yöntemi kullanılarak, ısı transfer katsayısının belirlenmesinde esas teşkil eden duvar ısı akısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$q_w'' = \frac{\dot{q} - \dot{q}_{loss}}{A_t} \quad (2.4)$$

Burada;  $A_t$ , mikrokanalların toplam ısı transfer alanını temsil etmekte olup, açık formu aşağıda verilmektedir:

$$A_t = NL(2H_{ch} + W_{ch}) \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.3) ve (2.4)'te yer alan geometrik parametreler Şekil 2.4'te verilmiştir. Isı alıcılar, dikdörtgen veya kare kesitli düz kanallardan oluşmaktadır. Kanalların yanal ve taban yüzeyleri silikon olup, üst yüzeyi düşük ısı iletim katsayısına sahip pyrex/borosilikat camdır. Ayrıca, pyrex cam üzerine polikarbonat plaka yerleştirilerek ısı kaybı minimizasyonuna katkı sağlanmıştır. Oluşturulan yüksek ısıl direnç nedeniyle, hesaplamalarda kanatçık ucundan olan ısı kaybı ihmal edilmiştir.

Kanatçık verimi ( $\eta_f$ ) ve toplam yüzey verimi ( $\eta_o$ ),

$$\eta_f = \frac{\tanh mH_{ch}}{mH_{ch}} \quad (2.6)$$

$$\eta_o = 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - \eta_f) \quad (2.7)$$

eşitlikleri kullanılarak belirlenmiştir. Burada;  $A_f$ , kanatçık yüzey alanını ve  $m$ , kanatçık parametresini ifade etmekte olup, açık formları aşağıda verilmiştir.

$$A_f = 2LH_{ch} \quad (2.8)$$

$$m = \sqrt{\left(\frac{h_{tp}}{k_a W_f}\right)} \quad (2.9)$$

Burada;  $W_f$ , kanatçıının yarı genişliğidir. Yukarıda verilen ifadeler kullanılarak, kaynamalı akışta yerel iki faz ısı transfer katsayısı,

$$h_{tp} = \frac{q_w''}{\eta_o (T_{w,n} - T_{sat,n})} \quad (2.10)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada;  $T_{sat,n}$ , yerel doyma sıcaklığıdır. Eşitlik (2.7) ve (2.10) dikkatli bir şekilde incelendiğinde, ısı transfer katsayısının tespiti için her iki eşitliğin eş çözümünün gerektiği görülmektedir. Eş çözümde, iteratif bir yaklaşım kullanılmıştır. İlk yaklaşım olarak toplam yüzey verimi %100 kabul edilerek, ısı transfer katsayısı değeri hesaplanmıştır. Sonra bu değer kullanılarak kanatçık verimi ve toplam yüzey veriminin güncel değeri hesaplanmıştır. Bu iterasyon istenilen yakınsama kriteri ( $10^{-7}$ ) sağlanana kadar devam ettirilmiştir.

Su, mikrokanallara aşırı soğutulmuş (*subcooled*) halde ( $T_{L,i} < T_{sat}$ ) girmektedir. Bu nedenle; mikrokanallar, tek ve iki fazlı olmak üzere iki alt bölgeye ayrılabilir. Bu bölgeler arasındaki sınır, kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadır. Bu değere kadar su, tek fazlı sıvı halinde; bu noktadan itibaren ise iki fazlı doymuş karışım halindedir. İki fazlı bölge boyunca herhangi bir noktadaki doyma sıcaklığının belirlenebilmesi için, yerel basınç dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere; geometrik kısıtlamalar, bu ölçümlerin doğrudan yapılmasını olanaksız kılmaktadır. Bu nedenle; yerel basınç dağılımının belirlenmesinde, kanal boyunca (doymuş kaynama bölgesinde) lineer basınç düşümü olduğu kabul edilmiştir. Böylelikle; iki fazlı bölge başlangıcındaki basınç, mikrokanal girişindeki basınçtan ( $P_{ch,i}$ ) tek fazlı bölge boyunca meydana gelen basınç kaybı ( $\Delta P_{sp}$ ) çıkarılarak belirlenebilir. İlgili ifadelerin açık formları ve hesap detayları aşağıda verilmektedir:

$$\Delta P_{sp} = \frac{2C_{f,sp} G^2 L_{sp} v_L}{D_h} \quad (2.11)$$

$$C_{f,sp} \text{Re}_{sp} = 24(1 - 1.355\beta + 1.947\beta^2 - 1.701\beta^3 + 0.956\beta^4 - 0.254\beta^5) \quad (2.12)$$

$$\text{Re}_{sp} = \frac{GD_h}{\mu_{sp}} \quad (2.13)$$

$$L_{sp} = \frac{\dot{m}c_{p,L}(T_{sat,0} - T_i)}{q_{eff}'' W_T} \quad (2.14)$$

$$P_{w,x_{e=0}} = P_{ch,i} - \Delta P_{sp} \quad (2.15)$$

Burada;  $T_{sat,0}$ , kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki doyma sıcaklığını,  $W_T$ , ısı alıcının genişliğini,  $C_{f,sp}$ , tek fazlı sıvı akışı için Fanning sürtünme faktörünü,  $\beta$  ise, sıfır ile bir değerleri arasında gelecek şekilde, kanal genişlik/derinlik veya derinlik/genişlik oranını ifade etmektedir.

Tek fazlı bölge uzunluğunun ve dolayısıyla kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki basınç değerinin belirlenebilmesi için, Eşitlik (2.14) ve (2.15)'in iteratif olarak eş çözümü yapıldı. Elde edilen basınç kullanılarak, lineer interpolasyon ile kaynama bölgesindeki herhangi bir noktaya karşılık gelen yerel basınç ve doyma sıcaklığı değerleri belirlendi. Benzer yaklaşımlar, konuyla ilgili literatürde (Mirmanto, 2014; Mahmoud vd., 2014; Qu ve Siu-Ho, 2009) yer almaktadır. Doymuş kaynama bölgesindeki yerel basınç değerleri aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$P_{W,n} = P_{w,x_{e=0}} - \left( \frac{P_{w,x_{e=0}} - P_{ch,o}}{L - L_{sp}} \right) (L_n - L_{sp}) \quad (2.16)$$

Yerel kuruluk derecesi ( $x_{e,n}$ ) ve çıkış kuruluk derecesi ( $x_{e,o}$ ) sırasıyla aşağıda verilmektedir:

$$x_{e,n} = \frac{\left( \frac{q_W'' A_t L_n}{L} - \dot{m}c_{p,L}(T_{sat,n} - T_i) \right)}{\dot{m}i_{L_v}} \quad (2.17)$$

$$x_{eo} = \frac{(q_W'' A_t - \dot{m} c_{p,L} (T_{sat,o} - T_i))}{\dot{m} i_{Lv}} \quad (2.18)$$

Burada;  $i_{Lv}$ , buharlaşma gizli ısı ve  $T_{sat,o}$  çıkış basıncına göre belirlenen doyma sıcaklığıdır.

Yapılan detaylı literatür araştırması sonunda, makro ve mini/mikrokanallarda kaynamalı akışta ısı transfer katsayısının belirlenmesine yönelik geliştirilen bağıntılardan bazıları seçilerek özet halinde Tablo 2.2’de verilmiştir. Bağıntıların detaylı analizi, deneysel sonuçların bağıntılardan elde edilen tahminlerle karşılaştırılması ve literatüre önerilen yeni ampirik bağıntı, bulgular ve tartışma bölümünde yer almaktadır.

### 2.2.3. Basınç Düşümü

Test bölgesinin geometrik yapısı nedeniyle, akışkan mikrokanallara girmeden önce büyük bir hazneden daha sonra ise küçük bir hazneden geçmektedir. Mikrokanalların çıkışında ise tersi bir durum söz konusudur. Toplam basınç düşümü ( $\Delta P_{tot}$ ), büyük haznelerin yanal yüzeylerine yerleştirilen basınç sensörleri kullanılarak aşağıdaki eşitlikle belirlenmiştir:

$$\Delta P_{tot} = P_i - P_o \quad (2.19)$$

Burada,  $P_i$  ve  $P_o$  giriş ve çıkıştaki büyük haznelere okunan statik basınçlardır. Mikrokanalların girişindeki basınç değeri ( $P_{ch,i}$ ), büyük haznede okunan basınç değerinden kesit daralması nedeniyle meydana gelen basınç kayıpları çıkartılarak belirlenir.

$$P_{ch,i} = P_i - (\Delta P_{c1} + \Delta P_{c2}) \quad (2.20)$$

Burada  $\Delta P_{c1}$  ve  $\Delta P_{c2}$  sırasıyla büyük hazneden küçük hazneye ve küçük hazneden mikrokanallara girişte kesit daralması nedeniyle akışkanın basıncında meydana gelen kayıpları ifade etmektedir. İlgili kayıpların belirlenmesinde kullanılan bağıntılar açık formda aşağıda verilmektedir.

Tablo 2.2. İki faz ısı transfer katsayısı bağıntıları

Referans çalışma	Isı transfer katsayısı, $h_{tp}$	Açıklama
Chen (1966)	$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} (Eh_{sp} + Sh_{nb}) h_{sp} = 0.023 (Re_L)^{0.8} (Pr_L)^{0.4} (k_L / D_h) E = \left( 1 + \frac{1}{X_u^{0.5}} \right)^{1.78} Re_L = \frac{G(1-x_e)D_h}{\mu_L}$ $h_{nb} = 0.00122 \left( \frac{k_L^{0.79} C_{p,L}^{0.45} \nu_g^{0.24}}{\sigma^{0.5} \mu_L^{0.29} \nu_L^{0.24} \nu_L^{0.49}} \right) \Delta T_{sat}^{0.24} \Delta P_{sat}^{0.75} S = 0.9622 - 0.5822 \left[ \tan^{-1} \left( \frac{Re_L E^{1.25}}{6.18 \times 10^4} \right) \right]$ $Pr_L = \frac{c_{p,L} \mu_L}{k_L} \quad Re_g = \frac{Gx_e D_h}{\mu_g} \quad X_u = \left( \frac{\mu_L}{\mu_g} \right)^{0.1} \left( \frac{1-x_e}{x_e} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.5}$	Makrokanal bağıntısı, doymuş iki fazlı akış, düşey ve yatay akış, kararlı akış, kritik ısı akısına erişilmemiş, su ve organik akışkanlar.
Gungor ve Winterton (1986)	$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} (Eh_{sp} + Sh_{nb}) h_{sp} = 0.023 (Re_L)^{0.8} (Pr_L)^{0.4} (k_L / D_h) S = \left( 1 + 1.15 \times 10^{-6} E^2 Re_L^{1.17} \right)^{-1}$ $h_{nb} = 55 P_r^{0.12} (-\log_{10}(P_r))^{-0.55} M_w^{-0.5} q_w^{0.67} E = 1 + 24000 Bo^{1.16} + 1.37 \left( \frac{1}{X_u} \right)^{0.86} Fr_L = \frac{G^2}{g D_h \rho_L^2}$ $Fr_L \leq 0.05 \Rightarrow E = E Fr_L^{0.1-2Fr_L} \text{ ve } S = S Fr_L^{0.5} \quad P_r = \frac{P}{P_{cr}} \quad Bo = \frac{q_w}{G i_{Lv}}$	D = 2.95–32.0 mm, makrokanal bağıntısı, su, R11, R12, R113, R114, R22, etilen glikol, yirmi sekiz kaynaktan 4300 veri noktası, halka kesit ve tüpler.
Kandlikar (1990)	$Co^* > 0.65 \Rightarrow h_{tp} = (Nu_3 / Nu_4) (Eh_{sp}) ; \quad Co^* < 0.65 \Rightarrow h_{tp} = (Nu_3 / Nu_4) (Sh_{sp}) ;$ $Co^* = \left( \frac{1-x_e}{x_e} \right)^{0.8} \left( \frac{\nu_L}{\nu_g} \right)^{0.5} S = 1.136 Co^{*-0.9} f(Fr_L) + 667.2 Bo^{0.7} E = 0.6683 Co^{*-0.2} f(Fr_L) + 1058 Bo^{0.7}$ $Fr_L \geq 0.04 \Rightarrow f(Fr_L) = 1; \quad Fr_L < 0.04 \Rightarrow f(Fr_L) = (25 Fr_L)^{0.3} \quad h_{sp} = 0.023 (Re_L)^{0.8} (Pr_L)^{0.4} (k_L / D_h)$	Makrokanal bağıntısı, yirmi dört kaynaktan 5246 veri, Su, R-11, R-12, R-13B1, R-22, R113, R-114, R-152a, Nitrojen, Neon.
	$Co^* > 0.65$ kabarcıklı kaynama bölgesi; $Co^* < 0.65$ taşınımli kaynama bölgesi	

Tablo 2.2'nin devamı

Referans çalışma	Isı transfer katsayısı, $h_{tp}$	Açıklama
Yu vd. (2002)	$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} \left[ 6400000 (Bo^2 We_{Lo})^{0.27} \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.2} \right] We_{Lo} = \frac{G^2 D_h}{\rho_L \sigma}; Bo = \frac{q_w''}{Gi_{Lv}}$	Minikanal bağıntısı, 2.98 mm çapında yatay tüp, su, etilen glikol ve bunların karışımı.
Warrier vd. (2002)	$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} (Eh_{sp}) h_{sp} = 0.023 (Re_L)^{0.8} (Pr_L)^{0.4} (k_L / D_h) E = 1 + 6Bo^{1/16} - 5.3(1 - 855Bo)^{0.65} x_e$	Mini kanal bağıntısı, FC-84, $D_h = 0.75$ mm, 5 paralel kanal.
Koşar vd. (2005)	$h_{tp} = \left( \frac{Nu_3}{Nu_4} 1.068 (q_{eff}'')^{0.64} Re_{cr} = 163.59 - 2.73 \times 10^4 Bo > Re_{Lo} \Rightarrow \text{Kabarcıklı kaynama baskın} \right) Re_{cr} = 163.59 - 2.73 \times 10^4 Bo > Re_{Lo} \Rightarrow \text{Kabarcıklı kaynama baskın}$ $h_{tp} = \left( \frac{Nu_3}{Nu_4} 4.068 \times 10^4 (Re_{Lo})^{0.12} (1 - x_e)^{0.8} \left( \frac{1 - x_e}{x_e} \right)^{0.02} Bo = \frac{q_w''}{Gi_{Lv}} \right) Bo = \frac{q_w''}{Gi_{Lv}}$	Mikrokanal bağıntısı, $D_h = 227$ $\mu$ m, su, yukuklu 5 paralel dikdörtgen kesitli kanal.
Lee ve Garimella (2008)	$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} \left[ (Eh_{sp})^3 + (Sh_{nb})^3 \right]^{1/3}$ $E = (\phi_f^2)^{0.2743} (c_{p,tp} / c_{p,L})^{0.2743} (k_{tp} / k_L)^{0.7257} S = 4.6809 - 0.6705 \log \left( \frac{q_w''}{10^6} \right) + 3.908 \left( \frac{D_h}{0.001} \right)$ $h_{sp} = \left[ 1.766 \left( \frac{Re_L Pr_L D_h}{L} \right)^{0.378} \dot{\alpha}^{0.1224} \left[ \frac{k_L}{D_h} \right] \right] \dot{\alpha} = \frac{H_{ch}}{W_{ch}} C = 25666 G^{0.5466} D_h^{0.8819} (1 - e^{-319 D_h})$ $h_{nb} = 5600 F_{PF} \left( \frac{q_w''}{20000} \right)^{0.9 - 0.3 P_r^{0.15}} F_{PF} = 1.73 P_r^{0.27} + \left( 6.1 + \frac{0.68}{1 - P_r} \right) P_r^2 \phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X_{MP}} + \frac{1}{X_{MP}^2}$	Mikrokanal bağıntısı, Kanal genişlikleri 102 ile 997 $\mu$ m arasında değişmekte ve derinlik ise 400 $\mu$ m'dir, paralel, dikdörtgen kesitli kanallar, su.

Tablo 2.2'nin devamı

Referans çalışma	Isı transfer katsayısı, $h_{tp}$	Açıklama
Lee ve Mudawar (2005b)	$0 < x_e < 0.05 \Rightarrow h_{tp} = 3.856 X_{MP}^{0.267} h_{sp,L} h_{sp,L} = \frac{Nu_3 k_L}{D_h} X_{vv} = \left( \frac{\mu_L}{\mu_g} \right)^{0.5} \left( \frac{1-x_e}{x_e} \right)^{0.5} \left( \frac{v_L}{v_g} \right)^{0.5}$ $X_{vt} = \left( \frac{f_L Re_g^{0.25}}{0.079} \right)^{0.5} \left( \frac{1-x_e}{x_e} \right)^{0.5} \left( \frac{v_L}{v_g} \right)^{0.5} \quad 0.05 < x_e < 0.55 \Rightarrow h_{tp} = 436.48 Bo^{0.522} We_{Lo}^{0.351} X_{MP}^{0.665} h_{sp,L}$ $Bo = \frac{q_w''}{Gi_{Lv}} We_{Lo} = \frac{v_L G^2 D_h}{\sigma} Re_g = \frac{G x_e D_h}{\mu_g} \quad 0.55 < x_e < 1 \Rightarrow h_{tp} = \max \left\{ (108.6 X_{MP}^{1.665} h_{sp,g}), h_{sp,g} \right\}$	Mikrokanal bağıntısı, $D_h=349 \mu\text{m}$ , elli üç paralel dikdörtgen kesitli kanal, R134a.
Li ve Wu (2010)	<p>Laminer gaz akışı <math>h_{sp,g} = \frac{Nu_3 k_g}{D_h}</math> ; Türbülanslı gaz akışı <math>h_{sp,g} = 0.023 Re_g^{0.8} Pr_g^{0.4}</math></p> $Re_L < 2000 \text{ ve } Re_g < 2000 \Rightarrow X_{MP} = X_{vy} \quad Re_L < 2000 \text{ ve } 2000 < Re_g < 20000 \Rightarrow X_{MP} = X_{vt}$ $h_{tp} = \left( \frac{Nu_3}{Nu_4} \right) \left[ 334 Bo^{0.3} (Bn Re_L^{0.36}) \right] \left( \frac{k_L}{D_h} \right) \quad Re_L = \frac{G(1-x_e)D_h}{\mu_L} \quad Bo = \frac{q_w''}{Gi_{Lv}} \quad Bn = \frac{g(\rho_L - \rho_g) D_h^2}{\sigma}$ $h_{tp} = (h_{nb}^2 + h_{cb}^2)^{0.5} \quad h_{nb} = \left[ 2345 \left( Bo \frac{P_{HT}}{P_{FT}} \right)^{0.70} P_r^{0.38} (1-x_e)^{-0.51} \right] \left( \frac{0.023 Re_L^{0.8} Pr_L^{0.4} k_L}{D_h} \right)$	On sekiz farklı kaynaktan 3744'ten fazla veri noktası
Kim ve Mudawar (2013c)	$h_{cb} = \left[ 5.2 \left( Bo \frac{P_{HT}}{P_{FT}} \right)^{0.08} We_{Lo}^{-0.54} + 3.5 \left( \frac{1}{X_{tt}} \right)^{0.94} \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.25} \right] \left( \frac{0.023 Re_L^{0.8} Pr_L^{0.4} k_L}{D_h} \right) \quad P_r = \frac{P}{P_{crit}}$ $We_{Lo} = \frac{G^2 D_h}{\rho_L \sigma} \quad X_{tt} = \left( \frac{\mu_L}{\mu_g} \right)^{0.1} \left( \frac{1-x_e}{x_e} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.5} \quad P_{HT} = N(2H_{ch} + W_{ch}) \quad P_{FT} = 2N(H_{ch} + W_{ch})$	Otuз bir kaynaktan 10805 kuruma öncesi veri, hidrolik çap aralığı: 0.19-6.5 mm, on sekiz farklı akışkan.

$$\Delta P_{c1} = \frac{v_{L,i}}{2} (G_{P2,i}^2 - G_{P1,i}^2) + \frac{K_{c1} v_{L,i}}{2} G_{P2,i}^2 \quad (2.21)$$

$$\Delta P_{c2} = \frac{v_{L,i}}{2} (G^2 - G_{P2,i}^2) + \frac{K_{c2} v_{L,i}}{2} G^2 \quad (2.22)$$

Burada;  $K_{c1}$  ve  $K_{c2}$ , kesit daralması kayıp katsayılarını ifade etmekte olup, açık formları aşağıda verilmektedir:

$$K_{c1} = 0.6740 + 1.2501\beta_{P2} + 0.3417\beta_{P2}^2 - 0.8358\beta_{P2}^3 \quad (2.23)$$

$$K_{c2} = 0.6740 + 1.2501\beta + 0.3417\beta^2 - 0.8358\beta^3 \quad (2.24)$$

$$\beta_{P2} = \frac{H_{P2}}{W_{P2}} \quad (2.25)$$

$$\beta = \frac{W_{ch}}{H_{ch}} \text{ veya } \frac{H_{ch}}{W_{ch}} \quad 0 < \beta < 1 \quad (2.26)$$

İlgili eşitliklerde;  $W_{P2}$  ve  $H_{P2}$ , sırasıyla, küçük haznenin genişliği ve yüksekliğini;  $H_{ch}$  ve  $W_{ch}$ , tek bir mikrokanalın yüksekliği (derinliği) ve genişliğini temsil etmektedir. Aynı yaklaşımla, mikrokanalların çıkışındaki basınç değeri ise aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$P_{ch,o} = P_o + \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} \quad (2.27)$$

Burada;  $\Delta P_{e2}$  ve  $\Delta P_{e1}$ , sırasıyla çıkış bölümünde mikrokanallardan küçük hazneye ve küçük haznedan büyük hazneye geçişte meydana gelen genişleme basınç kazanımını ifade etmekte olup, hesaplama detayları aşağıda verilmektedir:

$$\Delta P_{e2} = \frac{v_{L,o} + x_{e,o} v_{Lg,o}}{2} (G_{P2,o}^2 - G^2) + \frac{K_{e2} (v_{L,o} + x_{e,o} v_{Lg,o})}{2} G^2 \quad (2.28)$$



$$\Delta P_{e1} = \frac{v_{L,o} + x_{e,o} v_{Lg,o}}{2} (G_{P1,o}^2 - G_{P2,o}^2) + \frac{K_{e1} (v_{L,o} + x_{e,o} v_{Lg,o})}{2} G_{P2,o}^2 \quad (2.29)$$

$$K_{e2} = \left(1 - \frac{NA_{ch}}{A_{P2}}\right)^2 \quad (2.30)$$

$$K_{e1} = \left(1 - \frac{A_{P2}}{A_{P1}}\right)^2 \quad (2.31)$$

Burada;  $K_{e2}$  ve  $K_{e1}$ ; kesit genişlemesi kazanım katsayılarıdır. Kesit daralması basınç kayıpları ile kesit genişlemesi basınç kazanımlarının belirlenmesine yönelik bu tür yaklaşımlar, literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Qu ve Siu-Ho, 2009; Lee and Garimella, 2008; Qu vd., 2006; Qu ve Mudawar, 2003a; Collier and Thome, 1994; Blevins, 1984).

### 2.3. Belirsizlik Analizi

Hata analizi, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulguların değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, deneysel belirsizlikler, Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen yöntemle göre yapılmıştır. Bu yöntem, kısaca aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

$R$  bağımsız değişkenlerin (sıcaklık, basınç vb.) bir fonksiyonu olan herhangi bir deneysel parametre olmak üzere,

$$R = R(e_1, e_2, e_3, \dots, e_n) \quad (2.32)$$

formunda yazılabilir. Bağımsız değişkenlere ait belirsizlik değerleri;  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  şeklinde tanımlanırsa,  $R$  için toplam belirsizlik aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial e_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial e_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial e_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.33)$$

Ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerin hata düzeylerinin belirlenmesinde ölçüm cihazlarının kataloglarında yer alan belirsizlik miktarları dikkate alınmıştır. Yukarıda tanımlanan yöntemle göre belirlenen belirsizlikler Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3. Deneysel belirsizlikler

<b>Ölçülen/hesaplanan değerler</b>	<b>Belirsizlik</b>
Basınç, $P$	$\pm 0.25 \%$
Sıcaklık, $T$	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
Debi, $\dot{V}$	$\pm 2.0 \%$
Uygulanan güç, $\dot{q}$	$\pm 0.1 \%$
Kütle akısı, $G$	$\pm 2.18 \%$
Çıkış buhar kuruluk derecesi, $x_{eo}$	$\pm 1.3 - 12.1 \%$
Duvar ısı akısı, $q_w''$	$\pm 0.40 - 0.43 \%$
Isı transfer katsayısı, $h_{tp}$	$\pm 6.9 - 22.8 \%$

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, on farklı mikrokanallı ısı alıcıda kaynamalı akış deneyleri yapılarak geniş bir veritabanı oluşturulmuştur. Önceki bölümlerde belirtilen hedefleri karşılayacak şekilde, bu bölüm dört alt bölüme ayrılarak detaylandırılmıştır. Her bir alt başlıkta ilgili konunun kapsamı özetlenerek elde edilen bulgular verilmiş ve tartışılmıştır. Elde edilen sonuçların tamamının verilmesi imkansız olduğu için genel karakteristikleri temsil eden ve konuyla ilgili özgün değerleri yansıtan bulgular üzerinde durulmuştur.

Bu çalışma, doymuş kaynamalı akışla ilgilidir. Isı transfer katsayısı, yalnızca üst sıradaki dokuzuncu termoelemanına karşılık gelen konum için (kanal girişinden 41.5 mm ötede) hesaplanmıştır. Bunun nedeni, çıkışa doğru daha yüksek doymuş kaynama derecelerinin oluşmasıdır. En son sıradaki termoelemanın tercih edilmemesinin nedeni ise, sızdırmazlık malzemelerinin bu bölgede akışın görüntülenmesini güçleştirmesidir. Yazımda sadelik ve kolaylık sağlamak amacıyla, şekillerde “9” alt indisi kullanılmamıştır.

#### 3.1. Mikrokanallarda Doymuş Kaynamalı Akışta Isı Transferi ve Basınç Düşümünün Deneysel Olarak İncelenmesi

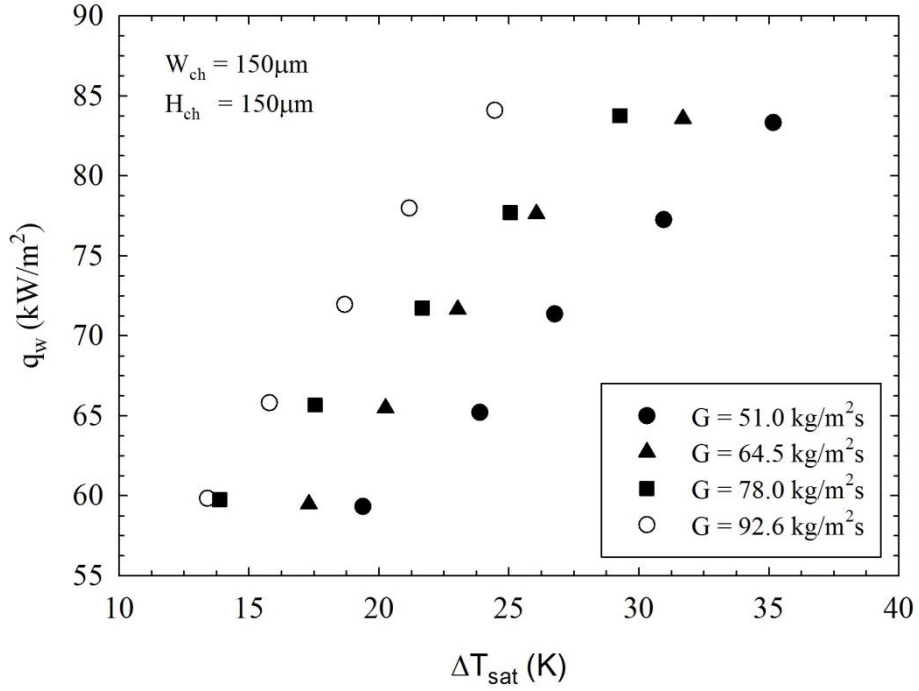
Bu bölümde, paralel mikrokanallarda de-iyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristiklerini incelemek amacıyla 150 x 150  $\mu\text{m}^2$  kesitli kanal için elde edilen sonuçlar verilmiştir. İncelenen kütle akıları 51, 64.5, 78 ve 92.6  $\text{kg/m}^2\text{s}$  değerlerini kapsamakta; duvar ısı akısı ise 59.3 – 84.1  $\text{kW/m}^2$  aralığında değerler almaktadır.

##### 3.1.1. Kaynama Eğrileri

Şekil 3.1’de doymuş kaynama bölgesinde farklı kütle akıları için kaynama eğrileri verilmiştir. Duvar kızma farkı ( $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$ ), artan ısı akısı ile artmaktadır. Artışlar oldukça lineer olup; üniform karaktere sahiptir. Herhangi bir kızma farkı histerisizi (*wall superheat excursion* veya *boiling hysteresis*) görülmemiştir. Benzer bir gözlem, Fu vd. (2013a) ve Deng vd. (2015b) tarafından da not edilmiştir. Kızma farkı histerisizi, kaynama bölgesinde duvar sıcaklığındaki azalma ile meydana gelir.

Literatürdeki bazı çalışmalarda (Harirchian ve Garimella, 2008; Yang vd., 2014a; Megahed, 2012; Sun vd., 2011) ise bu olay gözlemlenmiş ve kabarcıklı kaynama ile ilişkilendirilmiştir.

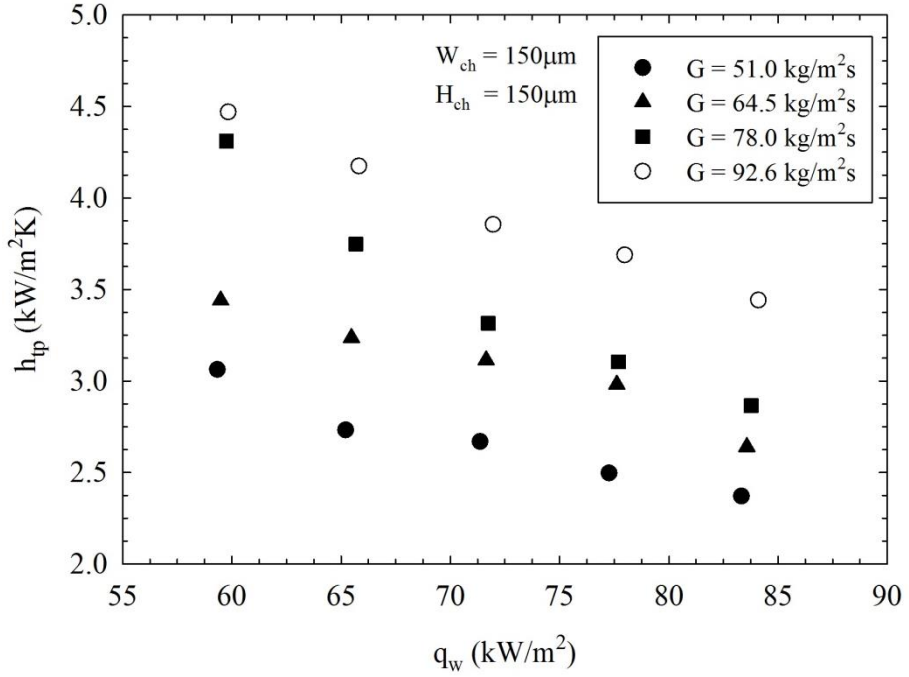
Verilen bir ısı akısında, kızma farkı artan kütle akısı ile azalır. Bu bulgu, Balasubramanian vd. (2013) tarafından da belirtildiği üzere; taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunun bir göstergesidir.



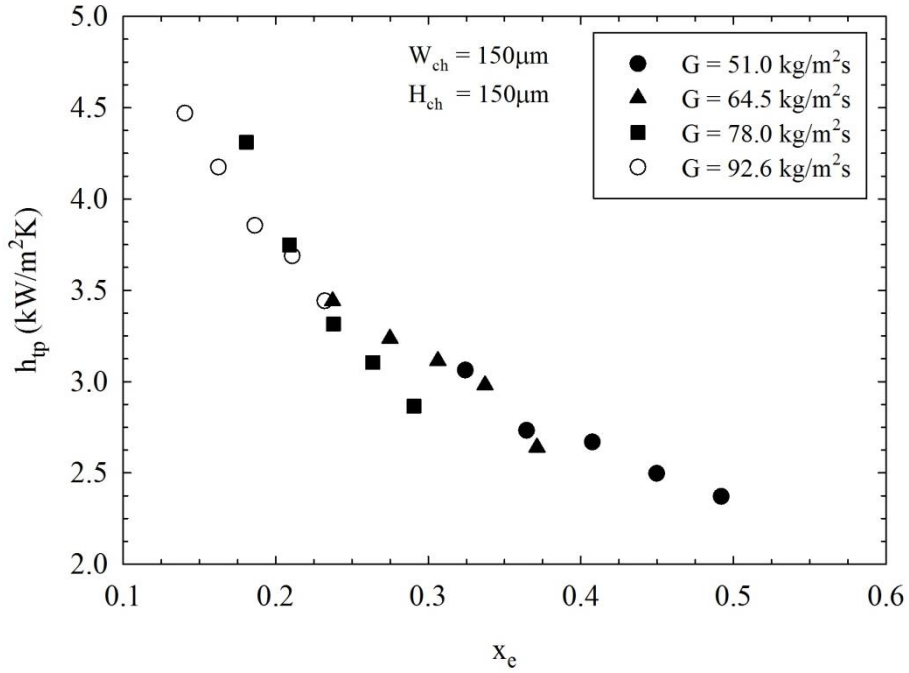
Şekil 3.1. Farklı kütle akıları için kaynama eğrileri

### 3.1.2. Kaynamalı Akışta Isı Transfer Katsayısı

Şekil 3.2a ve b'de, yerel iki faz ısı transfer katsayısının farklı kütle akısı değerleri için sırasıyla ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. Şekil. 3.2'den görüldüğü gibi, incelenen kütle akısı değerlerinde, ısı transfer katsayısı artan ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile azalmaktadır. Ayrıca, ısı transfer katsayısı kütle akısına oldukça bağlı olup, artan kütle akısı ile belirgin bir şekilde artmaktadır. Benzer sonuçlar literatürde de sunulmuştur (Qu ve Mudawar, 2003b; Law vd., 2014; Deng vd., 2015b). Liu vd., (2011) ve Lee ve Mudawar (2005b), ısı transfer katsayısının kuruluk derecesi ile değişimi için benzer sonuçları elde etmiştir. Ayrıca, Lee ve Mudawar (2005b) bu tarz bir eğilimin halkasal buharlaşmalı kaynamanın temel bir özelliği olduğunu belirtmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.2. Farklı kütle akıları için ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı (a) ve yerel kuruluk derecesi (b) ile değişimi

Qu ve Mudawar (2003b), ısı transfer katsayısının kütle akısı ile arttığını, kuruluk derecesi ile azaldığını ve bu durumun taşınımli kaynamanın baskınlığının bir göstergesi

olduğunu ifade etmiştir. Harirchian ve Garimella (2009a) ve Zhuan ve Wang (2013), ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azalmasının sebebini kısmî kuruma ile açıklamıştır.

