

# Kare Kesitli Mikrokanallarda Doymuş Kaynamalı Akış Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi\*

Burak Markal<sup>1</sup>, Orhan Aydın<sup>2</sup>, Mete Avcı<sup>3</sup>

## ÖZ

Bu çalışmada, her biri 200 µm x 200 µm kanal kesitine (genişlik x yükseklik) sahip yirmi dokuz paralel mikrokanaldan oluşan silikon ısı alıcıda, deiyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Üç farklı kütle akısında (51, 65 ve 78 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) çalışılmış olup; duvar ısı akısı, 44,5 – 62,8 kWm<sup>-2</sup> aralığında tutulmuştur. Bu kapsamda, ısı akısı ve kütle akısının iki faz ısı transfer katsayısı ve toplam basınç düşümü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Fiziksel mekanizma, ölçümlerle eşzamanlı alınan yüksek hızlı akış görüntüleri yardımıyla irdelenmiştir. Çalışma sonucunda, iki faz ısı transfer katsayısının artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile azaldığı, artan kütle akısı ile arttığı; toplam basınç düşümünün ise, genel karakter olarak, artan ısı akısı ve çıkış kuruluk derecesi ile arttığı ve artan kütle akısı ile azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, akış görüntüleme çalışmalarında, mikrokanallarda kaynamalı akış olayının sanki-periyodik karakterde olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikrokanal, kaynamalı akış, akış görüntüleme, ısı transferi, basınç düşümü

## An Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Characteristics in Square Microchannels

### ABSTRACT

In this study, saturated flow boiling characteristics of deionized water are experimentally investigated in silicon heat sink consisting of twenty nine parallel microchannels with cross sectional dimensions of 200 µm x 200 µm (width x height). Experiments are conducted for three different mass fluxes of 51, 65 and 78 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, while the wall heat flux ranges from 44.5 – 62.8 kWm<sup>-2</sup>. In this context, the effects of heat flux and mass flux on the two phase heat transfer coefficient and the total pressure drop are investigated. The physical mechanism is scrutinized through simultaneous high speed flow images taken during measurements. Consequently, two phase heat transfer coefficient decreases with increasing heat flux and vapor quality, and increases with increasing mass flux. The total pressure drop increases with increasing heat flux and exit vapor quality while it decreases with increasing mass flux. From the flow visualization experiments, it is observed that flow boiling phenomenon in microchannels has quasi-periodical characteristics.

**Keywords:** Microchannel, flow boiling, flow visualization, heat transfer, pressure drop.

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 24.12.2017

Kabul/Accepted : 18.09.2018

\* 19-22 Nisan 2017 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İzmir’de düzenlenen 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi’nde sunulan bu bildiri, dergimiz için yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize - burak.markal@erdogan.edu.tr

<sup>2</sup> Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon - oaydin@ktu.edu.tr

<sup>3</sup> Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon - mavci@ktu.edu.tr



## 1. GİRİŞ

Mikro boyutlu cihazlar veya parçalar, son yirmi yıldır mekanik, elektronik (elektromekanik) ve biyolojik sistemlerde giderek yaygınlaşan bir şekilde kullanılmaktadır. Savunma sanayisi, tıp, uzay endüstrisi ve benzeri alanlarda ihtiyaç duyulan bu tür sistemlerde artan işlem kapasitelerine karşı fiziksel boyutlarda meydana gelen küçülme, yüksek ısı akılarının açığa çıkmasına sebep olmaktadır. Aşırı ısınma problemlerini önlemek ve dolayısıyla sistem güvenliğini sağlamak için etkili ısı kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, mikrokanallarda kaynamalı akış en iyi alternatiflerden biri olarak görülmektedir. Bu yöntem, yüksek yüzey alanı / hacim oranı, ml/dk mertebelerinde akışkan debisi değerleri ve buharlaşma gizli ısısının kullanımı gibi üç önemli avantajı eşzamanlı olarak sunmakta ve böylece yüzey sıcaklıkları nispeten sabit kalırken yüksek miktarda ısı akısı uzaklaştırabilme potansiyeli taşımaktadır. Fakat, literatürde de [1-7] belirtildiği üzere, mikrokanallarda kaynamalı akış konusu oldukça karmaşık bir fiziksel mekanizmaya sahiptir ve ilgili literatürde belirsizlikler ve çelişkiler bulunmaktadır. Bu nedenle, akış görüntüleri ile desteklenen yeni deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Qu ve Mudawar [8], 349  $\mu\text{m}$  (231  $\mu\text{m}$  x 713  $\mu\text{m}$ ) hidrolik çapa ( $D_h$ ) sahip dikdörtgen kesitli yirmi bir paralel mikrokanaldan oluşan bakır ısı alıcıda, deiyonize suyun kaynamalı akışını deneysel olarak incelemiştir. Isı transfer katsayısının artan kütle akısı ile arttığını, artan kuruluk derecesi ile azaldığını ve ısı akısına çok az bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Taşınım ile kaynamayı baskın ısı transfer mekanizması olarak tanımlamışlardır. Steinke ve Kandlikar [9], yaklaşık olarak trapez kesit geometrisine sahip altı paralel kanaldan ( $D_h = 207 \mu\text{m}$ ) oluşan ısı alıcıda suyun kaynamalı akışı üzerine çalışmışlardır. Isı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığını ve kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Huh ve Kim [10], 103,5  $\mu\text{m}$  hidrolik çapa sahip dikdörtgen kesitli tek bir mikrokanalda suyun kaynamalı akışını incelemiştir. Isı transfer katsayısının kütle akısı ve kuruluk derecesinden neredeyse bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Saraceno vd [11], 1 mm çaplı tek bir mikro tüpte FC-72'nin kaynamalı akışını incelemiştir. Isı transfer katsayısının artan ısı akısı ile arttığını ve kuruluk derecesine çok az bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Tuo ve Hrňjak [12], 1 mm hidrolik çapa sahip yirmi beş paralel dikdörtgen kesitli kanal içeren buharlaştırıcıda R134a'nın kaynamalı akışını çalışmışlardır. Akışı görüntüleyerek, periyodik ters akışın gerçekleştiğini belirtmiş ve ters akışın ısı transferi ve basınç düşümünü olumsuz etkilediğini ifade etmişlerdir. Kuo ve Peles [13], hidrolik çapları 223  $\mu\text{m}$  olan dikdörtgen kesitli paralel beş kanaldan oluşan ısı alıcıda, deiyonize suyun kaynamalı akış kararsızlıkları üzerinde basıncın etkisini incelemiştir. Yüksek basıncın kararsızlıkları azalttığını ve kritik ısı akısını (CHF) artırdığını belirtmişlerdir. Chen ve Garimella [14], her biri 100  $\mu\text{m}$  genişliğe ( $W_{ch}$ ) ve 389  $\mu\text{m}$  yüksekliğe ( $H_{ch}$ ) sahip altmış paralel mikrokanal içeren ısı alıcıda FC-77'nin kaynamalı akışını incelemiştir. İvmelenme ve sürtünme basınç düşümü bileşenleri arasındaki denge nedeniyle toplam basınç düşümünün kütle akısına zayıf bir şekilde bağlı



