

## Makale

**Nezaket PARLAK**  
**Mesut GÜR**  
**Tahsin ENGİN**  
**Zekeriya PARLAK**

## Abstract:

The laminar water flow in rough and smooth microtubes is investigated made of stainless steel and fused silica respectively. Total pressure drops of flow in microtubes have been measured for the laminar flow range of  $Re=20-2300$  precisely to determine exergy losses in the experiments. Experiments with rough stainless steel microtube indicate that in the laminar flow range, the exergy loss is in a good agreement with the conventional theory. But  $Re$  increases, measured exergy losses are significantly higher than predicted values and its value differs strongly each other depending on the surface properties. The wall roughness will be more effective in smaller microtubes whereas its effect on the laminar flow in macroscale circular tubes will be ignored. Additionally, it is observed that the transition from laminar to turbulent flow starts at  $Re$  around 1500 at smallest rough tube (103  $\mu m$  ID).

## Key Words:

Microtube, Exergy, Second Law Analysis

## Mikroborularda Su Akışının Termodinamik Analizi

### ÖZET

*Pürüzlü ve pürüzsüz mikroborularda laminar su akışındaki akış kayıpları termodinamiğin ikinci yasası yardımıyla analiz edilmiştir. Deneylerde çapları 50 ila 179  $\mu m$  arasında değişen paslanmaz çelik (pürüzlü) ve ergimiş silika (pürüzsüz) mikroborular kullanılmıştır. Adyabatik koşullardaki akışın basınç düşüşü ve sıcaklık artışları  $Re=20-2200$  aralığında hassas bir şekilde ölçülmüş olup bu verilerle ekserji kayıpları da hesaplanmıştır. Ölçülen basınç kayıpları Hagen-Poiseuille denklemi yardımıyla hesaplanan teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Akış kayıplarının  $Re$  sayısına, mikroboru iç yüzey özelliklerine, boru çapı ve boyuna bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca test edilen mikroborularda viskoz ısınmanın etkin olduğu ve böylece akışın ısındığı tespit edilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Mikroboru, Ekserji, İkinci Yasa Analizi

### 1. GİRİŞ

İmalat ve malzeme teknolojisindeki ilerlemeler mikro ölçekli ısı pompalarının, ısı makinelerinin, yakma sistemlerinin, algılayıcı gibi cihazların geliştirilmesine ve yeni sistemlerin icat edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu cihazlar tıp, biyoloji, uzay, havacılık, bilişim ve otomotiv gibi alanlarda kullanım alanlarına sahip olup Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS), Mikro-Opto-Elektro-Mekanik Sistemler (MOEMS), Mikro-Akış Cihazları (MFD) olmak üzere başlıca üç kategoride sınıflandırılmaktadır. Mikro akışkan cihazları içlerinde birbirleri ile bağlantılı mikron ölçülerinde kanallar bulunmaktadır. Verimliliği yüksek bir cihazın üretilmesi, mikrokanal içerisindeki akışkan akışı ve ısı geçişi özelliklerinin iyi anlaşılmasına bağlıdır. Akış ve ısı geçişinin olduğu uygulamalarda Termodinamik'in II. Yasası özellikle akış ya da sıcaklık dağılımlarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır.

Bir mikrokanal içerisinde hız ve sıcaklık gradyanlarının geniş kanallara oranla yüksek oluşu ekserji kayıplarına sebep olur. Sıcaklık ya

da karakteristik özelliklerden birinin değişmesi gibi mikrokanal akışında meydana gelebilecek herhangi bir değişiklik büyük bir etkiye sebep olur. Bir sistemde akış ve ısı geçişinin neden olduğu tersinmezliklerin belirlenmesi, kullanılabilir enerji (ekserji) kaybının en aza indirilerek sistem veriminin artırılması gerekir. Özellikle enerji tüketen sistemlerde ekserji kayıplarının belirlenmesi mikro akışkan cihazlarının performansı açısından önemli bir yere sahiptir. Günümüze kadar olan süreçte yapılan deneysel araştırmalar geniş (makro ölçekli) kanallarda laminer akış koşullarında genellikle göz ardı edilen viskoz ısınma, giriş etkileri, aksel ısı kayıpları, yüzey pürüzlülüğü, kayma akışı etkisi gibi terimlerin mikron boyutlu kanallarda akış ve ısı geçişine önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Laminer akış bölgesinde iç yüzeyleri pürüzlü ve pürüzsüz, çapları 50 ila 1510 µm olan paslanmaz çelik, ergimiş silis (FS), cam, polimer esaslı malzemelerden yapılmış mikrobörlümlerle tek fazlı akış deneyleri yapılmıştır [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Mala ve Li [1, 2], pürüzlü borularla yaptıkları deneysel çalışma sonucunda geleneksel teoriye oranla (Hagen–Poiseuille Denklemi) basınç kayıplarının daha yüksek olduğunu, Poiseuille sayısının ( $Po = f.Re$ ) olması gereken 64 değerinden %9 ila %37 oranlarında daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Celata vd. [3], çapları 70 ila 326 µm olan mikrobörlümlerle adyabatik koşullarda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kayma akışı etkisi ve erken türbülansa geçişi gözlemlenemediklerini rapor etmişlerdir. Yine Celata vd. [4] laminer sıvı akışındaki viskoz ısınma etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. El-Genk and Yang [7], yaptıkları çalışmada ısıl gelişme bölgesini, akışkan viskozitesindeki değişimin etkilerini, viskoz ısınma ve kayma akış etkilerini nümerik olarak incelemişler, sonuçları literatürde var olan deneysel sonuçlar karşılaştırmışlardır. Dinamik viskozite azaldığında sürtünme faktörü değerlerinin hidrodinamik ve ısıl bakımdan tam gelişmiş akış koşullarındaki teorik sonuçların altında kaldığı,  $\beta=0.7-1.5$  µm kayma akış uzunluğu için kayma akış etkisinin ortaya çıktığını ve sürtünme faktörü değerlerinin düştüğünü rapor etmişlerdir. Ayrıca kayma akış etkilerinin mikrokanal çapına ve L/D oranına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Mikrokanallarda göz ardı edilemeyecek bir diğer önemli ölçek etkisi vis-

