

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ISI DEĞİŞTİRGEÇLERİNDE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMAL VE  
HİDROLİK ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ufuk KAYABAŞI**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sadık KAKAÇ**

**ARALIK 2018**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr.Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161511062 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ufuk KAYABAŞI**'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“ISI DEĞİŞTİRGEÇLERİNDE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMAL VE HİDROLİK ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ”** başlıklı tezi **13.12.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Sadık KAKAÇ** .....  
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

**Eş Danışman :** **Prof.Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU**  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ (Başkan)** .....  
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

**Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL** .....  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

**Dr. Sezer ÖZERİNÇ** .....  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Ufuk KAYABAŞI



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ISI DEĞİŞTİRGEÇLERİNDE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMAL VE HİDROLİK ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Ufuk Kayabaşı

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sadık Kakaç

Tarih: Aralık 2018

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile birlikte enerji ihtiyacı giderek artmakta olup, enerjinin daha verimli bir şekilde kullanılması oldukça önemli hale gelmektedir. Isı değiştirgeçleri birçok alanda enerjinin aktarımında kullanılan temel cihazlardır ve sıcak ile soğuk akışkanlar arasında ısı transferini sağlarlar. Diğer ısı değiştirgeçlerinden daha kompakt bir tasarıma sahip olan plakalı ısı değiştirgeçlerinin daha verimli ve olduğundan daha kompakt hale getirmek için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışma alanlarından birisi de akışkan olarak ısı iletkenliği daha iyi olan nanoakışkanların plakalı ısı değiştirgeçleri içerisinde kullanılmasının etkilerini incelemektir. Bu doğrultuda, plakalı bir ısı değiştirgeci içerisinde  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanının termal ve hidrolik etkilerini incelemek adına TOBB ETÜ Isı Değiştirgeçleri Laboratuvarında bir deney düzeneği kurulmuştur. Deneyler önce su ile gerçekleştirilmiş, ardından sıcak devrede kütlece %1'lik ve %0.5 olmak üzere iki farklı konsantrasyonda  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı için deneyler tekrarlanmıştır. Deneylerde debiler 100 – 450 l/sa arasında değişmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda her durum için Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı korelasyonları oluşturulmuş, ısı transferi katsayısındaki elde edilen iyileştirme oranları belirlenmiştir. Ayrıca basınç düşümündeki gözlenen artış incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Isı transferi, Plakalı ısı değiştirgeci, Nanoakışkan, Deneysel, Nusselt sayısı korelasyonu, Sürtünme katsayısı korelasyonu





## **ABSTRACT**

Master of Science

Experimental Investigation of Thermal and Hydraulic Performance of a Plate Heat

Exchanger Using  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanofluid

Ufuk Kayabaşı

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Sadık Kakaç

Date: December 2018

Nowadays, with the development of technology, energy demand is increasing and using the energy more efficiently becomes important. Plate heat exchangers are widely used in many applications such as power plants, nuclear reactors, food, chemical industries and air conditioning systems. Because of wide application area, it is very important that plate heat exchangers must be very efficient and compact. In order to make them more efficient and compact, researchers pay attention to utilize nanofluids as a working fluid in plate heat exchangers, since their thermo physical properties are much better than the industrial fluids. Therefore, an experimental set-up is designed and constructed in TOBB ETU, Heat Exchangers Laboratory to test and investigate the effect of utilizing  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /water nanofluids in plate heat exchangers. Experiments are performed with tap water at first, then they are repeated for two different  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /water nanofluid concentrations (1% wt. and 0.5% wt.). For all experiments, flow rates are changing between 100-450 l/h. As a result of this study, correlation of Nusselt number and friction factor for all cases are developed and enhancement rates on heat transfer coefficient are obtained. Moreover, increase on pressure drop due to utilizing  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /water nanofluids is investigated.