olduğunu, buna karşın ısı akışı ile neredeyse lineer olarak arttığını belirtmişlerdir. Wang vd [15], hidrolik çapları sırasıyla 571  $\mu\text{m}$ , 762  $\mu\text{m}$  ve 1454  $\mu\text{m}$  olan dikdörtgen kesitli tek mikrokanallarda FC-72'nin kaynamalı akışıyla ilgili deneyler yapmıştır. Hidrolik çapın basınç düşümü çalkantılarını etkilediğini ve basınç düşümü verilerinin artan kanal boyutu ile daha kaotik olduğunu belirtmişlerdir. Thiangtham vd [16], her biri 470  $\mu\text{m}$  yüksekliğe ve 382  $\mu\text{m}$  genişliğe sahip yirmi yedi paralel dikdörtgen kesitli mikrokanaldan oluşan bakır test bölgesinde R134a'nın kaynamalı akışında ısı transfer karakteristiklerini ve akış desenlerini deneysel olarak incelemiştir. Yüksek ısı akışı aralığında ısı transfer katsayısının artan kütle akışı ile arttığını, taşınım ile kaynama mekanizmasının dalgalı ve halkasal akış desenlerinde önemli bir rol oynayacağını, kısmi kurumanın ısı transfer katsayısını azalttığını ve akış desenlerinin ısı transfer karakteristikleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Jafari vd [17], paralel mikrokanallı (kırk kanal) buharlaştırıcılarda R134a'nın kaynamalı akışı için yüzey pürüzlülüğünün etkisini deneysel olarak incelemiştir. Dikdörtgen kesitli her bir mikrokanalın yüksekliği ve genişliği sırasıyla 700  $\mu\text{m}$  ve 250  $\mu\text{m}$ 'dir. Çalışma koşullarına bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğü artırılarak ısı transfer katsayısının %45'e kadar iyileştirilebileceğini göstermişlerdir. Chávez vd [18], mikrokanallı ısı alıcıda R600a, R290 ve R1270 soğutucularının kaynamalı akışını incelemiştir. Isı alıcı elli mikrokanaldan oluşmakta olup, her bir kanalın yüksekliği ve genişliği sırasıyla 494,2  $\mu\text{m}$  ve 123,3  $\mu\text{m}$ 'dir. Genel olarak, R290 akışkanının en iyi performansa sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Mikrokanallarda kaynamalı akışla ilgili birbirinden farklı bulgular, fiziksel mekanizmanın anlaşılmasına yönelik çalışmalar ve farklı parametrelerin etki düzeylerinin belirlenmesiyle ilgili girişimler derleme halinde yukarıda özetlenmiştir. Literatür özeti de görüldüğü üzere, bu güncel ve popüler konunun daha iyi anlaşılabilmesi için yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Yazarların önceki yayınlarında [19, 20] detaylı akış görüntüleme çalışmaları yardımıyla mikrokanallarda kaynamalı akışla ilgili kapsamlı deneyler/analizler yapılmış ve önemli bulgular elde edilmiştir. Kısa bir süre önce kabul edilmiş makalelerinde [21] ise literatüre konu dâhilinde yeni bir ısı transfer katsayısı bağıntısı önerilmiştir. Bu çalışmada ise, sadece, 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$  kanal kesitine sahip paralel mikrokanallardan oluşan ısı alıcıda, deiyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristiklerine odaklanılmıştır. İlgili test bölgesi için farklı kütle akılarında ve ısı yüklerinde elde edilen bulgular akış görüntüleri yardımıyla irdelenmiştir.

## 2. DENEY DÜZENEGİ VE TEST BÖLGESİ

### 2.1. Deney Düzenegi

Deney düzeneginin şematik resmi Şekil 1'de verilmiştir. Deney düzenegi, dört ana bölümden oluşmaktadır: (1) Açık sistem olarak tasarlanmış akışkan hattı, (2) test bölgesi, (3) akış görüntüleme sistemi ve (4) veri toplama sistemi. Sistemdeki akışkan

