

MİKROBORULARDA BASINÇ DÜŞÜŞÜ

Semahat BARLAK

**Yüksek Lisans Tezi
Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Prof. Dr. Sinan YAPICI**

2010

Her Hakkı Saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Y. LİSANS TEZİ

MİKRO BORULARDA BASINÇ DÜŞÜŞÜ

Semahat BARLAK


KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM
2010

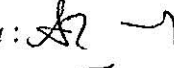
Her Hakkı Saklıdır

Prof. Dr. Sinan YAPICI danışmanlığında, Semahat BARLAK tarafından hazırlanan bu çalışma 02/07/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Sinan YAPICI

İmza : 

Üye : Doç. Dr. M. Akif CEVİZ

İmza : 

Üye : Doç. Dr. Özkan KÜÇÜK

İmza : 

Yukarıdaki sonucu onaylarım

(imza)

Enstitü Müdürü

ÖZET

Y. Lisans Tezi

MİKROBORULARDA BASINÇ DÜŞÜŞÜ

Semahat BARLAK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sinan YAPICI

Mikro kanallarda taşınım prosesleri son yıllarda önemli bir ilgi alanı olmuştur ve bu konuda birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada mikro boruların fiziksel ve geometrik özelliklerinin basınç düşüşüne ve sürtünme faktörüne olan etkisini aydınlatmak amacıyla kurulan deney düzeneğinde, dairesel çelik mikro borularda su akışı için mikro boruların farklı boy ve çaplarında basınç düşüşü ve sürtünme faktörü deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel olarak bulunan basınç düşüşleri ve sürtünme faktörü makro borularda teorik sonuçlar ile karşılaştırılarak verilmiştir. Boru çapları 198 μm , 257 μm , 400 μm , 505 μm ve 589 μm dir. Deneysel olarak bulunan basınç düşüşleri ve sürtünme faktörü değerleri teorik sonuçlarla kıyaslanmıştır. *Re* sayısı, 198 μm mikroboru için 75-2400 aralığında, 257 μm mikroboru için 427-3376 aralığında, 400 μm mikro boru için 500-6200 aralığında, 505 μm mikro boru için 918-8875 aralığında, 589 μm mikro boru için ise 1283-10461 aralığında bulunmuştur.

2010, 66 sayfa

Anahtar Kelimeler: mikro borular , basınç düşüşü, sürtünme faktörü

ABSTRACT

Master Thesis

PRESSURE DROP IN MICROCHANNELS

Semahat BARLAK

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sinan YAPICI

Convective processes in micro-channels in recent years has become a major area of interest and much work is done on this subject. In the experimental system which is made for illuminating the effect of the physical and geometrical properties of the micro tubes on the pressure drop and friction factor; for water flow in annular steel tube, the pressure and the friction factor were examined experimentally for different lengths and diameters of microtubes. The results of pressure drop and friction factor found in the study are given comparing with the results of macro tubes. Diameters of the tubes are 198 μm , 257 μm , 400 μm , 505 μm and 589 μm . Numbers of *Re* are, for 198 μm in the range of 75-2400, for 257 μm 427-3376, for 400 μm in the range of 500-6200, for 505 μm in the range of 918-8875, for 589 μm in the range of 1283-10461.

2010, 66 pages

Key Words: microchannels, pressure drop, friction factor

ÖNSÖZ

Rehberliği ve desteği için danışmanım Sayın Prof. Dr. Sinan YAPICI'ya teşekkür ederim. Bir bilim adamı ve hoca olarak derinliğini, özgün bakış açısını, öğrencilerine gösterdiği hoşgörüyü, samimiyeti ve teşviki yaşamak; kişisel ve profesyonel eğitimim açısından çok kıymetli bir deneyimdi.

Bu çalışma aynı zamanda Sayın Prof. Dr. Osman Nuri ŞARA'nın da değerli katkılarıyla yürütülmüştür. Özgün görüş ve eleştirileriyle beslenmiştir. Engin birikiminden faydalanma ayrıcalığını yaşattığı için, göstermiş olduğu sabır ve hoşgörüsü için, çalışmamda ayırdığı değerli zamanı, yüksek alakası ve katkıları için teşekkür ederim.

TÜBİTAK, 106 M 304 nolu proje ile araştırmayı desteklemiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK' a teşekkür ederim.

Arkadaşlarım Arş. Gör. Eda KELEŞ, Esmâ SEVİMLİ, Arş. Gör. Bircan KÖSE, ve Arş. Gör. Feray BAKAN'a, deneysel çalışmalarım süresince gösterdikleri sabır ve manevi desteklerinden dolayı, TÜBİTAK projesi çalışmalarımız boyunca süreci paylaştığım arkadaşım Elif EROĞLU'na desteği ve hissettirdiği derin sevgisinden dolayı çok teşekkür ederim.

Duyduğum minneti ifade edebilecek kelime bulamadığım, yaptığım her işte sınırsız teşvik, destek ve sevgilerinden güç aldığım sevgili aileme teşekkür ederim.

Semahat BARLAK

Temmuz, 2010

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1.GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL TEMELLER.....	10
2.1. Temel Akış Analizi Teknikleri.....	10
2.2. Akışkan Akışının Esasları.....	12
2.3. Borularda ve Kapalı Kanallarda Akış.....	12
2.3.1. Laminer akış.....	13
2.3.2. Kritik hız.....	13
2.3.3. Reynolds sayısı.....	13
2.3.4. Türbülanslı akış.....	14
2.3.5. Sınır Tabakalarda akış.....	15
2.3.5.1. Sınır Tabakalarda laminer ve türbülent akış.....	16
2.4. Yük Kaybı.....	18
2.4.1. Yük kayıplarının hesaplanması.....	18
2.4.1.a. Bernoulli denklemi.....	18
2.4.1.b. Dairesel kesitli hatlarda yerel yük kayıplarının hesaplanması.....	20
2.4.2. Tam dolu borularda yük kayıpları.....	25
2.4.2.a. Hagen-Poiseuille denklemi.....	25
2.4.2.b. Darcy-Weisbach formülü.....	26
2.5. Sürtünme katsayısı.....	26
2.6. Literatür.....	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	42
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	46
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	57

5.1. Öneriler.....	58
KAYNAKLAR.....	60
EKLER.....	65
EK-1.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	66

SİMGELER DİZİNİ

C	Sabit
d	Boru Çapı
f	Sürtünme Katsayısı
k	Boyutsuz Sayı (0,40)
K_d	Gelişmekte Olan Akış Kaybı
K_e	Çıkış Akış Kaybı
K_i	Giriş Akış Kaybı
l	Karışım Uzunluğu
L	Uzunluk
r_o	Boru Yarıçapı
Re	Reynolds sayısı
ν	Akışkanın Kinematik Viskozitesi
V	Ortalama Hız
ΔP_m	Giriş, Çıkış ve Gelişmekte Olan Akış Etkisinden Dolayı Meydana Gelen Basınç Düşüşü
ΔP_{net}	Net Basınç Düşüşü
τ	Kayma Gerilmesi
μ	Akışkanın Mutlak Viskozite
ρ	Akışkanın Yoğunluğu
η	Akışkanın Yoğunluğuna ve Hareketine Bağlı Bir Katsayı
γ	Özgül Ağırlık
z	Akışkanın Referans Yatay Bir Düzleme Göre Konumu, m

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Mikro-Dişli Çark ve Karıncanın Karşılaştırmalı Görünümü.....	5
Şekil 1.2. Uygulamada Kullanılan Bazı MEMS Ürünleri.....	6
Şekil 1.3. Sürekli Sağlık Denetimi İçin Sağlık Saati ve Mikro İğneler.....	7
Şekil 1.4. Hematolojik Analiz İçin Plastik Kart.....	8
Şekil 1.5. Komple Labratuvar Kartları.....	8
Şekil 2.1. Akış analizi.....	11
Şekil 2.2. Sınır Tabaka Gösterimi.....	17
Şekil 2.3. Tanklarda Boru Bağlantısında Yük Kaybı Katsayısı.....	21
Şekil 2.4. Borularda dönüşlerde yük kaybı katsayısı.....	22
Şekil 2.5. Konikliklerde (Redüksiyon) yük kaybı katsayısı.....	23
Şekil 2.6. Çapta ani değişimlerde yük kaybı katsayısı.....	24
Şekil 3.1. Deney Düzeneği.....	42
Şekil 3.2. Kanal Kesitleri.....	43
Şekil 4.1. ΔP 'nin Re ile Değişimi: $d=198 \mu m$	47
Şekil 4.2. ΔP 'nin Re ile Değişimi: $d=257 \mu m$	48
Şekil 4.3. ΔP 'nin Re ile Değişimi: $d=400 \mu m$	49
Şekil 4.4. ΔP 'nin Re ile Değişimi: $d=505 \mu m$	50
Şekil 4.5. ΔP 'nin Re ile Değişimi: $d=589 \mu m$	51
Şekil 4.6. Sürtünme Faktörünün Reynolds Sayısı ile Değişimi: $d=198 \mu m$	52
Şekil 4.7. . Sürtünme Faktörünün Reynolds Sayısı ile Değişimi: $d=257 \mu m$	53
Şekil 4.8. Sürtünme Faktörünün Reynolds Sayısı ile Değişimi: $d= 400 \mu m$	54
Şekil 4.9. Sürtünme Faktörünün Reynolds Sayısı ile Değişimi: $d=500 \mu m$	55
Şekil 4.10. Sürtünme Faktörünün Reynolds Sayısı ile Değişimi: $d=580 \mu m$	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Sektörlere Göre MEMS ürünleri.....	9
Çizelge 2.1. Borularda Geniş Açılı Dönüşlerde Yük Kaybı Katsayıları.....	22
Çizelge 2.2. Borulardaki Keskin Dönüşlerde Yük Kaybı Katsayıları.....	23
Çizelge 2.3. k katsayısının $(D_2/D_1)^2$ oranına bağlı olarak belirlenmesi.....	25
Çizelge 2.4. Mikro Kanallarda Isı ve Basınç Düşüşü ile İlgili Çalışmalar.....	41
Çizelge 4.1. Kullanılan Boru Boyutları ve <i>Re</i> Sayısı Değişimi.....	46

1.GİRİŞ

Üretim teknolojisinde, uzunluk ve zaman ölçeklerinin sınırlarını araştırmak veya zorlamak insanoğlunun tarihsel süreçte her zaman ilgisini çeken bir konu olmuştur (Avcı 2008). "*Nano*" Yunancadan ve Latineden alınmiş bir sözcüktür ve anlamı cüce demektir. Ayrıca kısaltma olarak milyarda bir olarak da kullanılır. Buna göre *nano* metrik sistemin içinde bir metrenin milyarda biri veya bir milimetrenin milyonda biridir. Ancak genel olarak söylenecek olursa, *nano* teknoloji maddeyi dolaylı olarak atom boyutuna yani "*nano*-boyutuna" indirgeme işidir. Maddelere, milimetrenin milyonda biri büyüklüğündeki yapılara inerek yeni sentez özellikleri kazandıran *nano* teknoloji, yakın gelecekte tüm dünyanın sanayi kollarına ve insan hayatının her alanına yön verecektir. *Nano* teknoloji, atom ve moleköl ölçeğinde özel yöntem ve tekniklerle yapıların, materyallerin ve araçların inşa edilmesini; bu ölçekte ölçme, tahmin etme, izleme ve yapım faaliyetlerinde bulunmayı ve bu ölçeğin bazı temel özelliklerinden yararlanma kabiliyetini ifade eder.

Bilgi teknolojileri ve internet geleneksel kurulu piyasalarda ve mevcut teknolojik altyapı içerisinde yaşamımızı değiştiren uygulamalara sahne olmuştur. *Nano* teknoloji; kullandığımız aletler, bilgisayarlar, yapılar, elbiseler ve materyalleri değiştirecek ve yeni ürünler, piyasalar ve yaşam tarzını gündeme getirecektir. *Nano* teknoloji, yalnızca minyatürize olmuş ürün ve üretim yapıları ortaya çıkarmayacak, bunun yanı sıra üretim sürecinde kullanılan materyaller atom ve moleküler düzeyde ele alınıp işleneceğinden atom (kuantum) fiziği devreye girecektir. Bu anlamda *nano* teknoloji çeşitli alanlarda yeni teknoloji, piyasa ve ürünlerin ortaya çıkmasına olanak tanımaktadır.

Bugün hayal gibi görünse de, kullandıklarımızdan binlerce kat hızlı bilgisayarlar, damarların içinde ilerleyerek hastalıkları tedavi edecek *nano* aygıtlar, organların içinde ameliyat yapabilecek robotlar, betondan daha dayanıklı plastik binalar, hareketleri şarj edilmiş elektrik ile sağlanan yapay kaslar, çok daha hafif ve gelişmiş silah sistemleri

gelecekte karşımıza çıkacak. Enerji konusundaki temel sıkıntı olan enerji sarfiyatı sifıra inebilecek ve zararlı her tür atıktan kurtulmak mümkün olacaktır (Anonim 2010).

Küçük aygıtların yapılması konusunda ortaya çıkan ilk fikir ünlü fizikçi Richard Feynman tarafından 1959 yılında yapılan "There's plenty of room at the bottom" isimli konuşmada ortaya atılmıştır. Richard Feynman malzeme ve cihazların moleküler boyutlarda üretilmesi ile başarılacaklar konusu üzerine yapmış olduğu konuşmasında, “atomları ve molekülleri kontrol etmeyi becerebileceğimizden, bunu yapabilmek için de yeni aletlere ihtiyacımız olduğu” konusundan bahsetmiştir. Atomik seviyede yer çekimi kuvvetinin öneminin azalacağına, Van der Waals gibi zayıf kuvvetlerin öneminin artacağını” da belirtmiştir. Feynman ayrıca konuşmasında, “Minyatürize edilmiş enstrümanlar ile *nano* yapıların ölçülebileceği ve yeni amaçlar doğrultusunda kullanılabilceği”, “Karmaşık hastalıkların teşhis ve tedavisinde küçük programlanabilir tıbbi cihazların, yutulabilir cerrahların kullanılabilceği günleri düşlediğini” de ifade etmiştir (Avcı 2008). İlerleyen süreçte *nano* teknoloji kelimesini ilk defa kullanan Tokyo Bilim Üniversitesi'nden Norio Taniguchi olmuştur. 1974'de yayınlanan bir makalede Taniguchi'nin tanımı şöyledir: "*Nano*-teknoloji' genel olarak malzemelerin atom ya da molekül işlenmesi, ayrılması, birleştirilmesi ve bozulmasıdır”(Taniguchi 1974). *Nano* teknolojinin gelişmesini sağlayan buluş ise 1981 yılında IBM tarafından “Scanning Tunneling Microscope (STM) ” (Tarama Tünelleme Mikroskobu) adlı mikroskobun keşfedilmesidir. Bu mikroskop sayesinde iletken bir yüzeydeki atomların yerleri değiştirilebiliyordu. Bu gelişmeyi 1986'da fullerinelerin ve karbon *nano* tüplerin keşfi izledi. 2000'de ABD'nin *nano* teknolojiye yatırım yapması sonucu tüm dünya'nın birçok ülkesinde *nano* teknoloji araştırmaları başlamış oldu. Geline nokta artık bütün sistemlerin (mekanik, akış, elektromekanik, vb.) mikron boyutlarda üretimi başlamıştır (Avcı 2008; Anonim 2010).

Mikro ve *nano* ölçekli cihazlara olan ilgi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de kendisini hissettirmeye başlamıştır. Özellikle 90'lı yıllarda başlayıp günümüze kadar olan süreçte, temel geometri olarak mikro kanallarda taşınım karakteristikleri ilgili deneysel ve teorik olmak üzere birçok çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda

ısı pompalarının, ısı makinelerinin, yanma sistemlerinin ve yakıt işleme sistemlerinin mikro ölçeklerde geliştirilmesi amaçlanmıştır. 1990-2008 yılları arasında, *mikro* fabrikasyon ve *nano* teknolojiye yaşanan gelişmeler paralelinde, kimyasal, biyolojik ve biyomedikal sistemlerde *mikro* elektro mekanik sistemler'lerin çalışma alanına dahil olmuştur (Avcı 2008). Gelişen teknoloji küçük boyutta bu cihazların, düşük verimli, gürültülü ve büyük ölçekli cihazların yerini alacağını göstermektedir. Bu sistemler, içerisinde akışkanın dolaştığı farklı birimleri birbirine bağlayan mikro kanallar içermektedir (Parlak 2007). Bu kanallardan geçen akışkanın akış ve ısı geçiş özelliklerinin ortaya çıkarılması, yeni *mikro*-elektro-mekanik sistemlerin geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Bünyelerindeki ara donanımlarda akışkan akışı içeren bu sistemler *mikro* akışkanlı sistemler (microfluidic systems) olarak adlandırılmaktadır. *Mikro* sistemler, *Mikro*-Elektro-Mekanik-Sistemler (MEMS), *Mikro*-Optik-Elektro-Mekanik-Sistemler (MOEMS) ve *Mikro*- Akış-Cihazları (MFD) olmak üzere üç grupta incelenmektedir (Şara vd 2004).

MEMS küçük boyutlu elektro-mekanik düzeneklerin ve sistemlerin incelendiği bir bilim ve uygulama alanıdır. MEMS'ler de amaç, *mikro*-elektronik teknoloji ile mekanik sistemleri bütünleştirmektir. Bu sistemlere örnek olarak hava yastığı sensörleri, HD okuyucular vb. verilebilir. MEMS'ler optik tekniklerle birleştirildiğinde MOEMS olarak adlandırılır. Örneğin: *mikro* endoskopi vb. MFD ise tek veya çift fazlı akış, taşınım ile ısı/kütle aktarımı ve akışkanlar mekaniğinin diğer farklı uygulamalarını içerir; *mikro* ısı değiştirici, *mikro* pompa, *mikro* reaktör vb. (Kandlikar *et al.* 2003; Kaplan *et al.* 2003; Şara vd 2004; Erbay *et al.* 2006).

Mikro elektro mekanik sistemler; 1981 yılından bu yana elektronik cihazların soğutulması, ısı pompalarının, ısı makinalarının, yanma sistemlerinin ve yakıt işleme sistemlerinin mikro ölçeklerde geliştirilmesi amacıyla üzerinde çalışılan bir konudur (Tuckerman *et al.* 1981). Ancak bu çalışmalardan, klasik akış ve ısı transferi mekanizmalarının küçük ölçekteki kanallarda geçerli olmadıkları sonucu çıkmıştır. Öte yandan, mikro ölçekteki geometrilerin soğutma sistemlerine uygulanması, ülkemizdeki soğutucu üretimi açısından önemlidir.

Bu tür bir tasarıma başlamadan önce, *mikro*-ölçekli (1-100 mm) ve *meso*-ölçekli (100 mm-1 mm) kanallarda basınç düşüşlerinin ve ısı transferi katsayısının kanal boyutlarına, geometrisine ve çalışma akışkanının cinsine göre değişimini araştırmak; bu kanallarda türbülansa geçiş ölçütünü oluşturmak gereklidir. Deneysel sonuçların analizine göre; klasik teoriden sapmanın başladığı Navier-Stokes denklemlerinin ve ısı transferi korelasyonlarının geçersizleştiği ölçüt bulunmalı, elde edilen sonuçları kullanarak, konvansiyonel sistemlerle karşılaştırma yapılmalıdır (Anonim 2010).

Küçük ölçekli kanallardan oluşmuş sistemler aşağıda sıralanan özelliklere sahiptirler:

- Yüksek ısı akıları.
- Küçük boyutlar ve ağırlıklar
- Çalışma akışkanı miktarının az olması
- Taşınabilir olmaları
- İleride seri üretimleri yapılarak ekonomikliklerinin sağlanabilmesi olasılığı (Amel *et al.* 1997).

Bu özellikler küçük ölçekli sistemleri çekici kılsa da, bazı sorunlar aradan geçen yıllar içerisinde çözülememiştir. Örneğin; bu kanallarda yüksek ısı akılarını sağlayan çok küçük hidrolik çaplar, aynı zamanda basınç düşümlerinin artmasına da yol açmaktadır. Bunun da ötesinde, kanal boyutları küçüldükçe, cidar ve ara yüzey etkilerinin artmasından dolayı, akışın davranışı klasik teoriden uzaklaşmaktadır. Ancak; bu uzaklaşmanın olduğu boyut henüz saptanamamıştır. Ayrıca; bu konuda, araştırmacılar arasında bir uzlaşma da yoktur. 10 mm genişliğindeki dikdörtgen kanallar üzerinde yapılan çalışmalar olduğu gibi; 1.5 mm çapındaki dairesel kesitli borularda yapılan çalışmalar da literatürde "mikro-kanallar" olarak geçebilmektedir (Mala *et al.* 1997; Jacobi *et al.* 2000). Son yıllarda kabul gören bir sınıflandırma ise şu şekildedir:

- 1) Mikro-ölçekli kanallar (1-100 mm);
- 2) Meso-ölçekli kanallar (100 mm-1mm);

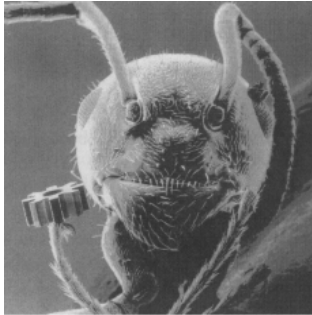
3) Makro-ölçekli kanallar (1mm-6mm), ki kompakt ısı değiştiricileri için kabul edilen boyutlardır;

4) Geniş kanallar (>6 mm).