Kaynamalı akışlarda rapor edilen başlıca iki baskın ısı transfer mekanizması vardır: Kabarcıklı kaynama ve taşınımlı kaynama. İki mekanizma, genel olarak, sırasıyla, kabarcık oluşumu (kabarcıklaşma) ve ince sıvı filmi buharlaşması ile karakterize edilir. Tez kapsamında, doymuş kaynamalı akışta, bütün test koşullarında, akış gözleme deneyleri ile gösterileceği gibi, hızlı kabarcık büyümesi ve kabarcığın sınırlandırılması etkileri nedeniyle kabarcıklaşmanın bastırıldığı görülmüştür. Yüksek kızma farkları nedeniyle, kanalın herhangi bir noktasında hızlı kabarcık büyümesi gerçekleşir. Kanal boyutları çok küçük olduğu için ( $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ ), akış pasajı içinde kabarcık sınırlandırılır ve hem kanal girişine hem de kanal çıkışına doğru uzamaya başlar. Buharlaşma momentum kuvvetinin etkisiyle kabarcığın kanal girişine doğru uzaması kabarcıklaşmayı bastırır ve kanala giren sıvıya karşı direnç oluşturur. Bu durum, giriş basıncında artışa neden olur. Daha sonra, artan giriş basıncı, sıvı ataleti ve komşu kanallar arasındaki etkileşimin birleşik etkileri nedeniyle, uzun kabarcık, kanal çıkışına doğru itilir. Sıvı tamamen kanalı doldurur ve akış pasajını süpürür. Bu olay, sanki-periyodik bir biçimde tekrar eder. Olayın altında yatan fiziksel mekanizmayı anlamak için bir periyot esnasındaki akış desenlerinin gözlemlenmesi oldukça önemlidir. Kanal sıvı ile dolunca hızlı kabarcık büyümesi ile aniden uzun bir kabarcık oluşur. Bu aşamada akış deseni halkasal akış formundadır. Kanalın iç bölgesinde (*core region*) buhar; kanal duvarları ile buhar bölgesi arasında ise sıvı filmi vardır. Sıvı filmi hızlı bir şekilde buharlaşmaya başlar ve sonra sırasıyla kısmî ve tam kuruma meydana gelir. Sonra, kanal tekrar sıvı ile dolar. Ana akış desenleri, uzun kabarcıklı akış ve halkasal akıştır. Belirtilen olgular, genel karakteri temsil etmektedir. Isı akısı ve kütle akısı değerlerine ve kanallar arası etkileşime göre çalkantılı akış veya sisli akış görülebilmekte; ayrıca, bir periyot içindeki olayların süreleri değişebilmektedir. Verilen bir kütle akısı değerinde, ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ve ısı akısı ile azalmasının nedeninin kısmî kuruma olduğu düşünülmektedir. Bir kanal içerisinde tamamen kuruma meydana gelse bile; bu durum, kısmî kuruma olarak adlandırılabilir. Çünkü bir ölçüm esnasında, komşu kanalların içinde eş zamanlı olarak sadece sıvı akışı veya buharlaşan sıvı filmi görülebilmektedir. Verilen bir ısı akısı (veya ısı gücü) değeri için, kütle akısındaki artış ile ısı transfer katsayısı belirgin bir şekilde artar. Bulgular, akış görüntüleme ile elde edilen bulgularla tamamen desteklenmektedir. Sabit bir ısı akısı için

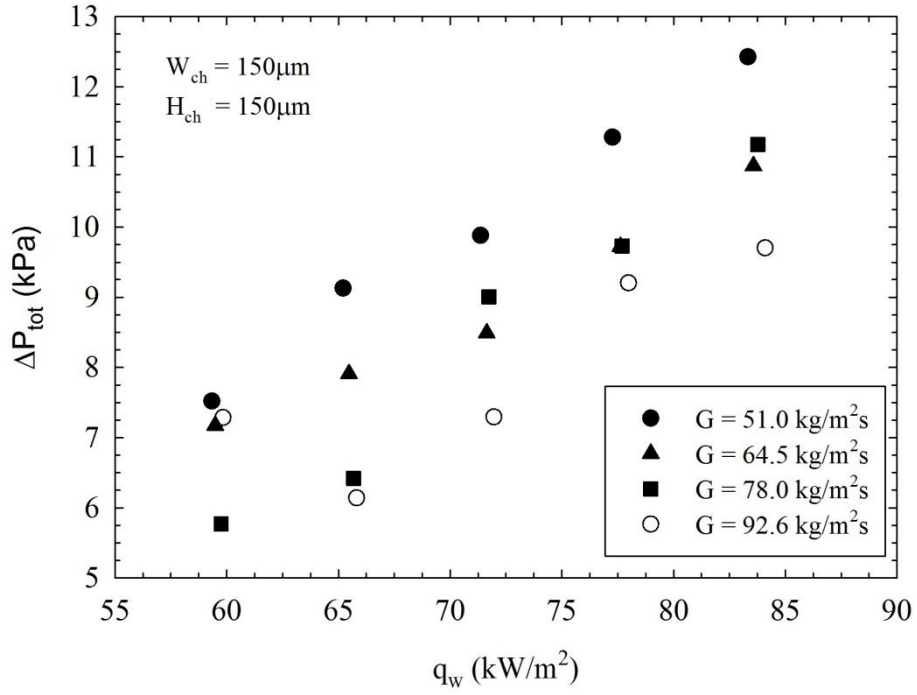
kütle akısındaki artış, ince sıvı filminin sürdürülebilirliğini arttırır, kuruma zamanını azaltır ve hatta tam kurumayı önleyebilir. Sonuç olarak, taşınımı kaynama mikrokanallardaki baskın ısı transfer mekanizmasıdır. Ancak, ısı transfer olayını yalnızca ince film buharlaşması ile açıklamak yeterli değildir. Bu olay, periyodik prosesin yalnızca bir bölümüdür. Mikrokanallardaki kaynamalı akışın periyodik karakteristiği ve paralel kanallar arasındaki etkileşim oldukça önemli olup; ısı transfer sonuçlarının değerlendirilmesinde mutlaka dikkate alınmalıdır.

### 3.1.3. Basınç Düşümü

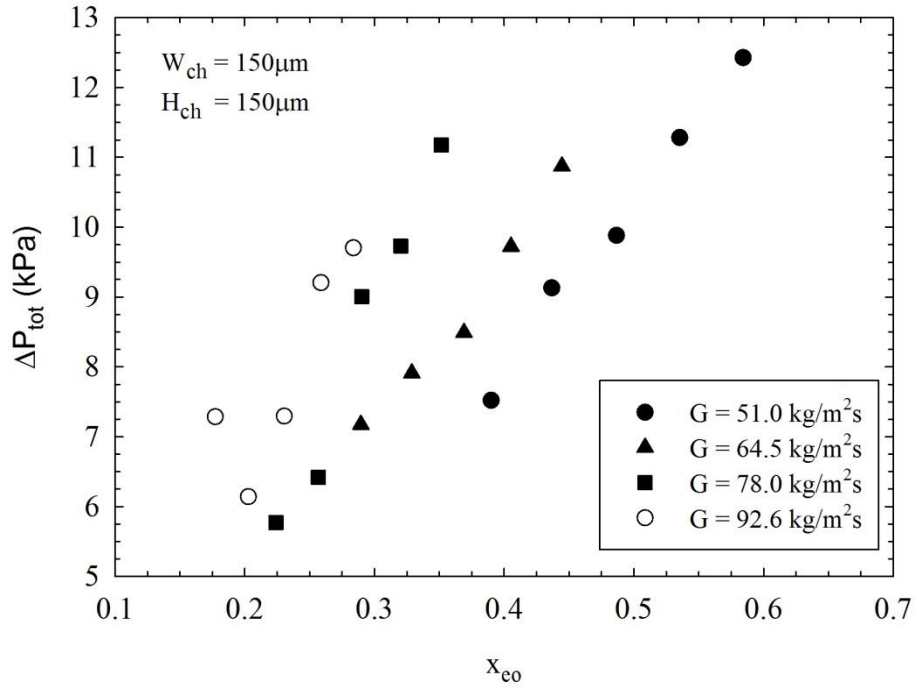
Şekil 3.3a ve b'de farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün sırasıyla duvar ısı akısı ve çıkış kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. Şekil 3.3'ten de görüldüğü üzere, toplam basınç düşümü, incelenen kütle akısı değerleri için, artan ısı akısı ve çıkış kuruluk derecesi ile artmaktadır. Ancak, sabit bir ısı akısı değerinde, basınç düşümü, artan kütle akısı ile genellikle azalmaktadır. Isı akısındaki artış ile buharlaşma momentum kuvveti artar. Bunun sonucu olarak, kanal girişine doğru uzayan kabarcık daha fazla kuvvet uygulamaya başlar ve akışa karşı direnç artar. Buharlaşma momentum kuvvetine karşı olan kuvvet ise sıvı ataletidir. Atalet kuvveti ise artan kütle akısı ile artar.

Bu bölümdeki debi değerleri oldukça düşük olup; 2 ile 3.63 ml/dk arasında değişmektedir. Ayrıca, kanal boyutları da oldukça küçüktür ( $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ ). Bu nedenle, yukarıda belirtilen kuvvetler arasındaki etkileşim daha belirgindir. Toplam basınç düşümü üzerinde rol oynayan diğer önemli faktörler ise paralel kanallar arası etkileşim ve test bölgesinin geometrisidir. Verilen herhangi bir zamanda, komşu kanallarda farklı akış koşulları meydana gelir.

Ayrıca, test bölgesinin geometrisi açısından, büyük haznedan sonra ve mikrokanallardan önce küçük hazne olarak adlandırılan dar bir kesit vardır. Mikrokanallardan önce meydana gelen kesit daralması sistemin kararlılığını artırır. Daha ayrıntılı bilgiler akış görüntüleme bölümünde verilmiştir.



(a)



(b)

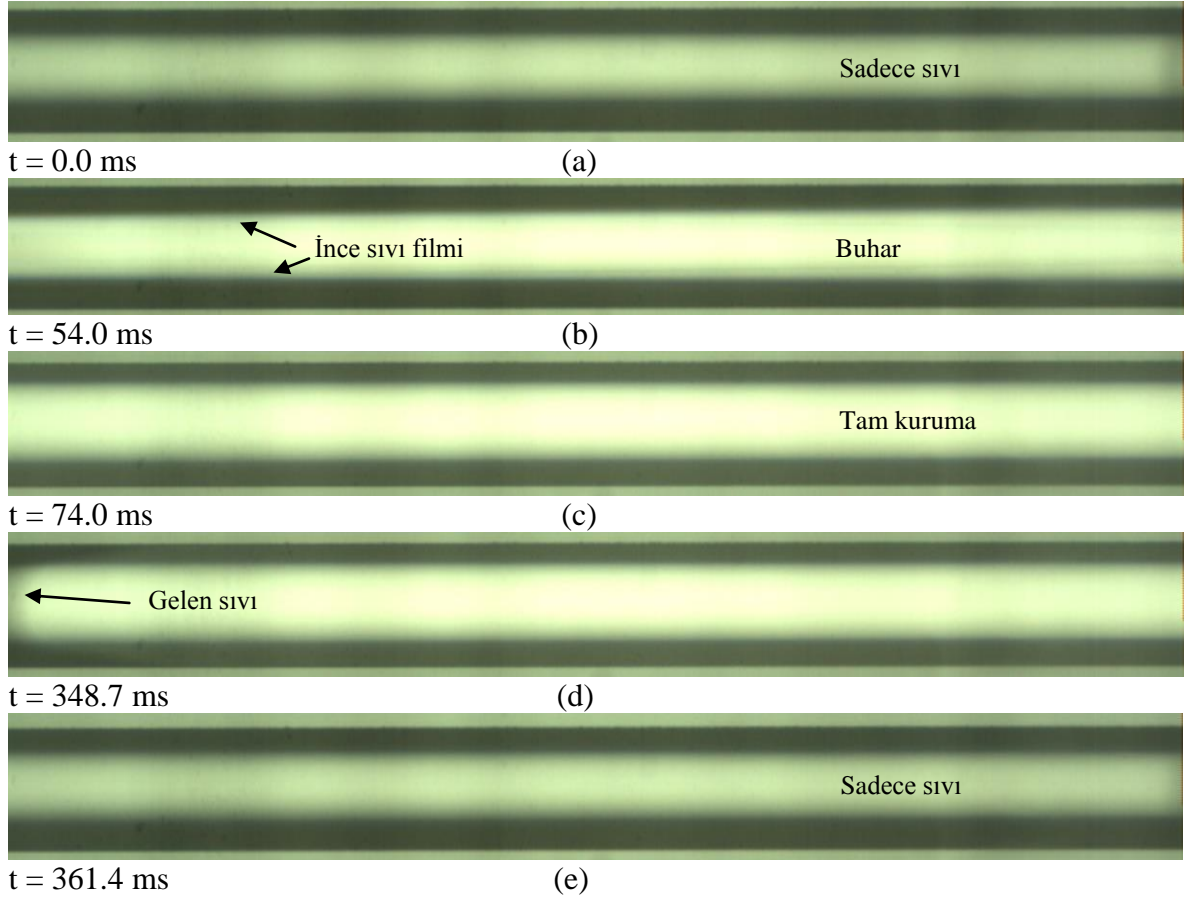
Şekil 3.3. Farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün duvar ısı akısı (a) ve çıkış kuruluk derecesi (b) ile değişimi



### 3.1.4. Akış Görüntüleme ve Akış Kararsızlıkları

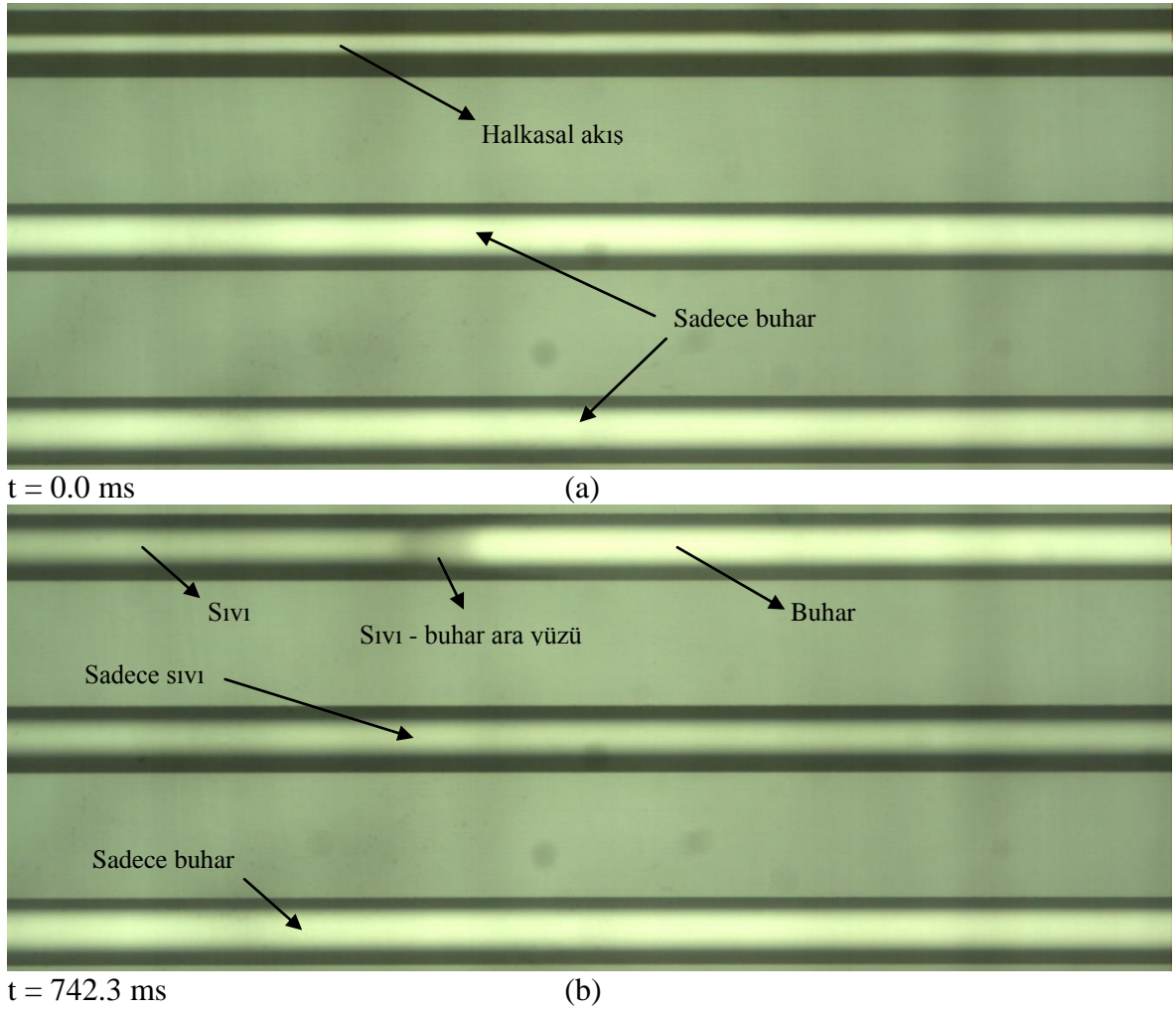
Akış görüntüleme sonuçları incelendiğinde, mikrokanallardaki (doymuş) kaynamalı akış olayının sanki periyodik karaktere sahip olduğu görülmektedir. Literatürde benzer gözlemler mevcuttur (Tuo ve Hrnjak, 2013; Wu and Cheng, 2003; Hetsroni vd., 2006; Tuo ve Hrnjak, 2014). Bu bölümde, bir periyottaki genel akış deseni sırası verilmiştir. Ayrıca, özgün akış desenlerini ve önemli akış olaylarını kapsayan görüntüler de verilmiş ve değerlendirilmiştir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 hariç diğer şekiller (Şekil 3.4 – 3.7) dokuzuncu termoeleman hizasına karşılık gelen konumdan (girişten 41.5 mm öteden) alınan görüntüleri ifade etmektedir. Bütün görüntüler 1500 fps’de alınmış olup; görüntülerde sol taraf, kanal giriş tarafını göstermektedir.

Şekil 3.4’te,  $G = 92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 44.1 \text{ W}$  çalışma koşulları için bir periyottaki akış desenleri görülmektedir.



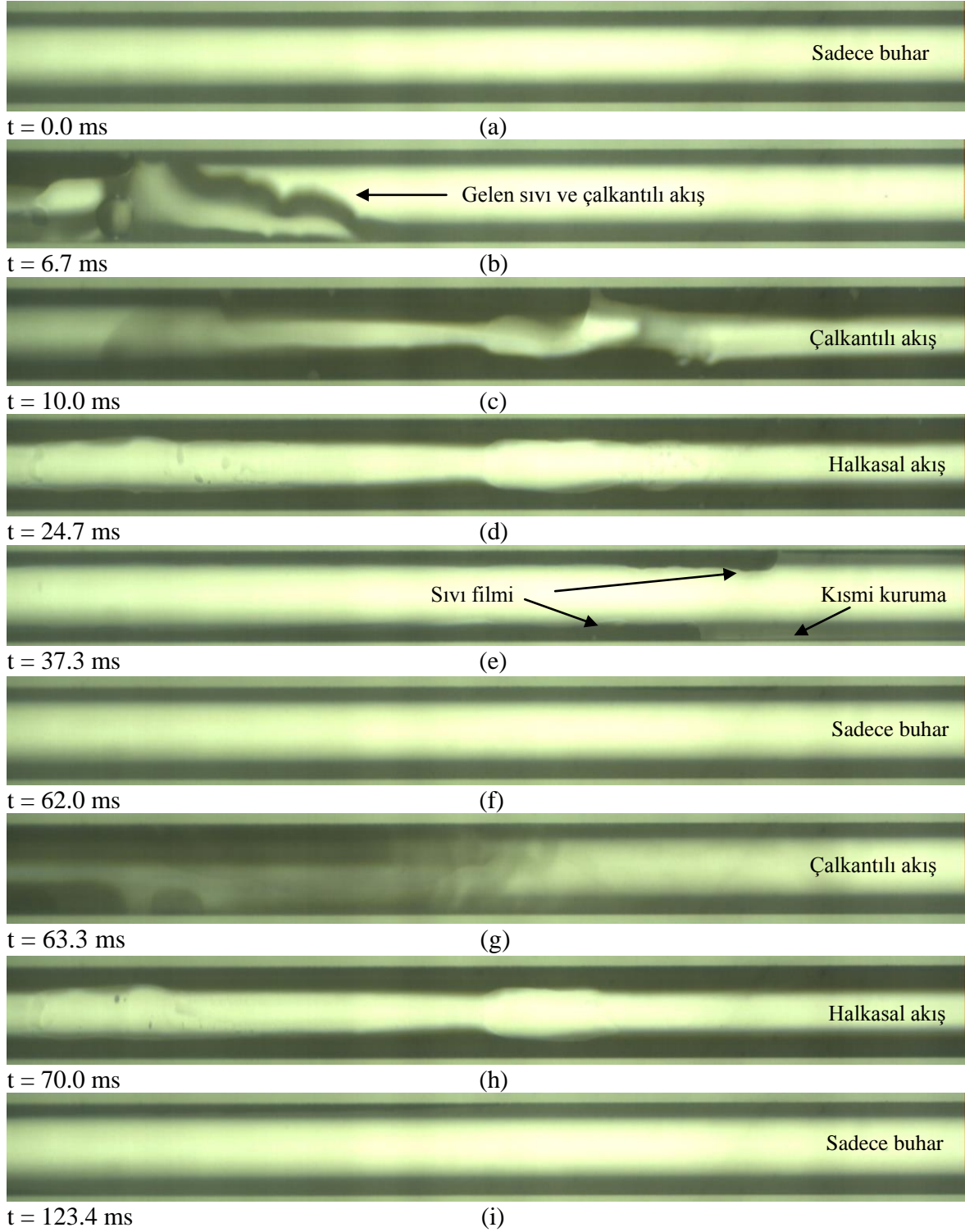
Şekil 3.4.  $G= 92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 44.1 \text{ W}$  çalışma koşulları için girişten 41.5 mm ötede akış desenleri

Kanalın sıvı ile dolduğu an, referans olarak alınmış ve bir periyottaki başlangıç zamanı olarak seçilmiştir ( $t = 0.0$  ms). Kanal su ile dolar dolmaz, akışkan hemen buharlaşmaya başlar. Buharlaşma ilk olarak merkez bölgede başlar ve halkasal akış deseni oluşur. Kanal duvarları üzerinde ince sıvı filmi, kanalın iç kesimlerinde ise buhar mevcuttur. Daha sonra sıvı filmi buharlaşmaya başlar ve 20 ms sonra tamamen buhara dönüşür. Daha sonra, tekrar besleme sıvısı gelir ve kanalı doldurur. Paralel kanallı bir yapıda, tek bir kanal içerisinde tamamen kuruma meydana gelmesi CHF koşulu bakımından kritik bir problem değildir. Paralel kanallar arası etkileşim nedeniyle; farklı kanallarda, farklı akış koşulları görülmektedir. Bir başka ifade ile komşu kanallar olası problemlerin önüne geçer. Bunu göstermek için Şekil 3.5 verilmiştir. Aynı anda komşu kanallarda farklı akış koşullarının varlığı Şekil 3.5'te görülmektedir. Bu durum, paralel mikrokanallı ısı alıcıların bir avantajıdır.



Şekil 3.5.  $G = 92.6$  kg/m<sup>2</sup>s ve  $\dot{q} = 44.1$  W için 41.5 mm ötede çoklu akış desenleri

Periyodik akış desenine ikinci bir örnek,  $G = 92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 48.0 \text{ W}$  için Şekil 3.6'da verilmiştir. Burada, halkasal akıştan önce çalkantılı akış deseninin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, halkasal akıştaki sıvı filmi kalınlıkları üniform değildir.



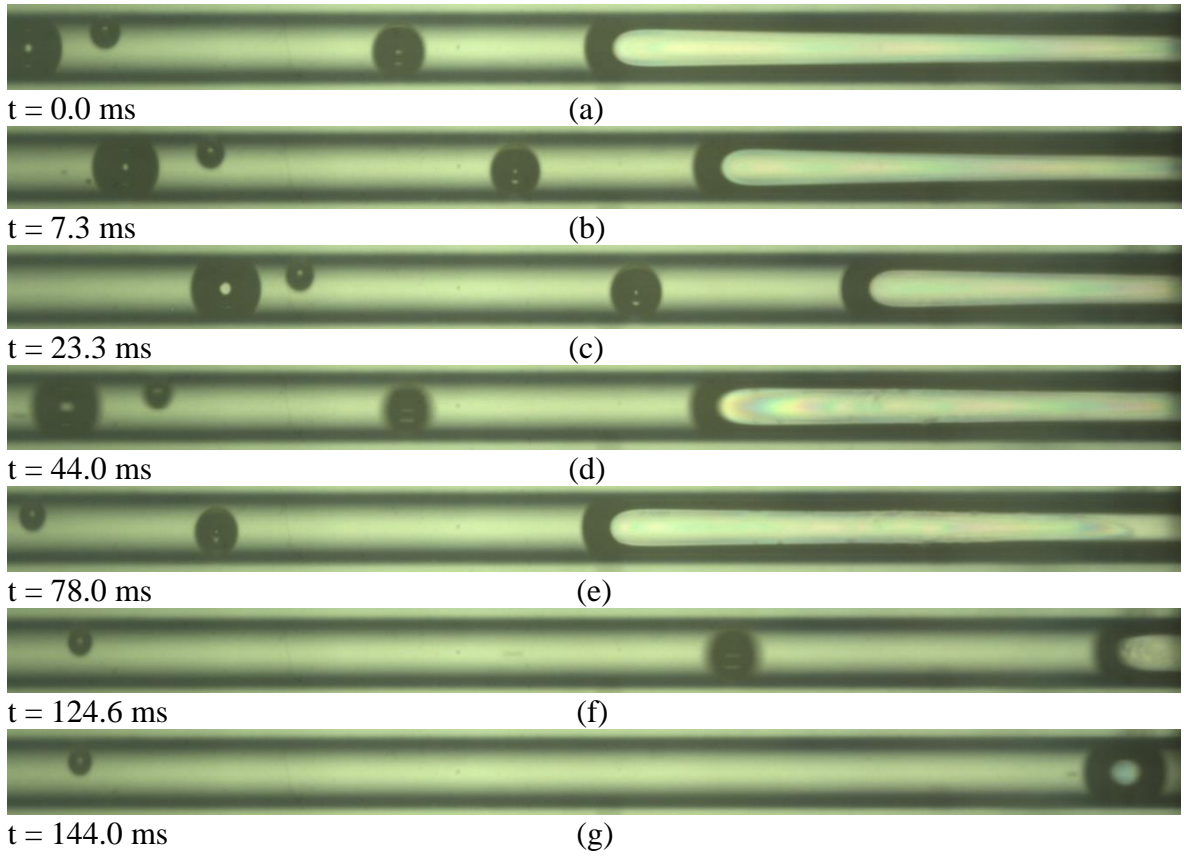
Şekil 3.6.  $G = 92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 48.0 \text{ W}$  için girişten 41.5 mm ötede akış desenleri

Kütle akısı ve ısı akısı değerlerine göre, Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, kanallar içerisinde sisli akış oluşabilmektedir. Bu görüntü,  $G = 92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 59.9 \text{ W}$  çalışma koşullarında alınmıştır. Verilen bir kütle akısında, sisli akış yüksek ısı akısı durumlarında, akışkan tamamen buhar faza dönüşmeden önce görülür.



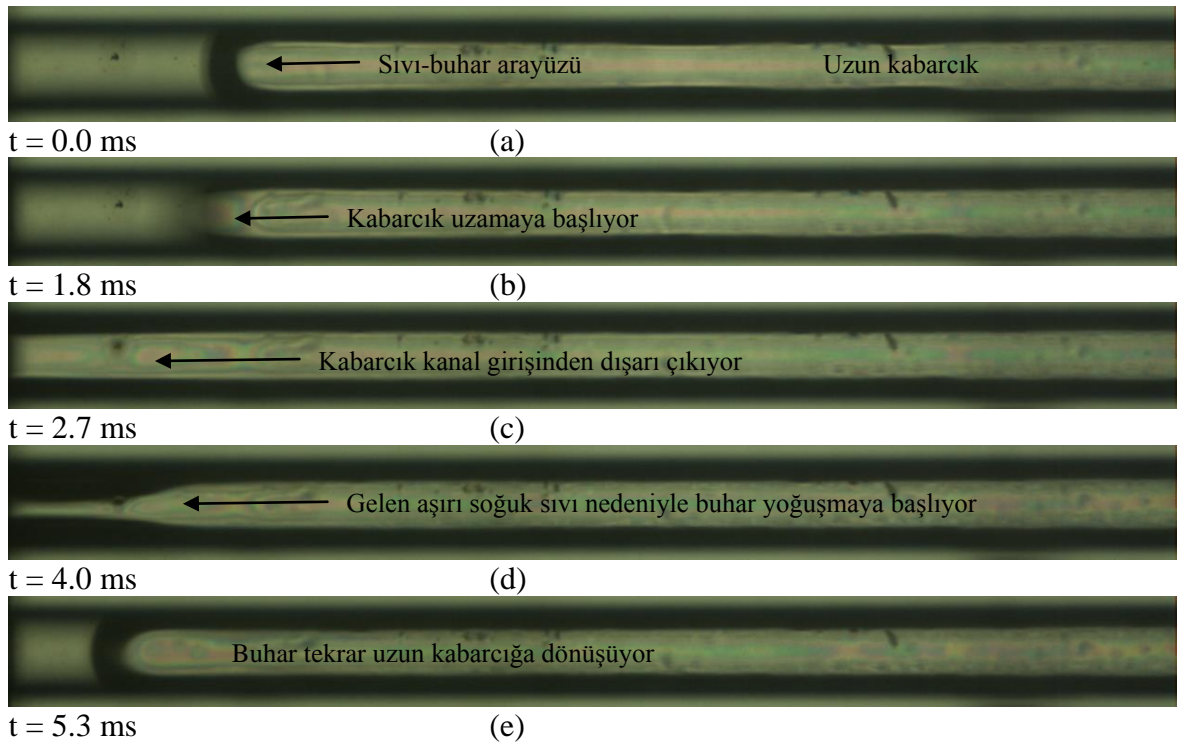
Şekil 3.7.  $G = 92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 59.9 \text{ W}$  için girişten 41.5 mm ötede sisli akış deseni

Şekil 3.8, buharlaşma momentum kuvveti ve atalet kuvveti arasındaki rekabeti/etkileşimi göstermekte olup, kanal girişinden 2 mm uzaklıkta  $G = 92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 44.1 \text{ W}$  çalışma koşullarında alınan görüntüleri içermektedir.



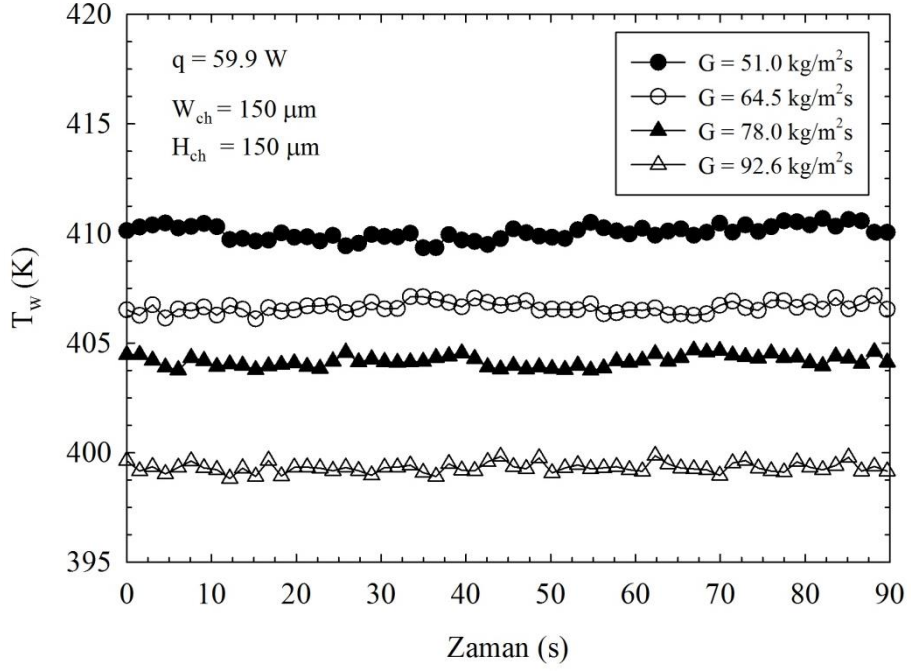
Şekil 3.8. Buharlaşma momentum kuvveti ve atalet kuvveti arasındaki etkileşim, girişten uzaklık 2 mm,  $G = 92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 44.1 \text{ W}$ .

Buharlaşma momentum kuvveti etkisiyle buhar kanal girişine doğru uzamaya başlar. Gelen sıvının ataleti bu harekete karşı bir kuvvet uygular. Şekillerde mili saniye mertebelerinde meydana gelen ileri-geri yönlü ara yüz hareketleri görülmektedir. Şekil 3.8'e karşılık gelen çalışma koşulları, bu kanal için, deneylerdeki en yüksek kütle akısı ile en düşük ısı akısı koşullarına karşılık gelmektedir. Şekil 3.9, kanalın hemen girişinde  $G = 51.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 59.9 \text{ W}$  alışma koşullarına aittir. İlgili değerler, bu kanal için, en düşük kütlesel debi ve en yüksek ısı akısına karşılık gelmektedir. Burada, ters akış o kadar Őiddetlidir ki; uzun kabarcık kanal girişinden dışarı çıkmaktadır. Şekil 3.2a'dan da hatırlanacağı üzere, bu durum ısı transferi açısından kötü koşullara karşılık gelmektedir.

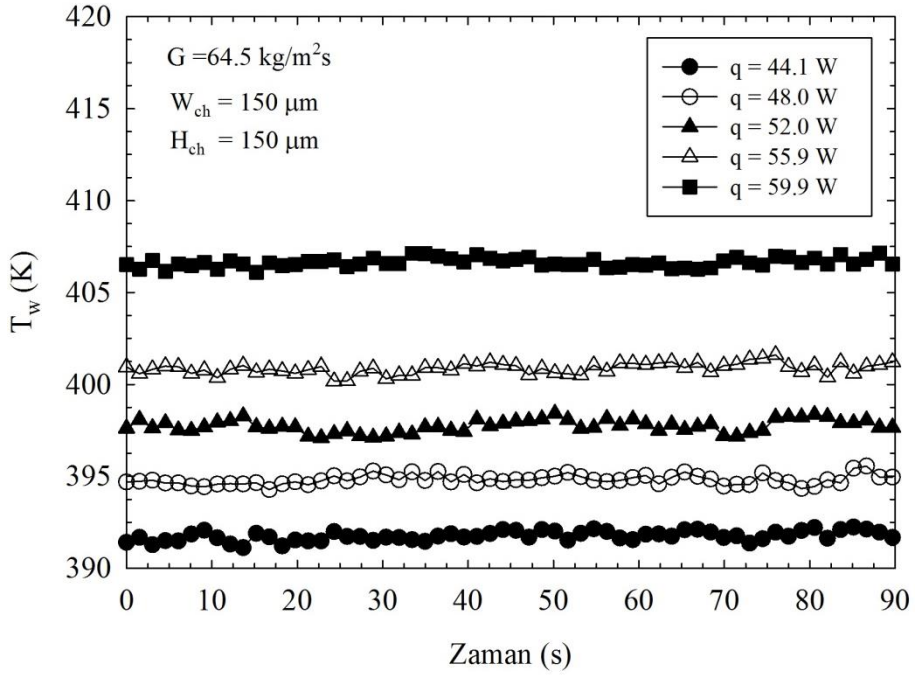


Şekil 3.9.  $G = 51.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $\dot{q} = 59.9 \text{ W}$  alışma koşullarında kanal girişinde ters akış

Kanallarda meydana gelen ters akış, kısm ve tam kuruma ve yukarıda bahsedilen farklı akış desenleri, basınç ve sıcaklık değerlerini etkilemektedir. Bu etkinin düzeyi, Şekil 3.10, 3.11 ve 3.12'de gösterilmiştir. Şekil 3.10a ve b'de duvar sıcaklığının zamanla değişimi sırasıyla farklı kütle akıları ve ısı akıları için verilmiştir. Periyodik karakter sıcaklık ölçümleri tarafından da yansıtılmaktadır. Ancak, salınım genlikleri oldukça düşük olup;  $\pm 0.5 - 1 \text{ K}$  arasında değişmektedir.



