



## MİKROBORULARDA TEK FAZLI LAMİNER SU AKIŞINDA VİSKOZ ISINMA ETKİSİNİN DENEYSSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Nezaket PARLAK\*, Mesut GÜR\*, Tahsin ENGİN\*, Hasan KÜÇÜK\*\*

\*Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Serdivan, Sakarya

\*\* Sakarya Üniversitesi Akyazı Meslek Yüksekokulu, Akyazı, Sakarya

(Geliş Tarihi: 09.04.2010, Kabul Tarihi: 30.06.2010)

**Özet:** Bu çalışmada tek fazlı laminer akışta viskoz ısınma etkisinin ortaya çıkarılması için çapları 50-150 mikrometre arasında değişen pürüzsüz ergimiş silika mikrobörulerle deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneyler adyabatik koşullarda gerçekleştirilerek viskoz ısınma nedeniyle oluşan sıcaklık artışları belirlenmiştir. Akış analizi, bir ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Ansys CFX.12 ile gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler, hem mevcut analitik model sonuçları hem de deneysel veriler ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Mikrokanal, Su akışı, Viskoz ısınma, HAD analizi.

## INVESTIGATION OF THE VISCOUS HEATING EFFECT AT SINGLE-PHASE LAMINER WATER FLOW IN MICROTUBES

**Abstract:** In the study, experimental and numerical study have been conducted with microtubes having diameters range between 50 and 150  $\mu\text{m}$  to investigate viscous heating effects on the single-phase water flow. In the experiments temperature rises due to viscous heating have been measured under adiabatic conditions. Numeric analysis of flow through the adiabatic microtubes was performed by taking into account viscous heating effects using by computational fluid dynamic (CFD) code ANSYS CFX 12.0. CFD results were compared both experimental and analytical model results.

**Keywords:** Microtubes, Water Flow, Viscous heating, CFD.

### GİRİŞ

Günümüzde imalat teknolojilerinin hızla gelişmesi mevcut cihazların giderek küçülmesine ve yeni teknolojik sistemlerin icat edilmesine sebep olmaktadır. Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) olarak da bilinen yeni sistemler, içerisinde akışkanın dolaştığı farklı birimleri birbirine bağlayan mikrokanallar içermektedir. Mikrokanallarda tek fazlı zorlanmış akış etkin bir soğutma mekanizması olarak elektronik cihazlardan reaktör soğutma sistemlerine kadar birçok alanda kullanılmaktadır (Papautsky, 2001; Herwig, 2002; Kandlikar, 2002; Morini, 2005).

Akış ve ısı geçişi uygulamalarında hidrolik iç çapın küçülmesi ile geniş kanallar için yapılan kabuller mikron boyutlu kanallarda geçerliliğini yitirmekte, ölçek etkileri diye adlandırılan viskoz ısınma, kayma akışı, eksenel ısı iletimi, yüzey pürüzlülüğü gibi etkiler önem kazanmaktadır. (Guo ve Li, 2003; Morini, 2004; Zhigang, 2009). Bu nedenle; mikro cihazların geometrilerinin belirlenmesine, mikro kanallardaki akışkan akışının sağlanmasına, kütle ve ısı geçişi analizlerinin yapılabilmesine olanak sağlayan yeni yöntemlerin geliştirilmesi ve var olan modellerin

deneysel çalışmalar ile doğrulanması büyük önem taşımaktadır.

Mala vd. (1999), ortalama pürüzlülük yüksekliği  $\pm 1.75$   $\mu\text{m}$  olan çapları 50 ila 254  $\mu\text{m}$  arasında değişen paslanmaz çelik ve ergimiş silisten (Fused Silica) yapılmış mikroböruler ile akış karakteristiği üzerine çalışmalar yapmışlardır. Akışkan olarak su kullanmışlardır. Sabit hacimsel debide yapılan deneysel çalışmalarda Hagen-Poiseulli akış teorisine göre daha yüksek basınç düşüşüne ihtiyaç olduğunu gözlemlemişlerdir. Küçük Reynolds sayıları  $Re < 500$  için deneysel verilerin geleneksel teoriyle uyumlu olduğunu ve Reynolds sayısının artışıyla sürtünme faktörü değerlerinin beklenenden daha hızlı arttığını göstermişlerdir. Türbülanslı akışa geçişin daha erken başladığını ve sürtünme faktörü değerlerindeki sapmaların yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Parlak vd. (2007) çapları 20  $\mu\text{m}$  ile 150  $\mu\text{m}$  arasında değişen ergimiş silis (FS) ve polimer esaslı malzemeden yapılmış mikrobörulerle akış deneyleri yapmışlardır. Ölçülen basınç düşüşlerinin boru boyuna, çapına ve malzeme cinsine göre değiştiğini göstermişlerdir. Kanal iç yüzey özelliklerinin, deneysel belirsizliklerin, kayma

akışı gibi etkilerin, geleneksel teoriden ayrılmanın muhtemel sebepleri olabileceğini rapor etmişlerdir. Yayında sıcaklık ölçümlerine yer verilmemiştir.

Mikrokanallarda viskoz akış deformasyonu makro boyutlu kanallarda olduğundan daha yüksek olmakta, cidar ve akışkan sıcaklıkları artmaktadır. Viskoz ısınmanın sebep olduğu sıcaklık artışı, özellikle viskozite gibi akışkanın fiziksel özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır. Örneğin viskoz ısınma nedeniyle, su sıcaklığının 10 K arttığı düşünülürse, yaklaşık olarak akışkan viskozitesinde %20 oranında bir düşüş olacak ve Reynolds sayısı %25 artacaktır. Bu nedenle mikrokanallarda viskoz ısınma fonksiyonu hem akış hem de ısı geçişinin söz konusu olduğu süreçlerde araştırılması gereken çok önemli bir terimdir. Viskoz ısınma etkisi üzerine çok azı deneysel olmak üzere birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Tso ve Mahulikar (1998), Brinkman boyutsuz sayısını kullanarak mikrokanallarda viskoz ısınma etkisini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Laminer akış koşullarında Br sayısının ekstenel yöndeki değişiminin, Nu sayılarında düşüşe neden olduğunu, özellikle soğutma uygulamalarında Br sayısının önem kazandığı ve bir boyutlu analizde dikdörtgen kesitli mikrokanallar için Nu sayısının  $Nu = 4(1 - 4Br)$  şeklinde ifade edilebileceğini rapor etmişlerdir.

Tunc ve Bayazitoglu (2001) kaygan akış rejimi koşullarında dairesel ve dikdörtgen kesitli mikrokanallardaki gaz akışında viskoz ısınma etkisini araştırmışlardır. Viskoz ısınmanın akışkanın ısıtılması durumunda ısı geçişi üzerinde azaltıcı bir etki oluşturduğunu, tersi durumda ise artırıcı bir etki yarattığını rapor etmişlerdir. Yine Çetin (2005), mikrokanallardaki iki boyutlu, hidrodinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan tek fazlı laminer akışın ısı transferi analizi sayısal olarak gerçekleştirmişlerdir. Br sayısı yardımıyla viskoz ısınmanın kaygan akış rejimi koşullarında gaz akışı üzerine etkisini incelemiş, özellikle uzun kanallarda viskoz ısınma etkisinin göz ardı edilemeyeceğini rapor etmişlerdir. Koo ve Kleinstreuer (2004) dikdörtgen ve dairesel kesitli mikrokanallardaki viskoz ısınma etkisini incelemişler, viskoz ısınmanın hidrolik iç çapa, kanal en-boy oranına ve Br sayısına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Xu (2003) viskoz ısınmanın mikrokanal akışına olan etkisini teorik olarak incelemişlerdir. Viskoz ısınmanın hız, sıcaklık ve basınç dağılımlarına önemli bir etkisi olduğunu göstermişler, boyut analizi yardımıyla tek fazlı laminer akıştaki sıcaklık artışı için bir bağıntı önermişlerdir.

$$\Delta T_v = \frac{93.419 Vi Pr^{-0.1}}{5.2086 + Vi Pr^{-0.1}} \Delta T_{ref} \quad (1)$$

Burada  $Vi$ , viskoz ısınma sayısı ( $Vi = \mu U^2 L / \rho U c_p \Delta T_{ref} D^2$ ) olarak tanımlanmaktadır.