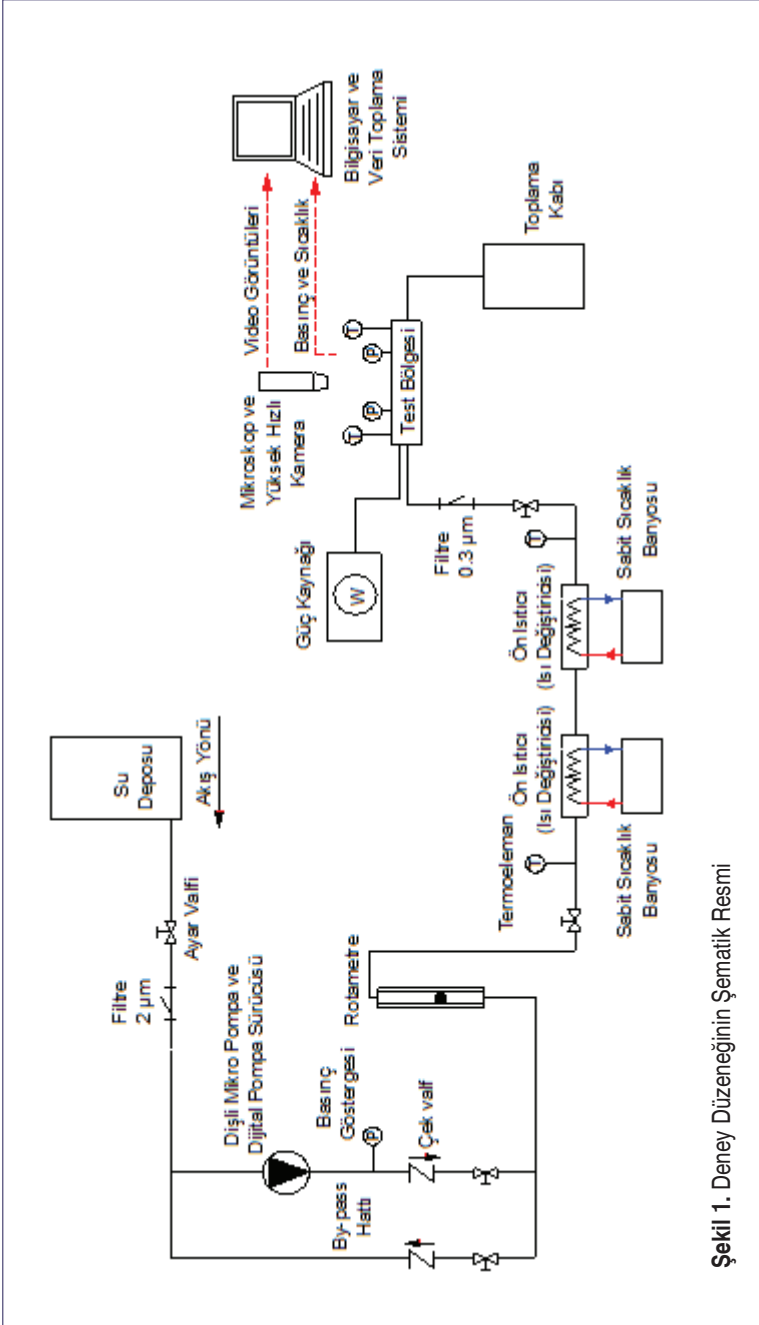


hareketi, dijital bir sürücü ile kontrol edilebilen mikro dişli pompa ile sağlanmaktadır. Pompa sürücüsü ile ayarlanıp, dijital ekrandan görüntülenebilen debi değeri, eşzamanlı olarak, sisteme yerleştirilmiş hassas bir rotametre ile de kontrol edilmektedir. Rotametreden geçen akışkan, iki adet özdeş mini ısı değiştiricisinden geçerek istenilen giriş sıcaklığına ayarlanmış olur. Isı değiştiricileri sabit sıcaklık banyoları ile irtibatlıdır. Sistem elemanlarının korunması ve deneysel ölçümlerin daha güvenilir sonuç vermesi amacıyla sisteme mikro filtreler yerleştirilmiştir. Test bölgesinin giriş ve çıkış haznelerindeki sıcaklık ve basınç değerleri, bu bölümlere (büyük haznelere) yerleştirilen termoelemanlar ve mutlak basınç sensörleri ile ölçülmektedir. Test bölgesi, her biri maksimum 300 W ısıtma kapasitesine sahip dört kartuş ısıtıcı ile ısıtılmakta olup, bu ısıtıcılar hassas bir güç kaynağı ile beslenmektedir. Akış görüntüleme sistemi, yüksek hızlı kamera ile bütünlük bir mikroskoptan oluşmaktadır. Test bölgesindeki sıcaklık ve basınç ölçümleri, veri toplama sistemi ile kayıt altına alınmıştır. Sistemdeki bütün bileşenlerin özellikleri yazarların önceki makalelerinde [19, 20] ayrıntılı olarak verilmiştir.

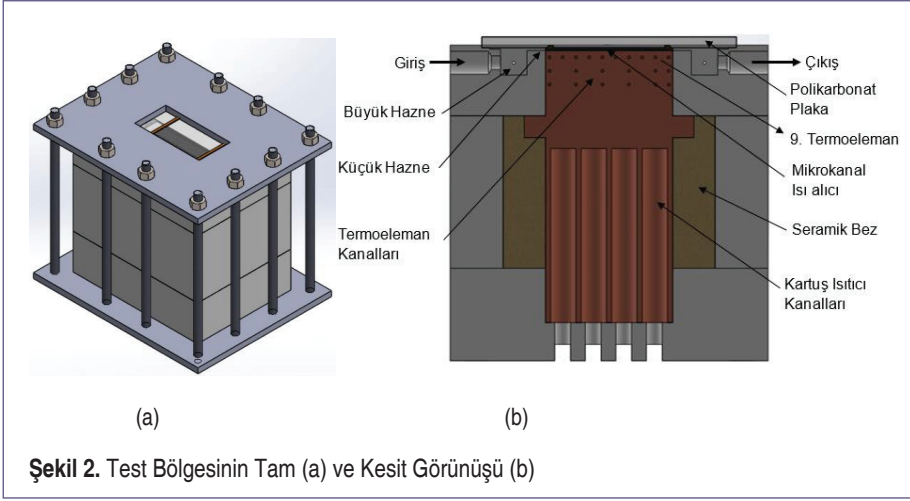
## 2.2 Test Bölgesi

Test bölgesinin tam ve kesit görünüşleri, sırasıyla, Şekil 2 (a) ve (b)'de verilmiştir. Test bölgesi üç parça halindeki teflon (PTFE) gömlek, bakır blok, şeffaf polikarbonat plaka, seramik bez, mikrokanallı ısı alıcı ve sızdırmazlık malzemelerinden oluşmaktadır. Teflon parçalardan en üste yerleştirilene, giriş ve çıkış haznelerini (büyük ve küçük haznelere) içermektedir. Bakır bloğun önyüzüne termoelemanlar için; alt kısmına ise kartuş ısıtıcılar için kanallar açılmıştır. Isı kaybını azaltmak amacıyla bakır blok, seramik bez ile sarılmıştır. Teflon malzeme seçimi de ısı kaybını azaltmayı hedeflemektedir. Mikrokanallı ısı alıcı, bakır bloğun üzerine konulmuş ve akış görüntüleme yapılabilmesi için onun üzerine de şeffaf polikarbonat plaka yerleştirilmiştir. Bu plaka, aynı zamanda, hem akışkanın test bölgesinden sızmasını önlemekte, hem de Şekil 2a'dan da görüldüğü üzere test bölgesinin sıkıştırılmasında kullanılan üst paslanmaz çelik plaka için oturma yüzeyi görevi görmektedir. Mikrokanallar 500 µm kalınlığındaki silikon tabaka üzerine derin reaktif iyon aşındırma tekniği ile (DRIE/Bosch yöntemi) açılmıştır. Kanallar açıldıktan sonra silikon test parçası, hem akışın görüntülenebilmesini sağlamak, hem de tamamen sızdırmaz bir yapı oluşturmak için anotsal yapılandırma ile 500 µm kalınlığındaki borosilikat/pyrex camla birleştirilmiştir. Uzunluğu ve genişliği, sırasıyla, 48 mm ve 13,5 mm olan ısı alıcıda, yirmi dokuz paralel kare kesitli mikrokanal bulunmaktadır.

Isı kaybı kalibrasyonu, deneysel prosedür ve deneysel hesaplama yöntemiyle ilgili detaylı bilgi yazarların önceki makalelerinde [19] verilmiştir.



Şekil 1. Deney Düzenine Şematik Resmi



### 2.3 Belirsizlik Analizi

Hesaplanan büyüklüklere ait belirsizlik değerleri, Kline ve McClintock [22] tarafından önerilen yöntemle göre belirlenmiştir. Cihazlardan ve/veya sensörlerden kaynaklanan, ölçümlerle ilgili belirsizlik değerleri ise üretici firmaların ilgili kataloglarından elde edilmiştir. Sıcaklık ölçümünde kullanılan termoelemanlar,  $\pm 0,03$  °C hassasiyetine sahip kalibrasyon banyosunda kalibre edilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan büyüklüklere ait belirsizlik düzeyleri Tablo 1’de verilmiştir. Cihazlarla ilgili detaylı bilgiye yazarların önceki çalışmalarından [19, 20] ulaşılabilir.