(a)

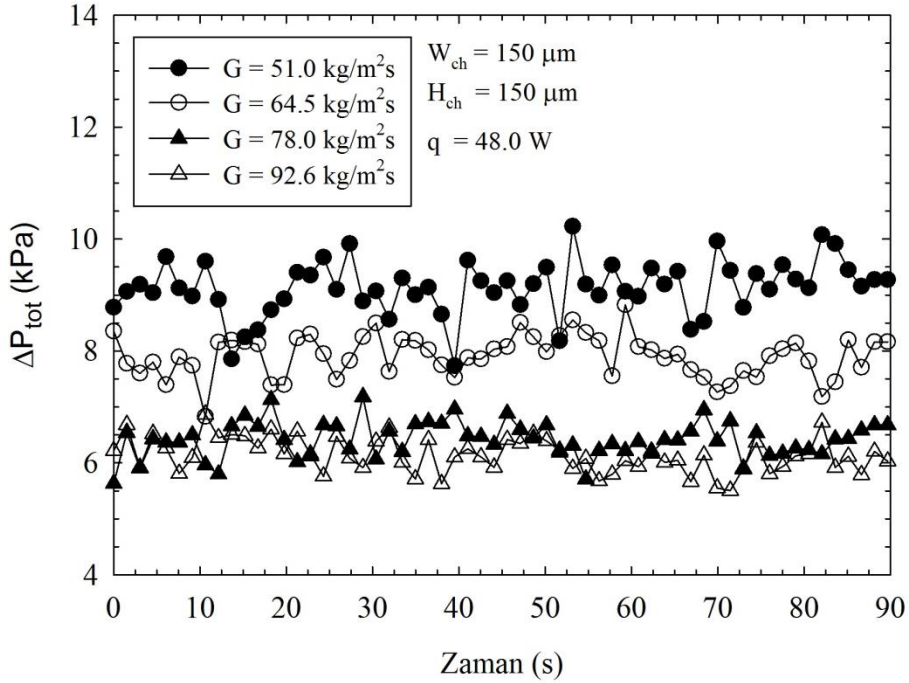


(b)

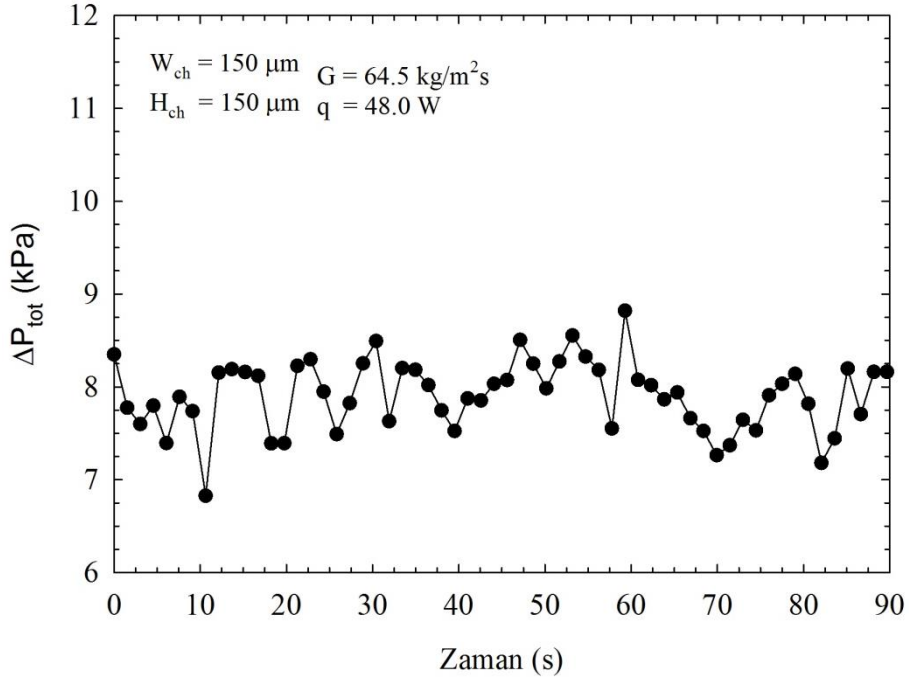
Şekil 3.10. Farklı kütle akıları (a) ve ısı yükleri (b) için duvar sıcaklığının zamanla değişimi

Yüzey sıcaklığı artan kütle akısı ile azalırken; artan ısı akısı ile artmaktadır. Yüksek kütle akıları, kuruma periyodunda azalmaya sebep olur ve aynı zamanda daha yüksek

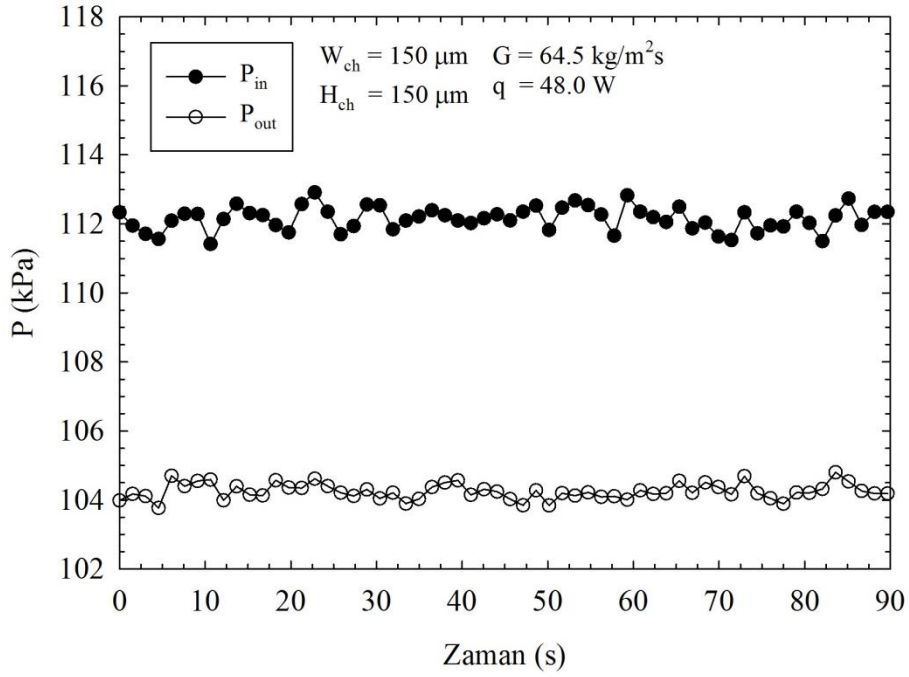
sistem kararlılığı anlamına gelir. Atalet kuvvetindeki artış, ters akışa karşı artan direnç anlamına gelmektedir. Verilen bir ısı akısında, debi artırılarak kuruma önlenir. Şekil 3.11, farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün zamanla değişimini göstermektedir. İncelenen koşullarda düşük basınç salınımları gözlenmiştir. Salınımların genlikleri 1 kPa değerinin altındadır. Bunun muhtemel iki sebebi vardır. Birincisi, test bölgesinin geometrisi ve ikincisi ise paralel kanallar arasındaki etkileşimdir. Büyük hazneden sonra kesit alanı aniden daralır. Bu düzenleme, kanallardan önce yerleştirilmiş bir kontrol vanası görevi görmekte ve ayrıca daha üniform akış dağılımına sebep olmaktadır. Paralel kanallı konfigürasyonlarda, tek bir kanal ters akış veya kabarcığın kanal girişine doğru uzaması nedeniyle akışa karşı direnç gösterirse, gelen akışkan daha düşük dirençli kanallara yönelir ve akışın sürekliliği/sürdürülebilirliği sağlanır. Bu sebeplerle, ne yüksek basınç düşümü çalkantıları ne de yüksek sıcaklık çalkantıları ölçülmüştür. Benzer şekilde, Şekil 3.12, toplam basınç düşümü ve giriş-çıkış basınçlarının tek bir koşul için zamanla değişimini göstermektedir. Düşük genlikli basınç salınımları Şekil 3.12'den de görülmektedir.



Şekil 3.11. Toplam basınç düşümünün farklı kütle akıları için zamanla değişimi



(a)



(b)

Şekil 3.12.  $G = 64.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve  $q = 48.0 \text{ W}$  için toplam basınç düşümü (a) ve giriş-çıkış basınçlarının (b) zamanla değişimi

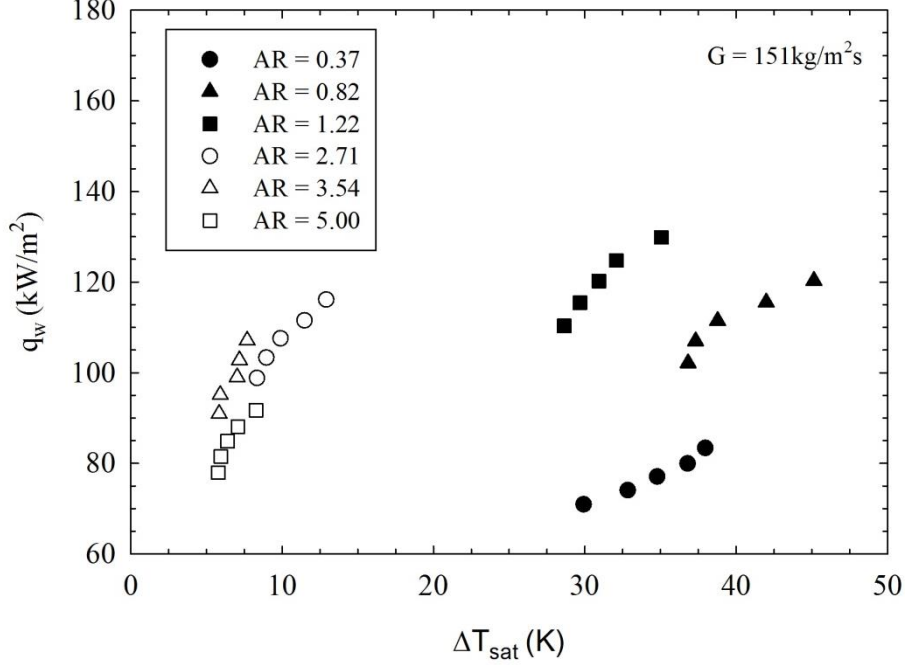


### 3.2. Genişlik/Derinlik Oranı (AR)'nin Mikrokanallarda Doymuş Kaynamalı Akış Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde AR'nin, paralel dikdörtgen kesitli mikrokanallarda doymuş kaynamalı akış karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. AR'nin etkisini belirlemek amacıyla altı farklı silikon mikrokanallı ısı alıcı kullanılmıştır. Herhangi bir ısı alıcıda yer alan mikrokanallar, bir diğer ısı alıcıdakine göre farklı genişlik ve derinlik değerine; fakat aynı hidrolik çapa (100  $\mu\text{m}$ ) sahiptir. Farklı kütle akıları (151, 195, 238, 281 ve 324  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ), ısı güç değerleri (51.9, 54, 56, 57.9, 60.1 W) ve AR'lerde (0.37, 0.82, 1.22, 2.71, 3.54 ve 5.00) çalışılmıştır.

#### 3.2.1. Kaynama Eğrileri

Şekil 3.13'te, doymuş kaynama bölgesinde  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ve farklı AR'ler için kaynama eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.13.  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de farklı AR'ler için kaynama eğrileri

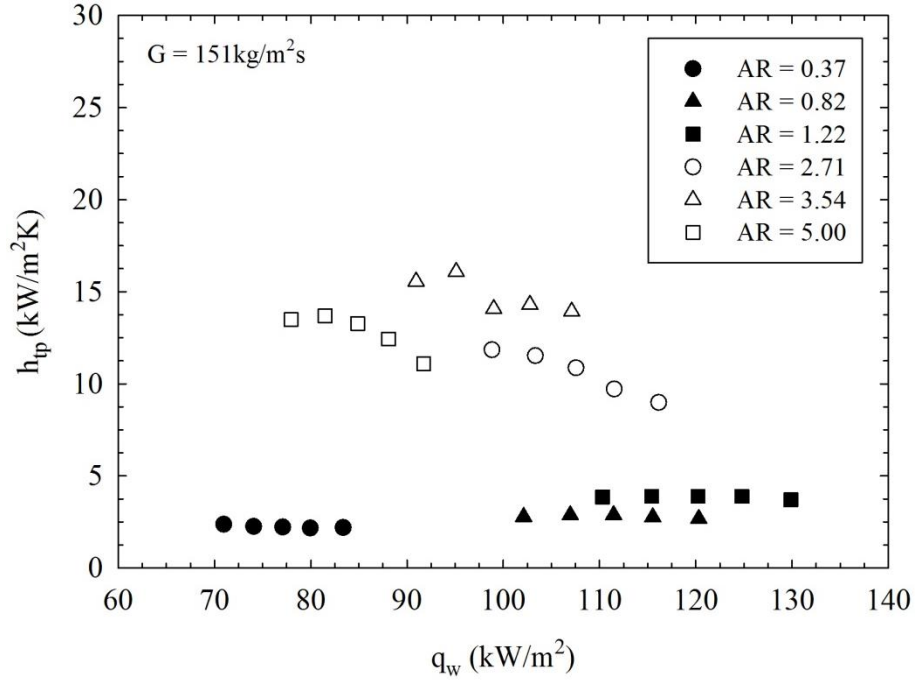
Şekilden de görüldüğü üzere; kızma farkı, incelenen bütün durumlarda artan ısı akısı ile artmaktadır. Yüksek AR değerlerinde, eğriler daha diktir. AR'nin 2.71'den 1.22'ye

geçişinde, kızma farklarında belirgin bir değişim olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kuruma periyodunun uzamasıdır. AR'nin 1.22 ve 0.82 değerlerinde, kuruma periyodu nedeniyle ısı transferinde meydana gelen yetersizlikler, duvar sıcaklıklarında yaklaşık 4 K değerinde sıçramalara sebep olmaktadır. Bu durum, daha yüksek kızma farklarına yol açmaktadır.

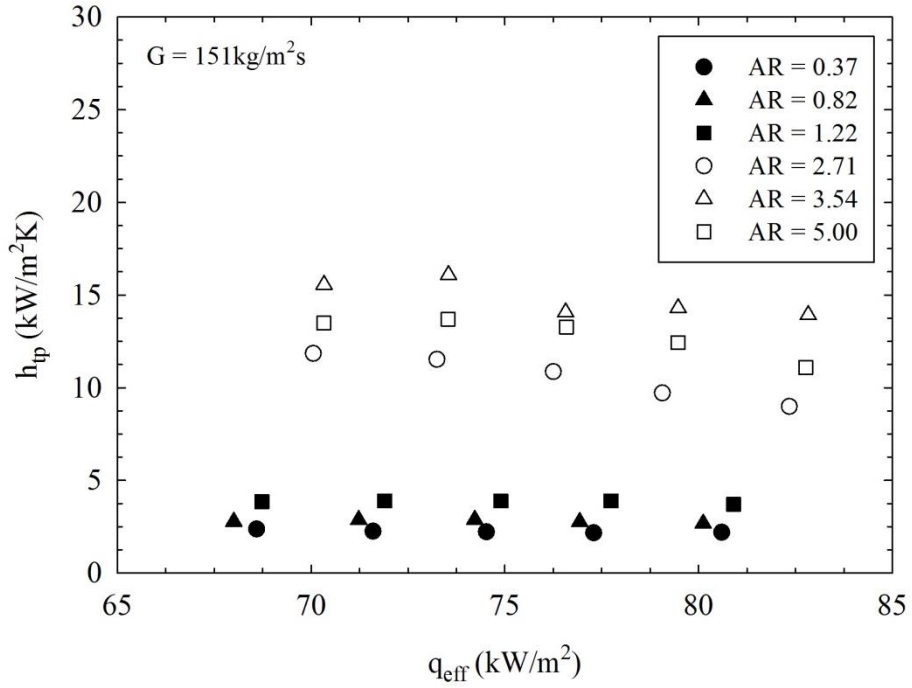
### 3.2.2. AR'nin Doymuş Kaynamalı Akış Karakteristikleri Üzerindeki Etkisi

Şekil 3.14 a ve b'de farklı AR'ler için yerel iki faz ısı transfer katsayısının, sırasıyla, duvar ısı akısı ve efektif ısı akısı ile değişimi verilmiştir. Isı transfer katsayısı  $AR = 3.54$  değerine kadar artan AR ile artıp; devamında ise azalmaktadır. Ayrıca, AR 1.22'den 2.71'e artınca, ısı transfer katsayılarında belirgin bir değişim meydana gelmektedir. Bu değişim, yalnızca kanal kesit etkisi veya köşe etkisi (köşelerdeki sıvı filmi kalınlığı veya miktarı) ile açıklanamaz. Muhtemel neden, köşe etkisi ve adyabatik uzunluğun birleşik etkisidir. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, kanalların üst tarafı pyrex camdır ve adyabatik duvar olarak kabul edilmiştir. Teorik olarak, köşelerdeki sıvı miktarı  $AR = 3.54$ 'e kadar artar.  $AR = 5.00$  için bu miktar  $AR = 3.54$ 'dekinden daha azdır. Aynı zamanda, adyabatik uzunluk kanal genişliği arttıkça artmaktadır. Adyabatik uzunluğun ve köşelerdeki sıvı miktarının her ikisi de AR'nin 1.22'den 2.71'e geçişinde belirgin bir artış gösterir. Geometrik konfigürasyonlar akış fiziğini ve dolayısıyla ısı transfer mekanizmalarını etkilemektedir.

Şekil 3.15'te farklı AR oranları için yerel iki faz ısı transfer katsayısının yerel kuruluk derecesi ile değişimi görülmektedir. AR'nin yüksek değerleri için (2.71, 3.54 ve 5.00) ısı transfer katsayısı, artan kuruluk derecesi ile azalmaktadır. Ancak, düşük AR değerlerinde (0.37, 0.82 ve 1.22); ısı transfer katsayısı, kuruluk derecesinden neredeyse bağımsızdır. Bu sonuçlar, AR'nin yüksek değerlerinde taşınımlı kaynamanın etkinliğini göstermektedir. Mikrokanallarda doymuş kaynamalı akış periyodik karaktere sahiptir. AR'nin yüksek değerleri için kuruma periyodu daha kısadır ve tek fazlı ıslatma periyodu ile buharlaşmalı kaynama periyodu daha uzundur.

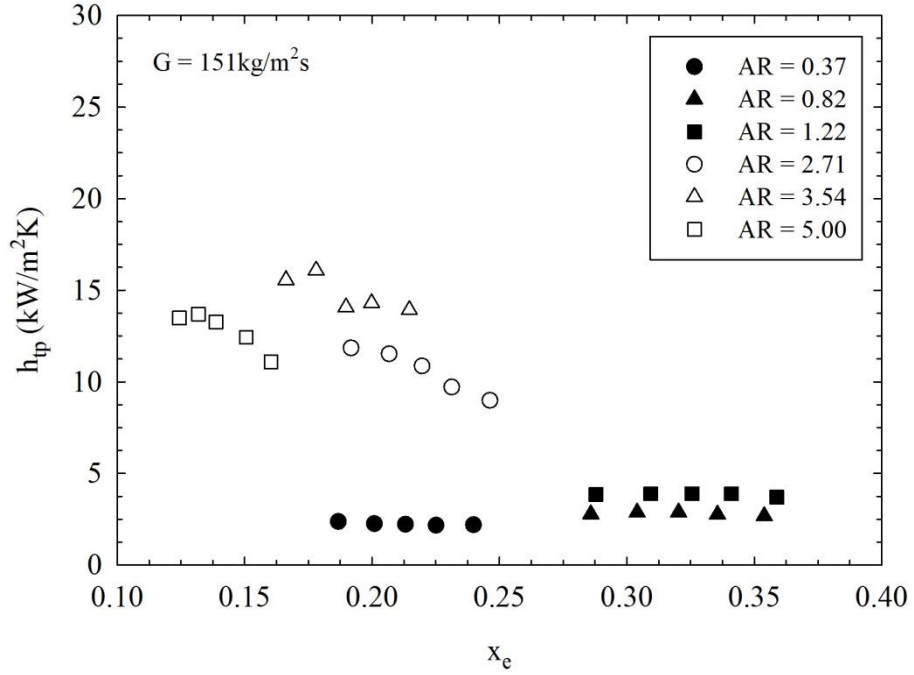


(a)



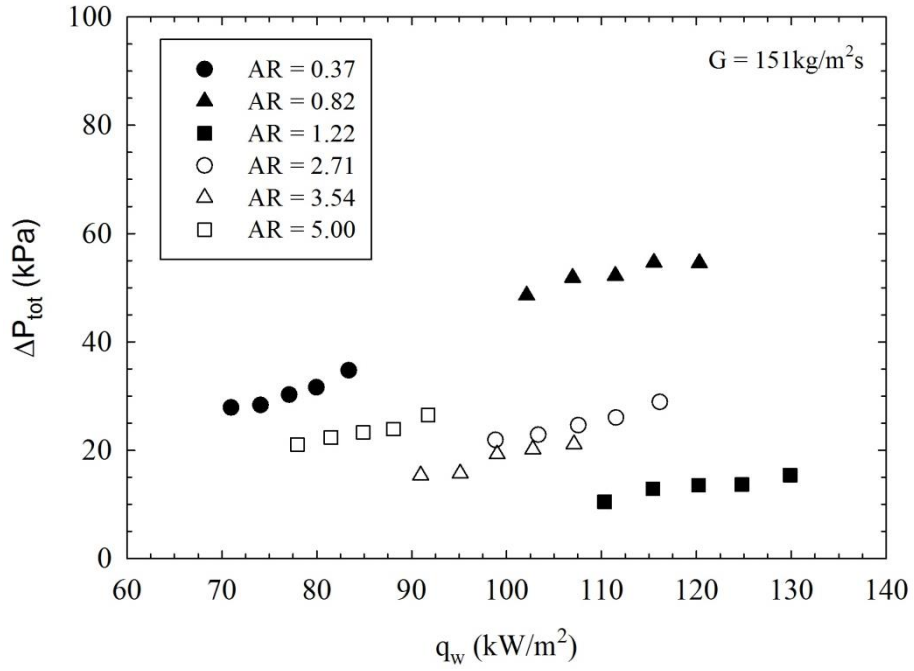
(b)

Şekil 3.14. Farklı AR değerleri için  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı (a) ve efektif ısı akısı (b) ile değişimi

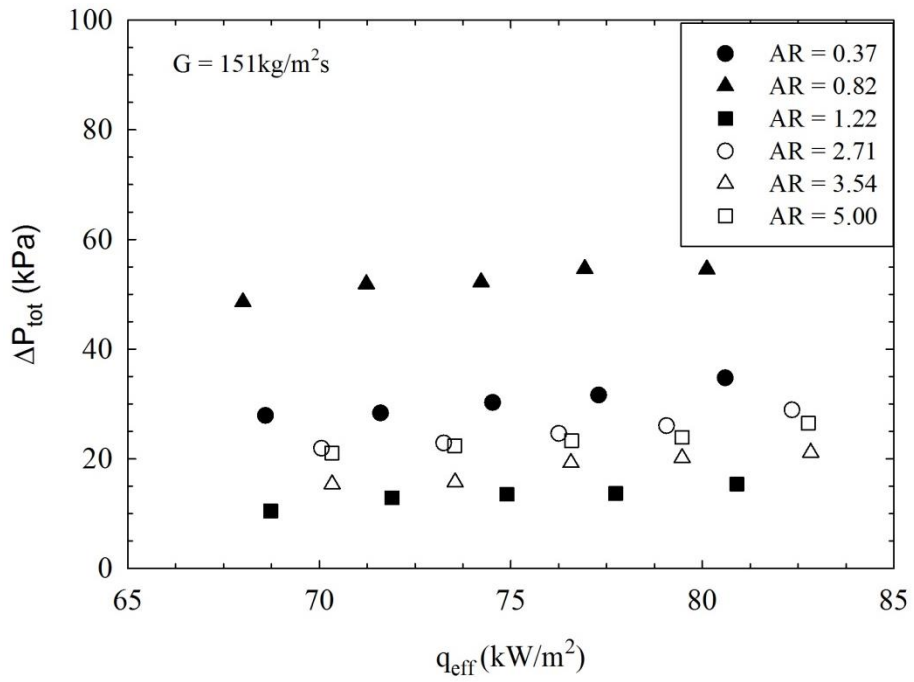


Şekil 3.15. Farklı AR değerleri için  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de ısı transfer katsayısının yerel kuruluk derecesi ile değişimi

Şekil 3.16 a ve b'de farklı AR'ler için toplam basınç düşümünün, sırasıyla, duvar ısı akısı ve efektif ısı akısı ile değişimi verilmiştir. İncelenen bütün AR değerleri için basınç düşümü, artan ısı akısı ile artmaktadır. Isı akısındaki artış ile buharlaşma momentum kuvveti artmaktadır. Bu nedenle, kanal girişine doğru genişleyen kabarcık daha fazla kuvvet uygulamaya başlar ve akışa karşı direnç artar. Bu durum, basınç düşümünü arttırır. Benzer durum, Şekil 3.17'de de görülmektedir. Basınç düşümü, artan çıkış kuruluk derecesi ile artar. Ancak, AR ile toplam basınç düşümü arasında düzenli bir ilişki yoktur. Bu durumun, akış fiziğinin karmaşık yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Buharlaşma momentum kuvveti ve atalet kuvveti arasında güçlü etkileşimler vardır. Mikro ölçekli uygulamalarda, yüzey gerilmesi de önemli bir faktör olarak ortaya çıkar. Ayrıca, kaynamalı akış periyodik bir karaktere sahiptir ve paralel kanallı düzenlemelerde kanallar birbirini etkiler.

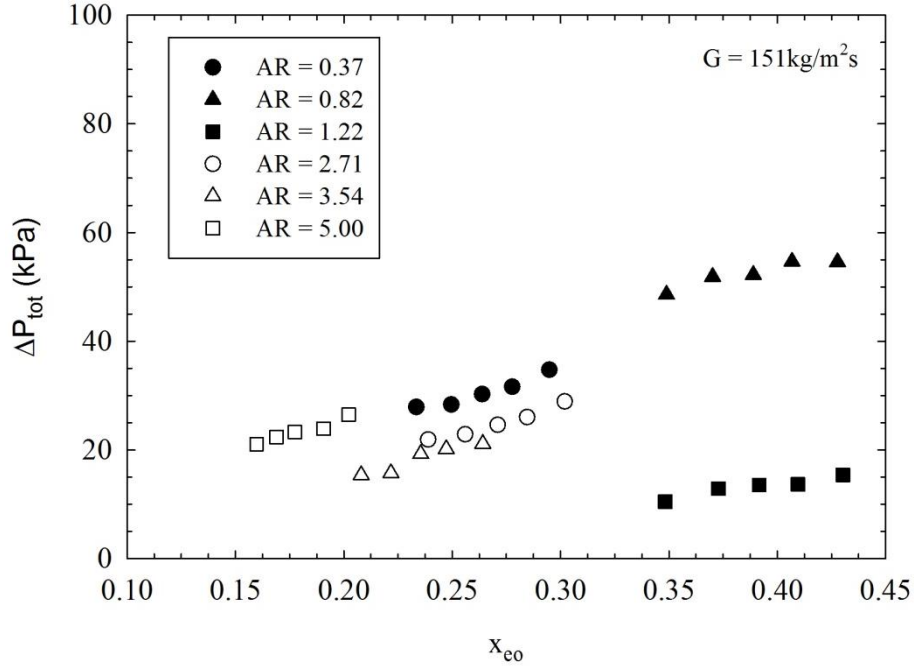


(a)



(b)

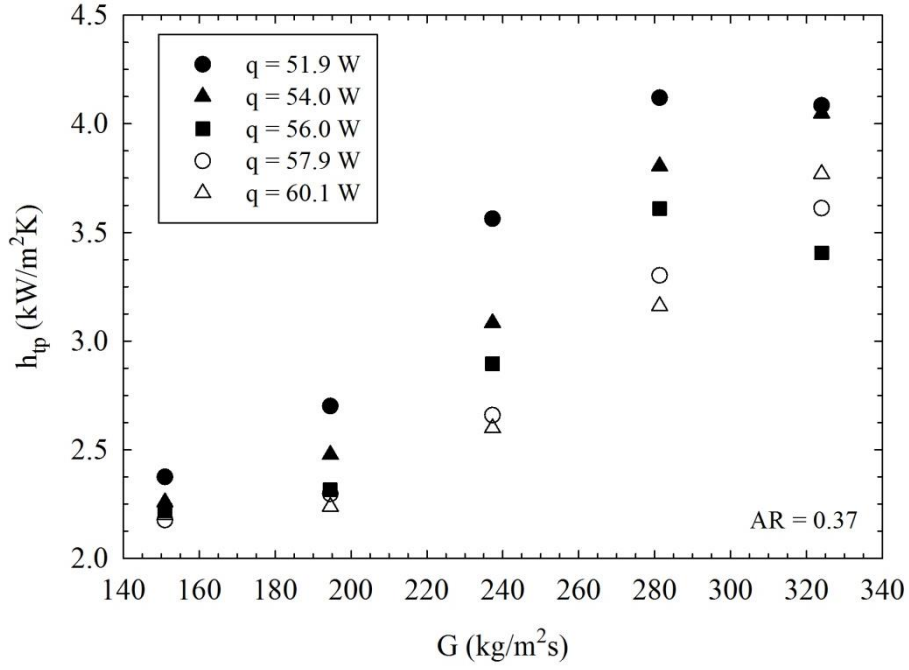
Şekil 3.16. Farklı AR değerleri için  $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de toplam basınç düşümünün duvar ısı akısı (a) ve efektif ısı akısı (b) ile değişimi



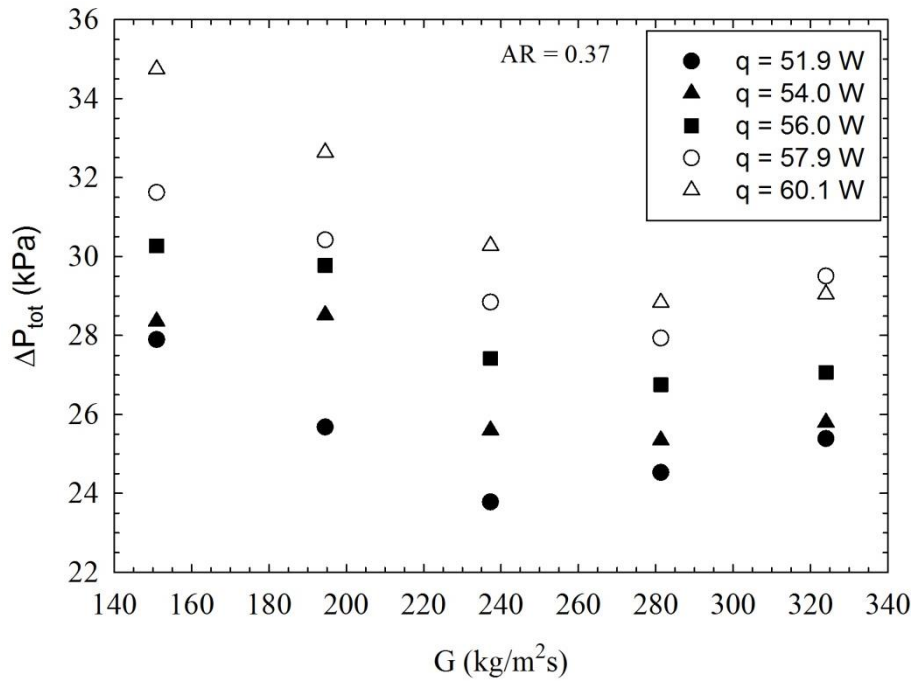
Şekil 3.17. Farklı AR değerleri için  $G=151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de toplam basınç düşümünün çıkış kuruluk derecesi ile değişimi

### 3.2.3. Isı Akısı ve Kütle Akısının Doymuş Kaynamalı Akış Karakteristikleri Üzerindeki Etkisi

Şekil 3.18 a ve b'de,  $AR = 0.37$  için farklı ısı yüklerinde, sırasıyla, ısı transfer katsayısı ve toplam basınç düşümünün kütle akısı ile değişimi verilmektedir. Şekil 3.18a'da görüldüğü gibi ısı transfer katsayısı incelenen bütün ısı yüklerinde benzer eğilim göstermektedir. Isı transfer katsayısı, genellikle, artan kütle akısı ile artar.  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$  haricinde; ısı akısı, ısı transfer katsayısı üzerinde önemli bir rol oynamaya başlar. Verilen bir kütle akısı değerinde, ısı transfer katsayısı genellikle artan ısı akısı ile azalır. Bu sonuçlar taşınımli kaynamanın baskın olduğunu göstermektedir. Şekil 3.18 b'den de görüldüğü üzere, toplam basınç düşümü bütün ısı akısı değerleri için benzer eğilimler göstermektedir. Toplam basınç düşümü artan kütle akısı ile bir minimuma erişir ve sonra tekrar artmaya başlar. Sabit bir kütle akısı değerinde, artan ısı akısı ile toplam basınç düşümü artar. Artan ısı akısı akışa karşı daha fazla direnç oluşmasına ve dolayısıyla daha yüksek basınçlara sebep olur. Kütle akısındaki artış ise buharlaşma momentum kuvvetine karşı olan atalet kuvvetinin artması anlamına gelmektedir. Fakat aynı zamanda daha yüksek kütle akıları daha yüksek sürtünme basınç kaybı demektir. Elde edilen sonuçlar, bu dengeyi veya etkileşimi çok net bir şekilde göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.18.  $AR = 0.37$  için ısı transfer katsayısı (a) ve toplam basınç düşümünün (b) farklı ısı yüklerinde kütle akısı ile değişimi

### 3.2.4. Akış Görüntüleme ve Akış Kararsızlıkları

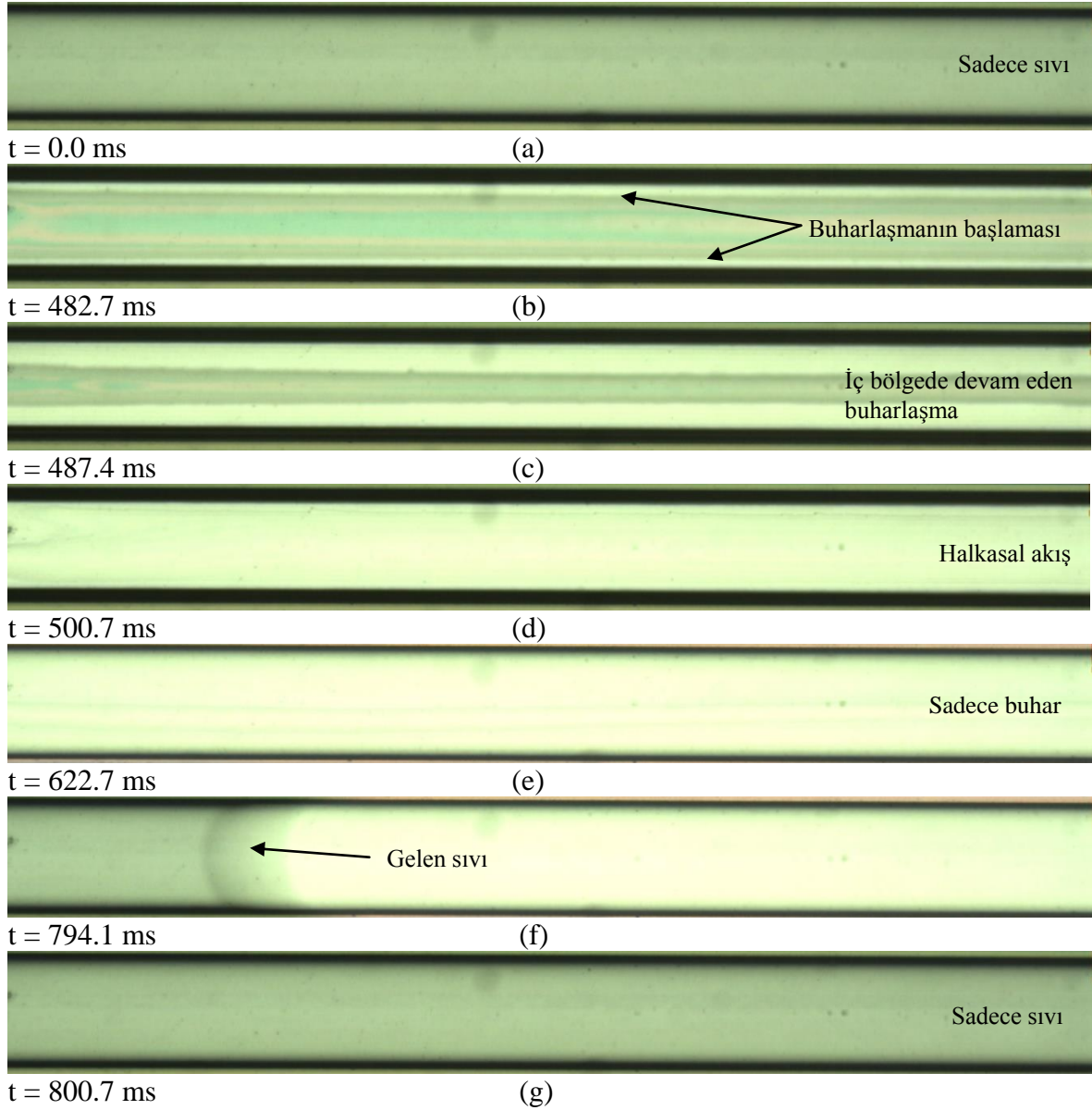
Birinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalarla ilgili olarak  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$  kesitli kanal için elde edilen akış görüntüleme sonuçları verilmiş ve akışın genel fiziksel mekanizmasından bahsedilmiştir. Mikrokanallarda kaynamalı akış, henüz, yeterince anlaşılammış karmaşık bir konudur. Bu nedenle, akış görüntüleme sonuçları konunun gelişimi ve anlaşılması açısından oldukça önemlidir. Bundan dolayı, tez kapsamında, akış görüntülerine özel bir önem ve ağırlık verilmiştir. Ancak, önceki bölümlerde yapılan açıklamaları tekrarlamamak amacıyla, benzer anlatımlar kısa geçilmiş ve görüntüler ön planda tutulmuştur.

