



**MİNİ KANALLARDA ISI TRANSFERİNİN  
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK  
İNCELENMESİ**

**Orhan YILDIRIM**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Termodinamik Bilim Dalı**

**Dr. Öğr. Üyesi Şendoğan KARAGÖZ**

**2018**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MİNİ KANALLARDA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL VE  
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Orhan YILDIRIM**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Termodinamik Bilim Dalı**

**ERZURUM**

**2018**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**MINİ KANALLARDA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL  
OLARAK İNCELENMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Şendoğan KARAGÖZ danışmanlığında, Orhan YILDIRIM tarafından hazırlanan bu çalışma, 16/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı - Termodinamik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Şendoğan KARAGÖZ

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Nesrin ADIGÜZEL

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi FARAZ AFSHARI

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 19.../07/2018 tarih ve 29.../29... nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Mehmet KARAKAN**  
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP, projeleri kapsamında desteklenmiştir.  
Proje No: 2016-205

**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

Yüksek Lisans Tezi

### **MINİ KANALLARDA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Orhan YILDIRIM

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Termodinamik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şendoğan KARAGÖZ

Teknolojik çalışmaların ilerlemesiyle cihazlar daha küçük boyutlarda üretilebilmekte, boyutlardaki küçülmeyle birlikte performanslarında artış da sağlanabilmektedir. Bu cihazlar endüstrinin ısıtma ve soğutma sistemleri, tıbbi alanlarda, savunma sanayisinde, hava teknolojilerinde, biyomühendislik yakıt pilleri vb. bir çok alanda kullanılmaya başlamış ve cihazların minyatürleştirilmesine etki etmiştir. Boyutların küçültülmenin bir sonucu olarak cihazların çalışması sırasında birim alandan uzaklaştırılması gereken ısı miktarının artmasından dolayı bu ısı enerjisinin uzaklaştırılması gerekmektedir. Son yıllarda araştırmacılar özellikle elektronik sistemlerde birim alandan atılması gereken ısı miktarının çok olmasından dolayı ısı transferinin önemli bir sorunu ve konusu haline gelmiştir. MikroElektroMekanikSistemler(MEMS) disiplinler arası bir çalışma olarak bu konularla ilgilenmektedir. Bu alandaki çalışmalar Ar-Ge faaliyetlerine büyük oranda katkı sağlayacaktır. Isı transferinde mini kanallar; düşük akışkan miktarı, hafiflik ve az yer kaplaması özellikleriyle yüksek ısı akışı şartlarında araştırmacıların en önemli alternatiflerinden biri haline gelmiştir.

Bu Tez çalışmasında iki farklı çapa ( $D=2,74$  mm –  $D=2,26$  mm) sahip kanallarda ısı transferinin etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Makro borularda kullanılan temel teorilerin amacı, çap küçüldüğü zaman uygulanabilirliğini gözlemek ve gerekirse buna uygun kolerasyonlar oluşturmaktır. Deneysel çalışmada her bir çap 6 farklı debi değerinde Reynolds Sayısı, Nusselt sayısı ve Isı taşınım Katsayısı bulunarak ısı transferine etkisi incelemiştir. Fluent paket programı kullanılarak sayısal analiz yapılmış olup deneysel analizler test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde mini kanallarda ısı ve akış analizi için deneysel ve sayısal analizlerin uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Kanal çapı küçüldüğünde ısı akışının yükseldiği ve sayısal sonuçlar deneysel sonuçlardan sapma gösterdiği görülmüş bunun nedeni ise ısı ve akış geçişine etki eden fiziksel mekanizmalardaki uyumsuzluğu olduğu saptanmıştır.

**2018, 79 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Minikanal, Taşınım, MEMS, Fluent, Tek Fazlı Akış

## **ABSTRACT**

MS Thesis

### **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN MINI CHANNELS**

Orhan YILDIRIM

Atatürk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering  
Thermodynamics Branch

Advisor: Asssit. Prof. Dr. Şendoğan KARAGÖZ

As a result of the progress of technological studies, devices can be produced in smaller sizes. With the downsizing in size, the performance can be increased. These devices are used in industrial heating and cooling systems, medical fields, defense industry, air technology, bioengineering fuel cells and etc. many areas have begun to be used and have influenced the miniaturization of the devices. As a consequence of the diminution of the dimensions, this thermal energy needs to be removed due to the increase in the amount of heat that must be removed from the unit area during operation of the devices. In recent years, researchers have become an important issue and issue of heat transfer, especially in electronic systems, since the amount of heat that must be thrown from the unit area is large. Microelectromechanicalsystem(MEMS) is an interdisciplinary study of these issues. The work in this area will contribute greatly to R & D activities. Mini channels have become one of the most important alternatives of researchers in heat transfer under high heat flow conditions due to low fluid volume, low weight and volume.

In this thesis study, the effect of heat transfer on mini pipes with two different anchors ( $D = 2.74 \text{ mm}$  -  $D = 2.26 \text{ mm}$ ) was investigated experimentally and numerically. The basic theories used in macro-piping are to be observed when the intended diameter is reduced and, if necessary, to create corresponding collaterals. In the experimental study, each circular diameter was examined for the effect of heat transfer by finding Reynolds number, Nusselt number and heat transfer coefficient at 6 different flow rates. Numerical analysis was performed using the Fluent packet program and experimental analyzes were tested. Results When examined, it was observed that the experimental and numerical analyzes for heat and flow analysis in mini pipes were in harmony. As the channel diameter decreased, the heat flux increased and the numerical results showed deviation from the experimental results. The reason for this is the discrepancy in the physical mechanisms affecting heat and flow.

**2018, 79 page**

**Key Words:** Mini Channels, Convection, MEMS, Fluent, Single Phase Flow

## TEŞEKKÜR

Çalışmanın ve eğitim-öğretimin her aşamasında teşvik, destek ve yardımlarını gördüğüm, bilgi ve tecrübelerini bana aktaran değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şendoğan KARAGÖZ'e ve Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI'ya teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Teknisyen Abit CÖMERT'e, Ahmet ÇEBE'ye, Arş. Gör. Murat CEYLAN'a ve Atatürk Üniversitesi Isı Transferi Laboratuvarı ekibine destek ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesi için sunduğu maddi destek ve yardımlardan dolayı Atatürk Üniversitesi Rektörlüğü ve BAP birimine teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında bana maddi ve manevi destek olan çok değerli abim Arş. Gör. Ahmet POLATOĞLU'na, sevgi ve desteklerini esirgemeyen Anneme, Babama, Kardeşlerime ve duaları ile yanımda olan kıymetli büyüklerime, dostlarıma şükranlarımı sunarım.

**Orhan YILDIRIM**  
**Temmuz, 2018**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖZET.....                                                      | i         |
| ABSTRACT.....                                                  | ii        |
| TEŞEKKÜR.....                                                  | iii       |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....                           | vi        |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                           | viii      |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                        | xi        |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                           | <b>1</b>  |
| 1.1. Mini Kanallarla İlgili Araştırmalar.....                  | 5         |
| <b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>                               | <b>17</b> |
| 2.1. Isı Transferi .....                                       | 17        |
| 2.1.1. Isı transfer mekanizmaları .....                        | 17        |
| 2.1.1.a. İletim.....                                           | 18        |
| 2.1.1.b. Taşınım.....                                          | 20        |
| 2.1.1.c. Işınım.....                                           | 22        |
| 2.1.2. Isı transferi artırma yöntemleri.....                   | 22        |
| 2.2. Konveksiyonla Isı Transferi .....                         | 24        |
| 2.2.1. Sınır tabaka kalınlığı .....                            | 25        |
| 2.2.1.a. Hidrodinamik sınır tabaka .....                       | 25        |
| 2.2.1.b. Termal sınır tabaka .....                             | 26        |
| 2.3. Borularda Türbülanslı Akış .....                          | 27        |
| 2.3.1. Pürüzlü yüzeyler.....                                   | 32        |
| 2.3.2. Giriş bölgesinde gelişen türbülanslı akış.....          | 33        |
| 2.4. MEMS ve Mini Kanallar .....                               | 33        |
| 2.4.1. MEMS ve mini kanal uygulamaları .....                   | 33        |
| 2.4.2. Mikro kanallarda ısı geçişini etkileyen faktörler.....  | 35        |
| 2.4.3. Mikrokanalların soğutulması ve nanoakışkan kavramı..... | 36        |
| 2.5. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin (CFD) Tanımı .....     | 37        |
| 2.5.1. Fluent.....                                             | 38        |
| 2.6. Deneysel Verilerin Hesaplamalarda Kullanılması .....      | 39        |

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>                       | <b>41</b> |
| 3.1. Deney Sistemi.....                                 | 41        |
| 3.1.1. Akışkan besleme bölümü .....                     | 43        |
| 3.1.2. Test bölümü.....                                 | 47        |
| 3.2. Ölçümler ve Belirsizlik Analizi.....               | 49        |
| 3.2.1. Sıcaklık ölçümleri.....                          | 49        |
| 3.2.2. Basınç Ölçümleri.....                            | 52        |
| 3.2.3. Isı güç ölçümleri.....                           | 52        |
| 3.3. Deneysel Yöntem .....                              | 52        |
| 3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Çözümü ..... | 53        |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>          | <b>56</b> |
| 4.1. Mini Kanallarda Deneysel Sonuçlar.....             | 56        |
| 4.2. Mini Kanallarla Sayısal Sonuçlar.....              | 58        |
| <b>5. SONUÇLAR.....</b>                                 | <b>71</b> |
| KAYNAKLAR .....                                         | 73        |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                          | 80        |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|            |                                             |
|------------|---------------------------------------------|
| $\lambda$  | Ortalama serbest yol (m)                    |
| $\dot{m}$  | Kütlesel Debi(kg/s)                         |
| $\Delta P$ | Basınç Düşümü(bar)                          |
| $\Delta T$ | Sıcaklık Farkı(°C)                          |
| $\mu$      | Dinamik viskozite (kg/m.s)                  |
| $A$        | Isı transferi yüzey alanı (m <sup>2</sup> ) |
| $C_p$      | Sabit basınçta özgül ısı(kJ/kg.K)           |
| $D$        | Çap (m)                                     |
| $D_h$      | Hidrolik Çap                                |
| $E$        | Toplam Enerji(kJ)                           |
| $f$        | Sürtünme Faktörü                            |
| $g$        | Yerçekimi ivmesi (m/s <sup>2</sup> )        |
| $h$        | Isı taşınım katsayısı (W/m <sup>2</sup> .K) |
| $I$        | Akım (A)                                    |
| $k$        | Isıl iletkenlik katsayısı (W/m.K)           |
| $k_{eff}$  | Efektif ısı transfer katsayısı              |
| $L$        | Test borusu uzunluğu(m)                     |
| $L_c$      | Karakteristik Uzunluk                       |
| $P$        | Çevre                                       |
| $P$        | Basınç(Bar)                                 |
| $Q$        | Isı miktarı (W)                             |
| $t$        | Zaman(s)                                    |
| $T$        | Sıcaklık (°C)                               |
| $U$        | Ortalama Hız (m/s)                          |
| $V$        | Gerilim (V)                                 |
| $\nu$      | Kinematik viskozite (m <sup>2</sup> /s)     |
| $V^i$      | Boru Net İç Hacmi(m <sup>3</sup> )          |

|               |                                                             |
|---------------|-------------------------------------------------------------|
| $V_{ort}$     | Ortalama hız                                                |
| $x$           | Bağımsız değişken                                           |
| $\beta$       | Hacimsel genleşme katsayısı (1/K)                           |
| $\varepsilon$ | Yüzey Yayılcılığı                                           |
| $\rho$        | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )                               |
| $\sigma$      | Stefan-Boltzmann sabiti (W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ) |

### Alt İndisler

|           |                    |
|-----------|--------------------|
| $\varphi$ | Çıkış              |
| duvar     | Yüzey sıcaklığında |
| eff,e     | Efektif            |
| f         | Zorlanmış          |
| g         | Giriş              |
| h         | Hidrolik           |
| L         | Lokal              |
| ort       | Ortalama           |
| s         | Yüzey              |
| $\infty$  | Ortam              |

### Kısaltmalar

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| CFD   | Computational Fluid Dynamics          |
| Gr    | Grashof sayısı                        |
| MEMS  | Mikro elektro-mekanik sistemler       |
| MFD   | Mikro Akış Cihazlar                   |
| MOEMS | Mikro Optik Elektro-Mekanik Sistemler |
| Nu    | Nusselt sayısı                        |
| Pr    | Prandtl Sayısı                        |
| Ra    | Rayleigh sayısı                       |
| Re    | Reynolds sayısı                       |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. 1946 yılında yapılan ENIAC bilgisayar .....                                                                                                                                                                                                                              | 2  |
| Şekil 1.2. a) Yakıt Hücresi(Cep Telefonu), b) Mikro ısı değıştiricisi(Elektronik devrelerin soğutulması), c) Mikro Pompa (İnsülin Enjenksiyon), d) Yonga Laboratuvar(Protein analizi), e) Mikro ivmeölçer (Kalp atışlarının İncelenmesi), f) Mikro Pompa (Morfin Enjeksiyonu) ..... | 3  |
| Şekil 1.3. Farklı uygulamalar için çalışılan boru çapları .....                                                                                                                                                                                                                     | 5  |
| Şekil 1.4. Agarwal <i>et al.</i> tarafından kullanılan mikro kanal geometrileri.....                                                                                                                                                                                                | 10 |
| Şekil 1.5. Dai <i>et al.</i> (2014a) farklı mikro kanallarda zorlanmış taşınım a) giriş sıcaklığının etkisi b) Isı akısının etkisi .....                                                                                                                                            | 10 |
| Şekil 2.1. Isı transfer türleri .....                                                                                                                                                                                                                                               | 18 |
| Şekil 2.2. Bir maddenin farklı fazlarda ısı iletim mekanizmaları .....                                                                                                                                                                                                              | 19 |
| Şekil 2.3. Geniş düzlem bir duvarda ısı iletimi.....                                                                                                                                                                                                                                | 19 |
| Şekil 2.4. Kaynamış bir yumurtanın akışkan hareketine göre taşınım soğutulması ....                                                                                                                                                                                                 | 21 |
| Şekil 2.5. Hidrodinamik sınır tabaka değışimi.....                                                                                                                                                                                                                                  | 25 |
| Şekil 2.6. Termal sınır tabakanın gelişimi .....                                                                                                                                                                                                                                    | 26 |
| Şekil 3.1. Deney düzeneğinin görünümü .....                                                                                                                                                                                                                                         | 42 |
| Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü .....                                                                                                                                                                                                                                 | 42 |
| Şekil 3.3. Sistemde kullanılan sirkülasyon pompası.....                                                                                                                                                                                                                             | 44 |
| Şekil 3.4. Sistemde kullanılan ısı eşanjörü .....                                                                                                                                                                                                                                   | 45 |
| Şekil 3.5. Sistemde kullanılan debimetre.....                                                                                                                                                                                                                                       | 46 |
| Şekil 3.6. Debimetre ve sistemdeki konumu .....                                                                                                                                                                                                                                     | 46 |
| Şekil 3.7. Basınç trandüseri .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 48 |
| Şekil 3.8. DC güç kaynağı .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 49 |
| Şekil 3.9. Test borusu ve bağlantılar.....                                                                                                                                                                                                                                          | 50 |
| Şekil 3.10. Test borusunun ızalasyonu .....                                                                                                                                                                                                                                         | 50 |
| Şekil 3.11. Sistemde kullanılan data okuma kartı ve termo elemanların bağlantısı .....                                                                                                                                                                                              | 51 |
| Şekil 3.12. IB10 ara birim.....                                                                                                                                                                                                                                                     | 51 |
| Şekil 3.13. Meshi yapılan bir borunun görüntüsü.....                                                                                                                                                                                                                                | 54 |
| Şekil 4.1. Mini kanallarda Nu-Re değışimi .....                                                                                                                                                                                                                                     | 56 |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.2.</b> Mini kanallarda $f$ - $Re$ değişimi .....                                                                        | 57 |
| <b>Şekil 4.3.</b> Çapı 2,26 mm Mini kanaldaki deneysel ve sayısal çalışmalardaki $Nu$ - $Re$ ilişkisi .....                        | 58 |
| <b>Şekil 4.4.</b> Çapı 2,74 mm Mini kanaldaki deneysel ve sayısal çalışmalardaki $Nu$ - $Re$ ilişkisi .....                        | 59 |
| <b>Şekil 4.5.</b> Mini kanallardaki deneysel ve sayısal sonuçların temel teorilerle karşılaştırılması ve $Nu$ - $Re$ ilişkisi..... | 59 |
| <b>Şekil 4.6.</b> Çapı 2,26 mm Mini kanaldaki deneysel ve sayısal çalışmalardaki $f$ - $Re$ ilişkisi .....                         | 61 |
| <b>Şekil 4.7.</b> Çapı 2,74 mm Mini kanaldaki deneysel ve sayısal çalışmalardaki $f$ - $Re$ ilişkisi .....                         | 61 |
| <b>Şekil 4.8.</b> Mini kanallardaki deneysel ve sayısal sonuçların temel teorilerle karşılaştırılması, $f$ - $Re$ ilişkisi.....    | 62 |
| <b>Şekil 4.9.</b> 2,74 mm çaplı boruda iterasyon değişimi.....                                                                     | 64 |
| <b>Şekil 4.10.</b> 2,26 mm çaplı boruda iterasyon değişimi.....                                                                    | 64 |
| <b>Şekil 4.11.</b> 2,74 mm Mini kanaldaki sayısal analiz sonucu kanal giriş ve çıkışında sıcaklık dağılımı .....                   | 65 |
| <b>Şekil 4.12.</b> 2,74 mm Mini kanaldaki sayısal analiz sonucu kanal girişinde basınç dağılımı.....                               | 66 |
| <b>Şekil 4.13.</b> 2,26 mm Mini kanaldaki sayısal analiz sonucu kanal giriş ve çıkışında sıcaklık dağılımı .....                   | 66 |
| <b>Şekil 4.14.</b> 2,26 mm Mini kanaldaki sayısal analiz sonucu kanal girişinde basınç dağılımı.....                               | 67 |
| <b>Şekil 4.15.</b> 2,74 mm mini kanalda $v=4,71$ m/s olduğunda kanal çıkışında sıcaklık değişimi .....                             | 67 |
| <b>Şekil 4.16.</b> 2,74 mm mini kanalda $v=4,71$ m/s olduğunda kanal çıkışında hız değişimi .....                                  | 68 |
| <b>Şekil 4.17.</b> 2,74 mm mini kanalda $v=4,71$ m/s olduğunda kanal girişinde basınç değişimi .....                               | 68 |
| <b>Şekil 4.18.</b> 2,26 mm mini kanalda $v=5,75$ m/s olduğunda kanal çıkışında hız değişimi .....                                  | 69 |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.19.</b> 2,26 mm mini kanalda $v=5,75$ m/s olduğunda kanal çıkışında sıcaklık değişimi ..... | 69 |
| <b>Şekil 4.20.</b> 2,26 mm mini kanalda $v=5,75$ m/s olduğunda kanal girişinde basınç değişimi .....   | 70 |



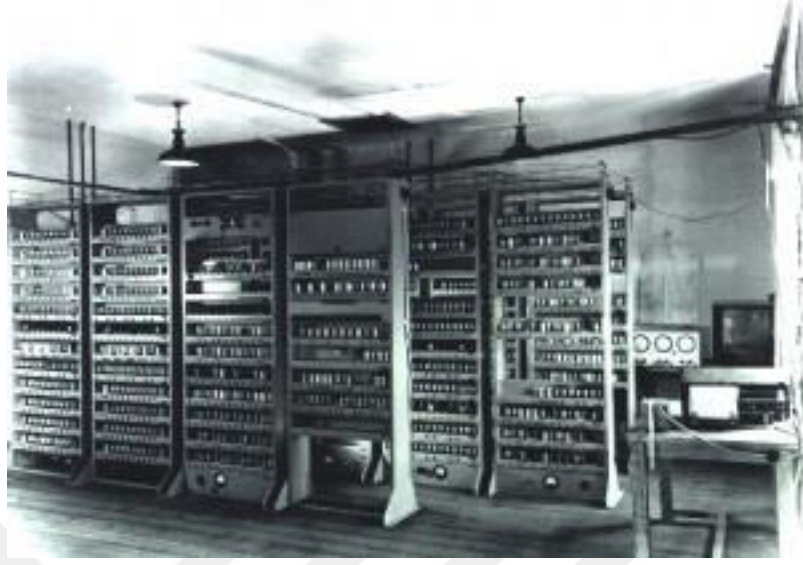
## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 1.1.</b> Mehendale <i>et al.</i> (2000) tarafından yapılan sınıflandırma.....                                         | 3  |
| <b>Çizelge 1.2.</b> Kandlikar and Grande (2004) ve Canay (2007) tarafından yapılan<br>kanal sınıflandırılması.....               | 3  |
| <b>Çizelge 1.3.</b> Mini ve Mikro Kanallar için deneysel ve sayısal çalışmalar özet<br>çizelgesi .....                           | 14 |
| <b>Çizelge 2.1.</b> Isı transferi iyileştirme yöntemleri.....                                                                    | 24 |
| <b>Çizelge 2.2.</b> Pürüzsüz borularda tam gelişmiş türbülanslı akış hakkında üretilmişler<br>denklem ve uygulama şartları ..... | 31 |
| <b>Çizelge 2.3.</b> MEMS uygulama alanları .....                                                                                 | 34 |
| <b>Çizelge 2.4.</b> Mini ve Mikrokanallarda yapılan çalışmalar sonucu bulunan<br>denklemlerin bazıları .....                     | 35 |
| <b>Çizelge 3.1.</b> Debimetre teknik özellikleri .....                                                                           | 47 |
| <b>Çizelge 3.2.</b> CFD sınır şartları .....                                                                                     | 55 |

## 1. GİRİŞ

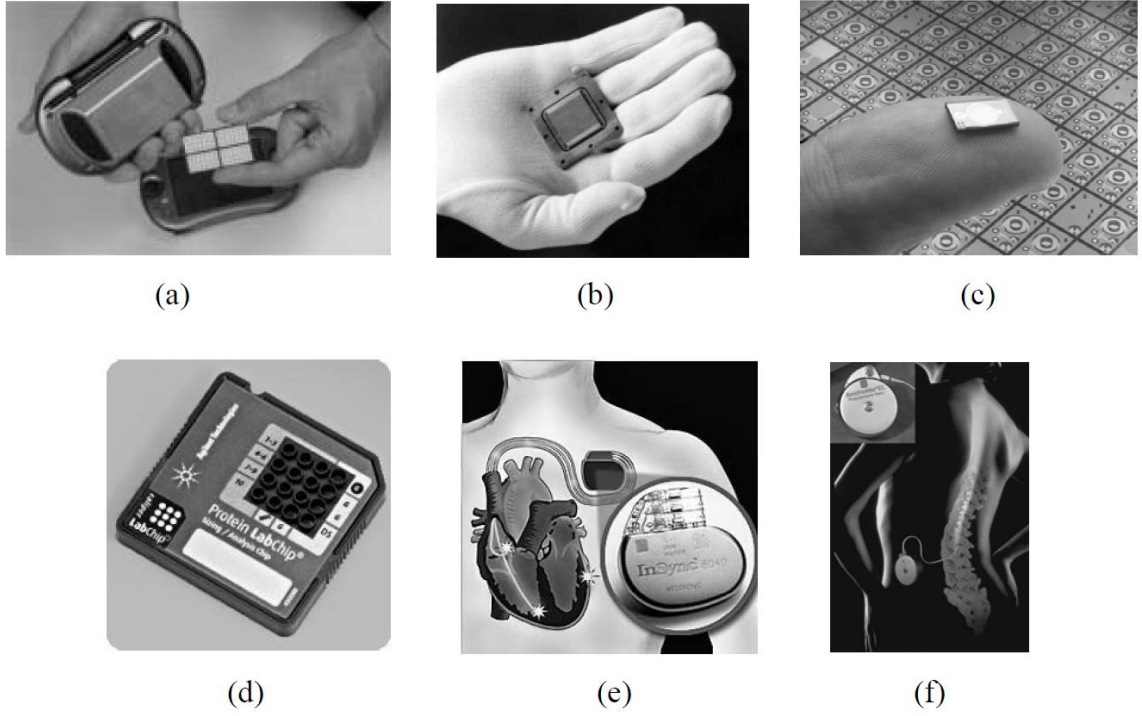
18. ve 19. Yüzyıllarda, Avrupa da gerçekleşen yeni buluşlar ve buhar gücüyle çalışan makinelerin üretim dâhil birçok alanda kullanılması, kömür, demir, çelik ve elektrik üretim sürecine sokulmuş ve endüstri alanını doğurmuş ve sanayi devrimi gerçekleşmiştir. İlk olarak İngiltere de ortaya çıkan sanayi devrimi, ardından batı Avrupa, Amerika ve Japonya dâhil tüm dünyaya yayılmıştır. Sanayi devrimi sonucunda büyük ölçekli cihazlar geliştirilmiştir. Sanayi devriminin yayılması teknolojik gelişmeleri artırırken enerjiye talep sürekli olarak artmaktadır. Sanayinin olduğu kadar halkında günlük yaşantısında önemli bir yere sahip olan enerjiye talep artarken enerji kaynakları azalmaktadır. Sürdürülebilir bir denge sağlanması için enerji kaynaklarındaki çeşitliliğin artması, kaynakların en verimli ve enerjinin akıllı kullanılması, yenilenebilir enerjini kaynaklarının kullanıma sunulması önemli bir noktaya gelmiştir. Günümüzde hem bilimsel araştırmalarda hem de endüstriyeldeki çalışmalarda ısı ve kütle transferini artırma ve iyileştirme önemli bir alan oluşturmıştır. Mikro-Nano boyutlardaki ısı transferi de son yıllarda önemli bir hale gelmiştir.

1980’li yıllarda üretim teknolojisinin gelişmesiyle bağlantılı olarak yeni alanlar ortaya çıkmıştır. 1981 yılında “Scannig Tunneling Microscope (STM)” adlı mikroskopun geliştirilmesi ile nanoteknoloji olarak adlandırılan süreç başlamış ve günümüz de ise mekanik, akış, bilgisayar, haberleşme, elektronik, uzay çalışmaları, biyomedikal, tıp gibi alanlarda mikron boyutlarda üretim başlamış ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin 1946 yılında Pensilvanya üniversitesinde geliştirilen ilk bilgisayarlardan olan ve en çok bilenen 30 ton ağırlığındaki ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) devasa bir boyutta olup bir odayı kaplıyordu geliştirilen sistemler sayesinde günümüzde bilgisayarlar çok az yer kaplamaktadır (Şekil 1.1).



**Şekil 1.1.** 1946 yılında yapılan ENIAC bilgisayar (Anonim 2018)

Bu sistemler Mikroakışlı Sistemler (Microfluidic Systems) olarak adlandırılmaktadır. Küçük boyutlu bu cihazlar zamanla büyük ölçekli, düşük verimli cihazların yerini almaya başlamıştır. Mikro sistemler üç grupta incelenmektedir; Mikro Elektromekanik Sistemler (MEMS), Mikro Optik Elektromekanik Sistemler (MOEMS) ve Mikro Akışlı Cihazlar (MFD) sistemleridir. MEMS, küçük ölçekli elektro-mekanik sistemlerin incelendiği bir disiplinler arası bir uygulama alanıdır. Mikro pompa veya ısı değiştiricisi, kalp pili gibi kullanım alanlarında tek veya çift fazlı akış, taşınım ve ısı aktarımı gibi sistemler MFD sistemlerinin uygulama alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Teknolojinin ilerlemesi ile bu sistemler sürekli gelişmekte ve uygulama alanları gittikçe artmakta, bu gelişmelere ek olarak mikro-akış, mikro-ısı aktarımı gibi kavramlar gelişmiş ve bunlarla ilgili alanlar ortaya çıkmıştır. Mikro-nano boyutlarda geliştirilen elektromekanik sistemlerin, daha küçük boyutlara mikro-nano seviyelere indirgenmesi, hız ve performans arttırmaya yönelik çalışmaları devam etmektedir. Küçük hacimlerde ısı transferini gerçekleştirmek mikro veya mini kanallar sayesinde gerçekleşmektedir. MEMS'lerin sınıflandırılması mikro veya mini terimlerinin kullanılmaya başlaması ve çapa bağlı bir sınıflandırma yapılmasını gerekli kılmıştır. MEMS'lerin çapa bağlı olarak en çok kullanılan sınıflandırmalar aşağıda Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2'de belirtilmiştir. Uygulama da kullanılan bazı MEMS ürünleri Şekil 1.2'de verilmiştir.