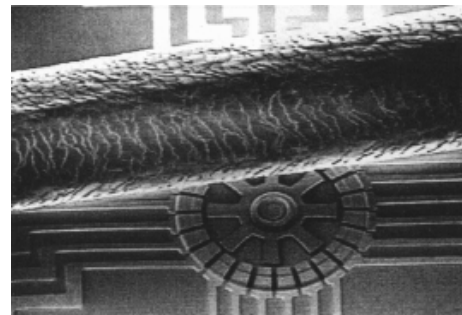
Örneğin, Şekil 1.1’de çapı 100 μm olan nikel esaslı bir mikro-dişli ark ve toplam boyutu 200 μm olan bir *mikro* motorun karşılaştırmalı görünümü verilmektedir.

MEMS, dünya çapında milyarlarca dolarlık pazar potansiyeliyle (2003 yılında 12 milyar dolar) ok çeşitli endüstriyel ve tıbbi alanlarda artan sayıda uygulama alanı bulmaktadır (Tabelling 2005).

Otomobil hava yastıkları için ivmeölçerler, anahtarsız giriş sistemleri, yüksek netlikteki optik ekranlar için yoğun *mikro* ayna dizileri, tek bir atomu görüntülemek için tarayıcı elektron mikroskop uçları, elektronik devrelerin soğutulması için *mikro* ısı değiştiricileri, biyolojik hücreleri ayırştırmak için reaktörler, kan analizi yapan cihazlar ve sonda uçları için basınç algılayıcıları bugünkü kullanım alanlarından sadece birkaçıdır (Avcı 2008).



(a)

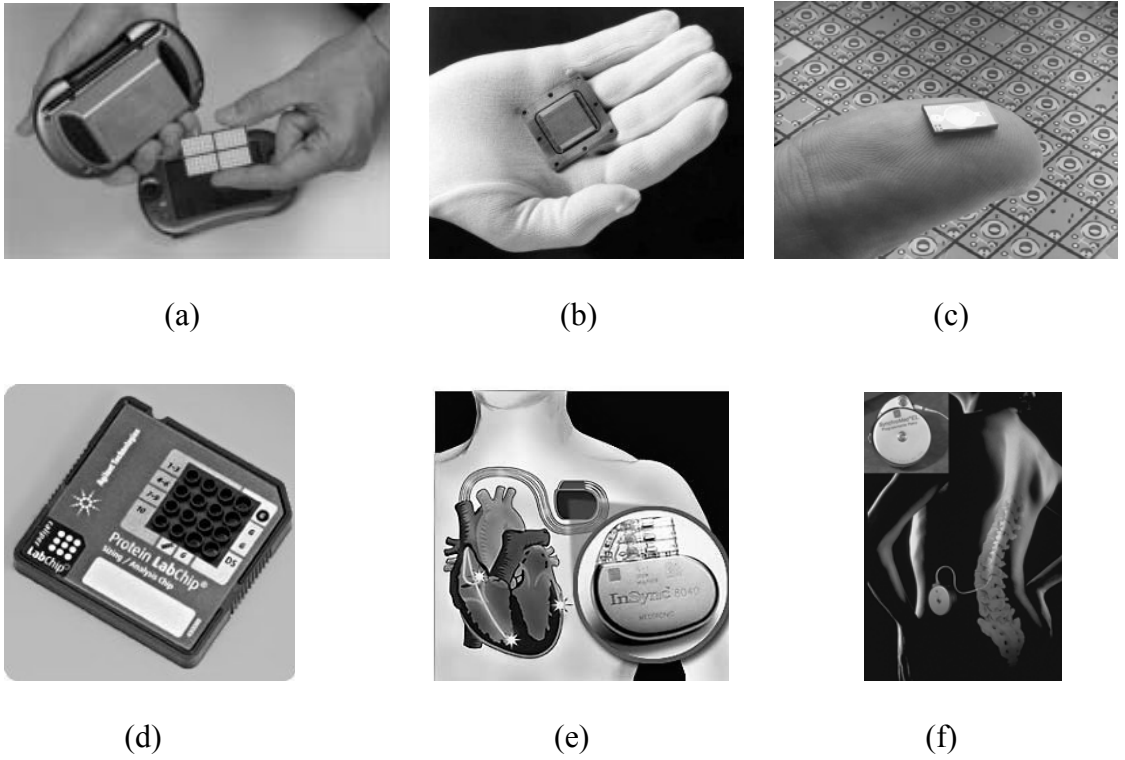


(b)

Şekil 1.1. Mikro-Dişli ark ve Karıncanın Karşılaştırmalı Görünümü

Şekil 1.1’de 100 μm çapa sahip nikel esaslı bir mikro-dişli ark ve karıncanın karşılaştırmalı görünümü (a), Toplam boyutu 200 μm olan bir mikromotor ve insan saçının karşılaştırmalı görünümü (b) (Tabelling, 2005) verilmektedir.

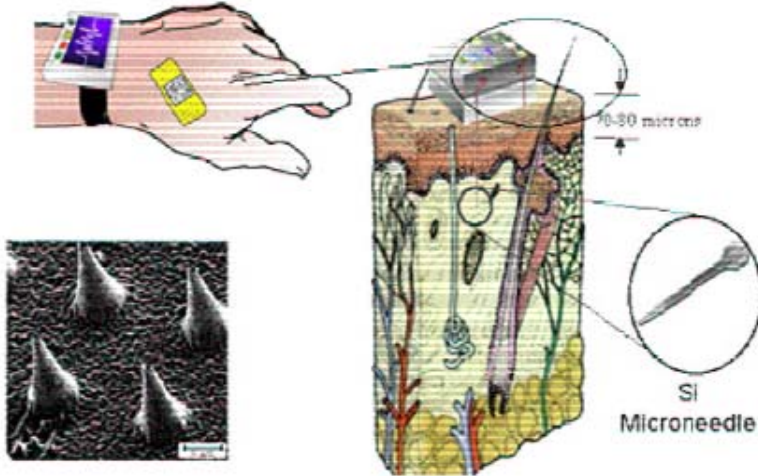
Mikroborular, kızıl ötesi detektörlerde, diyot lazerlerinde, minyatür gaz kromatograflarında ve yüksek-frekans akışkan kontrol sistemlerinde kullanılmaktadır. Mikropompalar, mürekkep püskürtmeli baskıda, çevre deneylerinde ve elektronik soğutmada kullanılır. Küçük pompaların potansiyel tıbbi uygulama alanları, çok küçük miktarlarda ilaçlamanın izlenmesi ve kontrollü aktarımı, kimyasalların nano litre miktarlarında üretilmesi ve yapay pankreasların geliştirilmesini içerir. Uzun zamandır araştırılan yonga-laboratuar(*lab-on-a-chip*), biyolojinin ve kimyanın otomasyonu açısından, hesaplamanın büyük ölçekli otomasyonunu sağlayan entegre devrelerle aynı doğrultuda ilerlemektedir. Uygulamada kullanılan bazı MEMS ürünleri Şekil 1.2, Şekil 1.3, Şekil 1.4 ve Şekil 1.5’de verilmektedir.



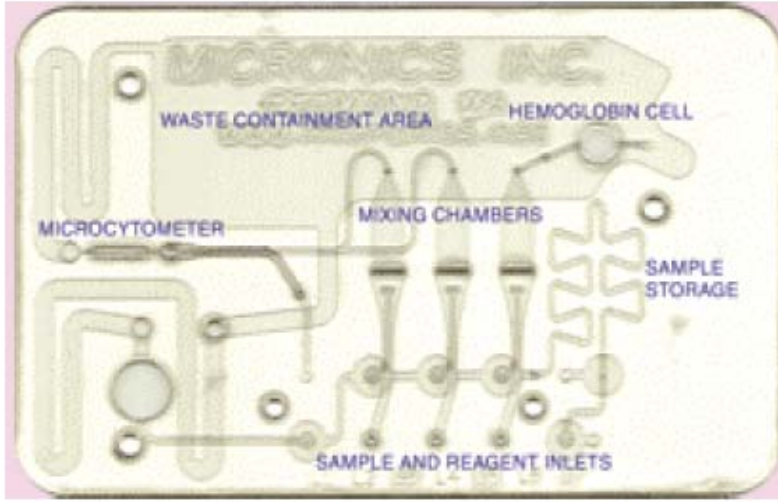
Şekil 1.2. Uygulamada Kullanılan Bazı MEMS Ürünleri

Şekil 1.2. Yakıt hücresi (cep telefonu) (a), mikro-ısı değiştirici (elektronik devrelerin soğutulması) (b), Mikro-pompa (insülin enjeksiyonu) (c), Yonga laboratuar (protein analizi) (d), Mikro ivme ölçer (kalp atışlarının düzenlenmesi) (e), Mikro-pompa (morfin enjeksiyonu) (f) (Tabelling, 2005)

Mikro sistemlerin biyoteknoloji alanındaki uygulamaları da son zamanlarda büyük önem kazanmaya başlamıştır. Özellikle kimyasal ve biyolojik analizlerin mikro-lab (μ Lab) ortamında gerçekleştirilmesi; ilgili sistemlerin bir plastik kart yada kırık üzerine taşınarak, onların geniş çaplı elektronik sistemlerle entegrasyonu mümkün olabilmektedir. Bu konunun en önemli uygulamalarından biri sayılan sağlık saati (“health watch”) hayata geçirildiğinde, bir mikro lab ortamında insan, hayvan ve çevre sağlığının sürekli olarak gözetimi (“continuous health monitoring”) yoluyla; sağlık alanında yeni büyük değişimlerin olması umulmaktadır. Bu yüzyıl içinde uygulamaları artması beklenen bir diğer yeni gelişme de, klasik lab ortamlarının yerlerini mikroelektronik sistemlerle bütünleşmiş, üretimi kolay, ucuz, tek kullanımlık mikro laboratuarlara (μ Lab) bırakması olacaktır. Burada sözü edilen mikro akışkan sistemlerin önemli elemanları mikro pompalar, vanalar, mikrokarıstırıcılar, akış duyucuları, akış yönlendiricileri, mikro iğneler vb. olarak sayılabilir. Bu sistemler; özellikle akışkan numunesi alma, mikro akışkan taşınımı (sözgelimi ilaçların vucuda zerkedilmesi) kimyasal, biyolojik mikro-lab ortamlarında akışkanların manipülasyonu gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Kaplan vd 2003).



Şekil 1.3. Sürekli Sağlık Denetimi İçin Sağlık Saati ve Mikro İğneler (Ananthasuresh 2001)



Şekil 1.4. Hematolojik Analiz İçin Plastik Kart (<http://www.micronics.net>)



Şekil 1.5. Komple Labratuvar Kartları (Bemord Weigl IVD Technology 2000)

Çizelge 1.1 genel MEMS uygulama alanlarını özetlemektedir.

Çizelge 1.1. Sektörlere Göre MEMS Ürünleri (URL-2, 2007)

Alan	Uygulama
Bilişim	Optik esaslı bilgi depolama ve disk sürücü teknolojisi, mürekkep püskürtmeli yazıcılar, ivme duyargaları, dönüş ölçer (kamera sabitleme sistemleri), antenler, duyarga ağırları, mikro aynalar, mikro ısı değiştiricileri (elektronik devrelerin soğutulması)
Çevre	İvmeölçerler(depremin algılanması), kimyasal ve biyokimyasal duyargalar, yonga-laboratuar (çevre kirliliğinin algılanması), radyoaktif duyargalar
Otomotiv	Basınç/sıcaklık/nem/ivme duyargalar, manyetik duyargalar, optik duyargalar, mikro enjektör, hava yastıkları, taşıt güdüm teknolojileri, yağmur algılama sistemleri, mikro ısı değiştiricileri
Proses kontrolü ve metroloji	İvmeölçerler ve eğiklik duyargaları, gaz duyargaları, manyetik duyargalar, spektrometre, sıcaklık/basınç duyargaları, ultra sesli dönüştürücüler
Savunma, havacılık, uzay	Mikro uydular, radyasyon ölçümü, akıllı giysiler, ivmeölçerler, biyolojik ve biyokimyasal ve duyargalar, yonga-laboratuar (biyolojik ve kimyasal silahların algılanması, ilaç yönetimi), ivmeölçerler, mikro bolometreler (kızıl ötesi görüntüleme sistemleri), mikro güç kaynakları, optik duyargalar, mikro ısı değiştiricileri (elektronik çiplerin soğutulması)
Tıp ve biyoloji	DNA analizi, mikro cerrahi aletler, kimyasal duyurucular, sinirsel elektrotlar/sondalar, insulin pompası, iğnesiz enjektörler, ivmeölçerler (kalp atışlarını düzenleyen cihazlar), işitme cihazları, basınç duyargaları (kalp basıncı), akıllı haplar, biyo çipler, mikroçipler, mikro pompalar.
Akışkanlar Mekaniği	Mikropompalar, mikrovalfler, mikrokarıstırıcılar, mikro iğneler, mikroplastik kartlar, mikro akışkan duyucuları
Haberleşme	Radyo frekansı devre ve filtre Uygulamaları
Fizik	Gelişmiş mikroskop uygulamaları, mikro ölçekli sıcaklık ölçüm uygulamaları
Elektronik	Cihazlar ve röleler
Optik	Tümleşik optik sistemler, optik anahtarlama, sayısal ışık işleme, düz panel görüntüleme

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Temel Akış Analizi Teknikleri

Akışkanın hareketi ile ilgili problemleri çözenin üç temel yolu vardır.

1. Denetim hacmi, ya da *integral* analizi
2. Sonsuz küçük sistem, ya da *diferansiyel* analiz
3. Deneysel çalışma, ya da *boyut* analizi

Tüm durumlarda, akış, mekaniğin üç temel yasasını artı bir termodinamik hal bağıntısını ve ilgili sınır koşulları sağlamalıdır:

1. Kütlenin korunumu (süreklilik)
2. Doğrusal Momentum (Newton'un ikinci yasası)
3. Termodinamiğin birinci yasası (enerjinin korunumu)
4. Hal denklemi, $\rho = \rho(p, T)$ gibi
5. Katı yüzeyler, arakesit yüzeyleri, girişler ve çıkışlarda uygun sınır koşulları

Integral ve diferansiyel analizde, bu beş bağıntı matematiksel olarak modellenir ve sayısal yöntemlerle çözülür. Deneysel çalışmada, akışkanın kendisi, herhangi bir matematiksel model kullanmaksızın bu görevi üstlenir. Diğer bir deyişle, bu yasaların fiziğin temelleri olduğuna inanılır ve bu yasalara ters davranışta bulunan herhangi bir akışkan hareketine rastlanmamıştır.

Bir denetim hacmi, analizci tarafından dikkatlice seçilen ve kütle, momentum ve enerjinin geçmesine izin verildiği açık sınırlara sahip bir sonlu büyüklükte bölgedir. Analizci, giren ve çıkan akışkan ve bunun neticesinde bölgenin içindeki değişimler arasındaki dengeye bakar. Sonuç oldukça yararlı fakat ham bir bilgidir. Denetim hacmi analizde akışa ait detaylar, normal olarak, görülmez ya da ihmal edilir.

Düzenli bir biçimde planlanmış bir deney, pratik mühendislik akış problemlerinin incelenmesinde genellikle en iyi yoldur. Örneğin, ister diferansiyel ister integral yaklaşımla olsun, analitik ya da bilgisayar ile, otoyolda hareket eden bir otomobilin, çapraz yöndeki bir rüzgar etkisinde, aerodinamik direnç kuvvetini ve yan kuvvetini doğru olarak hesaplayabilecek bir teori henüz yoktur. Kişi bu problemleri deneyle çözmek zorundadır. Deney tam ölçekli yapılabilir. Bu durumda gerçek bir otomobil otoyolda çapraz rüzgar altında denenebilir.

Akışları sınıflandırmak olasıdır, fakat bunun nasıl yapılacağı konusunda genel bir anlaşma yoktur. Sınıflandırmaların pek çoğu önerilen akış analizinde yapılan kabullerle ilgilidir. Bu sınıflandırmalar çiftler halindedir ve normal olarak verilen bir akış:

Daimi	ya da	daimi olamayan
Sürtünmesiz (ideal)	ya da	sürtünlü (viskoz)
Sıkıştırılmaz	ya da	sıkıştırılabilir
Gaz	ya da	sıvı

olabilir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi her bir çiftten bir kabulü seçeriz. Bir akış, daimi, sürtünlü, sıkıştırılabilir gaz akışı olabilir ya da daimi olmayan sürtünmesiz(ideal, $\mu=0$), sıkıştırılmaz sıvı akışı olabilir. Gerçek sürtünmesiz akışkan gibi bir şey olmamasına karşın, $\mu=0$ kabulü, pek çok analizde yeterli sonuçlar verir.



Şekil 2.1. Akış analizi

Şekil 2.1'de akış analizi için her bir kutudan bir kabul seçilebilir.

2.2. Akışkan Akışının Esasları

Akışkan akışı, zamandan bağımsız (kararlı), zamana bağımlı (kararsız); üniform veya üniform olmayan; laminer veya türbülanslı; bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu; dönmeli veya dönmesiz şekilde olabilir.

Gerçek bir boyutlu sıkıştırılmaz akış, hızın yönü ve şiddeti her noktada aynı olduğunda gerçekleşir. Ancak tek boyut akım çizgisi boyunca alındığında akım çizgisine dik doğrultuda hız ve ivmelerin ihmal edilebilmesi halinde tek boyutlu analiz kabul edilebilir. Böyle durumlarda, ortalama hız, basınç ve yükseklik (kot) değerleri akışın bütünü temsil eder ve küçük sapmalar ihmal edilebilir. Örneğin eğrisel boru hatlarındaki akış, borunun üç boyutlu olmasına ve hızın akışa normal doğrultudaki herhangi bir kesitle değişmesine rağmen bir boyutlu akım prensipleri ile analiz edilebilir.

Akışkan partiküllerinin bir düzlemde veya paralel düzlemlerde hareket etmesi ve akım çizgisi yapısının bütün düzlemlerde özdeş olması halinde akış iki boyutludur.

Kayma gerilmesi ve dolayısıyla torkun mevcut olmadığı ideal akışkanlarda, akışkan partikülleri kendi kütle merkezlerine göre dönme hareketi yapamazlar. Bu tip ideal akışa, dönmesiz akış adı verilir (White 1999).

2.3. Borularda ve Kapalı Kanallarda Akış

Mühendislik uygulamalarının çeşitli dallarında boru akış problemlerinin pratik çözümünde enerjinin korunumu prensibi uygulanmaktadır. Gerçek akışkanların akışı, ideal akışkanların akışına göre daha komplekstir. Akışkan partikülleri ile cidarlar ve akışkan partiküllerinin kendi aralarında kayma kuvvetleri, akışkan viskozitesinden dolayı oluşur. Akışı hesaplamak için kullanılan kısmi türevli diferansiyel

denklemlerin(Euler denklemleri) genel çözümü yoktur. Akış problemlerini çözmek için deneysel sonuçlardan ve yarı ampirik formüllerden yararlanmak gerekir.

Gerçek akışkanların kararlı akışında, dikkate alınması gereken iki tip akış söz konusudur. Bunlar Laminer akış ve Türbülanslı akıştır. Bu iki akış tipi için farklı kanunlar geçerlidir.

2.3.1. Laminer akış

Laminer akışta, akışkan partikülleri, tabakalarda düz paralel yörüngeler boyunca hareket ederler. Komşu tabakalarda ki hızların büyüklükleri aynı değildir. Laminer akışta, kayma gerilmesinin, açısal deformasyon oranı bağıntısı kanunu, yani akışkanın viskozitesinin hız gradyeni ile çarpımı, $\tau = \mu dv / dy$ bağıntısı geçerlidir. Akışkanın viskozitesi etkin rol oynayıp, türbülans koşullarına dönmeyi engeller.

2.3.2. Kritik hız

Mühendisler için pratik önem taşıyan kritik hız, akışkanın viskozitesi tarafından tüm türbülans koşullarının sönmüldüğü hız limiti olarak tanımlanır. Pratikte, laminer akışın üst limiti yaklaşık olarak Reynolds sayısının 2000 olduğu civardır.

2.3.3. Reynolds sayısı

Reynolds sayısı (Re) boyutsuz bir sayı olup atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanır. Tüm Newton tipi akışkanların viskoz davranışlarını belirleyen ana parametre boyutsuz Reynolds sayısıdır.