koz ısınmadır. Hidrolik çapın küçülmesiyle mikrokanallarda viskoz akış deformasyonu makro boyutlu kanallarda olduğundan daha yüksek olmakta, cidar ve akışkan sıcaklıkları artmaktadır. Tso ve Mahulikar [8] Brinkman (Br) boyutsuz sayısını kullanarak mikrokanallarda viskoz ısınma etkisini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Laminer akış koşullarında Br sayısının aksel 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. Koo ve Kleinstreuer [9] dikdörtgen ve dairesel kesitli mikrokanallardaki viskoz ısınma etkisini incelemişler, viskoz ısınmanın hidrolik iç çapa, kanal en-boy oranına ve Br sayısına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Morini [10] pürüzsüz mikrokanallarda sıkıştırılamaz tam gelişmiş laminer akış için viskoz ısınma etkilerinin dahil edildiği bir model geliştirmişler ve model sonuçlarını deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

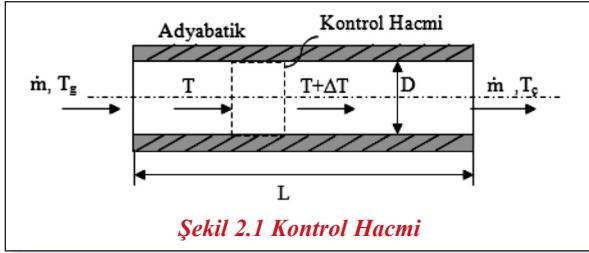
Deneysel çapları 50 ila 100 mikrometre arasında değişen pürüzsüz mikrobörlümler kullanılarak viskoz ısınma sebebiyle beklenen sıcaklık artışlarını ölçmüşlerdir. Bir diğer deneysel çalışma Parlak vd. [11] tarafından gerçekleştirilmiştir. Ergimiş silika (FS) mikrobörlümlerle adyabatik koşullarda yapılan çalışmada, akışkan olarak su kullanılmış ve viskoz ısınmanın neden olduğu sıcaklık artışları ölçülerek, sonuçlar literatürdeki mevcut model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada viskoz ısınma etkisinin hidrolik çap ve boy-çap oranına bağlı olarak değiştiği gözlenmiş, özellikle iç çapı  $D < 100$  µm olan mikrobörlümlerde mutlaka viskoz ısınma etkinin dahil edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Göz önünde bulundurulması gereken bir diğer önemli ölçek etkisi yüzey pürüzlülüğüdür. Mikrokanallarda, mevcut teorinin aksine, laminer akış koşullarında sürtünme faktörünün sadece Re sayısı ile değil, yüzey pürüzlülüğü ile değiştiğini gösteren çalışmalar mevcuttur. Yüzey pürüzlülüğünün sürtünme direncini artırdığı ve akışın laminer akış rejiminden erken türbülansa geçtiği birçok çalışmada gösterilmiştir. Fakat hangi pürüzlülük yüksekliğinde akış karakteristiğinin ne kadar değiştiği hala araştırma konularından birini oluşturmaktadır.

## Makale

Bu çalışmanın amacı pürüzlü ve pürüzsüz mikroborularla adyabatik koşullarda gerçekleştirilen deneyler sayesinde ölçek etkiler diye adlandırılan viskoz ısınma, kayma akışı, giriş etkisi ve yüzey pürüzlülüğü gibi etkileri termodinamik açıdan incelemektir. Deneylerde mikroboru giriş ve çıkışında sıcaklık ve basınç değerleri ölçülerek, sonuçlar mevcut bağıntılar ile analiz edilecektir.

## 2. TERMODİNAMİK MODEL

Ekserji kaybı bir prosesin termodinamik verimliliğinin bir ölçüsüdür. Enerji tüketen bir sistem için Ekserji kaybının düşük olması sistemin yüksek termodinamik verimliliğine sahip olduğunu, yüksek olması ise düşük verimliliğe sahip olması anlamına gelmektedir. Şekil 2.1'deki gibi akışın gerçekleştiği bir mikrokanal içerisinde kontrol hacmi ele alalım. Su, mikroboruya  $\dot{m}$ , kütleli debisi ve  $T_g$ , sıcaklığı ile girmekte, mikroborudan  $T_c$ , sıcaklığı ile çıkmaktadır. Akışın sürekli, tam gelişmiş, laminar ve adyabatik olduğu kabul edilsin.