**Şekil 1.2.** a) Yakıt Hücresi(Cep Telefonu), b) Mikro ısı değıştiricisi(Elektronik devrelerin soğutulması), c) Mikro Pompa (İnsülin Enjenksiyon), d) Yonga Laboratuvar(Protein analizi), e) Mikro ivmeölçer (Kalp atışlarının İncelenmesi), f) Mikro Pompa (Morfin Enjeksiyonu) (Tabelling 2005)

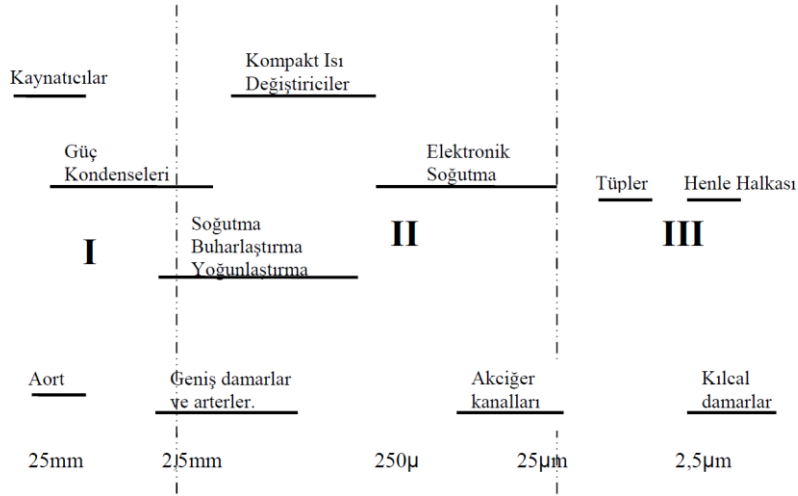
**Çizelge 1.1.** Mehendale *et al.* (2000) tarafından yapılan sınıflandırma

|                         |                                                       |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|
| Geleneksel(makro) Kanal | $D_h > 6\text{mm}$                                    |
| Sıkıştırılmış geçiş     | $1\text{ mm} < D_h < 6\text{ mm}$                     |
| Mezo(Mini) Kanal        | $100\text{ }\mu\text{m} < D_h < 1\text{ mm}$          |
| Mikro Kanal             | $1\text{ }\mu\text{m} < D_h < 100\text{ }\mu\text{m}$ |

**Çizelge 1.2.** Kandlikar and Grande (2004) ve Canay (2007) tarafından yapılan kanal sınıflandırılması

| Kanal Adı   | Canay(2007)                                           | Kandlikar ve Grande(2004)                              |
|-------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Makro Kanal | $1\text{ mm} < D_h$                                   | $3\text{ mm} < D_h$                                    |
| Mini Kanal  | $100\text{ }\mu\text{m} < D_h < 1\text{ mm}$          | $200\text{ }\mu\text{m} < D_h < 3\text{mm}$            |
| Mikro Kanal | $1\text{ }\mu\text{m} < D_h < 100\text{ }\mu\text{m}$ | $10\text{ }\mu\text{m} < D_h < 200\text{ }\mu\text{m}$ |

Günümüzde hidrolik çapları çok küçük olan bu mini ve mikro kanalların kullanım alanı genişlemekte ve yeni araştırma konuları ortaya çıkmaktadır. Günümüz teknolojisinin getirdiği yüksek performans cihazları MEMS alanında etkisini göstermiştir. Yüksek performanslı cihazların enerji ihtiyacı artmış ve beraberinde soğutma yükleri de artmıştır. Sonuç olarak mini ve mikro kanallarda ısı transferi performansı geliştirilmesi önemli bir hal almıştır. Küçük hidrolik çapları sayesinde etkin bir ısı transferi sağlamanın yanında boyutlarının küçük olması, kullanılan akışkanın az olması, ağırlıklarının az ve taşınabilir olması gibi avantajları sayesinde önemi ön plana çıkmaktadır. Makro kanallarda yapılan akış ve ısı karakteristiğini için geliştirilen bağıntılar çapların küçüldüğü zaman geçerliliğini koruyup korumadığı günümüz araştırma konusunu oluşturmaktadır. Yapılan birçok araştırma bu farklılığı ortaya koymaktadır. Makro kanallarda akış Reynolds sayısına bağlı olarak laminar bölgesi, geçiş bölgesi yada türbülans bölgesi olarak gerçekleşir. Bu akış düzenleri kanal içinde hidrolik ve ısı sınır tabakanın gelişmesine bağlı olarak dört tip akış meydana gelir ve bunlar; tam gelişmiş akış, hidrodinamik akış, ısı olarak meydana gelişen akış ve eş zamanlı gelişen akıştır. Bu durum mini ve mikro kanallar için de geçerlidir. Yapılan bazı çalışmalarda mini ve mikro kanallarda bu akış tiplerinin geçerliliğini koruyamadığı görülmüş ve yeni bağıntılar literatüre kazanılmıştır. Bu karşın yapılan bazı çalışmalarda da elde edilen sonuçlar makro kanallardaki temel teorilerle uyum içerisinde olduğu görülmüş ve temel teorilerin bu çaplardaki kanallarda uygulanabileceği belirtilmiştir. Bu yüzden son yıllarda mikro ve mini kanallar üzerinde çok sayıda deneysel ve sayısal olarak çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada Kandlikar ve Grande'nin sınıflandırması esas alınmıştır.



**Şekil 1.3.** Farklı uygulamalar için çalışılan boru çapları (Kandlikar *et al.* 2003)

### 1.1. Mini Kanallarla İlgili Araştırmalar

Yüksek ısı akıları, küçük boyutlar, akışkan miktarının az olması, ekonomik ve taşınabilir olması gibi sebeplerden dolayı tercih edilen mini ya da mikro kanallar, küçük hidrolik çaplarda yüksek basınç kayıplarına sebep olması bununda ötesinde çap küçüldükçe cidar ve ara yüzey etkilerinin artmasından dolayı akış davranışı temel teorilerden uzaklaşmaktadır. Bu uzaklaşmanın boyutları henüz saptanmamıştır. Ayrıca sınıflandırma başta olmak üzere birkaç konuda araştırmacılar tarafından bir uzlaşmaya varılmadığı görülmüştür. Literatürde mini kanallarla ilgili çalışmalara göz atıldığında hidrolik çap esas alındığından dolayı dairesel, dikdörtgen, yamuk, üçgen, trapez gibi farklı geometrilere sahip çalışmalarla karşılaşılmaktadır.

Celata (2006) yaptığı çalışmada akışkan tipi, kanal çapı, kenar oranı ve eğim parametrelerini de esas olarak farklı kanallarda deneysel çalışmalar yapmıştır. Akışkan tipleri olarak demineralize su, R-134a kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan boru çapları tamamen pürüzsüz olup 0,259-1,699 mm arasında değişmektedir. Bu çalışma üç farklı enstitüde yapılmıştır. Sonuçlar klasik bağlantılarla karşılaştırılmıştır. Poiseuille ve Blasius denklemlerinin kesit alanı, eğim ve akışkan tipi gözetmeksizin geçerli olmuştur.

Celata (2006) yaptığı diğer çalışmada dairesel çapı 120  $\mu\text{m}$  - 528  $\mu\text{m}$  değişen mikro borularda tek fazlı laminar akışı doğru sınıflandırmak için deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmada eksenel ısı iletimi, ısı girişi uzunluğu ve viskoz ısınmanın mikro borular üzerine etkisini incelemiştir. Sonuçlar çap küçüldükçe Nu sayısının küçüldüğünü gözlemlemiştir.

Yun Heming *et al.* (2006) yaptığı çalışmada mini kanaldaki akışı ve ısı geçişini CFD yöntemiyle sayısal olarak analiz etmiştir. Boru cidarı üzerinde sabit ısı akısı, giriş sıcaklığı 20°C de olan hidrolik çapı 0,2-1,4 mm arasında değişen dikdörtgen kesitli borularda su için analizler yapmıştır. Bu koşullar altındaki Knudsen sayılarını hesaplamıştır. Analizde model olarak Reynolds Stress Model(RSM) kullanılmıştır. Yapılan çalışmada sonuçlar şöyle sıralanmıştır; Laminer bölgede sürtünme çarpanının etkisi yok, türbülanslı bölge de çap büyüdükçe sürtünme çarpanının azaldığı, kenar oranının artmasıyla sürtünme çarpanının arttığı, Re sayısının sürtünme çarpanının azaldığını gözlemlemiş ve çapın küçülmesiyle Re sayısının azaldığını belirlemiştir.

Steinke and Kandlikar (2006) yaptığı bu çalışmada mikro kanalda tek fazlı akış için sürtünme çarpanını deneysel olarak incelemiş ve literatür karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmayla mikro kanaldaki sürtünme çarpanının temel teorilerle uyum içerisinde olduğunu sonucuna varmıştır.

Qu and Mudawar (2002) yaptığı çalışmada genişliği 57  $\mu\text{m}$  ve derinliği 180  $\mu\text{m}$  dikdörtgen kesitli mikro kanalda ısı alıcılarının üç boyutlu analizini gerçekleştirmiştir. Simple algoritmasını kullanarak üç boyutlu Navier-stokes ve enerji denklemlerini çözerek sayısal bir analiz gerçekleştirmiştir. Sonuçlar analitik çözümlerle ve mevcut diğer sonuçlarla karşılaştırmıştır. Katı ve sıvılardaki artışın doğrusal olduğunu, ısı akısı ve Nu sayısında ise çevre etkisiyle bir değişim olduğunu gözlemlemiştir.

Adams *et al.* (1997) yaptığı bu çalışmada dairesel çapı 0,76-1,09 mm olan, akışan tipi olarak su kullanılan mikro kanaldaki tek fazlı türbülanslı akıştaki zorlanmış taşınımın etkilerini incelemiştir. Sonuçlar Reynolds Sayısı 2600-23000 ve çapı 0,102-1,09 mm

aralığındaki diğer çalışmayla kıyaslanmıştır. Nu sayısı için ön görülen değerler  $\pm\%18,6$  farkla uyduğu belirlenmiştir.

Peng *et al.* (1994) yaptığı bu çalışmada hidrolik çapı 0,133-0,343 mm arasında değişen dikdörtgen kesitli borularda akışkan olarak su'nun etkilerini incelemiştir. Sürtünme davranışının laminar ve türbülanslı bölgede temel teorilerden ayrıldığı ve türbülanslı laminar bölgeye geçişin gözlemlendiği, Reynolds sayısının klasik değerden daha küçük olduğu sonucuna varılmıştır.

Van Male *et al.* (2004) yaptığı bu çalışmada silikon kare mikro kanallarda akışın ısı ve kütle özelliklerini incelemek için CFD çözümlemesini kullanmışlardır. Çözümleme sonuçları deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu gözlemlenmiş ve farklı Nu ve Sherwood sayıları için karşılıklı denklem sunmuşlardır.

Garimella (2005) yaptığı bu çalışmada farklı kesit şekilleri ve hidrolik çaplar için mikro ve mini kanallarda yoğunlaşma durumunda akış tipi, ısı geçişi ve basınç kaybını belirlemek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Akış görselleştirme teknikleri de kullanılarak akış mekanizmaların anlaşılması için sunulmuştur. Bu çalışmanın sonucunda çeşitli akış rejimleri arasındaki geçişin temel geometrilerde olması gerekenden farklı şartlarda olduğu meydana gelmiştir.

Mala and Li (1999) yaptığı çalışmada silika ve paslanmaz çelikten yapılmış 50 mm -254 mm arasında değişen iki ayrı dairesel kesitli kanalda basınç kayıplarını incelemişlerdir. Sabit kütleli debilerde Re sayısı arttıkça Pousielle eşitliğinden uzaklaştığını, bu uzaklaşmanın 130  $\mu\text{m}$ 'den küçük borularda daha belirgin olduğu sonuçlarıyla karşılaşmışlardır. Akışkan tipi olarak su kullanılan bu deneylerde, kanal içindeki akış davranışının kanal malzemesi ile bağlantılı olduğu yorumu yapılmıştır. Türbülansa geçişe ek olarak yüzey pürüzlülüğü de araştırması gerektiği önerisi de sunulmuştur.

Zhuo *et al.* (2006), ikizkenar yamuk ve üçgen kesite sahip mikro kanallarda üç boyutlu su akışını sayısal olarak incelemişlerdir. Kesit etkisi ve Reynolds sayısının ısı ve akış

üzerine etkisi araştırılmıştır. Birbirine uyumlu kanalların aksine, laminar akış bölgesinde Nusselt sayısının sabit olmadığı Reynolds sayısı ile arttığı gözlemlenmiştir.

Zhuo *et al.* (2007) yaptığı diğer çalışma da ise, mikrotüpler üzerine yaptığı çalışmada ısı transferini ve akış karakteristiğini laminar bölgede deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneylerde iş akışkanı saf su olan ve yüzeyi parlatılmış silika ve kaba paslanmaz çelikten yapılmış hidrolik çapları 50  $\mu\text{m}$  -100  $\mu\text{m}$  ve 373  $\mu\text{m}$  - 1570  $\mu\text{m}$  olan mikro borular kullanılmıştır. Reynolds Sayısı 20-2400 aralığında belirlenmiştir. Sürtünme faktörü yüzeyi parlatılmış silika tüpler için temel teori tahminleriyle uyum içerisindeyken kaba paslanmaz çelikte bu uyum gözlenmemiştir. Isı transferi incelendiğinde ise aksel yöndeki nusselt sayısının beklenilenden düşük olmasının sebebi ise düşük reynolds sayılarında çalışılması olarak gözlemlenmiştir.

Lelea *et al.* (2004) yaptığı bu çalışmada Reynolds sayısını 800 ile sınırlandırmış, kanal malzemesi olarak paslanmaz çelik ve iş akışkanı olarak saf su kullanılmıştır. Laminar akışta mikro tüplerin çapları ise sırasıyla; 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm olarak seçilmiştir. Tüm mikro tüpler için geleneksel ve klasik teori ile uyum içerisinde olduğu sunulmuştur.

Cheng and Wu (2002), ikizkenar yamuk şeklinde tasarlanan mikro kanal kesitine su akışı için taşınım ile ısı geçişi ve basınç kaybı ile oluşan nusselt sayısı değerinin ve sürtünme faktörünün bir dizi parametreye bağlı olduğunu ve yüzey pürüzlülüğü ile de arttığını ifade etmişlerdir. Bu artış Reynolds sayısının artması ile daha belirgin hale gelmiştir. Geometrik boyutlar ve ilgili diğer parametreler bilindiğinde İkizkenar yamuk mikro kanallarda Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için gerekli olan diğer boyutsuz parametreler elde edilmiştir.

Chen and Cheng (2002), elektronik çiplerin soğutulmasında kullanılan mikro kanallarla ilgili yeni bir ağaç tasarım sunmuşlardır. Bu mikro kanal ağlarındaki ısı geçişi ve akış davranışını incelemek için deneyler yapmışlardır. Bu ağlar, geleneksel paralel mikro kanal ağları ile karşılaştırıldığında daha iyi bir ısı geçişi sağladığı ve daha düşük pompalama gücü olduğunu gözlemlemişler.

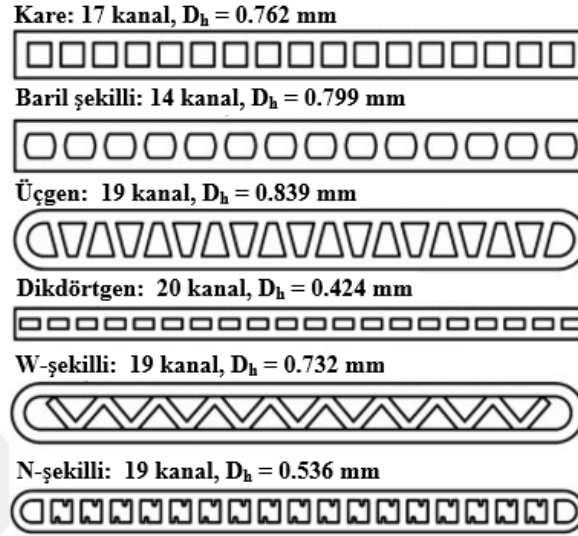
Yin *et al.* (2002), karmaşık başlıkları ve paralel devreleri olan bir mikro kanal ısı değiştiricisini tek fazlı akışta basınç kaybı ölçümlerini göstermişlerdir. Deneyler İmalatta olan kusurları belirlemek için yapılmıştır.  $\mu\text{m}$  boyutlardaki hidrolik çaplardaki kanallarda sürtünme için Moody diyagramının uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir.

Shokouhmand and Bigham (2010) yapılan diğer çalışmada sabit Reynolds sayısındaki mikrokannalların termal ve hidrodinamik karakteristiklerini belirlemek için sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Termal ve hidrodinamik karakteristiklere Knudsen sayısı ve geometri etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçları olarak Nusselt sayısı ve Sürtünme Katsayısının Knudsen sayısı ile beraber düştüğü gözlemlenmiştir. Giriş bölgesinde ısı transferi ve sürtünme katsayısının çok yüksek olduğu, akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş hale yaklaşması ile hızlı bir şekilde düşeceği bildirilmiştir. Ek olarak viskoz yayılımın mikro kanal karakteristiklerini belirlemede önemli bir noktaya sahip olduğu, Knudsen sayısının artışı ile bu etkinin daha belirgin olarak ortaya çıkabileceği bahsedilmiştir.

Morkani *et al.* (2009) deneysel olarak yaptığı çalışmada sabit genişlikte mikrokannallarda akış ve konvektif ısı transferini incelemiştir. Kanal yüksekliğinin  $50\ \mu\text{m}$  -  $500\ \mu\text{m}$  arasında değiştiği deney sisteminde iş akışkanı olarak akış hızı  $0,04\ \text{ml/dk}$  -  $240\ \text{ml/dk}$  arasında olan şebeke suyu kullanılmıştır. Akışın Reynolds sayısı çalışma aralığı  $100 - 5000$  arası olarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçları akış ve konvektif ısı transferi için konvansiyonel kanunlar ve kolerasyonların direk olarak uygulanabileceğini göstermiştir. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin büyük boyutlu kanallara benzer Reynolds sayılarında gözlemlendiği de rapor edilmiştir.

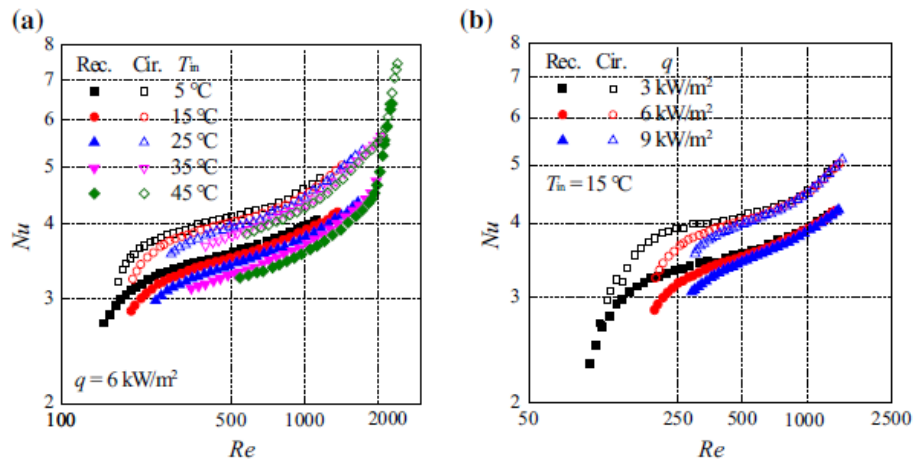
Agarwal *et al.* (2010) yaptığı çalışmada dairesel olmayıp N,W, Dikdörtgen, Kare, Üçgen kesitli 5 farklı geometrilere sahip mikro kanaldaki ısı transfer katsayısını belirlemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır(Şekil 1.4). Çalışmada hidrolik çapı  $0,424\ \text{mm}$  -  $0,939\ \text{mm}$  arasında tutulmuş, akışkan olarak da R-134a kullanılmıştır. Deneylerde kütleli debi aralığı  $150-750\ \text{kg/m}^2\text{s}$  olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarının büyük kanallar için

geliştirilmiş teorik modellerin uzağında kaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmalar sonucunda dikdörtgen, kare kesitli ve barıl kanallar için modeller sunulmuştur.



Şekil 1.4. Agarwal *et al.* tarafından kullanılan mikro kanal geometrileri

Dai *et al.* (2014), dikdörtgen kesitli hidrolik çapı 0,715 mm olan çok kanallı ekstrüzyonlu mikrotüplerde yaptığı çalışmada, tek fazlı etanolün sürtünme ve ısı transfer özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada giriş sıcaklığı 5-45°C arasında, ısı akısı 3-9 kW/m<sup>2</sup> arasında değişmiştir. Giriş sıcaklığı ve ısı akısının azalması ile Nusselt sayısının arttığını gözlemlemiştir.



Şekil 1.5. Dai *et al.* (2014a) farklı mikro kanallarda zorlanmış taşınım a) giriş sıcaklığının etkisi b) ısı akısının etkisi

Kim (2016), en boy oranının ve hidrolik çapın sırasıyla 0,25-3,8 ve 155-580  $\mu\text{m}$  arasında değiştiği 10 farklı dikdörtgen kesitli mikrokanallarda akış direncini ve ısıl davranışını araştırmıştır. İş akışkanı olarak FC770 ve su kullanılmıştır.  $Re < 180$  olduğu durumlarda deneysel olarak elde edilen Nusselt sayılarının geleneksel bağıntılar tarafından tahmin edilen değerden daha küçük olduğu,  $Re > 180$  ise Nusselt sayısının tahmin edilenden daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Ma *et al.* (2011), dar ve dikdörtgen kesitli kanalda yaptığı çalışmada ısı ve hidrodinamik analizni sayısal ve deneysel olarak gerçekleştirmiştir. Kullanılan mikrokanalın özellikleri ise, yüksekliği 2 mm, uzunluk hidrolik çap oranı 300, genişlik-yükseklik oranı, 0,05, ortalama bağıl pürüzlülük değeri  $8,3 \cdot 10^{-4}$ 'tür. Kanallar dik bir şekilde konumlandırılmış ve iş akışkanı olarak deiyonize su kullanılmıştır. Reynolds sayısı 1090-10200 aralığında değişmiştir. Sonuçlar teori ile karşılaştırılmış ve laminar bölgede sürtünme faktörünün teorik değerlerden küçük olduğu gözlemlenirken Nusselt sayısı teori ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yazarlar laminar bölgede sürtünme katsayısı ve Nusselt sayısının tahmini için iki adet yeni kolerasyon önermişlerdir.

Barlak *et al.* (2011), Reynolds sayısı 100-10000 arasında değişen, iş akışkanı olarak distile edilmiş su ve hidrolik çapları 0,20-0,589 mm arasında değişen farklı uzunluklara sahip toplam 18 adet mikrotüpте basınç düşümü ve sürtünme faktörünü deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada akış rejimi olarak türbülansa ve kritik Reynolds sayısına dair çalışmalar da mevcut olup sadece hidrodinamik bir çalışma amaçlanmıştır. Farklı parametrelere sahip 18 mikrotüp için yapılan çalışmaların tutarlı olduğu görülmüştür.

Moharana *et al.* (2011),dikdörtgen kesitli, çoklu girişe sahip bir minikanalı deneysel ve sayısal incelemiştir. İş akışkanı olarak deiyonize su kullanılmış ve akış, ısıl ve hidrodinamik olarak gelişmektedir. Minikanallarda 15 adet paralel minikanaldan oluşmaktadır. Kanalların hidrolik çapı 0,907 mm, yükseklik genişlik oranı 0,7, bağıl pürüzlülük %0,364'tür. Sabit ısı akısında yapılan bu çalışmada, ısı kanalın sadece alt kısmından uygulanmış ve kanalın üst tarafı adyabatiktir, Reynolds sayısı 150-2500 arasında değişmektedir. Fluent kullanılarak korunum denklemleri akış ve katı madde için

çözülerek bütünleşik ısı transferi uygulanmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Minikanalların tasarımında sayısal yöntemin kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Kim *et al.* (2017), minikanalların kritik kanal boyutunu ve uzunluğunu belirlemek için çalışma yapmışlardır. Akışkan olarak su soğutucu kullanılan çok kademeli minikanallı, düşük basınç düşüşüne sahip ve küçük bir alanda daha verimli bir soğutma hızı elde etmek için bir tasarım yapmışlardır. Tek fazlı akış ve laminar koşullar altında çeşitli sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Kanalin çapı 2 mm uzunluğu 530 mm'dir. Çözümleme, soğutma suyu sıcaklığı, kanal-duvar sıcaklığı, kütle akısı, basınç düşüşü vb. parametreler altında analiz gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal çalışma daha sonra deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve temel teoriler kullanılmıştır. Maksimum soğutma hızı 5 kademeli modelde basınç düşüşü 1383 Pa'da 40 W/cm<sup>2</sup> olduğu gözlemlenmiştir.

Chein *et al.* (2015), çok kanallı yatay minikanallardaki tek fazlı kaynama da ısı geçişini çalışmışlardır. 7 adet dikdörtgen kanalı 7,9x2,5 mm ve 5000 mm uzunluk, 1400-4200 arasında Reynolds Sayısı ve ısı akısı 3-6 kW/m<sup>2</sup>, kanal malzemesi olarak alüminyum ile araştırma yapmışlardır. Kütle ve ısı akısının akışını ısı transferine etkisini çözümlemişlerdir. Akış rejiminin geçişi Reynolds Sayısının 300 olduğu görülmüştür. CFD çözümlenmesi yapılarak deneysel verilerle karşılaştırılmış, deneysel ve sayısal verilerin uyum içerisinde olduğu göstermişlerdir.

Zhang *et al.* (2017) çok parçalı mini kanallı yatay tüp(MMFT) içinde ısı transferi iyileştirme yöntemi olan mikro yüzgeç yapısı ve nanoakışkanlar kullanarak tek fazlı akış da ısı transferini ve basınç düşüşünü deneysel olarak incelemişlerdir. MMFT'ler paralel dikdörtgen minikanallardan ve minikanallar ısı değiştiricinde kullanılmak üzere tasarlandı. İyileştirme tekniğinden birisi uygulanmış ve ısı geçiş miktarı, Nusselt Sayısı ve sürtünme faktörü ve performans değerlendirme kriteri kullanılarak araştırılmıştır. Bu iyileştirme tekniği farklı mikro yüzgeç sayılarına (N = 0, 1, 2, 3 ve 4) sahip beş MMFT ve üç hacim konsantrasyonlu nanoakışkan ( $\phi = 0,005, 0,01$  ve  $0,1$ ) kullanılmıştır. İkinci aşamada iyileştirme tekniği kombine olarak uygulanmış ve deneyler

gerçekleştirilmiştir. Nusselt sayısı,  $Re=3600$ 'de %158 artmakta, performans değerlendirme kriteri ise  $Re=5120$ 'de 2,0'a ulaşmaktadır.

Zewede *et al.* (2017), on iki adet dairesel minikanalı ısı eşanjöründe iş akışkanı olarak Etanol /polialfaolefin (PAO) nanoemülsiyon sıvıları kullanılarak nano yapılı ısı transfer etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Reynolds sayısı 140-1200 arasında değişmiştir. Tek fazlı ve iki fazlı olarak incelenen çalışma da karşılaştırma için temel teoriler kullanılmıştır. Tek fazlı akışta, PAO sıvı ile karşılaştırıldığında Etanol / PAO nanoemülsiyon arasında Nusselt sayısında önemli bir artış olmadığı gözlemlenmiştir.

Ho *et al.* (2018), minikanal ısı alıcıları üzerinde yaptığı bu çalışmada minikanal ısı alıcılarının geometrisini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Paralel ve ıraksak olarak ısı alıcılarını  $\beta=1,38/2,06$  derece diverjans açılarına sahip hidrotermal kapasiteleri üzerine karşılaştırılmalı bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma sıvısının hacimler akış hızı  $3.2 \times 10^4$ ,  $4 \times 10^4$  ve  $4.8 \times 10^4$  W / m farklı ısı akısı yoğunlukları altında 100-600  $cm^3/dk$  arasında belirlenmiştir. Minikanalların Duvar sıcaklık dağılımı, ortalama Nusselt sayısı, basınç düşüşü ve sürtünme faktörünün ilgili değerleri, soğutucu akışkanın ısıl direnci ve performans maliyeti (COP) farklı deney koşulları altında termal performansını incelemişlerdir.

Dai *et al.* (2014), dairesel ve dikdörtgen kesitli kanallarda iki farklı çoklu girişli mikro kanal içerisinde sıvı akışını deneysel olarak incelemişlerdir. İş akışkanı etanol ve Reynolds sayısı 50-240 arasındadır. Çalışma hem izotermal hem de 3-9  $kW/m^2$  arasındaki sabit ısı akısı şartlarında yapılmıştır. Yazarlar  $Re<250$  küçük olduğu zaman Nusselt sayısı tahmin edilenden küçüktür olduğunu ifade etmişlerdir. Isı akısının artmasının sürtünme faktörünün azalmasına sebep olduğu görülmüştür.

