



**T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MİKRO PİM TİPİ KANATÇIKLARA SAHİP ISI ALICILARDA
KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Beyzanur KUL

**Danışman
Doç. Dr. Burak MARKAL**

**RİZE
2022**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Burak MARKAL danışmanlığında, Beyzanur KUL tarafından hazırlanan *Mikro Pim Tipi Kanatçıklara Sahip Isı Alıcılarda Kaynamalı Akışın Deneysel İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 05/09/2022 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı, Adı Soyadı

İmza

Başkan :

Prof. Dr. Mete AVCI

Üye :

Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI

Üye :

Doç. Dr. Burak MARKAL

ETİK BEYAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Mikro Pim Tipi Kanatçıklara Sahip Isı Alıcılarda Kaynamalı Akışın Deneysel İncelenmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

05/09/2022

Beyzanur KUL

ÖN SÖZ

Yüksek ısı akılarının ısıtma yüzeyleri üzerinden uzaklaştırılmasında en etkili ve yüksek potansiyele sahip yöntemlerden birisi, mikro akış pasajlarında kaynamalı akışın olduğu ısı alıcı sistemlerin kullanımıdır. Bu sebeple, mikrokanaallarda kaynamalı akış yoğun araştırma ilgisinin olduğu ileri ısı kontrol yöntemleri arasında yer almaktadır.

Bu tezde, kabarcık dinamiğini hedef alarak tasarlanan geometrik konfigürasyonlara sahip mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcılarda, farklı ısı yükler ve kütle akıları için kaynamalı akış deneysel olarak incelenmiştir. Karşılaştırmalı analiz sunabilmek için konvansiyonel kanal tasarımları da (paralel mikro kanallı ısı alıcı ve üniform mikro pim kanatçık dağılımına sahip ısı alıcı) deney matrisine dahil edilmiştir. Akış görüntüleri üzerinden fiziksel mekanizma analiz edilmiş ve kaynamalı akış karakteristiklerine yönelik detaylı irdelemeler sunulmuştur.

Tez çalışmam sürecinde, değerli bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren, çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan saygı değer danışman hocam Sayın Doç. Dr. Burak MARKAL'a, fikirleri ile çalışmamıza katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Mete Avcı'ya, hayatımın her anında koşulsuzca beni destekleyen değerli aileme ve yaptığım çalışma boyunca bana yardımcı olan yakın arkadaşlarıma en içten ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu Yüksek Lisans Tezi, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 219M142 nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Beyzanur KUL
2022 / RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
1.1. Kaynama	3
1.2. Kaynamalı Akışta Isı Transfer Mekanizmaları ve Akış Desenleri	4
1.3. Kaynama Kararsızlıklarının Detayları ve Önlenme Süreci.....	8
1.3.1. Hızlı Kabarcık Büyüme Kararsızlığı.....	9
1.3.2. Paralel Kanal Kararsızlığı	9
1.3.3. Sıkıştırılabilir Hacim Kararsızlığı	9
1.3.4. Ledinegg Kararsızlığı (Akış Gezintisi)	10
1.4. Akış Kararsızlıklarının Önlenmesine Yönelik Uygulanan Teknikler.....	10
1.4.1. Geometri Bazlı Modifikasyonlar	10
1.4.2. Yüzey Modifikasyonları	10
1.4.3. İş Akışkanının Rolü	11
1.5. Literatür Özeti	11
1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	22
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Deney Düzenegi	24
2.2. Isı Alıcılar.....	29
2.3. Deneylerin Gerçekleştirilme Aşamaları	31
2.4. Hesaplama Prosedürü.....	31

2.4.1. Isı Kaybı Kalibrasyonu	31
2.4.2. Isı Transferi	33
2.5. Bulgular.....	37
2.5.1. Tekrarlanabilirlik Deneyleri.....	37
2.5.2. Kaynama Eğrileri	38
2.5.3. Doymuş Kaynamalı Akış Koşullarında Isı Transfer Katsayısı	40
2.5.4. Doymuş Kaynamalı Akış Koşullarında Basınç Düşümü	42
2.5.5. Kaynama Kararsızlıkları	44
2.5.6. Akış Görüntüleri	48
3. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	74
3.1. Tartışma.....	74
3.1.1. Tekrarlanabilirlik Deneyleri.....	74
3.1.2. Kaynama Eğrileri	74
3.1.3. Doymuş Kaynamalı Akış Koşullarında Isı Transfer Katsayısı	76
3.1.4. Doymuş Kaynamalı Akış Koşullarında Toplam Basınç Düşümü	84
3.1.5. Kaynama Kararsızlıkları	86
3.2. Sonuç.....	91
3.3. Öneriler	93
KAYNAKÇA.....	94

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. Burak MARKAL

Hazırlayan : Beyzanur KUL

Yıl : 2022

Sayfa Sayısı : 98

ÖZET

MİKRO PİM TİPİ KANATÇIKLARA SAHİP ISI ALICILARDA KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ

Bu tez çalışmasında, farklı geometrik düzenlemelere sahip mikrokanallı ısı alıcılarda, deiyonize su kullanılarak, kaynamalı akış deneyleri yapılmış ve geometrik özelliklerin etkileri ile ısı ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Isı alıcılar, üçü özgün geometriye ve ikisi karşılaştırmalı analiz için konvansiyonel geometriye sahip olmak üzere beş adettir. Farklı kütle ve ısı akımlarında çalışılmıştır. Mikroskopla bütünleşik yüksek hızlı kamera kullanılarak saniyede 1000 görüntü alınmıştır. Özgün geometrili ısı alıcılar kabarcık dinamiği dikkate alınarak tasarlanmış olup, kare kesitli mikro pim tipi kanatçıklara sahiptir ve kanatçık sayısı ana akış doğrultusunda azalan yapıdadır. Aralarındaki farklılık ise; düzgün veya kaydırılmış sıralı kanatçık yerleşimi, yapay kabarcıklaşma oyuklarının olup olmaması ve akış doğrultusundaki kesit genişleme miktarı ile ilişkilidir. Özgün geometrilerin tümü konvansiyonel geometrilere kıyasla ısı transferini iyileştirmiştir. En iyi ısı performans ise kare kesitli, düzgün sıralı mikro pim tipi kanatçıklardan oluşan; kanatçık sayısı kanal çıkışına doğru azalan ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip ısı alıcıda elde edilmiştir. Akış görüntüleri aracılığıyla, akışın fiziksel mekanizması irdelenmiş ve önemli akış karakteristikleri literatüre sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Akış görüntüleme, Kaynamalı akış, Mikrokanal, Mikro pim tipi kanatçık, Kademeli genişleme

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Energy System Engineering

Thesis Type : Master Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Burak MARKAL

Author : Beyzanur KUL

Year : 2022

Pages : 98

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW BOILING IN HEAT SINKS WITH MICRO PIN FINS

In this thesis, by using deionized water, flow boiling experiments were conducted in microchannel heat sinks having different geometrical configurations, and effects of geometrical characteristics as well as heat and flow characteristics were investigated. There are five heat sinks; three of them have novel geometry, and two of them have conventional geometry for comparative analysis. Experiments were conducted at different mass and heat fluxes. 1000 images per second were taken using a high-speed camera integrated with the microscope. The heat sinks having novel geometry were designed depending on bubble dynamics; and they have square micro pin fins, and the number of fins decreases in the main flow direction. The difference between them are related to inline or staggered layout of fins, existence, or non-existence of artificial nucleation sites, and enlargement level of cross section in the flow direction. All the novel heat sinks enhanced heat transfer compared to conventional counterparts. The best thermal performance is obtained for the heat sink having square cross-section, inline micro pin fins of which the number decreases towards channel outlet, and having artificial nucleation sites. Via the flow images, the physical mechanism of the flow was scrutinized, and important flow characteristics were introduced to the literature.

Keywords: Flow visualization, Flow boiling, Microchannel, Micro pin fin, Gradually expanding

KISALTMALAR

A_f	: Tek bir kanatçığın ıslak yüzey alanı [m^2]
A_{fc}	: Tek bir kanatçığın kesit alanını [m^2]
A_{uf}	: Kanatçıksız yüzey alanı [m^2]
A_p	: Isıtıcı bloğun üst platform alanı [m^2]
A_t	: Toplam ısı transfer alanı [m^2]
H_f	: Kanatçığın yüksekliği [m^2]
h_{fg}	: Buharlaştırma gizli ısısını [$kJ\ kg^{-1}$]
h_{tp}	: Yerel ısı transfer katsayısı [$kW\ m^{-2}\ K^{-1}$]
k	: Bakırın ısı iletim katsayısı [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$]
L	: Isı alıcısının toplam uzunluğu [m]
m_f	: Kanatçık parametresi
N	: Toplam kanatçık sayısı
P_i	: Giriş basıncı [Pa]
P_f	: Tek bir kanatçığın kesit çevresi [m]
q_{ap}	: Uygulanan ısı gücü [W]
q_{loss}	: Isı kaybı [W]
T_f	: Akışkan sıcaklığı [K]
T_w	: Duvar sıcaklığı [K]
T_{st}	: Yedinci termoelemanından okunan sıcaklık [K]
t	: Isı alıcısının kalınlığı [m]
x_e	: Yerel kuruluk derecesi
W	: Isı alıcısının toplam genişliği [m]
$\dot{m}$	: Akışkanın kütleli debisi [$kg\ s^{-1}$]
$\dot{V}$	: Hacimsel debi [$ml\ dk^{-1}$]
ΔP	: Basınç düşümü [Pa]
ΔT_{sat}	: Kızma farkı [K]

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Deneysel çalışmaların özeti	20
Tablo 2. Deneysel belirsizlik düzeyleri.....	36



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Kaynamada ısı transferinin taşınım türleri arasındaki potansiyeli	4
Şekil 2. Mikro ve makro ölçekleri kapsayan kaynama eğrileri (Mao vd., 2021)	5
Şekil 3. Genel hatlarıyla iki faz akış desenleri (Kim ve Mudawar, 2013)	8
Şekil 4. Deney düzeneğine ait şematik çizim	26
Şekil 5. Deney düzeneğine ait fotoğraf	27
Şekil 6. Test bölgesinin detaylı görünümü; kesit görünümü (a) ve montaj görünümü (b)	28
Şekil 7. Isı alıcıların üç boyutlu izometrik görünümleri: PW-MCHS (a), CT-MFHS (b), GD-MFHS (c), DN-MFHS (d), GS-MFHS (e)	30
Şekil 8. Tüm ısı alıcılarına ait ısı kaybı grafikleri	32
Şekil 9. Tekrarlanabilirlik deneylerine ilişkin grafikler	38
Şekil 10. Farklı kütle akıları için kaynama eğrileri	39
Şekil 11. Farklı kütle akıları için iki faz ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi.....	40
Şekil 12. Farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi.....	42
Şekil 13. Farklı kütle akıları için giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi	45
Şekil 14. Farklı kütle akıları için giriş basıncının zamana bağlı değişimi.....	47
Şekil 15. $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri	48
Şekil 16. $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri	49
Şekil 17. $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için GD-MFHS'nin akış görüntüleri.....	50
Şekil 18. $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri.....	50
Şekil 19. $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri	51
Şekil 20. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri	52
Şekil 21. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri	52
Şekil 22. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri.....	53
Şekil 23. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri.....	54
Şekil 24. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri	54
Şekil 25. $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri	55

Şekil 26.	$174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri	56
Şekil 27.	$174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri	56
Şekil 28.	$174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri	57
Şekil 29.	$174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri	58
Şekil 30.	$212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri	59
Şekil 31.	$212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri	59
Şekil 32.	$212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri	60
Şekil 33.	$212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri	61
Şekil 34.	$212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri	62
Şekil 35.	$250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri	63
Şekil 36.	$250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MCHS'nin akış görüntüleri	64
Şekil 37.	$250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri	64
Şekil 38.	$250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri	65
Şekil 39.	$250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri	66
Şekil 40.	$287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri	67
Şekil 41.	$287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri	69
Şekil 42.	$287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri	70
Şekil 43.	$287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri	71
Şekil 44.	$287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri	72

GİRİŞ

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte işlem hızları ve fonksiyonelliği artan, boyutları ise küçülen cihazlar geliştirilmektedir. Artan kapasiteye karşı, küçülen boyutlar, aşırı ısınma olarak da adlandırılan yüksek ısı akılarının açığa çıkması problemini beraberinde getirmektedir. Öyle ki, Karayiannis ve Mahmoud (2017) tarafından belirtildiği üzere, beş yıl içerisinde, bilgisayar çiplerindeki atık ısı akılarının 4500 kW m^{-2} değerine ulaşması beklenmektedir. Yüksek hızlı işlemcili çiplere sahip elektronik sistemler, gelişmiş lazer ve radar sistemleri, tıbbi cihazlar, uzay elektroniği bileşenleri, optik cihazlar gibi birçok gelişmiş cihazda, söz konusu problem potansiyel bir risk olarak ortaya çıkmaktadır. İlgili sistemler için optimum veya güvenilir çalışma koşullarının oluşabilmesi, ancak sistem bileşenlerindeki sıcaklık düzeyi ve dağılımının uygun aralıklarda tutulması ile mümkündür. Bu kapsamda, ileri ısı kontrol tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yüksek ısı akılarının ısıtma yüzeyleri üzerinden süpürülmesinde en etkili ve yüksek potansiyele sahip yöntemlerden birisi, mikro akış pasajlarında kaynamalı akışın olduğu ısı alıcı sistemlerin kullanımıdır. Bu sebeple, mikrokanallarda kaynamalı akış yoğun araştırma ilgisinin olduğu ileri ısı kontrol yöntemleri arasında yer almaktadır. Literatürde (Prajapati ve Bhandari, 2017; Deng vd., 2021) vurgulandığı gibi, mikrokanallarda kaynamalı akışı diğer ısı kontrol tekniklerinden ayıran özellikler; ısı aktarım prosesinde gizli ısıdan faydalanılması, yüksek kompaktlık değeri, nispeten üniform yüzey sıcaklığı sağlama potansiyeli ve düşük debili akışlarda çalışma (az miktarda soğutucu akışkan kullanma) olgularını bir arada barındırma olarak ifade edilebilir. Buna karşın, sınırlı kesit ve/veya hacim sunan mikro ölçekli akış pasajları, doğrudan kabarcık dinamiğini etkilemekte ve böylece ısı transferi, akış ve geometri arasında kompleks bir ilişki oluşmaktadır. Kabarcıkların kanallar içinde sınırlanma potansiyeli, iki farklı karakteristikteki fazın (sıvı ve buharın) sürekli ve değişken düzeyli etkileşimi ve çalışma koşullarının kabarcık sınırlanması ve/veya dinamiği üzerindeki etkileri, doğrudan kaynamalı akış kararsızlıkları ve dolayısıyla sistem performansı ile ilişkilidir. Mikrokanallarda kaynamalı akış ile ilgili olarak yukarıda tanımlanan tüm avantajlardan (potansiyellerden) maksimum düzeyde faydalanabilmek için kabarcık dinamiğini ön planda tutan geometrik düzenlemelere

sahip ısı alıcıların tasarlanması ve akış fiziğinin karmaşık yapısının detaylı incelenmesi gerekmektedir. Al-Zaidi vd. (2017) tarafından da belirtildiği üzere, karmaşık ve henüz tam olarak çözülememiş geometri-ısı-akış bazlı etkileşimler, konunun popüleritesini ve güncel araştırma ilgisini artırmaktadır.

Bu tezde, kabarcık dinamiğini hedef alarak tasarlanan geometrik konfigürasyonlara sahip mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcılarda, farklı ısı yükler ve kütle akıları için kaynamalı akış deneysel olarak incelenmiştir. Karşılaştırmalı analiz sunabilmek için konvansiyonel kanal tasarımları da (paralel mikro kanallı ısı alıcı ve üniform mikro pim kanatçık dağılımına sahip ısı alıcı) deney matrisine dahil edilmiştir. Akış görüntüleri üzerinden fiziksel mekanizma analiz edilmiş ve kaynamalı akış karakteristiklerine yönelik detaylı irdelemeler sunulmuştur.

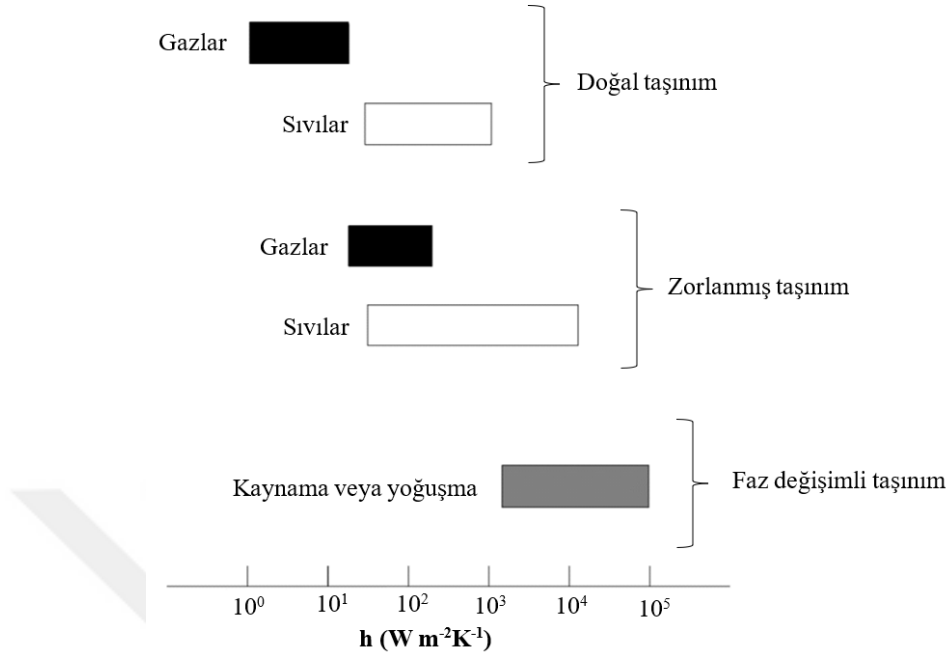
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Kaynama

Bir akışkanın sıvı fazdan buhar fazına geçiş süreci olarak basit bir şekilde ifade edilebilen kaynama, daha açık bir şekilde, verilen bir basınç değeri için, sıvının, doyma sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta bulunan bir yüzeyle temas etmesi halinde katı-sıvı arayüzeyinde gerçekleşen ve buhar kabarcıklarının oluşumuyla karakterize edilen bir olgudur (Çengel ve Ghajar, 2015). Kaynama, taşınım ile ısı transferi türleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle, kaynamada ısı transferi, ısı akısı olarak, en temel formda, Newton'un soğuma yasası üzerinden aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$q'' = h(T_s - T_{sat}) \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte, h , ısı transfer katsayısını ifade etmektedir. Kaynama, bir sıvı, sıvının temas ettiği katı bir yüzey ve doyma koşulunun gerçekleşmesi süreçlerini barındırmaktadır. Bu nedenle, Eşitlik (1)'deki sıcaklık farkı ifadesi yüzey sıcaklığı (T_s) ve verilen basınç değerine karşılık gelecek şekilde akışkanın doyma sıcaklığını (T_{sat}) içermektedir. Ayrıca, ilgili sıcaklık farkı değeri kaynama süreçlerini karakterize eden önemli bir parametre olup, duvar kızma farkı veya sıcaklık fazlalığı şeklinde tanımlanmaktadır. Diğer taşınım süreçlerine kıyasla, kaynamada ısı transferinin etkinliği, taşınım katsayılarının potansiyel nicel aralıkları üzerinden Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Kaynamada ısı transferinin taşınım türleri arasındaki potansiyeli

Kaynama, havuz kaynaması ve kaynamalı akış (zorlanmış taşınımlı kaynama) olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. Havuz kaynaması, akışkanın kitlesel hareket gerçekleştiremeyeceği şekilde, bir kap içerisinde iken kaynaması sürecini ifade etmektedir. Kitlesel hareketin olmaması nedeniyle, havuz kaynamasında doğal taşınım süreci ve dolayısıyla kaldırma kuvvetlerinin etkin rol oynadığı belirtilmelidir. Kaynamalı akış ise bir akışkanın kanal içerisindeki kitlesel hareketi veya akışı esnasında gerçekleşen kaynama süreciyle ilgilidir. Kaynamanın bu formunda zorlanmış taşınım etkileri ön plandadır. Bu tez çalışmasında, akış pasajları içerisinde gerçekleşen kaynamalı akış incelenmiştir. Bu nedenle, kaynamanın bu türü üzerinde durulacaktır.

1.2. Kaynamalı Akışta Isı Transfer Mekanizmaları ve Akış Desenleri

Kaynamalı akışı ısı transfer mekanizmalarıyla birlikte tanımlayan ve karakterize eden en temel araçlardan biri kaynama eğrisidir. Kaynama eğrileri; ısı akısı ile kızma farkı ilişkisini yansıtmakta ve eğri-eğilimi açısından incelendiğinde ısı transfer mekanizmaları hakkında bilgi sunmaktadır. Şekil 2’de, Mao vd. (2021) tarafından tanımlanan ve genel hatlarıyla mikro ve makro ölçekleri kapsayan kaynama

Şekil 2’den görüldüğü gibi, sıvının tek fazlı halinden başlayarak, kaynamanın gerçekleşmesi ve devamında ısı akısının artarak kaynama sürecinin son bölümlerinin de yer aldığı toplamda beş farklı bölge tanımlanabilir. Aşağıda maddeler halinde verilen bu bölgeler, devamında detaylarıyla birlikte sunulmuştur.

-

5

Kaynama eğrilerinde, her ne kadar ısı akısı düşey ekseninde yer alsada bu durumun, pratikte, kızma farkının kontrol edilebilen bir parametre olduğu veya bir başka ifade ile kontrollü olarak değiştirilen kızma farkı ile ısı akısında değişim gerçekleştiği anlamına gelmediği belirtilmelidir. Pratikte kontrol edilen parametre ısı akısı olup, uygulanan ısı akısı değerlerine göre kızma farkı değerleri değişmektedir. Şekil 2’de olduğu gibi, literatürde konvansiyonel olarak sunulan benzer eğriler, standartlaşmış bir gösterimin devam ettirilmesinden ibarettir. Bu hatırlatmayla birlikte, Şekil 2 üzerinden kaynama süreci detaylarıyla birlikte aşağıda açıklanmıştır.

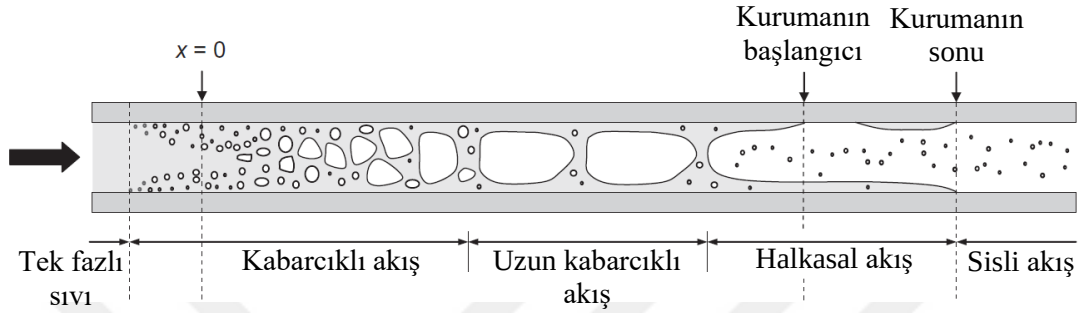
Şekil 2’den görüldüğü üzere, ilk bölüm tek fazlı sıvı taşınım bölgesidir. Bu bölge henüz kaynamanın gerçekleşmediği bölgedir. Artan ısı akısıyla birlikte, sıvının temas ettiği yüzeyin sıcaklığı akışkanın ilgili basınca karşılık gelen doyma sıcaklığını geçer ve yüzeyle temas eden akışkanda kabarcık oluşumu başlar. İlk kabarcığın oluştuğu koşul kabarcıklı kaynamanın başlangıcı (ONB) olarak adlandırılır. Yüzeyden görece uzak bölgelerde sıvı sıcaklığı henüz doyma sıcaklığına erişmemiştir. Bu nedenle, bu bölge aşırı soğutulmuş kaynama bölgesi olarak adlandırılır. Kabarcıklı kaynamanın başladığı koşullarda, kabarcıklar hızlıca sönmeye eğilimindedir. Ancak, literatürde de (Yadigaroglu, 1981; Al-Yahia ve Jo, 2018) belirtildiği üzere, artan ısı akısı ile oluşan kabarcıklar sıvı faza dönüşmeden kalabilecek konuma gelir ve kabarcık popülasyonunun bir ölçüsü olan boşluk oranı artmaya başlar. Bu koşulun/durumun başlangıç noktası, belirgin boşluk başlangıç noktası (OSV) olarak adlandırılır (Al-Yahia ve Jo, 2018). OSV noktasından sonra da aşırı soğutulmuş kaynama bir süre devam eder. Isı akısı, verilen koşullar için kritik bir değere eriştikten sonra, sıvının yığın sıcaklığı doyma sıcaklığına erişir ve yığın kaynama olarak da adlandırılan doymuş kaynama bölgesi oluşur (Markal, 2016). Bu bölgede artan ısı gücü ile kabarcık popülasyonu sürekli artmaktadır.

Kabarcık yoğunluğu arttıkça ve oluşan kabarcıklar birleşerek buhar kümelerini oluşturdukça, yüzeyin sıvı ile teması zayıflar veya bir başka ifade ile yüzey sıvı tarafından yeterli düzeyde ve/veya büyük ölçüde ıslatılamaz. Isı akısının artması sonucu oluşan bu durumda, yüzeyde ani ve yüksek değerli sıcaklık sıçramaları meydana gelir. Kaynama krizi olarak adlandırılan bu olaydan hemen önceki ısı akısı, Şekil 2’de görülen ve CHF olarak kısaltılmış olan kritik ısı akısıdır. CHF noktasından sonra, minimum film kaynaması (MFB) noktası veya bir diğer ismiyle Leidenfrost

noktasına kadar geçiş kaynama bölgesi oluşur (Çengel ve Ghajar, 2015; Mao vd., 2021). Bu bölge, yüzey sıcaklığı ve dolayısıyla kızma farkı kontrollü durumda, yüzeyin büyük bölümünün buhar filmiyle kaplanması ve buharın ısıl iletkenliğini düşük olması sonucu ısı akısındaki azalmayı temsil eder. Buna karşın, yukarıdaki bölümlerde açıklandığı üzere, pratikteki uygulamalarda kontrol edilen parametre ısıl güç ve dolayısıyla ısı akısıdır. Bu nedenle, ısı akısı azalmayacağı ve sabit ısı akısı değerinde yüzey sıcaklığı aniden artacağı için eğri sağa doğru yatay bir şekilde değişir. Bu durum, Markal (2016) ve Çengel ve Ghajar (2015) gibi birçok çalışmada vurgulanmıştır. Son bölge film kaynama bölgesidir. Bu bölümde, yüksek ısı akılarına maruz kalan yüzey tamamen buharla kaplanır. Yüzeyi kaplayan buhar filmi sürekli ve kararlı yapıdadır. Artan yüzey sıcaklıkları sonucu ısı transferindeki iyileşme ısıtım etkisiyle gerçekleşmektedir.

Yukarıda tanımlanan ısı transfer mekanizmalarıyla doğrudan ilişkili olan kavram, sıvı ve buhar fazının akış pasajları içinde dağılımlarını karakterize eden akış desenleridir. Akış desenleri, geometrik koşullara ve diğer çalışma parametrelerine göre değişebilmekte ve farklı araştırmacılar tarafından farklı isimlerle adlandırılabilir veya çalışma limitlerine bağlı olarak bir kaç desenle sınırlı kalabilmektedir (Markal, 2016). Buna karşın, genel karakter olarak, mini ve/veya mikrokanaallarda gözlenlenebilme potansiyeli olan ve literatürde tanımlanmış akış desenleri Şekil 3'te verilmiştir. Kaynamanın ilk evrelerinde, yüzey üzerindeki kabarcıklaşma odaklarında buhar kabarcıkları oluşmaya başlar ve görece küçük kabarcıklar yüzeyden ayrılarak akış doğrultusunda ilerler. Bu şekilde, görece küçük kabarcıkların kanal içerisinde olduğu ve sıvı fazla birlikte hareket ettiği akış desenine kabarcıklı akış denir. Akışkanın artan ısı akısına maruz kalması veya kanal içerisinde ilerlemesi sonucu daha uzun süre ısı akısına maruz kalmasıyla küçük kabarcıklar büyür veya birleşerek görece büyük ve sayıca az buhar kabarcıklarına dönüşür. Bu akış deseni uzun kabarcıklı akış (*slug flow* veya *elongated bubble flow*) olarak adlandırılır. Akışkan kanalda ilerledikçe uzun kabarcıklı akıştaki buharların birleşmesi veya mevcut uzun kabarcıkların aksel doğrultuda büyümesiyle, akış pasajının iç bölgesinde buharın geniş yer kapladığı ve kanal iç yüzeyi üzerinde sıvının buharı çevreleyecek şekilde ince bir film halinde bulunduğu akış deseni oluşur. Bu desen halkasal akış olarak adlandırılır. Halkasal akıştaki sıvı filmi, buharlaşmanın etkisiyle

ve artan buhar hızının sebep olduğu sürüklenme kuvveti sonucu yüzeyden sıvının damlacıklar halinde koparak buhar bölgesine katılmasıyla zamanla inceler ve kaybolur. Sıvı filminin tamamen kaybolduğu ve sıvının damlacıklar halinde buhar bölgesi içerisinde yer aldığı akış deseni ise sisli akış olarak adlandırılır.



Şekil 3. Genel hatlarıyla iki faz akış desenleri

Kaynak: Kim ve Mudawar, 2013

1.3. Kaynama Kararsızlıklarının Detayları ve Önlenme Süreci

Kaynamalı akış süreci, sıvı ve buhar fazlarının farklı düzeylerde etkileşimi ve geometrinin özellikle kabarcık dinamiği üzerindeki baskın rolü nedeniyle bir dizi kararsızlığa maruz kalma potansiyeline sahiptir. Prajapati ve Bhandari'nin (2017) derleme çalışmasında da belirtildiği üzere, kararsızlıklar, sıcaklık ve basınç düzeylerinde dalgalanma, ters akış, kritik ısı akısı değerinin azalması ve kurma gibi problemlere sebep olmaktadır. Bu problemlerin ortaya çıkması ise, kaynamalı akış için ön görülen potansiyelden istenilen düzeyde faydalanılamamasına yol açmaktadır. Mikrokanallar ise konvansiyonel kanallardan farklı olarak kararsızlıklara daha meyillidir. Bunun en temel sebebi, kanal boyutlarının kabarcık gelişim süreçleri açısından yeterli alanı veya hacmi sağlayamama durumudur. Daha açık bir ifade ile kabarcığın kanal içinde sınırlanma, ters doğrultuda büyüme ve akışa karşı direnç oluşturma potansiyelidir. Literatürde farklı isimlerle birçok kararsızlık türü tanımlanmış olsa da mikrokanallarda öncü çalışmalar yapan araştırmacılar tarafından 2013 yılında sunulan derleme çalışmasında (Kandlikar vd., 2013), mikrokanallarda kaynamalı akış kararsızlıkları beş ana başlık altında toplanmıştır. Bu başlıklardan biri, kritik ısı akısı koşuludur. Bu koşul, temelde, kararsızlıkların sonucu olarak veya sistem limitleri dahilinde erişilen ve güvenli bölge için limit değerini yansıtan ısı akısı değeri

ve o değerin oluştuğu koşula karşılık gelir. Bu sebeple, Kandlikar vd. (2013) tarafından sunulan diğer dđrt kararsızlık tđrđ aşağıda verilmiştir:

1.3.1. Hızlı Kabarcık Bđyđme Kararsızlığı

Hızlı kabarcık bđyđme kararsızlığı tamamen kđçük đlçekli (mikro/mini) kanallara đzgđ olan bir kararsızlık tđrđdđr. Ayrıca, yukarıda da belirtildiği đzere, diğer birçok kararsızlığı tetikleyen veya etkinliğini artıran temel bir kararsızlık tđrđdđr. Đyle ki, Prajapati ve Bhandari (2017) paralel kanal kararsızlığı ve ters akış olaylarının kaynağı olarak, hızlı kabarcık bđyđmesini gđstermiřtir. Hızlı kabarcık bđyđmesi, kabarcıklaşma odaklarında meydana gelen kabarcığın, hızlı bir şekilde bđyđmesini ve bđyđrken kanal kesitinin kđçük olması nedeniyle sınırlanmasını ve çalışma koşullarına bağlı olarak eksenel doğrultuda her iki yđnde uzamasını ifade eder.

1.3.2. Paralel Kanal Kararsızlığı

Tek bir kanaldaki debi değerinin çok az olması nedeniyle mikrokanallı soğutucular için paralel kanal kullanımı yaygındır. Paralel kanallı bir yapıda, kanalların ortak manifoldlara bağlı olması ve aralarında ısı transferi gerçekleşecek şekildeki geometrik konfigđrasyonlara sahip olmaları farklı bir kararsızlık tđrđne yol açar ve bu, paralel kanal kararsızlığı olarak adlandırılır. Kararlı bir çalışmada, paralel kanalların eř debi ve akış rejiminde olması beklenir. Buna karşın, literatđrde de (Kandlikar vd., 2013; Prajapati ve Bhandari, 2017) belirtildiği gibi tasarımsal hatalar, çalışma koşullarının kabarcık dinamiği đzerindeki etkisi ve komşu kanallar arası ısıl etkileşim sebebiyle kanallar arasında farklılıklar ve buna bağlı kararsız bir yapı oluşur. Uygun geometrik tasarımlar, bu tđr bir kararsızlığın sđnđmlenmesinde etkili bir özđm sunar.

1.3.3. Sıkıştırılabilir Hacim Kararsızlığı

Bu kararsızlık tđrđ yoğuşmayan gazların varlığıyla ilişkilidir. Kanal giriş bđlđmünde veya ısıl gđce maruz bırakılan herhangi bir bđlđmde biriken yoğuşmayan gazlar, sıkıştırılabilir yapıları nedeniyle basınçta salınımlara yol açarlar (Kandlikar vd., 2013). Bu kararsızlık tđrđ, Qu ve Mudawar (2004) tarafından şiddetli basınç dđřđmđ salınımı şeklinde karakterize edilmiştir.

1.3.4. Ledinegg Kararsızlığı (Akış Gezintisi)

Statik bir kararsızlık türüdür (Prajapati ve Bhandari, 2017). Bu kararsızlık türü sadece basınç düşümü – kütle akısı eğrisinin eğimi negatif olduğu zaman meydana gelir (Kandlikar vd., 2013).

1.4. Akış Kararsızlıklarının Önlenmesine Yönelik Uygulanan Teknikler

Kaynamalı akışın gerçekleştiği herhangi bir makro veya mikro ölçekli sistemde, ilgili sistemin potansiyelinden istenilen düzeyde faydalanabilmek ve sorunsuz bir işletme ömrü sağlayabilmek için kararsızlıkların önlenmesi ve/veya sistem performansını etkilemeyecek düzeye indirgenmesi gerekmektedir. Bu sebeple, kaynama kararsızlıklarının incelenmesi ve/veya önlenmesi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Mao vd. (2021) tarafından yapılan güncel derleme çalışmasında, kararsızlıkları önlemeye yönelik olan teknikler beş farklı grupta toplanmıştır. Bu çalışmada ise ilgili grupların niteliği ve birbiriyle ilişkisi değerlendirilerek kaynamalı akış kararsızlıklarını azaltmaya yönelik olan veya azaltılmasını sağlayan teknikler üç başlık altında toplanmıştır.

1.4.1. Geometri Bazlı Modifikasyonlar

Bir kaynama prosesinde, kanal geometrisi, akış ve ısı transferi üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Özellikle kabarcık davranışı ve gelişimi süreçlerinin geometrik yapıdan doğrudan etkilenmesi, kanal geometrisini önemli kılmaktadır. Bu nedenle, literatürde, mikrokanallarda kaynama kararsızlıklarını önlemek amacıyla, geometri bazlı çok sayıda konfigürasyon önerilmiştir. Bu kapsamda, kanatçıklarda yeniden girişli ve/veya bağlantılı oyuklar oluşturma (Kuo ve Peles, 2008), eğik kesimli kanatçıklı ısı alıcı kullanımı (Law ve Lee, 2016) ve karşıt akışlı basamaklı mikrokanal tasarımı (Li et al., 2022) gibi örnekler verilebilir.

1.4.2. Yüzey Modifikasyonları

Akışkanın temas ettiği yüzeylerin yapısal karakteristikleri, kaynama kararsızlıkları üzerinde rol oynayan bir diğer faktördür. Kabarcık oluşumu yüzey üzerindeki kabarcıklaşma odaklarında meydana gelir ve kabarcık davranışı ve/veya akışkan dinamiği yüzey morfolojisinden etkilenir. Literatürde yapılan çalışmalarda

işlenmiş yüzeylerde kararsızlıkların azaltıldığı rapor edilmiştir. Zhu vd. (2016) taban yüzeyi üzerinde oluşturdıkları dairesel kesitli mikro çıkıntılar aracılığıyla sıcaklık ve basınç çalkantılarını azalttıklarını belirtmişlerdir. Ayrıca, Lin vd. (2021) heterojen (su iten ve su çeken) yüzeyli bir kanalda kaynama kararsızlıklarının azaltıldığını rapor etmiştir.

1.4.3. İş Akışkanının Rolü

Akışkanların yüzey gerilmesi ve kaynama noktası gibi özellikleri, kaynama sürecini doğrudan etkileyen, kaynamanın başlangıcı, kabarcık oluşumu/gelişimi ve benzeri olgularla doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple, farklı akışkan türleri (saf akışkan çeşitleri, nanoakışkanlar, karışımlar, ikili akışkanlar, katkılı akışkanlar vb.) kullanarak kararsızlık düzeylerinde baskılama yapılabilir.

1.5. Literatür Özeti

Kuo ve Peles (2007) yeniden girişli (*reentrant*) oyuklara sahip paralel mikrokanallarda kaynamalı akış performansını deneysel olarak incelemiştir. Bu kapsamda, ısı transfer katsayıları, akış morfolojileri, kaynama başlangıçları ve kritik ısı akıları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geleneksel (düz duvarlı/paralel kanallı) mikrokanallar ile karşılaştırılmıştır. Yenilikçi kanallara sahip ısı alıcısının, kabarcık oluşumunu belirgin bir şekilde desteklediğini, kaynama başlangıcı için gerekli olan kızma farkını azalttığını ve kritik ısı akısı açısından avantaj sağladığını (daha yüksek ısıl güç değerlerine ötelediğini) ifade etmişlerdir.

Lie vd. (2007) farklı genişlik ve uzunluktaki mikro pim tipi kanatçıklı silikon mikrokanallarda, kaynamalı akışta ısı transferi ve ilgili kabarcık karakteristiklerini incelemek üzere deneysel bir çalışma yapmıştır. Mikro pim tipi kanatçıklar sayesinde kabarcık yoğunluğunun arttığını ve böylece ısı transfer performansının iyileştiğini; yüzeyden ayrılan kabarcıkların çapının ise kütle akısının artmasıyla azaldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, kabarcıkların yüzeyden ayrılma frekansının artan kütle akısı ve ısı akısı ile arttığını belirtmişlerdir.

Qu ve Siu-Ho (2009) kaydırılmış sıralı mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıda deiyonize suyun, doymuş kaynamalı akış karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Farklı giriş sıcaklığı ve kütle akı değerlerinde çalışmışlardır. Yüksek

kuruluk derecelerinde ısı transfer katsayısının hem kütle akısı hem de kuruluk derecesinden neredeyse bağımsız olduğunu; düşük kuruluk derecelerinde ise ısı transfer katsayısının artan aşırı soğutma derecesi ile arttığını belirtmişlerdir. Halkasal akışın baskın ısı transfer mekanizması olduğu ve buhar akışına dahil olan sıvı damlacıklarının ısı transferi üzerinde önemli bir role sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcılara yönelik iki yeni korelasyon önermişlerdir.

Koşar vd. (2010) üç farklı mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıda, iş akışkanı olarak su ve R-123 kullanarak, kararsız kaynama koşullarında deneysel çalışma yapmıştır. Tüm ısı alıcılar için kaynamanın başlamasıyla akış kararsızlıklarının meydana geldiğini ve böylece yüzey sıcaklığının arttığını rapor etmişlerdir. Su kullanılarak yapılan deneylerde hem kaynama başlangıcından önce hem de sonra oluşan basınç düşümü salınımlarının önemsiz olduğunu; bunun aksine R-123 için yapılan deneylerde ise kaynamanın başlamasıyla basınç düşümü salınımlarında önemli bir artış meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Alam vd. (2012) mikro boşluk formundaki kanala sahip ısı alıcıda, kanal boyutunun deiyonize suyun kaynamalı akışına yönelik ısı transferi ve basınç düşümü mekanizmaları üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. İş akışkanının kanala giriş sıcaklığı 86°C’de sabit tutulmuştur. Mikro boşluk boyutların küçülmesinin, ısı transfer katsayısını artırdığını ve yerel duvar sıcaklığındaki salınımları azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, kabarcıklı kaynamanın başlamasıyla sınırlandırılmış uzun kabarcıklı akış ve halkasal akışın baskın hale geldiği ifade edilmiştir.

