

**DAİRESEL VE DİK DÖRTGEN MİKRO  
KANALLARDA BASINÇ DÜŞÜŞÜ VE  
KÜTLE TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

**Özgecan BARLAY ERGÜ**

**Doktora Tezi  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı  
Prof. Dr. Osman Nuri ŞARA  
2011  
Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**DAİRESEL VE DİKDÖRTGEN MİKRO KANALLARDA BASINÇ  
DÜŞÜŞÜ VE KÜTLE TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

Özgecan BARLAY ERGÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM  
2011  
Her hakkı saklıdır



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

DAİRESEL VE DİKDÖRTGEN MİKRO KANALLARDA BASINÇ DÜŞÜŞÜ VE  
KÜTLE TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

Prof. Dr. Osman Nuri ŞARA danışmanlığında, Özgecan BARLAY ERGÜ tarafından hazırlanan bu çalışma 16/06/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından. Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr.Metin GÜRÜ

İmza :

Üye : Prof.Dr.Mehmet YILMAZ

İmza :

Üye : Prof.Dr.Osman Nuri ŞARA

İmza :

Üye : Prof.Dr.Sinan YAPICI

İmza :

Üye : Doç.Dr.Özkan KÜÇÜK

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum  
Enstitü Müdürü

Prof.Dr.Ömer AKBULUT

Bu çalışma TÜBİTAK-MAG ve Atatürk Üniversitesi (BAP) projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: (106M304) ve (2005/12)

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Doktora Tezi

### DAİRESEL VE DİKDÖRTGEN MİKRO KANALLARDA BASINÇ DÜŞÜŞÜ VE KÜTLE TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

Özgecan BARLAY ERGÜ

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ŞARA

Minimalleşen sistemlerin, pek çok alanda doğan yeni ihtiyaçlar sebebi ile uygulama alanları bulunmaktadır. Literatürde ısı aktarım prosesleri üzerine pek çok çalışma bulunurken kütle aktarım prosesleri hakkında sınırlı sayıda çalışma vardır ve araştırılması gereken bir konudur. Bu sebeple, bu çalışmada dairesel ve dikdörtgen mikro kanallarda basınç düşüşü ve kütle transferi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma laminar akış şartlarında gerçekleştirilmiştir. İki farklı geometride yapılan çalışmada dairesel mikro boruların hidrolik çapları 0,2 mm ve L/d oranları 100-500 arasındadır. Dikdörtgen mikro kanalların ise yükseklik/genişlik oranları 0,09-0,03 aralığında ve boyları yaklaşık 4 cm'dir. 5-1 500 arasında değişen Reynolds sayılarında çalışılmıştır. Sürtünme faktörü geleneksel Poiseuille akış teorisi ile uyumlu çıkmıştır. Sherwood sayısı ise dairesel mikro borularda geleneksel teoriye göre daha düşük, dikdörtgen mikro kanallarda geleneksel teori ile yaklaşık olarak aynı elde edilmiştir.

**2011, 106 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Dairesel mikro kanal, dikdörtgen mikro kanal, noktasal elektrotlar, sürtünme faktörü, basınç düşüşü, konveksiyonla kütle transferi, konveksiyonla ısı transferi.

## ABSTRACT

Ph.D.Thesis

### INVESTIGATION OF PRESSURE DROP AND MASS TRANSFER ON CIRCULAR AND RECTANGULAR MICROCHANNELS

Özgecan BARLAY ERGÜ

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

Supervisor: Prof. Dr.Osman Nuri ŞARA

Minimized systems have found widespread application due to the requirements in different domains. In literature while there are lots of work about heat transfer, there are just few work about mass transfer and it is a topic that needs to be investigated. Therefore, in this study, an investigation was carried out for the pressure drop, friction factor and mass transfer in micro channels having circular and rectangular cross-sections. The work has been performed in laminar flow conditions. The hydraulic diameter was 0.2 mm, and L/d ratio range was 100 to 500 for circular cross-section. The height/wideness ratios of rectangular micro channels were between 0.09-0.03 respectively, and the length was 4 cm. Reynolds number was in the range of 5-1 500 range. Outcome of the work for friction factor has been in complicity with Poiseuille flow theory. On the other hand, Sherwood numbers for circular cross section were found to be lower, for rectangular cross section, they were found to be in agreement with classical theory.

**2011, 106 pages**

**Keyword:** Circular microchannel, rectangular microchannel, local electrodes, friction factor, pressure drop, convective mass transfer, convective heat transfer.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında engin bilgi ve deneyimleri ile bana yardımcı olan başta tez hocam Sayın Prof. Dr. Osman Nuri ŞARA olmak üzere, değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Sinan YAPICI, ve Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Emin ARZUTUĞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Yine çalışmalarımızın yürütmesinde her aşamada desteklerini esirgemeyen Sayın Nigar ARSLAN, Ufuk BİLGİÇ, Hikmet ŞENGÜL, Selçuk DİLER ve Arş. Gör. Eda KELEŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, lisans ve yüksek lisans eğitimlerinde beni yetiştiren ve doktora eğitimim süresince desteğini hissettiren hocam Sayın Prof. Dr. Metin GÜRÜ olmak üzere tüm Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği öğretim üyelerine şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmanın büyük kısmı TÜBİTAK-MAG (106M304) tarafından ve bir kısmı da Atatürk Üniversitesi (2005/12) tarafından desteklendiğinden bu projelere de teşekkür ederim.

Son olarak tüm çalışma boyunca sonsuz sabır ve yardımları ile hep arkamda olan değerli eşim Çağatay ERGÜ'ye, moral takviyesinde bulunup beni sürekli destekleyen kıymetli anne ve babam Derya-Emin BARLAY'a ve en önemlisi bana sürekli enerji veren oğlum Çağan ERGÜ'ye sonsuz minnetlerimi sunarım.

Özgecan BARLAY ERGÜ

Mayıs 2011

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2.KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>4</b>
2.1.Makro Sistem Korelasyonları.....	7
2.1.1.Sürtünme faktörü .....	7
2.1.2.Isı / kütle transferi.....	10
2.2.Mikro Sistemlerde Kütle Transferi.....	12
2.3.Basınç Düşüşü ve Sürtünme Faktörü .....	13
2.4.Mikro Skalada Akış Sonuçlarını Etkileyen Faktörler .....	20
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>23</b>
3.1.Deney Sistemi.....	23
3.2.Kütle Transferi Ölçüm Tekniği .....	37
3.3.Sürtünme Faktörünün Hesaplanması .....	42
3.3.1.Dairesel mikro borular içerisinde akış.....	43
3.3.2.Dikdörtgen mikro kanallar içerisinde akış .....	45
3.4.Ölçüm Belirsizliği .....	46
<b>4.ARAŞTIRMA ve BULGULAR.....</b>	<b>49</b>
4.1.Basınç Düşüşü ve Sürtünme Faktörü .....	49
4.1.1.Dairesel mikro borularda akışta basınç düşüşü ve sürtünme faktörü .....	49
4.1.2.Dikdörtgen mikro kanallarda akışta basınç düşüşü ve sürtünme faktörü.....	57
4.2.Kütle Transferi.....	62
4.2.1.Dairesel mikro borularda kütle transferi.....	64
4.2.2. Dikdörtgen mikro kanallarda kütle transferi .....	75
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>98</b>

KAYNAKLAR .....	101
ÖZGEÇMİŞ .....	107



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alan
$C_f$	Fanning Sürtünme Katsayısı
C	Kanal Geometrisine Bağlı Sabit
C	Konsantrasyon
$C_0$	Celsius Derece
d	Deneysel Boru Çapı
$D_{AB}$	Kütle Yayılım Katsayısı
$d\phi/dx$	Potansiyel Dağılımı
$dc/dx$	Konsantrasyon Dağılımı
Gz	Greatz Sayısı
F	Faraday Sabiti
f	Darcy–Weisbach Sürtünme Faktörü
H	Derinlik
I	Akım
k	Kütle Transfer Katsayısı
$K_i$	Giriş Kayıp Katsayıları
$K_e$	Çıkış Kayıp Katsayıları
$K_\infty$	Asimptotikal Basınç Düşüşü
L	Uzunluk
N	Molar Akı
Nu	Nusselt Sayısı
n	Elektron Sayısı
Pr	Prandtl Sayısı
$r^2$	Korelasyonun Doğruluk Oranı
R	İdeal Gaz Sabiti
Re	Reynolds Sayısı
Sc	Schmidt Sayısı
Sh	Ortalama Sherwood Sayısı
$Sh_x$	Yerel Sherwood Sayısı

$r$	Kanal Yarıçapı
$T$	Sıcaklık
$u$	Hız
$u_{x_i}$	$x_i$ Değerinin Belirsizliği
$u_R$	R Değerinin Belirsizliği
$\Delta P$	Basınç Farkı
$V$	Volt
$z$	Reaksiyon İyonlarının Valans Yüğü
$W$	Genişlik
$x$	Mesafe
$q$	Elektron Yüğü
$\tau$	Duvar Gerilme Enerjisinin
$\mu$	Viskozite
$\delta$	Kalınlık
$\rho$	Yoğunluk
$\alpha$	Yükseklik/Genişlik Oranı

#### Kısaltmalar

MEMS	Mikro Elektromekanik Sistemler
MOEMS	Mikro Optoelektromekanik Sistemler
MAS	Mikro Akış Sistemleri

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Değişik uygulamalar için çalışılan boru çapları .....	5
Şekil 2.2. Dairesel boruda sınır tabaka gelişimleri .....	8
Şekil 2.3. Üç tip mikro borunun kesit alanı .....	21
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi .....	24
Şekil 3.2. Deney düzeneği fotoğrafı .....	25
Şekil 3.3. Dairesel mikro borular için test alanı şematik gösterimi .....	26
Şekil 3.4. Dikdörtgen mikro kanallar için test alanı şematik gösterimi .....	27
Şekil 3.5. Dairesel mikro borular için test alanı fotoğrafları .....	27
Şekil 3.6. Dikdörtgen mikro kanallar için test alanı fotoğrafı .....	28
Şekil 3.7. Nikon MM 400 L markalı video ölçüm özelliği bulunan mikroskop .....	30
Şekil 3.8. Mikro boruların kesit alan görüntüleri .....	31
Şekil 3.9. Mikro kanalların optik mikroskop ile çekilen görüntüsü .....	33
Şekil 3.10. Noktasal elektrotların optik mikroskop ile çekilen görüntüsü .....	34
Şekil 3.11. Boşalma karakteristiği .....	38
Şekil 4.1. Dairesel mikro borular için $\Delta P$ -Re grafikleri .....	52
Şekil 4.2. Dairesel mikro borular için $\Delta P/L$ -Re grafiği .....	53
Şekil 4.3. Dairesel mikro borular için f-Re grafiği .....	56
Şekil 4.4. Dikdörtgen mikro kanallar için $\Delta P$ -Re grafikleri .....	59
Şekil 4.5. Tüm dikdörtgen mikro kanallar için net $\Delta P/L$ -Re grafiği .....	59
Şekil 4.6. Dikdörtgen mikro kanallar için f-Re grafiği .....	61
Şekil 4.7. Kütle transferi çalışmaları için sınırlayıcı akım .....	63
Şekil 4.8. Dairesel mikro borular için k-Re grafikleri .....	67
Şekil 4.9. Dairesel mikro borular için Sh-Re grafikleri .....	73
Şekil 4.10. Dairesel mikro borularda Sh-L/d grafikleri .....	74
Şekil 4.11. AA dikdörtgen mikro kanalı k-Re grafikleri .....	80
Şekil 4.12. BB dikdörtgen mikro kanalı k-Re grafikleri .....	84
Şekil 4.13. CC dikdörtgen mikro kanalı k-Re grafikleri .....	88
Şekil 4.14. AA dikdörtgen mikro kanalında Sh-x grafiği .....	89
Şekil 4.15. BB dikdörtgen mikro kanalında Sh-x grafiği .....	90

<b>Şekil 4.16.</b> CC dikdörtgen mikro kanalında Sh-x grafiği .....	90
<b>Şekil 4.17.</b> AA dikdörtgen mikro kanalı karşılaştırmalı Sh grafikleri .....	93
<b>Şekil 4.18.</b> BB dikdörtgen mikro kanalı karşılaştırmalı Sh grafikleri .....	95
<b>Şekil 4.19.</b> CC dikdörtgen mikro kanalı karşılaştırmalı Sh grafikleri .....	97

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1.</b> Hidrolik çaplarına göre mikro kanal sınıflandırmaları .....	7
<b>Çizelge 3.2.</b> Deneyleerde kullanılan dairesel mikro boru boyutları .....	29
<b>Çizelge 3.3.</b> Deneyleerde kullanılan dikdörtgen mikro kanal boyutları.....	29
<b>Çizelge 3.4.</b> Ölçüm belirsizliği değerleri .....	48
<b>Çizelge 4.1.</b> Laminer akışta gelişmekte olan akış için ısı/kütle transferi korelasyonları	70

## 1. GİRİŞ

Akış sistemleri proseslerin dolaşım sistemidir. Biyolojik sistemlerde, ısı ve kütle transferinin damarlarda gerçekleşmesine benzer şekilde; ısı değiştiriciler, nükleer reaktörler, destilasyon veya hava ayırma üniteleri gibi sistemlerde de, ısı ve kütle transferi akış sistemleri içerisinde gerçekleşir.

Son yıllarda, teknolojik ürünlerde hafiflik, az yer kaplama, kolay taşınabilme gibi ihtiyaçlar ortaya çıkmıştır. Bu sebeple üreticiler ürünlerin boyutlarını küçültülmesine önem vermektedir. Bu duruma paralel olarak proseslerde de boyut küçültme ile hız ve performansın artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde madde ve enerji tasarrufunun yanı sıra performans artışı, daha yüksek ısı ve kütle aktarımı sağlamaktadır.

Sanayide kullanılan sistemlerin boyutlarının küçülmesi sonucunda, küçük boyutlu ve yüksek performanslı elektronik parçalardan, büyük miktarda ısıyı belirli bir hızda uzaklaştırmak gerekmektedir. Yüksek ısı akılarında çalışmak için de özel ve yüksek performanslı küçük boyutta cihazların yapımı gittikçe önem kazanmakta olduğundan, mikro ölçekli sistemlere olan ilgi önemli derecede artmıştır (Kandlikar 2003).

Ancak; makro sistemlerde olduğu gibi, mikro sistemlerde çalışılırken taşınım problemlerinin çözülmesi için, basınç düşüşü, sürtünme faktörü, ısı ve kütle transfer katsayıları gibi bilinmesi gereken temel verilerin tespit edilmesi önem arz etmektedir.

Bu noktada makro kanallar için oluşturulan taşınım eşitliklerinin mikro kanallar için geçerli olup olmadığı, taşınım olaylarının boyut küçülmesinden etkilenip etkilenmediği, eğer etkilendiyse nasıl değiştikleri soruları bilimsel açıdan incelenecek yeni bir alan oluşturmuştur.

Örneğin makro ölçekte genellikle ihmal edilen, inter moleküler kuvvetlerin sebep olduğu yüzey kuvvetleri, mikro ölçekte viskoziteyi değiştirerek akışa önemli etkilerde bulunabilir ya da boyut küçülmesinden kaynaklanan ve akış koşullarını etkileyen daha birçok parametre oluşabilir.

Mikro kanal alanındaki araştırmalar, ilk olarak Tuckerman ve Pease (1981)'in çalışmaları ile yaklaşık otuz yıl önce başlayarak hızla ilerlemiştir. Günümüzde mikro kanallar ile ısıtma sistemleri, mikro pompalar ve valflar gibi pek çok mikro sistem geliştirmek mümkündür. Karakteristik boyutları 1µm ile 1mm arasında değişen mikro-aygıtlar biyo-medikal malzemelerden mürekkep püskürtmeli yazıcılara kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Pek çok cihazın merkezlerinde, mikron boyutlarında; silindirik, trapezoidal, dikdörtgen gibi çeşitli geometrilere bir veya birden çok mikro kanal bulunmaktadır. (Morini *etal.* 2006).

Mikro kanallarda akış esnasında basınç düşüşü ve sürtünme katsayısının değişimi ve ısı transferi hakkında literatürde pek çok çalışma bulunmakla birlikte, kütle transferi hakkında yapılmış çalışma sayısı sınırlıdır.

Çalışmanın amacı dairesel mikro borularda ve dikdörtgen mikro kanallarda akış şartlarını inceleyerek öncelikle bu mikro sistemlerdeki basınç düşüşü ve sürtünme faktörünü gözlemlemek, ardından kütle transfer katsayısını ve Sherwood sayısını belirleyebilmektir.

Çalışmada öncelikle hidrolik çapları yaklaşık 0,2 mm ve boyları yaklaşık 2-10 cm olan dairesel nikel mikro boruların ve genişliği yaklaşık 1, 2 ve 4 mm derinliği yaklaşık 100 µm ve boyları yaklaşık 4 cm olan dikdörtgen mikro kanallarda, çalışma çözeltisi olarak damıtık su kullanılarak basınç düşüşü ve sürtünme faktörü karakteristikleri incelenmiştir.

Daha sonra dairesel mikro borular ve dikdörtgen mikro kanallar için elektrokimyasal sınırlayıcı akım tekniği kullanılarak kütle transfer katsayısı ve Sherwood sayısı

belirlenmiştir. Çalışma çözeltisi olarak elektrokimyasal bir çözelti kullanılmıştır. Çalışma sırasında Reynolds sayısı dairesel mikro borularda 10-1 500, dikdörtgen mikro kanallarda ise 5-1 100 arasında değiştirilmiştir.



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

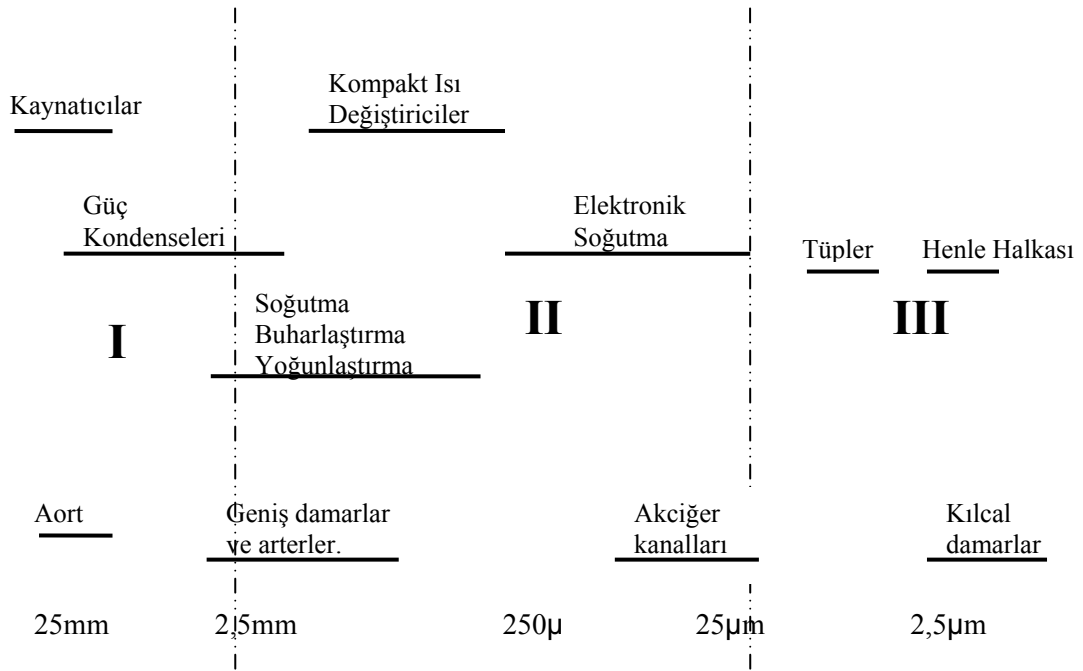
Mikro boyuttaki mekanik uygulamalar son yıllarda hem bilimsel çalışmalarda hem de sanayi uygulamalarında tercih edilmektedir. Akış teknolojisinde mikro sistemlerin kullanılmasının, küçük hacimde büyük yüzey alanı oluşturarak, kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi ile daha çok ürün elde etmek için daha küçük alanda çalışma imkânı yaratmak gibi pek çok avantajı vardır.

Mikro sistemlerdeki teknolojik gelişmelere paralel olarak, bu sistemlerde meydana gelen ısı ve kütle aktarımı karakteristiklerinin incelenmesi gerekmiş ve bu konudaki çalışmalar ön plana çıkarak ve çalışmaların sayıları giderek artmıştır. Mikro kanallarda ısı ve kütle aktarımı önemli bir ilgi alanı olmuştur.

1970'lerin sonlarından beri mikro sistemler hakkında çalışmalar yapılmış olup. Özellikle mikro sistemler için ısı transferi, basınç düşüşü ve sürtünme faktörünün belirlenebilmesi gibi araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda mikro sistemler için elde edilen sonuçlar hakkında korelasyonlar elde edilmeye çalışılmış, bu korelasyonların geleneksel kanallar için var olan korelasyonlarla örtüşüp örtüşmediği tespit edilmeye çalışılmıştır.

Akış sistemi küçüldükçe, yığın akışta ısı ve kütle transferi için bazı geleneksel teorilerin yeniden gözden geçirilebileceği düşünülmüştür. Bazı temel sebeplerden makro sistemler için kullanılan geleneksel teorilerin mikro kanallara uygulanıp uygulanamayacağı tartışılmaktadır.

Makro sistemler için geliştirilmiş olan temel proseslerde bir değişim olup olmayacağı, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen makro sistemlerde kullanılan empirik formüllerin mikro sistemlerde de kullanılıp kullanılamayacağı tartışılmaktadır. Ayrıca mikro skalada geometrik çaplar ve operasyon parametreleri gibi deneysel araştırmalarla araştırılması gereken belirsizlikler mevcuttur.



**Şekil 2.1.** Değişik uygulamalar için çalışılan boru çapları (Kandlikar *etal.* 2003)

Kandlikar *etal.* (2003) farklı mikro sistemler için ifade ettikleri değişik hidrolik çaplar Şekil 2.1’de görülmektedir. Geleneksel sistemlerde farklı prosesler için farklı boru çapları tercih edilmektedir, mikro sistemler de aynı şekilde düşünülmektedir. Mikro bir sistem olarak değerlendirilebilecek ısı değiştiricilerde en yüksek verim için kanal çapı birkaç milimetre civarında tutulmaktadır. Otomotiv, havacılık, uzay sistemleri uygulamalarında ya da hava sıvılaştırılması, ve ayırma prosesleri gibi çok büyük verim gerektiren uygulamalarda dizayn şartların göre çaplar belirlenir. Ayrıca ciğerlerde, böbreklerde, beyindeki gibi biyolojik kütle transfer uygulamalarında kanallar ancak mikrometre ölçüsünde hidrolik çapa sahiptir (Kandlikar *etal.* 2003).

Proseslerin hızları çapa göre değişen yüzey alanına bağlıdır. Silindirik borularda yüzey alanı çapın karesi ile değişir. Bu nedenle borunun yüzey alanı ile hacimsel hız arasında ters orantı vardır ve çap arttıkça hacimsel hız azalır, çap azaldıkça ise artar. Hacimsel

hız başta Reynolds sayısının belirlenmesi gibi pek çok parametrede etkili olduğundan dolayı çap da bütün parametreleri doğrudan etkilemektedir.

Mikro sistemler; mikro elektromekanik sistemler (MEMS), mikro optoelektromekanik sistemler (MOEMS) ve mikro akış sistemleri (MAS) olmak üzere üç bölümde incelenebilir (Morini 2004).

Morini (2004) mikro kanallar üzerine yapmış olduğu derlemede, MAS'ın mikro kanalının geometrisinin üretildiği teknolojiye bağlı olduğunu ve mikro kanalların üretimde yaygın olarak kullanılan proseslerin aşağıdaki gibi verilebileceğini belirtmektedir.

- Mikro mekanik teknikler (elmas makineleri, lazer prosesleri, vb.).
- X-ray mikro mekaniği.
- Fotolitografik temelli prosesler (kimyasallarla aşındırmak).
- Yüzey ve yüzeye yakın noktaların mikro mekaniği.

MAS'ın mikro kanalın içerisinde akışın sağlanmasının iki yolu vardır.

- İlk olarak, dışarıdan bir basınç farkı uygulanarak basınç ile hareket sağlanabilir. Bu durumda kanalın içerisinde bir Poiseulle akış profili oluşturulur. Kanalın küçük hidrolik çapı nedeniyle Reynolds sayısının küçük olmasından dolayı akış laminerdir ve hız kanalın giriş kesit alanı ile değişir.

- İkinci olarak da dışarıdan bir elektrik alanı uygulanabilir (Elektrokinetik ile akış).

Kandlikar *etal.* (2003) bir çalışmasında mikro kanal boyutları Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Buna göre; 10  $\mu\text{m}$ 'den 200  $\mu\text{m}$ 'ye kadar olan kanalların mikro kanal, 200  $\mu\text{m}$ 'den 3 mm'ye kadar olan kanallar mini kanal ve de hidrolik çapları 3 mm'den büyük olan kanallar ise geleneksel kanallar olarak tanımlanmıştır.

**Çizelge 2.1.** Hidrolik çaplarına göre mikro kanal sınıflandırmaları (Kandlikar *etal.* (2003))

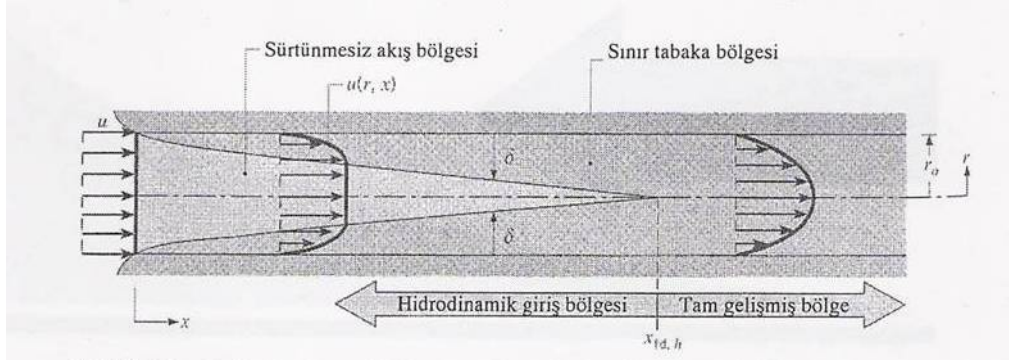
KANAL TİPİ	HİDROLİK ÇAPLAR
Geleneksel Kanallar	$d > 3 \text{ mm}$
Mini Kanallar	$3 \text{ mm} > d > 200 \text{ } \mu\text{m}$
Mikro Kanallar	$200 \text{ } \mu\text{m} > d > 10 \text{ } \mu\text{m}$
Geçiş Kanalları	$10 \text{ } \mu\text{m} > d > 0,1 \text{ } \mu\text{m}$
Geçiş Mikro Kanalları	$10 \text{ } \mu\text{m} > d > 1 \text{ } \mu\text{m}$
Geçiş Nano Kanalları	$1 \text{ } \mu\text{m} > d > 0,1 \text{ } \mu\text{m}$
Moleküler Nano Kanallar	$0,1 \text{ } \mu\text{m} > d$

## 2.1. Makro Sistem Korelasyonları

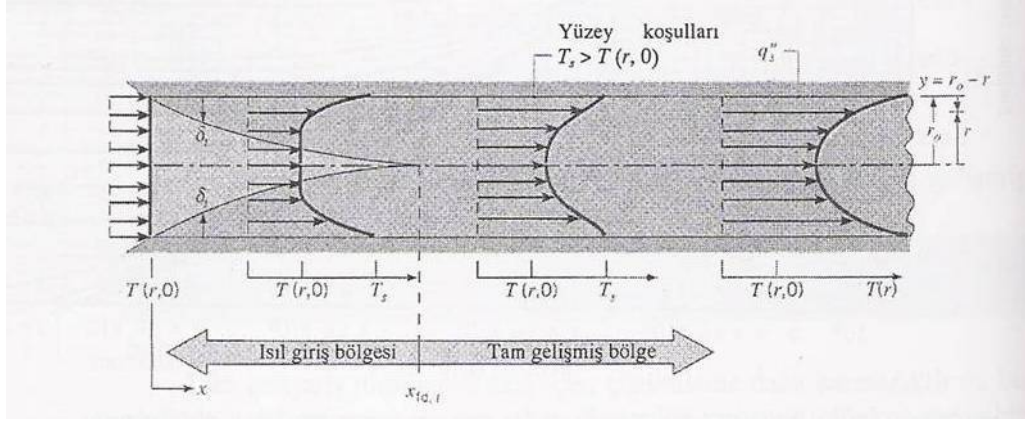
Bu bölümde çalışmada kullanılan ve geleneksel teori olarak adlandırılan makro sistem korelasyonları hakkında kısa bilgiler verilecektir.

### 2.1.1. Sürtünme faktörü

Şekil 2.2’de dairesel boruda sınır tabaka gelişimleri görülmektedir. Dairesel boruda laminer hidrodinamik sınır tabaka gelişimi Şekil 2.2. a’da, ısıtılmış dairesel boruda ısıl sınır tabaka gelişimi Şekil 2.2. b’de verilmektedir. Isı transferi ile kütle transferi arasındaki benzerlik sebebiyle boru içerisinde akışta kütle transferinin sınır tabaka değişimi de aynı ısı transferinde olduğu gibidir (Incropera ve Dewitt 2001). Laminer akışta hidrodinamik giriş uzunluğu  $L_{hd}/d=0,05Re$  şeklinde verilmektedir.



(a) Dairesel boruda laminar hidrodinamik sınır tabaka gelişimi



(b) Isıtılmış dairesel boruda ısı sınır tabaka gelişimi

**Şekil 2.2.** Dairesel boruda sınır tabaka gelişimleri (Incropera ve Dewitt 2001)

Akış özellikleri genellikle sürtünme katsayısı ile ifade edilir. En yaygın olarak kullanılan sürtünme katsayısı, duvar gerilme enerjisinin birim hacimdeki akış enerjisinin oranı olarak ifade edilen ve Eşitlik 2.1’de verilen Fanning sürtünme katsayısıdır (Lin 2007).

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{\rho u_m^2}{2}} \quad (2.1)$$

Diğer taraftan sürtünme faktörü Darcy–Weisbach gösterimine göre Eşitlik 2.2’deki gibi ifade edilir (Incropera ve Dewitt 2001).

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{d}\right) \frac{1}{2} \rho u^2} \quad (2.2)$$

Tam gelişmiş akışta Hagen-Poiseuille Kanunu, sürtünme katsayısını Eşitlik 2.3'deki gibi açıklar (Lin 2007).

$$f = \frac{C}{\text{Re}} \quad (2.3)$$

Burada Re Reynolds sayısı, C ise kanal geometrisine bağlı olan sabittir. C dairesel borularda akış için, Hagen-Poiseuille Kanunu'na göre 16, Darcy-Weisbach Kanunu'na göre 64'tür (Lin 2007).

Dikdörtgen kanallarda laminer tam gelişmiş akış için C sabiti yükseklik/genişlik ( $\alpha$ ) oranına bağlı olarak değişmekte ve Eşitlik 2.4'te görüldüğü şekilde ifade edilmektedir (Sahah and Sekulic 1978).

$$C = 96(1 - 1,3553\alpha + 1,9467\alpha^2 - 1,7012\alpha^3 + 0,9564\alpha^4) \quad (2.4)$$

Türbülent tam gelişmiş akış için sürtünme faktörü hesaplanırken yaygın olarak kullanılan eşitlikler Eşitlik 2.5-2.7'de verilmiştir (Incropera ve Dewitt 2001).

$$f = 0,316 \text{Re}_D^{-1/4} \quad \text{Re}_D \leq 2 \cdot 10^4 \quad (2.5)$$

$$f = 0,184 \text{Re}_D^{-1/5} \quad \text{Re}_D \geq 2 \cdot 10^4 \quad (2.6)$$

$$f = (0,790 \ln \text{Re}_D - 1,64)^{-2} \quad 3000 \leq \text{Re}_D \leq 5 \cdot 10^6 \quad (2.7)$$

### 2.1.2 Isı / kütle transferi

Dairesel borularda laminer akış problemi teorik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar taşınım katsayılarını hesaplamak için kullanılabilir. Laminer, tam gelişmiş koşullarda yüzeyde sabit ısı akısı ve sabit yüzey sıcaklığı sınır koşulları için Nusselt sayısı sabit olup sırasıyla 4,36 ve 3,66 değerlerine eşittir. Farklı kesitlerdeki borularda tam gelişmiş laminer akışta Nusselt sayıları kaynaklarda bulunabilir (Incropera ve Dewitt 2001). Dikdörtgen kanallarda bu değerler kanal yükseklik-genişlik oranına göre değişmektedir. Isıl laminer tam gelişmiş akış koşulu  $L_{td}/d=0,05RePr$  şeklinde verilmektedir. Giriş bölgesi için genel olarak Nusselt sayıları Gzatz sayısının ( $Gz=(d/x)RePr$ ) fonksiyonu olarak verilir. Farklı eşitlikler olmakla birlikte yaygın kullanılan eşitlik Eşitlik 2.8'de verilmiştir.

$$\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,668(d/L)Re_D Pr}{1 + 0,04[(d/L)Re_D Pr]^{2/3}} \quad (2.8)$$

Bileşik giriş uzunluğu problemi için Eşitlik 2.9'da verilen Sieder ve Tate eşitliği kullanılmaktadır.

$$\overline{Nu}_D = 1,86 \left( \frac{Re_D Pr}{L/d} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.10, Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.12'de ısı transferi tam gelişmiş türbülent akış için Nusselt sayısının hesaplanmasında kullanılan korelasyonlar görülmektedir. Benzeşim nedeniyle ısı transferinde kullanılan Nusselt sayısının yerini kütle transferinde Sherwood sayısı almaktadır. Yani ısı transferinde ısı transfer katsayısı Nusselt sayısına çevrilerek boyutsuzlaştırılırken, kütle transferinde kütle transferinin Nusselt sayısı olarak bilinen Sherwood sayısı kullanılır. Yine ısı transferinde momentum ve ısı yayılım katsayılarının oranı olan Prandtl sayısı kullanılırken, kütle transferinde onun yerine momentum ve kütle yayılım katsayılarının oranı olan Schmidt sayısı kullanılır.

$$Nu_D = 0,23 Re^{4/5} Pr^n \quad 0,6 \leq Pr \leq 160, Re_D \geq 10\ 000, (L/d) \geq 10, \quad (2.10)$$

$T_s > T_m$  için  $n=0,4$  ve  $T_s < T_m$  için  $n=0,3$

$$Nu_D = 0,27 Re^{4/5} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad 0,7 \leq Pr \leq 16\ 700, Re_D \geq 10\ 000, (L/d) \geq 10 \quad (2.11)$$

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad 0,5 \leq Pr \leq 2000, 3000 \leq Re_D \leq 5 \cdot 10^6, (L/d) \geq 10 \quad (2.12)$$

Sherwood sayısı Eşitlik 2.13'de, Schmidt sayısı ise Eşitlik 2.14'te görülmektedir (Incropera ve Dewitt 2001).

$$Sh = \frac{k * L}{D_{AB}} \quad (2.13)$$

Eşitlik 2.13'te  $k$  kütle transfer katsayısı,  $L$  karakteristik uzunluk,  $D_{AB}$  ise çalışma sıvısının kütle yayılım katsayısıdır. Sherwood sayısının fiziksel anlamı, konveksiyonla kütle transfer katsayısının difüzyonla kütle transfer katsayısına oranıdır. Eşitlik 2.14'te  $v$  momentum,  $D_{AB}$  ise kütle yayılım katsayısıdır (Incropera and Dewitt 2001).

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} \quad (2.14)$$



## 2.2. Mikro Sistemlerde Kütle Transferi

Acosta *etal.* (1985) tarafından yapılan çalışmada dikdörtgen mikro kanalda kütle aktarımı elektro-kimyasal yöntem kullanılarak incelenmiştir. Kanal yükseklikleri 0,2-0,5 mm ve Reynolds sayısı 1 300-22 000 aralığında olan bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında, makro kanal eşitliklerinin mikro kanal için de kullanılabileceği belirtilmektedir.

Literatürde ayrıca mikro kanallarda kütle transferi çalışmalarının arasında mikro reaktörlerle yapılan çalışmalar da vardır. Mikro reaktörler sıvı/sıvı proseslerinde yüzey alanı/hacim oranında oldukça iyi bir azalma sağladıkları için ilginç konuları oluşturmaktadırlar.

Bunlardan biri de Walter *etal.* (2005) çalışmasıdır. Çalışmada duvarları katalizörle kaplı bir mikro kanal reaktörü incelenmiştir. Çalışma; katalizör kalınlığı ve sıcaklık parametrelerinin değişimi ile kinetik özellikler üzerinde kütle transferi sınırlamalarını incelenmesini konu almıştır. Teorik olarak yapılan çalışmanın sonucunda, klasik sabit yatak reaktörleri ile mikro kanal reaktörleri karşılaştırıldığında, kütle transferi sınırlandırmalarının farklı olduğu görülmüştür.

Mikro reaktörlerle yapılan ve mikro kanallarda kütle transferini ele alan çalışmalardan biri de Adeosun *etal.* (2005) yaptığı çalışmadır. Bu çalışmada da mikro reaktörlerdeki kütle transferi değişimleri kinetik açıdan incelemektedir. Teorik olarak yapılan çalışmada; en iyi karıştırma performansı için optimum reaktör geometrisi saptanmaya çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda kalınlık 50 µm, derinlik ise 500 µm olarak bulunmuştur.

Xu *etal.* (2008) yaptıkları çalışmada, bir sıvı fazından diğerine mikrometre boyutundaki damlalarla kütle transferi gerçekleştirilmiştir. İki fazın incelendiği çalışma, ara yüzeyde bulunan ve oldukça büyük olan reaksiyon alanının değerlendirilmesi açısından ilginç bir

çalışmadır. Kütle transferi konsantrasyon farkları ölçülerek belirlenmiştir. Ortalama damla çapına ve kütle transferine göre akış hızı grafikleri incelenmiştir.

Raimondi *etal.* (2008), çalışmalarında 50–960  $\mu\text{m}$  derinliğinde dikdörtgen mikro kanallardan sıvı sıvı akışında kütle transferini ölçmüşlerdir. Damla tekniğini kullanmış olup kütle transfer katsayısı, konsantrasyon farkı ile belirlenmiştir.

Shen *etal.* (2006) 300  $\mu\text{m}$  eninde ve 800  $\mu\text{m}$  derinliğinde dikdörtgen kanallarda ısı transferi üzerinde çalışmış ve 162 ila 1 257 aralığında Reynolds sayıları elde etmişlerdir. Çalışma sonuçlarının literatürle deneysel hatalar ve fabrikasyon metotları nedeniyle uyuşmadığını belirtmişlerdir. Mikro kanalların pürüzlülüğü, fiziksel parametrelerin sıcaklığa bağlı olması, fiziksel yüzey etkileri gibi pek çok faktör deneysel sonuçları etkilemektedir. Mikro ölçekte akışı ve dolayısıyla ısı ile kütle transferini etkileyen asıl faktörler hala çok kesin olarak belli olmadığını belirtmişlerdir.