**Çizelge 1.3.** Mini ve Mikro Kanallar için deneysel ve sayısal çalışmalar özet çizelgesi (Salman *et al.* 2012)

| Yazar                        | Kanal Profili          | Hidrolik Çap                                   | Akışkan         | Çalışma Aralığı (Re) | Sonuçlar veya İncelen Durumlar                                                                                                                              |
|------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agarwal <i>et al.</i> (2010) | Yatay dairesel olmayan | 0,424-0,939 mm / laminar                       | R134a           |                      | Soğutucu R134a'nın yoğunlaşması sırasında ısı aktarımı için korelasyonlar geliştirilmiştir.                                                                 |
| Roland <i>et al.</i> (2006)  |                        | 700-200 $\mu\text{m}$ / laminar ve türbülanslı | Demineralize Su | 200-8000             | Mikro ölçekte laminar akış için Nusselt sayısında bir azalma meydana geldiği bildirilmiştir.                                                                |
| Owhaib <i>et al.</i> (2004)  | Dairesel               | 0,862-1,7 mm / laminar                         | R134a           |                      | Daha küçük çaplı kanallarda ısı transfer katsayısının daha yüksek olduğu ve sistem basıncındaki artışın ısı transfer performansını arttırdığı gözlenmiştir. |
| Chui <i>et al.</i> (2011)    | Dikdörtgen             | W/H=1,67-14,29 / laminar                       | Su              | 50-1000              | Isı transfer katsayısındaki artışının yüksek en/boy oranına sahip mikrokannallarda daha belirgin olduğu rapor edilmiştir.                                   |
| Celata <i>et al.</i> (2010)  |                        | 480 $\mu\text{m}$ / laminar                    | FC-72           |                      | Isı transfer katsayısının ısı akısından bağımsızlığına yönelik sonuçlar alınmıştır.                                                                         |
| Diaz and Schmidt (2007)      | Dikdörtgen             | H=0,3 mm<br>W=12,7mm / laminar                 | Su ve Etanol    |                      | Alt ısı akısının artması ile ısı transfer katsayısında bir artış olduğu belirlenmiştir.                                                                     |
| Chen <i>et al.</i> (2009)    |                        | 100 - 250 $\mu\text{m}$ / laminar              | Su              | 200-1700             | Kanal boyutların azaltıldığında yoğunlaşmada ısı transferinde belirgin bir artış elde edilmiştir.                                                           |
| Asthana <i>et al.</i> (2011) |                        | 100 $\mu\text{m}$ / laminar                    | Su/Yağ          | -                    | Sıcaklıktaki değişimden büyük oranda etkilenen basınç kaybındaki artışın, ısı transferini arttırdığı belirlenmiştir.                                        |
| Kohl <i>et al.</i> (2005)    |                        | 25-100 $\mu\text{m}$ / laminar ve türbülanslı  | Su ve Hava      | -                    | Sonuçlar mikrokannallardaki sürtünme katsayılarının, standart boyutlara sahip kanal verileri kullanılarak çıkarılabileceğini göstermiştir.                  |

Çizelge 1.3. (Devamı)

|                               |            |                                                |                                         |           |                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------|------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tang <i>et al.</i> (2007)     |            | 52-300 $\mu\text{m}$ / laminar                 | Azot ve Helyum                          | 3-6300    | Mikrokanallardaki yüzölçümünün sürtünme katsayısını doğrudan etkileyeceği belirtilmiştir.                                                                                              |
| Mokrani <i>et al.</i> (2009)  |            | 1 - 100 $\mu\text{m}$ / laminar ve Turbulans   | Su                                      | 100-5000  | 50 ila 500 $\mu\text{m}$ arasında kanal yüksekliğine sahip mikrokanallarda, Konvansiyonel kanunlar ve kolerasyonların direkt olarak uygulanabilirliği ortaya konmuştur.                |
| Berstch <i>et al.</i> (2009)  |            | 1,09 ve 0,54 mm                                | R134a ve R245fa                         | -         | Tek fazlı akış için R134a ve R245fa akışkanlarının ısı transfer katsayıları karşılaştırılmıştır.                                                                                       |
| Ngo <i>et al.</i> (2007)      |            | 1,09 mm / laminar                              | $\text{CO}_2$                           | 250-2500  | Mikrokanallı ısı değiştiricilerinde basınç düşüm katsayısı analizi yapılmış ve S-şekilli kanatların zikzak kanatlara göre 4-5 kat daha az basınç düşümüne neden olduğu belirlenmiştir. |
| Wu <i>et al.</i> (2011)       | Dikdörtgen | L/D=50-150 / laminar                           | R134a, R123, R245fa, R236fa, Azot ve Su | -         | Su verilerinin %94'ünün ve su harici verilerin %97'sinin tahminin için %30 hata oranına sahip bir metot ortaya konmuştur.                                                              |
| Muhammad <i>et al.</i> (2010) | Dikdörtgen | H=300 $\mu\text{m}$<br>W=100-250 $\mu\text{m}$ | FC-70, Helyum ve Su                     | 1000-3000 | Yüksek Reynolds sayılarında, iş akışkanı olarak su kullanımı, FC-70 ve Helyum kullanımına oranla daha iyi ısı performans elde edilmesini sağlamıştır.                                  |
| Niazmand <i>et al.</i> (2008) | Dikdörtgen | W/H=25-2 / laminar                             | Gaz                                     | 10-200    | Hız profilinin tamamen gelişmiş olmaması ve sıcaklık sıçramaları nedeniyle, giriş bölgesinde ısı transferi ve sürtünme katsayısında büyük bir düşüş gözlenmiştir.                      |
| Khadem <i>et al.</i> (2009)   |            | L/H=20 laminar                                 | Gaz                                     | -         | Yüksek bağıl pürüzlülüklerde akışın Nusselt sayısı, pürüzlülükten büyük oranda etkilenmiştir.                                                                                          |

**Çizelge 1.3. (Devamı)**

|                                |                            |                                        |               |            |                                |
|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|---------------|------------|--------------------------------|
| Del Col <i>et al.</i> (2010)   | Dairesel / Bakır           | 960 $\mu\text{m}$                      | R1234yf       | 200-1000   | Basınç düşümü ve ısı geçişi    |
| Shiferaw <i>et al.</i> (2009)  | Dairesel - Paslanmaz Çelik | 1100 $\mu\text{m}$                     | R134a         | 100-800    | Isı geçişi                     |
| Huo <i>et al.</i> (2007)       | Dairesel - Paslanmaz Çelik | 2010 - 4260 $\mu\text{m}$              | R134a         | 100-500    | Isı geçişi                     |
| Warrier <i>et al.</i> (2001)   | Dikdörtgen - Alüminyum     | 750 $\mu\text{m}$                      | FC84          | 557-1600   | Basınç düşümü ve ısı geçişi    |
| Lee <i>et al.</i> (2003)       | Dikdörtgen                 | 780-3640 $\mu\text{m}$                 | R113          | 50-200     | Basınç düşümü ve ısı geçişi    |
| Downing <i>et al.</i> (2000)   | Dairesel                   | 230-1860 $\mu\text{m}$                 | R113          | 750-6330   | Basınç düşümü                  |
| Kim and Mudawar (2012)         | Dikdörtgen - Bakır         | 1000 $\mu\text{m}$                     | FC72          | 118-367    | Isı geçişi                     |
| Ağra ve Teke (2008)            | Dairesel - Bakır           | 4000 $\mu\text{m}$                     | R600a         | 57-118     | Isı geçişi                     |
| Cavallini <i>et al.</i> (2006) | Dikdörtgen - Alüminyum     | 1400 $\mu\text{m}$                     | R410a, R134a  | 200-1400   | Isı geçişi                     |
| Qwhaib and Palm (2004)         | Dairesel - Paslanmaz çelik | 800-1700 $\mu\text{m}$                 | R134a         | 1000-17000 | Isı geçişi ve Basınç düşümü    |
| Kandlikar <i>et al.</i> (2005) | Dikdörtgen -               | 325-1819 $\mu\text{m}$                 | Su, hava      | 200-5700   | Basınç düşümü                  |
| Garimella and Singhal (2004)   | Dikdörtgen                 | 250-1000 $\mu\text{m}$                 | –             | 588-2202   | Basınç düşümü ve ısı geçişi    |
| Adams <i>et al.</i> (1998)     | Bakır, dairesel            | 76, 102, 1090 $\mu\text{m}$            | Su            | 2600-23000 | Basınç düşümü ve ısı geçişi    |
| Fernando <i>et al.</i> (2008)  | Alüminyum, Dikdörtgen      | 1.44 mm                                | Su            | 170- 600   | Basınç düşümü ve ısı geçişi    |
| Choi and Cho (2001)            | Dikdörtgen                 | 6900-254.10 <sup>4</sup> $\mu\text{m}$ | parafin       | 3000-15000 | Sürtünme Faktörü ve Isı geçişi |
| Lee <i>et al.</i> (2005)       | Dikdörtgen                 | 318-930 $\mu\text{m}$                  | de iyonize su | 300-3500   | Sürtünme Faktörü ve Isı geçişi |
| Hwang <i>et al.</i> (2006)     | Dairesel                   | 244-792                                | R-134a        | 100-10000  | Sürtünme Faktörü               |

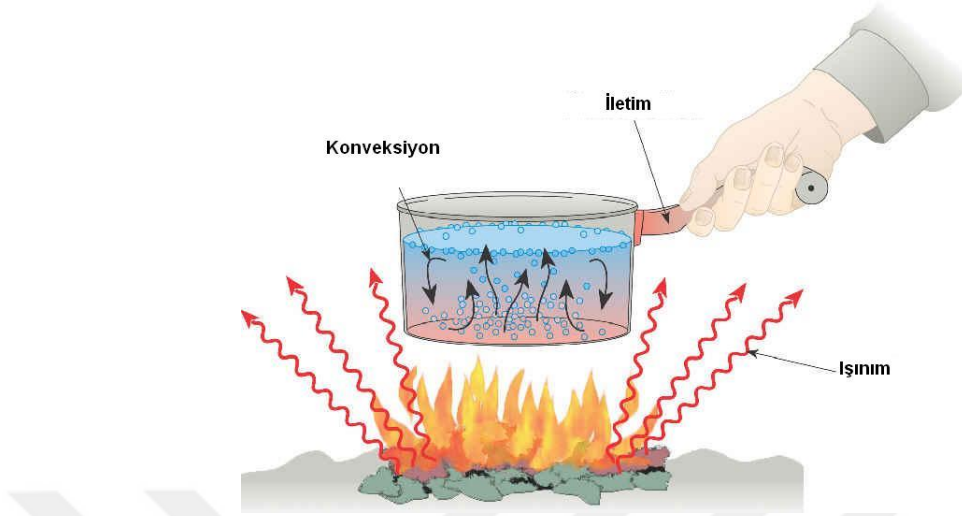
## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Isı Transferi

Termodinamik bir sistemin denge durumuyla ilgilenir ve denge halindeki bir sistemi başka bir denge durumuna getirmek için sistem ile çevresi arasında ısı ve iş alışverişi ile enerji değişimini inceler. Isı transferi ise, ısı dengesi bozulmuş bir sistemle ilgilenir. Isı, sistem sınırında geçişte geçen enerji şekli olarak bilinir. Isı transfer miktarını belirlemek için sadece termodinamik yasalar yeterli olmayabilir buna ilave bazı fizik kanunları ekleyerek inşa edilir. 2. Yasasına göre, termodinamik bir işlem sırasında iki ortam arasında sıcaklık farkı oluşuyorsa ısı yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama doğru geçer. Isı kavramı, sıcaklık farkından dolayı yüksek enerji bir ortamdan düşük enerji bir ortama transfer edilen enerji olarak tanımlanır. Örneğin ortama bırakılan bir fincan çay çevre ile bir etkileşim halinde olur ve fincan çay sıcaklığı düşer ve bir ısı transferi meydana gelir. Termodinamik çayın soğutma miktarını bulurken, ısı transferi de bunun ne kadar süre de soğuyacağını belirler. Isı transferi uygulama alanlarına birçok alanda rastlarız; iklimlendirme sistemleri, kombiler, elektrikli ev aletleri, bilgisayarlar, ocaklar, mühendislik alanları açısından düşünüldüğünde ise motorlar, türbinler, enerji santralleri, güneş panelleri, uzay gemisi gibi pek çok cihazın tasarımında önemli rol oynar.

#### 2.1.1. Isı transfer mekanizmaları

Enerjinin ısı olarak transferi her zaman yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan düşük sıcaklıktaki bir ortama doğru akar ve böyle bir enerji transferinin hızlarını bulmamızı sağlayan bilim dalı ısı transferi. Isı, Üç farklı mekanizma ile aktarılır. Bunlar; iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıyım (radyasyon). Isı transfer mekanizmalarının hepsinde sıcaklık farkı olmak zorundadır ve ısı yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama doğru geçer.

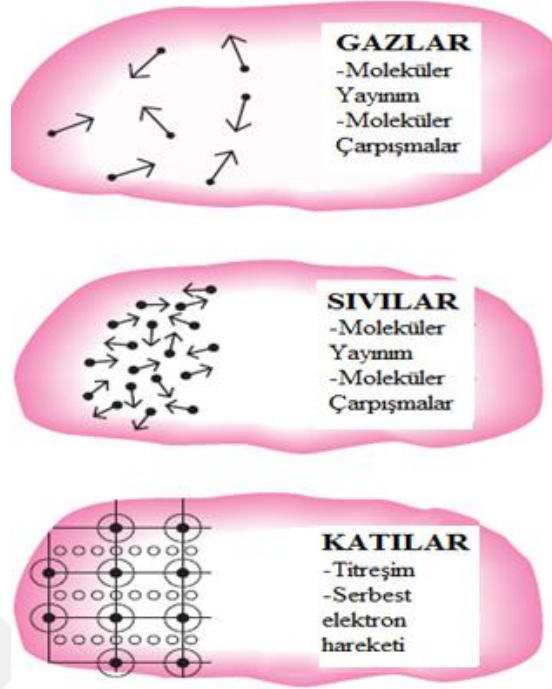


**Şekil 2.1.** Isı transfer türleri (Anonim 2018)

**İletim**, parçacıklar arası etkileşmenin sonucu olarak enerjinin bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklarından bitişiklerindeki daha düşük enerjili olanlara aktarılmasıdır. **Taşınım**, bir katı yüzey ve bitişikindeki hareket halinde olan sıvı veya gaz akışkan arasındaki ısı aktarılması biçimidir ve iletim ile akışkan hareketinin bileşik etkilerini içerir. **Işınım**, atom veya moleküllerin elektronik düzenlerindeki değişimin bir sonucu olarak, maddeden elektromanyetik dalga veya fotonlar şeklinde yayılan enerjidir (Çengel 2011).

#### 2.1.1.a. İletim

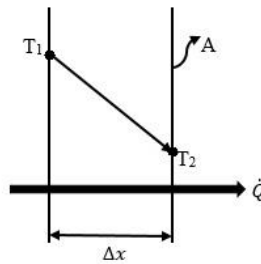
İletim, parçacıklar arası etkileşmenin sonucu olarak enerjinin bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklarından bitişiklerindeki daha düşük enerjili olanlara aktarılmasıdır. Bu ısı transfer mekanizması ısı enerjisinin moleküllerin doğrudan teması sonucunda oluşur. İletimle ısı transferi katı, sıvı ve gaz hallerinde görülebilir. İletim işlemi sıvılarda moleküllerin birbirini takip eden çarpışmaları ile katılarda ise moleküllerin ve maddenin yapısını oluşturan kafeslerin titreşimleri ile gazlarda ise moleküler yayılma ve çarpışma ile gerçekleşir (Kakaç 1999).



**Şekil 2.2.** Bir maddenin farklı fazlarda ısı iletim mekanizmaları (Çengel 2011)

Isı iletimi sıcaklık farkı, ısı transfer yüzey alanı, kalınlığına malzemenin bir özelliği olan ısıl iletkenlik katsayısı( $k$ ) gibi parametrelere bağlıdır. Isıl iletkenlik, malzemenin ısıyı iletme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Bir diğer anlamı ile malzemenin ısıl iletkenliği, birim sıcaklık farkında, birim alan ve kalınlıkta gerçekleşen ısı transferi miktarı olarak tanımlanmaktadır. Isı iletim kanunu 1822’de Fourier tarafından Eşitlik 1.1 de ifade edilmiştir.

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$



**Şekil 2.3.** Geniş düzlem bir duvarda ısı iletimi

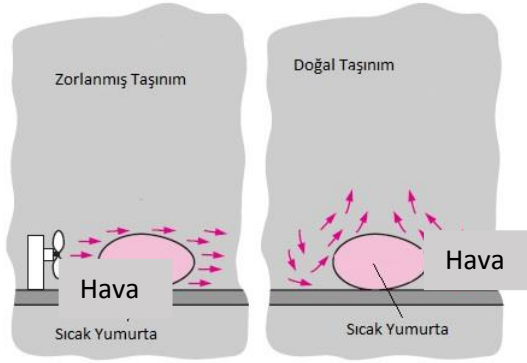
Fourier ısı iletim yasası olarak bilinen bu denklem, bir yöndeki iletim ile ısı transferinin sıcaklık gradyanı ile doğru orantılı olduğunu gösterir. Bu yasa kararlı hal durumunda bir boyutta ısı iletimi için kullanılır. Fourier ısı iletim kanun genel ifadesindeki (Eşitlik 2.1)  $dT/dx$ ,  $x$  yönündeki sıcaklık gradyanı,  $A$  ısı geçiş yüzey alanı ve  $k$  ise ilgili malzemenin ısı iletim katsayısıdır.

### 2.1.1.b. Taşınım

Taşınım, bir katı yüzey ile ona bitişik, hareket halinde olan sıvı veya gaz akışkan arasındaki enerji aktarım biçimidir ve iletim ile akışkan hareketinin bileşik etkilerini içerir. Taşınım da önemli olan ortamlardan birisinin hareketli olmasıdır aksi durumda iletim meydana gelir. Bu mekanizma da hareketli akışkan molekülleri yüzey ile temasları sonucu aldıkları enerjiyi akışkan boyunca aktarırlar. Isı taşınım yasasını Newton soğutma yasasıyla ifade edilir. Bu ısı transfer mekanizmasında ısı transfer hızı, ortamlar arasındaki sıcaklık farkı, yüzey alanı ve ısı taşınım katsayısı ile doğru orantılıdır. Bu yasa Eşitlik 2.2 de ifade edilmiştir. Eşitlik 2.2’de verilen Newton’un Soğutma Yasası’nda  $h$  ısı taşınım katsayısı,  $A$  ısı transferi yüzey alanı,  $T_s$  yüzey sıcaklığı ve  $T_\infty$  ortam sıcaklığıdır.

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Yapılan bu çalışmanın konusu da taşınım olduğundan akışkanın nasıl tahrik edildiği önemlidir. Akışkan hareketi basınç farkı ya da fan, pompa veya rüzgâr vasıtasıyla oluyorsa zorlanmış taşınım, yoğunluk farkından dolayı oluyorsa doğal(serbest) taşınım ya da ikisi beraber karma taşınım meydana gelir.



**Şekil 2.4.** Kaynamış bir yumurtanın akışkan hareketine göre taşınım ile soğutulması

Yerçekimi ortamında ağır bir akışkanla yer değiştiren daha hafif bir akışkanı yukarı doğru iten bir kuvvet vardır. Akışkanı yukarı doğru uyguladığı bu kuvvete kaldırma kuvveti olarak adlandırılır. Doğal taşınım da ki akışkan hareketini sağlayan kaldırma kuvvetidir. Isının artmasıyla havanın hacmi artar ve yoğunluk azalır. Isı transferinin sıcaklık farkı cinsinden ifade edilmesi istenir fakat özgül kütle farkının sıcaklık farkı cinsinden ifade edilmesini gösteren bir özelliğin bilinmesi gerekir. Bu özellik hacimsel genleşme katsayısıyla ( $\beta=1/T$ ) tanımlanır. Doğal taşınımın olabilmesi için  $\frac{Gr_L}{Re_L^2} \gg 1$  oranından yararlanılır. Bu oranda  $Gr_L$ : Grashof sayısıdır ve akışkan üzerinde etkiyen kaldırma kuvvetinin viskoz kuvvetine oranı olarak tanımlanır.  $Re_L$ ; Reynolds sayısı olarak bilinir ve akışkan parçacığı üzerine etkiyen atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranı olarak bilinir. Doğal taşınım da akış rejimi  $Gr$  sayısına bağlıdır. Doğal taşınım birçok uygulamada etkilidir. Doğal taşınım, düşük maliyet ve yüksek ısı transferi miktarı sağladığından dolayı cihazların kullanılmasında tercih edilen bir soğutma yöntemidir.

Zorlanmış taşınım, akışkan yüzey üzerindeki hareketi fan, pompa gibi dış etmenlerle sağlanır. Zorlanmış taşınım, doğal taşınım etkileri göz ardı edildiğinden  $Gr_L-Re_L$  arasındaki ilişki  $\frac{Gr_L}{Re_L^2} \ll 1$  şeklinde ifade edilir. Sıvı hareketinin pompa ile sağlandığı ısı değiştiricileri, fanlı hava ısıtıcıları zorlanmış taşınımın olduğu cihazlara örnektir.

Zorlanmış taşınımında levha, boru demetleri gibi sınırlandırılmayan bir serbest akış hareketi olduğunda “dış akış” tanımlaması yapılırken, akışkan hareketi boru veya kanal gibi sınırlı yüzeylerde oluyorsa “iç akış” söz konusudur.

Karma taşınım ise doğal taşınım etkilerinin ihmal edilmediği, kararsız bir sıcaklık gradyanı etkisinden bahsedildiğinde oluşur. Çok düşük Reynolds sayılarında doğal taşınımı ihmal etmek hataya sebep olabilir.  $0,01 < \frac{Gr_L}{Re_L^2} < 10$  bu oran doğal taşınımın etkisinin gözlemleneceğini bizlere göstermektedir.

### 2.1.1.c. Işınım

İletim ve taşınımında, enerji bir ortam vasıtasıyla transfer edilir. Deneysel çalışmalar sonucunda hiçbir ortam olmadığı durumlarda da enerjinin transfer edildiğini bize göstermektedir. Işınımında bir aracı ortam gerekmemektedir. Elektromanyetik dalgalarla aracılığıyla transfer olan bu mekanizma ışıınım olarak adlandırılır. Güneş enerjisinin dünyamıza ulaşma şekli budur. Işınım hacimsel bir olay olup bütün katılar, sıvılar, gazlar ışıınımı değişen seviyelerde yayar, soğurur ya da geçirir.  $T_s$  sıcaklığına sahip bir yüzeyden yayılabilecek maksimum ışıınım hızı Stefan-Boltzmann kanunu ile ifade edilir. Yayıcılığı  $\epsilon$ , yüzey alanı  $A_s$ , termodinamik sıcaklığı  $T_s$  olan bir yüzey  $T_{\text{çevre}}$  sıcaklığında çok geniş bir yüzeyle tamamen çevrelenmiş ve aralarında ışıınım ile etkileşmeyen bir gaz olduğu zaman bu iki yüzey arasında ışıınım meydana gelir ve Eşitlik 2.3 ile ifade edilir. Burada  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabitidir ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ) (Çengel 2014; Kakaç 1999).

$$\dot{Q}_{\text{ışıınım}} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{çevre}}^4) \quad (2.3)$$

### 2.1.2. Isı transferi artırma yöntemleri

Teknolojik gelişmelere paralel olarak kullanılan aletlerin minyatürleştirilmesi ve işletim oranındaki artış aletlerin termal yönetiminde çeşitli problemler ortaya çıkarmıştır. Bir diğer problem ise yüzey alanıdır. Cihazların küçültülmesi ilse yeni bir soğutma teknolojisi

de ortaya çıkarmıştır. Bu soğutma yollarından birisi yeni tasarımlar için mikrokanallar ve küçük soğutucu cihazlar kullanmakla diğeri ise sıvının ısı transfer katsayısını arttırmaktır. Günümüzde mikrokanalların üretilmesi ve bunu ısı değıştircilerinde kullanılması mühendislikte yeni bir yaklaşımı gözler önüne sermiştir (Tuckerman and Peace 1981).

Mikro kanallarda olduğı gibi mini kanallarda da ısı değıştircileri tasarlanmış ve bu cihazlar küçük boyut, düşük ağırlık, az akışkan ve yüksek ısı iletkenliğı gibi özelliklere sahiplerdir. Bu cihazların boyutunun ve ağırlığının azalması birçok alan için önemlidir. Örneğın, bu yeni soğutma teknolojisi sayesinde boyutlar ve ağırlıkların küçölmesiyle bilgisayarlar daha da küçük olmaya ve verimli bir hale gelmeye başladı.

Günümüzde enerjinin daha etkili ve verimli bir şekilde kullanılmasına bugün için alternatif bir enerji yöntemi olarak bakılması gereklidir. Bu kapsamda endüstrinin her alanında kullanılan ısı değıştirciler dâhil olmak üzere tüm cihazlarda ısı transferini iyileştirmeye yönelik enerji ekonomisi anlamında çalışmalar mevcuttur. Isı transferini iyileştirmeye yönelik bu çalışmalar aktif, pasif ve karma yöntemler başlığı altında toplanmaktadır. Aktif yöntem, ısı aktarılan akışkana ilave enerji vererek iyileştirmeyi sağlayan yöntemdir. Pasif yöntem, Isı aktarılan akışkana ilave enerji verilmeden gerekli iyileştirmeyi sağlayan yöntemdir. Karma yöntem ise aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlasını birlikte kullanmakla iyileştirme sağlanır. Aktif yöntemde ilave enerji harcanacağından dolayı maliyet göz önüne alınmalı. Endüstri için pasif yöntem tercih edilmelidir. Pasif yöntemde de önemli oranda iyileştirmeler elde edilmektedir. Pasif yöntem bu avantajına rağmen dezavantajlara da sahiptir. Pasif yöntemde uygulama sırasında basınç düşüşünde artış meydana gelir ve akışkanı pompalamak için gerekli enerji miktarı artar.

**Çizelge 2.1.** Isı transferi iyileştirme yöntemleri

| Pasif yöntemler         | Aktif Yöntemler       |
|-------------------------|-----------------------|
| İşlenmiş Yüzeyler       | Mekanik yardımcılar   |
| Pürüzlü Yüzeyler        | Yüzey titreşimi       |
| Genişletilmiş Yüzeyler  | Jet çarpması          |
| Katkı Maddeleri         | Akışkan Titreşimi     |
| Yüzey Gerilim Aygıtları | Emme veya Enjeksiyon  |
| Dönmeli Akış Aygıtları  | Elektrostatik Alanlar |
| Yerleşik İyileştirme    |                       |

## 2.2. Konveksiyonla Isı Transferi

Isı bir yüzeyden hareket halindeki akışkana transfer edildiğinde bu iletim veya taşınım olabilir. Yığın akışkan hareketi (sıvı veya gaz) olduğunda taşınım meydana gelir. Taşınım ısı transferindeki asıl amaç yüzeyden hareket eden yığın akışkana olan ısı transfer miktarını hesaplamaktır. Sıvıların ısı transferi gelişiminde en önemli etken ısı iletkenlikteki artışla beraber farklı parametreler etki etmektedir. Bu parametreler akışkan hızı  $V$ , dinamik viskozite, ısı iletkenlik, özgül kütle, özgül ısı, boru çapı ve geometrisi gibi akışkan özelliklerine fazla bağlı olduğu görülmüştür.

Bölüm 2.1.1.2 bahsedilen ısı transfer mekanizmalarından taşınım zorlanmış taşınım ve doğal taşınım olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Taşınımın temel yasası olan “Newton soğutma yasası (Eşitlik 2.2)” olarak adlandırılmıştır. Bu yasa da bahsedilen ısı taşınım katsayısı ( $h$ ), sıvı ve özellikleri, akış geometrisi, akış rejimi, akış hızı ve sınır tabaka gibi birçok faktöre bağlıdır.