Bu bölümde, farklı kanallar ve çalışma koşulları için de akış görüntüleri verilmiştir. Mikrokanallarda doymuş kaynamalı akışın sanki-periyodik bir karaktere sahip olduğu önceki bölümde bahsedilmiştir. Bu periyodik davranış üç aşamadan oluşur: ıslatma aşaması, kısmî kuruma/kuruma aşaması ve buharlaşma ve uzun kabarcıklı (slug)-halkasal/halkasal akış aşaması. Bu aşamalar arasında geçen süre, geometrik parametrelere ve test koşullarına göre değişmektedir.

Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de sırasıyla  $AR = 3.54$  ve  $1.22$  olmak üzere iki farklı kanalda (girişten  $41.5 \text{ mm}$  uzakta) gerçekleşen, bir periyottaki genel akış deseni sırası verilmiştir. Şekil 3.19’den görüldüğü üzere, öncelikle, kanal sıvı ile dolar. Bu süre, başlangıç zamanı olarak seçilerek  $0.0 \text{ ms}$  alınmış ve diğer olayların başlangıç zamanları bu referans zaman üzerinden verilmiştir. Kanal sıvı ile dolduktan sonra buharlaşma başlar ve halkasal akış oluşur. Sonra, sıvı filmleri de buharlaşır ve kuruma meydana gelir. Daha sonra, kanal tekrar besleme sıvısı ile dolar. Şekil 3.19 b ve c’de görüldüğü üzere, geniş kanalda ( $AR = 3.54$ ) buharlaşma duvar tarafından (sıvı filmi hariç) iç bölgeye doğru gerçekleşir ve kuruma periyodu  $AR = 1.22$ ’dekine kıyasla çok daha kısadır.

$AR = 3.54$  için kanalın sıvı ile temas süresi, buharlaşma periyodu ve halkasal akış periyotları  $AR = 1.22$ ’ye oranla daha uzundur.  $AR = 1.22$  için ise buharlaşma iç bölgede başlar ve aniden yan duvarlara doğru yayılır. Kuruma periyodu,  $AR = 3.54$ ’den çok daha uzundur. Bu görüntüler, kaynamalı akıştaki fiziksel mekanizmayı ve farklı  $AR$  değerleri için ısı transfer karakteristiklerinin genel eğilimlerini açıklamaktadır. Görüldüğü üzere, taşınımlı kaynama baskın ısı transfer mekanizması olup; kabarcıklı kaynama bastırılmaktadır. Periyodik kuruma olayı ısı transfer prosesi açısından ciddi bir problemdir.

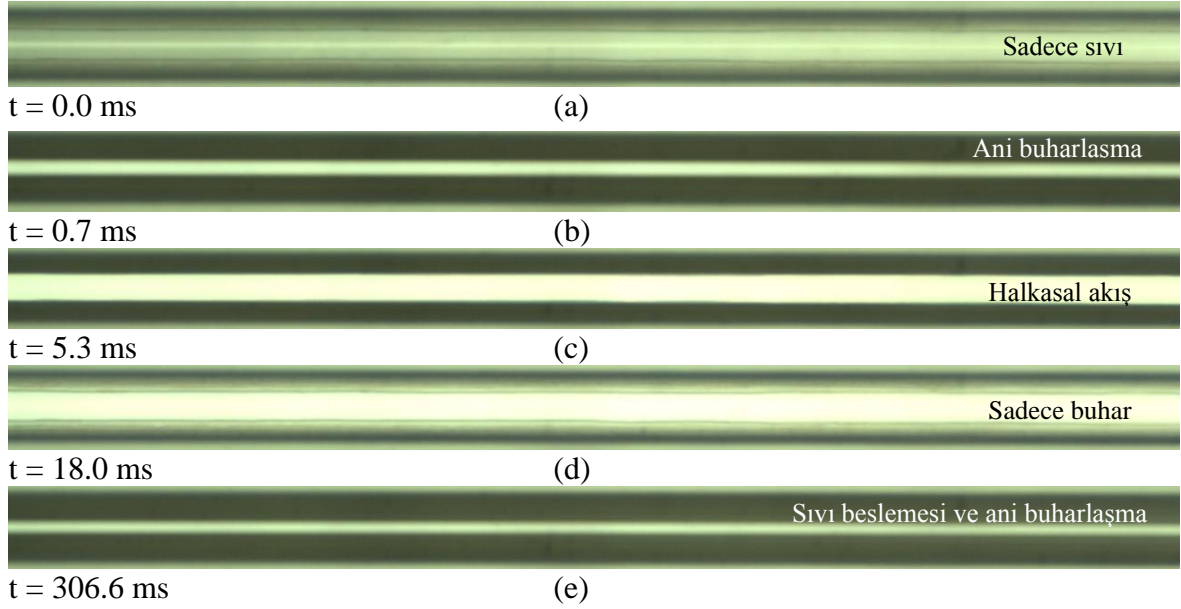




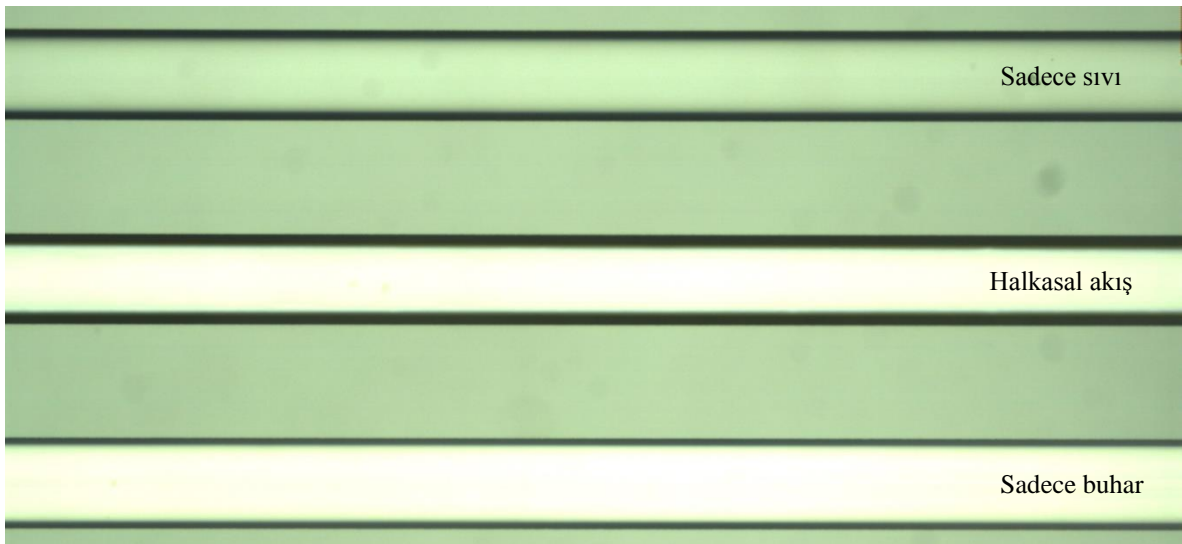
Şekil 3.19.  $G = 324 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 57.9 \text{ W}$  ve  $AR = 3.54$  için girişten 41.5 mm uzakta bir periyodik kaynamadaki akış deseni sırası.

Şekil 3.21’de verilen herhangi bir zamanda komşu kanallar içerisinde farklı akış desenlerinin olduğu görülmektedir. Literatür özetinde de belirtildiği üzere, konuyla ilgili sayısal çalışma sayısı az ve mevcutların da geçerliliği sorgulanacak düzeydedir. Zaten sayısal çalışmalardaki genel amaç basit bir kabarcığın ara yüzünü modelleme şeklindedir. Ancak, Şekil 3.22’de ara yüzün milisaniye mertebelerinde hem şekil hem de konum olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Bu şekilde, ayrıca, kızgın buhar ile onu çevreleyen kızgın sıvı arasındaki etkileşim, bu etkileşim esnasında buharlaşma momentum kuvveti, atalet kuvveti ve yüzey gerilme kuvvetlerinin mikrokanallarda doymuş kaynamalı akış esnasında

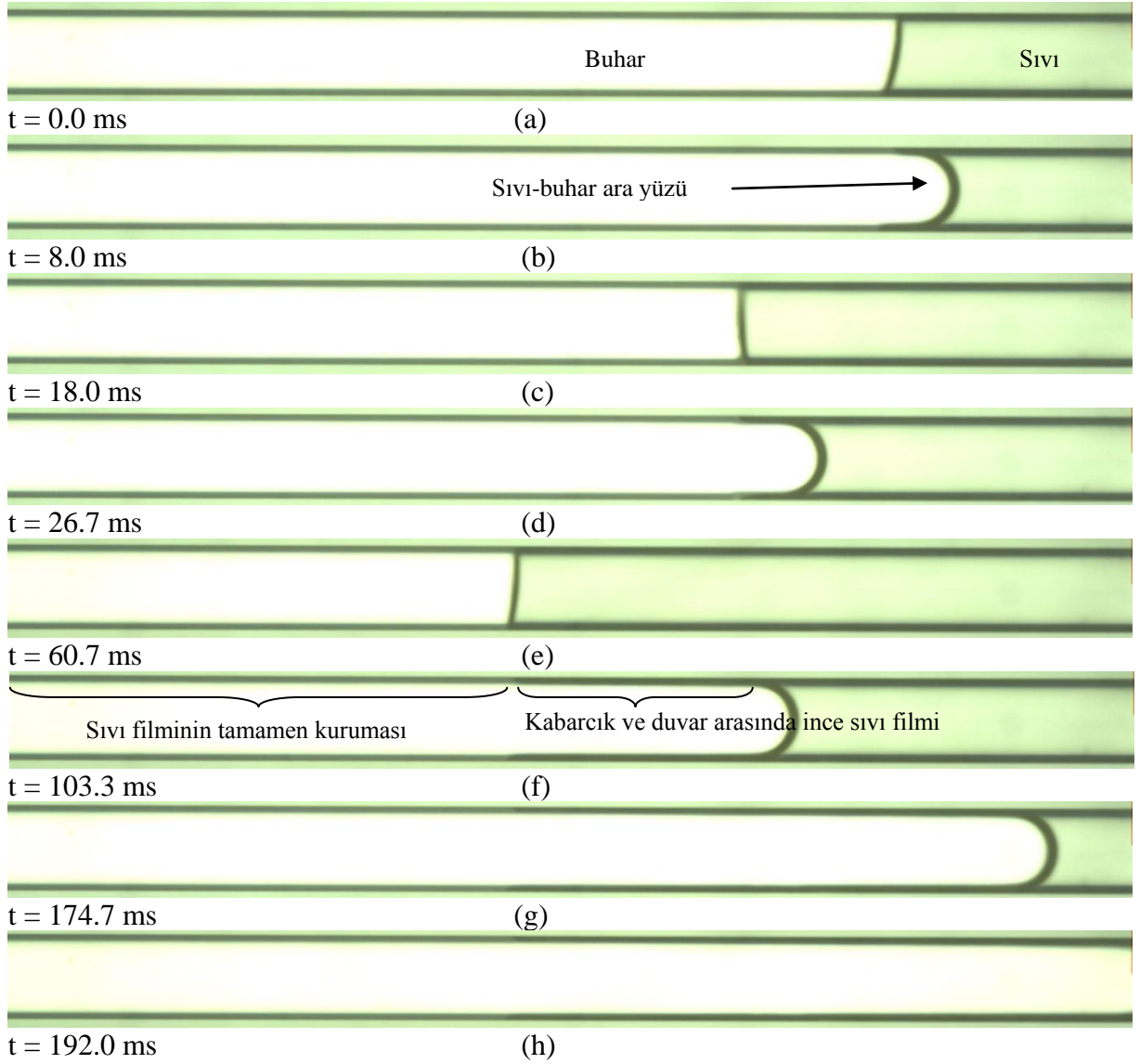
ne derece önemli oldukları da görülmektedir. Şekil 3.22,  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $AR = 2.71$  ve  $\dot{q} = 51.9 \text{ W}$  çalışma koşulları altında, girişten 11.5 mm uzaklıkta alınan görüntülerden oluşmaktadır.



Şekil 3.20.  $G = 324 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 57.9 \text{ W}$  ve  $AR = 1.22$  için girişten 41.5 mm uzakta bir periyodik kaynamadaki akış deseni sırası.

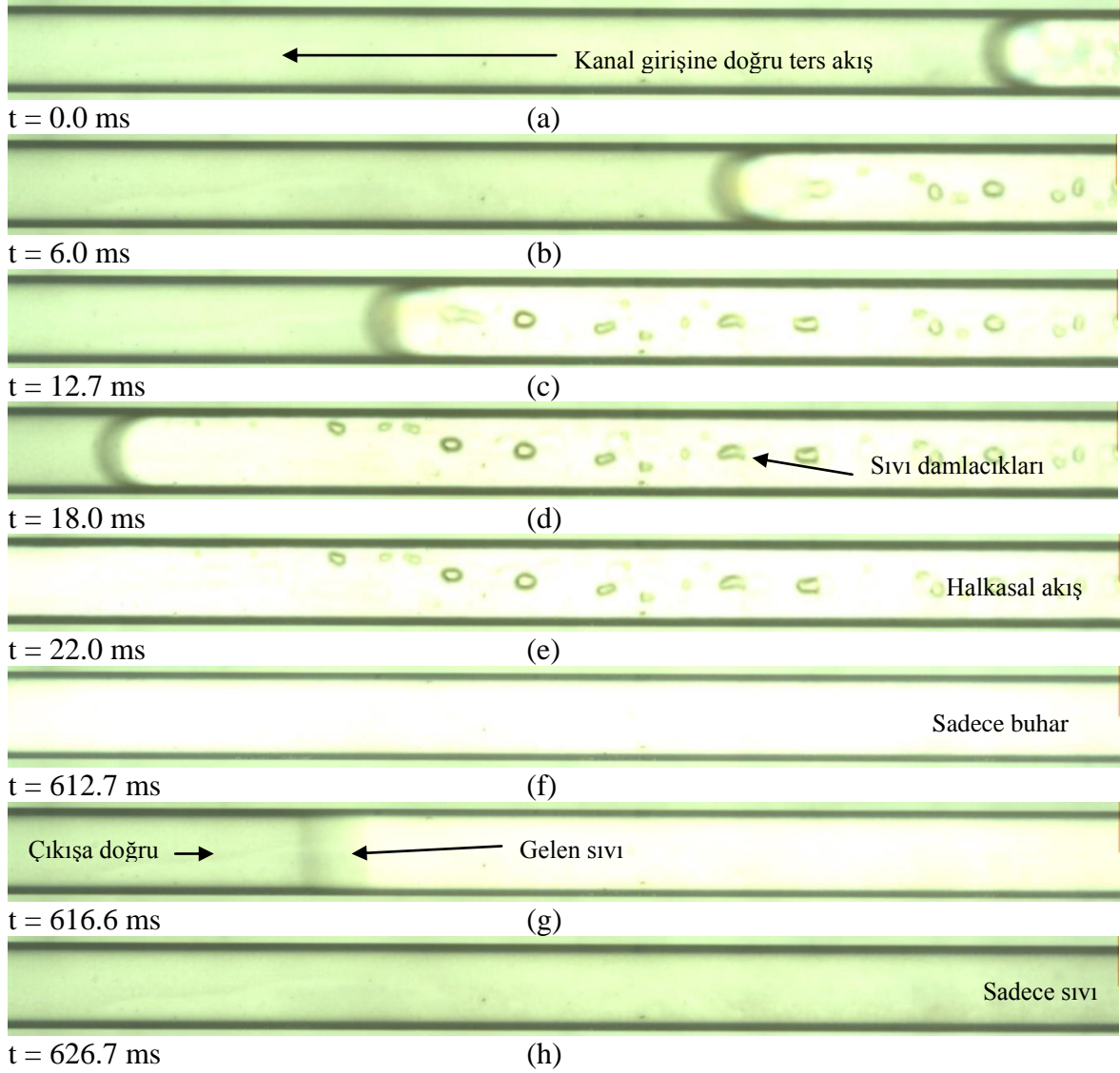


Şekil 3.21.  $G = 324 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 51.9 \text{ W}$  ve  $AR = 2.71$  için verilen bir zamanda girişten 41.5 mm uzakta komşu kanallardaki akış deseni dağılımı



Şekil 3.22.  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 51.9 \text{ W}$  ve  $AR = 2.71$  için girişten 11.5 mm uzakta akış deseni değişimi

Şekil 3.23, Şekil 3.22 ile aynı koşullarda çekilmiş olup; tek fark, uygulanan ısıl gücün  $60.1 \text{ W}$ 'a yükseltilmesidir. Artan ısı akısı, akışa karşı olan direnci, ters akış şiddetini veya bir diğer ifadeyle kabarcığın giriş tarafına doğru uzama eğilimini artırmaktadır. Bu şekilde, aynı zamanda gözlemlenen bir diğer önemli olay ise sıvı damlacıkların buhar bölgesinde sürüklenmesidir. Çalışma kapsamında alınan görüntülere bakıldığında, neredeyse bütün durumlarda (doymuş kaynama bölgesi); kabarcıklı kaynamanın, hızlı kabarcık büyümesi, kabarcığın sınırlanması ve hem giriş hem de çıkış doğrultusunda aniden uzaması nedeniyle bastırıldığı görülmektedir.



Şekil 3.23.  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 60.1 \text{ W}$  ve  $AR = 2.71$  için girişten 11.5 mm uzakta akış deseni değişimi

### 3.3. Mikrokanallarda Kaynamalı Akışlarda Hidrolik Çapın Etkisi

Bu bölümde, temel olarak, hidrolik çapın paralel, kare kesitli mikrokanallarda doymuş kaynamalı akış karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun yanında, önceki bölümde olduğu gibi, ısı ve kütle akısının etkisi ile farklı kanallar için elde edilen eş zamanlı akış görüntüleri sonuçları da verilmiştir.

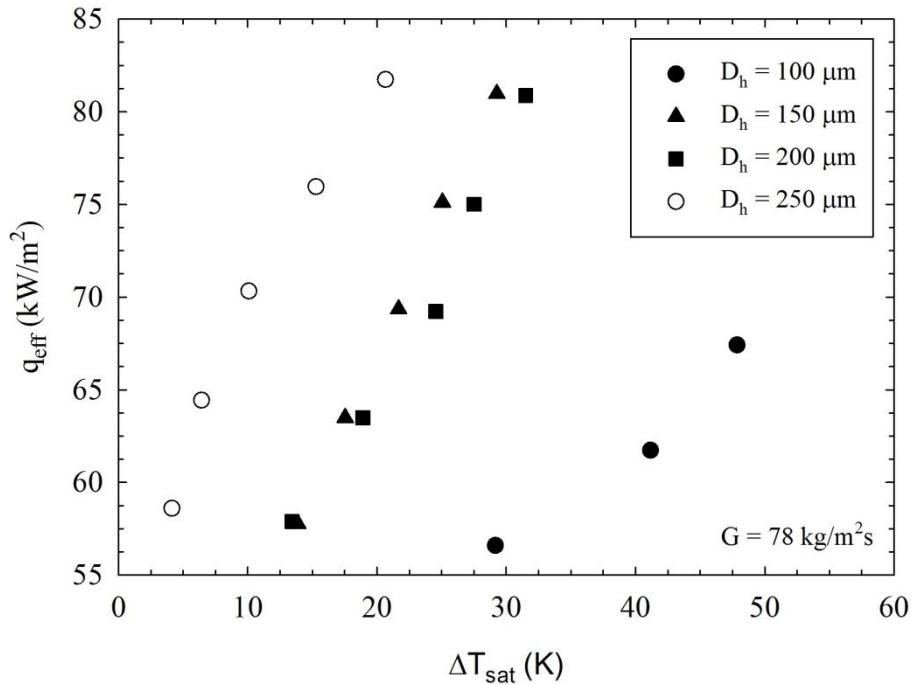
Her biri kare kesitli, paralel mikrokanallardan oluşan dört farklı silikon mikrokanallı ısı alıcı kullanılmıştır. Hidrolik çapın etkisini incelemek için AR sabit ( $AR = 1$ , kare kesit) tutulmuştur.

Farklı kütle akıları (51, 65, 78 ve 93  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ), ısı güçleri (44.1, 48, 52, 55.9, 59.9 W) ve hidrolik çaplarda (100, 150, 200 ve 250  $\mu\text{m}$ ) çalışılmıştır.

### 3.3.1. Kaynama Eğrileri

Şekil 3.24'te doymuş kaynama bölgesinde,  $G = 78 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı hidrolik çaplarda kaynama eğrileri verilmiştir. Kızma farkı, incelenen bütün test koşullarında artan efektif ısı akısı ile artmaktadır. Ancak, CHF koşulundan dolayı 100  $\mu\text{m}$  hidrolik çaplı kanala ait eğri biraz farklıdır. Bu kanal için, ani sıcaklık artışı problemleri sebebiyle maksimum 52 W'a kadar ısı güç uygulanabilmiştir. Aynı çalışma koşulları için kızma farkı, kuruma periyodunun uzaması nedeniyle daha küçük hidrolik çaplarda artma eğilimi göstermektedir.

Deneilerde gözlemlenen baskın akış desenleri, uzun kabarcıklı ve halkasal akıştır. Daha geniş kanallarda daha kalın sıvı filmleri vardır. Bu nedenle, kuruma periyodu genellikle azalır ve CHF daha yüksek ısı akısı değerlerine ötelenir.



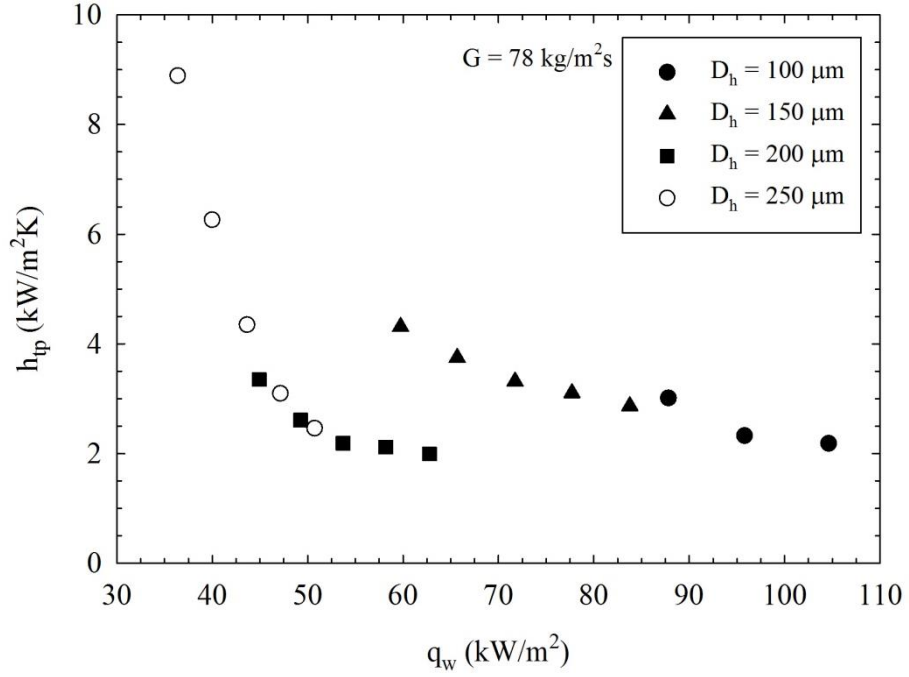
Şekil 3.24.  $G = 78 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de farklı hidrolik çaplar için kaynama eğrileri

### 3.3.2. Hidrolik Çap Etkisi

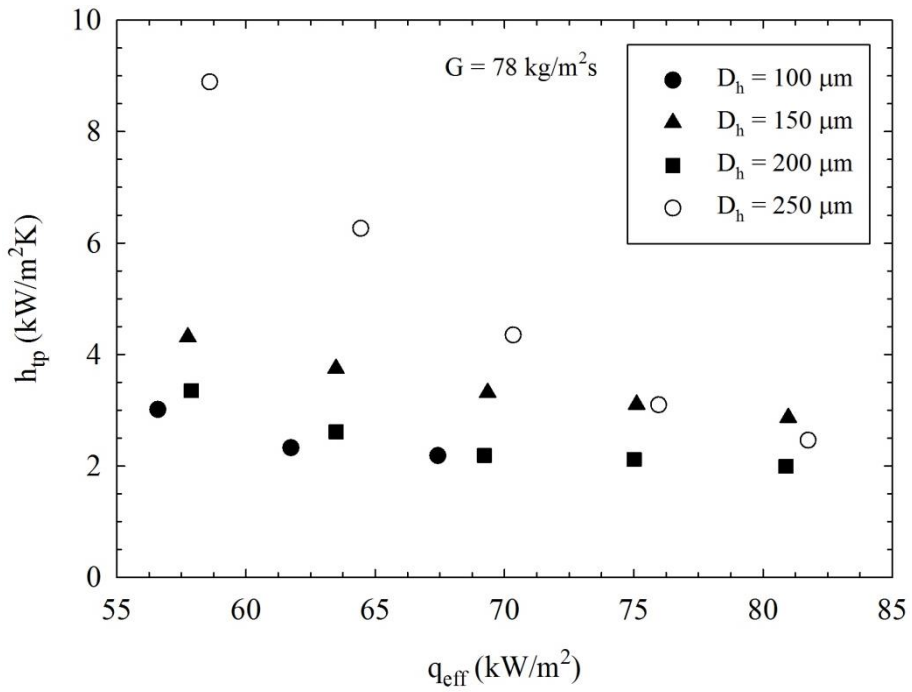
Şekil 3.25 a ve b’de farklı hidrolik çaplar için yerel iki faz ısı transfer katsayısının, sırasıyla, duvar ısı akısı ve efektif ısı akısı ile değişimi verilmiştir. Isı transfer katsayısı artan ısı akısı ile azalır ve yüksek ısı akısı değerlerinde bütün eğriler birbirine yaklaşır. Benzer eğilimler Deng vd. (2015b) tarafından da elde edilmiştir. Isı akısının düşük değerlerinde ve daha geniş kanallarda (özellikle  $D_h = 250 \mu\text{m}$  için) ısı transfer katsayısındaki azalma daha belirgindir. Ancak, yerel ısı transfer katsayısı hidrolik çap ile monotonik bir artış veya azalış göstermemektedir. Deneyler esnasında taşınımlı kaynama baskın ısı transfer mekanizması olarak gözlemlenmiş olup; kaynama olayı, sanki periyodik karaktere sahiptir. Kısmî kuruma veya kuruma periyodu artan ısı akısı ile uzar. Deneylerde gözlemlenen baskın akış desenleri (periyodik kaynama esnasında), uzun kabarcıklı akış ve halkasal akıştır. Daha geniş kanallarda daha kalın sıvı filmleri oluşmaktadır. Bir kabarcık aniden büyür ve kanal duvarları arasında sınırlandırılır. Özellikle, doymuş kaynama bölgesinde ısı akısının düşük değerleri için, küçük çaplı kanallardaki sınırlandırma etkileri büyük çaplı kanallara oranla daha belirgindir.

Bu durum, kanala girmeye çalışan iş akışkanına karşı daha erken ve daha fazla direnç uygulanmasına sebep olur. Isı akısındaki artış ile sınırlandırma etkileri, küçük çaplı kanallarda olduğu gibi, büyük çaplı kanallarda da oldukça etkili olmaya başlar. Isı akısında devam eden artış, incelenen bütün kanallar için sıvı filminde yetersizliğe ve en sonunda tamamen kurumaya sebep olur. Ayrıca, önceki bölümlerde de belirtildiği üzere; komşu kanallar arasında güçlü etkileşimler vardır. Bahsedilen olayların birleşik etkisi, elde edilen sonuçların muhtemel sebepleridir ve akışın fiziksel mekanizmasının ne kadar karmaşık olduğunu da göstermektedir. Bu sonuçlar ve yapılan yorumlar akış görüntüleri ile desteklenmektedir.

Şekil 3.26’da yerel iki faz ısı transfer katsayısının, farklı hidrolik çaplar için yerel kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. Verilen bir ısı akısı ve kütle akısı değeri için kuruluk derecesi azalan hidrolik çap ile artar. Isı transfer katsayısı, incelenen bütün hidrolik çap değerleri için artan kuruluk derecesi ile azalır. Bu azalış, hidrolik çap arttıkça daha belirgin hale gelir. Bu sonuçlar, taşınımlı kaynamanın etkinliğini göstermektedir. Ayrıca, daha geniş kanallarda gözlemlenen daha kalın sıvı filmleri elde edilen sonuçları desteklemektedir.

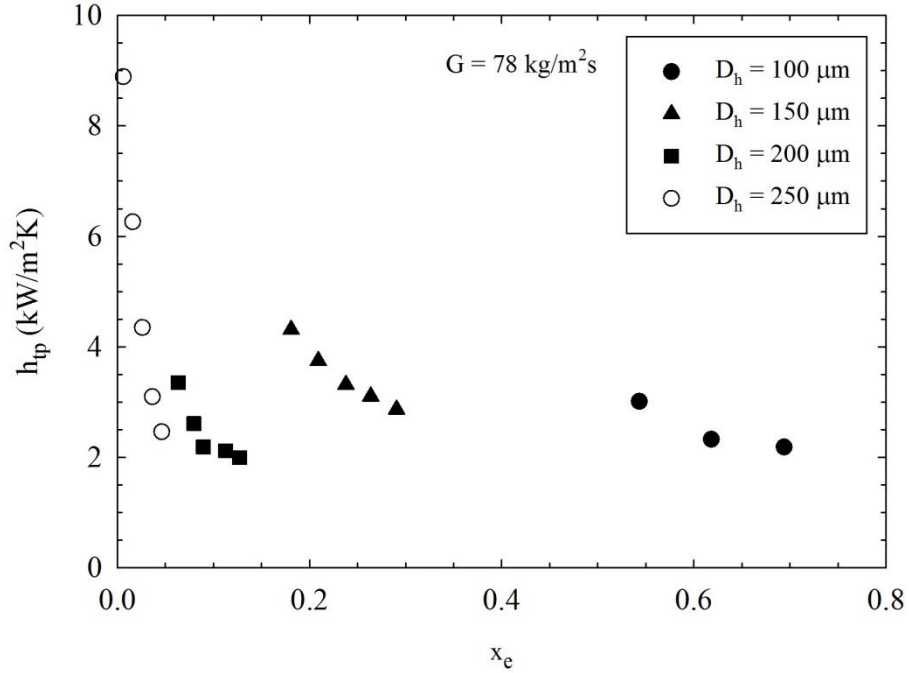


(a)



(b)

Şekil 3.25. Farklı hidrolik çaplar için ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı (a) ve efektif ısı akısı (b) ile değişimi

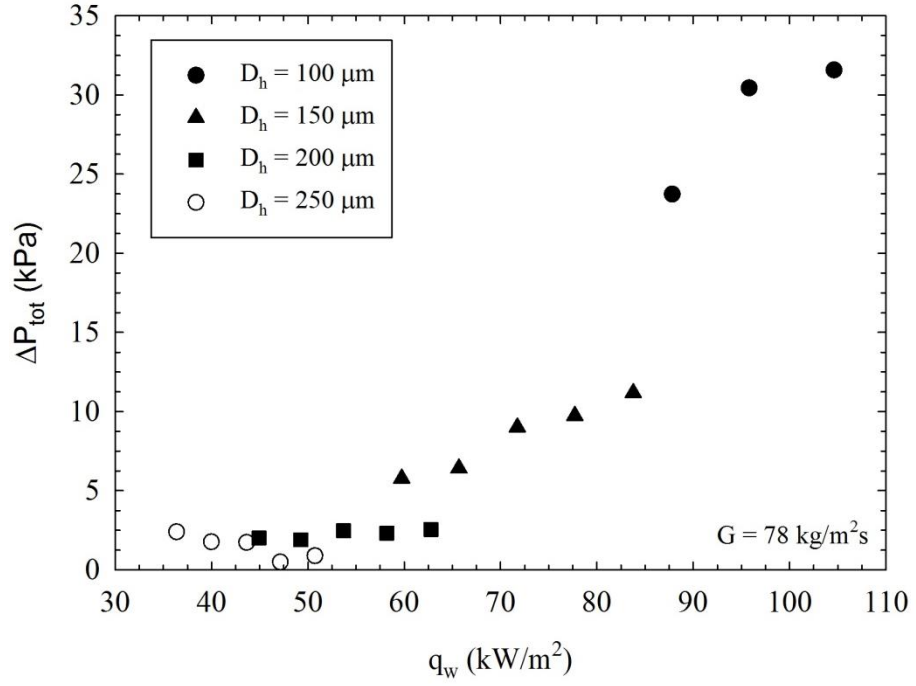


Şekil 3.26. Farklı hidrolik çaplar için ısı transfer katsayısının yerel kuruluk derecesi ile değişimi

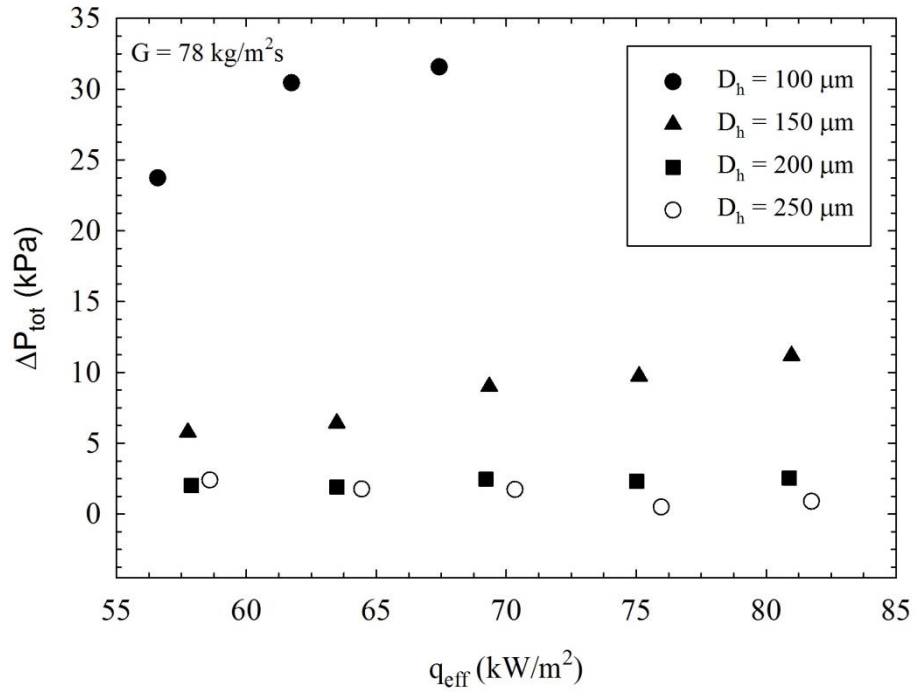
Şekil 3.27 a ve b'de,  $G = 78 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için farklı hidrolik çaplarda, toplam basınç düşümünün sırasıyla duvar ısı akısı ve efektif ısı akısı ile değişimi verilmektedir. Sabit ısı akısı ve kütle akısı değerleri için toplam basınç düşümü azalan hidrolik çap ile artar. Bu sonuç, kabarcık sınırlanmasının ve kabarcığın kanal girişine doğru uzamasının etkinliğini göstermektedir. Aslında bu olaylar, bu çalışma kapsamındaki bütün kanallarda, bütün test koşulları için meydana gelmiştir. Ancak, bu etkilerin şiddeti azalan hidrolik çap veya artan ısı akısı ile artar. Şekil 3.28 incelendiği zaman,  $D_h = 100 \mu\text{m}$  ve  $D_h = 150 \mu\text{m}$  için çıkış kuruluşundaki artışla, basınç düşümünün belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Daha geniş kanallarda basınç düşümü neredeyse kuruluk derecesinden bağımsızdır. Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere buharlaşma momentum kuvveti ile atalet kuvveti arasında güçlü etkileşimler vardır.

Yüzey gerilme kuvveti mikro ölçekli uygulamalarda önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Mikrokanallarda doymuş kaynamalı akış, periyodik bir karaktere sahiptir ve paralel kanallı düzenlemelerde kanallar arası etkileşim vardır. Özellikle, akış görüntüleme sonuçlarına dayalı olarak yapılan değerlendirmeler, farklı geometrik düzenlemelere veya çalışma koşullarına ait bulguların anlaşılması ve yorumlanmasında büyük öneme sahiptir.