Yue *etal.* (2007) hidrolik çapı 667  $\mu\text{m}$  olan bir hidrolik kanaldan gaz-sıvı karışımı geçirerek iki faz arasındaki kütle transferini incelemişlerdir. Sistemde  $\text{CO}_2$  absorplanmış ve absorplanan miktar konsantrasyon ölçümü ile belirlenmiştir. Çalışmada ölçülen kütle transferi ve basınç düşüşü değerlerinin literatürle uyumlu çıktığını tespit etmişlerdir.

Phillips and Federov (2004), polimer kaplı kimyasal sensörlerde kütle transferini incelemişlerdir. Çalışma koşullarına ve dizayn konfigürasyonlarına göre oldukça küçük değerlerde kütle transferi gözlemlenmiştir.

### **2.3. Basınç Düşüşü ve Sürtünme Faktörü**

Mikro kanal çalışmalarında, 1980'lerin başından beri en ilgi gören araştırma konularından biri de sürtünme faktörü araştırmalarıdır. Sürtünme faktörünün geleneksel kanallarda bulunan değerlerden küçük, büyük ya da eşit olup olmasına ilişkin farklı sonuçlar bulunmaktadır.

Bu konuya ilişkin literatürdeki ilk çalışmalardan biri Wu and Little (1983)'nindir. Çalışmada hidrolik çapları 55,81 ila 72,38  $\mu\text{m}$  arasında değişen silikon trepozoidal mikro kanallarda gaz akışında sürtünme faktörü incelenmiş ve geleneksel teoriye göre sürtünme faktörü %10-30 oranında büyük bulunmuştur.

Birçok araştırmacı mikro kanallarda sürtünme faktörünün değişiminin, geleneksel teori ile uyumlu olup olmadığını incelemiştir. Örneğin Pfaller *etal.* (1990) yaptıkları iki çalışmadan birinde, hidrolik çapları 1,6 ve 3,4  $\mu\text{m}$  olan dikdörtgen mikro kanallarda, diğerinde 100  $\mu\text{m}$  kalınlığında ve 0,5 ila 50  $\mu\text{m}$  derinliğinde trapezoidal mikro kanallarda çalışmışlardır. Çalışma sıvısı olarak, izoproponal, silikon yağ sıvıları ile helyum ve nitrojen gazları kullanmışlar ve 50 ila 30 arasında değişen Reynolds sayılarında elde ettikleri sürtünme faktörünün geleneksel teoriye göre düşük olduğunu görmüşlerdir. Çalışılan en küçük kanalda Poiseuille sayısı Reynolds sayısı ile düşmektedir. Ayrıca mikro ölçekte, viskozitenin boyuta bağlı olduğunu ve akışkanın polar yapısının sürtünme faktörünü etkilediğini tespit etmişlerdir.

Choi *etal.* (1991) bir çalışmalarında, çapları 3, 7, 10, 53, 81  $\mu\text{m}$  arasında değişen silika mikro borularda 30 ila 20 000 arasındaki Reynolds sayılarında, tam gelişmiş laminer akışta, Poiseuille sayısını,  $fRe$ , geleneksel teoriye göre ( $fRe = 16$ ) düşük bulmuşlardır ve sürtünme faktörünün yüzey pürüzlülüğü ile değişmediğini söylemişlerdir.

Kandlikar *etal.* (2003) tarafından yapılan çalışma ise mikro kanal kütle aktarımının biyolojik sistemlere uygulanabilirliği konusu ele almışlardır. Bu çalışmada 200  $\mu\text{m}$ 'lik dikdörtgen kanaldan su geçirilmiş ve de geleneksel boyuttaki kanallar için elde edilen sürtünme katsayısı ile çok uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Arklic *etal.* (1994) de hidrolik çapı 2,6  $\mu\text{m}$  olan bir mikro kanalda sürtünme faktörünü geleneksel teoriye göre düşük bulmuşlardır

Jiang *etal.* (1995) çalışmalarında 35'ten 110  $\mu\text{m}$ 'ye değişen hidrolik çaplarda ve 13,4'ten 46  $\mu\text{m}$  değişen yükseklikteki dikdörtgen ve trepezodial kanallardan su geçirilmiş, geleneksel teoriye göre büyük sürtünme katsayıları elde edilmiştir. 35 ila 120  $\mu\text{m}$  arasında değişen hidrolik çaptaki borularda, 1-30 arasında Reynolds sayısı için sürtünme katsayısı sonuçları geleneksel teoriye göre düşük çıkmıştır.

Xu *etal.* (2000) bir diğer çalışmasında alüminyum plakalar ve fleksiglas tabakaların bağlanması ile oluşan dikdörtgen mikro kanallar ile silikon tabakaların pyreksle bağlanması ile oluşan dikdörtgen kanalların sonuçlarını karşılaştırılmıştır. Alüminyum mikro kanalların hidrolik çapları 46,8 ila 344,3  $\mu\text{m}$  arasında, silikon mikro kanalların hidrolik çapları ise 29,59 ila 79,08  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Hidrolik ap 30  $\mu\text{m}$ 'den büyük olduğunda sürtünme faktörü değerleri sıkıştırılamayan akış için Newtonian akışkanda Navier Stokes değerleri ile oldukça uyumlu bulunmuştur.

Richter *etal.* (1997), hidrolik çapları 28 ila 182  $\mu\text{m}$  arasında değişen, boyları 2 mm, kenar açıları 54,7 derece olan trepezodial kanallarda, 0,01 ila 1000  $\mu\text{l}$  dak arasındaki akış hızlarında basınç düşüşünü deneysel olarak incelemiştir. Reynolds sayısı 1'den küçük olduğundan akış laminerdir. Çalışma sıvısı olarak KOH özeltisi kullanmışlar ve sıvı yoğunluk ve viskozitesinin ve sıcaklıkla değişiminin sonuçlara etkisini görmek için 20 ila 50<sup>0</sup>C arasındaki sabit sıcaklıkta çalışmışlardır. Elde ettikleri sürtünme faktörü sonuçları literatürdeki makro kanal sonuçları ile karşılaştırılmış ve uyumun çok iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışmada akış hızının sıcaklıkla oldukça ilişkili olduğu da belirtilmektedir.

Harms *etal.* (1997) çalışmalarında hidrolik çapı 404  $\mu\text{m}$  olan silikon mikro kanalda laminer rejimde sürtünme katsayısı sonuçları geleneksel teoriyle oldukça uyumlu çıkmıştır. Yine Harms *etal.* (1999) 251  $\mu\text{m}$  eninde ve 1 039  $\mu\text{m}$  derinliğinde bir mikro kanal üreterek çalışma sıvısı olarak su kullanmışlar ve 173-12 900 Reynolds sayılarında çalışmışlar ve geleneksel teori ile uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Yu *etal.* (1995) 19, 52 ve 102  $\mu\text{m}$  olan borularda azot gazının akışını ve ısı transferini incelemiştir. Laminer ve türbülent rejimlerde çalışılmış ve Reynolds sayısı 250 ila 20 000 arasında değişmiştir. Moody Diyagramına göre, sürtünme katsayısının düşük olduğunu belirlemiş ve yüzey pürüzlülüğünün etkisi üzerinde durulmuştur.

Pfund *etal.* (2000) diğer bir çalışmada 200-900  $\mu\text{m}$  arasında değişen hidrolik çaplarda ve 40 ila 4 000 arasında değişen Reynolds sayılarında dikdörtgen mikro kanallarda laminer şartlarda sürtünme katsayısı sonuçlarının geleneksel teoriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca laminer rejimde sürtünme faktörü değerinin yüzey pürüzlülüğünün artışı ile arttığını tespit etmişlerdir.

75 ila 242  $\mu\text{m}$  arasında değişen hidrolik çaplarda ve 50 ila 2 500 arasında değişen Reynolds sayılarında gerçekleşen çalışmalarında, Sharp *etal.* (2000), mikro borularda sürtünme katsayısı sonuçları geleneksel teori ile oldukça iyi örtüştüğünü görmüşlerdir.

Lalonde *etal.* (2001), 52,8  $\mu\text{m}$  hidrolik çapındaki bir mikro boru ile çalışmışlar ve sürtünme katsayısı sonuçlarının geleneksel teori ile oldukça uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Jiang *etal.* (2001), 300  $\mu\text{m}$  hidrolik çapında, yüzey pürüzlülüğü elektron mikroskobu ile 5,8 ve 36,3  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüş ( $\epsilon=0.1$ ), dikdörtgen olarak üretilebilmiş mikro ısı değiştiricide, sürtünme faktörü değerlerinin geleneksel teoriye göre yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca test sonuçlarına göre kısa mikro kanallarda hidrodinamik giriş bölgesi etkilerinin de ihmal edilebilir olduğunu değerlendirilmiştir.

Gao *etal.* (2002), hidrolik çapı 199,2 ve 1923  $\mu\text{m}$  dikdörtgen mikro kanallarda sürtünme katsayısı sonuçları geleneksel teoriyle oldukça uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Kandlikar *etal.* (2001) pürüzlülüğün basınç düşüşü üzerindeki etkisini 620 ve 1 067  $\mu\text{m}$  hidrolik çapındaki iki mikro boruyla denemiş ve yüzey pürüzlülüğünün mikro kanallarda oldukça önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir.

Sharp *etal.* (2004), 50 ila 247  $\mu\text{m}$  arasındaki çaplardaki mikro borularda laminar akıştan türbülent akışa geçiş bölgesinde çalışmışlar ve geçiş bölgesi için kritik Reynolds sayısının geleneksel teoriye göre %1 değiştiğini görmüş, Sürtünme katsayısı ise geleneksel teori ile uyumlu elde edilmiştir. Ancak 50  $\mu\text{m}$  çapın altında ise geleneksel teoriye göre farklılıklar belirlenmiştir.

Lelea *etal.* (2004), çalışmalarında mikro borulardaki akışı ve ısı transferini nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Paslanmaz çelik mikro boruların çapları 0,1, 0,3 ve 0,5 mm ve Reynolds sayısı 800'den büyüktür, akış şartları laminardır. Çalışma sıvısı olarak su kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçlarının basınç düşüşü ve ısı transferi yönünden geleneksel teori ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Celata *etal.* (2000), 0.130 mm çaplı paslanmaz çelik mikro boruda R114 akışkanı ile yaptıkları çalışmada, Reynolds sayısı 600 iken sürtünme katsayısının Hagen-Poiseuille Teorisi ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Ancak daha yüksek Reynolds sayılarında çalışıldığında sürtünme katsayısı değeri beklenene göre yüksek olduğunu bulmuşlardır.

Celata *etal.* (2009), başka bir çalışmalarında mikro borulardaki gaz akışını laminar, geçiş ve türbülent akış bölgelerinde incelemişlerdir. Laminar akış şartlarında sürtünme katsayısının geleneksel teori ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak boru çapı 100  $\mu\text{m}$ 'den küçük iken ve Reynolds sayısı 1300'ü geçtiğinde sürtünme katsayısı Reynolds sayısına göre yüksek çıktığını ve çalışmada bu durumun sebebinin sıkıştırılma etkileri ile açıklanabileceğini söylemişlerdir.

Judy *etal.* (2000) tarafından, 20-150  $\mu\text{m}$  çapındaki silika mikro borularda hegzan ve propanın akışını incelenmiştir. Reynolds sayısı 20-2 000 arasında değiştirilmiştir. 100 ve 150  $\mu\text{m}$  çaplarında elde edilen  $fRe$ 'nin geleneksel Stokes Teorisi ile uyumlu olduğu

belirtilmiştir. 75  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki çaplarda ise  $fRe$  64'ten daha düşük değerlerde elde edilmiştir.

Li *etal.* (2000), hidrolik çapı 79.9-166.3  $\mu\text{m}$  olan cam, 100,25-205,3  $\mu\text{m}$  olan silikon ve 128,76-179,8  $\mu\text{m}$  paslanmaz çelik borularda tam gelişmiş akış şartlarında su akışını incelemişlerdir. Cam ve silikon borularda  $fRe$  oranının aynı geleneksel teorideki gibi 64 olduğunu görmüşlerdir, ancak paslanmaz çelik borularda bu oran geleneksel teoriye göre %15-37 yüksektir.

Jiang *etal.* (1995), çalışmalarında çapları 0,008 mm'den 0,042 mm; boyları ise 1cm'den 10 cm'e kadar değişen mikro borular kullanmışlardır. Sürtünme katsayısı sonuçları geleneksel teori ile oldukça uyumlu olarak tespit edilmiştir.

Yang *etal.* (2000), hidrolik çapı 0,171-4,01 mm arasında değişen mikro borularda laminer ve türbülent akış koşullarında R-134a akışkanı ile çalışmışlar; her iki akış rejiminde de sürtünme katsayısı sonuçlarının Blasius ve Poiseuille eşitlikleri ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Papautsky *etal.* (1999) deneysel çalışmalarda sürtünme faktörünün %20 oranında artışını tespit etmişlerdir.

Mala and Li (1999) çalışmalarında 50 ve 254  $\mu\text{m}$  hidrolik çapındaki silika ve paslanmaz çelik mikro borularından su akışı incelenmiş düşük Reynolds sayılarında geleneksel teoriye göre yüksek sayılar elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada kanal malzemesinden kaynaklanan farklar da gözlenmiştir. Örneğin aynı akış hızı ve çapta, silika boruda paslanmaz çelik boruya göre daha yüksek basınç gradyenti elde edilmiştir. 50 ve 600  $\mu\text{m}$  eninde ve 20 ve 30  $\mu\text{m}$  yüksekliğinde dikdörtgen mikro kanallarda sürtünme katsayısı sonuçları geleneksel teoriye göre yüksek çıkmıştır.

Pong *etal.* (1994) uzunluğu 4,5 mm, eni 5-40  $\mu\text{m}$  ve derinliği 1,2  $\mu\text{m}$  olan dikdörtgen kanalda helyum ve azot gazı akışında basınç değişimini ölçmüşlerdir. Araştırmacılar

basıncın geleneksel teoride olduğu gibi Re sayılarına göre lineer olarak değişmediğini görmüşlerdir.

Araki *etal.* (2000) azot ve helyumun gazının hidrolik çapları 3'ten 10  $\mu\text{m}$ 'a kadar değişen üç farklı trepozodial mikro kanalda akışını incelemişler ve sıkıştırma etkisine rağmen sürtünme faktörünün geleneksel teoriye göre düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Çalışmasında 13 farklı terpozodial mikro kanalda ısı transferini inceleyen Wu ve Cheng (2003); yükseklik- en oranının mikro kanallarda akış sürtünmesi, ısı ve kütle transferleri açısından oldukça önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Morini *etal.* (2006), tarafından ticari olarak paslanmaz çelikten üretilmiş çapları, 762, 508, 254 ve 127  $\mu\text{m}$  olan mikro borularla yapılan bir çalışmada sürtünme faktörü incelenmiş ve sonuçların lamner rejimde geleneksel teori ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Phillips (2008) yaptığı tez çalışmasında 200  $\mu\text{m}$  çapında ve 25 mm boyunda bir mikro borudan 100 ila 1 000 arasında değişen Reynolds sayılarında sürtünme faktörünü incelemişlerdir. Yaptığı çalışma literatürdeki paralel çalışmalarla uyumlu çıkmış, ayrıca elde ettiği sürtünme faktörüne karşılık Reynolds sayısı grafiği ile gelişmekte olan laminer akış bölgesi ile laminer akış bölgesinde sürtünme katsayısının hemen hemen aynı davranışı gösterdiğini belirlemiştir.

Yayımlanmış eserlerde, mikro kanallarda taşınım prosesleri ile ilgili çalışmaların başladığı 1980 yılından itibaren yapılan çalışmalara ait derlemeler Morini (2004), Sobhan and Garmiella (2001), Hassan *etal.* (2004), Obot (2004), Şara ve Yapıcı (2007), Bayraktar and Pidigu (2005), Papautsky *etal.* (2001), Steinke and Kandlikar (2006) gibi araştırmacılar tarafından verilmiştir.

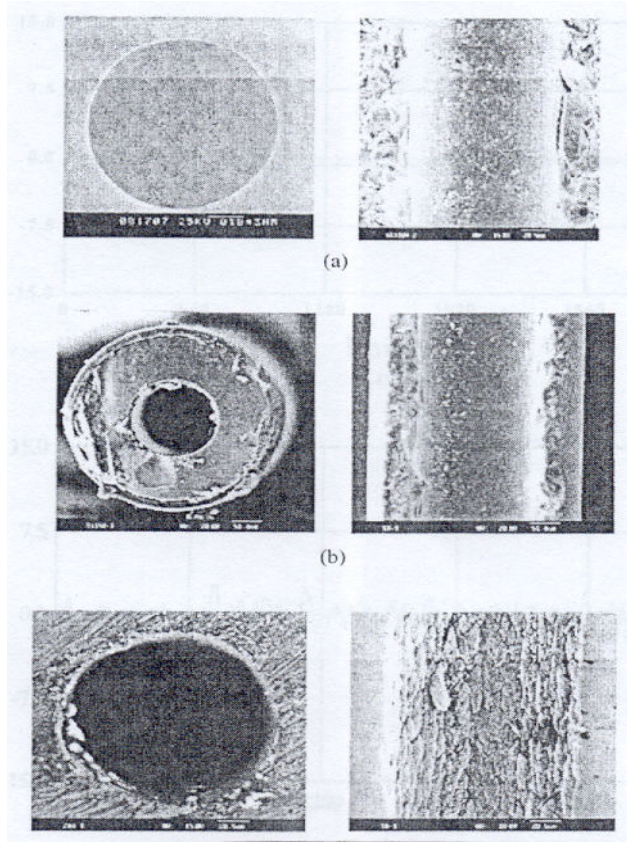


#### 2.4. Mikro Skalada Akış Sonuçlarını Etkileyen Faktörler

Literatürdeki çalışmalarda, mikro ölçekte çalışılırken karşılaşılan problemler sebebiyle bazı hataların oluştuğu ve bu hatalardan dolayı mikro ve makro skala sonuçlarının karşılaştırılmasında bazı sıkıntıların yaşanabildiği görülmüştür. Bu problemler aşağıda sunulmuştur.

- Mikro ölçekte çalışırken, çalışılan kanalın veya borunun boyutlarını belirlemek oldukça önemlidir. Çünkü tüm hesaplamalar mikro boru veya kanal boyutlarına dayanmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde kanalın boyutlarını belirlemek için, elektron mikroskobu veya optik mikroskop gibi aletlerin kullanıldığı görülmüştür.

Li *etal.* (2003), 79,9-166,3 µm çapında cam, 100,25-205,3 µm silikon, 128,76-179,8 µm çapında paslanmaz çelik mikro borularla çalışmışlardır, çalışılan boruların kesitlerinin optik mikroskopla çekilen fotoğrafı Şekil 2.3'te görülmektedir. Makro borularda  $fRe$  çarpımı çalışma sıvısı olarak su kullanıldığında 64 olarak bulunmaktadır. Çalışma sonucunda paslanmaz çelik borularda bu çarpım %15-37 daha büyük bulunmuştur.



(a) Mikro cam boru (b) Mikro silikon boru (c) Mikro paslanmaz çelik boru

**Şekil 2.3.** Üç tip mikro borunun kesit alanı (Li *etal.* 2003)

- Basınç düşüşü ölçümlerinin de yaşanacak problemler; mikro kanal veya borunun çok iyi tasarlanması, giriş ve çıkış etkilerinin iyi analiz edilmesi ve de uygun basınç ölçer kullanılması ile ortadan kaldırılabılır.
- Yüzey pürüzlülüğünün akış koşullarına etkileri yaklaşık bir yüzyıldır tartışılmakla birlikte, sürtünme katsayısının laminer akış için yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olup olmadığı bir netlik kazanmamıştır. Bazı yazarlar, yüzey pürüzlülüğünün bir etkisi olmadığını düşünürken bazıları ise, kanal ebadı birkaç mikrona düştüğünde pürüzlülüğün akış, ısı ve kütle transferini etkileyecek önemli bir unsura dönüştüğünü düşünür.

Kandlikar *etal.* (2003) çalışmalarında düşük Reynolds sayılarında, küçük çaplı mikro borularda yüzey pürüzlülüğü etkisini incelemiştir. Çalışmada farklı asitler ile

muamele edilen boruların pürüzsüz hale geldiği, ancak bir süre sonra asidin etkisinin geçtiği ve eski pürüzlülüklerine döndükleri görölmüştür.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

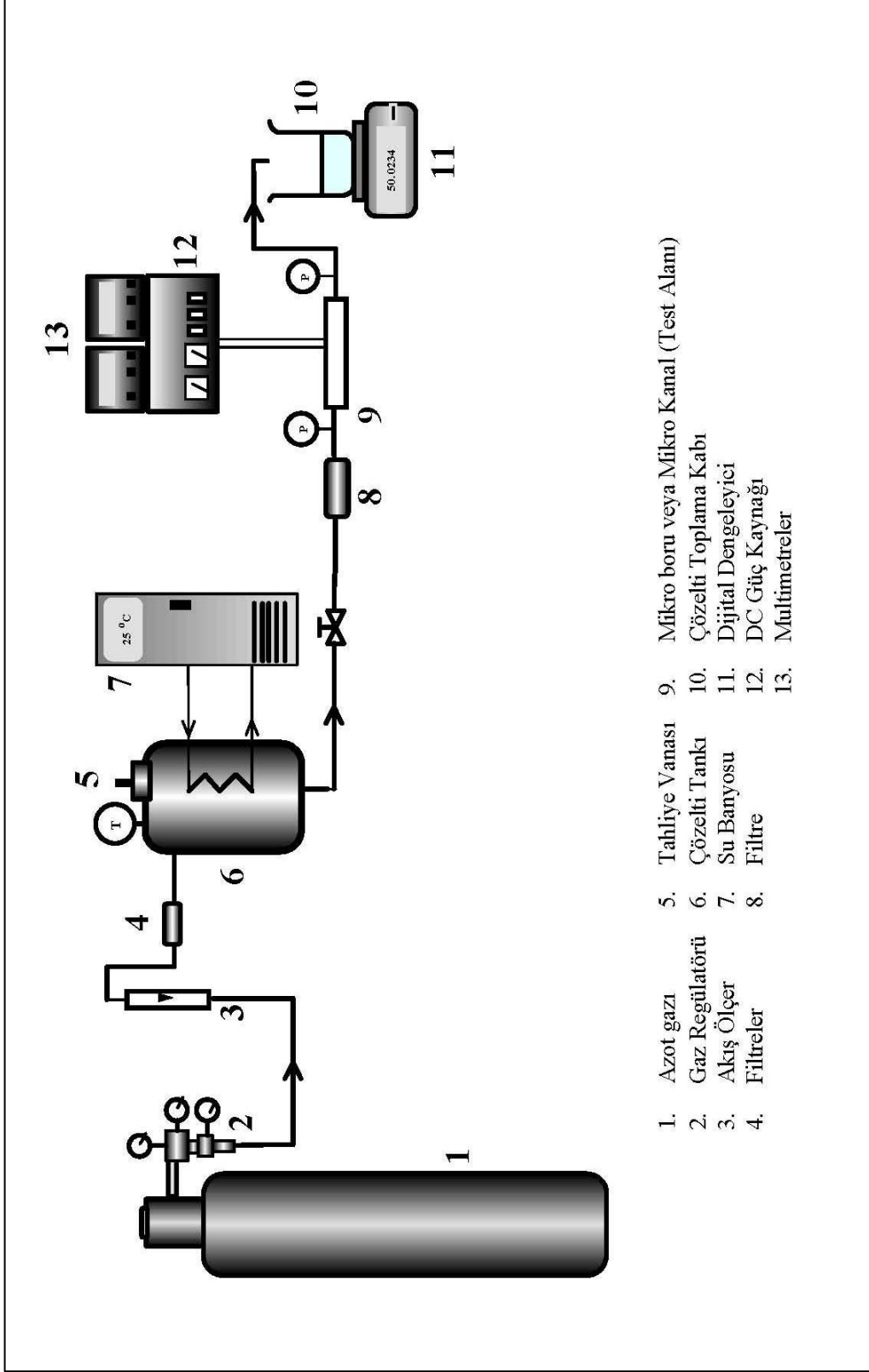
#### 3.1. Deney Sistemi

Kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.1’de ve fotoğrafı Şekil 3.2’de görülmektedir. Düzenek yüksek basınçlı azot gazı tüpünden, gaz regülatöründen, akış ölçerden, filtrelerden, çözelti tankından, multimetrelerden, DC güç kaynağından, mikro filtrelerden, dijital teraziden, sirkülasyonlu su banyosundan ve test alanından oluşmaktadır. Deney düzeneğinde akış yüksek basınçlı azot tüpü sayesinde sağlanmaktadır. Akış hızları tüpe bağlı olan iki basamaklı gaz regülatörü ile ayarlanmaktadır. Filtreden geçen azot gazı çözelti tankına ulaşmakta ve çözeltiyi test alanına doğru harekete geçirmektedir.

Mikro boru çapları ve mikro kanal genişlikleri çok küçük olup; çözeltilerde bulunabilecek ve tıkanmaya sebep olabilecek herhangi bir partikül varlığına karşı çözelti test alanına girmeden önce bir filtreden geçirilmektedir.

Test alanı çıkışından toplanan çözelti biriktirilerek zamana karşı çözelti miktarı tartımı yapılmaktadır. Bu sayede kütleli akış hızı elde edilmektedir.

Test bölgesinde dairesel ve dikdörtgen olmak üzere iki farklı kanal geometrisi kullanılmıştır. Şekil 3.3’te mikro borular ve Şekil 3.4’te mikro dikdörtgen kanallar için test alanı şematik olarak, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da ise fotoğrafları ile yer almaktadır. Şekil 3.4’te ayrıca test alanının akrilik kısmına monte edilmiş mikro kanal ve nikel elektrotların görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Deneý düzeneğinin şematik gösterimi

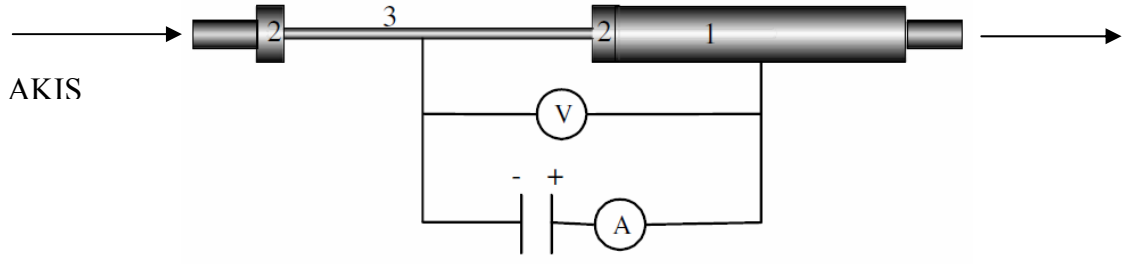


(a) Multimetreler



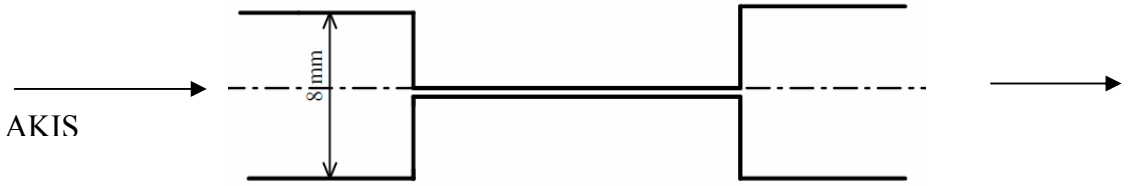
(b) Akış Sistemi

**Şekil 3.2.** Deney düzeneği fotoğrafı



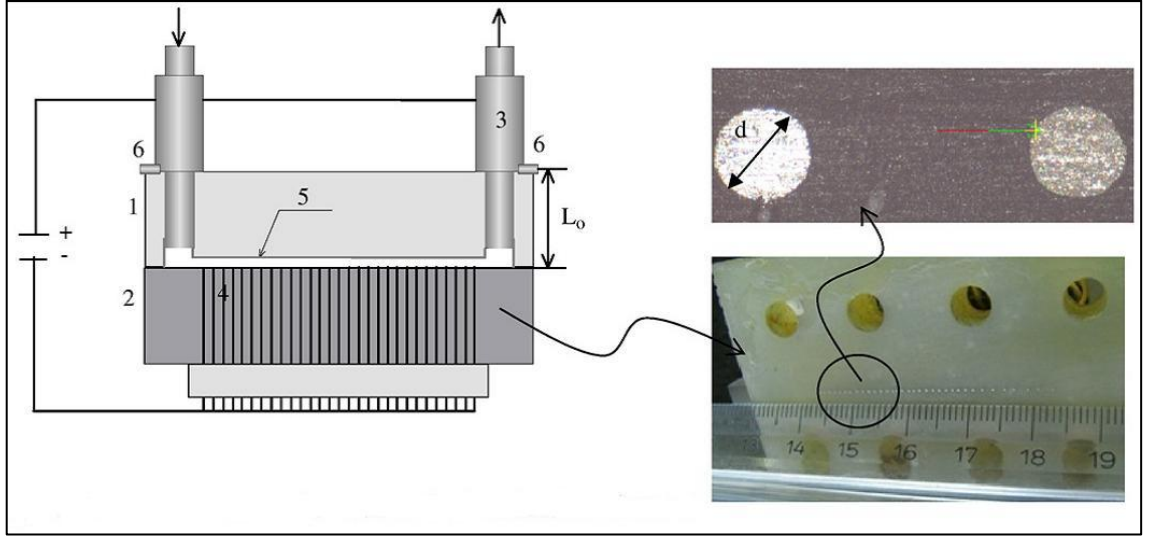
1. Nikel Anot      2. Akrilik      3. Nikel Katot

(a). Kütle transferi ölçümü test alanı



(b). Basınç düşüşü ölçümü

**Şekil 3. 3.** Dairesel mikro borular için test alanı şematik gösterimi



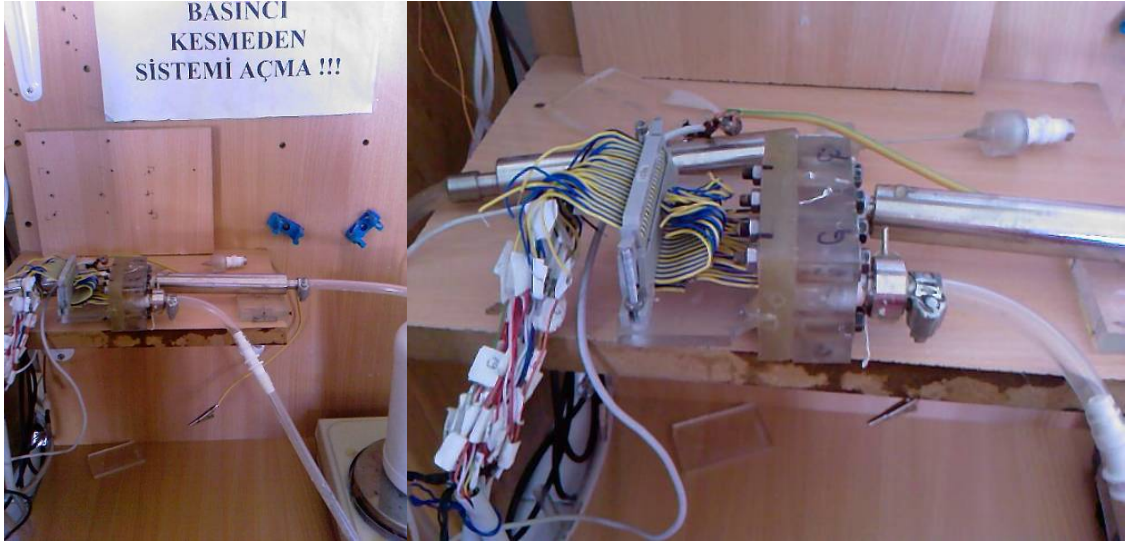
- |            |                      |                           |
|------------|----------------------|---------------------------|
| 1. Akrilik | 3. Nikel Boru        | 5. Mikro Kanal            |
| 2. Reçine  | 4. Nikel Elektrotlar | 6. Basınç Ölçer Girişleri |

**Şekil 3.4.** Dikdörtgen mikro kanallar için test alanı şematik gösterimi



**Şekil 3.5.** Dairesel mikro borular için test alanı fotoğrafları





**Şekil 3.6.** Dikdörtgen mikro kanallar için test alanı fotoğrafı

Mikro borular ticari olarak Goodfellow Firması'ndan temin edilmiştir ve %99 nikelden oluşmaktadır. Boru çapları Nikon MM 400 L markalı video ölçüm özelliği bulunan mikroskop ile ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan Nikon MM 400 L markalı video ölçüm özelliği bulunan mikroskop Şekil 3.7'de, bu mikroskop ile görüntülenen mikro boruların kesit alanları ise Şekil 3.8' de görülmektedir.

Sistemde kütle transferi ölçümlerinde mikro boruların malzemesi olan nikel gövde katot görevi görürken, boruya akışı sağlayan ve katot alanından yaklaşık 100 kat büyük olan, oldukça geniş bir yüzey alanı bulunan, 8 mm çaplı nikel bir boru da anot olarak görev yapmaktadır. Çalışmada kullanılan boruların geometrik ölçüleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Deneylerde kullanılan dairesel mikro boru boyutları

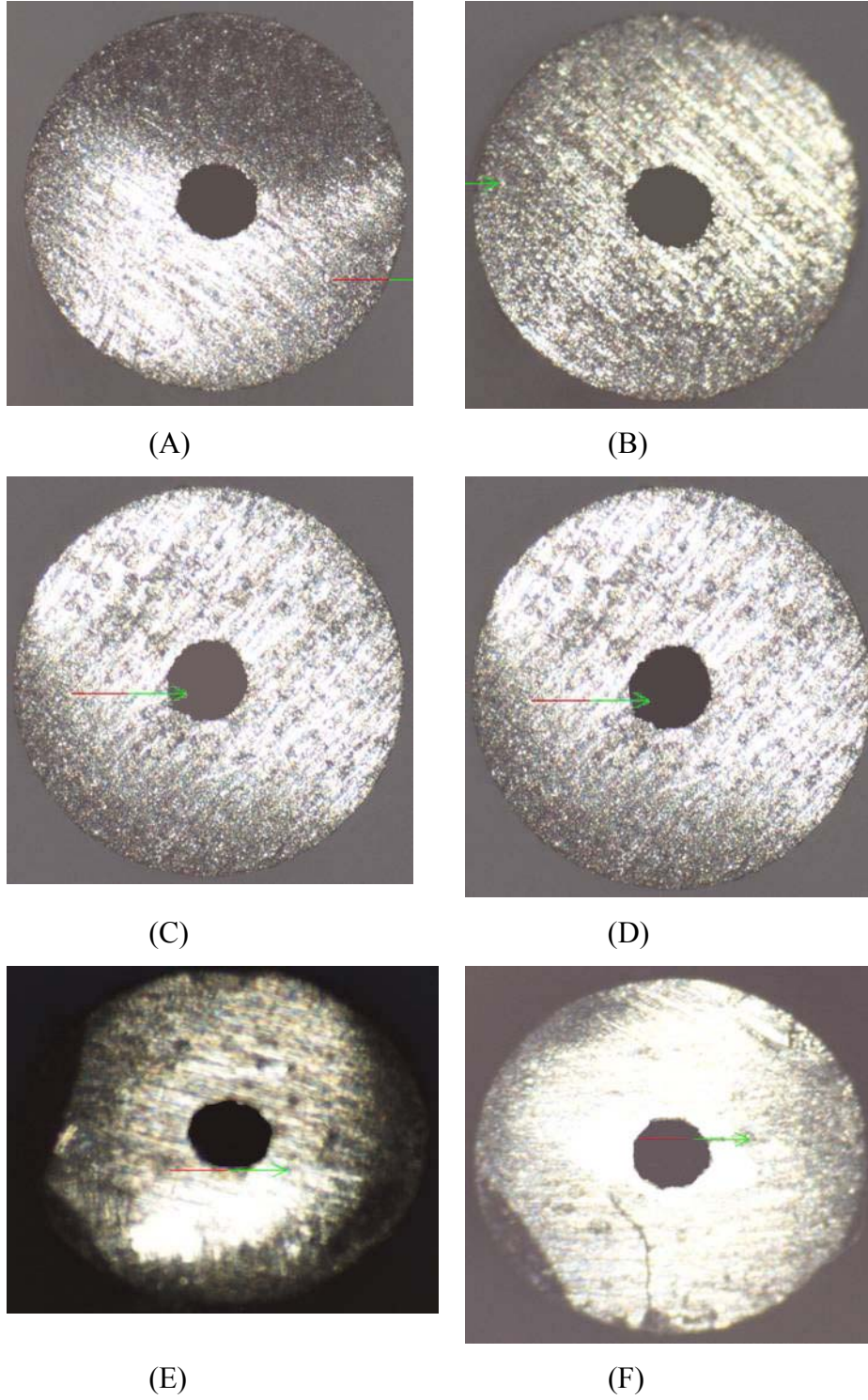
<b>MİKRO BORU</b>	<b>UZUNLUK (mm)</b>	<b>ÇAP (mm)</b>	<b>L/d</b>	<b>MALZEME</b>
A	20,2	0,205	98	Nikel Boru
B	30,1	0,206	146	
C	39,8	0,203	197	
D	49,6	0,200	248	
E	69,9	0,204	344	
F	99,9	0,203	492	

**Çizelge 3. 2.** Deneylerde kullanılan dikdörtgen mikro kanal boyutları

<b>MİKRO KANAL</b>	<b>GENİŞLİK (w) (mm)</b>	<b>DERİNLİK (h) (mm)</b>	<b>UZUNLUK (L) (mm)</b>	<b>HİDROLİK ÇAPLAR (mm)</b>	<b>MALZEME</b>
AA	0,94	0,084	35	0,15	1. kısım akrilik gövde 2. kısım silikon taban
BB	2,04	0,109	35	0,21	
CC	3,70	0,107	35	0,21	



**Şekil 3.7.** Nikon MM 400 L markalı video ölçüm özelliği bulunan mikroskop



Şekil 3.8. Mikro boruların kesit alan görüntüleri

Mevcut imkânlar ile nikel boruların pürüzlülükleri ölçülememiştir. Ancak gerekli boru boyları sağlandıktan sonra, boru giriş ve çıkışları temizlenerek deneyler yapılmıştır. Şekiller incelendiğinde mikro boruların içlerindeki kanalların oldukça temiz ve pürüzsüz olduğu görülmektedir.

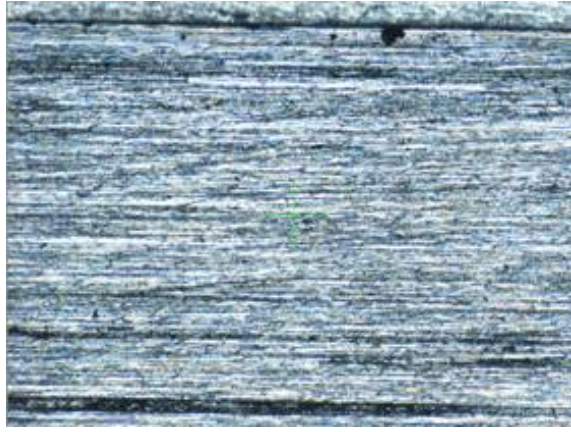
Mikro dikdörtgen kanallar mekanik olarak üretilmiştir. Mikro kanallar ile çalışmayı sağlayan hücre sandviç biçiminde iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım, kanalların üzerinde bulunduğu gövdedir. Bu gövde işleme kolaylığı yüzünden akrilik malzemedan üretilmiştir. Gövde üzerinde mekanik olarak gerekli boyutlarda kanallar açılmıştır. Çizelge 3.2.'de görülen genişlik, derinlik, uzunluklarda ve hidrolik çaplarda mikro kanallar kazılmıştır.

