



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

KARE KESİTLİ MİKROKANALLARDA DOYMUŞ KAYNAMALI AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

**BURAK MARKAL
ORHAN AYDIN
METE AVCI
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

KARE KESİTLİ MİKROKANALLARDA DOYMUŞ KAYNAMALI AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

An Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Characteristics in Square Microchannels

Burak MARKAL
Orhan AYDIN
Mete AVCI

ÖZET

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 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) çalışılmış olup; duvar ısı akısı, 44.5 – 62.8 kW m^{-2} aralığında tutulmuştur. Bu kapsamda, ısı akısı ve kütle akısının iki faz ısı transfer katsayısı ve toplam basınç düşümü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Fiziksel mekanizma, ölçümlerle eş zamanlı 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, Isı transferi, Basınç düşümü

ABSTRACT

In this study, saturated flow boiling characteristics of deionized water are experimentally investigated in silicon heat sink consists 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 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$, while the wall heat flux ranges from 44.5 – 62.8 kW m^{-2} . 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.

1. GİRİŞ

Mikro boyutlu cihazlar veya parçalar, son yirmi yıldır mekanik, elektronik (elektro-mekanik) 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, mikrokanaallarda 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 eş zamanlı olarak sunmakta ve böylece yüzey sıcaklıkları nispeten sabit kalırken; yüksek miktarda ısı akısı uzaklaştırabilme potansiyeli taşımaktadır. Ancak, literatürde de [1-7] belirtildiği üzere, mikrokanaallarda 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.