Bir diğer analitik çalışma Morini (2005) tarafından yapılmıştır. Çalışmada adyabatik akış koşullarındaki mikrokanalda viskoz ısınma nedeniyle oluşan sıcaklık artışı için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir.

$$\Delta T_v = \frac{Ec}{Re} [f Re L] \frac{\Delta T_{ref}}{D} \quad (2)$$

Burada,  $Ec$  (Eckert) viskoz ısınmayı temsil eden bir boyutsuz sayıyı,  $\Delta T_{ref}$  ise referans sıcaklığı ifade eder. Referans sıcaklık, akışkan viskozitesinin sıcaklıkla değişimi göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Su için referans sıcaklığın 1 K alınması önerilmiştir (Morini 2005, Celata 2006). Sıcaklığın 1 K artması viskozitenin yaklaşık %2 oranında azalmasına sebep olur ve eğer bu değer altında bir sıcaklık artışı oluyorsa viskoz ısınma etkisinin ihmal edilebileceği rapor edilmiştir.

Celata vd. (2006) yaptıkları çalışmada mikrokanal akışlarında viskoz ısınma etkisinin dahil edilmesi gereken durumlar için bir kriter belirlemişlerdir. Çapları 50 ila 100  $\mu m$  arasında değişen mikroborularla yapılan deneysel verileri kullanarak viskoz ısınma ile sürtünme faktörü arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir. Çapları 100  $\mu m$ 'nin altındaki kanallarda viskoz ısınma etkisinin mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiğini rapor etmişlerdir.

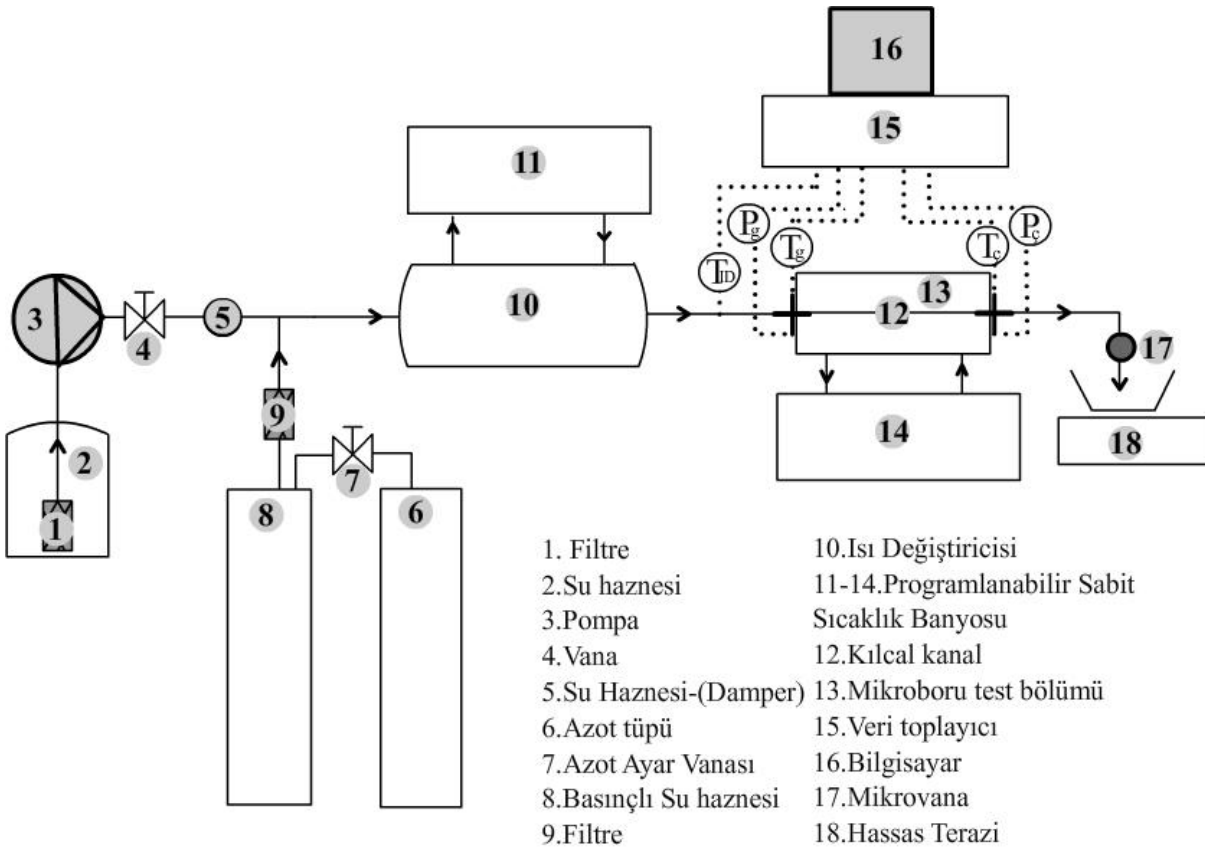
Morini (2007) taşınım ile ısı geçişinin söz konusu olduğu hidrolik çapları 100 ve 110  $\mu m$  olan dikdörtgen ve yamuk kesitli silikon kanallardaki sıvı akışlarında viskoz ısınma etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Bu tip kanallar için viskoz ısınma etkisinin göz önünde bulundurulduğu Nu ve Br bağıntıları önermişlerdir. Isı geçiş özelliklerinin kanal boyutlarının azaltılmasıyla iyileşmediğini, en-boy oranının viskoz ısınma üzerinde etkili olduğunu göstermişlerdir. Viskoz ısınma için hidrolik çap limit değerinin mikrokanal içindeki akışkana göre değiştiği, akışkan olarak isopropanol kullanıldığında bu değer 200  $\mu m$ , su kullanıldığında 50  $\mu m$  olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda mikrokanallardaki viskoz ısınma etkisi üzerine yapılan deneysel çalışmaların azlığı göze çarpmıştır. Ayrıca günümüze kadar yapılan çalışmalar mikrokanallardaki akış karakteristiğinin makro ölçekteki akışlardan farklı olup olmadığı üzerine olup, HAD programlarının geçerliliği yeterince test edilmediği görülmüştür. Bu çalışmada tek fazlı laminer akışta viskoz ısınma etkisinin ortaya çıkarılması için çapları 50-150 mikrometre arasında değişen pürüzsüz ergimiş silika mikroborularla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel adyabatik koşullarda gerçekleştirilerek viskoz ısınma nedeniyle oluşan sıcaklık artışları belirlenmiştir. Akış analizi, bir ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Ansys CFX.12 ile gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler deneysel veriler ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