Mikro kanalların optik mikroskop ile çekilen kanal resimleri Şekil 3.9'da görülmektedir. Kanal başlangıç ve sonu giriş ve çıkış rezervuarlarına mümkün olduğu kadar merkezleri eş olacak şekilde oturtulmaya çalışılmıştır. Yine kanal iç görüntüsünde görüldüğü gibi kanal mümkün olduğunca pürüzsüz üretilmeye çalışılmıştır.

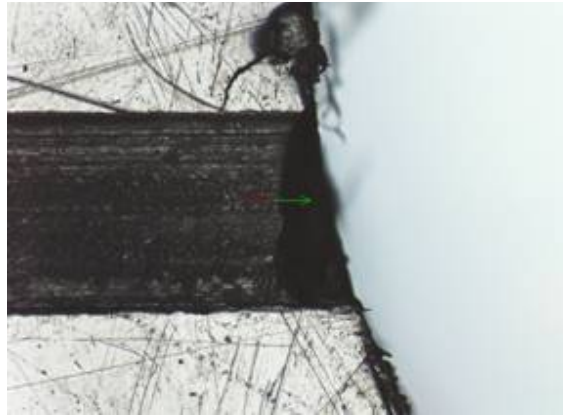




(a)



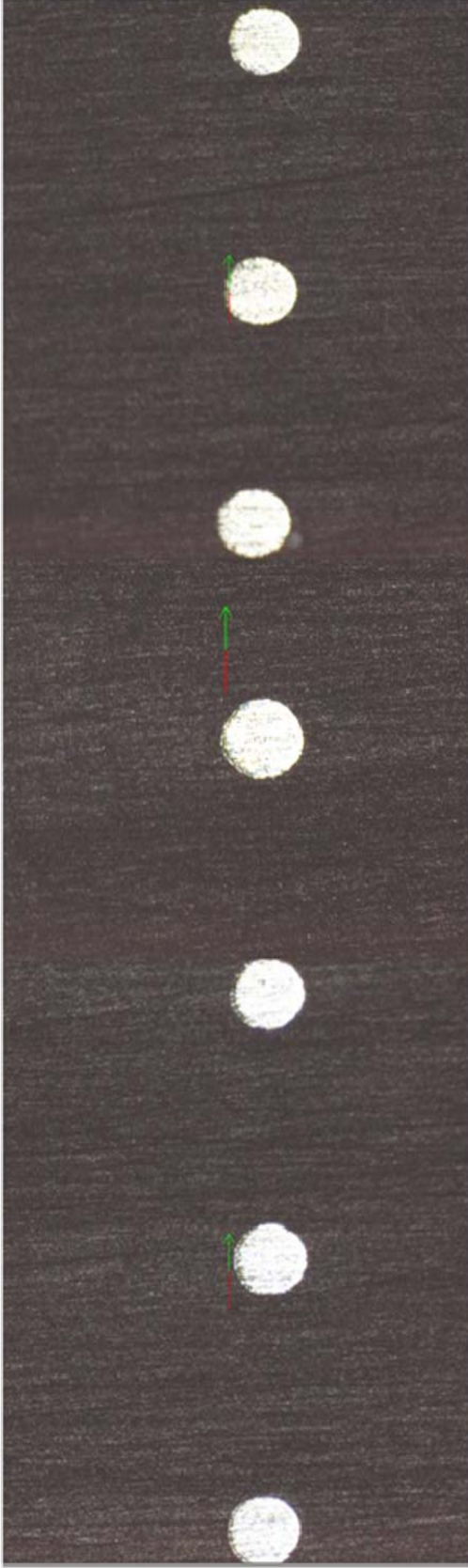
(b)



(c)

(a) Giriş rezervuarı (b) Kanal iç görüntüsü (c) Kanal çıkış rezervuarı

**Şekil 3.9.** Mikro kanalların optik mikroskop ile çekilen görüntüsü



**Şekil 3.10.** Noktasal elektrotların optik mikroskop ile çekilen görüntüsü

Hücrenin ikinci kısmını, silikon içerisine yerleştirilmiş noktasal elektrotlar oluşturmaktadır. Hücrenin iki kısmı, vidalanarak bir araya getirildiğinde, elektrotlar kanalın merkezine yerleşmektedir.

Şekil 3.10.'da noktasal elektrotların şekilleri görülmektedir, elektrot yüzeyleri temiz ve pürüzsüz yapılmaya çalışılmıştır. Noktasal elektrotlar, yerel kütle transferi ölçümünde, katot olarak görev yapmaktadır. Elektrot olarak yaklaşık 0.2 mm kalınlığında nikel tel kullanıldı. Elektrotlar yerleştirilip temizlendikten sonra gerçek çapları mikroskop ile ölçülerek hesaplamalarda kullanılmıştır. Anot görevini de kanallara akışı sağlayan ve 8 mm, çaplı nikel bir boru görmektedir. Sonuç olarak anot alanı katot alanına oranla oldukça büyüktür. Çizelge 3.3'te elektrotlar arasındaki mesafeler toplu olarak verilmiştir. Hücrede toplam 32 elektrot bulunmaktadır. Ancak kanal girişinde bulunan elektrot birinci elektrot olarak kabul edilmiş ve bu elektrottan itibaren mesafe ölçümleri yapılmıştır.

Sistemdeki basınç düşüşü test alanının girişine bağlanan Keller marka, 0-6 bar arasında  $\pm\%0,5$  FS hata ile ölçüm yapabilen basınç ölçer ile ölçülmüştür. Basınç ölçer korozif olan çalışma çözeltisinden etkilenebilmektedir. Bu nedenle basınç düşüşünü ölçmek için çalışma çözeltisi olarak saf su kullanılmış, yine değişik akış hızlarında çalışılarak basınç ölçümü yapılmıştır.

Sistemde akım ölçümleri Keithly 2700/7702 marka çok kanallı multimetre ile yapılmıştır. Dikdörtgen mikro kanallarda çok sayıda elektrot olduğundan, çok kanallı multimetre ile ölçülen voltaj değerleri, kullanılan standart dirençler ile akıma dönüştürülmüştür.

Elde edilen akımların kullanılması ile, mikro borularda boru boyunca, mikro kanallarda ise noktasal elektrotlar üzerinde oluşan kütle transferi belirlenmiştir. Bu sistem için gerekli güç DC güç kaynağı ile sağlanmıştır.



Çizelge 3.3. Dikdörtgen mikro kanalda yer alan noktasal elektrotlar arasındaki mesafe

Elektrot No	x (mm)	x/d		
		AA	BB	CC
1	0	0	0	0
2	1	6,67	4,8	4,8
3	1,9	12,67	9	9
4	3,2	21,33	15,2	15,2
5	4,3	28,5	20,5	20,5
6	5,6	35,4	26,7	26,7
7	6,3	42,1	30	30
8	7,5	50	35,7	35,7
9	9,6	63,2	45,7	45,7
10	10,2	67,8	48,67	48,67
11	11,1	74,3	52,9	52,9
12	12,2	81,4	58,1	58,1
13	13	86,9	61,9	61,9
14	14	93,4	66,7	66,7
15	15,1	100,9	71,9	71,9
16	16,3	108,4	77,6	77,6
17	17,3	115,6	82,4	82,4
18	18,4	122,6	87,6	87,6
19	19,5	129,6	92,9	92,9
20	21,5	143,3	102,4	102,4
21	22,7	151,1	108,1	108,1
22	24,1	160,7	114,78	114,78
23	25,8	172	122,9	122,9
24	27,5	183,5	130,9	130,9
25	29	193,6	138,1	138,1
26	31	208,9	147,6	147,6

### 3.2. Kütle Transferi Ölçüm Tekniği

Sıvı ve katı yüzeyler arasındaki kütle transferi hızlarını ölçmekte kullanılan tekniklerden biri de elektrokimyasal tekniktir. Reaksiyona veren iyonların elektrotlara transferi sebebi ile oluşan elektrik akımı ölçülür (Berger *etal.* 1983). Bu çalışmada da elektrokimyasal teknik kullanılarak kütle transferi ölçümü yapılmıştır. Kütle transferinin sınırlayıcı akım tekniğinin kullanılması ile elektrokimyasal olarak ölçülmesi 1960'lardan beri kullanılan bir yöntemdir (Selman *etal.* 1978 ).

Sınırlayıcı akım tekniği için pek çok sistem kullanılabilir, ancak pratikte sıklıkla tercih edilen, redoks çifti potasyum ferri ve ferrosiyaniürün ( $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} - \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ ) genellikle NaOH, KOH,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  gibi bir elektrolitle oluşturduğu sulu sistemlerdir (Selman *etal.* 1978). Ancak NaOH ve KOH çözeltileri kirletici ve aşındırıcıdır. Bu nedenle bu çalışmada elektrolit olarak aşırı miktarda  $\text{K}_2\text{CO}_3$  içeren  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$  ve  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$  karışımı, elektrot olarak da nikel elektrotlar kullanılmıştır.

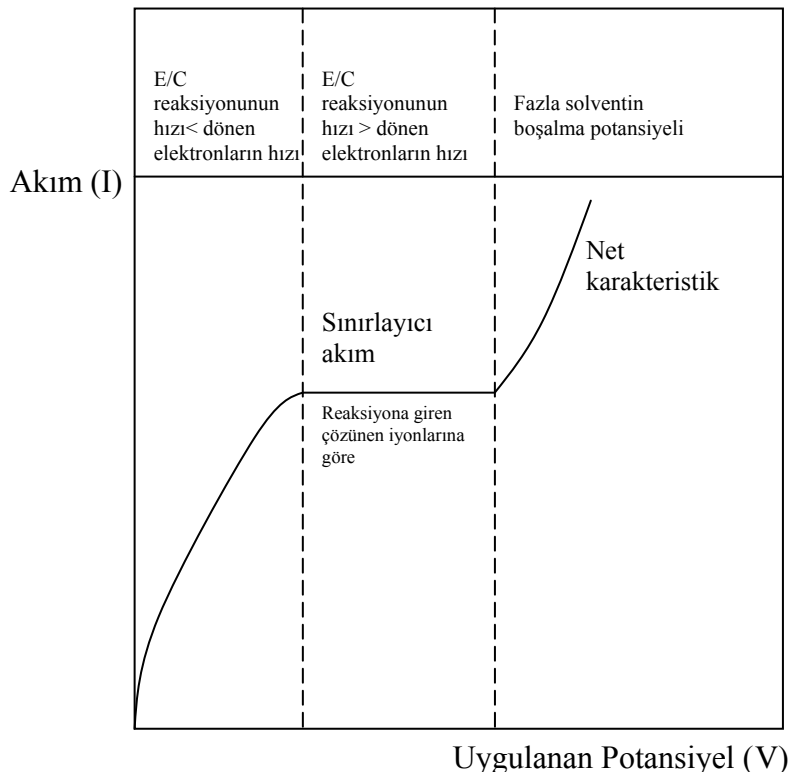
Çalışılacak mikro boru ve mikro kanallarda kütle transferi ölçümlerinde, ferri ve ferrosiyaniür ve  $\text{K}_2\text{CO}_3$  çözeltisi sistemlerden değişik akış hızlarında geçirilmiştir. Çözelti tankına bir sirkülasyonlu su banyosu bağlanmış ve çözelti sıcaklığı  $25 \pm 0,1$  °C'de sabit tutulmuştur. Çözeltinin bu sıcaklıktaki yoğunluğu  $1111,89 \text{ kg/m}^3$  ve viskozitesi  $0,0011 \text{ Nsm}^{-2}$ 'dir.

Yapıcı *etal.* (1995) makro sistemlerde kütle transferini incelemiştir. Çalışmada elektrokimyasal sınırlayıcı akım tekniği ile çalışılmıştır. Elektrot/elektrolit sistemi olarak sıvı sodyum hidroksit solüsyonu ile desteklenmiş potasyum ferri ile ferrosiyaniür çifti ile nikel anot ve katot kullanılmıştır. Elektrolit solüsyonun bileşimi; 0,5 M sodyum hidroksit, 0,01 M potasyum ferri, 0,02 M potasyum ferrosiyaniür şeklindedir. Çalışma boyunca çözeltinin sıcaklığı  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 'de tutulmuştur.

Bu metotta teori oldukça basittir. Ancak ölçümlerin doğru ve mümkün olan en kapsamlı

akış koşullarını kapsayabilmesi için, pratikte pek çok problemin aşılması gerekir.

Şekil 3.11.'de reaksiyona giren iyonlar içeren bir sıvı ile ayrılmış iki elektroda bir potansiyel farkı uygulandığında oluşan yük boşalma karakteristiği görülmektedir (Berger *etal.* 1983). Eğri üç farklı bölgeye bölünmüştür; çalışmanın yapıldığı bölüm voltajın arttırılmasıyla akımın sabit kaldığı plato bölgesidir.



**Şekil 3.11.** Boşalma karakteristiği (Berger *etal.* 1983)

Plato bölgesindeki voltajda, elektrottaki reaksiyon hızı öyle hızlıdır ki yüzeyde reaksiyona giren iyonların konsantrasyonu sıfıra çok yakındır. Bu noktadaki akımın büyüklüğü geri dönen reaksiyon iyonlarının büyüklüğü ile ölçülür; bu akıma da sınırlayıcı akım denir.

Yatışkın halde, x yönünde molar akı Eşitlik 3.1'deki Nernst-Planck denklemi ile tanımlanmaktadır (Perez 2004).

$$N = -D \frac{dc}{dx} - \frac{zFDc}{RT} \frac{d\phi}{dx} + cv \quad (3.1)$$

Bu denklemde sağ taraftaki terimler sırası ile difüzyon akısı, migrasyon molar akı ve konvektif molar akıyı göstermektedir. Burada D difüzyon katsayısı, c konsantrasyon,  $v$  hidrodinamik hız,  $dc/dx$  ve  $d\phi/dx$  sırası ile konsantrasyon ve potansiyel dağılımıdır.

Kütle transferine migrasyon, difüzyon ve konveksiyon olmak üzere üç farklı kütle transfer tipinin katkısı vardır. Migrasyon etkisi çözelti içerisinde elektrotlar arasına uygulanan potansiyelin etkisi altında anyon ve katyonun çözelti içerisinde hareketinden kaynaklanmaktadır. Difüzyon elektrot yüzeyinde oluşan reaksiyondan dolayı yükseltgen veya indirgenin konsantrasyonunun dolayı yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye kütle transferidir. Konvektif kütle transferi ise akışkan yığın hareket katkısıdır.

Sınırlayıcı akım tekniği ile çalışırken, plato bölgesinde yüzeyde reaksiyona giren iyonların konsantrasyonu sifıra yakın olduğundan, Eşitlik 3.1'de ifade edilen Nernst-Planck denkleminin son terimi olan konvektif molar akı ihmal edilebilir. Akı, difüzyon ve migrasyon akılarından oluşmaktadır (Berger *etal.* 1983), bu durum Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 ile ifade edilebilir.

$$N = -D \frac{dc}{dx} - \frac{zFDc}{RT} \frac{d\phi}{dx} \quad (3.2)$$

$$I = I_{dif} + I_{mig} \quad (3.3)$$

Çözeltiye aktif olmayan elektrolitten fazlaca eklenerek elektrik alanının varlığına dayanan migrasyon etkisini ortadan kaldırılabilir ya da ihmal edilebilir bir seviyeye indirilebilir. Bu durumda akı sadece difüzyon akısından oluşur ve Eşitlik 3.4'te görüldüğü hâle gelir.

$$N = -D \frac{dc}{dx} \quad (3.4)$$

Difüzyon kontrollü şartlarda sınırlayıcı akım Eşitlik 3.5'teki gibidir (Berger *et.al* 1983),

$$I_{\text{lim}} = N n A F \quad (3.5)$$

Burada  $I_{\text{lim}}$  sınırlayıcı akım,  $n$  elektron sayısı ve  $A$  elektrot yüzey alanı,  $F$  Faraday sabitidir. Faraday sabiti fizik ve kimyada, bir mol elektronun sahip olduğu elektrik yükü olarak tanımlanır ve Eşitlik 3.6'daki gibi ifade edilir. Elektrolitik sistemlerde, elektrot yüzeyinde toplanan kimyasal madde miktarını hesaplamada kullanılır. Bu eşitlikte  $N_A$  yaklaşık  $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  olan Avagadro sayısı ve  $q$  da elektron başına yaklaşık  $1,602 \times 10^{-19}$  Coulomb olan bir elektronun yükünün büyüklüğüdür.

$$F = N_A q = 96485 \text{ C/mol} \quad (3.6)$$

Şeklindeki eşitlikle ifade edilebilir.

Buradan akı Eşitlik 3.7'deki gibi elde edilir.

$$N = \frac{I_{\text{lim}}}{n A F} \quad (3.7)$$

Diğer taraftan molar akı Eşitlik 3.8'deki gibi ifade edilebilir (Perez 2004).

$$N = k(C_{\infty} - C_s) \quad (3.8)$$

Burada  $k$  kütle transfer katsayısı,  $C_{\infty}$  aktif iyonun yığın konsantrasyonu ve  $C_s$  ise yüzeydeki konsantrasyondur. Eşitlik 3.7 ve 3.8 birleştirildiğinde Eşitlik 3.9 elde edilir.

$$k = \frac{I_{\text{lim}}}{n A F (C_{\infty} - C_s)} \quad (3.9)$$

Sınırlayıcı akım koşullarında  $C_s = 0$  olduğundan Eşitlik 3.9 Eşitlik 3.10'a dönüşür.

$$k = \frac{I_{\text{lim}}}{n A F C_{\infty}} \quad (3.10)$$

Burada  $C_{\infty}$  çalışma çözeltisi içerisindeki ferrisiyanürün konsantrasyonudur. Çalışma süresince her deneyin başında ve sonunda çözelti içerisindeki ferrisiyanürün konsantrasyonu Shimadzu UV 1208 model UV ile ölçülerek hesaplamalarda kullanılmıştır.

Dikdörtgen mikro kanallarda noktasal elektrotlar üzerinde yerel kütle transferi ölçüldüğünden hesaplamalarda ferrisiyanürün konsantrasyonu  $C_{\infty}$  olarak alınmıştır. Ancak dairesel mikro borularda ferrisiyanürün konsantrasyonu değiştiğinden  $C_{\infty}$  yerine Eşitlik 3.11'de ifade edilen  $\Delta C_{LM}$  kullanılmıştır.

$$\Delta C_{LM} = \frac{(C_i - C_s) - (C_o - C_s)}{\ln((C_i - C_s)/(C_o - C_s))} \quad (3.11)$$

Burada  $C_i$  çözeltinin giriş,  $C_o$  çözeltinin çıkış ve  $C_s$  çözeltinin yüzey konsantrasyonudur. Sınırlayıcı akım koşullarında  $C_s$  sıfır olduğundan Eşitlik 3.11 Eşitlik 3.12'ye dönüşür.

$$\Delta C_{LM} = \frac{(C_i - C_o)}{\ln(C_i / C_o)} \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.10'dan hesaplanan katsayılar, Eşitlik 3.13 ile Sherwood sayısına dönüştürülmüştür.

$$Sh = \frac{k d}{D} \quad (3.13)$$

Burada  $k$  kütle transfer katsayısı,  $d$  dairesel mikro borularda çap ve dikdörtgenel mikro kanallarda ise hidrolik çap,  $D$  ise çalışma çözültüsünün kütle yayılım katsayısıdır. Bu çalışma için kütle yayılım katsayısının değeri  $6,85 \cdot 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$  olarak alınmıştır.

Ferri-ferro sistemlerde çalışırken karşılaşılabilecek bazı sorunları aşmak için;

- Kritik akış hızının değişik sıcaklıklarda çalışılarak elektrokimyasal reaksiyon hızı ve difüzyon hızına etkisi incelenmelidir. Tam sıcaklık kontrolü yapılmalıdır.
- Sınırlayıcı akımda migrasyon etkisi ortadan kaldıracak bileşenin miktarı belirlenmelidir.
- Elektrolit ve elektrotların olumsuz etkileri önlenmelidir. Elektrolit ve elektrot aktivitesinin bozucu etkisi ortadan kaldırılmalıdır. Katodik hazırlık aşaması ve katodik aktivasyon önemlidir. Bu süre sağlanana kadar kanalda akış sağlanmalıdır (Berger *et al.* 1983).

Berger *et al.* (1983) çalışmalarında pek çok elektrotla değişik sıcaklıklarda sınırlayıcı akımı ölçmüşler ve  $3^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık değişimi ile sınırlayıcı akımın %20 oranında değiştiğini gözlemlemişlerdir.

### 3.3. Sürtünme Faktörünün Hesaplanması

Sürtünme faktörü boyutsuz ve skaler bir değerdir. İki obje arasındaki sürtünme kuvvetinin iki objeyi birbirine bastıran kuvvete oranı olarak da belirtilebilir. Borular ve kanallar için sürtünme katsayısı Eşitlik 3.14 ile ifade edilir;

$$f = \frac{2 (\Delta P)}{(L/d)\rho v^2} \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.14.'te  $\Delta P$  net basınç düşüşü, L borunun uzunluğu, d hidrolik çapı,  $\rho$  akışkanın yoğunluğu, v ise hızdır.

### 3.3.1. Dairesel mikro borular içerisinde akış

Sürtünme faktörünü hesaplayabilmek için ilk olarak basınç düşüşünün hesaplanması gerekir. Sistemdeki basınç düşüşü Eşitlik 3.15'teki bileşenlerden oluşmaktadır.

$$\Delta P_m = \Delta P_n + \Delta P_i + \Delta P_e + \Delta P_d \quad (3.15)$$

$\Delta P_m$  ölçülen basıncı ifade etmektedir.  $\Delta P_n$  net basınç düşüşünü,  $\Delta P_i$  boru girişindeki ve  $\Delta P_e$  boru çıkışındaki daralma ve genişlemelerden oluşan kayıpları ve de  $\Delta P_d$  akışın gelişmesinden kaynaklanan basınç kaybını içermektedir

Bu durumda elde edilmek istenilen  $\Delta P_n$  formülden çekilirse Eşitlik 3.16 elde edilir.

$$\Delta P_n = \Delta P_m - \Delta P_i - \Delta P_e - \Delta P_d \quad (3.16)$$

$\Delta P_i$  değeri Eşitlik 3.17 ile,  $\Delta P_e$  değeri Eşitlik 3.18 ile,  $\Delta P_d$  değeri ise Eşitlik 3.19 ile ifade edilir.

$$\Delta P_i = K_i \frac{\rho_i v_i^2}{2} \quad (3.17)$$

$$\Delta P_e = K_e \frac{\rho_e v_e^2}{2} \quad (3.18)$$

$$\Delta P_d = K_\infty \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.19)$$



$K_i$  ve  $K_e$  kayıp katsayıları olup literatürden bulunmaktadır (Morini *et.al* 2006). Dairesel mikro boru çalışmalarında  $K_i$  ve  $K_e$  değerleri 1 olarak alınmıştır.  $K_\infty$  asimptotikal basınç düşüşü değeridir; literatürde dairesel kanallar için  $K_\infty$ 'yi Eşitlik 3.20'deki gibi ifade eder (Morini *et.al* 2006);

$$K_\infty = 1,2 + \frac{38}{Re} \quad (3.20)$$

Kohl *et.al* (2005), L/D oranı 300'den büyükse giriş bölgesi etkisinin, yani gelişmekte olan akış için basınç düşüşünün ihmal edilebileceğini gözlemlemişlerdir. Bu durumda sürtünme faktörü aşağıdaki gibidir.

Eşitlik 3.16'da  $\Delta P_i$ ,  $\Delta P_e$  ve  $\Delta P_d$  değerleri yerlerine konduğunda,

$$\Delta P_n = \Delta P_m - K_i \frac{\rho_i v_i^2}{2} - K_e \frac{\rho_e v_e^2}{2} - K_\infty \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.21)$$

Eşitlik 3.21. elde edilir. Çalışmada Eşitlik 3.22 ve 3.23'de ifade edildiği gibi hız ve yoğunluk verileri eşittir. Bu durumda net basınç düşüşü Eşitlik 3.24'teki gibi hesaplanabilir.

$$v_i = v_e = v \quad (3.22)$$

$$\rho_i = \rho_e \quad (3.23)$$

$$\Delta P_n = \Delta P_m - (K_i + K_e + K_\infty) \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.24)$$

### 3.3.2. Dikdörtgen mikro kanallar içerisinde akış

Dikdörtgen mikro kanallarda net basınç düşüşünün hesaplanması mikro kanalların yapısında bulunan dirsekler nedeniyle mikro boruların net basınç düşüşü ifadesinden farklı olarak Eşitlik 3.25.'teki gibidir.

$$\Delta P_m = \Delta P_n + \Delta P_i + \Delta P_e + \Delta P_d + 2\Delta P_{90} + 2\Delta P_{Lo} \quad (3.25)$$

Yine  $\Delta P_m$  ölçülen basıncı ifade etmektedir.  $\Delta P_n$  net basınç düşüşünü,  $\Delta P_i$  ile boru girişindeki ve  $\Delta P_e$  boru çıkışındaki daralma ve genişlemelerden oluşan kayıpları,  $\Delta P_d$  ise akışın gelişmesinden kaynaklanan basınç kaybını,  $\Delta P_{90}$  ile dirseklerden,  $\Delta P_{Lo}$  bağlantı boruları boyunca akıştan dolayı oluşan basınç kaybını ifade etmektedir (Morini *et.al* 2006).

Bu durumda elde edilmek istenilen  $\Delta P_n$  formülden çekilirse Eşitlik 3.26 elde edilir.

$$\Delta P_n = \Delta P_m - \Delta P_i - \Delta P_e - \Delta P_d - 2\Delta P_{90} - 2\Delta P_{Lo} \quad (3.26)$$

$\Delta P_i$  değeri Eşitlik 3.17. ile,  $\Delta P_e$  değeri Eşitlik 3.18. ile,  $\Delta P_d$  değeri ise Eşitlik 3.19. ile,  $\Delta P_{90}$  değeri ise Eşitlik 3.27. ile ifade edilir.  $\Delta P_{Lo}$  ise bağlantı boruları boyunca çok düşük bir hız olması sebebiyle ihmal edilebilir.

$$\Delta P_{90} = \frac{A_c}{A_p} 2K_{90} \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.27)$$

Dikdörtgen mikro kanallar için Steinke *et.al* (2006)  $K_{\infty}$ 'yi Eşitlik 3.28'deki gibi ifade eder;

$$K_{\infty} = 0,6796 + 1,2197\alpha + 3,3089\alpha^2 - 9,5921\alpha^3 + 8,9089\alpha^4 - 2,9959\alpha^5 \quad (3.28)$$

Eşitlik 3.26'daki  $\Delta P_i$ ,  $\Delta P_e$ ,  $\Delta P_d$  ve  $\Delta P_{90}$  değerleri yerlerine konduğunda,

$$\Delta P_n = \Delta P_m - K_i \frac{\rho_i v_i^2}{2} - K_e \frac{\rho_e v_e^2}{2} - K_\infty \frac{\rho v^2}{2} - \frac{A_c}{A_p} 2K_{90} \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.29)$$

Eşitlik 3.29 elde edilir. Çalışmada Eşitlik 3.22 ve 3.23'te ifade edildiği gibi hız ve yoğunluk verileri eşittir. Bu durumda net basınç düşüşü Eşitlik 3.30'daki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta P_n = \Delta P_m - (K_i + K_e + K_\infty + \frac{A_c}{A_p} 2K_{90}) \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.30)$$

Son olarak Reynolds sayısı da Eşitlik 3.31 ile hesaplanır.

$$\text{Re} = \frac{d v \rho}{\mu} \quad (3.31)$$

Burada  $d$  hidrolik çap,  $v$  ise hacimsel akış hızı,  $\rho$  akışkanın yoğunluğu,  $\mu$  ise akışkanın viskozitesidir.

### 3.4. Ölçüm Belirsizliği

Deneysel çalışmalarda ölçülen dataların gerçek değerleri hiçbir zaman tam olarak bilinmemektedir. Dataların ölçümündeki hataları belirleme çalışmaları ölçüm belirsizliği çalışmaları olarak adlandırılır (Owhaib 2007).

Çalışmada deneysel dataların ölçüm belirsizliği hesaplamaları, Eşitlik 3.32'ye göre hesaplanmıştır (Phillips 2008).

$$u_R = \pm \left[ \sum_{i=1}^n \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \right]^{1/2} \quad (3.32)$$

Burada,  $u_R$  R değerinin belirsizliği,  $u_{x_i}$  ise R değerinin belirlenmesini sağlayan  $x_i$  değerinin belirsizliğidir. Örneğin sürtünme katsayısı R olarak düşünöldüğünde, sürtünme katsayısının ölçüm belirsizliğini belirleyebilmek için, alınan  $x_i$  değerleri tartım, mikro tüp veya kanal hidrolik çapları ve uzunlukları ve basınç farkıdır (Phillips 2007).

Örneğin kütle transfer katsayısı R olduğunda da  $x_i$  değerleri mikro boru veya kanal ölçüleri, akım ve konsantrasyondur. Sherwood sayısı için ölçüm belirsizliği hesaplanırken ise  $x_i$  değerleri kütle transfer katsayısı, mikro boru veya kanal çapı ve difüzyon sabitidir. Çizelge 3.4'te temel parametrelerin ve hesaplanan büyüklüklerin ölçüm belirsizlikleri verilmiştir.

**Çizelge 3. 3.** Ölçüm belirsizliği değerleri

Ölçülen Özellik	Ölçüm Belirsizliği
Tartım	$\pm 0,3$ mg
Dairesel Mikro Boru/Dikdörtgen Mikro Kanal Uzunluğu	$\pm 5$ $\mu$ m
Dairesel Mikro Boru/Dikdörtgen Mikro Kanal Çapı	$\pm 5$ $\mu$ m
Dikdörtgen Mikro Kanal Elektrot Çapları	$\pm 5$ $\mu$ m
Akım	$\pm \%1,0$
Voltaj	$\pm \%0,5$
Giriş Konsantrasyonu	$\pm \%0,8$
Çıkış Konsantrasyonu	$\pm \%3,6$
Basınç Düşüşü	$\pm \%0,5$ FS
Hız	$\pm \%2,8$
Reynolds Sayısı	$\pm \%3,3$
Sürtünme Katsayısı	$\pm \%15,8$
Kütle Transfer Katsayısı	$\pm \%5,1$
Difüzyon Katsayısı	$\pm \%1,69$
Sherwood Sayısı	$\pm \%7,3$

#### **4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR**

Çalışma sonucunda; mikro boru ve kanallarda sürtünme katsayısı, basınç düşüşü, ayrıca kütle transferi değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler çalışmanın bu kısmında sırasıyla önce mikro borular için daha sonrada mikro dikdörtgen kanallar için sunulacaktır.

##### **4.1. Basınç Düşüşü ve Sürtünme Faktörü**

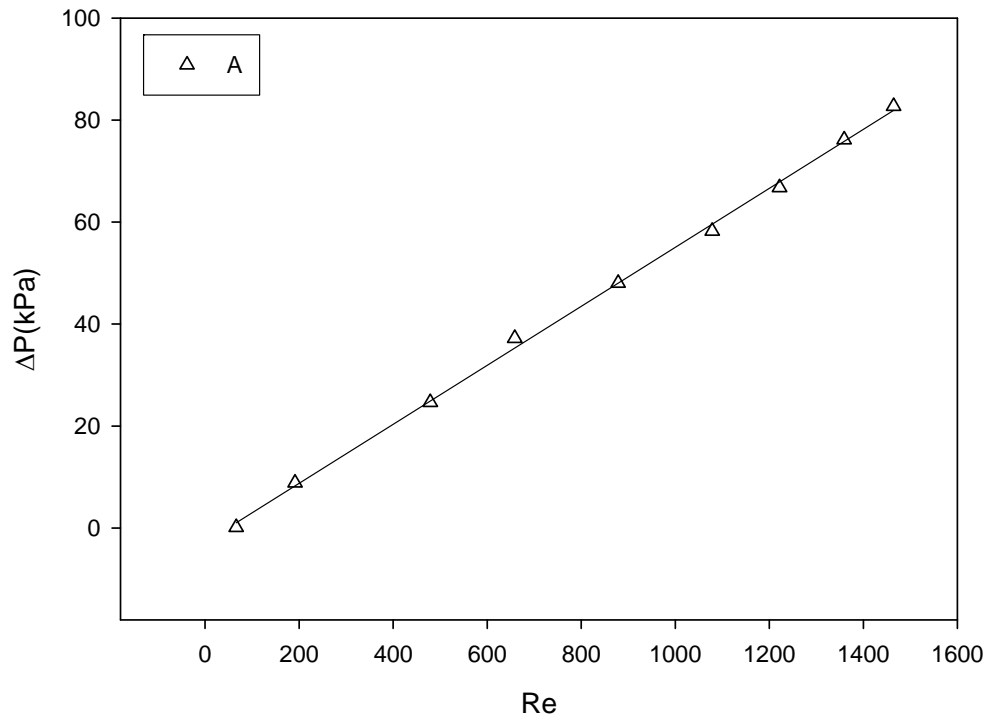
Çalışmanın bu kısmında mikro borular ve dikdörtgen mikro kanallarda basınç ölçümünde elde edilen sonuçlar mikro borular ve mikro kanallar için ayrı alt başlıklar halinde sunulacaktır.

###### **4.1.1. Dairesel mikro borularda akışta basınç düşüşü ve sürtünme faktörü**

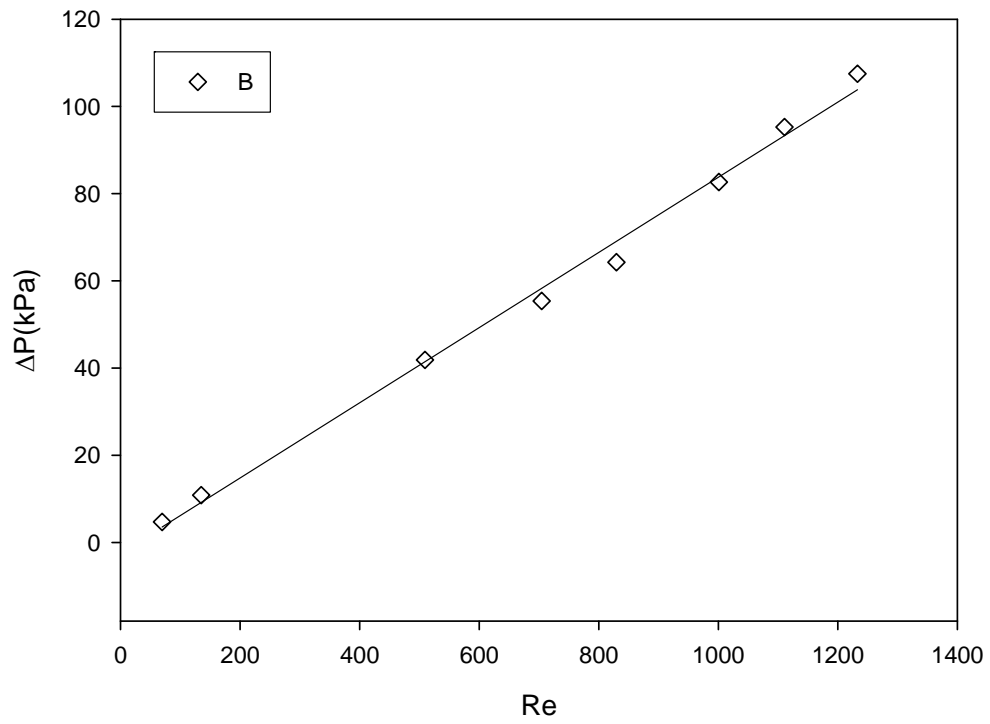
Basınç düşüşü ölçümleri için çalışma çözültisi olarak saf suyun kullanıldığı daha önce belirtilmiştir. Mikro boruda akışın her akış hızında kararlı hale gelmesinden sonra, basınç ölçümüne başlanmış ve 10-1 500 Reynolds sayısı aralığında çalışılmıştır. Basınç düşüşü ölçüldükten sonra Eşitlik 3.24 kullanılarak net basınç düşüşü hesaplanmıştır.

Her mikro boru için ayrı ayrı; basınç düşüşüne karşılık Reynolds sayısı grafikleri Şekil 4.1'de Ayrıca tüm mikro borular için basınç düşüşünün boru uzunluğuna oranına karşı Reynolds sayısı grafiği Şekil 4.2'de sunulmuştur.

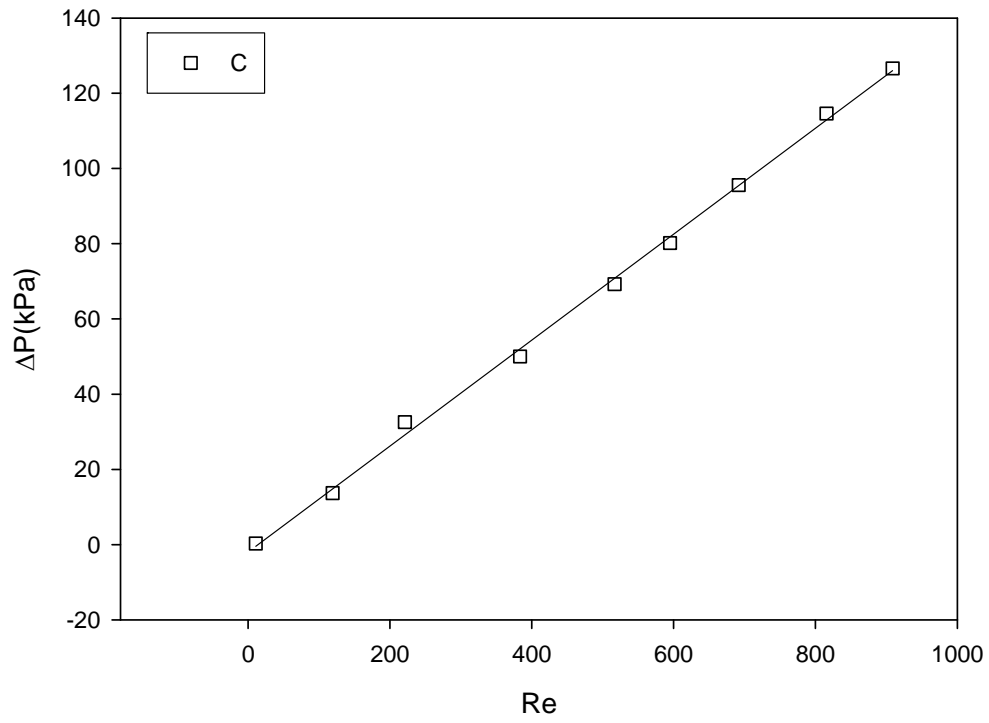
Şekil 4.1'de görülmekte olan basınç düşüşüne karşılık Reynolds sayısı grafiklerinde tüm mikro borularda, laminar akış koşulları için geleneksel teoride olduğu gibi basınç düşüşünün Reynolds sayısının artışı ile lineer olarak arttığı görülmektedir. Yine geleneksel teori ile uyumlu olarak, boru boyu arttıkça basınç düşüşü de artmıştır.