Şekil 2.1 Kontrol Hacmi

Bu kabuller doğrultusunda kütle korunumu;

$$\frac{\partial m_{KH}}{\partial t} = \sum_g \dot{m} - \sum_c \dot{m} \quad (2.1)$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c = \dot{m} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Sistem sınırları içerisinde enerji üretimi, ısı geçişi ve iş terimlerinin olmadığı, kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edildiği kontrol hacmi için enerji korunumu;

$$\frac{dE_{KH}}{dt} = \dot{E}_g - \dot{E}_c + \dot{E}_{\text{üretim}} \quad (2.3)$$

$$h_g = h_c \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir. Termodinamiğin II. Yasası momentum ve korunum denklemleri arasında köprü görevi görmektedir. Bu kontrol hacmi için ekserji denkliği, aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{X}_g - \dot{X}_c - \dot{X}_{\text{kayıp}} = \frac{dX_{KH}}{dt} \quad (2.5)$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \dot{Q}_s - (\dot{W} - P_0 \frac{dV_{KH}}{dt}) + \sum_g \dot{m} \psi - \sum_c \dot{m} \psi - \dot{X}_{\text{kayıp}} = \frac{dX_{KH}}{dt} \quad (2.6)$$

Burada "0" ve "s" alt indisleri sırasıyla çevre ve kaynağı temsil etmektedir. Denklem 2.6'daki  $\dot{Q}$ ,  $\dot{W}$  ve  $\psi$  terimleri ise, ısı, iş ve akış ekserjisini tanımlamaktadır. Akış ekserjisi,  $\psi$ ;

$$\psi = (h - h_g) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir. Sonuç olarak bu kontrol hacminin ekserji kaybı için;

$$\dot{X}_{\text{kayıp}} = \sum_g \dot{m} \psi - \sum_c \dot{m} \psi \quad (2.8)$$

$$\dot{X}_{\text{kayıp}} = \dot{m} T_0 (s_g - s_c) = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (2.9)$$

Termodinamiğin I. ve II. Yasası'nın kombinasyonu  $dh = Tds + vdP$  mikroboru girişinden çıkışına yazıldığında;

$$h_c - h_g = T(s_c - s_g) + \frac{1}{p}(P_c - P_g) \quad (2.10)$$

elde edilir. Enerji korunumundan,  $h_g = h_c$  ;

$$0 = T(s_c - s_g) + \frac{1}{p}(P_c - P_g) \quad (2.11)$$

olup entropi farkı ve kayıp iş sırasıyla;

$$(s_c - s_g) = \frac{1}{T} \left[ \frac{1}{p}(P_g - P_c) \right] \quad (2.12)$$

$$\dot{X}_{\text{Kayıp}} = \dot{m} \left[ \frac{1}{\rho} (P_g - P_\varphi) \right] \quad (2.13)$$

şeklinde elde edilir. Bir makro ölçekli kanal içerisindeki tam gelişmiş laminer sıkıştırılmaz akışkan akışında basınç düşüşü ile hacimsel debi arasındaki ilişki Hagen–Poiseuille Denklemi ile ifade edilmektedir. Bu denklem, hacimsel debi  $\dot{V}$ , basınç düşüşü  $\Delta P$  olmak üzere:

$$\dot{V} = \Delta P \frac{\pi}{128} \frac{D^4}{\mu L} \quad (2.14)$$

şeklinde yazılır. Burada  $D$ ,  $L$  ve  $\mu$  sırasıyla, iç çap, boy ve dinamik viskoziteyi ifade eden terimlerdir. Teorik olarak akış için ekserji kaybı denklem (2.14) yardımıyla;

$$(\dot{X}_{\text{Kayıp}})_{\text{Teorik}} = \frac{128 \mu L \dot{V}^2}{\pi D^4} \quad (2.15)$$

elde edilir. Basınç farkı, kütleli debi ve akışkan yoğunluğunun deneysel olarak belirlenebilir ve ekserji kaybı denklem 2.13 yardımıyla bulunabilir. Belirlenen ekserji kaybı, kinetik enerji, potansiyel enerji, ısı kayıpları ile deneysel hataları da içinde kapsayan gerçek kayıptır.

### 2.1. İrdeleme: Mikro Ölçekli Akış

Yapılan çalışmalar bir mikrokanal akışında ölçek etkileri olarak adlandırılan viskoz ısınma, kayma akışı, yüzey pürüzlüğü ve giriş etkileri gibi makro ölçekte genellikle göz ardı edilen terimlerin akış üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

**Giriş etkisi:** Mikroboru girişinde çeper kayma gerilmesi değerinin büyük değerlerde olması basınç düşüşünün tam gelişmiş akış koşullarında olduğundan daha fazla olmasına ve dolayısıyla sürtünme faktörü değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Mikro ölçekli kanallarda yüksek basınç düşüşleri nedeniyle kanal boyları kısa tutulmakta ve giriş uzunluğunun etkisi makro ölçekli kanallara oranla daha da önem kazanmaktadır. Dairesel kesitli bir kanalda tam gelişmiş laminer zorlanmış sıkıştırılmaz akışkan akışı Hagen–Poiseuille Denklemi (Denklem 2.14) ile

ifade edilmektedir. Yine kanal boyunca sürtünme direncinin sebep olduğu basınç düşüşü Darcy–Weisbach Denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho \dot{V}^2}{2} \quad (2.16)$$