Balasubramanian vd. (2013) basamak formunda oluşturulan kanatçıklara sahip, paralel kanallı, iki farklı ısı alıcıda deiyonize suyun kaynamalı akışına yönelik deneyler yapmıştır. Orta ve yüksek ısı akısı değerlerinde, kabarcıklı kaynama veince film buharlaşmasının bütünleşik olarak ısı transferini domine ettiğini belirtmişlerdir. ısı transfer katsayısının akış rejimine ve/veya ısı transfer mekanizmasına göre farklı davranış gösterdiğini; kabarcıklı kaynama rejiminde artan kuruluk derecesi ile arttığını; halkasal akış öncesinde azalış eğilimi gösterip, artan ısı akısıyla halkasal akış boyunca tekrar arttığını; ısı akısından devam eden artış sonucu, kısmi kuruma ve kritik ısı akısına yaklaşan çalışma koşulları sebebiyle azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, iki faz basınç düşümünün, sürtünme ve sürüklenme etkilerindeki artış nedeniyle, kuruluk

derecesi ve kütle akısıyla orantılı olarak değiştiğini raporlamışlardır.

Zhuan ve Wang (2013) kübik (cuboid) yapıdaki kanatçıklara sahip mikrokanallı bir ısı alıcıda, R134a iş akışkanının kaynamalı akış performansını deneysel olarak incelemiştir. Kaynamada ısı transferi sürecini taşınımli kaynama ve buharlaşma bölgesi ve taşınımli buharlaşma bölgesi olarak iki temel bölgeye ayırmışlar ve her bir bölge için ısı transfer katsayısının tahminine yönelik bağıntı önermişlerdir. Her iki bölgedeki baskın akış desenleri ve ısı transfer katsayısı davranışının birbirinden farklı olduğu rapor edilmiştir. Taşınımli kaynama ve buharlaşma bölgesinde kabarcıklı/uzun kabarcıklı akış baskın olup, etkin ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır. Ayrıca, kütle akısına zayıf bir şekilde bağlı olan ısı transfer katsayısı ısı akısına kuvvetle bağlıdır (artan ısı akısı ile artar). Diğer bölgede ise, yarı halkasal ve/veya halkasal akış desenleri baskın olup, ısı akısının ısı transfer katsayısı üzerinde etkisi bulunmamaktadır. Isı transfer katsayıları artan kuruluk derecesi ile azalmakta ve artan kütle akısı ile artmaktadır.

Deng vd. (2014) yeniden girişli gözenekli mikrokanal (RPM) ile yeniden girişli mikrokanal (RCM) olarak adlandırdıkları ısı alıcılarda, deiyonize su kullanarak, kaynamalı akışta ısı transfer performansını ve baskın ısı transfer mekanizmalarını deneysel olarak incelemiştir. Isı alıcıların birbirinden farkı, RPM'nin sinterleme ile oluşturulmuş olması (partiküllerden dolayı yüzeyde pürüzlülük var) RCM'nin ise klasik düz yüzeyli yapıda olmasıdır. RPM'nin yüzeyinin gözenekli yapıda olması nedeniyle kabarcıklaşma alanlarının sayısının arttığını ve böylece kaynama başlangıcı için gerekli olan ısı akısının ve kızma farkının azaldığını belirtmişlerdir. Gözenekli yüzeye sahip ısı alıcının iki faz ısı transferini, diğer ısı alıcıya kıyasla, beş kata kadar iyileştirdiğini, akış kararsızlıklarını geciktirdiğini ve/veya zayıflattığını da ifade etmişlerdir. Baskın ısı transferinin ısı akısı düzeyiyle değişim gösterdiği ve bu kapsamda, düşük ısı akısı değerlerinde kabarcıklı kaynamanın, orta ve yüksek ısı akısı değerlerinde ise taşınımli kaynamanın baskın mekanizmalar olduğu rapor edilmiştir.

Law vd. (2014) eğik kanatçıklı (oblique) mikrokanallarda kaynamalı akış sürecine yönelik deneysel bir çalışma yapmıştır. Kullanılan iş akışkanı FC-72'dir. Düşük ısı akılarında kabarcıklı kaynamanın, yüksek ısı akılarında ise taşınımli kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçlar yüksek hızlı görüntüleme ile desteklenmiştir. Kütle akısının giriş basınç salınımları üzerindeki

etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu da ifade etmişlerdir.

Deng vd. (2015) yüksek ısı akılı cihazların verimli bir şekilde soğutulmasına yönelik 590 μm , 781 μm ve 858 μm hidrolik çaplara sahip omega (Ω) şeklinde kanal geometrisine sahip bakır mikrokanaallar (RCMs) geliştirmiştir. Deiyonize su için kaynamalı akış deneyleri yapmışlardır. Kanal hidrolik çapının basınç düşümü, ısı transferi ve akış kararsızlıkları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. En iyi ısı performansın 781 μm hidrolik çapa sahip kanallardan oluşan ısı alıcı için elde edildiğini ve ilgili ısı alıcının diğerlerine kıyasla şiddetli iki faz akış kararsızlıklarını başarılı bir şekilde zayıflatabildiğini belirtmişlerdir. Buna karşın, iki faz basınç düşümünün mikrokanaal boyutundaki artışla azaldığı, dolayısıyla 858 μm hidrolik çap değerinin basınç düşümü açısından en avantajlı duruma karşılık geldiği gösterilmiştir.

Law ve Lee (2015) eğik kanatçıklı (diyagonal kesimli / oblique) ve konvansiyonel düz paralel kanallı iki farklı ısı alıcıda kaynamalı akışa yönelik deneysel çalışmalar yapmıştır. Kullanılan iş akışkanı FC-72'dir. İkincil akış pasajlarına sahip olan eğik kanatçıklı mikrokanaallı yapının, konvansiyonel mikrokanaallara kıyasla, ısı transfer performansını arttırdığını, kritik ısı akısını yüksek ısı yüklerine ötelediğini ve kararsızlıkları azalttığını belirtmişlerdir.

Prajapati vd. (2015) geleneksel paralel kanallı, genişleyen kesitli paralel kanallı ve eğik/diyagonal kesimli kanatçıklı mikrokanaallı ısı alıcılarda, deiyonize suyun kaynamalı akış karakteristiklerini karşılaştırmalı olarak çalışmıştır. Genişleyen kesitli mikrokanaal, geleneksel mikrokanaala göre daha iyi performans göstermesine karşın, en iyi ısı performansın eğik kanatçıklı mikrokanaal için elde edildiğini belirtmişlerdir. Isı transferindeki iyileşmenin fiziksel sebeplerini eğik kanatçıklı geometri sebebiyle, kararsızlıkların azalması, kabarcıklaşma alanı sayısının artması, ısı sınır tabakanın parçalanması ve ters akışın minimuma indirgenmesi olarak açıklamışlardır. Isıl performanstaki iyileşmeye rağmen, en yüksek basınç düşümü eğik kanatçıklı mikrokanaal için elde edilmiş olup; maksimum basınç değeri üzerinden paralel mikrokanaallı yapıya kıyasla %5.2; genişleyen kesitli yapıya kıyasla ise %3.5 daha yüksek değerler elde edilmiştir.

Law ve Lee (2016) 0.15 mm, 0.30 mm ve 0.45 mm olmak üzere üç farklı ikincil kanal genişliğine sahip eğik kanatçıklı mikrokanaallı ısı alıcı tasarlamış ve tasarladıkları ısı alıcılarda, kaynamalı akış deneyleri yaparak, kanal genişliklerinin ısı transfer

performansı, basınç düşümü ve basınç kararsızlıkları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kullanılan iş akışkanı FC-72'dir. İkincil kanal genişliğinin artmasıyla birlikte, ısı transfer yüzeyleri üzerinde kısmi kuruma meydana geldiğini, kritik ısı akısının (CHF) erken oluştuğunu ve ısı transferinin olumsuz etkilendiğini ifade etmişlerdir. Temel sebep olarak, kaynamalı akış kararsızlıklarının daha baskın olması gösterilmiştir. En iyi ısıl performans, en yüksek CHF limiti ve en düşük giriş basınç çalkantıları ile basınç düşümü 0.15 mm ikincil kanal genişliği için elde edilmiştir.

Prajapati vd. (2016) eğik kanatçıklı mikrokanallı ısı alıcıda, geçici rejimde, tek fazlı ve kaynamalı akış için ısı transfer karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlar, geleneksel mikrokanallar için elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Soğutucu akışkan olarak ise deiyonize su kullanmışlardır. Kaynamalı akış koşulunda kararlı hale gelme süresinin tek faza kıyasla daha kısa olduğunu ve eğik kanatçıklı yapı için, üniform kanallıya kıyasla, kararlı hale gelme süresinin daha kısa olduğunu ve ısı transfer performansının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Gelişen kabarcığın akış pasajları içinde sınırlanmamasının eğik kanatçıklı ısı alıcı için tepki süresinin (sıcaklığın kararlı hale gelmesi) kısılmasında önemli rol oynadığı ifade edilmiştir. Deng vd. (2017) kaynamalı akış kapsamında, kanallarının taban yüzeyi üzerinde mikro koni şekilli pim tipi kanatçıklar içeren mikrokanallı ısı alıcının ısı transferine katkısını inceleyerek, klasik düz kanallı mikrokanallar ile karşılaştırma yapmıştır. Deneylerde iş akışkanı olarak su ve etanol kullanmıştır. Deneyler sonucunda, mikro koni türü kanatçıklara sahip ısı alıcıda, konvansiyonel ısı alıcıya kıyasla, ısı transferinin iyileştiğini, iki faz akış kararsızlıklarının azaldığını ve CHF'nin yüksek ısıl güçlere ötelendiğini belirtmişlerdir. Kanalların tabanındaki mikro koni formundaki kanatçıklı yapının ekstra kabarcıklaşma alanı oluşturmasının ve su hapsetme özelliği sağlamasının sistem performansını artırmada kilit rol oynadığını ifade etmişlerdir.

Prajapati vd. (2017), düz duvarlı paralel kanallı, genişleyen kesite sahip boyuna kanallı ve eğik kanatçıklı mikrokanallardan oluşan ısı alıcılarda deiyonize suyun kaynamalı akışı için kabarcık büyümesi ve akış kararsızlıklarını deneysel olarak incelemiştir. Eğik kanatçıklı mikrokanallarda, diğer kanallara kıyasla, kabarcığın hem aksel hem de yanal kanalların varlığı sebebiyle genişlemek için yeterli alan bulabildiğini, kabarcığın toplam büyüme hızının daha düşük olduğunu, taban yüzeyi

sıcaklık salınımlarının daha az olduğunu ve basınç kaybının görece yüksek olmasına rağmen basınç çalkantılarının daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Wan vd. (2017) kare, daire, elmas kesimli ve akım çizgisi formu olmak üzere dört farklı kesit şekline sahip kaydırılmış sıralı mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıda, kaynamalı akışı deneysel olarak incelemiştir. Deneylerde soğutucu akışkan olarak deiyonize su kullanılmıştır. Kaynamada ısı transferi açısından en iyi sonuçlar kare şekilli mikro pim kanatçıklara sahip ısı alıcıda elde edilmiştir. En düşük ısıl performans ise elmas kesimli kanatçık için elde edilmiştir. Basınç düşümü kapsamında en düşük değer ise ısı transferi yönünden zayıf performans göstermesine rağmen elmas kesimli kanatçık için elde edilmiştir. Ayrıca, kanatçık şeklinin kabarcıklı kaynamanın başlangıcı (ONB) açısından önemli bir etkisinin olmadığını, kızma farkının 1 – 3 °C değerlerinde bütün ısı alıcılar için ONB'nin gerçekleştiğini ve kare kesitli kanatçıklı yapı için buharın sürekli gelişiminin engellenmesi ve ısı transfer yüzeyinin tekrar ıslatılma süreçlerinin desteklenmesinin ısı transferine yönelik en iyi sonuçların elde edilmesini sağlayan fiziksel mekanizmalar olduğunu ifade etmişlerdir.

Jia vd. (2018) düz duvarlı kanatçıkların her iki yüzünde dairesel kesitli mikro pim tipi kanatçıklar bulunan bir ısı alıcı geliştirmiş ve bu ısı alıcıyı gözenek-duvarlı mikro kanallı ısı alıcı olarak adlandırmışlardır. İlgili ısı alıcıda saf aseton kullanarak kaynamalı akış deneyleri yapmışlar ve sonuçları konvansiyonel düz duvarlı dikdörtgen kesitli kanatçıklar içeren ısı alıcıdan elde edilenlerle karşılaştırmışlardır. Gözenekli özgün yapıli ısı alıcıda kabarcıklaşma alanlarının artması sebebiyle ONB'nin daha düşük kızma farklarında oluştuğunu ve kritik ısı akısının görece yüksek ısıl güç değerlerine ötelendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, gözenekli ısı alıcı kullanılıncı, ısı transferinin iyileştiğini basınç düşümünün azaldığını ve kaynama kararsızlıklarının azaldığını belirtmişlerdir.

Li vd. (2018) geliştirdikleri özgün geometriye sahip paralel kanallı ısı alıcıda HFE-7100 soğutucu akışkanını kullanarak kaynamalı akış deneyleri yapmıştır. Özgün kanal geometrisi her bir kanatçık yan yüzeyinde kanatçık boyunca yeniden girişli mikro ölçekli oyuklar ve bir by-pass kanalı ile bağlantılı dört adet mikro lüle bulunmaktadır. Kanal girişlerinde sınırlandırıcı bulunan düz duvarlı paralel mikrokanaallara ile sonuçları karşılaştırmışlardır. Yapısal olarak iyileştirilmiş ısı alıcının, kritik ısı akısını %70'e yakın oranda artırdığını ve basınç düşümünde %82'ye

varan azalma sağladığını belirtmişlerdir.

Chien vd. (2019) kübik formda ancak her birinin içine oyuklar açılmış mikro kanatçıklara sahip ısı alıcıda FC-72 iş akışkanının kaynamalı akışını incelemişlerdir. Genel karakter olarak, taşınımlı kaynamada, basınç düşümünün artan ısı akısı ile belirgin bir şekilde arttığını, doyma sıcaklığındaki azalmanın kızma farkını artırdığını ve kaynama olayını ertelediğini, düşük ısı akılarında baskın akış deseninin kabarcıklı akış yüksek ısı akılarında ise uzun kabarcıklı akış olduğunu belirtmişlerdir.

Deng vd. (2019) önerdikleri özgün geometrik yapıdaki ısı alıcıda iş akışkanı olarak deiyonize su ve etanol kullanarak kaynamalı akış deneyleri yapmıştır. Özgün kanal geometrisi diyagonal olarak oluşturulmuş omega şekilli kanalların elmas profil kesitine sahip mikro pim tipi kanatçıklar içerecek formda işlenmesiyle oluşturulmuş ve pim kanatçık tipi bağlantılı yeniden girişli mikrokanallar olarak adlandırılmıştır. Sonuçları omega kesit şekilli paralel kanallar için elde edilenlerle karşılaştırmışlardır. Modifiye edilmiş ısı alıcının su ve etanol için ısı transferinde sırasıyla %284 ve %220 iyileşme sağladığını, kabarcık sınırlanma etkisinin azaldığını, kabarcıklaşmanın iyileştiğini ve su için elde edilen performansın etanolden daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Ma vd. (2019) girişlerinde sınırlandırıcı bulunan paralel beş mikro kanaldan oluşan bir ısı alıcıyı, tüm kanatçıklarda (ilgili kanatçıkların yarı uzunluğundan sonra) yanal doğrultuda 20 μm genişliğinde mikro kanallar açarak modifiye etmiş böylece paralel kanalları birbirine bağlamıştır. Yanal kanallar arası mesafe 180 μm 'dir. Yanal mikro yarıkların yapay kabarcıklaşma odağı olarak davrandığını ve kabarcıklaşmayı iyileştirdiğini, bekleme süresini azalttığını ve iki faz ısı transfer katsayısını %172'ye kadar artırdığını ifade etmişlerdir.

Dang vd. (2020) sürekli ve üç parçalı (iki bölümlü) kanatçıklara sahip paralel kanallı ısı alıcıda, HFE-7000 iş akışkanı için kaynamalı akış karakteristiklerini ve basınç düşümünü incelemiştir. Bölüntülü kanatçıklı ısı alıcının ısı transferini iyileştirdiğini, kritik ısı akısının arttığını, yerel kuruma oluşana kadar sürtünme basınç düşümü çalkantılarının daha pasif olduğunu belirtmişlerdir.

Lingjian vd. (2020) dairesel, oval ve elmas kesimli olan üç farklı mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıda iş akışkanı olarak deiyonize su kullanarak kabarcıklı kaynamanın başlangıcı (ONB) olayını ölçümlerle ve akış görüntüleme aracılığıyla

incelemişlerdir. Kabarcıklı kaynamanın daima mikro kanatçıkların çevresinde gerçekleşmeye başladığını, mikro pim kanatçıkların ek kabarcıklaşma alanları sağladığını, artan kütle akısı ve giriş aşırı soğutma derecesinin kabarcıklaşmanın başlaması için gerekli olan ısı akısı ve kızma farkını artırdığını ve dairesel kanatçıklı ısı alıcı için ONB'nin diğer kanatçık formlarına göre daha erken bir başka ifade ile daha düşük ısı akılarında başladığını belirtmişlerdir.

Mathew vd. (2020) konvansiyonel düz kanallı, mikro boşluklu olarak adlandırdıkları kanatçıksız ve hibrit olarak adlandırdıkları yarı paralel kanallı yarı kanatçıksız üç farklı ısı alıcının kaynamalı akış performansını karşılaştırmalı analiz yapmıştır. Deneylerde kullanılan iş akışkanı de-iyonize sudur. Yaptıkları çalışma sonucunda, kaynama kararsızlıklarının kabarcık sınırlanması ve her iki yönde uzaması sebebiyle en fazla konvansiyonel düz kanallı ısı alıcıda ortaya çıktığını, buna karşın en iyi ısı transfer performansının bu kanalda elde edildiğini, ısı transfer performansının açısından ise en zayıf kanalın kanatçıksız yapıdaki ısı alıcı olduğunu belirtmişlerdir.

Yin vd. (2020) hibrit yüzey yapısına sahip mikro pim tipi kanatçıklı bir ısı alıcı tasarlamıştır. Isı alıcının giriş bölümü kanatçıksız olup pürüzlü yapıdadır. Pürüzlü yüzeyin devamında ise kaydırılmış sıralı olarak oluşturulmuş üçgen kesitli mikro pim tipi kanatçıklar mevcuttur. İlgili ısı alıcıda, saf suyun aşırı soğuk kaynamalı akışı farklı çalışma koşulları altında incelenmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda yeni bir akış deseni görüntülediklerini ve bu akı deseninin görece yüksek debi ve ısı akısı altında hem pürüzlü yüzeyi hem de kanatçıkları kaplayan buhar bölgesi olduğunu ifade etmişlerdir. Pürüzlü yüzeyin kabarcıklaşmayı desteklediğini ve mikro kanatçıkların kılcallık etkisi oluşturarak yerel kurumayı önlediğini, dolayısıyla da ısı transferini iyileştirdiğini vurgulamışlardır.

Zong vd. (2020) farklı boyutlarda mikro pim tipi yapı şeklinde oluşturulmuş uzunlamasına kanatçıklara sahip paralel kanallı bir ısı alıcıda kaynamalı akış deneyleri yapmıştır. İlgili ısı alıcıyı gözenek-duvarlı mikrokanallı ısı alıcı olarak adlandırmışlardır. İş akışkanı saf asetondur. Gözenekli kanal sayesinde ONB'nin erken gerçekleştiğini (< 2 ms) ve kararsızlıkların bastırılabilirdiğini belirtmişlerdir. Kaynama kararsızlıklarını dört akış modu olarak sınıflandırmışlardır.

Deng vd. (2021) açık halka tipi pim kanatçıklı mikrokanal tasarlamışlardır. Akışkan giriş-çıkışının olduğu halkasal formda kanatçıklar içeren ve kanatçıkların düzgün ve kaydırılmış sıralı olarak konumlandırıldığı iki farklı ısı alıcıda çalışmışlardır. Akışkan deiyonize sudur. Yaptıkları çalışma sonucunda, her iki ısı alıcıda da ONB'nin düşük (1 – 2 °C) duvar kızma farklarında gerçekleştiğini, artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile akış pasajlarında sırasıyla kabarcıklı kaynama, hem kabarcıklı kaynama hem de ince film buharlaşması ve taşınımli kaynama rejimlerinin baskın olduğunu, düzgün sıralı ısı alıcının kaydırılmış sıralıya kıyasla ısı transferini %80'e kadar iyileştirebildiğini, kararsızlıkları azalttığını ve basınç düşümünü %20'ye kadar azaltabildiğini belirtmişlerdir.

Moon vd. (2021) sabit ısı akısında, kaydırılmış sıralı mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıda kaynamalı akış deneyleri gerçekleştirmişler. Deiyonize su iş akışkanı olarak kullanılmıştır. Genel karakter olarak ısı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığı ancak kuruluk derecesinin düşük değerlerinde (< 0.01) hızlı gelişen azalma eğiliminin, daha yüksek kuruluk derecesi değerlerinde (0.01 – 0.043) hafif bir şekilde azaldığını belirtmişlerdir. Gözlemlenen akış desenlerinin kabarcıklı akış ve uzun kabarcıklı akış olduğunu, ayrıca sabit buhar kümelerinin de tespit edildiğini ifade etmişlerdir. Isı transfer katsayısını tahmin etmek için korelasyon önermişlerdir.

Qui vd. (2021) elmas formunda kanatçıklara sahip üç farklı ısı alıcıda deioynize suyun kaynamalı akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Her bir ısı alıcı farklı temas açısına sahiptir (90°, 120° ve 150°). Ayrıca, 120° temas açısına sahip elmas form kanatçıklı ısı alıcı, aynı hidrofobik özellikteki dairesel, elips ve üçgen kanatçıklı ısı alıcılarla da karşılaştırılmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda; film kaynama, geçiş durumu, kabarcıklı kaynama ve tek fazlı durum olmak üzere dört farklı akış deseni tanımlamışlardır. Hidrofobik yüzey kaplamayı ayrıca kaplamasız bakır yüzeyle de karşılaştırmışlar ve kaplamalı durumda %90 oranında basınç düşümünde azalma tespit etmişlerdir. Hidrofobik kaplamanın akış direncini azalttığını ve incelenen kanatçık şekilleri içinde en iyi akış ve ısı transferi performansının elmas profilli kanatçıklar için elde edildiğini vurgulamışlardır.

Tablo 1. Deneysel çalışmaların özeti

Yazarlar	İş akışkanı	Çalışma parametreleri	Isı alıcısının malzemesi
Lie vd. (2007)	FC-72	$G = 287\text{-}431 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 10 \text{ W cm}^{-2}$, e kadar	Silikon
Kuo ve Peles (2007)	-	$G = 83\text{-}303 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 643 \text{ W cm}^{-2}$	-
Qu ve Siu-Ho (2009)	Deiyonize su	$G = 183\text{-}420 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 23.7\text{-}248.5 \text{ W cm}^{-2}$, e kadar; $T_{in} = 30, 60, 90^\circ\text{C}$	Bakır
Koşar vd. (2010)	Deiyonize su, R123	$G = 576\text{-}1351 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 278.9 \text{ W cm}^{-2}$, e kadar	Silikon
Alam vd. (2012)	Deiyonize su	$G = 420\text{-}970 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 0\text{-}110 \text{ W cm}^{-2}$; $T_{in} = 86^\circ\text{C}$	Silikon
Zhuan ve Wang (2013)	R134a	$G = 10\text{-}35 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $T_{in} = 8, 32^\circ\text{C}$	-
Balasubramanian vd. (2013)	Deiyonize su	$G = 88\text{-}751 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 420 \text{ W cm}^{-2}$, e kadar; $T_{in} = 90^\circ\text{C}$	Bakır
Deng vd. (2014)	Deiyonize su	$G = 125\text{-}300 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 625 \text{ kW m}^{-2}$, e kadar; $T_{in} = 33, 60, 90^\circ\text{C}$	Bakır
Law vd. (2014)	FC-72	$G = 175\text{-}350 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 60\text{-}120 \text{ W cm}^{-2}$; $T_{in} = 29.5^\circ\text{C}$	Bakır
Law ve Lee (2015)	FC-72	$G = 175\text{-}350 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 120 \text{ W cm}^{-2}$, e kadar; $T_{in} = 29.5^\circ\text{C}$	Bakır
Prajapati vd. (2015)	Deiyonize su	$G = 100\text{-}350 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 10\text{-}350 \text{ kW m}^{-2}$; $T_{in} = 30^\circ\text{C}$	Bakır
Law ve Lee (2016)	FC-72	$G = 197\text{-}394 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 14.9\text{-}70.2 \text{ W cm}^{-2}$; $T_{in} = 29.5^\circ\text{C}$	Bakır
Prajapati vd. (2016)	Deiyonize su	$G = 100\text{-}350 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 20\text{-}350 \text{ kW m}^{-2}$; $T_{in} = 30^\circ\text{C}$	Bakır
Deng vd. (2017)	Deiyonize su, etanol	$G = 200\text{-}300 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 1067 \text{ kW m}^{-2}$, e kadar; $\Delta T_{sub} = 10, 40^\circ\text{C}$	Bakır
Wan vd. (2017)	Deiyonize su	$G = 500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 850 \text{ kW m}^{-2}$, e kadar; $\Delta T_{sub} = 10^\circ\text{C}$	Bakır
Prajapati vd. (2017)	Deiyonize su	$G = 100\text{-}350 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 10\text{-}350 \text{ kW m}^{-2}$; $T_{in} = 30^\circ\text{C}$	Bakır

Tablo 1 (Devam). Deneysel çalışmaların özeti

Yazarlar	İş akışkanı	Çalışma parametreleri	alıcısının İzemesi
Li vd. (2018)	HFE-7100	$G = 231-1155 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 180 \text{ W cm}^{-2}$ e kadar	Silikon
Jia vd. (2018)	Saf aseton	$G = 255-843 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 4-110 \text{ W cm}^{-2}$; $T_{in} = 30^\circ\text{C}$	Silikon
Ma vd. (2019)	HFE-7100	$G = 462-1617 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 150 \text{ W cm}^{-2}$ e kadar	Silikon
Chien vd. (2019)	FC-72	$G = 94-275 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 0-6 \text{ W cm}^{-2}$; $T_{in} = 35, 50^\circ\text{C}$	-
Deng vd. (2019)	Su, etanol	$G = 125-300 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 1050 \text{ kW m}^{-2}$ e kadar; $\Delta T_{sub} = 10, 40^\circ\text{C}$	Bakır
Zong vd. (2020)	Saf aseton	$G = 250-510 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 120-720 \text{ kW m}^{-2}$	Silikon
Dang vd. (2020)	HFE-7000	$G = 300-500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 30-300 \text{ kW m}^{-2}$; $\Delta T_{sub} = 10^\circ\text{C}$	Alüminyum
Lingjian vd. (2020)	Deiyonize su	$G = 147.4-355.4 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 4.8-55.8 \text{ W cm}^{-2}$; $\Delta T_{sub} = 10^\circ\text{C}$	Bakır
Mathew vd. (2020)	Deiyonize su	$G = 100-399 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 0-128 \text{ W cm}^{-2}$ e kadar; $T_{in} = 85.5^\circ\text{C}$	Bakır
Yin vd. (2020)	Deiyonize su	$v = 80-480 \text{ mL dk}^{-1}$; $q''_{eff} = 100-651.7 \text{ W cm}^{-2}$ e kadar; $\Delta T_{sub} = 20, 40^\circ\text{C}$	Bakır
Moon vd. (2021)	Deiyonize su	$G = 9.3-46.6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 0.5-0.9 \text{ W cm}^{-2}$ e kadar; $T_{in} = 70-75^\circ\text{C}$	Bakır
Qui vd. (2021)	Deiyonize su	$G = 21.54-962.75 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 0.5-0.9 \text{ W cm}^{-2}$ e kadar; $T_{in} = 30^\circ\text{C}$	Bakır
Deng vd. (2021)	Deiyonize su	$G = 200-300 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $q''_{eff} = 1050 \text{ kW m}^{-2}$ e kadar; $\Delta T_{sub} = 10^\circ\text{C}$	Bakır

1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Mikro-elektronik veya mikro-elektro-mekanik sistemlerdeki gelişim hızı giderek artmaktadır. Daha küçük alanlara daha fazla transistörün yerleştirildiği, bir başka ifade ile daha yoğun dizilmiş/yerleştirilmiş elektronik bileşenlere sahip sistemler, her ne kadar işlemci hızlarının artmasını sağlasa da yüksek ısı akılarının açığa çıkmasına yol açmaktadır. Savunma sanayisi, uzay ve havacılık, haberleşme gibi önemli sektörlerin vazgeçilmez parçası haline gelen elektronik sistemlerin güvenli ve istenilen performansta çalışabilmesi ise ancak ilgili ısı yüklerinin uzaklaştırılması ile mümkündür. Dolayısıyla etkili, yenilikçi ve verimli soğutma tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, mikro akış pasajları içinde kaynamalı akış prosesi uygulamada duyulan gereksinimi karşılama potansiyeline sahiptir. Bu potansiyel, yüksek kompaktlık, faz değişiminin ısı transfer sürecinde rol oynaması ve nispeten üniform sıcaklık dağılımı sağlama özelliklerinin bir arada sunulabilmesinden kaynaklanmaktadır.

Mikrokanallarda kaynamalı akışın önemi yukarıda özetlenmiştir. 219M142 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında tamamlanan bu tezin amacı, ilgili projenin amacıyla paralel olarak, “özgün geometrik konfigürasyonlara sahip mikrokanallı ısı alıcılar kullanarak, geniş parametre aralığında, kaynamalı akışta ısı transferi ve akış karakteristiklerini deneysel olarak incelemek ve pratik uygulamalar için yeni bir ısı alıcı önerisinde bulunmaktır”. Tezin özgünlüğü; temel olarak, kabarcık dinamiği dikkate alınarak tasarlanan özgün ve yenilikçi mikrokanal geometrileri ve güçlü geometrik-ısı-hidrolik etkileşim sebebiyle ilgili geometrilerde akış görüntüleme destekli yapılan kaynamalı akış deneyleri sonucunda, akış fiziğine/karakteristiklerine yönelik elde edilen özgün çıktılarla ilgilidir. Bu doğrultuda üçü özgün olmak üzere beş farklı mikrokanallı ısı alıcı kullanılmıştır. Diğer iki ısı alıcı ise özgün geometriler için elde edilecek sonuçların değerlendirilmesinde ve irdelenmesinde temel teşkil etmesi bakımından referans geometriler olarak kullanılmıştır. Özgün tasarımlara ait kısa tanımlar/açıklamalar aşağıda verilmiştir:

- Kare kesitli, düzgün sıralı mikro pim tipi kanatçıklardan oluşan; kanatçık sayısı kanal çıkışına doğru kademeli olarak azalan ısı alıcı.
- Kare kesitli, düzgün sıralı mikro pim tipi kanatçıklardan oluşan; kanatçık sayısı kanal çıkışına doğru azalan ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip ısı

alıcı.

- Kare kesitli, kaydırılmış sıralı mikro pim tipi kanatçıklardan oluşan ve kanatçık sayısı kanal çıkışına doğru azalan ısı alıcı.

Yukarıda kısaca tanımlanan özgün geometriler, düzgün sıralı eşit dağılımlı mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcı ve paralel düz duvarlı mikrokanallı ısı alıcı olmak üzere iki geleneksel ısı alıcı türüyle karşılaştırılmıştır. Yapılan ölçümlerle hesaplanan parametrelere ek olarak, mikroskop ile bütünleşik yüksek hızlı kamera kullanılarak akış desenleri ve dolayısıyla akışın fiziksel mekanizması detaylı analiz edilmiştir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, farklı geometrik düzenlemelere sahip mikrokanallı ısı alıcılarda, deiyonize su kullanılarak, kaynamalı akış deneyleri yapılmış ve geometrik özelliklerin etkileri ile ısı ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Isı alıcılar, üç özgün geometri ve karşılaştırmalı analiz için iki konvansiyonel tip ısı alıcıyı içerecek şekilde toplamda beş adettir. Deneyler farklı kütle akıları (98, 136, 178, 212, 250 ve 287 kg m⁻² s⁻¹) ve ısı akılarında (132 – 272 kW m⁻²) yapılmıştır. Isı akısı aralığı, her bir deneyde, 90 W ile 180 W arasında 10W'lık artışlar şeklinde uygulanan ısı güce karşılık gelmektedir. Giriş sıcaklığı yaklaşık 75 °C olarak, ortam sıcaklığı ise yaklaşık 24 °C olarak sabit tutulmuştur. Akış görüntüleme süreci kamera ile bütünleşik mikroskop aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

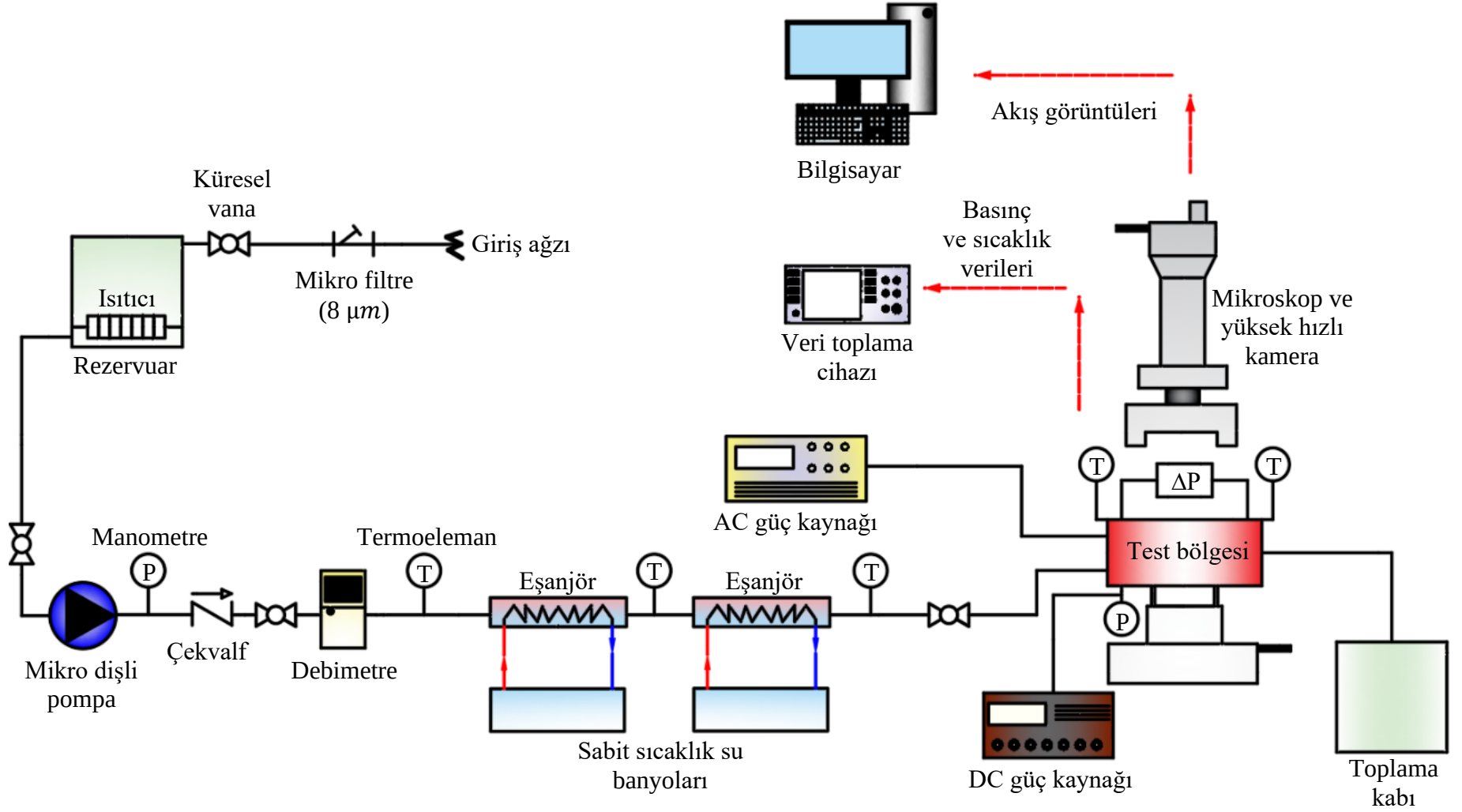
2.1. Deney Düzeneği

Çalışmada kullanılan deney düzeneğine ait şematik çizim ve fotoğraf, sırasıyla, Şekil 4 ve Şekil 5' de gösterilmiştir. Deney düzeneği; akış hattı, test bölgesi ve görüntüleme bölümü olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. İş akışkanı olarak kullanılan deiyonize su, öncelikli olarak, giriş ağzından sisteme gönderilir. Mikro filtreden (8 µm) geçirilen iş akışkanı rezervuara doldurulur. İş akışkanı, ısıtıcıya sahip rezervuarda, içeriğindeki çözünmüş gazların kabul edilebilir bir seviyenin (< 3 ppm) altına indirilebilmesi kaynatılır. Her deneyden önce tekrar edilen bu işlem, literatürde (Lee ve Garimella, 2008; Markal vd., 2018) yaygın bir şekilde uygulanmakta olup, ilgili işlemin sonucu çözünmüş oksijen ölçer (Cole-Parmer / 19601-31) yardımıyla kontrol edilir. İş akışkanının sistem içindeki hareketi dijital pompa sürücüsüyle (Masterflex Digital Gear Pump, 75211-70) bütünleşik mikro pompa (Micropump L22097) ile gerçekleştirilir. İş akışkanının debisi sürücünün dijital ekranından ayarlanır ve pompanın yanındaki dijital debimetre (McMillan / S-111) ile de kontrol edilir. Ayrıca, akış hattındaki basınç değeri pompa ile debimetre arasına konumlandırılan dijital manometreyle (Keller / LEO2) gözlemlenir. Akış ölçerden sonra, iş akışkanının test bölgesine istenilen sıcaklık değerinde girebilmesi için iki adet ısı eşanjörü yerleştirilmiştir. Eşanjörler sabit sıcaklık banyolarıyla (P200-H22 / Labo) bütünleşiktir. Isı eşanjörlerin girişinden itibaren test bölgesine kadar olan akış hattı

bölümü, ısı kaybını en aza indirmek için yalıtım malzemeleriyle kaplanmıştır.

Düzenekteki en kritik bölüm, asıl olayın gerçekleştiği yer olan test bölgesidir. Test bölgesinin ayrıntılarını gösteren üç boyutlu çizimler Şekil 6'da sunulmuştur. Test bölgesinin temel bölümleri Teflon ana gövde, ısıtma plakası, ısı alıcı, polikarbon şeffaf kapak, alt ve üst sıkıştırma plakaları ve test bölgesi ölçümlerinde kullanılan sıcaklık ve basınç ölçüm cihazları/elemanlarıdır. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi, test bölgesinin akış doğrultusundaki ilk bölümü giriş haznesidir. Giriş haznesinin karşılıklı iki yan yüzeyinde birer adet ve tabanında bir adet olmak üzere toplamda üç bağlantı noktası/kanalı vardır. Tabandaki bağlantı noktası diferansiyel basınç sensörünün (Omega / PXM409-350HDWU10V) bir kolu ile ilişkili iken, diğer bağlantı noktaları sırasıyla termoeleman ve mutlak basınç sensörü (Omega / PXM01MA0-2.5BARA5T) ile ilişkilidir. Termoeleman sistemde kullanılan tüm termoelemanlarla aynı olacak şekilde T-tipi olup, giriş haznesinin ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Orta bölümde ise ısıtma plakası ve ısı alıcı yer almaktadır. Orta bölüme önce içerisinde iki adet kartuş ısıtıcı bulunan ısıtma plakası yerleştirilmiş, onun üstüne de ısı alıcı konumlandırılmıştır. Basınç sensörleri DC güç kaynağı (GW INSTEK GPP-4323) ile aktive edilirken, kartuş ısıtıcılar AC güç kaynağı (GW-INSTEK / APS-7100E) ile tahrik edilmektedir. Isı alıcı ve haznelerin üzeri şeffaf polikarbon plaka ile kapatılır ve alt ve üst sıkıştırma plakaları aracılığıyla sıkıştırılır. Kullanılan şeffaf plaka, gözetleme kapağı olarak kullanılmaktadır.