Dairesel borularda, tam dolu akış için:

$$\text{Reynolds sayısı } Re = \frac{\rho V d}{\mu} \text{ veya } Re = \frac{V d}{\nu} = \frac{V(2r_0)}{\nu} \quad (2.1)$$

Olup, burada

V : ortalama hız (ft/s veya m/s)

d : boru çapı ve r_0 : boru yarıçapı (ft veya m)

ν : akışkanın kinematik viskozitesi (ft^2/s veya m^2/s)

ρ : akışkanın yoğunluğu ($slug/ft^3$ veya $lb-s^2/ft^4$ veya kg/m^3 veya $N.s^2/m^4$)

μ : mutlak viskozite ($lb-s/ft^2$ veya $N-s/m^2$)

Genel olarak, mühendisin ilk yapması gereken, incelenen akış probleminin Reynolds sayısı aralığını tahmin etmektir. Çok küçük Re sayısı, atalet etkilerinin önemli olmadığı sürtünmeli akışın sürünme hareketi yaptığını gösterir. Re sayısının orta değerleri laminar akışa karşılık gelir. Yüksek Re sayıları, olasılıkla, zaman içinde yavaşça değişen fakat bunun üzerine güçlü yüksek frekanslı rastgele çalkantıların eklendiği türbülanslı akışa neden olur.

2.3.4. Türbülanslı akış

Türbülanslı akışta, akışkan partikülleri, bütün doğrultularda gelişigüzel hareket ederler. Herhangi tek bir partikülün hareketini izlemek hemen hemen imkansızdır.

Türbülanslı akış için kayma gerilmesi

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dy} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada η (*eta*) akışkanın yoğunluğuna ve hareketine bağlı bir katsayıdır. Birinci katsayı (μ) viskoz hareketinin etkilerini, ikinci katsayı (η) türbülanslı hareketin etkilerini dikkate almaktır.

Deneysel sonuçlardan, türbülanslı akışta kayma gerilmesi çözümleri yapmak için faydalanılır. Prandtl, türbülanslı akışta kayma gerilmesi için;

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (2.3)$$

denklemini önermiştir. Bu ifadenin dezavantajı, l karışım uzunluğunun y 'nin fonksiyonu olmasıdır. Boru cidarından olan y uzaklığı büyüdükçe, l değeri de büyür. Daha sonra von Karman

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) = \rho k^2 \frac{(dv/dy)^4}{(d^2v/dy^2)^2} \quad (2.4)$$

denklemini önermiştir. k' nın tam bir sabit değeri olmamakla birlikte, bu boyutsuz sayı yaklaşık 0,40 ' dır.

2.3.5. Sınır tabakalarda akış

Sınır tabakası oluşumuna örnek olarak Şekil 2.2 (a)'daki gibi ince bir levhaya paralel yönde akan bir akışkanı inceleyelim. Levha ile sıvının temas ettiği yüzeyde akışkanın hızı sıfırdır; levhadan uzaklaştıkça hız artar ve bir mesafeden sonra kararlı ve sabit bir değere ulaşır. Şekildeki üç eğri, levhadan farklı uzaklıklardaki x değerlerine göre çizilmiştir. Eğrilerin eğimi levhaya yaklaştığında hızla değişir, levhadan belirli bir uzaklıkta yerel hız, tüm akışkan akımının hızına yaklaşır.

Şekil 2.2 (a) daki noktalı eğri (OL) hız değişikliği sınırını gösterir; eğrinin altındaki bölge hızın sıfırdan (duvarda) başlayarak kararlı hale kadarki değer değişimini gösterir.

Eğrinin üstündeki bölgede hız değişimi yoktur ve hız sabittir. OL nin akışkan akımını iki bölgeye ayırdığı hayal edilebilir.

Bu hayali bölgelerden OL ile levha arasında kalan kısma sınır tabakası denir.

2.3.5.a. Sınır tabakalarda laminar ve türbülent akış

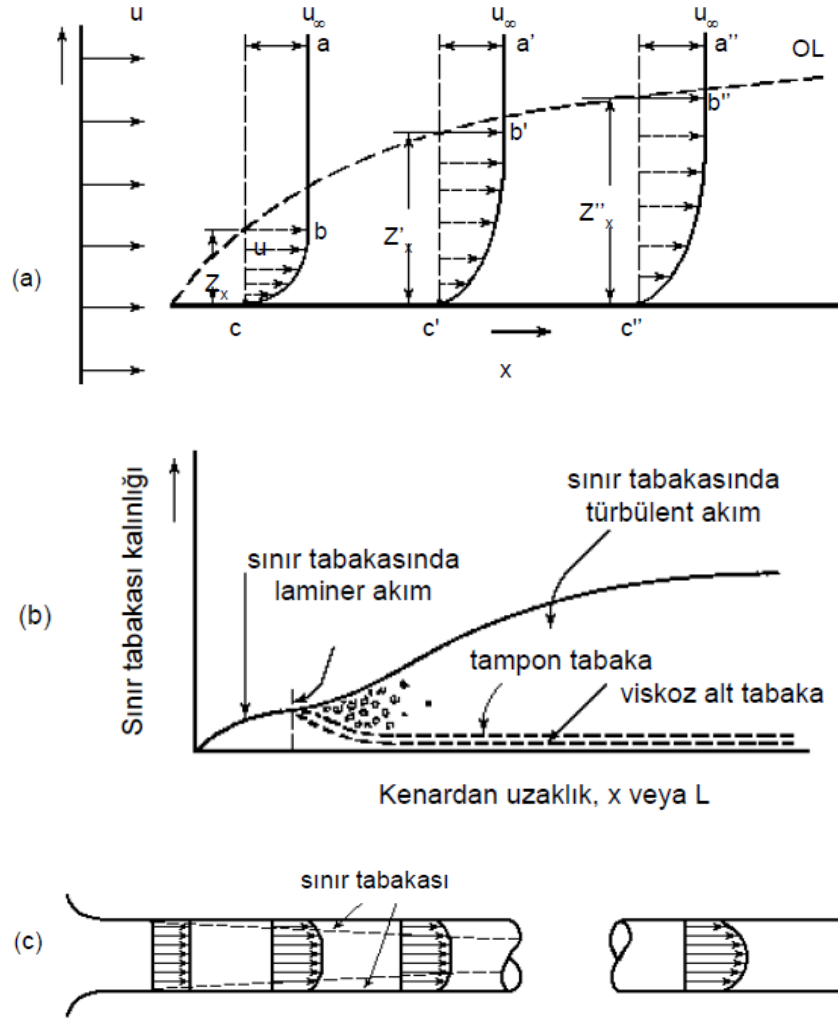
Akışkanın hızı, katı-akışkan arasındaki yüzeyde sıfırdır ve katı yüzeye yakın kısımlardaki hızlar oldukça küçüktür. Bu nedenle katı yüzey yakınındaki akış laminar karakterdedir. Yüzeyden uzaklaştıkça hız artar; sabit hızın altında olduğu halde katı yüzeyden uzakta akım türbülent özelliğe döner.

Türbülensin tam olarak olduğu yer ile laminar akış arasındaki bölge bir geçiş bölgesidir ve her iki akımın karakterlerini gösterir; buraya tampon (buffer) bölge denir.

Bu tanımlamaya göre, türbülent sınır tabakasının üç bölgeden oluştuğu söylenebilir: viskoz-alt tabaka, tampon tabaka ve türbülens sınır.

Kararlı bir hızla akan bir akışkana düz bir levha daldırıldığında oluşan sınır tabakası incedir ve bu tabaka içindeki tüm akışkan düşük bir hızla akar. Bu koşullarda sınır tabakası içindeki akış tümüyle laminardır. Sınır tabakasının kalınlığı arttıkça türbülensin oluştuğu bir noktaya gelinir; bu anda sınır tabakası kalınlaşmasında ani bir artış (sıçrama) görülür (Şekil 2.2 b).

Sınır tabakasındaki akış tümüyle laminar olduğunda tabakanın kalınlığı Z_x , $x^{1/2}$ ile orantılı olarak artar (x = levhadan olan uzaklık). Türbülensin oluşmasından kısa bir süre sonra Z_x deki artış $x^{1,5}$ olur; türbülens tam oluştuğunda bu artış $x^{0,8}$ 'e düşer.



Şekil 2.2. Sınır Tabaka Gösterimi

Şekil 2.2. (a) Prandtl sınır tabakası; x = levhadan uzaklık, u_∞ = kararlı akımın hızı, $Z = x$ mesafesindeki sınır, tabakasının kalınlığı, u = yerel hız, $abc-a'b'c'-a''b''c''$ noktalarında "hız duvarından mesafe" eğrileri, OL = sınır tabakası hattı. (b) Düz bir levhada türbülent sınır tabakasının doğuşu. (c) Bir borudaki akışta sınır tabakasının doğuşu

Reynolds sayısı 2100 den küçük olduğunda daima laminar akım vardır. Normal koşullardaki akışta $N_{Re} > 4000$ in üzerinde türbülent karakter görülür. 2100–4000 arasındaki bölge, tüp girişi ve çıkışının şekline göre, akımın laminar veya türbülent olabildiği geçiş bölgesidir.

2.4. Yük Kaybı

Bağlantı boruları ve kanallardaki toplam kayıp aşağıdakilerin toplamıdır:

- a. Giriş yük kaybı,
- b. Çıkış yük kaybı,
- c. Daralma ve genişleme yük kaybı,
- d. Sürtünme (sürekli) yük kaybı
- e. Dirsek, ara bağlantılar, kapak, vana ve metrelerdeki yük kaybı.

2.4.1.Yük kayıplarının hesaplanması

Boru veya kanalın genişlediği veya akımın doğrultu değiştirdiği yerlerde hızın büyüklüğünün ve doğrultusunun değişmesi nedeniyle enerji kayıpları meydana gelir. Bunlar yerel (lokal) enerji (yük) kayıplarıdır. Sürekli yük kaybı ise boru hattı boyunca akış uzunluğu ile orantılı olan yük kayıplarıdır. Akış yolunun kısa olduğu durumlarda yerel yük kayıpları daha fazla önem kazanır. Enerji kayıpları hesaplanırken yerel yük kayıpları genellikle ihmal edilir.

2.4.1.a. Bernoulli teoremi:

Sürtünmesiz akış şartlarında (ideal akışkan hali), sıkıştırılmayan akışkanlar için akışkan taneciğinin potansiyel, basınç ve hareket (kinetik) enerjisi toplamı sabittir. İdeal akış şartlarında akışkanın mekanik enerji korunumu Bernoulli denklemi ile ifade edilebilir.

Akışkan taneciğinin ağırlığı ρ , g , v ile ifade edilebilir, Bu durumda Bernoulli denklemindeki enerji ifadeleri (Featherstone 1982)

$$\text{Potansiyel enerji} = \rho g v z / \rho g v = z \quad (2.5)$$

$$\text{Basınç enerjisi} = p v / \rho g v = p / \rho g \quad (2.6)$$

$$\text{Kinetik enerji} = (\rho v V_2/2) / \rho g v = V_2/2g \quad (2.7)$$

Netice olarak Bernoulli denklemi:

$$z + p/\rho g + V^2/2g = C \quad (2.8)$$

olur.

Burada,

ρ : akışkanın yoğunluğu, kg/m³

g : yerçekimi ivmesi, m/sn²

v : akışkanın hacmi, m³

z : akışkanın referans yatay bir düzleme göre konumu, m

p : akışkan taneciğine uygulanan basınç, pascal (Newton/m²)

V : akışkan taneciğinin hızı, m/sn

C : sabit

Bir akışta akışkan taneciğinin P gibi bir noktaya $p/\rho g$ kadar yükseltildiğini düşünürsek, P noktasının koordinatı basınç yüksekliğini, P noktasının konumu ise hidrolik gradyanı ifade eder. Akışkan taneciğini P noktasından C noktasına $V^2/2g$ değeri kadar yükselttiğimizde C noktasının konumu akışın enerji çizgisini belirler. İdeal akış şartlarında, diğer bir deyişle sürtünmesiz ortamda, C noktasının konumu sabit olup enerji çizgisi yatay durumdadır. Gerçek akış şartlarında, sürtünmenin sebep olduğu enerji kaybı nedeniyle, akışkan içinde ve akış istikametinde farklı iki nokta arasındaki enerji çizgisi azalan bir eğilim gösterir. Bu durumda iki noktadaki enerji çizgisi arasındaki seviye farkı yük kaybı olarak tanımlanır.

2.4.1.b. Dairesel kesitli hatlarda yerel yük kayıplarının hesaplanması

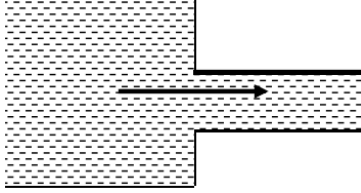
Dairesel kesitli hatlardaki akış şartlarında yerel yük kaybı hesaplamalarında (2.9) formülü kullanılmaktadır. Bu formül, hattın herhangi bir noktasında mevcut genişleme ve daralma ile vana, dirsek ve benzeri bağlantıların olması durumunda, bu noktadaki basınç kaybı hesabında kullanılır. Bu bağlantıların cinsine ve niteliğine bağlı olarak yerel yük kaybı katsayıları (k) değişmekte olup k' nın değeri yük kaybını etkiler.

$$\Delta h = k \frac{V^2}{2g} \quad (2.9)$$

Formül (2.9) boruların yapılara giriş ve çıkışlarında, boru daralma ve genişlemelerinde, değişik açılardaki dirseklerde, boru hattı üzerinde mevcut olabilecek muhtelif tip vana, T ve Y bağlantılarında akışın sebep olduğu yerel kayıpların hesaplamalarında da kullanılır. Şekil 2.3, 2.4, 2.5 ve 2.6 'da değişik yapı ve bağlantıların sebep olduğu yük kaybı hesaplamalarında kullanılan yük kaybı katsayıları (k) örneklerle verilmiştir.

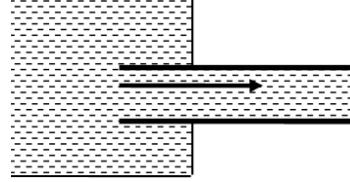
ÇIKIŞ

a) Tanktan çıkış-keskin açılı ile



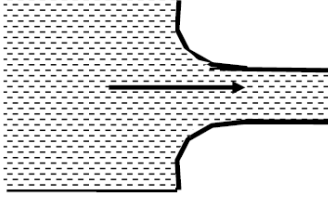
$$k=0.5; \quad \Delta h = 0,5 \frac{V^2}{2g}$$

b) Çıkış borusu tankın içinden (içeri giren kısım çapın 1-2 katı)



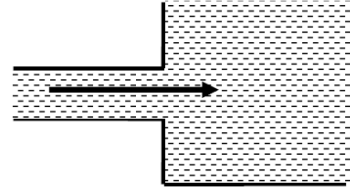
$$k=1; \quad \Delta h = \frac{V^2}{2g}$$

c) Yuvarlatılmış çıkış


 $k = 0.05$ (bu ortalama bir değerdir)

$$\Delta h = 0,05 \frac{V^2}{2g}$$

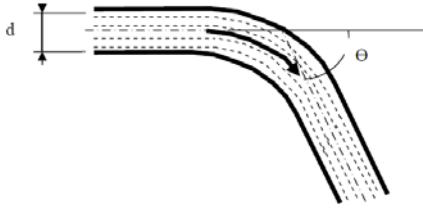
GİRİŞ



$$k = 1; \quad \Delta h = \frac{V^2}{2g}$$

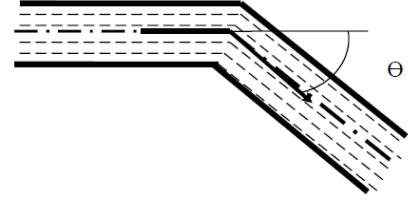
Şekil 2.3. Tanklarda Boru Bağlantısında Yük Kaybı Katsayısı

a) geniş açılı dönüş



$$k = \left[0,13 + 1,85 - \left(\frac{d}{2r} \right)^{3,5} \right] \frac{\theta}{180} \quad (2.10)$$

b) Keskin dönüş



$$k = 6,7.610^{-6} . \theta^{2,17} \quad (2.11)$$

Şekil 2.4. Borularda Dönüşlerde Yük Kaybı Katsayısı(Erkek vd. 2002)

Burada;

$$k : \text{yük kaybı katsayısı, } \Delta h = k \frac{V^2}{2g}$$

r : kıvrımın yarıçapı, m

d : borunun iç çapı, m

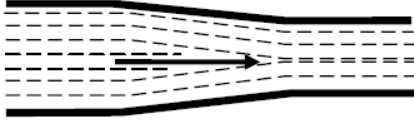
θ : açı, derece

k , (2.10) ve (2.11) bağıntısından bulunabilir. Ayrıca Çizelge 2.1 ve 2.2'de r , d ve θ 'nın fonksiyonu olarak verilmiştir.

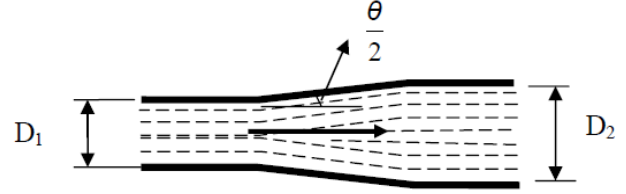
Çizelge 2.1. Borularda Geniş Açılı Dönüşlerde (Çeşitli r , d ve θ Değerlerinde) Yük Kaybı Katsayısı

r/d $\theta(^{\circ})$	1	1,5	2	2,5
11,25	0,037	0,021	0,018	0,017
22,5	0,074	0,043	0,036	0,034
30	0,098	0,057	0,048	0,046
45	0,147	0,085	0,073	0,069
90	0,294	0,170	0,145	0,138
180	0,588	0,341	0,291	0,275

a) Daralan koniklik



b) Açılan koniklik



Şekil 2.5. Konikliklerde (Redüksiyon) Yük Kaybı Katsayısı

Çizelge 2.2. Borulardaki Keskin Dönüşlerde (Çeşitli θ Değerlerinde) k Yük Kaybı Katsayısı

$\theta(^{\circ})$	22,5	30	45	60	90
K	0,07	0,11	0,24	0,47	1,13

Daralan konikliklerde yük kaybı ihmal edilebilir.

Açılan koniklerde genişleme açısına göre yük kaybı aşağıdaki gibi bulunur.

1. Genişleme açısı $\leq 10^{\circ}$

$$\Delta h = k \frac{V_1^2}{2g} \quad (2.12)$$

k , aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$k = 3,2 - (\operatorname{tg} \theta/2)^{1,25} \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (2.13)$$

Burada

V_1 : genişlemeden önceki ortalama hız, m/sn

D_1 : genişleme öncesi borunun iç çapı, m

D_2 : genişleme sonrası borunun iç çapı, m

2. Genişleme açısı $> 10^\circ$

Yük kaybı aşağıda ani genişlemeler için verilen bağıntı ile bulunur (2.14).

Şekil 2.6. a 'da;

$$\Delta h = k \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.14)$$

Burada;

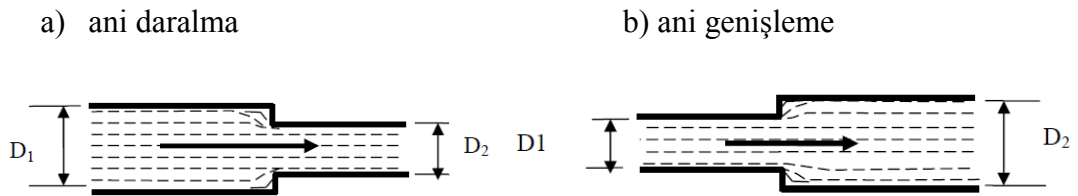
V_2 : sıkışma sonrası ortalama hız, m/sn

D_1 : sıkışma öncesi borunun iç çapı, m

D_2 : sıkışma sonrası borunun iç çapı, m

k katsayısı, $(D_2/D_1)^2$ oranına bağlı olarak Çizelge 2.3'den belirlenebilir. Özel hal için

(tanktan boruya giriş halinde) $\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 = 0$, $k = 0.5$ alınır.



Şekil 2.6. Çapta Ani Değişimlerde Yük Kaybı Katsayısı

Çizelge 2.3. k Katsayısının $(D_2/D_1)^2$ Oranına Bağlı Olarak Belirlenmesi (Mutlu vd. 1985)

$(D_2/D_1)^2$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
k	0,5	0,46	0,41	0,36	0,30	0,24	0,18	0,12	0,06	0,02	0

Şekil 2.3. b için;

$$\Delta h = k \frac{V_1^2}{2g} \quad (2.15)$$

$$k = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (2.16)$$

Burada

V_1 : genişleme öncesi ortalama hız, m/sn

D_1 : genişleme öncesi borunun iç çapı, m

D_2 : genişleme sonrası borunun iç çapı, m

Bunların dışında hesaplamalarda gerekli olabilecek kısmi yük kaybı katsayıları Çizelge 2.3'de verilmiştir.

2.4.2. Tam dolu borularda yük kayıpları

Dolu borularda yük kayıplarının hesapları için ampirik formüller kullanılmaktadır.