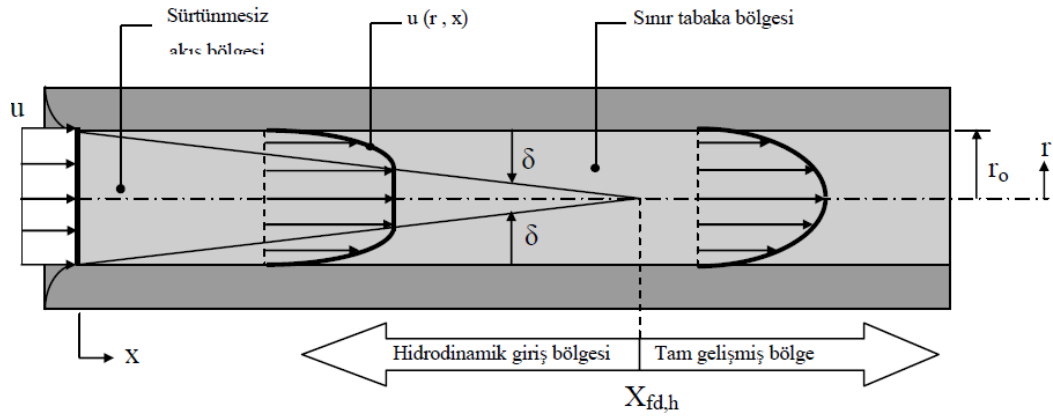
Akış rejiminin laminar veya türbülanslı olması çeşitli boyutsuz parametrelere bağlıdır. Zorlanmış taşınım akış rejimi Reynolds sayısına bağlıdır. Farklı geometrilerde laminardan türbülanslı akıma geçiş farklı Reynolds sayısında olmaktadır. Reynolds sayısı, Nusselt sayısı Bölüm 2.3’te detaylı bahsedilmiştir.

### 2.2.1. Sınır tabaka kalınlığı

Alman bilim adamı L. Prandtl, akış ve ısı transfer problemleri için önemli bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşım akış durumunda viskozite ve sürtünmenin etkisiyle duvara yakın bölgede ince bir tabaka gözlemlemiştir. Bu gözlemlenen tabaka sınır tabaka olarak adlandırılmıştır. Kalınlığı diğer akış boyutlarına göre çok küçük olduğu görülmüştür. Bu tabaka hidrodinamik sınır tabaka ve termal sınır tabaka olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bu tabakalar Prandtl sayısı ile belirlenir.

Prandtl sayısı, hız ve ısı tabakalarının birbirine göre kalınların en iyi olarak  $Pr = \frac{\mu C_p}{k}$  şeklinde tanımlanan boyutsuz bir parametredir. Prandtl (1904) yılında sınır tabaka kavramı ortaya atmış ve sınır tabaka teorisine önemli katkılarda bulunmuştur.

#### 2.2.1.a. Hidrodinamik sınır tabaka



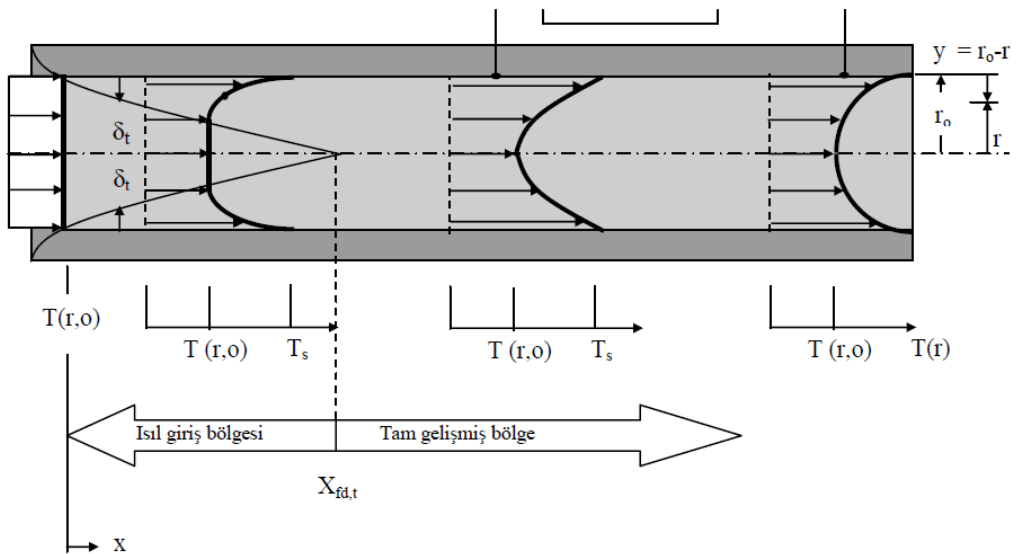
Şekil 2.5. Hidrodinamik sınır tabaka değişimi

$r_0$  yarıçaplı dairesel boruda akışkanın uniform hızla giren bir akış ele alalım. Kaynama şartı sebebiyle boru yüzeyine temas eden tabakadaki akışkan parçacıkları durur ve sürtünme sonucu akışkan parçacıkları yavaşlamaya sebep olur. Boru içerisinde kütle debisi sabit tutmak için ve akışkan hızını arttırması gerekmektedir. Viskoz kuvvetlerinin etkilerinin görüldüğü bu tabaka sınır tabaka olarak adlandırılır. Boru boyunca bir hız

gradyeni değişir (Şekil 2.5). Akışkan yüzeye temasa geçtiği zaman viskoz kuvvetler etkili olur ve artan  $x$  mesafesi sınır tabaka ile artar. Viskoz olmayan akışkan bölgesinin daralması ekseninde sınır tabakanın birleşmesi ile sonuçlanır. Bu birleşmeyle beraber viskoz etkisi tüm kanal kesiti boyunca genişler ve artan hız gradyeni artan  $x$  mesafesi ile değişmez. Bu andan itibaren akışa “tam gelişmiş” ve bu bölgenin uzunluğu “hidrodinamik giriş uzunluğu” olarak adlandırılır. Hız profili, laminar akıştaki tam gelişmiş akış bölgesinde “parabolik”, türbülanslı akışta ise bir miktar daha basık veya doludur.

### 2.2.1.b. Termal sınır tabaka

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi bir akışkan boruya yüzey sıcaklığından daha düşük sabit sıcaklıkta  $T(r,0)$  girdiğinde, taşınım ile ısı transferi gerçekleşir ve ısıl sınır tabaka gelişir. Bununla beraber boru yüzey şartları sabit sıcaklıkta veya sabit ısı akısında ısıl olarak tam gelişmiş bir duruma ulaşır. Tam gelişmiş sıcaklık gradyeni  $T(r,x)$  biçimi, sabit yüzey sıcaklığı veya ısı akışı sınır koşuluna göre değişir.  $Pr > 1$  ise hidrodinamik sınır tabaka termal sınır tabakadan çok daha hızlı geliştiği,  $Pr < 1$  ise tam tersi durumun oluşması söz konusudur.



Şekil 2.6. Termal sınır tabakanın gelişimi

Boru girişinde ısı sınır tabaka kalınlığı sıfır olduğundan taşınım katsayısı çok büyüktür. Isı transfer katsayısı, termal sınır tabaka gelişirken tam gelişmiş koşullardaki sabit değerine ulaşana kadar hızla artar.

### 2.3. Borularda Türbülanslı Akış

Uygulamalarda çok sıkça karşılaştığımız boru ve kanallar içerisinde akış mühendisler için önemlidir. Boru ve kanallardaki bu akış çoğunlukla ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılır. Bu uygulamalarda zorlanmış taşınım gerçekleşir ve akış pompa veya fan vasıtasıyla sağlanır. Mühendisler bu kanallarda, akışkan ve kanal arasındaki sürtünme kuvvetine bağlı olarak basınç düşümünü ve akışkan ve kanal yüzeyi arasındaki ısı akısının hesaplanmasıdır. Uygulamada boru içindeki akış şartlarına bağlı olarak laminar veya türbülanslı olarak tanımlanabilir. Akışkan düşük hız da laminar olup akım çizgilidir fakat akışkan hızı kritik değerinin üstüne çıktığında türbülanslı akış meydana gelir. Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş aniden meydana gelmez. Uygulamada karşılaştığımız borular genelde türbülanslı akış oluşur. Akışın laminar ya da türbülanslı akış oluşu boyutsuz bir sayı olan Reynolds sayısına bağlıdır. Reynolds (Re) sayısı;

$$Re = \frac{\rho V_{ort} D_h}{\mu} = \frac{V_{ort} D_h}{\nu} \quad (2.4)$$

olarak tanımlanır, burada  $V_{ort}$  ortalama akış hızı,  $D_h$  borunun hidrolik çapı,  $\nu = \mu/\rho$  olarak bilinen kinematik viskozitesidir. Boru içindeki akışkanın analizi yapılırken akışkanın sıkıştırılmaz olduğunu ( $\rho = \text{sabit}$ ) ve boru uzunluğu boru boyunca değişmediği kabul edilir. Boru hızı ve çapı duruma göre farklılık gösterebilir. Re sayısı, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü hidrolik çap olarak esas alınarak bulunur. Hidrolik çap;

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (2.5)$$

Olarak tanımlanır, burada  $A_c$  borunun kesit alanı,  $P$  ise çevresidir. Dairesel borularda hidrolik çap borunun iç çapına eşit olur ve hidrolik çap dairese olmayan kesitlerde kullanılır.

Kanallarda tam gelişmiş türbülanslı akışta ısı transferi katsayısı Reynolds sayısına, Prandtl sayısına ve kanalın ortalama yüzey pürüzlülüğü  $\varepsilon$ 'ye bağlıdır.

Taşınım çalışmalarda toplam değişken sayısını azaltmak için ana denklemleri boyutsuzlaştırmak sıkça rastlanan bir uygulamadır. Isı transfer katsayısını(h) nusselt sayısı ile boyutsuzlaştırmak da önemli bir uygulamadır. Nusselt sayısı;

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (2.6)$$

Olarak ifade edilir ve burada k akışkanın ısıl iletkenliği,  $L_c$  karakteristik uzunluk olarak tanımlanır. Wilhelm Nusselt'e izafeten verilmiş olan bu sayı taşınımına önemli etki sağlayan bir boyutsuz bir sayıdır.

Kalınlığı L ve sıcaklık farkının( $\Delta T = T_2 - T_1$ ) olduğu bir akışkan tabakası göz önüne alınsın. Akışkan bir miktar hareket içerdiği zaman taşınım, akışkan hareketsiz olduğu zaman da iletim meydana gelir. Her iki durumda da birim alana düşen ısı transfer hızı birbirine eşit olur.

$$\dot{q}_{\text{taşınım}} = \dot{q}_{\text{iletim}}$$

Bu ifadelerin oranı;

$$\frac{\dot{q}_{\text{taşınım}}}{\dot{q}_{\text{iletim}}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/L} = \frac{hL}{k} = Nu$$

Nusselt sayısını İfadesini verir. Nusselt sayısı da taşınımın iletme oranının sonucu olarak o akışkan tabakasındaki ısı transferi iyileştirmesini belirtir. Nusselt sayısı ne kadar büyük olursa taşınım da o kadar büyük olur.

Pürüzsüz boru yüzeylerde akış için  $Re \gg 10,000$  genellikle türbülanslıdır. Yüksek ısı transferi katsayılarına çıkıldığında türbülanslı akıştan yararlanılır. Türbülanslı akışlarda

kullandığımız sürtünme ve ısı transfer katsayısı denklemleri deneysel çalışmalar sonucu elde edilmektedir.

Pürüzsüz borular da türbülanslı akışta sürtünme faktörü;

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

Birinci Petukhov denkleminde bulunabilir (Petukhov, 1970).

Chilton-Colburn benzerliği ise türbülanslı akışta sürtünme faktörü Nusselt sayısı ile ilişkili olup;

$$Nu = 0,125 f Re Pr^{1/3} \quad (2.8)$$

Şeklinde ifade edilir. Eğer sürtünme faktörü biliniyorsa eşitlik 2.8 pürüzsüz ve pürüzlü borular için Nusselt sayısının bulunmasında kullanılabilir. Re sayısı bilinen akışta sürtünme faktörü  $f=0,184 Re^{-0,2}$  bağıntısı eşitlik 2.8 yerleştirilerek bulunur. Pürüzsüz borularda tam gelişmiş türbülanslı akışta Nusselt sayısı Colborn eşitliği olarak bilinen denklemden bulunabilir. Colborn eşitliği;

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{1/3} \quad 0,7 \leq Pr \leq 160 \text{ ve } Re > 10,000 \quad (2.9)$$

Şeklinde ifade edilir. Bu denklem;

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad (2.10)$$

Şeklinde yazıldığında daha hassas sonuçlar verebilir. Akışkan akışının ısıtılması durumunda  $n=0,4$ , soğutulması durumunda  $n=0,3$  olarak alınır. Eşitlik 2.9 Dittus-Boelter denklemi(1930) olarak bilinir ve Colborn denklemi yerine de kullanılabilir.

Akışkanla çeper yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı büyük olmadığı zaman, türetilen denklemler bütün özellikler  $T_a=(T_i+T_e)/2$  yıllık ortalama akışkan sıcaklığında bulunabilir. Yüksek sıcaklık farkı sebebiyle özelliklerde büyük değişme olduğu zamanı Sieder ve Tate (1936)'in denklemi kullanılabilir;

$$Nu = 0,027Re^{0,8}Pr^{1/3}\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad 0,7 \leq Pr \leq 16700 \text{ ve } Re \geq 10,000 \quad (2.11)$$

$\mu_s$  değeri  $T_s$  sıcaklığında hesaplanırken diğer değerler  $T_a$ 'de hesaplanır. Yukarıda belirtilen Nusselts sayısı bağıntıları daha sade ve %25'lik hata payına sahiptir.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re.Pr)}{1,07+12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}\left[Pr^{2/3}-1\right]} \quad 0,5 \leq Pr \leq 2000 \text{ ve } 10^4 < Re < 5 \times 10^6 \quad (2.12)$$

İkinci Petukhov denklemi olarak daha karmaşık ve daha hassas bağıntılar kullanılarak hata payı oranını %10 altına kadar düşürebilir. Düşük Reynolds sayısında bu denklemin duyarlılığı,

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000).Pr}{1,07+12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}\left[Pr^{2/3}-1\right]} \quad 0,5 \leq Pr \leq 2000 \text{ ve } 3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6 \quad (2.13)$$

Şeklinde düzeltilerek Gnielinski(1976) hata oranı iyileştirilir ve sürtünme faktörü eşitlik 2.7 da ki benzer bir bağıntıdan veya Moddy diyagramından bulunabilir. Hata oranı daha düşük olduğu zaman bu denklem tercih edilmelidir ve özellikler  $T_a$  sıcaklığında belirlenmelidir.

Pürüzsüz borularda tam gelişmiş türbülanslı akış da ısı transferi katsayısı hakkında deneysel çalışmalar sonucu türetilmiş diğer bağıntılar Çizelge 2.1 den gösterilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Pürüzsüz borularda tam gelişmiş türbülanslı akış hakkında üretilmişler denklem ve uygulama şartları

| Araştırmacı                                                                                                                                                                                          | Denklem                                                                                                                                     | Uygulama şartları                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nuselt                                                                                                                                                                                               | $Nu = 0,024Re_D^{0,786}Pr^{0,45}$                                                                                                           | $Pr < 1$<br>$10^3 < Re_D < 10^6$                                                                                                                                |
| Mc Adams                                                                                                                                                                                             | $Nu = 0,021Re_D^{0,8}Pr^{0,4}$                                                                                                              | $Pr \leq 0,7$<br>$10^4 < Re_D < 5 \times 10^6$                                                                                                                  |
| Kays<br>Crawford                                                                                                                                                                                     | $Nu = 0,023Re_D^{0,8}Pr^{0,5}$                                                                                                              | $0,5 < Pr \leq 1$<br>$10^4 < Re_D < 5 \times 10^6$                                                                                                              |
| Prandtl                                                                                                                                                                                              | $Nu = \frac{(\frac{f}{8})(Re_D \cdot Pr)}{1 + 8,7(\frac{f}{8})^{\frac{1}{2}}[Pr - 1]}$                                                      | $Pr > 0,5$                                                                                                                                                      |
| Petukhov-<br>Kirillov                                                                                                                                                                                | $Nu = \frac{(\frac{f}{8})(Re_D \cdot Pr)}{1,07 + 12,7(\frac{f}{8})^{\frac{1}{2}}[Pr^{\frac{2}{3}} - 1]}$                                    | $0,5 < Pr < 2000$<br>$10^4 < Re_D < 5 \times 10^6$                                                                                                              |
| Webb                                                                                                                                                                                                 | $Nu = \frac{(\frac{f}{8})(Re_D \cdot Pr)}{1,07 + 9(\frac{f}{8})^{\frac{1}{2}}[Pr - 1]Pr^{-1/4}}$                                            | $0,5 < Pr \leq 100$<br>$10^4 < Re_D < 5 \times 10^6$                                                                                                            |
| Sleicher-<br>Rouse                                                                                                                                                                                   | $Nu = 5 + 0,015Re_D^m Pr^n$<br>$m = 0,88 - 0,24/(4 + Pr)$<br>$n = 1/3 + 0,5 \exp(-0,6Pr)$<br>veya<br>$Nu = 5 + 0,012Re_D^{0,83}(Pr + 0,29)$ | $0,1 < Pr \leq 10^4$<br>$10^4 < Re_D < 10^6$<br><br>$0,1 < Pr \leq 0,9$ , Gaz                                                                                   |
| (Yukarıdaki denklemlerde akışkan özellikleri ortalama sıcaklık da hesaplanmalıdır.)                                                                                                                  |                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                 |
| Sieder-Tate                                                                                                                                                                                          | $Nu = 0,027Re^{0,8}Pr^{1/3}(\frac{\mu}{\mu_s})^{0,14}$                                                                                      | $0,7 \leq Pr \leq 17,600$<br>$Re \geq 10,000$                                                                                                                   |
| Petukhov-<br>Kirillov                                                                                                                                                                                | $Nu = \frac{(\frac{f}{8})(Re_D \cdot Pr)}{1,07 + 12,7(\frac{f}{8})^{\frac{1}{2}}[Pr^{\frac{2}{3}} - 1]}(\frac{\mu}{\mu_s})^n$               | Sıvı, $L/D \geq 60$ , $0,08 \leq \frac{\mu}{\mu_s} < 40$ ,<br>$10^4 < Re_D < 5 \times 10^6$ ,<br>$2 < Pr < 140$ , $n=0,011$ Isıtma, $n=0,25$ soğutma            |
| Hafschmit                                                                                                                                                                                            | $Nu = \frac{(\frac{f}{8})(Re_D \cdot Pr)}{1,07 + 12,7(\frac{f}{8})^{\frac{1}{2}}[Pr^{\frac{2}{3}} - 1]}(\frac{Pr}{Pr_s})^{0,11}$            | Su, $2 < Pr < 5,5$ , $2 \times 10^4 < Re_D < 6,4 \times 10^5$ ,<br>$0,1 \leq \frac{Pr}{Pr_s} < 10$                                                              |
| Humble                                                                                                                                                                                               | $Nu = 0,023Re_D^{0,8}Pr^{0,4}(\frac{T_s}{T_m})^n$                                                                                           | Hava, $30 < L/D < 120$ , $7 \times 10^3 < Re_D < 3 \times 10^5$ , $0,46 \leq \frac{T}{T_s} < 35$ ,<br>$\frac{T}{T_s} < 1$ $n=0$ , $\frac{T}{T_s} > 1$ $n=-0,55$ |
| Petukhov                                                                                                                                                                                             | $Nu = 0,021Re_D^{0,8}Pr^{0,4}(\frac{T_s}{T_m})^n$<br>$n = -(0,9 \log(T_s/T_m) + 0,205)$                                                     | Nitrojen, $80 < L/D < 100$ , $1,3 \times 10^3 < Re_D \leq 3 \times 10^5$ ,                                                                                      |
| Dalle-Donne                                                                                                                                                                                          | $Nu = 0,022Re_D^{0,8}Pr^{0,4}(\frac{T_s}{T_m})^{-10,29 + 0,0019L/D}$                                                                        | Hava, Helyum, $18 < L/D < 316$ ,<br>$10^4 < Re_D \leq 10^5$ ,                                                                                                   |
| (Pürüzsüz borularda tam gelişmiş türbülanslı akış da akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişimi ihmal ediliyorsa ısı transferi katsayısı hakkında deneysel çalışmalar sonucu türetilmiş bağıntılar.) |                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                 |

### 2.3.1. Pürüzlü yüzeyler

Yüzeyde oluşan herhangi bir pürüzlülük veya düzensizlik laminar alt tabakayı bozar ve akışı etkiler. Bu türbülanslı akışta sürtünme faktörü ve ısı taşınım katsayısı yüzey pürüzlülüğünün birer fonksiyonudur.

Bu akış şartında sürtünme faktörü Reynolds sayısına ve boru pürüzlülüğünün ortalama yüksekliğinin boru çapına oranı olan bağıl pürüzlülük  $\varepsilon/D$  ye bağlıdır. Bağıl pürüzlülük teorik çözümlenemeyen bulunamaz, elde edilen sonuçlar yapay olarak pürüzlendirilmiş yüzeylerin kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Bu deneylerin birçoğu Prandtl'ın öğrencisi J.Nikuradse(1933) tarafından yapılmış ve yeni çalışmalarla sürtünme faktörü, basınç düşüşü hesaplanmasına noktasında literatüre katkıda bulunmuştur.

1939'da Cyril F. Colebrook hem pürüzlü hem de pürüzsüz borularda geçiş bölgesi ve türbülanslı akış için var olan verileri 'Colebrook denklemi'olarak bilinen;

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (2.14)$$

İfadesinde birleştirdi. 1942'de Hunter Rouse, Colebrook denklemini doğruladı ve Reynolds sayısı ve  $Re\sqrt{f}$  çarpımının fonksiyonu olarak f grafiğini çizdi. 1944'de se F. Moody diyagramı diyagramı biçimlendirmiştir. Günümüzde çok kullanılan 'moddy diyagramı'boru akışı için darcy sürtünme faktörünü geniş bir aralıkta, Reynolds sayısı ve bağıl pürüzlülük ( $\varepsilon/D$ ) fonksiyonu olarak vermektedir. Moddy diyagramı dairesel borular için geliştirilmiş olmasına rağmen çap yerine hidrolik çap kullanıldığında dairesel olmayan borular için kullanılmaya başlamıştır. Pürüzsüz borular da Colebrook ve Petukhov eşitlikleri arasındaki uyum iyidir. Sürtünme faktörü pürüzlülüğe bağlı olarak artar.

f için yaklaşık bir denklem S. E. Haaland(1983) tarafından;

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[ \frac{6,9}{Re} + \left( \frac{\varepsilon}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (2.15)$$

Şeklinde ifade edilmiştir. Haaland tarafından sunulan bu denklem Colebrook denkleminde elde edilen sonuçlarla arasındaki fark %2 civarındadır. Türbülanslı akışta yüzey pürüzlülüğü, ısı transfer katsayısını 2 kattan daha fazla arttırır.

### 2.3.2. Giriş bölgesinde gelişen türbülanslı akış

Giriş uzunlukları büyük çoğunlukla boru çapının sadece 10 katı kadar olacak şekilde kısadır ve tam gelişmiş türbülanslı akış için bulunan Nusselt sayısı bütün boru için yaklaşık olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım uzun boru veya kanallarda basınç düşüşü ve ısı transferi için uygun ve mantıklı sonuçlar verir. Literatür de sürtünme katsayısı ve ısı transfer katsayılarıyla alakalı daha hassas denklemler bulmak mümkündür. Çizelge 2.1 buna benzer denklemlerden bazıları verilmiştir.

## 2.4. MEMS ve Mini Kanallar

### 2.4.1. MEMS ve mini kanal uygulamaları

Günümüzdeki mekanik ve elektronik sistemlerin birçoğunun boyutlarının minyatürize edilmiş hali, Mikro Elektro-Mekanik Sistemler(MEMS) olarak adlandırılmaktadır. MEMS'in boyutları 3-100 mikrometre aralığında değişim göstermektedir. MEMS'ler mekanik bölümü, tahrik bölümü ve mekanik hareketin davranışını inceleyen algılama bölümü olmak üzere üç bölümden oluşur. Tahrik tipi termal, elektrostatik, manyetik, pnömatik ve optik olarak farklılık gösterebilir. MEMS makine, malzeme ve elektronik olmak üzere temel bilimleri ve tüm mühendislik dalları kapsayan disiplinler arası bir çalışma olarak ortaya çıkmaktadır. Çok çeşitli Endüstriyel ve tıbbi alanlarda artan çok sayıda çalışma alanı var. Bu uygulama alanları Çizelge 2.3'te ifade edilmiştir.

**Çizelge 2.3. MEMS uygulama alanları (Avcı 2008)**

| Alan                                        | Uygulamalar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bilişim                                     | Optik esaslı bilgi depolama ve disk sürücü teknolojisi, mürekkep püskürtmeli yazıcılar, ivme duyargaları, dönü ölçer (kamera sabitleme sistemleri), antenler, duyarga ağırları, mikroaynalar, mikro ısı değiştiricileri (elektronik devrelerin soğutulması)                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Proses kontrolü, savunma, havacılık ve uzay | İvmeölçerler ve eğiklik duyargaları, gaz duyargaları, manyetik duyargalar, spektrometre, sıcaklık/basınç duyargaları, ultrasonik dönüştürücüler, mikrouydular, radyasyon ölçümü, akıllı giysiler, ivmeölçerler, biyolojik ve biyokimyasal ve duyargalar, yonga-laboratuvar (biyolojik ve kimyasal silahların algılanması, ilaç yönetimi), ivmeölçerler, mikrobolometreler (kızıl ötesi görüntüleme sistemleri), mikro güç kaynakları, optik duyargalar, mikro ısı değiştiricileri (elektronik çiplerin soğutulması) |
| Tıp ve biyoloji                             | DNA analizi, mikrocerrahi aletler, kimyasal duyurucular, sinirsel elektrotlar/sondalar, insulin pompası, iğnesiz enjektörler, ivmeölçerler (kalp atışlarını düzenleyen cihazlar), ısıtma cihazları, basınç duyargaları (kalp basıncı), akıllı haplar, biyoçipler, mikroçipler, mikropompalar                                                                                                                                                                                                                        |
| Otomotiv                                    | Basınç/sıcaklık/nem/ivme duyargalar, manyetik duyargalar, optik duyargalar, mikroenjektör, hava yastıkları, taşıt güdüm teknolojileri, yağmur algılama sistemleri, mikro ısı değiştiricileri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Çevre                                       | İvmeölçerler (depremin algılanması), kimyasal ve biyokimyasal duyargalar, yonga-laboratuvar (çevre kirliliğinin algılanması), radyoaktif duyargalar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

MEMS, uygulama alanlarından biri olan elektronik bileşenlerin soğutulması ve ısıtılmasında oldukça önemlidir. Mevcut cihazlar yeterli kapasiteye sahip olmadığı için MEMS teknolojisinde kullanılmamakta ve bu nedenle önemi artmaktadır. Bu sistemlerin çoğu mini kanallar içermektedir. Mini kanallar küçük boyutları, ağırlıkları, az iş akışkanı gerektirmesi ve yüksek ısı akıları nedeniyle MEMS teknolojilerinde çokça kullanılmaktadır (Küçükakça ve Parlak, 2015). MEMS sayesinde gelişen teknoloji ile düşük verimli, gürültülü ve büyük ölçekli cihazların yerini alacaktır. Bu kanallardan geçen akışkan akış ve ısı geçiş özelliklerinin ortaya çıkarılması MEMS'lerin geliştirilmesine gelişmesine sebep olmaktadır. Ancak mini kanalların MEMS teknolojisinde avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur, bunlar; küçük hidrolik

çap, basınç düşümü, çift fazlı akışlarda kavitasyon ve akış analizi için kullanılacak teorilerin belirsizliği gibi bir takım durumlar söz konusudur (Manay 2012).

**Çizelge 2.4.** Mini ve Mikrokanallarda yapılan çalışmalar sonucu bulunan denklemlerin bazıları

| Araştırmacı         | Denklem                                                                                                                                                                                                                             | Uygulama şartları                                               |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Adams <i>et al.</i> | $Nu_{GN} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000). Pr}{1 + 12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}[Pr^{\frac{2}{3}} - 1]}$ $Nu = Nu_{GN} * (1 + F)$ $F = c * Re * (1 - ((D_h/D_0)^2))$ $c = 7,6 * 10^{-5} \quad D_0 = 1,164$ | $0,5 \leq Pr \leq 2000$<br>$3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6$ |
| Choi <i>et al.</i>  | $Nu = 3,82. 10^{-6} * Re^{1,96} * Pr^{1/3}$                                                                                                                                                                                         | $2500 < Re < 20000$                                             |
| Yu <i>et al.</i>    | $Nu = 0,007 * Re^{1,2} * Pr^{0,2}$                                                                                                                                                                                                  | $6000 < Re < 20000$                                             |
| Peng <i>et al.</i>  | $Nu = 0,072 \left(\frac{D}{P}\right)^{1,15} [1 - 2,421$ $* (Z - 0,5)^2]. Re^{0,8} Pr^{0,33}$                                                                                                                                        | $Re > 10000$                                                    |
| Wu ve Little        | $Nu = 0,00222 * Re^{1,09} * Pr^{0,4}$                                                                                                                                                                                               | $Re > 3000$                                                     |
| Wang ve Peng        | $Nu = 0,0085 * Re^{0,8} * Pr^{1/2}$                                                                                                                                                                                                 | $Re > 1600$                                                     |
| Sieder-Tate         | $Nu = 0.027 Re^{0,8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14}$                                                                                                                                                                | $0,7 \leq Pr \leq 17,600$<br>$Re \geq 10,000$                   |

#### 2.4.2. Mikro kanallarda ısı geçişini etkileyen faktörler

Mikro ölçekte akış ve ısı geçişinde yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkan bazı sorunlar olmuştur. Bu sorunlar; sürtünme faktörü, ısı geçiş katsayıları ve fiziksel mekanizmalardaki farklılıklardır ve bu farklılıklar hala açıklanmamaktadır. Mehendale ve diğerleri, Gad-el-hak, Palm tarafından yapılan çalışmalarda bu sorunlar konu olmuş ve tartışılmıştır. Gaz basıncını azaltmanın, mikro ölçekli gaz akışları açısından daha düşük Nusselt sayılarına ve sürtünme faktörlerine yol açtığı fark edilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda basınç kaybının yanı sıra yüzey pürüzlülüğündeki farklılıkları ısı geçişi ve sürtünme faktöründeki denklemlerle açıklayabileceğini ifade etmiştir.