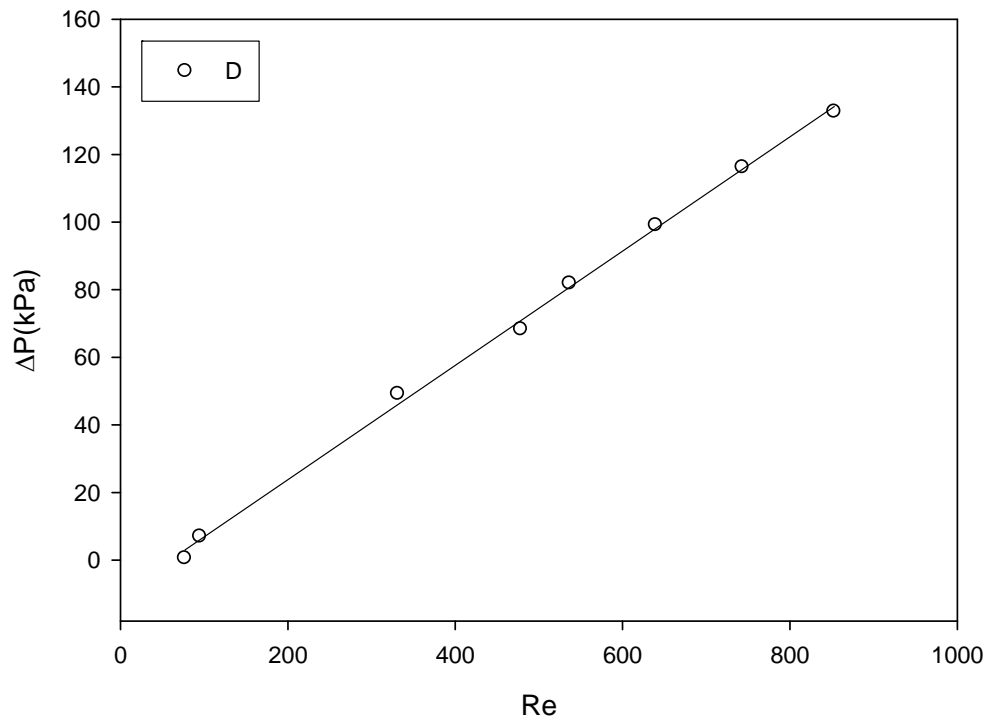
(a)



(b)

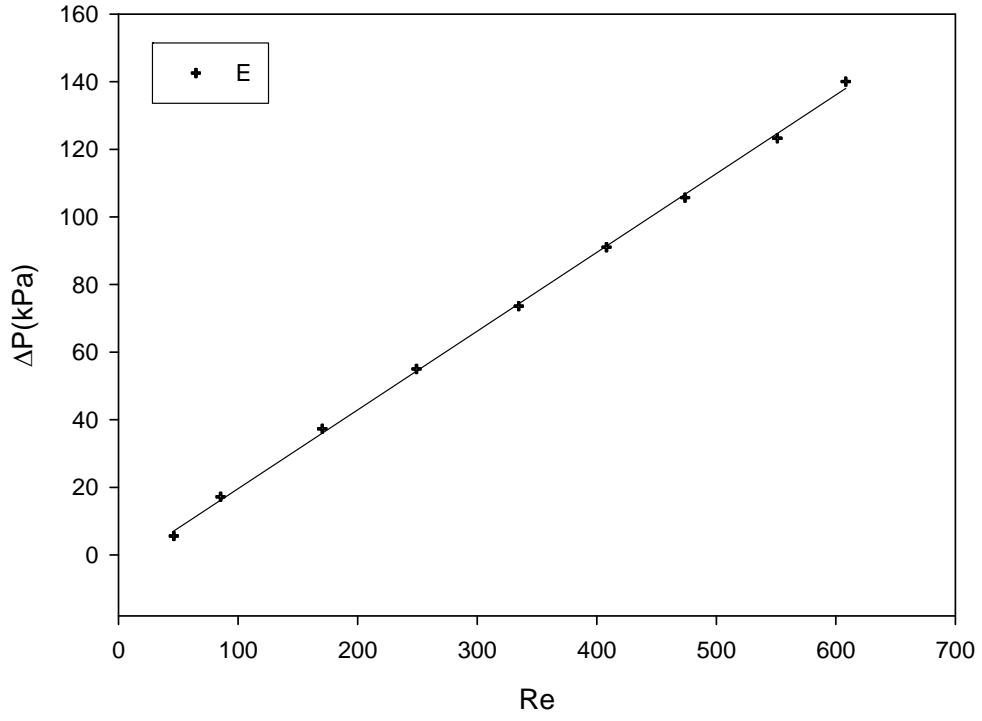


(c)

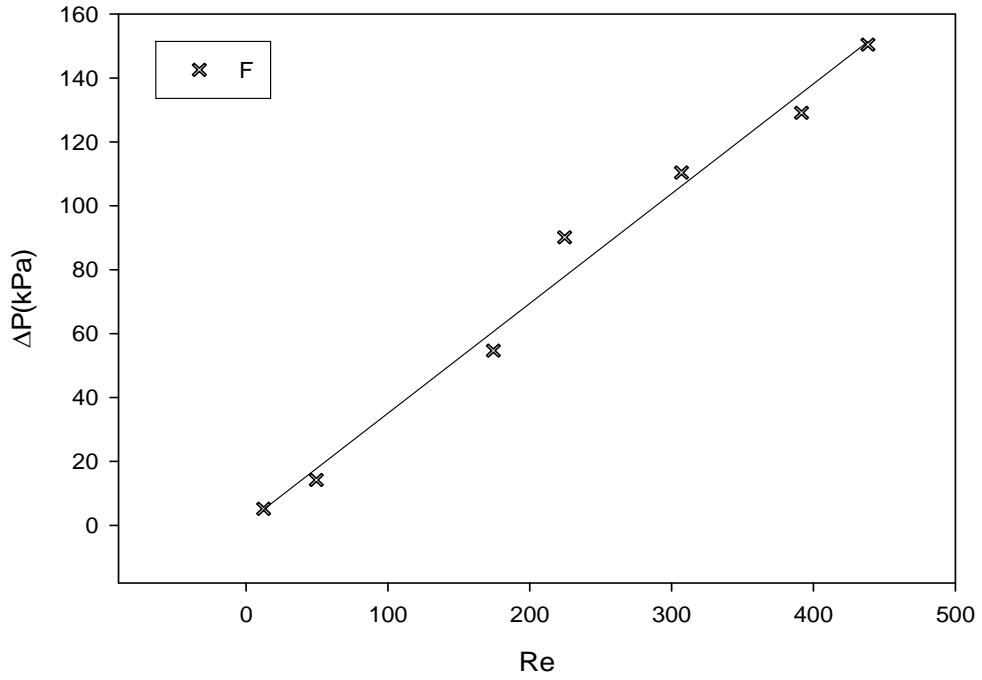


(d)



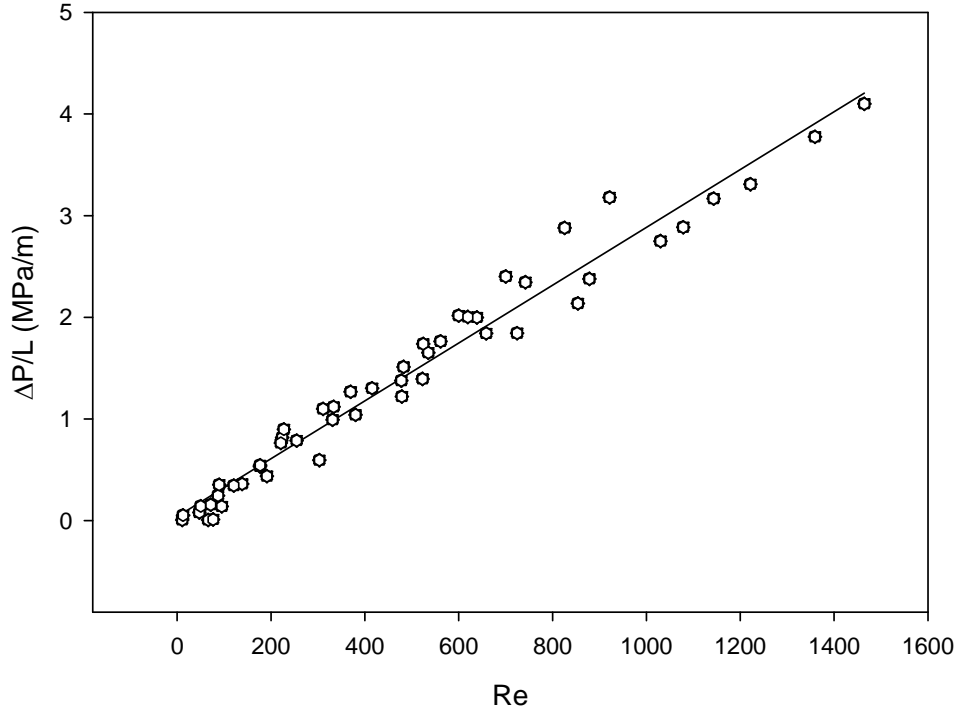


(e)



(f)

**Şekil 4.1.** Dairesel mikro borular için  $\Delta P$ -Re grafikleri

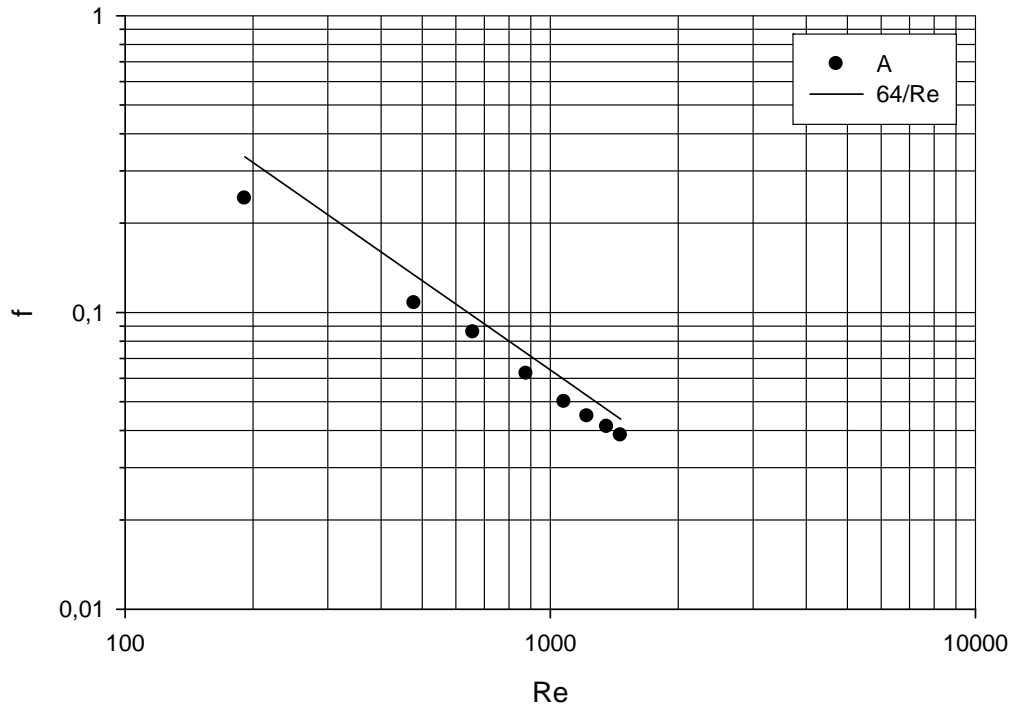


**Şekil 4.2.** Dairesel mikro borular için  $\Delta P/L$ -Re grafiği

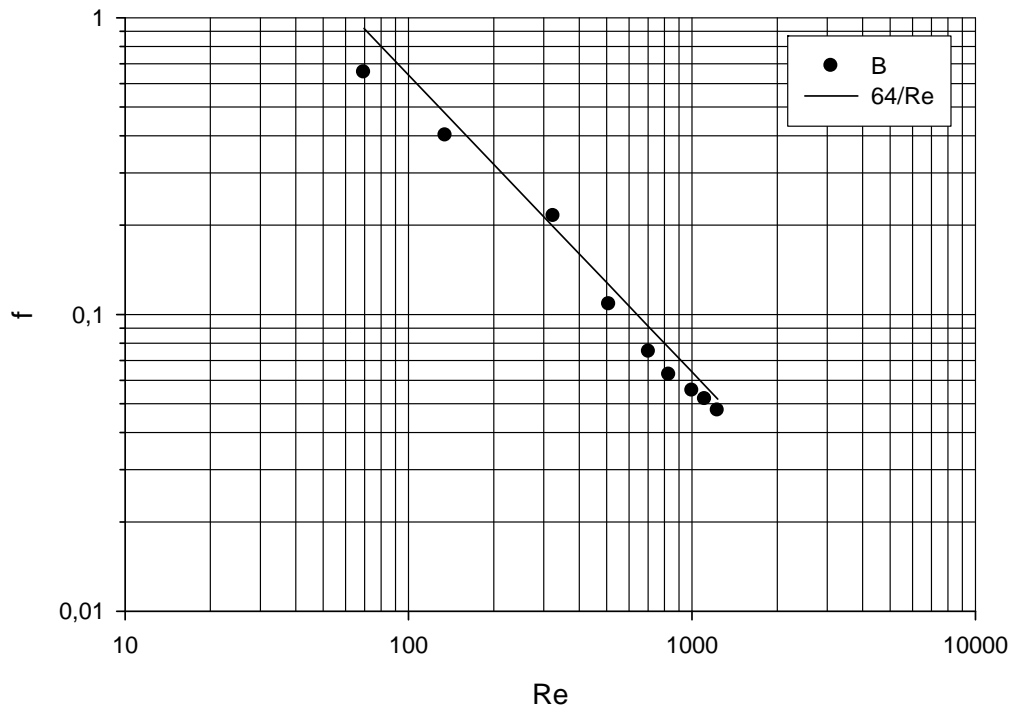
Şekil 4.2’de farklı  $L/d$  oranları için  $\Delta P/L$  değerinin Reynolds sayısına karşılık, deneysel belirsizlik aralığında aynı doğru üzerine düştüğü görülmektedir. Deneysel verilerin regresyonu ile aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir. Görüldüğü gibi Reynolds sayısının üssü Poiseuille akış için geçerli olan bir değerine yakındır.

$$\frac{\Delta P}{L} = 0,0017513 \text{ Re}^{1,12} \quad r^2 = 0,9789 \quad (4.1)$$

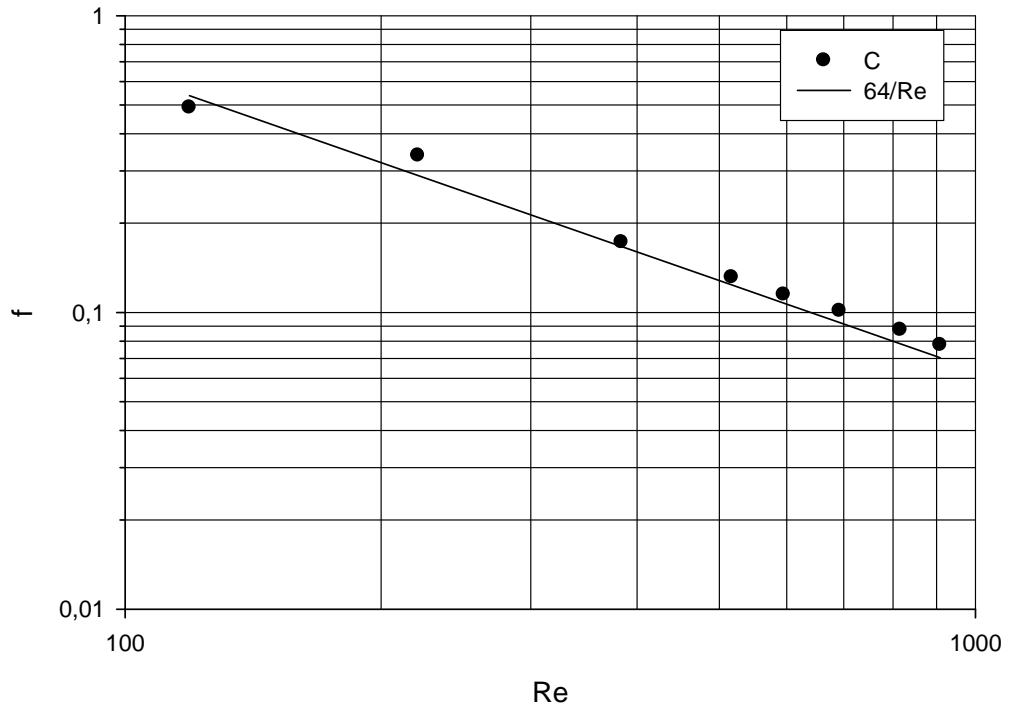
Eşitlik 3.14 yardımı ile sistemdeki net basınç düşüşü sürtünme faktörüne dönüştürülmüştür. Şekil 4.3’te her mikro boru için Reynolds sayısına karşılık sürtünme katsayısı grafikleri sunulmuştur. Ayrıca, karşılaştırma için grafiklerde geleneksel teoride tam gelişmiş laminer akış için geçerli olan  $64/Re$  ifadesinden elde edilen sürtünme faktörü değeri de verilmiştir. A ve B boruları için sürtünme faktörü değerleri teorik değerlerin altında görülmektedir. Ancak bu standart sapma deneysel belirsizlik aralığındadır.



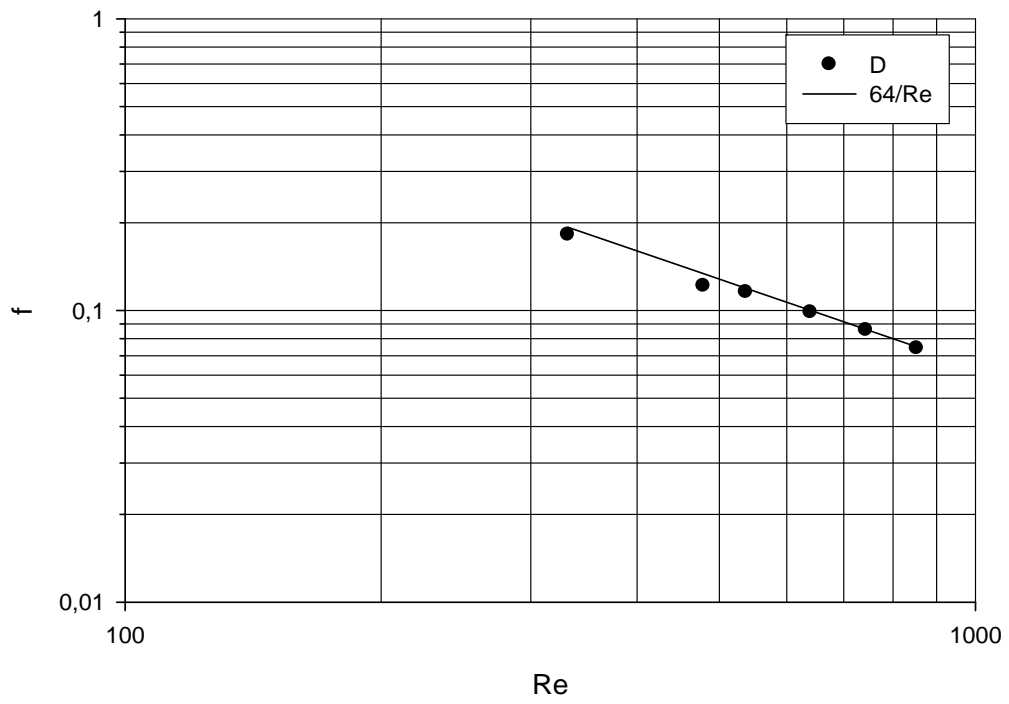
(a)



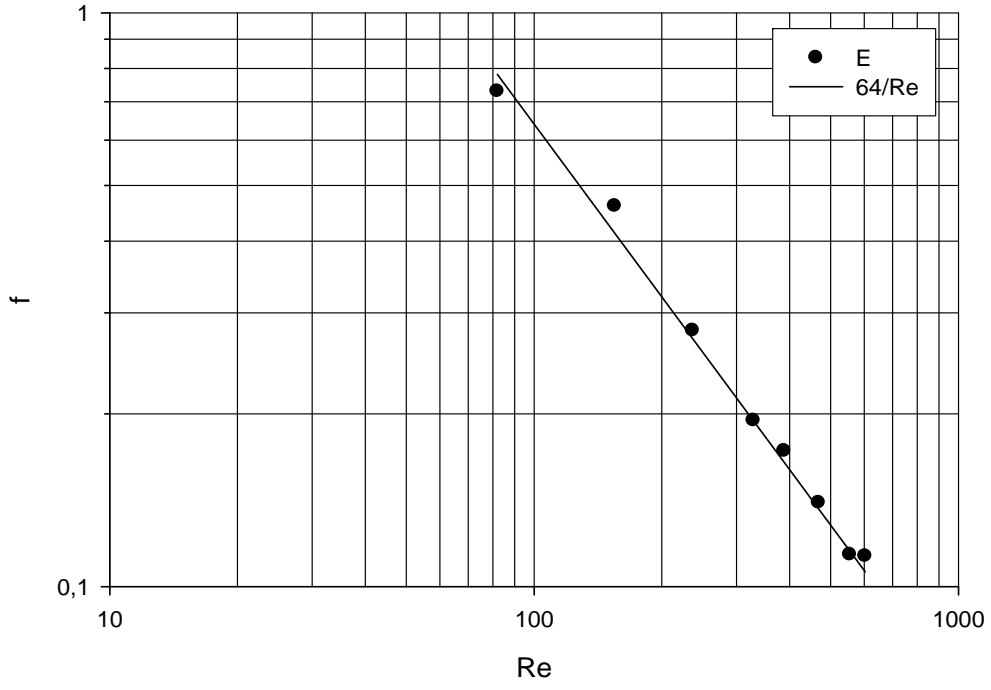
(b)



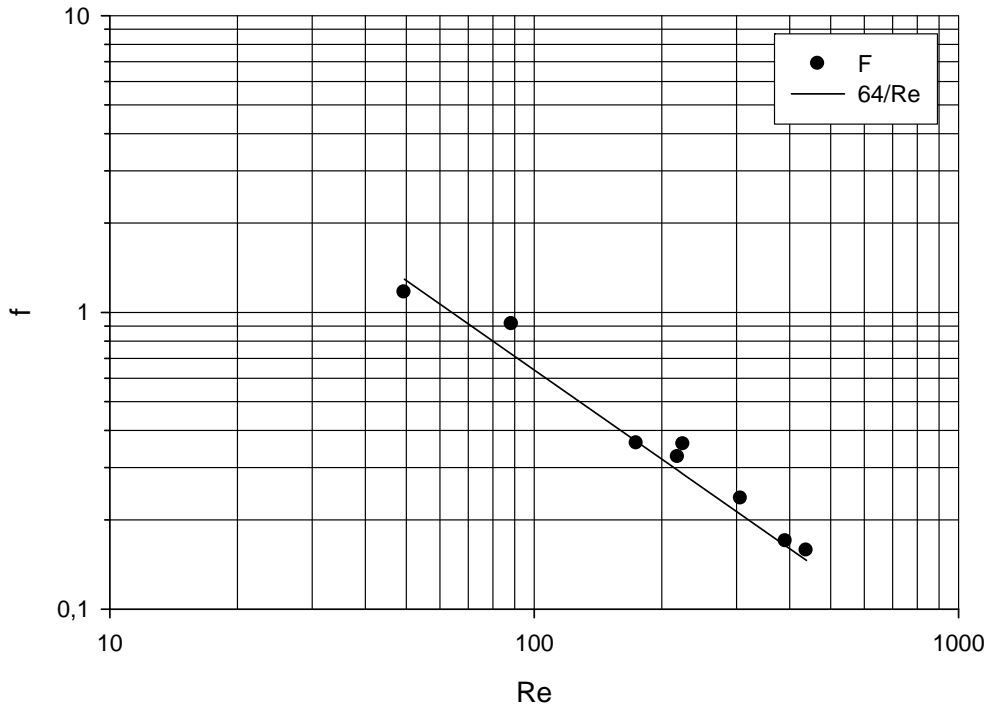
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.3. Dairesel mikro borular için  $f$ - $Re$  grafiği

Yine ilk ölçülen veri noktalarındaki sapmanın daha büyük olduğu görülmektedir. Ölçülebilecek en düşük akış hızını sağlamak için sürükleyici gazın basıncı düşük tutulmaktadır, bu koşullarda kararlı akış sağlama zorluğu yanında düşük basınç değerleri için basınç ölçüm belirsizliği de artmaktadır. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi geleneksel laminar tam gelişmiş akış davranışına uymaktadır. Tüm test boruları için incelenen Re aralığı için türbülent akışa geçiş davranışı görülmemektedir. Sürtünme faktörü değerleri Reynolds sayısının artışı ile lineer olarak azalmaktadır.

#### 4.1.2. Dikdörtgen mikro kanallarda akışta basınç düşüşü ve sürtünme faktörü

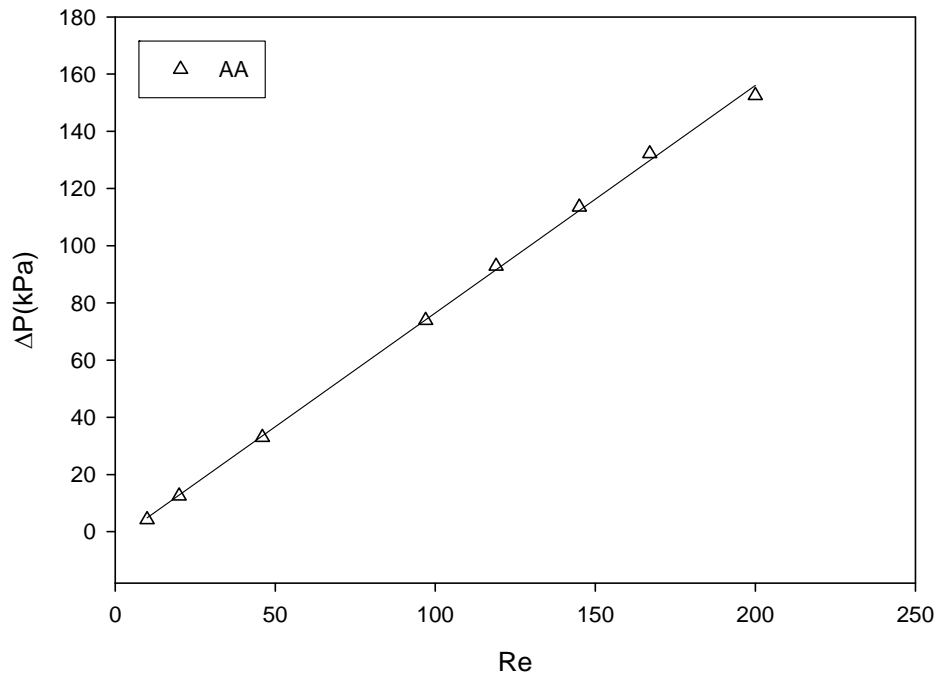
Basınç düşüşü ölçümleri için çalışma çözeltisi olarak saf su kullanılmıştır. Mikro kanallarda akışın her akış hızında kararlı hale gelmesinden sonra, basınç ölçümüne başlanmış ve 5-100 Reynolds sayısı aralığında çalışılmıştır. Basınç düşüşü ölçüldükten sonra Eşitlik 3.30 kullanılarak net basınç düşüşü hesaplanmıştır.

Her dikdörtgen mikro kanal için ayrı ayrı; basınç düşüşüne karşılık Reynolds sayısı grafikleri Şekil 4.4'te, ayrıca tüm mikro kanallar için  $\Delta P/L$  - Re Şekil 4.5'te sunulmuştur.

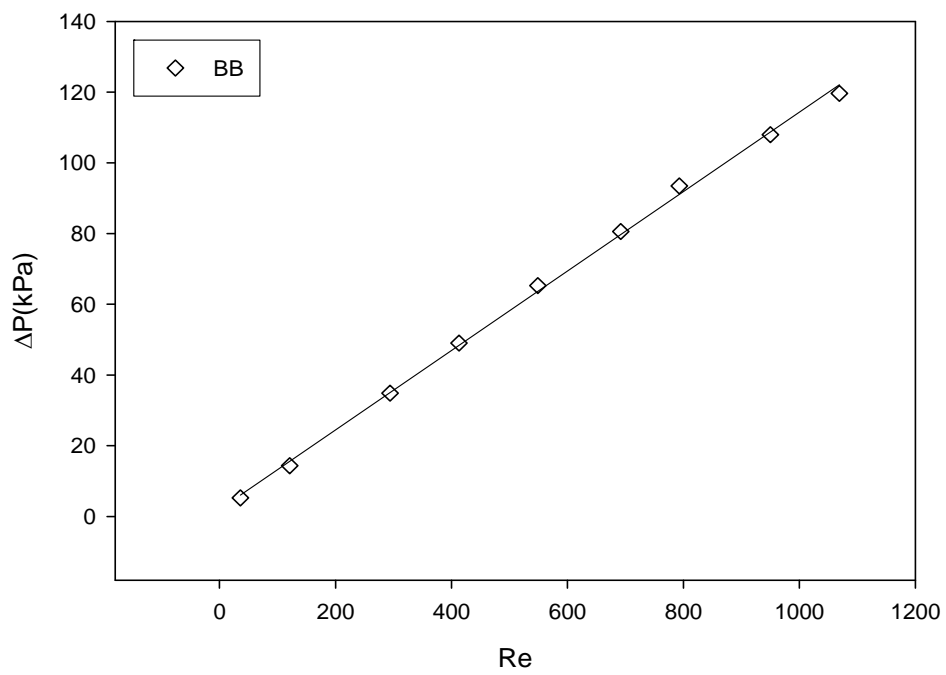
Şekil 4.4'te görülmekte olan basınç düşüşüne karşılık Reynolds sayısı grafiklerinde tüm mikro kanallarda, geleneksel teoride olduğu gibi basınç düşüşünün Reynolds sayısının artışı ile lineer olarak arttığı görülmektedir.

Şekil 4.5'e bakıldığında yine,  $\Delta P/L$  değerleri deneysel belirsizlik aralığında aynı doğru üzerine düşmektedir. Deneysel verilerin regresyonu ile aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir. Görüldüğü gibi Reynolds sayısının üssü yine 1 değerine çok yakındır. Değerlerin elde edilen doğrudan fazla sapma göstermesinin sebebi kanallarda genişlik-yükseklik oranının farklı olmasıdır.

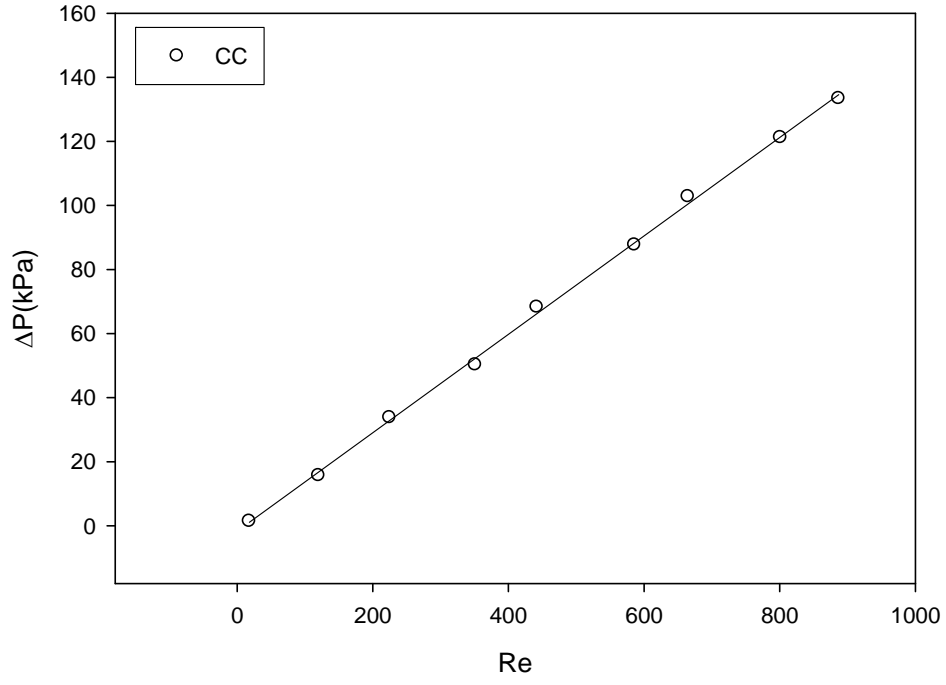
$$\frac{\Delta P}{L} = 0,003751 \text{Re}^{1,02} \quad r^2 = 09951 \quad (4.2)$$



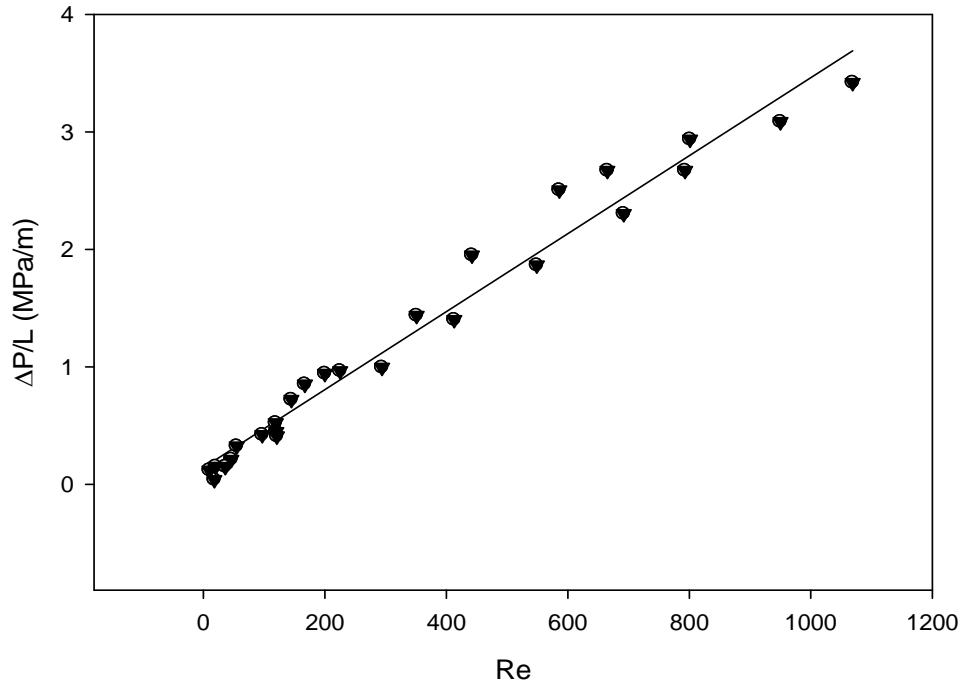
(a)



(b)



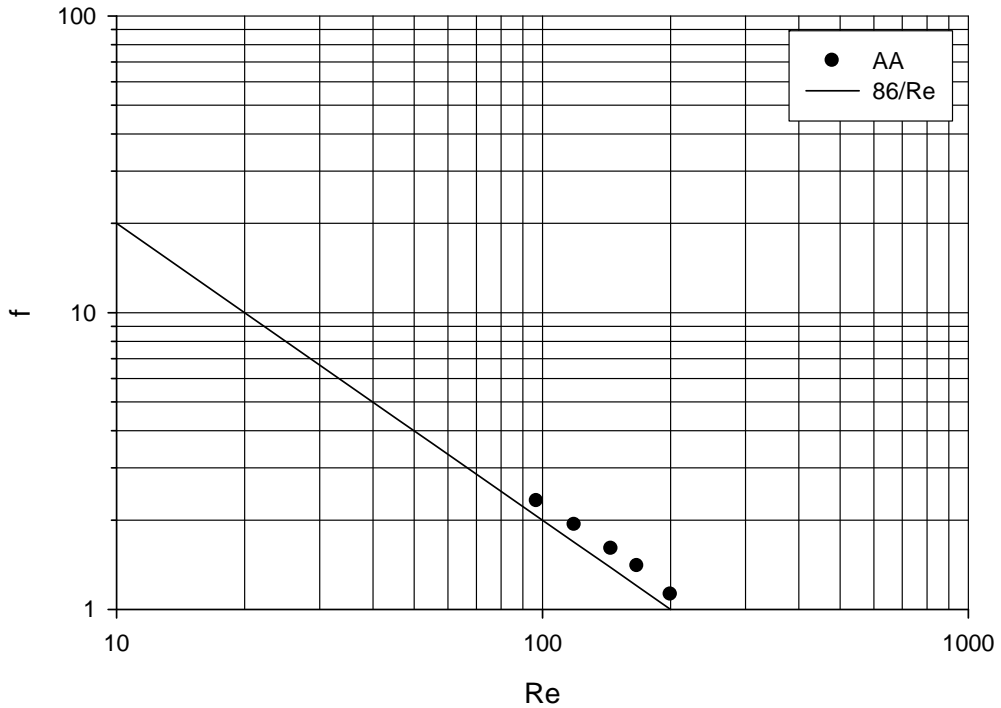
(c)

Şekil 4.4. Dikdörtgen mikro kanallar için  $\Delta P$ -Re grafikleriŞekil 4.5. Tüm dikdörtgen mikro kanallar için net  $\Delta P/L$ -Re grafiği

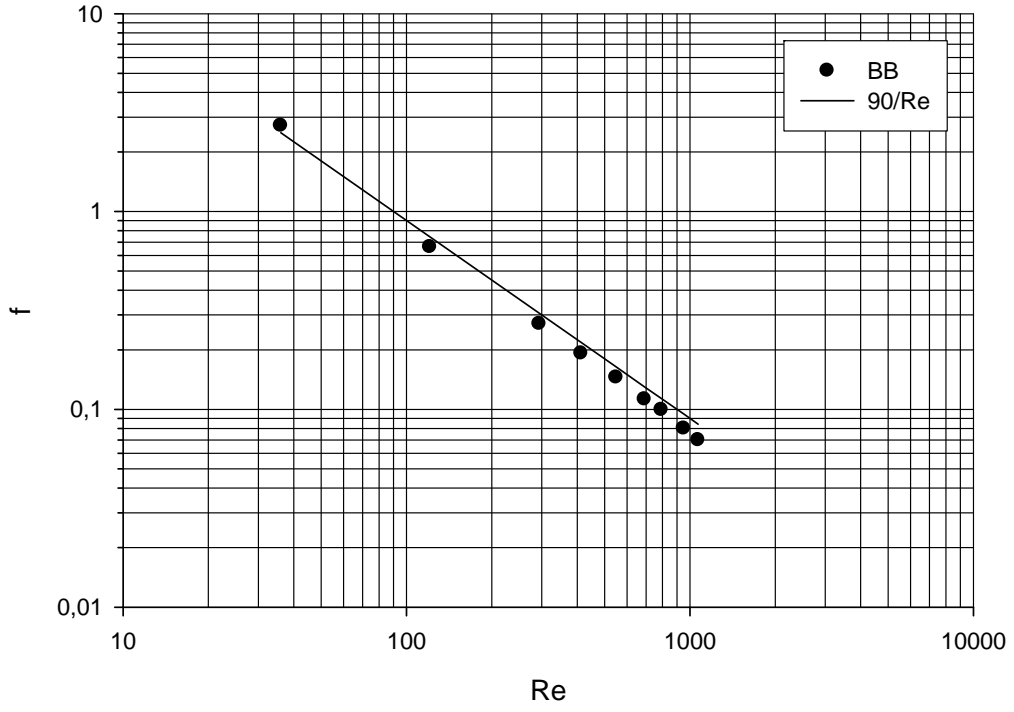


Eşitlik 4.2'de  $\Delta P/L$ 'nin birimi MPa/m'dir. Hesaplanan net basınç düşüşü değerleri Eşitlik 3.14 kullanılarak sürtünme faktörüne dönüştürülmüştür. Şekil 4.6'da mikro kanal için sürtünme katsayısına karşılık Reynolds sayısı grafikleri sunulmuştur. Karşılaştırma yapmak amacı ile makro kanallar için önerilen Eşitlik 2.3 yardımı ile hesaplanan sürtünme katsayıları da ayrıca grafikler üzerinde gösterilmiştir.