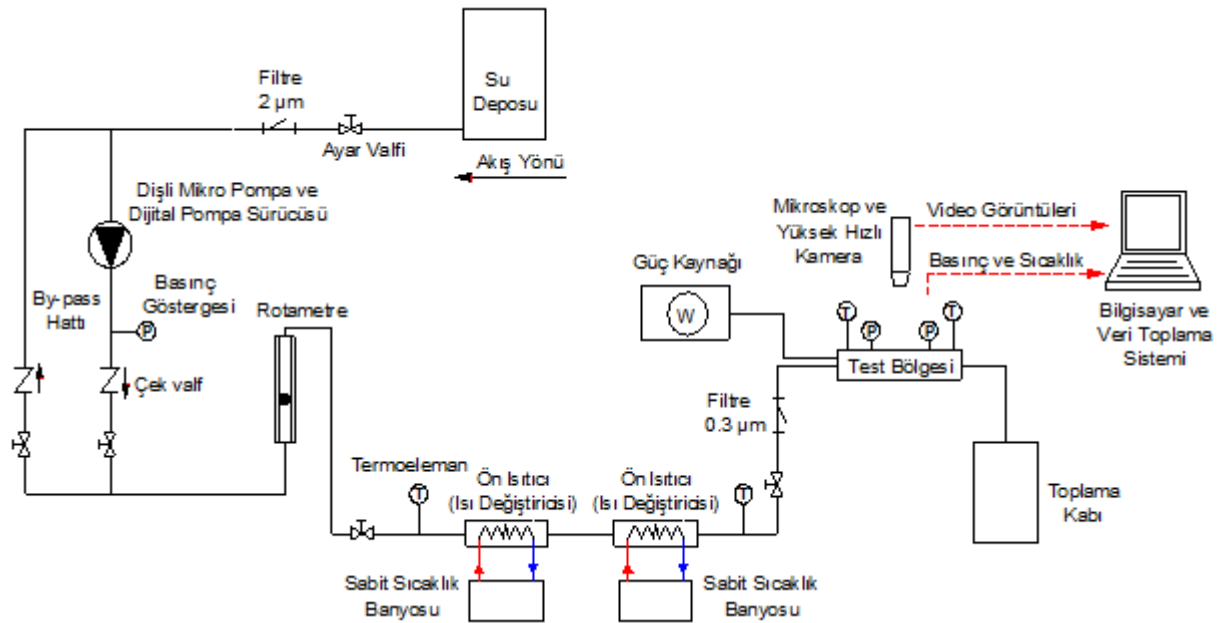
Qu ve Mudawar [8], 349 μm (231 μm x 713 μm) hidrolik çapa (D_h) sahip dikdörtgen kesitli yirmi bir paralel mikrokanaaldan oluşan bakır ısı alıcıda, deiyonize suyun kaynamalı akışını deneysel olarak incelemiştir. Isı transfer katsayısının artan kütle akısı ile arttığını, artan kuruluk derecesi ile azaldığını ve ısı akısına çok az bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Taşınımın 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 çalışmıştır. Isı transfer katsayısının artan kuruluk derecesi ile azaldığını ve kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Huh ve Kim [10], 103.5 μm hidrolik çapa sahip dikdörtgen kesitli tek bir mikrokanaalda 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 Hrnjak [12], 1 mm hidrolik çapa sahip yirmi beş paralel dikdörtgen kesitli kanal içeren buharlaştırıcıda R134a'nın kaynamalı akışını çalışmıştır. 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 μm 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 μm genişliğe (W_{ch}) ve 389 μm yüksekliğe (H_{ch}) sahip altmış paralel mikrokanaal 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 akısı ile neredeyse lineer olarak arttığını belirtmişlerdir. Wang vd. [15], hidrolik çapları sırasıyla 571 μm , 762 μm ve 1454 μm olan dikdörtgen kesitli tek mikrokanaallarda 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 μm yüksekliğe ve 382 μm genişliğe sahip yirmi yedi paralel dikdörtgen kesitli mikrokanaaldan oluşan bakır test bölgesinde R134a'nın kaynamalı akışında ısı transfer karakteristiklerini ve akış desenlerini deneysel olarak incelemiştir. Yüksek ısı akısı aralığında ısı transfer katsayısının artan kütle akısı ile arttığını, taşınımın 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 mikrokanaallı (kırk kanal) buharlaştırıcılarda R134a'nın kaynamalı akışı için yüzey pürüzlülüğünün etkisini deneysel olarak incelemiştir. Dikdörtgen kesitli her bir mikrokanaalın yüksekliği ve genişliği sırasıyla 700 μm ve 250 μm 'dir. Çalışma koşullarına bağlı olmak üzere, yüzey pürüzlülüğü artırılarak ısı transfer katsayısının %45'e kadar iyileştirilebileceğini göstermişlerdir. Chávez vd. [18], mikrokanaallı ısı alıcıda R600a, R290 ve R1270 soğutucularının kaynamalı akışını incelemiştir. Isı alıcı elli mikrokanaaldan oluşmakta olup, her bir kanalın yüksekliği ve genişliği sırasıyla 494.2 μm ve 123.3 μm 'dir. Genel olarak, R290 akışkanının en iyi performansla 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 özetinden 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 μm x 200 μm kanal kesimine sahip paralel mikrokanallardan oluşan ısı alıcıda, deiyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristiklerine odaklanılmıştır. İlgili test bölgesi için farklı kütle akılarında ve ısıl yüklerde 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, eş zamanlı 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 bütünleşik 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.