**Keywords:** Plate heat exchangers, Nanofluids, Heat transfer, Experimental, Nusselt number correlation, Friction coefficient correlation



## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocalarım Sadık KAKAÇ ve Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU'na, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Bu çalışmada 113G109 no'lu projenin kurum hissesi kullanılmıştır. Finansal desteği sebebiyle, Türkiye Bilimler Akademisi ve bana burs veren TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi ve TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Çalışmam süresince bana her konuda yardımcı olan başta Berk ÇEVİRİM olmak üzere değerli dostlarım Erkan İNCEÖZ, Kaan KIRCI, Sezgin DEMİRTAŞ ve Mehmet BAYAR'a teşekkür ederim. Ayrıca deneyler esnasında yardımlarını esirgemeyen lisans öğrencileri Çağatay Can ÇİÇEK ve Ayşe UĞUR'a teşekkür ederim.

Deney düzeneğinin kurulmasını gerçekleştiren ve karşılaştığım her sorunda tereddüt etmeden sorunu çözmemde yardımcı olan Mustafa YALÇIN'a teşekkür ederim.

Son olarak destekleriyle her zaman yanımda olan ve bana benliğimi kazandıran aileme teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|   |           |
|---|-----------|
| ÖZET.....   | vii       |
| ABSTRACT .....  | ix        |
| TEŞEKKÜR .....  | xi        |
| İÇİNDEKİLER .....   | xiii      |
| ŞEKİL LİSTESİ.....  | xv        |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....  | xvii      |
| KISALTMALAR .....   | xix       |
| SEMBOL LİSTESİ .....  | xxi       |
| RESİM LİSTESİ .....   | xxiii     |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivasyon.....   | 1         |
| 1.2 Isı Değiştirgeçleri .....   | 2         |
| 1.2.1 Isı Değiştirgeçlerinin Sınıflandırma Kriterleri .....                           | 2         |
| 1.2.1.1 Geri Kazanım ve Yeniden Üretim.....   | 2         |
| 1.2.1.2 Isı Transferi İşlemi .....  | 3         |
| 1.2.1.3 Geometrik Yapı.....   | 3         |
| 1.2.1.4 Isı Transferi Mekanizması.....  | 4         |
| 1.2.1.5 Akış Düzeni.....  | 4         |
| 1.2.2 Contalı Plakalı Isı Değiştirgeçleri .....                                       | 4         |
| 1.3 Nanoakışkanlar .....  | 8         |
| 1.3.1 Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri.....                                 | 9         |
| 1.3.1.1 Özkütle .....   | 9         |
| 1.3.1.2 Özgül Isı .....   | 10        |
| 1.3.1.3 Viskozite .....   | 10        |
| 1.3.1.4 Isıl İletkenlik .....   | 11        |
| 1.4 Literatür Taraması .....  | 16        |
| <b>2. DENEY DÜZENEGİ TASARIMI VE KURULUMU .....</b>                                   | <b>29</b> |
| 2.1 DeneY Düzeneği Tasarımı .....   | 29        |
| 2.2 DeneY Düzeneğinde Kullanılan Cihazlar.....  | 32        |
| 2.2.1 Sıcaklık Ölçümünde Kullanılan J-Tipi Isıl Çift .....                            | 32        |
| 2.2.2 Debi Ölçümünde Kullanılan Debimetreler .....                                    | 33        |
| 2.2.3 Basınç Düşümü Ölçümünde Kullanılan Basınç Fark Ölçerler .....                   | 33        |
| 2.2.4 Contalı Plakalı Isı Değiştirgeci .....  | 35        |
| 2.2.5 Düzenekte Kullanılan Pompalar .....   | 36        |
| 2.3 KaviteYon Hesabı.....   | 38        |
| 2.4 DeneY Düzeneğinin Kurulumu.....   | 38        |
| <b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>  | <b>47</b> |