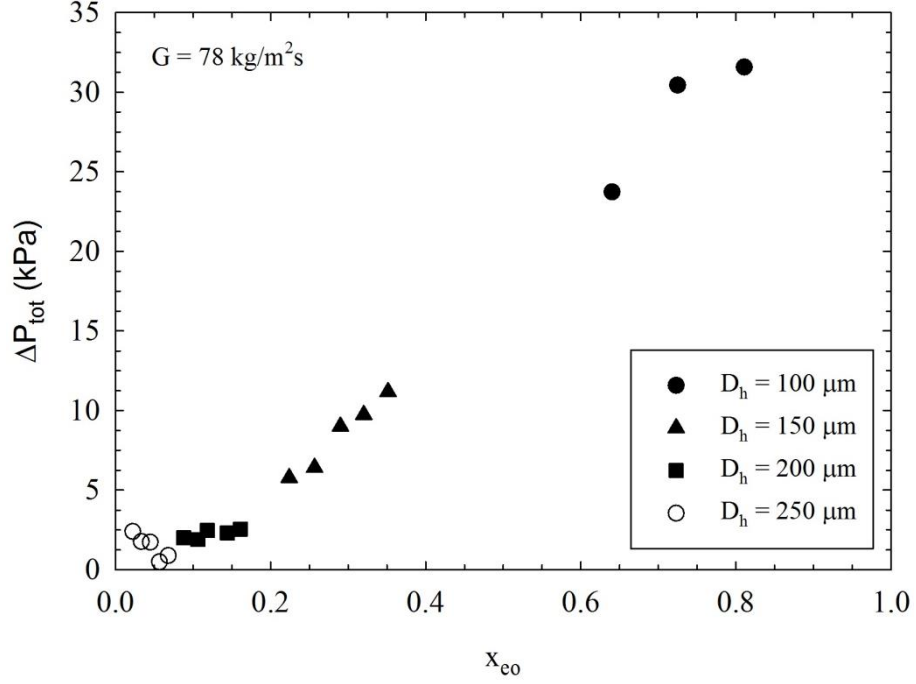


(a)



(b)

Şekil 3.27. Farklı hidrolik çaplar için toplam basınç düşümünün duvar ısı akısı (a) ve efektif ısı akısı (b) ile değişimi



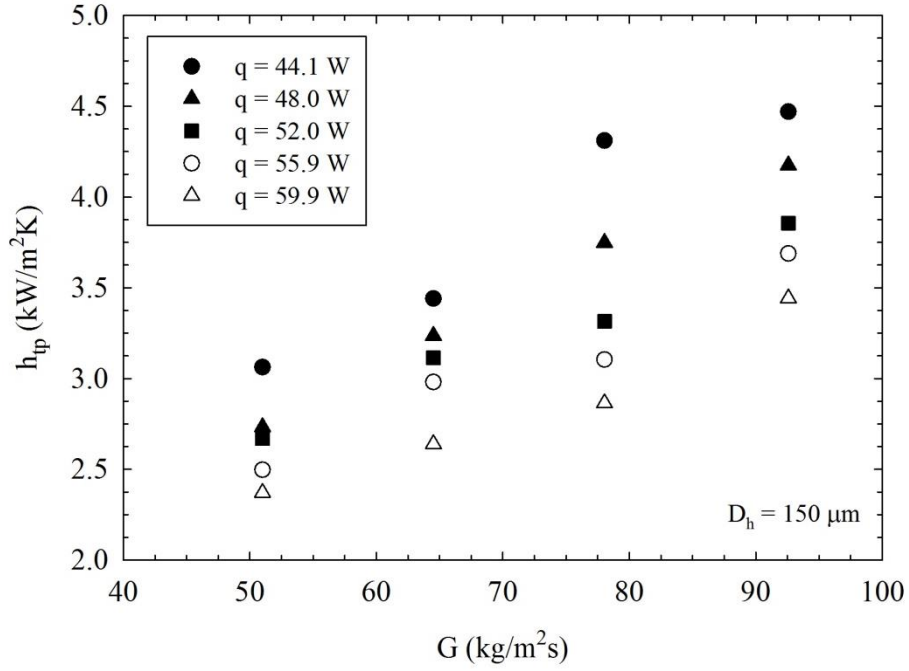
Şekil 3.28. Farklı hidrolik çaplar için toplam basınç düşümünün çıkış kuruluk derecesi ile değişimi

### 3.3.3. Isı ve Kütle Akısının Etkisi

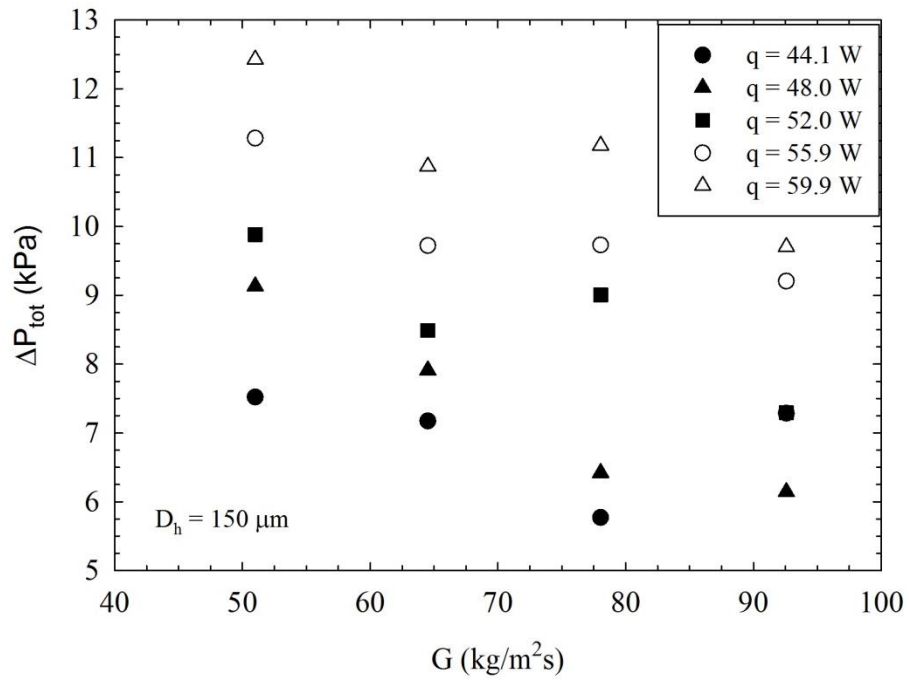
Şekil 3.29 a ve b’de, sırasıyla, ısı transfer katsayısı ve toplam basınç düşümünün  $150 \mu\text{m}$  hidrolik çapa sahip kanal için farklı ısı yüklerinde kütle akısı ile değişimi verilmektedir. Isı transfer katsayısı, artan kütle akısı ile artarken; artan ısı akısı ile azalır. Isı akısındaki artış, kuruma periyodunun uzaması anlamına gelmektedir. Diğer taraftan, kütle akısındaki artış, kanallardaki kuruma periyodunun kısalması anlamına gelmektedir. Toplam basınç düşümü, artan ısı akısı ile artarken, artan kütle akısı ile genellikle azalır.

Mikrokanallarda kabarcıkların sınırlandırıldığı kaynamalı akışlarda, sıvının atalet kuvveti ile buharlaşma kuvveti arasında güçlü bir etkileşim vardır. Isı akısındaki artış, buharlaşma momentum kuvvetinde artışa sebep olmakta; bu da kanala gelen sıvı haldeki iş akışkanına karşı direnç oluşmasına yol açmaktadır.

Diğer taraftan; kütle akısındaki artış, atalet kuvvetlerinin artmasına yol açar. Bu kuvvet test koşullarına göre değişimleri dengeler ve ısı transfer katsayısı ve basınç düşümü için yukarıda belirtilen ilişkilere sebep olur.



(a)



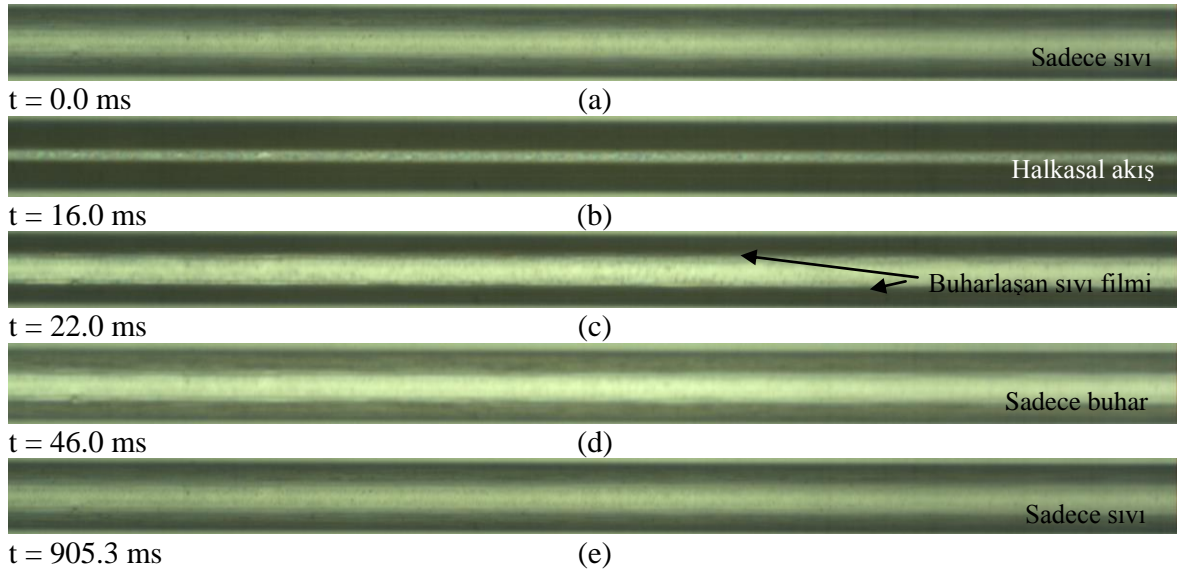
(b)

Şekil 3.29. Isı transfer katsayısı (a) ve toplam basınç düşümünün (b)  $D_h=150 \mu\text{m}$  için farklı ısı yüklerde kütle akışı ile değişimi

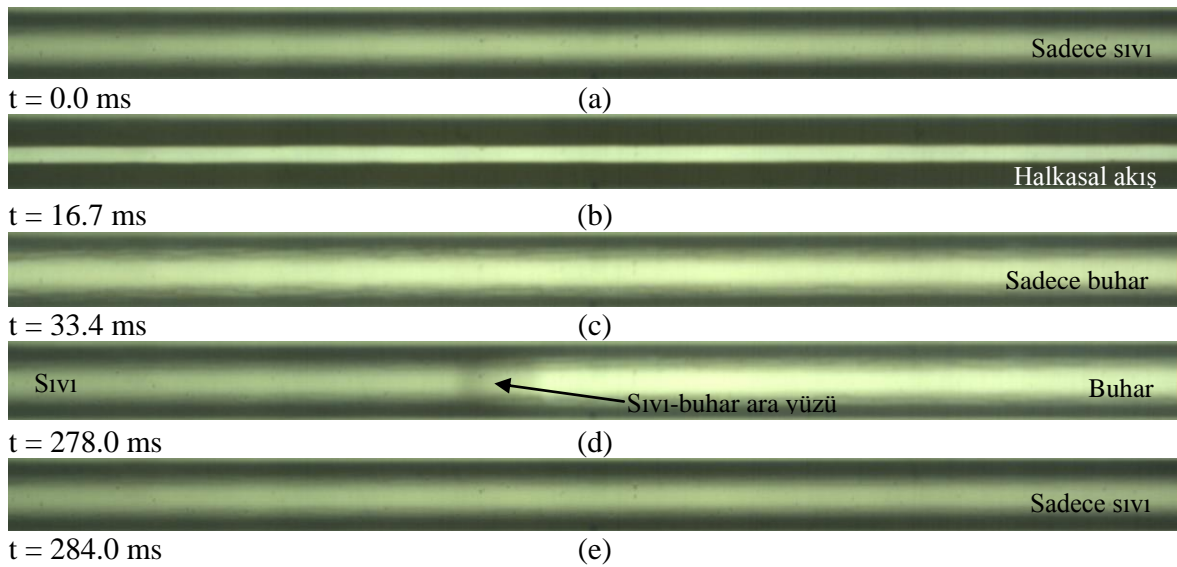
### 3.3.4. Akış Görüntüleme ve Akış Kararsızlıkları

Şekil 3.30'dan 3.33'e kadar, farklı test koşulları için periyodik kaynamadaki genel akış deseni sırası verilmiştir. Şekil 3.30, kanal girişinden 41.5 mm uzakta  $G = 78 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 44.1 \text{ W}$  ve  $D_h = 100 \text{ }\mu\text{m}$  olan test koşulları için verilmiştir. Önceki bölümlerde olduğu gibi; kanalın sıvı ile dolduğunu gösteren görüntü, referans olarak alınmış ve bu görüntüye ait zaman, başlangıç zamanı olarak ( $t = 0.0 \text{ ms}$ ) belirlenmiştir. Diğer görüntülerin zamanı, başlangıç zamanına göre verilmiştir. Öncelikle, kanal sıvı ile dolar. Sonra, buharlaşma başlar ve halkasal akış deseni oluşur. Bu oluşumun farklı muhtemel nedenleri vardır. Görüntülenen bölgenin gerisinde veya ilerisinde oluşan bir kabarcığın her iki doğrultuda aniden uzaması veya kanal içindeki sıvının bir bütün olarak iç bölgeden kanal duvarlarına doğru buharlaşması, bu oluşuma sebep olabilir. İç bölgede buhar, kanal duvarlarına bitişik olarak ise ince sıvı filmi vardır. Sıvı filmleri buharlaşmaya başlar ve kuruma meydana gelir. Sonra, kanal tekrar sıvı ile dolar. Bu, genel bir durumdur. Gerek önceki bölümlerde ve gerekse bu bölümde, sürekli farklı kanallar seçilerek olayın genel geçerliliğine vurgu yapılmıştır. Şekil 3.31'deki görüntüler, Şekil 3.30'dakilerle aynı noktadan, aynı koşullar için alınmış olup, tek fark kütle akısının  $93 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'ye artırılmış olmasıdır. Şekil 3.31'den de görüldüğü üzere, kuruma periyodu,  $859.3 \text{ ms}$ 'den  $250.6 \text{ ms}$ 'ye azalmıştır. Şekil 3.32 ise Şekil 3.31 ile aynı koşullarda olup; tek fark, ısıl gücün  $44.1 \text{ W}$ 'dan  $52 \text{ W}$ 'a artırılmış olmasıdır. Aynı akış deseni sırası görülmektedir. Ancak, kuruma periyodu  $250.6 \text{ ms}$ 'den  $395.3 \text{ ms}$ 'ye çıkmıştır. Şekil 3.33 ise Şekil 3.30 ile karşılaştırılabilir. Test koşulları aynıdır. Ancak, hidrolik çap  $D_h = 200 \text{ }\mu\text{m}$  olup; farklı bir kanal (daha geniş) söz konusudur. Şekilden de görüldüğü gibi, daha geniş kanalda sıvı filmi daha kalındır ve kuruma periyodu daha kısadır. Isı transferi ve basınç düşümü sonuçlarına göre en kritik kanal,  $D_h = 100 \text{ }\mu\text{m}$  olan kanaldır. Şekil 3.34, girişe doğru uzayan bir kabarcığın kanal girişinden küçük hazneye çıkışıyla ilgili akış görüntülerini vermektedir. Şekil 3.34a'da (tekrar), ıslatma aşaması görülmektedir. Sonra, kanal girişine doğru uzun bir kabarcık oluşmakta ve kabarcık kanal girişinden dışarı çıkmaktadır. Daha sonra, küçük haznedeki aşırı soğuk sıvının etkisiyle, dışarı çıkan kabarcık küçülmeye başlar ve besleme sıvısı kabarcığı bastırarak tekrar kanala girer. Periyodik kaynama esnasında, bütün test koşullarında baskın akış desenleri, uzun kabarcıklı akış ve halkasal akıştır. Ancak, deneyler esnasında gözlemlenen bazı farklı akış desenleri Şekil 3.35 ve 3.36'da verilmiştir. Şekil 3.35, ters akışı ve kabarcıklı kaynamanın bastırılmasını göstermektedir. Bu görüntüler, kanal

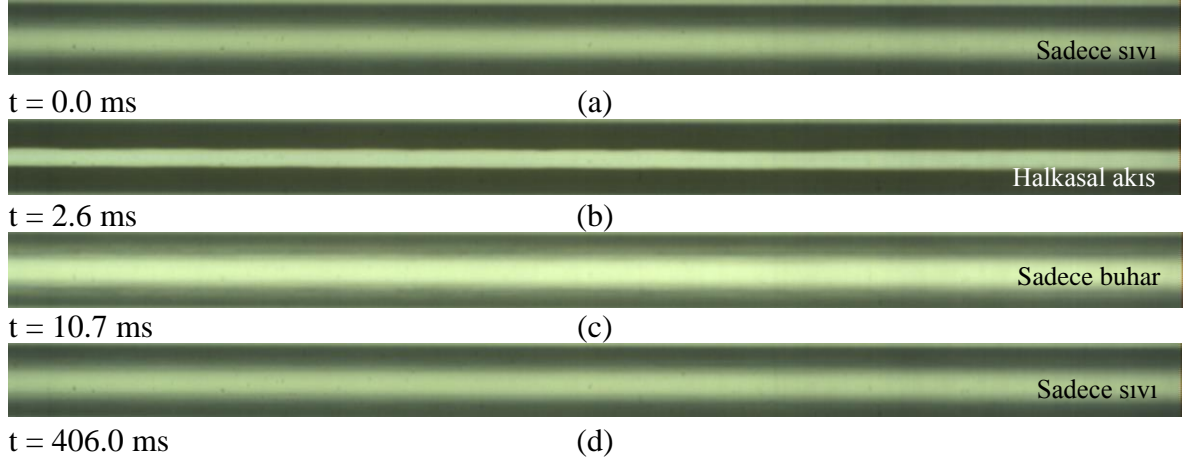
girişinden 11.5 mm uzaklıkta,  $G = 51 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 59.9 \text{ W}$  ve  $D_h = 200 \text{ }\mu\text{m}$  için elde edilmiştir. Aynı anda iki kabarcık oluşmaya başlamaktadır. Kanal çıkışına daha yakın olan kabarcık daha hızlı büyür ve kanal duvarları arasında sınırlanmaya başlar. Bu kabarcık, kanal girişine doğru uzayarak daha küçük kabarcıklarla birleşir. Bu olay, kabarcıklaşmanın bastırılmasına örnektir. Şekil 3.36'da ise; girişten 41.5 mm uzakta,  $G = 51 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 59.9 \text{ W}$  ve  $D_h = 200 \text{ }\mu\text{m}$  için halkasal akış deseninden önce gözlemlenen çalkantılı akışa ait görüntüler verilmiştir.



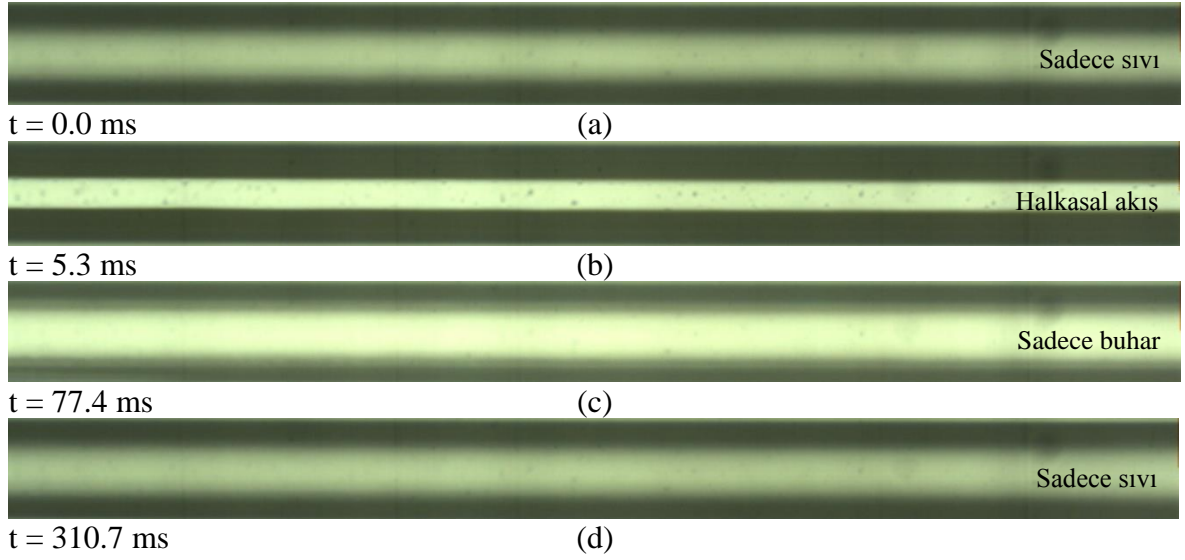
Şekil 3.30.  $G=78\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q}=44.1\text{W}$ ,  $D_h=100 \text{ }\mu\text{m}$  ve girişten 41.5 mm uzakta akış desenleri



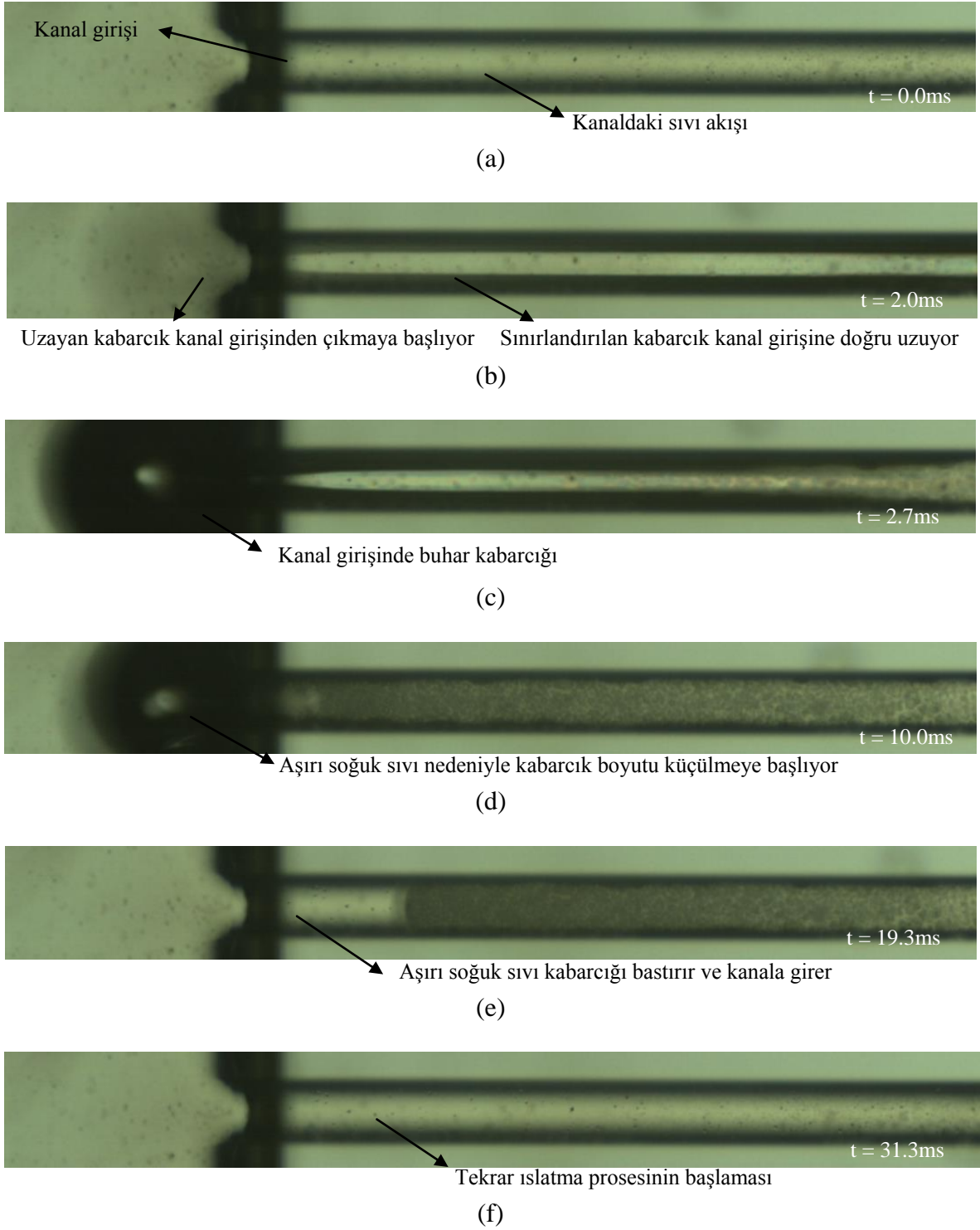
Şekil 3.31.  $G=93\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q}=44.1\text{W}$ ,  $D_h=100 \text{ }\mu\text{m}$  ve girişten 41.5 mm uzakta akış desenleri



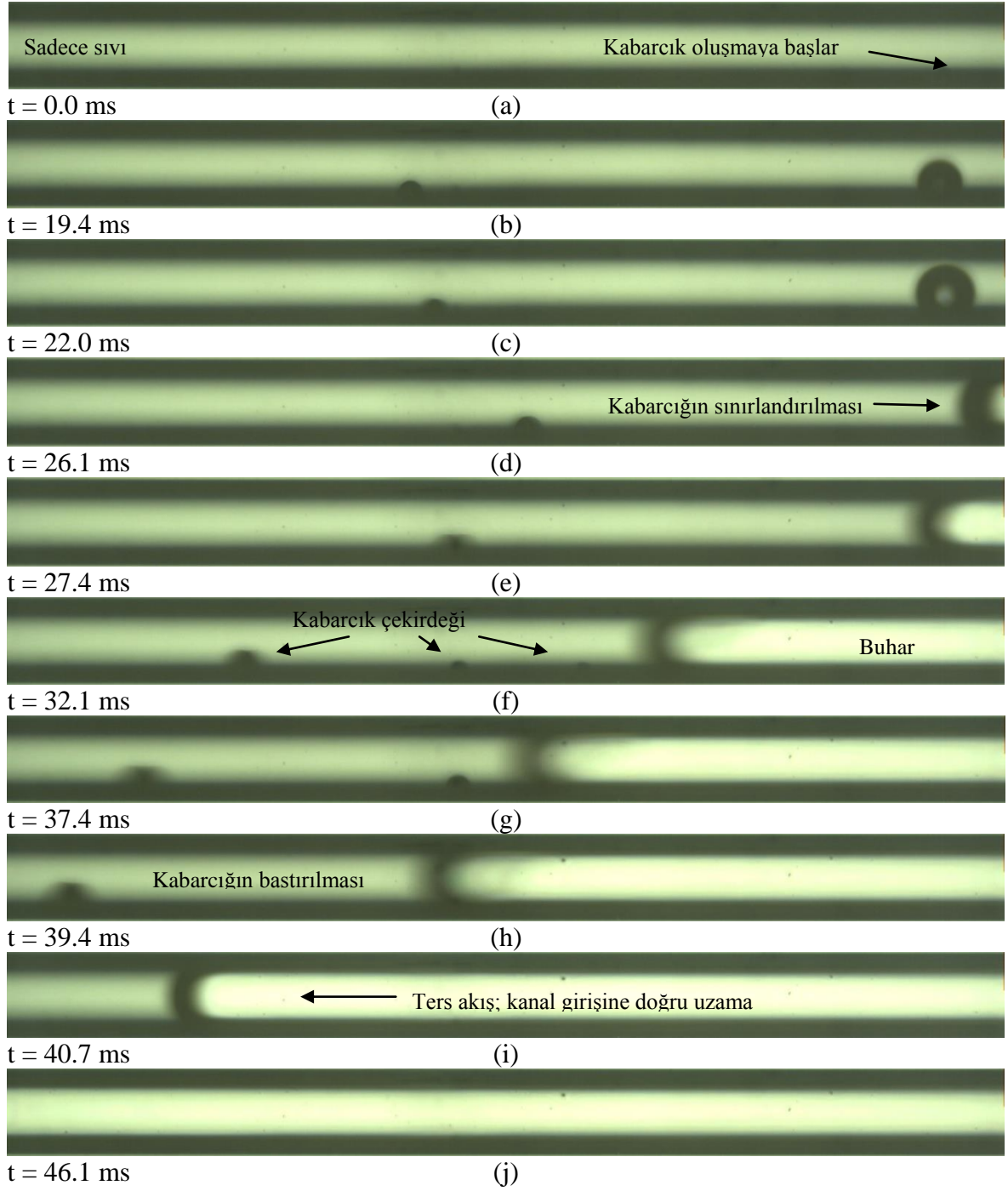
Şekil 3.32.  $G = 93 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 52.0 \text{ W}$ ,  $D_h = 100 \text{ }\mu\text{m}$  ve girişten 41.5 mm uzakta akış desenleri



Şekil 3.33.  $G = 78 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 44.1 \text{ W}$ ,  $D_h = 200 \text{ }\mu\text{m}$  ve girişten 41.5 mm uzakta akış desenleri

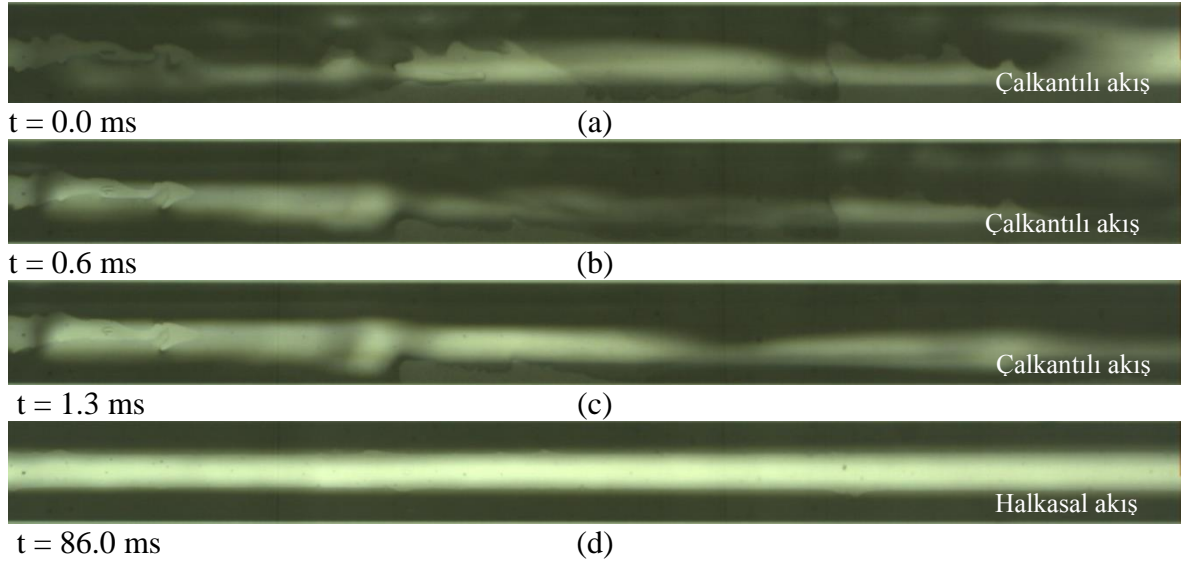


Şekil 3.34.  $G = 93 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 52.0 \text{ W}$  ve  $D_h = 100 \text{ }\mu\text{m}$  çalışma koşulları için kabarcığın kanal girişinden dışarı çıkması



Şekil 3.35.  $G = 51 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 59.9 \text{ W}$ ,  $D_h = 200 \text{ }\mu\text{m}$  ve girişten 11.5 mm uzaklıkta ters akış ve kabarcıklı kaynamanın bastırılması





Şekil 3.36.  $G=51\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 59.9\text{W}$ ,  $D_h=200\mu\text{m}$  ve girişten 41.5mm uzakta çalkantılı akış

### 3.4. Mikrokanallarda Doymuş Kaynamalı Akış İçin Yeni Bir Isı Transfer Katsayısı Bağıntısının Geliştirilmesi

Bu bölüm, mikrokanallarda doymuş kaynamalı akışta ısı transferinin tahminiyle ilgilidir. Tez kapsamında yapılan deneyler sonucunda, doymuş kaynamalı akışta CHF öncesi duruma ait 213 veri noktasını içeren geniş bir veritabanı oluşturulmuştur. Veritabanı;  $51 - 728.7 \text{ kg/m}^2\text{s}$  arasında kütle akısı değerlerini,  $36 - 221.7 \text{ kW/m}^2$  arasında duvar ısı akısı değerlerini,  $0.01 - 0.69$  arasında yerel kuruluk derecesi değerlerini,  $7.72 - 190$  arasında Reynolds sayısı değerlerini ( $Re_L$ ) ve hidrolik çap değeri sabit ( $100 \mu\text{m}$ ) olmak koşuluyla  $0.37 - 5.00$  arasında AR değerleri ve sabit AR değerleri için ( $AR = 1$ )  $100-250 \mu\text{m}$  arasında hidrolik çap değerlerini içermektedir. Bu bölümde, öncelikle, literatürdeki çeşitli makro ve mikrokanal bağıntıları deneysel sonuçlara karşı değerlendirilmiştir. Daha sonra, özellikle, akış görüntüleri aracılığıyla fiziksel mekanizmaya yönelik elde edilen değerlendirmelerden yararlanarak; mikrokanallarda doymuş kaynamalı akışta ısı transfer katsayısının tahmini için yeni bir bağıntı önerilmiştir.

#### 3.4.1. Mevcut Bağıntıların Değerlendirilmesi

Kaynamalı akış literatüründeki 10 farklı popüler ısı transfer katsayısı bağıntısı, değerlendirilmek üzere seçilmiştir. Bu bağıntılar, Tablo 2.2'de verilmiştir. Bunlardan ilk

üçü (Chen 1966; Gungor ve Winterton 1986; Kandlikar, 1990), makro kanallar için geliştirilmişken; diğerleri, (Yu vd., 2002; Warriar, 2002; Koşar vd., 2005; Lee ve Garimella, 2008; Lee ve Mudawar, 2005b; Li ve Wu, 2010; Kim ve Mudawar, 2013c) mini veya mikrokanallar için geliştirilmiştir. Üniform ve çevresel olarak ısıtılan dairesel veya dikdörtgen kesitli kanallar için türetilen bağıntılar, sadece üç kenarı ısıtılan dikdörtgen kesitli kanallara uygulanacağı zaman bir çarpan ile modifiye edilebilirler. Bu tez çalışmasında, Qu ve Mudawar (2003b), Lee ve Mudawar (2005b) ve Kim ve Mudawar (2012a) tarafından da kullanılan ve aşağıda belirtilen yöntemden yararlanılmıştır:

$$h_{tp} = h_{tp,cor} \frac{Nu_3}{Nu_4} \quad (3.1)$$

Burada,  $h_{tp,cor}$  tüm yüzeylerinden, çevresel olarak ısıtılan kanallara göre tanımlanan bağıntılardan direkt olarak elde edilen ısı transfer katsayısı değeri;  $Nu_3$  ve  $Nu_4$  ise sırasıyla üç ve dört yüzeyinden ısı transferi gerçekleşen kanallarda tek fazlı, tam gelişmiş, laminer akış için Nu sayılarıdır ve aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Shah ve London, 1978; Qu ve Mudawar, 2003b):

$$Nu_3 = 8.235(1 - 1.883\beta + 3.767\beta^2 - 5.814\beta^3 + 5.361\beta^4 - 2\beta^5) \quad (3.2)$$

$$Nu_4 = 8.235(1 - 2.042\beta + 3.085\beta^2 - 2.477\beta^3 + 1.058\beta^4 - 0.186\beta^5) \quad (3.3)$$

Kim ve Mudawar (2013c) ise aynı etkiyi sağlamak için ısıtılan çevrenin ıslak çevreye oranı ( $P_{HT}/P_{FT}$ ) şeklinde farklı bir çarpan kullanmıştır. Yukarıda bahsedilen ve Tablo 2.2'de verilen bağıntılar, üç farklı kriter üzerinden değerlendirilmiştir: (1) ortalama mutlak hata (MAE), (2) çeşitli hata bantları içine düşen ( $\pm \%30$ ,  $\pm \%40$  ve  $\pm \%50$ ) tahmin verilerinin yüzdesi ve (3) veri değişiminin doğru yakalanması. Ortalama mutlak hata,

$$MAE = \frac{1}{M} \sum \frac{|h_{tp,pred} - h_{tp,exp}|}{h_{tp,exp}} \times 100\% \quad (3.4)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada; M, toplam veri noktası sayısıdır.