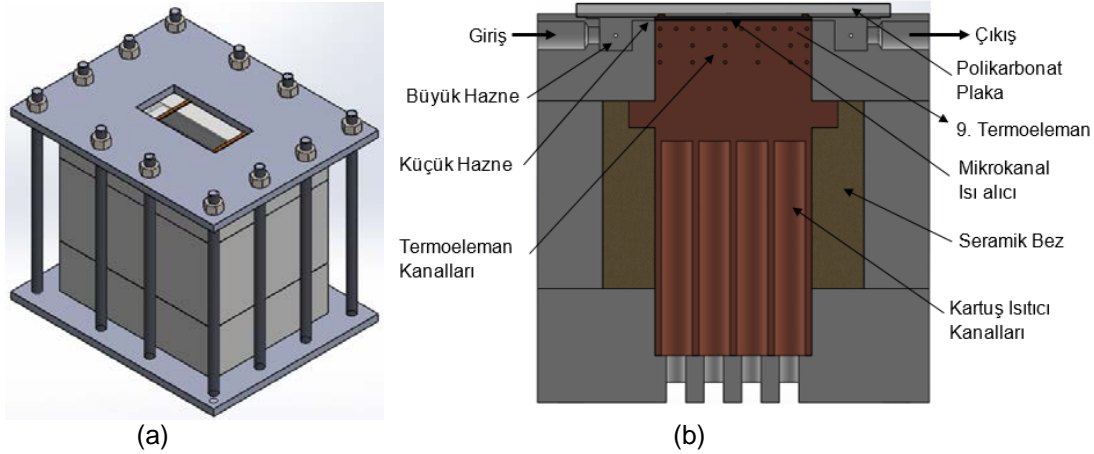


Şekil 1. Deney düzeneginin şematik resmi

2.2. Test Bölgesi

Test bölgesinin tam ve kesit görünüşleri, sırasıyla, Şekil 2a 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 haznelarını (büyük ve küçük haznelar) içermektedir. Bakır bloğun ön yüzüne 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 yapıştırma 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 2. Test bölgesinin tam (a) ve kesit görünüşü (b)

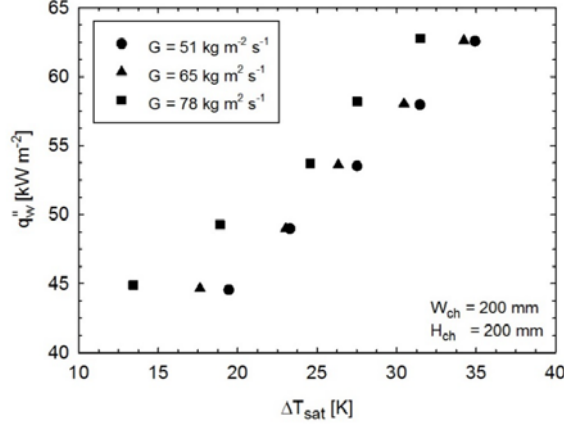
2.3. Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, Kline ve McClintock [22] tarafından önerilen yöntemle yapılmıştır. Isı transfer katsayısı, çıkış kurulum derecesi ve toplam basınç düşümü için ortalama belirsizlik değerleri, sırasıyla, %13.1, %5.5 ve %14.8'dir. Cihazlardan ve/veya sensörlerden kaynaklanan, ölçümlerle ilgili belirsizlik değerleri ise detaylı olarak [19, 20] numaralı referanslarda verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, duvar ısı akısı (q_w') aralığı 44.5 – 62.8 kW m⁻² 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 kg m⁻² s⁻¹) 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_{tp}) yalnızca kanal girişinden 41.5 mm uzaklığa denk gelen dokuzuncu termo elemana göre hesaplanmıştır. Bunun nedeni, çıkışa doğru daha yüksek doymuş kaynama derecelerinin elde edilmesidir. En son sıradaki (onuncu) termoelemanın tercih edilmemesinin nedeni ise sızdırmazlık malzemelerinin bu bölgede akışın görüntülenmesini engellemesidir.

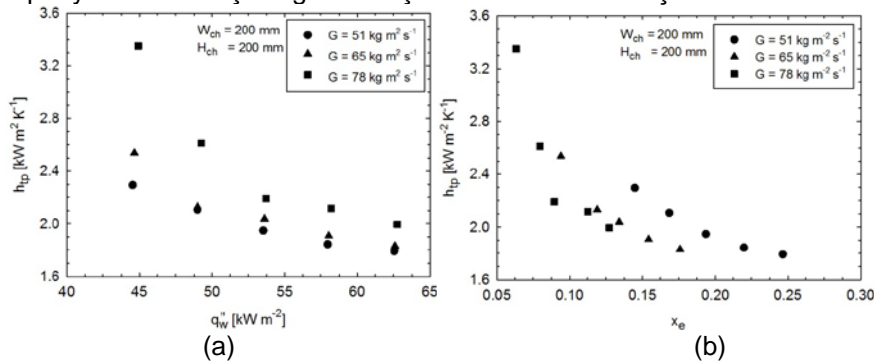
Şekil 3'te, farklı kütleli akılar için kaynama eğrileri verilmiştir. Her bir kütleli akı (G) değeri için, duvar kızma farkı ($\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$) artan ısı akısı ile artmaktadır. Bu artış oldukça belirgin olup, lineer karaktere sahiptir. Doymuş kaynamalı akış dikkate alındığında bu tür davranış, 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.