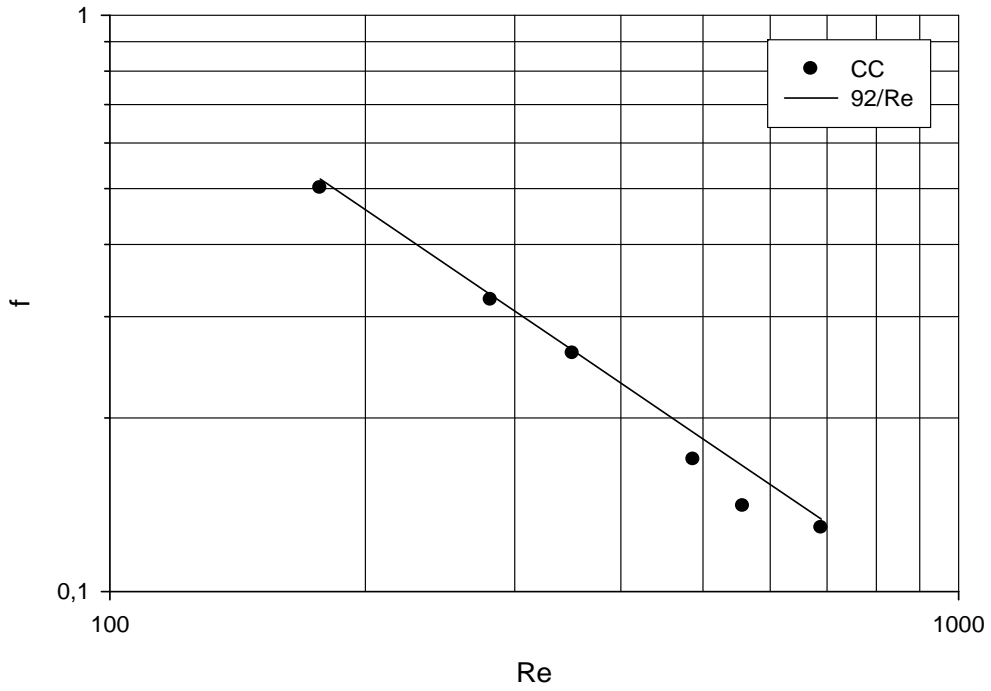
Sürtünme faktörü değerleri de Reynolds sayısının artışı ile lineer olarak azalmaktadır. AA kanalı için deneysel değerlerin hesaplanan teorik değerlerden büyük olduğu görülmektedir. Kanal boyutları küçüldükçe yüzey büzülüşünün ve kanal geometrisindeki düzensizliklerin etkisi de artmaktadır. Yüksek sürtünme faktörü değerlerinin sebebi bu olabilir.



(a)



(b)

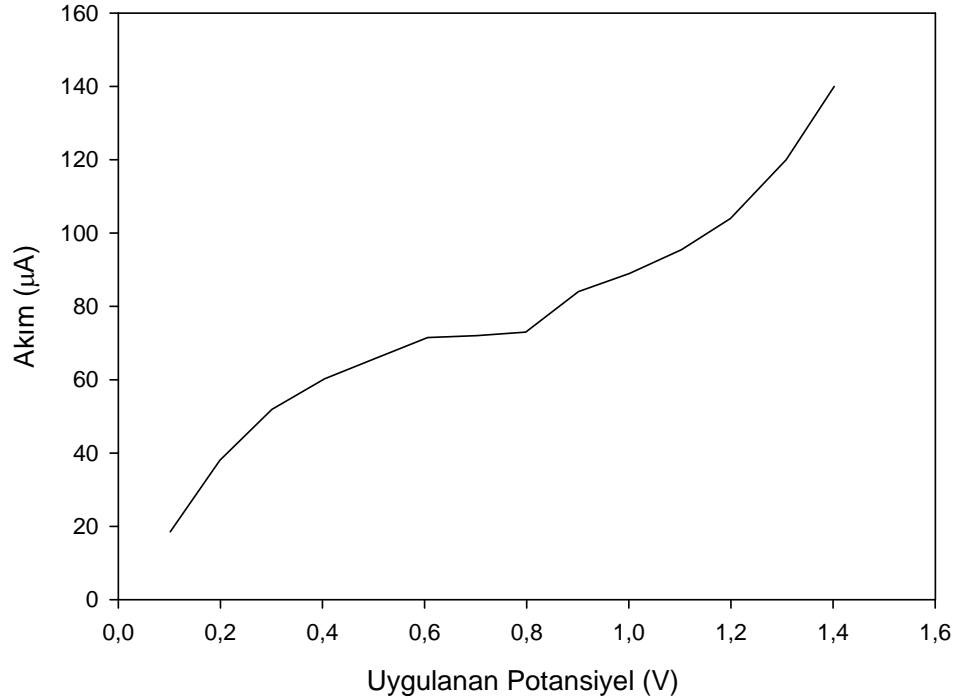


(c)

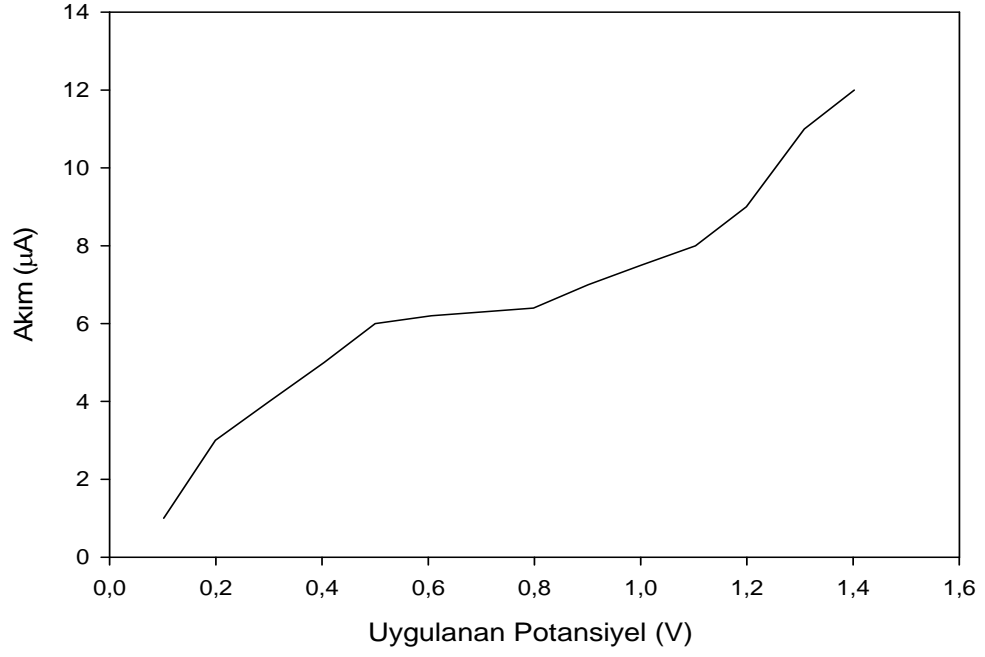
Şekil 4. 6. Dikdörtgen mikro kanallar için f-Re grafiği

## 4.2. Kütle Transferi

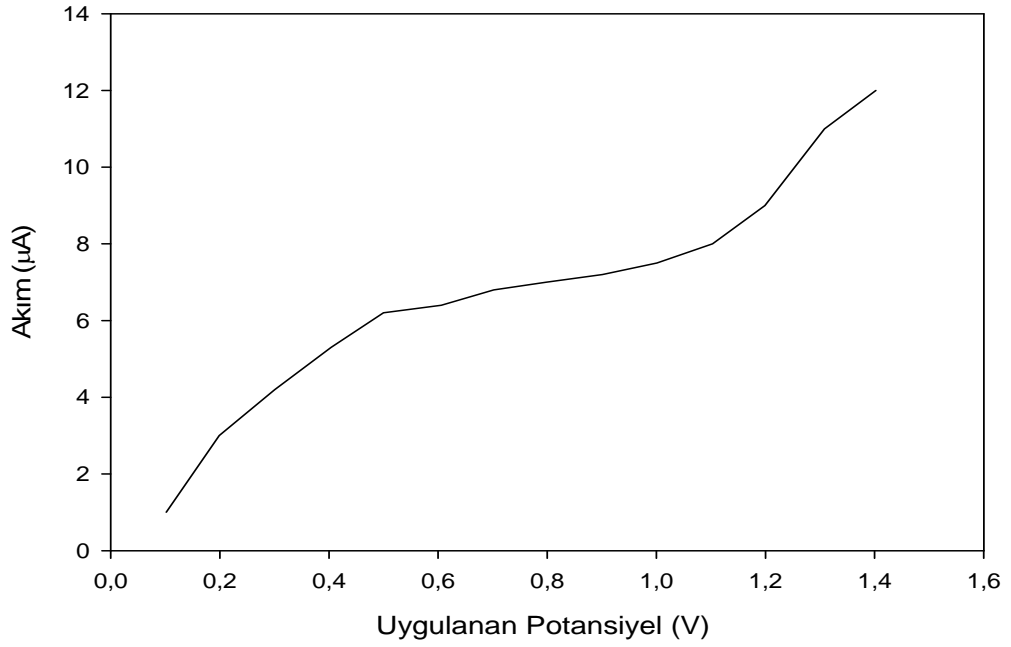
Çalışmada kütle transferi ölçümlerinde ilk olarak sınırlayıcı akım belirlenmiştir. Şekil 4.7’de dairesel borular ve dikdörtgen kanallar için akım-potansiyel grafiği verilmiştir. Ancak dikdörtgen kanallarda akım ölçümleri birden fazla yerel elektrot ile yapıldığında burada örnek olarak sadece bir elektrot için sunulmuştur. Görüldüğü gibi 0,6-0,8 V arasında artan voltaja rağmen akım neredeyse sabit kalarak bir plato oluşturmaktadır. Sınırlayıcı akım değeri olarak bu platonun ortalarına isabet eden 0,7 V değeri alınmıştır.



(a) Dairesel boru



(b) Dikdörtgen kanal 14. elektrot



(c) Dikdörtgen kanal 22. elektrot

**Şekil 4.7.** Kütle transferi çalışmaları için sınırlayıcı akım

Çalışmanın bu kısmında mikro borular ve dikdörtgen mikro kanallarda kütle transferi ölçümünde elde edilen sonuçlar mikro borular ve mikro kanallar için ayrı alt başlıklar halinde sunulacaktır.

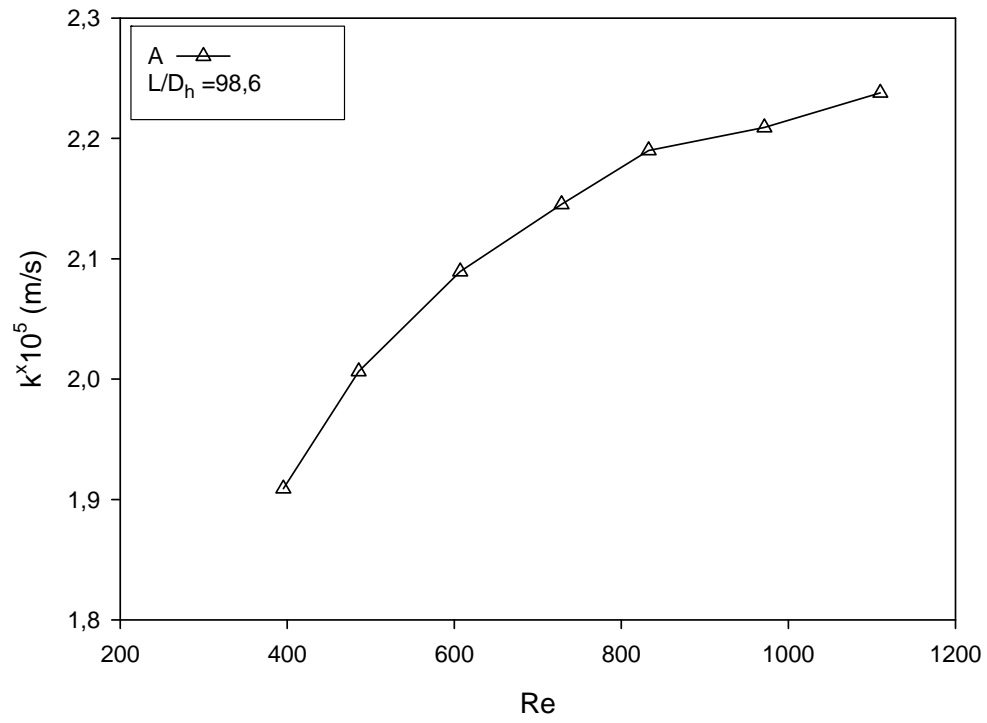
#### 4.2.1. Dairesel mikro borularda kütle transferi

Tüm mikro borularda kütle transferi ölçümü deneyleri için çalışma çözeltisi olarak Ferri-ferrosiyandır çözeltisi kullanılmıştır. Kütle transferi ölçümlerinde 20-1 210 Reynolds sayıları arasında çalışılmıştır. Mikro borularda kütle transferinin gerçekleştiği alan mikro borunun iç yüzey alanıdır.

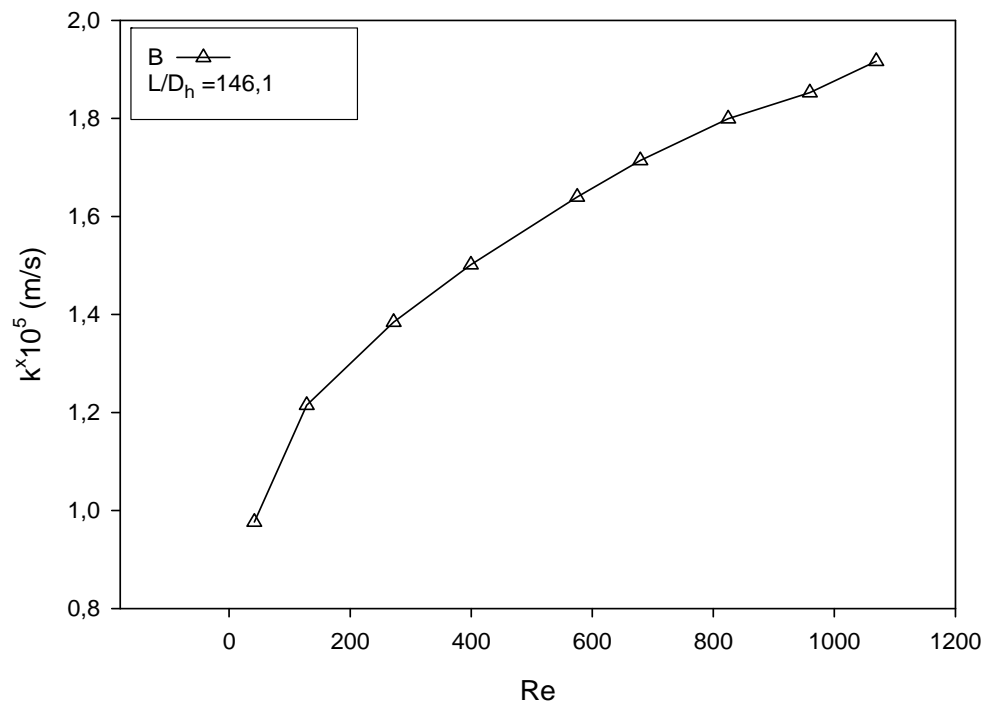
Deneysel çalışma sonucunda elde edilen sınırlayıcı akım değerleri Eşitlik 3.10'da gösterildiği gibi kütle transfer katsayısına dönüştürülmüştür. Şekil 4.8'de farklı L/d oranlarındaki mikro borular için kütle transfer katsayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi görülmektedir. Tüm mikro borularda, makro borularda görüldüğü gibi kütle transfer katsayısı Reynolds sayısının artışı ile artmakta ve de boru boyunun artışı ile azalmaktadır. Kütle transfer katsayıları Reynolds sayısı ve L/d oranına bağlı olarak  $3 \times 10^{-6} - 2,4 \times 10^{-5}$  (m/s) aralığında değişmektedir.

Bilindiği gibi boru içerisindeki akışta boru girişinden itibaren kütle aktarım katsayısı aksel mesafe ile azalmakta tam gelişmiş akış koşullarında belli bir değer almaktadır. Bu değer yüzeyde sabit konsantrasyon veya sabit akı sınır koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Dairesel borularda laminer akış için termal giriş uzunluğu  $L_{th} = 0,05 Re Pr d$  denklemi ile verilmektedir. (Incropera ve Dewitt 2001). Bu koşul  $Pr$  yerine  $Sc$  konularak kütle transferi içinde kullanılabilir. Modifiye edilen bu koşul bu çalışmaya uygulandığında kütle giriş uzunluğu giriş bölgesinde kalmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada ölçülen kütle aktarım katsayıları giriş bölgesinde olup kütle transferi açısından tam gelişmiş akış sağlanmamaktadır.

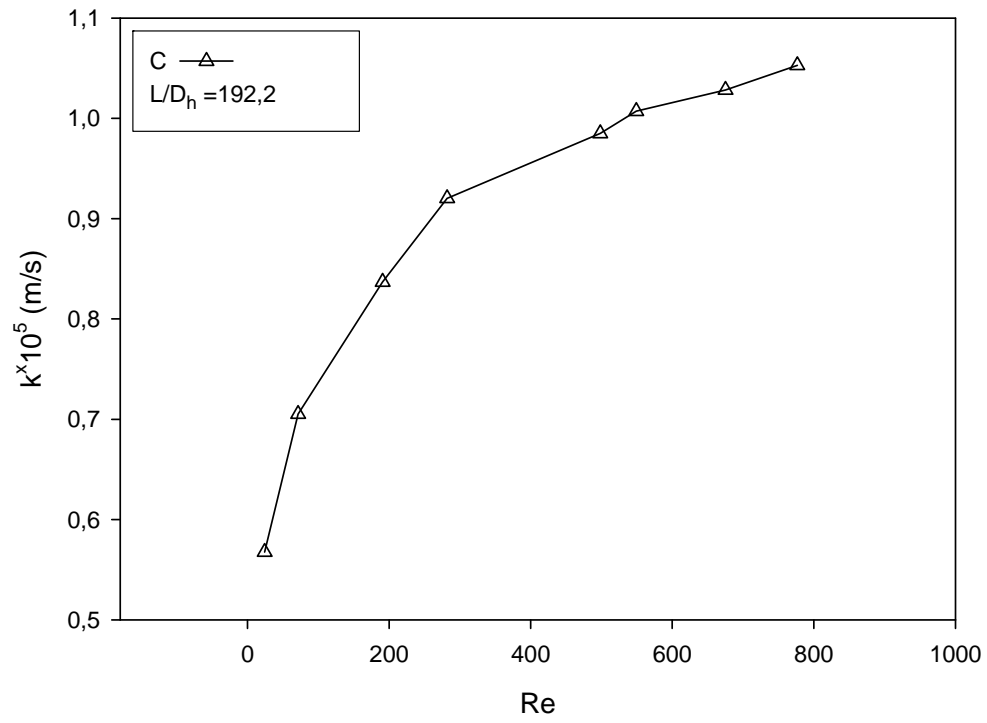
Elde edilen kütle transfer katsayısı Eşitlik 3.13. kullanılarak Sherwood sayısına dönüştürülmüştür. Şekil 4.9'da dairesel mikro borular için ortalama Sherwood sayısının Reynolds sayısı ile değişimi farklı boru uzunlukları için görülmektedir.



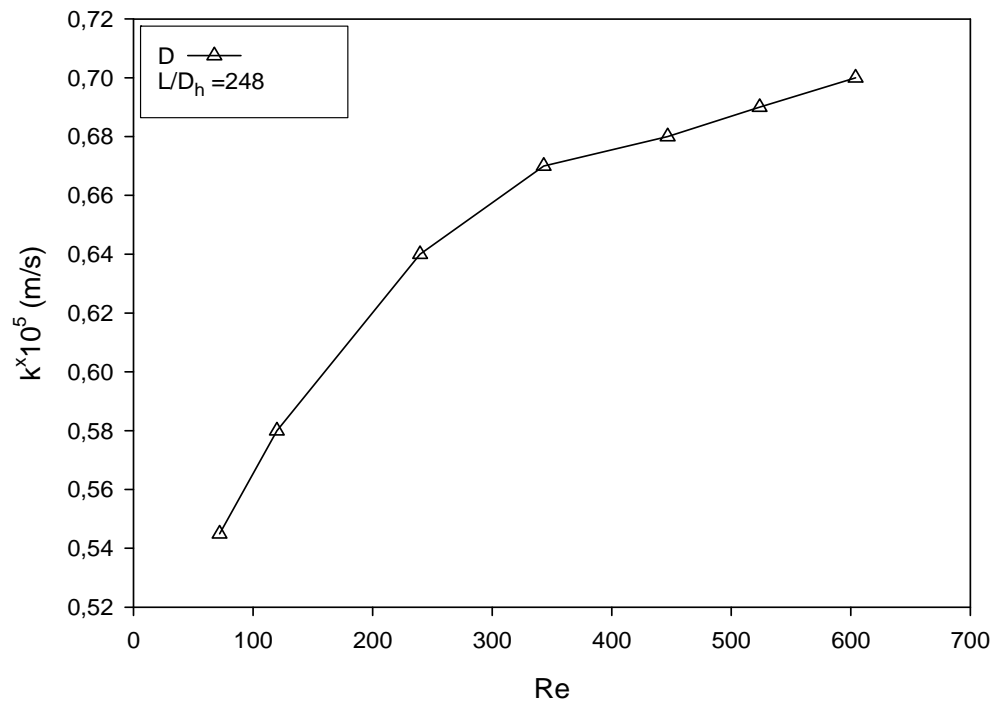
(a)



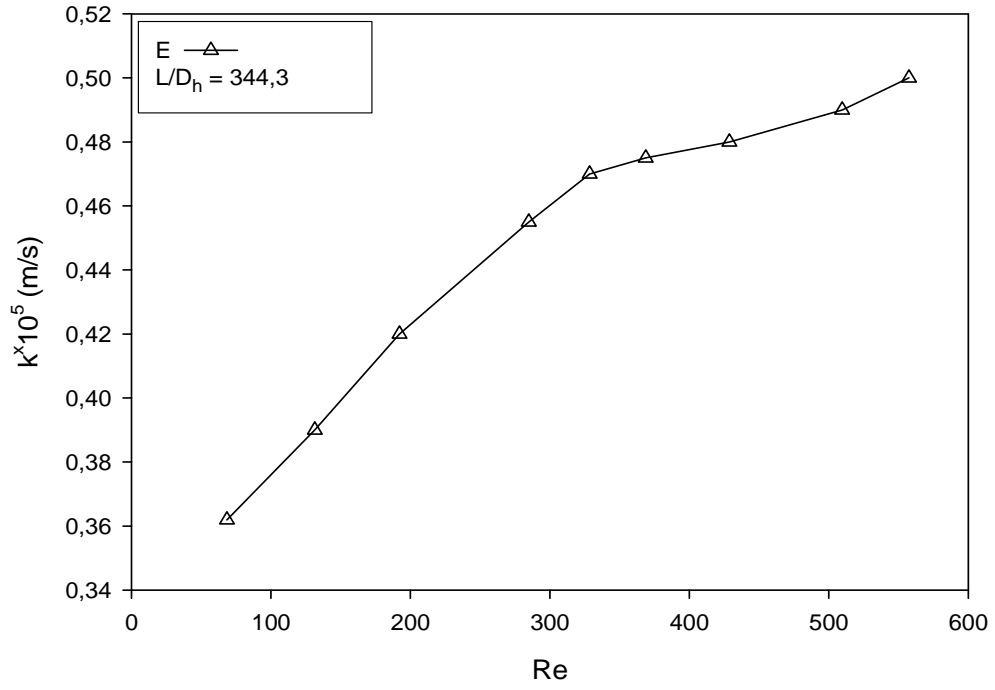
(b)



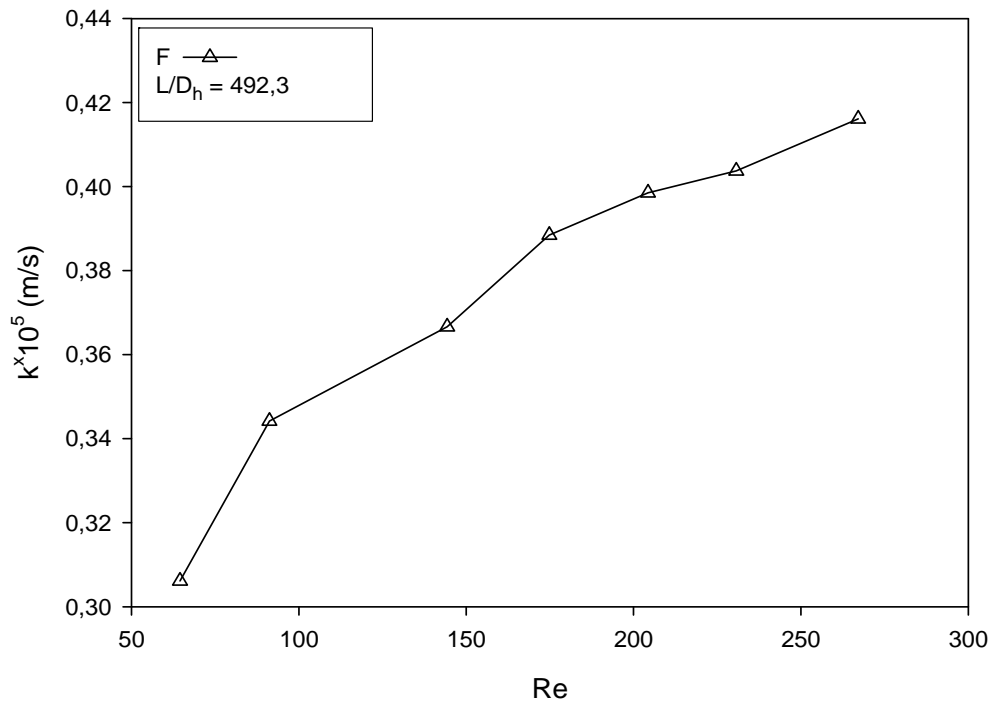
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.8. Dairesel mikro borular için k-Re grafikleri



Ortalama Sherwood sayıları Reynolds sayısı ile artmaktadır. Sherwood sayısının Reynolds sayısı ile değişimi  $\alpha Re^a$  şeklinde ifade edildiğinde a değerleri 0,15-0,22 aralığında değişmektedir.

Şekil 4.10.a'da Sherwood sayılarının L/d oranına göre değişimi grafik edilmiştir. Görüldüğü gibi L/d oranının artması ile Sh değerleri azalmaktadır. Laminer termal olarak gelişmekte olan akışta sabit yüzey sıcaklığı için Nusselt sayısı için önerilen yaygın korelasyonlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Burada  $(RePr/L/d)$  Graetz sayısı olarak adlandırılır.

Bu çalışmada Sherwood sayıları yukarıda verilen formda Pr yerine Sc kullanılarak benzer formda korale edilmek istenmiş, ancak regresyon katsayısı düşük çıkmıştır. Şekil 4.11.b'de ortalama Sherwood sayılarının Graetz sayısı ile değişim grafiği görülmektedir. Deneysel verilere uygun en iyi korelasyon aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Sh = 0,93 + 7,46.10^{-4} Gz - 2,37.10^{-8} Gz^2 \quad r^2 = 0,8730 \quad (4.3)$$

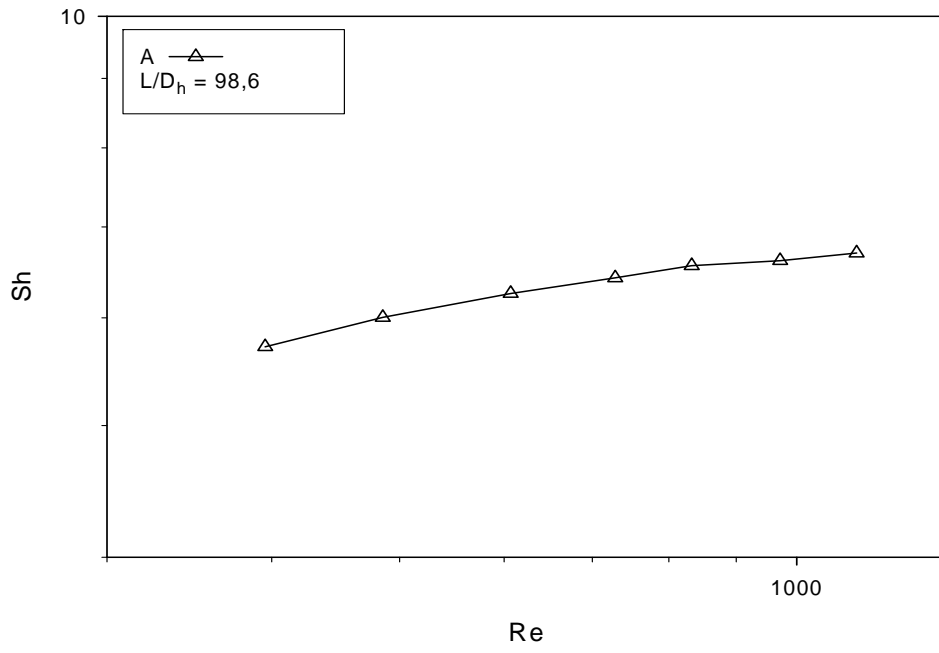
Çizelge 4.1'de verilen ve makro kanallarda ısı transferi için önerilen, Eşitlik 4.4. ve Eşitlik 4.6. korelasyonlarında Pr yerine Sc konularak hesaplanan Sh değerleri ile deneysel Sh değerleri karşılaştırıldığında deneysel verilerin daha düşük olduğu görülmektedir. Basınç düşüşü sonuçlarının makro kanal sonuçları ile uyuşmasına rağmen kütle transferi sonuçlarının yukarıda belirtilen korelasyonlarla hesaplanan değerlerden düşük çıkması ilginçtir. Bunun muhtemel sebeplerinden bir tanesi tam bir karşılaştırma yapılabilirliğinin zorluğudur. Giriş bölgesinde giriş etkileri akışkan hız profili gibi faktörler kütle/ısı transferini önemli ölçüde etkilemektedir.

Birçok araştırmacı mikro kanallarda laminer akış için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile arttığı ve Reynolds sayısının üssü 0,3-1,96 arasında değiştiğini belirtmiştir. Bunun yanında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile azaldığını bildiren çalışmalarda vardır. Makro kanal eşitlikleri ile karşılaştırıldığında Nusselt sayılarının büyük, eşit ve küçük şeklinde farklı sonuçlar bildirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuç Nusselt

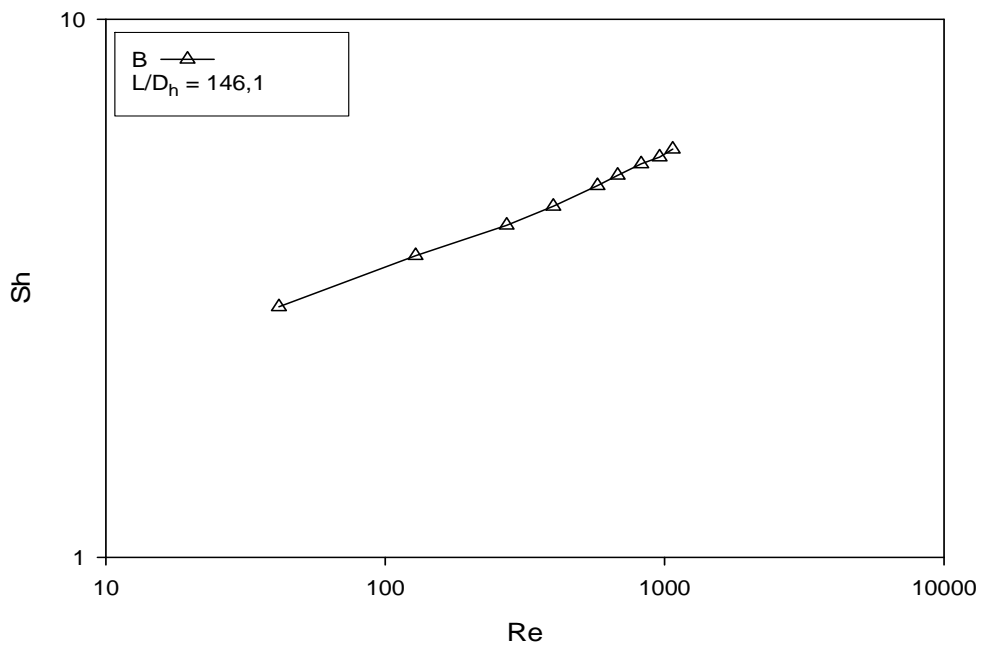
sayılarının makro kanal eşitliklerine göre küçük olduğunu desteklemektedir. Nusselt sayılarının Sherwood sayıları ile paralelliği düşünüldüğünde Sherwood sayılarının da makro kanal eşitliklerine göre düşük olduğu görülür. Ancak sınırlı veriler ile bu davranışın mikro kanlar için karakteristik olduğunu söylemek güçtür. İlave çalışmalar gerekmektedir (Khan and Fartaj 2010).