2.4.2.a. Hagen-Poiseuille denklemi

Laminer akışta yük kaybı, Hagen-Poiseuille denklemi ile ifade edilir. Bu ifade

$$\text{Yük kaybı} = \frac{32\mu LV}{\gamma d^2} \quad (2.17)$$

şeklindedir. $\mu / \gamma = \nu / g$ olduğundan kinematik viskozite cinsinden

$$\text{Yük kaybı} = \frac{32\nu LV}{gd^2} \quad (2.18)$$

olur.

2.4.2.b. Darcy-Weisbach formülü

Darcy-Weisbach formülü borularda ve kapalı kanallarda akışta yük kaybının bulunması için temel formüldür. Bu denklem;

$$\begin{aligned} \text{Yük kaybı} &= \text{sürtünme katsayısı } f \times \frac{\text{uzunluk}}{\text{çap}} \frac{L}{d} \times \text{hız yükü} \frac{V^2}{2g} \\ &= f \left(\frac{L}{d} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Bir kesitteki hız yükü, ortalama hızın karesi olan $(Q/A)^2$ 'nin α katsayısı ile çarpılması ve $2g$ 'ye bölünmesi ile bulunur. Borularda ve kapalı kanallarda türbülanslı akış için, α , sonuçlarda önemli bir hata doğurmaksızın birim (l) olarak alınabilir.

2.5. Sürtünme Katsayısı

Sürtünme katsayısı, f , laminer akış için matematiksel olarak türetilebilir, ancak türbülanslı akış için, f 'nin Reynolds sayısı ile değişimi gösteren basit bir matematiksel bağıntı mevcut değildir. Ayrıca, Nikuradse ve diğerleri, bir borunun bağlı pürüzlülüğünün de (yüzey girinti çıkıntılarının, boru iç çapına oranı) f değerini etkilediğini bulmuşlardır.

(a) Laminer akış için (2.19) denklemi şöyle düzenlenebilir:

$$\text{Yük kaybı} = 64 \frac{\nu}{Vd} \left(\frac{L}{d} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) = \frac{64}{\text{Re}} \left(\frac{L}{d} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (2.20)$$

Böylece, bütün borularda, bütün akışkanlar için laminer akış durumunda, f değeri,

$$f = 64/\text{Re}$$

dir. Laminer akışta Re 'nin pratik olarak maksimum değeri 2000 dir.

(b) Türbülanslı akış için, birçok hidrolik mühendisi, f değerini, kendilerinin veya diğerlerinin deneylerinden hesaplamaya çalışmışlardır.

(1) Pürüzsüz ve pürüzlü borularda türbülanslı akış için, universal direnç kanunları,

$$f = 8\tau_0 / \rho V^2 = 8V_*^2 / V^2 \quad (2.21)$$

ifadesinden türetilebilir.

(2) Pürüzsüz borular için, 3000 ile 100,000 arasındaki Reynolds sayıları için Blasius;

$$f = 0.316 / \text{Re}^{0.25} \quad (2.22)$$

formülünü önermiştir. 3,000,000 'a kadar Re sayıları için Prandtl tarafından modifiye edilen von Karman denklemi,

$$1/\sqrt{f} = 2 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8 \quad (2.23)$$

(3) Pürüzlü borular için,

$$1/\sqrt{f} = 2 \log(r_0 / \varepsilon) + 1.74 \quad (2.24)$$

(4) Bütün borular için, f değerinin hesaplanmasında, Hidrolik Enstitüsü ve birçok mühendis Colebrook denklemini güvenilir saymaktadır. Bu denklem,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (2.25)$$

şeklindedir.

Denklem (2.25) çözüm için uygun değildir, sürtünme katsayısı f , Reynolds sayısı Re ve bağıl pürüzlülük ε/d arasındaki bağıntıyı veren diyagramlar eklerde verilmiştir.

ε/d değerinin çok küçük olduğu pürüzsüz borular için (2.25) denkleminin köşeli parantez içindeki ilk terimi ihmal edilebilir, böylece denklem (2.25) ve denklem (2.23) benzer hale gelirler. Re sayısı çok büyük olursa denklem (2.25) 'deki köşeli parantez içindeki ikinci terim ihmal edilebilir, böyle durumlarda viskozitenin etkisi ihmal edilebilir ve f , borunun bağıl pürüzlülüğüne bağlı kalır.

2.6. Literatür

Literatürdeki deneysel veriler incelendiğinde, bu alanda halen önemli bir sistematik çalışma açığının bulunduğu göze çarpmaktadır. Örneğin benzer çalışmalar için bile sürtünme faktörü değerleri, teorik değerlerin hem üstünde hem de altında % ± 30 'luk bir dağılım gösterebilmekte, bazen %100'ü aşan sapmalar kaydedilmektedir (Parlak 2007). Birbiriyle çelişen deneysel veriler nedeniyle geleneksel ya da yeni geliştirilen bağıntıların kullanılıp kullanılmaması hakkında tek bir görüş bulunmamaktadır.

Dolayısıyla yeni hesap modellerinin geliştirilmesine ve geliştirilecek teorik modellerin test edilmesine büyük katkı sağlayacak deneysel çalışmalara ihtiyaç olduğu bir gerçektir.

Mikro kanallarda, sürtünme faktörünün tayini üzerine ilk deneysel çalışma Wu ve Little (1983) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hidrolik çapları 55.81, 55.92 ve 72.38 μm olan silikon ve cam esaslı ikizkenar yamuk kesit geometrisine sahip mikro kanallardaki sürtünme davranışı incelenmiştir. Test akışkanı olarak azot, hidrojen ve argon gazlarının kullanıldığı çalışmada, ölçülen sürtünme faktörü değerlerinin makro kanal değerlerine kıyasla %10-30 düzeyinde yüksek olduğu gözlenmiştir. Sürtünme faktöründeki bu artış, yüksek relatif pürüzlülük ve asimetrik pürüz dağılım etkisi ile açıklanmıştır.

Acosta *et al.* (1985), hidrolik çapları 368.9-990.4 μm ve kenar oranları 0.019-0.05 arasında değişen dikdörtgen kesitli mikrokanallarda sürtünme davranışını incelemiştir. Test akışkanı olarak He gazının kullanıldığı çalışmada elde edilen Po ($=fRe$) değerlerinin konvansiyonel değerlerle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Pfalher *et al.* (1990-1991) yaptıkları bir dizi çalışmada, akış direnci davranışını farklı mikrojeometrilere için araştırmıştır. Kullanılan mikrokanallar dikdörtgen ve yamuk kesit geometrisine sahip olup hidrolik çapları 1.6-65 μm arasında değişmektedir. Deneysel sıvı (izopropanol ve silikon yağı) ve gaz akışı (helyum ve azot) için $Re= 50-300$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçülen sürtünme faktörü değerlerinin konvansiyonel değerlere kıyasla küçük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca çalışmada, mikroskalada akışkan viskozitesinin boyut bağımlı değişim gösterdiği ortaya konmuştur.

Choi *et al.* (1991), 3, 7, 10, 53, 81 μm çapa sahip silika esaslı mikrotüplerde, sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemiştir. Çalışma Reynolds sayısının 30-20000 aralığında gerçekleştirilmiş ve test akışkanı olarak nitrojen kullanılmıştır. Laminer akış rejiminde ölçülen tam gelişmiş Poiseuille sayısının ($Po=fRe$) konvansiyonel değere ($fRe=16$) kıyasla daha küçük olduğu gözlenmiştir.

Arkilic *et al.* (1994), silikon esaslı ve dikdörtgen kesit geometrisine sahip bir mikrokanaldaki ($Dh=2.6 \mu m$) He akışını incelemiştir. Çalışmada, sürtünme faktörünün konvansiyonel değere kıyasla daha küçük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, mikrokanallarda kütleli debinin, kayma sınır koşulları kullanılarak yüksek doğrulukta hesaplanabileceğini ortaya konmuştur.

Liu *et al.* (1995), $2.33 \mu m$ hidrolik çap ve dikdörtgen kesit geometrisine sahip mikrokanalda basınç düşümünü deneysel olarak araştırmıştır. Test akışkanı olarak He gazının kullanıldığı çalışmada basınç düşümlerinin teorik değerlerden daha küçük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca çalışmada ölçülen debi oranının, uyuşum katsayısının 1 değeri için kayma sınır koşulları kullanılarak hesaplanan debi oranı ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Liu *et al.*'nin yaptığı çalışma (1995), Shih vd. (1996) tarafından farklı test akışkanı (Helyum ve nitrojen) ve debi değerleri kullanılarak genişletilmiştir. Çalışmada, debi oranının düşük kanal giriş basınç değerlerinde ($<0.25 MPa$) kaygan akış modeliyle uyum içerisinde olduğu, yüksek basınç değerlerinde ise önemli düzeyde sapmaların olduğu ortaya kondu.

Yu *et al.* (1995), farklı çaplara ($19-102 \mu m$) sahip silika esaslı mikro tüplerde nitrojen ve su akışını $Re=250-20000$ aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel sürtünme faktörünün konvansiyonel değere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır.

Harley *et al.* (1995), farklı hidrolik çaplardaki ($Dh=1.01-35.91 \mu m$) yamuk ve dikdörtgen kesitli mikrokanallarda sıkıştırılabilirlik ve seyrelme düzeyinin sürtünme davranışı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada test akışkanı olarak nitrojen, helyum ve argon kullanılmıştır. Deneysel sürtünme faktörünün konvansiyonel değere kıyasla daha düşük düzeyde olduğunu belirlemişlerdir. Sürtünme faktöründeki azalım seyrelme etkisi ile açıklanmış ve değişim birinci mertebeden kayma sınır koşulu kullanılarak teorik olarak da desteklenmiştir.

Peng *et al.* (1996), hidrolik çapı 0.133-0.367 mm arasında farklı geometrik özelliklere sahip, dikdörtgen kesitli paralel kanallarda $Re=50-4000$ aralığında yaptıkları deneylerde, kritik Reynolds sayısının daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca suya tek fazlı zorlanmış taşınım ile ısı geçişini ve akış karakteristiklerini inceleyerek, ısı geçişi ve basınç kaybı için deneysel bağıntılar önermişlerdir.

Mala *et al.* (1998) çapları 50 ile 254 μm arasında değişen mikro borularda su akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Erimiş silis (FS) ve paslanmaz çelik mikro borular kullanmışlardır. Akış karakteristiklerini analiz etmek için basınç düşüşü ve akış hızları ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar, küçük çaplar için klasik teoriden farklılık göstermiş ve büyük çaplar için klasik teoriyle aşağı yukarı aynıdır. Düşük Reynolds sayıları için, istenilen basınç düşüşü yaklaşık olarak Poiseuille akış teorisiyle aynıdır. Fakat yüksek Reynolds sayıları için, Poiseuille akış teorisiyle kıyaslandığında basınç gradientinde önemli bir artış vardır. Küçük Re sayıları için klasik teori ve deneysel veriler hemen hemen uygundur. Ayrıca Re sayısı artırıldığında klasik teoriden önemli bir sapma gözlemlenmiştir. Sürtünme faktörü bunun için klasik teoriden daha yüksektir. Aynı akış hızı ve aynı çaplar için bir erimiş silis (FS) mikro boru paslanmaz çelik borudan daha yüksek bir basınç gradienti gerektirdiği belirtilmiştir.

Mala *et al.* (1999) basınç düşüşü ölçümlerini kısa ve uzun olmak üzere farklı iki boru ile yaparak, her iki borunun da çıkışı atmosfere açık, girişleri ise aynı besleme hattına bağlayarak, giriş ve çıkış etkilerini toplam basınç farkını her bir boru ölçümünden elde edilen basınç farklarını birbirinden çıkararak elde etmişlerdir.

Weilin *et al.* (2000) hidrolik çapları 62 μm den 169 μm ye değişen yamuk silikon mikro kanallarda su akışının karakteristik ısı transferini incelemişlerdir. Deneysel olarak bulunan Nusselt sayılarının sayısal analizlerle elde edilenlerden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Düşük Nusselt sayılarının mikro kanal duvarının yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir.

Araki *et al.* (2000), yamuk kesit alanına sahip mikrokanallarda ($Dh=3-10\mu m$) nitrojen ve helyum akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Harley vd.'nin (1995) yaptıkları çalışmayla benzer değişimler gözlemlemişlerdir. Sürtünme faktöründeki azalım seyrelme etkisi ile açıklanmıştır.

Li *et al.* (2000), çapları 80-166 μm arasında değişen 5 farklı mikrotüpteki nitrojen akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Mach sayısının 0.3'den büyük değerlerinde, tüp boyunca basınç düşümünün lineer olmadığı ve bu değişime bağlı olarak sürtünme faktörünün konvansiyonel değere kıyasla büyük olduğunu belirlediler.

Qu *et al.* (2000) hidrolik çapı 62-169 μm arasında değişen, 30 mm uzunluğunda, trapez kesitli paralel silikon kanallarda, $Re=100-1400$ aralığında suya tek fazlı taşınım ile ısı geçişini incelemişlerdir. Katı ve akışkan bölgelerini dikkate alacak şekilde tasarlanan sayısal model sonuçlarının deney sonuçlarından daha düşük olması, cidarın bağlı pürüzlülüğü ile yorumlanmıştır.

Pfund *et al.* (2000) dikdörtgen kesit alanına sahip ($D_h = 128\mu m - 521\mu m$) mikro kanallarda su akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada 60-3450 Reynolds sayısı aralığında, kanalın kendi içindeki giriş ve çıkış kayıpları çıkarılarak sürtünme faktörleri ve basınç düşüşleri hesaplanmıştır. Pürüzlü ve pürüzsüz kanalların her ikisinde incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü interferometre kullanılarak beyaz ışın yardımıyla ölçülmüştür. Basınç düşüşleri giriş ve çıkış bölgelerinden uzak kanalların içindeki valfler kullanılarak yapılmıştır. Sürtünme faktöründeki belirsizliğin ana kaynağı ortalama kanal derinliğinde ki hata aralığı olarak belirtilmiştir.

Yang *et al.* (2000), çapları 173-4010 μm arasında değişen 10 farklı mikrotüpteki hava, su ve soğutucu akışkan R134a akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Su ve soğutucu akışkan akışında, laminar ve türbülanslı rejimde, sürtünme faktörünün konvansiyonel değerle uyum içerisinde olduğunu belirlemişlerdir. Hava akışında ise, özellikle

türbülanslı rejimde sürtünme faktörünün konvansiyonel teoriye kıyasla oldukça düşük olduğunu gözlemlemişlerdir.

Xu *et al.* (2000) hidrolik çapı 30-344 μm arasında değişen, 20-4000 Reynolds sayısı aralığında dikdörtgen bir mikro kanalda basınç düşüşünü incelemişlerdir. Çalışma akışkanı olarak iyon giderilmiş su kullanılmıştır. Kanal yapımında mekanik işleme ve silikon waferin kimyasal çözündürülmesi şeklinde iki farklı yapım yöntemi kullanılmıştır. Mekanik işleme ile elde edilen 50-300 m kanal için değerleri, 100 m için elde edilen değerlerden ve teorik değerden küçük olduğu belirlenmiş, ancak silikondan elde edilen 0-60 m boyutundaki kanal sonuçlarının teorik sonuçlar ile uyduğu bulunmuştur. Dolayısıyla sürtünme faktöründe meydana gelen farklılıkların kanal yapım tekniğine bağlı olarak, boyutlardaki belirsizlikten kaynaklanabileceği söylenebilir. Türbülanslı akışa geçiş için kritik Reynolds sayısı 1500 olarak belirtilmektedir.

Lalonde *et al.* (2001), çapı 52.8 μm olan bir mikrotüpteki hava akışında sürtünme faktörü davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçların konvansiyonel değerle uyum içerisinde olduğunu belirlemişlerdir.

Benzer bir çalışmada, Turner *et al.* (2001) hidrolik çapı 4-100 μm arasında değişen pürüzlü ve pürüzsüz dikdörtgen kesitli mikrokanallarda laminer ($Re=0.02-1000$) gaz akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Test akışkanı olarak nitrojen, helyum ve havanın kullanıldığı çalışmada, sürtünme faktörünün pürüzlü ve pürüzsüz kanal için konvansiyonel teoriyle uyum içerisinde olduğunu belirlemişlerdir.

Sobhan *et al.* (2001), 2000 yılına kadar yapılan ısı aktarımı ve akışkan akışı çalışmalarını karşılaştırmalı olarak vermiştir. Yapılan çalışmalar, sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı için önerilen bağıntılar tablo halinde verilmiş ve grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada değerlendirilen çalışmaların sonuçları birbirleri ile ve makro kanal sonuçları ile farklılıklar göstermektedir.

Obot (2002) tarafında yapılan benzer bir çalışmada, ısı aktarımı ve basınç düşüşü ile ilgili çalışmalar karşılaştırmalı bir şekilde verilmiş, sonuçlar arasındaki farklıklar ve makro sistemlerden farklılıklar vurgulanmıştır.

Maynes *et al.* (2003), 705 μm çapına sahip 141.9 mm uzunluğunda ergimiş silis (FS) mikroboru kullanarak Reynolds sayısının 500 ile 1600 arasındaki değeri için yaptıkları deneyler sonucunda laminer teori ile uyduğunu göstermişlerdir.

Li *et al.* (2003), çapları 79.9–166.3 μm , 100.25–205.3 μm ve 128.76–179.8 μm olan cam, silikon ve paslanmaz çelikten yapılmış mikrokanallar kullanılarak, deiyonize edilmiş su akışıyla sürtünme direnci üzerine çalışmışlardır. Cam ve silikon mikrokanallarda Darcy sürtünme faktörü f ile Reynolds sayısı çarpımı makroborularda olduğu gibi yaklaşık olarak 64 'te kaldığını, pürüzlülüğü %15 ile %34 arasında olan paslanmaz çelik için ise $f \cdot \text{Re} > 64$ olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca deneysel sonuçlara göre, akış karakteristikleri açısından çapı 80 μm 'den büyük olan mikroboruların makroborulardan bir farkı bulunmadığını, laminerden türbülanslıya geçişin erken gerçekleşmediğini öne sürmüşlerdir.

Hojoon *et al.* (2003) akışkan sıcaklığını çok doğru ölçmek için kanal duvarının düz yüzeyine direnç sıcaklık dedektörleri (RTD) 'nin yerleştirildiği, ölçüleri 57 μm x 200 μm x 48,050 μm olan dikdörtgen düz bir mikrokanal üreterek akışkan özelliklerini incelemişlerdir. RTD materyali olarak platinyum kullanmışlardır. Boru giriş ve çıkışına ısı akışını sağlamak için mikro ısıtıcılar yerleştirerek, mikrokanallardaki laminer akış karakteristiklerinin özelliklerine sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. Akışkan olarak saf su kullanmışlardır. Isıtma gücü artırılarak basınç düşüşü ölçülmüş ve mikrokanal boyunca akışkan özelliklerinin değişiminin akış direnci üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu fakat hız profili üzerine kayda değer bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca ölçülen akış direnci ve hız alanı değerleri makro laminer akış teorisiyle yüksek derecede tutarlılık göstermiştir.

Brutin *et al.* (2004) çapları 50-530 μm arasında değişen erimiş silikadan yapılmış mikro borularda iyon giderilmiş su ve normal suyun akışında akışkanın iyon içeriğinin ve yüzey özelliklerinin sürtünme faktörü üzerine etkisini incelemiştirler. İki farklı yüzey özelliği, erimiş silika ve yüzeyin dimetil ile aktifsizleştirildiği durum denenmiştir. İki farklı boru çapı, 152 ve 262 μm , ve aynı yüzeye sahip borularda su ve iyon giderilmiş suyun kullanıldığı deneylerde, iyon giderilmiş su ile elde edilen Poiseuille sayıları her iki boru çapı için de daha düşük elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak akışkanların iyon içeriklerinin farklı oluşu gösterilmektedir.

Celata *et al.* (2004), $Re=600-800$ 'ün altındaki mikrokanal akışlarında ($Dh=130$ ve $290 \mu\text{m}$) basınç kaybının Hagen-Poiseuille teorisine uygun, daha yüksek Re sayılarında ise basınç kaybının artması yönünde sapmalar olduğu bildirilmiştir. Büyük çaplı borulardaki laminer ve türbülanslı akışlar için geliştirilen ısı geçişi bağıntılarının mikro kanallar için kullanılamayacağı sonucuna varılmıştır.

Hsieh *et al.* (2004), hidrolik çapı 80 μm olan dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda, tam gelişmiş laminer azot akışını deneysel ve analitik olarak incelemiştirler. Çalışmanın sayısal analiz kısmında, birinci mertebeden kayma sınır koşulları ve sıkıştırılabilirlik etkilerini ihtiva eden ilgili korunum denklemleri pertürbasyon metoduyla çözülmüştür. Elde edilen sayısal sonuçlarla deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Konvansiyonel değerlere kıyasla, artan seyrelme düzeyine bağı olarak akış direncinin azaldığı gözlenmiştir.