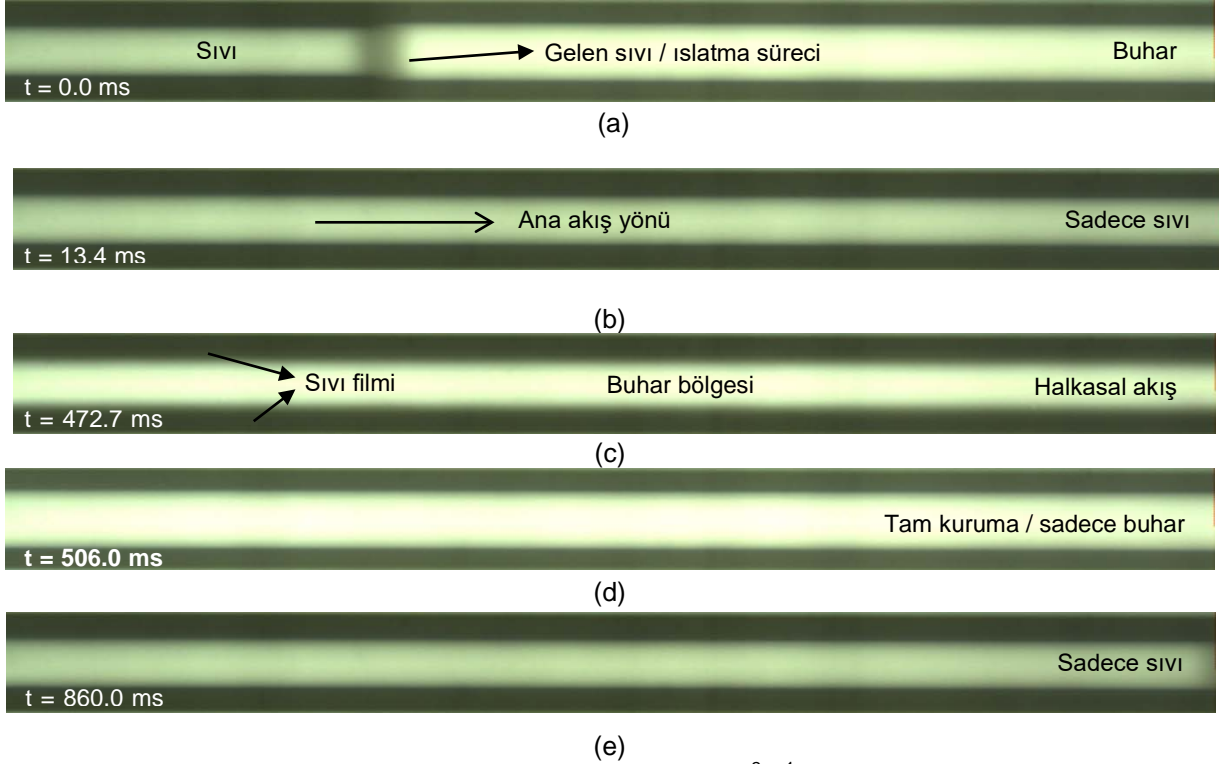
Şekil 3. Farklı kütleli akılar için kaynama eğrileri.

Şekil 4a ve b'de, farklı kütleli akıları için yerel iki faz ısı transfer katsayısının, sırasıyla, duvar ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi (x_e) ile değişimi verilmiştir. Bütün kütleli akısı değerlerinde, ısı transfer katsayısı artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile azalmaktadır. Verilen bir ısı yük değeri için, ısı transfer katsayısı artan kütleli akısı ile artmaktadır. Ayrıca, aynı çalışma koşulları altında, kuruluk derecesi artan kütleli 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) taşınımlı 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], mikrokannallardaki 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, $G = 65 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $\dot{q} = 48 \text{ W}$ çalışma koşulları için bir periyodik davranıştaki genel akış deseni sırası verilmiştir.