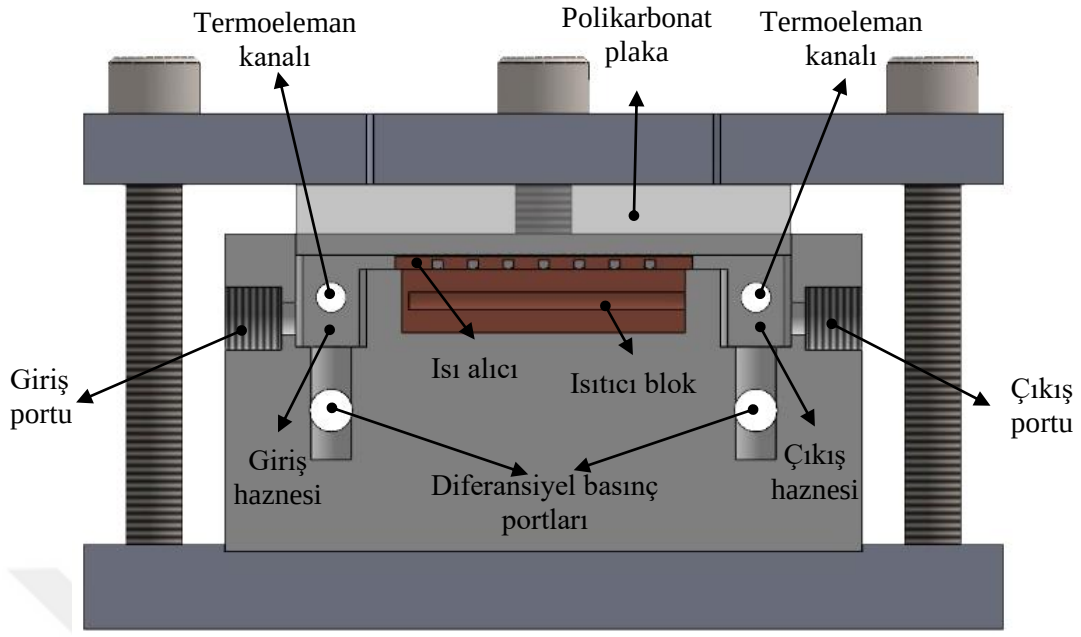
Son bölüm ise akış görüntüleme bölümüdür. Test bölgesi yüksek hızlı kamera (Fastec / HiSpec 4 Color) ile bütünleşik bir mikroskopun (Nikon / LV-IM) dört yöne hareket edebilen tablası üzerine yerleştirilmiştir. Akış görüntüleri saniyede 1000 kare (1000 fps) olacak şekilde alınmış olup, kaynamalı akış sürecinin arkasındaki fiziksel mekanizmaların ortaya konulması noktasında oldukça önemli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca sistemdeki tüm sıcaklık ve basınç verileri bir veri toplama cihazı (Keithley / DAQ6510 / 7708 Modülü) aracılığıyla toplanarak bilgisayara aktarılmaktadır.



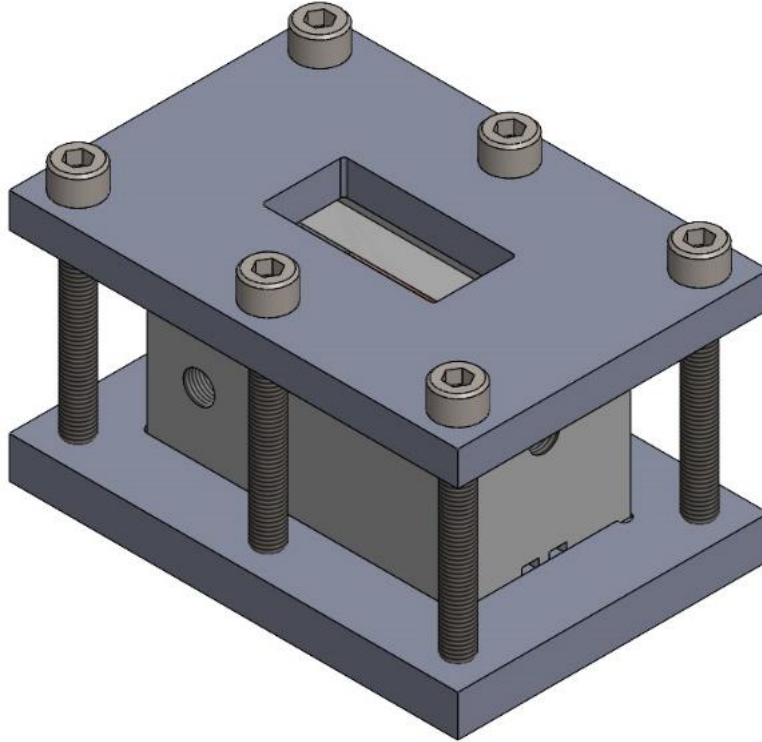
Şekil 4. Deney düzeneğine ait şematik çizim



Şekil 5. Deney düzeneğine ait fotoğraf



(a)



(b)

Şekil 6. Test bölgesinin detaylı görünümü; kesit görünümü (a) ve montaj görünümü (b)

2.2. Isı Alıcılar

Beş farklı konfigürasyona sahip mikrokanallı ısı alıcılar Şekil 7’de gösterilmiştir. Her biri ısı alıcısı, hassas mikro işleme teknikleri kullanılarak (mikro CNC freze) üretilmiştir. Tüm ısı alıcıların; toplam uzunluk (L), toplam genişlik (W) ve kalınlık değerleri (t), 42 mm, 18 mm ve 2 mm’dir. Isı alıcıların etkin genişlik (W_e) 40 mm ve etkin uzunluk (L_e) 16 mm’dir. Görüldüğü üzere ısı alıcıların ön-arka, sağ ve sol kenarlarının her biri kanal ve/veya kanatçıklardan sonra 1 mm daha uzun tasarlanmıştır. Bundaki amaç, sızma problemini önlemek için oturma yüzeyleri oluşturmaktır. Aynı şekilde, tüm ısı alıcılarda ortak olmak üzere, alt yüzeylerde (ısıtıcı plaka ile temas eden yüzey) 1.5 mm genişliğinde ve 1.3 mm derinliğinde enine doğrultuda yedi adet T-tipi termolemanlar için kanal açılmıştır. Termoeleman ile kanal yüzeyi arasındaki mesafe ise 0.5 mm’dir. Kritik bir öneme sahip mikrokanallı ısı alıcılar hakkında detaylı bilgi verilecek olunursa;

PW-MCHS: İlgili ısı alıcı, duvarlı paralel mikrokanallı ısı alıcısı olup; literatürde geleneksel bir tiptir. Her ısı alıcısı için ortak olan 333 μm hidrolik çapa sahip olup, 11 mikro kanaldan meydana gelmektedir. Kanatçık genişliği, kanal yüksekliği ve genişliği; sırasıyla, 500 μm , 1 μm ve 200 μm ’dir.

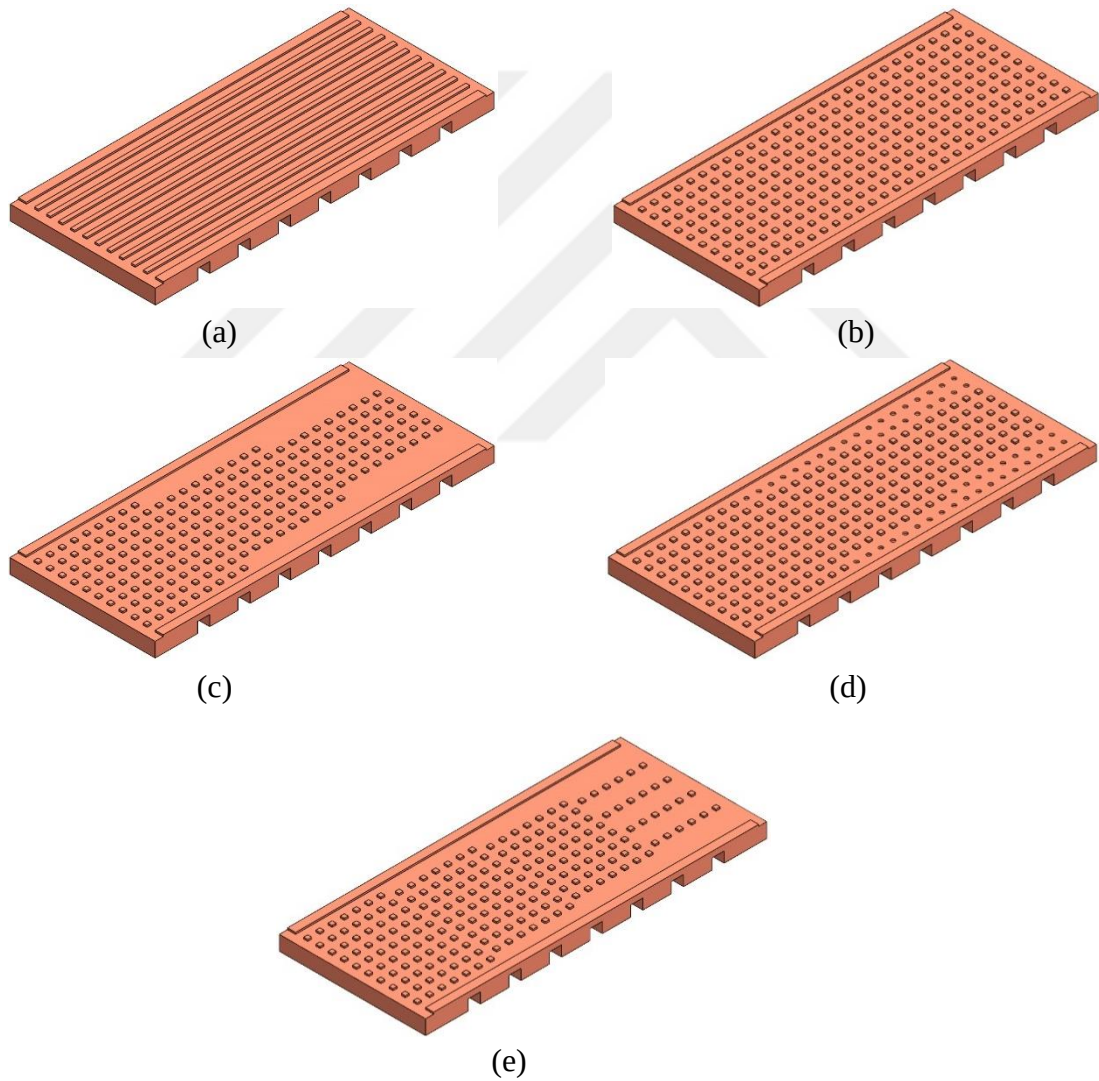
CT-MFHS: İlgili ısı alıcısı, mikro kanatçıklı ısı alıcılar için literatürde geleneksel bir tiptir. Kanatçık uzunluğu ve genişliği aynı olup, 500 μm ’dir ve yüksekliği ise 200 μm ’dir. Toplam 270 adet mikro kanatçık içermektedir. Kanatçıklar arası mesafe ise, 1 mm’dir.

GD-MFHS: İlgili ısı alıcısı, toplam 216 adet kare kesitli kanatçıktan meydana gelmektedir. Kanatçıklar kademeli olarak kanal çıkışına doğru azalmaktadır. Dokuzuncu ve on sekizinci kanatçık sırasından sonra kanatçık sıraları çıkarılmıştır. Kanatçık sayısının azaltılmasının sebebi; çıkışa doğru akış kesitini genişletmek ve böylece genişleyen buhar kümesinin sınırlanma problemiyle karşılaşmadan kanaldan çıkışını sağlamaktır. Ayrıca, akış kesitinin kademeli genişlemesiyle, akış direnci azalacak ve iş akışkanı kanal çıkışına doğru daha etkin bir şekilde yönlendirilmiş olacaktır (tek yönlü akışın desteklenmesi).

DN-MFHS: İlgili ısı alıcısı, toplam 216 adet kare kesitli kanatçıktan ve 54 adet mikro oyuktan meydana gelmektedir. Bir önceki ısı alıcısı gibi aynı amaç hedeflenerek, çıkışa doğru kademeli olarak kanatçıklar çıkarılmıştır. Çıkarılan

kanatçıklar yerine, 500 μm nominal çapa ve 200 μm nominal derinliğe sahip yapay kabarcıklaşma oyukları açılmıştır. Böylece, fitil etkisiyle oyuk içinde su tutulacak hem de yapay kabarcıklaşma alanı oluşturulmuştur.

GS-MFHS: İlgili ısı alıcısı, toplam 213 adet kaydırılmış sıralı kare kesitli kanatçıktan oluşmaktadır. Kanatçık sayısı çıkışa doğru azalırken, kanatçıkların hizası üç bölgede kaydırılmıştır. İlgili üç bölge, sırasıyla; yedi, on dört ve yirmi bir kanatçık dizisinden sonra meydana gelmektedir. Bu geometride, kaydırılmış sıralı ve çıkışa doğru azalmakta olan kanatçıkların birleşik etkisi incelenmiştir.



Şekil 7. Isı alıcıların üç boyutlu izometrik görünüşleri: PW-MCHS (a), CT-MFHS (b), GD-MFHS (c), DN-MFHS (d), GS-MFHS (e)

2.3. Deneylerin Gerçekleştirilme Aşamaları

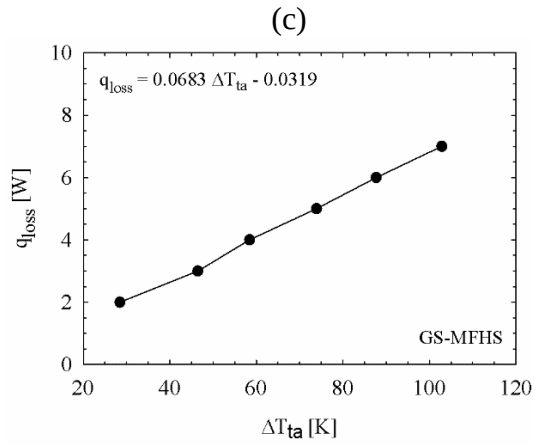
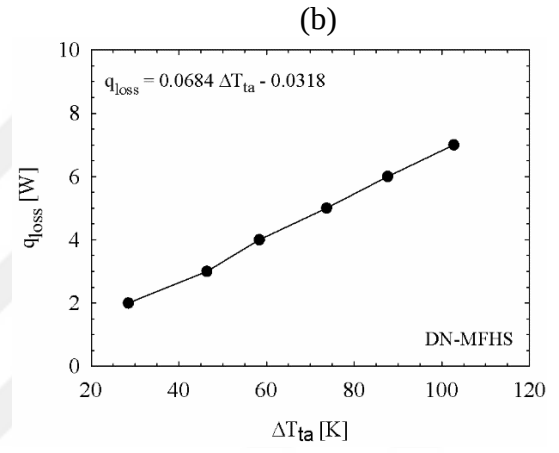
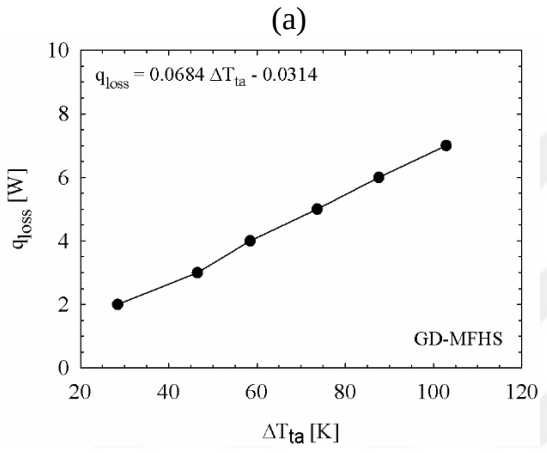
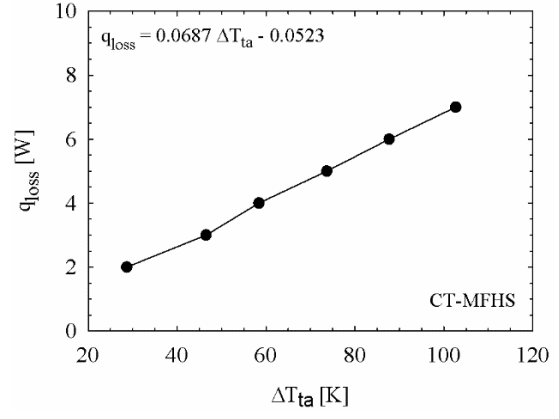
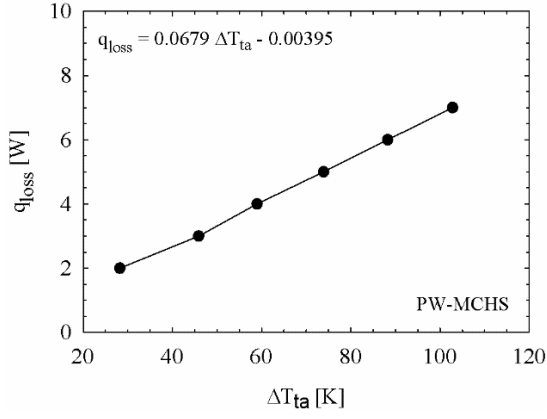
Deney düzeneğinin çalışma prensibini de içerecek şekilde, bir deney esnasında takip edilen adımlar aşağıda verilmiştir:

- I. Tüm deneyler için geçerli olmak üzere, deneye başlamadan önce iş akışkanının içindeki çözünmüş oksijeni azaltmak için iş akışkanı kaynatılır.
- II. Pompa çalıştırılarak iş akışkanının sistem içerisindeki hareketi başlatılır. Pompanın dijital sürücüsü yardımıyla ve sistem üzerindeki akış ölçerden de okuma yapılarak, debi istenilen değere ayarlanır.
- III. Sabit sıcaklık banyoları çalıştırılır ve böylece iş akışkanı, test bölgesinde istenilen giriş sıcaklığı elde edilecek şekilde ön ısıtmaya tabi tutulur.
- IV. Kartuş ısıtıcılara, AC güç kaynağı ile besleme yapılarak, istenilen ısı güç değeri ayarlanır. DC güç kaynağı ile de basınç sensörleri aktifleştirilir.
- V. Deneylerde ısı güç 90 W'dan 180 W'a kademeli olarak (10 W) arttırılır. Her bir ısı güç değerinde, test bölgesindeki bütün sıcaklık sensörlerinin kararlı hale gelmesi beklenir. İlgili süreç veri toplama cihazı ile takip edilir ve kararlı hal koşullarında tüm ölçümler kaydedilir.
- VI. Çalışma parametreleri değiştirilerek yukarıdaki prosedür tekrarlanır.

2.4. Hesaplama Prosedürü

2.4.1. Isı Kaybı Kalibrasyonu

Isı kaybı kalibrasyonu işlemi sırasında test bölgesine iş akışkanı gönderilmez. Sistem boş iken test bölgesine ısı güç uygulanır. 2 W'dan başlayan ısı güç, 1 W aralıkları ile 7 W'a kadar uygulanmıştır. Verilen bir ısı güç değeri için ısı alıcı boyunca yerleştirilen yedi farklı termoelemanlardan okunan sıcaklık değerleri kararlı hale ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) gelmesi beklenir. Kararlı hale ulaştığında, termoelemanlardan okunan sıcaklık değerlerin aritmetik ortalaması ile ortam sıcaklığı arasındaki fark, ilgili ısı yüküne karşılık gelecek şekilde kaydedilir. Her bir ısı güçte tekrarlanan bu prosedür sonucunda ısı kalibrasyon eğrisi elde edilir. Beş ısı alıcıda aynı işlemler uygulanmış olup, her bir ısı alıcıya ait kalibrasyon eğrileri Şekil 8'de verilmiştir. Isı kaybının belirlenmesinde takip edilen bu prosedür, literatürde (Kuo ve Peles, 2009; Mirmanto; 2014; Law ve Lee, 2015) yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 8. Tüm ısı alıcılarına ait ısı kaybı grafikleri

2.4.2. Isı Transferi

Beş ısı alıcı da aynı giriş kesit alanına sahiptir. Böylece, verilen bir kütleli akı değeri için aynı zamanda aynı kütleli debi değeri altında çalışılmış olmaktadır. Kütleli akının belirlenmesinde kullanılan eşitlik aşağıda sunulmuştur:

$$G = \frac{\dot{V} \rho_f}{A_{in}} \quad (2)$$

Burada; $\dot{V}$, akışkanın hacimsel debisini, ρ_f , akışkanın yoğunluğunu ve A_{in} ısı alıcılarının toplam giriş kesit alanını ifade etmektedir. Efektif ısı akısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$q''_{eff} = \frac{q_{ap} - q_{loss}}{A_p} \quad (3)$$

Burada, q''_{eff} , efektif ısı akısını, q_{ap} , uygulanan ısı gücü, q_{loss} ısı kaybını, A_p ise ısıtıcı bloğun üst platform alanını ifade etmektedir. Isıtıcı bloğun üst platform alanının uzunluğu ve genişliği, sırasıyla, ısı alıcıların etkin uzunluğu (L_e) ve genişliğine (W_e) eşittir. Bunun için A_p 'nin açık formu aşağıdaki gibidir.

$$A_p = W_e \times L_e \quad (4)$$

Yerel ısı transfer katsayısı aşağıdaki eşitlik ile elde edilir:

$$h_{tp} = \frac{q_{ap} - q_{loss}}{A_t (T_w - T_f)} \quad (5)$$

Burada, T_w , duvar sıcaklığı ve T_f akışkan sıcaklığıdır. Doymuş kaynama etkisinin daha fazla olmasından dolayı çıkışa en yakın (yedinci) termoelemanına karşılık gelen konumdaki yerel değerler dikkate alınmıştır. İlgili yaklaşım literatürde yaygındır (Law ve Lee, 2016; Deng vd., 2017). Yerel duvar sıcaklığı, tek boyutlu ısı iletimi kabulü ile aşağıdaki gibi elde edilir:

$$T_w = T_{st} - q''_{eff} \left(\frac{l_c}{k} \right) \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitlikte, T_{st} , yedinci termoeleman dan okunan sıcaklık değeri; l_c , termoeleman ile kanal tabanı arasındaki düşey mesafeyi ve k , ısı alıcının ısı iletim katsayısını temsil etmektedir. Burada, T_f ile gösterilen akışkan sıcaklığı, akışkanın tek (aşırı soğuk) veya iki fazlı (doymuş) bölgede olması durumuna göre farklı şekillerde hesaplanır. İlgili bölgeleri birbirinden ayıran kriter yerel kuruluk derecesinin (x_e) sıfır değeridir.

$$T_f = T_{f,in} + \frac{q''_{eff} W_e z}{\dot{m} c_p} \quad (\text{Aşırı soğuk bölge}) \quad (7)$$

$$T_f = T_{sat} \quad (\text{Doymuş bölge}) \quad (8)$$

Burada, $T_{f,in}$, akışkan giriş sıcaklığını, z , mikro kanal girişinden ilgili termoeleman a kadar olan mesafeyi; $\dot{m}$, akışkanın kütle sel debisini; c_p , akışkanın özgül ısısını ve T_{sat} , yerel doyma sıcaklığını ifade etmektedir. Yerel doyma sıcaklığının değeri, yerel doyma basıncına göre belirlenir. Giriş ve çıkış basıncı arasında lineer interpolasyon yapılarak yerel doyma basıncı hesaplanır ve bu değere karşılık gelen yerel doyma sıcaklığı belirlenir (Balasubraminian vd., 2013; Wan vd. 2017).

Isı alıcılar kanatçıklı yapıya sahiptir. Bu nedenle, ısı transfer katsayısının belirlenmesi sürecinde, ilgili ısı alıcının toplam ısı transfer alanı (A_t) kullanılmış ve kanatçık analizi uygulanmıştır.

$$A_t = A_{uf} + \eta N A_f \quad (9)$$

Kanalların tabanındaki kanatçıksız yüzey alanı, A_{uf} ile; kanatçık verimi η ile, toplam kanatçık sayısı N ile; tek bir kanatçığın ıslak yüzey alanı ise A_f ile gösterilmiştir. Terimlerin açık formları aşağıdaki gibidir:

$$A_f = H_f P_f \quad (10)$$

$$A_{uf} = W_e L_e - N A_{fc} \quad (11)$$

Burada, H_f , kanatçığın yüksekliği, P_f , tek bir kanatçığın kesit çevresi ve A_{fc} , tek bir kanatçığın kesit alanını (üst görünüş olarak, $W_f \times L_f$) ifade etmektedir.

Akış görüntüleme için ısı alıcı üzeri şeffaf polikarbon plaka ile kapatılmıştır. Dolayısıyla, kanalların üst yüzeyinin ısı iletim katsayısı (yaklaşık $0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), ısı alıcı malzemesi olan bakıra kıyasla oldukça düşüktür. Bunun için adyabatik uç kabulü uygulanmıştır. Bu bağlamda, kanatçık verimi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{\tanh(m_f H_f)}{m_f H_f} \quad (12)$$

Burada, m_f , kanatçık parametresidir. Aşağıda açık formu verilmiştir.

$$m_f = \sqrt{\frac{h_p P_f}{k A_{fc}}} \quad (13)$$

Isı transfer katsayısını elde etmek için yukarıdaki eşitlikler kullanılarak iteratif yaklaşım kullanılır. Bu yaklaşım oldukça yaygın bir kullanımdır (Law ve Lee, 2016; Wan vd., 2017).

Yerel kurulum derecesinin açık formu aşağıdaki gibidir.

$$x_e = \frac{1}{h_{fg}} \left(\frac{q_{eff}'' A_p L_n}{\dot{m} L} - c_p (T_{sat} - T_{f,in}) \right) \quad (14)$$

Burada, h_{fg} , buharlaşma gizli ısısını ve L_n , kanal girişinden ilgili termoelemanına kadar olan mesafeyi ifade etmedir.

Giriş basıncı P_i , giriş haznesinde mutlak basınç sensörü vasıtasıyla; basınç düşümü (ΔP) de giriş haznesi ve çıkış haznesiyle bağlantılı olan diferansiyel basınç sensörü yardımıyla doğrudan ölçülmektedir.

Hesaplanan ve ölçülen büyüklüklerin belirsiz düzeylerinin elde edilmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ölçülen büyüklükler, ilgili ölçüm cihazının üretici firma katalog verileri veya kalibrasyon sonucu elde edilen yeni belirsizlik düzeyleri ile belirlenmiştir. Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen yöntem ile hesaplanan büyüklüklerdeki belirsizlik bulunmuştur. Ölçülen büyüklüklerden hacimsel debi için, akış ölçer hassas bir ölçekli kap ile kalibre edilmiştir. Sıcaklık ölçümünün kalibrasyonunda ise sabit sıcaklık banyosu kullanılmıştır. Aşağıdaki tabloda hesaplanan/ölçülen parametrelere ilişkin belirsizlik düzeyleri verilmiştir.

Tablo 2. Deneysel belirsizlik düzeyleri

Hesaplanan/Ölçülen değerler	Belirsizlik sonuçları		
Sıcaklık (T)	± 0.1 °C		
Giriş basıncı (P_i)	$\pm 0.05\%$ FS		
Basınç düşümü (ΔP)	$\pm 0.08\%$ FS		
Isıl güç (q_{ap})	$\pm 0.6\%$ RS		
Hacimsel debi ($\dot{V}$)	± 0.2 ml dk ⁻¹		
Kütle akısı (G)	± 2.6 - 2.98%		
Yerel kuruluk derecesi (x_e)	± 1.4 - 12.4%		
Efektif ısı akısı (q_{eff}'')	± 2.74 - 3.16%		
Isı transfer katsayısı (h_{tp})	PW-MCHS ± 1.4 - 3.5%	CT-MFHS ± 1.6 - 5.9%	GD-MFHS ± 2.8 - 26.6% .
	DN-MFHS ± 4 - 33.3%	GS-MFHS ± 1 - 13.2%	

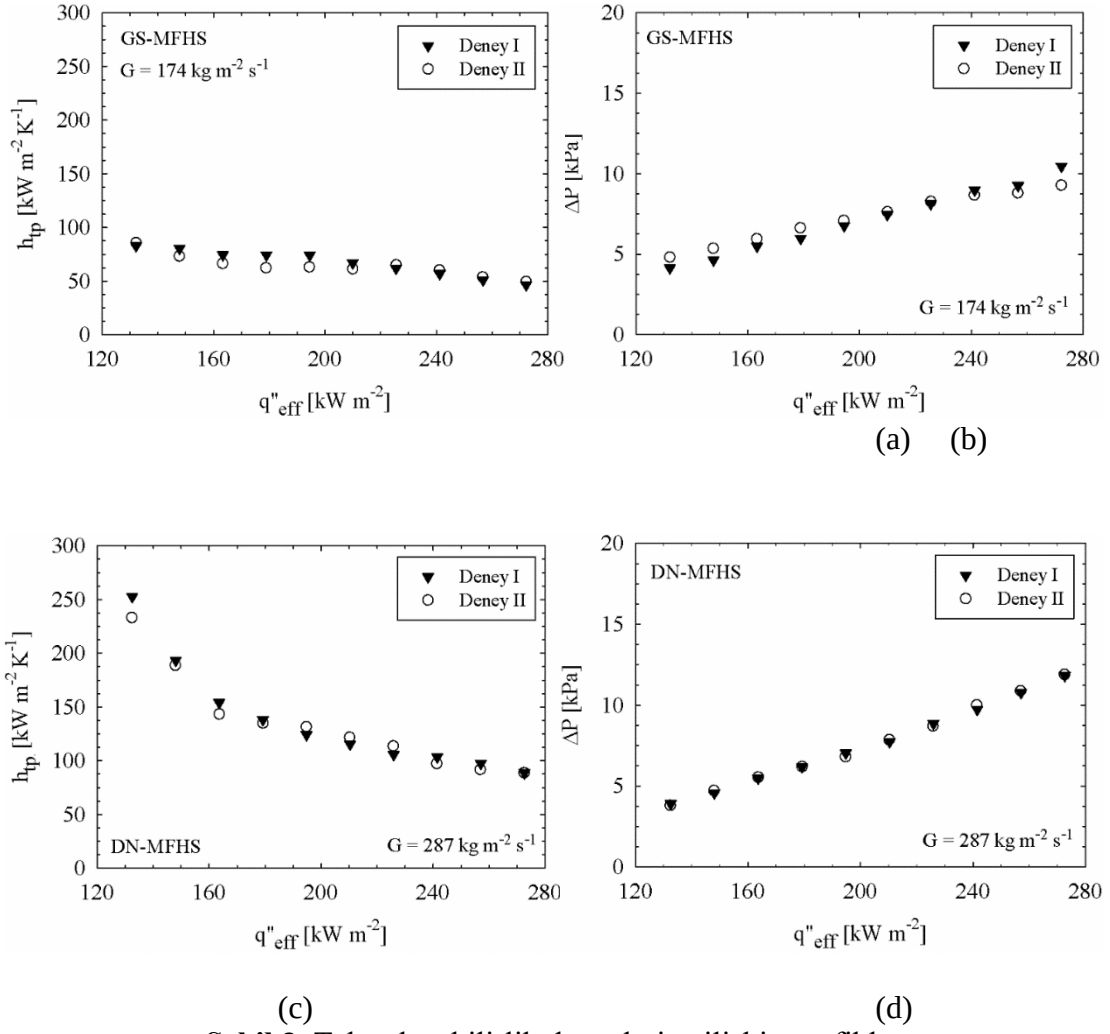
Dipnot: FS: Full scale; RS: Reading scale

2.5. Bulgular

Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, bu tez çalışmasında, beş farklı geometriye sahip mikro kanallı ısı alıcıda, kaynamalı akış ısı transfer karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, 98, 136, 174, 212, 250 ve 287 kg m⁻² s⁻¹ olmak üzere altı farklı kütle akısında ve 10 W'lık aralıklarla 90 W – 180 W arasındaki ısı gücü değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Akışkan giriş sıcaklığı ise yaklaşık 75°C'dir. Yapılan çalışmalarda sadece doymuş kaynama koşulları dikkate alınmış olup, hesaplamalarda çıkışa en yakın termoelemanından alınan sıcaklık ölçümleri kullanılarak ilgili konuma karşılık gelen yerel değerler (ısı transfer katsayısı ve kuruluk derecesi için) hesaplanmıştır. Bu başlık altında, kısa tanımlar eşliğinde, elde edilen bulgular sunulacak olup, bulgulara yönelik detaylı irdeleme sonraki bölümde yapılacaktır. Bu bölüm; tekrarlanabilirlik deneyleri, kaynama eğrileri, doymuş kaynamalı akış koşullarında ısı transfer katsayısı, doymuş kaynamalı akış koşullarında basınç düşümü, kaynama kararsızlıkları ve akış görüntüleri olmak üzere altı farklı alt başlık altında sunulmuştur.

2.5.1. Tekrarlanabilirlik Deneyleri

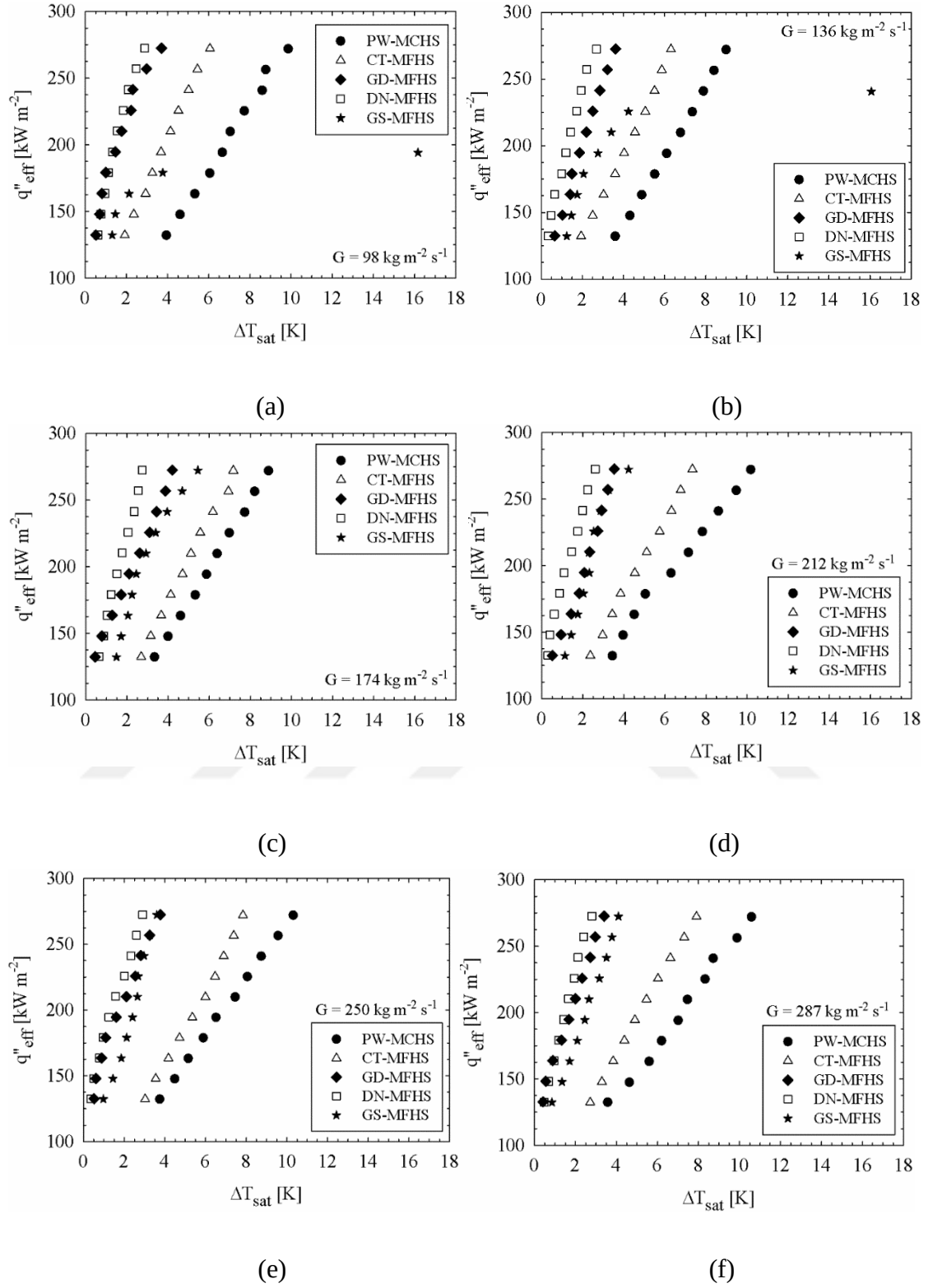
Şekil 9a-d'de, mikro oyuklu (DN-MFHS) ve kaydırılmış sıralı (GS-MFHS) mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıları için tekrarlanabilirlik deney sonuçları sunulmuştur. Her bir şekilde, kendi içinde, aynı koşullar altında gerçekleştirilen iki farklı deneye ait eğri yer almaktadır. Şekiller, ısı transfer katsayısının ve basınç düşümünün efektif ısı akısı ile değişimi üzerinden sunulmuştur. Şekil 9a-d'de, farklı çalışma koşullarındaki durumu ortaya koyabilmek için farklı ısı alıcı tiplerine ve kütle akılarına ait sonuçlar paylaşılmıştır.



Şekil 9. Tekrarlanabilirlik deneylerine ilişkin grafikler

2.5.2. Kaynama Eğrileri

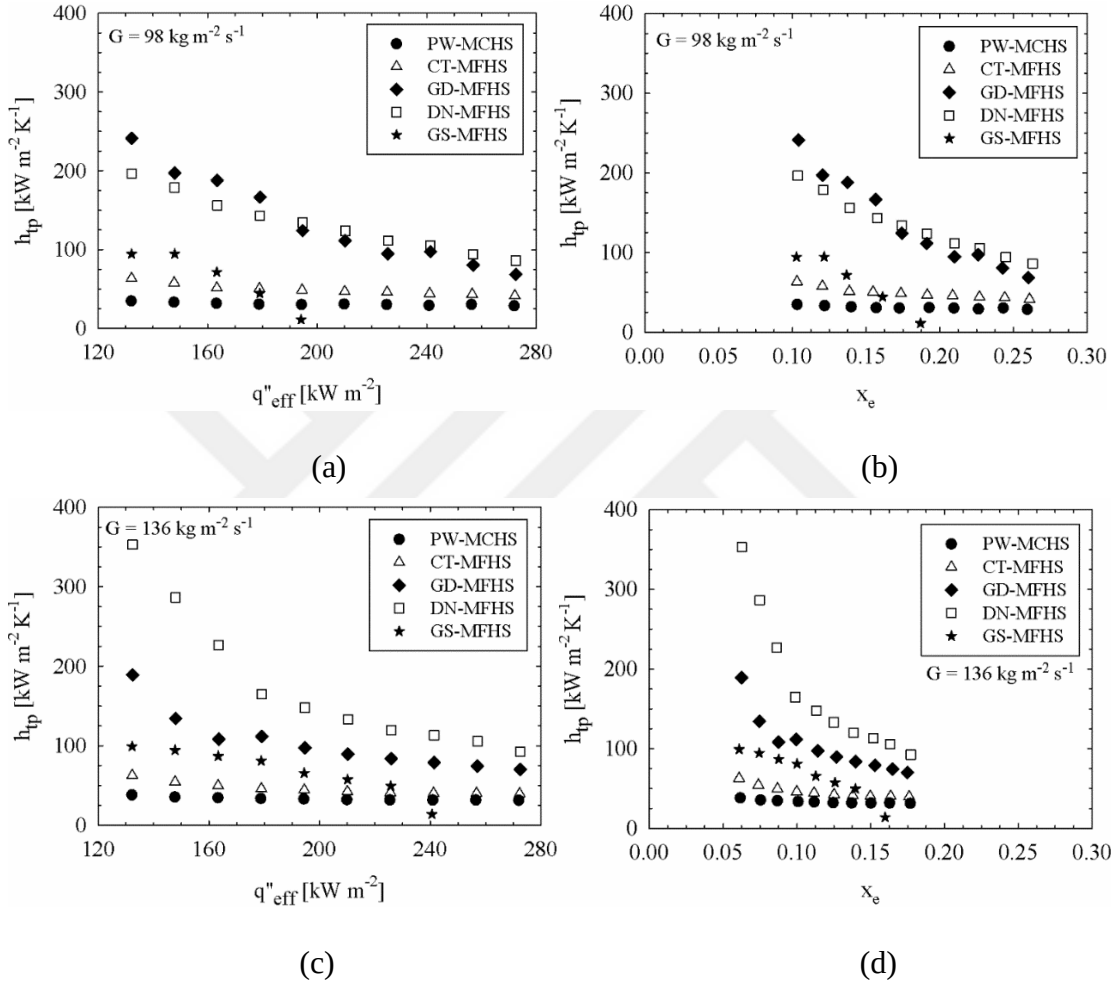
Isı alıcıların en önemli performans göstergelerinden biri kaynama eğrisidir. Tez kapsamında incelenen tüm ısı alıcılarına ait kaynama eğrileri, altı farklı kütle akısı için karşılaştırmalı olarak Şekil 10a-f’de sunulmuştur. Şekil 10’dan görüldüğü üzere, kaynama eğrileri duvar kızma farkı (ΔT_{sat}) ile efektif ısı akısı (q''_{eff}) arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



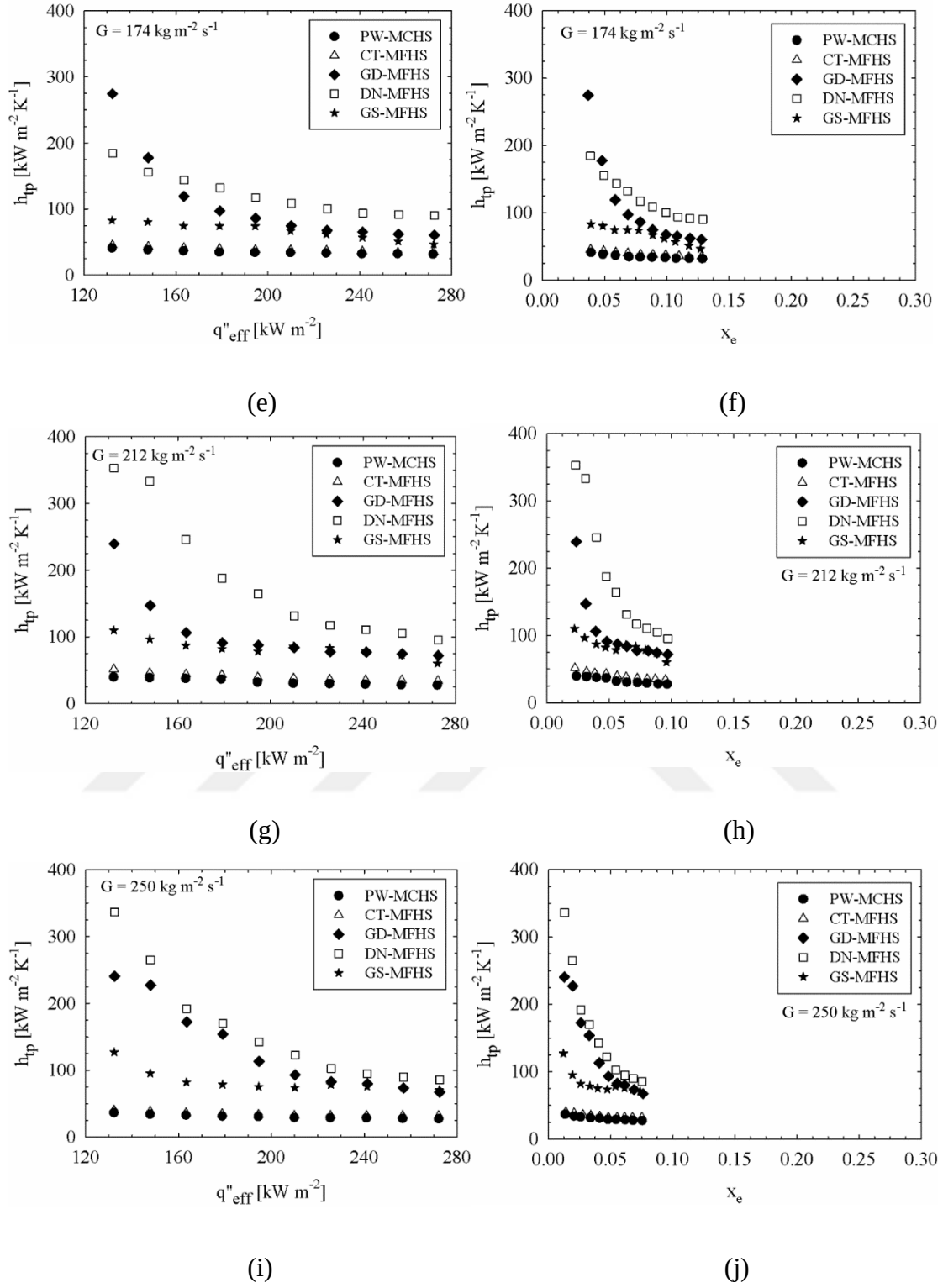
Şekil 10. Farklı kütle akıları için kaynama eğrileri

2.5.3. Doymuş Kaynamalı Akış Koşullarında Isı Transfer Katsayısı

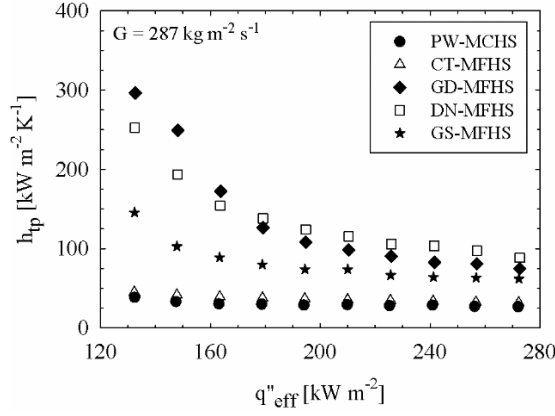
Doymuş kaynamalı akış koşullarında ısı transfer katsayısının, efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimini gösteren grafikler Şekil 11’de verilmiştir. Beş farklı ısı alıcıya ait grafikler, altı farklı kütle akısı için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Şekil 11a-l).