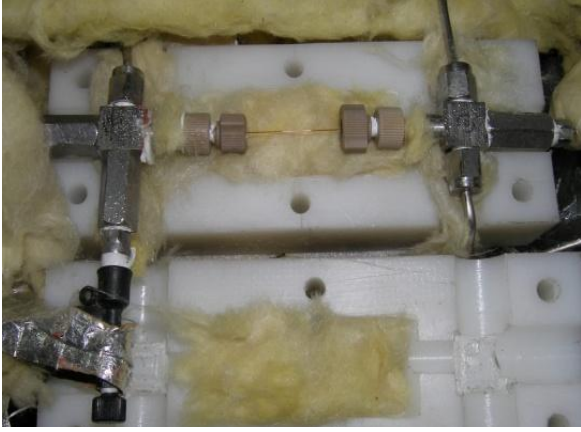
## DENEYSSEL ÇALIŞMA

Şekil 1’de detaylı olarak verilen deney tesisatı; mikropompa, filtre, su haznesi, ısı değiştiricisi, sabit sıcaklık banyosu, bilgisayar, veri toplama cihazı ve mikroboru test düzeneğinden meydana gelmektedir. Deneylerde akışkan olarak deiyonize su kullanılmıştır ve mikroborudaki akış 0.01 ml/d-10 ml/d hacimsel debi aralığında %0.1 hassasiyetli mikropompa ile daha yüksek hacimsel debilerde ise azot gazı ile basınçlandırılmış tank vasıtasıyla sağlanmıştır. Şekildeki mikro-vana iç çapı 150 µm’ den büyük olan mikroboruların testlerinde kullanılmıştır. Bu çalışmada mikro-vana tamamen kapalı olup, istavroz bağlantının bir ucu atmosfere açıktır. Deneylerde akışkan kütlesi pompanın gösterdiği hacimsel debi ile saptandığı gibi test süresince mikroboru çıkışına konulan bir kaptan toplanan su hassasiyeti %0.1 olan AND GX-600 marka hassas terazi ile ölçülerek de belirlenmiştir. Literatürde özellikle akış ve ısı geçişinin söz konusu olduğu deneysel çalışmalarda test bölgesinin vakum altına alındığı görülmüştür. Bu çalışmada mikroborulardaki tek fazlı laminer akışta viskoz ısınma etkisini ortaya çıkarmak için deneyler Şekil 2’de görülen izole edilmiş test ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Adyabatik koşulların güvenilirliğini sağlamak açısından akışkan ortam sıcaklığında mikroboruya sürülmüştür. Hem basınç kayıplarının hem de ısı kayıplarının en aza indirilmesini

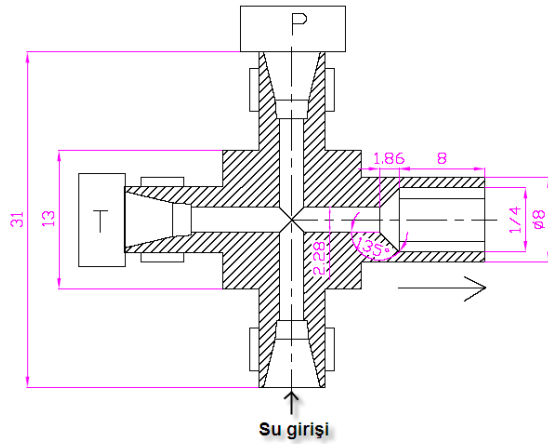
sağlamak amacıyla Şekil 3’te görüldüğü gibi mini istavroz bağlantılar özel olarak imal edilmiştir. Mikroborular yüksek basınca dayanıklı bağlantı elemanları ile, mikroboru giriş ve çıkışı istavroz içindeki kanalın orta noktasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Her bir deney esnasında; mikroboru giriş ve çıkışında su sıcaklıkları, ortam sıcaklığı ve giriş basıncı ölçülmüştür. Ölçülen değerler veri toplama cihazı (Personal-Daq3000) ile bilgisayara aktarılmıştır. Suyun hesaplamalarda kullanılan fiziksel özellikleri, akışkanın ortalama sıcaklığına göre tablolardan okunarak elde edilmiştir. Sıcaklık ölçümleri Anbetherm firmasından alınan hassas (20-200 µm tel çapı) K tipi (kromel-alumel) termoelemanlar ile Elimko firmasından alınan izoleli (1.5 mm çaplı) termokupullar sayesinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde mikroboru giriş basıncı % 0.1 hassasiyetli 0-200 bar arasında kalibre edilmiş Keller (PA-33X) marka basınç dönüştürücüsü ile belirlenmiştir. Çıkışta istavroz bağlantının bir ucu atmosfere açık olup, akışkanın toplanması için kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılacak parametreler sistem sürekli rejime geçtikten sonra kaydedilip bilgisayara aktarılmıştır. Muhtemel deneysel hataları önlemek için her deney aynı koşullarda 3 defa tekrarlanmıştır. Ölçülen basınç düşüşleri ve sıcaklık artışları yardımıyla mikroborulardaki akış karakteristiği incelenmiştir.



Şekil 1. Deney tesisatı



Şekil 2. Mikroboru test ünitesi



Şekil 3. Mikroboru bağlantı elemanı

Deneylerde dairesel kesitli ergimiş silis malzemeden yapılmış Upchurch (ABD) firmasından temin edilen mikroborular kullanılmıştır.

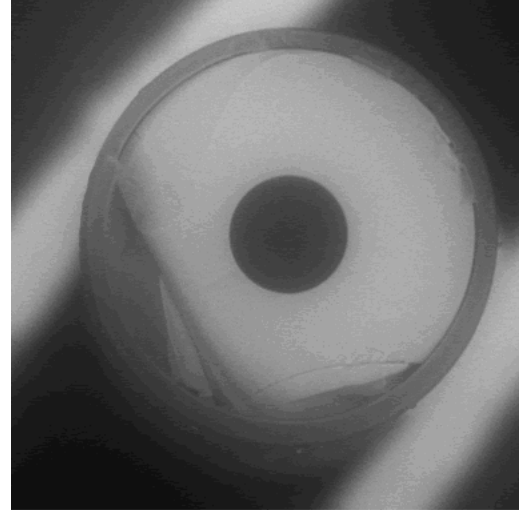
Tablo 1. Viskoz ısınma deneyleri

Malzeme	İç çap ID (µm)	Belirsizlik (µm)	Boy, L (cm)	Reynolds Aralığı	Hidrodinamik giriş uzunluğu $L_H = 0.05 Re D$ (cm)	Bağıl pürüzlülük % $\epsilon/D$	Mikroboru Kod Malzeme[Çap]
Ergimiş silika	150	1.8	10 30	20-3000	0.015-1.65	0	S[150]
Ergimiş silika	101	2.0	10 12 20	20-3000	0.01-1.1	0	S[101]
Ergimiş silika	76	2.2	10 12	80-2100	0.03-0.7	0	S[76]
Ergimiş silika	50	2.4	8 11	80-1000	0.02-0.5	0	S[50]

### Deneysel sürtünme faktörünün belirlenmesi

Mikroboru içerisinde akışın sürdürülebilmesi için gerekli basınç farkının ( $\Delta P$ ) belirlenmesi gerekmektedir. Tam gelişmiş akış bölgesi için Hagen-Poiseuille denkleminden basınç düşüşü;

$$\Delta P = 128 Q \frac{\mu L}{\pi D^4} \quad (3)$$



Şekil 4. Ergimiş silis mikroboru

Deneysel çalışmada kullanılan mikroboruların iç çapları Sakarya üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan elektron mikroskobu (SEM, Vega Tescan) ile ölçekli mikroboru en-kesit resimleri alınarak, 1 µm ölçek hatasıyla belirlenmiştir. Şekil 4'te 100 µm iç çaplı ergimiş silis mikroboru görülmektedir.