Mikro ve mini kanallarda ısı geçişini etkileyen faktörleri kısaca şu şekilde özetlenebilir;

1. Basınç Azalması
2. Sıkıştırılabilirlik
3. Yüzey pürüzlülüğü
4. Kanal şekli
5. Hidrolik çap
6. Yüzey ıslaklığı
7. Seyrelme

#### **2.4.3. Mikrokanalların soğutulması ve nanoakışkan kavramı**

Önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi Mikro boyuttaki ısı değiştiricileri yüksek ısı iletkenlik, küçük boyut, az akışkan gibi özelliklere sahiptirler. Geleneksel makro kanallarla karşılaştırıldığında daha sık ve hafiftir. Soğutma sistemlerinde kullanılan mikrokanallar sayesinde boyutunun ve ağırlığının azaltılması endüstri için çok önemlidir. Isı transferinde kullanılan su, motor yağı, etilen glikol gibi akışkanlar geleneksel akışkanlardır. Isı Bölüm 2.1.2 anlatılan ısı transferini iyileştirme yöntemleri kullanılmasına rağmen geleneksel akışkanlar yeterli verimi sağlamamaktadır. Isı değiştiricisinin küçük boyutlarda ve az yer kaplayan geometri de olması sınırlandırmıştır. Bu sebeple sıvılar içerisine metal veya ametal partiküller katılarak ısı transferi artırılması amaçlanmıştır. Ancak boyutlarının küçük olmasından dolayı çeşitli problemler ortaya çıkmıştır. Bunlar; Hızla çökme, mikro/mini kanallardan geçerken tıkanma, basınç düşüşünde artış, parçacıkların aşındırıcı özelliğinde botu hattında gibi sorunlar sayılabilir. Modern teknoloji nano boyutta üretim sağladığından bu olumsuz durumlar artık önemsiz olmaktadır. Bu nedenle nanoakışkanlar kavramı ortaya çıkmıştır. Oda sıcaklığında bulunan katı fazdaki metallerin bu akışkanların ısı iletkenliklerinden daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu bilmektedir. Ametal akışkanların ısı iletkenlikleri metal akışkanlarındakinden çok daha düşüktür. Klasik akışkanların ısı iletkenliğinin düşük olmasından dolayı katı partiküller içeren nanoakışkanların ısı iletkenliği yüksek olması beklenir.

## 2.5. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin (CFD) Tanımı

Akışkan akışını, ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonları ve temel matematiksel denklem takımını sayısal olarak çözen ve bu konuda tahminlerde bulunan yöntem/bilime hesaplamalı akışkanlar dinamiği adı verilir. Kütle, Enerji ve momentumun korunumu denklemleri esas alınır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonlu elemanlar, sonlu hacimler, sonlu farklar ve sınır elemanları yöntemini kullanır. Kontrol hacimlerin sonlu seti üzerinde ayrışma yaparak çözüm yapılır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği korunum denklemlerini kontrol hacimlerine göre hazırlanan denklem takımları ile çözülür. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerinde en genel halde aşağıdaki denklem kullanılır;

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V \cdot dA = \int_A \Gamma \nabla \phi dV + \oint_A S_\phi dV \quad (2.16)$$

Bu kısmi diferansiyel denklemler cebirsel denklemler sistemine dönüştürülür ve çözüm alanın durumuna göre sayısal olarak çözülür.

CFD analizlerinin temel basamakları aşağıdaki gibi özetlenir;

1. Modellenme hedefinin belirlenmesi
2. Model yapılacak alanın belirlenmesi
3. Model yapılacak alanın ağ yapısı tasarlanır ve yapılır.
4. Çözüm kısmında sayısal model kurulur
5. Çözüm yapılır ve sonuçlar kontrol edilir.
6. Sonuçlara bağlı olarak sonuçlar incelenir ve modelde veya ağ yapısında düzeltmeler yapılır.

Korunum denklemleri lineer denklemler takımı haline getirilir ve iterasyonla çözülür. Bu yaklaşık sonuca ulaşmak için gereklidir. Yaklaşık sonucun doğruluğu, fiziksel modellerin

uygunluğuna ve doğruluğuna, ağ yapısının uygun çizilmesi ve bağımsızlığına ve problem kabullerine bağlıdır. Sonuçlara bağlı olarak sınır şartlarının uygunluğu ve doğruluğu ve ağ yapısı kontrol edilerek düzeltilir.

### 2.5.1. Fluent

Karmaşık geometriye sahip elemanların akış ve ısı transferi problemlerini modelleyip çözmeye yarayan, C program diliyle yazılmış bir bilgisayar programıdır. Fluent birçok durumda çözümleme yapmaya yarayan bir programdır. Bu durumlara bağlı olarak akış rejimine uygun modeller seçilir.

Problemimize uygun olarak Standart k-ε modeli seçilmiştir. Standart k-ε modeli, türbülans kinetik enerjisi ve dağılımı nedeniyle transport denklemlerine dayanan yarı deneysel bir modeldir. Bu modelin performansını arttırmak için yeni modeller geliştirilmiş ve bu modellerde RNG k-ε model ve realizable k-ε modelleri kullanılmaktadır. Bu modellerde viskoz etkileri önemsiz olduğundan akış tamamen türbülanslı olarak kabul edilir. Standart k-ε modeli için kinetik enerji, k, türbülans dağılım oranı ve ε için aşağıdaki transport denklemleri kullanılmaktadır;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_e} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_e \quad (2.18)$$

Bu denklemlerde;

$G_k$ : Ortalama hız büyüklüklerinden dolayı türbülans Kinetik enerji üretimi

$G_b$ : kaldırma kuvvetinden dolayı türbülans kinetik enerji üretimi

$Y_m$ : Tüm dağılıma oranına sıkıştırılabilir türbülans azalıp artmanın etkisi

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$ ,  $C_\mu$  sabitlerdir.  $\sigma k$  ve  $\sigma\varepsilon$  sırasıyla  $k$  ve  $\varepsilon$  için prandtl sayısıdır. Türbülans viskozitesi( $\mu_t$ ), Eşitlik 2.19 gibi hesaplanır;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.19)$$

Sabit değerler türbülans için hava ve su ile yapılan deneylerden hesaplanmıştır. Model sabitlerin bu değerleri standart olmasına rağmen her biri geniş çapta kabul edilebilir.

Türbülanslı akış rejiminde k-ε modellerinde taşınım ısı ve kütle transferinde kullanılan Enerji denklemi Eşitlik 2.20 gibi hesaplanır;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff}\right) + S_h \quad (2.20)$$

E: Toplam enerji

$k_{eff}$ : Efektif ısı transfer katsayısı

## 2.6. Deneysel Verilerin Hesaplamalarda Kullanılması

Sisteme ısı ısı enerji güç kaynağı ile verilmektedir. Elektriksel ısı girişi güç kaynağı üzerinden okunan akım ve gerilimin çarpımından belirlenmiştir.

$$Q=VI \quad (2.21)$$

Sistemden kayıplar yüzeyden ışınlama veya borunun yüzeyinden çevre ortama iletimle olabilmektedir. Literatür de yapılan çalışmalarda sistemde test bölgesinin iyi yalıtıldığı zaman ışınlama olan kayıplarının ihmal edilebileceğini ifade etmektedir. İletimle ısı kayıpları, borunun ortalama yüzey sıcaklığı ve yalıtım malzemesinin dış yüzey sıcaklığı ölçülerek belirlenebilir. Ölçülen sıcaklıklar kullanılarak h Eşitlik 2.22’de ki gibi belirlenebilir;

$$h = \frac{Q}{A(T_s - \frac{T_g + T_c}{2})} \quad (2.22)$$

Hesaplanan ısı transfer katsayısı(h), Nusselt sayısını(Eşitlik 2.6) bulmamıza yardımcı olacaktır. İç akışlarda, akışkanın sürtünmesi basınç düşümüne neden olmaktadır. Klasik sürtünme faktörünün bir fonksiyonu olan basınç düşümü pratik olarak Eşitlik 2.23 de ifade edilmiştir.

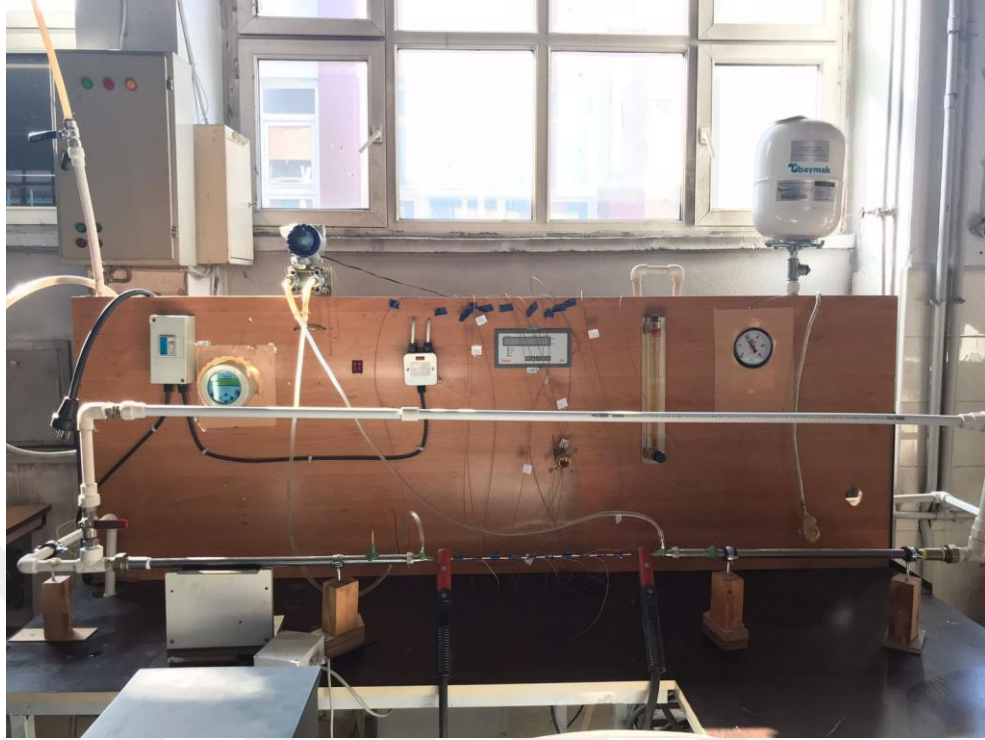
$$\Delta p = f \frac{L}{D} (\frac{1}{2} \rho v^2) \quad (2.23)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

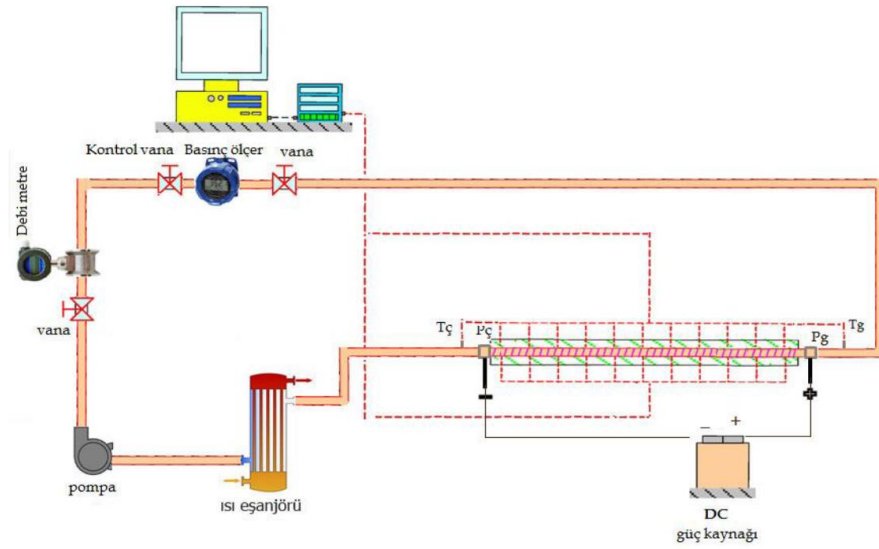
#### 3.1. Deney Sistemi

Bu tezin amacı ele alınan mini kanallarda iç akışı incelemek ve Re-Nu ve Re-f ilişkisini incelemektir. Bu çalışma Makine Mühendisliği Bölümü Isı Transferi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. İş akışkanı olarak saf su kullanılmıştır. Deney sistemin kurulmasında çalışmalar şöyle özetlenebilir;

- i. Sistemde test borusu 37 cm uzunluğunda, çapları sırasıyla 2.74 mm ve 2.26 mm olan Cr-Ni(Paslanmaz çelik 316L) malzemeden üretilmiş çelik boru kullanılmıştır.
- ii. Dengeleyici tank, gerekli çalışma koşullarında ve basınç altında çalışmak için dayanıklı malzemeden üretilmiştir.
- iii. Güç kaynağı, deney sisteminde test borusunda ihtiyaç olunan belirlenen ısı enerjisi sağlamak için kullanılmıştır.
- iv. Sistemde test basıncını ölçmek için bourdan tipi manometre kullanılmıştır. Test bölgesine giriş ve çıkışta basınç farkını ölçmek için basınç transdüseri kullanılmıştır.
- v. Sistemdeki akışkan debisini ölçmek için türbin tipi debi ölçer sisteme entegre edilmiştir.
- vi. Termoelemanlar, türbin tipi debi ölçer, basınç transdüseriden alınan veriler Elimko data logger aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ayrıca sistem üzerinden de incelenmektedir. Test borusu üzerinde toplam 11 termoeleman kullanılmıştır.
- vii. Sistemde iş akışkanını sirküle etmek için bir adet pompa kullanılmıştır.
- viii. Test borusuna girişte istenilen sıcaklığı sağlamak amacıyla bir adet ısı değiştiricisi kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin görünümü



Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Deney sistemi iki ayrı bölümden oluşmaktadır; akışkan besleme bölümü ve test bölümü.

### 3.1.1. Akışkan besleme bölümü

Akışkan besleme bölümü; debi ayar vanası, pompa, yoğurturucu, dengeleyici tank ve debimetreden oluşmaktadır. Akışkan besleme bölümü, iş yapan akışkan olan saf suyun istenilen giriş şartlarında test bölgesine getirilmesini sağlar.

#### i. Sirkülasyon pompası

Deney sisteminde akışı sağlamak için santrifüj tipi sirkülasyon pompası kullanılmıştır (Şekil 3.1). Pompanın çark içeren bir yapıda olması eleştirilebilir ancak seçilen test bölgesi çaplarında bulunabilecek ve böyle bir sistemde darbesiz akış sağlayacak peristaltik pompaların maliyeti fazla olduğu için kullanılmamıştır. Yüksek basınç ve debi sağlayacak dişli pompalar alınabilir

Sirkülasyon pompasının özellikleri;

- Üç kademeli
- Max su sıcaklığı: 120° C (NPVO-26-P, 53-25 ve 63-32 tiplerinde 110° C).
- Model: LPS 50-8S/180
- Max ortam sıcaklığı: 40° C.
- Max çalışma basıncı: 6 bar
- İsteğe bağlı olarak max çalışma basıncı: 10 bar
- Kazan Kapasitesi: 90 – 110.000 Kcal/h
- Motor yalıtımı: Sınıf H
- Motor koruması: IP 41



**Şekil 3.3.** Sistemde kullanılan sirkülasyon pompası

## ii. Isı Eşanjörü

Sistemde kullanılan test borusunun çıkışında sıcaklık seviyesi değiştiğinden akışkanı giriş koşullarını sağlamak için dikey gövde-boru tipi bir ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Yoğuşturucunun dış gövde çapı 16 cm, uzunluğu 40 cm ve dikişli siyah boru malzemesinden imal edilmiştir. Test bölgesi çıkışında istenilen sıcaklığı sağlaması için yoğuşturucu içinde 0,0127 m çapa sahip bakır boru, dış yüzeyinden soğutma suyu olarak kullanılan şebeke suyu akmakta, spiral olarak yerleştirilen bakır boru içerisinde iş yapan akışkan olan saf su kullanılmaktadır.



**Şekil 3.4.** Sistemde kullanılan ısı eşanjörü

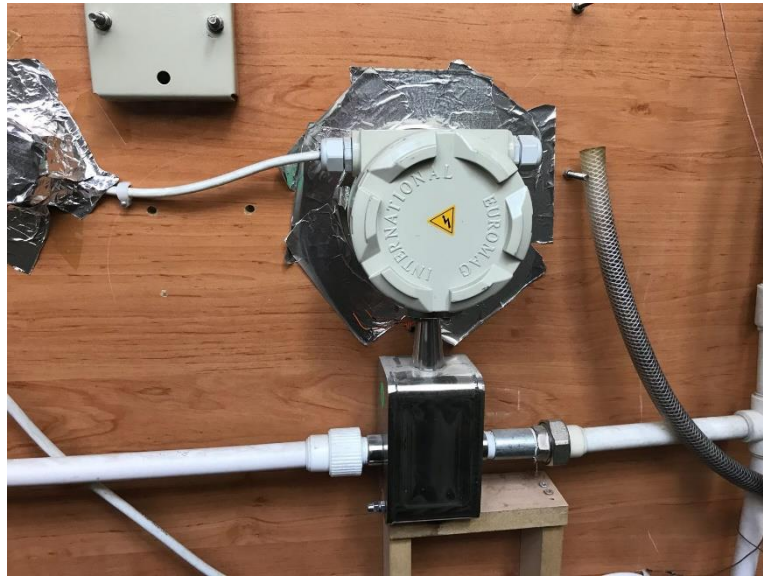
### **iii. Debimetre**

Akışkan debisini ölçmek için elektromanyetik debimetre kullanılmıştır. Debimetre sisteme entegre edildikten sonra hem ağırlık ölçme yöntemiyle hem de sisteme bağlanan şamandıralı debimetre ile kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonuçları incelendiğinde fabrika çıkışı değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Debi değerleri hem cihaz üzerinde okunabilmekte hem de bilgisayar ortamına aktarılarak okunabilmekte.



**Şekil 3.5.** Sistemde kullanılan debimetre

Debi değerinin çok hassas olarak ölçülmesi gerekmektedir ve istenen debi ayarı kontrol vanası yardımıyla yapılmaktadır. Debimetrenin konumu dengeleyici tank ve test borusu arasında monte edilmiştir. Debimetredeki hata oranı  $\pm 0,05$ 'dir. Debimetrenin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.6.** Debimetre ve sistemdeki konumu

**Çizelge 3.1.** Debimetre teknik özellikleri

| Parametre                  | Değer           |
|----------------------------|-----------------|
| Akış Debisi                | 15-1000 l/h     |
| Doğruluk                   | $\pm\%1$        |
| Maksimum viskozite         | 1000 centipoise |
| Maksimum çalışma basıncı   | 500 kPa/        |
| Maksimum çalışma sıcaklığı | 80°C            |
| Pulse/Litre                | 400             |
| Çıkış sinyali              | 4-20 mA         |
| Boyut                      | 50mm*50mm       |

### 3.1.2. Test bölümü

Test bölümü tek fazlı akışın meydana geldiği bölümdür. Test bölümü şu kısımlardan oluşmaktadır; akışkan giriş kontrol vanası, ısıtıcı test borusu, test borusuna gerekli olan ısıyı vermek için bir DC güç kaynağı, basınç transdüseri, bourdan tipi manometre ve termo elemanlardan oluşmaktadır.

Test borusu kısmında basınç transdüseri, bourdan tipi manometre, sıcaklık ölçümleri için termoelemanlar bulunmaktadır. Bourdon tipi manometre sistemin basıncını ölçerken, basınç transdüseri (Şekil 3.7) giriş ve çıkıştaki basınç kayıplarını ölçmektedir. Deneysel çalışmada 6 farklı debi değeri kullanılmıştır(100-90-80-70-60-50 L/h). Test borusunun giriş sıcaklığı akış boruya girmeden önce T tipi termoelemanlar ile ölçülmüştür.



**Şekil 3.7.** Basınç trandüseri

#### **i. DC Güç Kaynağı**

Test borusuna gerekli ısı gücü, borunun her iki ucuna DC güç kaynağının (+) ve(-) uçları bağlanarak sağlanmıştır. Test borusunun her iki ucunun sistemin diğer elektrik kısımlarından ayırmak için plastik boru ile kaplanmıştır. Isıtıcı güç değerleri DC güç kaynağı üzerinde bulunan ekran göstergelerinden takip edilmiştir. Deney sisteminde kullanılan güç girdisi yaklaşık 20 kW kapasitesindedir.



**Şekil 3.8.** DC güç kaynağı

### 3.2. Ölçümler ve Belirsizlik Analizi

#### 3.2.1. Sıcaklık ölçümleri

Deney düzeneğinde ölçümler T tipi bakır-konstantan termoelemanlar kullanılmış ve çapı 0,25 mm kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Sıcaklık okuma hatası  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$  civarındadır. Termoelemanların kalibresi sıcak su banyosunda yapıldıktan sonra sistemde kullanılmak üzere sisteme monte edilmiştir. Akışkan test borusunun giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçmek için T tipi termoelemanlar ucu kapalı ince bakır boru içerisine yerleştirilmiştir ve bu bakır boru test bölgesine giren boru içerisine daldırılarak sıcaklıklar ölçülmüştür.

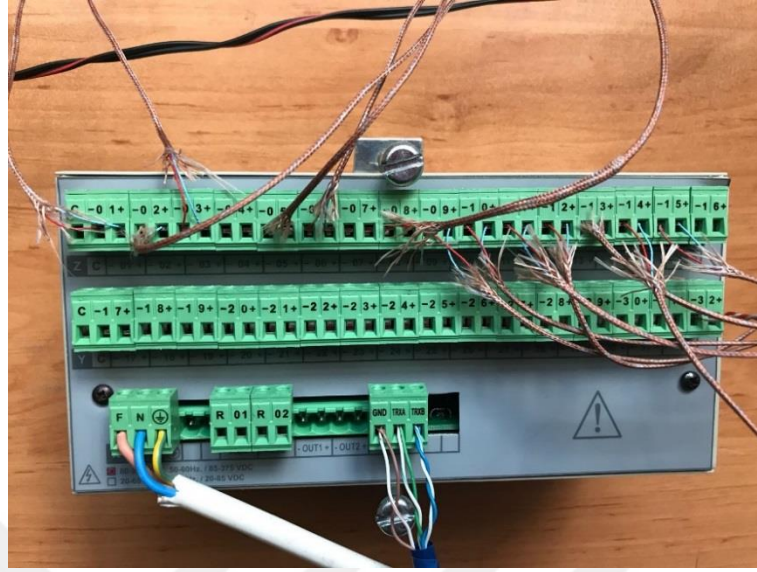


**Şekil 3.9.** Test borusu ve bağlantılar

Test borusunun yüzey sıcaklıkları eşit aralıklarla 9 adet termoelemanı boru yüzeyine ısı iletkenlik sıvısı kullanılmış ve elektrikten etkilenmesin diye yalıtkan bant ile yapıştırılmış ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir(Şekil 3.9). Test borusu üzerinde alınan verilerin okunması ve değerlendirilmesi için analog/dijital data okuma kartı kullanılmıştır. Data logger da okunan değerlerin bilgisayara aktarılması için IB10 ara birim kullanılmıştır.



**Şekil 3.10.** Test borusunun ızalasyonu



**Şekil 3.11.** Sistemde kullanılan data okuma kartı ve termo elemanların bağlantısı

Şekil 3.11’de termoelemanların data okuma kartına bağlantısı göstermiştir. Şekil 3.12 de ise bilgisayara aktarma için kullanılan IB10 ara birim gösterilmiştir. Termoelemanların bakır ucu kartta bulunan kanalın pozitif ucuna, konstantn ucu ise negatif uca bağlanmıştır. 5 saniye de bir IB10 ara birim bilgisayara aktarmakta ve ayrıca dijital olarak da anlık takip edilmektedir.



**Şekil 3.12.** IB10 ara birim

### 3.2.2. Basınç Ölçümleri

Deney sisteminde test borusunun giriş ve çıkış noktalarındaki basınç farkı için basınç transdüseri kullanılmıştır. Basınç transdüseri 4-20 mA'lık analog sinyallerle ölçüm yapmaktadır. Transdüseri elektrikselsel olarak beslemek için DC güç kaynağı ile bağlantı oluşturulmuştur. Basınç transdüserindeki hata oranı  $\pm 0.01\%$  seviyesindedir. Bourdon tipi manometre ile de sistemin basıncı takip edilmekte ve sistemin basıncı 10 bar olarak sabit tutulmaktadır. Skala üzerindeki basınç ise 0.5 bar olarak okunabilmektedir.

### 3.2.3. Isı güç ölçümleri

Deney düzeneğinde tüm deneysel adımlarda kullanılan güç değeri DC güç kaynağının üzerinde bulunan ayar düğmesiyle yapılmıştır. DC güç kaynağı üzerinde bulunan dijital volt/akım göstergelerinden okunmuştur, DC güç kaynağında Akım sabit tutularak sisteme güç girdisi yapılmıştır. Deney sisteminde kullanılan güç girdisi yaklaşık 20 kW kapasitesindedir.

## 3.3. Deneysel Yöntem

Deneysel çalışmalar(100-90-80-70-60-50) L/h debi aralığında, çapı 2,74 mm ve 2,26 mm olan boş boruda gerçekleştirilmiştir.

Test borusunun uzunluğu; 37 cm

Güç Kaynağı: 20 kW

Sistem Basıncı: 1 Bar

Soğutma suyu debisi: 0,8 GPM

2,74 mm ve 2,26 mm borularda, her bir deneyde aşağıda belirtilen değerler ölçülmüştür;

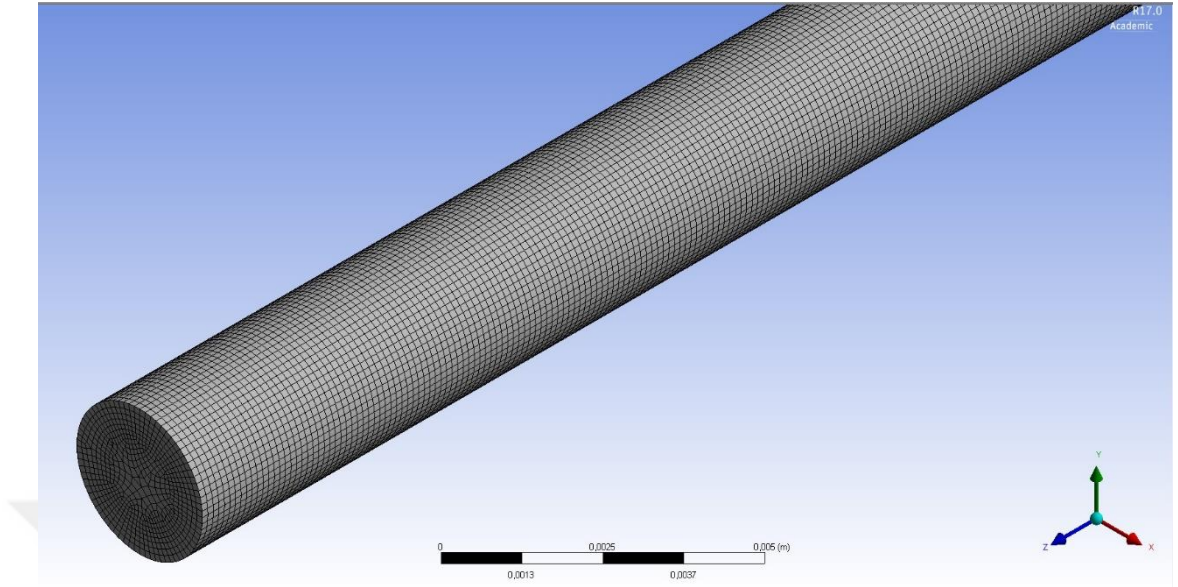
1. Test borusu yüzey sıcaklığı
2. Akışkanın test borusuna giriş ve çıkış sıcaklığı
3. Test borusuna giren ve çıkan akışkanın basınç farkı
4. Test borusundaki debi

Deneysel Çalışmalarda test borusunda gerekli ölçümler yapmak için şu işlemler sırasıyla yapılmıştır;

1. Sistemin debisi kontrol vanası kullanılarak deneysel çalışmada tespit edilen en yüksek debi değeri sağlanmıştır.
2. İş yapan akışkanın yoğunlaştırulduğu ısı değiştiricisi soğutma suyu açılır.
3. Test borusuna gerekli gücü temin etmek için ayarlanabilir DC güç kaynağı istenen değerlerde ayarlanarak sisteme aktarılması sağlanır.
4. Sistemin kararlı hale gelmesi beklenilir, test borusundaki yüzey sıcaklıklarında fazla bir değişim olmadığında sistemin kararlı hale geldiği kararına varılır.
5. Sistem kararlı hale geldikten sonra gerekli ölçüm değerli alınır ve belirlenen debi için deneyler tamamlanır. Bir sonraki debi değeri ölçümleri için aynı yol tercih edilir.