Sharp *et al.* (2004), çapları 50-247 μm arasında değişen cam mikro borularda, iyon giderilmiş su, 1-propanol ve %20 gliserin çözeltilerinin akışkan olarak kullanıldığı deneysel çalışmada, laminerden türbülanslı akışa geçişi incelemiştirler. Kritik Reynolds sayısının 1800-2300 arasında olduğu, C sabitinin ise makro kanallardaki değer olan 64 ile örtüşüğünü ve mikro kanallardaki akışın makro kanallardakinden farklı olmadığını belirtmişlerdir.

Lelea *et al.* (2004), çapları 100-500 μm borularda laminer akışta ısı aktarımı ve sürtünme karakteristiklerini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Akışkan olarak damıtık su kullanılmıştır ve Reynolds sayısı maksimum 800 alınmıştır. Basınç ölçümleri, ısıtmanın yapılmadığı ve farklı ısıtma güçlerinde ısıtılan durumda olmak üzere iki farklı şekilde hesaplanmıştır. Akışkanın ısıtılmadığı durumda 300 ve 125.4 μm çaplar için Poiseuille sayısının teori ile uyuştuğu belirtilmektedir. $D=300 \mu m$ çaplı boruda akışkanın ısıtıldığı durum için, $f.Re$ çarpımının ısıtma gücünden bağımsız olduğu, ancak $D=500 \mu m$ için $f.Re$ 'nin Reynolds sayısının azalmasıyla azaldığı kaydedilmiştir. Akışkanın ısıtılmadığı durum için $\Delta P/u_m$ nün yine sabit olduğu, fakat akışkanın ısıtıldığı durumda $\Delta P/u_m$ nün üssel bir şekilde azaldığı belirtilmiştir. Eğer ısıtılan boru uzunluğu toplam boru uzunluğuna yakınsa, $\Delta P/u_m$ deki azalmanın akışkanın viskozitesindeki azalmaya paralel olduğu, eğer ısıtma uzunluğu kısa ise $\Delta P/u_m$ deki azalmanın hızdaki ve akışkandaki azalmadan daha hızlı olduğu da ayrıca kaydedilmektedir.

Morini (2004), yaptığı derleme çalışmasında farklı mikro geometrilerdeki tek-fazlı akışkan akışı ve ısı transferini konu alan çalışmaları detaylı bir şekilde incelemiş ve sunmuştur.

Kohl *et al.* (2005), hidrolik çapları 25-100 μm aralığında değişen dikdörtgen kesitli mikrokanallarda hava ve su olmak üzere iki farklı akışkanın akışını deneysel olarak incelemiştir. Kanallar silikonun kimyasal çözündürülmesiyle elde edilmiştir. Basınç ölçümü üzerine kanal girişlerinin etkisini ortadan kaldırmak için, basınç algılayıcılar kanalların içerisine yerleştirilmiştir. Bu yeni ölçüm tekniğiyle elde edilen deneysel verilerin, sıkıştırılabilir ($18,814 > Re > 6,8$) ve sıkıştırılmaz ($2068 > Re > 4,9$) akış durumlarında, geleneksel değerlerle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Sonuçta hem laminer, hem de türbülanslı bölgede sonuçların teori ile uyuştuğu, sapmaların deneysel belirsizlikler aralığında olduğu belirtilmektedir. Tüm deneylerde laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin 2067 değerinden büyük olduğu da belirtilmektedir. Çalışmada,

literatürdeki mevcut çelişkilerin ölçüm cihazları ve yanlış hesaplama tekniklerinden kaynaklandığı vurgulanmıştır.

Hao *et al.* (2005) hidrolik çapı 237 µm olan yamuk silikon kanalda, iyon giderilmiş su kullanarak basınç düşüşü ve hız dağılımını PIV tekniği ile incelemişlerdir. Çalışmada $Re < 1400$ değerleri için giriş etkileri dikkate alındığında, tam gelişmiş Poiseuille sayılarının teori ile uyduğu, laminerden türbülanslı akışa geçişin 1500-1800 Reynolds sayısı aralığında olduğu kaydedilmektedir. Ayrıca bu çalışma için giriş uzunluğunun $L/D = (0.08-0.09) Re$ şeklinde olduğu da belirtilmektedir.

Yine Hao *et al.* (2006) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, pürüzlü ve düz, hidrolik çapı 153-191 µm aralığında değişen kanalda basınç düşüşü incelenmiştir. Pürüzsüz kanal için elde edilen sürtünme katsayılarının teori ile uyduğu, türbülansa geçişin $Re=2100$ de olduğu belirtilmektedir. Pürüzlü kanal için ise sürtünme faktörünün $Re < 900$ değerleri için klasik teori ile uyduğu, ancak $Re > 900$ değerleri için ise teorik değerlerden büyük olduğu belirtilmiştir. Türbülanslı akışın ise 900-1100 Reynolds sayıları aralığında meydana geldiği belirtilmektedir.

Hrnjak *et al.* (2006), tam gelişmiş sıvı ve buhar akışı hidrolik çapları 69,5 mikrondan 304,7 mikrona ve boy oranları 0,09 den 0,24 e değişen dikdörtgen mikro kanallarda araştırmaya odaklanmıştır. R134a sıvı ve buhar test sıvıları olarak kullanılmıştır. Basınç düşüşü verisi laminar bölgede, geçiş bölgesinde ve türbülans bölgesinde sürtünme faktörünü karakterize etmek için kullanılmıştır. Kanal yüzey pürüzlülüğü düşükken, en küçük kanal için bile test edilen hem laminar sürtünme faktörü hem de kritik Reynolds sayısı, geleneksel değerlere yakın bulunmuş dolayısıyla orada dikdörtgen mikro kanallar için Navier-Stokes akım teorisinden sapmaya dair hiçbir işarete rastlanmamıştır. Türbülanslı bölgede sürtünme katsayısı verisi pürüzsüz boru eşitlikleri için tahmin edilenden ve akış boruları için hesaplanarlardan bile daha yüksek çıkmıştır.

Tang *et al.* (2006), literatürdeki sürtünme faktörü ile ilgili deneysel verileri incelemiştir. Nitrojen ve helyum akış karakteristikleri çelik mikroborularda ($D=119-300 \mu\text{m}$), ergimiş silika mikroborularda ($D=50-201 \mu\text{m}$) ve ergimiş kare silika borularda ($D=52-100 \mu\text{m}$) incelenmiş ve ergimiş silika ve ergimiş kare silika mikroborularda geleneksel değerlerle sürtünme faktörünün iyi bir uygunluk gösterdiği fakat paslanmaz çelik borularda sürtünme faktörünün, çelik borulardaki geniş relatif pürüzlülüğünden dolayı daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

Morini *et al.* (2007), çapları $100-300 \mu\text{m}$ ve uzunluk/çap oranları, L/D , 167-5000 arasında değişen mikrotüplerdeki nitrojen akışını deneysel olarak incelemiştir. Sürtünme faktörünün ve laminar-türbülans geçiş Reynolds sayısının kanal uzunluğundan bağımsız şekilde konvansiyonel kanal değere yakınsadığını belirlemiştir.

Valdes *et al.* (2007) 'nin yaptıkları çalışmanın asıl amacı sayısal benzeşim yoluyla annular mikrokanallarda lamine akış üzerine yüzey pürüzlülüğünün etkilerini incelemek ve bu mikrokanallarda akışkan akışının hesaplanması yada benzeşimde yüzey pürüzlülüğünün etkilerini hesaba katmak ve bir metot geliştirmektir. Bu yöntem klasik viskoz akış denklemlerine dayanmaktadır. Eş pürüzsüz bir kanal modellenmesiyle veya bu eş pürüzsüz kanalların akış dirençlerinin hesaplanmasıyla analitik ifadelerden duvar pürüzlülük etkileri hesaba katılmıştır ve bu yaklaşım ıslak yüzey alanlarında ve akış hızında hesaplanan benzer hidrolik çaplarla pürüzsüz bir kanal yapmak için en iyi sonuçları vermiştir. Analitik modellerde, giriş, çıkış yada gelişmekte olan akıştan kaynaklan ikincil kayıpların özellikle $Re \geq 50$ için hesaba katılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Parlak vd. (2007) çalışmalarında mikroboruların fiziksel ve geometrik özelliklerinin basınç düşüşüne ve sürtünme faktörüne olan etkisini aydınlatmak amacıyla kurulan deney tesisatında, çapları $20 \mu\text{m}$ ile $150 \mu\text{m}$ arasında değişen ergimiş silis (FS) ve polimer esaslı malzemedan yapılmış mikroborularla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel olarak bulunan basınç düşüşleri ve sürtünme faktörü makroborularda teorik

sonuçlar ile karşılaştırılarak verilmiştir. Elde edilen deneysel verilere göre, Reynolds sayısının 0 ila 100 olduğu değeri için teoriden sapmaların görüldüğü, 100 ila 1000 olduğu değerleri için geleneksel teoriyle uyum sağladığı ve laminerden türbülanslıya geçişin özellikle polimer borularda erken yaşandığı sonucuna varılmıştır.

Singh *et al.* (2008) dikdörtgen mikrokanallarda farklı boy oranlarının kaynayan su için toplam basınç düşüşü üzerine etkilerini incelemişlerdir. Mikro ısıtıcılar sensörler ve mikro kanallar içeren silikon yüzeye entegre bir sistemde çalışmışlardır. Hidrolik çapı $142 \pm 2 \mu\text{m}$ olan dikdörtgen kanalda çift fazlı akış için basınç düşüş değerleri ölçülmüş ve minimum 1,6 olarak bulunmuştur. Isı ve kütle akış alanları içinde çift fazlı akış için bulunan basınç düşüşü değerleri tek fazlı akış için elde edilenlerden daha düşük çıkmıştır. Sonuçlar geleneksel akış teorisiyle uygunluk göstermiştir.

Yang *et al.* (2010) görselleştirme metodu ile hidrolik çapı $D_h = 2,5, 2,886$ ve $0,886$ mm olan kare yada üçgen, düşey ve dairesel olmayan mikrokanallarda Newton tipi akış olmayan çift fazlı nitrojen akışı üzerine araştırmalar sunmuşlardır. Newton tipi olmayan akışkanlaştırıcı sulu solisyonlar seçilmiştir. Bunlar % 0,4 karboksimetil selüloz (CMC), % 0,2 poliarsilamid (PAM) ve % 0,2 ksantat amonyak (XG) dir. Araştırmalar sonucunda mikrokanalın geometrik faktörlerinin ve hidrolik çapının akış rejim haritasını etkilediği görülmüştür.

Sara vd. (2004) tarafından yapılan literatür derlemelerinde şu sonuçlara varılmıştır:

- Mevcut çalışmalar genel olarak ısı aktarımı ve basınç düşüşü ile ilgilidir. Mikro kanallarda kütle aktarımı ilgili, yazarların bilgisi dahilinde, yayımlanmış çalışmalara rastlanmamıştır.
- Genel olarak hem ısı aktarımı hem basınç düşüşü sonuçları, makro kanallarda olduğu gibi boyutsuz gruplar şeklinde ifade edilmekte ve sonuçlar makro kanal sonuçları ile mukayese edilmektedir.

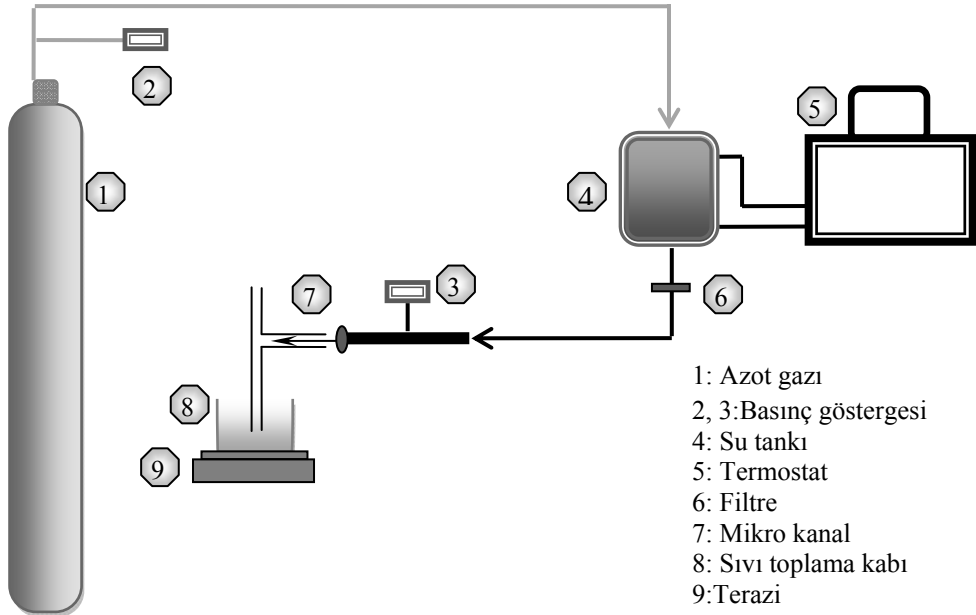
- Tam gelişmiş laminer akış ile karşılaştırıldığında, daha küçük sürtünme katsayıları elde edildiği gibi daha büyük sürtünme katsayılarının elde edildiği çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalarda, uygun sınır koşulları ve önemli parametreler dikkate alındığında, sonuçların makro kanal sonuçları ile uyuştuğunu belirten çalışmalar daha fazladır.
- Gaz akışlarda sürtünme faktörü, laminer tam gelişmiş akış için Knudsen sayısı ile azalmaktadır.
- Sürtünme faktörü, mikro kanalın yapıldığı malzemeye ve yüzey ile akışkan arasındaki etkileşime bağlıdır. Pürüzlülük sürtünme faktörünü etkileyen önemli bir parametredir.
- Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş için 200-900 gibi düşük Reynolds sayıları verilmekle birlikte çalışmaların çoğunda, yüzey ve akışkan özelliklerine, kanalın geometrisine bağlı olarak, kritik Reynolds sayısı için makro kanal sonuçları civarında değerler verilmektedir. Dolayısıyla şu anda daha düşük Reynolds sayılarında türbülanslı akışa geçişin mikro kanalların bir karakteristiği olduğunu söylemek zordur.
- Son zamanlarda yüzey özellikleri ve yüzey ve akışkan etkileşimi ile sürtünme katsayısının azaltılabileceği görüşü ileri sürülmüştür.
- Ayrıca literatürde mikro kanallar ile ilgili yapılmış çalışmaların sonuçları Şara vd. tarafından derleme halinde çizelge 2.4' de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Mikro Kanallarda Tek Fazlı Akışta Isı ve Basınç Düşüşü ile İlgili Çalışmalar, Geometri ve Akış Koşulları (Şara vd. 2004).

Referans	Geometri	D_h (μm)	Re	Akışkan	İncelenen
Wu ve Cheng (2003)	Yamuk	25,9-291,0	12,9-2000	İyon giderilmiş su	F
Pfund vd. (2000)	Pürüzlü dikdörtgen	255,96-1041,45	60-3450	Su	F
Xu vd. (2005)	Üçgen, trapezoid	155	100-2000	İyon giderilmiş su	f, Nu
Choi ve Cho (2001)	Dikdörtgen	6900-2540000	3000-15000	Parafin	f, Nu
Tiselj vd. (2004)	üçgen	160	3,2-64	Su	Nu
Shen vd. (2006)	Dikdörtgen	436,36	162-1257	İyon giderilmiş su	f, Nu
Lee vd. (2005)	Dikdörtgen	318-930	300-3500	İyon giderilmiş su	f, Nu
Mala ve Li (1999)	Dairesel	50-254	300-2500	Su	F
Chen vd. (2004)	Dikdörtgen	57-267	50-850	Metanol	f, Nu
Qu vd. (2000)	Yamuk	62-169	150-1400	Su	Nu
Adams vd. (1998)	Dairesel	760-1090	2600-23000	Su	Nu
Owhaib ve Palm (2004)	Dairesel	800-1700	1000-17000	R-134a	Nu
Qu ve Mudawar (2002)	Dikdörtgen	348,94	139-1672	İyon giderilmiş su	f, Nu
Liu vd. (2004)	Dikdörtgen	74,07-137,93	10-80	İyon giderilmiş su	f, Nu
Harms vd. (1999)	Dikdörtgen	401,27	173-12900	İyon giderilmiş su	f, Nu
Araki vd. (2002)	Üçgen,yamuk	3,93-10,3	0,03-4,19	Helyum,azot	F
Xu vd. (2000)	Dikdörtgen	30-344	20-4000	Su	F
Hegab vd. (2002)	Dikdörtgen	112-210	1280-13000	R-134a	F
Brander vd. (2006)	Dikdörtgen	70-144	-	İyon giderilmiş su	f, Nu
Papautsky vd. (1999)	Dikdörtgen	57,14	5-20	Su	F
Morini vd. (2006)	dairesel	127-762	300-4000	Azot	F
Kohl vd. (2005)	Dikdörtgen	25-100	6,8-2068	Hava,, su	F
Phares ve Smedley (2004)	Dairesel	120-440	-	Su, iyon giderilmiş su, tuz çözeltisi,	F
Sharp ve Adrian (2004)	Dairesel	50-247	20-2900	İyon giderilmiş su, I-propanol,%20gliserin su	F
Hao vd. (2005)	Yamuk	237	50-2800	İyon giderilmiş su	F
Hao vd. (2006)	Dikdörtgen	153-191	250-2500	İyon giderilmiş su	F
Yang vd. (2005)	Farklıaçılarda eğik	167-182	70-1600	Su	F
Hwang vd. (2006)	Dairesel	244-792	100-10000	R-134a	F
Baviere vd. (2006)		370,37-1093,75	200-8000	Su	f, Nu
Yu vd. (1995)	Dairesel	19-102	250-20000	Azot gazı ve su	f, Nu
Peng vd. (1994)	Dikdörtgen	133-367	200-700	Su	F
Kandlikar vd. (2005)	Dikdörtgen	325-1819	200-5700	Su, hava	F
Celata vd. (2002)	Dairesel	130	100-8000	R114	f, Nu
Garimella ve Singhal (2004)	Dikdörtgen	250-1000	588-2202	-	f, Nu
Hsieh vd. (2004a)	Dikdörtgen	80	2,6-90	Azot gazı	F
Hsieh vd. (2004b)	Dikdörtgen	146	50-1000	İyon giderilmiş su,	$f, hız$
Brutin ve Tadrst (2003)	Dairesel	50-530	-	Su, İyon giderilmiş su	F
Gao vd. (2002)	Dikdörtgen	199,20-1923,7	100-8000	İyon giderilmiş su,	f, Nu
Ren vd. (2001)	Dikdörtgen	28,17-80,76	5-55	İyon giderilmiş su	F
Jiang vd. (1995)	Dikdörtgen	0,787-0,797	0,1-1,58	İyon giderilmiş su	F

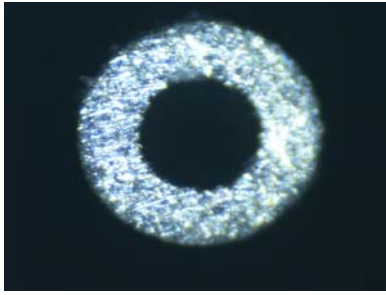
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.1'de şematik olarak verilmiştir. Deney düzeneği genel olarak, basınçlı azot tüpü, basınçölçer, akışkan tankı, filtre, sabit sıcaklık sirkülatörü ve mikroborudan oluşmaktadır. Deneylede 198 µm ve 400 µm çaplarında iki farklı çelik boru kullanılarak farklı Reynolds sayılarında değişik boru boyları için basınç düşüşü ölçümleri yapılmıştır. Akışkan olarak saf su kullanılmıştır. Suyun mikro boruda akışını sağlamak için basınçlı azot gazı kullanılmış ve tüp çıkışına yerleştirilen çift kademeli bir gaz regülatörü yardımı ile gaz basıncı ayarlanarak farklı akış debileri sağlanmıştır. Mikro boru içerisinde oluşabilecek tıkanmaları önlemek amacıyla akışkan tankı çıkışında filtre kullanılmıştır. Akış debisi mikro borudan geçen akışkan kütlesi deney süresince mikro boru çıkışına konulan bir kap içerisinde toplanmış ve hassas terazi yardımıyla tartılarak belirlenmiştir. Akışkan sıcaklığı sabit sıcaklık sirkülatörü yardımı ile $25^{\circ}\text{C}\pm 0.2$ de sabit tutulmuştur.

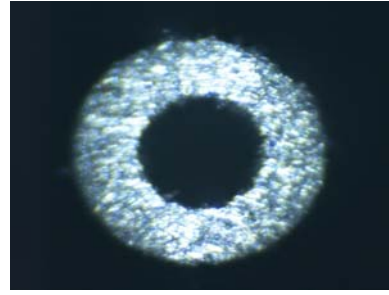


Şekil 3.1. Deney Düzeneği

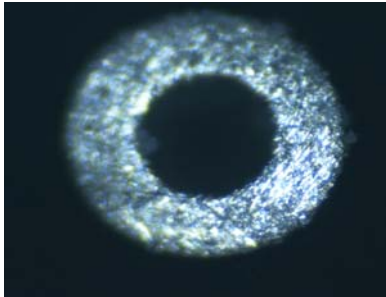
Boruların boyutlarının ölçümü NİKON marka MM 400 L video ölçüm mikroskobu yardımıyla yapıldı. Basınç ölçümleri ise KELLER marka basınç transmitteri yardımıyla yapıldı. Ölçümlerin güvenilirliği için mikroborularda kesitin daralmasını ve zarar görmesini engellemek için kesme işlemi özenle yapıldı ve bağlantı elemanları dikkatle takıldı. Şekil 3.2'de mikro çelik borulara ait kesit fotoğrafları Nikon MM 306 marka mikroskop ile görüntülenmiştir. Fotoğraflarda da görüldüğü gibi mikro boru kesitleri oldukça düzgündür.