Burada  $f$ , Darcy sürtünme faktörüdür ve laminer akışta sadece Reynolds sayısının bir fonksiyonudur ( $f = 64 / \text{Re}$ ). Giriş etkisinin deneysel olarak belirlenebilmesi için bu çalışmada iç çapları aynı fakat farklı uzunluklarda (Tablo 3.2) mikrorodlar kullanılmıştır. Deneysel olarak hem uzun borudaki hem de kısa borudaki basınç düşüşleri ölçülmüştür. Girişteki basınç kaybı  $\Delta P_k$  olmak üzere uzun borudaki basınç düşüşü,  $\Delta P_L$ ;

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} = 8 \frac{f \rho}{\pi^2} \frac{L}{D^5} Q^2 + \Delta P_k \quad (2.17)$$

ve kısa borudaki basınç düşüşü,  $\Delta P_l$ ;

$$\Delta P_l = f \frac{l}{D} \frac{\rho V^2}{2} = 8 \frac{f \rho}{\pi^2} \frac{l}{D^5} Q^2 + \Delta P_k \quad (2.18)$$

ile ifade edilebilir. Uzun borudaki basınç düşüşü değeri ile kısa borudaki basınç düşüşü değerinin farkı alındığında;

$$\Delta P_L - \Delta P_l = 8 \frac{f \rho}{\pi^2} \frac{(L-l)}{D^5} Q^2 = 8 \frac{f}{\rho \pi^2} \frac{(L-l)}{D^5} \dot{m} \quad (2.19)$$

elde edilir ve bu basınç düşüşü  $(L-l)$  kadar boya sahip bir mikroroddaki basınç düşüşü değerine eşdeğer kabul edilir. Bu yöntem ile giriş etkisi göz önünde bulundurularak sürtünme faktörü hesaplanabilir.

**Viskoz ısınma etkisi:** Viskoz ısınma adyabatik akış esnasında akışkanın ısınmasına sebep olmakta ve akışkanın fiziksel özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır. Akışta hacimsel debinin değişmediği varsayılırsa; sıcaklık artışı viskozitenin azalmasına yol açacağından, akış için gerekli basınç düşüşünün azalması beklenir. Buna bağlı olarak akış için gerek-

## Makale

li iş azalır ve ekserji kaybı azalmış olur. Morini [10] yaptıkları çalışmada adyabatik akış koşullarındaki mikrokanalda viskoz ısınma nedeniyle oluşan sıcaklık artışı için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir.

$$\Delta T_v = \frac{Ec}{Re} [f Re L] \frac{\Delta T_{ref}}{D} \quad (2.20)$$

Burada,  $Ec$  (Eckert) viskoz ısınmayı temsil eden bir boyutsuz sayıyı,  $\Delta T_{ref}$  ise referans sıcaklığı ifade eder.

**Kayma akışı etkisi:** Makro ölçekli akış analizinde yapılan varsayımlardan biri de duvarda akışkan hızının sıfır kabul edildiği kaymama koşuludur. Sıvı akışlarında kayma akışı; duvara yakın kayma gerilmesinin, duvara bitişik sıvı moleküllerini tutan kuvveti aşması durumunda ortaya çıkabilir. Kayma gerilmesinin ya oldukça büyük olması ya da akışkan ile duvar arasındaki bağın çok zayıf olması gerekmektedir. Bu iki durum; yüksek viskozitenin ve yüksek hızların söz konusu olduğu ya da duvarın hidrofobik (su itici) bir yüzey olmasından ötürü ortaya çıkabilir. Duvardaki kayma hızı;

$$u_R = \delta \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (2.21)$$

şeklinde tanımlanabilir. Buradaki  $\delta$ , kayma sabitidir duvar yüzeyinden hızın sıfır olduğu noktaya kadar olan mesafeyi ifade eder (Morini, [10]). Eğer  $\delta = 0$  ise kaymama koşulu geçerlidir. Tam gelişmiş laminar akış koşullarında kayma akışı hız gradyanı;

$$u = -\frac{R^2}{4\mu} \frac{\partial P}{\partial X} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 + \frac{2\delta}{R} \right] \quad (2.22)$$

olacaktır. Hız profilinde de anlaşılacağı gibi belirli bir hacimsel debide akışın sağlanması için gerekli basınç farkından daha düşük basınç farkı söz konusu ise kayma akışından söz etmek mümkün olacaktır. Kayma akış etkisi de akış için gerekli enerji kaybını azaltan yönde etkiye sahiptir.

**Yüzey pürüzlülüğü etkisi:** Makro ölçekli kanallarda akışın karakteristiği boyutsuz Reynolds sayısı

$Re = \frac{\rho U D}{\mu}$  ile belirlenmektedir. Boru içindeki akışta türbülansın başladığı nokta kritik Reynolds sayısı olarak tanımlanır ki bu da yaklaşık  $Re_{kr} \cong 2300$ 'dür. Laminer akışta sürtünme faktörü yüzey pürüzlülüğünden bağımsız ve sadece  $Re$  sayısına bağlıdır.

Reynolds sayısı  $Re_{kr} \cong 2300$  için  $\frac{\epsilon}{D} \approx \%4$  olarak bulunur. Bu değer altındaki yüzeyler pürüzsüz olarak kabul edilebilir. Sürtünme faktörü yüzey pürüzlülüğünün artması ile artacak, farklı bağıl pürüzlülük değerlerinde farklı değerler alacaktır. Yüzey pürüzlülüğü özellikle ısı geçişi uygulamalarında istenirken, adyabatik akış koşullarında ekserji kaybına yol açacaktır.