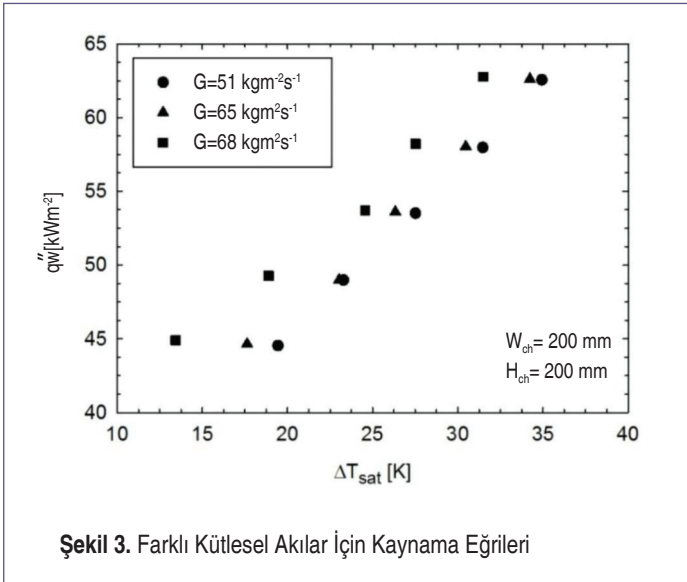
**Tablo 1.** Deneysel Belirsizlikler

Ölçülen ve hesaplanan büyüklükler	Belirsizlik düzeyi (Hesaplanan büyüklükler için ortalama değerler yazılmıştır.)
Basınç ( $P$ )	$\pm \%0,25$
Sıcaklık ( $T$ )	$\pm 0,1$ °C
Hacimsel debi ( $\dot{V}$ )	$\pm \%2$
Uygulanan ısı güç ( $q$ )	$\pm \%0,1$
Kütle akısı ( $G$ )	$\pm \%2,18$
Duvar ısı akısı ( $q_w''$ )	$\pm \%0,42$
Toplam basınç düşümü ( $\Delta P_{tot}$ )	$\pm \%14,8$
Çıkış kuruluk derecesi ( $x_{eo}$ )	$\pm \%5,5$
Isı transfer katsayısı ( $h_{tp}$ )	$\pm \%13,1$

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, duvar ısı akısı ( $q_w''$ ) aralığı 44,5 – 62,8 kW m<sup>-2</sup> olacak şekilde, beş farklı ısı yük ( $\dot{q}$ ) altında (44,1, 48, 52, 55,9, 59,9 W) ve üç farklı kütle akıda,  $G$ , (51, 65 ve 78 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) deneyler yapılmıştır. Deneyler boyunca iş akışkanının test bölgesine giriş sıcaklığı 50±1 °C’de; ortam sıcaklığı ise yaklaşık 22 °C’de sabit tutulmuştur. Bu çalışma doymuş kaynamalı akışla ilgilidir. İki faz ısı transfer katsayısı ( $h_{ip}$ ) yalnızca kanal girişinden 41,5 mm uzaklığa denk gelen dokuzuncu ısı elemana göre hesaplanmıştır. Bunun nedeni, çıkışa doğru daha yüksek doymuş kaynama derecelerinin elde edilmesidir. En son sıradaki (onuncu) ısı elemanın tercih edilmemesinin nedeni ise sızdırmazlık malzemelerinin bu bölgede akışın görüntülenmesini engellemesidir.

Şekil 3’te, farklı kütle akılar için kaynama eğrileri verilmiştir. Her bir kütle akı ( $G$ ) değeri için, duvar kızma farkı ( $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$ ) artan ısı akısı ile artmaktadır. Bu artış oldukça belirgin olup, lineer karaktere sahiptir. Doymuş kaynamalı akış dikkate alındığında bu tür davranış, beklenen bir sonuçtur. Kütle akısının etkisine bakıldığında, artan kütle akısı ile kızma farkının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni artan debi ile yüzey sıcaklığında meydana gelen azalmadır. Bu sonuçlar literatürle uyumludur. Megahed [23], kütle akısındaki azalmanın daha yüksek kızma farklarına sebep olacağını belirtmiştir. Aynı şekilde, Balasubramanian vd [24], verilen bir ısı akısı değeri için kütle akısındaki artış ile kızma farkının azaldığını ifade etmiş ve bunu, taşınım ile kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olmasıyla ilişkilendirmiştir.



Şekil 3. Farklı Kütle Akılar İçin Kaynama Eğrileri

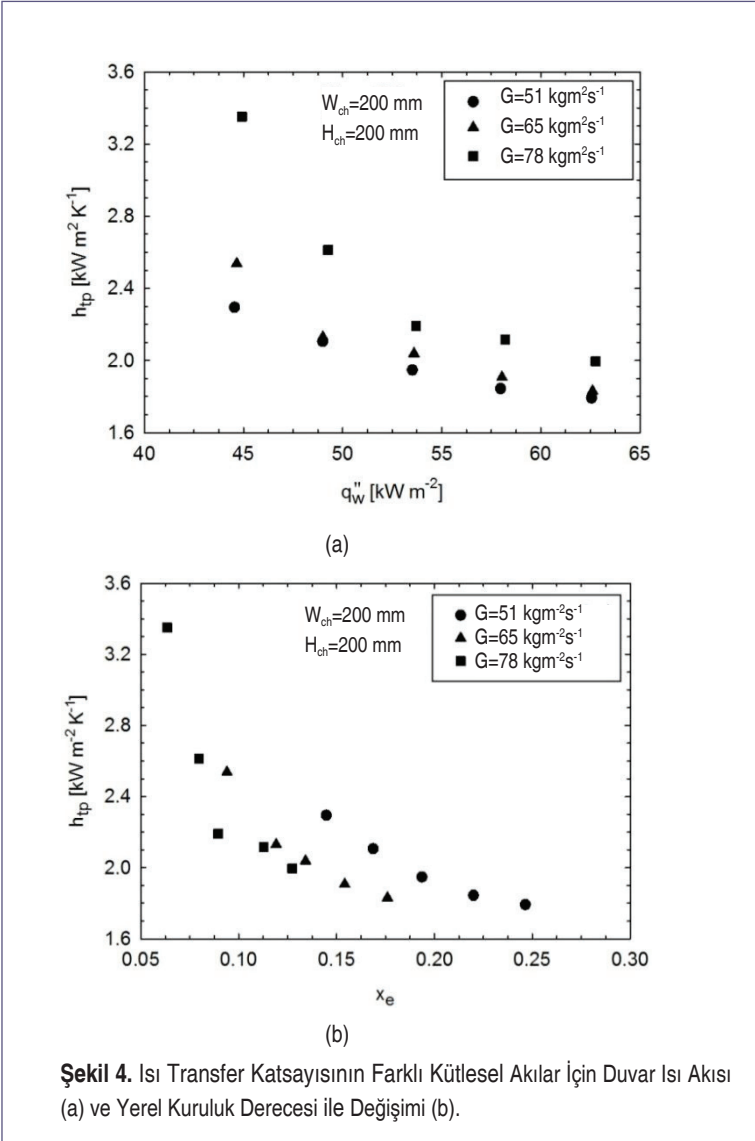


Şekil 4 (a) ve (b)'de, farklı kütle akıları için yerel iki faz ısı transfer katsayısının, sırasıyla, duvar ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ( $x_e$ ) ile değişimi verilmiştir. Bütün kütle akısı değerlerinde, ısı transfer katsayısı artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile azalmaktadır. Verilen bir ısı yük değeri için, ısı transfer katsayısı artan kütle akısı ile artmaktadır. Ayrıca, aynı çalışma koşulları altında, kuruluk derecesi artan kütle akısı ile azalmaktadır. Bu tür değişimlerin sebebi, kısaca, kısmi kuruma veya kuruma olarak açıklanabilir. Öyle ki; Zhuan ve Wang [25], ısı transfer katsayısının kuruluk derecesi ile azalmasının sebebini sıvı filminin kısmi kuruması ile açıklamıştır. Fu vd [26] ise, ısı transfer katsayısının ısı akısı ile ters orantılı olduğunu belirtmiş ve (bu bulgunun göstergesi olarak) taşınımı kaynamayla ilişkili ince sıvı filmi buharlaşmasının temel ısı transfer mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir.