Şekil 4. Isı transfer katsayısının farklı kütleli akılar için duvar ısı akısı (a) ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi (b).



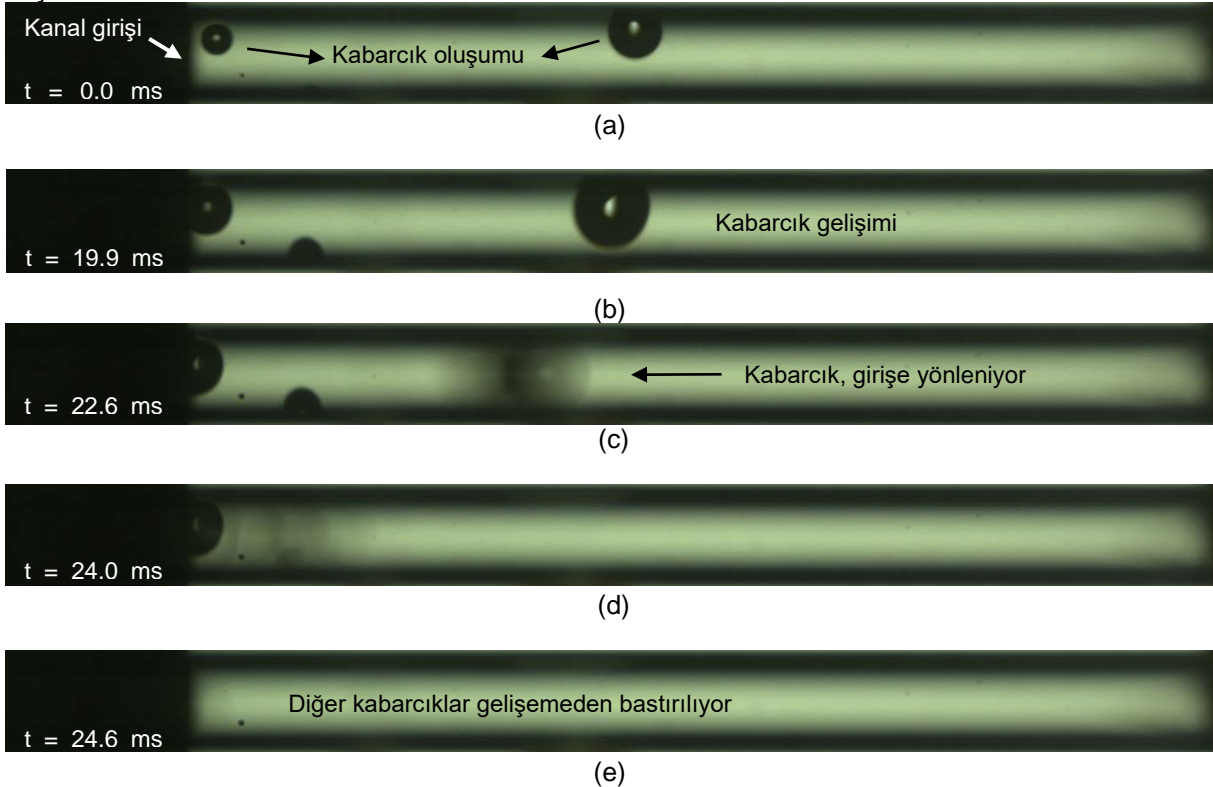
Şekil 5. Kanal girişinden 41.5 mm uzaklıkta, $G = 65 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $\dot{q} = 48 \text{ W}$ için bir periyodik davranıştaki genel akış deseni sırası.

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: İlk olarak, kanal sıvı ile dolar (Şekil 5b). Sonra buharlaşma başlar ve halkasal akış deseni oluşur (Şekil 5c). Halkasal akış, iç bölgede buharın; kanal duvarlarına bitişik olarak da ince sıvı filminin olduğu akış deseni ile 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.