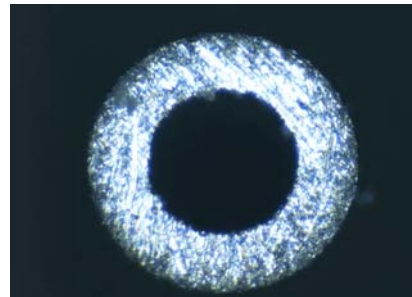
(a). 198 mikron



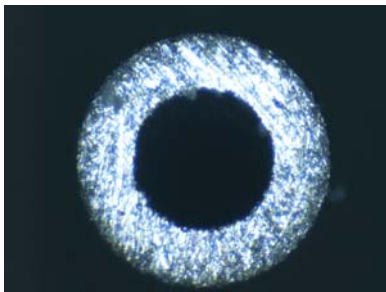
(b). 400 mikron



(c) 250 mikron



(d) 500 mikron



(e) 589 mikron

Şekil 3.2. Kanal Kesitleri

Mikro ölçekli kanallarda basınç proplarının kanala yerleştirilmesi zor olduğundan, kanal giriş ve çıkışındaki, kanala göre çok büyük olan rezervuarlara yerleştirilmektedir. Bu çalışmada da bu yöntem takip edilmiştir. Bundan dolayı ölçülen basınç düşüşü değerleri; giriş, çıkış ve gelişmekte olan akış terimlerinin tümünü içermektedir. Kanaldaki net basınç düşüşü, ölçülen toplam basınç düşüşünden bu etkilerin çıkarılması ile elde edilmiştir.

$$\Delta P_{net} = \Delta P_{top} - \Delta P_m \quad (3.1)$$

Burada ΔP_m giriş, çıkış ve gelişmekte olan akış etkisinden dolayı meydana gelen basınç düşüşünü göstermektedir. Bu çalışmada borunun çıkışı atmosfere açıktır. ΔP_m aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\Delta P_m = (K_i + K_e + K_d) \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (3.2)$$

Burada K_i , K_e ve K_d sırasıyla giriş, çıkış ve gelişmekte olan akış kayıp katsayıları olup, makro kanallar için önerilen yöntem kullanılarak hesaplanabilir (Kandlikae *et al.* 2006; Ludwig *et al.* 1999). $k_d = 1.250$ olarak alınmıştır (Bhatti *et al.* 1987). Reynolds sayısı aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplandı:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (3.3)$$

Burada ρ akışkanın yoğunluğu, μ akışkanın viskozitesi, u ve d akışa ait karakteristik hız ve boru çapıdır. Test bölgesinde ölçülen basınç değerleri aşağıdaki denklem yardımıyla sürtünme faktörüne dönüştürüldü.

$$f = \frac{2\Delta P_{net}}{(L/d)\rho u^2} \quad (3.4)$$

Burada L ve d sırasıyla boru boyu ve çapını göstermektedir. f ve Re çarpımı Poiseuille sayısı olarak adlandırılmaktadır. Pürüzsüz borularda tam gelişmiş laminar akış için akış denkleminin çözümü aşağıdaki sonucu vermektedir:

$$f = \frac{C}{Re} \quad (3.5)$$

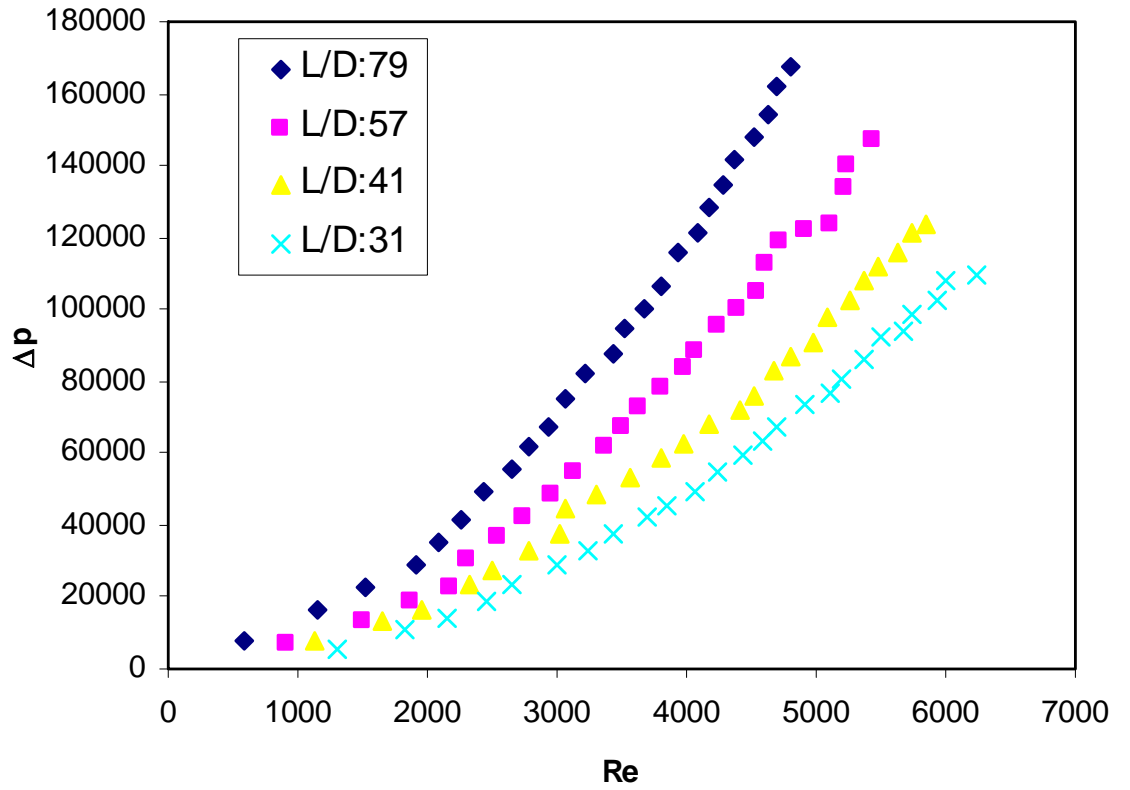
Eşitlikteki C sabiti kanalın geometrisine bağlı ancak akış koşullarından bağımsızdır (Bhatti *et al.* 1987). Dairesel kanal için sabitin değeri 64'dür. Türbülanslı akışta ise sürtünme faktörü (pürüzsüz borular için) Blasius eşitliği ($f = 0.316 Re^{-0.25}$) ile verilmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Deneyleerde 198 μm , 257 μm , 400 μm , 505 μm ve 602 μm çaplarında paslanmaz çelik boru kullanılarak farklı Reynolds sayılarında değişik boru boyları için basınç düşüşü ölçümleri yapılmıştır. Akışkan olarak saf suyun kullanıldığı sistemde suyun mikro boruda akışını sağlamak için basınçlı azot gazı kullanılmış ve tüp çıkışına yerleştirilen çift kademeli bir gaz regülatörü yardımı ile gaz basıncı ayarlanarak farklı akış debileri sağlanmıştır. Her 180 dk bir alınan kütle değerleri yardımıyla debiler hesaplanmış ve elde edilen debi değerleri yardımıyla sırasıyla akış hızı, Reynolds sayıları, basınç düşüşleri ve sürtünme faktörleri bulunmuştur. Mikroborularda meydana gelen giriş, çıkış ve tam gelişmiş akış kayıpları geleneksel kitaplarda bulunan tablolar yardımıyla belirlenmiştir. Hesaplamalarda su yoğunluğu 997 kg/lt, viskozitesi 0,000892 kg/m.s olarak alınmıştır. Deneyleerde kullanılan boru boyları ve akış koşulları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Ayrıca *Re* sayısının basınç düşüşü ve sürtünme faktörü ile değişimi garfikselle olarak gösterilmiştir.

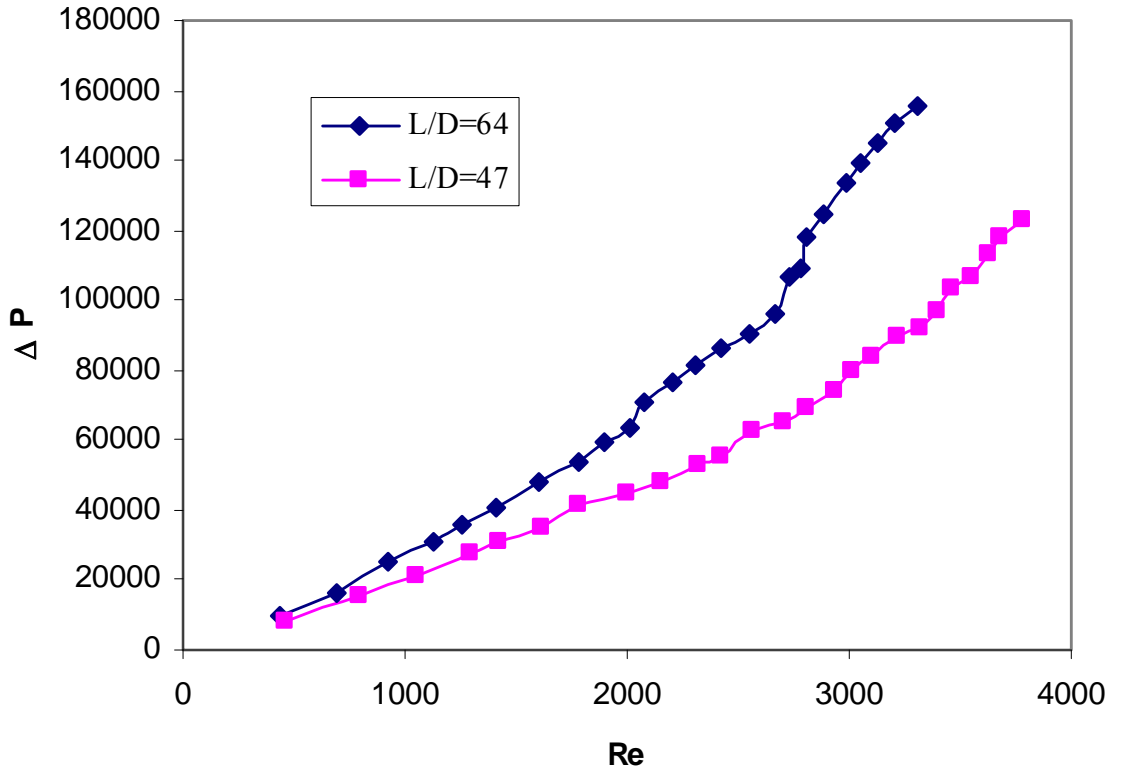
Çizelge 4.1. Kullanılan Boru Boyutları ve *Re* Sayısı Değişimi

Boru	Çap(mm)	L/d	Re
A1	0.198	268	75 - 1478
A2	0.198	216	106 - 1668
A3	0.198	165	159 - 1907
A4	0.198	106	215 - 2395
B1	0,257	64	437-3305
B2	0,257	47	466-3780
C1	0,400	79	587 - 4796
C2	0,400	57	915 - 5432
C3	0,400	41	1128 - 5850
C4	0,400	31	1294 - 6234
D1	0,505	70	918-6544
D2	0,505	46	1603-7390
D3	0,505	31	1651-7827
D4	0,505	18	1888-8875
E1	0,589	66	1283-8005
E2	0,589	47	1693-8662
E3	0,589	33	1999-9400
E4	0,589	16	2512-10461



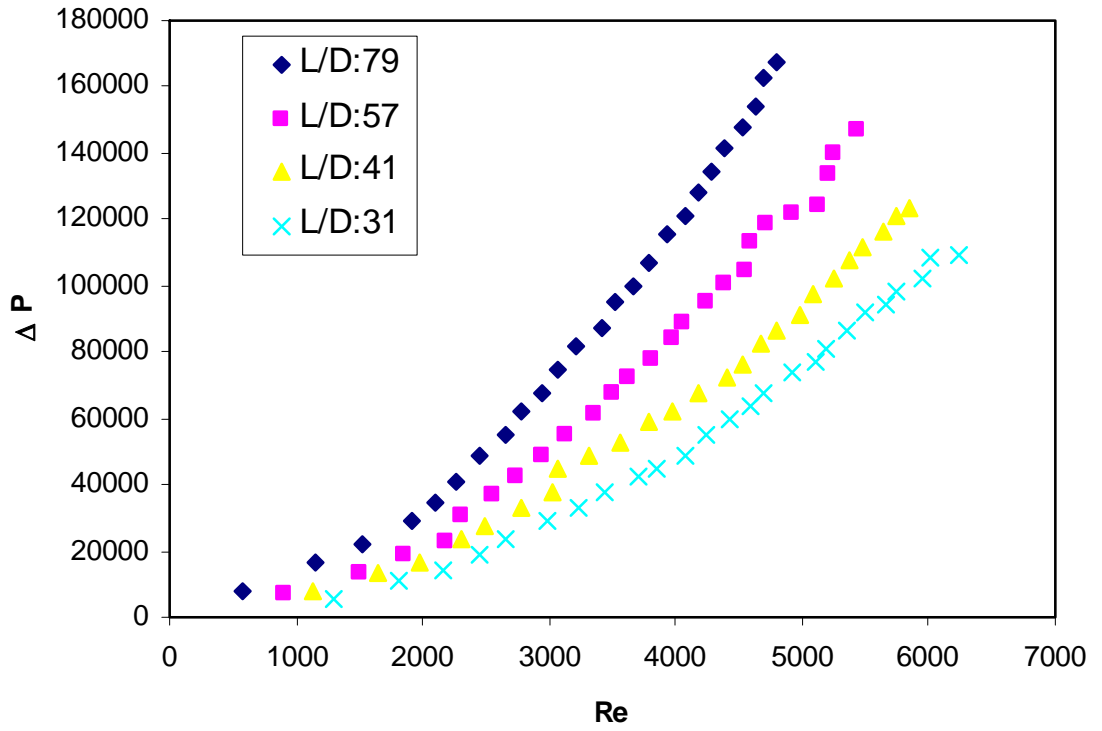
Şekil 4.1. ΔP 'nin Re ile değişimi: $d = 198 \mu m$

198 μm boru için çizilen $Re - \Delta P_{net}$ grafiğinde görüldüğü gibi $Re < 2000$ değerleri için basınç düşüşünün Re ile değişimi lineerdir. Reynolds sayısının üssü 1–1.13 arasında değişmektedir. Bu değerler tam gelişmiş laminar akış için geçerli olan 1 değerine çok yakındır. $L/d = 106$ olan boru için incelen Re sayısı 2400 kadar çıkmaktadır. Bu boru için $Re = 2000$ den sonra lineerlikten sapmanın başladığı görülmektedir.



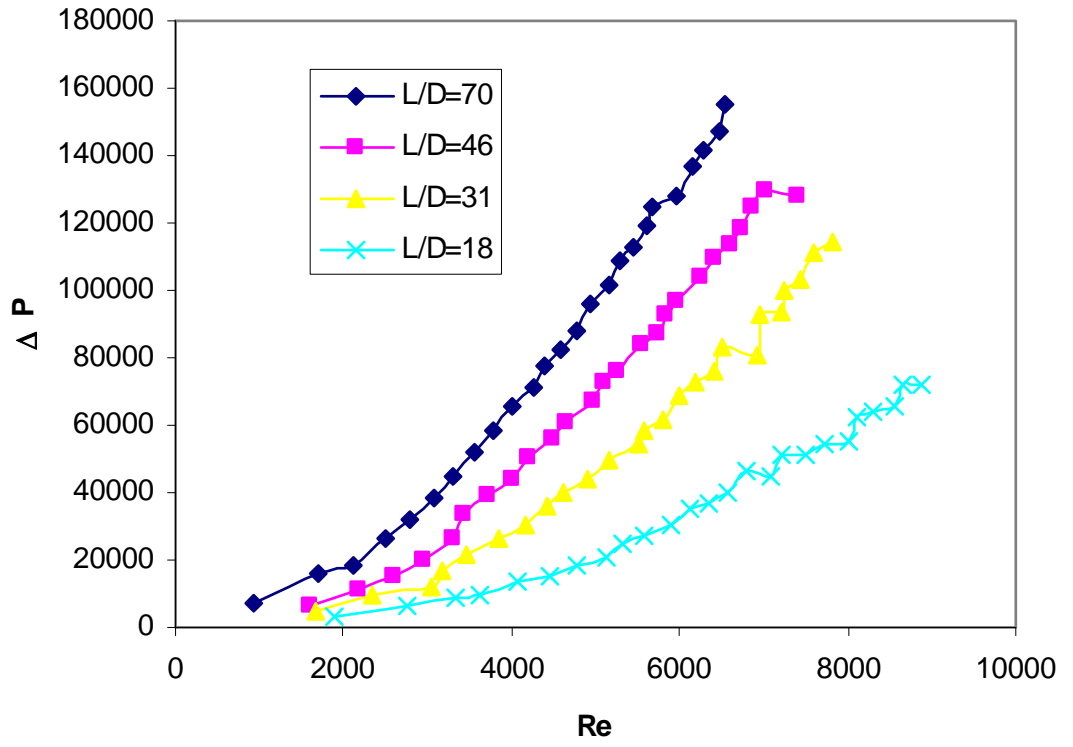
Şekil 4.2. ΔP 'nin Re ile değişimi: $d=257\ \mu m$

$257\ \mu m$ mikroboruda $Re-\Delta P_{net}$ grafiğinde basınç düşüşünün Re ile değişiminin L/D 64 değeri için 2300 değerine kadar lineer olduğu görülür. $L/d=64$ olan mikroboruda $Re=2800$ değerinden sonra lineerlikten sapma görülür. Sonuçlar makro kanallar için verilen sonuçlarla uygunluk göstermektedir. Laminer akıştan türbülansa geçiş 2300-2800 aralığında gerçekleşmektedir.



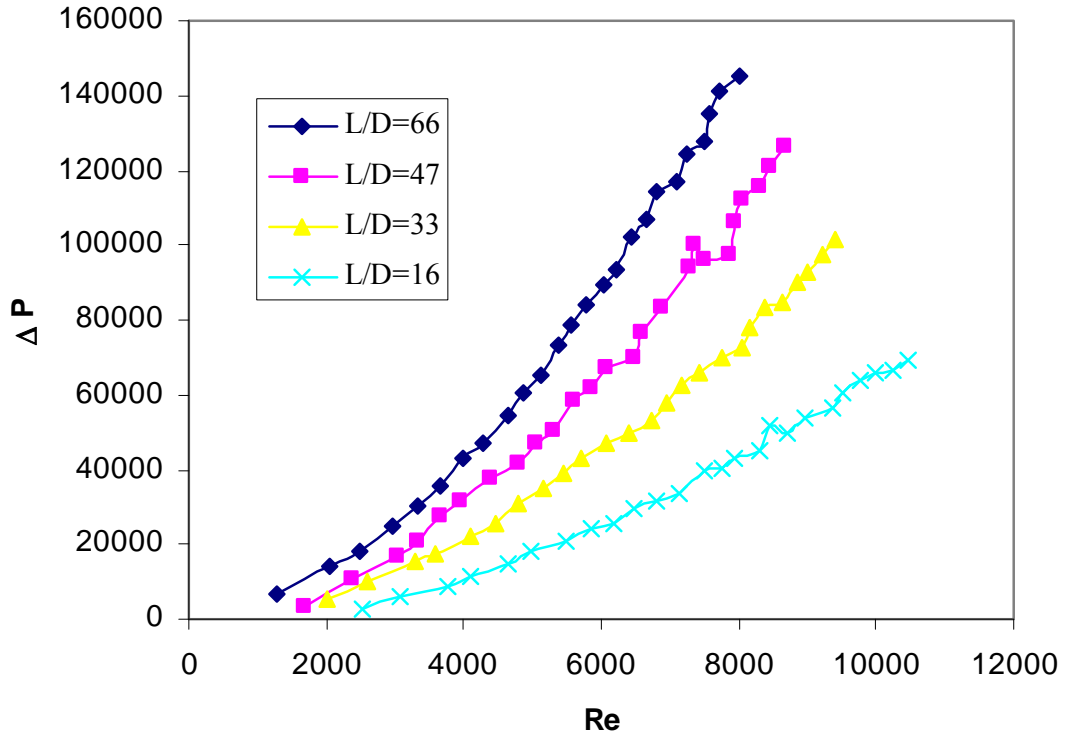
Şekil 4.3. ΔP 'nin Re ile değişimi: $d=400\ \mu m$

Boru çapının $400\ \mu m$ olduğu sistemde ulaşılan Reynolds sayısı $600 - 6200$ aralığındadır. $Re-\Delta P_{net}$ grafiğinde görüldüğü gibi Reynolds sayısının 2000 değerine ulaştıktan sonra $\Delta P - Re$ değişimi lineerlikten sapmaktadır.