**Çizelge 4.1.** Laminer akışta gelişmekte olan akış için ısı/kütle transferi korelasyonları

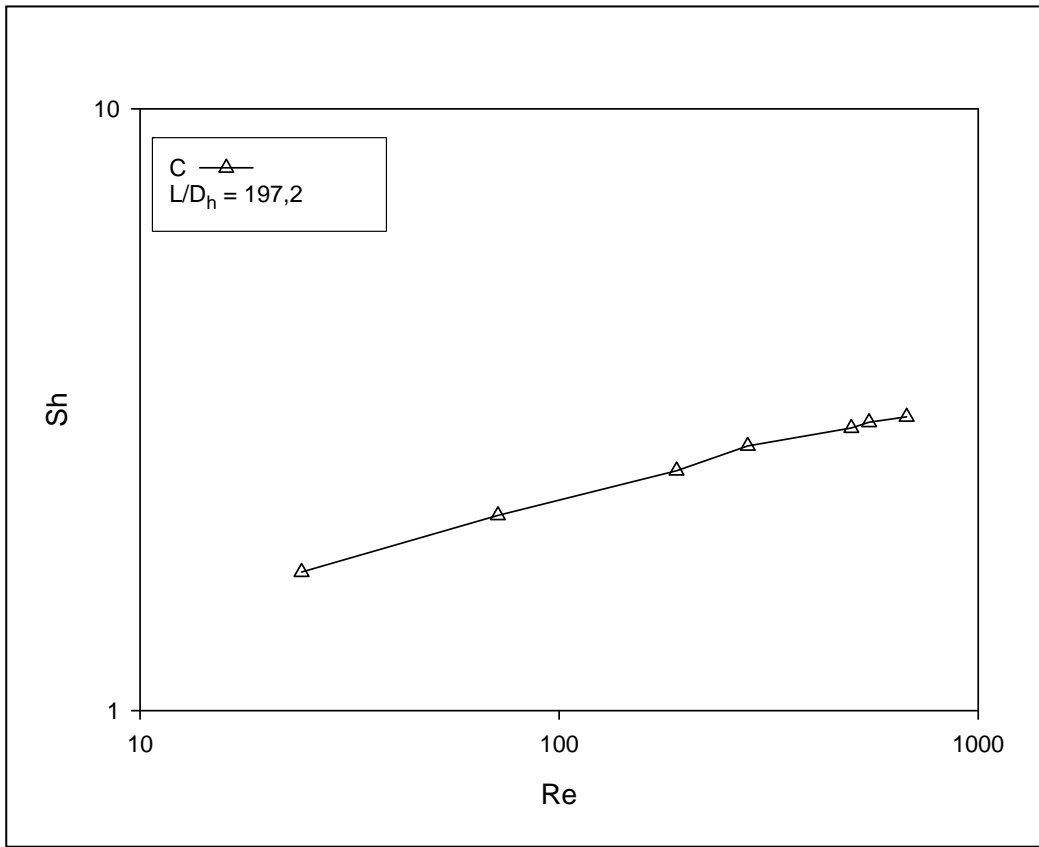
Korelasyon	Koşullar	Kaynak
$Nu = 3,66 + \frac{0,066(d/L) Re Pr}{1 + 0,041[(d/L) Re Pr]^{2/3}} \quad (4.4)$	Isıl giriş uzunluğu, yüzeyde sabit sıcaklık. Dairesel Kanal.	(Incropera ve Dewitt 2001)
$Nu = 1,86 \left( \frac{Re Pr}{L/d} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (4.5)$	Birleşik giriş uzunluğu, yüzeyde sabit sıcaklık. Dairesel Kanal. $0,48 < Pr < 16\,700$ , $\left( \frac{Re Pr}{L/d} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \geq 2$	(Incropera ve Dewitt 2001)
$Nu = 3,6 + \frac{0,19(Re Pr D/L_h)^{0,8}}{1 + 0,177(Re Pr D/L_h)^{0,467}} \quad (4.6)$	Isıl giriş uzunluğu, yüzeyde sabit sıcaklık. Dairesel Kanal.	(Celata <i>etal.</i> 2004)
$Nu = 4,36 + 1,31 \left( Re Pr \frac{d}{z} \right)^{1/3} \exp \left( -13 \sqrt{\frac{z}{Re Pr d}} \right) \quad (4.7)$	Dairesel Kanal. Yüzeyde sabit sıcaklık. $\sqrt{\frac{z}{Re Pr d}} > 0,001$	(Jiang <i>etal.</i> 2011)
$Sh = 2,43 \left( 1 + \left( \frac{Gz}{132} \right)^{0,835} \right) \quad (4.8)$	Dikdörtgen Kanal. $Gz = Re Sc \frac{H}{L} = \frac{uH^2}{DL}$	(Loss <i>etal.</i> 2011)
$Sh = 2,5 Sc^{0,33} Re^{0,44} (L/d_e)^{-0,24} \quad (4.9)$	Dikdörtgen Kanal. $360 \cdot 10^3 > Sc > 81 \cdot 10^3$ , $7$ $115 > Re > 533$ , $1 > L/D > 0,1$	(Sedahmed <i>etal.</i> 2011)



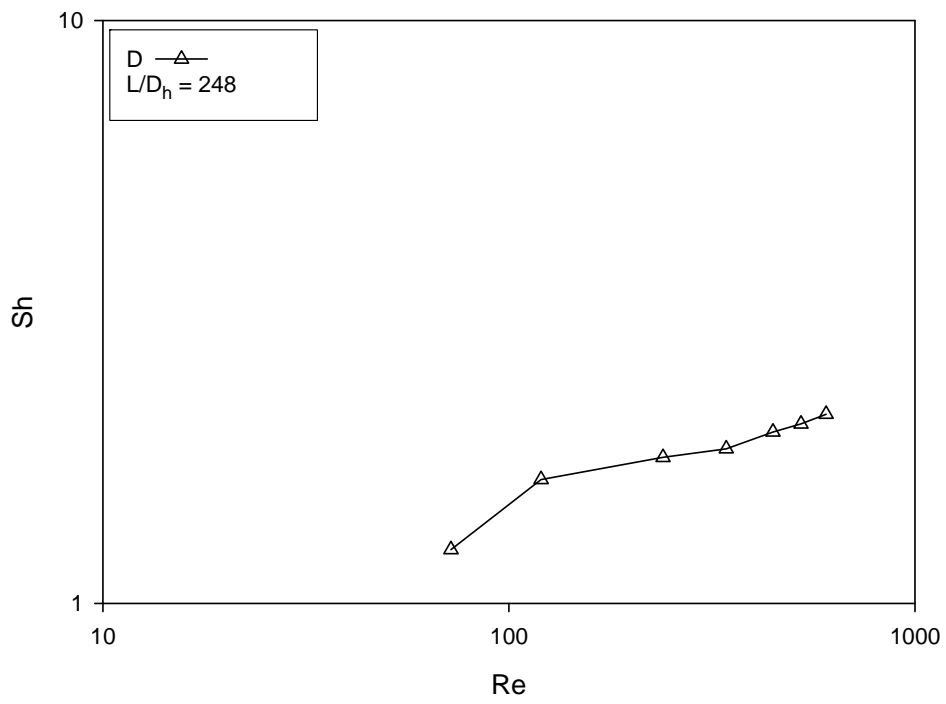
(a)



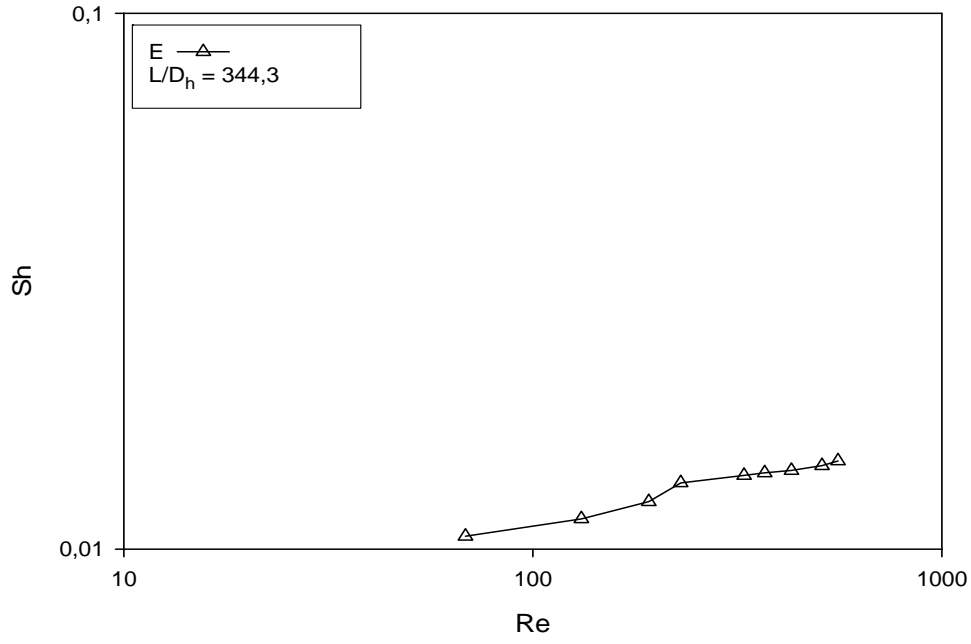
(b)



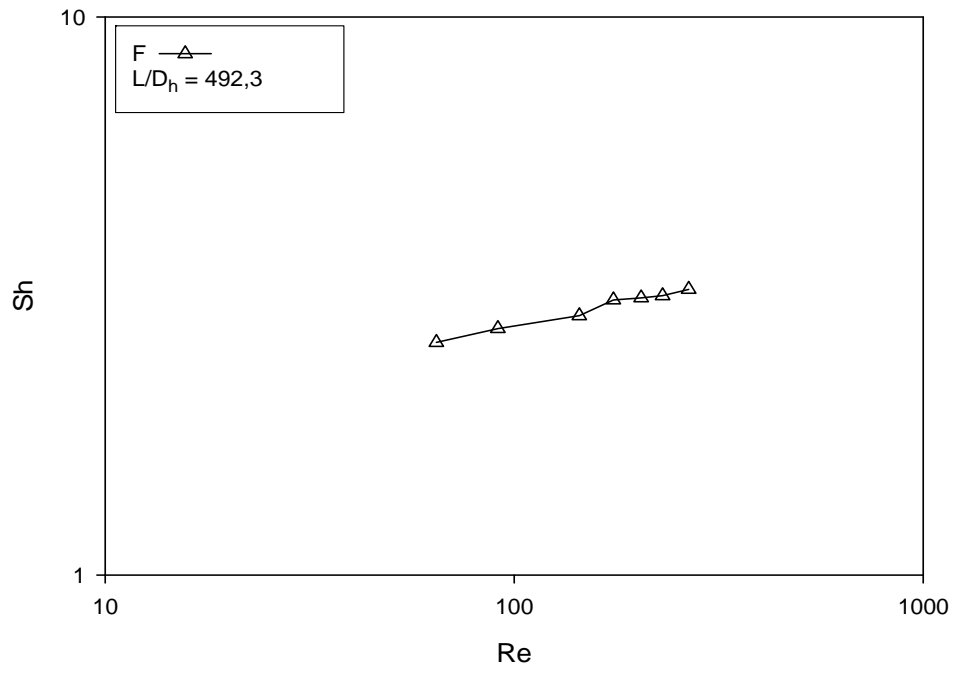
(c)



(d)

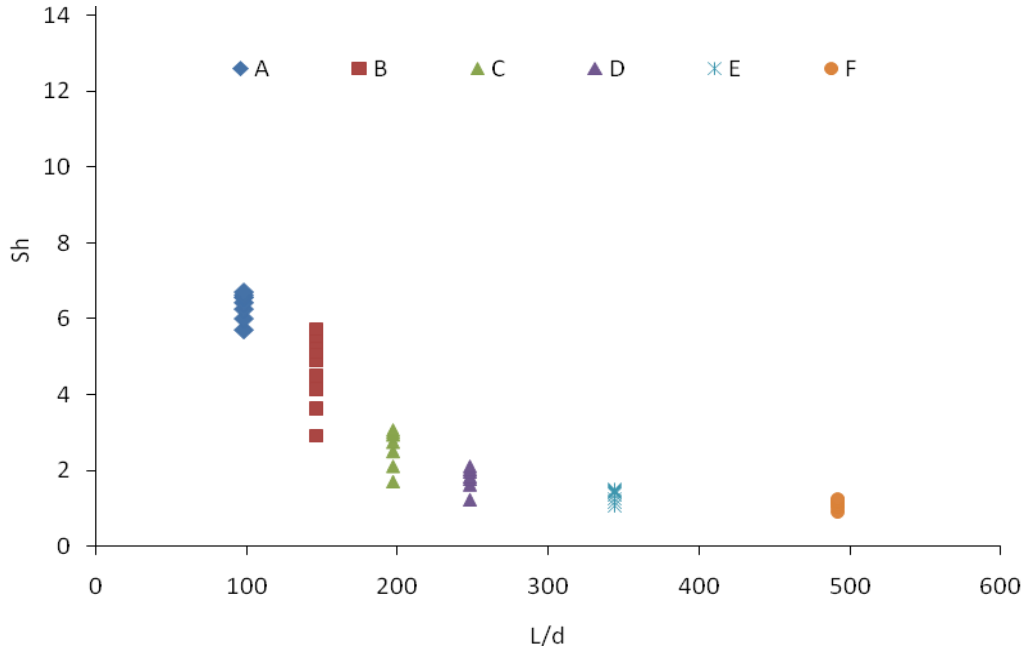


(e)

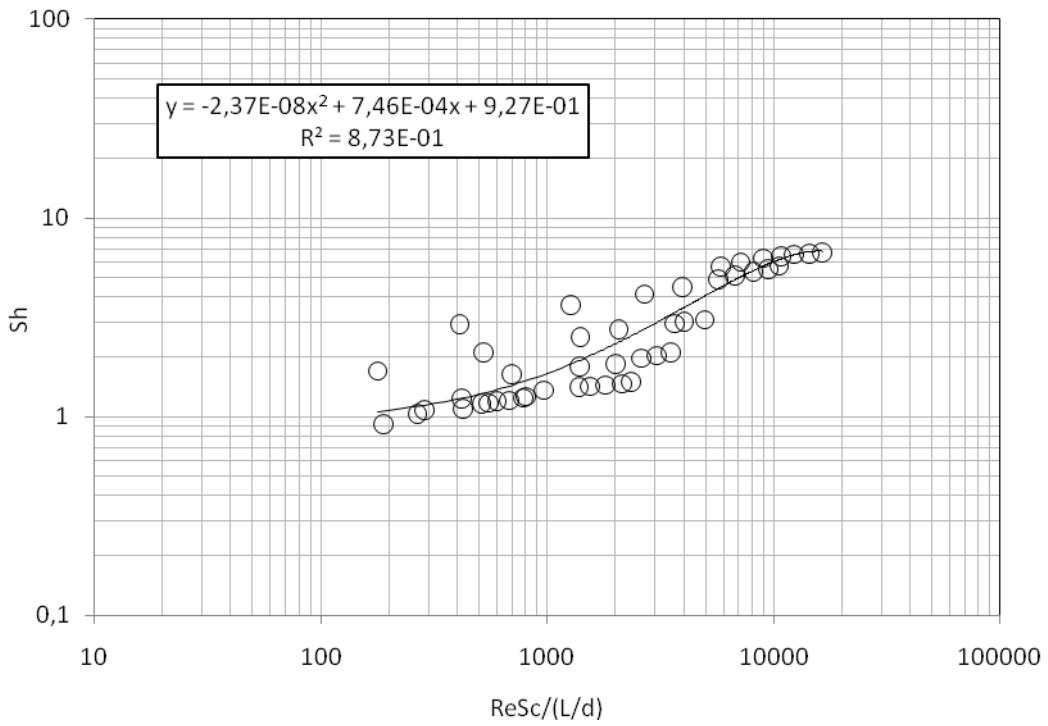


(f)

Şekil 4.9. Dairesel mikro borular için  $Sh$ - $Re$  grafikleri



(a)



(b)

Şekil 4. 10. Dairesel mikro borularda Sh-L/d grafikleri

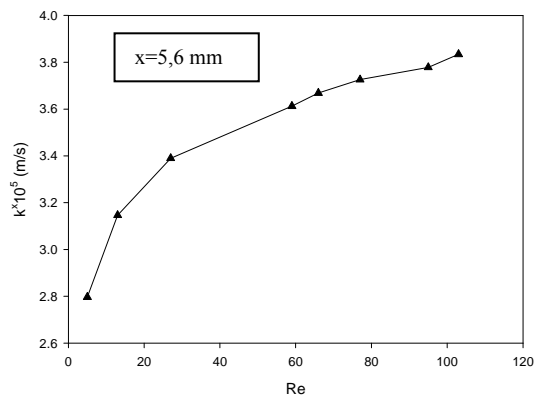
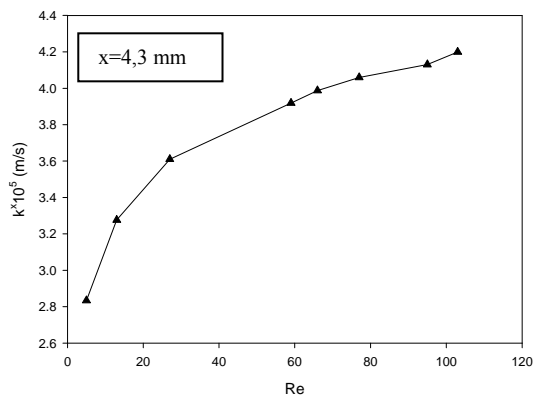
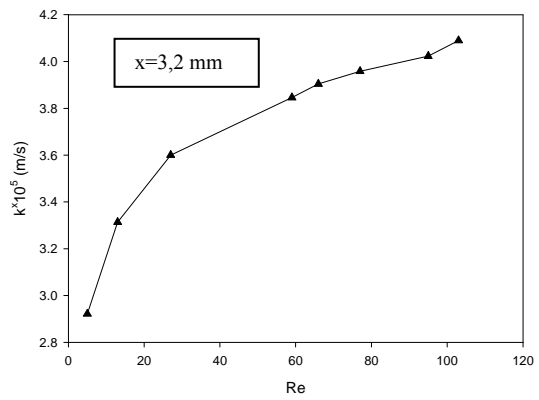
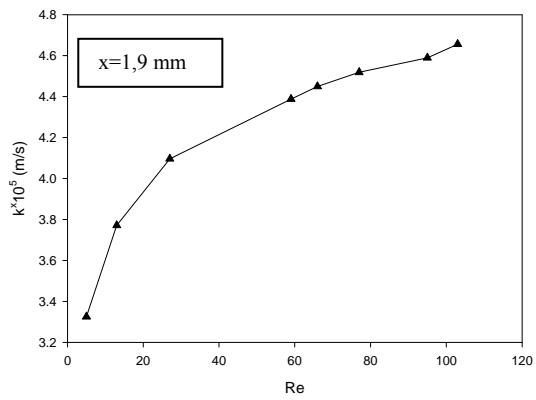
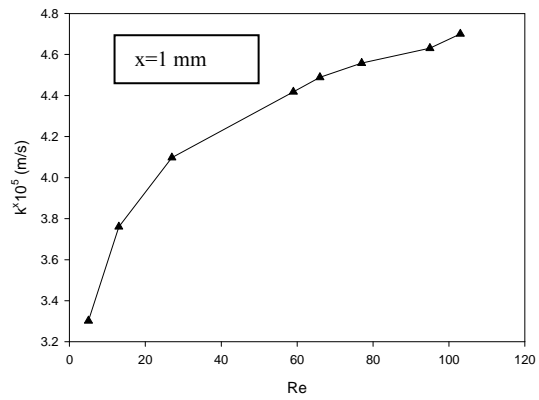
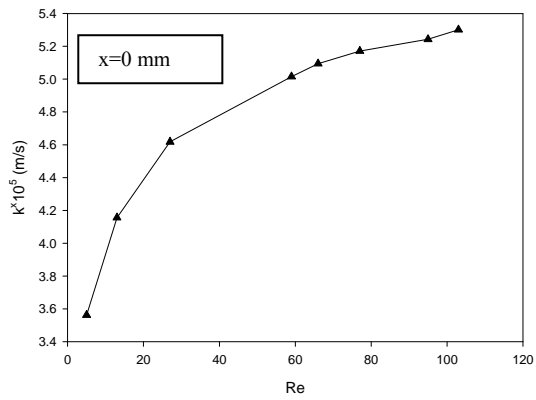
#### 4.2.2. Dikdörtgen mikro kanallarda kütle transferi

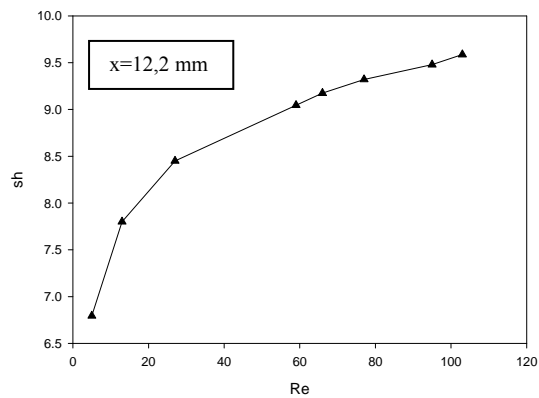
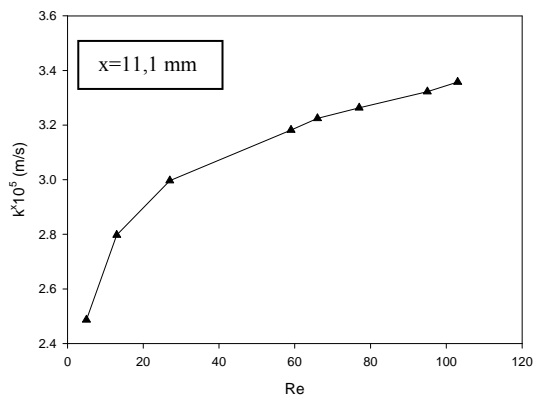
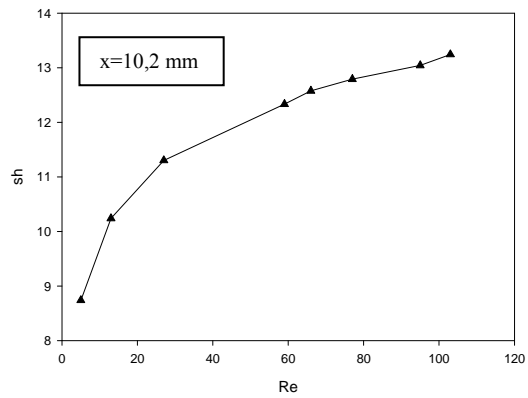
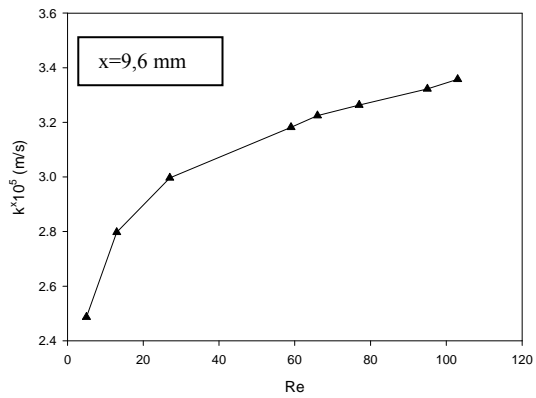
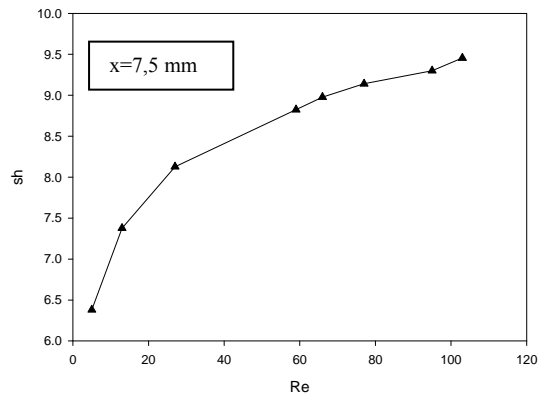
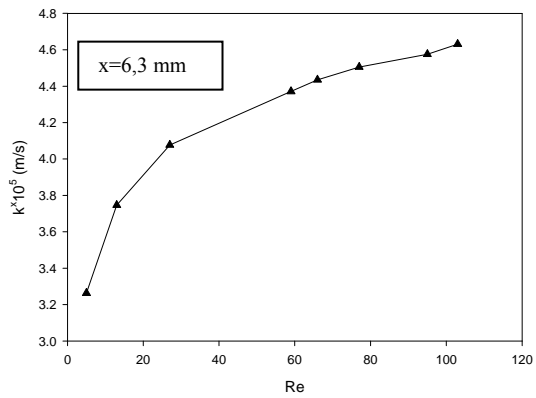
Tüm mikro kanallarda da kütle transferi ölçümü deneyleri için çalışma çözeltisi olarak ferri-ferrosiyenür çözeltisi kullanılmıştır. Kütle transferi ölçümlerinde 5-1 100 Reynolds sayıları arasında çalışılmıştır. Mikro kanal içerisinde kütle transferi ölçümleri kanalın merkezine yerleştirilmiş noktasal elektrotların üzerinde yerel olarak gerçekleşmektedir.

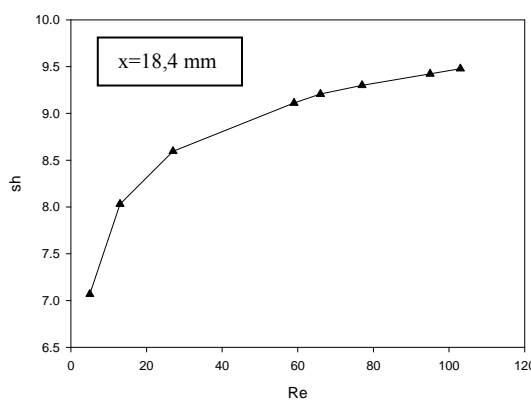
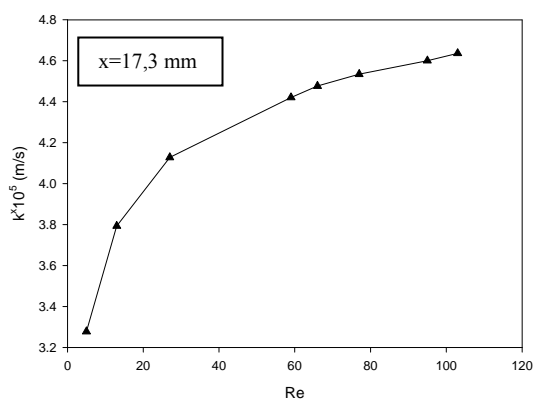
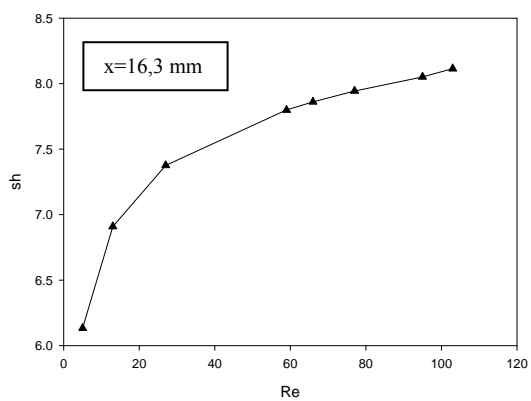
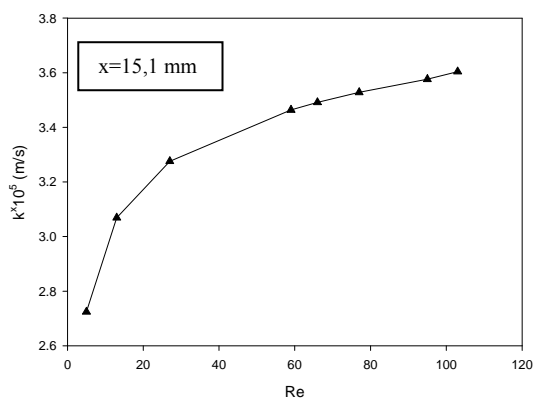
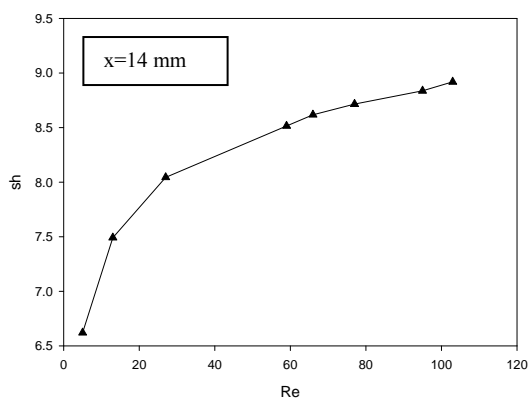
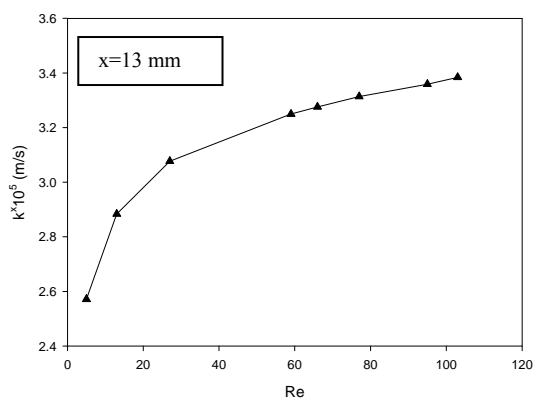
DeneySEL çalışma sonucunda elde edilen sınırlayıcı akım değerleri Eşitlik 3.10'da gösterildiği gibi kütle transfer katsayısına dönüştürülmüştür. Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te AA, BB ve CC mikro kanalları içerisindeki her elektrotta için kütle transfer katsayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi görülmektedir. Kütle transfer katsayıları her bir elektrot için ortalama kütle transfer katsayısıdır.

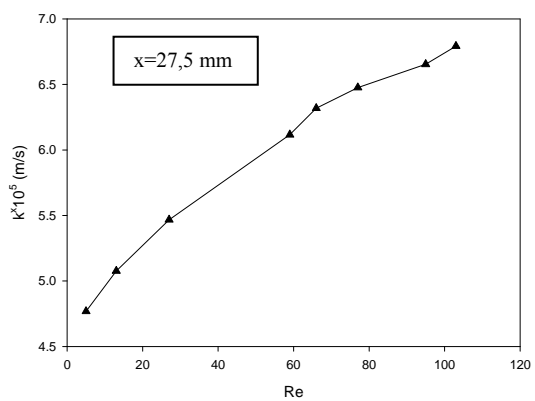
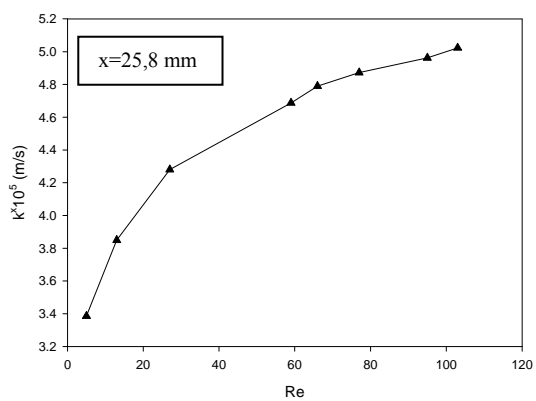
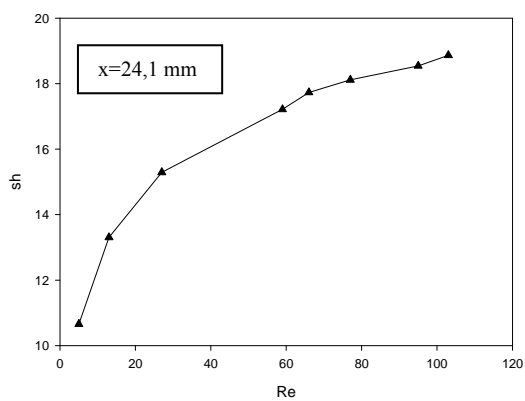
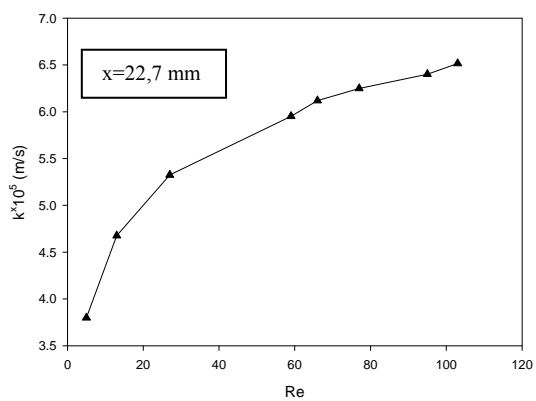
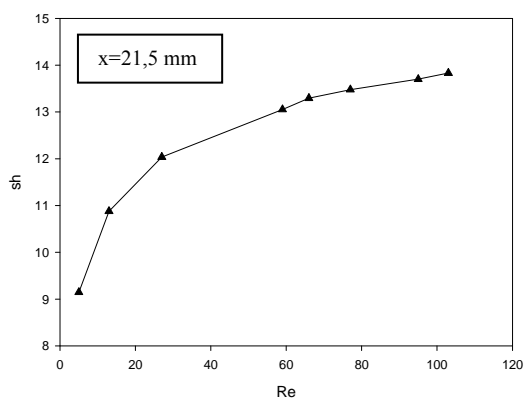
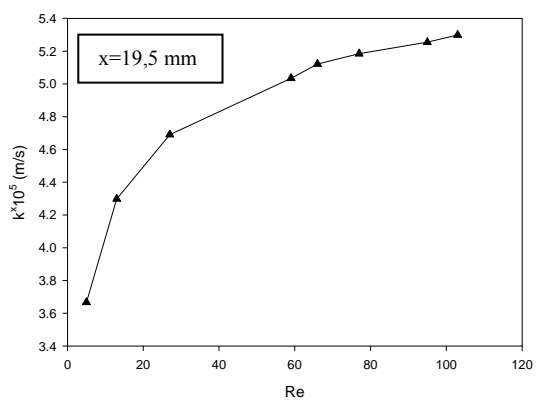
Kanal içerisinde 32 adet elektrot vardır ancak bunlardan kanalın girişinde dört, çıkışında ise iki olmak üzere altı tanesi kanal giriş ve çıkışındaki rezervuarlarda kalmaktadır. Kanal girişindeki ilk elektrot birinci elektrot ( $x=0$  mm) kabul edilerek elektrotlar arasındaki mesafeler dikkate alınarak kanal girişinden itibaren elektrot mesafeleri hesaplanmıştır. Çizelge 3.3'te elektrot sayılarına göre  $x$  mesafesi görülmektedir.

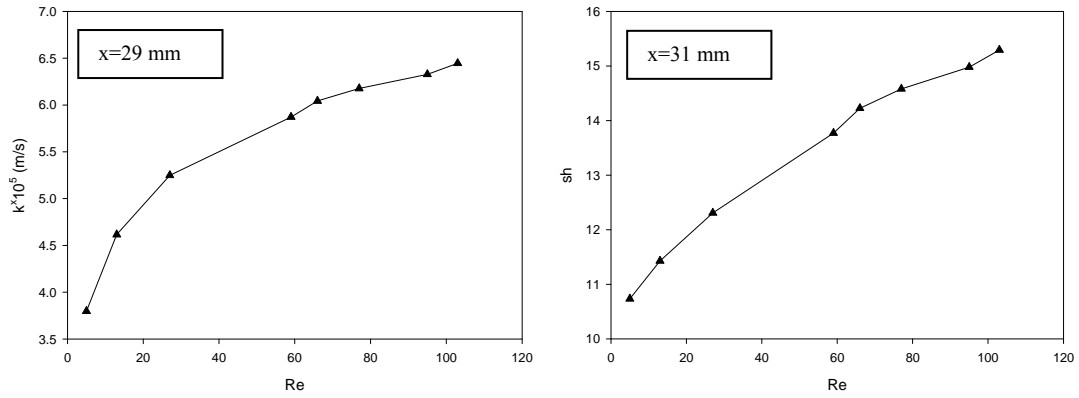




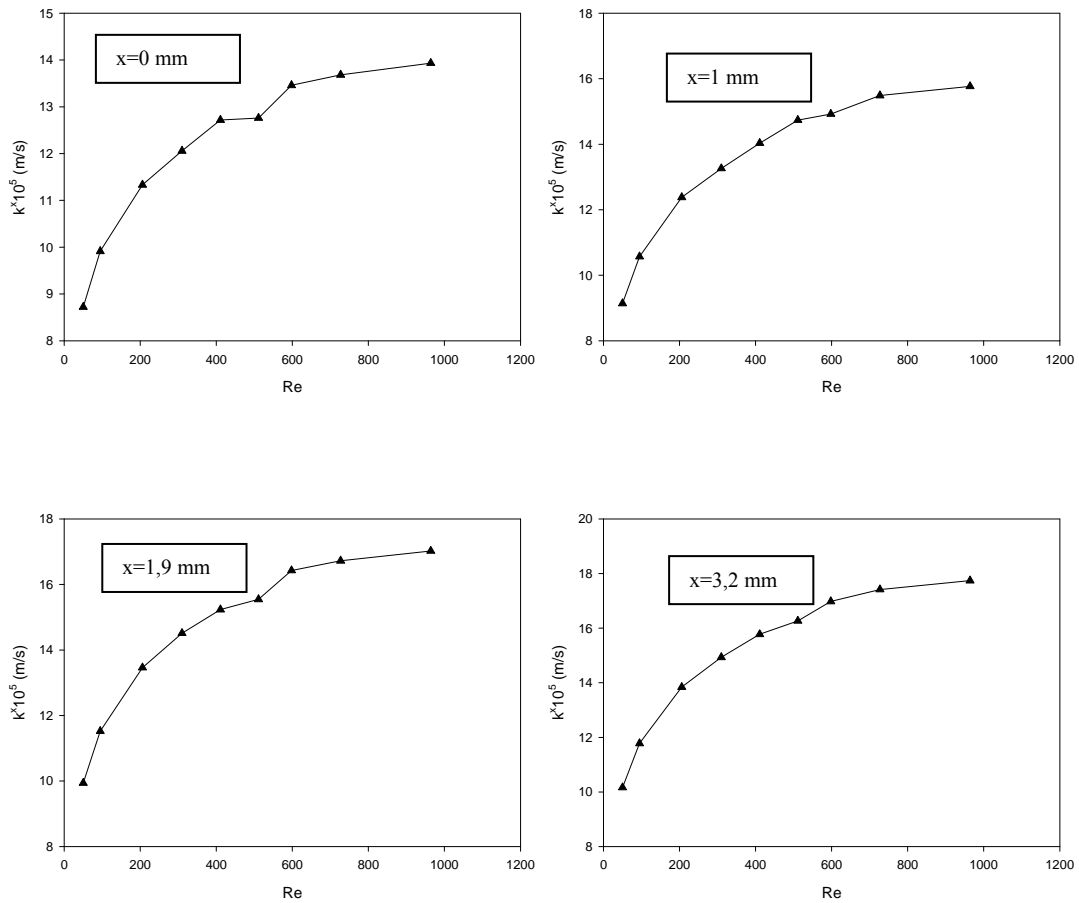


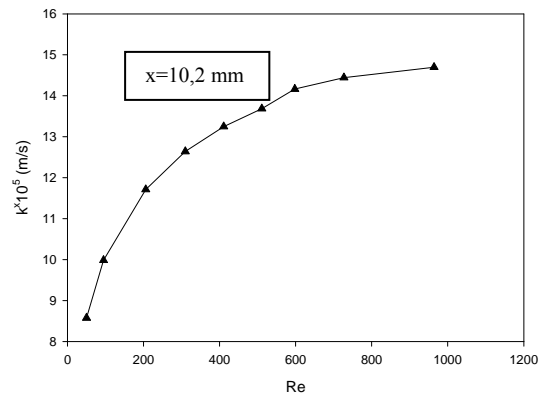
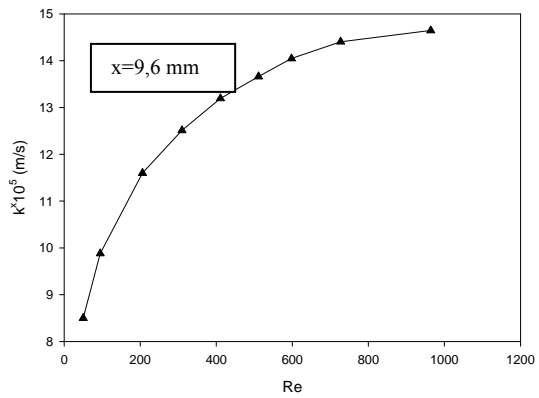
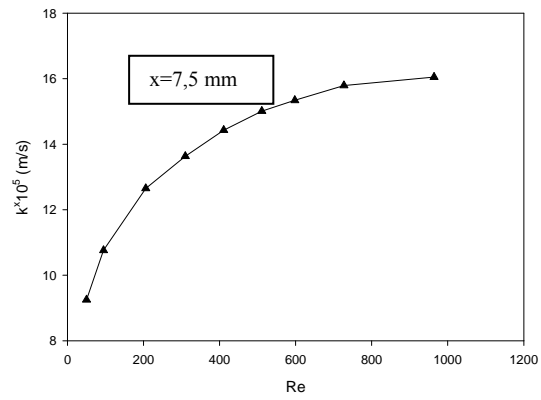
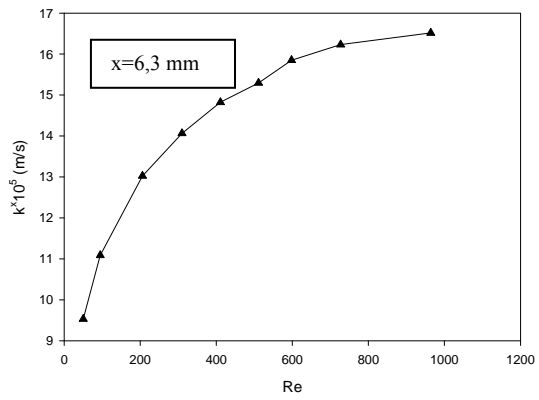
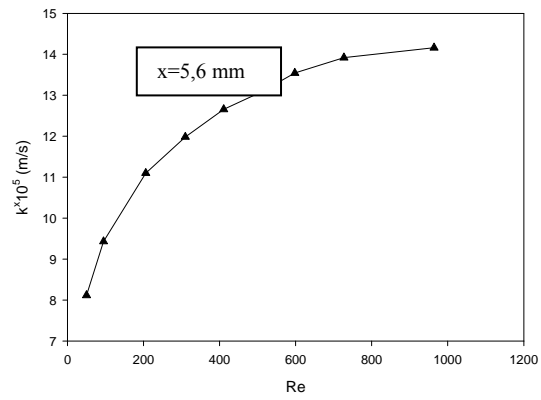
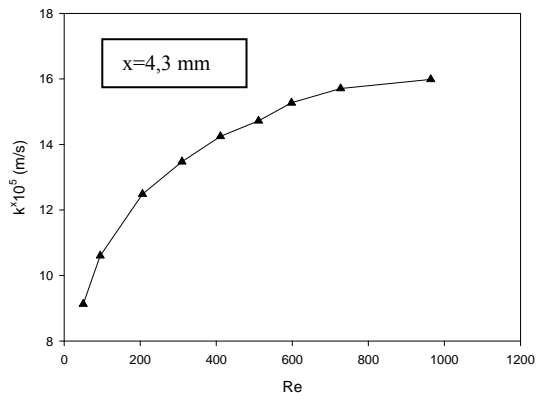