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 3.1. Deney Tesisatı

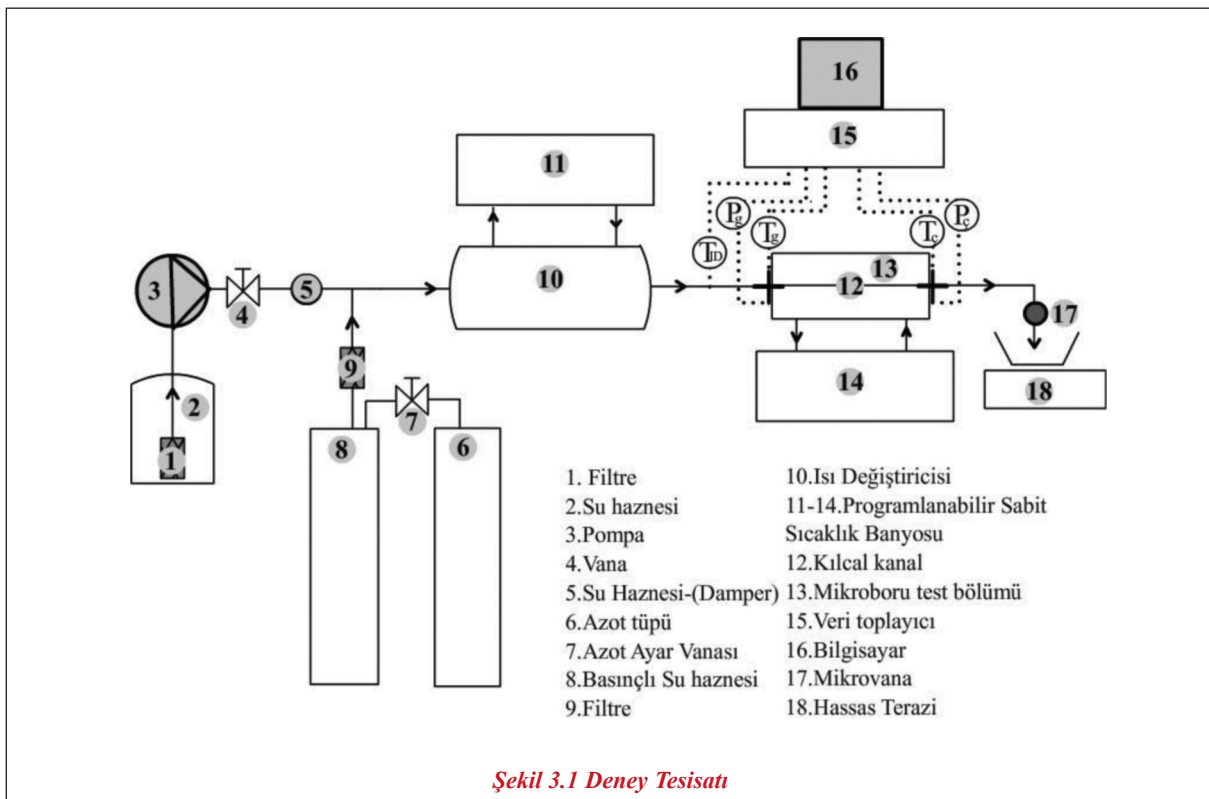
Şekil 3.1'de detaylı olarak verilen deney tesisatı; mikropompa, filtre, su haznesi, ısı değiştiricisi, sabit sıcaklık banyosu, bilgisayar, veri toplama cihazı ve mikroboru test düzeneğinden meydana gelmektedir. Deneylerde akışkan olarak deiyonize su kullanılmıştır ve mikroborudaki akış 0.01 ml/d-10 ml/d hacimsel debi aralığında %0.1 hassasiyetli mikropompa ile daha yüksek hacimsel debilerde ise azot gazı ile basınçlandırılmış tank vasıtasıyla sağlanmıştır. Deneylerde akışkan kütlesi pompanın gösterdiği hacimsel debi ile saptandığı gibi test süresince mikroboru çıkışına konulan bir kaptan toplanan su hassasiyeti %0.1 olan hassas terazi ile ölçülerek de belirlenmiştir. Deneyler adyabatik koşullarda gerçekleştirilmiştir. Adyabatik koşulların güvenilirliğini sağlamak açısından akışkan ortam sıcaklığında mikroboruya sürülmüştür. 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. Sıcaklık ölçümleri Anbetherm firmasından alınan hassas (20-200  $\mu$ m tel çapı) K tipi (kromel-alumel) termoelemanlar termokupullar sayesinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde mikroboru giriş basıncı %0.1 hassasiyetli 0-200 bar arasında

kalibre edilmiş Keller (PA-33X) marka basınç döndürücüsü ile belirlenmiştir. Çıkışta istavroz bağlantısının 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. Deneylerde dairesel kesitli ergimmiş silis malzemeden yapılmış Upchurch (ABD) firmasından temin edilen mikrorborular kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmada kullanılan mikrorboruların iç çapları Sakarya Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan elektron mikroskobu (SEM, Vega Tescan) ile ölçekli mikrorboru enkesit resimleri alınarak, 1 µm ölçek hatasıyla belirlenmiştir. Mikrorboruların boyları giriş etkisi göz önünde bulundurularak özel kesme aletleri ile kesilerek belirlenmiştir. Deneylerde akışkan sıcaklığı ortam sıcaklığında olup, testler adyabatik şartlarda gerçekleştirilmiştir. Test edilen mikrorborular ve deney parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