Şekil 4.4. ΔP 'nin Re ile değişimi: $d= 505 \mu m$

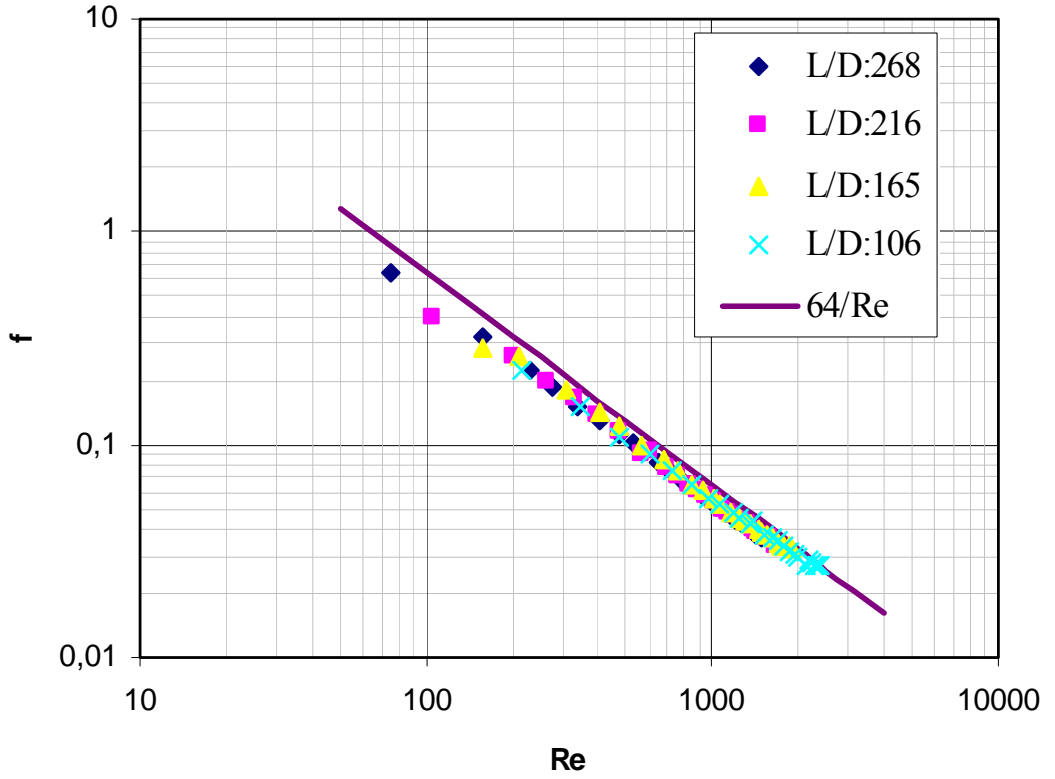
Çapı $505 \mu m$ olan mikroboruda Reynolds sayıları 900 – 8800 aralığında değişmektedir. $Re-\Delta P_{net}$ grafiğinde Reynolds'un 2000 değerinden sonra lineerlikten sapma başlamıştır.



Şekil 4.5. ΔP 'nin Re ile değişimi: $d= 589 \mu m$

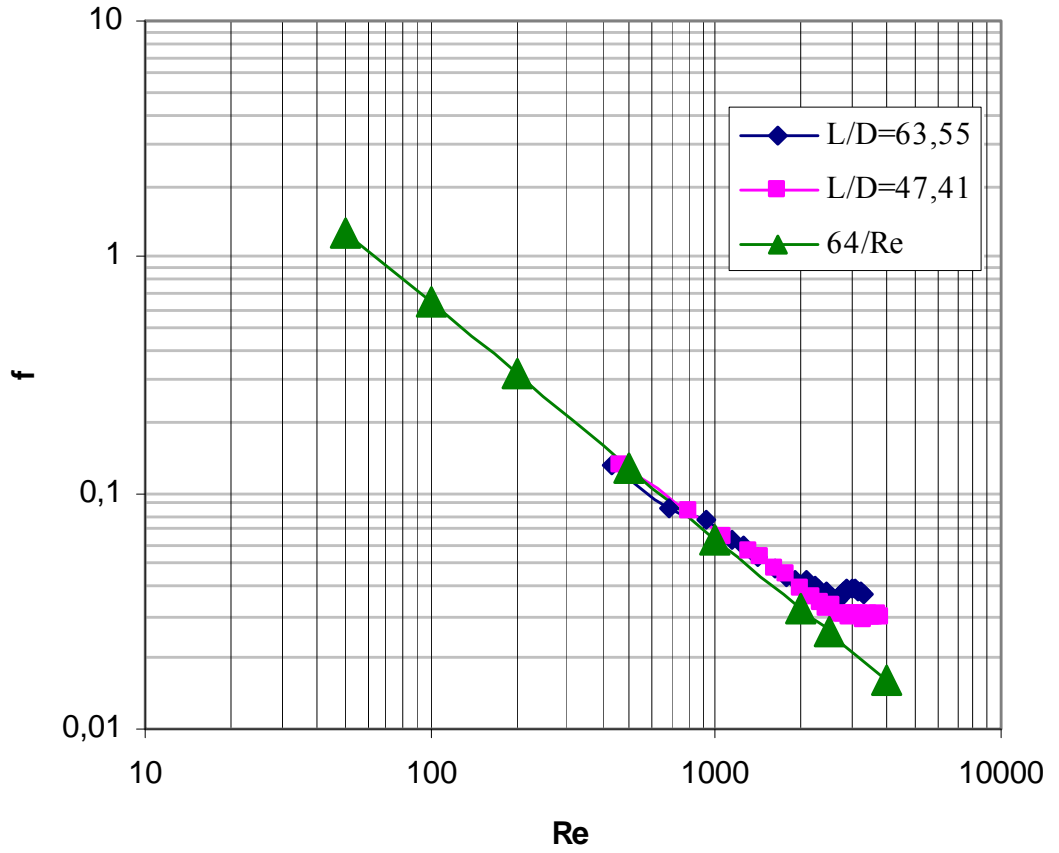
589 μm çapındaki mikroborda Reynolds'un 1200-10000 aralığında çıkmıştır. Aynı şekilde bu test borusu içinde Re sayısının 2000 değerinden sonra sapmalar başlamıştır.

Basınç düşüşü ölçümleri kullanılarak sürtünme faktörüne, f , dönüştürülmüştür. Sürtünme faktörü değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi grafik şeklinde verilmiştir. Grafik üzerinde ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla makro kanallardaki laminar tam gelişmiş akış için geçerli olan $64/Re$ denkleminde ve türbülanslı akış için geçerli olan $(0.316 Re^{-0.25})$ Blasius eşitliğinden hesaplanan değerler de gösterilmiştir.



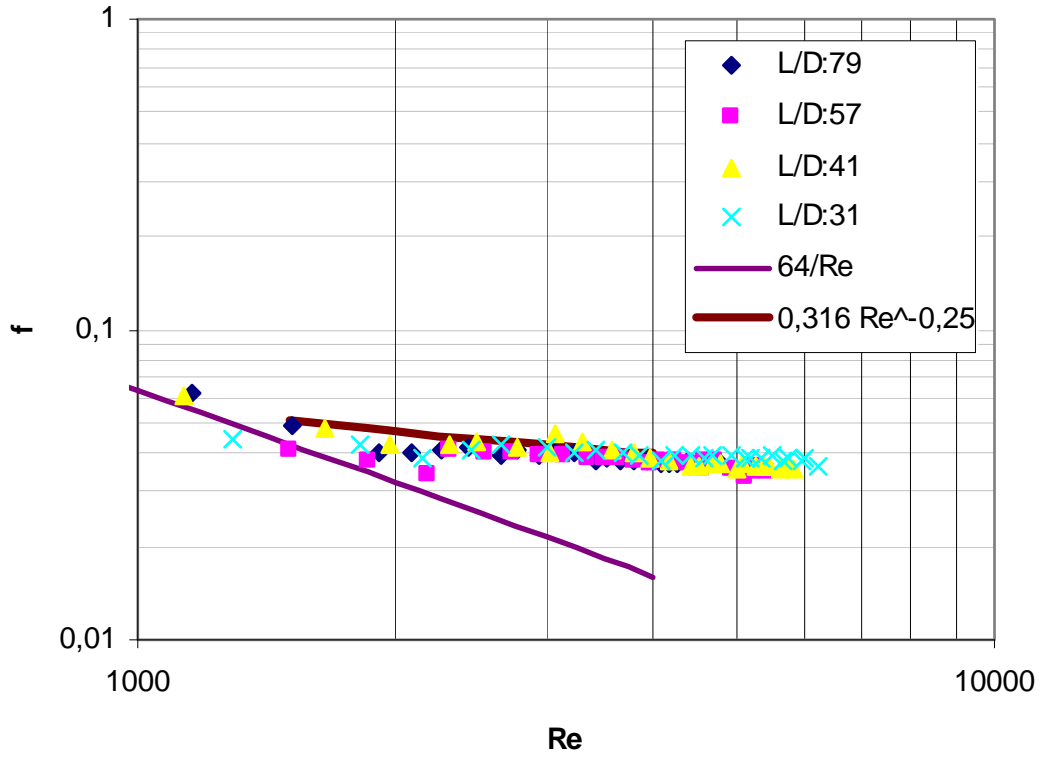
Şekil 4.6. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi: $d= 198 \mu\text{m}$

Şekil 4.6'dan da görüldüğü gibi bu test borusu için, Reynolds sayısı aralığında sürtünme faktörü deneysel sonuçların geleneksel makro kanallar için geçerli olan tam gelişmiş laminer akış için geçerli olan teorik denklemden hesaplanan sonuçlar ile uyduğu akışa geçişin başladığı açıkça görülmektedir. Dairesel makro kanallarda akış için üst sınır çok net olmamakla birlikte pratik uygulamalar için laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş kritik Reynolds sayısı olarak 2300 sayısı kabul edilmekte olup $2300 \leq Re \leq 10^4$ aralığı geçiş bölgesi kabul edilir. İncelen akış ve geometrik koşullarında türbülanslı akışa geçiş Reynolds sayısı ve sürtünme faktörü sonuçlarının makro kanal akış sonuçları ile uyduğu görülmüştür.



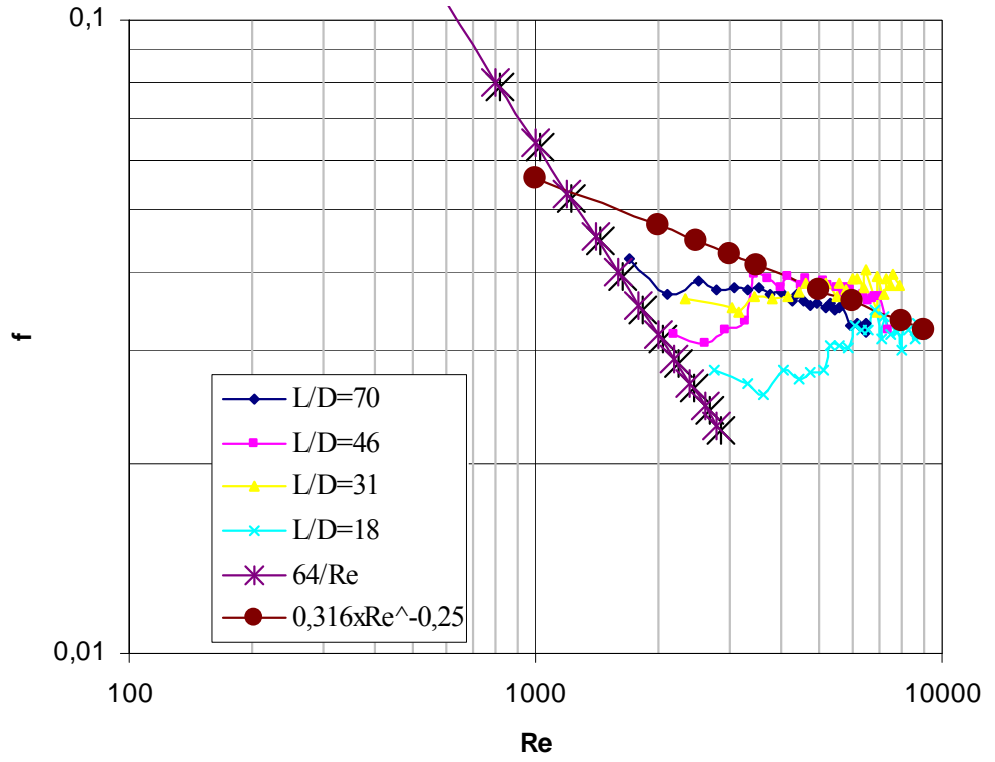
Şekil 4.7. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi: $d= 257 \mu m$

Şekil 4.7’de ki test borusunda görüldüğü gibi Reynolds sayısı 2000-3000 aralığında, geleneksel makro kanallar için geçerli değerlere yakın değerlerde laminardan türbülansa geçiş meydana gelmiş ve tam gelişmiş laminar akış için geçerli olan teorik denklemden hesaplanan sonuçlar ile uyduğu akışa geçişin başladığı görülmektedir.



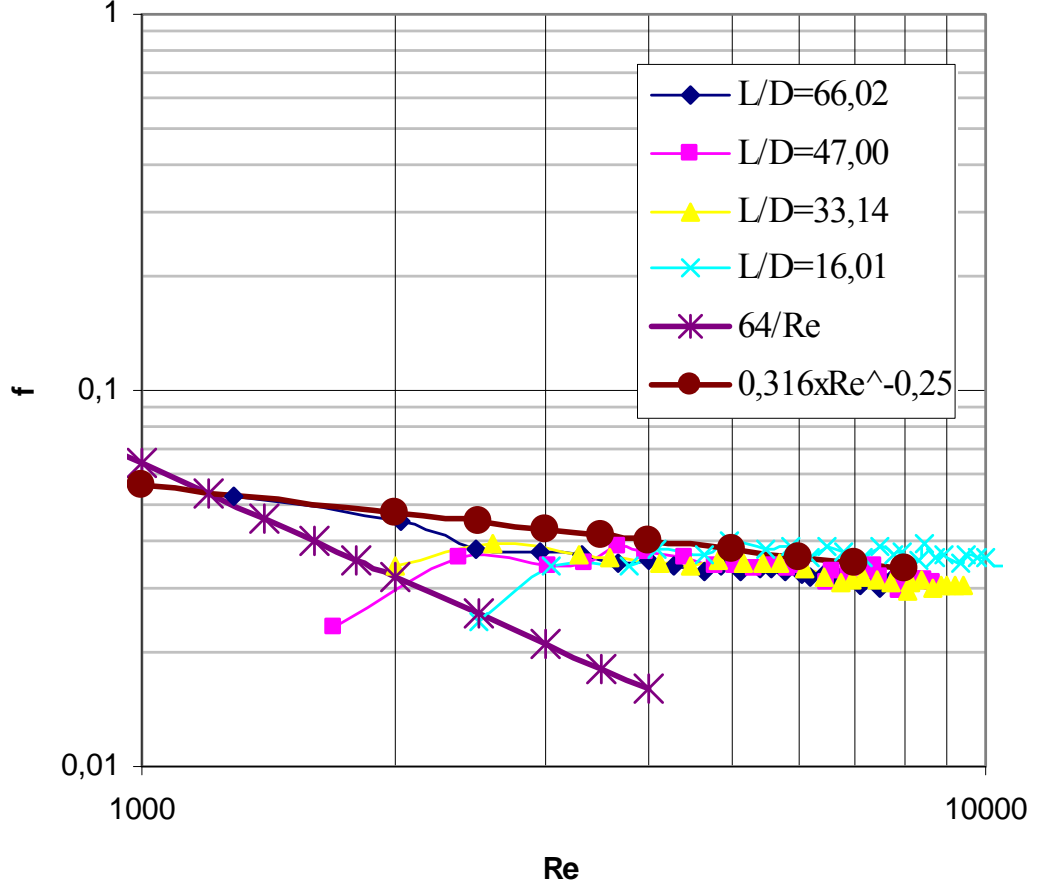
Şekil 4.8. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi: $d = 400 \mu m$

Bu test borusu için sürtünme faktörü değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi geleneksel makro kanallar için geçerli olan tam gelişmiş laminer akış için geçerli olan teorik denklemden hesaplanan sonuçlar ile uyduğu akışa geçişin başladığı açıkça görülmektedir. Grafik üzerinde ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla makro kanallardaki laminer tam gelişmiş akış için geçerli olan $64/Re$ denkleminde ve türbülanslı akış için geçerli olan ($0,316 Re^{-0,25}$) Blasius eşitliğinden hesaplanan değerler de gösterilmiştir. Sonuçların bu denklemlen hesaplanan teorik değerler arasında kaldığı grafikten açıkça görülmektedir.



Şekil 4.9. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi: $d= 505 \mu m$

505 mikron kanal için gibi tam gelişmiş akışa geçiş grafikten çok net görülmektedir. Değerler laminer ve türbülans akış için teorik olarak hesaplanan verilerle uygunluk göstermekte ve sonuçlar makro kanallarla örtüşmektedir.



Şekil 4.10. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi: $d = 589 \mu m$

Şekil 4.10'da verilen 589 mikron test borusunda görüldüğü gibi geleneksel kanal değerleri ile yakın sonuçlar veren geçiş bölgesi ve türbülans akış açıkça gözlemlenmiştir. Reynolds sayısı aralığında sürtünme faktörü deneysel sonuçları geleneksel makro kanallar için tam gelişmiş laminer akış için geçerli olan teorik denklemden hesaplanan sonuçlar ile uyuştugu, akışa geçişin başladığı açıkça görülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada mikro boruların fiziksel ve geometrik özelliklerinin basınç düşüşüne ve sürtünme faktörüne olan etkisini aydınlatmak amacıyla, çapları 198 µm ile 589 µm arasında değişen paslanmaz çelik malzemeden yapılmış mikro borularla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler ile basınç düşüşlerinin boru boyuna ve çapına göre değiştiği bir kez daha gösterilmiştir. Hesaplanan sürtünme faktörü için, aynı geometrik özelliklere sahip kanallarda, boru boyuna ve çapına göre farklı değerler aldığı gözlenmiştir. Elde edilen değerler, verilen sonuçlar genel olarak pratikte pürüzsüz kabul edilebilecek mikroborulara aittir. Literatürde geleneksel teorisinin mikro kanallar için de değiştirilmeden aynen kullanılabilceğini gösteren yeterli delil bulunmamakta ve birbiriyle çelişen çok sayıda çalışmaya rastlanmaktadır.

Tam gelişmiş laminer akış ile karşılaştırıldığında, daha küçük sürtünme katsayıları elde edildiği gibi daha büyük sürtünme katsayılarının elde edildiği çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalarda, uygun sınır koşulları ve önemli parametreler dikkate alındığında, sonuçların makro kanal sonuçları ile uyduğunu belirten çalışmalar da bulunmaktadır.

Dairesel makro kanallarda akış için üst sınır çok net olmamakla birlikte pratik uygulamalar için laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş kritik Reynolds sayısı olarak 2300 sayısı kabul edilmekte olup $2300 \leq Re \leq 10^4$ aralığı geçiş bölgesi kabul edilir. Ancak tek kriter, Reynolds sayısı olmayıp, kanal girişi, kanalın pürüzlülüğü, girişte akışın türbülans şiddeti ve hız dağılımının laminerden türbülansa geçişi ve tam gelişmiş türbülanslı akış koşullarının oluşmasının da önemli olduğu bilinmektedir.

Literatürde mikro kanallarda akış için laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş Reynolds sayıları için 200-900 gibi değerlerin verildiği çalışmalar da mevcuttur. Bunun sebebi olarak yüzey pürüzlülüğü, giriş etkileri, kanal geometrilerindeki ve ölçümlerdeki belirsizlikler gibi faktörler görülmektedir. Diğer taraftan mikro kanallardaki akış

karakteristiklerinin makro kanal sonuçları ile uyuştuğunu bildiren çok sayıda çalışmada bulunmaktadır. Birbiriyle çelişen deneysel veriler nedeniyle geleneksel ya da yeni geliştirilen bağıntıların kullanılıp kullanılmaması hakkında tek bir görüş bulunmamaktadır. Bu çalışma da mikro kanallarda incelenen koşul ve boyutlar aralığında akış karakteristiklerinin makro kanal sonuçlarıyla uyuştuğunu desteklemektedir. İncelenen akış ve geometri koşullarında türbülanslı akışa geçiş Reynolds sayısı ve sürtünme faktörü sonuçlarının makro kanal akış sonuçları ile uyuştuğu görülmüştür.