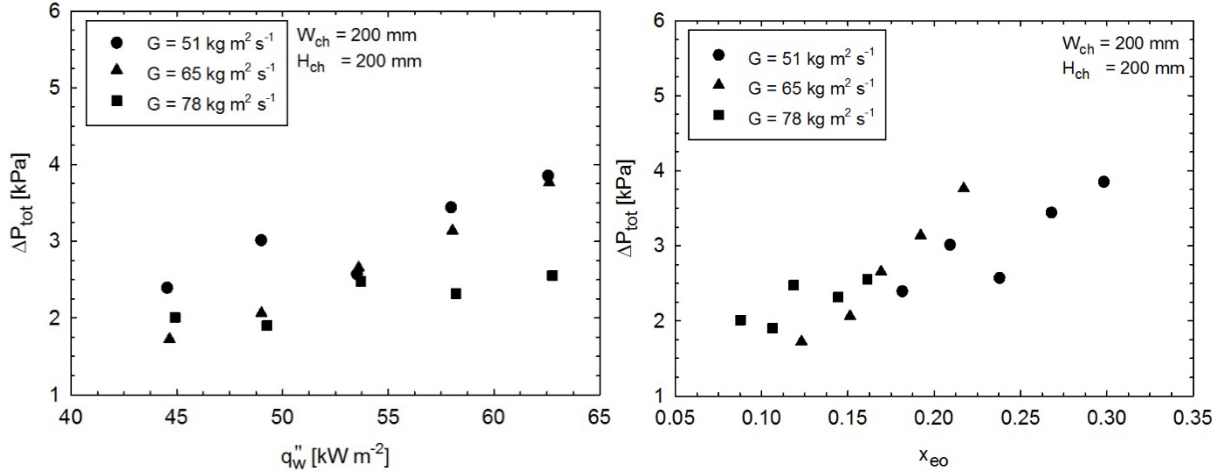
Fiziksel mekanizmaya yönelik daha derin analiz yapıldığında, mikrokanallarda kaynamalı akış için elde edilen bu sonuçların temelinde, kabarcık sınırlandırma etkilerinin yattığı görülmektedir. Çalışma kapsamında, hızlı kabarcık büyümesi ve kabarcığın sınırlandırılması etkileri nedeniyle kabarcıklaşmanın 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, $G = 65 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 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]'nin ana akış doğrultusundaki kuvvet olan sıvı atalet kuvveti ile ters yönde etkiyen buharlaşma momentum kuvveti arasındaki etkileşime dikkat çektiği; Lee vd. [30]'nin de bu kuvvetlerin üzerinde durduğu 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 7a ve b'de, toplam basınç düşümünün (ΔP_{tot}) farklı kütle akıları 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 artmasının 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.



Şekil 6. Kanal giriş bölgesinde $G = 65 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $\dot{q} = 59.9 \text{ W}$ çalışma koşulları altında kabarcıklı kaynamanın bastırılması.



Şekil 7. Toplam basınç düşümünün farklı kütleli akılar için duvar ısı akısı (a) ve çıkış kuruluk derecesi ile değişimi (b).

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, her biri 200 μ m x 200 μ m kanal kesatine sahip yirmi dokuz paralel mikrokanaaldan oluşan silikon ısı alıcıda, deiyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Duvar kızma farkı, artan kütle akısı ile azalmakta ve her bir kütleli akı değeri için artan ısı akısı ile artmaktadır.
- İki faz ısı transfer katsayısı, artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile azalmakta; artan kütle akısı ile artmaktadır.
- Toplam basınç düşümü, genel karakter olarak, artan ısı akısı ve çıkış kuruluk derecesi ile artmakta; artan kütle akısı ile azalmaktadır.
- Taşınım ile kaynama baskın ısı transfer mekanizmasıdır.
- Mikrokanaallardaki (doymuş) kaynamalı akış olayı sanki-periyodik karaktere sahiptir.
- Ana akış desenleri uzun kabarcıklı akış ve halkasal akıştır.