Mikroboruların boyları giriş etkisi göz önünde bulundurularak özel kesme aletleri ile kesilerek belirlenmiştir. Deneylerde akışkan sıcaklığı ortam sıcaklığında olup, testler adyabatik şartlarda gerçekleştirilmiştir. Test edilen mikroborular ve deney parametreleri Tablo 1' de verilmiştir.

şeklinde ifade edilir. Burada  $Q$ ,  $\mu$ ,  $L$ ,  $D$  sırasıyla akışkanın hacimsel debisi, viskozitesi, boru boyu ve çapıdır. Deneysel sürtünme faktörünün belirlenebilmesi için sürtünmeden kaynaklanan basınç düşüşünün belirlenmesi gerekmektedir.

Deneylerde mikroboru girişinde basınç dönüştürücü yardımıyla giriş basıncı ölçülmekte, çıkışta ise basınç atmosfer basıncına eşittir. Sürtünmeden kaynaklanan basınç düşüşü;

$$\Delta P = \Delta P_{g-\zeta} - \left[ K_D \frac{\rho U^2}{2} + K_G \frac{\rho U^2}{2} \right] \quad (4)$$

ile hesaplanır. Burada  $K_D$ , girişte daralma kayıp katsayısı,  $K_G$  genişleme katsayısı,  $\Delta P_{g-\zeta}$ , ölçülen basınç farkını ifade etmektedir. Deneylerde, daha önce rapor edilen çalışmalarda olduğu gibi,  $K_D$ ,  $K_G$ , sırasıyla 0.8 ile 1.0 alınmıştır (Maynes ve Webb, 2002; Hegab vd., 2002; Lelea vd., 2004). Basınç düşüşü belirlendikten sonra deneysel sürtünme faktörü,  $f$ , değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$f = \Delta P \frac{D}{L} \frac{2}{\rho U^2} \quad (5)$$

Burada  $\rho$ , akışkan yoğunluğu,  $U$  ise ortalama hızdır. Geleneksel teoriye göre dairesel kesitli kanallarda tam gelişmiş laminar akışta sürtünme faktörü;

$$f = \frac{64}{Re} \quad Re_{kr} < 2300 \quad (6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $Re_{kr}$ , laminar akıştan türbülanslı akışa geçişi temsil eden kritik Reynolds sayısıdır.

### Viskoz Isınma Nedeniyle Oluşan Sıcaklık Artışının Belirlenmesi

Adyabatik zorlanmış tek fazlı mikroboru su akışında viskoz kuvvetlerin neden olduğu sıcaklık artışı, mikroboru giriş ve çıkışında akışkan sıcaklıklarının ölçülmesi ile belirlenmiştir. Giriş ve çıkış arasında ölçülen sıcaklıkların farkı viskoz ısınma nedeniyle olan sıcaklık artışını verir;

$$\frac{\Delta T}{L} = \frac{T_\zeta - T_g}{L} \quad (7)$$

Teorik olarak sıcaklık artışı hem analitik bağıntılar Denklem 1 ve 2 yardımıyla hem de HAD analizi ile belirlenmiş sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

### Belirsizlik Analizi

Yapılan çalışmada son yıllarda hata oranlarının tespitinde araştırmacılar tarafından çokça tercih edilen Kline ve McClintock belirsizlik analizi (Holman, 1994) yöntemi kullanılmıştır. Deneyler süresince hacimsel ve kütleli debi, kanala giriş ve çıkış basınçları ve sıcaklıkları ölçülmüştür. Hataya yol açan büyüklüklerin hata oranları Tablo 2’de verilmiştir.

Sıcaklık ve basınç ölçümünde veri toplama cihazından kaynaklanan hatalar esas olmakla beraber basınç ölçümünde basınç dönüştürücüsünden kaynaklanan ilave hata da alınmıştır. Alınan bu değerlerin standart sapmaları da hesaplanarak toplam belirsizliğe eklenmiştir.

**Tablo 2.** Hata oluşturan parametreler ve hatalar

Hata oluşturan parametreler	Birim	Hata
Basınç düşüşü $\Delta P$	%	$\pm 2.3$
Giriş ve Çıkış sıcaklığı	$^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.2$
Fiziksel değerlerin okunmasında yapılan hata	%	$\pm 0.1$
Boru iç çapı	$\mu\text{m}$	$\pm 2$
Boru dış çapı	%	$\pm 3$
Boru uzunluğu	%	1
Zaman ölçer	dakika	$\pm 0.0003$
Hassas terazi	gr	$\pm 0.001$
Okuma hatası	%	$\pm 0.1$

Deneylerde saniyede 4 ölçüm alınmış, test süresi boyunca toplanan ölçümlerin ortalama değerleri alınmıştır. Elde edilen sonuçların standart sapması hesaplanıp %95 güven seviyesi için 1,95 ile çarpılarak rastgele hata belirlenmiştir. Diğer taraftan deney düzeneğinde kullanılan ve ölçümleri etkileyen elemanların üretici firma tarafından belirlenen hata oranları da sistematik hata olarak alınmış ve yapılan toplam hata belirlenmiştir.

Deneylerde ölçülen giriş ve çıkıştaki basınç ve sıcaklık verileri sayesinde basınç düşüşü ile sıcaklık artışları belirlenmiş, akışkanın viskozite, yoğunluk gibi termal özellikleri akışkanın ortalama sıcaklığında alınmıştır. Deneysel sürtünme faktörünün belirsizliği Denklem 5’ten yola çıkarak aşağıdaki denklem ile belirlenmiştir.

$$\left(\frac{U_f}{f}\right)^2 = \left(\frac{U_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{U_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{L}\right)^2 + \left(2\frac{U_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{U_\rho}{\rho}\right)^2 \quad (8)$$

Deneysel parametrelerin laminar akış bölgesinde ortalama belirsizliği Tablo 3’te verilmiştir.

**Tablo 3.** Deneysel parametrelerde hesaplanan belirsizlikler

Ortalama Belirsizlik, %				
İç çap ( $\mu\text{m}$ )	Kütleli debi	Hacimsel debi	Reynolds Sayısı, Re	Darcy sürtünme faktörü, f
50	0.1657	0.1668	0.1771	0.24665
76	0.107605	0.108425	0.116815	0.16866
101	0.03627	0.03853	0.03823	0.06462
150	0.03566	0.038075	0.041355	0.062095

### SAYISAL ÇALIŞMA (HAD ANALİZİ)

Mikroboruda akışın sayısal modellenmesi ANSYS-CFX 12 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu program sonlu hacimler yöntemini kullanarak Navier-Stokes denklemlerini çözen ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programıdır. En genel halde daimi, sabit fiziksel özelliklere sahip Newton tipi sıkıştırılmaz bir akış için vektörel formda korunum denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Cengel ve Cimbala 2006, Bejan 1995).