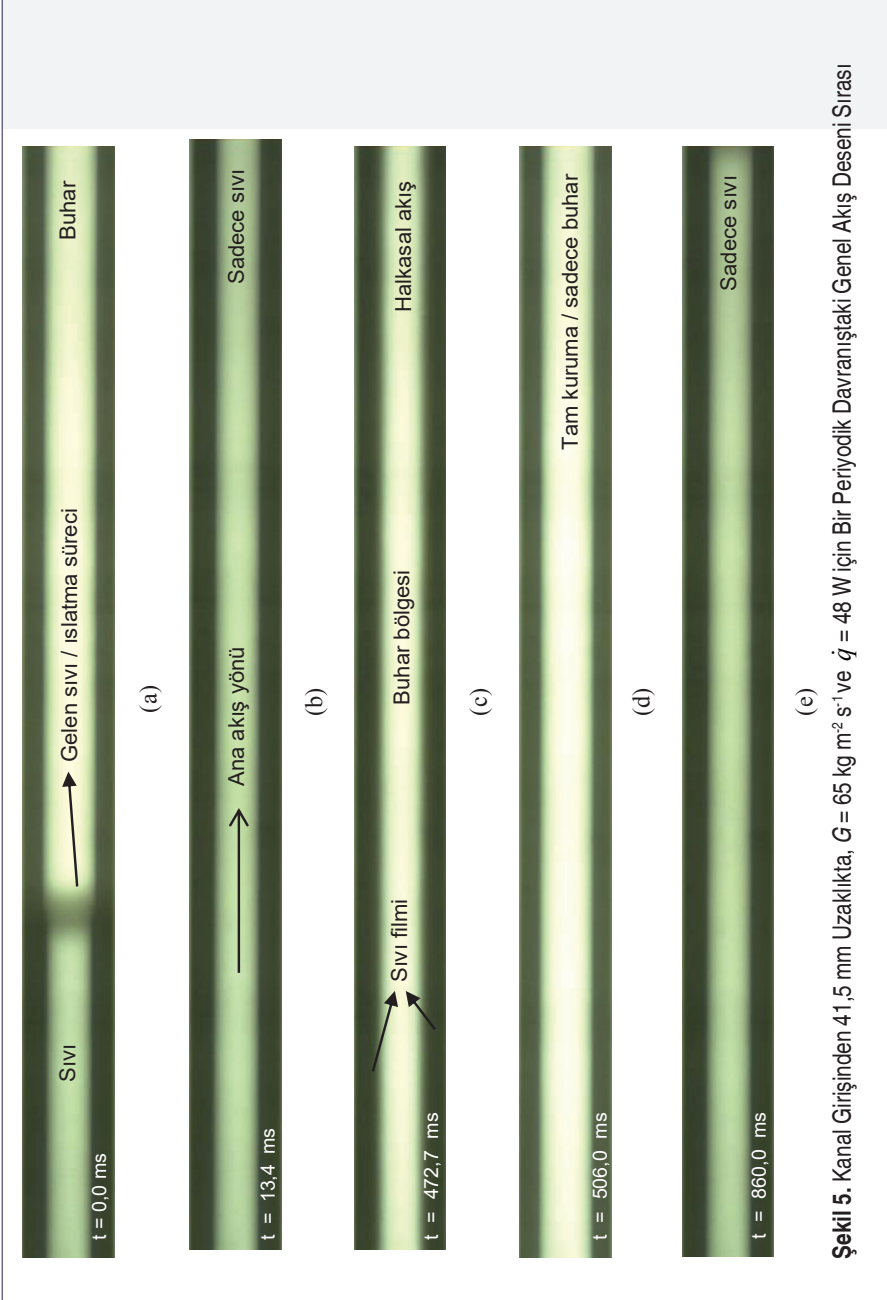
Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için elde edilen bulguların akış görüntüleme sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmesi ve fiziksel mekanizmanın bu şekilde açıklanması oldukça önemlidir. Yazarların önceki çalışmalarında [19, 20], mikrokanallardaki kaynamalı akış olayının sanki-periyodik karakterde olduğu belirtilmiştir. Benzer gözlemler literatürde de [12, 27–29] yer almaktadır. İlgili periyodik davranış üç aşamadan oluşmaktadır: (1) Islatma / tekrar ıslatma aşaması, (2) buharlaşma ve uzun kabarcıklı-halkasal / halkasal akış periyodu ve (3) kısmi kuruma / kuruma periyodu. Bu çalışma kapsamında elde edilen akış görüntüleri incelendiğinde, mevcut test koşulları altında da, periyodik olgunun gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 5'te, kanal girişinden 41.5 mm uzaklıkta,  $G = 65 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ve  $\dot{q} = 48 \text{ W}$  çalışma koşulları için bir periyodik davranıştaki genel akış deseni sırası verilmiştir.

Burada, esas olarak, periyodun başlangıcı görüntü alınan bölümün tamamen sıvı ile dolduğunu gösteren Şekil 5b'dir. Ancak, bu görüntüden önce gerçekleşen ve sıvının gelişini gösteren Şekil 5a ilk görüntü olarak verilmiştir. Bundaki amaç, sıvı, buhar, sıvı filmi ve kuru bölgelerin aynı karede görülebilmesini sağlamak ve dolayısıyla fiziksel yapıyı daha anlaşılabilir kılmaktır. İlk görüntünün zamanı referans olarak seçilmiş ve başlangıç zamanı olarak alınmıştır. Diğer görüntülerin üzerindeki değerler ise başlangıç zamanına göre verilmiş olup, ilgili akış olayının gerçekleştiği anı ifade etmektedir. Periyot kısaca şu şekilde açıklanabilir: ilk olarak kanal sıvı ile dolar (Şekil 5b). Sonra, buharlaşma başlar ve halkasal akış deseni oluşur (Şekil 5c). Halkasal akış, iç bölgede buharın olduğu akış deseni ile ve kanal duvarlarına bitişik olarak da ince sıvı filmininkiyle olduğu akış deseni ile ve tasvir edilir. Devamında, sıvı filmi buharlaşmaya başlar ve önce cidar üzerinde kısmi kurumayı ifade eden kuru noktalar oluşur; daha sonra da sıvı filmlerinin tamamen buharlaşması ile kuruma olayı gerçekleşir (Şekil 5d). Son olarak, Şekil 5a'da da görüldüğü gibi, besleme sıvısı gelir ve akış