5. TEŞEKKÜR

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

6. KAYNAKLAR

- [1] LIU, D., GARIMELLA, S.V., "Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels", Journal of Heat Transfer, 129, 1321-1332, 2007.
- [2] CHEN, T., GARIMELLA, S.V., "Local Heat Transfer Distribution And Effect Of Instabilities During Flow Boiling In A Silicon Microchannel Heat Sink", International Journal of Heat and Mass Transfer, 54, 15-16, 3179-3190, 2011.
- [3] WANG, Y., WANG, Z.G., "An overview of liquid-vapor phase change, flow and heat transfer in mini- and micro-channels", International Journal of Thermal Sciences, 86, 227-245, 2014.



- [4] DENG, D., WAN, W., TANG, Y., WAN, Z., LIANG, D., “Experimental investigations on flow boiling performance of reentrant and rectangular microchannels – A comparative study”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 435–446, 2015.
- [5] TIBIRIÇÁ, C.B., CZELUSNIAK, L.E., RIBATSKI, G., “Critical heat flux in a 0.38 mm microchannel and actions for suppression of flow boiling instabilities”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 67, 48-56, 2015.
- [6] LEE, P.S., GARIMELLA, S.V., “Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 3–4, 789–806, 2008.
- [7] HUANG, H., THOME, J.R., “Local measurements and a new flow pattern based model for subcooled and saturated flow boiling heat transfer in multi-microchannel evaporators”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 701–714, 2016.
- [8] QU, W., MUDAWAR, I., “Flow boiling heat transfer in twophase micro-channel heat sinks-I. Experimental investigation and assessment of correlation methods”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 15, 2755–2771, 2003.
- [9] STEINKE, M.E., KANDLIKAR, S.G., “An experimental investigation of flow boiling characteristics of water in parallel microchannels”, *Journal of Heat Transfer*, 126, 518–526, 2004.
- [10] HUH, C., KIM, M.H., “Pressure drop, boiling heat transfer and flow patterns during flow boiling in a single microchannel”, *Heat Transfer Engineering*, 28, 8–9, 730–737, 2007.
- [11] SARACENO, L., CELATA, G.P., FURRER, M., MARIANI, A., ZUMMO, G., “Flow boiling heat transfer of refrigerant FC-72 in microchannels”, *International Journal of Thermal Sciences*, 53, 35–41, 2012.
- [12] TUO, H., HRNJAK, P., “Periodical reverse flow and boiling fluctuations in a microchannel evaporator of an air-conditioning system”, *International Journal of Refrigeration*, 36, 4, 1263–1275, 2013.
- [13] KUO, C.J., PELES, Y., “Pressure effects on flow boiling instabilities in parallel microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 1–2, 271–280, 2009.
- [14] CHEN, T., GARIMELLA, S.V., “Local heat transfer distribution and effect of instabilities during flow boiling in a silicon microchannel heat sink”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 15–16, 3179–3190, 2011.
- [15] WANG, Y., SEFIANE, K., WANG, Z.G., HARMAND, S., “Analysis of two-phase pressure drop fluctuations during micro-channel flow boiling”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 353–362, 2014.
- [16] THIANGTHAM, P., KEEPAIBOON, C., KIATPACHAI, P., ASIRVATHAM, L. G., MAHIAN, O., DALKILIC, A. S., WONGWISES, S., “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*, 98, 390–400, 2016.
- [17] JAFARI, R., OKUTUCU-ÖZYURT, T., ÜNVER, H.Ö., BAYER, Ö., “Experimental investigation of surface roughness effects on the flow boiling of R134a in microchannels”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 79, 222–230, 2016.
- [18] CHÁVEZ, C.A., LEÃO, H. L.S.L., RIBATSKI, G., “Evaluation of thermal-hydraulic performance of hydrocarbon refrigerants during flow boiling in a microchannels array heat sink”, *Applied Thermal Engineering*, 111, 703–717, 2017.
- [19] MARKAL, B., AYDIN, O., AVCI, M., “Effect of aspect ratio on saturated flow boiling in microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 130–143, 2016.
- [20] MARKAL, B., AYDIN, O., AVCI, M., “An Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop in Square Microchannels”, *International Journal of Refrigeration*, 65, 1–11, 2016.
- [21] MARKAL, B., AYDIN, O., AVCI, M., “Prediction of Heat Transfer Coefficient in Saturated Flow Boiling Heat Transfer in Parallel Rectangular Microchannel Heat Sinks: An Experimental Study”, *Heat Transfer Engineering*, accepted, 2016.
- [22] KLINE, S.J., MCCLINTOCK, F.A., “Describing uncertainties in single-sample experiments”, *Mechanical Engineering*, 73, 1, 3–8, 1953.
- [23] MEGAHED, A., “Local flow boiling heat transfer characteristics in silicon microchannel heat sinks using liquid crystal thermography”, *International Journal of Multiphase Flow*, 39, 55–65, 2012..
- [24] BALASUBRAMANIAN, K., JAGIRDAR, M., LEE, P.S., TEO, C.J., CHOU, S.K., “Experimental investigation of flow boiling heat transfer and instabilities in straight microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 655–671, 2013.