Süreklilik denklemi;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (9)$$

momentum denklemi;

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V} \quad (10)$$

ve enerji denklemi;

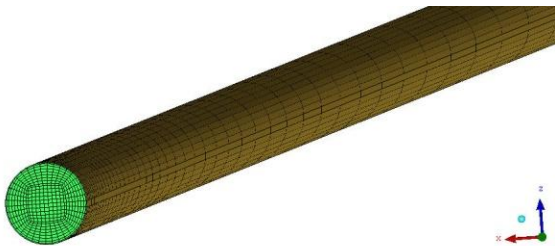
$$\rho c_p \frac{D\vec{T}}{Dt} = k\nabla^2\vec{T} + \mu\Phi \quad (11)$$

şeklindedir. Burada,  $\Phi$ , viskoz ısınma (kayıplar) etkisiyle oluşan kayıp fonksiyonunu temsil eder ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\begin{aligned} \Phi = 2 \left[ \left( \frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right)^2 \right. \\ \left. - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \vec{V})^2 \right] \quad (12) \end{aligned}$$

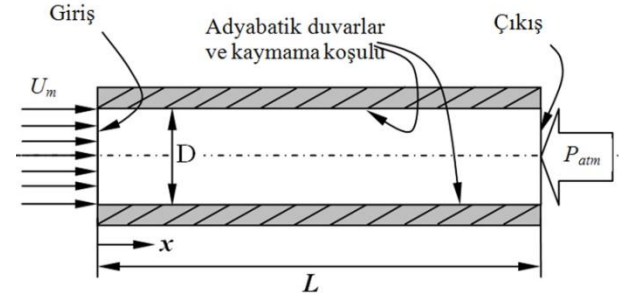
Denklemdaki  $u_r, u_\theta, u_z$  terimleri  $r, \theta, z$  yönlerindeki hız bileşenlerini ifade eder. Yine  $\mu, k, \rho$  ve  $c_p$  terimleri sırasıyla akışkanın viskozitesini, ısı iletim katsayısını, yoğunluğu ile özgül ısısını temsil ederler.

Sayısal hesaplamalar akış kararlı, laminar ve üç boyutlu olarak tanımlanmış ve çözümler ısı enerji modeli kullanılarak yapılmıştır. Sayısal model 100  $\mu\text{m}$  iç çapında, 100 mm uzunluğundaki bir boru için gerçekleştirilmiştir. Mikroborunun akış hacminin tamamı hesaplama bölgesi olarak tanımlanmıştır. Bu alan 45200 adet düğüm ve 42768 adet altı yüzeyli (hexahedral) hacim elemanlarına bölünmüştür. Oluşturulan çözüm ağı Şekil 5'te görüldüğü gibi boru duvarına ve girişe yakın yerlerde daha sık, akış eksenine yaklaştıkça seyrekleşen bir yapıda oluşturulmuştur. Çözümleme iterasyon sayısı 400, ya da artık değer (residual)  $10^{-5}$  değerinin altına düşene kadar sürdürülmüştür.



Şekil 5. Mikroboru akış hacminde oluşturulan çözüm ağı

Şekil 6'da görüldüğü gibi sayısal çözümlemede kullanılan deneysel çalışmadaki sınır şartları kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalarda verilen sınır şartları aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 6. Şematik mikroboru ve sınır şartları

Giriş: Akış Hızları;

$u_{m,giriş}(r, 0) = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 \text{ m/s}$  ve giriş sıcaklığı  $T_{giriş}(r, 0) = 295 \text{ K}$ .

Çıkış: Çıkış basıncı; atmosferik basınç  $P_{çıkış} = 101310,5 \text{ Pa}$ .

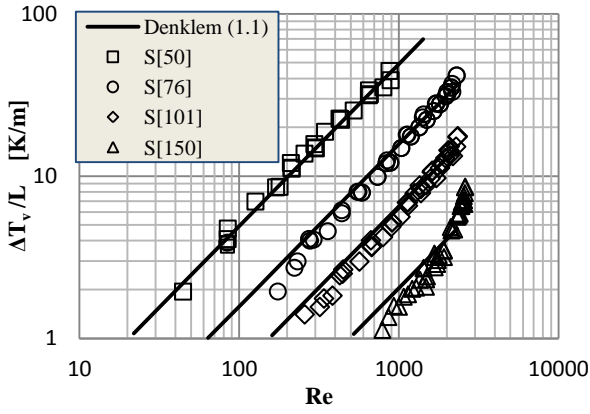
Duvar: Adyabatik duvar ve duvarda hız sıfıra eşit;  $u_{duvar}(r, x) = 0$ .

Bu çalışmada HAD analizi sadece iç çapı 100  $\mu\text{m}$  olan mikroboru için yapılmıştır. Deneysel olarak kullanılan mikroborular su itici özelliğe sahip ergimiş silika mikroborular olup bu tür borular için kayma uzunluğu yaklaşık  $\beta=1 \mu\text{m}$  olduğu rapor edilmiştir (Tretheway ve Meinhart, 2002). Bu çap boyutlarında kayma etkisi göz ardı edilerek sadece viskoz ısınma etkisi incelenmiştir. Yapılan analizde verilen her bir akış hızı için basınç düşüşü ve boru boyunca sıcaklık artışları  $Re = 240-2240$  aralığında hesaplanmış, elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ve literatürdeki analitik modellerin sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

## SONUÇLAR VE KARŞILAŞTIRMA

Adyabatik şartlarda gerçekleştirilen akış deneylerinde akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülerek sıcaklık artışları belirlenmiştir. Ayrıca mikroborudaki basınç düşüşü ölçülerek, Denklem 5 yardımıyla deneysel sürtünme faktörü değerleri hesaplanmıştır. Deneysel veriler hem mevcut analitik bağıntılardan hesaplanan hem de HAD analizinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

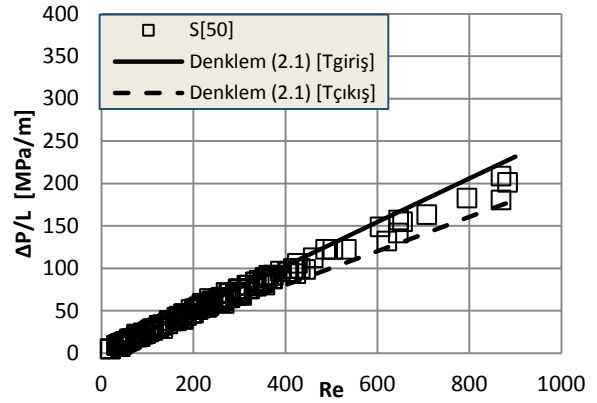
Şekil 7'de ölçülen sıcaklık artışları Denklem 1 kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Laminar akış bölgesinde iç çapı 50  $\mu\text{m}$  olan pürüzsüz boruda ölçülen sıcaklık artışlarının hem iç çapları daha büyük olan mikroborulardan hem de Denklem 1 ile elde edilen sonuçlardan daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Boru çapları büyüdükçe deneysel verilerin Denklem 1'den daha düşük olduğu ve bununla birlikte teorik değerler ile aynı eğilime sahip olduğu görülmüştür.