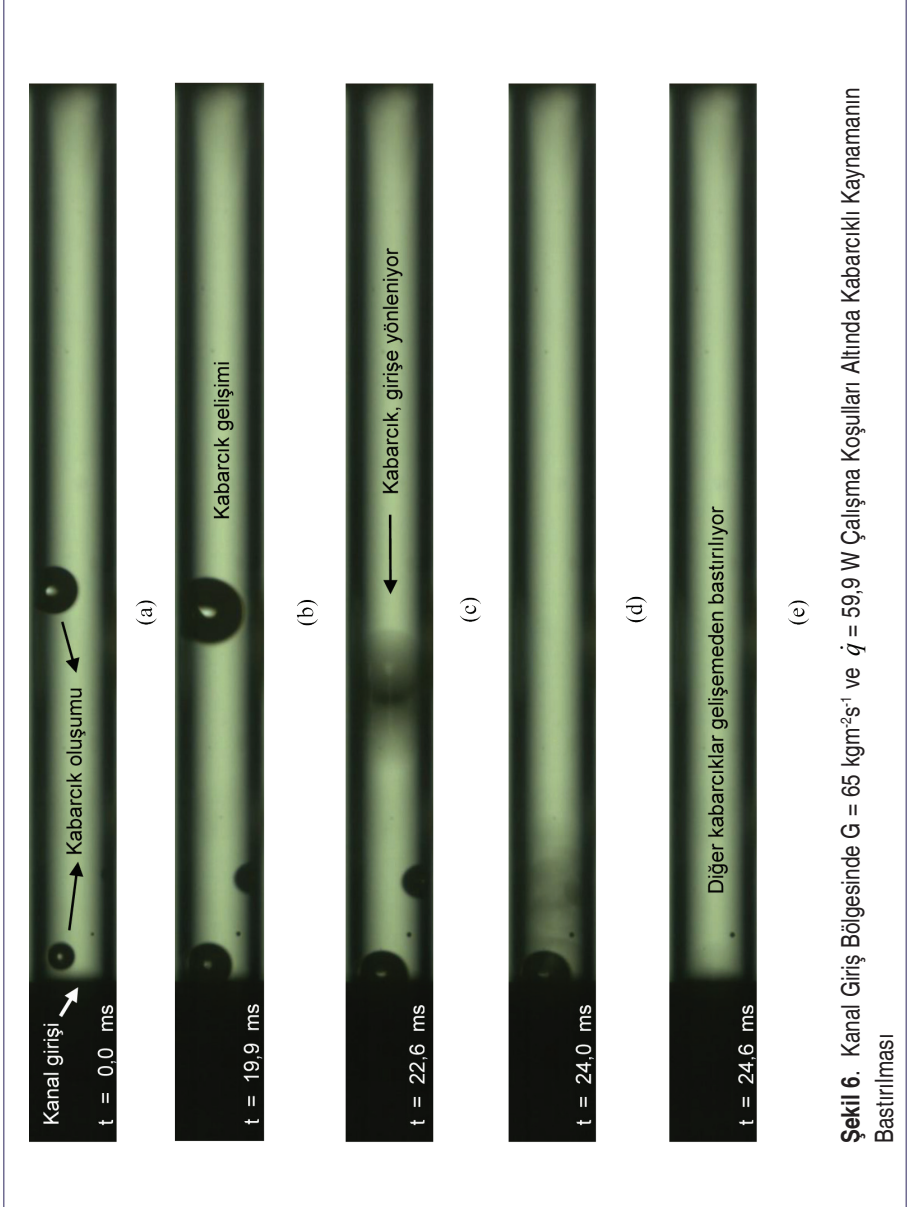
pasajını süpürür (Şekil 5e). Kurumanın meydana gelmesi veya kuruma periyodunun uzaması ısı transferinin kötüleşmesine, yüzey sıcaklıklarında artışa ve dolayısıyla kızma farkının artmasına yol açmaktadır. Isı akısındaki artış, bu süreçleri kuvvetlendirmektedir. Kütle akısı ise tam tersi bir etki göstermektedir. Artan kütle akısı, kanalların sıvı ile temasta olduğu süreçlerin uzamasına, ısı transferinde iyileşmeye ve kuruluk derecesinde azalmaya sebep olur.