- [25] ZHUAN, R., WANG, W., “Boiling heat transfer characteristics in a microchannel array heat sink with low mass flow rate”, Applied Thermal Engineering, 51, 1–2, 65–74, 2013.
- [26] FU, B.R., LEE, C.R., PAN, C., “The effect of aspect ratio on flow boiling heat transfer of HFE-7100 in a microchannel heat sink”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 58, 1–2, 53–61, 2013.
- [27] TUO, H., HRNJAK, P., “Visualization and measurement of periodic reverse flow and boiling fluctuations in a microchannel evaporator of an air-conditioning system”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 71, 639–652, 2014.
- [28] WU, H.Y., CHENG, P., “Visualization and measurements of periodic boiling in silicon microchannels”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 14, 2603–2614, 2003.
- [29] HETSRONI, G., MOSYAK, A., POGREBNYAK, E., SEGAL, Z., “Periodic boiling in parallel microchannels at low vapor quality”, International Journal of Multiphase Flow, 32, 1141–1159, 2006.
- [30] LEE, H.J., LIU, D.Y., YAO, S-C., “Flow instability of evaporative micro-channels”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 1740–1749, 2010.
- [31] KANDLIKAR, S.G., “Heat transfer mechanisms during flow boiling in microchannels”, Journal of Heat Transfer, 126, 8-16, 2004.
- [32] KANDLIKAR, S.G. “Scale effects on flow boiling heat transfer in microchannels: A fundamental perspective”, International Journal of Thermal Sciences, 49, 7, 1073- 1085, 2010.
- [33] HARIRCHIAN, T., GARIMELLA, S.V., “Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 15-16, 3724–3735, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Burak MARKAL

1985 yılı Trabzon doğumludur. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimini tamamlayarak doktor unvanını almıştır. Mikrokanallarda kaynamalı akış, ısı ve kütle transferi, ısı boruları, mikroakışkanlar, elektronik sistemlerin soğutulması, vorteks tüpler ve dönmeli akışlar konularında çalışmaktadır.

Orhan AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı öğretim üyesidir. Mikroakışkanlar, elektronik sistemlerin soğutulması, titreşimli biyolojik akışlar, ısı ve kütle transferi, mikropolar akışkanlar, ısı enerji depolama, gözenekli ortamlarda aktarım, Newtonumsu olmayan akışkanlar dinamiği, kapalı ortamlarda doğal ve karma taşınım, gaz ışınımı ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği konularında çalışmaktadır. Yüze yakın uluslararası saygın dergide yayınlanmış makalesi, uluslararası saygın bir yayınevi tarafından basılan bir kitap bölümü, çok sayıda yurtiçi ve yurtdışı bildirisi mevcuttur.

Mete AVCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı'nda öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Mikrokanallarda ısı ve kütle transferi, ısı enerji depolama, Newtonumsu olmayan akışkanlar dinamiği ve gözenekli ortamlarda aktarım konularında çalışmaktadır.