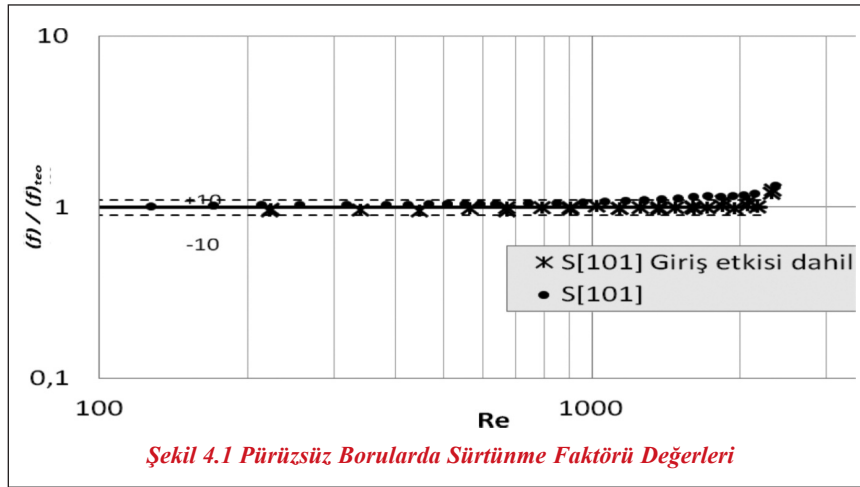
Adyabatik koşullarda su ile yapılan akış deneyleri sonucunda denklem (2.16) yardımıyla sürtünme faktörü değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.1’de pürüzsüz borulara ait sürtünme faktörü değerleri, hem giriş etkisi göz önünde bulundurularak hem de dikkate alınmadan hesaplanmış,  $64/Re$  ile hesaplanan teorik değerlere oranlanarak  $Re$  sayısı ile değişimi verilmiştir. Giriş etkisi dâhil edildiğinde laminer akış bölgesinde teorik olanlarla uyumlu olduğu görülürken, giriş etkisi dâhil edilmediğinde değerlerin teorik değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Böylelikle hidrolik çap küçüldüğünde giriş etkisinin önem kazandığı ve mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Şekil 4.2’de aynı malzemeden ve aynı metotla yapılmış iç çapları pürüzlü borulara ait ekserji kayıpları görülmektedir. İç çapın küçülmesiyle akış için gerekli basınç düşüşü artacağından ekserji kaybı artmıştır. İç çapın küçülmesi bağlı pürüzlülüğün artmasına sebep olduğundan şekil 4.2’de pürüzlülüğün etkisi görülmektedir. İç çapı 180 µm olan boruda deneysel verilerin  $Re=1800$ ’e kadar teorik değerlerle uyumlu olduğu



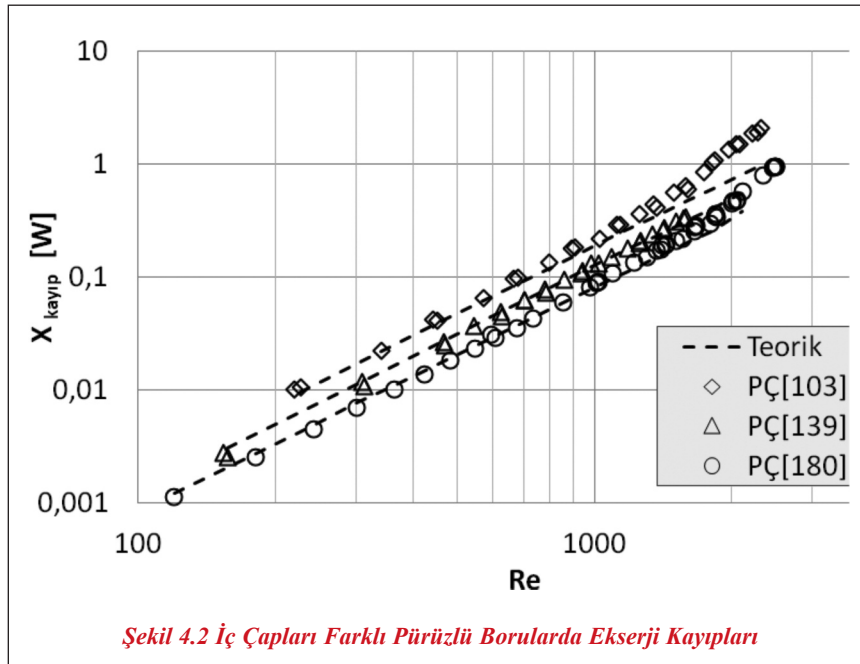
## Makale

Tablo 3.1 Kullanılan Mikrobörüler ve Deney Kodları

Malzeme	İç çap ID ( $\mu\text{m}$ )	Belirsizlik ( $\mu\text{m}$ )	Boy, (cm)	L	Reynolds Aralığı	Bağıl pürüzlülük % $\epsilon/D$	Mikroboru Kod Malzeme[Çap]
Paslanmaz çelik	179	6.2	10,20		117-2300	2.0-4.0	PÇ[179]
Paslanmaz çelik	139	8.6	10		150-2200	2.0-5.0	PÇ [139]
Paslanmaz çelik	132	8.7	10		160-1750	2.0-5.0	PÇ [132]
Paslanmaz çelik	103	10.7	10		60-2350	4.0-6.0	PÇ [103]
Ergimiş silika	101	2.0	10,12		20-3000	0	S[101]
Ergimiş silika	76	2.2	10,12		80-2100	0	S[76]
Ergimiş silika	50	2.4	8,11		80-1000	0	S[50]