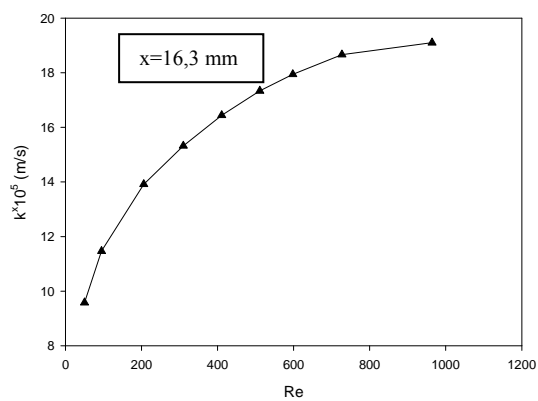
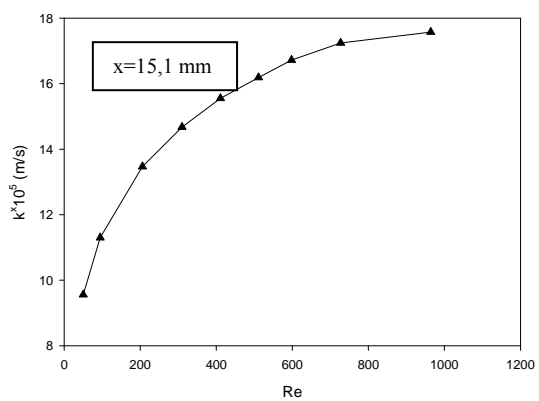
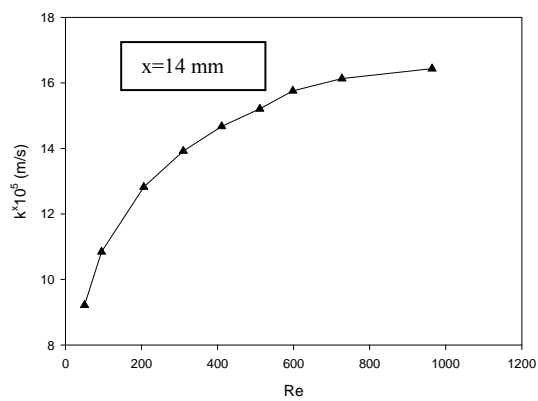
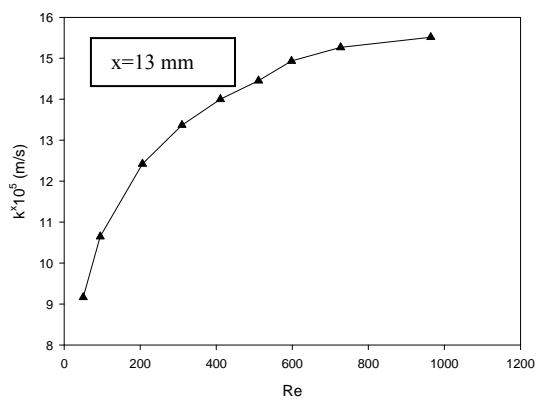
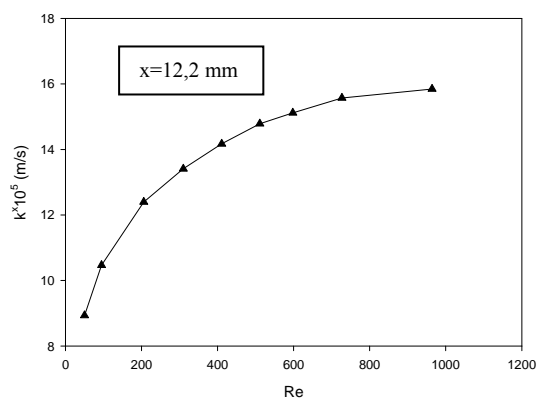
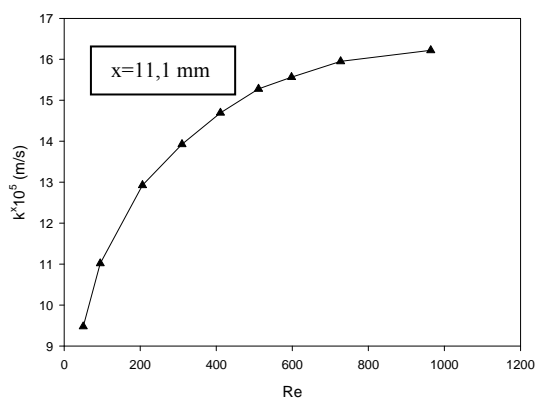


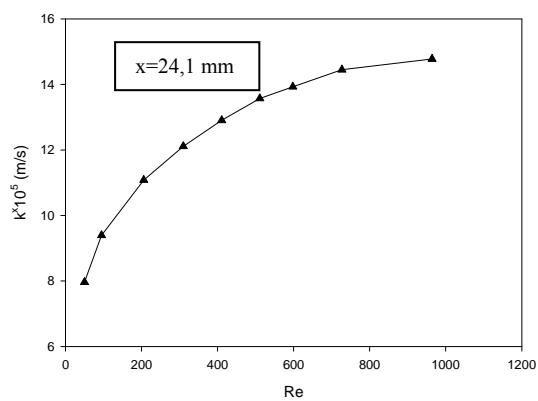
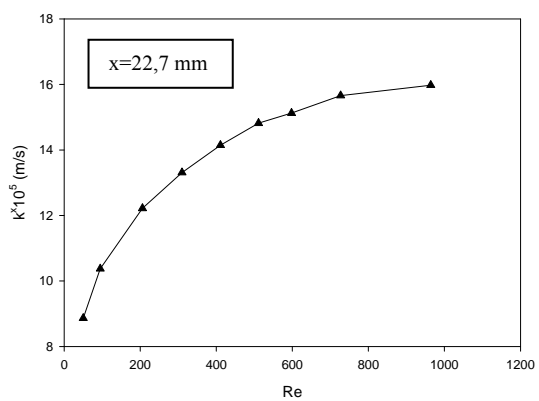
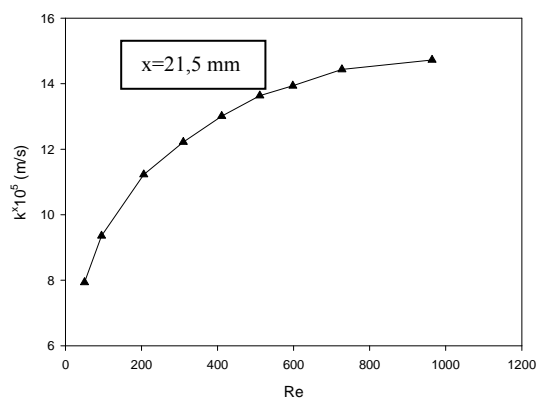
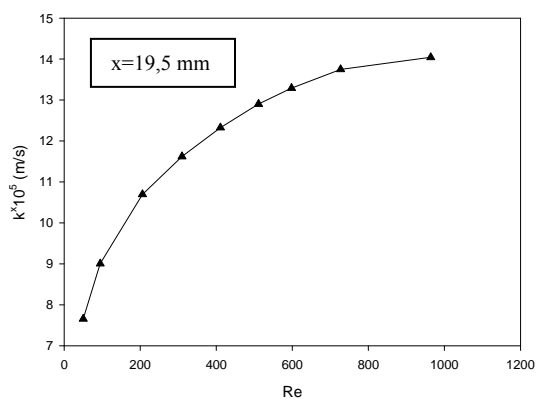
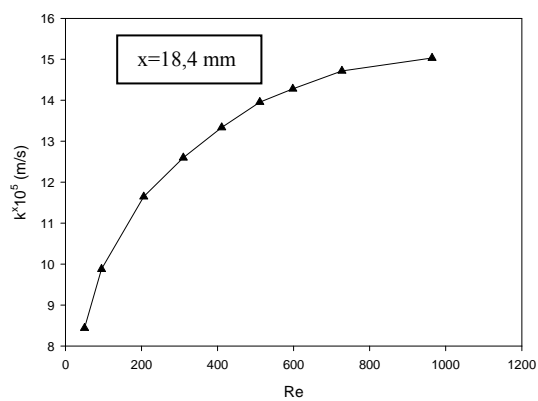
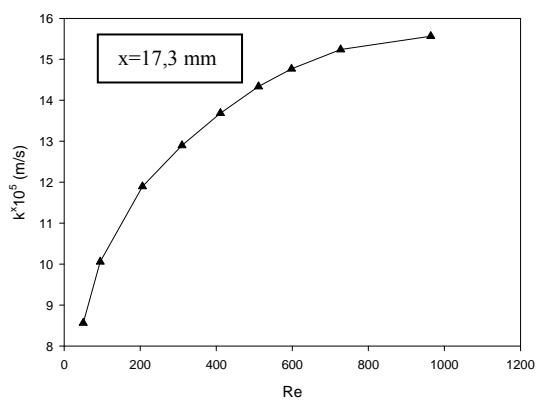


Şekil 4.11. AA dikdörtgen mikro kanalı k-Re grafikleri

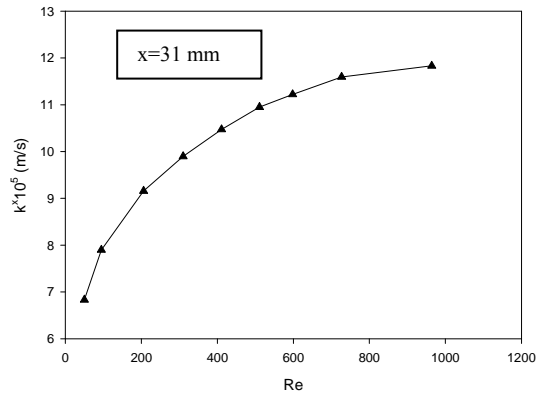
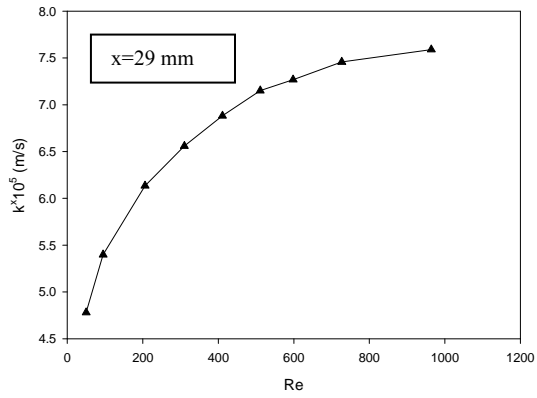
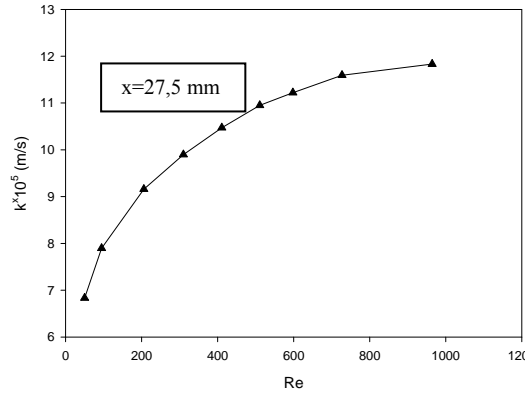
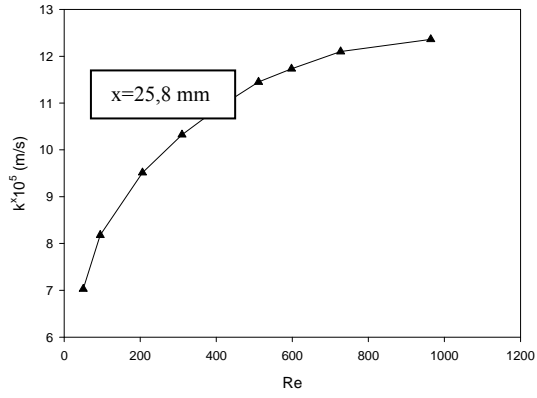




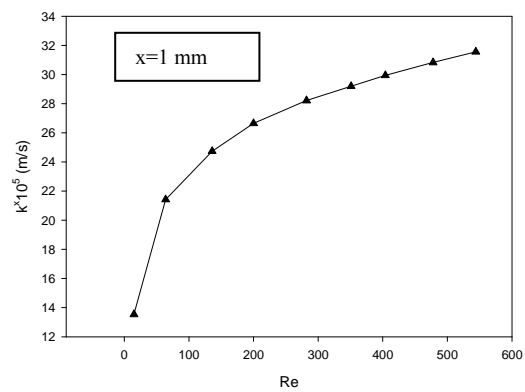
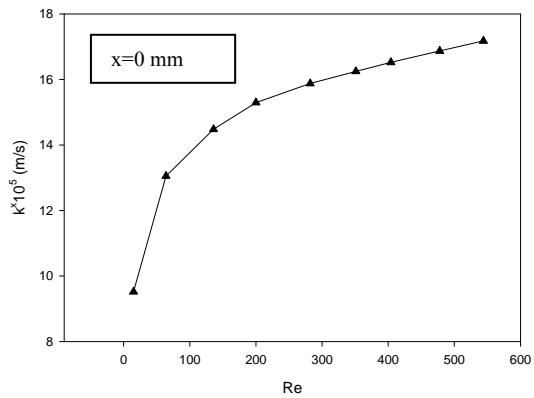


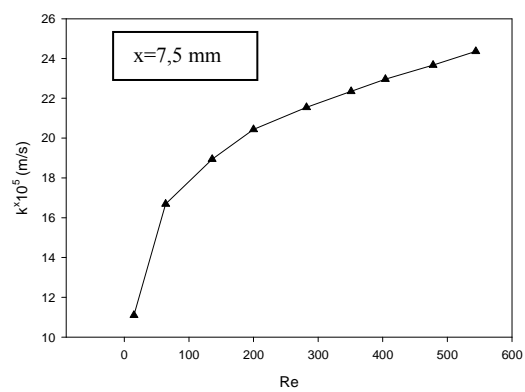
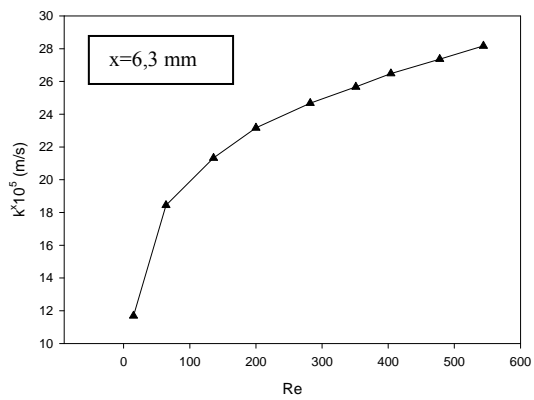
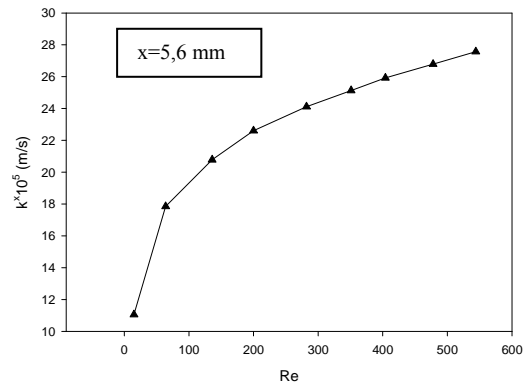
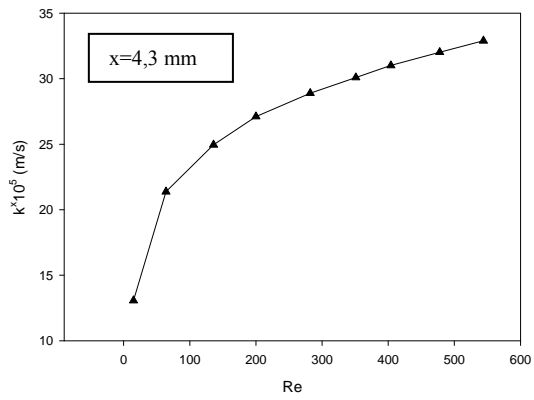
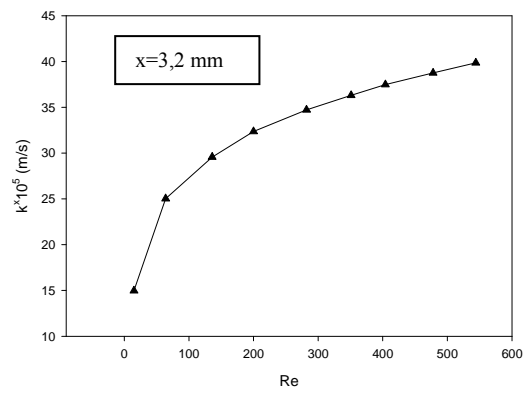
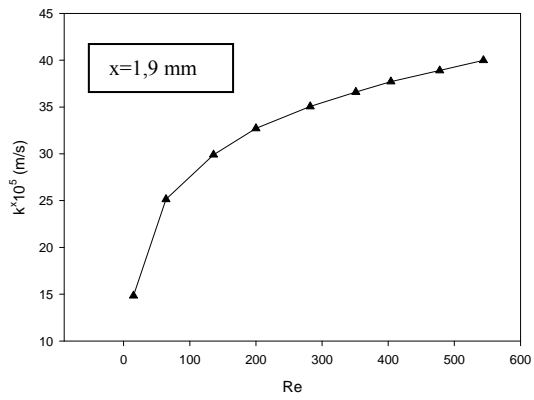


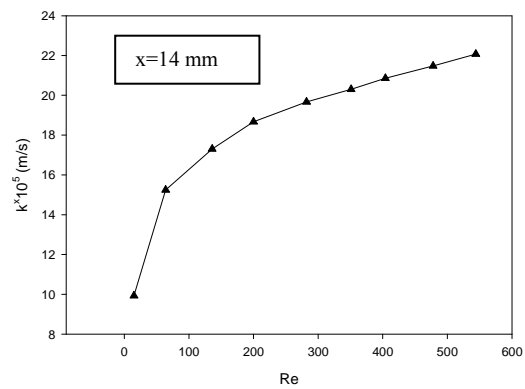
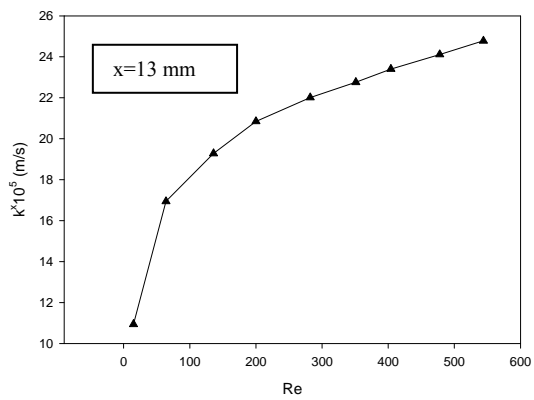
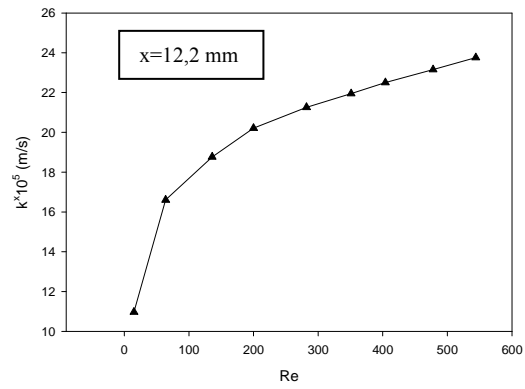
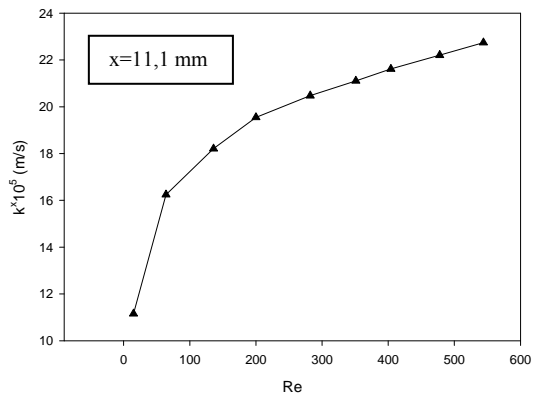
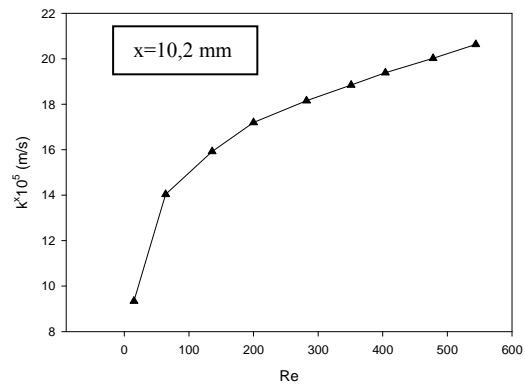
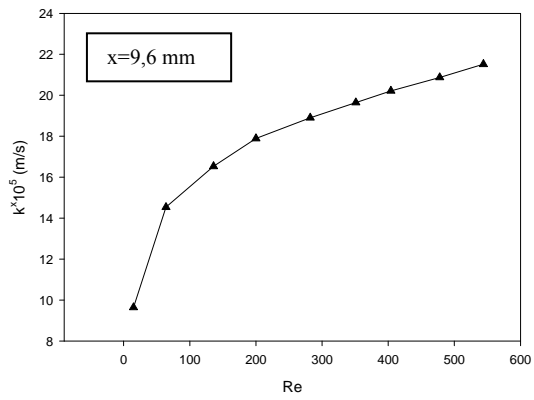


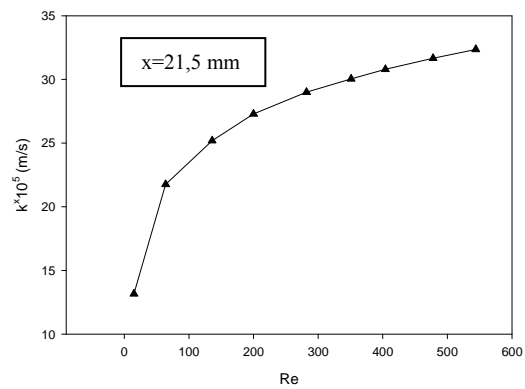
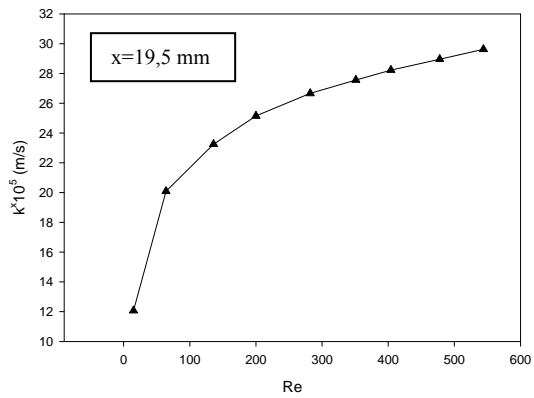
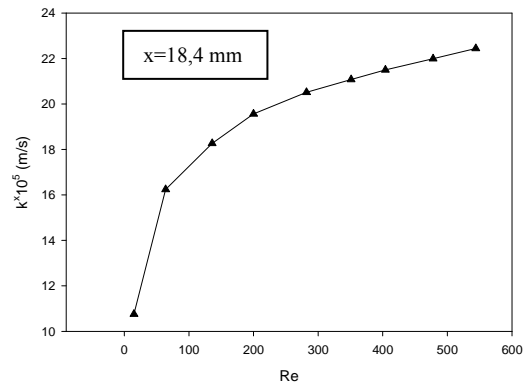
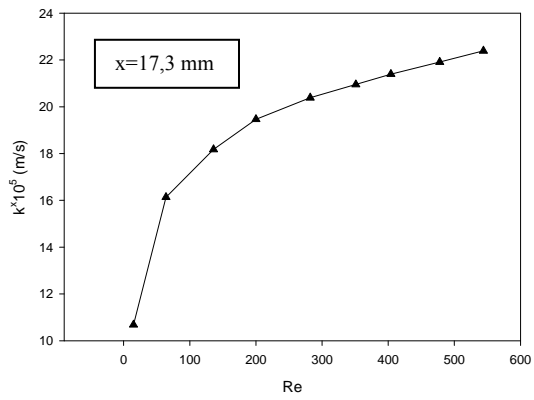
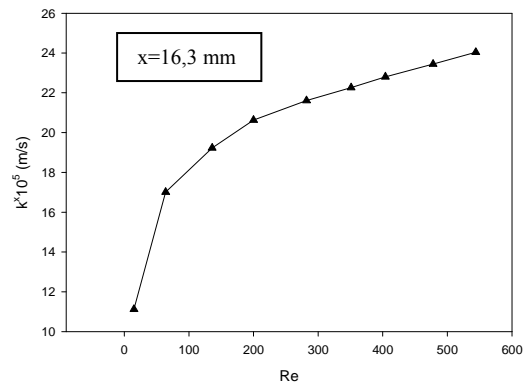
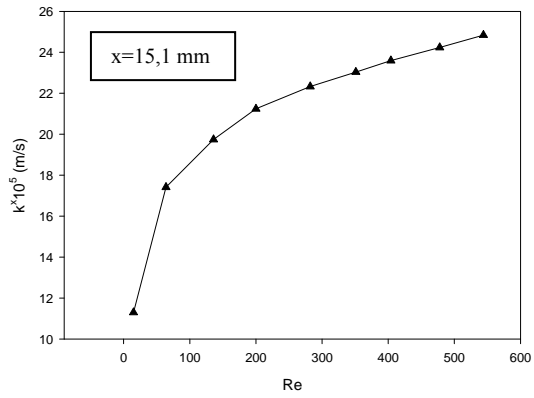


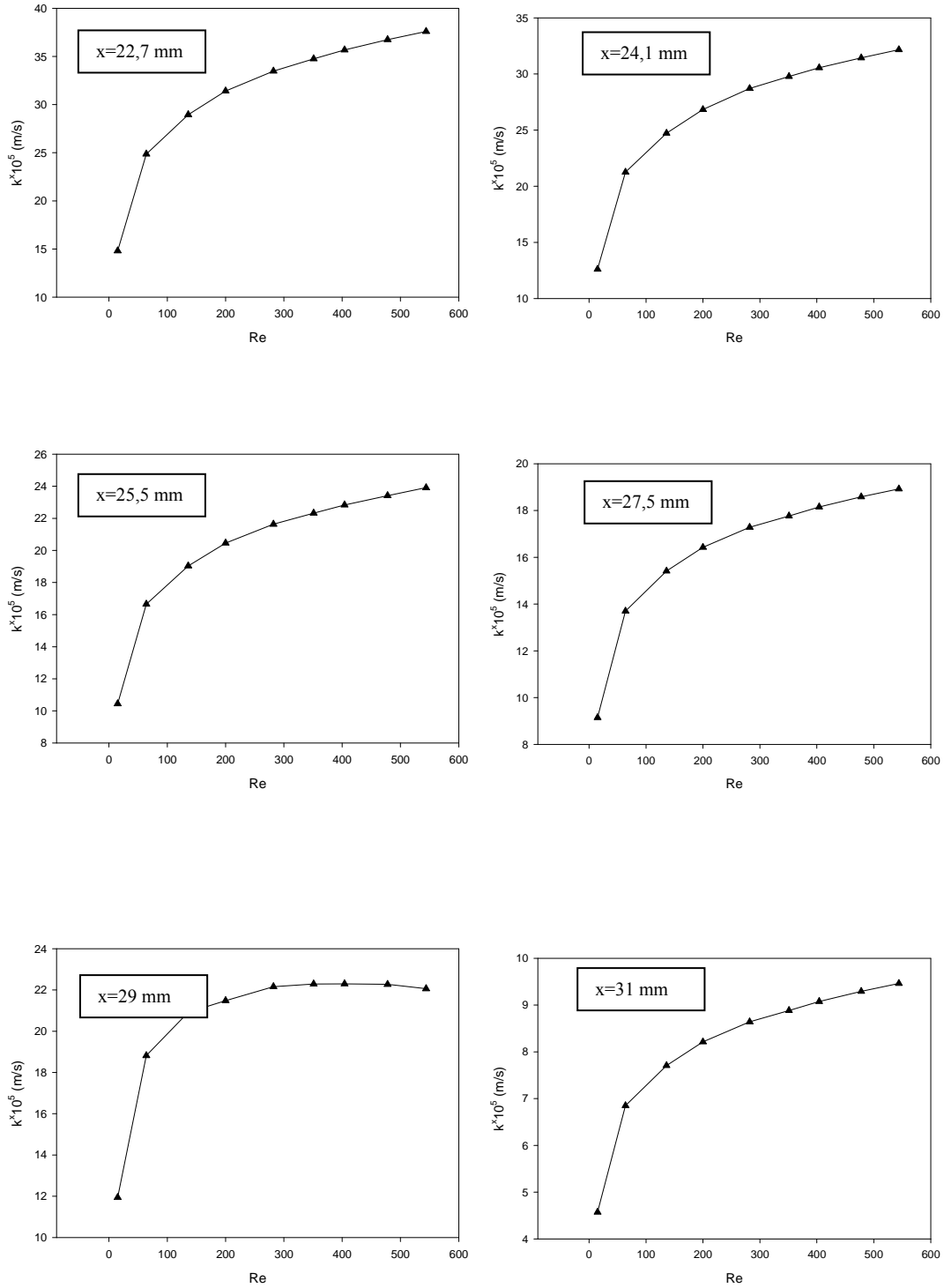
Şekil 4.12. BB dikdörtgen mikro kanalı k-Re grafikleri









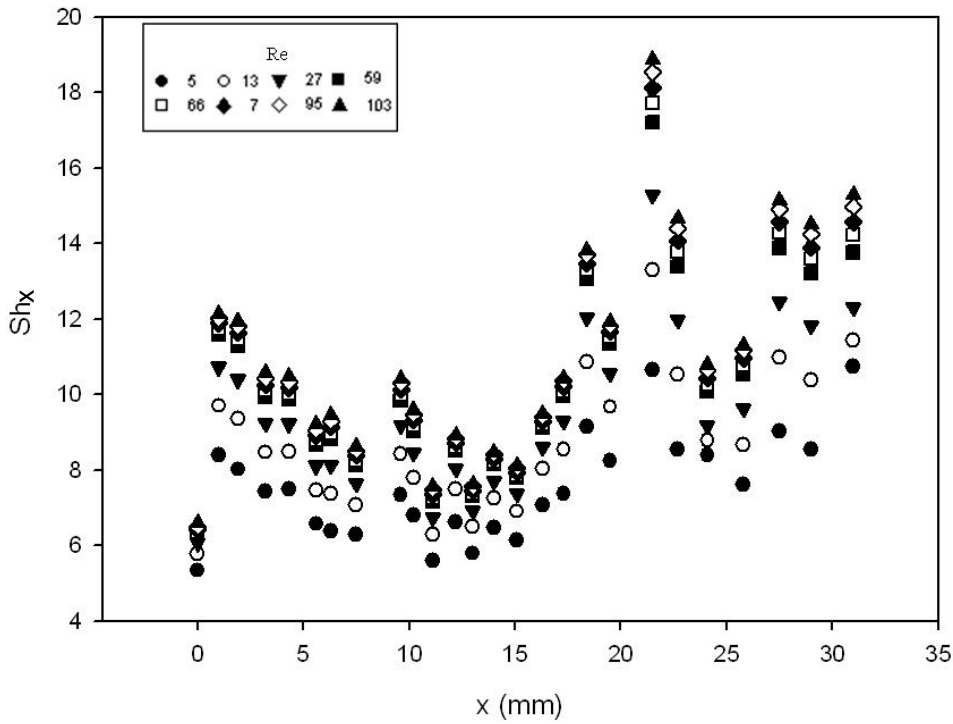


**Şekil 4.13.** CC dikdörtgen mikro kanalı  $k$ - $Re$  grafikleri

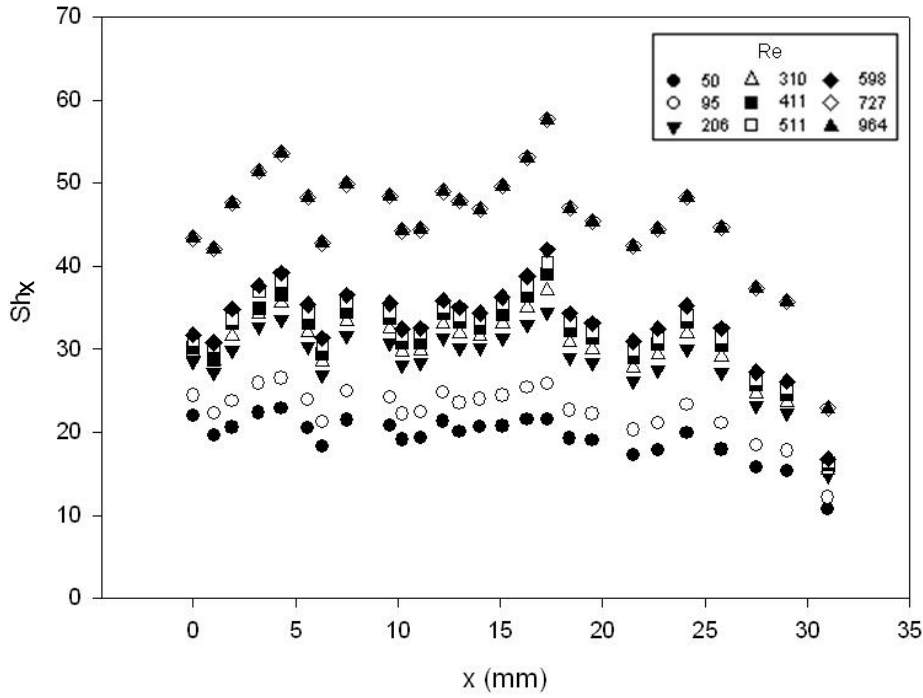
Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te görüldüğü gibi mikro kanallarda gerçekleşen kütle transferi kanalın merkezi boyunca her elektrotta benzer şekilde başlamış ve

benzer şekilde bitmiştir. Yani kütle transferi kanal içerisindeki her elektrot üzerinde aynı şekilde gerçekleşmiştir. Kütle transfer katsayısı mikro kanal genişliğinin artışına paralel olarak artmıştır. Grafikler incelendiğinde kütle transfer katsayılarının  $2,37 \cdot 10^{-5}$ - $39,99 \cdot 10^{-5}$  m/s aralığında değiştiği ve Reynolds sayısının artması ile arttığı görülmektedir. Reynolds sayısının üssü 0,41-0,48 aralığında değişim göstermektedir.

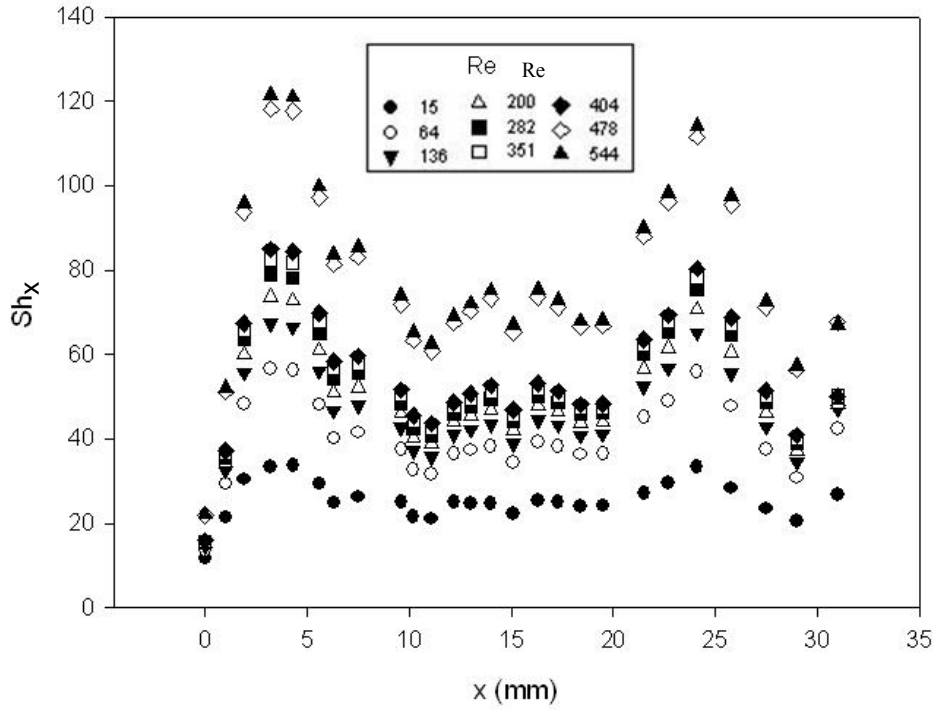
Dikdörtgen mikro kanallar için elde edilen kütle transfer katsayısı Sherwood sayına Eşitlik 3.13 kullanılarak dönüştürülmüştür. Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da AA, BB ve CC dikdörtgen mikro kanalları için elde edilen Sherwood sayılarının kanal boyunca değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.14. AA dikdörtgen mikro kanalında  $Sh_x$ -x grafiği



Şekil 4.15. BB dikdörtgen mikro kanalında  $Sh_x$ - $x$  grafiği



Şekil 4.16. CC dikdörtgen mikro kanalında  $Sh_x$ - $x$  grafiği

Sherwood sayısı kütle transfer katsayısına bağlı olduğundan dikdörtgen mikro kanallar da o da kütle transfer katsayısı ile benzer özellik göstermiş, kanal genişliğinin artmasına paralel olarak artış göstermiştir. Ayrıca Sherwood sayısı ile Reynolds sayısı arasındaki korelasyon AA dikdörtgen mikro kanalı için Eşitlik 4.10, BB dikdörtgen mikro kanalı için Eşitlik 4.11, CC dikdörtgen mikro kanalı için Eşitlik 4.12 ile ifade edilmiştir.

$$Sh_x = 1,1765 Re^{0,44} (x/d)^{-0,05} Sc^{1/3} \quad r^2 = 0,7556 \quad (4.10)$$

$$Sh_x = 1,758 Re^{0,48} (x/d)^{-0,1} Sc^{1/3} \quad r^2 = 0,8278 \quad (4.11)$$

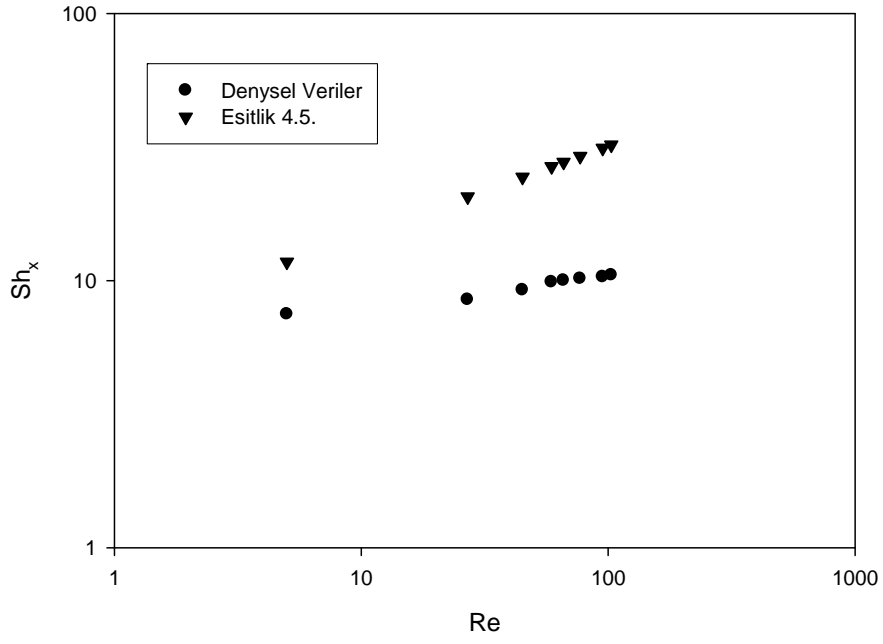
$$Sh_x = 2,342 Re^{0,41} (x/d)^{-0,1} Sc^{1/3} \quad r^2 = 0,8554 \quad (4.12)$$

Makro kanalların giriş bölgesi için çeşitli eşitlikler bulunmaktadır, bunlardan birisi Çizelge 4.1’de bulunan Eşitlik 4.5’te ifade edilmiştir (Incropera ve Dewitt 2001).