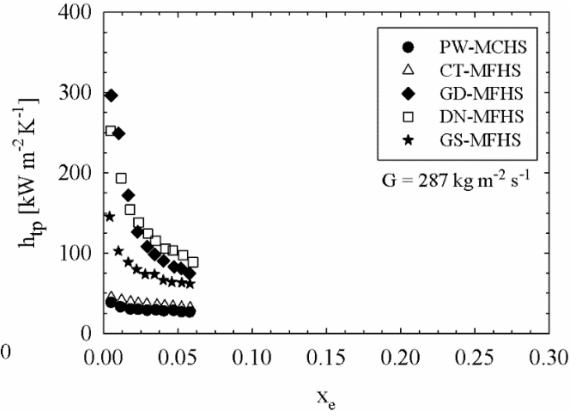
Şekil 11. Farklı kütle akıları için iki faz ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi



Şekil 11 (Devam). Farklı kütle akıları için iki faz ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi



(k)

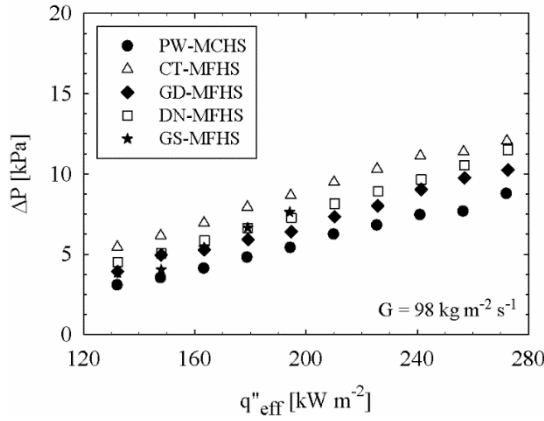


(l)

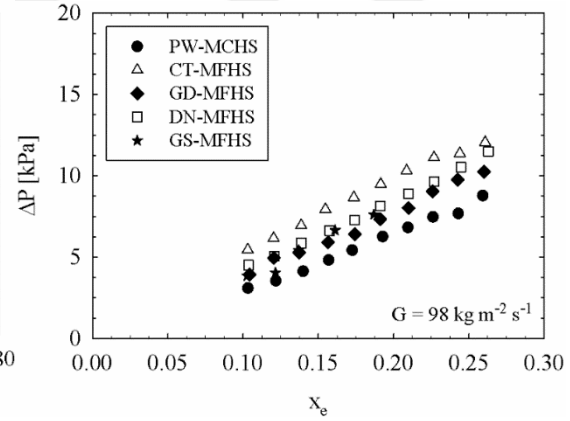
Şekil 11 (Devam). Farklı kütle akıları için iki faz ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi

2.5.4. Doymuş Kaynamalı Akış Koşullarında Basınç Düşümü

Farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi Şekil 12a-l’de verilmiştir. Şekil 12a-l’de tüm ısı alıcılar için elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

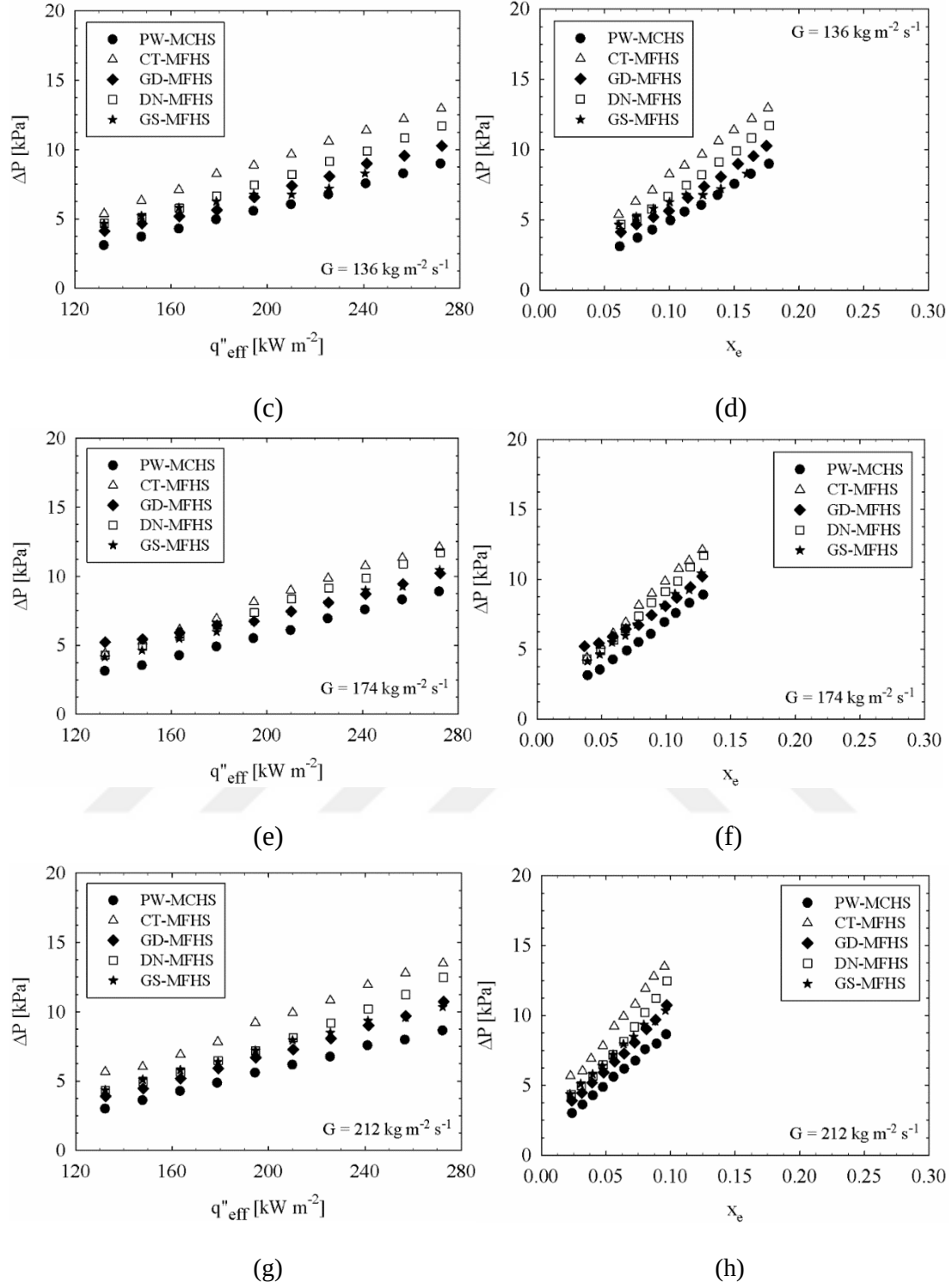


(a)

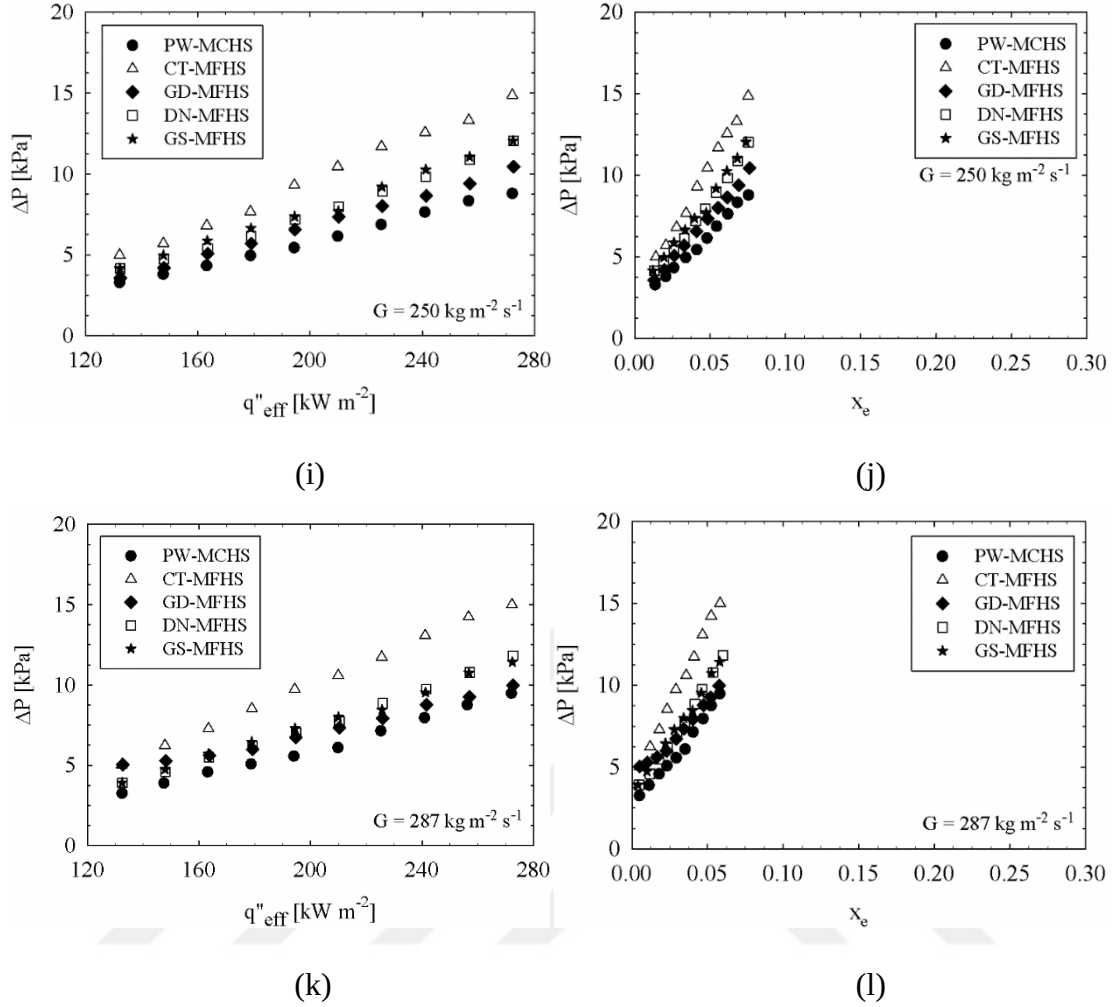


(b)

Şekil 12. Farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi



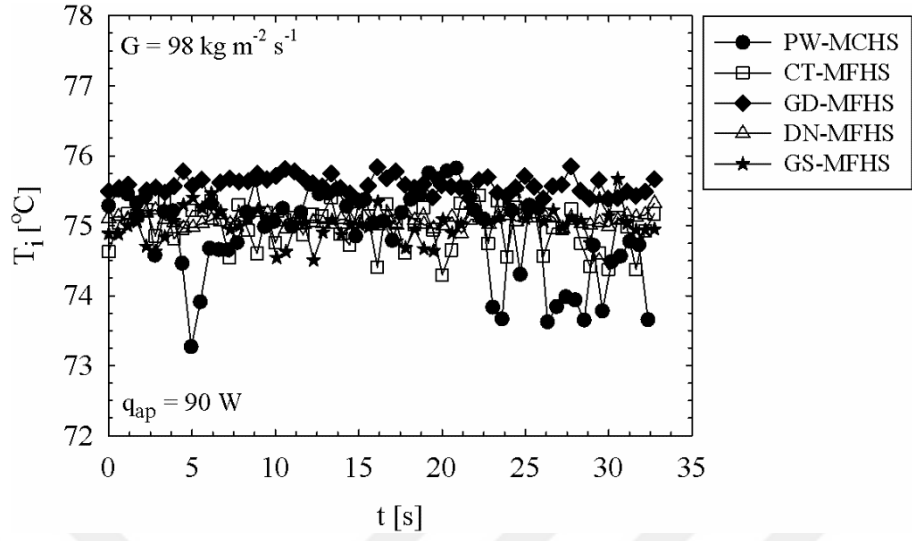
Şekil 12 (Devam). Farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi



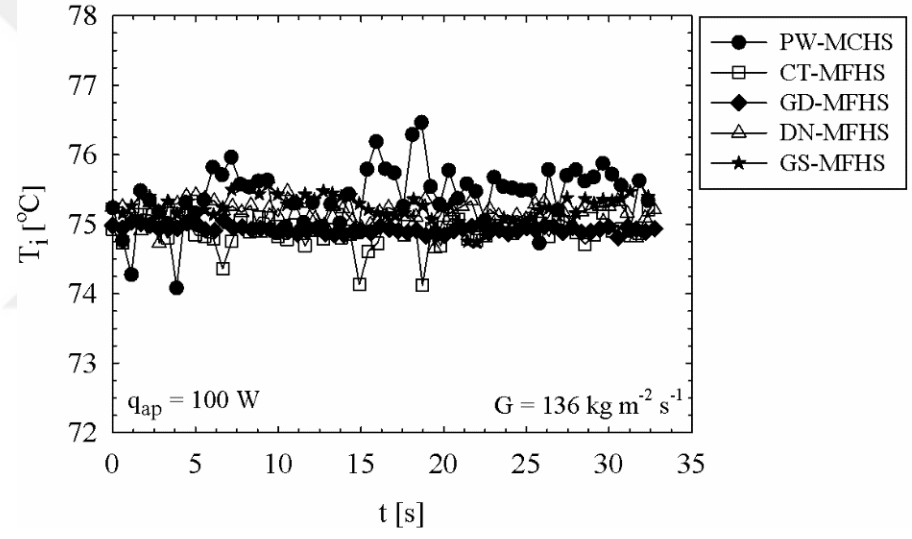
Şekil 12 (Devam). Farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi

2.5.5. Kaynama Kararsızlıkları

Mikro ölçekli akış pasajlarındaki kaynamalı akış, doğası gereği, kararsızlık oluşumuna yatkın bir olayı/süreci kapsar. Oluşan kararsızlıkları incelemek, azaltmak, önlemek ve/veya ihmal edilebilecek düzeye indirmek yapılan çalışmaların temel hedefleri arasında yer almaktadır. Bunun sebebi, kararsızlıkların ısı kontrol sürecindeki performans düşümünün ana sebepleri arasında yer almasıdır. Giriş sıcaklığı ve basıncındaki salınımlar, kararsızlık düzeyinin önemli göstergeleridir. Bu doğrultuda, Şekil 13 ve 14'te, tüm ısı alıcılar için, sırasıyla, giriş sıcaklığı ve giriş basıncının zamanla değişimi sunulmuştur. Zaman bağımlı değişimler, bir ölçüm esnasında veri toplama cihazı aracılığıyla alınan altmış ardışık verinin zamanla değişimini ifade etmektedir. Şekil 13 ve 14'te, görece düşük, orta ve yüksek ısıl güç değerlerini kapsayan çalışma koşullarına yer verilmiştir.

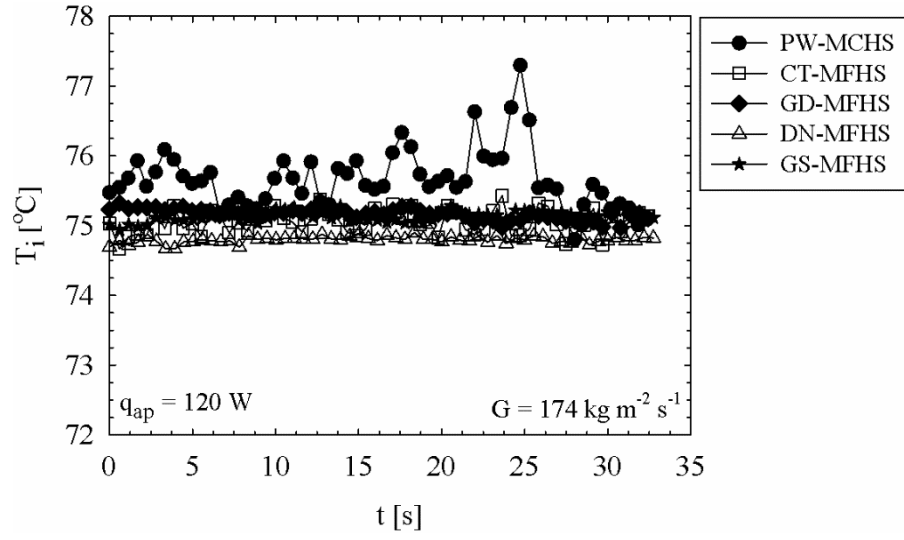


(a)

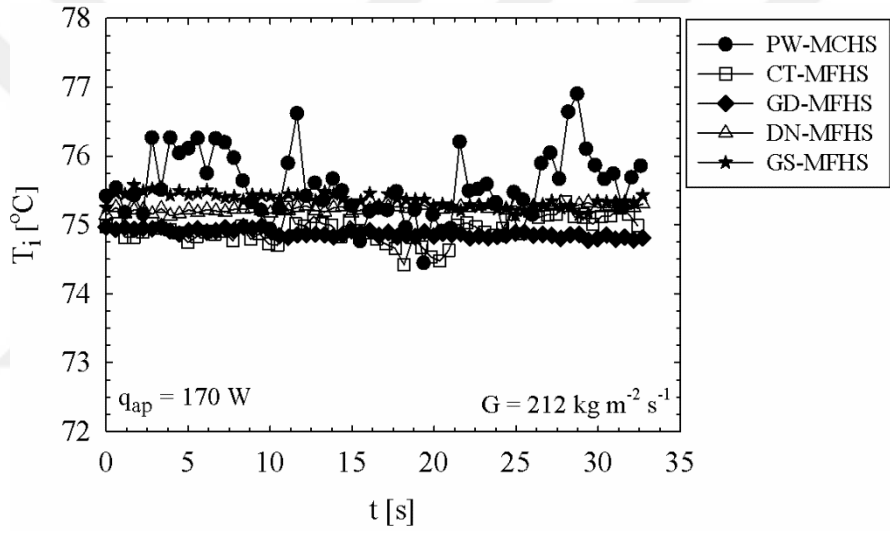


(b)

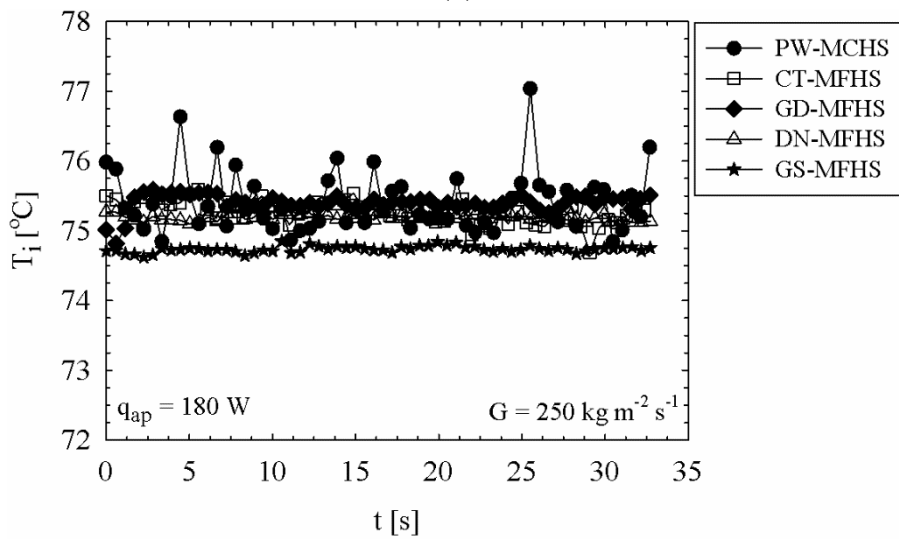
Şekil 13. Farklı kütle akıları için giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi



(c)

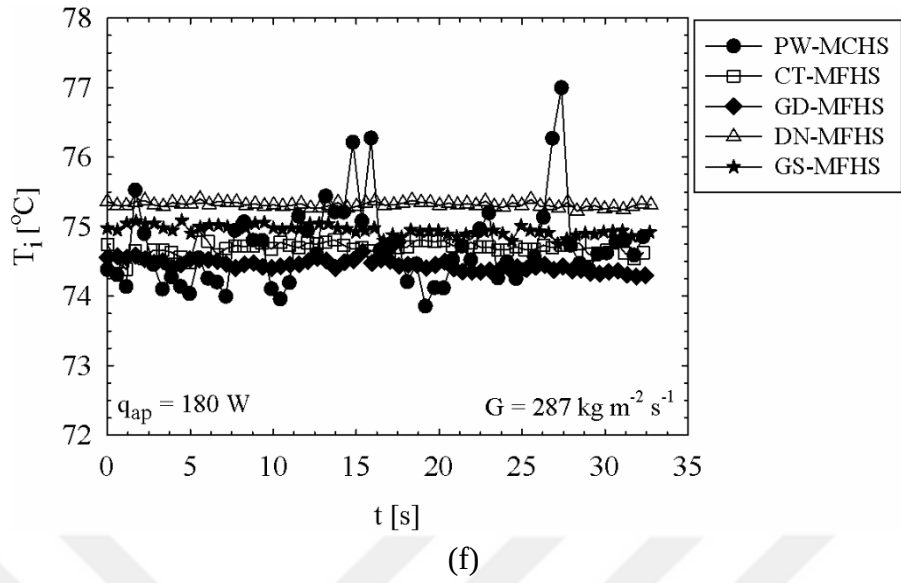


(d)

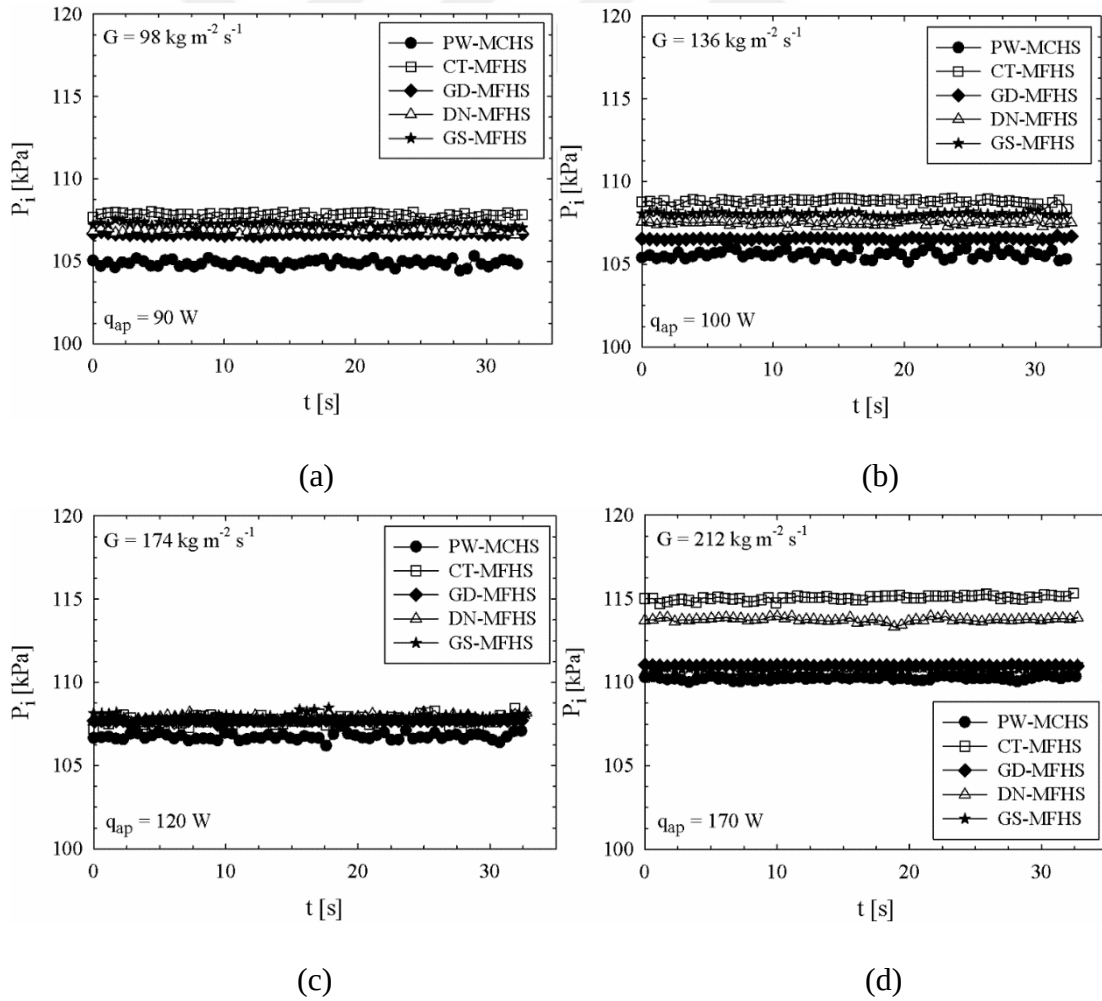


(e)

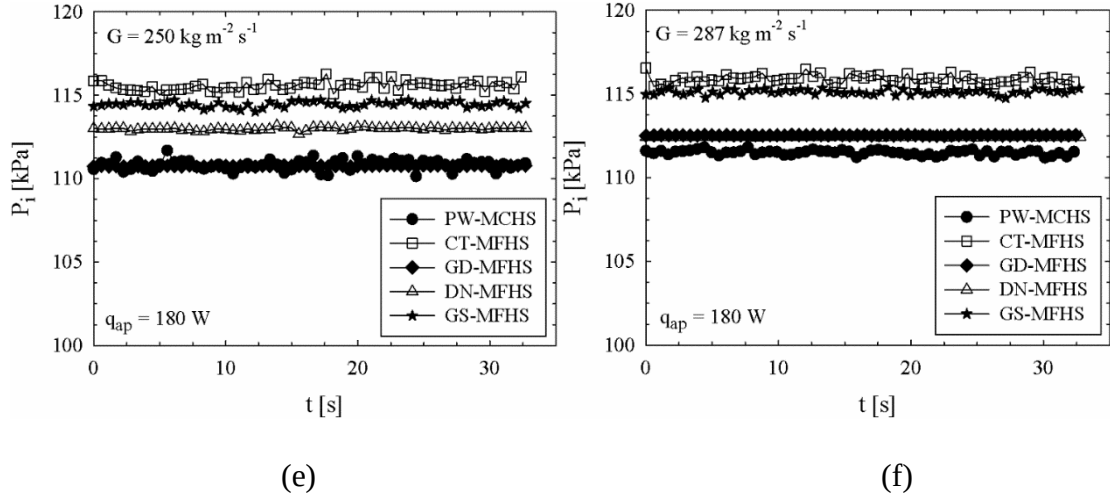
Şekil 13 (Devam). Farklı kütle akıları için giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi



Şekil 13 (Devam). Farklı kütle akıları için giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi



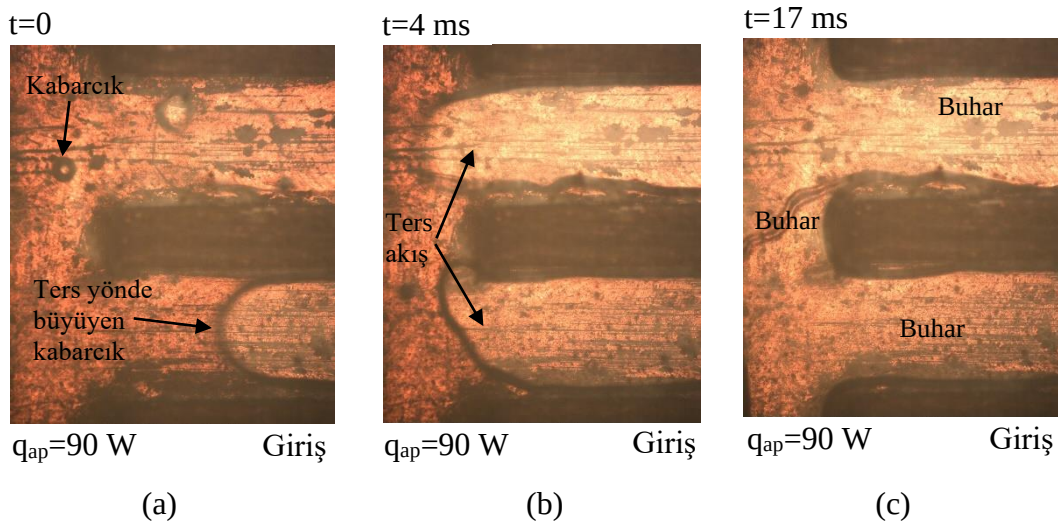
Şekil 14. Farklı kütle akıları için giriş basıncının zamana bağlı değişimi



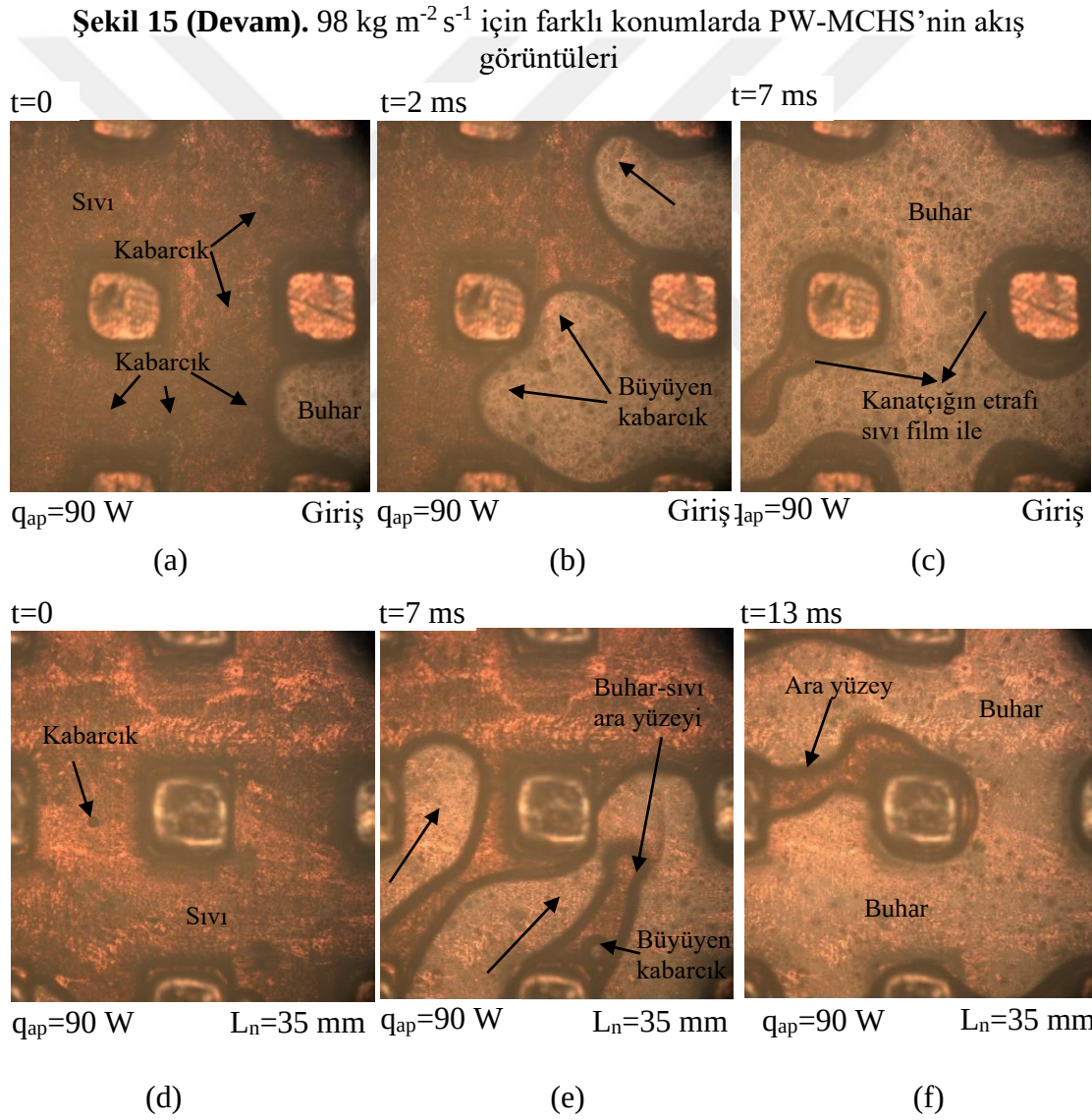
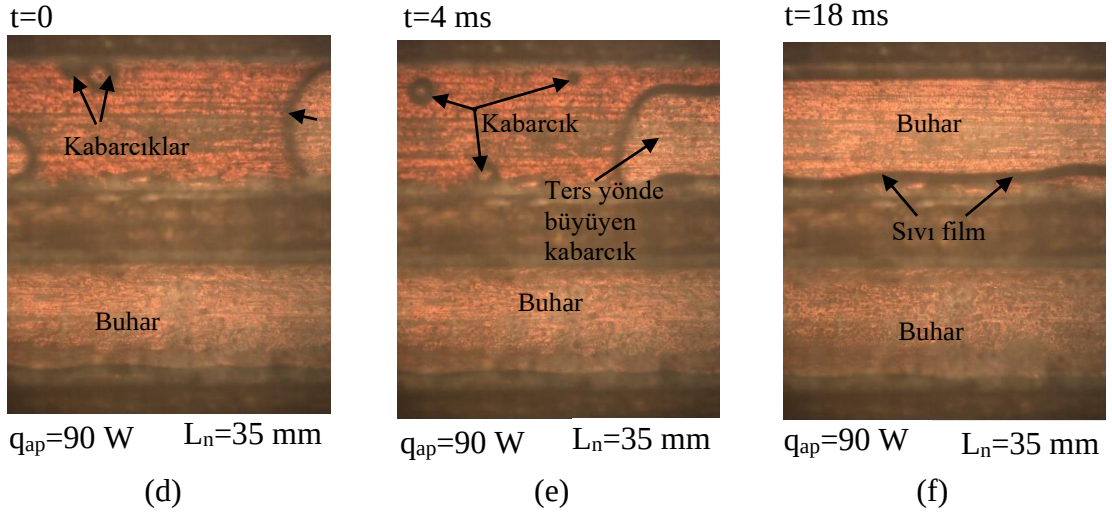
Şekil 14 (Devam). Farklı kütle akıları için giriş basıncının zamana bağlı değişimi

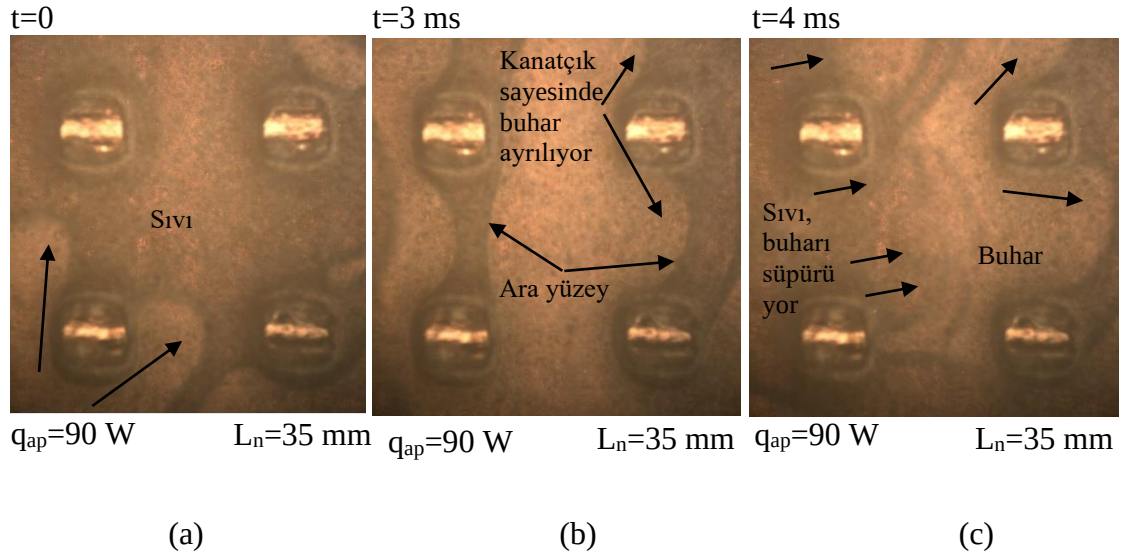
2.5.6. Akış Görüntüleri

Herhangi bir kaynamalı akış sürecini ayrıntılı olarak analiz edebilmek ve/veya fiziksel mekanizmaları irdeleyebilmek için akışın görüntülenmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle, mikrokannallardaki kaynamalı akış olayı mili saniye mertebelerinde değişimleri barındırdığından yüksek hızlı görüntüleme gerektirmektedir. Bu bölümde, yüksek hızlı kamera ile elde edilen ve önemli akış olaylarını karakterize eden bazı akış görüntülerine yer verilmiştir.