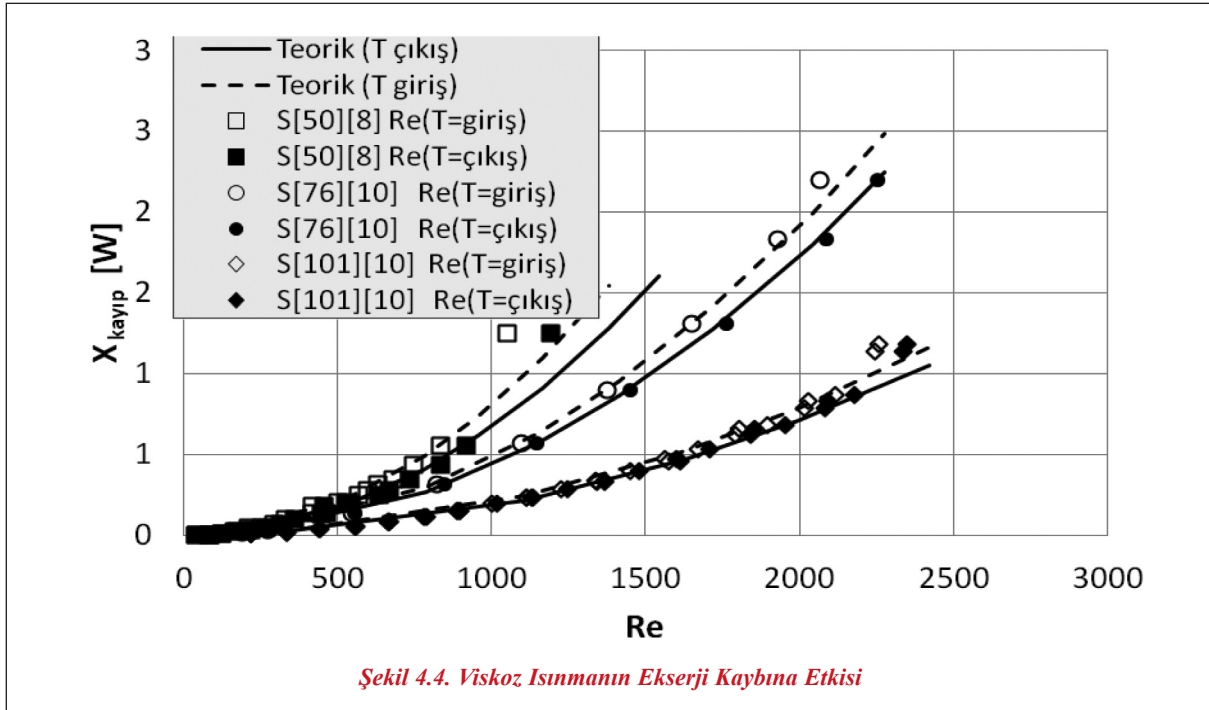
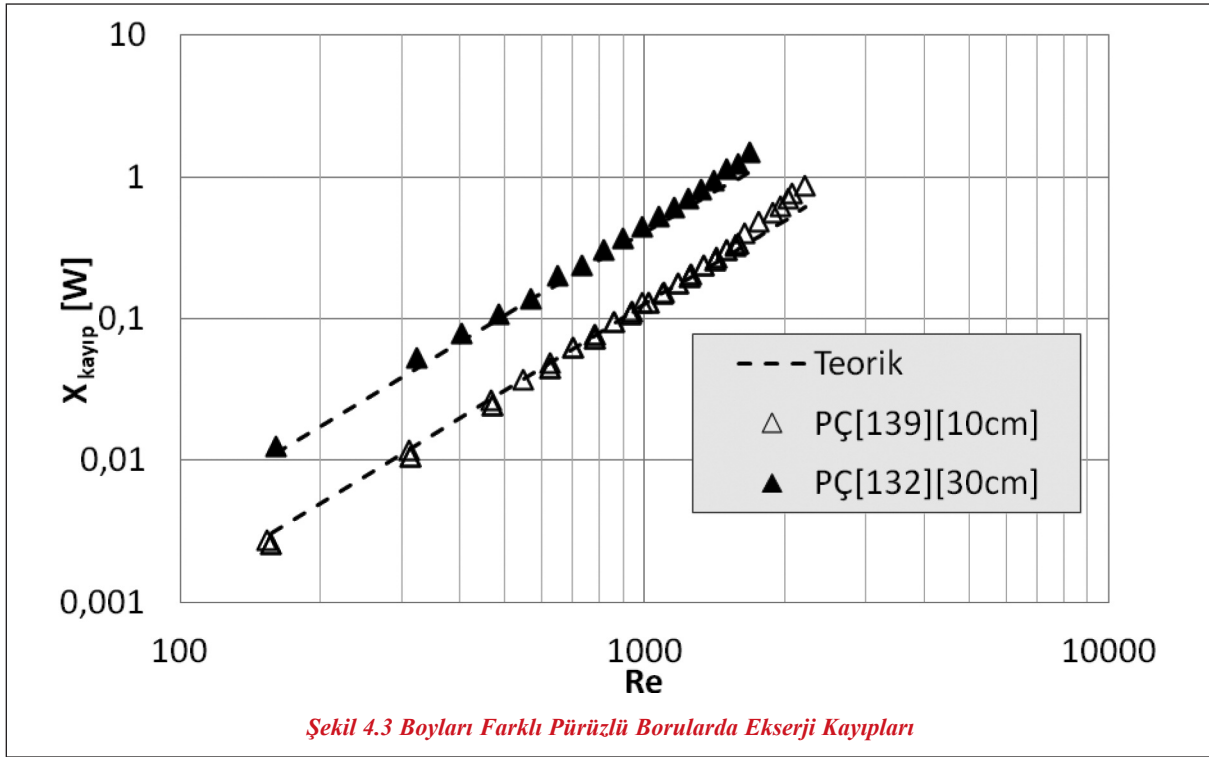
Şekil 4.1 Pürüzsüz Borularda Sürtünme Faktörü Değerleri