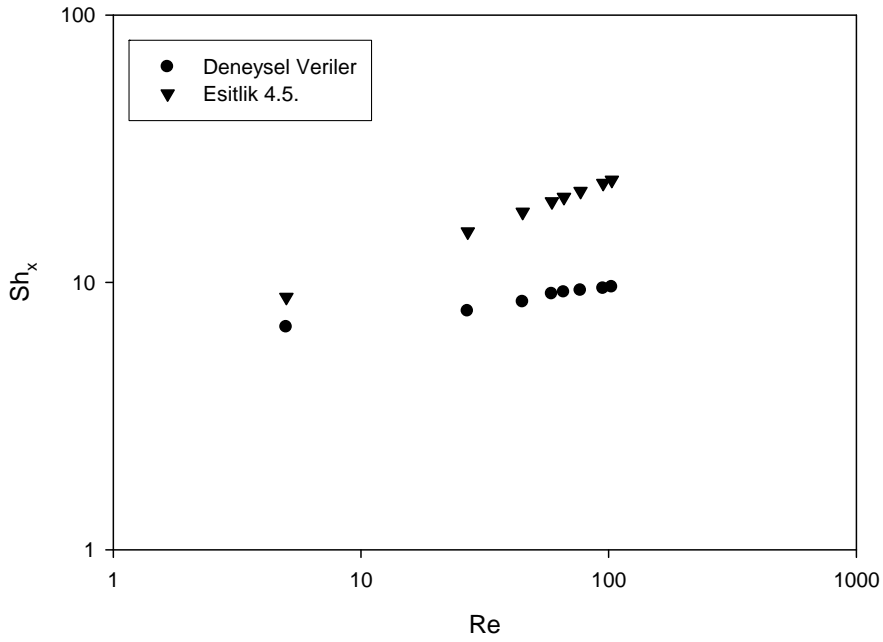
Dikdörtgensel mikro kanallar deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen Sh sayılarının geleneksel teoriye göre incelenmesi için; makro kanallar için tanımlanan Eşitlik 4.5’te Pr sayısı yerine Sc sayısı ile kullanılarak Nu sayısı yerine Sh sayısı elde edilmiştir.

Elde edilen bu sayılar, çalışma sonucunda elde edilen Sh sayıları ile mukayeseli olarak Re sayısına karşı, AA kanalının, BB kanalının ve CC kanalının beşinci, onuncu, onbeşinci, yirminci elektrotları için sırasıyla Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde Eşitlik 4.5 ile deneysel veriler arasındaki sapma elektrotlar için farklılık göstermektedir. Bazı elektrotlar için sapmalar yakın olmasına rağmen, bazıları için ise aradaki fark oldukça büyüktür. Bunun sebebinin elektrotların yapısından kaynaklanan farklılıklardan dolayı, laminar koşullarda kütle transferinin sıçramalar göstermesinin sonucunda farklı değerler ölçülmesi olduğu düşünülmüştür. Tam bir karşılaştırma yapmak zordur.

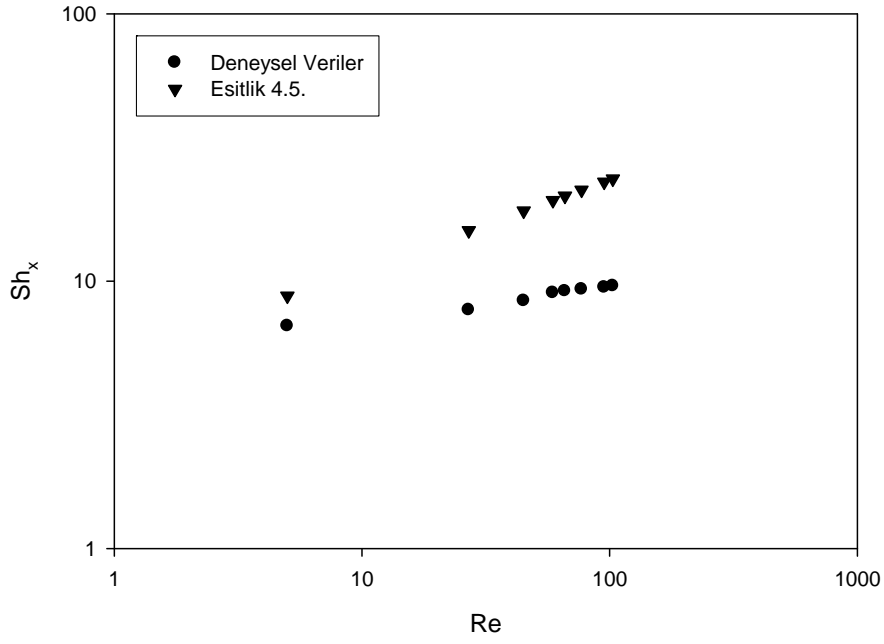




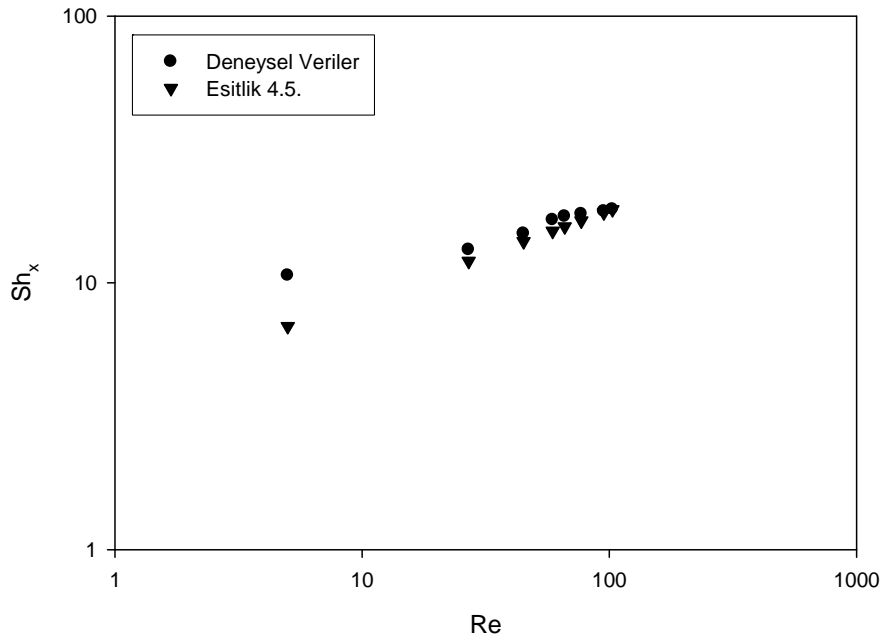
(a) 5. elektrot



(b) 10. elektrot

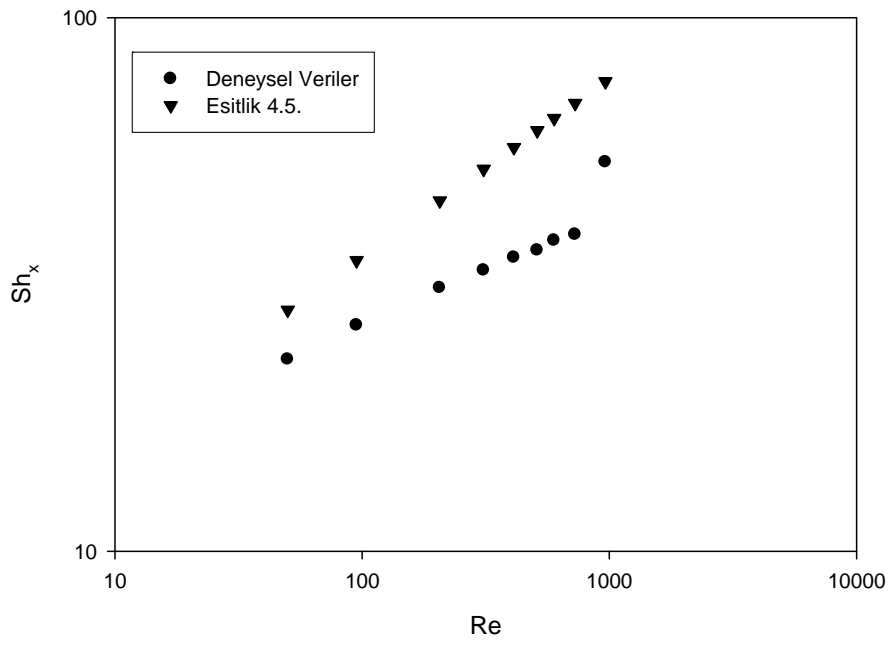


(c) 15. elektrot

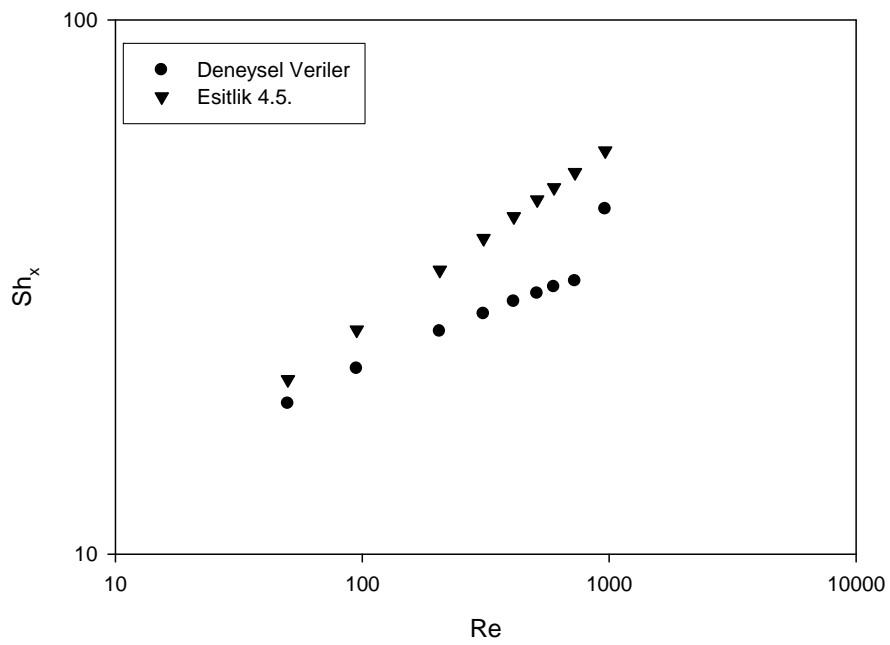


(d) 20. elektrot

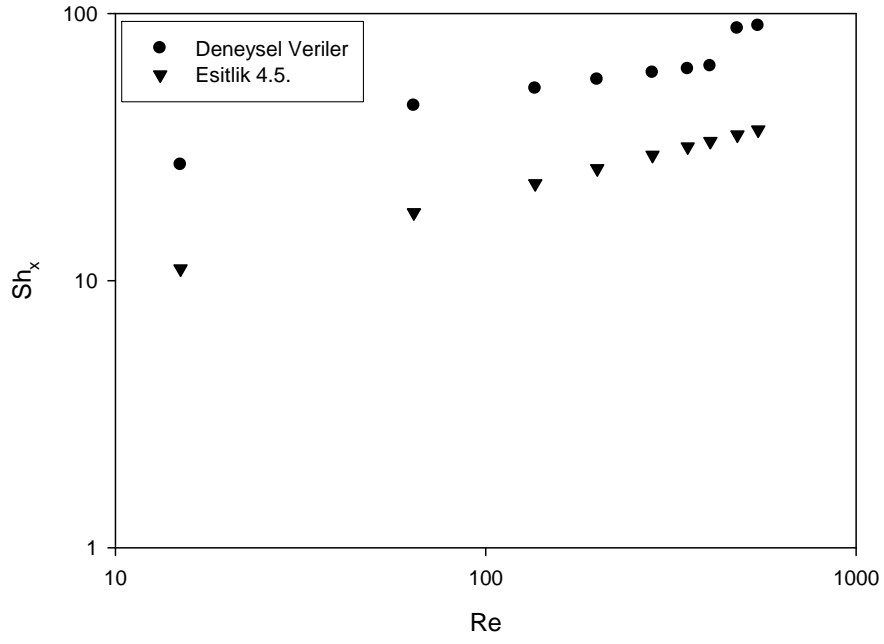
Şekil 4.17. AA dikdörtgen mikro kanalı karşılaştırmalı  $Sh_x$  grafikleri



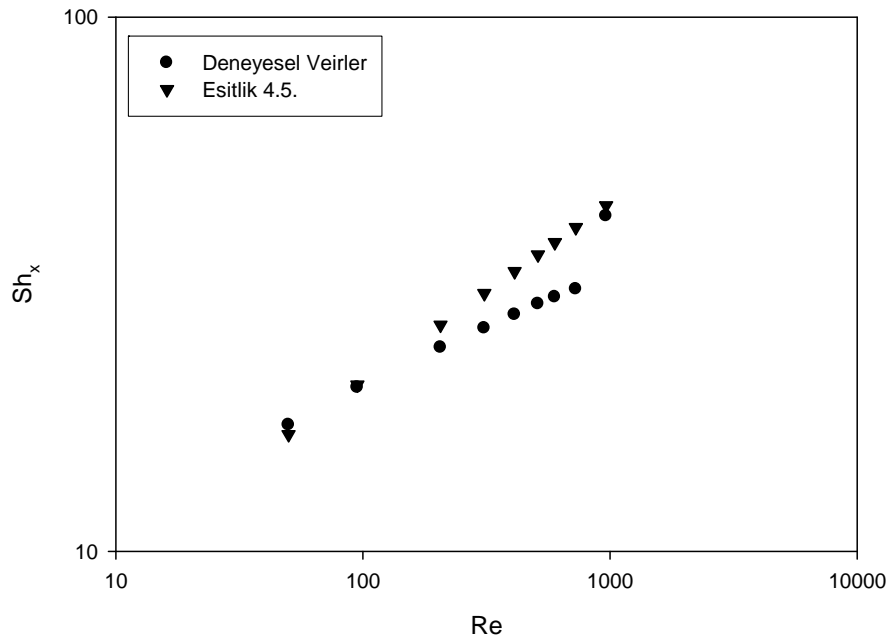
(a) 5. elektrot



(b) 10. elektrot

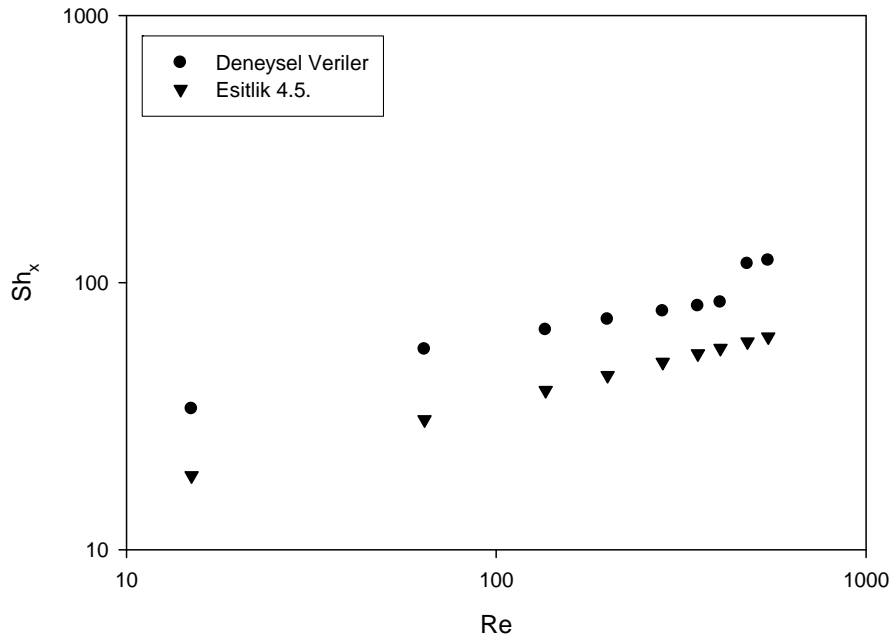


(c) 15. elektrot

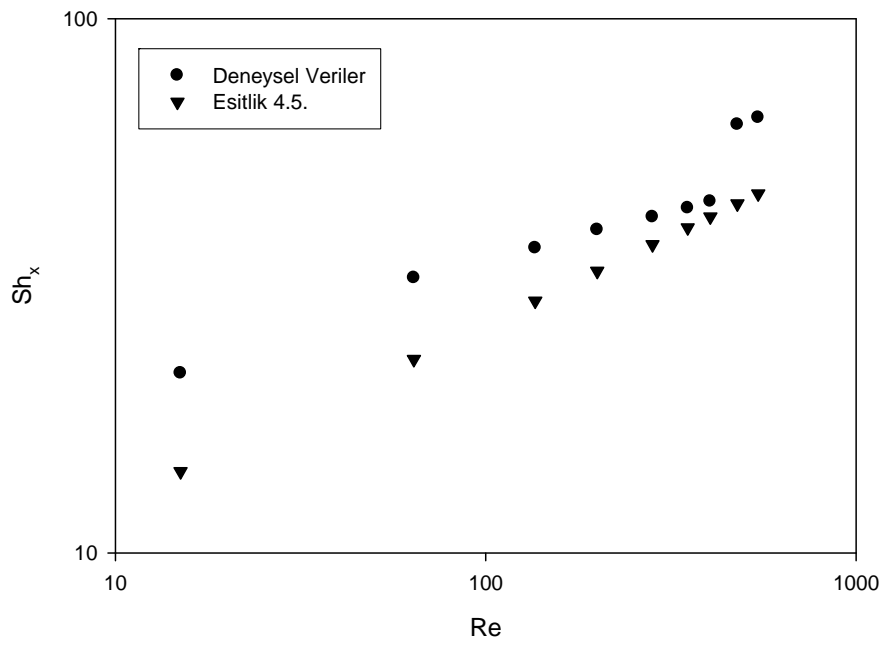


(d) 20. elektrot

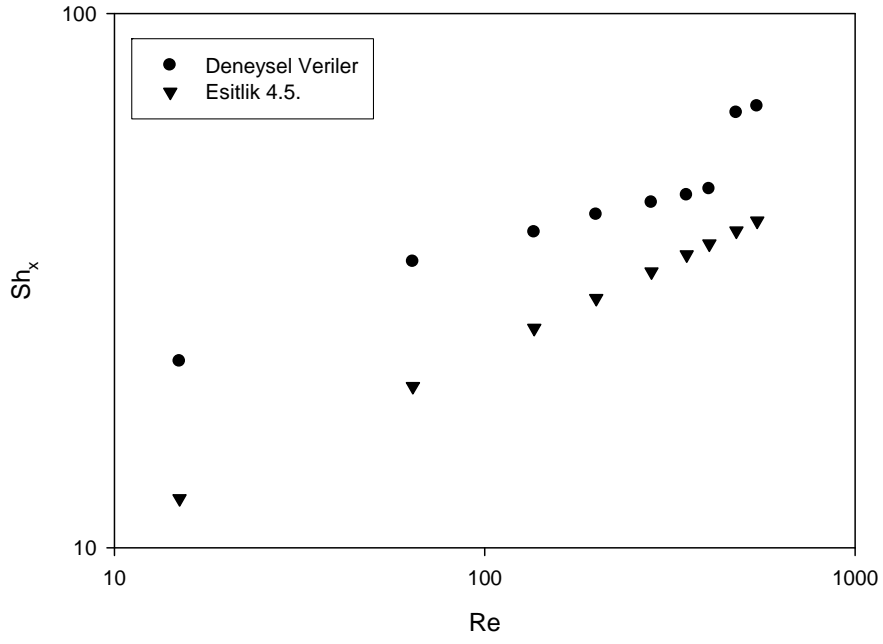
Şekil 4.18. BB dikdörtgen mikro kanalı karşılaştırmalı  $Sh_x$  grafikleri



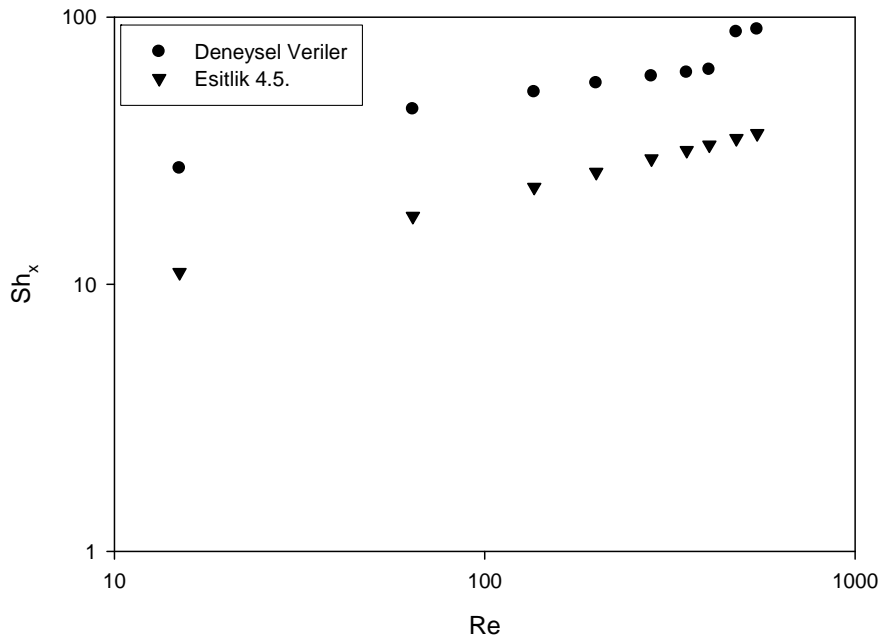
(a) 5. elektrot



(b) 10. elektrot



(c) 15. elektrot



(d) 20. elektrot

Şekil 4.19. CC dikdörtgen mikro kanalı karşılaştırmalı  $Sh_x$  grafikleri

## 5. SONUÇ

Çalışmada, hidrolik çapları yaklaşık 0,2 mm olan dairesel ve dikdörtgen mikro kanalların basınç düşüşü ve kütle transferi davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Basınç düşüşü ölçümlerinde damıtık su, kütle transferi ölçümlerinde ise ferri-ferrosiyanyür ve potasyum karbonat karışımı çözelti kullanılmıştır. Dairesel mikro borular için 10-1 500, dikdörtgen mikro kanallar için ise 5-1 100 arasında değişen Reynolds sayılarında çalışılmıştır. Kütle transferi ölçümleri sınırlayıcı difüzyon akım tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler ile aşağıdaki sonuçlar vurgulanabilir.

Her iki kanal geometrisi içinde basınç düşüşü ve sürtünme faktörü karakteristikleri makro kanallar için geçerli olan geleneksel sonuçlar ile uyusmaktadır. Çalışma sonucunda dairesel mikro kanallar için  $fRe$  sonucu  $63,09 \pm 2,73$  olarak elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda sürtünme katsayısı geleneksel teoriye göre yüksek, düşük ve aynı olduğunu belirten çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmanın sonucu incelenen kanal çapları için, basınç düşüşü ölçümlerini etkileyen faktörler iyi bir şekilde dikkate alındığında, hesaplamalar bu etkiler göz önünde bulundurularak yapıldığında, mevcut çalışma koşullarında basınç düşüşü ve sürtünme faktörünün geleneksel kanallar ile aynı olduğu görüşünü desteklemektedir. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan mikro kanal boyutları için, sürtünme faktörünü hesaplamak amacıyla geleneksel makro kanal akış için kullanılan teorik ifadeler kullanılabilir. Bu sonuç mikro sistemlerin tasarımı için önemlidir.

Literatürde laminer akıştan türbülent akışa geçiş için 300-900 gibi düşük Reynolds sayıları bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada çalışılan Reynolds sayısı aralığı için erken laminer akıştan Türbülent akışa geçiş davranışı gözlenmemiştir.

Sırasıyla dairesel ve dikdörtgen kanalda birim uzunluk başına basınç düşüşü için aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir:

$$\frac{\Delta P}{L} = 0,0017513 \text{ Re}^{1,12} \quad r^2 = 0,9789 \quad 10 < \text{Re} < 1500 \quad (4.1)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 0,003751 \text{ Re}^{1,02} \quad r^2 = 0,9951 \quad 5 < \text{Re} < 100 \quad (4.2)$$

Dairesel borular içerisinde laminer akış için ortalama kütle transfer katsayıları  $0,31 \cdot 10^{-5}$ - $2,24 \cdot 10^{-5}$  m/s aralığında L/d ve Re değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Reynolds sayısının artması ile kütle transfer katsayısı artmakta, L/d oranının artması ile azalmaktadır. Kütle transfer katsayısının Reynolds sayısına bağlılığı 0,15-20 aralığında değişmektedir. Makro kanallarda laminer akış koşullarında giriş bölgesi için Nusselt sayısı için korelasyonlarda Pr yerine Sc kullanılarak elde edilen Sh değerleri deneysel veriler ile karşılaştırıldığında, deneysel verilerin daha düşük olduğu görülmüştür. Deneysel veriler Gz sayısının fonksiyonu olarak korele edilmiş deneysel verilere uyan en iyi eşitlik aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Sh = 0,93 + 7,46 \cdot 10^{-4} Gz - 2,37 \cdot 10^{-8} Gz^2 \quad r^2 = 0,8730 \quad (4.3)$$

Dikdörtgen kanallarda laminer akışta bölgesel kütle transfer katsayıları  $2,37 \cdot 10^{-5}$ - $39,99 \cdot 10^{-5}$  m/s aralığında değişmekte ve Reynolds sayısının artması ile artmaktadır. Reynolds sayısının üssü 0,41-0,48 aralığında değişim göstermektedir. x/d nin etkisi tam gözlenememiştir. Kanal girişinden itibaren kütle transfer katsayılarının x/d ile azalma eğiliminde olmasına rağmen, kütle sınır tabakasının sürekli olmaması ve yerel elektrotlardaki kirlilik, pürüzlülük gibi etkilerden dolayı yerel kütle transfer katsayılarında sıçramalardan dolayı x/d etkisi tam olarak elde edilememiştir. Makro kanallarda laminer akış koşullarında giriş bölgesi için Nusselt sayısı için korelasyonlarda Pr yerine Sc kullanılarak elde edilen Sh değerleri



deneysel veriler ile karşılaştırıldığında, elektrotlara bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Bundan sonra yapılabilecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler yapılabilir. Bu çalışmada basınç düşüşü ölçümleri sadece laminar akış koşulları ile sınırlandırılmıştır. Dolayısı ile bundan sonraki çalışmalarda, türbülentli akış koşulları için veriler elde etmek amacıyla ilave çalışmalarda yapılabilir. Deneysel alt yapı geliştirilerek daha küçük dairesel mikro borularda ve dikdörtgen mikro kanallarda ölçümler tekrarlanabilir. Farklı kütle ölçüm teknikleri kullanılıp sonuçlar karşılaştırılarak ve mikro kanallardaki kütle transfer karakteristiklerinin netleştirilmesi konusunda literatüre katkı sağlanabilir.

**KAYNAKLAR**

- Acosta R.E, Muller, R., H., Tobias, C., W., 1985. Transport processes in narrow (capillary) channels. *Alche Journal*, 31, 473-482.
- Adeosun, J., T., Lawal, A., 2005. Mass transfer enhancement in microchannel reactors by reorientation of fluid interfaces and stretching. *Sensors and Actuators, B* 110, 101–111.
- 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.
- Araki, T., Soo, K., M., Hiroshi, I., Kenjiro, S., 2000. An experimental investigation of gaseous flow characteristics in microchannels. *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, 155–161.
- Arklic, E., B., Breuer, K., S, Schmidt, M., A., 1994. Gaseous flow in microchannels. *Application of Microfabrication to Fluid Mechanics ASME FED*, 197, 57–66.
- Bayraktar, T., Pidigu, S., B., 2005. Characterization of liquid flows in microfluidic systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 815–824.
- Berger, F.P., Ziai, A., 1983. Optimisation of experimental conditions for electrochemical mass transfer measurements. *Chemical Eng. Res.Des.*, Vol.61, 377-382.
- Celata, G., P., Cumo, M., Guglielmi, M., Zummo, G., 2002. Experimental investigation of hydraulic and single phase heat transfer in 0.130 mm capillary tube. *Microscale Thermophys. Eng.*, 6, 85–97.
- Celata, G., P., Cumo, M., Zummo, G., 2004. Thermal–hydraulic characteristics of single-phase flow in capillary pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science* 28 () 87–95.
- Celata, G., P., Lorenzini, M. , Morini , G., L., Zummo, G., 2009. Friction factor in micropipe gas flow under laminar, transition and turbulent flow regime, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 814–822.
- Choi, S., B., Barron, R., F., Warrington, R. O., 1991. Fluid flow and heat transfer in microtubes. *Micromechanical Sensors, Actuators and Systems, ASME DSC*, 32, 123–134.

- Gao, P., Le Person, S., Favre-Marinet, M., 2002. Scale effects on hydrodynamics and heat transfer in two-dimensional mini and microchannels. *Internat. J. Thermal Sci.*, 41, 1017–1027.
- 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.
- Harms, T., M., Kazmierczak, M., J., Gerner, F., M., Holke, A., Henderson, H., T., Pilchowski, J., Baker, K., 1997. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop through deep microchannels in a  $\bar{110}$  silicon substrate. *Proceedings of ASME Heat Transfer Division ASME HTD*, 351, 347–357.
- Hassan, I, Phuttohavong, P., Abdelgawad, M., 2004. Microchannel heat sinks: an overview of the state-of-the-art. *Microscale Thermophysical Engineering*, 8, 183-205.
- Incropera, F., P., Dewitt, D., P., 2001. *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Altıncı Bölüm, Taşınma Giriş, Yedinci Bölüm, Dış Akış, Sekizinci Bölüm, İç Akış, 4'üncü Basımdan Çeviri, Literatür Yayıncılık, İstanbul*, 315-518.
- Jiang, P., X., Fan, M., H., Si, G., S., Ren, Z., P., 2001. Thermal-hydraulic performance of small scale micro-channel and porous-media heat-exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 1039-1051.
- Jiang, X., N., Zhou, J., Y., Yao, Y., L., Ye, X., Y., 1995, Micro-fluid flow in microchannel. *Proc. Transducers*, 95, 317–320.
- Judy, J., Maynes, D., Web, W., B., 2000. Liquid flow pressure drop in microtubes. *International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, 149-154.
- Kandlikar, S., G., 2003. Microchannels-short history and bright future. *Heat Transfer Engineering*, 24(1):1–2, 2003.
- Kandlikar, S., G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King, M., R., 2006. Single-phase liquid flow in minichannels and microchannels, *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*, Elsevier Ltd.,UK, pp. 87–133.
- Kandlikar, S., G., Joshi, S., Tian, S., 2001. Effect of channel roughness on heat transfer and fluid flow characteristics at low Reynolds numbers in small diameter tubes. *Proc. of 35th National Heat Transfer Conference, Anaheim CA, USA*, , paper 12134.
- Kandlikar, S., G., Joshi, S., Tian, S., 2003. Effect of surface roughness on heat transfer and fluid flow, *Heat Transfer Engineering*, 31, 4-16.

- Kandlikar, S.G., Steinke, M.E., 2003. Examples of microchannel mass transfer processes in biological systems. First International Conference on Microchannels, April, 24-25, 933-943.
- Khan, M. G. and Fartaj, A., 2010. A Review on Microchannel Heat Exchangers and Potential Applications, International Journal of Energy Research. John Wiley & Sons, Ltd., US.
- Kohl, M.J., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S.M., Sadowski D.L., 2005. An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements. International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 1518-1533.
- Lalonde, P., Colin, S., Caen, R., 2001. Mesure de debit de gaz dans les microsystemes. Mec. Ind. 2, 355-362.
- Lelea, D., Shigefumi, N., Takano, K., 2004. The experimental research on microtube heat transfer and fluid flow of distilled water. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, 2817-2830.
- Li, Z., X., Du, D., X., Guo, Z., Y., 2000. Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes. International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale, 162-167.
- Li, Z., X., Du, D., X., Guo, Z., Y., 2003. Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes. Microscale Thermophysical Engineering, 7:253-265.
- Lin, T., Y., 2007. Experimental Analysis on Forced Convective Heat Transfer Characteristics in Micro Tubes by the Method of Liquid Crystal Thermography, Ph.D. Thesis, Science and Technology Institute, Çin.
- Loos, S., R., A., Schaaf, J., Croon, M., H., J., M., Nijhuis, T., A., Schouten, J., C., 2011. Enhanced liquid-solid mass transfer in microchannels by a layer of carbon nanofibers, Chemical Engineering Journal, 167, 671-680.
- Mala, G., M., Li, D., 1999. Flow characteristics of water in microtubes. Int. J. Heat Fluid Flow, 20, 142-148.
- Morini, G.L., Lorenzini, M., Salvigini, S., 2006. Friction characteristics of compressible gas flows in microtubes. Experimental Thermal and Fluid Science, 30, 733-744.
- Morini, L.G., 2004. Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results. International Journal of Thermal Sciences, 43, 631-651.
- 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., 2007. Experimental Heat Transfer, Pressure Drop, and Flow Visualization of R-134a in Vertical Mini/Micro Tubes. Doctoral Thesis, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration Department of Energy Technology Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Papautsky, I., Ameel, T., Frazier, A., B., 2001. A review of laminar single-phase flow in microchannels. ASME, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 1-9.
- Papautsky, I., Gale, B., K., Mohanty, S., Ameel, T., A., Frazier, A., B., 1999. Effects of rectangular microchannel aspect ratio on laminar friction constant. SPIE 3877, 147–158.
- Perez, N., 2004. Electrochemistry and Corrosion Science, Yedinci Bölüm, Electrometallurgy, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 189-233.
- Pfalher, J., Harley, J., Bau, H., H., Zemel, J., N., 1990. Liquid and gas transport in small channels, ASME DSC, 31, 149-157.
- Pfalher, J., Harley, J., Bau, H., H., Zemel, J., N., 1990, “Liquid transport in micron and submicron channels”, Sensors Actuators, A 21–23, 431–434.
- Pfund, D., Rector, D., Shekarriz, A., Popescu, A., Welty, J., 2000. Pressure drop measurements in a microchannel. AIChE J., 46, 1496–1507.
- Phillips, C., Fedorov, A., G., 2004. Multicomponent mass transfer in polymer-coated chemical sensors. Sensors and Actuators, 99, 273-280.
- Phillips, W., A., 2008. Experimental and Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannels. MS Thesis, Louisiana State University Louisiana.
- Phillips, W., A., J., 2008. Experimental and numerical investigation of fluid flow and heat transfer in microchannels, Mastır Tezi, Louisiana State Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Louisiana.
- Pong, K., Ho, C., Liu, J., Tai, Y., 1994. Non-linear pressure distribution in uniform microchannels. Application of Microfabrication to Fluid Mechanics”, ASME FED, vol. 197, 51–56.
- Raimondi, N., D., M., Prat, L., Gourdon, C., Cognet, P., 2008. Direct numerical simulations of mass transfer in square microchannels for liquid– liquid slug flow. 63, 5522-5530.
- Richter, M., Woias, P., Weiß, D., 1997. Microchannels for applications in liquid dosing and flow-rate measurements. Sensors Actuators A 62, 480–483.

- Şara, O., N., Yapıcı, S., Arzutuğ, M.,E., 2007. Mikro kanallarda basınç düşüşü ve ısı/kütle aktarımı:II- taşınım ile ısı ve kütle aktarım. Mühendis ve Makine, Ağustos, 571, 20-27.
- Şara, O.,N., Yapıcı, S., 2007. Mikro kanallarda basınç düşüşü ve ısı/kütle aktarımı: I- basınç düşüşü ve sürtünme faktörü bağıntıları., Mühendis ve Makine, Temmuz, 570, 23-34.
- Sedahmed, G., H., Abdo, M., S., KamalInt, M., A., 2001. A mass transfer study of the electropolishing of metals in mechanically agitated vessels. *Comm Heat Mass Transfer*, vol. 28, No. 2, pp. 257-265.
- Selman, J., R., Tobias, C., W., 1978. *Advances in Chemical Engineering*, Dördüncü Bölüm, Measurements by the Limiting Current Technique, Elsevier, Londra, 204-336.
- Shah, R., K., London, A., L., 1978. *Laminar Flow Forced Convection İn Duct*, Adv. Heat Transfer (Supplement 1). Academic Press, New York.
- Sharp, K., V., Adrian, R., J., 2004. Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes. *Experiments in Fluids*, 36, 741-747.
- Sharp, K., V., Adrian, R., J., Beebe, D., J., 2000. Anomalous transition to turbulence in microtubes. *Proceedings of Int. Mech. Eng. Cong. Expo.5th Micro-Fluidic Symp.*, 150–158.
- Shen, S., Xu, J.,L., Zhou, J.,J., Chen, Z.,Y., 2006. Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface. *Energy Conservation and Management*, 47, 1311-1325.
- Sobhan, C., B., Garmiella, S., V., 2001. Comparative analysis of studies on heat transfer and fluid flow in microchannels. *Microscale Thermophysical Engineering*, 5, 293-311.
- Steinke, M.,E., Kandlikar, S.,G., 2006. Single-phase liquid friction factors in microchannels”, *International Journal of Thermal Sciences*. 45, 1073-1083.
- Tuckerman, D. B., Pease, R. F., 1981. High performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electronic Device Letters*, EDL-2, 126–129, 1981.
- Walter, S., Malmberg, S., Schmidt B., Liauw, M.A., 2005. Mass transfer limitations in microchannel reactors. *Catalysis Today*, 110, 15–25.
- Wu, H.,Y., Cheng, P., 2003. An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46,2547-2556.

- Wu., P., 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.
- Xu, B., Ooi, K., T., Wong, N., T., Choi, W., K., 2000. Experimental investigation of flow friction for liquid flow in microchannels. *Internat. Comm. Heat Mass Transfer*, 27, 1165–1176.
- Xu, J., H., Tan, J., Li, S., W., Luo, G., S., 2008. Enhancement of mass transfer performance of liquid–liquid system by droplet flow in microchannels. *Chemical Engineering Journal*, 141, 242–249.
- Yang, C., Y., Chien, H., T., Lu., S., R., Shyu, R., J., 2000. Friction characteristic of water, R-134a and air in small tubes. *International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, 168-174.
- Yapıcı, S., Yazıcı, G., Özmetin, C., Erşahan, H., 1995. Mass transfer to local electrodes at wall and wall friction factor in decaying turbulent swirl flow. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 40, 2775-2783.
- Yu, D., Warrington, R., O., Barron, R., Ameel, T., 1995. An experimental and theoretical investigation of fluid flow and heat transfer in microtubes. *Proceedings of ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conf.*, 523–530.
- Yue, J., Chena, G., Yuana, Q., Luob, L., 2007. Hydrodynamics and mass transfer characteristics in gas–liquid flow through a rectangular microchannel. *Chemical Engineering Science*, 62, 2096 – 2108.

## ÖZGEÇMİŞ

Özgecan BARLAY ERGÜ 1979 yılında Ankara’da öğretmen bir anne ve uzman doktor bir babanın ilk çocukları olarak dünyaya geldi. 1985 yılında ilköğretime başladı, 1990 yılında Uşak Anadolu Lisesi’ni kazandı, 1998 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümüne girdi ve buradan 2003 yılında mezun oldu.

Aynı yıl Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında tezli ve Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü Kimya Öğretmenliği Anabilim Dalında tezsiz olmak üzere iki yüksek lisans programına kabul edildi. 2005 yılında tezsiz yüksek lisansını, 2006 yılında da tezli yüksek lisansını tamamladı. Tezinde “Sol-Jel Yöntemi ile Farklı Asit Oranlarında Alümina-Zirkonya Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu” konusunu çalıştı. Bu konu ile ilgili bir makalesi 2008 yılında, dairesel ve dikdörtgen mikro kanallarda basınç düşüşü ve kütle transferinin incelenmesi konuları ile ilgili iki makalesi 2009 yılında yayınlandı.

2004 yılında eğitimine devam ederken aynı zamanda Kara Kuvvetleri Komutanlığı’nda göreve başlamıştır ve halen aynı kurumda görev yapmaktadır. Evlidir ve bir çocuk sahibidir.