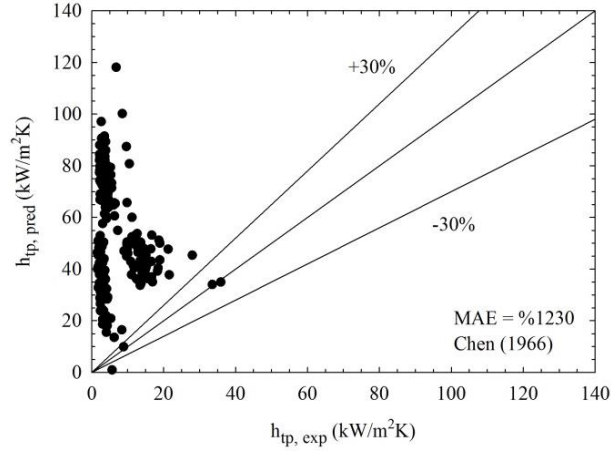
### 3.4.1.1. Makro Kanal Bağıntılarının Değerlendirilmesi

Şekil 3.37 a, b ve c'de, deneysel sonuçların seçilen mevcut makro kanal bağıntılarının tahminleriyle karşılaştırılması ve ilgili bağıntılarının MAE değerleri verilmiştir. Chen (1966), Güngör ve Winterton (1986) ve Kandlikar'ın (1990) bağıntılarını, mini/mikrokanal bağıntılarında (Tablo 3.1) daha yüksek MAE'ye (%1100'den fazla) sahiptir.

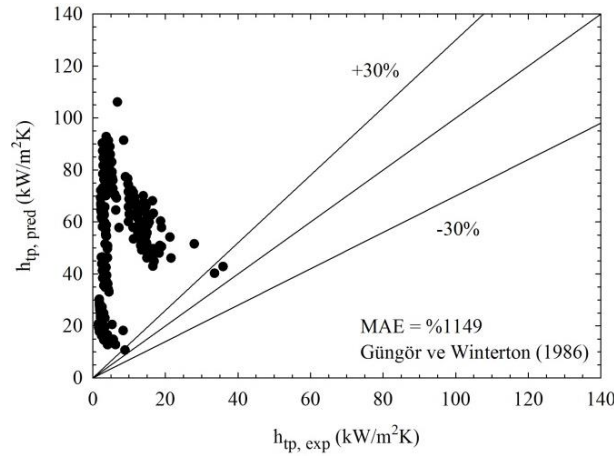
Tablo 3.1'den de görüldüğü üzere, bu bağıntılar için  $\pm$  %50 hata bandındaki tahmin verilerinin yüzdesi bile %2'den daha düşüktür. Şekil 3.38 a ve b'de ise makro kanal bağıntılarını tarafından yakalanan eğilimleri göstermek için  $AR = 1$ ,  $D_h = 150 \mu m$  ve  $G = 64.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  çalışma koşullarında, ısı transfer katsayısının sırasıyla ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. İncelenen bütün makro kanal bağıntılarını, deneysel sonuçlara karşı ters eğilim göstermektedir. Bu bağıntılardan elde edilen sonuçlara göre, ısı transfer katsayısı artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile artmaktadır.

Ayrıca, gerek Şekil 3.37, gerekse Şekil 3.38 incelendiğinde, makro kanal bağıntılarını kullanılarak tahmin edilen değerlerin, sayısal olarak deneysel sonuçlardan oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu belirgin sapmaların birkaç muhtemel sebebi vardır. Temel sebep, kanal boyutları arasındaki farktır (makro – mikro). Hidrolik çap mikro ölçüğe düşürüldüğü zaman, hidrodinamik ve ısıl davranışlar önemli ölçüde değişir. Diğer sebepler ise deneysel çalışma koşulları veya konsolide edilmiş veri tabanlarının çeşitliliğiyle ilişkilidir.

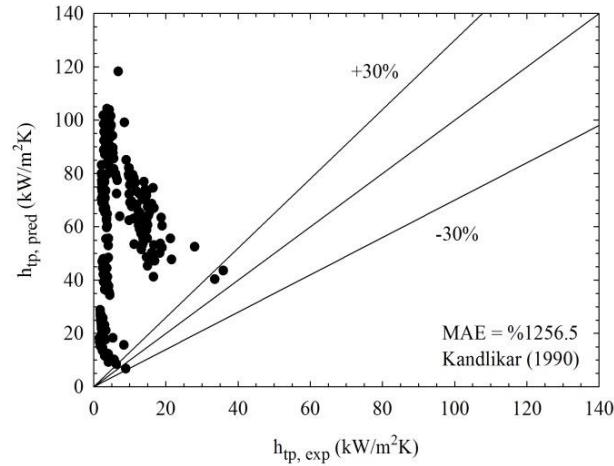
Kısaca açıklamak gerekirse, Chen (1966), 6 farklı kaynaktan 6 farklı akışkan için (su, metanol, sikloheksan, pentan, heptan ve benzin) derlediği 600'ün üzerindeki veriyi kullanmıştır. Bu verilerin hepsi düşey konumlandırılmış dairesel veya halka kesitli kanallarda yukarı veya aşağı yönlü akışlara aittir. Güngör ve Winterton (1986), 28 farklı kaynaktan 7 farklı akışkana ait yaklaşık 4300 veri noktası toplamıştır. Konsolide edilmiş veritabanını, düşey ve yatay akışları kapsamaktadır. Kandlikar (1990) yatay ve düşey akışlar için 24 farklı kaynaktan 10 farklı akışkana ait 5246 adet veri kullanmıştır.



(a)

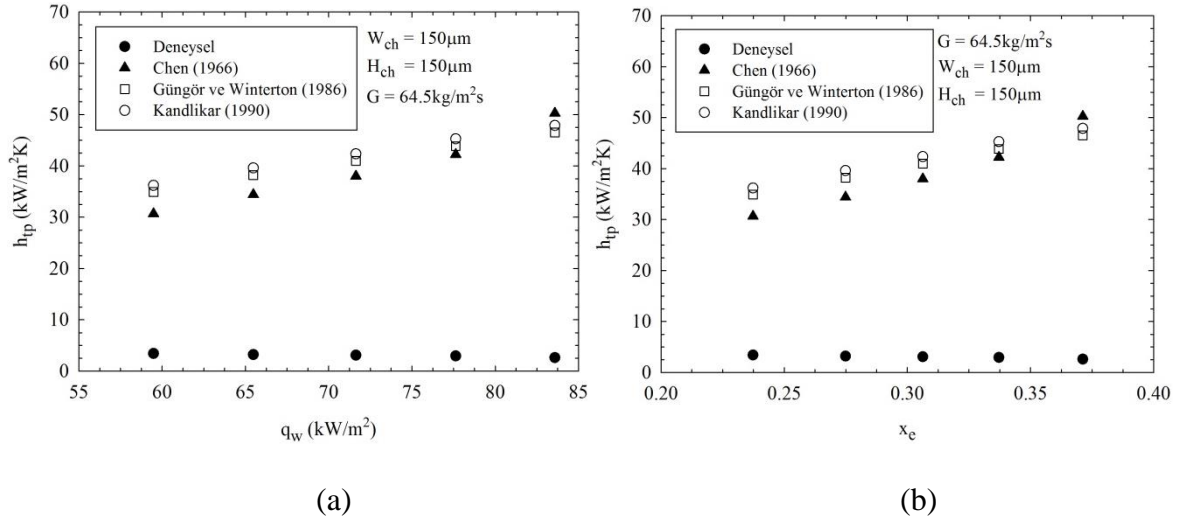


(b)



(c)

Şekil 3.37. Doymuş kaynamalı akışta deneysel ısı transfer katsayısı verilerinin tüm veri tabanı için, seçilen makro kanal bağıntılarının tahminleriyle karşılaştırılması. Chen (1966) (a), Güngör ve Winterton (1986) (b), Kandlikar (1990) (c).



Şekil 3.38. Deneysel ısı transfer katsayısı sonuçlarının  $G=64.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $AR=1$ ,  $D_h=150 \text{ }\mu\text{m}$  çalışma koşulları için makro kanal bağıntılarının tahminleriyle karşılaştırılması

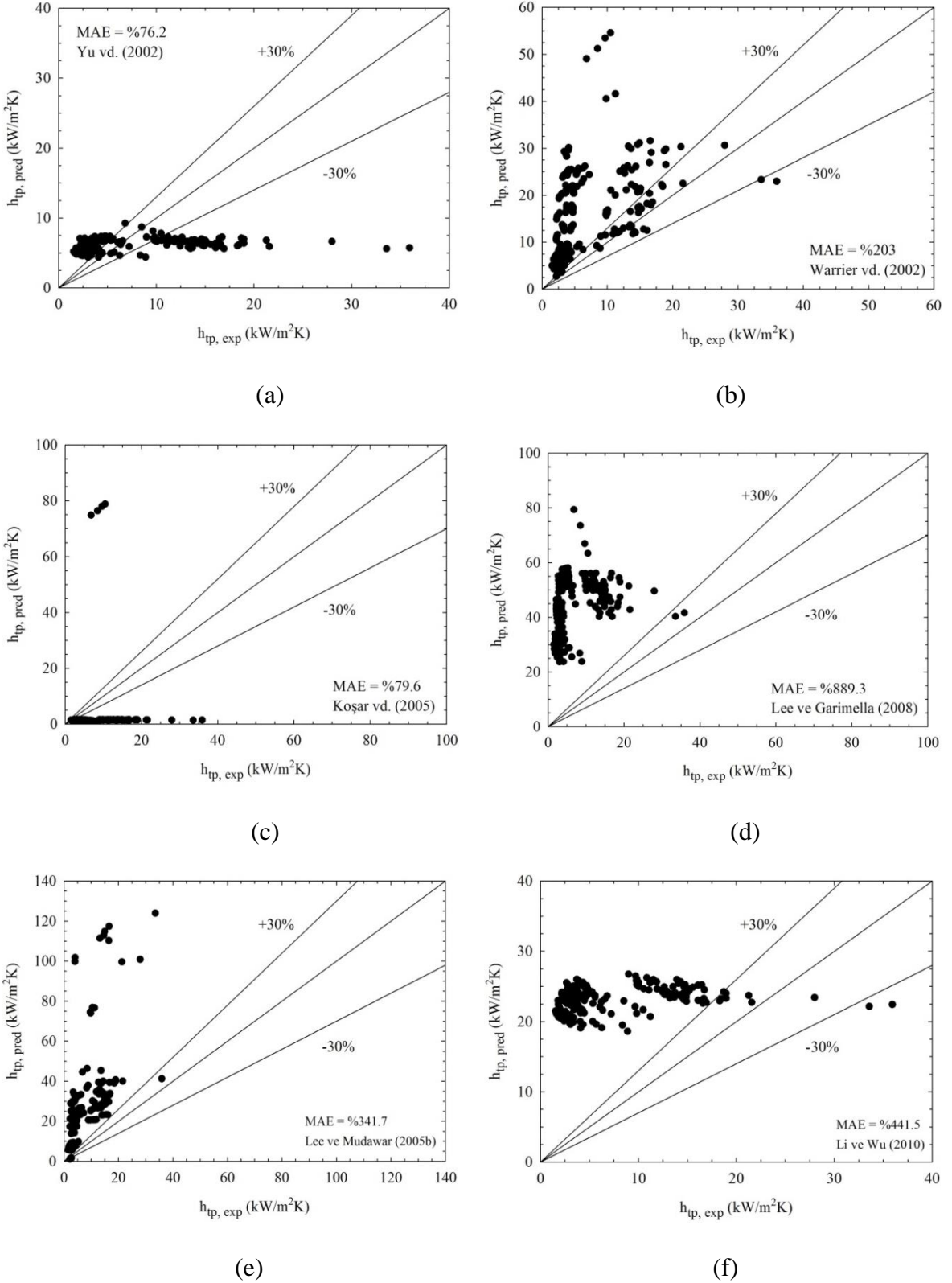
Tablo 3.1. Seçilen mevcut bağıntıların ve önerilen bağıntının tahmin kapasitesi

Referans çalışma	Doymuş kaynamalı akış verileri (213 veri noktası)			
	MAE (%)	$\pm\%30$	$\pm\%40$	$\pm\%50$
Chen (1966)	1230	1.4	1.4	1.4
Güngör ve Winterton (1986)	1149	1.4	1.4	1.4
Kandlikar (1990)	1256.5	1.4	1.9	1.9
Yu vd. (2002)	76.2	10.8	16.9	30
Warrier vd. (2002)	203	16.4	21.1	25.8
Kosar vd. (2005)	79.6	5.6	11.7	21.1
Lee ve Garimella (2008)	889.3	0.9	0.9	0.9
Lee ve Mudawar (2005b)	341.7	0.5	1.4	2.3
Li ve Wu (2010)	441.5	3.8	6.6	7.5
Kim ve Mudawar (2013c)	1167	0	0	0
Önerilen bağıntı	16.9	86.4	96.2	99.5

### 3.4.1.2. Mini/mikrokanal Bağıntılarının Değerlendirilmesi

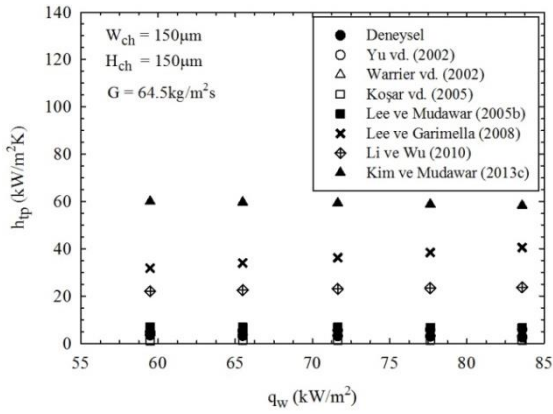
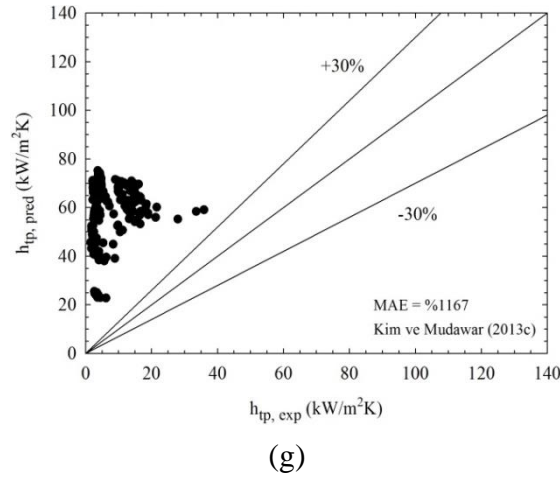
Şekil 3.39’da, deneysel ısı transfer katsayısı verilerinin, tüm veritabanı üzerinden seçilen mini/mikrokanal bağıntıları kullanılarak elde edilen tahmin değerleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 3.39 ve Tablo 3.1’den, Yu vd.’nin (2002) en düşük MAE değerine (%76.2) sahip olduğu görülmektedir. Ancak, mevcut bağıntılar içerisinde en iyi

tahmin kapasitesi Warrier vd.'ne (2002) aittir. Tahmin verilerinin %16.4, %21.1 ve %25.8'i sırasıyla  $\pm$  %30,  $\pm$  %40 ve  $\pm$  %50 hata bantları içine düşmektedir. Şekil 3.40a ve b'de,  $AR = 1$ ,  $D_h = 150 \mu\text{m}$  ve  $G = 64.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  çalışma koşulları için mini/mikrokanal bağıntıları tarafından tahmin edilen verilerin değerleri ve değişimleri, deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak verilmiştir. Kim ve Mudawar (2013c), Lee ve Garimella (2008) ve Li ve Wu (2010) tarafından önerilen bağıntılar, deneysel sonuçlardan oldukça yüksek tahminler yapmaktadır. Bu sonuç, ilgili çalışmaların kapsamı ve/veya çalışmalarda kullanılan yöntemle açıklanabilir. Kim ve Mudawar (2013c) ve Li ve Wu'nun (2010) bağıntıları, farklı kaynaklardan konsolide edilmiş veritabanına dayanmakta olup, bu veritabanları farklı akışanların kullanıldığı çok sayıda makro kanal çalışması verilerini de içermektedir. Ayrıca, Lee ve Garimella (2008) ve Kim ve Mudawar (2013c) tarafından önerilen bağıntılarda, hem taşınımlı kaynamanın hem de kabarcıklı kaynamanın etkileri süperimpoze edilmiştir. Seçilen diğer mini/mikrokanal bağıntılarının ise deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu net bir şekilde görülmektedir. Şekil 3.40a ve b'de deneysel sonuçlara yakın değerler verdiği görülen diğer bağıntılar, Şekil 3.40c ve d'de detaylı olarak verilmiştir. İlgili çalışma koşulları altında, Koşar vd.'nin (2005) bağıntısı deneysel sonuçlara göre daha düşük tahminler yaparken, diğerleri (Yu vd., 2002; Warrier vd., 2002; Lee ve Mudawar, 2005b) daha yüksek tahminler yapmaktadır. Koşar vd. (2005) ve Yu vd.'nin (2002) bağıntıları için, tahmin edilen verilerin trendleri deneysel sonuçların aksine nispeten artmaktadır. Deneysel sonuçlara yakın değerler veren bağıntıların kapsamlı incelemesi, Şekil 3.41 ile Şekil 3.56 arasındaki grafiklerde görülmektedir. İlgili şekiller, farklı AR oranları ve kütle akılarında doymuş kaynamalı akışta ısı transfer katsayısının sırasıyla ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi üzerinden deneysel verilerle tahmin verilerinin karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Şekillerden de görüldüğü üzere, Warrier vd. (2002), Yu vd. (2002) ve Koşar vd.'nin (2005) bağıntılarıyla yapılan tahminler, farklı çalışma koşulları altında deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olabilmektedir. Özellikle, yüksek AR değerlerinde, Warrier vd.'nin (2002) bağıntısı deneysel sonuçlarla neredeyse çakışırken; AR değeri azaldıkça, kütle akısına da bağlı olmak üzere, Yu vd. (2002) ve Koşar vd.'nin (2005) bağıntıları çok iyi sonuçlar vermektedir. Burada, önemli çıkarımlardan bir diğeri de AR'nin ısı transferi üzerindeki belirleyici etkisidir. Elde edilen bu sonuçlar, AR etkisini de içeren yeni ve kapsamlı bir bağıntıya ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

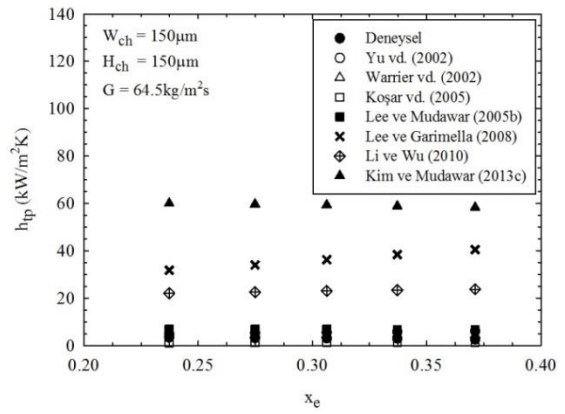


Şekil 3.39. Deneysel verilerin tüm veri tabanı için, seçilen mini/mikrokanal bağıntılarının tahminleriyle karşılaştırılması. Yu vd. (2002) (a), Warriier vd. (2002) (b), Koşar vd. (2005) (c), Lee ve Garimella (2008) (d), Lee ve Mudawar (2005b) (e), Li ve Wu (2010) (f) ve Kim ve Mudawar (2013c) (g).

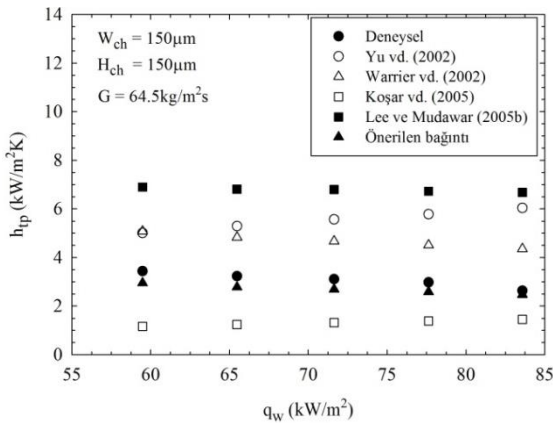
Şekil 3.39'un devamı



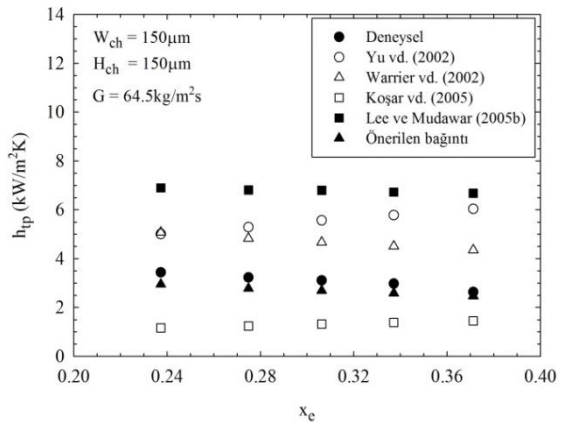
(a)



(b)



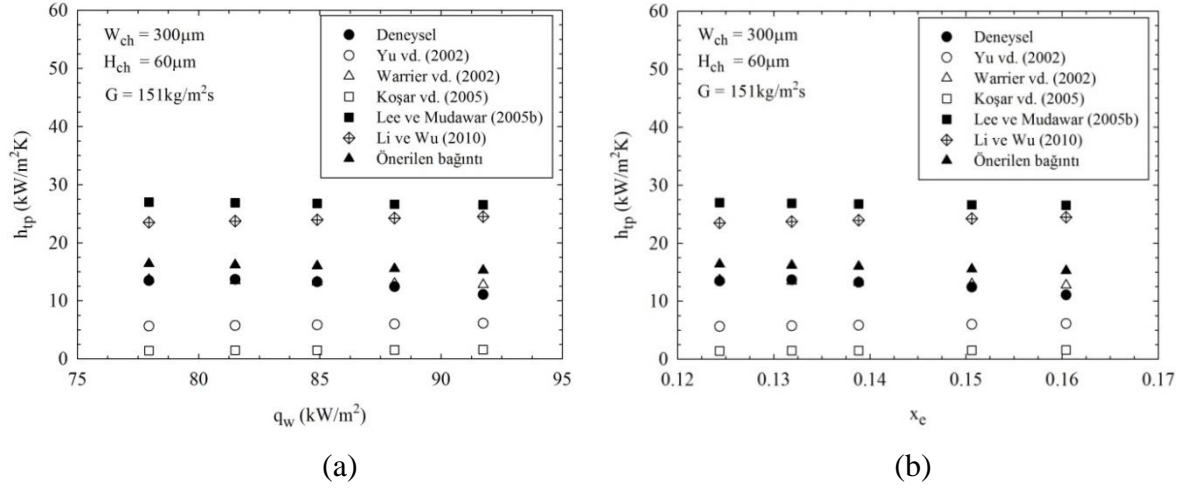
(c)



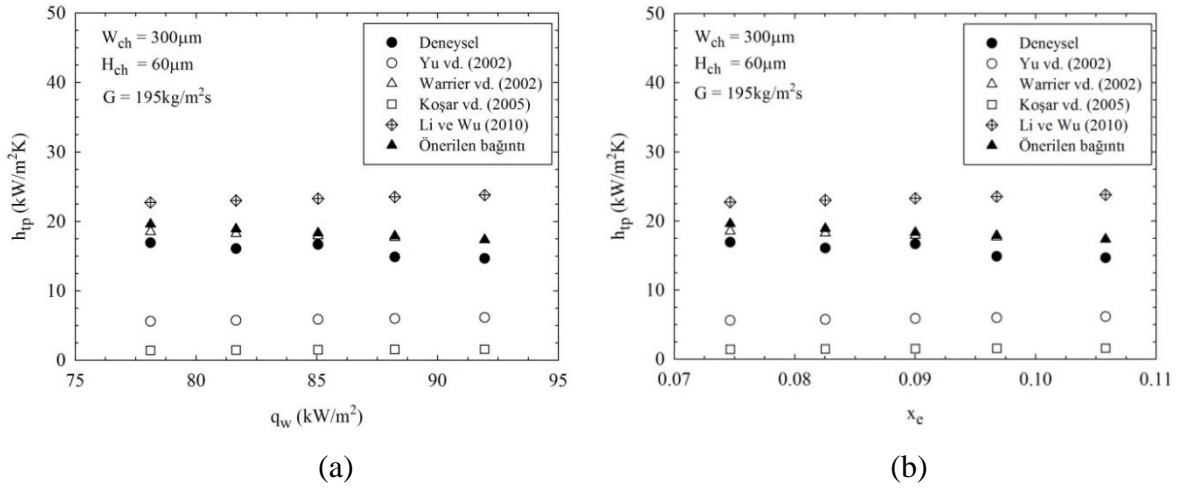
(d)

Şekil 3.40. Deneysel ısı transfer katsayısı sonuçlarının  $G = 64.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $AR = 1$ ,  $D_h = 150 \text{ }\mu\text{m}$  çalışma koşulları için mini/mikrokanal bağıntılarının tahminleriyle karşılaştırılması (a ve b) ve yakın tahminlerin detaylı gösterimi (c ve d)

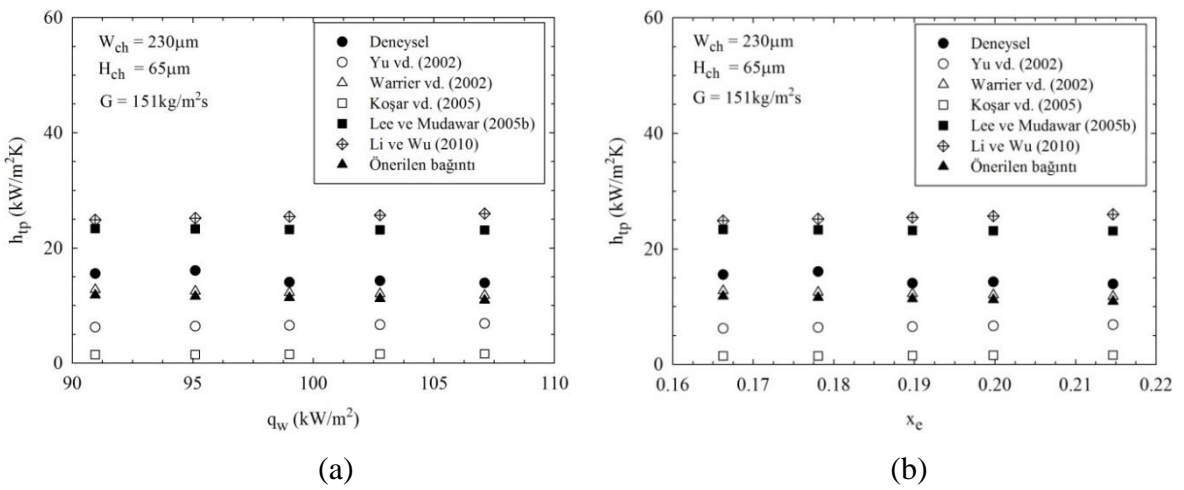




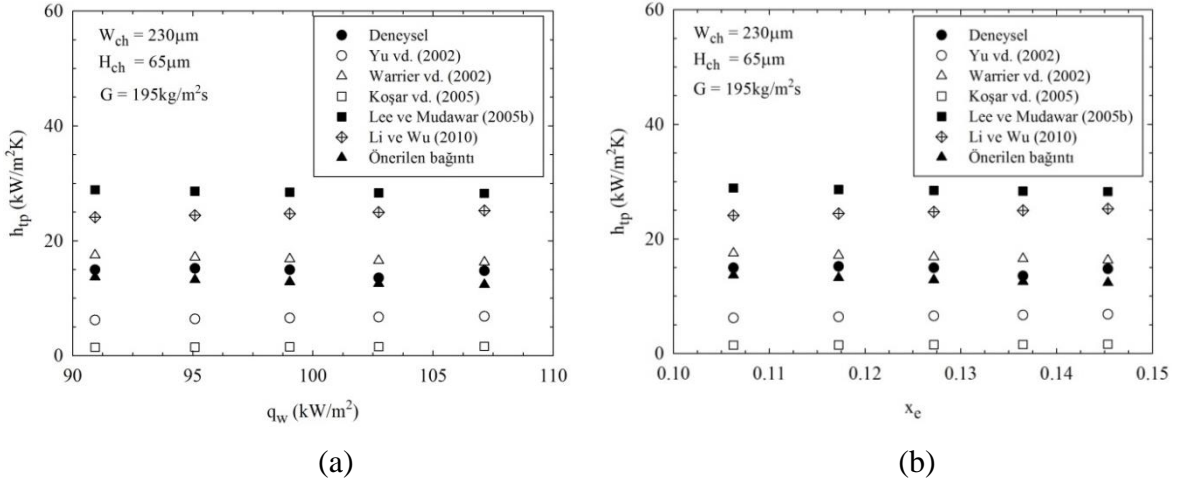
Şekil 3.41.  $AR = 5$  ve  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi



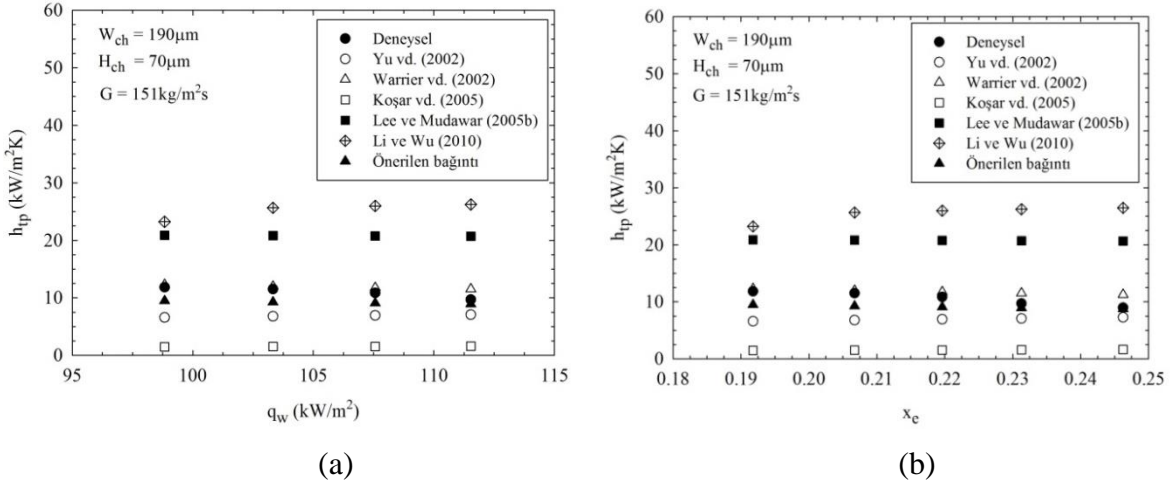
Şekil 3.42.  $AR = 5$  ve  $G = 195 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi



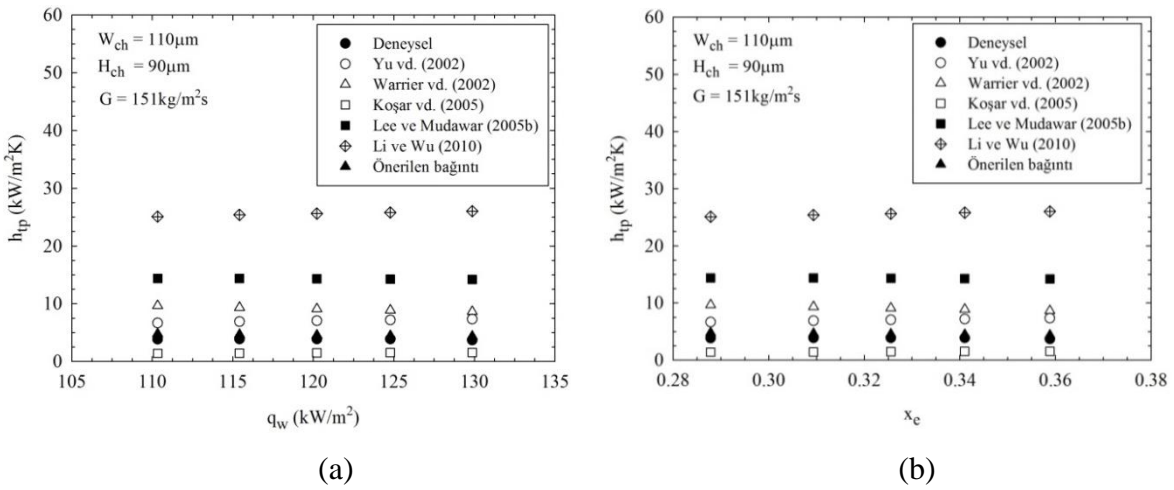
Şekil 3.43.  $AR = 3.54$  ve  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi



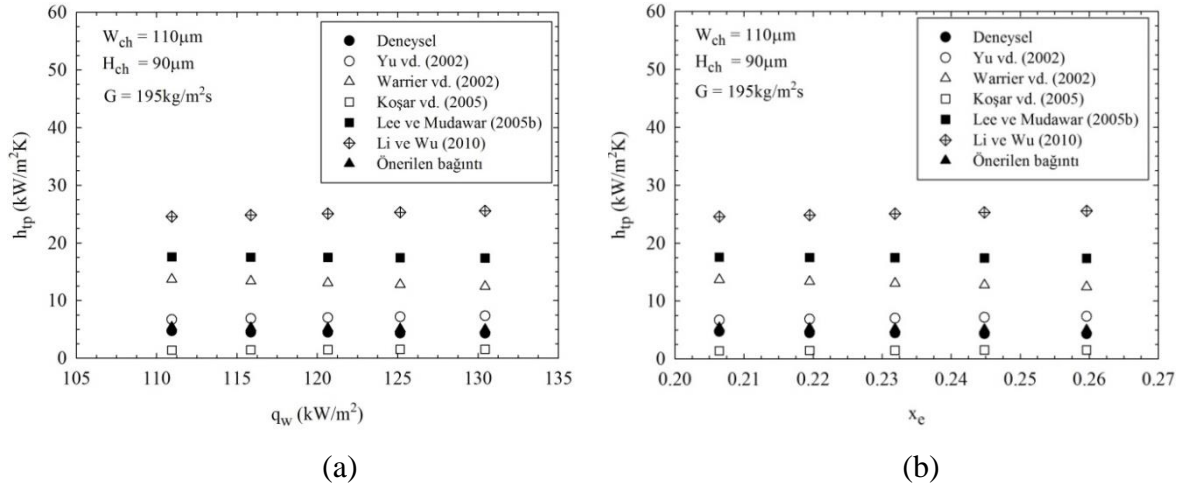
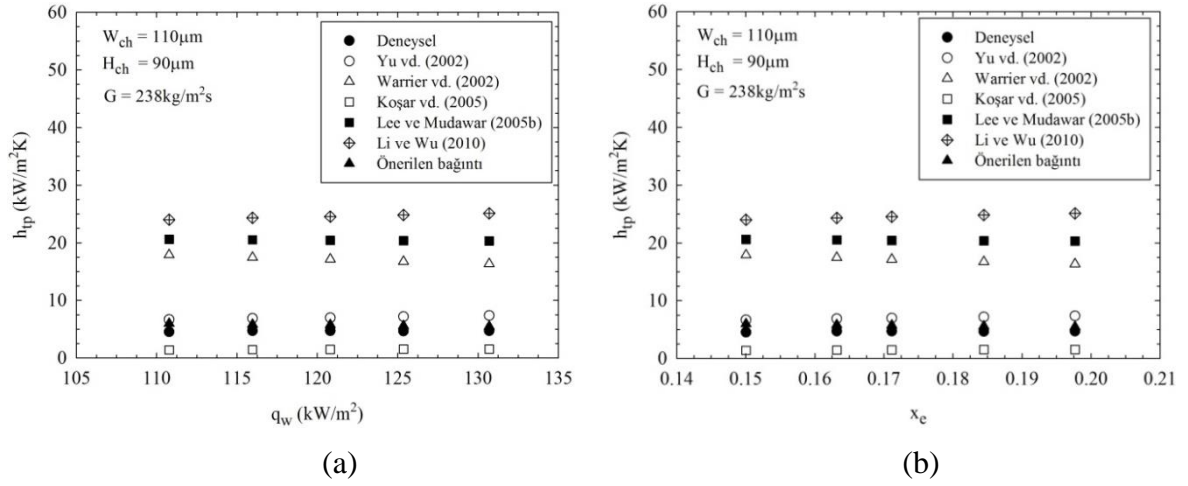
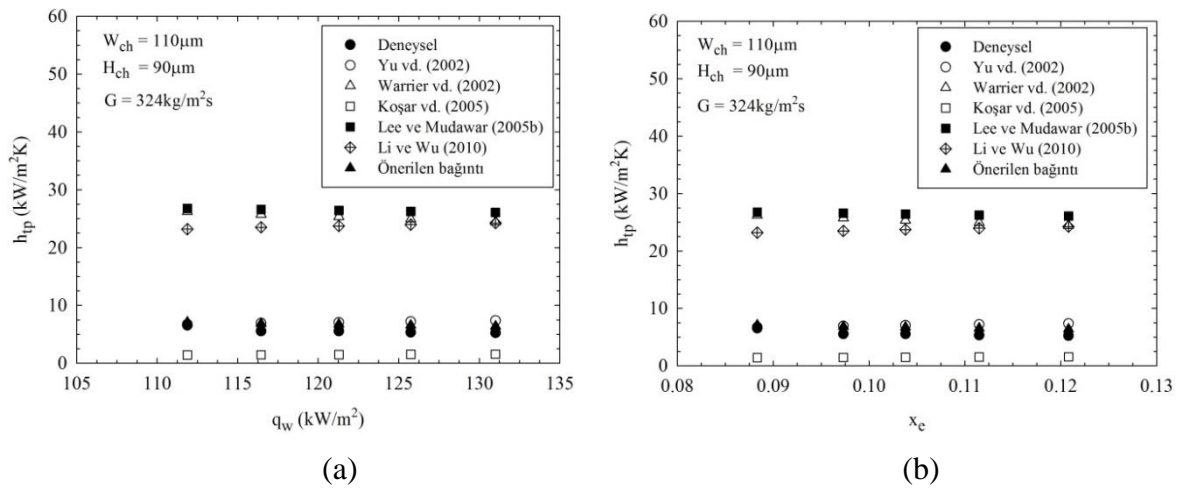
Şekil 3.44.  $AR = 3.54$  ve  $G = 195 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi