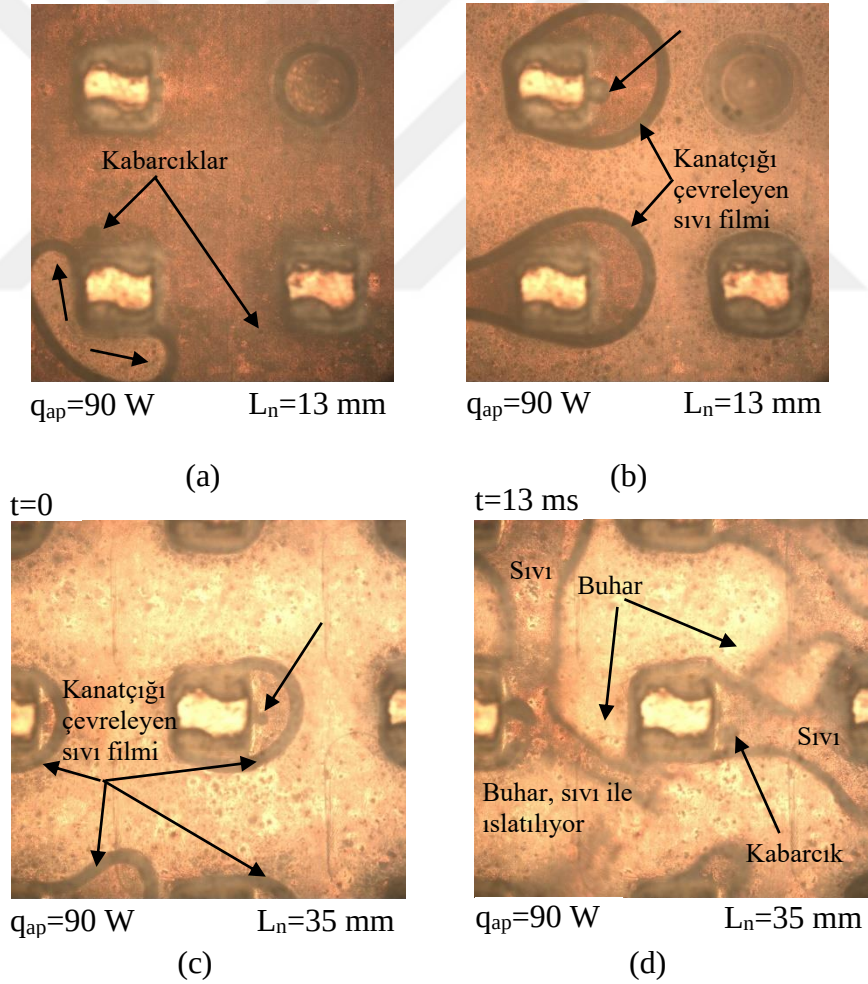


Şekil 15. $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri

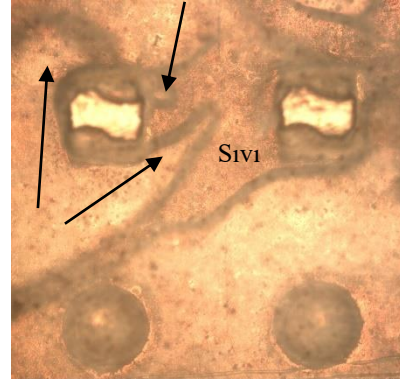




Şekil 17. $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için GD-MFHS'nin akış görüntüleri



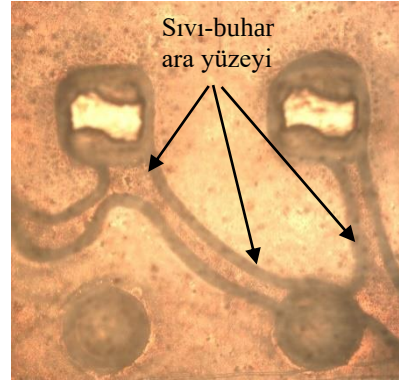
Şekil 18. $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri



$q_{ap}=90 \text{ W}$

$L_n=35 \text{ mm}$

(e)

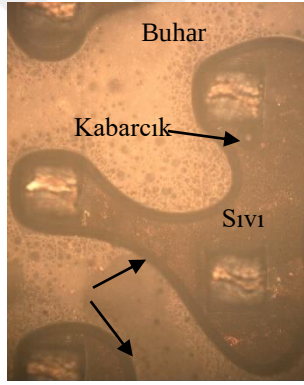


$q_{ap}=90 \text{ W}$

$L_n=35 \text{ mm}$

(f)

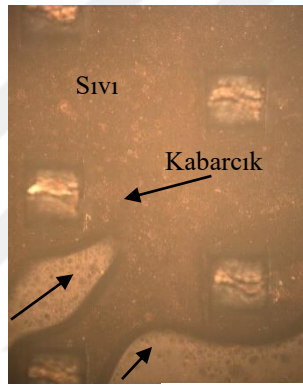
Şekil 18 (Devam). $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri



$q_{ap}=90 \text{ W}$

$L_n=10 \text{ mm}$

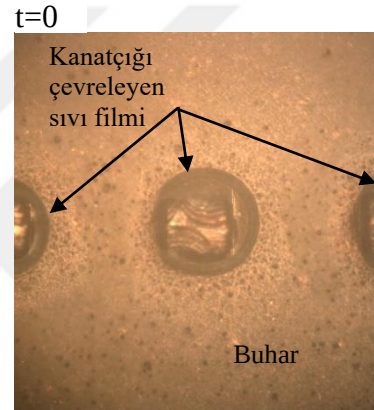
(a)



$q_{ap}=90 \text{ W}$

$L_n=10 \text{ mm}$

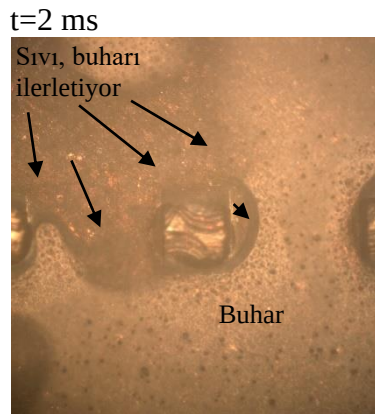
(b)



$q_{ap}=90 \text{ W}$

$L_n=35 \text{ mm}$

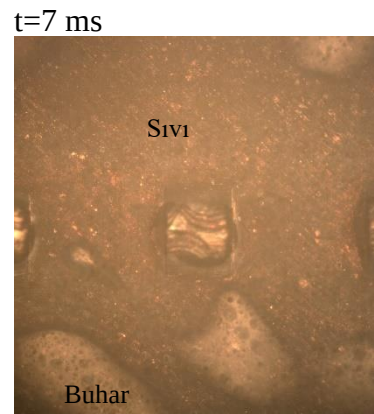
(c)



$q_{ap}=90 \text{ W}$

$L_n=35 \text{ mm}$

(d)

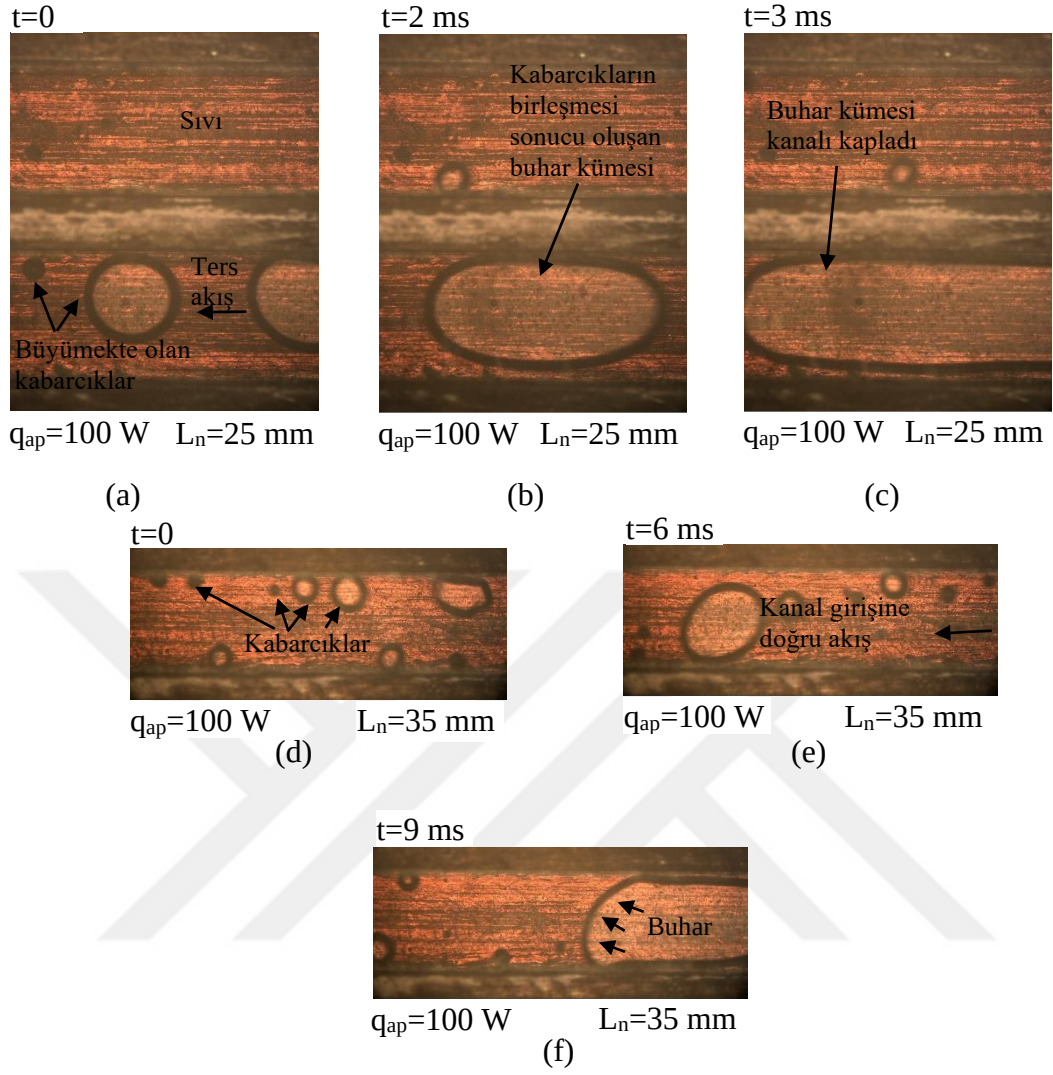


$q_{ap}=90 \text{ W}$

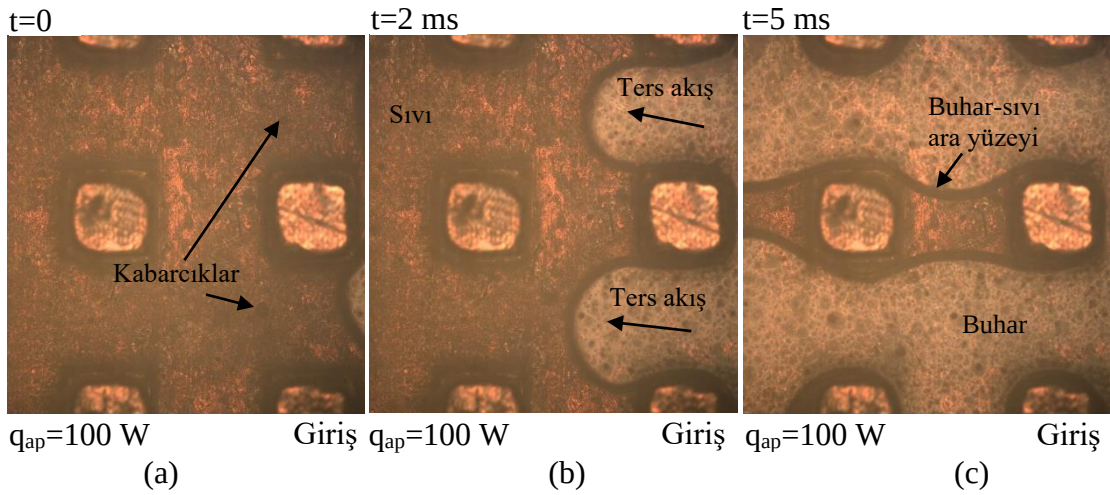
$L_n=35 \text{ mm}$

(e)

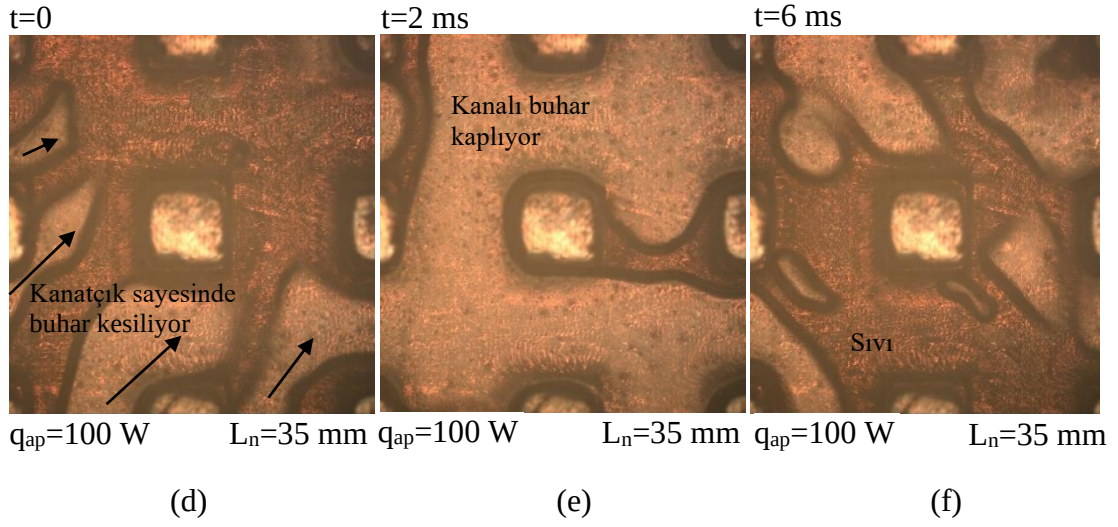
Şekil 19. $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri



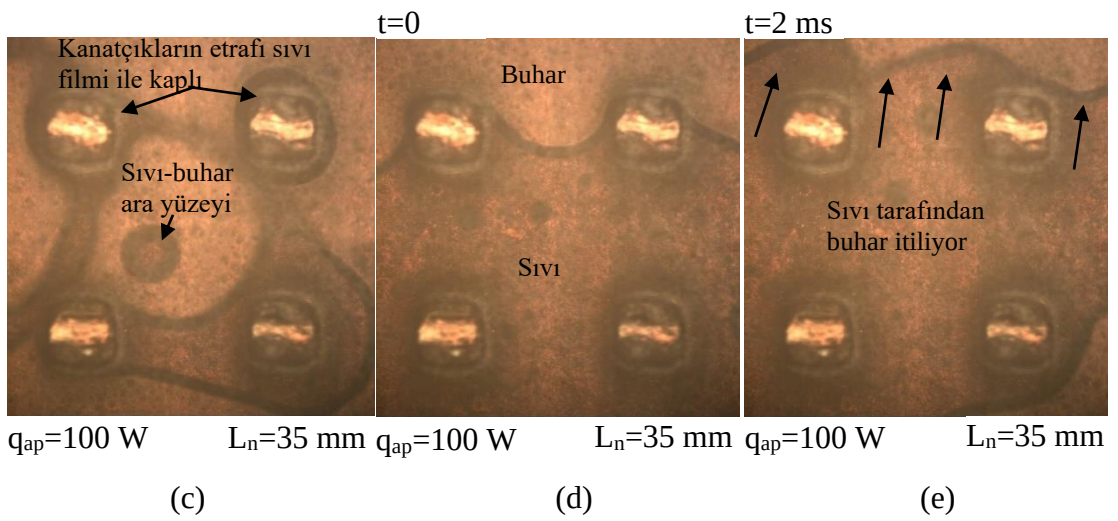
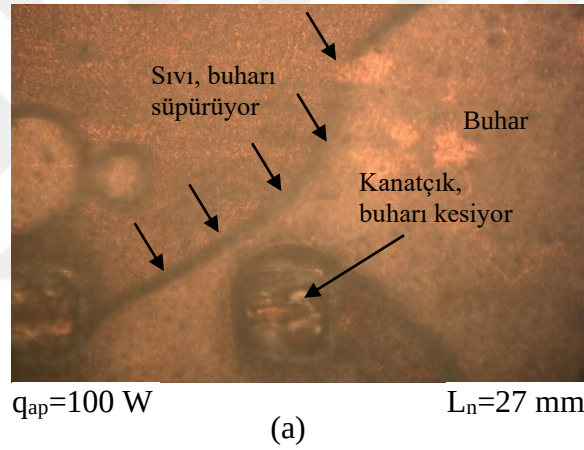
Şekil 20. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri



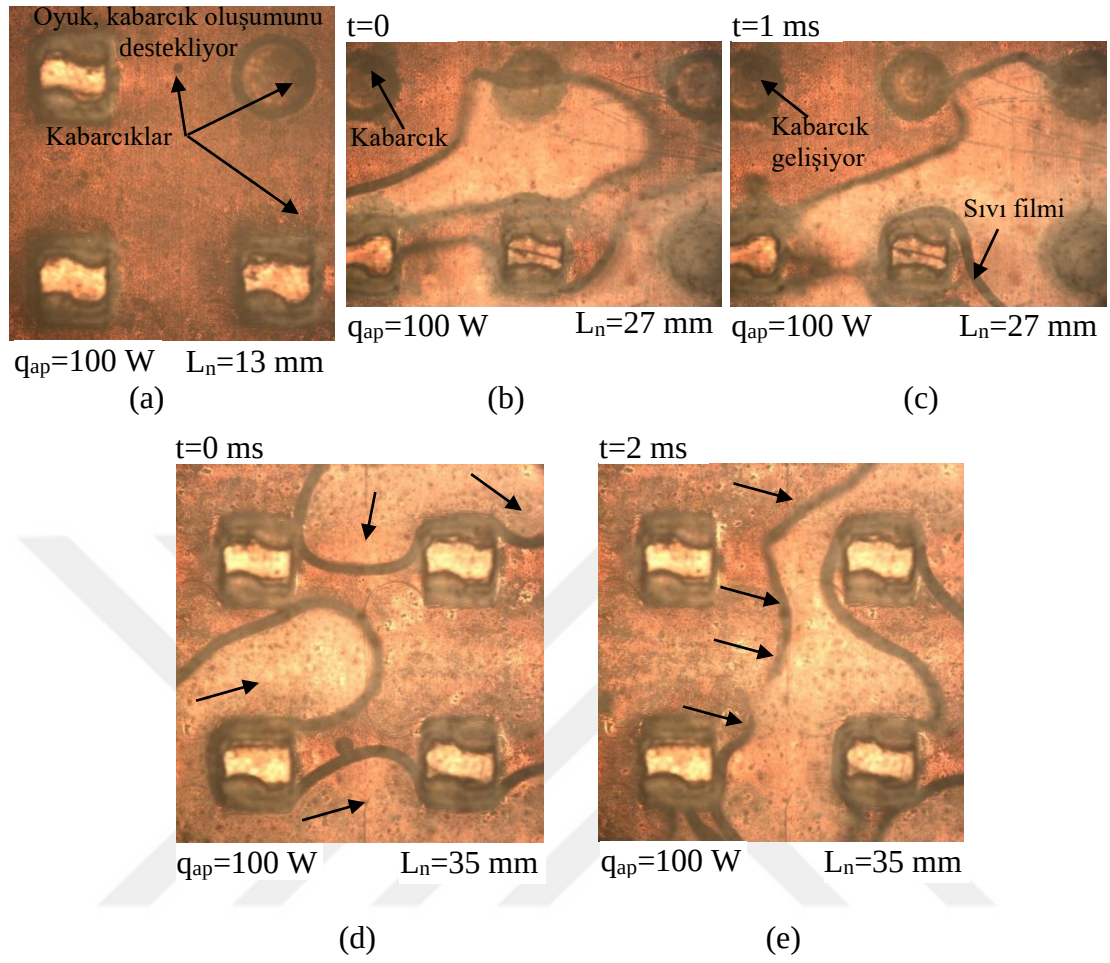
Şekil 21. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri



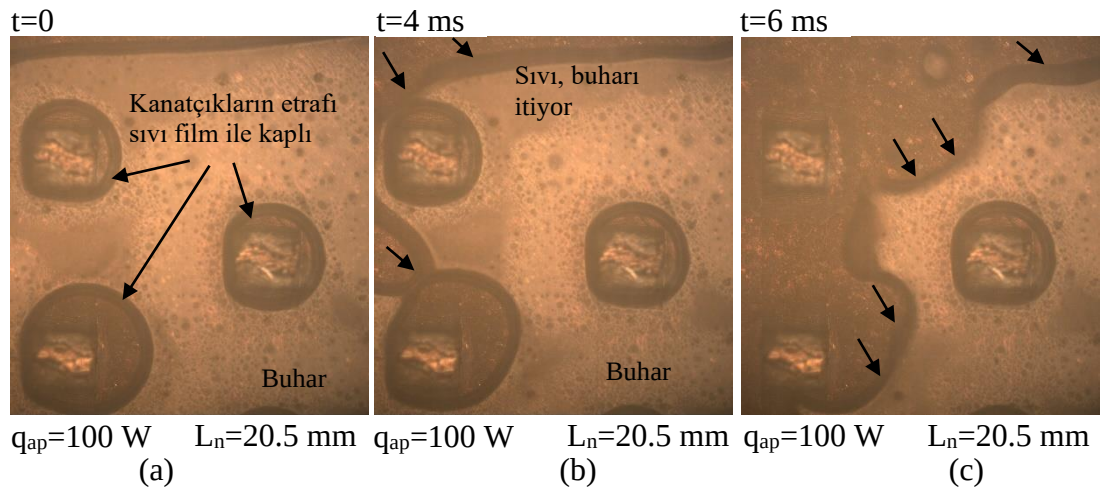
Şekil 21 (Devam). $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri



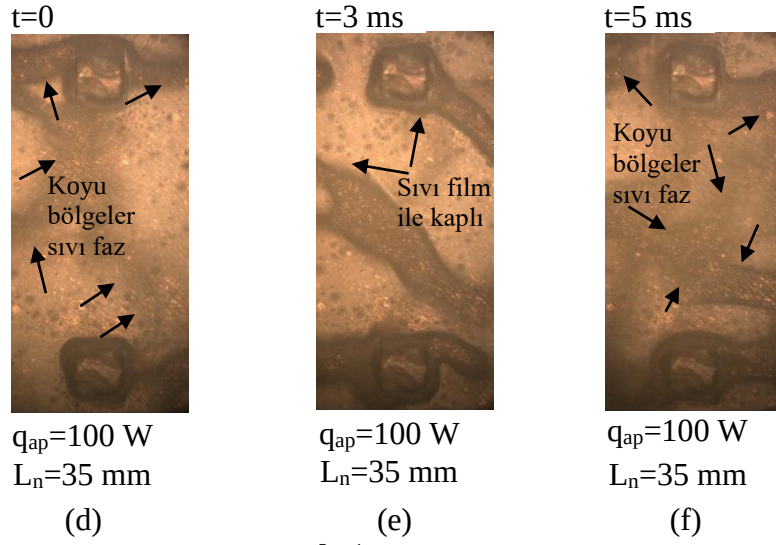
Şekil 22. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri



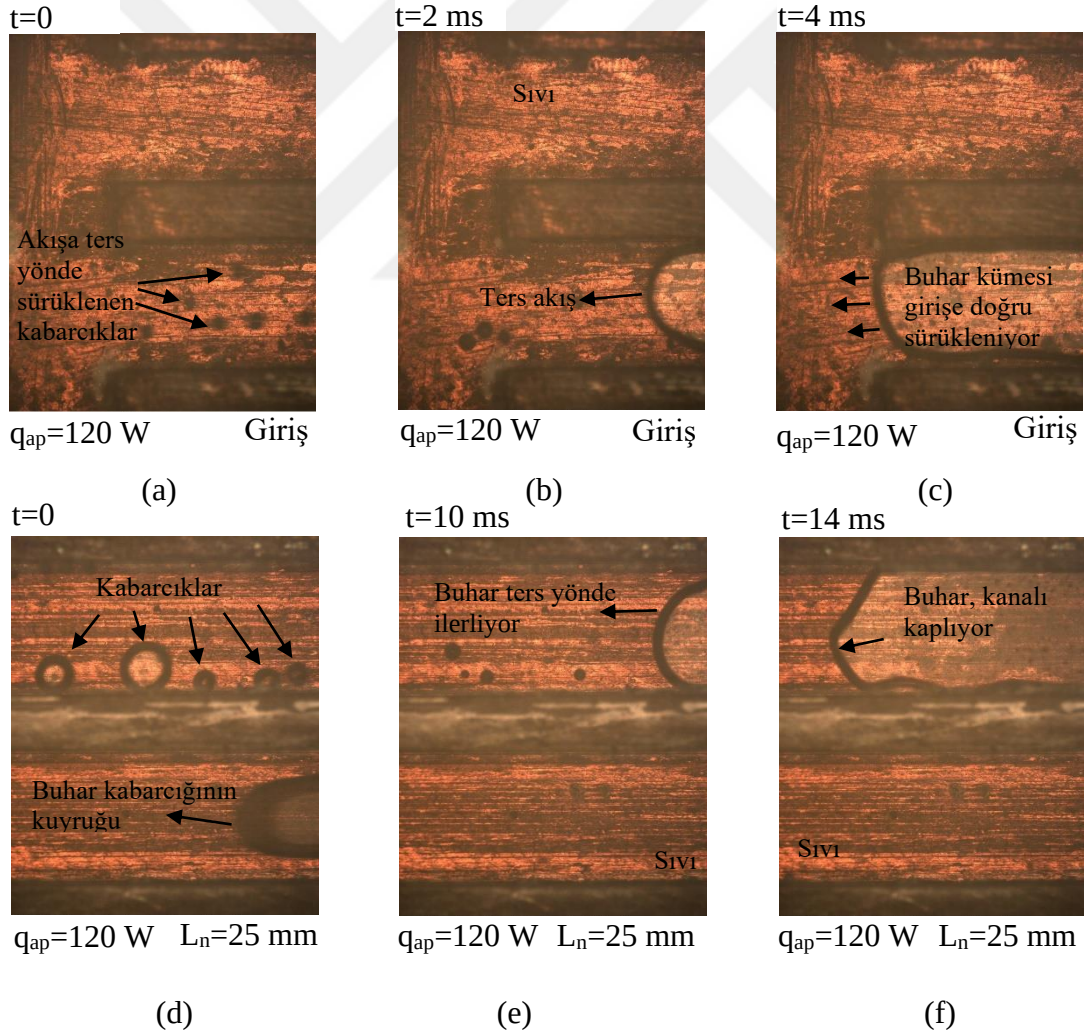
Şekil 23. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri



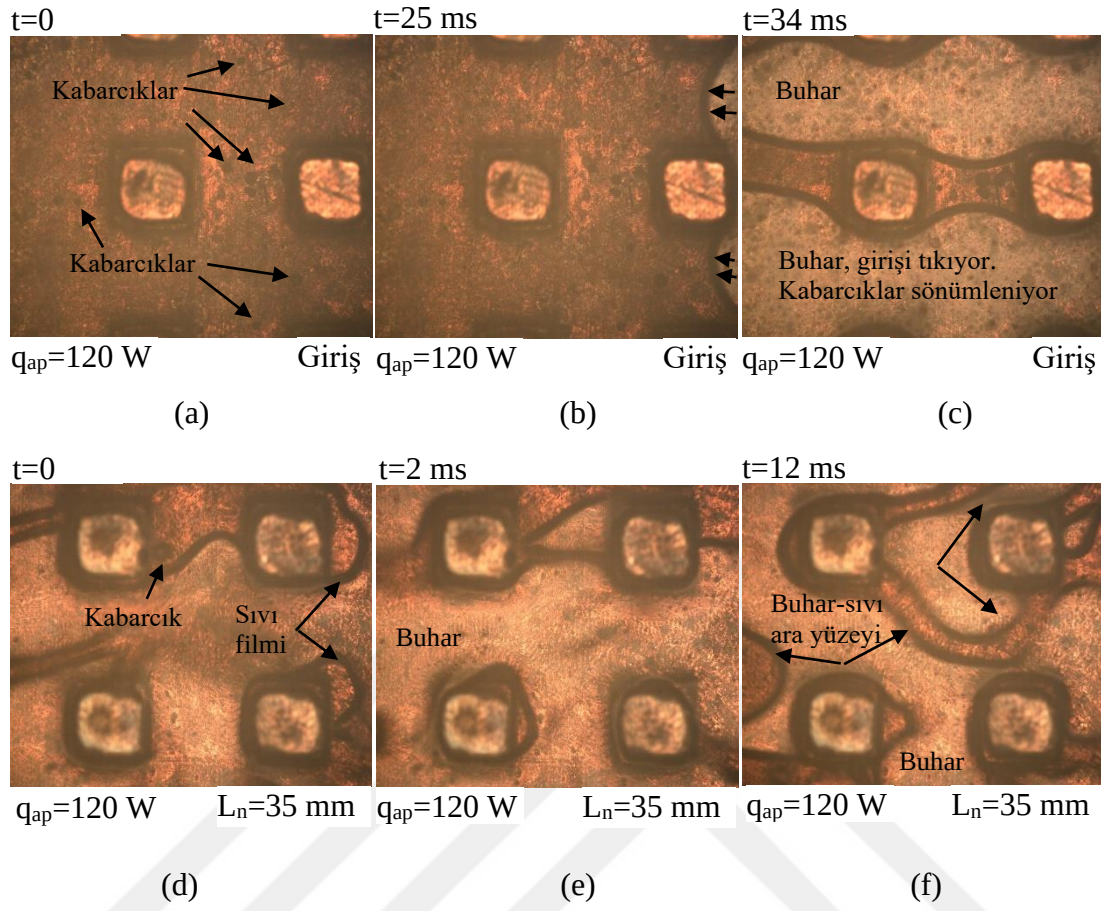
Şekil 24. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri



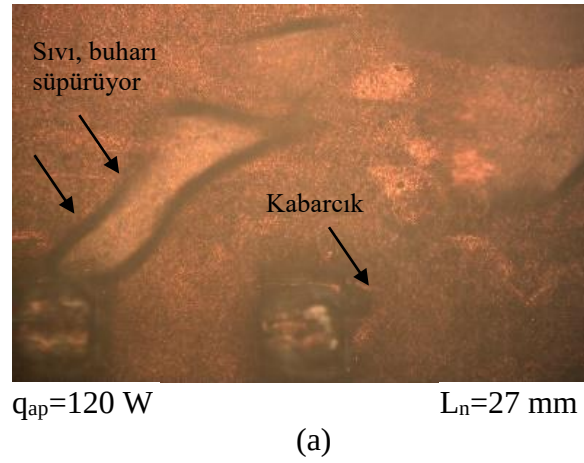
Şekil 24 (Devam). $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri



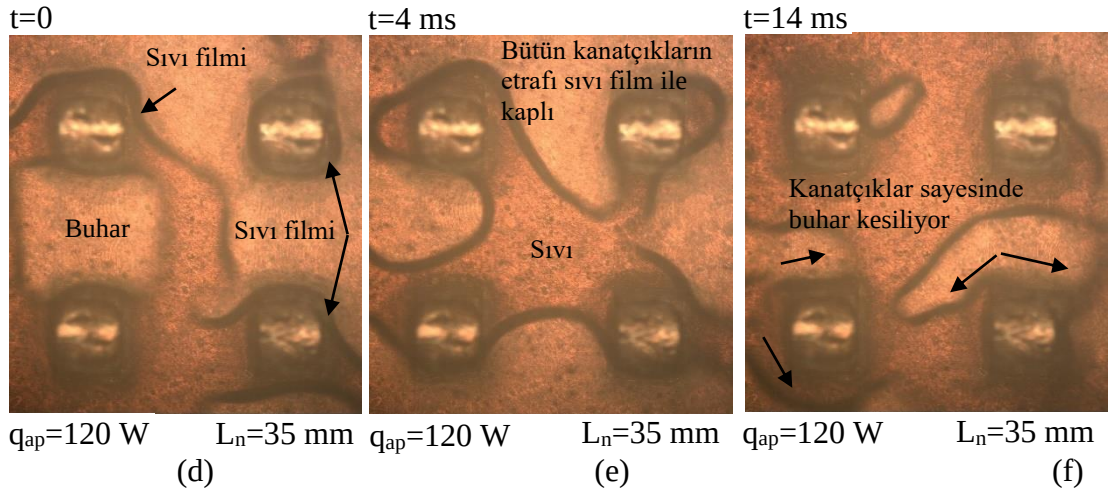
Şekil 25. $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri



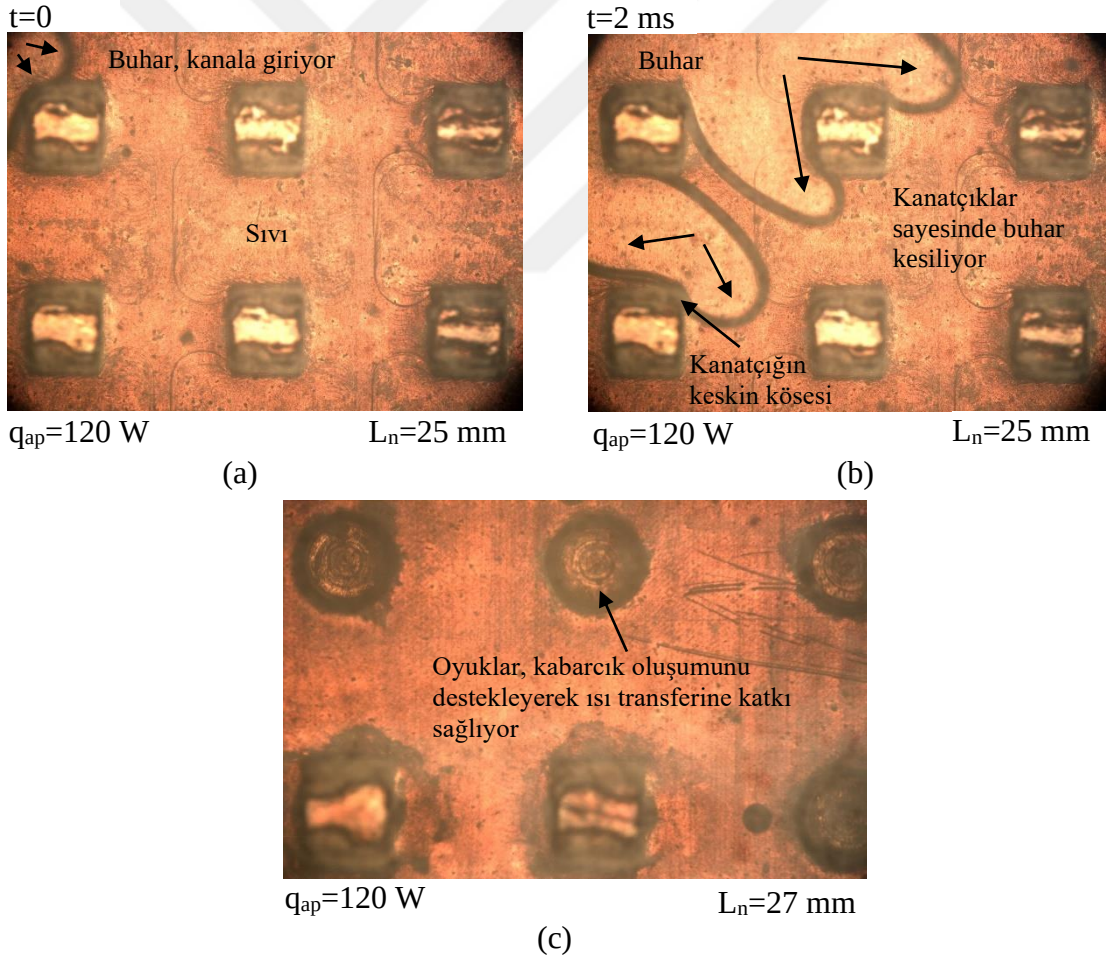
Şekil 26. $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri



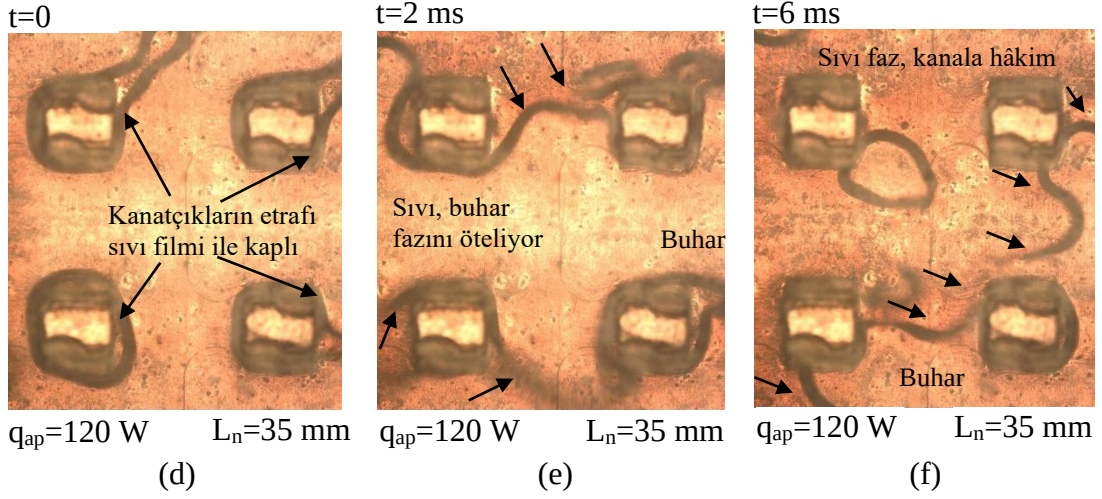
Şekil 27. $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri



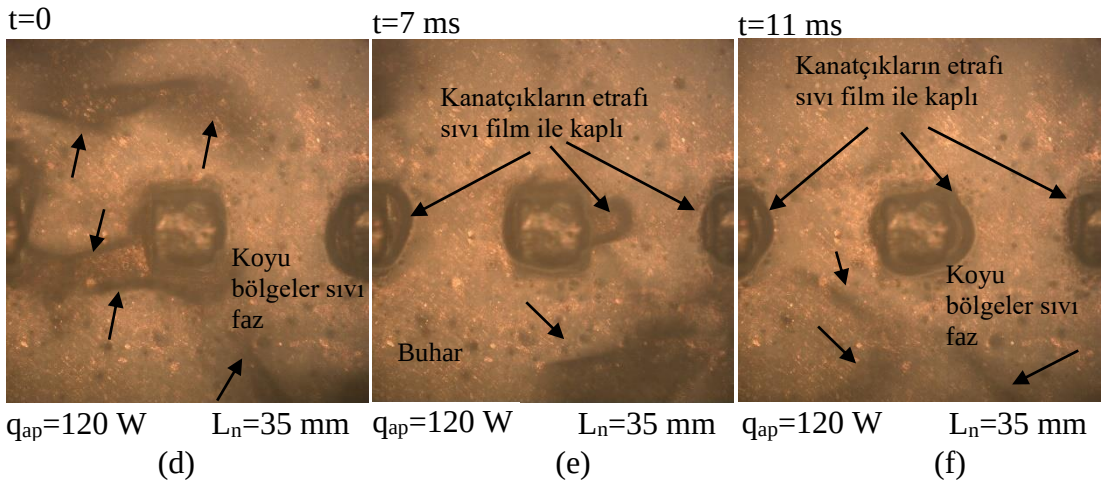
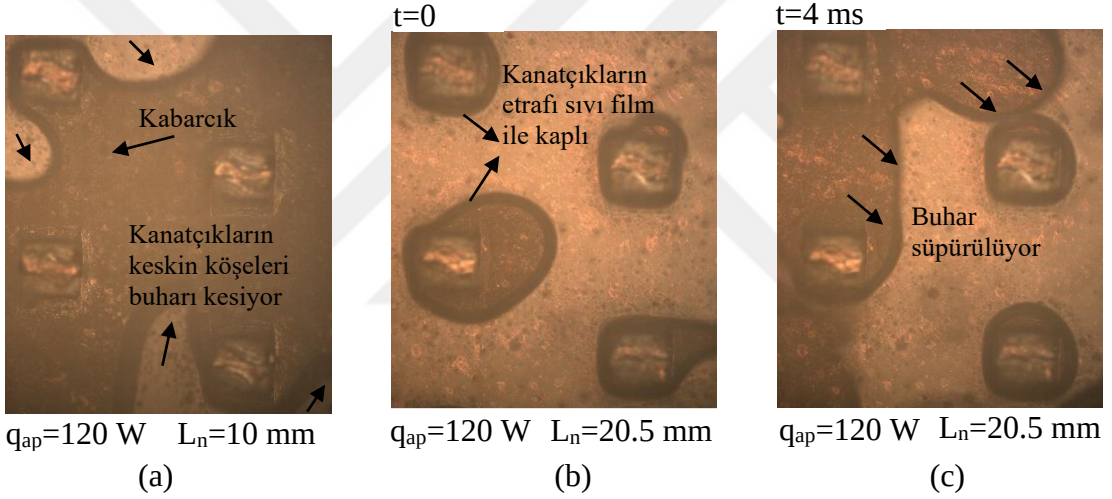
Şekil 27 (Devam). 174 kg m⁻² s⁻¹ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri



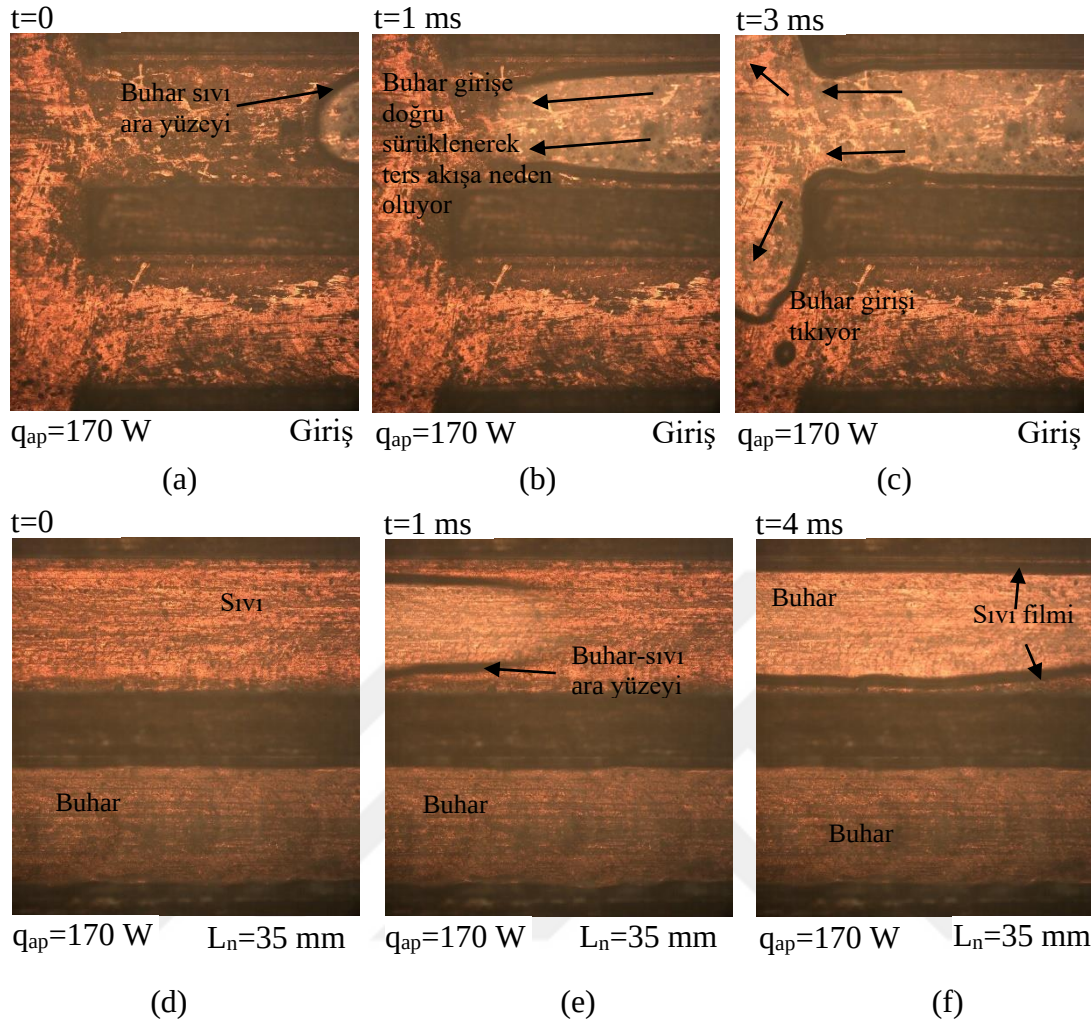
Şekil 28. 174 kg m⁻² s⁻¹ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri



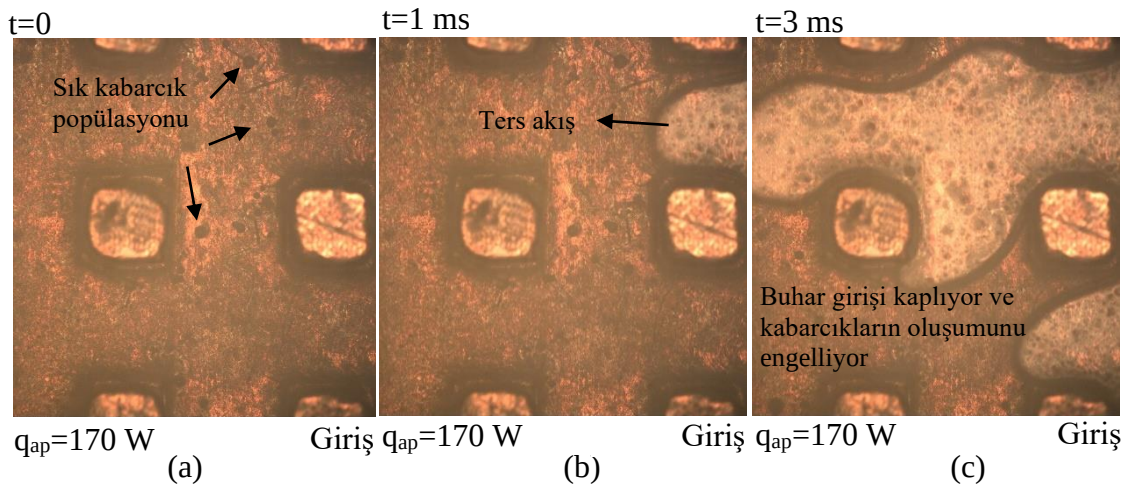
Şekil 28 (Devam). $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri



Şekil 29. $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri



Şekil 30. $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri



Şekil 31. $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri

$t=16 \text{ ms}$

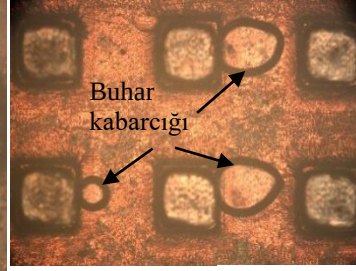


$q_{ap}=170 \text{ W}$

Giriş

(d)

$t=0$

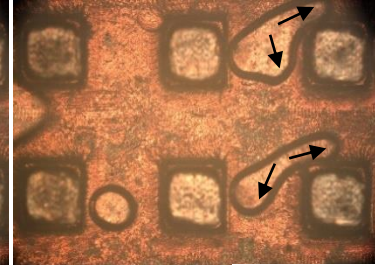


$q_{ap}=170 \text{ W}$

$L_n=25 \text{ mm}$

(e)

$t=1 \text{ ms}$

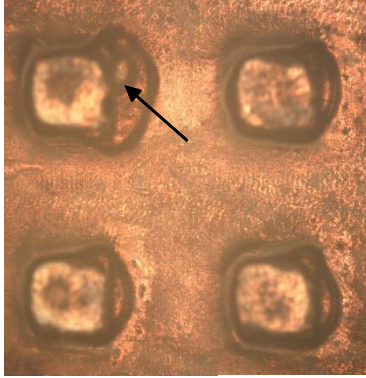


$q_{ap}=170 \text{ W}$

$L_n=25 \text{ mm}$

(f)

$t=0$

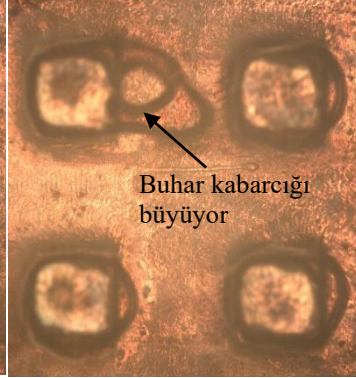


$q_{ap}=170 \text{ W}$

$L_n=35 \text{ mm}$

(g)

$t=3 \text{ ms}$

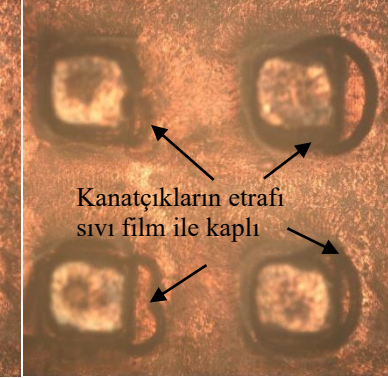


$q_{ap}=170 \text{ W}$

$L_n=35 \text{ mm}$

(h)

$t=17 \text{ ms}$



$q_{ap}=170 \text{ W}$

$L_n=35 \text{ mm}$

(i)

Şekil 31 (Devam). $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri

$t=0$

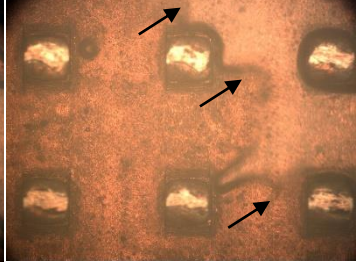


$q_{ap}=170 \text{ W}$

$L_n=25 \text{ mm}$

(a)

$t=1 \text{ ms}$



$q_{ap}=170 \text{ W}$

$L_n=25 \text{ mm}$

(b)

$t=2 \text{ ms}$

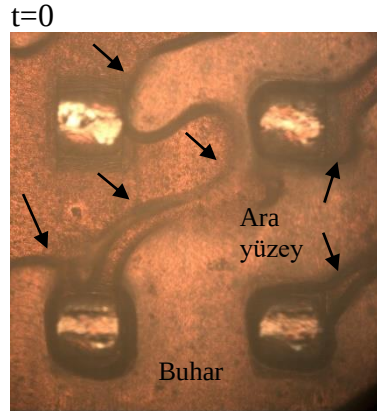


$q_{ap}=170 \text{ W}$

$L_n=25 \text{ mm}$

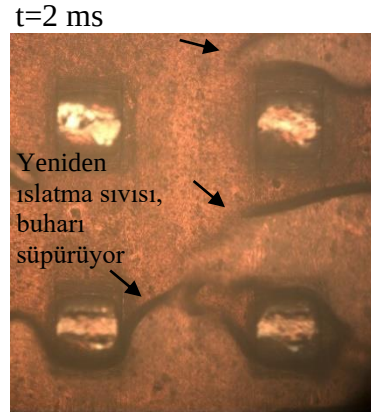
(c)

Şekil 32. $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri



$q_{ap}=170 \text{ W}$ $L_n=35 \text{ mm}$

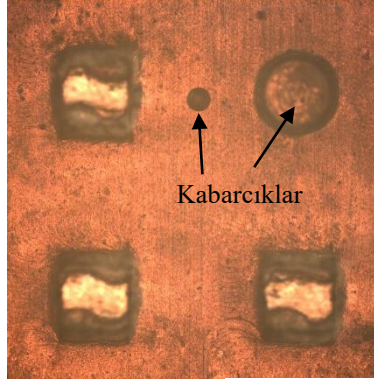
(d)



$q_{ap}=170 \text{ W}$ $L_n=35 \text{ mm}$

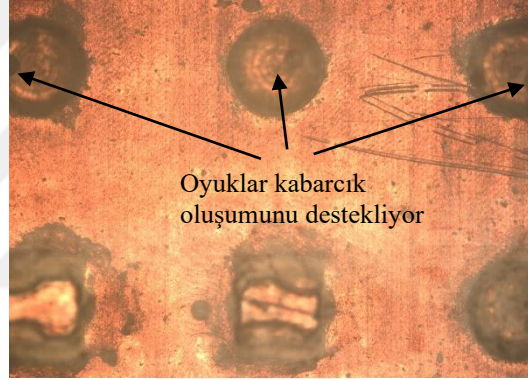
(e)

Şekil 32 (Devam). $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri



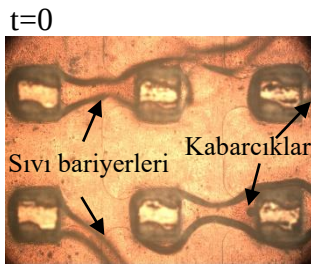
$q_{ap}=170 \text{ W}$ $L_n=10 \text{ mm}$

(a)



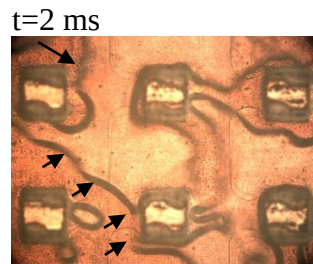
$q_{ap}=170 \text{ W}$ $L_n=20.5 \text{ mm}$

(b)



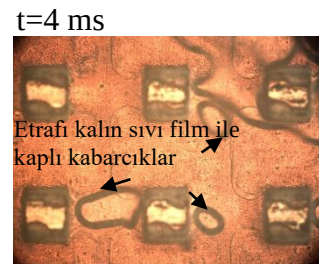
$q_{ap}=170 \text{ W}$ $L_n=25 \text{ mm}$

(b)



$q_{ap}=170 \text{ W}$ $L_n=25 \text{ mm}$

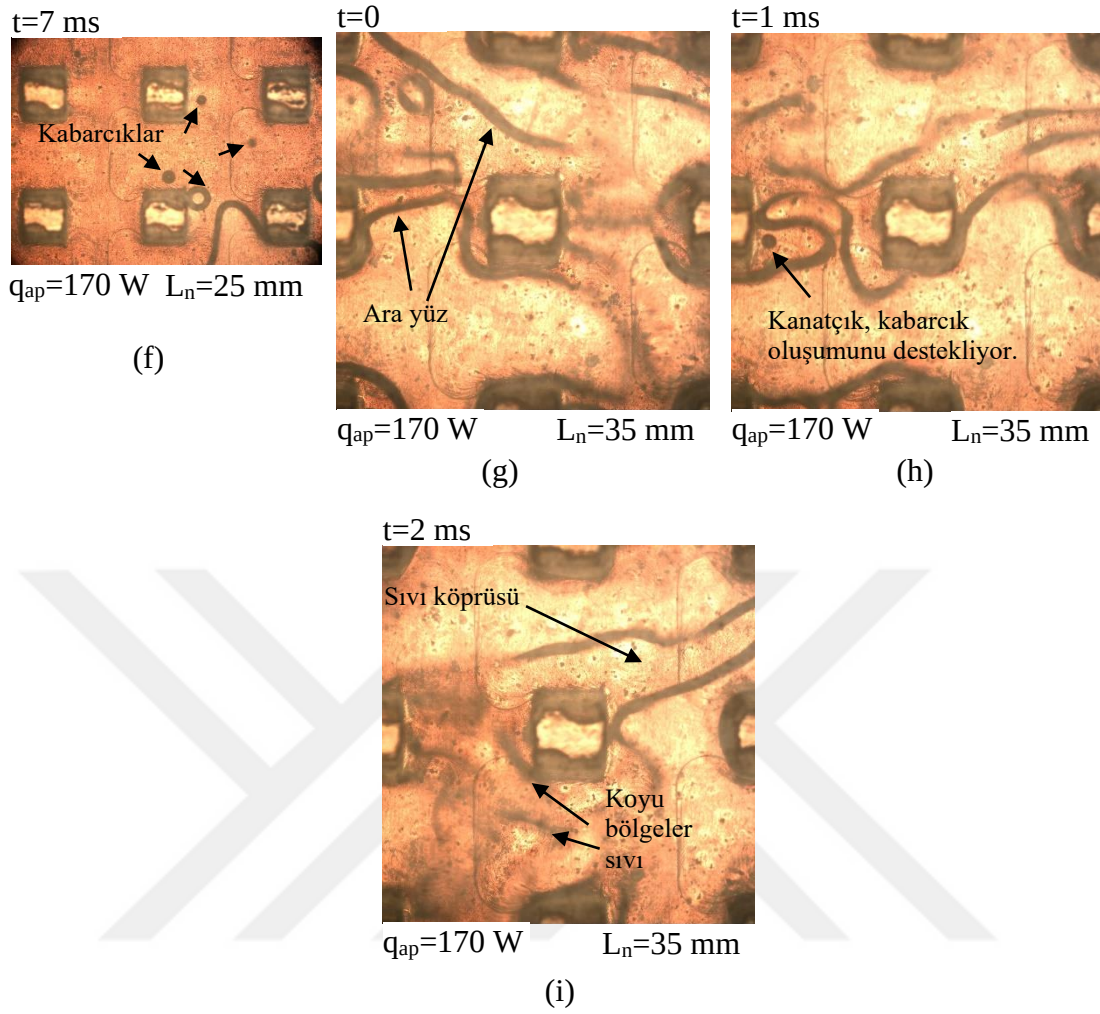
(d)



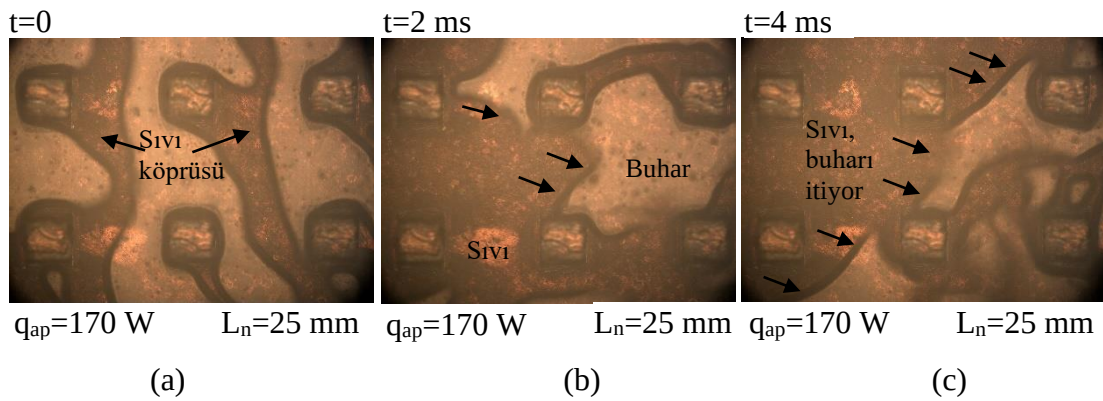
$q_{ap}=170 \text{ W}$ $L_n=25 \text{ mm}$

(e)

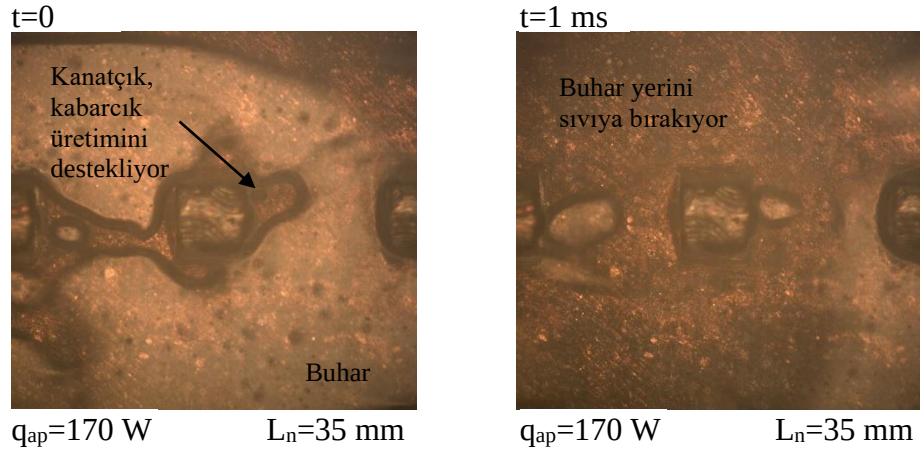
Şekil 33. $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri



Şekil 33 (Devam). $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri



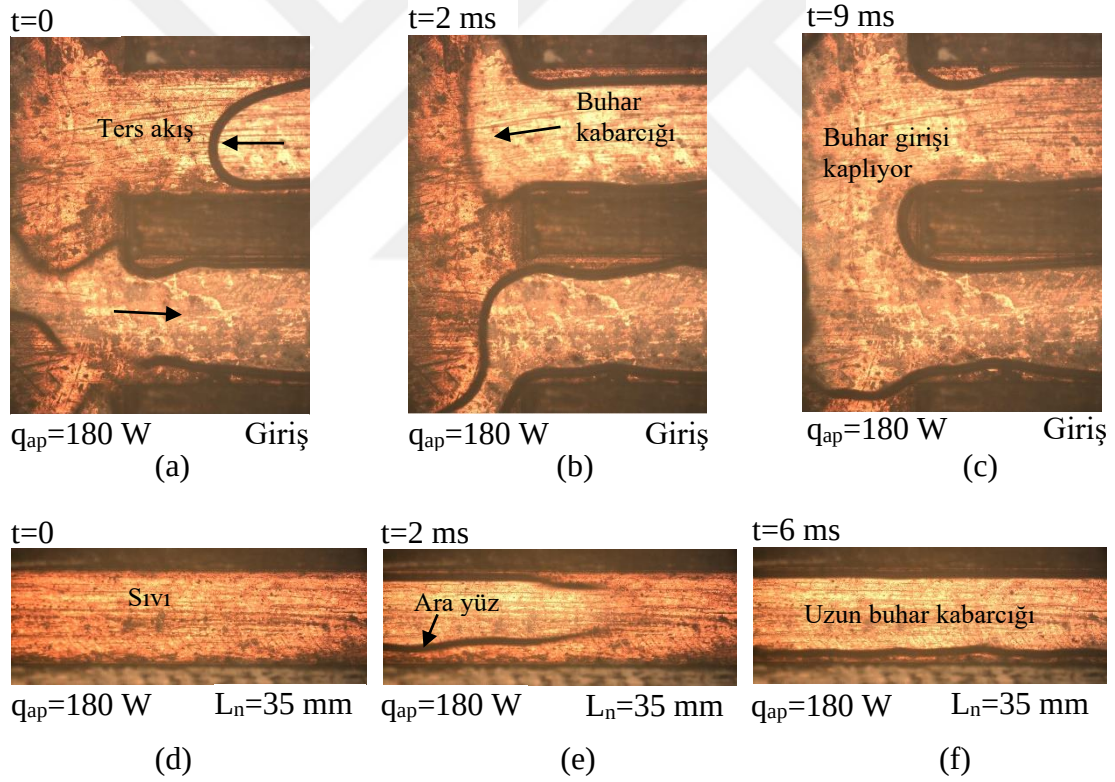
Şekil 34. $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri



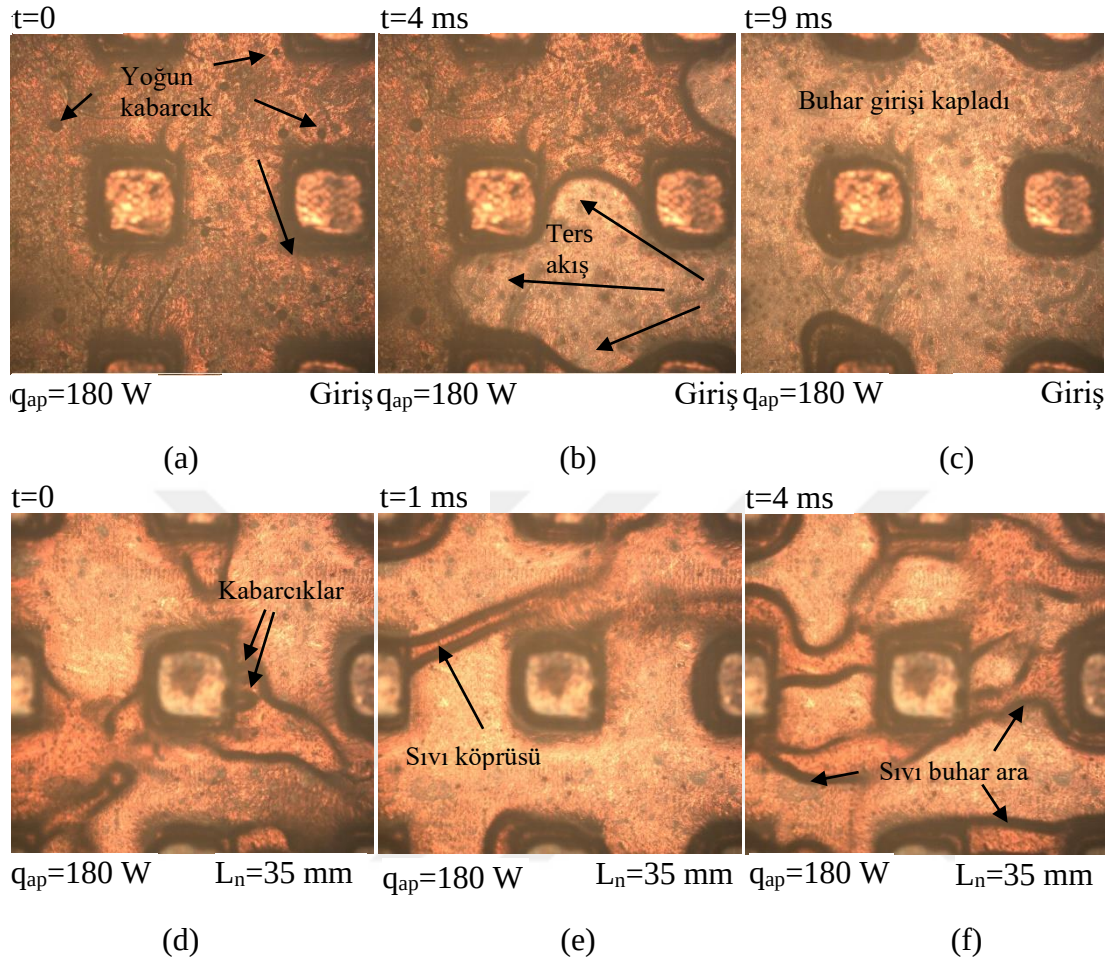
(d)

(e)

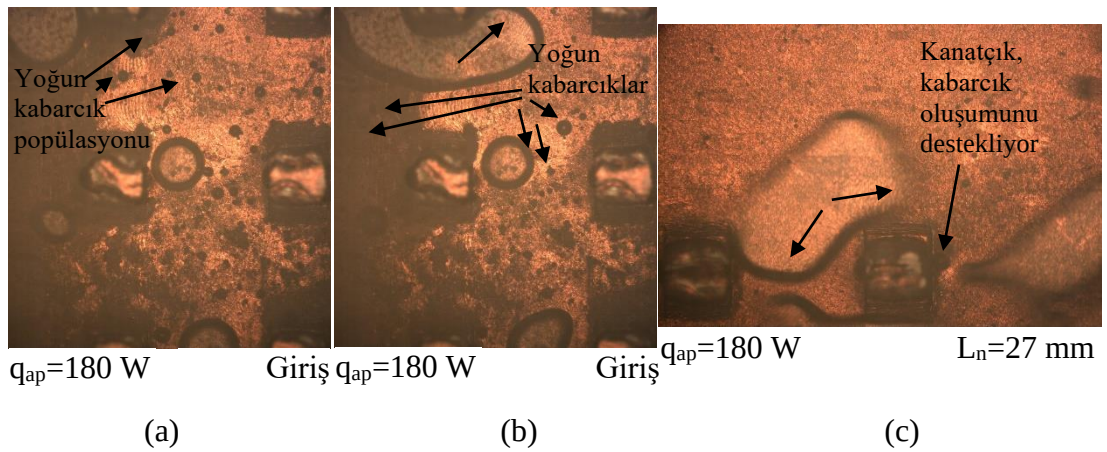
Şekil 34 (Devam). $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri



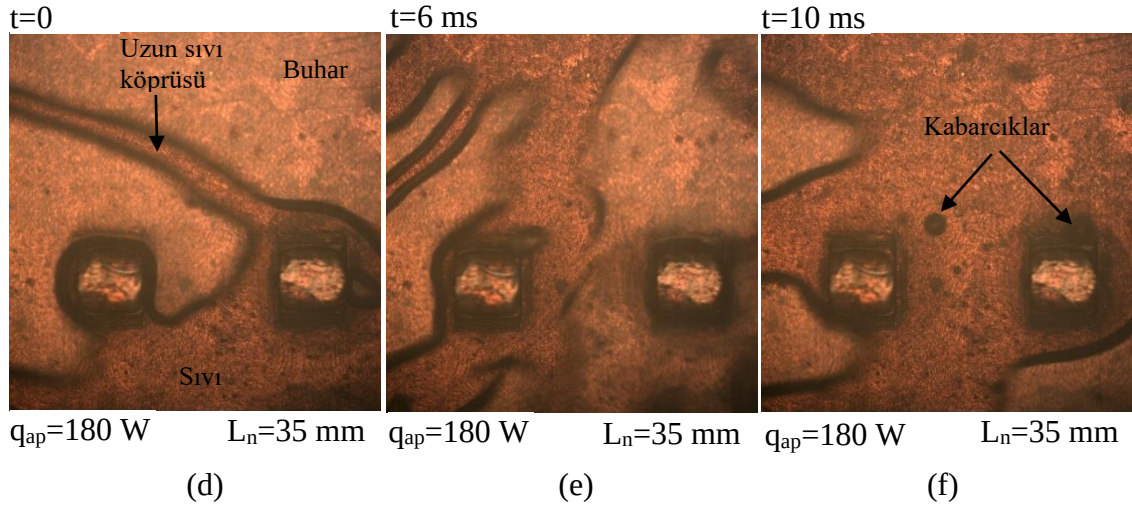
Şekil 35. $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri



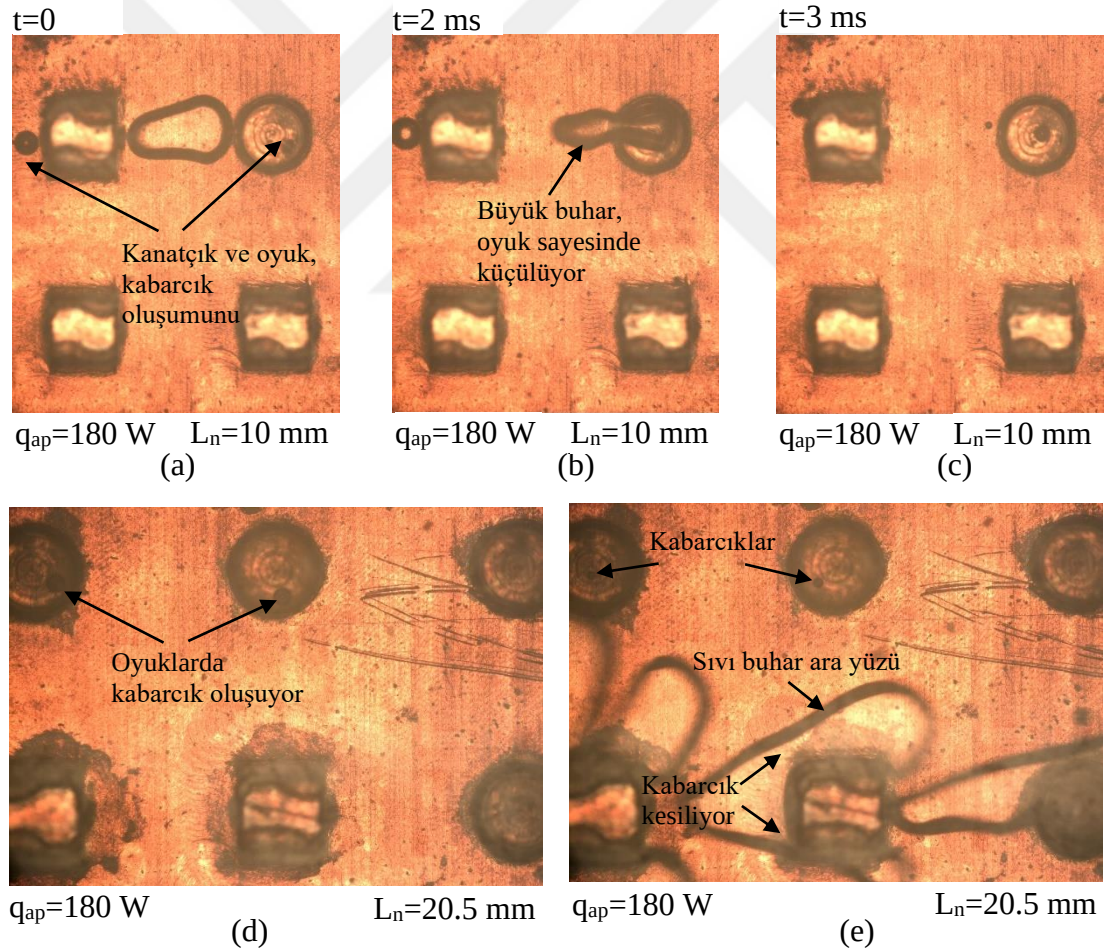
Şekil 36. $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MCHS'nin akış görüntüleri



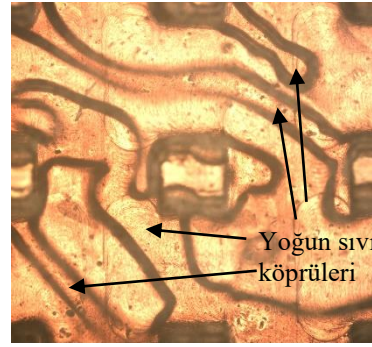
Şekil 37. $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri



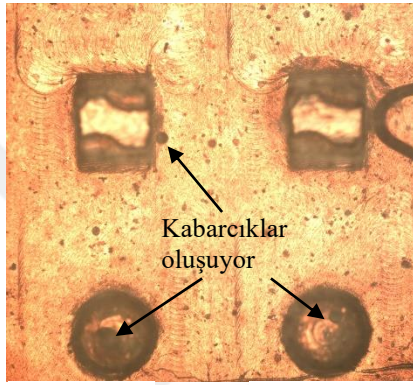
Şekil 37 (Devam). $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri



Şekil 38. $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri



$q_{ap}=180 \text{ W}$ $L_n=35 \text{ mm}$
(f)

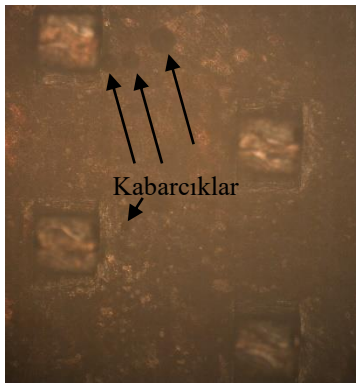


$q_{ap}=180 \text{ W}$ $L_n=35 \text{ mm}$
(g)

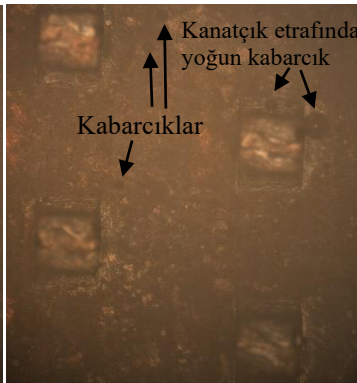


$q_{ap}=180 \text{ W}$ $L_n=35 \text{ mm}$
(h)

Şekil 38 (Devam). $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri



$q_{ap}=180 \text{ W}$ $L_n=10 \text{ mm}$



$q_{ap}=180 \text{ W}$ $L_n=10 \text{ mm}$



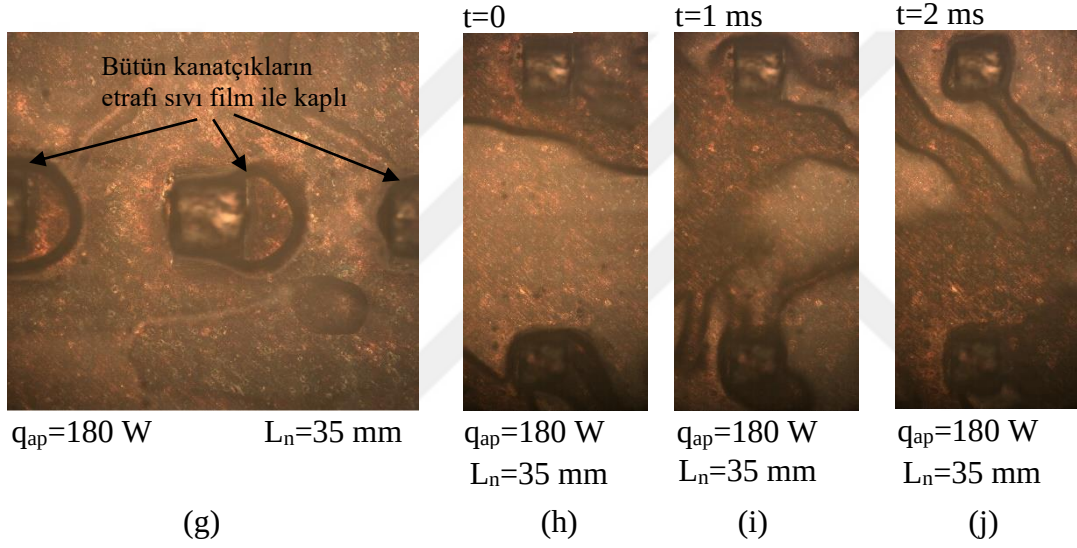
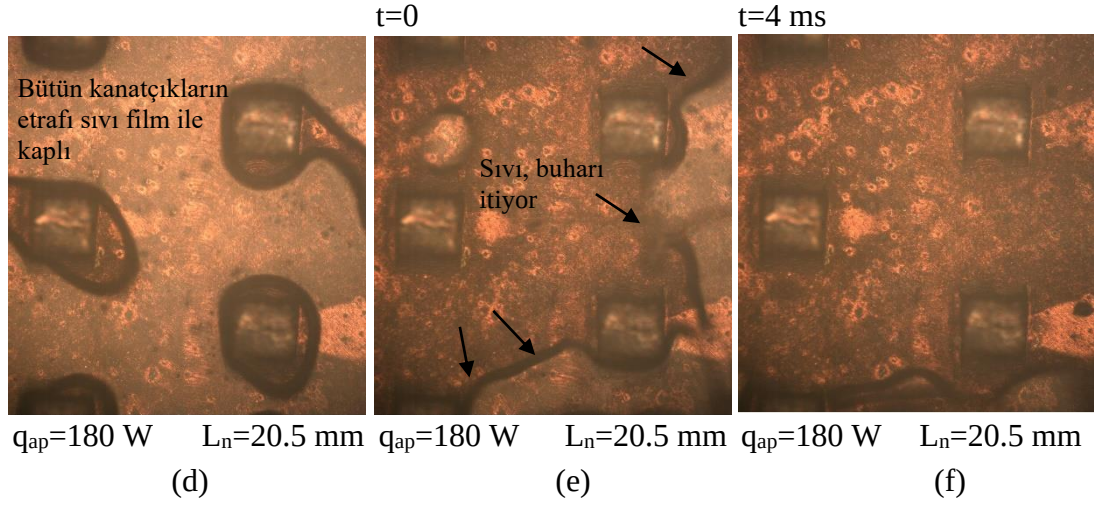
$q_{ap}=180 \text{ W}$ $L_n=20.5 \text{ mm}$

(a)

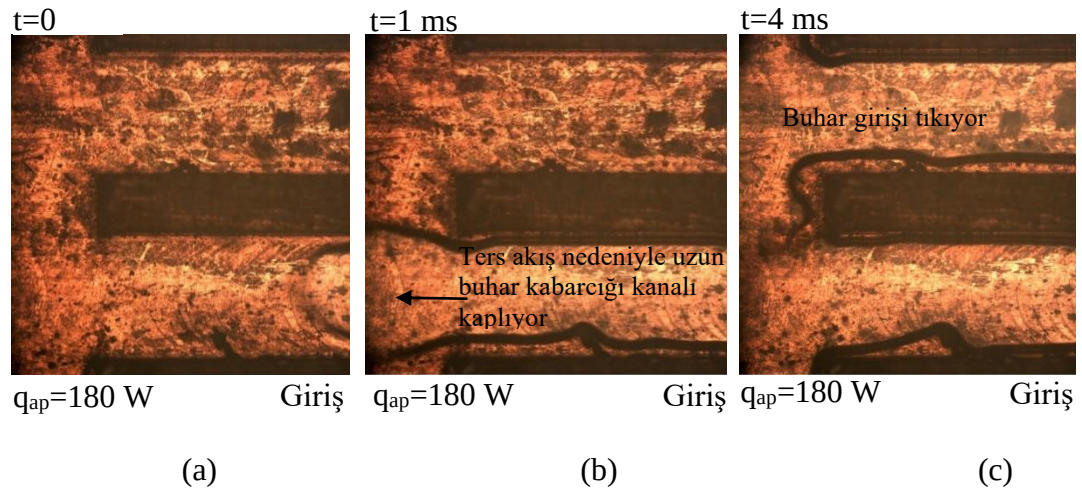
(b)

(c)

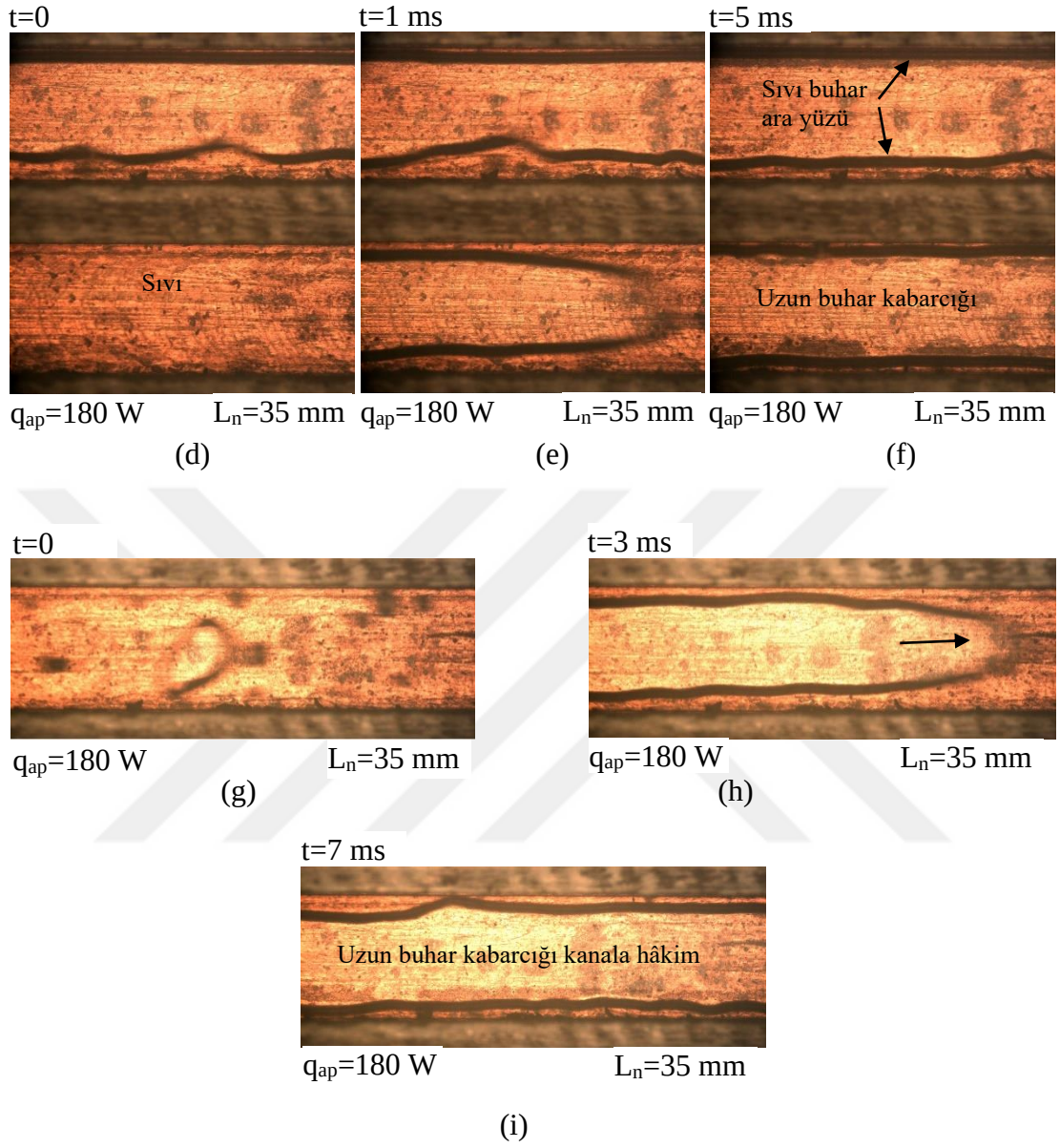
Şekil 39. $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri



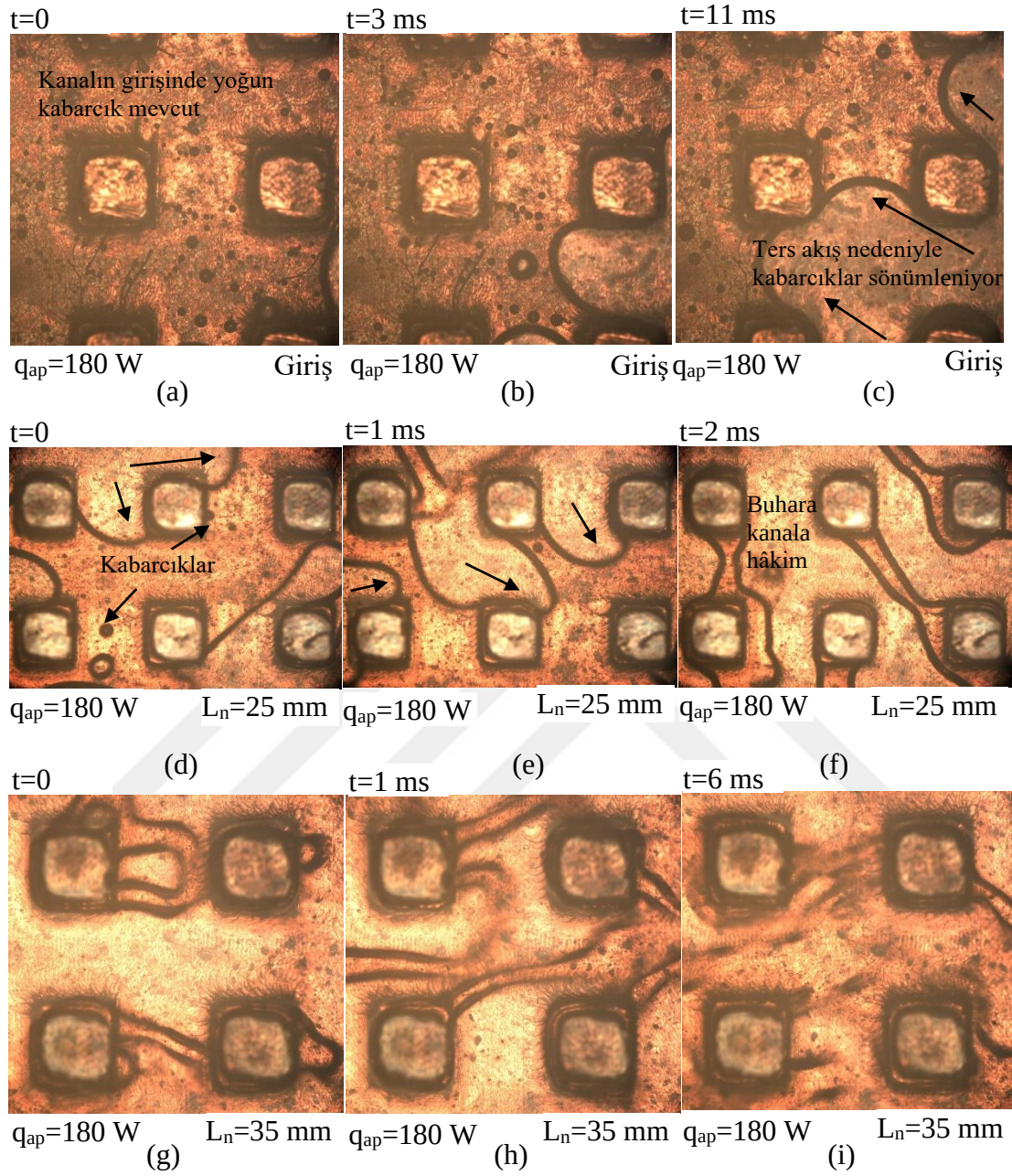
Şekil 39 (Devam). $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri



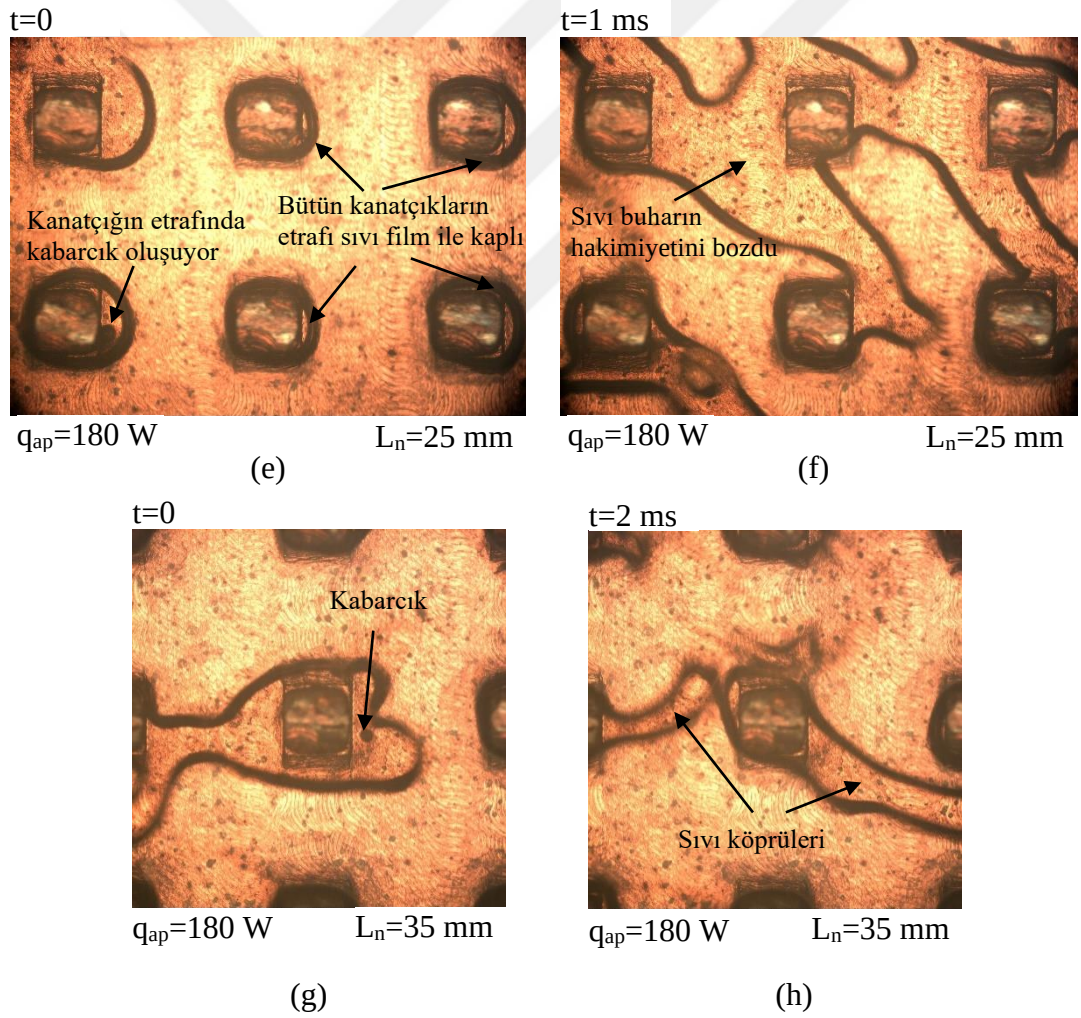
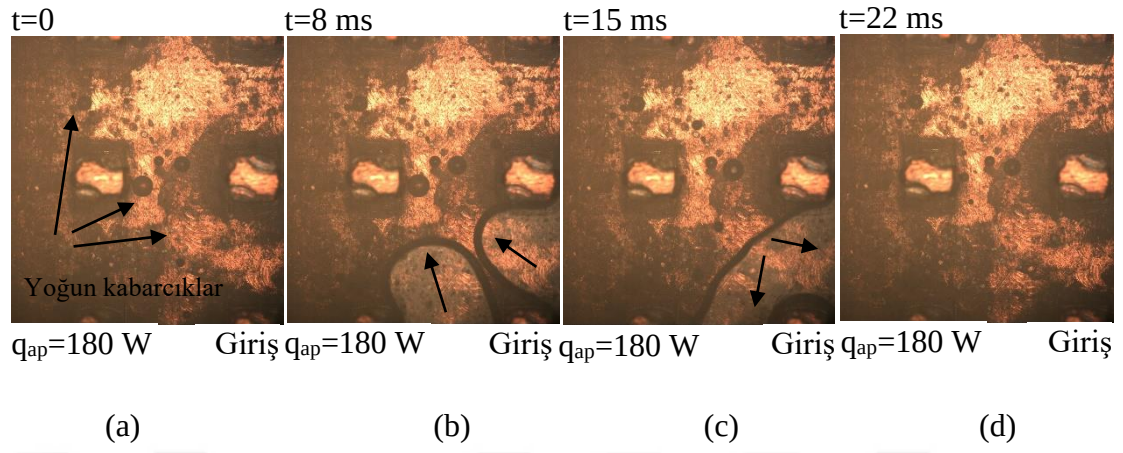
Şekil 40. $287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri



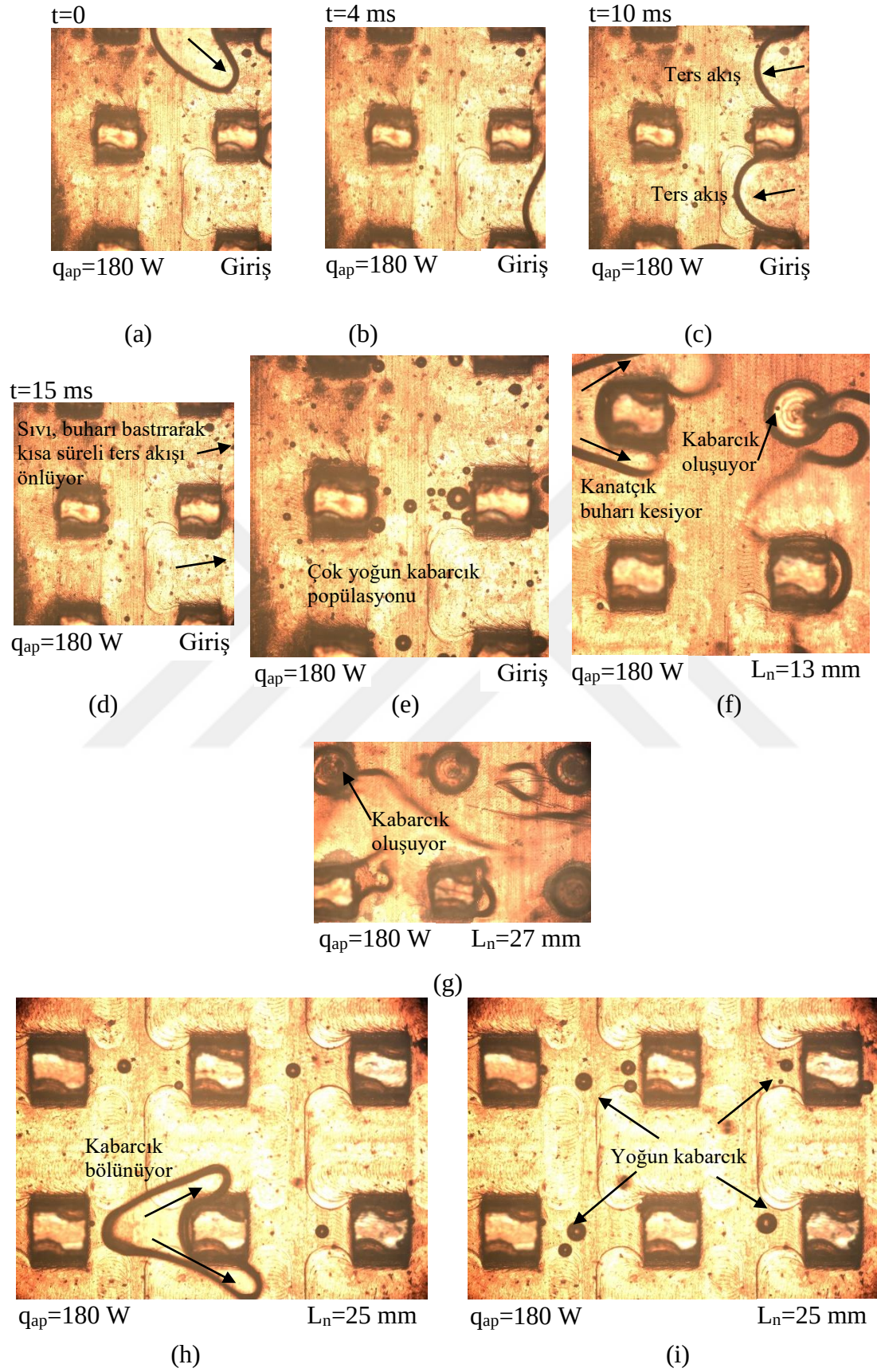
Şekil 40 (Devam). $287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda PW-MCHS'nin akış görüntüleri



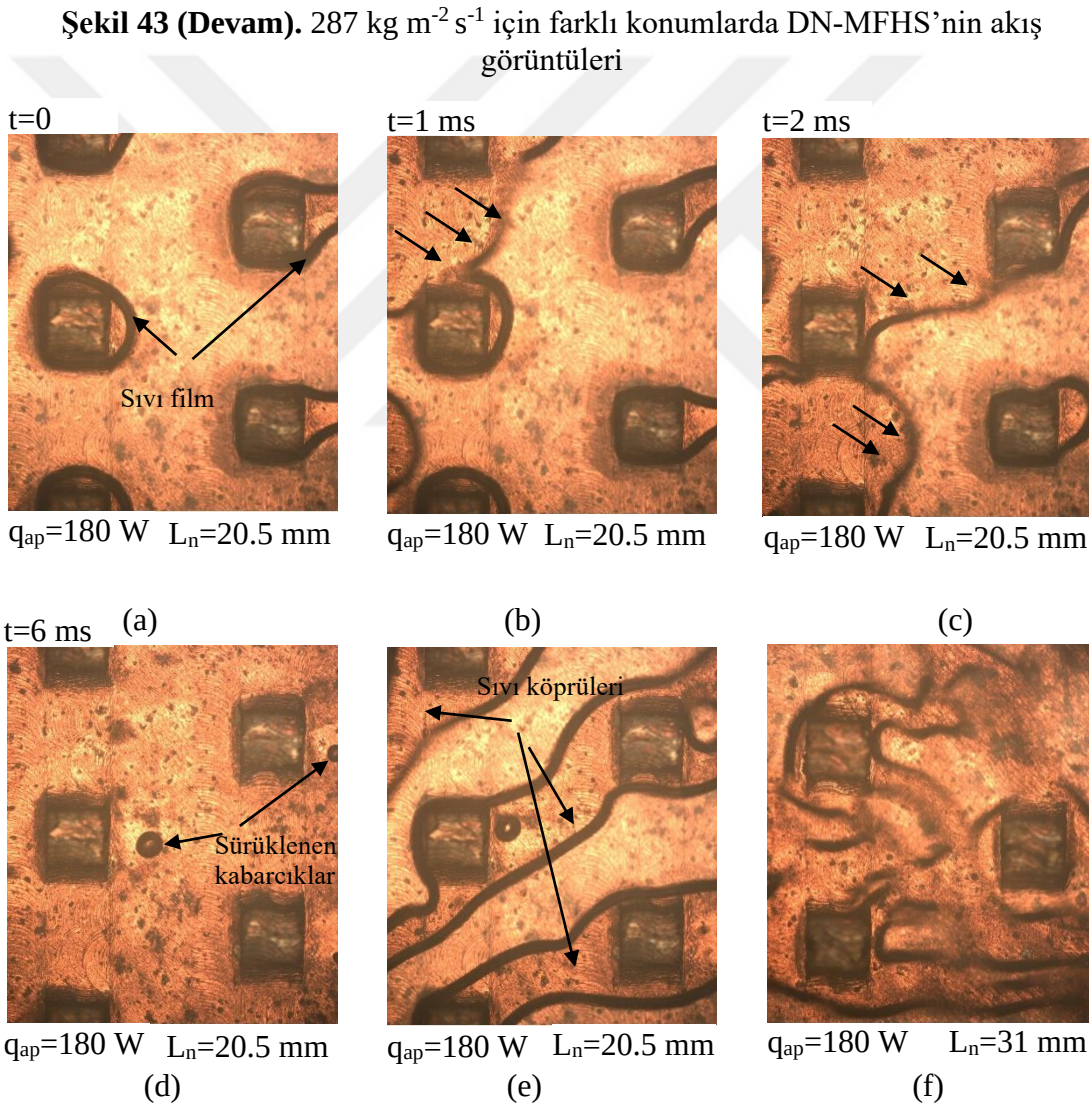
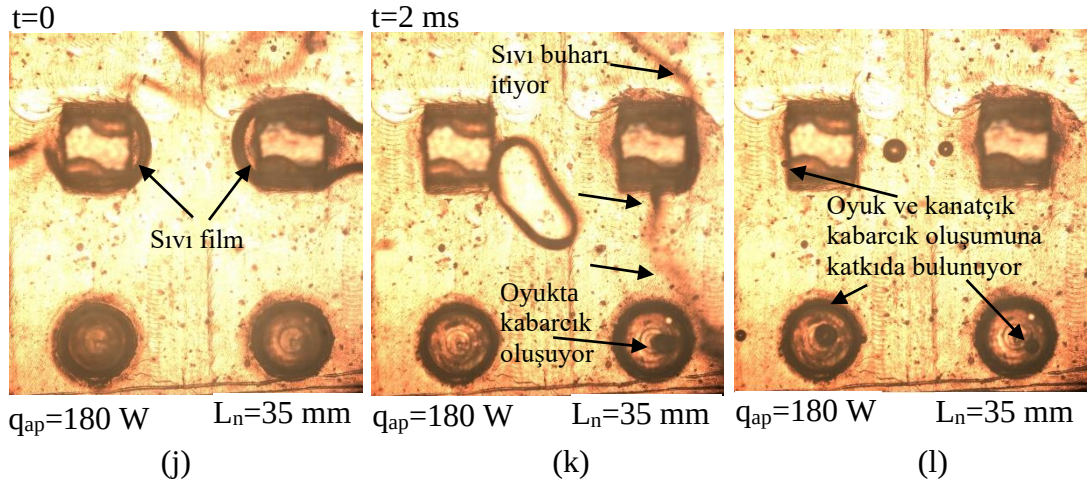
Şekil 41. $287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda CT-MFHS'nin akış görüntüleri

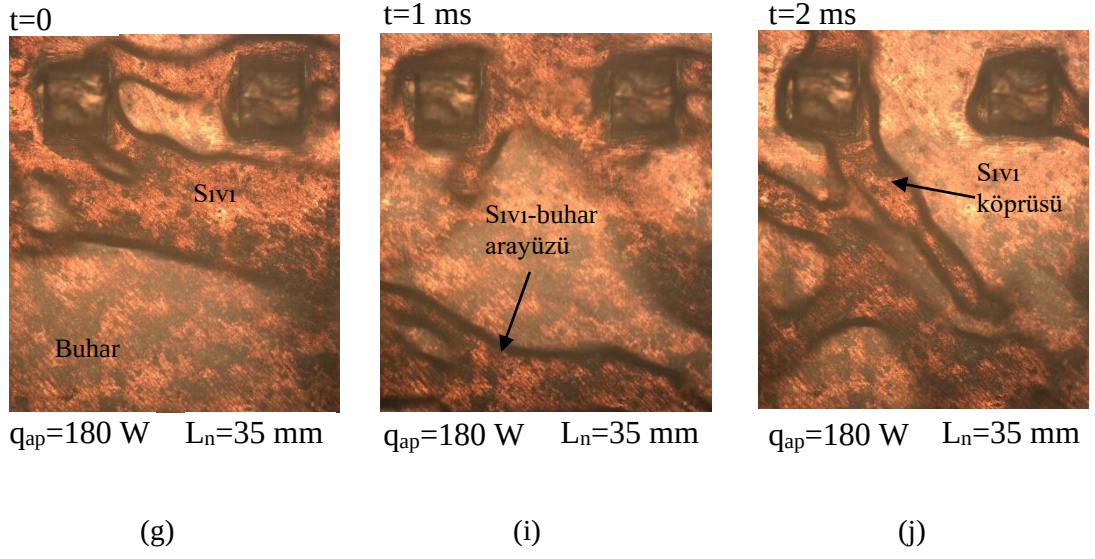


Şekil 42. $287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GD-MFHS'nin akış görüntüleri



Şekil 43. $287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda DN-MFHS'nin akış görüntüleri





Şekil 44 (Devam). $287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için farklı konumlarda GS-MFHS'nin akış görüntüleri

3. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bir önceki bölümde, tez çalışması sürecinde elde edilen bulgular verilmiştir. Bu bölümde ise, sunulan bulgular tartışılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır.

3.1. Tartışma

3.1.1. Tekrarlanabilirlik Deneyleri

Şekil 9a-d'de, mikro oyuklu (DN-MFHS) ve kaydırılmış sıralı (GS-MFHS) mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcılarına ait tekrarlanabilirlik sonuçları verilmiştir. Doymuş kaynamalı akış koşullarında DN-MFHS kodlu ısı alıcı için ısı transfer katsayısındaki minimum, maksimum ve ortalama sapmalar, sırasıyla; ± 0.23 , ± 7.67 ve ± 5.02 'dir. Basınç düşümündeki minimum, maksimum ve ortalama sapmalar ise, sırasıyla; ± 0.34 , ± 3.16 ve ± 1.77 'dir. Bir diğer ısı alıcı olan ve GS-MFHS ile kodlanan ısı alıcısında ise, tekrarlanabilirlik kapsamında, ısı transfer katsayısındaki minimum, maksimum ve ortalama değişimler, sırasıyla; ± 3.51 , ± 16.1 ve ± 8.56 'dir. Basınç düşümündeki minimum, maksimum ve ortalama sapmalar ise sırasıyla; ± 1.73 , ± 16.24 ve ± 7.99 'dur. Mikrokanallarda kaynamalı akışın kompleks yapısı dikkate alındığında, tekrarlanabilirlik kapsamında elde edilen yüzdesel değişim/sapma düzeylerinin düşük olduğu; bu sonucun da deney düzeneği kurulumu ile ölçüm sürecindeki başarıyı gösterdiği belirtilmelidir.

3.1.2. Kaynama Eğrileri

Şekil 10a – f'de tüm ısı alıcılarına ait kaynama eğrileri verilmiştir. Bütün grafiklerde artan ısı akısı ile duvar kızma farkının arttığı görülmektedir. Kütle akısının $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ değeri için kaynama eğrileri Şekil 10a'da gösterilmektedir. PW-MCHS'nin duvar kızma farkı 3.94 ile $9.86 \text{ }^{\circ}\text{C}$; CT-MFHS'nin kızma farkı, 1.92 ile $6.06 \text{ }^{\circ}\text{C}$; GD-MFHS'nin kızma farkı, 0.51 ile $3.70 \text{ }^{\circ}\text{C}$; DN-MFHS'nin kızma farkı, 0.61 ile $2.88 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve GS-MFHS'nin kızma farkı, 1.31 ile $16.17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Bu çalışmada, en düşük kütle akısına karşılık gelen $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değeri için, GS-MFHS kodlu ısı alıcıya ait kaynama eğrisinde 120 W ısı güç değerinden (4. veri noktasından) sonra kızma farkında ani bir sıçrama olduğu

görülmektedir. Bu durum, ani ve kontrolsüz sıcaklık artışına ve dolayısıyla sistemin deforme olmasına yol açacak kritik ısı akısı oluşumunun bir göstergesi olup, ilgili ısı alıcı için verilen koşullarda ($98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için 130 W 'tan sonra) deney sonlandırılmıştır. En düşük kütle akısı değeri, en düşük sıvı atalet kuvveti anlamına gelmektedir. GS-MFHS kodlu ısı alıcı çıkışa doğru en geniş kesit alanına veya en az kanatçık sayısına sahiptir. Artan ısıl güç ile çıkış tarafında ana akışa ters yönde oluşan kabarcık genişleme süreçleri sıvı atalet kuvvetinin zayıf olması sebebiyle ters akışa yol açar ve kritik ısı akısının erken gerçekleşmesine sebep olur. Bu durumun, GS-MFHS için sadece düşük kütle akılarında (en küçük iki değerde) oluştuğu belirtilmelidir. $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında, kızma farkı değerleri; PW-MCHS için 3.6 ile $9 \text{ }^{\circ}\text{C}$; CT-MFHS için 1.94 ile $6.31 \text{ }^{\circ}\text{C}$; GD-MFHS için 0.66 ile $3.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$; DN-MFHS için 0.34 ile $2.68 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve GS-MFHS için 1.24 ile $16.06 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. GD-MFHS ilk iki verisinde ve DN-MFHS ise ilk dört verisinde birden düşük kızma farkı değeri sunmuştur. $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında, kızma farkı değerleri; PW-MCHS için 3.34 ile $8.88 \text{ }^{\circ}\text{C}$; CT-MFHS için 2.69 ile $7.17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; GD-MFHS için 0.45 ile $4.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; DN-MFHS için 0.65 ile $2.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve GS-MFHS için 1.49 ile $5.45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında, kızma farkı değerleri; PW-MCHS için 3.44 ile $10.18 \text{ }^{\circ}\text{C}$; CT-MFHS için 2.37 ile $7.33 \text{ }^{\circ}\text{C}$; GD-MFHS için 0.52 ile $3.53 \text{ }^{\circ}\text{C}$; DN-MFHS için 0.29 ile $2.61 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve GS-MFHS için 1.12 ile $4.22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında, kızma farkı değerleri; PW-MCHS için 3.75 ile $10.31 \text{ }^{\circ}\text{C}$; CT-MFHS için 3.03 ile $3.78 \text{ }^{\circ}\text{C}$; GD-MFHS için 0.52 ile $3.78 \text{ }^{\circ}\text{C}$; DN-MFHS için 0.36 ile $2.90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve GS-MFHS için 0.97 ile $3.60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. $287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında, kızma farkı değerleri; PW-MCHS için 3.58 ile $10.59 \text{ }^{\circ}\text{C}$; CT-MFHS için 2.72 ile $7.90 \text{ }^{\circ}\text{C}$; GD-MFHS için 0.42 ile $3.40 \text{ }^{\circ}\text{C}$; DN-MFHS için 0.48 ile $2.80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve GS-MFHS için 0.85 ile $4.10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir.

Yukarıda nicel değerleri açıkça sunulan kaynama eğrileri, bir ısı alıcının ısıl performansının değerlendirilmesinde önemli bilgiler sunar. Herhangi bir ısı alıcı için kaynama eğrisinin görece sol tarafta ve büyük eğime sahip olması, ilgili ısı alıcının ısıl performansının görece iyi olduğu anlamına gelir. Bu durum, fiziksel olarak, artan ısı akılarına karşı yüzey sıcaklığının görece daha az artmasına ve verilen bir ısıl güç değeri için daha düşük yüzey sıcaklığı değerine karşılık gelmektedir. Bu kapsamda,

hem yukarıda sunulan veriler incelendiğinde hem de Şekil 10a-f'deki eğriler değerlendirildiğinde, genel karakter olarak, en iyi ısıl performansın DN-MFHS için, en kötü ısıl performansın ise (ilk iki kütle akısındaki kritik ısı akısı koşulları hariç) PW-MCHS için elde edildiği görülmektedir.

3.1.3. Doymuş Kaynamalı Akış Koşullarında Isı Transfer Katsayısı

Şekil 11a-l'de farklı kütle akılarında, tüm ısı alıcılar için iki fazlı ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesiyle değişimi sunulmuştur. Genel karakter olarak, en yüksekten en düşük ısıl performansa göre sıralama; DN-MFHS > GD-MFHS > GS-MFHS > CT-MFHS > PW-MCHS şeklindedir. Şekil 11'den de görüldüğü gibi, DN-MFHS diğer ısı alıcılara kıyasla üstün bir ısıl performans sunmaktadır. Ayrıca, en düşük iki kütle akısında GS-MFHS'de meydana gelen kritik ısı akısına erişme durumu haricinde, diğer tüm koşullarda, yapısal olarak iyileştirilmiş ısı alıcıların tamamı konvansiyonel ısı alıcılara kıyasla ısı transferinde belirgin bir iyileşme sağlamaktadır. Bu bölümde, ısıl performanstaki iyileşme iki faz ısı transfer katsayıları üzerinden sunulacak olup, öncelikle ısı transfer katsayılarındaki yüzdesel değişimler üzerinden nicel veriler paylaşılacak, devamında ise akış görüntüleri aracılığıyla fiziksel mekanizma irdelenecektir. Çalışma kapsamındaki en düşük kütle akısı olan $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 'de , DN-MFHS, PW-MCHS'ye kıyasla iki faz ısı transfer katsayısında %465.3'e kadar iyileşme sunmaktadır. Ayrıca, iki faz ısı transfer katsayısındaki ortalama artış %324.8'dir. Geleneksel mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcı olan CT-MFHS ise PW-MCHS'ye kıyasla iki faz ısı transfer katsayısında maksimum ve ortalama olarak, sırasıyla, %82.4 ve %58.62 artış sunmaktadır. Çıkışa doğru kademeli olarak kanatçık sayısı azalan ısı alıcı (GD-MFHS) ise PW-MCHS'ye kıyasla maksimum ve ortalama olarak, sırasıyla %594.1 ve %334.8 düzeyinde ısı transfer katsayısını artırabilmektedir. Çıkışa doğru kaydırılmış sıralı olarak azalan kanatçık sayısına sahip olan GS-MFHS kodlu ısı alıcıda ise ilgili kütle akısında ($98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) erken kritik ısı akısı oluşumu nedeniyle ani sıcaklık sıçraması oluşmuş ve 130 W'a karşılık gelen 5. veri noktasında deneyler sonlandırılmıştır. Buna karşın ilk üç veri noktası (90 – 110 W arası) üzerinden karşılaştırma yapılacak olursa, GS-MFHS'nin PW-MCHS'ye kıyasla ısı transfer katsayısını %171.8'e kadar artırabildiği görülmektedir.

Şekil 11c ve d’de ise $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değeri için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. İlgili kütle akısında DN-MFHS için elde edilen iki faz ısı transfer katsayıları, PW-MCHS için elde edilenlere kıyasla, maksimum ve ortalama olarak, sırasıyla, %827.2 ve %410.5 daha büyüktür. CT-MFHS ise PW-MCHS’ye kıyasla ısı transfer katsayılarında maksimum ve ortalama, sırasıyla, %64.85 ve %37.46 iyileşme sunmaktadır. GD-MFHS ile PW-MCHS arasında yapılan karşılaştırmada ise GD-MFHS lehine olmak üzere ısı transfer katsayılarında %396.7’ye kadar artış elde edilmiştir. Ortalama artış değeri ise %206.7’dir. GS-MFHS için kritik ısı akısı oluşumunun meydana geldiği bir diğer kütle akısı $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ’dir. En düşük kütle akısı ile karşılaştırıldığında kritik ısı akısının meydana geldiği ısı güç değerinin artan kütle akısı ile arttığı görülmektedir. GS-MFHS için, PW-MCHS’ye göre ısı transfer katsayılarında %166’ya kadar artış sağlayabildiği ifade edilebilir.

Şekil 11e ve f’de ise $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değeri için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Isı alıcı olarak DN-MFHS kullanıldığında, PW-MCHS’ye kıyasla, iki fazlı ısı transfer katsayısında maksimum ve ortalama, sırasıyla, %349.2 ve %244.2 iyileşme elde edilmiştir. Aynı ısı alıcı (PW-MCHS) referans alındığında, CT-MFHS için ısı transfer katsayılarının %14.5’e kadar arttığı belirlenmiştir. GD-MFHS’de konvansiyonel yapıya sahip PW-MCHS’ye kıyasla tüm veri tabanı üzerinden belirgin bir üstünlük sağlamakta olup, ısı transfer katsayılarında %567.9’a kadar artış sunabilmektedir. Ortalama, artış değeri ise %199’dur. Önceki kütle akılarından farklı olarak bu ve daha yüksek kütle akılarında GS-MFHS’de herhangi bir kritik ısı akısı oluşumu gözlenmemiş olup, tüm veri tabanı üzerinden her iki konvansiyonel ısı alıcısına (PW-MCHS ve CT-MFHS) kıyasla sütun ısı performans sunmaktadır. PW-MCHS üzerinden değerlendirme yapılacak olursa, GS-MFHS’nin ısı transfer katsayılarının maksimum ve ortalama olarak, sırasıyla, %101.5 ve %90.4 oranında daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Şekil 11g ve h’de ise $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değeri için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Referans olarak seçilen PW-MCHS üzerinden yapılan değerlendirmede, DN-MFHS’nin iki fazlı ısı transfer katsayılarında, maksimum ve ortalama olarak %786 ve %434.5 düzeylerinde iyileşme sağladığı belirtilmelidir. CT-MFHS için bu değerler, sırasıyla, %29.24 ve %21.85; GD-MFHS için %500.8 ve %210.9; GS-MFHS için ise %180.8 ve %153.2’dir.

Şekil 11i ve j’de $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değeri için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Referans olarak seçilen PW-MCHS üzerinden yapılan değerlendirmede, DN-MFHS’nin, iki fazlı ısı transfer katsayılarında, maksimum ve ortalama olarak, sırasıyla, %819.5 ve %402.1 düzeylerinde artış sağladığı belirtilmelidir. CT-MFHS için ilgili değerler, %12.2 ve %11.6; GD-MFHS için %565.9 ve %309.7; GS-MFHS için ise %247.4 ve %168.2’dir.

Son olarak, Şekil 11k ile l’de, $G = 287 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Referans olarak seçilen PW-MCHS üzerinden yapılan değerlendirmede, DN-MFHS’nin, iki fazlı ısı transfer katsayılarında, maksimum ve ortalama olarak, sırasıyla, %557.6 ve %347.8 düzeylerinde artış sağladığı belirlenmiştir. CT-MFHS için ilgili değerler %29.6 ve %22.46; GD-MFHS için %671.7 ve %342.6 ve GS-MFHS için %278.8 ve %168.9 olarak hesaplanmıştır.

Yukarıda, ısı alıcılar için farklı çalışma koşullarında elde edilen iki faz ısı transfer katsayıları nicel olarak ayrıntılı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu bölümde, akış görüntüleri aracılığıyla tüm kanaldaki süreç fiziksel olarak irdelenecek ve ısı transferiyle ilişkisi açıklanacaktır. İlk olarak, Şekil 15’te, PW-MCHS’nin $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve görece düşük ısıl güçlere karşılık gelen koşullardaki akış rejimlerini ifade eden görüntüler verilmiştir. Bu kapsamda, 90 W ısıl güç değerinde, kanal girişindeki (Şekil 15a – c) ve kanal girişinden 35 mm uzaklığına sahip bölgelerdeki (Şekil 15d – f) akış görüntüleri sunulmuştur. Görüntü özelliklerine ait detayları ilgili şekillerin üzerinde verilmiştir. PW-MCHS için düşük ısıl güçlerde baskın akış desenleri kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akıştır. Şekil 15a-c’de kanal girişindeki akış görüntüleri sunulmuştur. Şekillerde buhar kabarcığının kanal girişine doğru bir başka ifade ile ters akış oluşturarak genişlediği ve oluşan görece küçük buhar kabarcıklarını söndürdüğü görülmektedir. Bu tür bir ters akışın gerçekleşmesi aynı zamanda ilgili süreç boyunca ilgili bölgelerdeki kabarcıklaşmayı da bastırmakta ve ısılatma sıvısının kanala girişine (en azından ters akışın gerçekleştiği paralel kanallar için) engel olmaktadır. Ters akış, kabarcıklaşmanın bastırılması veya etkinliğinin azalması, ısılatma sıvısının kanala girişinin geçişi olarak engellenmesi ve benzeri süreçler ısıl performansın önemli ölçüde azalmasına sebep olmakta ve bu nedenle PW-MCHS’de en düşük ısıl performans elde edilmektedir. Sönümlenme olayına ilişkin görüntüler ayrıca, Şekil 15d – f’de de görülmektedir.

Şekil 16'da CT-MFHS'nin $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve 90 W ısı güç değerindeki akış görüntüleri verilmiştir. Mikro pim tipi kanatçıklı yapı, akışın boyuna ve enine doğrultularda hareketine olanak sunmaktadır. Bu yönüyle oluşan buhar kabarcıkları her iki doğrultuda da genişleyebilmekle PW-MCHS'ye kıyasla avantaj sağlanmaktadır. Daha açık bir ifade ile kabarcıklar ters yönde büyüye de ters akışın ve kabarcıklaşmanın sönümlenme şiddeti PW-MCHS'ye kıyasla azalmaktadır. Şekil 16a – c'de ısı alıcı giriş bölümünden alınan görüntüler sunulmuştur. Görüntülerde buhar bölgesinin ters yönde genişleyerek ısı alıcının ilgili bölgesini kapladığı görülmektedir. Mikro pim tipi kanatçıklı yapıya rağmen ters akış oluşmakta ve bu durum, ısı transfer yüzeyinin ıslanmasını ve kabarcıklaşmayı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple, konvansiyonel mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcı (CT-MFHS) yapısal olarak iyileştirilmiş ısı alıcılara kıyasla çok daha düşük ısı performans sunmaktadır. Buna karşın, PW-MCHS'ye kıyasla kabarcık oluşumunun daha etkin olduğu ve buharla kaplanan bölgelerde kanatçıkların sıvı filmleriyle çevrelendiği görülmektedir. Benzer durum, ısı alıcı girişinden 35 mm uzaklıktaki bölge için de geçerlidir. Buhar ilgili bölgeyi kapladığında, kanatçıklar sıvı filmiyle çevrelenmektedir. Aynı zamanda, buhar alternatif yollara yönelerek tıkanma konusunda avantaj elde edilebilmektedir (Şekil 16d – f). Bu koşulun, mevcut çalışma şartları içinde en düşük sıvı atalet kuvvetinin olduğu koşula karşılık geldiği belirtilmelidir.

Şekil 17'de GD-MFHS'nin, $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve 90 W ısı güç değerindeki akış görüntüleri verilmiştir. Kademeli genişleyen yapı sayesinde, tıkanma problemi önlenmekte, buhar kanal çıkışına doğru rahatça genişleyebilmekte, oluşan buhar bölgesi ısı alıcının önceki bölümlerinden gelen ısılatma sıvısı tarafından kolayca süpürülerek kanal çıkışına itilmektedir. Bu süreçler ısı transfer yüzeyinin kolayca ısılatılmasını ve tıkanmanın önlenmesini ifade etmekte ve dolayısıyla ısı transfer performansında belirgin bir iyileşme sağlanmaktadır.

Şekil 18'de DN-MFHS'nin, $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve 90 W ısı güç değerindeki akış görüntüleri sunulmuştur. Kanatçıklar potansiyel olarak, buharın parçalanmasına sebep olmaktadır. Ayrıca buhar, kanatçıklı bölgeyi kapladığında, kanatçıkların çevresi sıvı filmi ile çevrelenmektedir. Kanatçıkların sıvı filmi ile çevrelenmesi hem sıvı buharlaşması ile ısı transferine katkı sağlamaktadır hem de kabarcık sıvı filmi varlığında oluşabileceği için kabarcık oluşumunu veya

kabarcıklaşmanın sürdürülmesini desteklemektedir. Aynı zamanda, ısı transfer yüzeyi arasında yer alan kanatçık çevresi ve yüzeyi sıvı tarafından ıslatılmış olmaktadır. DN-MFHS’de de genişleyen akış kesiti yapısı vardır. Bir başka ifade ile kanatçık sayısı ısı alıcı çıkışına doğru azalmaktadır. Bu sebeple, tıkanma önlenmekte ve buhar, genişleyen kesitlere doğru yönlendirilerek akışı çıkışa doğru hızlıca sürüklemektedir. DN-MFHS’nin diğer ısı alıcılara önemli bir avantajı kabarcıklaşma oyuklarına sahip olmasıdır. Kabarcıklaşma oyukları kabarcıklaşmayı destekleyerek ve sıvı kapanı görevi görerek ısı transferine katkı sağlar. Yüzey buharla bile kaplansa, kabarcıklaşma oyunu fitil etkisi ile sıvıyı tutarak, ısı transfer yüzeyinin ıslatılmasını sağlar. Bu mekanizmalar, DN-MFHS’nin en iyi ısı transfer performansını sunmasını sağlamıştır.