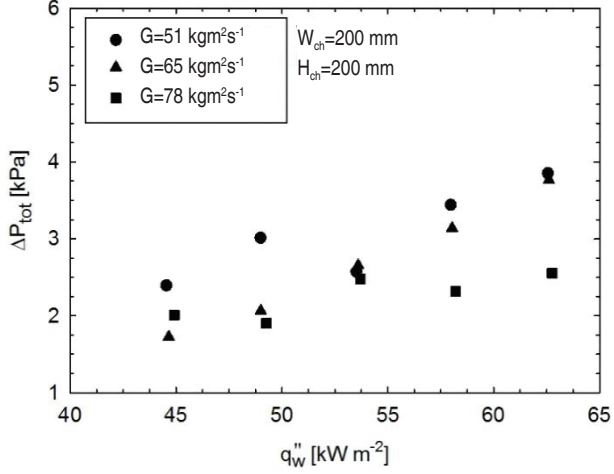


Fiziksel mekanizmaya yönelik daha derin analiz yapıldığında, mikrokanallarda kaynamalı akış için elde edilen bu sonuçların temelinde, kabarcık sınırlandırma etkilerinin yattığı görülmektedir. Çalışma kapsamında, hızlı kabarcık büyümesi ve kabarcığın sınırlanması etkileri nedeniyle kabarcıklaşmanın bastırıldığı görülmüştür. Yüksek kızma farkları nedeniyle kanalın herhangi bir noktasında hızlı kabarcık büyümesi gerçekleşir. Kanal boyutları çok küçük olduğu için, kabarcık kanal içerisinde sınırlandırılır ve her iki yönde uzamaya başlar. Buharlaşma momentum kuvvetinin etkisiyle kabarcığın kanal girişine doğru uzaması kabarcıklaşmayı bastırır ve kanala giren sıvıya karşı direnç oluşturur. Bu durum giriş basıncında artışa neden olur. Daha sonra artan giriş basıncı, sıvı ataleti ve komşu kanallar arasındaki etkileşimin birleşik etkileri nedeniyle, uzun kabarcık kanal çıkışına doğru itilir. Sıvı tamamen kanalı doldurur ve akış pasajını süpürür. Bu olay sanki-periyodik bir biçimde tekrar eder. Şekil 6'da, kanalın hemen girişinde,  $G = 65 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ve  $\dot{q} = 59,9 \text{ W}$  çalışma koşulları altında, kabarcıklaşmanın bastırılması olayına ait görüntü dizisi verilmiştir. Fotoğraflardan görüldüğü üzere, kanalın giriş bölümü olmasına rağmen, kabarcıklı kaynamayı temsil eden aktif kabarcıklaşma meydana gelmemektedir. Aynı anda sadece birkaç kabarcık oluşmakta ve çıkışa daha yakın olan kabarcık diğerlerine göre daha hızlı gelişmektedir. Ancak, oluşan kabarcığın ana akış yönüne ters doğrultuda uygulanan bir kuvvetin etkisiyle kanal girişine doğru yönlendiği ve diğer kabarcıklar gelişmeden onları söndürdüğü görülmektedir. Buradaki etkili kuvvet buharlaşma momentum kuvvetidir. Literatür incelendiğinde, Markal vd [19, 20] tarafından ana akış doğrultusundaki kuvvet olan sıvı atalet kuvveti ile ters yönde etkiyen buharlaşma momentum kuvveti arasındaki etkileşime dikkat çekildiği; Lee vd [30] tarafından da bu kuvvetlerin üzerinde durulduğu görülmektedir. Ayrıca, Kandlikar [31, 32] da mikrokanallarda kaynamalı akışta etkili olan kuvvetleri incelemiştir. Şekil 6'da görülen kanal bölümü oldukça kısa olup, yaklaşık 2 mm kadardır. Yukarıda da belirtildiği üzere kanalın herhangi bir noktasında (alınan görüntüye girmeyen bölgede) hızlı kabarcık büyümesi gerçekleşir; kabarcık kanal kesiti içinde sınırlanarak her iki doğrultuda büyümeye başlar ve ana akışa karşı direnç oluşturur. Yüksek olan kızma farklarının etkisiyle, şiddetli ve hızlı kabarcık büyümesinin kanalın ilerleyen bölümlerinde (girişten uzaklaştıkça) meydana gelmesi beklenen bir sonuçtur. Belirtilen hızlı kabarcık büyümesi, mikrokanallarda kaynama konusuna özgü olan bir kararsızlık türüdür. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi (geçici olarak) ters akışa yol açmakta ve performansı olumsuz etkilemektedir.

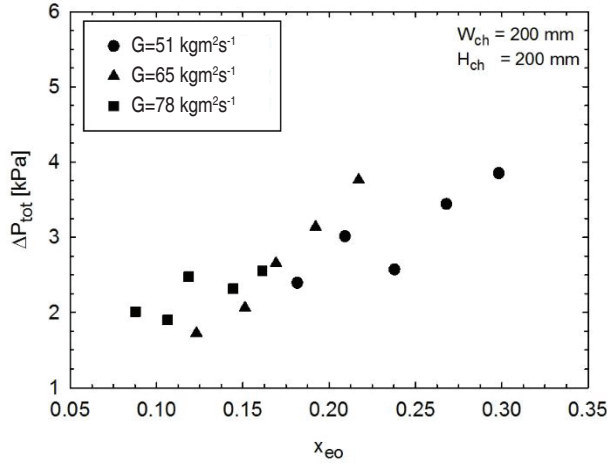
Şekil 7 (a) ve (b)'de, toplam basınç düşümünün ( $\Delta P_{tot}$ ) farklı kütleli akılar için, sırasıyla, duvar ısı akısı ve çıkış kuruluk derecesi ( $x_{eo}$ ) ile değişimi verilmiştir. Toplam basınç düşümü, genel karakter olarak, artan ısı akısı ve çıkış kuruluk derecesi ile artmakta ve artan kütle akısı ile azalmaktadır. Basınç düşümünün artan ısı akısı ile art-



**Şekil 6.** Kanal Giriş Bölgesinde  $G = 65 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ve  $\dot{q} = 59,9 \text{ W}$  Çalışma Koşulları Altında Kabarcıklı Kaynamanın Bastırılması



(a)



(b)

**Şekil 7.** Toplam Basınç Düşümünün Farklı Kütesel Akılar İçin Duvar Isı Akısı (a) ve Çıkış Kuruluk Derecesi ile Değişimi (b)



masının sebepleri, Harirchian ve Garimella [33] tarafından buharın ivmelenmesi ve iki faz sürtünme basınç düşümü olarak ifade edilmiştir. Bu gerekçeler doğru olmakla birlikte yukarıda açıklanan fiziksel mekanizmanın etkisi de mutlaka dikkate alınmalıdır. Verilen bir kütle akısı değeri için ısı akısındaki artış, kabarcık sınırlanmasının gerçekleştiği doymuş kaynamalı akışlı bir mikrokanalda, akışa karşı uygulanan direncin artmasına ve dolayısıyla basınç düşümünde artışa yol açacaktır. Kütle akısındaki artış ise buharlaşma momentum kuvvetine karşı yönlü kuvvet olan sıvı atalet kuvvetinin artması anlamına gelmektedir. Bu nedenle, artan kütle akısı ile basınç düşümü azalmaktadır.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, her biri 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$  kanal kesitine sahip yirmi dokuz paralel mikrokanaldan oluşan silikon ısı alıcıda, deiyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir: (1) Duvar kızma farkı, artan kütle akısı ile azalmakta ve her bir kütle akı değeri için artan ısı akısı ile artmaktadır; (2) iki faz ısı transfer katsayısı, artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile azalmakta ve artan kütle akısı ile artmaktadır; (3) toplam basınç düşümü, genel karakter olarak, artan ısı akısı ve çıkış kuruluk derecesi ile artmakta ve artan kütle akısı ile azalmaktadır; (4) taşınım ile kaynama baskın ısı transfer mekanizmasıdır; (5) mikrokanallardaki (doymuş) kaynamalı akış olayı sanki-periyodik karaktere sahiptir; (6) ana akış desenleri uzun kabarcıklı akış ve halkasal akıştır.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 113M408 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

#### SEMBOLLER

$D_h$  : Hidrolik çap [m]

$h_{tp}$  : İki faz ısı transfer katsayısı [ $\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]

$H_{ch}$  : Kanal yüksekliği (derinliği) [m]

$G$  : Kütle akısı [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]

$q_w$  : Duvar ısı akısı [ $\text{kW m}^{-2}$ ]

$\dot{q}$  : Güç kaynağı tarafından test bölgesine uygulanan ısı transfer miktarı [W]

$T_{sat}$  : Doyma sıcaklığı [K]

$T_w$  : Duvar sıcaklığı [K]

$W_{ch}$  : Kanal genişliği [m]



- $x_e$  : Kuruluk derecesi  
 $x_{eo}$  : Çıkış kuruluk derecesi  
 $\Delta P_{tot}$  : Toplam basınç düşümü [Pa]  
 $\Delta T_{sat}$  : Duvar kızma farkı [K]