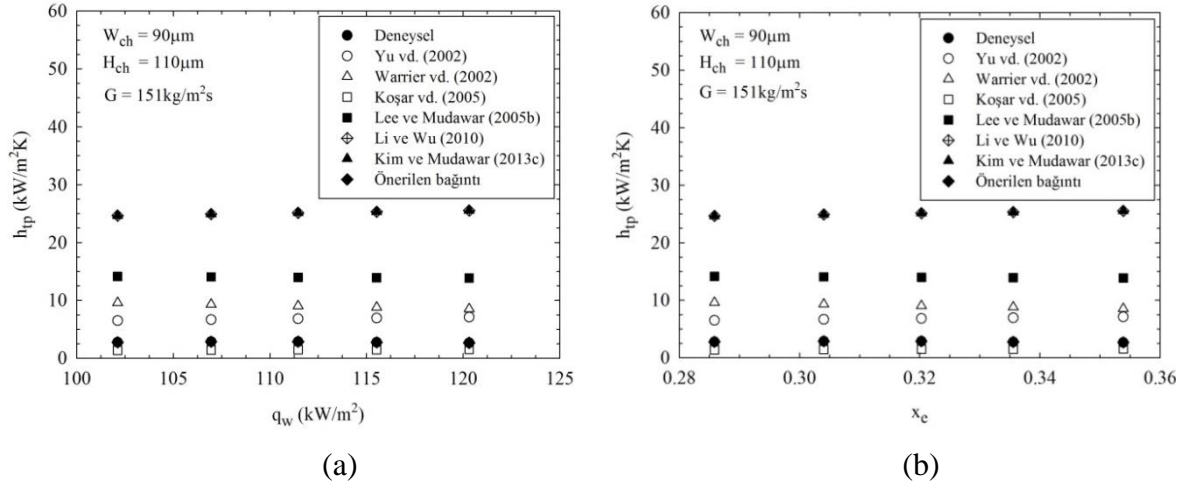
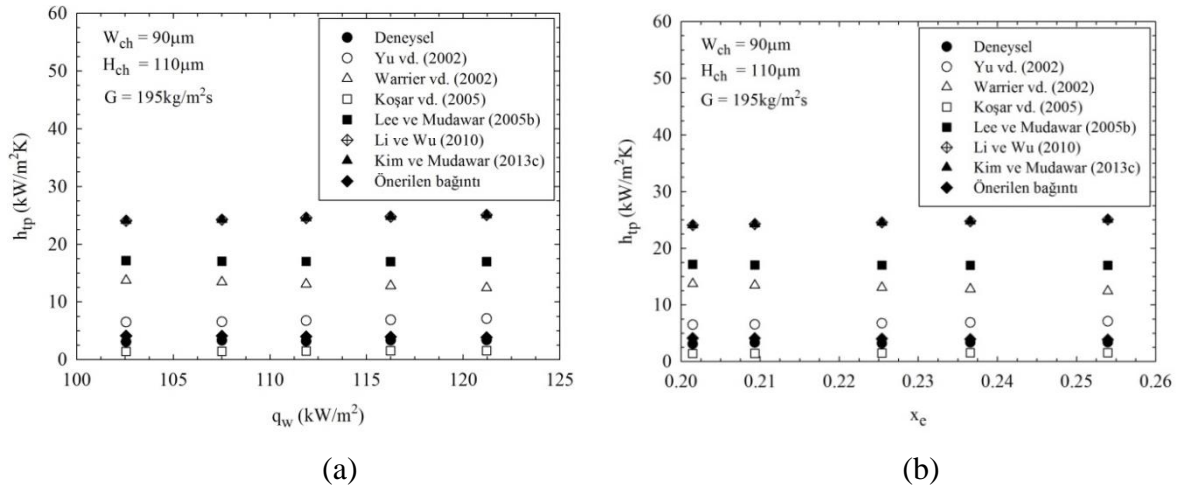
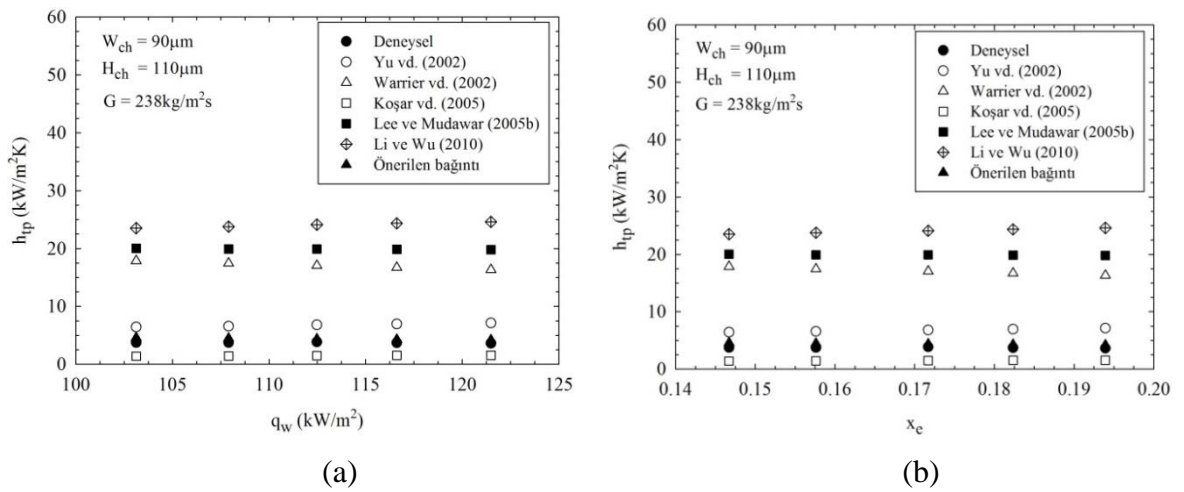


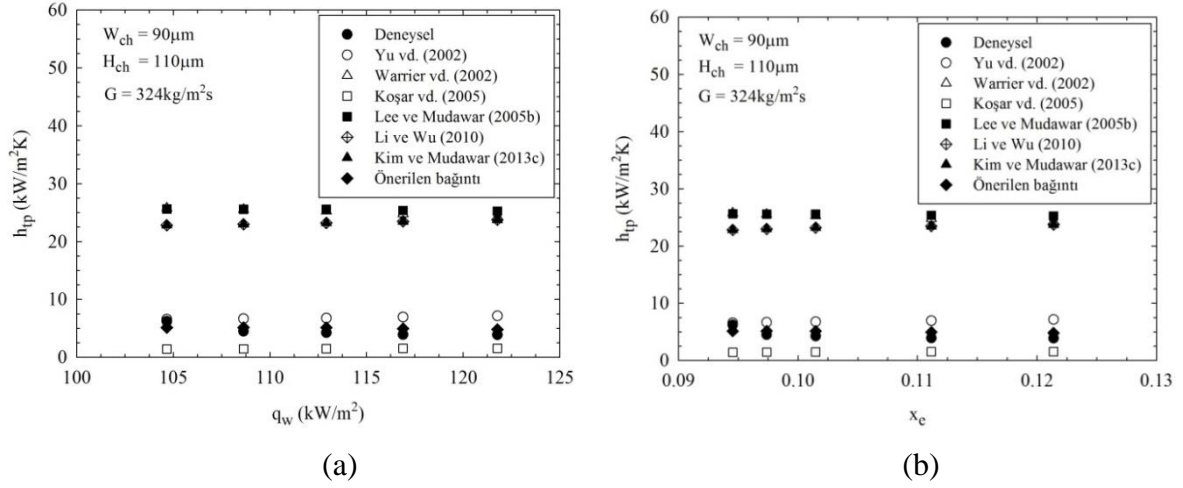
Şekil 3.45.  $AR = 2.71$  ve  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi



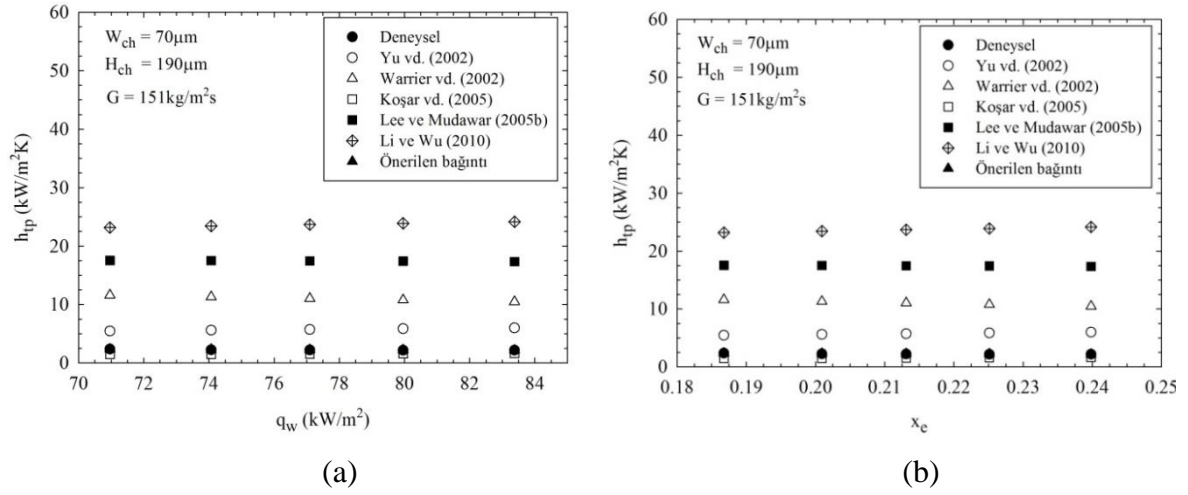
Şekil 3.46.  $AR = 1.22$  ve  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi

Şekil 3.47. AR = 1.22 ve  $G = 195\text{ kg/m}^2\text{ s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesiŞekil 3.48. AR = 1.22 ve  $G = 238\text{ kg/m}^2\text{ s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesiŞekil 3.49. AR = 1.22 ve  $G = 324\text{ kg/m}^2\text{ s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi

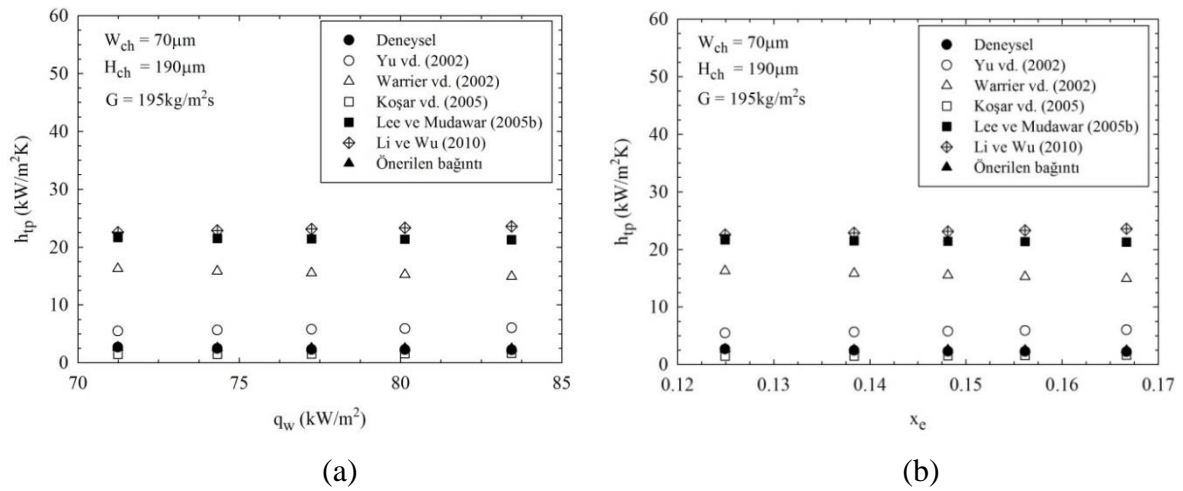
Şekil 3.50. AR = 0.82 ve  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesiŞekil 3.51. AR = 0.82 ve  $G = 195 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesiŞekil 3.52. AR = 0.82 ve  $G = 238 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi



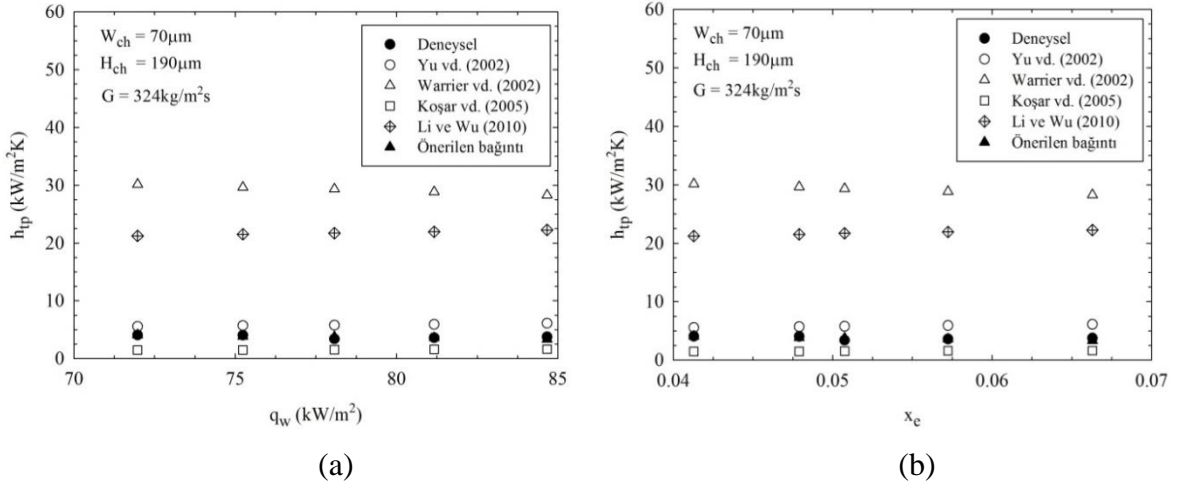
Şekil 3.53. AR = 0.82 ve  $G = 324 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi



Şekil 3.54. AR = 0.37 ve  $G = 151 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi



Şekil 3.55. AR = 0.37 ve  $G = 195 \text{ kg/m}^2\text{s}$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi



Şekil 3.56. AR = 0.37 ve  $G = 324 kg/m^2s$  için mini/mikrokanal bağıntılarının incelenmesi

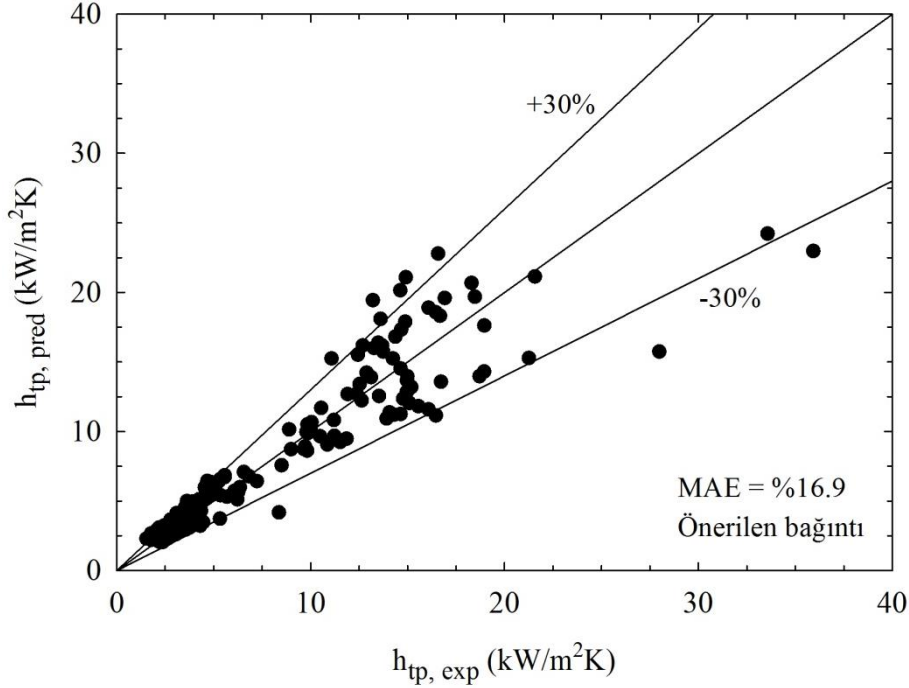
### 3.4.2. Mikrokanallarda Doymuş Kaynamalı Akışta Isı Transferi İçin Yeni Bir Bağıntının Geliştirilmesi

Önceki ilk üç bölümde, farklı test koşullarında, farklı kanallar için elde edilen deneysel sonuçlar ve ölçümlerle eş zamanlı olarak yüksek hızlı kamerayla çekilen akış görüntüleri ayrıntılı bir şekilde verilmiş ve mikrokanallarda doymuş kaynamalı akışın fiziksel mekanizmasıyla ilgili detaylı değerlendirmeler yapılmıştır. Yaklaşık 0.7 ms'de bir alınan görüntüler ile mikrokanallarda doymuş kaynamalı akışa özgü tüm olaylar görsel olarak desteklenmiştir. Bu bilgiler ışığında, etkili kuvvetler, termo-fiziksel parametreler ve ilgili boyutsuz sayılar belirlenmiştir. Önemli çıkarımlar aşağıda belirtilmiştir.

Kabarcıklı kaynamanın etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. Kaynama sayısı (Bo), Weber sayısı (We), Reynolds sayısı (Re), kuruluk derecesi ( $x_e$ ) ve AR (geometrik bir parametre olarak) ısı transferi açısından önemli parametrelerdir. Tablo 2.2 ve 3.1 ile bağıntıların incelenmesine yönelik verilen grafiklere (Şekil 3.39 – 3.56) bakıldığında; bu boyutsuz sayılardan birini veya birkaçını içeren veya sadece taşınımlı kaynamanın etkisini ön planda tutarak geliştirilen bağıntıların diğerlerinden daha iyi tahminler yaptıkları görülmektedir. Belirtilmesi gereken bir diğer önemli husus, Reynolds sayısıdır. Bu çalışmada, sıvı ( $Re_L$ ) ve buhar ( $Re_g$ ) Reynolds sayıları sırasıyla 7.72 – 190 ve 11 – 487 arasında değişmektedir. Düşük Reynolds sayılarına rağmen, akışın karmaşık yapısı sebebiyle laminar etkilerden bahsetmek doğru değildir. Belirtilen durumlar dikkate alınarak, mikrokanallarda doymuş kaynamalı akış için yeni bir ısı transfer katsayısı bağıntısı önerilmiş ve aşağıda verilmiştir.

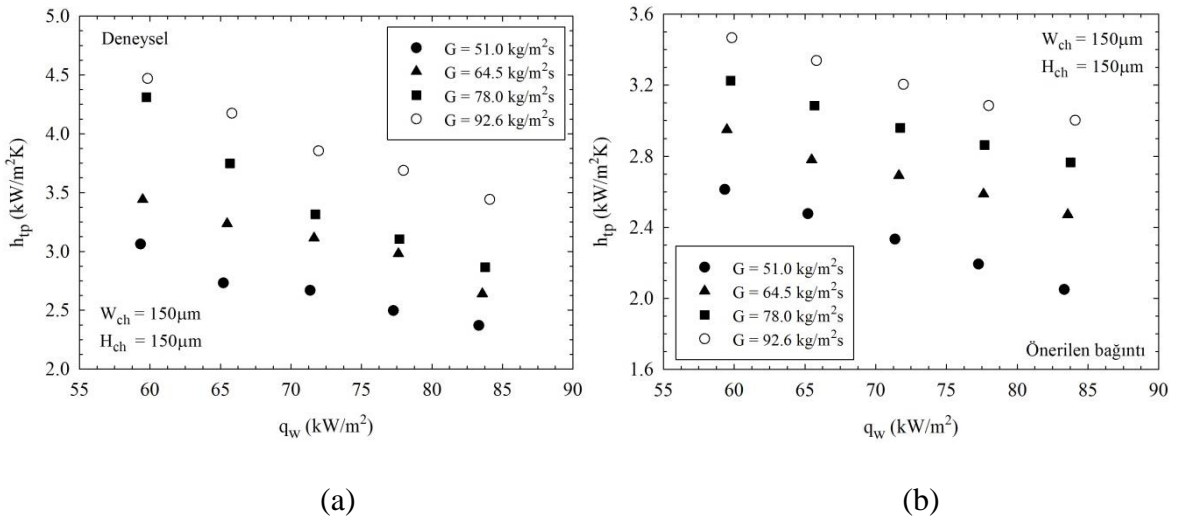
$$h_{tp} = \frac{0.054 \text{Re}_L^{0.214} \text{Bo}^{0.913} \text{AR}^{0.552} \left( \frac{1-x_e}{x_e} \right)^{0.7} \left( \frac{k_L}{D_h} \right)^{1.959}}{\text{We}_{Lo}^{0.094} \text{Pr}_L^{0.333}} \quad (3.5)$$

Tablo 3.1'den de görüldüğü üzere, önerilen bu bağıntının MAE değeri %16.9 olup, tahmin ettiği verilerin %86.4, %96.2 ve %99.5'i sırasıyla  $\pm$  %30,  $\pm$  %40 ve  $\pm$  %50 hata bantları içerisinde yer almaktadır. Farklı çalışma koşulları için önerilen bağıntının deneysel verilerle karşılaştırılması, Şekil 3.40–3.59'da verilmiştir. Şekil 3.40'da  $\text{AR} = 1$ ,  $D_h=150$   $\mu\text{m}$  ve  $G = 64.5$   $\text{kg/m}^2\text{s}$  çalışma koşulları için ısı transfer katsayısının artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile azaldığı görülmektedir. Şekil 3.41 – 3.56'da ise farklı AR oranları ve kütle akıları için de benzer etkinin söz konusu olduğu görülmektedir. Isı transfer katsayısı, genel karakter olarak artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile azalmakta; bazı çalışma koşullarında ise nispeten sabit kalmaktadır. Ayrıca, ilgili şekillerde, önerilen bağıntının farklı çalışma koşullarına rağmen deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu da görülmektedir. Şekil 3.57, tüm veri tabanı üzerinden, önerilen bağıntıyla yapılan tahminlerin  $\pm$  %30 hata bantları kullanılarak deneysel verilerle karşılaştırılmasını göstermektedir.



Şekil 3.57. Önerilen ısı transfer katsayısı bağıntısıyla yapılan tahminlerin  $\pm$ %30 hata bantları üzerinden deneysel verilerle karşılaştırılması

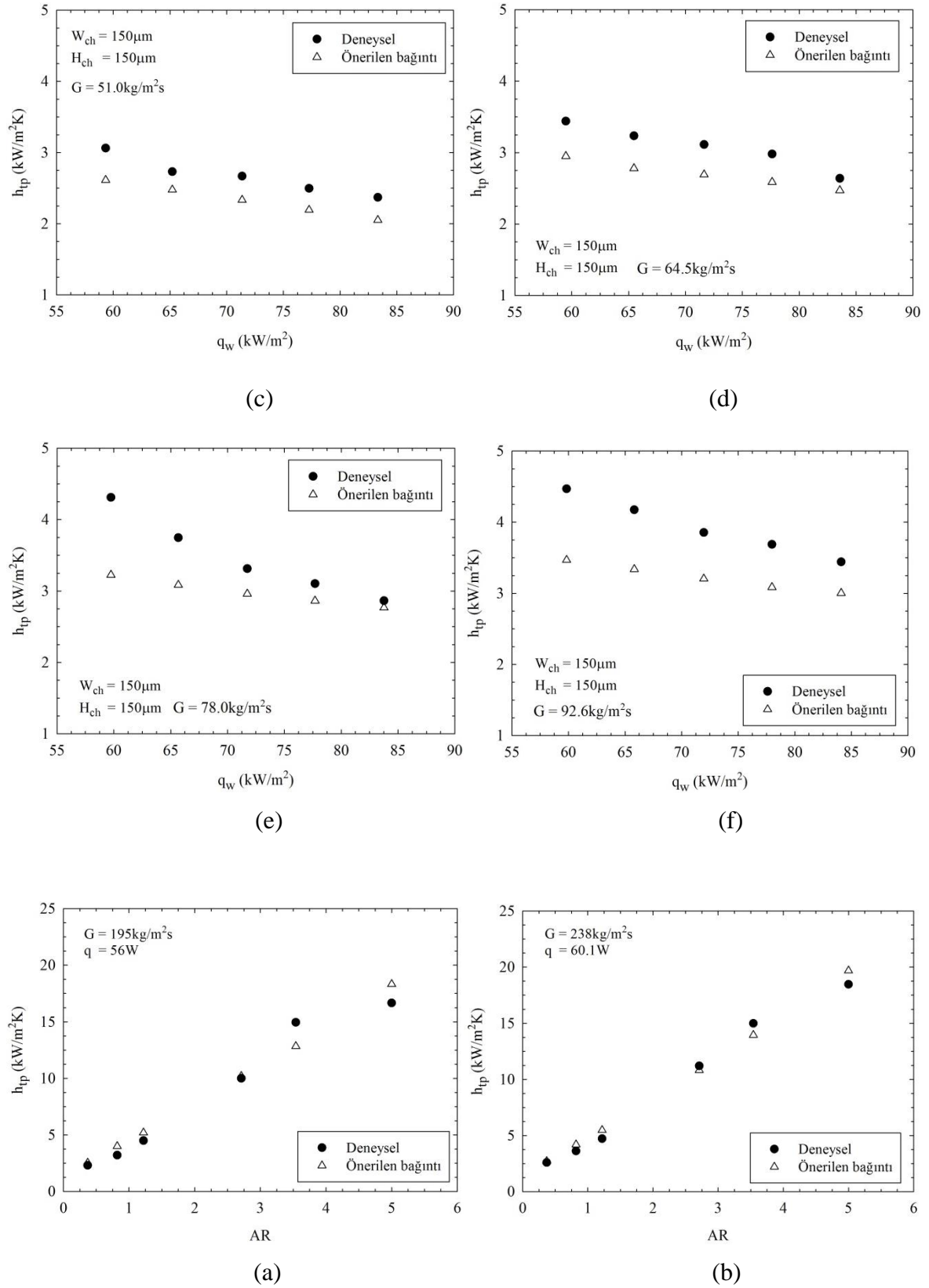
Şekil 3.58, Şekil 3.40'ın 4 farklı kütleli akıyı içeren ( $G=51, 64.5, 78$  ve  $92.6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) genişletilmiş formu olup;  $AR = 1$  ve  $D_h = 150 \mu\text{m}$  çalışma koşulları için sadece önerilen bağıntı ile deneysel sonuçların karşılaştırılmasını ayrıntılı olarak vermektedir. Şekil 3.58a ve b'de, sırasıyla, yalnızca deneysel veriler ve önerilen ısı transferi bağıntısıyla tahmin edilen veriler görülmektedir. Isı transfer katsayısı, bütün kütle akısı değerlerinde artan ısı akısı ile azalır. Sabit bir ısı akısı değerinde, ısı transfer katsayısı artan kütle akısı ile artar. Bu şekildeki değişimler, akış görüntüleriyle de uyumlu olarak taşınımın baskın ısı transfer mekanizması olduğunun bir göstergesidir. Şekil 3.59'da, önerilen bağıntının geniş bir çalışma aralığı için deneysel sonuçlarla karşılaştırılması verilmiştir. Sabit bir ısı güç ve kütle akısı değeri için ısı transfer katsayısı, artan  $AR$  ile artar. Isı transfer katsayısı aynı zamanda verilen bir  $AR$  ve ısı güç değeri için artan kütle akısı ile de artar. Elde edilen sonuçlar, önerilen bağıntının yüksek tahmin kapasitesini göstermektedir.



Şekil 3.58.  $AR = 1$ ,  $D_h = 150 \mu\text{m}$  ve dört farklı kütleli akı için önerilen ısı transfer katsayısı bağıntısının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

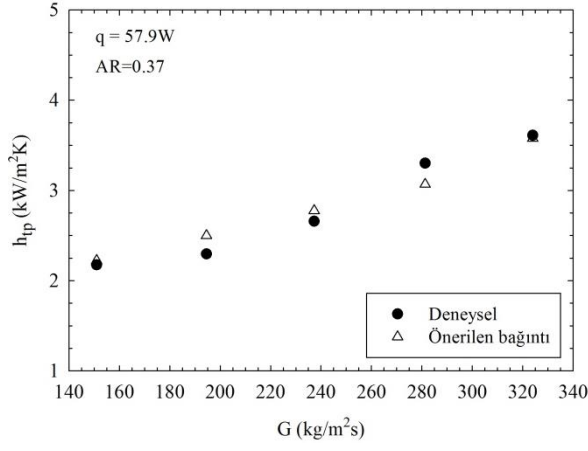


Şekil 3.58'in devamı

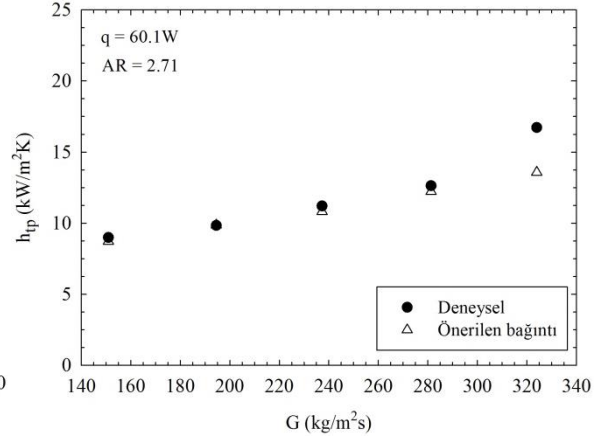


Şekil 3.59. Önerilen ısı transfer katsayısı bağıntısının farklı AR (a ve b) ve farklı kütle akıları (c ve d) için deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Şekil 3.59'un devamı



(c)



(d)

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, özetle, farklı geomerik konfigürasyonlara sahip mikrokanallarda, doymuş kaynamalı akışta ısı transferi ve basınç düşümü deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, akış fiziğini açıklayabilmek için yüksek hızlı akış görüntülerinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda verilmiştir.

1. Hem deneysel ölçümler hem de akış görüntüleri, mikrokanallardaki kaynamalı akışın özgün niteliklere sahip olduğunu ve makro kanal karakteristiklerinden farklı olduğunu göstermiştir.
2. Mikrokanallardaki (doymuş) kaynamalı akış olayı, sanki periyodik karaktere sahiptir.
3. Yerel iki faz ısı transfer katsayısı, incelenen bütün kütle akısı değerleri için genel karakter olarak; artan kütle akısı ile artmakta, ısı akısı veya yerel kuruluk derecesindeki artışla azalmakta veya bazı çalışma koşulları için nispeten sabit bir davranış göstermektedir.
4. Temel akış desenleri uzun kabarcıklı akış ve halkasal akıştır. Isı akısı ve kütle akısının değerlerine ve kanallar arasındaki etkileşime göre çalkantılı akış veya sisli akış görülebilmekte ve bir periyot içerisindeki kuruma gibi olayların gerçekleşme süreleri değişebilmektedir.
5. Mikrokanallarda doymuş kaynamalı akışta baskın ısı transfer mekanizması taşınımlı kaynamadır.
6. Çalışma kapsamında, basınç düşümü veya sıcaklık değerlerinde yüksek genlikli çalkantılar gözlenmemiştir.
7. Bütün test koşullarında, artan ısı akısı ile kızma farkı artmaktadır. Bu artış, yüksek AR değerlerinde daha belirgindir.
8. AR'nin 2.71'den 1.22'ye geçişinde, kızma farklarında belirgin bir değişim olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kuruma periyodunun uzamasıdır.
9. Isı transfer katsayısı; genel karakter olarak, artan AR değeri ile artmaktadır. Ancak; bu artış, sürekli olmayabilir. Çalışma koşullarına bağlı olmak üzere, kritik bir AR değerine erişilirse ısı transfer katsayısı pik yaparak azalmaya başlar. Çalışma kapsamında, ısı transfer katsayısının AR = 3.54 değerine kadar artan AR ile artıp devamında azaldığını gösteren sonuçlar da elde edilmiştir.

10. Toplam basınç düşümü, sabit bir kütle akısı değeri için artan çıkış kuruluk derecesi ve ısı akısı ile artar. Sabit bir ısı akısı değerinde ise artan kütle akısı ile genellikle azalır. Ancak, bu azalış sürekli değildir. İlgili çalışma koşulları için kritik bir kütle akısı değerine erişilirse; bu değerden itibaren (bir başka ifade ile bir minimum değerden itibaren), toplam basınç düşümü, artan kütle akısı ile artmaya başlar.
11. Tüm çalışma koşulları için test bölgesi giriş haznesinde ölçülen basınç değerleri 105.7 ile 158.9 kPa arasında değişmektedir.
12. Yerel ısı transfer katsayısı, hidrolik çap ile monotonik bir artış veya azalış göstermemektedir.
13. Kuruma periyodu, artan ısı akısı ile uzamaktadır.
14. Sabit ısı akısı ve kütle akısı değerleri için toplam basınç düşümü azalan hidrolik çap ile artar. Bu sonuç, kabarcık sınırlanması ve kabarcığın kanal girişine doğru uzamasının etkinliğini göstermektedir.
15. Makro ve mini/mikrokanallarda kaynamalı akışta ısı transferi için geliştirilmiş çeşitli bağıntılar değerlendirilmiştir. Warriar vd. (2002), Yu vd. (2002) ve Koşar vd.'nin (2005) bağıntılarıyla yapılan tahminlerin belirli çalışma koşulları için deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu; ancak, mevcut bağıntıların tüm veri tabanı dikkate alındığında, yetersiz kaldığı görülmüştür.
16. Mikrokanallarda doymuş kaynamalı akışta ısı transfer katsayısını belirlemek için yeni bir bağıntı önerilmiştir. Önerilen bağıntının tüm veri tabanı (213 veri noktası) üzerinden MAE değeri %16.9 olup; tahmin ettiği verilerin %86.4, %96.2 ve %99.5'i sırasıyla  $\pm$  %30,  $\pm$  %40 ve  $\pm$  %50 hata bantları içerisinde yer almaktadır.