Şekil 19’da GS-MFHS’nin, $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve 90W ısı güç değerindeki akış görüntüleri verilmiştir. GS-MFHS’de yer alan kademeli kaydırılmış sıralı kanatçık yapısı, akışın karışmasını iyileştirerek ve buhar kabarcıklarının parçalanmasını destekleyerek ısı transfer sürecine katkı sunar. Buna ek olarak, genişleyen kademeli akış kesiti yapısı ve mikro pim tipi kanatçıkların varlığının getirdiği avantajlara da sahiptir. Buna karşın, GS-MFHS’deki genişleme oranı veya kanatçık sayısının çıkışa doğru azalma miktarı diğer kademeli genişleyen yapılara kıyasla çok daha fazladır. Bir başka ifade ile bu ısı alıcısının çıkış bölümüne doğru olan son bölgesinin kesiti diğer ısı alıcılara kıyasla çok daha büyüktür. Bu durum, çıkış bölümünde ters akışa karşı veya buharın ters yönde büyümesine karşı direncin azalması anlamına gelmektedir. Bu sebeple, $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ gibi kütle akısının görece düşük değerlerinde artan ısı akısına bağlı olarak çıkış bölümündeki zayıf direnç nedeniyle ters yönde akış oluşmakta ve erken kaynama krizi oluşmaktadır. Bu durum, artan kütle akısına bağlı artan sıvı akışkanın momentum kuvvetinin etkisiyle bertaraf edilebilmektedir.

Yukarıda, tüm ısı alıcıları için, ısı transferini etkileyen temel fiziksel mekanizmalar irdelenmiştir. Devam eden paragraflarda, diğer kütle akıları ve/veya koşullar için de görüntüler sunulacak ve tekrara girmeyecek düzeyde açıklama yapılacaktır.

Şekil 20’de PW-MFHS’nin, $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve 100 W ısı güçteki akış görüntülerine ait örnekler sunulmuştur. Düşük ısı güçlerine karşılık gelen bu koşulda, etkin akış desenlerinin kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akış olduğu

görülmektedir. Paralel kanallarda farklı akış desenleri oluşmaktadır. Bu durum paralel düz kanallı konvansiyonel ısı alıcıda diğer koşullarda da oluşmaktadır ve paralel kanal kararsızlığını tetikleyerek kararsızlık düzeyinin artışına yol açmaktadır. Görüntülerde ters akış da görülmektedir ve ilgili kanaldaki kararsızlık düzeyinin yüksek olmasının ve ısı performansının düşük olmasının en büyük sebepleri arasında yer almaktadır.

Şekil 21a – f’de CT-MFHS’nin, $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve 100 W ısı güç değerine karşılık gelen çalışma koşulları altında elde edilen akış görüntülerine ait örnekler verilmiştir. Isı alıcıda kanal girişinde sunulan ardışık görüntülerde (Şekil 21a – c) görüldüğü gibi genişleyen buhar kabarcığı veya birleşerek daha büyük öbekler haline gelen kabarcıklar ana akışa ters yönde de gelişebilmektedir; ancak, enine doğrultudaki kanalların varlığı PW-MCHS’ye kıyasla ters akışın şiddetini azaltmaktadır. Ayrıca, mikro kanatçıkları saran buhar bölgesi ile kanatçık yüzeyi arasında ince sıvı filmi bulunmaktadır. Bu sıvı filminin varlığı buharlaşmanın gerçekleşmesi ve kanatçık yanal yüzeylerinin sıvı ile ıslatılmasının sağlanması ile ısı transferine katkı sunmaktadır. Şekil 21d – f’de ise akışın kaotik yapısı ve buharın farklı doğrultularda hareketi veya genişlemesi görülmektedir.

Şekil 22’de, $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değerinde GD-MFHS için elde edilen görüntüler sunulmuştur. Görüntülerde, buharın geniş bölgelere yayılması, tıkanmanın önlenmesi sebebiyle akışın iyileşmesi ve gelen ısılatma sıvısının buharı süpürmesi ve kanatçıkların ince sıvı filmi ile çevrilmesi şeklindeki akış olayları görülmektedir.

Şekil 23’te DN-MFHS’nin, $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değeri ve düşük ısı güçlere (100 W) karşılık gelen çalışma koşullarındaki akış görüntüleri sunulmuştur. Mikro oyuklarda kabarcık oluşumu açıkça görülmektedir (Şekil 23a – c). Buhar kanatçıksız bölgeye doğru genişlemekte (Şekil 23b ve c), böylece buhar sınırlanarak kanalı tıkamamakta ve akışın ana akış doğrultusunda hızlıca akabilmektedir. Ayrıca, Şekil 23d’de buhar kabarcığının kanatçıklar sebebiyle parçalanması da görülmektedir.

Şekil 24’te GS-MFHS’ye ait görüntüler verilmiştir. Çalışma koşulları $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısına ve 100 W ısı yük değerine karşılık gelmektedir. Şekil 24a – c’de kanatçıkların sıvı ile kaplanması, Şekil 24c’de buharın sıvı tarafından kanal çıkışına doğru süpürülmesi ve Şekil 24d – f’de kanal çıkışına yakın bölgede kanatçıklar arası artan mesafede sıvı ve buhar fazının kompleks ilişkisi görülmektedir.

Şekil 25'te PW-MCHS için, $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve 120 W ısı güç değerinde elde edilen akış görüntülerine örnekler verilmiştir. Şekil 25a – c'de ters akış oluşumu, oluşan görece mikro kabarcıkların ters yönde büyüyen kabarcık sebebiyle ana akışa ters doğrultuda hareket etmesi görülmektedir. Şekil 25c – f'de ise ısı alıcının yaklaşık orta bölümlerine denk gelen konumdan alınan görüntüler sunulmuştur. Kabarcık oluşumu, sönümlenmesi ve paralel iki kanalda aynı anda farklı akış olaylarının gerçekleşmesi görülmektedir.

Şekil 26'da CT-MFHS için $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 120 W ısı yük değerinde alınan görüntülere ait örnekler sunulmuştur. Genel olarak, aynı kanal için yukarıda bahsedilen akış olayları gerçekleşmektedir. Isıl güç artışına bağlı olarak kabarcık oluşumunda görece artış meydana geldiği belirtilmelidir.

Şekil 27'de GD-MFHS; Şekil 28'de DN-MFHS ve Şekil 29'da GS-MFHS için $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 120 W ısı yük değerinde elde edilen görüntülere örnekler verilmiştir. Tekrara girmemek için bu bölümde sadece görüntüler sunulmuştur.

Şekil 30'da PW-MCHS için $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve görece yüksek ısı güç değerine karşılık gelen çalışma koşulunda (170 W), elde edilen akış görüntülerine örnekler verilmiştir. Yüksek ısı güç sebebiyle, kabarcıklaşma etkisini kaybeder, kabarcık popülasyonu önemli ölçüde azalır ve baskın akış desenleri uzun kabarcıklı akış ve halkasal akış olur. Bir buhar kabarcığı, görece yüksek ısı yük altında daha şiddetli bir şekilde büyür, ters akış şiddetlenir, kabarcık sönümlenme olayı daha baskın hale gelir ve kabarcıklı kaynama etkinliğini kaybeder. Bir buhar kabarcığı gelişip, kanalın mikro kesiti içinde sınırlandığı zaman her iki doğrultuda da büyüyerek uzun buhar kabarcığına dönüşür ve/veya bir sonraki aşama olarak halkasal akış oluşur. Halkasal akış, kanal iç bölgesinde buharın ve buharı çevreleyerek kanal yüzeyleriyle temas halinde olan ince sıvı filminin olduğu akıştır. Bir başka ifade ile halkasal akışta iç bölgede buhar ve onun çevresinde kanal yüzeyleriyle temas edecek şekilde sıvı filmi bulunur. Bu durumda sıvı filmi buharlaşması ısı transfer sürecinde etkin bir rol oynar. Şekil 30f'de halkasal akış açık bir şekilde görülmektedir. Buharı çevreleyen koyu çizgi sıvı-buhar arayüzüdür ve kanal yüzeyi sıvı filmi ile kaplıdır.

Şekil 31'de CT-MFHS için $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 170 W ısı güçte elde edilen görüntüler sunulmuştur. Artan ısı güce bağlı olarak buharlaşmanın ve

buhar bölgelerinin etkinliği artmaktadır. Buna karşın, kabarcıklaşma devam etmektedir. Burada, alternatif akış pasajlarının varlığı önemli rol oynamaktadır. Buhar bir bölgeyi kapladığında bile mikro kanatçıkların sıvı filmi ile çevrili olması ince film buharlaşması şeklinde ısı transferine katkı sunmaktadır. Buna karşın, buharın ısı transfer yüzeyleri üzerinde kalma süresinin görece uzun olması (daha düşük ısı yüklerine ve yapısal olarak iyileştirilmiş ısı alıcılara kıyasla), yapısal olarak iyileştirilmiş kanallara kıyasla buhar blokajının ve ters akışın gerçekleşmesi ve sürdürülebilir kabarcıklaşmanın ilgili kanallara kıyasla daha zayıf olması CT-MFHS'nin ısı performansını yapısal olarak iyileştirilmiş kanallara kıyasla oldukça zayıflatmaktadır. Buna karşın, PW-MCHS'ye kıyasla alternatif akış yollarının varlığı ve mikro pim tipi kanatçıkların sağladığı avantajlar sebebiyle daha iyi bir ısı transferi sunmaktadır.

Şekil 32'de GD-MFHS için $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 170 W ısı yük değerindeki akış görüntülerine örnekler verilmiştir. Yüksek ısı güç değerlerine rağmen, genişleyen kanal kesiti etkisiyle kabarcık tıkanması ve ters akış oluşmadan kaynamalı akış gerçekleşmektedir. Buhar kabarcıkları geniş bölgelere doğru yönlendirilerek hızlıca hareket etmekte ve böylece ısı alıcı çıkışına doğru herhangi bir blokaja maruz kalmadan ivmelenmektedir. Tıkanma olmadığı için kabarcıklaşma sürdürülebilir niteliktedir ve ısılatma sıvısıyla birlikte buhar kabarcıkları sürüklenerek ısı alıcı çıkışına doğru hareket etmektedir. Isılatma iyileşmektedir. Herhangi bir buhar bölgesinin yüzeyde kalma süresi azalmaktadır. Bu mekanizmalar aracılığıyla ısı transferinde önemli düzeyde iyileşme sağlanmaktadır.

Şekil 33'te DN-MFHS'nin, $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve 170 W ısı yük değeri için alınan akış görüntülerine örnekler verilmiştir. GD-MFHS'ye ek olarak bu ısı alıcıda yapay kabarcıklaşma oyukları bulunmaktadır. Bu oyuklar sayesinde hem kabarcıklaşma iyileşmekte hem de oyuklar sıvıyı tutarak ısılanma sürecine katkı sağlamaktadır.

Şekil 34'te GS-MFHS'nin, $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 170 W ısı yük değerinde alınan akış görüntülerine örnekler sunulmuştur. Yüksek ısı güçlerine rağmen kütle akısının artmasıyla akışın ana akış doğrultusundaki hareketi iyileşmektedir. Buradaki temel faktör artan sıvı atalet momentum kuvvetidir. Isı transfer katsayıları üzerinden sunulan grafiklerde de görece orta ve yüksek kütle akısı değerlerinde bu ısı alıcısının performansının yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 35 – 44 arasında

diğer iki kütle akısı ve yine yüksek ısıl güçlere (180 W) karşılık gelen durum için tüm kanallara ait örnek görüntüler sunulmuştur. Fiziksel mekanizmalara ait irdelemeler yapıldığı için tekrara girmemek adına sadece görüntüler verilmiştir.

3.1.4. Doymuş Kaynamalı Akış Koşullarında Toplam Basınç Düşümü

Şekil 12’de farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi sunulmuştur. Tüm ısı alıcılarına ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tüm ısı alıcılar için ortak bir davranış olarak, artan efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile basınç düşümü artar. Grafiklerde de görüldüğü üzere, en düşük basınç düşümü PW-MCHS için elde edilmiştir. En yüksek basınç düşümü değerleri ise CT-MFHS için elde edilmiştir. Özgün ısı alıcılar için kendi aralarında bir değerlendirme yapılacak olursa, tüm veri tabanı üzerinden, genel karakter olarak GD-MFHS’nin GS-MFHS’den, GS-MFHS’nin de DN-MFHS’den daha düşük basınç düşümü değerleri sunduğu ifade edilebilir.

Nicel değerler üzerinden kıyaslama yapılacak olursa; $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değerinde CT-MFHS, PW-MCHS’den ortalama olarak %58 oranında daha yüksek basınç düşümü sunmaktadır. GD-MFHS ise geleneksel kanallar ile kıyaslama yapıldığında, PW-MCHS’den ortalama olarak %23.5 daha yüksek; CT MFHS’den ise ortalama olarak %21.6 daha düşük basınç düşümü sunmuştur. DN-MFHS, PW-MCHS’den ortalama %36 daha yüksek; CT-MFHS’den ise ortalama %13.7 daha düşük basınç düşümü sunmaktadır.

Kütle akısının $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ değeri için kıyaslamalar yapıldığında sonuçlar şu şekildedir: CT-MFHS, PW-MCHS’ye göre ortalama %59.1 daha yüksek basınç düşümü sunmuştur. GD-MFHS, PW-MCHS’den ortalama %20 daha yüksek basınç düşümü ve CT-MFHS’den ortalama %24.5 daha düşük basınç düşümü sunmuştur. DN-MFHS, PW-MCHS’den ortalama %35.2 daha yüksek; CT-MFHS’den ise ortalama %14.9 daha düşük basınç düşümü sunmaktadır.

Kütle akısının $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için kıyaslamalar yapıldığında şu sonuçlar elde verilebilir: CT-MFHS, PW-MCHS’ye göre ortalama %42.5 daha yüksek basınç düşümü sunmuştur. GD-MFHS, PW-MCHS’den ortalama %29.3 daha yüksek basınç düşümü sunmuştur. GS-MFHS, PW-MCHS’den ortalama %22.3 daha yüksek basınç düşümü sunmuştur. DN-MFHS ise PW-MCHS’den ortalama %33.5 daha yüksek

basınç düşümü sunmaktadır.

Kütle akısının $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ değeri için kıyaslamalar yapıldığında şu sonuçlar elde edilmiştir: CT-MFHS, PW-MCHS'ye göre ortalama %63.5 daha yüksek basınç düşümü sunmuştur. GD-MFHS, PW-MCHS'den ortalama %21.6 daha yüksek, CT-MFHS'den ise ortalama %25.5 daha düşük basınç düşümü sunmuştur. GS-MFHS, PW-MCHS'den ortalama %29.8 daha yüksek, CT-MFHS'den ortalama %20.6 daha düşük basınç düşümü sunmuştur. DN-MFHS, PW-MCHS'den ortalama %36.1 daha yüksek basınç düşümü ve CT-MFHS'den ortalama %16.6 daha düşük basınç düşümü sunmaktadır.

Kütle akısının $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ değeri için kıyaslamalar yapıldığında şu sonuçlar sunulabilir: CT-MFHS, PW-MCHS'ye göre ortalama %61.9 daha yüksek basınç düşümü sunmuştur. GD-MFHS, PW-MCHS'den ortalama %15.3 daha yüksek, CT-MFHS'den ise ortalama %28.7 daha düşük basınç düşümü sunmuştur. GS-MFHS, PW-MCHS'den ortalama %32.6 daha yüksek basınç düşümü ve CT-MFHS'den ortalama %17.9 daha düşük basınç düşümü sunmuştur. DN-MFHS, PW-MCHS'den ortalama %28.8 daha yüksek, CT-MFHS'den ise ortalama %20.3 daha düşük basınç düşümü sunmaktadır.

Son olarak, $287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı için kıyaslamalar yapılmıştır. Bu doğrultuda, CT-MFHS, PW-MCHS'ye göre ortalama %63.7 daha yüksek bir basınç düşümü sunmuştur. GD-MFHS, PW-MCHS'den ortalama %20.4 daha yüksek basınç düşümü sunmuştur. GS-MFHS, PW-MCHS'den ortalama %23.7 daha yüksek bir basınç düşümü sunmuştur. DN-MFHS ise PW-MCHS'den ortalama %22.7 daha yüksek bir basınç düşümü sunmuştur.

Basınç düşümünün artan ısı akısı veya kuruluk derecesi ile artmasının temel sebebi, ivmelenme ve sürtünme basınç düşümü bileşenlerinde meydana gelen artıştır. Yapısal olarak iyileştirilmiş kanallarda ise akış karışımındaki artış, akışkanın kanatçıklara çarpması ve sıvı ve buhar fazının birbirine göre ivmelenme süreçleri basınç düşümündeki değişimlerde rol oynayan diğer faktörler arasındadır.

3.1.5. Kaynama Kararsızlıkları

Mikrokanallarda kaynamalı akış, yapısı gereği kararsızlık oluşumuna elverişlidir. Kararsızlık düzeyleri ise sıcaklık ve basınç değerlerinde meydana gelen çalkantılar şeklinde nicelleştirilebilir. Kanallarda yapısal iyileştirmeler yapılarak kararsızlıklar önlenabilir, azaltılabilir veya ihmal edilebilecek düzeye çekilebilir. Kararsızlık kapsamında, Şekil 13 ve 14'te, bütün ısı alıcılar için tüm kütle akılarında, giriş sıcaklığı ve basıncının zaman bağımlı değişimleri verilmiştir. Bu grafikler, her bir çalışma koşulunda, bir ölçüm esnasında, toplamda yaklaşık 32 saniyede alınan 60 veriyi kapsamaktadır. Şekiller farklı ısıl güç değerlerine karşılık gelecek koşulları içerecek şekilde verilmiştir.

Şekil 13a'da, $98 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı ve 90 W ısıl güç değeri için, giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi verilmiştir. Şekillerde tüm ısı alıcılara ait veriler yer almaktadır. Niceliksel olarak ifade edilecek olunursa, PW-MCHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $1.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 2.16\%$ 'ya karşılık gelmektedir. CT-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 1.2\%$ 'ye karşılık gelmektedir. GD-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.44 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 0.59\%$ 'a karşılık gelmektedir. DN-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 0.23\%$ 'e karşılık gelmektedir. GS-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 0.84\%$ 'e karşılık gelmektedir.

Şekil 13b'de, $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 100 W ısıl güç değerinde bütün ısı alıcılar için giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. PW-MCHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $1.23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 1.66\%$ 'ya karşılık gelmektedir. CT-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.81 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 1.1\%$ 'e karşılık gelmektedir. GD-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 0.2\%$ 'ye karşılık gelmektedir. DN-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 0.93\%$ 'e karşılık gelmektedir. GS-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 0.39\%$ 'a karşılık

gelmektedir.

Şekil 13c’de, $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 120 W ısı gücü değerinde, bütün ısı alıcılar için giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi verilmiştir. PW-MCHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%1.3$ ’e karşılık gelmektedir. CT-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%0.76$ ’ya karşılık gelmektedir. GD-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%0.27$ ’ye karşılık gelmektedir. DN-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%0.22$ ’ye karşılık gelmektedir. GS-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%0.17$ ’ye karşılık gelmektedir.

Şekil 13d’de, $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 170 W ısı gücü değerinde, bütün ısı alıcılar için giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi sunulmuştur. PW-MCHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $1.25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%1.67$ ’ye karşılık gelmektedir. CT-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.4°C olup, $\pm\%0.53$ ’e karşılık gelmektedir. GD-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.09 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%0.11$ ’e karşılık gelmektedir. DN-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%0.14$ ’e karşılık gelmektedir. GS-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%0.27$ ’ye karşılık gelmektedir.

Şekil 13e’de, $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 180 W ısı gücü değerinde, bütün ısı alıcılar için, giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi verilmiştir. PW-MCHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $1.39 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%1.8$ ’e karşılık gelmektedir. CT-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.5°C olup, $\pm\%0.66$ ’ya karşılık gelmektedir. GD-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%0.59$ ’a karşılık gelmektedir. DN-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $0.15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm\%0.2$ ’ye karşılık gelmektedir. GS-MFHS’nin giriş sıcaklığı verilerindeki

ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.16 °C olup, ± 0.22 'ye karşılık gelmektedir.

Şekil 13f'de, 287 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısında ve 180 W ısı güç değerinde, bütün ısı alıcılar için, giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi verilmiştir. PW-MCHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 2.27 °C olup, ± 2.94 'e karşılık gelmektedir. CT-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.46°C olup, ± 0.62 'ye karşılık gelmektedir. GD-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.16 °C olup, ± 0.21 'e karşılık gelmektedir. DN-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.12 °C olup, ± 0.16 'ya karşılık gelmektedir. GS-MFHS'nin giriş sıcaklığı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.22 °C olup, ± 0.29 'a karşılık gelmektedir.

Şekil 14a'da, 98 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısında ve 90 W ısı güç değerinde, tüm ısı alıcılar için, giriş basıncının zamana bağlı değişimi görülmektedir. PW-MCHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.77 kPa olup, ± 0.74 'e karşılık gelmektedir. CT-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.4 kPa olup, ± 0.37 'ye karşılık gelmektedir. GD-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.13 kPa olup, ± 0.12 'e karşılık gelmektedir. DN-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.29 kPa olup, ± 0.28 'e karşılık gelmektedir. GS-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.38 kPa olup, ± 0.36 'ya karşılık gelmektedir.

Şekil 14b'de, 136 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısında ve 100 W ısı güç değerinde, tüm ısı alıcılar için giriş basıncının zamana bağlı değişimi verilmiştir. PW-MCHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.68 kPa olup, ± 0.64 'e karşılık gelmektedir. CT-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.56 kPa olup, ± 0.52 'ye karşılık gelmektedir. GD-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.27 kPa olup, ± 0.25 'e karşılık gelmektedir. DN-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.37

kPa olup, ± 0.35 'e karşılık gelmektedir. GS-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.22 kPa olup, ± 0.21 'e karşılık gelmektedir.

Şekil 14c'de, $174 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 120 W ısı güçte, tüm ısı alıcılar için giriş basıncının zamana bağlı değişimi verilmiştir. PW-MCHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.7 kPa olup, ± 0.65 'e karşılık gelmektedir. CT-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.66 kPa olup, ± 0.61 'e karşılık gelmektedir. GD-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.25 kPa olup, ± 0.23 'e karşılık gelmektedir. DN-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.6 kPa olup, ± 0.55 'e karşılık gelmektedir. GS-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.66 kPa olup, ± 0.61 'e karşılık gelmektedir.

Şekil 14d'de, $212 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 170 W ısı güçte, tüm ısı alıcılar için giriş basıncının zamana bağlı değişimi sunulmuştur. PW-MCHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.2 kPa olup, ± 0.18 'e karşılık gelmektedir. CT-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.31 kPa olup, ± 0.27 'ye karşılık gelmektedir. GD-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.07 kPa olup, ± 0.06 'ya karşılık gelmektedir. DN-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.3 kPa olup, ± 0.27 'ye karşılık gelmektedir. GS-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.32 kPa olup, ± 0.29 'a karşılık gelmektedir.

Şekil 14e'de, $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında, 180 W ısı güçte, tüm ısı alıcılar için giriş basıncının zamana bağlı değişimi verilmiştir. PW-MCHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 1.13 kPa olup, ± 1.01 'e karşılık gelmektedir. CT-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 1.2 kPa olup, ± 1.03 'e karşılık gelmektedir. GD-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.06 kPa olup, ± 0.06 'ya karşılık gelmektedir. DN-MFHS'nin giriş

basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.37 kPa olup, ± 0.33 'e karşılık gelmektedir. GS-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.43 kPa olup, ± 0.38 'e karşılık gelmektedir.

Şekil 14f'de, $287 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısında ve 180 W ısı güçte, tüm ısı alıcılar için giriş basıncının zamana bağlı değişimi verilmiştir. PW-MCHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.42 kPa olup, ± 0.38 'e karşılık gelmektedir. CT-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 1 kPa olup, ± 0.9 'a karşılık gelmektedir. GD-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.04 kPa olup, ± 0.04 'e karşılık gelmektedir. DN-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.07 kPa olup, ± 0.06 'ya karşılık gelmektedir. GS-MFHS'nin giriş basıncı verilerindeki ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 0.52 kPa olup, ± 0.46 'ya karşılık gelmektedir.

Genel karakter olarak, konvansiyonel ısı alıcılardaki kaynamalı akışta meydana gelen kararsızlıklar, yapısal olarak iyileştirilmiş ısı alıcılardakilere kıyasla daha şiddetlidir. Genel olarak, en yüksek kararsızlık düzeyleri, PW-MCHS için elde edilmiştir. Kabarcık sınırlanma olayı, şiddetli ters akış, buhar kabarcığının kanal girişinden (ters yönde) çıkarak gelen besleme sıvısıyla (ve hatta giriş haznesindeki sıvıyla) etkileşime girmesi ve paralel kanal kararsızlığının meydana gelmesi PW-MCHS'nin en yüksek kararsızlık düzeyine sahip olmasının arka planındaki fiziksel süreçlerdir. CT-MFHS'de ise alternatif kanalların varlığı ters akışı kısmen önlemekte (PW-MCHS'ye göre azaltmakta) ve mikro pim tipi kanatçıklı yapı gereği paralel kanal kararsızlığından bahsedilememektedir. Buna karşın, özellikle ısı alıcı çıkışına doyma koşulları etkisini artırmaktadır. Bu nedenle, özellikle ısı alıcının çıkış bölgesine doğru, buharlaşma daha etkin olmakta, daha geniş buhar kabarcıkları oluşmakta veya oluşan kabarcıklar birleşerek büyük kümeler haline gelmektedir. CT-MFHS'deki alternatif yollara rağmen, tüm ısı alıcı boyunca olan üniform kanatçık dağılımı ve üniform akış pasajı kesitleri, kabarcık sınırlanmasını, tıkanmasını ve ters yönde kabarcıkların büyümesini engelleyememekte veya ortadan kaldıramamaktadır. Bu sebeple, PW-MCHS'den daha avantajlı olmasına rağmen, CT-MFHS'de de yapısal olarak

iyileştirilmiş kanallara kıyasla, genel karakter, olarak daha yüksek düzeyli kararsızlıklar oluşmaktadır. Yapısal olarak iyileştirilmiş kanallarda, mikro pim tipi kanatçık sayısı çıkışa doğru azalmaktadır. Dolayısıyla, çıkışa doğru akış kesiti genişlemektedir. Bu sebeple, buhar kabarcıklarının tıkanması, sınırlanması ve ters akış önlenebilmekte, akışın tek yönlü hareketi desteklenmekte ve kararsızlık düzeyleri azaltılarak ısıl performans iyileşmektedir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, GS-MFHS kodlu ısı alıcı çıkışa doğru en az kanatçık sayısına sahiptir. Bu sebeple, kütle akısının düşük değerlerinde (ilk iki kütle akısında) erken CHF meydana gelmiştir. Buna karşın, kütle akısı artışına bağlı olarak, artan sıvı atalet kuvveti etkisiyle bu olumsuz durum kolayca bertaraf edilebilmektedir.

3.2. Sonuç

Tez kapsamında elde edilen bulgular ve bulguların irdelenmesi detaylı olarak önceki bölümlerde yapılmıştır. Bu konuda, elde edilen sonuçlar özet halinde sunulmuştur.

- Tüm ısı alıcılar için artan ısı akısı ile duvar kızma farkı artmaktadır. Genel karakter olarak, en iyi ısıl performansın DN-MFHS için, en kötü ısıl performansın ise (ilk iki kütle akısındaki kritik ısı akısı koşulları hariç) PW-MCHS için elde edildiği görülmektedir.
- İki fazlı ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesiyle değişimi sonucunda, genel karakter olarak, en yüksekten en düşük ısıl performansa göre sıralama; DN-MFHS > GD-MFHS > GS-MFHS > CT-MFHS > PW-MCHS şeklindedir.
- Tüm veri tabanı üzerinden, DN-MFHS kodlu ısı alıcı iki faz ısı transfer katsayısında, PW-MCHS ve CT-MFHS kodlu ısı alıcılarına kıyasla, sırayla, %827.2'ye ve %737.7'ye kadar artış sağlamıştır.
- Tüm veri tabanı üzerinden, GD-MFHS kodlu ısı alıcı iki faz ısı transfer katsayısında, PW-MCHS ve CT-MFHS kodlu ısı alıcılarına kıyasla, sırayla, %671.7'ye ve %561.7'ye kadar artış sağlamıştır.
- Tüm veri tabanı üzerinden, GS-MFHS kodlu ısı alıcı iki faz ısı transfer katsayısında, PW-MCHS ve CT-MFHS kodlu ısı alıcılarına kıyasla, sırayla, %278.8'e ve %224.8'e kadar artış sağlamıştır.

- En düşük iki kütle akısında GS-MFHS’de meydana gelen kritik ısı akısına erişme durumu haricinde, diğer tüm koşullarda, yapısal olarak iyileştirilmiş ısı alıcıların tamamı konvansiyonel ısı alıcılara kıyasla ısı transferinde belirgin bir iyileşme sağlamaktadır.
- Tüm ısı alıcılar için ortak bir davranış olarak, artan efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile basınç düşümü artmaktadır. En düşük basınç düşümü PW-MCHS ve en yüksek basınç düşümü değerleri ise CT-MFHS için elde edilmiştir.
- Özgün ısı alıcılar için kendi aralarında kıyaslama yapıldığında, tüm veri tabanı üzerinden, genel karakter olarak GD-MFHS’nin GS-MFHS’den, GS-MFHS’nin de DN-MFHS’den daha düşük basınç düşümü değerleri sunmuştur.
- Konvansiyonel ısı alıcılardaki kaynamalı akışta meydana gelen kararsızlıklar, yapısal olarak iyileştirilmiş ısı alıcılardakilere kıyasla daha şiddetlidir.
- Kabarcık sınırlanma olayı, şiddetli ters akış, buhar kabarcığının kanal girişinden (ters yönde) çıkarak gelen besleme sıvısıyla etkileşime girmesi ve paralel kanal kararsızlığının meydana gelmesi PW-MCHS’nin en yüksek kararsızlık düzeyine sahip olmasına neden olmuştur.
- CT-MFHS’deki alternatif yollara rağmen, tüm ısı alıcı boyunca olan üniform kanatçık dağılımı ve üniform akış pasajı kesitleri, kabarcık sınırlanmasını, tıkanmasını ve ters yönde kabarcıkların büyümesini engelleyememekte veya ortadan kaldıramamaktadır.
- Yapısal olarak iyileştirilmiş kanallarda, mikro pim tipi kanatçık sayısı çıkışa doğru azalmaktadır. Dolayısıyla, çıkışa doğru akış kesiti genişlemektedir. Bu sebeple, buhar kabarcıklarının tıkanması, sınırlanması ve ters akış önlenemekte, akışın tek yönlü hareketi desteklenmekte ve kararsızlık düzeyleri azaltılarak ısı performans iyileşmektedir.
- GD-MFHS’nin, kademeli genişleyen yapı sayesinde, tıkanma problemi önlenmekte, buhar kanal çıkışına doğru rahatça genişleyebilmekte, oluşan buhar bölgesi ısı alıcının önceki bölümlerinden gelen ısılatma sıvısı tarafından kolayca süpürülerek kanal çıkışına itilmektedir. Bu süreçler ısı transfer performansında belirgin bir iyileşme sağlanmaktadır.

- DN-MFHS'nin kabarcıklaşma oyukları, kabarcıklaşmayı destekleyerek ve sıvı kapanı görevi görecektir ısı transferine katkı sağlar. Yüzey buharla bile kaplansa, kabarcıklaşma oyuğu fitil etkisi ile sıvıyı tutarak, ısı transfer yüzeyinin ıslatılmasını sağlar. Bu mekanizmalar, DN-MFHS'nin en iyi ısı transfer performansını sunmasını sağlamıştır.
- GS-MFHS kodlu ısı alıcı çıkışa doğru en az kanatçık sayısına sahiptir. Bu sebeple, kütle akısının düşük değerlerinde (ilk iki kütle akısında) erken CHF meydana gelmiştir. Buna karşın, kütle akısı artışına bağlı olarak, artan sıvı atalet kuvveti etkisiyle bu olumsuz durum kolayca bertaraf edilebilmektedir.

3.3. Öneriler

- Mevcut çalışmada iş akışkanı olarak deiyonize su kullanılmıştır. Farklı akışkanlar kullanılarak, akışkan özelliklerinin etkisi incelenebilir.
- Kanatçık yerleşim yerleri üzerinden yeni geometrik yapılar oluşturulabilir.
- Farklı çalışma aralıkları kullanılabilir.

KAYNAKÇA

- Al-Yahia, O. S., ve Jo, D. (2018). ONB, OSV, and OFI for subcooled flow boiling through a narrow rectangular channel heated on one-side. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.011>
- Al-Zaidi, A. H., Mahmoud, M. M., ve Karayiannis, T. G. (2019). Flow boiling of HFE-7100 in microchannels: Experimental study and comparison with correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 100–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.095>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.02.007>
- Balasubramanian, K., Lee, P. S., Teo, C. J., ve Chou, S. K. (2013). Flow boiling heat transfer and pressure drop in stepped fin microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 234–252. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.023>
- Chien, L. H., Liao, W. R., Ghalambaz, M., ve Yan, W. M. (2019). Experimental study on convective boiling of micro-pin-finned channels with parallel arrangement fins for FC-72 dielectric fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 138, 390–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.072>
- Çengel, Y.A., ve Ghajar, A.J. (2015). Heat and mass transfer: fundamentals & applications, Fifth edition. New York, NY: McGraw Hill Education.
- Dang, C., Jia, L., Peng, Q., Yin, L., ve Qi, Z. (2020). Comparative study of flow boiling heat transfer and pressure drop of HFE-7000 in continuous and segmented microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 148, 119038. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119038>
- Deng, D., Chen, L., Wan, W., Fu, T., ve Huang, X. (2019). Flow boiling performance in pin fin- interconnected reentrant microchannels heat sink in different operational conditions. *Applied Thermal Engineering*, 150(December 2018), 1260–1272. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.092>
- Deng, D., Tang, Y., Liang, D., He, H., ve Yang, S. (2014). Flow boiling characteristics in porous heat sink with reentrant microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 463–477. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.057>
- Deng, D., Wan, W., Qin, Y., Zhang, J., ve Chu, X. (2017). Flow boiling enhancement of structured microchannels with micro pin fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 105, 338–349.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.086>

- Deng, D., Xie, Y., Huang, Q., Tang, Y., Huang, L., ve Huang, X. (2015). Flow boiling performance of Ω -shaped reentrant copper microchannels with different channel sizes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 69, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.07.016>
- Deng, D., Zeng, L., ve Sun, W. (2021). A review on flow boiling enhancement and fabrication of enhanced microchannels of microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 175, 121332. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121332>
- Deng, D., Zeng, L., Sun, W., Pi, G., ve Yang, Y. (2021). Experimental study of flow boiling performance of open-ring pin fin microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 167, 120829. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120829>
- Jia, Y. T., Xia, G. D., Zong, L. X., Ma, D. D., ve Tang, Y. X. (2018). A comparative study of experimental flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics in porous-wall microchannel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 818–833. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.090>
- Jung, K. M., Krishnan R, A., Kumar G, U., ve Lee, H. J. (2021). Experimental study on two-phase pressure drop and flow boiling heat transfer in a micro pin fin channel heat sink under constant heat flux. *Experimental Heat Transfer*, 34(2), 162–185. <https://doi.org/10.1080/08916152.2020.1725182>
- 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), 1–18. <https://doi.org/10.1115/1.4024354>
- Karayiannis, T. G., ve Mahmoud, M. M. (2017). Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications. *Applied Thermal Engineering*, 115, 1372–1397. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.063>
- Kim, S. M., ve Mudawar, I. (2013). Universal approach to predicting saturated flow boiling heat transfer in mini/micro-channels – Part II. Two-phase heat transfer coefficient. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 1239–1256. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.014>
- Koşar, A., Rafet Özdemir, M., ve Keskinöz, M. (2010). Pressure drop across micro-pin heat sinks under unstable boiling conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(7), 1253–1263. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.12.018>

- Kong, L., Liu, Z., Jia, L., Lv, M., ve Liu, Y. (2020). Experimental study on flow and heat transfer characteristics at onset of nucleate boiling in micro pin fin heat sinks. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 115(April 2019). <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109946>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.047>
- Kuo, C. J., ve Peles, Y. (2008). Flow boiling instabilities in microchannels and means for mitigation by reentrant cavities. *Journal of Heat Transfer*, 130(7), 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.2908431>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.015>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.137>
- Law, M., ve Lee, P. S. (2016). Effects of varying secondary channel widths on flow boiling heat transfer and pressure characteristics in oblique-finned microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 313–326. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.055>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.045>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.019>
- Li, W., Ma, J., Alam, T., Yang, F., Khan, J., ve Li, C. (2018). Flow boiling of HFE-7100 in silicon microchannels integrated with multiple micro-nozzles and reentry micro-cavities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123, 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.108>
- Li, Y., Wu, H., ve Yao, Y. (2022). Enhanced flow boiling heat transfer and suppressed boiling instability in counter-flow stepped microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123025. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123025>
- Lie, Y. M., Ke, J. H., Chang, W. R., Cheng, T. C., ve Lin, T. F. (2007). Saturated flow boiling heat transfer and associated bubble characteristics of FC-72 on a heated

- micro-pin-finned silicon chip. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(19–20), 3862–3876. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.010>
- Lin, Y., Luo, Y., Li, J., ve Li, W. (2021). Heat transfer, pressure drop and flow patterns of flow boiling on heterogeneous wetting surface in a vertical narrow microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 172, 121158. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121158>
- Ma, J., Li, W., Ren, C., Khan, J. A., ve Li, C. (2019). Realizing highly coordinated, rapid and sustainable nucleate boiling in microchannels on HFE-7100. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133, 1219–1229. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.162>
- Markal, B. (2016). Mikrokanallarda Kaynamalı Akışın Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Mao, N., Zhuang, J., He, T., ve Song, M. (2021). A critical review on measures to suppress flow boiling instabilities in microchannels. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 57(6), 889–910. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-03009-2>
- Mathew, J., Lee, P. S., Wu, T., ve Yap, C. R. (2020). Comparative Study of the Flow Boiling Performance of the Hybrid Microchannel-Microgap Heat Sink with Conventional Straight Microchannel and Microgap Heat Sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119812>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.022>
- Prajapati, Y. K., ve Bhandari, P. (2017). Flow boiling instabilities in microchannels and their promising solutions – A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88(July), 576–593. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.07.014>
- Prajapati, Y. K., Pathak, M., ve Kaleem Khan, M. (2015). A comparative study of flow boiling heat transfer in three different configurations of microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 711–722. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.016>
- Prajapati, Y. K., Pathak, M., ve Khan, M. K. (2016). Transient heat transfer characteristics of segmented finned microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 79, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.004>
- Prajapati, Y. K., Pathak, M., ve Khan, M. K. (2017). Bubble dynamics and flow boiling characteristics in three different microchannel configurations. *International*

- Journal of Thermal Sciences*, 112, 371–382.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.10.021>
- Qin, L., Li, S., Zhao, X., ve Zhang, X. (2021). Experimental research on flow boiling characteristics of micro pin-fin arrays with different hydrophobic coatings. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 126(July), 105456.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105456>
- Qu, W., ve Mudawar, I. (2004). Transport phenomena in two-phase micro-channel heat sinks. *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, 126(2), 213–224. <https://doi.org/10.1115/1.1756145>
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.008>
- Wan, W., Deng, D., Huang, Q., Zeng, T., ve Huang, Y. (2017). Experimental study and optimization of pin fin shapes in flow boiling of micro pin fin heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 114, 436–449.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.182>
- Yadigaroglu, G. (1981). Two-phase flow instabilities and propagation phenomena. *Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Individual Design and Nuclear Engineering*, Hemisphere, Washington, DC, 353–403.
- Yin, L., Chauhan, A., Recinella, A., Jia, L., ve Kandlikar, S. G. (2020). Subcooled flow boiling in an expanding microgap with a hybrid microstructured surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 151, 119379.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119379>
- Zhu, Y., Antao, D. S., Chu, K. H., Chen, S., Hendricks, T. J., Zhang, T., ve Wang, E. N. (2016). Surface Structure Enhanced Microchannel Flow Boiling. *Journal of Heat Transfer*, 138(9), 1–13. <https://doi.org/10.1115/1.4033497>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.001>
- Zong, L. X., Xia, G. D., Jia, Y. T., Liu, L., Ma, D. D., ve Wang, J. (2020). Flow boiling instability characteristics in microchannels with porous-wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 1–19.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118863>