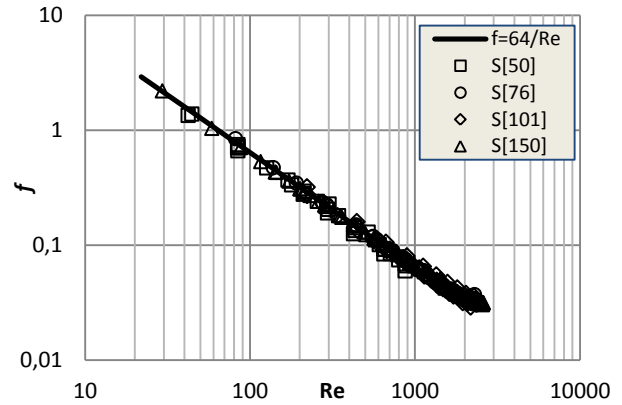
Şekil 7. Pürüzsüz borularda viskoz sıcaklık artışları: S[50], S[76], S[101], S[150].

Deneylerde en yüksek sıcaklık artışı boyu 11 cm, iç çapı en küçük olan (50  $\mu\text{m}$ ) boruda ölçülmüştür.  $Re=870$ ' de 44 K/m olduğu görülmüştür. Akışkan sıcaklığının 44 K/m kadar artması akışkan viskozitesinin azalmasına, dolayısıyla yerel  $Re$  değerinin artmasına neden olmaktadır. Bir başka deyişle aynı  $Re$  değerleri için basınç düşüşünün yaklaşık %5 azalmasına yol açmaktadır. Akışkan viskozitesindeki değişimin basınç düşüşüne olan etkisini görmek amacıyla, akışkanın mikrobordaya giriş sıcaklığı ve mikrobordadan çıkış sıcaklığına göre teorik basınç düşüşleri Denklem 3 yardımıyla belirlenmiş, deneysel verilerle Şekil 8'de karşılaştırılmıştır. Ölçülen basınç düşüşü verilerinin  $Re=20-400$  aralığında giriş sıcaklığına göre hesaplanan teorik basınç düşüşü verileri ile uyumlu olduğu,  $Re=400-900$  aralığında ise daha düşük olduğu, çıkış sıcaklığı yardımıyla hesaplanan teorik değerlere yaklaştığı görülmüştür. Şekil 9'da pürüzsüz borulara ait sürtünme faktörü değerleri görülmektedir. Laminer akış bölgesinde iç çapları  $D>50 \mu\text{m}$  'den büyük olan pürüzsüz mikrobordadaki sürtünme faktörü değerlerinin,  $\pm \%10$  belirsizlik aralığında teori ( $f=64/Re$ ) ile mükemmel uyum sağladığı görülmüştür. İç çapı 50  $\mu\text{m}$  olan mikrobordadaki deneysel sürtünme faktörü değerlerinin  $Re>300$  'den sonra teorik verilerden %10'dan daha düşük değerler aldığı görülmüştür. Sadece viskoz ısınma etkisinin değil aynı zamanda, kayma uzunluğunun çapa kıyasla önemli hale gelmesi nedeniyle kayma akışı etkisinin de sürtünme faktörü değerlerinde azalmaya sebep olduğu söylenebilir. Fakat sürtünme faktörü değerleri, bu çap için belirlenen ortalama belirsizlik sınırları (%24) içinde olduğundan, kesin olarak kayma akışının yaşandığını söylemek mümkün değildir. Yapılan çalışmalarda özellikle iç çapın belirsizliğe önemli bir etkisi olduğu, çap küçüldükçe belirsizlik aralığının artmasının kaçınılmaz olduğu rapor edilmiştir (Celata vd., 2006).

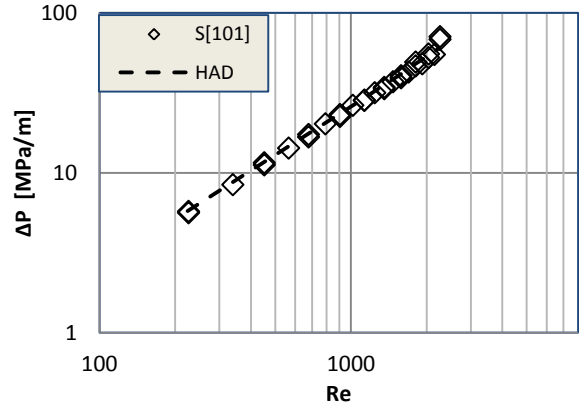
Şekil 10'da HAD analizi ile hesaplanmış basınç düşüşü değerleri, 101  $\mu\text{m}$  iç çaplı boruda ölçülen basınç farkı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Laminer akış bölgesinde verilerin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Basınç düşüşünün  $Re$  ile değişimi: S[50].

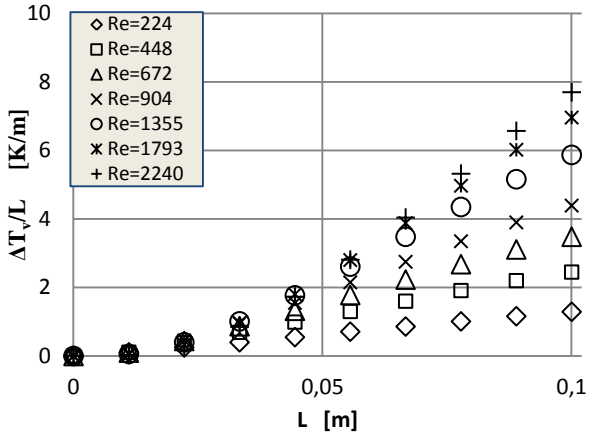


Şekil 9. Pürüzsüz borularda sürtünme faktörleri: S[50], S[76], S[101], S[150].

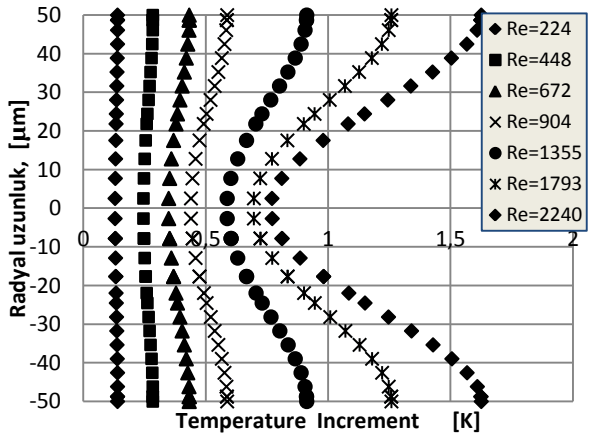


Şekil 10. Pürüzsüz mikrobordada basınç düşüşünün HAD sonuçları ile karşılaştırılması.