### **3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Çözümü**

Fluent paket programında yapılacak sayısal çözümleme için belirlenen sınır koşulları deneysel sistemin ve boru çapının doğrulanmasını amaçlandığından deneysel yöntemde kullanılan değerler kullanılmıştır. Bu çözüm 3 boyutlu olup geometri Fluent'te üzerinde çizilmiştir. Bu çözümleme de ağ yapısı olarak kare olarak mesh edilmiştir.



**Şekil 3.13.** Meshi yapılan bir borunun görüntüsü

Ağ yapısının kalitesine dikkat edilmiş ve en yüksek seviye de olması sağlanmıştır. Mesh sayısı artırılarak yakınsama kriteri belirlenmeye çalışılmıştır. Yakınsama kriteri mesh sayısı arttıkça sonuçların değişmemesine bağlı olarak belirlenmektedir. Bu yakınsama durumu iterasyon sayısının belirlenmesi için de önemlidir.

Bu sayısal çözümleme k- $\epsilon$  standart türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu model de “Enhenced Wall Treament” seçeneği işaretlenmiştir.

Sınır şartları aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

- Akışkan giriş sıcaklığı; 295 K
- Boru çıkışında basınç atmosfer basıncı
- Boru uzunluğu; 0,37 mm
- Çap olarak 2,76 ve 2,26 mm olarak belirlenmiştir.
- Re sayısı aralığı; 6500-14000

Deneysel ve sayısal olarak elde edilen bu sonuçlar karşılaştırılmış ve doğruluğu belirlenmeye çalışılmıştır. Boru çapının mikro/mini seviyelere indirgenmesiyle temel teorilerin geçerliliği belirlenmeye çalışılmıştır.

Diğer sınır şartları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir;

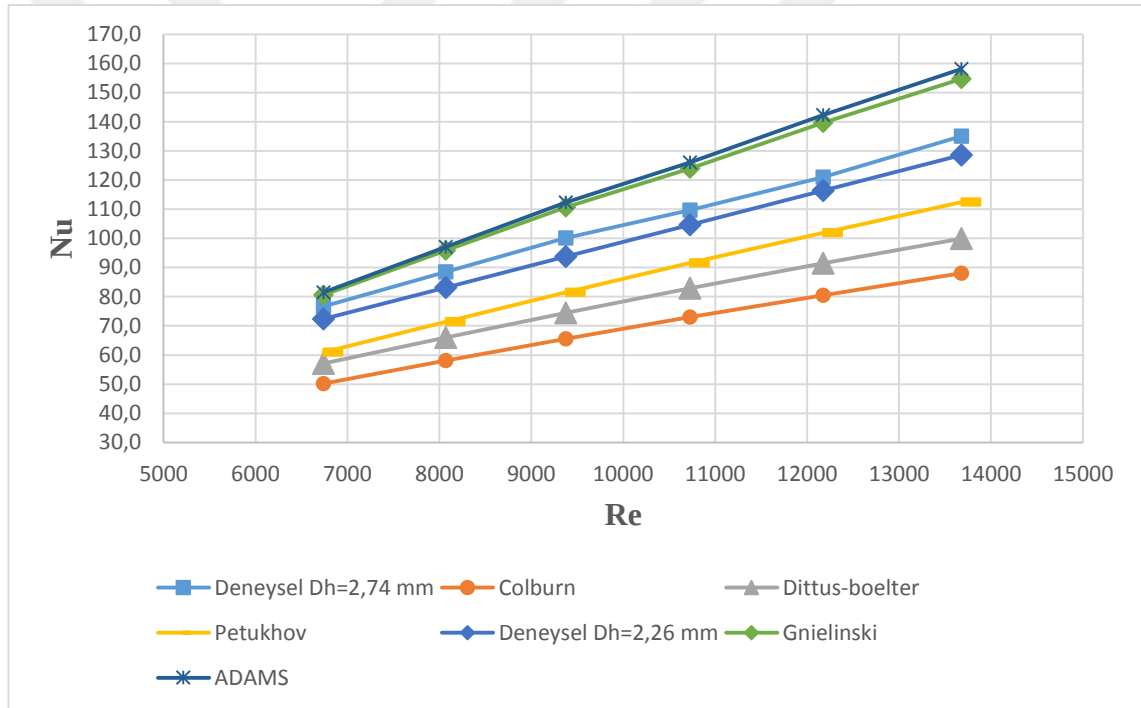
**Çizelge 3.2.** CFD sınır şartları

| Mini kanal | Çap(mm) | Boru Et Kalınlığı(mm) | Hız(m/s) | Debi(L/h) |
|------------|---------|-----------------------|----------|-----------|
| 1          | 2,74    | 0,23 mm               | 4,71     | 100       |
|            |         |                       | 4,24     | 90        |
|            |         |                       | 3,77     | 80        |
|            |         |                       | 3,29     | 70        |
|            |         |                       | 2,83     | 60        |
|            |         |                       | 2,36     | 50        |
| 2          | 2,26    | 0,17 mm               | 5,75     | 100       |
|            |         |                       | 5,12     | 90        |
|            |         |                       | 4,50     | 80        |
|            |         |                       | 3,94     | 70        |
|            |         |                       | 3,39     | 60        |
|            |         |                       | 2,84     | 50        |

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde deneysel ve sayısal çalışmalarda elde edilen araştırma bulguları değerlendirilmiş ve sonuçlar grafiksel ortamda hazırlanmıştır. Sonuçlar minikanallarda boş borularda tek fazlı akış ve sayısal analiz olmak üzere iki alt bölüm halinde incelenmiştir.

##### 4.1. Mini Kanallarda Deneysel Sonuçlar



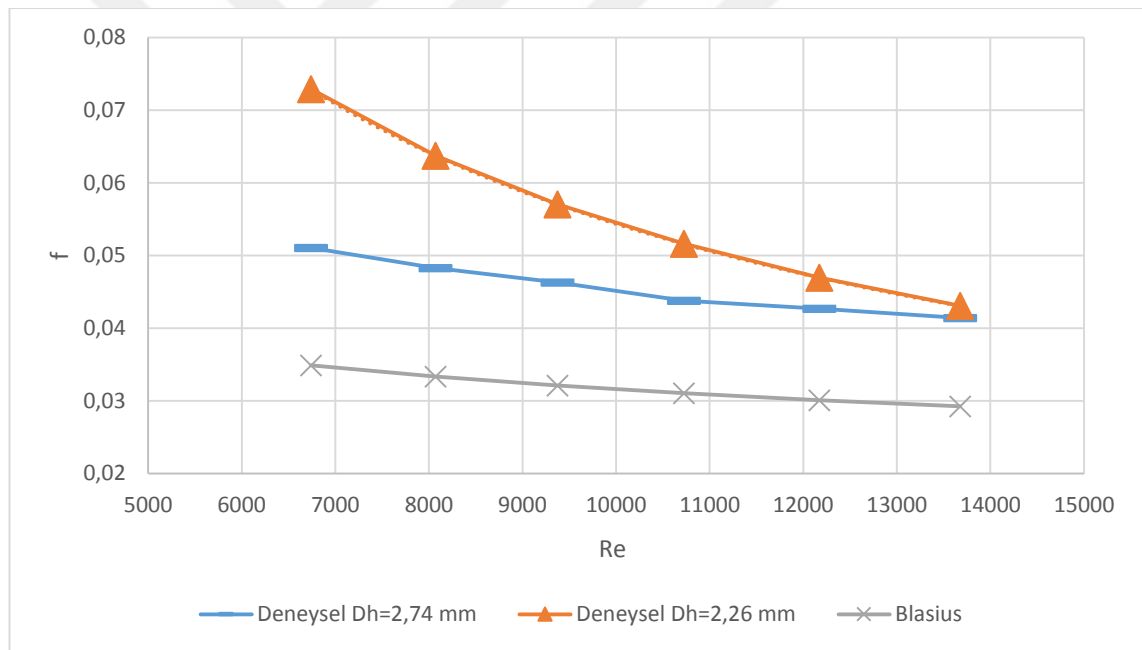
Şekil 4.1. Mini kanallarda Nu-Re değişimi

Şekil 4.1’de Çapları 2,74 mm ve 2,26 mm olan mini kanalda tek fazlı akışta yapılan deneysel sonuçlar görülmektedir. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere elde edilen sonuçlar temel teorilerle uyum içerisindedir. Re sayısının artması ile Nu sayısının artması istenen bir sonuçtur (Eiamsa–Ard. 2010). Mini kanallarda çapın küçülmesi temel teorilere daha da yaklaştığı görülmektedir.

Çapı 2,74 mm olan mini kanallarda çalışma koşulları için elde edilen Nu sayısı kolerasyonu  $Nu=0,038.Re^{0,79}.Pr^{1/3}$  şeklindedir. Çapı 2,26 mm olan mini kanal için Nu sayısı kolerasyonu  $Nu=0,030.Re^{0,81}.Pr^{1/3}$  şeklindedir. Bu kolerasyonlar temel teoriler olan Colborn ve Dittus-Boelter Kolerasyonu ile karşılaştırıldığında uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

$$\text{Colburn Korelasyonu; } Nu = 0,023.Re^{0,8}.Pr^{1/3} \quad (4.1)$$

$$\text{Dittus-Boelter Korelasyonu; } Nu = 0,023.Re^{0,8}.Pr^n \quad (n=0,4-0,3) \quad (4.2)$$



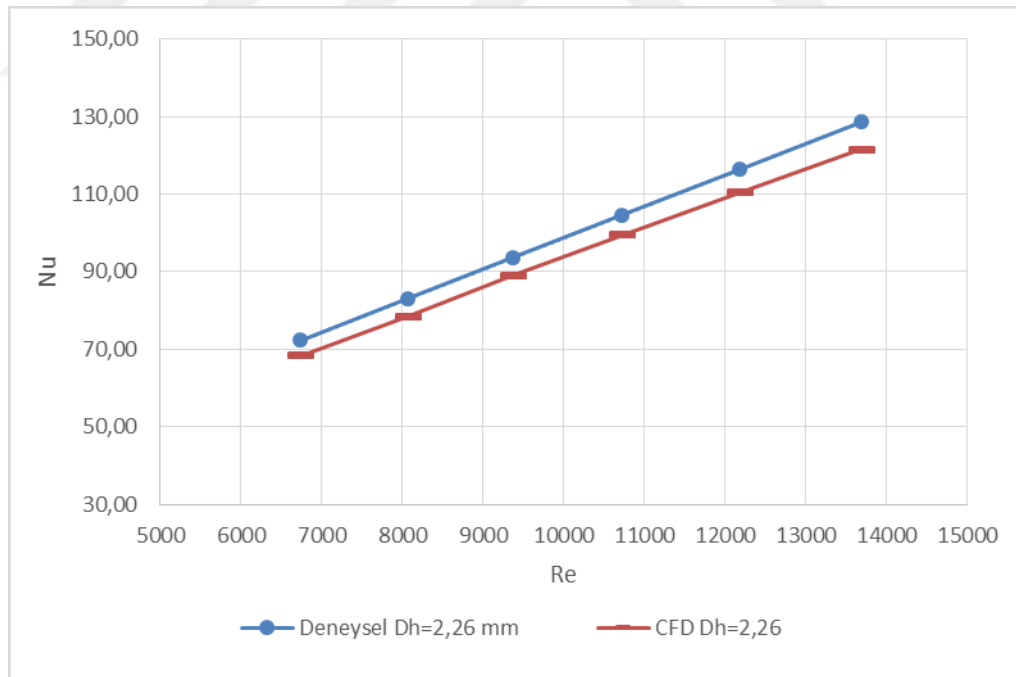
**Şekil 4.2.** Mini kanallarda f- Re değişimi

Şekil 4.2’de çapları 2,74 mm ve 2,26 mm olan mini kanalda tek fazlı akışta yapılan deneysel sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 4.2’den de gözlemlendiği üzere f-Re ilişkisi literatürde temel teorilerle uygunluk içerisinde, Re sayısının artması ile f’nin azalması beklenen bir sonuçtur. Şekil 4.2’de ilk değerlerin yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni basınç düşümü değerlerinin düşük hızlarda hassas olarak okunamamasından kaynaklanabilmektedir. Bu nedenle mini ve mikro kanallarda deneysel çalışmalar sonucu

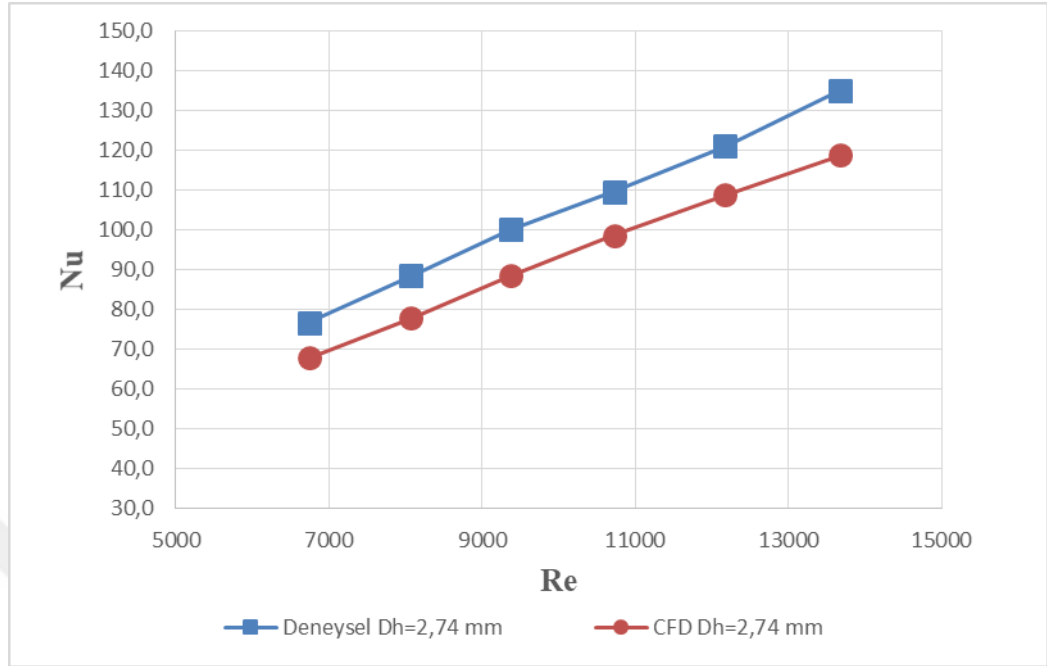
elde edilen sürtünme katsayısı beklenilenden farklı çıkabilir(Deniz, 2007). Çapı 2,74 mm olan mini kanallarda çalışma koşulları için elde edilen f sayısı kolerasyonu  $f=51,442 \cdot Re^{-0,744}$  şeklindedir. Çapı 2,26 olan mini kanal için f sayısı kolerasyonu  $f=0,7222 \cdot Re^{-0,301}$  şeklindedir. Ayrıca Blasius eşitliğinde hassasiyetin %25 olduğu düşünülürse bu hata düzeyinin beklenmesi normaldir. Hrnjak *et al.* (2007), yaptığı deneysel çalışmada da türbülanslı bölgedeki sürtünme katsayısı değerinin ise temel teorilerden büyük çıktığı gözlemlenmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalarla sürtünme katsayısının kanal geometrisi, yüzey özellikleri ve akışkan etkileşimi ile azaltılabileceği görüşü öne sürülmüştür (Şara, 2012).

Blasius denklemi;  $f=0,316 \cdot Re^{-0,25}$  (4.3)

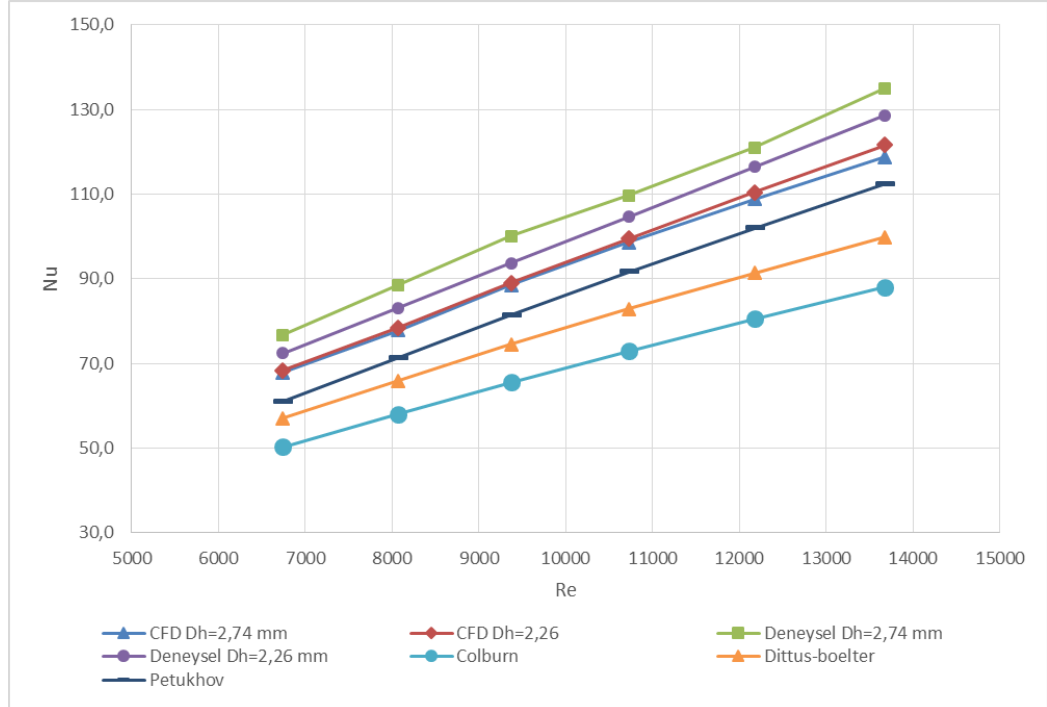
#### 4.2. Mini Kanallarla Sayısal Sonuçlar



Şekil 4.3. Çapı 2,26 mm Mini kanaldaki deneysel ve sayısal çalışmalardaki Nu-Re İlişkisi



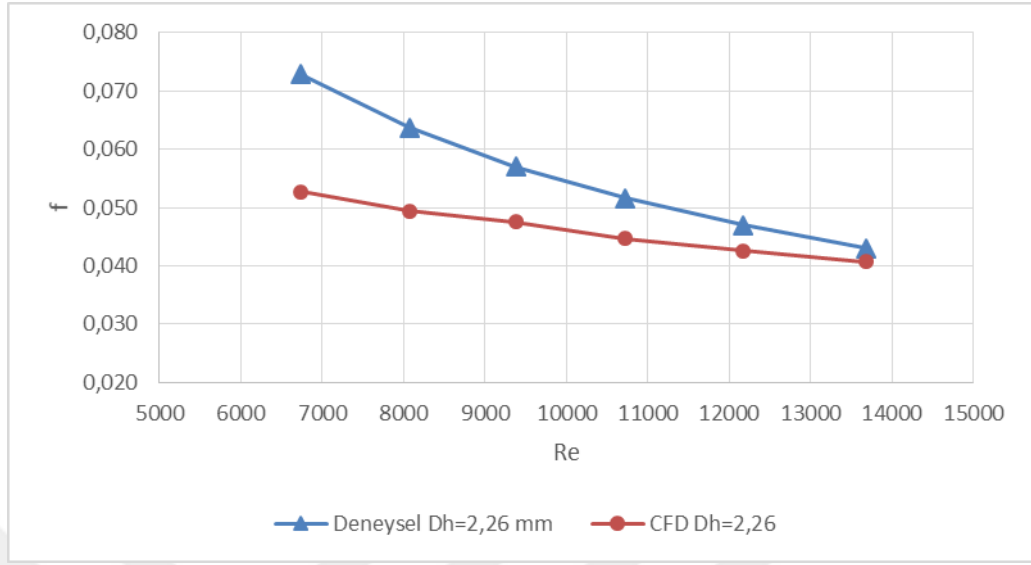
Şekil 4.4. Çapı 2,74 mm Mini kanaldaki deneysel ve sayısal çalışmalarda Nu-Re ilişkisi



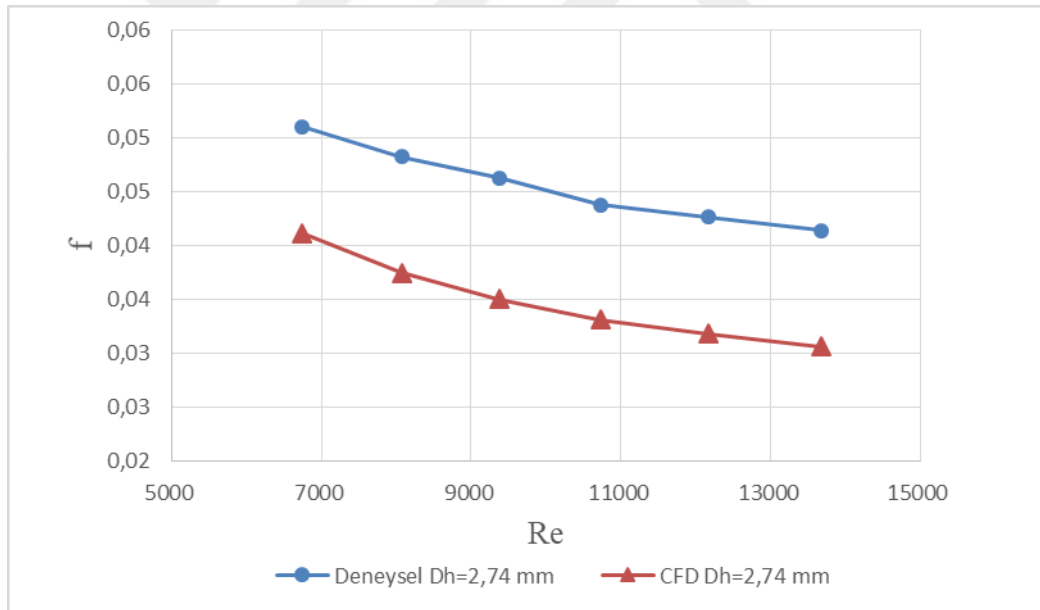
Şekil 4.5. Mini kanallardaki deneysel ve sayısal sonuçların temel teorilerle karşılaştırılması ve Nu-Re ilişkisi

Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de çapları 2,74 mm ve 2,26 mm olan mini kanalda tek fazlı akışta yapılan deneysel ve sayısal sonuçların Re-Nu ilişkisi karşılaştırılmıştır. Şekiller incelediğinde sayısal çözümler sonucu bulunan değerlerle deneysel çalışma sonucu elde edilen değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Sayısal analizde FLUENT süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini makro kanallardakine uygun olarak çözdüğünden farkın oluşması beklenen bir sonuç olarak gözlemlenmiştir. Makro kanallardaki bu denklemler cidarda kaymama sınır şartı altında hesaplamalar yapmamaktadır. Oysa mini kanallarda azalan çap ve basınç düşünün artması cidarda kayma hareketine sebep olmaktadır. Bu kayma hareketi cidarda akışkan taneciklerinin gerçekleştirdiği hareket miktarını arttırdığından taşınım miktarını da daha fazla artmasını sağlamaktadır. Elde edilen bu veriler Adams *et al.*(1997) tarafından mini kanallarda türbülanslı akışta yapılan deneysel sonuçlarda elde edilen sonuçların temel teorilerden ve sayısal çözümler sonucu elde edilen değerlerden yüksek çıkmasını cidar kayma hareketinin başlamasıyla açıklanabilir olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca, 2,26 mm kanal çapı için ortalama ısı transfer katsayısı değerlerinin 2,74 mm kanal çapından daha yüksek olduğu açıktır. Bu nedenle, kanalın çapını azaldıkça ortalama ısı transfer katsayısı artar (Seyed Ebrahim Ghasemi 2017).

Sayısal çözümleme sonucu elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmekte ve deneysel değerle uyum içerisinde. Deniz (2007), Re sayısı artması ile belli bir oranda sayısal değerlerden büyük olmaktadır. Çapım 1 mm ve altındaki çaplarda, türbülanslı akışta makro borularda kullanılan korunum denklemlerini kullanan FLUENT sonuçlarının küçülen bir çapla artan bir hata ile deneysel değerlerden %40 veya daha yüksek bir oranda küçüldüğü ifade edilmiştir.



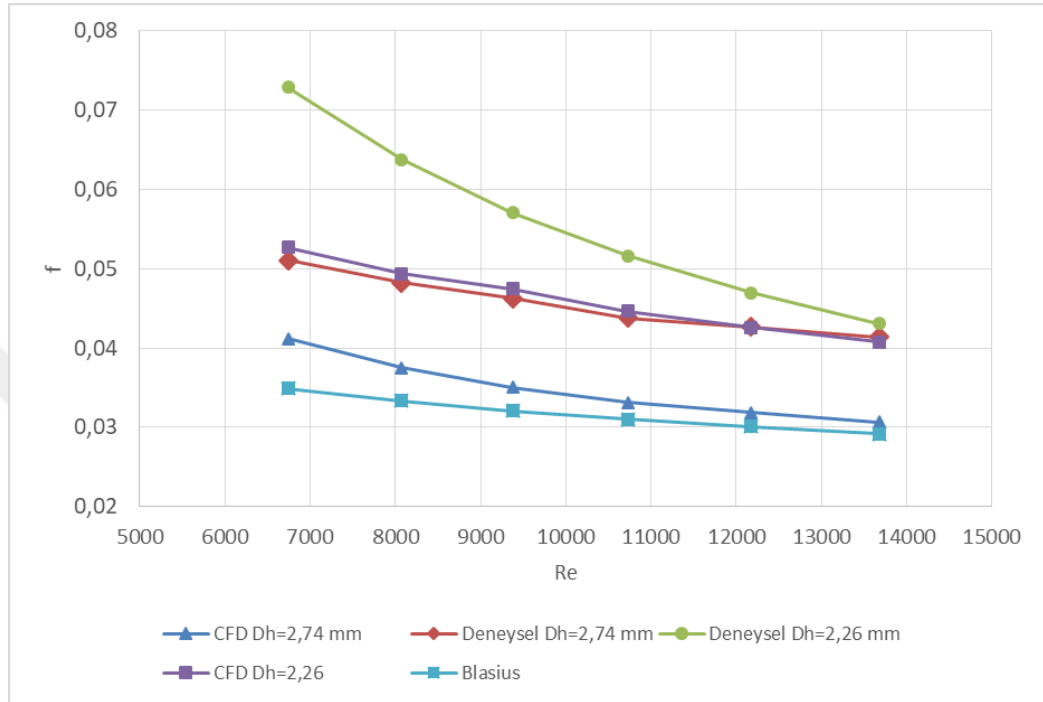
**Şekil 4.6.** Çapı 2,26 mm Mini kanaldaki deneysel ve sayısal çalışmalarda  $f$ -Re ilişkisi



**Şekil 4.7.** Çapı 2,74 mm Mini kanaldaki deneysel ve sayısal çalışmalarda  $f$ -Re ilişkisi

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de mini kanalda yapılan deneysel ve sayısal sonuçlarda  $Re$ - $f$  ilişkisi görülmektedir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’den de anlaşılacağı üzere sayısal sonuçlar hem deneysel sonuçlarla Şekil 4.8’de görüldüğü literatürle uyum içerisindedir. Deneylerde  $Re$  sayısı artarken sürtünme katsayısında azalma olduğu görülmektedir.  $Re$  sayısı düşük olduğunda sürtünme faktörü CFD de deneysel den düşük olduğunu göstermektedir.