## 5. ÖNERİLER

Konu üzerine çalışmayı düşünen araştırmacılar için aşağıda bazı tavsiyeler sıralanmıştır:

1. Bu çalışmada, akışkan olarak sadece saf su kullanılmıştır. Benzer geometri ve çalışma koşulları için farklı akışkanlarla deneyler yapılarak ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri karşılaştırılabilir.
2. Yüzey sıcaklıklarının belirlenmesinde bir boyutlu ısı iletimi kabulü kullanılmaktadır. Akışın yapısını bozmayacak şekilde, mikrokanallara özgü tekniklerin geliştirilmesi ve yüzey sıcaklıklarının bu şekilde belirlenmesi daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Benzer durum basınç ölçümleri için de geçerlidir.
3. Literatürde kullanılan hesaplama prosedürleri makro kanallara ait denklem takımlarının mikrokanallara modifikasyonu şeklindedir. Bunların yerine tamamen mikrokanallara özgü hesaplama prosedürlerinin geliştirilmesi faydalı olacaktır.
4. Geniş geometrik aralık ve çalışma koşullarında deneyler yapılarak, makro, mini ve mikro ölçek arasındaki geçişler için yeni kriterler tanımlanmalıdır. Bu tarz çalışmalar, cihaz tasarımları ve dolayısıyla pratik uygulamalar açısından oldukça önemlidir.
5. Daha düşük kızma farklarında daha fazla ısı transferi sağlamak için kabarcıklı kaynamanın kanal boyunca etkinliğini arttıracak, literatürden farklı geometrik tasarımların yapılması oldukça önemlidir.
6. Deneysel sonuçlarla desteklenen sayısal çalışmaların geliştirilmesi gerekmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Ali, R., Palm, B., Callizo, C.M. ve Maqbool, M.H., 2013. Study of Flow Boiling Characteristics of a Microchannel Using High Speed Visualization, Journal of Heat Transfer, 135, 8, 1-8.
- Alam, T., Lee, P. S., Yap, C.R. ve Jin, L., 2012. Experimental Investigation of Local Flow Boiling Heat Transfer And Pressure Drop Characteristics In Microgap Channel, International Journal of Multiphase Flow, 42, 164–174.
- Alam, T., Lee, P.S., Christopher R.Y. ve Jin, L., 2013. A Comparative Study of Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in Microgap and Microchannel Heat Sink and an Evaluation of Microgap Heat Sink for Hotspot Mitigation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 58, 1-2, 335–347.
- Anwar, Z., Palm, B. ve Khodabandeh, R., 2014. Flow Boiling Heat Transfer and Dryout Characteristics of R152a in a Vertical Mini-Channel, Experimental Thermal and Fluid Science, 53, 207-217.
- Asadi, M., Xie, G.ve Sunden, B., 2014. A Review of Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Single and Two-Phase Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 79, 34–53.
- Balasubramanian, P. ve Kandlikar, S.G., 2004. An Experimental Study of Flow Patterns, Pressure Drop and Flow Instabilities in Parallel Rectangular Minichannels. in: Proceedings Of The 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels, Rochester, June, New York, ICMM2004–2371, 475–481.
- Balasubramanian, P. ve 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., Jagirdar, M., Lee, P.S., Teo, C.J. ve 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.
- Barber, J., Sefiane, K., Brutin, D. ve Tadrist, L., 2009. Hydrodynamics and Heat Transfer During Flow Boiling Instabilities in A Single Microchannel, Applied Thermal Engineering, 29, 7, 1299–1308.
- Barber, J., Brutin, D., Sefiane, K. ve Tadrist, L., 2010. Bubble confinement in flow boiling of FC-72 in a “rectangular” microchannel of high aspect ratio, Experimental Thermal and Fluid Science, 34, 8, 1375–1388.
- Bau, H.H., 1998. Optimization of Conduits’ Shape in Micro-Heat Exchangers, Int. J. Heat Mass Transfer, 41, 18, 2717–2723.

- Bogojevic, D. Sefiane, K., Walton, A.J., Lin, H., Cummins, G., Kenning, D.B.R. ve Karayiannis, T.G., 2011. Experimental Investigation of Non-Uniform Heating Effect On Flow Boiling Instabilities in a Microchannel-Based Heat Sink, International Journal of Thermal Sciences, 50, 3, 309-324.
- Bogojevic, D., Sefiane, K., Duursma, G. ve Walton, A.J., 2013. Bubble Dynamics and Flow Boiling Instabilities in Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 58, 1-2, 663-675.
- Bergles, A.E., Goldberg, P. ve Maulbetsch, J.S., 1967. Acoustic Oscillations in a High Pressure Single Channel Boiling System. In: Proc. Symp. Two phase Flow Dynamics, Eindhoven, 1, 535–550.
- Bergles, A.E., Lienhard V.J.H., Kendall, G.E. ve Griffith, P., 2003. Boiling and Evaporation in Small Diameter Channels, Heat Transfer Eng., 24, 1, 18–40.
- Bergles, A.E. ve Kandlikar, S.G., 2005. On the Nature of Critical Heat Flux in Microchannels, Journal of Heat Transfer, 127, 1, 101-108.
- Blevins, R.D. 1984. Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Boure, J.A., Bergles, A.E. ve Tong L.S., 1973. Review of Two-Phase Flow Instability, Nuclear Engineering and Design, 25, 2, 165-192.
- Brauner, N. ve Ullmann, A., 2006. The Prediction of Flow Boiling Maps in Minichannels, 4th Japanese–European Two-Phase Flow Group Meeting, Kyoto.
- Celata, G.P., Mishima, K. ve Zummo, G., 2001. Critical Heat Flux Prediction for Saturated Flow Boiling of Water in Vertical Tubes, Int. J. Heat and Mass Transfer, 44, 22, 4323-4331
- Celata, G.P., Saha, K.S., Zummo, G. ve Dossevi, D., 2010. Heat Transfer Characteristics Of Flow Boiling In A Single Horizontal Microchannel, International Journal of Thermal Sciences, 49, 7, 1086-1094.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., 2013. Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla, Yedinci Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Chang, K.H. ve Pan, C., 2007. Two-Phase Flow Instability for Boiling in a Microchannel Heat Sink, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 2078–2088.
- Chen, J.C., 1966. Correlation For Boiling Heat Transfer To Saturated Fluids in Convective Flow, I&EC Process Design and Development, 5, 3, 322-329.
- Chen, I.Y., Chen Y.M., Liaw, J.S. ve Wang, C.C., 2007. Two-Phase Frictional Pressure Drop in Small Rectangular Channels, Experimental Thermal and Fluid Science, 32, 1, 60–66.

- Chen, T. ve Garimella, S.V., 2006. Measurements and High-Speed Visualizations of Flow Boiling of a Dielectric Fluid in a Silicon Microchannel Heat Sink, International Journal of Multiphase Flow, 32, 8, 957–971.
- Chen, T. ve 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. ve Mewes, D., 2006. Review of two-phase flow and flow boiling of mixtures in small and mini channels, International Journal of Multiphase Flow, 32, 2, 183–207.
- Chedester, R.C. ve Ghiaasiaan, S.M., 2002. A Proposed Mechanism for Hydrodynamically-Controlled Onset of Significant Void in Microtubes, International Journal of Heat and Fluid Flow, 23, 6, 769–775.
- Chisholm, D., 1973. Pressure Gradients Due to Friction During the Flow of Evaporation Two-Phase Mixtures in Smooth Tubes and Channels, Int. J. Heat Mass Transfer, 16, 347–358.
- Choi, C. ve Kim, M.H., 2008. The Fabrication of a Single Glass Microchannel to Study the Hydrophobicity Effect on Two-Phase Flow Boiling of Water, Journal of Micromechanics and Microengineering, 18, 10, 1-9.
- Choi, C. Shin, J.S., Yu, D.L. ve Kim, M.H., 2011. Flow Boiling Behaviors in Hydrophilic and Hydrophobic Microchannels, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 5, 816–824.
- Collier, J.G. ve Thome J.R., 1994. Convective Boiling and Condensation, Third Edition, Oxford University Press, USA.
- Costa-Patry, E. ve Thome, J.R., 2013. Flow Pattern-Based Flow Boiling Heat Transfer Model for Microchannels, Int. J. Refrigeration, 36, 2, 414-420.
- Davis, E.J. ve Anderson, G.H., 1966. The Incipience of Nucleate Boiling in Forced Convection Flow, AIChE J., 12, 4, 774–780.
- Del Col, D. ve Bortolin, S., 2012. Investigation of Dryout During Flow Boiling in a Single Microchannel Under Non-Uniform Axial Heat Flux, International Journal of Thermal Sciences, 57, 25-36.
- Deng, D., Tang, Y., Liang, D., He, H. ve Yang, S., 2014a. Flow Boiling Characteristics in Porous Heat Sink with Reentrant Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 70, 463-477.
- Deng, D., Tang, Y., Shao, H., Zeng, J., Zhou, W. ve Liang, D., 2014b. Effects of Structural Parameters on Flow Boiling Performance of Reentrant Porous Microchannels, J. Micromech. Microeng., 24, 065025, 14.



- Deng, D., Wan, W., Tang, Y., Wan, Z. ve 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. ve 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. ve 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., Chen, R., Tang, Y., Lu, L., Zeng, T. ve Wan, W., 2015d. A Comparative Study of Flow Boiling Performance in Reentrant Copper Microchannels and Reentrant Porous Microchannels with Multi-Scale Rough Surface, International Journal of Multiphase Flow, 72, 275-287.
- Dhir, V.K., Abarajith, H.S. ve Li, D., 2007. Bubble Dynamics and Heat Transfer During Pool and Flow Boiling, Heat Transfer Engineering, 28, 7, 608–624.
- Diaz, M.C. ve Schmidt, J., 2007. Experimental Investigation of Transient Boiling Heat Transfer in Microchannels International Journal of Heat and Fluid Flow, 28, 1, 95–102.
- Ding, Y., Kakaç, S. ve Chen, X.J., 1995. Dynamic Instabilities of Boiling Two-Phase Flow in a Single Horizontal Channel, Experimental Thermal and Fluid Science, 11, 327-342.
- EL-Genk, M.S. ve Bostanci, H., 2003. Saturation Boiling of HFE-7100 from a Copper Surface, Simulating a Microelectronic Chip, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 10, 1841–1854.
- Friedel, L., 1979. Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-Phase Pipe Flow, in: European Two-phase Group Meeting, Ispra, Italy, Paper E2.
- Fu, B.R., Lee C.R. ve Pan C., 2013a. The Effect of Aspect Ratio on Flow Boiling Heat Transfer of HFE-7100 in a Microchannel Heat Sink, International Journal of Heat and Mass Transfer, 58, 1-2, 53–61.
- Fu, B.R., Tsou, M.S. ve Pan, C., 2013b. 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.
- Fu, X., Zhang, P., Huang, C.J. ve Wang, R.Z., 2010. Bubble Growth, Departure and the Following Flow Pattern Evolution During Flow Boiling in a Mini-Tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 21-22, 4819–4831.

- Gedupudi, S., Zu, Y.Q., Karayiannis, T.G., Kenning, D.B.R. ve Yan, Y.Y., 2011. Confined Bubble Growth During Flow Boiling in a Mini/Micro-Channel of Rectangular Cross-Section Part I: Experiments and 1-D Modelling, International Journal of Thermal Sciences, 50, 3, 250-266.
- Ghiaasiaan, S.M. ve Chedester, R.C., 2002. Boiling Incipience in Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45, 4599–4606.
- Gong, S. ve Cheng, P.A, 2012. Lattice Boltzmann Method for Simulation of Liquid-Vapor Phase-Change Heat Transfer, Int. J. Heat Mass Transfer, 55, 4923–4927.
- Gong, S. ve Cheng, P., 2014. Numerical Investigation of Saturated Flow Boiling in Microchannels by the Lattice Boltzmann Method, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology, 65, 7, 644-661.
- Gungor, K.E. ve Winterton, R.H.S., 1986. A General Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli, Int. J. Heat Mass Transfer, 29,3, 351–358.
- Harirchian, T. ve 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. ve Garimella, S.V., 2009a. 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. ve Garimella, S.V., 2009b. A Systematic Investigation of the Effects of Microchannel Width, Depth, and Aspect Ratio on Convective Boiling Heat Transfer and Flow Regimes in Parallel Microchannels, ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference collocated with the InterPACK09 and 3rd Energy Sustainability Conferences, San Francisco, California, USA, 907-916.
- Harirchian, T. ve Garimella, S.V., 2009c. Effects 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. ve 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.
- Harirchian, T. ve Garimella, S.V., 2012. Flow Regime-Based Modeling of Heat Transfer And Pressure Drop in Microchannel Flow Boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 4, 1246–1260.
- Hestroni, G., Mosyak, A., Segal, Z. ve Ziskind, G., 2002. A Uniform Temperature Heat Sink for Cooling of Electronic Devices, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45, 16, 3275–3286.

- Hetsroni, G. Mosyak, A. Pogrebnyak, E. ve Segal, Z., 2006. Periodic Boiling in Parallel Micro-Channels at Low Vapor Quality, International Journal of Multiphase Flow, 32, 1141–1159.
- Hsu, Y.Y. ve Graham, R., 1961. An Analytical and Experimental Study of the Thermal Boundary Layer and Ebullition Cycle in Nucleate Boiling, NASA TN-D-594.
- Hsu, Y.Y., 1962. On the Size Range of Active Nucleation Cavities on a Heating Surface, J. Heat Transfer, 84, 207–216.
- Huh, C. ve 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. ve 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. ve 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.
- Incropera, P.F., DeWitt, P.D., Bergman, L.T. ve Lavine, S.A., 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Sixth Edition, John-Wiley & Sons Inc, USA.
- Kadam, T.S. ve Kumar, R., 2014. Twenty First Century Cooling Solution: Microchannel Heat Sinks, International Journal of Thermal Sciences, 85, 73-92.
- Kakaç, S. ve Bon, B., 2008. A Review of Two-Phase Flow Dynamic Instabilities in Tube Boiling Systems, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 3-4, 399-433.
- Kakaç, S. ve Cao, L., 2009. Analysis of Convective Two-Phase Flow Instabilities in Vertical and Horizontal in-Tube Boiling Systems, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 17-18, 3984–3993.
- Kalani, A. ve Kandlikar, S. G., 2014. Evaluation of Pressure Drop Performance During Enhanced Flow Boiling in Open Microchannels with Tapered Manifolds, Journal of Heat Transfer, 136, 051502, 7.
- Kalani, A. ve Kandlikar, S. G., 2015. Effect of Taper on Pressure Recovery During Flow Boiling in Open Microchannels with Manifold Using Homogeneous Flow Model, International Journal of Heat and Mass Transfer, 83, 109–117.
- Kandlikar, S.G., 1990. A General Correlation for Saturated Two Phase- Flow Boiling Heat Transfer Inside Horizontal and Vertical Tubes, J. Heat Transfer, 112, 219–228.
- Kandlikar, S.G., Mizo, V., Cartwright, M. ve Ikenze, E., 1997. Bubble Nucleation and Growth Characteristics in Subcooled Flow Boiling of Water, ASME Proceedings of the 32nd National Heat Transfer Conference, January, New York, 4, 11–18.

- Kandlikar, S.G., 2002. Fundamental Issues Related to Flow Boiling in Minichannels and Microchannels, Exp. Therm. Fluid Sci., 26, 38–47.
- Kandlikar, S.G. ve Grande, W., 2002. Evolution of Micro-Channel Flow Passages – Thermo-Hydraulic Performance and Fabrication Technology, in: Proceedings of IMECE ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November, New Orleans, IMECE 32043, 1–13.
- Kandlikar, S.G., 2004. Heat Transfer Mechanisms During Flow Boiling in Microchannels, Journal of Heat Transfer, 126, 8-16.
- Kandlikar, S.G., 2005. High Flux Heat Removal with Microchannels-A Roadmap of Challenges and Opportunities, Heat Transfer Engineering, 26, 8, 5-14.
- Kandlikar, S.G., Garimella, S.V., Li, D., Colin, S. ve King, M.R., 2006. Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels, Elsevier, Oxford.
- 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., 2010c. A Scale Analysis Based Theoretical Force Balance Model for Critical Heat Flux, CHF During Saturated Flow Boiling in Microchannels and Minichannels, Journal of Heat Transfer, 132, 081501-1- 081501-13.
- Kandlikar, S.G., Colin, S., Peles, Y., Garimella, S., Pease, R.F., Brandner, J.J. ve Tuckerman, D.B., 2013. Heat Transfer in Microchannels-2012 Status and Research Needs, Journal of Heat Transfer, 135, 9, 18.
- Karayiannis, T.G., Shiferaw, D., Kenning, D.B.R. ve 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.
- Kaya, A., Özdemir, M.R. ve Koşar, A., 2013. High Mass Flux Flow Boiling and Critical Heat Flux in Microscale, International Journal of Thermal Sciences, 65, 70-78.
- Kew, P.A. ve Cornwell, K., 1997. Correlations For The Prediction of Boiling Heat Transfer in Small-Diameter Channels, Applied Thermal Engineering, 17, 8-10, 705-715.
- Kim, S.M. ve Mudawar, I., 2012a. Flow Condensation in Parallel Micro-Channels – Part 2: Heat Transfer Results and Correlation Technique, Int. J. Heat Mass Transfer, 55, 4, 984–994.

- Kim, S.M. ve Mudawar, I., 2012b. Universal Approach to Predicting Two-Phase Frictional Pressure Drop for Adiabatic and Condensing Mini/Micro-Channel Flows, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 3246–3261.
- Kim, S.M. ve Mudawar, I., 2013a. Universal Approach to Predicting Two-Phase Frictional Pressure Drop for Mini/Micro-Channel Saturated Flow Boiling, Int. J. Heat and Mass Transfer, 58, 1-2, 718-734.
- Kim, S.M. ve Mudawar, I., 2013b. Universal Approach to Predicting Saturated Flow Boiling Heat Transfer in Mini/Micro-Channels – Part I. Dryout incipience quality, Int. J. Heat and Mass Transfer, 64, 1226-1238.
- Kim, S.M. ve Mudawar, I., 2013c. 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. ve Mudawar, I., 2014a. Theoretical Model for Local Heat Transfer Coefficient For Annular Flow Boiling in Circular Mini/Micro-Channels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 73, 731–742.
- Kim, S.M. ve Mudawar, I., 2014b. Review of Databases and Predictive Methods for Pressure Drop in Adiabatic, Condensing and Boiling Mini/Micro-Channel Flows, International Journal of Heat and Mass Transfer, 77, 74–97.
- Kim, S.M. ve Mudawar, I., 2014c. 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.
- Kline, S.J. ve McClintock, F.A., 1953. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, Mechanical Engineering, 73, 1, 3–8.
- Koşar, A., Kuo, C.J. ve 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. ve Peles, Y., 2006. Suppression of Boiling Flow Oscillations in Parallel Microchannels With Inlet Restrictors, ASME J. Heat Transfer, 128,3, 251–260.
- Kuo, C.J. ve Peles, Y., 2007. Local Measurement Of Flow Boiling in Structured Surface Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 23-24, 4513–4526.
- Kuo, C.J. ve Peles, Y., 2009. Pressure Effects On Flow Boiling Instabilities in Parallel Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 1-2, 271–280.
- Law, M., Lee, P.S. ve Balasubramanian, K., 2014. Experimental investigation of Flow Boiling Heat Transfer in Novel Oblique-Finned Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 76, 419–431.

- Law, M. ve 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.
- Lazarek, G.M. ve Black, S.H., 1982. Evaporative Heat Transfer, Pressure Drop and Critical Heat Flux in a Small Vertical Tube with R-113, International Journal of Heat and Mass Transfer, 25, 7, 945-960.
- Leão, H.L.S.L., Nascimento, F.J.D. ve Ribatski, G., 2014. Flow Boiling Heat Transfer of R407C in a Microchannels Based Heat Spreader, Experimental Thermal and Fluid Science, 59, 140-151.
- Lee, P.S. ve 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, J. ve 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. ve 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.C. ve Pan, C., 2008. On The Eruptive Boiling in Silicon-Based Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 19-20, 4841–4849.
- Lee, W., Son, G. ve Jeong, J.J., 2010. Numerical Analysis of Bubble Growth and Departure from a Microcavity, Numerical Heat Transfer, 58, 323–342.
- Lee, W., Son, G. ve Yoon, H.Y., 2012a. Numerical Study of Bubble Growth and Boiling Heat Transfer on a Microfinned Surface, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39, 52–57.
- Lee, W., Son, G. ve Yoon, H.Y., 2012b. Direct Numerical Simulation of Flow Boiling in a Finned Microchannel, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39, 9, 1460–1466.
- Lee, W. ve Son, G., 2014. Numerical Simulation of Bubble Growth and Heat Transfer During Flow Boiling in a Surface-Modified Microchannel, Heat Transfer Engineering, 35, 5, 501-507.
- Li, J. ve Wang, B., 2003. Size Effect on Two-Phase Flow Regime for Condensation in Micro/Mini Tubes, Heat Transfer – Asian Research, 32, 65–71.
- Liu D., Lee P.S. ve Garimella S.V., 2005. Prediction of the Onset of Nucleate Boiling in Microchannel Flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 25-26, 5134–5149.

- Liu, D. ve Garimella, S.V., 2007. Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels, Journal of Heat Transfer, 129, 1321-1332.
- Liu D., Weng X. ve 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.
- Li, W. ve 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.
- Liu, T.L., Fu, B.R. ve Pan, C., 2012. Boiling Two-Phase Flow and Efficiency of Co- and Counter-Current Microchannel Heat Exchangers with Gas Heating, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 21-22, 6130–6141.
- Liu, Y., Fletcher, D.F. ve Haynes, B.S., 2013. On the Importance of Upstream Compressibility in Microchannel Boiling Heat Transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, 58, 1-2, 503–512.
- Lockhart R.W. ve Martinelli R.C., 1949. Proposed Correlation of Data For Isothermal, Two-Phase, Two Component Flow in Pipes, Chemical Engineering Progress, 45, 1, 39-48.
- Mahmoud, M.M., Karayiannis, T.G. ve 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.
- Magnini, M., Pulvirenti, B. ve Thome, J.R., 2013a. Numerical Investigation of the Influence of Leading and Sequential Bubbles on Slug Flow Boiling within a Microchannel, International Journal of Thermal Sciences, 71, 36-52.
- Magnini, M., Pulvirenti, B. ve Thome J.R., 2013b. Numerical Investigation of Hydrodynamics and Heat Transfer of Elongated Bubbles During Flow Boiling in a Microchannel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 59, 451–471.
- Maulbetsch, J.S. ve Griffith, P., 1965. A Study of System-Induced Instabilities in Forced convection Flows with Subcooled Boiling, MIT Engineering Projects Lab Report No. 5382-35.
- Megahed, A. ve Hassan, I., 2010. Analytical Modeling of Annular Flow Boiling Heat Transfer in Mini- and Microchannel Heat Sinks, Journal of Heat Transfer, 132, 041012-1- 041012-11.
- 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. ve Ahah, R.K., 2000. Fluid Flow and Heat Transfer at Micro- and Meso-Scales with Application to Heat Exchanger Design. Appl. Mech. Rev., 53, 175–193.
- Mirmanto, M., 2014. Heat Transfer Coefficient Calculated Using a Linear Pressure Gradient Assumption and Measurement for Flow Boiling in Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 79, 269–278.
- Morshed, A.K.M.M., Paul, T.C. ve Khan, J.A., 2013. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticle Deposition on Flow Boiling Performance of Water in a Microchannel, Experimental Thermal and Fluid Science, 47, 6-13.
- Mosdorf, R., Cheng, P., Wu, H. ve Shoji, M., 2005. Non-Linear Analyses Of Flow Boiling in Microchannels, International Journal Of Heat And Mass Transfer, 48, 21-22, 4667–4683.
- Muller-Steinhagen, H. ve Heck, K., 1986. A Simple Friction Pressure Drop Correlation for Two-Phase Flow in Pipes, Proceedings of Chemical Engineering, 20, 297–308.
- Mukherjee, A. ve Kandlikar, S.G., 2005. Numerical Simulation of Growth of a Vapor Bubble During Flow Boiling of Water in a Microchannel, Microfluid Nanofluid, 1, 137–145.
- Mukherjee, A., Kandlikar, S.G. ve Edel, Z.J., 2011. Numerical Study of Bubble Growth and Wall Heat Transfer During Flow Boiling in a Microchannel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 54, 15-16, 3702–3718.
- Nascimento, F.J., Leão, H.L.S.L. ve 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.
- Ong, C.L. ve Thome, J.R., 2011a. Macro-To-Microchannel Transition in Two-Phase Flow: Part 1 -Two-Phase Flow Patterns and Film Thickness Measurements, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 1, 37–47.
- Ong, C.L. ve Thome, J.R., 2011b. Macro-To-Microchannel Transition in Two-Phase Flow: Part 2 - Flow Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 6, 873–886.
- Ozawa, M., Umekawa, H., Mishima, K., Hibiki, T. ve Saito, Y., 2001. CHF in Oscillatory Flow Boiling Channels, Inst. Chem. Eng. Symp. Ser., 79, 4, 389–401.
- Park, C.Y., Jang Y., Kim B. ve Kim Y., 2012. Flow Boiling Heat Transfer Coefficients and Pressure Drop Of FC-72 in Microchannels, International Journal of Multiphase Flow, 39, 45-54.
- Prajapati, Y.K., Pathak, M. ve Khan, M.K., 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.



- Peng X.F., Hu, H.Y. ve Wang, B.X., 1998. Boiling Nucleation During Liquid Flow in Microchannels, J. Heat Mass Transfer, 41, 1, 101-106.
- Ritchey, S.N., Weibel, J.A. ve 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.
- Qian, L., Ding, S. ve Qiu, S., 2014. Research on Two-Phase Flow Instability in Parallel Rectangular Channels, Annals of Nuclear Energy, 65, 47–59.
- Qu, W. ve Mudawar, I., 2003a. 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. ve Mudawar I., 2003b. Flow Boiling Heat Transfer in Two-Phase Micro-Channel Heat Sinks-I. Experimental Investigation and Assessment of Correlation Methods, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 15, 2755–2771.
- Qu, W. ve Mudawar, I., 2004. Transport Phenomena in Two-Phase Micro-Channel Heat Sinks, Journal of Electronic Packaging, 126, 213-224.
- Qu, W., Mudawar, I., Lee, S.Y. ve Wereley, S.T., 2006. Experimental and Computational Investigation of Flow Development and Pressure Drop in a Rectangular Micro-channel, Journal of Electronic Packaging, 128, 1-9.
- Qu, W. ve Siu-Ho, A., 2009. Experimental Study of Saturated Flow Boiling Heat Transfer in An Array of Staggered Micro-Pin-Fins, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 7-8, 1853–1863.
- Shah, R.K. ve London, A.L., 1978. Laminar Flow Forced Convection in Ducts: a Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data, Supl. 1, Academic Press, New York.
- Saraceno, L., Celata, G.P., Furrer, M., Mariani, A. ve Zummo, G., 2012. Flow Boiling Heat Transfer of Refrigerant FC-72 in Microchannels, International Journal of Thermal Sciences, 53, 35-41.
- Singh, S.G., Kulkarni, A., Duttagupta, S.P., Puranik, B., P. ve Agrawal, A., 2008. Impact of Aspect Ratio on Flow Boiling of Water in Rectangular Microchannels Experimental Thermal and Fluid Science, 33,1, 153–160.
- Soupremanien, U., Person, S. L., Favre-Marinet, M. ve Bultel, Y., 2011. Influence of the Aspect Ratio on Boiling Flows in Rectangular Mini Channels, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 5, 797–809.
- Steinke M.E. ve Kandlikar S.G., 2004. An Experimental Investigation of Flow Boiling Characteristics of Water in Parallel Microchannels, Transactions of the ASME, 126, 518-526.

- Stenning, A.H., 1964. Instabilities in the Flow of Boiling Liquid, Journal of basic engineering, 86, 2, 213-217.
- Stenning, A.H. ve Veziroğlu, T.N., 1965. Flow oscillation modes in forced convection boiling, in: Proceedings of the Heat Transfer and Fluid Mechanics, Institute, Stanford Univ. Press, 301–316.
- Sun, Y., Zhang, L., Xu, H. ve Zhong X., 2011. Subcooled Flow Boiling Heat Transfer From Microporous Surfaces in a Small Channel, International Journal of Thermal Sciences, 50, 881-889.
- Szczukiewicz, S., Magnini, M. ve Thome J.R., 2014. Proposed Models, Ongoing Experiments and Latest Numerical Simulations of Microchannel Two-Phase Flow Boiling, International Journal of Multiphase Flow, 59, 84-101.
- Tadrist L., 2007. Review on Two-Phase Flow Instabilities in Narrow Spaces, International Journal of Heat and Fluid Flow, 28,1, 54-62.
- 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., 2006. State-of-the-Art Overview of Boiling and Two-Phase Flows in Microchannels, Heat Transfer Engineering, 27, 9, 4-19.
- Tibirică, C.B., 2011. A Theoretical and Experimental Study on Flow Boiling Heat Transfer and Critical Heat flux in Microchannels, Doktora Tezi, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), São Paulo Üniversitesi, São Carlos, Brazilya.
- Tibirica, C.B. ve Ribatski, G., 2013. Flow Boiling in Micro-Scale Channels A Synthesized Literature Review, Int. J. Refrigeration, 36, 2, 301-324.
- Tibirică, C.B. ve Ribatski, G., 2014. Flow Patterns and Bubble Departure Fundamental Characteristics During Flow Boiling in Microscale Channels, Experimental Thermal and Fluid Science, 59, 152-165.
- Tibirică, C.B., Czelusniak, L.E. ve Ribatski, G., 2015. Critical Heat Flux in a 0.38mm Microchannel and Actions for Suppression of Flow Boiling Instabilities, Experimental Thermal and Fluid Science, 67, 48-56.
- Thome, J.R. ve Consolini, L., 2010. Mechanisms of Boiling in Micro-Channels: Critical Assessment, Heat Transfer Engineering, 31, 4, 288–297.
- Thurston, R.S., Rogers, J.D. ve Skoglund, V.J., 1967. Pressure Oscillations Induced by Forced Convection Heating of Dense Hydrogen. Adv. Cryogen. Eng., 12, 8, 438-451.
- Tong, L.S. ve Tang, Y.S., 1997. Boiling Heat Transfer and Two Phase Flow, Second Edition, Taylor and Francis, Washington.

- Tran, T.N., Chyub, M.C., Wambsganssa, M.W. ve France, D.M., 2000. Two-Phase Pressure Drop of Refrigerants During Flow Boiling in Small Channels: An Experimental Investigation and Correlation Development, International Journal of Multiphase Flow, 26, 1739-1754.
- Tuo, H. ve Hrnjak, P., 2013. Periodical Reverse Flow and Boiling Fluctuations in a Microchannel Evaporator of an Air-Conditioning System, International Journal of Refrigeration, 36, 4, 1263–1275.
- Tuo, H. ve Hrnjak, P., 2014. Visualization and Measurement of Periodic Reverse Flow and Boiling Fluctuations in a Microchannel Evaporator of an Air-Conditioning System, International Journal of Heat and Mass Transfer, 71, 639–652.
- Vandervort, C.L., Bergles, A.E. ve Jensen, M.K., 1992. Heat Transfer Mechanisms in very High Heat Flux Subcooled Boiling, ASME Fundamentals Subcooled Flow Boiling, 1–9.
- Wang, B.-X. ve Peng, X.F., 1994. Experimental Investigation of Liquid Forced-Convection Heat Transfer Through Microchannels, Int. J. Heat Mass Transfer, 37, 73–82.
- Wang, Q., Chen X. J., Kakaç, S. ve Ding, Y., 1996. Boiling Onset Oscillation: A New Type of Dynamic Instability in a Forced-Convection Upflow Boiling System, Int. J. Heat and Fluid Flow, 17, 418-423.
- Wang, G. ve Cheng P., 2008. An Experimental Study of Flow Boiling Instability in a Single Microchannel, International Communications in Heat and Mass Transfer, 35, 10, 1229–1234.
- Wang, G., Cheng, P. ve 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. ve Safiane, K., 2012. Effects of Heat Flux, Vapour Quality, Channel Hydraulic Diameter on Flow Boiling Heat Transfer in Variable Aspect Ratio Micro-Channels Using Transparent Heating, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 9-10, 2235–2243.
- Wang, Y. ve Wang, Z.G, 2014. An Overview of Liquid-vapor Phase Change, Flow and Heat Transfer in Mini- And Micro-Channels, International Journal of Thermal Sciences, 86, 227-245.
- Wang, Y. ve 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.
- Wang, Y., Sefiane, K., Wanga, Z.G. ve 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.

- Warrier, G.R., Dhir, V.K. ve Momoda, L.A., 2002. Heat Transfer and Pressure Drop in Narrow Rectangular Channel, Exp. Therm. Fluid Sci., 26, 1, 53–64.
- Wongwises, S., Disawas, S., Kaewon, J. ve Onurai, C., 2000. Two-Phase Evaporative Heat Transfer Coefficients of Refrigerant HFC-134a Under Forced Flow Conditions in A Small Horizontal Tube, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 27, 1, 35-48.
- Woorim, L. ve Gihun, S., 2014. Numerical Simulation of Bubble Growth and Heat Transfer During Flow Boiling in a Surface-Modified Microchannel, Heat Transfer Engineering, 35, 5, 501-507.
- Wu, H.Y. ve Cheng, P., 2003. Visualization and Measurements of Periodic Boiling in Silicon Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 14, 2603–2614.
- Wu, H.Y. ve Cheng, P., 2004. Boiling Instability in Parallel Silicon Microchannels at Different Heat Flux, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, 3631–364.
- Wu, Z., Li, W. ve Ye, S., 2011. Correlations for Saturated Critical Heat Flux in Microchannels, Int. J. Heat Mass Transf., 54, 379–389.
- Xu, J., Zhou, J. ve Gan, Y., 2005. Static and Dynamic Flow Instability of a Paralel Microchannel Heat Sink at High Heat Fluxes, Energy Conversion and Management, 46, 2, 313–334.
- Yadigaroğlu, G. ve Bergles, A.E., 1969. An Experimental And Theoretical Study Of Density-Wave Oscillations in Two-Phase Flow, Engineering Projects Laboratory Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, 02139, USA.
- Yadigaroğlu, G. ve Bergles, A.E., 1972. Fundamental and Higher-Mode Density-Wave Oscillations in Two-Phase Flow, Journal of Heat Transfer, 94, 2, 189-195.
- Yang, F., Dai, X., Kuo, C.-J., Peles, Y. Khan, J. ve Li, C., 2013. Enhanced Flow Boiling in Microchannels by Self-Sustained High Frequency Two-Phase Oscillations, International Journal of Heat and Mass Transfer, 58, 1-2, 402–412.
- Yang, F., Dai X., Peles, Y. Cheng, P., Khan, J. ve Li, C., 2014a. Flow Boiling Phenomena in a Single Annular Flow Regime in Microchannels (I): Characterization Of Flow Boiling Heat Transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, 68, 703–715.
- Yang, F., Dai X., Peles, Y. Cheng, P., Khan, J. ve Li, C., 2014b. 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.
- Yarin, Y., P., Mosyak, A. ve Hestroni, G., 2009. Fluid Flow Heat Transfer and Boiling in Micro Channels, Springer, Germany.

- Yen, T.H., Kasagi, N. ve Suzuki, Y. 2003. Forced Convective Boiling Heat Transfer in Microtubes at Low Mass and Heat Fluxes, Int. J. Multiph. Flow, 29, 1771-1792.
- Yin, L., Jia, L., Guan, P. ve Liu D., 2014. Experimental Investigation on Bubble Confinement and Elongation in Microchannel Flow Boiling, Experimental Thermal and Fluid Science, 54, 290-296.
- Yu, W., France, D.M., Wambsganss, M.W. ve Hull, J.R. 2002. Two phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube, Int. J. Multiphase Flow, 28, 6, 927–941.
- Zhang, T., Tong, T., Chang, J.Y., Peles, Y., Prasher, R., Jensen, M. K., Wenf, J.T. ve Phelan, P., 2009. Ledinegg Instability In Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 25-26, 5661–5674.
- Zhang, T.J., Peles, Y., Wena, J.T., Tong, T., Chang, Je-Y., Prasher, R. ve Jensen, M.K, 2010. Analysis and Active Control of Pressure-Drop Flow Instabilities in Boiling Microchannel Systems, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 11-12, 2347–2360.
- Zhuan, R. ve 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.
- Zhou, X., Qiao, W., Zhang, X., Liu, Z. ve Gao, Dayong., 2015. Physical Modeling of Flow Boiling in Microchannels and its Induced Vitrification of Biomaterials, International Journal of Heat and Mass Transfer, 83, 659–664.
- URL-1, [http://eed.gsfc.nasa.gov/562/SA\\_MEMs.htm](http://eed.gsfc.nasa.gov/562/SA_MEMs.htm). Parts, Packaging, and Assembly Technologies Office. 20 Ekim 2012.
- URL-2, <http://nextgenlog.blogspot.com/2009/03/mems-market-slowed-by-auto-makers-woes.html>. Next-Generation Electronics and Related Technology News. 20 Ekim 2012.
- URL-3, [http://multimedia.3m.com/mws/mediawebsserver?mwsId=SSSSSuH8gc7nZxtUM8tZl8\\_9vUqe17zHvTSevTSeSSSSSS](http://multimedia.3m.com/mws/mediawebsserver?mwsId=SSSSSuH8gc7nZxtUM8tZl8_9vUqe17zHvTSevTSeSSSSSS), 6 Ağustos, 2014.

## ÖZGEÇMİŞ

Burak MARKAL, 1985 yılında Trabzon'da doğdu. 2003 yılında Trabzon Tevfik Serdar Anadolu Lisesi'nden mezun olup, aynı yıl KTÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2007 yılında bölüm ikincisi ve fakülte üçüncüsü olarak KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olup, aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2010 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayıp aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. İngilizce bilmekte olup, evli ve bir çocuk babasıdır.

Tezden üretilen ve SCI kapsamındaki dergilerde yayınlanan makaleler:

Markal, B., Aydın, O., Avci, M., 2016. Effect of aspect ratio on saturated flow boiling in microchannels. International Journal of Heat and Mass Transfer, 93, 130-143.

Markal, B., Aydın, O., Avci, M., 2016. An experimental investigation of saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in square microchannels. International Journal of Refrigeration, doi:10.1016/j.ijrefrig.2015.12.013.