Mikrokanallardaki akışta duvara yakın bölgelerdeki viskoz kuvvetler, geniş kanallara oranla çok daha yüksek olduğundan yüksek basınç kayıplarına (sürtünme kaybı) neden olmaktadır. Bu sürtünme kayıpları nedeniyle, adyabatik bir mikrobordada kütleli debiyle doğrudan orantılı olarak cidar ve akışkan sıcaklığının artması beklenmektedir. 100  $\mu\text{m}$  iç çaplı 100 mm boydaki bir boru için yapılan üç boyutlu HAD analizi sonucunda akışkanın sıcaklık değişimleri bulunmuştur. Şekil 11 ve 12'de sırasıyla boru çıkışında akışkanın merkez sıcaklıklarındaki değişim ile radyal yöndeki sıcaklıklarının değişimleri verilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar beklentiye uygun olarak, akışkan sıcaklığının  $Re$  sayısı ve boru boyunun artması ile



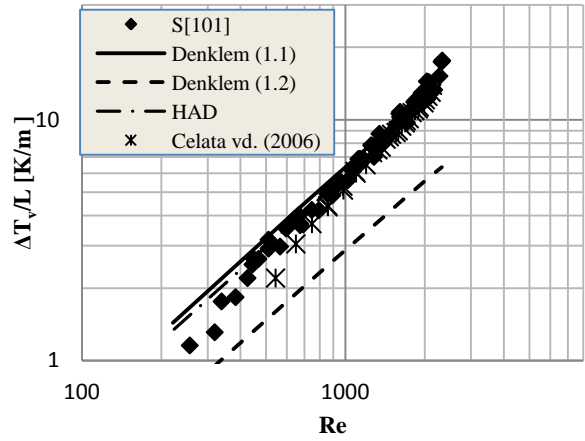
Şekil 11. Farklı Re sayılarında mikrorobu boyunca akışkanın merkez sıcaklıkları



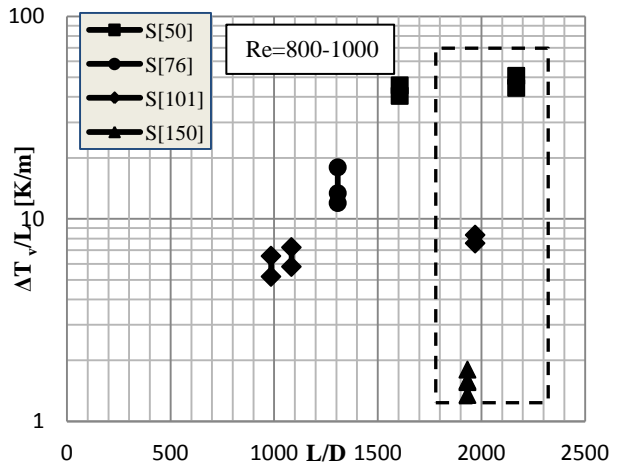
Şekil 12. Farklı Re sayılarında akışkanın radyal yöndeki sıcaklıkları

arttığını, cidara yakın bölgede yüksek, boru ekseninde daha düşük olduğunu göstermiştir.

Şekil 13'te analiz sonucunda elde edilen sıcaklık artışları deneysel veriler ve analitik bağıntılar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen deneysel verilerin, literatürde Celata vd. (2006) tarafından elde edilen deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür. HAD sonuçlarının laminer bölgede daha düşük olduğu dolayısıyla deneysel veriler ile daha iyi uyum sağladığı görülmüşken, yüksek Re sayılarında deneysel veriler ile Denklem 1 ile hesaplanan verilerden daha düşük olduğu saptanmıştır. Ölçülen sıcaklıkların iç çap ve sıcaklık ölçümlerindeki belirsizlikler ile çok küçük boyutlardaki ısı kayıpları göz önünde bulundurulduğunda genel olarak teoriyle uyumlu olduğu söylenebilir. Denklem 2 ile hesaplanan verilerin ise hem deneysel verilerden hem de HAD analizinden çok daha düşük olduğu gözlenmiştir. Hidrolik iç çapları küçük, en-boy oranının büyük olduğu kanallarda, akışkan viskozitesinin yüksek olduğu akışlarda, viskoz ısınma teriminin önem kazanacağı bilinmektedir. Şekil 14'te Re=800-1000 aralığında ölçülen sıcaklıkların boy-çap oranı ile değişimi görülmektedir. Şekilde kesikli çizgili alan içerisinde boy-çap oranları birbirine yakın iç çapları 50, 101 ve 150 µm olan 3 mikrorobuda ölçülen sıcaklık artışları görülmektedir. Boy-çap oranları aynı dahi olsa



Şekil 13. Deneysel ve hesaplanan sıcaklık artışlarının karşılaştırılması



Şekil 14. Deneysel sıcaklık artışlarının boy-çap (L/D) oranı ile değişimi

en fazla sıcaklık artışının, çapı en küçük olan mikrorobuda ölçüldüğü görülmüştür.

## SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Pürüzsüz mikrorobularla adyabatik şartlarda gerçekleştirilen deneylerde viskoz ısınma nedeniyle 1 ila 44 K/m aralığında sıcaklık artışları ölçülmüştür. Bu sıcaklık artışlarının boru iç çapının küçülmesiyle, boru boyu ve Re sayısının artmasıyla büyüdüğü gözlenmiştir. Viskoz sıcaklık artışının iç çapı en küçük mikrorobuda (D=50 µm) en yüksek olduğu, hesaplamalarda viskozitedeki değişimin mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Viskoz ısınmanın sadece iç çapla değil boru boyu ile de değiştiği görülmüş, boy-çap oranının (L/D) 1000'den büyük olduğu, özellikle iç çapı 100 µm'den küçük borularda mutlaka hesaba katılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca pürüzsüz mikrorobular için deneysel sürtünme faktörü değerlerinin laminer akış bölgesinde teori ile uyum sağladığı, iç çapı 50 µm olan mikrorobuda Re>300'den sonra sürtünme faktörü değerlerinin teoriye oranla daha düşük olduğu görülmüştür. Mikrorobuda adyabatik akışın analizi, ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan



Ansyst CFX.12 ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan basınç kayıplarının ve sıcaklık artışlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

## SEMBOLLER

Br	Brinkman sayısı, $Br = \mu U^2 / k \Delta T$
$c_p$	zėul ısı (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
D	ap (μm)
Ec	Eckert sayısı, $Ec = U^2 / 2c_p \Delta T_{ref}$
f	Sürtünme faktörü
g	Yerçekimi ivmesi (m.s <sup>-2</sup> )
$K_D$	Daralma kayıp katsayısı
$K_G$	Genişleme kayıp katsayısı
L	Mikroboru uzunluğu (m)
P	Basınç (Pa)
Pr	Prandtl sayısı
Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık (K)
$\Delta T_v$	Sıcaklık artışı (K)
$\Delta T_{ref}$	Referans sıcaklığı (K)
U	Akışkanın ortalama hızı (m.s <sup>-1</sup> )
V	Akışkan hızı (m.s <sup>-1</sup> )
$Vi$	Viskoz ısınma sayısı, $Vi = \mu U^2 L / \rho U c_p \Delta T_{ref} D^2$
Q	Hacimsel debi (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
$\mu$	Akışkan viskozitesi (N.s.m <sup>-2</sup> )
$\rho$	Akışkan yoğunluğu (kg.m <sup>-3</sup> )
$\epsilon$	İ yüzey pürüzlülüğü (μm)

## TEŐEKKÜR

2003.K.120.970 numaralı proje kapsamında vermiş olduğu maddi destekten dolayı DPT' ye teŐekkr ederiz.

## KAYNAKLAR

Bejan, A., *Convection Heat Transfer* (Second edition), Wiley, New York, 1995.

Celata, G.P., Morini, G.L., Marconi, V., McPhail, S.J., Zummo, G., Using Viscous Heating to Determine the Friction Factor in Microchannels – An Experimental Validation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 725–731, 2006.

engel, Y.A., Cimbala, J.M., *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, Gven Kitabevi, İzmir, 2008.

etin, B., Analysis of Single Phase Convective Heat Transfer in Microtubes and Microchannels, *Y.Lisans tezi*, ODT, 2005.

Guo, Z.Y., Li, Z.X., Size Effect on Single-Phase Channel Flow and Heat Transfer at Microscale, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24, 284–298, 2003.