Eiamsa-Ard. (2010),  $f$  sayısı açısından, CFD-deneysel  $\%7$ 'lik bir farkın olduğu, CFD-Dittus ile  $\%5$ 'lik bir farkın olduğu belirlenmiştir.

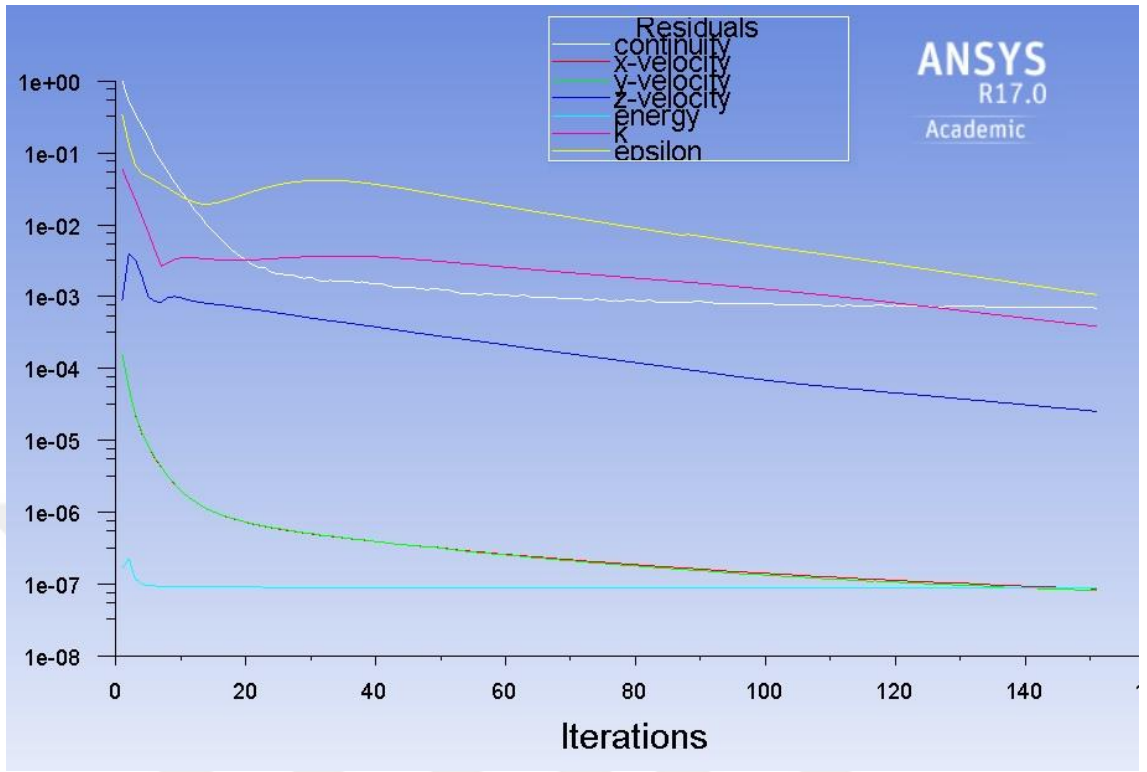


**Şekil 4.8.** Mini kanallardaki deneysel ve sayısal sonuçların temel teorilerle karşılaştırılması,  $f$ - $Re$  ilişkisi

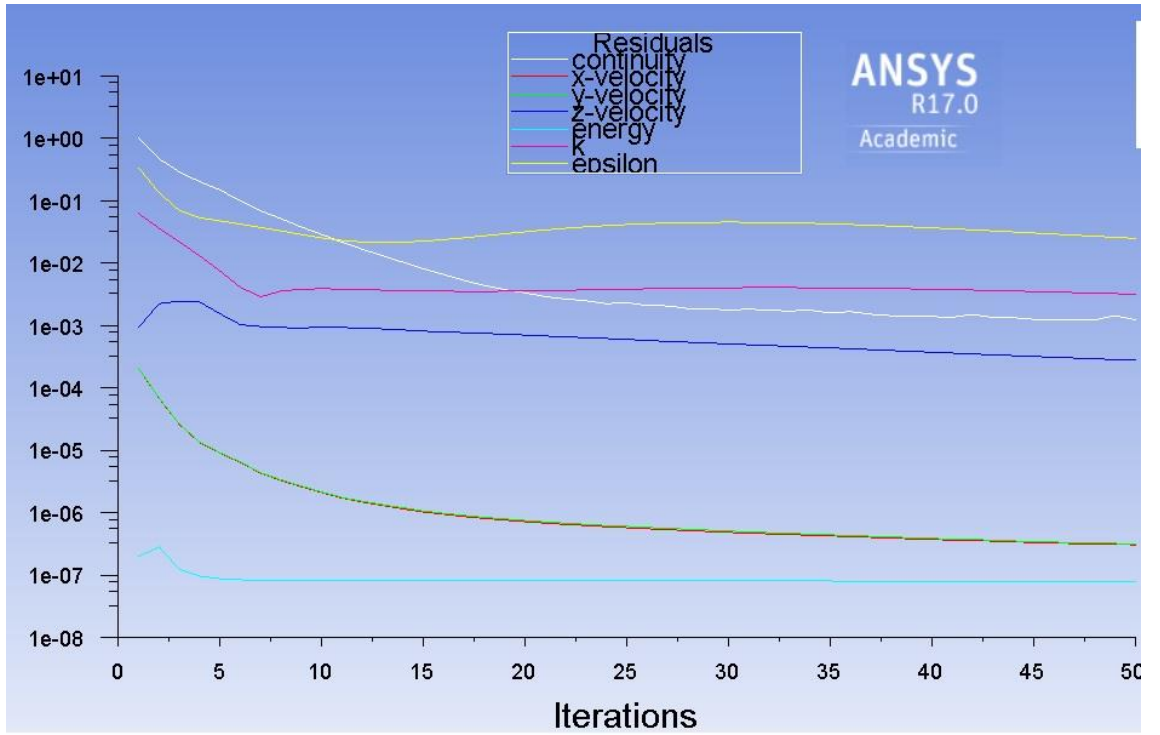
Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de Çapları 2,74 mm ve 2,26 mm olan mini kanalda tek fazlı akışta yapılan deneysel ve sayısal sonuçların  $Re$ - $f$  ilişkisi karşılaştırılmıştır. Türbülanslı akış bölgesinde sayısal sonuçların temel teorilerden büyük değerler verdiği, mini kanallarda elde edilen deneysel sonuçların da çap küçüldükçe aradaki farkın sürekli arttığı gözlemlenmiştir. Bu fark  $Re$  sayısının artmasıyla daha çok arttığı görülmektedir. Büyük çapa sahip olan kanal daha düşük basınç düşüşü gösterir. Kanal çapı arttığında, kesit alanı artar ve hız azalır dolayısıyla basınç düşüşü azalır (Seyed Ebrahim Ghasemi 2017). Compell ve Kandlikar (2002), yapılan deneysel çalışmada kanal içerisinde laminar akışta elde edilen sürtünme katsayısının geleneksel değerlere yakın olduğunu ifade etmişlerdir. Steinke ve Kandlikar (2006), farklı hidrolik çapa sahip kanallarda farklı  $Re$  Sayılarına sahip akışlardaki sürtünme katsayısı ile ilgili çalışmaları ele almışlar ve bir veri havuzu oluşturmuşlardır. Temel teoriler de kullanılarak laminar ve türbülanslı bölgedeki

sürtünme katsayısını hesaplamışlar. Bu değerleri deneysel bağıntılarla elde edilen sonuçlarla oranlamışlardır. Türbülanslı bölgede Blasisus (Eşitlik 4.3) ifadesini kullanmışlardır. Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçların farklı çıkmasının nedeni mini kanallarda çapın küçülmesi ve basınç düşüşü ile açıklanmaktadır. Reynolds sayısı arttıkça çap büyüdükçe sürtünme katsayısı temel teorilere daha yakınlaştığı görülmekte fakat çap küçüldükçe bu oranın daha çok arttığı görülmüştür.

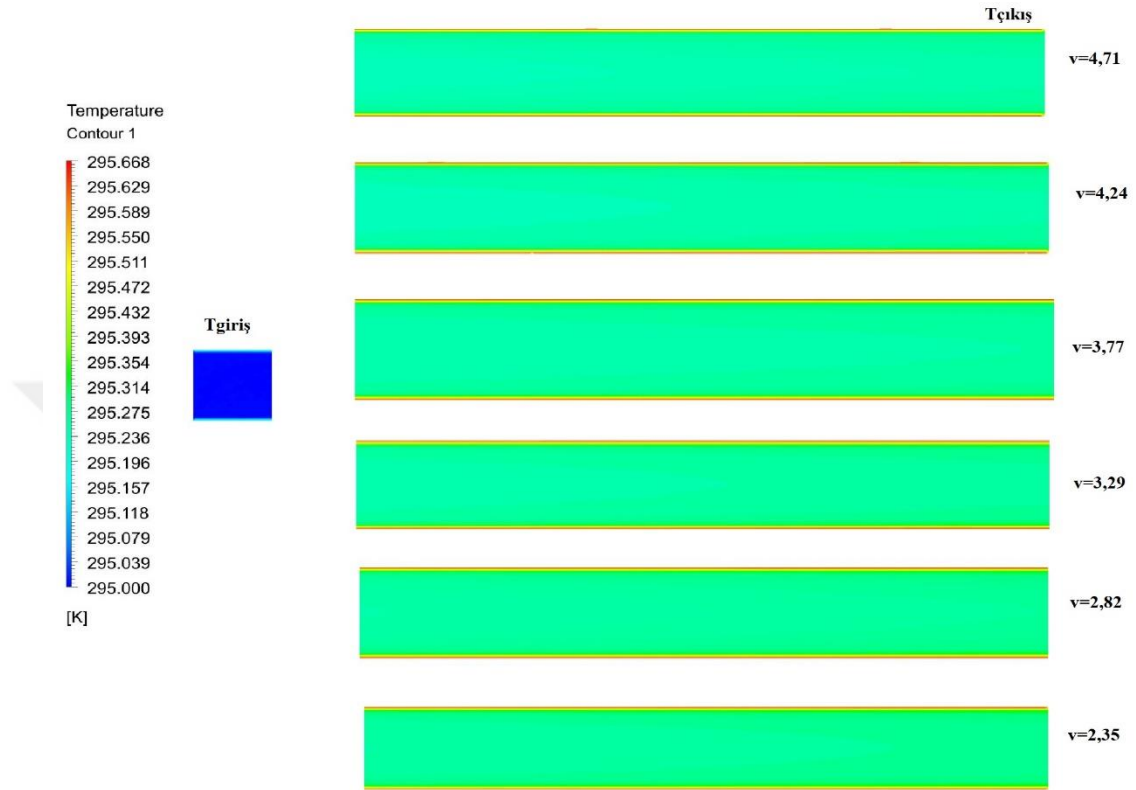
Sayısal analizde çözüm yöntemi k- $\epsilon$  standart modeli kullanılmış ve çözüm metodu iterasyonla yakından alakalı olduğu görülmüştür. Analiz yapılırken çözümün hangi iterasyondan itibaren kararlı hale geldiği gözlemlenir. Yakınsamış ve iterasyon sayısından bağımsız bir çözümde bütün değişkenler için sabit kalmalı yada sürekli olarak küçülmeli, değerler belli bir yerden sonra da sürekli olarak sabit kalmalıdır. Şekil 4.9.’da 2,74 mm mini kanalda, Şekil 4.10’da 2,26 mm mini kanalda sabit ısı akısında süreklilik, enerji ve momentum denklemlerinin 2,74 mm mini kanalda 150, 2,26 mm mini kanalda 50 iterasyondan sonra kararlı hale geldiğini görülmüştür. İterasyon sayısının artışı ile yakınsamanın değişmediği görülmüştür.



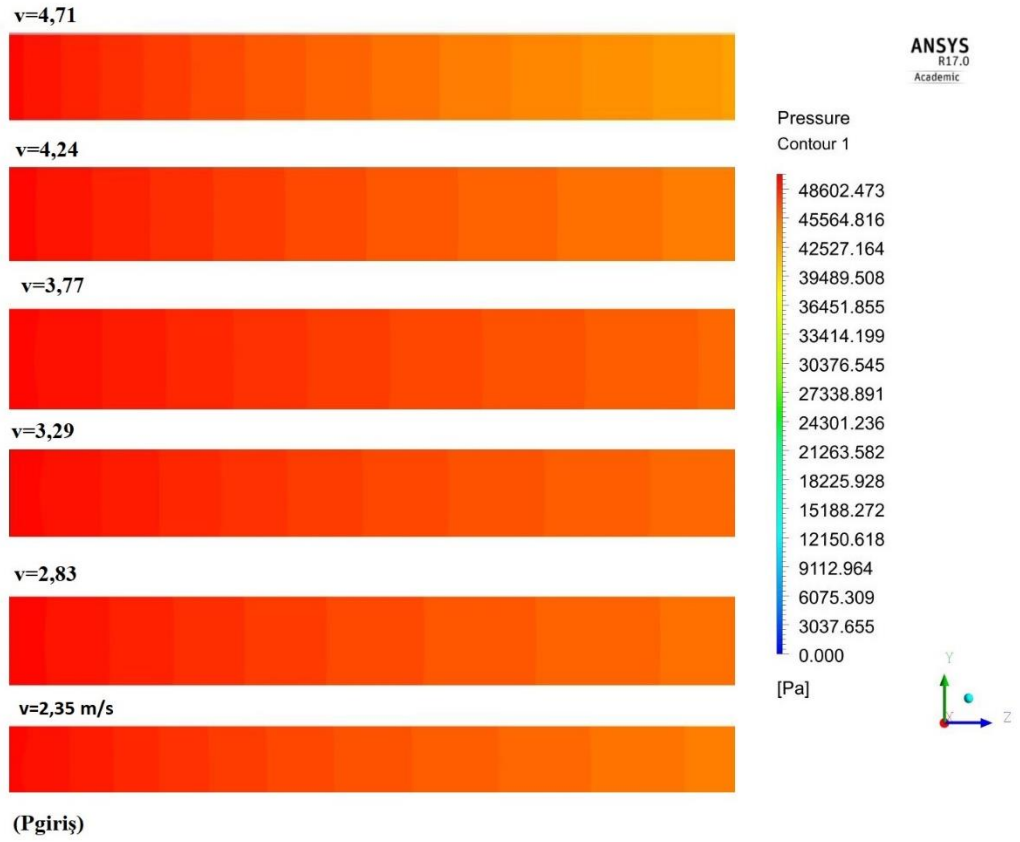
Şekil 4.9. 2,74 mm çaplı boruda iterasyon değişimi



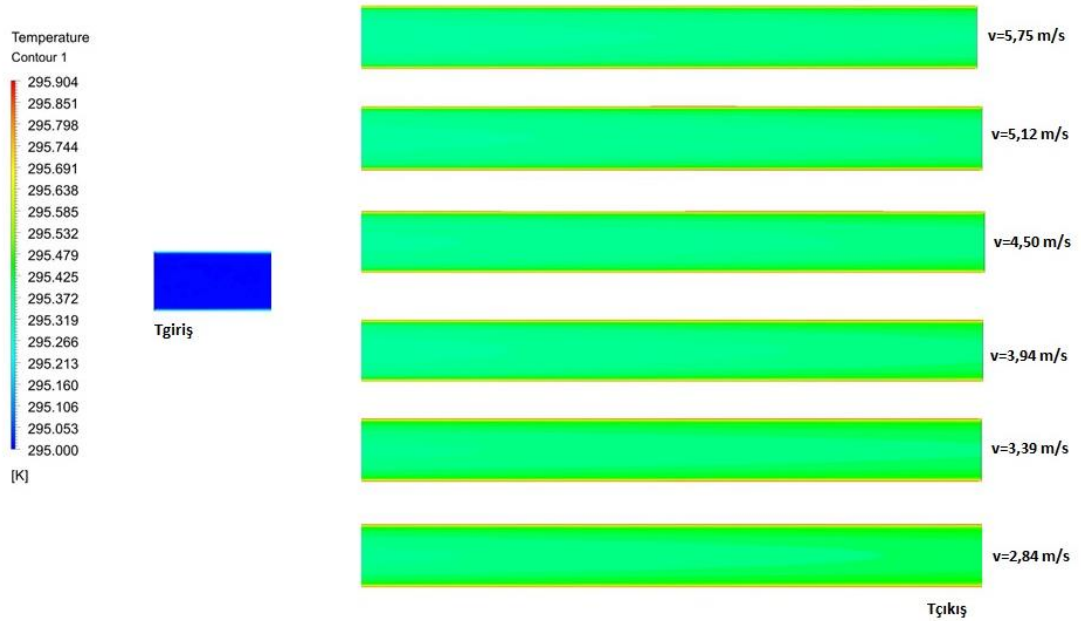
Şekil 4.10. 2,26 mm çaplı boruda iterasyon değişimi



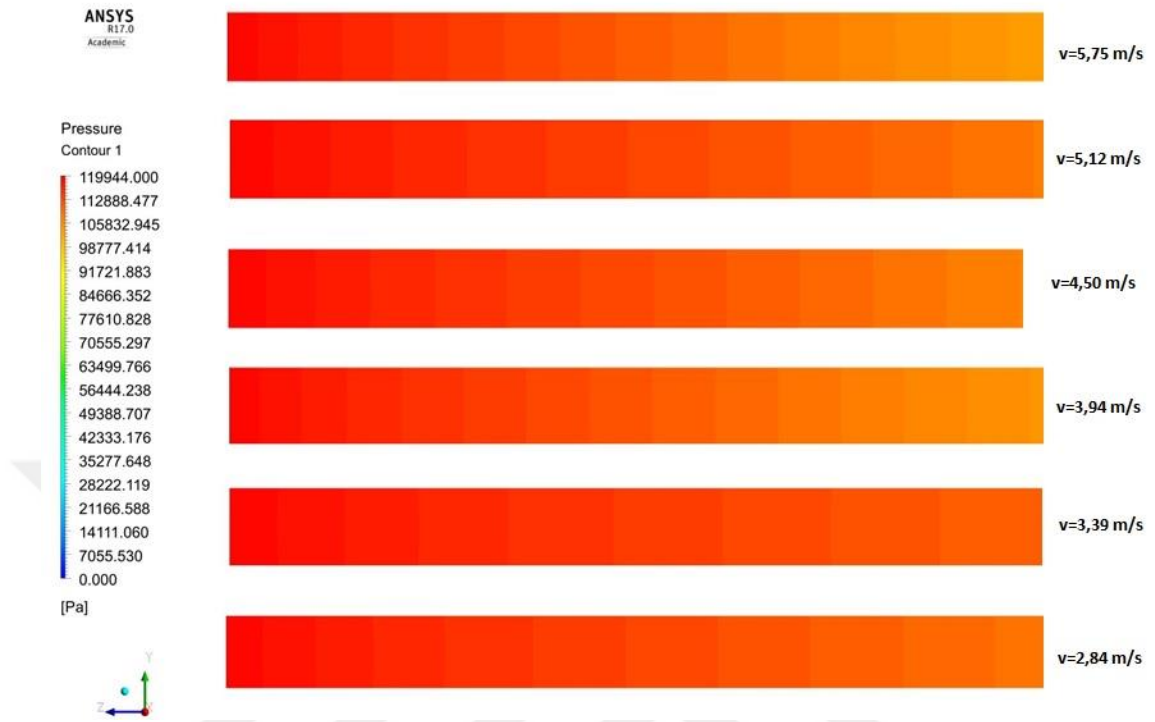
**Şekil 4.11.** 2,74 mm Mini kanaldaki sayısal analiz sonucu kanal giriş ve çıkışında sıcaklık dağılımı



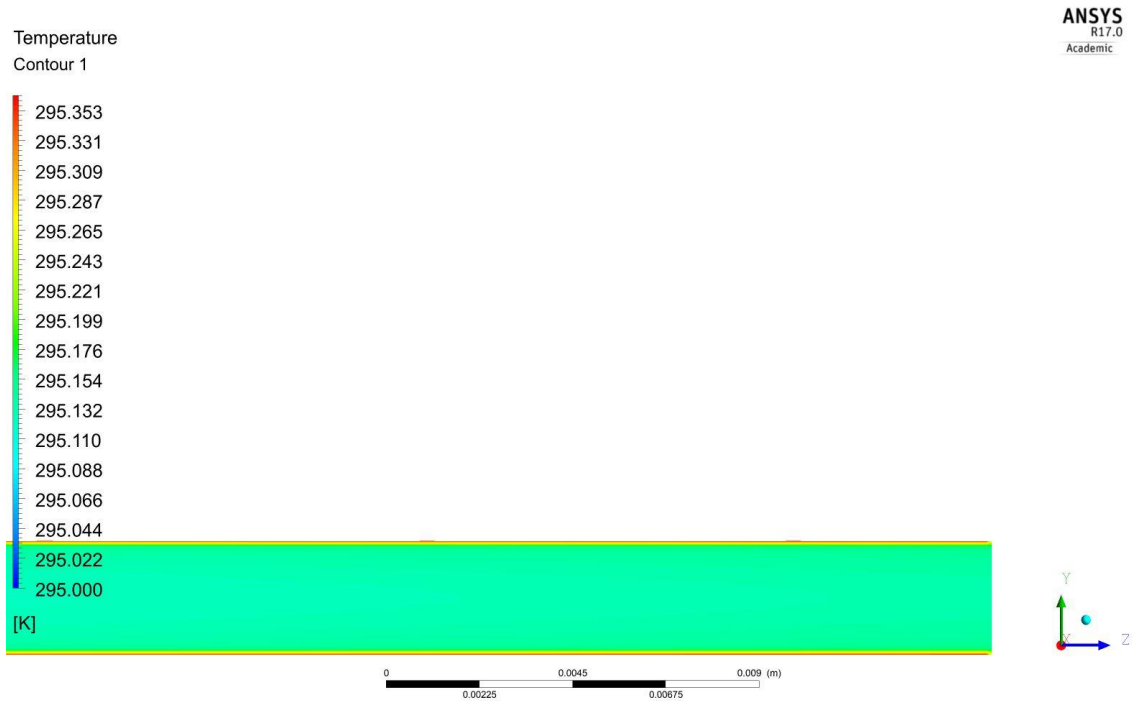
Şekil 4.12. 2,74 mm Mini kanaldaki sayısal analiz sonucu kanal girişinde basınç dağılımı



Şekil 4.13. 2,26 mm Mini kanaldaki sayısal analiz sonucu kanal giriş ve çıkışında sıcaklık dağılımı



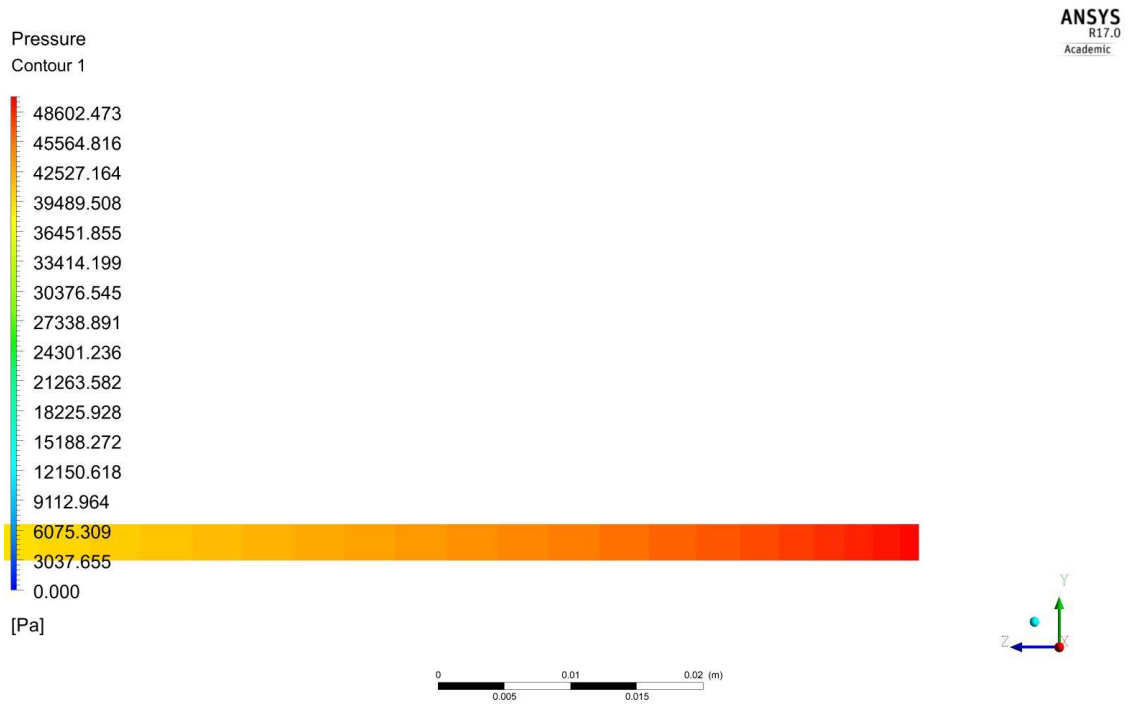
Şekil 4.14. 2,26 mm Mini kanaldaki sayısal analiz sonucu kanal girişinde basınç dağılımı



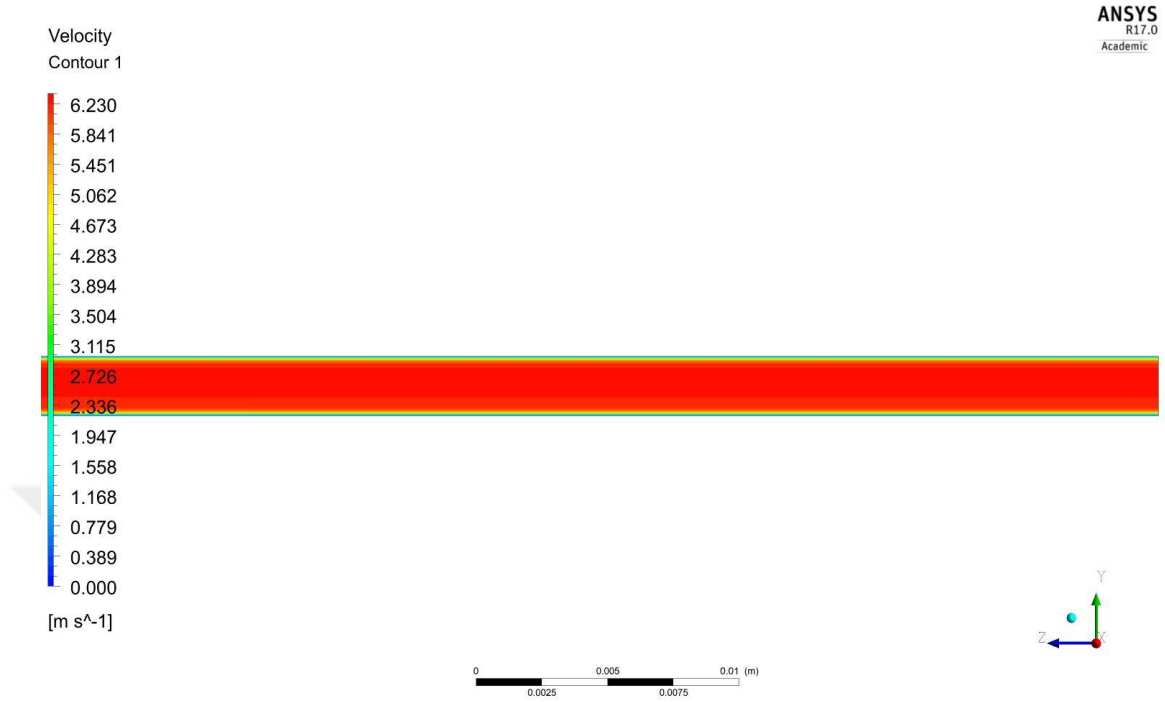
Şekil 4.15. 2,74 mm mini kanalda  $v=4,71$  m/s olduğunda kanal çıkışında sıcaklık değişimi