Şekil 4.2 İç Çapları Farklı Pürüzlü Borularda Ekserji Kayıpları

görüldükçe, iç çapı 103  $\mu\text{m}$  olan borudaki ekserji kayıplarında  $Re=1500$  civarlarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Mikro ölçekte bağıl pürüzlülük arttıkça ekserji kaybının da arttığı söylenebilir.

Şekil 4.3'te mikro boru boyunun ekserji kaybına olan etkisi görülmektedir. Boy arttıkça kaybın arttığı  $Re=1600$  civarlarına kadar deneysel verilerin teorik olanlarla uyum sağladığı ve daha büyük  $Re$  sayılarında teorik değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 4.4'te pürüzsüz mikroborulara ait ekserji kayıpları görülmektedir. Viskoz ısınmanın etkisini görmek amacıyla teorik değerler ile  $Re$  sayıları hem giriş sıcaklığında hem de mikroborudan çıkış sıcaklığındaki akışkan özellikleri alınarak hesaplanmıştır. Akışkan sıcaklığının değişmesiyle özellikle viskozite gibi akışkan özelliklerinde önemli değişimler olmaktadır.



Şekil 4.4'den de görüldüğü gibi viskoz ısınma nedeniyle sıcaklık arttığında ekserji kayıpları azalmıştır. İç çapın azalmasıyla ekserji kaybında önemli bir artış olduğu görülmüş, özellikle çapı 100  $\mu\text{m}$  ve

altında olan mikrokanallarda viskoz ısınmanın göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışmada son olarak iç çap 50  $\mu\text{m}$  olduğunda bile ekserji kayıplarının teoriye oranla azalmadığı



**Makale**

gözlenmiş, bu da kayma akış etkisinin bu şartlarda ihmal edilebilir olduğu göstermiştir.

**SONUÇ**

Bu çalışmada pürüzlü ve pürüzsüz mikroborulardaki laminer su akışı adyabatik koşullarda deneysel olarak incelenmiş ve ortaya çıkan akış kayıplarının analizi termodinamiğin ikinci yasası yardımıyla yapılmıştır. Akış kayıplarının Re sayısına, mikroboru iç yüzey özelliklerine, boru çapı ve boyuna bağlı olduğu görülmüştür. Hidrolik çapın küçülmesiyle, giriş etkisinin önem kazandığı ve ekserji kayıplarını artırdığı gözlenmiştir. Ayrıca test edilen mikroborularda viskoz ısınmanın etkin olduğu ve böylece akışın ısındığı tespit edilmiş, hesaplamalarda mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**KAYNAKLAR**

- [1] Mala, G.M. and Li, D., Flow characteristics of water in microtubes, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 20, 142–148, 1999.
- [2] Li, Z. He, Y.L. Tang, G.H. and Tao, W.Q., Experimental and numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 50, 3447–3460, 2007.
- [3] Celata, G.P. Cumo, M. McPhail, S. and Zummo, G., Characterization of fluid dynamic behavior and channel wall effects in microtube, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 27, 135–143, 2006.
- [4] 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, (2006b)
- [5] Shen, S. Xu, J.L. Zhou, J.J. and Chen, Y., Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface', *Energy Conversion and Management*, 47, 1311-1325, 2006.
- [6] Szweczyk, H., Liquid flow in smooth capillary pipes, *Chemical and Process Engineering*, 29, 403–424, 2008.
- [7] El-Genk, M. S., Yang, I., Numerical analysis of laminar flow in micro-tubes with a slip boundary, *Energy Conversion and Management*, 50, 1481–1490, 2009.
- [8] Tso, C.P., Mahulikar, S. P., The use of Brinkman number for single phase forced convective heat transfer in microchannels, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 41, 1759-1769, 1998.
- [9] Koo, J., Kleinstreuer C., Viscous dissipation effects in microtubes and microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 3159-3169, 2004.
- [10] Morini, G.L., Viscous heating in liquid flows in micro-channels, *International J. of Heat and Mass Transfer*, 48, 3637-3647, 2005.
- [11] Parlak, N., Gur, M., Arı, V., Küçük, H. and Engin, T., Second law analysis of water flow through smooth microtubes under adiabatic conditions, *Exp. Thermal and Fluid Science*, 35, 60–67, 2011.