Hegab, H.E., Bari, A., Ameel, T., Friction and Convection Studies of R-134a in Microchannels within

the Transition and Turbulent Flow Regimes, *Experimental Heat Transfer*, 15, 245–259, 2002.

Herwig, H., Flow and Heat Transfer in Micro Systems: Is Everything Different or Just Smaller? *Z. Angew. Math. Mech.*, 82 (9), 579-586, 2002.

Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers* (Sixth Edition), McGraw-Hill, 1994

Kandlikar, S.G., Fundamental Issues Related to Flow Boiling in Minichannels and Microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, 389-407, 2002.

Koo, J., Kleinstreuer C., Viscous Dissipation Effects in Microtubes and Microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 3159-3169, 2004.

Lelea, D., Nishio, S., Takano, K., The Experimental Research on Microtube Heat Transfer and Fluid Flow of Distilled Water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2817-2830, 2004.

Mala, G.M., Li, D., Flow Characteristics of Water in Microtubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20, 142-148, 1999.

Maynes, D., Webb, B. W., Velocity Profile Characterization in Sub-Millimeter Diameters Tubes Using Molecular Tagging Velocimetry, *Experiments in Fluids*, 32, 3-15, 2002.

Morini, G.L., Single-Phase Convective Heat Transfer in Microchannels: A Review of Experimental Results, *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 631–651, 2004.

Morini, G.L., Viscous Heating in Liquid Flows in Micro-Channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 3637-3647, 2005.

Morini, G.L., Spiga, M., The Role of the Viscous Dissipation in Heated Microchannels, *ASME J. Heat Transfer*, 129, 308-318, 2007.

Papautsky, I., Ameel, T., Frazier, A.B., A Review of Laminar Single-Phase Flow in Microchannels, Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11-16, 2001 New York.

Parlak, N., Engin, T., zbey, A., Mikroborularda Su Akışının Deneysel Olarak İncelenmesi, ULIBTK'07, 2007 Kayseri.

Tretheway, D.C., Meinhart, C.D., Apparent Fluid Slip at Hydrophobic Microchannel Walls, *Physics of Fluids*, 14 (3), L9–L12, 2002.

Tso, C.P., Mahulikar, S.P., The Use of The Brinkman Number for Single Phase Forced Convective Heat Transfer in Microchannels, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 41, 1759-1769, 1998.

Tunc, G., Bayazitoglu, Y., Heat Transfer in Microtubes with Viscous Dissipation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 2395-2403, 2001.

Xu, B., Mavriplis, K. C., Zaghoul, M. E., Evaluation of Viscous Dissipation in Liquid Flow in Microchannels,

*Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13, 53-57, 2003.

Zhigang, I., Niing, G., Chengwu, Z., Cuaobao Z., Experimental Study on Flow and Heat Transfer in a 19.6  $\mu\text{m}$  Microtube, *Experimental Heat Transfer*, 22, 178-197, 2009.



Nezaket Parlak 1978 yılında Almanya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya’da tamamladıktan sonra, 2000 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans ve Sakarya Üniversitesi Enformatik Bölüm Başkanlığında, Uzaktan Eğitim projesinde Arş. Gör. olarak çalışmaya başladı. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmasını tamamlayarak Makine Mühendisliği Termodinamik ve Isı tekniği Anabilim Dalı’na Arş.Gör. olarak atandı. 2010 yılında da Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü’nde Doktora çalışmasını tamamladı. Uzaktan eğitimde temel bilgisayar teknolojileri kullanımı ve termodinamik ders notları ile, mikrokanaallarda akış ve ısı geçişi, kurutma tekniği, stirling motor, konularında yurt içi ve yurt dışı yayınları bulunmaktadır. Evli ve 1 çocuk annesidir.



Mesut Gür 1955 yılında Akyazı/Sakarya’ da doğmuştur. 1977 yılında SDMMMA Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Daha sonra 1984 yılında Hamburg, Harburg Teknik Üniversitesi’ nde Proses Tekniği Bölümünde ikinci lisans ve 1986 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 1992 yılında Almanya Clausthal Teknik Üniversitesi’nde doktora çalışmasını başarıyla bitirmiştir. 1994 yılında Doçent ve 1999 yılında Profesör unvanlarını almıştır. Halen Sakarya Üniversitesi Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim dalında, Öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2004-2005 yıllarında Amerika’ da Pittsburg Üniversitesi’ nde Makine Mühendisliği Bölümünde Misafir Öğretim Üyesi olarak bulunmuş ve süper iletkenlerin soğutulması konusunda çalışmıştır. Akışkan yataкта kurutma, yanma, yüksek sıcaklık vantilatörleri ve pompalar, siklon ısı değiştiriciler, mikrokanaallarda akış ve ısı geçişi uzmanlık alanlarıdır.



Doç. Dr. Tahsin Engin 1968 yılında Samsun’da doğdu. 1992 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (Zonguldak) Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 1992-1994 yılları arasında Van Çimento T.A.Ş’de makine ve üretim mühendisi olarak görev yaptı. 1995 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde “Sıvıdan Sıvıya Gövde Borulu Bir Isı Değiştirgecinin Bilgisayar Yardımı İle Optimizasyonu” konulu tez çalışması ile yüksek lisansını, 2000 yılında ise “Radyal Pompaların Katı-Su Karışımı İletiminde Kullanılmasının Deneysel İncelemesi” konulu tez çalışması ile doktorasını tamamlamıştır. 1994-1997 yılları arasında Karaelmas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışan Dr. Engin 2001-2003 yılları arasında ABD’deki University of Nevada Reno’da doktora sonrası çalışmalar yapmıştır. 2000 yılında “Yrd. Doç. Dr.”, 2008 yılında ise “Doç. Dr.” unvanını alan Dr. Engin, çoğu akışkan dinamiği ve ısı tekniği konularında 18 uluslararası makalenin yanı sıra toplam 45 bilimsel eser yayımlamıştır. Doç. Dr. Tahsin Engin’in 2007 yılında Türkçe’ye çevirdiği Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (Y. A. Çengel and J. M. Cimbala) kitabı ülkemizde 50 civarında üniversitenin çeşitli bölümlerinde “Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları” adıyla okutulan temel bir ders kitabıdır.



Yrd. Doç. Dr. Hasan KÜÇÜK; 1970 yılında Akseki’de doğdu. 1991 yılında İTÜ Makina Fak. Makina Müh. Bölümü’nden mezun oldu. 1992 yılında İTÜ Sakarya Müh. Fak. Makina Müh. Bölümü’nde Arş. Gör. olarak çalışmaya başladı. 1995 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü’nde “Bir Turbojet Motorunun Performansının İncelenmesi” adlı çalışması ile Yüksek Lisans’ını, 2002 yılında aynı enstitüde “Çekirdekli Havuz Kaynamasında Isı Geçişine Katı Taneciklerin Etkisi” başlıklı çalışması ile Doktora’sını tamamladı. 2002 yılında Sakarya Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksekokulu’nda Yrd. Doç. Dr. olarak göreve başlayan Hasan KÜÇÜK, 2003 yılında çalışmaya başladığı Sakarya Üniversitesi Akyazı Meslek Yüksekokulu’nda, 2007’den buyana Okul Müdürü olarak görev yapmaktadır. Isı geçişinin iyileştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynakları, mikro kanallarda akış ve ısı geçişi konularında çalışmalar yürütmektedir.