## KAYNAKÇA

1. **Liu, D., Garimella, S.V.** 2007. "Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels," Journal of Heat Transfer, vol. 129, p. 1321-1332.
2. **Chen, T., Garimella, S.V.** 2011. "Local Heat Transfer Distribution And Effect Of Instabilities During Flow Boiling In A Silicon Microchannel Heat Sink," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, no. 15-16, p. 3179-3190.
3. **Wang, Y., Wang, Z.G.** 2014. "An Overview of Liquid-Vapor Phase Change, Flow and Heat Transfer in Mini and Micro-Channels," International Journal of Thermal Sciences, vol. 86, p. 227-245.
4. **Deng, D., Wan, W., Tang, Y., Wan, Z., Liang, D.** 2015. "Experimental Investigations on Flow Boiling Performance of Reentrant and Rectangular Microchannels – A Comparative Study," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 82, p. 435-446.
5. **Tibiriçá, C.B., Czelusniak, L.E., Ribatski, G.** 2015. "Critical Heat Flux in a 0.38 mm Microchannel and Actions for Suppression of Flow Boiling Instabilities," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 67, p. 48-56.
6. **Lee, P.S., Garimella, S.V.** 2008. "Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, no. 3-4, p. 789-806.
7. **Huang, H., Thome, J.R.** 2016. "Local Measurements and a New Flow Pattern Based Model for Subcooled and Saturated Flow Boiling Heat Transfer in Multi-Microchannel Evaporators," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 103, p. 701-714.
8. **Qu, W., Mudawar, I.** 2003. "Flow Boiling Heat Transfer in Two phase Micro-Channel Heat Sinks-I. Experimental Investigation and Assessment of Correlation Methods," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 46, no. 15, p. 2755-2771.
9. **Steinke, M.E., Kandlikar, S.G.** 2004. "An Experimental Investigation of Flow Boiling Characteristics of Water in Parallel Microchannels," Journal of Heat Transfer, vol. 126, p. 518-526.
10. **Huh, C., Kim, M.H.** 2007. "Pressure Drop, Boiling Heat Transfer and Flow Patterns During Flow Boiling in a Single Microchannel," Heat Transfer Engineering, vol. 28, no. 8-9, p. 730-737.



11. **Saraceno, L., Celata, G.P., Furrer, M., Mariani, A., Zummo, G.** 2012. "Flow Boiling Heat Transfer of Refrigerant FC-72 in Microchannels," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 53, p. 35–41.
12. **Tuo, H., Hrnjak, P.** 2013. "Periodical Reverse Flow and Boiling Fluctuations in a Microchannel Evaporator of an Air-Conditioning System," *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 4, p. 1263–1275.
13. **Kuo, C.J., Peles, Y.** 2009. "Pressure Effects on Flow Boiling Instabilities in Parallel Microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 1–2, p. 271–280.
14. **Chen, T., Garimella, S.V.** 2011. "Local Heat Transfer Distribution and Effect of Instabilities During Flow Boiling in a Silicon Microchannel Heat Sink," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 15–16, p. 3179–3190.
15. **Wang, Y., Sefiane, K., Wang, Z.G., Harmand, S.** 2014. "Analysis of Two-Phase Pressure Drop Fluctuations During Micro-Channel Flow Boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 70, p. 353–362.
16. **Thiangtham, P., Keepaiboon, C., Kiatpachai, P., Asirvatham, L. G., Mahian, O., Dalkilic, A. S., Wongwises, S.** 2016. "An Experimental Study on Two-Phase Flow Patterns and Heat Transfer Characteristics During Boiling of R134a Flowing Through a Multimicrochannel Heat Sink," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 98, p. 390–400.
17. **Jafari, R., Okutucu-Özyurt, T., Ünver, H.Ö., Bayer, Ö.** 2016. "Experimental Investigation of Surface Roughness Effects on the Flow Boiling of R134a in Microchannels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 79, p. 222–230.
18. **Chávez, C.A., Leão, H. L.S.L., Ribatski, G.** 2017. "Evaluation of Thermal-Hydraulic Performance of Hydrocarbon Refrigerants During Flow Boiling in a Microchannels Array Heat Sink," *Applied Thermal Engineering*, vol. 111, p. 703–717.
19. **Markal, B., Aydın, O., Avci, M.** 2016. "Effect Of Aspect Ratio on Saturated Flow Boiling in Microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 93, p. 130–143.
20. **Markal, B., Aydın, O., Avci, M.** 2016. "An Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop in Square Microchannels," *International Journal of Refrigeration*, vol. 65, p. 1–11.
21. **Markal, B., Aydın, O., Avci, M.** 2016. "Prediction of Heat Transfer Coefficient in Saturated Flow Boiling Heat Transfer in Parallel Rectangular Microchannel Heat Sinks: An Experimental Study," *Heat Transfer Engineering*, vol. 38, no. 16, p. 1415-1428.





22. **Kline, S.J., McClintock, F.A.** 1953. "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, vol. 73, no. 1, p. 3–8, 1953.
23. **Megahed, A.** 2012. "Local Flow Boiling Heat Transfer Characteristics in Silicon Microchannel Heat Sinks Using Liquid Crystal Thermography," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 39, p. 55–65.
24. **Balasubramanian, K., Jagirdar, M., Lee, P.S., Teo, C.J., Chou, S.K.** 2013. "Experimental Investigation of Flow Boiling Heat Transfer and Instabilities in Straight Microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 66, p. 655–671.
25. **Zhuan, R., Wang, W.** 2013. "Boiling Heat Transfer Characteristics in a Microchannel Array Heat Sink With Low Mass Flow Rate," *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, no. 1–2, p. 65–74.
26. **Fu, B.R., Lee, C.R., Pan, C.** 2013. "The Effect of Aspect Ratio on Flow Boiling Heat Transfer of HFE-7100 in a Microchannel Heat Sink," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 58, no. 1–2, p. 53–61.
27. **Tuo, H., Hrnjak, P.** 2014. "Visualization and Measurement of Periodic Reverse Flow and Boiling Fluctuations in a Microchannel Evaporator of an Air-Conditioning System," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 71, p. 639–652.
28. **Wu, H.Y., Cheng, P.** 2003. "Visualization and Measurements of Periodic Boiling in Silicon Microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 14, p. 2603–2614.
29. **Hetsroni, G., Mosyak, A., Pogrebnyak, E., Segal, Z.** 2006. "Periodic Boiling in Parallel Micro-Channels at Low Vapor Quality," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 32, p. 1141–1159.
30. **Lee, H.J., Liu, D.Y., Yao, S-C.** 2010. "Flow Instability of Evaporative Micro-Channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, p. 1740–1749.
31. **Kandlikar, S.G.** 2004. "Heat Transfer Mechanisms During Flow Boiling in Microchannels," *Journal of Heat Transfer*, vol. 126, p. 8-16.
32. **Kandlikar, S.G.** 2010. "Scale Effects on Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels: A Fundamental Perspective," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, no. 7, p. 1073- 1085.
33. **Harirchian, T., Garimella, S.V.** 2008. "Microchannel Size Effects on Local Flow Boiling Heat Transfer to a Dielectric Fluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 15-16, p. 3724–3735.