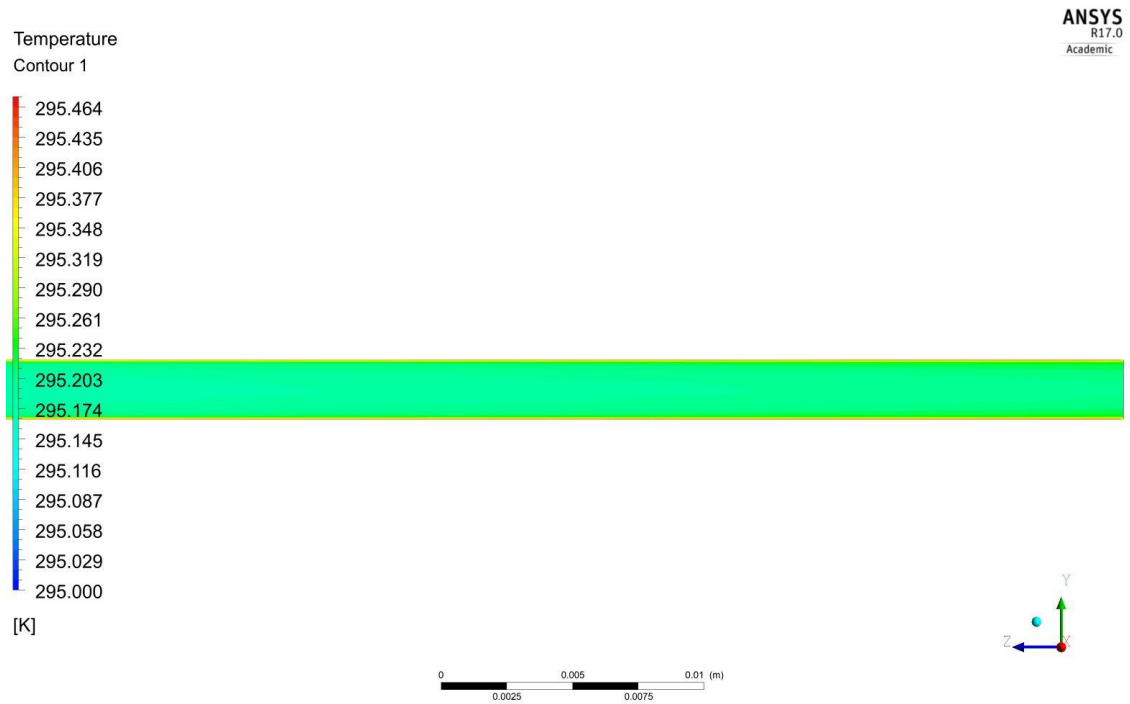
Şekil 4.16. 2,74 mm mini kanalda  $v=4,71$  m/s olduğunda kanal çıkışında hız değişimi



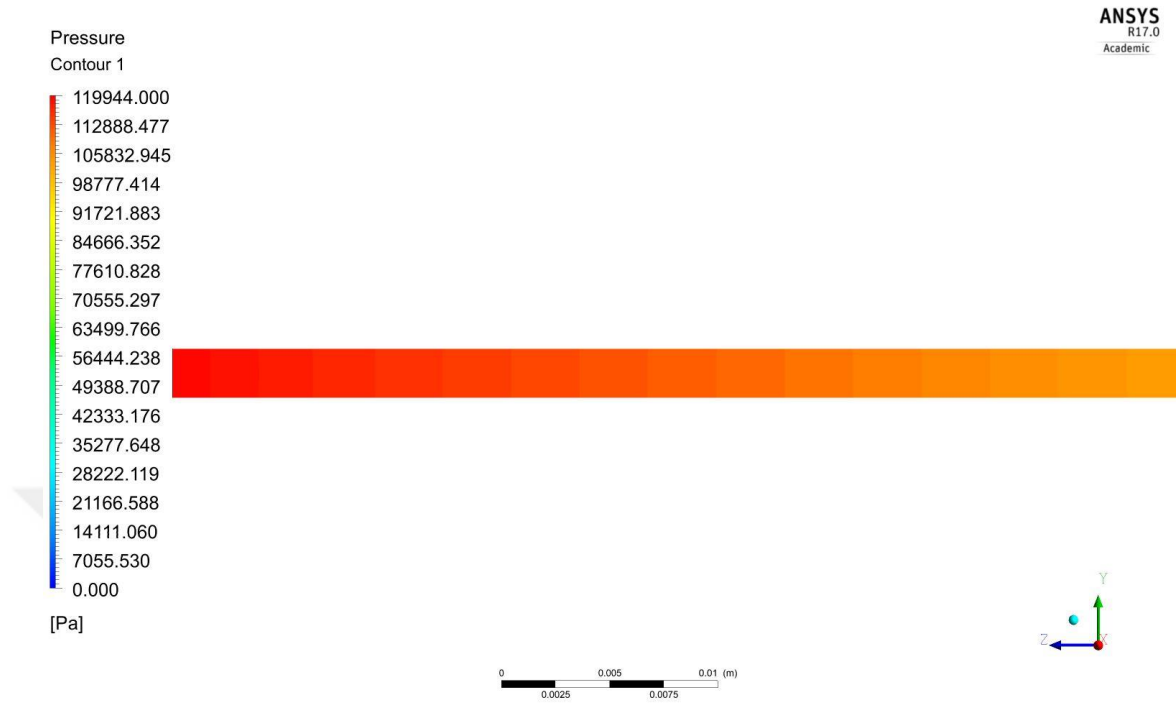
Şekil 4.17. 2,74 mm mini kanalda  $v=4,71$  m/s olduğunda kanal girişinde basınç değişimi



**Şekil 4.18.** 2,26 mm mini kanalda  $v=5,75$  m/s olduğunda kanal çıkışında hız değişimi



**Şekil 4.19.** 2,26 mm mini kanalda  $v=5,75$  m/s olduğunda kanal çıkışında sıcaklık değişimi



**Şekil 4.20.** 2,26 mm mini kanalda  $v=5,75$  m/s olduğunda kanal girişinde basınç değişimi

## 5. SONUÇLAR

Bu deneysel ve sayısal çalışmada, farklı çapa sahip iki mini kanal içerisinde türbülans akış oluşturularak ısı geçişi ve basınç düşüşü incelenmiştir. İki farklı çapa sahip mini kanallar, 6 farklı debi de giriş sıcaklığı sabit tutularak sabit ısı akısında deneyler yapılmış ve elde edilen verilerden  $Nu-Re$  ve  $f-Re$  ilişkileri incelenmiştir. Ayrıca CFD de çözümler yapılmış ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak hem sayısal modelin doğrulanması hem de deneysel sonuçların doğruluğunu için yapılmıştır.

- Deneysel çalışmalarda elde edilen  $Nu$  sayısı denklemi literatürle uyum içerisindedir.
- Mini kanallarda çap küçüldükçe ısı transfer katsayısının ve basınç düşüşünün de arttığı görülmüştür.
- 2,74 ve 2,26 mm çapındaki kanallardan akan su için ısı transfer katsayıları ve Nusselt sayıları deneysel olarak belirlenmiştir ve Gnielinski denklemi gibi geleneksel Colborn, Dittus-Bolter gibi Nusselt sayıları korelasyonlarından tahmin edilenden daha yüksek bulunmuştur.
- Deneysel ve sayısal sonuçlar Adams *et al.*(1997) ve Yut *et al.* tarafından sunulan verilerle karşılaştırıldı ve ısı transferi artırımındaki eğilimler uyum içinde bulundu.
- Türbülanslı akışta ise, deneysel sonuçlara göre, makro boyutlar için geleneksel bağıntılardan elde edilen sürtünme faktörü değerleri, bu çalışmaya konu olan çaplarda küçük hatalar vermiştir. Makro boyut için korunum denklemlerini esas alan sayısal yöntem denklemlerinin, çapların büyümesi ve küçük  $Re$  sayısının küçüldüğü zaman deneysel değerlere yakın olduğu, ancak çapın küçülmesi ve  $Re$  sayısının artmasıyla, sayısal yöntem sonuçlarının, deneysel değerlerden küçük kaldığı gözlemlenmiştir.
- Literatür incelenmesi sonucunda türbülanslı akışta  $Dh > 1$  mm büyük olması durumunda deneysel sonuçlara göre, makro boyutta temel teorilerden elde edilen  $Nu$  sayılarının daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Sayısal çözümleme sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.
- Bulunan denklemler mini kanallarda literatüre yeni katkı sağlamıştır. Bu denklemler; Çapı 2,74 mm olan mini kanal için elde edilen  $Nu$  sayısı korelasyonu

$Nu=0,038.Re^{0,79}.Pr^{1/3}$  şeklindedir. Çapı 2,26 olan mini kanal için Nu sayısı kolerasyonu  $Nu=0,030.Re^{0,81}.Pr^{1/3}$

- Mini kanal, makro boruya göre daha küçük sürtünme kuvvetine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Mini kanalların küçük çaplara, az akışkana vb. özelliklere sahip olmasından dolayı MEMS cihazların ve içerisinde mikro akışlı cihazların gelişimine katkıda bulunacağı gözlemlenmiştir.
- Nu-Re ve f-Re ilişkisi literatürle uyum içerisinde.
- Mini kanallarda çapın küçülmesi temel teorilere daha da yaklaştığı gözlemlenmiştir.
- Mini kanallarda çap küçüldükçe ısı transfer katsayısı daha çok artmaktadır.
- Mini kanallar çap küçüldükçe sürtünme faktörü arasındaki farkın sürekli arttığı belirlenmiştir. Bu fark Re sayısının artmasıyla daha belirgin bir hale geliyor.
- f - Re ilişkisinde sayısal ve deneysel sonuçların farklı çıkmasının nedeni çapın küçülmesi ve basınç düşüşü ile bağlantılı olduğu görülmüştür.
- Reynolds sayısı arttıkça çap büyüdükçe sürtünme katsayısı temel teorilere daha yakınlaştığı görülmekte fakat çap küçüldükçe bu oranın daha çok arttığı gözlemlenmiştir.
- Mini kanallarda yapılan bu çalışmalar  $D_h < 1$  mm olduğu çalışmalarla desteklenmelidir.

## KAYNAKLAR

- Adams, T. M., Abdel-Khalik, S. I., Jeter, S. M. and Qureshi, Z. H., 1997. An Experimental Investigation of Single-Phase Forced Convection in Microchannels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.41, No.6–7, pp. 851–857
- Adams, T. M., Abdel-Khalik, S. I., Jeter, S. M., Qureshi, Z. H., 1998. An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannels. *Int. J. Heat Mass Transfer* 41, 6–7, 851–857.
- Agarwal, A., Bandhauer, T.M., Garimella, S., 2010. Measurement and modeling of condensation heat transfer in non-circular microchannels. *International Journal of Refrigeration*, 33, 1169-79.
- ANSYS, Fluent Paket Programı, version 17.0
- Anonim, 2018. <http://konveksiyon.nedir.org/>, (05.02.2018)
- Asthana, A., Zinovik, I., Weinmueller, C., Poulikakos, D., 2011. Significant Nusselt number increase in microchannels with a segmented flow of two immiscible liquids: an experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 1456-64.
- Avcı, M., 2008. Mikroakışkanlar akış ve ısı transferi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Awad, M.M., Dalkilic, A.S. ve Wongwises, S., 2014. “A Critical Review on Condensation Heat Transfer in Microchannels and Minichannels”, *ASME Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, 5:1-25.
- Barlak, S., Yapıcı, S., Sara, O.N., 2011. Experimental investigation of pressure drop and friction factor for water flow in microtubes, *Int. J. Thermal Sciences*, cilt 50, pp. 361-368.
- C.B. Sobhan, S.V. Garimella. 2001. A comparative analysis of studies on heat transfer and fluid flow in microchannels, *Microscale Thermophysical Engineering* 5, 293–311.
- Canay, A., 2007. “Mikro Kanallarda Isı transferi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 99-100.
- Caney, N., Marty, P., Bigot, J., 2006. Friction losses and Heat Transfer of single –phase flow in a minichannel, *Applied Thermal Engineering*, 27, 1715-1721
- Celata, G.P., Cumo, M., Marconi, V., McPhail, S.J., Zummo, G., 2006. Microtube liquid single-phase heat transfer in laminar flow. *Int. J. Heat Mass Transfer* 49, 3538–3546.
- Celata, G.P., Morini, G.L., Marconi, V., McPhail, S.J., Zummo, G., 2006b. Using viscous heating to determine the friction factor in microchannels – An experimental validation. *Experimental Thermal and Fluid Science* 30, 725–731.
- Celata, G.P., Saha, S.K., Zummo, G., Dossevi, D., 2010. Heat transfer characteristics of flow boiling in a single horizontal microchannel. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 1086-1094.
- Çengel, Y., 2011, *Isı ve Kütle Transferi*, 3. Basım, Güven Bilimsel
- Chen, C. S., Lee, S. M., & Sheu, J. D. 1998. Numerical analysis of gas flow in microchannels. *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, 33(7), 749-762.

- Chen, Y., & Cheng, P. 2002. Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(13), 2643-2648.
- Chen, Y., Wua, R., Shi, M., Wua, J., Peterson, G.P., 2009. Visualization study of steam condensation in triangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5122-9.
- Chen, Y., Zhang, C., Shi, M., Wu, J., 2009. Three-dimensional numerical simulation of heat and fluid flow in noncircular microchannel heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 917-20.
- Chien, N. B., Vu, P. Q., Mohd-Ghazali, N., & Jong-Taek, O. 2015. Convective heat transfer characteristics of single phase liquid in multiport minichannel tube: Experiment and CFD simulation. *Energy Procedia*, 75, 3180-3185.
- Choi M., Cho K. 2001. Effect of the Aspect Ration of Rectangular Channels on the Heat Transfer and Hydrodynamics of Paraffin Slurry Flow, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 44, 55-61.
- Cortina-Diaz, M., Schmidt, J., 2007. Experimental investigation of transient boiling heat transfer in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 95-102.
- Dai, B., Li, M., Dang, C., Ma, Y., Chen, Q., 2014a. Investigation on convective heat transfer characteristics of single phase liquid flow in multi-port micro-channel tubes, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, cilt 70, pp. 114-118.
- Dai, B., Li, M., Ma, Y., 2014b. Effect of surface roughness on liquid friction and transition characteristics in micro- and mini-channels, *Applied Thermal Engineering*, cilt 67, pp. 283-293.
- Deniz, E., 2007. Mini Kanallarda Akış ve Isı Geçişinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eiamsa-Ard., S., 2009. Concentric Double Pipe Exchanger Equipped With Swirl Elements, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 31, 857-868, 2004.
- Eiamsa-Ard., S., Thianpong, C, Eiamsa-ard,P.,2010.Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes, *Experimental Thermal and Fluid Science* ,34 , 53-62.
- Eiamsa-Ard., S., Thianpong, C., Eiamsa-ard, P., Promvonge, P., 2009. Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, , 365-371.
- Eiamsa-Ard., S., Thianpong.,C, Eiamsa-ard.,Promvonge,P.,2010.Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with dual twisted tape elements in tandem, *International Communications in Heat and Mass Transfer* ,37, 39-46.
- Erbay L.B., Inal L. , Öztürk M.M. 2006. Akışkan- Mikroeletromekanik Sistemler, *Mühendis ve Makina*, 556, 13-33.
- Fedorov, A. G., & Viskanta, R. 2000. Three-dimensional conjugate heat transfer in the microchannel heat sink for electronic packaging. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(3), 399-415.
- Garimella, S., & Singhal, V. 2004. Single-Phase Flow and Heat Transport and Pumping Considerations in Microchannel Heat Sinks. *Heat Transfer Engineering*, 25, 15-25.

- Garimella, S. 2003. Condensation flow mechanisms in microchannels: basis for pressure drop and heat transfer models. In ASME 2003 1st International Conference on Microchannels and Minichannels (pp. 181-192). American Society of Mechanical Engineers.
- Ghasemi, S. E., Ranjbar, A. A., & Hosseini, M. J. 2017. Experimental and numerical investigation of circular minichannel heat sinks with various hydraulic diameter for electronic cooling application. *Microelectronics Reliability*, 73, 97-105.
- Guo, Z. Y., & Li, Z. X. 2003. Size effect on microscale single-phase flow and heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(1), 149-159.
- 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.
- Heming, Y., Lin, C., Liqiu, W. and Shusheng, Z., 2006. Numerical Simulation of Heat and Flow of Liquid through Minichannels, *Proceedings of ASME ICNMM'06*, Limerick, Ireland
- Yin, J. M., Bullard, C. W., & Hrnjak, P. S. 2002. Single-phase pressure drop measurements in a microchannel heat exchanger. *Heat Transfer Engineering*, 23(4), 3-12.
- Ho, C. J., Chang, P. C., Yan, W. M., & Amani, P. 2018. Thermal and hydrodynamic characteristics of divergent rectangular minichannel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, 264-274.
- Hejcik, J., & Jicha, M. 2014. Single phase heat transfer in minichannels. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 67, p. 02034). EDP Sciences.
- Huang, C.Y., Wu, C.M., Chen, Y.N., Liou, T.M., 2014. The experimental investigation of axial heat conduction effect on the heat transfer analysis in a microchannel flow, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 57, pp. 169-173.
- Hwang Y.W., Kim M.S. 2006. The Pressure Drop in Microtubes and the Correlation Development, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 49, 1804-1812.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 2010. *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri 4. Basım'dan Çeviri*. Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye.
- Irvine, T.R., 1987. "noncircular Convective Heat Transfer" in W. Ible(ed)., *Modern Developments in Heat Transfer*, Academic, New York.
- Kakac, S., Yener, Y., 2013. *Convective heat transfer*, New York: Taylor & Francis Group.
- Kakaç, S., and Lui, H. 1997. *Heat Exchangers:Thermel design and rating*, CRC Press, Inc. Boca Raton.
- Kakaç, S., Yüncü, H., 1999, *Temel Isı Transferi*, Bilim Yayıncılık
- Kandlikar S.G., Schmitt D., Carrano A.L., Taylor J. B. 2005. Characterization of Surface Roughness Effects on Pressure Drop in Single-Phase Flow in Minichannels, *Physics of Fluids*, 17, 100606-1-11.
- Kandlikar, S.G. 2002. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, 389-407.
- Kandlikar S.G., Steinke M.E. 2003. Examples of Microchannel Mass Transfer Processes in Biological Systems, 1st Int. Conference on Microchannels and Minichannels, April 24-25, Rochester, New York, USA.
- Kandlikar, S. G., and Grande, W. J., 2003. Evolution of Microchannel Flow Passages–Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology, *Heat Transfer Eng.*, 24(1), 3-17

- Kandlikar, S., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King, M.R., 2006. "Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels", Elsevier.
- Keepaiboon, C., Thiangtham, P., Mahian, O., Dalkılıç, A.S. ve Wongwises, S., 2016. "Pressure drop characteristics of R134a during flow boiling in a single rectangular micro-channel", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 71:245–253.
- Khadem, M.H., Shams, M., Hossainpou, S., 2009. Numerical simulation of roughness effects on flow and heat transfer in microchannels at slip flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 69-77.
- Kılıç, İ. Burak., 2012. Bir Mikro Kanal Isı alıcında Gerçekleşen Isı Transferin Sayısal Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kim, B., 2016. "An experimental study on fully developed laminar flow and heat transfer in rectangular microchannels", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 62:224–232.
- Kim, Y., Kim, M., Ahn, C., Kim, H. U., Kang, S. W., & Kim, T. 2017. Numerical study on heat transfer and pressure drop in laminar-flow multistage mini-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 1197-1206.
- 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, 1518-33.
- Kosar, A., 2010. Effect of substrate thickness and material on heat transfer in microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 635-42.
- Küçükakça, Z., Parlak, N., 2015. Miniboruda ısı geçişinin deneysel incelenmesi, Makine Mühendisleri Odası, Termodinamik sempozyumu. 1875-1887.
- Lee P.S., Garimella S.V., Liu D. 2005. Investigation of Heat Transfer in Rectangular Microchannels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 48, 1688-1704.
- Lelea, D., Nishio, S., & Takano, K. 2004. The experimental research on microtube heat transfer and fluid flow of distilled water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(12-13), 2817-2830.
- Liu, J.T., Peng, X.F., Yan, W.M. 2006. Numerical study of fluid flow and heat transfer in microchannel cooling passages, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 50, 1855-1864.
- M. Altınöz, 2013. Experimental investigation of single phase liquid flow and heat transfer in multiport minichannels, Ankara.
- Ma, J., Li, L., Huang, Y., Liu, X., 2011. Experimental studies on single-phase flow and heat transfer in a narrow rectangular channel, *Nuclear Engineering and Design*, cilt 241, pp. 2865-2873.
- Mala, Gh. M., Li, D., 1999. Flow Characteristics of Water in Microtubes, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 20: 142–148
- Manay, E., 2014. Mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Erzurum.
- Manay, E., Sahin, B., Akyürek, E.F., Comaklı, O., 2012. Mikrokanallarda nanoakışkanların kullanımı. *Mühendis ve Makine*, 53 (627), 38-42.
- Mehendale, S. S., Jacobi, A. M., and Shah, R. K., 2000. Fluid Flow and Heat Transfer at Micro and Meso Scales with Applications to Heat Exchanger Design, *Appl. Mech. Rev.*, 53, 175 – 193

- Moharana, M.K., Agarwal, G., Kandekar, S., 2011. Axial conduction in single-phase simultaneously developing flow in a rectangular mini-channel array, *Int. J. Thermal Sciences*, cilt 50, pp. 1001-1012.
- Mokrani, O., Bourouga, B., Castelain, C., Peerhossaini, H., 2009. Fluid flow and convective heat transfer in flat microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 1337-52.
- Morini G.L, Lorenzini M. 2006. Mikro Kanallarda Tek-Fazlı Akışkan Akışı ve Isı Geçişi, *Mühendis ve Makina*, 557, 68-96
- Morini L.G., 2004. Single-Phase Convective Heat Transfer in Microchannels: a Review of Experimental Results, *Int. J. Thermal Sciences*, 43, 631-651.
- Morini, G. L. 2004. Laminar-to-turbulent flow transition in microchannels. *Microscale Thermophysical Engineering*, 8(1), 15-30.
- Morini, G. L., & Yang, Y. 2013. Guidelines for the determination of single-phase forced convection coefficients in microchannels. *Journal of Heat Transfer*, 135(10), 101004.
- Muhammad, M.R., Shevade, S.S., Ojada, E., 2010. Convective heat transfer in a composite trapezoidal microchannels during magnetic heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 1175-81.
- Niazmand, H., Renksizbulut, M., Saeedi, E., 2008. Developing slip-flow and heat transfer in trapezoidal microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 6126-6135.
- Yıldırım O., Karagöz Ş., Şahin B., Çomaklı Ö., 2017. Mini Borularda CFD Çözümlemesi. TÜRKİYE, 21.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Çorum. 1293-1299.
- Owhaib, W., & Palm, B. 2004. Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(2-3), 105-110.
- Owhaib, W., Martin, C.C., Palm, B., 2004. Evaporative heat transfer in vertical circular microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 24, 1241-53.
- Owhib W., Palm B. 2004. Experimental Investigation of Single-phase Convective Heat Transfer in Circular Microchannels, *Exp. Thermal and Fluid Science*, 28, 105-110.
- Parlak N. ,Engin T. ve Özbey A. 2007. Mikroborularda Su Akışının Deneysel Olarak İncelenmesi, ULIBTK'07, 16 Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi.
- Peng, X. F., Peterson, G. P., Wang, B. X., 1994. Frictional Flow Characteristics of Water Flowing Through Microchannels. *Experimental Heat Transfer*, 7: 249 – 264
- Qu, W., & Mudawar, I. 2002. Analysis of three-dimensional heat transfer in micro-channel heat sinks. *International Journal of heat and mass transfer*, 45(19), 3973-3985.
- Ranabir Dey , Tamal Das & Suman Chakraborty. 2012. Frictional and Heat Transfer Characteristics of Single-Phase Microchannel Liquid Flows, *Heat Transfer Engineering*, 33:4-5, 425-446,
- Roland, B., Michel, F., LePerson, S., 2006. Bias effect on heat transfer measurements in microchannel flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 3325-37.

- Salman, B., Mohammed, H., Kherbeet, A., 2012. Heat transfer enhancement of nanofluids flow in microtube with constant heat flux. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 1195-1204.
- Sara, O.N., Pekdemir, T., Yapıcı, S., Yılmaz, M., 2010. Enhancement of Heat Transfer from a Flat Surface in a Channel Flow by Attachment of Rectengular Blocks, *International Journal of Energy Research*, 25, 563-576.
- Shiferaw, D., Karayiannis, T.G., Kenning, D.B.R. 2009. Flow boiling in a 1.1 mm tube with R134a: Experimental results and comparison with model, *Int. J. Thermal Sciences*, 48, 331-341.
- Shokouhmand, H., Bigham, S., 2010. Slip-flow and heat transfer of gaseous flows in the entrance of a wavy microchannel. *International Communicationsin Heat and Mass Transfer*, 37, 695-702.
- Sieder, E.N., Tate, G.E., 1936. Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes, *Industrial Engineering Chemistry*, 28, 1429-1435.
- Srisomba, R., Asirvatham, L.G., Mahian, O., Dalkılıç, A.S., Awad, M.M. ve Wongwises, S., 2017. “Air-side performance of a micro-channel heat exchanger in wet surface conditions”, *Thermal Science*, 21:375–385.
- Steinke, M. E., Kandlikar, S. G., 2006. Single-Phase Liquid Friction Factors in Microchannels, *Int. J. Thermal Sciences*, 45: 1073–1083
- Şara O.N., Yapici S. 2007. Mikro Kanallarda Basınç Düşüşü ve Isi/Kütle Aktarimi: I-Basınç Düşüşü ve Sürtünme Faktörü Bagintilari, *Mühendis ve Makina • Cilt : 48 Sayi: 570*
- Şara O.N., Yapici S. Arzutuğ, M. Emin., 2007. Mikro Kanallarda Basınç Düşüşü ve Isi/Kütle Aktarimi: II-Basınç Düşüşü ve Sürtünme Faktörü Bagintilari, *Mühendis ve Makina • Cilt : 48 Sayi: 571*
- Tabelling, P., 2005. *Introduction to Microfluidics*, Oxford, New York, 4-6.
- Tang, G.H., Li, Z., He, Y.L., Tao, W.Q., 2007. Experimental study of compressibility, roughness and rarefaction influences on microchannel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 2282-95
- Tekin B., Güvenç Yazıcıoğlu A., Kakaç S., Kerpiççi H. 2011. 1.65 mm’lik bir bakır miniboruda iki fazlı R134a akışının deneysel olarak incelenmesi, 18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Zonguldak
- Tekin, B. 2011. Experimental Investigation of R134a Flow in a 1.65 mm Copper Minitube, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü.
- Thakkar, K., Kumar, K., Trivedi, H., 2014. Thermal & Hydraulic Characteristic of Single-Phase Flow in Mini-channel for Electronic Cooling – Review, *İnternational journal of Innovative Research İn Science, Engineering and technology*, Vol.3, Issue 2., 9726-9733
- Tuckerman, L., and Peace, S., 1981. Numerical optimization of silicon-based high performance parallel microchannel heat sink with liquid flow. *Tez*.
- Uygur, S. 2002. “Mikro ve Meso Ölçekli Kanalların Soğutucu Üretiminde Uygulanması”, *Tesisat Mühendisliği*, 68.
- Van Male, P., De Croon, M. H. J. M., Tiggelaar, R. M., van den Berg, A., & Schouten, J. C. 2004. Heat and mass transfer in a square microchannel with asymmetric heating. *International journal of heat and mass transfer*, 47(1), 87-99.

- Wu, J., Shi, M., Chen, Y., Li, X., 2010. Visualization study of steam condensation in wide rectangular silicon micro channels. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 922-930
- 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(14), 2547-2556.
- Yan, Y. Y., & Lin, T. F. 1998. Evaporation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a small pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(24), 4183-4194.
- Zewede, F., Argaw, H., Tran, T., & Xu, J. 2017. Convective Heat Transfer of Ethanol/Polyalphaolefin Nanoemulsion Inside Circular Minichannel Heat Exchanger. In *ASME 2017 Heat Transfer Summer Conference* (pp. V001T08A006-V001T08A006). American Society of Mechanical Engineers.
- Zhang, J., Diao, Y., Zhao, Y., & Zhang, Y. 2017. An experimental investigation of heat transfer enhancement in minichannel: Combination of nanofluid and micro fin structure techniques. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 81, 21-32.
- Zhigang, L., Ning, G., & Takei, M. 2007. An experimental investigation of single-phase heat transfer in 0.045 mm to 0.141 mm microtubes. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 11(3-4), 333-349.
- Zhou, J., Zhang, Y. ve Chen, J.K., 2007. Numerical Simulation of Compressible Gas Flow and Heat Transfer in a Microchannel Surrounded by Solid Media, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 28, 6, 1484-1491.
- Zhuo, L., Quan, T.W. ve Ling, H.Y., 2006. A Numerical Study of Laminar Convective Heat Transfer in Microchannel with Non-Circular Cross-Section, *Int. J. Therm. Sci.*, 45, 12, 1140-1148.
- Zhuo, L., Ya-Ling, H., Gui-Hua, T., Wen-Quan, T., 2007. Experimental and numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 3447-60.

## ÖZGEÇMİŞ

Orhan YILDIRIM, 1992 yılında Elazığ'ın Karakoçan ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Karakoçan'da tamamladı. 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2015 yılında Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Termodinamik Anabilim Dalında yüksek lisans programına başladı. 2017 yılında Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen çalışmaya devam etmektedir.