Öneriler

Bu çalışmada, pratikte yaygın kullanım alanına sahip temel mikrogeometri akışlarının hidrodinamik analizleri sunulmaktadır. İncelenen problemlerin daha gerçekçi sonuçlar vermesi açısından aşağıda verilen önerilerin dikkate alınması faydalı olacaktır.

1. Sürtünme faktörü, mikro kanalın yapıldığı malzemeye ve yüzey ile akışkan arasındaki etkileşime bağlıdır. Pürüzlülük sürtünme faktörünü etkileyen önemli bir parametredir. Mikro ölçeklere inildiğinde pürüzlülük yüksekliğinin boru çapına kıyasla önemli bir hale gelmesi ve laminar akışı etkilemesinden dolayı pürüzlülüğün etkilerinin incelenmesi çalışmaların doğruluğu için büyük fayda sağlayacaktır.
2. Pratikte kullanılan farklı kesit geometrisine sahip (kare, yamuk, vb.) mikrokanal akışları mevcut koşullarda incelenebilir.
3. Yapılan sayısal çalışmaların geçerlilik düzeyi deneysel çalışmalarla desteklenmelidir. Yapılacak deneysel çalışmalar, uygulanan fiziksel ve matematiksel modelin geliştirilmesinde yapılan kabullerin ne derece doğru olduğu hakkında bilgi verecektir.
4. Mevcut literatür ayrıntılı olarak incelendiğinde, mikrosıvı akışı üzerine çok az sayıda çalışmanın yapıldığı görülmüştür. Bu doğrultuda yapılacak kapsamlı bir deneysel

çalışmayla, literatüre mikrosıvı akışını karakterize eden matematiksel ve fiziksel modellerin kazandırılabilceği düşünölmektedir.

5. Mevcut çalışmalar incelendiğinde genel olarak ısı aktarımı ve basınç düşüşü ile ilgili çalışmalara rastlanmıştır. Mikro kanallarda kütle aktarımı ile ilgili yayımlanmış çalışmalara rastlanmamıştır. Bu konuda yapılacak çalışmalar pratik uygulamalar için faydalı olabilir.

6. Literatürde geleneksel makro kanal davranışının mikrokanallar için de değiştirilmeden aynen kullanılabilceğini gösteren yeterli delil bulunmamakta ve birbiriyle çelişen çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu sapmanın muhtemel sebepleri irdelenerek açıklığa kavuşturulması için ilave çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Acosta, R.E., Muller, R.H. and Tobias, W.C., 1985. Transport Processes in Narrow(Capillary) Channels, *AICHE J.*, 31, 3, 473–482.
- Adams, T.M., Abdel-Khalik S.I., Qureshi Z.H., 1998. An Experimental Investigation of Single-Phase Forced Convection in Microchannels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 41, 851-857.
- Araki, T., Soo, K.M., Hiroshi, I. ve Kenjiro, S., 2000. An Experimental Investigation of Gaseous Flow Characteristics in Microchannels, in: G.P. Celata, et al. (Eds.), *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, Begell House, New York,USA, 155–161.
- Araki, T., Kim M.S., Iwai H., Suzuki K., 2002. An Experimental Investigation of Gaseous Flow Characteristics in Microchannels, *Microscale Thermophysical Engineering*, 6, 117-130.
- Arkilic, E.B., Breuer, K. ve Schmidt, M.A., 1994. Gaseous Flow in Microchannels, in: *Application of Microfabrication to Fluid Mechanics*, ASME FED, 197, 57–66.
- Baviere, R., Marinet M.F., 2006. Le Person S., Bias Effect on Heat Transfer Measurments in Microchannel Flows, *Int. J. Heat and MassTransfer*, 49, 3325-2337.
- Brander, J.J, Anurjew E, Bohn l., Hansjosten E., HenningT, Schygulla U., Wenka A., Schubert K., 2006. Concepts and Realization of Microstructutue Heat Exchangers For Enhanced Heat Transfer, *Exp. Thermal and Fluid science*, 30, 801-809.
- Brutin, D., Tadrst L., 2003. Experimental Friction Factor of Liquid Flow in Microtubes, *Physics oh Fluid*, 15, 653-661.
- Celata, G.P., Cumo M., Guglielmi, ZummoG., 2002. Experimental Investigation of Hydraulic and Single-phase Heat Transfer in0.130-mm Capillary Tube, *Microscale Thermophysical Engineering*, 6, 85-97.
- Celata, G.P., Cumo, M., McPhail, S.J., Tesfagabir, L. ve Zummo, G., 2007. Experimental Study on Compressible Flow in Microtubes, *International Journal Heat and Fluid Flow*, 28, 28-36.
- Chen, Y.T., Kang S.W., TuhW.C., Hsiao T.H., 2004 Experimental Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannels, *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 7, 11-16.
- Choi, S.B., Barron, R.F. ve Warrington, R.O., 1991. Fluid Flow and Heat Transfer in Microtubes, in: *Micromechanical Sensors, Actuators and Systems*, ASME DSC, 32 ,123–134.
- Choi , M., Cho K., 2001. Effect of the Aspect Ration of Rectangular Channels on the Heat Transfer and Hydrodynamics of Parafin Slurry Flow, *Int. J. Heat and MassTransfer*, 44, 55-61.
- Erbay, L.B., Inal L. , Öztürk M.M., (2006). Akişkan- Mikroelektromekanik Sistemler, *Mühendis ve Makina*, 556, 13-33.
- Erkek, C., i Ağralıoğlu N., (2002), *Su Kaynakları Mühendisliği Uygulamaları*, 3. baskı, Beta Yayınevi.
- Featherstone, R.E., Nalluri C., 1982. *Civil Engineering Hydraulics, Essential Theory with Worked Examples*, Granada Publishing Limited.

- Gao, P., Person S.L., Marinet M.F., 2002. Scale Effects on Hydrodynamics and Heat Transfer in Two-Dimensional Mini and Microchannels, *Int.J. Thermal Sciences*, 41, 1017- 1027.
- Garimella, S.V, Singhal V., 2004. Single-Phase Flow and Heat Transport and Pumping Considerations in Microchannel Heat Sinks, *HeatTransfer Engineering* 25, 15-25.
- Hao, P.F.,He F., Zhu K.Q., 2005 Flow Characteristics inTrapezoidal Silicon Microchannel, *J . Micromechanics and Microengineering*, 15, 1362-1368.
- Hao, P.F., He F., Zhu K.Q., 2006. Experimental Investigation of Water Flow in Smooth and Rough Microchannel, *J. Micromechanics and Microengineering*, 16, 1397-1402.
- Harms, T.M., Kazmierczak M.J., Gerner F.M, 1999. Developing Convective Heat Transfer in Deep Rectangular Microchannels, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 20, 149-157.
- Hegab, H.E, Bari A., Amel T., 2002. Friction and Convection Studies of R-134a in Microchannels Within the Transition and Turbulent Flow Regimes, *Experimental Heat Transfer*, 15, 124-259.
- Hrnjak, P., Tu X., 2006. Single Phase Pressure Drop in Microchannels, , *International Journal of Heat and Flow* , 28, 2-14.
- Hsieh, S.S., Tsai, H.H., Lin, C.Y., Huang, C.F. ve Chien, C.M., 2004. Gas Flow in a Long Microchannel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47, 3877-3887.
- Hsieh, S.S, Tsai H.H., Lin C.Y., Huang C.F., 2004. Tsai H.H, Liquid Flow in a Micro-Channel, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14, 436-445.
<http://www.micronics.net> 10 temmuz 2010
- Hwang, Y.W., Kim M.S., 2006. The Pressure Drop in Microtubes and the Correlation Development, *Int. J. Heat and MassTransfer*, 49, 1804-1812.
- Jiang, X.N., Zhou Z.Y., Yao J., Li Y., Ye X.Y., 1995. Micro-Fluid Flow in Microchannel, *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eur sensors IX. Stockholm, Sweden.*
- Kandlikar S.G., GrandeW.J., 2003. Evaluations of Microchannel Flow Passages- Thermohdraulic Performance and Fabrication Technology, *HeatTransfer Engineering*, 24, 3-17.
- Kandlikar, S.G., Schmitt D., Carrano A.L., Taylor J. B., 2005. Characterization of Surface Roughness Effects on Pressure Drop In Single-phase Flow İn Minichannels, *Physics of Fluids*, 17, 100606-1-11.
- Kaplan H., Dölen M., 2003. Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) Üretim Teknikleri, 11.Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara.
- Kohl, M.J., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S.M. ve Sadowski, D.L., 2005. An Experimental Investigation of Microchannel Flow with Internal Pressure Measurements. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 1518-1533.
- Lalonde, P., Colin, S. ve Caen R., 2001. Mesure de Debit de Gaz Dans es Microsystemes, *Mec. Ind.*, 2, 355–362.
- Lee, P.S., Garimella S.V., Liu D., 2005. Investigation of Heat Transfer in Rectangular Microchannels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 48, 1688-1704.

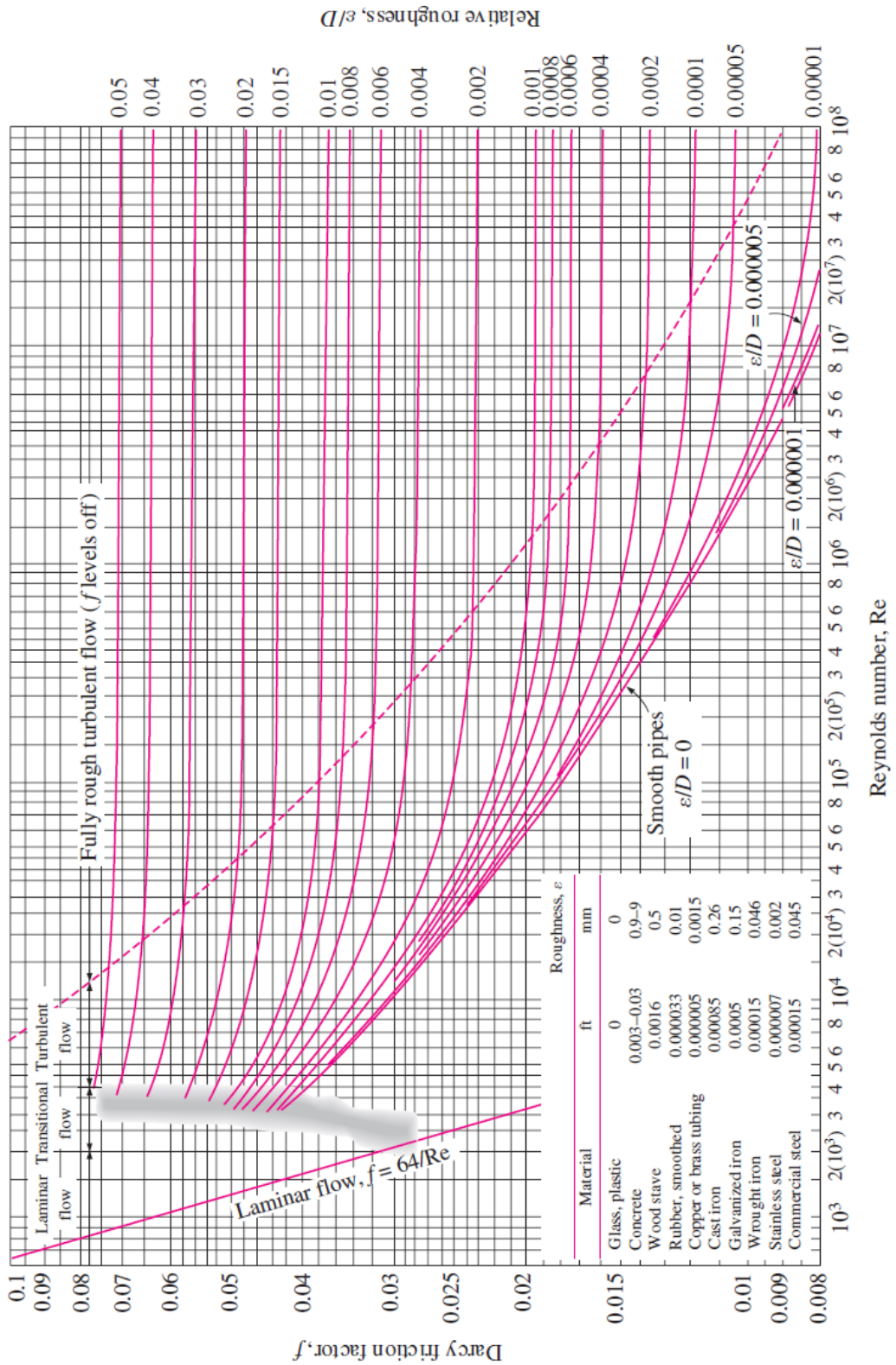
- Lelea D., Nishio S., Takano K., 2004. The Experimental Research on Microtube Heat Transfer and Fluid Flow of Distilled Water, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 47, 2817-2830.
- Li, Z.X., Du, D.X. ve Guo, Z.Y., 2000. Experimental Study on Flow Characteristics of Liquid in Circular Microtubes, in: G.P. Celata, et al. (Eds.), *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, Begell House, New York, USA, 162–168.
- Liu, J., Tai, Y.C. ve Ho, C.M., 1995. MEMS for Pressure Distribution Studies of Gaseous Flows through Uniform Microchannels, in: *Proceedings of 8th Ann. Int. Workshop MEMS*, IEEE, 209–215.
- Liu, C.W., Gau C., Dai B.T., 2004. Design and Fabrication Development of a Micro Flow Heated Channel With Measurements of the Inside Micro-scale Flow and Heat Transfer Process, *Biosensors Bioelectronics*, 20, 91-101.
- Mala, Gh. M., Li D., 1999. Flow Characteristics of Water in Microtubes, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 20, 142-148.
- Morini, G.L., 2004. Single-Phase Convective Heat Transfer in Microchannels: A Review of Experimental Results, *Int. J. Thermal Sci.*, 43, 631–651.
- Morini, G.L., Lorenzini M, Salvigini S., 2006. Friction Characteristics of Compressible Gas Flows In Microtubes, *Exp. Thermal and Fluid science*, 30, 733-744.
- Morini, G.L., Lorenzi, M., Colin, S. ve Geoffroy, S., 2007. Experimental Analysis of Pressure Drop and Laminar to Turbulent Transition for Gas Flows in Smooth Microtubes, *Heat Transfer Eng.*, 28, 670-679.
- Obot N.T., (2002). Toward a Better Understanding of Friction and Heat/mass Transfer in Microchannels-a Literature Review, *Microscale Thermophysical Engineering*, 6, 155-173.
- Owhaib, W., Palm B., 2004. Experimental Investigation of Single- Phase Convective Heat Transfer in Circular Microchannels, *Exp. Thermal and Fluid science*, 28, 105 110.
- Papautsky, I., Brazzle J., Ameel T., Frazier B.A., 1999. Laminar Fluid Behaviour In Microchannels Using Micropolar Fluid Theory, *Sensors and Actuators*, 73, 101-108.
- Park, H., Pak J.J., Son S.Y., Lim G., Song I., 2003. Fabrication of a Microchannel Integrated With Inner Sensor and The Analysis of Its Laminar Flow Characteristics, *Sensors and Actuators*, 103, 317-329,
- Parlak, N., Engin T. ve Özbey A., 2007. Mikroborularda Su Akışının Deneysel Olarak İncelenmesi, *ULIBTK'07 16. Ulusal İsi Bilimi ve Teknigi Kongresi*.
- Peng, X.F., Peterson G.P., Wang B.X., 1994. Frictional Flow Characteristics of Water Flowing Through Rectangular Microchannels, *Experimental Heat transfer*, 7, 249-264.
- Pfalher, J., Harley, J., Bau, H.H. ve Zemel, J.N., 1990a. Liquid Transport in Micron and Submicron Channels, *Sensors Actuators A*, 21–23, 431–434.
- Pfalher, J., Harley, J., Bau, H.H. ve Zemel, J.N., 1990b. Liquid and Gas Transport in Small Channels, *ASME DSC*, 31, 149–157.
- Pfalher, J., Harley, J., Bau, H.H. ve Zemel, J.N., 1991. Gas and Liquid Flow in Small Channels, in: *Micromechanical Sensors, Actuator and Systems*, ASME DSC, 32, 49–60.

- Pfund, D., Rector, D., Shekarriz, A., Popescu, A. ve Welty J., 2000. Pressure Drop Measurements in a Microchannel, *AIChE J.*, 46, 1496–1507.
- Phares, D.J., Smedley G.T., 2004. A Study of Laminar Flow of Polar Liquids Through Circular Microtubes, *Physics of Fluids*, 16, 1267-1272.
- Qu, W., Mala M., Li D., 2000. Pressure-Driven Water Flows in Trapezoidal Silicon Microchannels, *Internat. J. Heat Mass Transfer*, 43, 353-364.
- Qu, W., Mudawar I., 2002. Experimental and Numerical Study of Pressure Drop and Heat Transfer in a Single-phase Microchannel Heat Sink, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 45, 2549-2565.
- Rands, C., Webb B.W, Maynes D., 2006. Characterization of Transition to Turbulence in Microchannels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 49, 2924-2930.
- Ren, L., Qu W., Li D., 2001. Interfacial Electro Kinetic Effect on Liquid Flow in Microchannels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 44, 3125-3134.
- Sharp, K.V., Adrian R.J., 2004. Transition From Laminar to Turbulent Flow in Liquid Filled Microtubes, *Experiments in Fluids*, 36, 741-747.
- Shen, S., Xu J.L., Zhou J.J., Chen Y., 2006. Flow and Heat Transfer in Microchannels With Rough Wall Surface, *Energy Conversion and Management* 47, 1311-1325.
- Shih, J.C., Ho, C.M., Liu, J. ve Tai, Y.C., 1996. Monatomic and Polyatomic Gas Flow Through Uniform Microchannels, *ASME DSC*, 59, 197–203.
- Singh, S.G., Kulkarni A., Duttagupta S.P., Agrawal A., 2008. Impact of Aspect Ratio Flow Boiling of Water in Rectangular Microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 153-160.
- Sobhan, C. B., Garimella S.V, 2001. A Comparative Analysis of Studies on Heat Transfer and Fluid flow in microchannels, *Microscale Thermophysical Engineering*, 5, 293-311.
- Sümer, B., Ünsal İ., Bayazit M., (1985), *Hidrolik*, Birsen Yayınevi.
- Tabelling, P., 2005. *Introduction to Microfluidics*, Oxford, New York, 4-6.
- Taniguchi, N., 1974. "On the Basic Concept of 'Nano-Technology'," *Proc. Intl. Conf. Prod.*, Part II, British Society of Precision Engineering, London.
- Tiselje, I., Hetsroni G., Mavko B., Mosyak A., Pogrebnyak E., Segal Z., 2004. Effect of Axial Conduction on the Heat Transfer in Micro-Channels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 47, 2551-2565.
- Turner, S.E., Sun, H., Faghri, M. ve Gregory, O.J., 2001. Compressible Gas Flow Through Smooth and Rough Microchannels, in: *Proceedings of IMECE 2001*, New York- USA, HTD-24145.
- URL-2, www.bilgiekonomisi.googlepages.com/mekatronik.pdf, 10 Ekim 2007.
- Wu, P. ve Little, W.A., 1983. Measurement of Friction Factors for the Flow of Gases in Very Fine Channels Used for Microminiature Joule–Thompson Refrigerators, *Cryogenics*, 23, 273–277.
- White, F. M., 2004. *Akışkanlar Mekaniği*, Bölüm 1, Rhode Island Üniversitesi, 43p, USA
- Wu, H.Y., Cheng P., 2003. Friction Factors in Smooth Trapezoidal Silicon Microchannels With Different Aspect Ratios, *Internat. J. Heat Mass Transfer*, 46, 2519-2525.
- Xu, B, Ooi K.T, Wong N.T., 2000. Experimental Investigation of Flow Friction for Liquid Flow in Microchannels, *Int. Comm..Heat and Mass Transfer*, 27, 1165-1176.

- Xu, J.L., Gan Y.H., Zhang D.C., Li X.H., 2005. Microscale Heat Transfer Enhancement Using Thermal Boundary Layer Redeveloping Concept, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 48, 1662-1674.
- Yang, C.Y., Chien, H.T., Lu, S.R. ve Shyu, R.J., 2000. Friction Characteristics of Water, R134a and Air in Small Tubes, in: G.P. Celata, et al. (Eds.), *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, Begell House, New York, USA, 168–174.
- Yang, W., Zhang J., Cheng H., 2005. The Study of Flow Characteristics Of Curved Microchannel, *Applied Thermal Engineering*, 25, 1894-1907.
- Yu, D., Warrington, R.O., Barron, R. ve Ameel, T., 1995. An Experimental and Theoretical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microtubes, in: *Proceedings of ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conf.*, Maui-HI, 523–530.

EKLER

EK-1 Sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı eğrileri



ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Erzurum ‘ da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimimi aynı ilde tamamladı. 2003 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’nden, 2007 yılında, Kimya Mühendisi ünvanıyla mezun oldu. Aynı yıl, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Temel İşlemler ve Termodinamik Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisansa başladı.