| 3.1 Nanoakışkanların Hazırlanması .....   | 48        |
| 3.2 Deneysel Süreç .....  | 51        |
| <b>4. DENEYSEL VERİLERİN ANALİZİ .....</b>  | <b>53</b> |
| 4.1 Plakalı Isı Değiştirgeci İçin Nusselt Sayısı Korelasyonlarının Oluşturulması..... | 53        |
| 4.2 Isı Transferi Katsayısı Hesabı .....  | 58        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.3 Plakalı Isı Değiştirgeci İçin Sürtünme Katsayısı Korelasyonlarının Oluşturulması ..... | 59         |
| 4.4 Belirsizlik Hesabı .....   | 60         |
| <b>5. DENEY VERİLERİNİN İSİL VE HİDROLİK ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>    | <b>61</b>  |
| 5.1 Isıl Sonuçlar.....   | 61         |
| 5.2 Hidrolik Sonuçlar .....  | 68         |
| 5.3 Belirsizlik Analizi.....   | 74         |
| <b>6. DEĞERLENDİRME.....</b>   | <b>75</b>  |
| 6.1 Gelecekte Yapılabilecek alışmalar.....  | 77         |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>  | <b>79</b>  |
| <b>EKLER.....</b>  | <b>85</b>  |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>   | <b>112</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Şekil 1.1. Geri kazanım ve yeniden üretim tipindeki ısı değiştirgeçlerinin diyagramları .....   | 3  |
| Şekil 1.2. Geometrik yapılarına göre ısı değiştirgeçleri (a) Borulu ısı değiştirgeci, (b) Plakalı ısı değiştirgeci, (c) Genişletilmiş yüzeyli ısı değiştirgeci[2].....                                  | 3  |
| Şekil 1.3. Isı transferine göre gruplandırılmış farklı tipteki ısı değiştirgeçleri. (a) Tek-tek fazlı ısı değiştirgeci, (b) Çift-çift fazlı ısı değiştirgeci, (c) Tek-çift fazlı ısı değiştirgeci ..... | 4  |
| Şekil 1.4. Akış düzenine göre ısı değiştirgeçlerinin sınıflandırılması. (a) Paralel akışlı ısı değiştirgeci, (b) Ters akışlı ısı değiştirgeci, (c) Çapraz akışlı ısı değiştirgeci[2] .....              | 5  |
| Şekil 1.5. Contalı plakalı ısı değiştirgecinin şematik gösterimi[2]. .....  | 5  |
| Şekil 1.6. Chevron tipi plakaların genel yapısı ve karakteristik parametreleri[2] .....   | 6  |
| Şekil 1.7. Plakalı ısı değiştirgeçleri içerisindeki akış tipleri. (a) U tipi akış, (b) Z tipi akış .....  | 8  |
| Şekil 1.8. Literatürdeki bazı viskozite modellerinin nanoakışkan hacimsel konsantrasyonu ile değişimi .....   | 11 |
| Şekil 1.9. Parçacıkların akışkan içerisindeki rastgele hareketi (Brown Hareketi).....   | 13 |
| Şekil 1.10. Nanoakışkan içerisindeki nanoparçacıklar ve nano mertebesindeki ara katmanlar[26] .....   | 15 |
| Şekil 1.11. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini belirlemek için kullanılan ısı iletkenlik modellerinin karşılaştırılması.....  | 16 |
| Şekil 1.12. Ünverdi ve İslamoğlu'nun çalışmalarında kullandıkları deney düzeneği[29].....   | 17 |
| Şekil 1.13. Bin Sun vd.'nin deneylerinde kullanılan düzeneğin şeması [30] .....   | 18 |
| Şekil 2.1. Deney düzeneği için yapılan ilk tasarım .....  | 30 |
| Şekil 2.2. Deney düzeneği için yapılan ikinci tasarım .....   | 31 |
| Şekil 2.3. Kurulması planlanan deney düzeneğinin şeması .....   | 31 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 2.4. Farklı tipteki ısı çiftlerinin mV-Sıcaklık eğrileri [60].....  | 32  |
| Şekil 2.5. Sistem ve seçilen bazı pompaların karakteristik eğrileri .....   | 37  |
| Şekil 2.6. Yapılan tasarımın üç boyutlu katı modeli .....   | 39  |
| Şekil 2.7. Plakalı ısı değiştirgecinin giriş ve çıkışındaki ısı çiftlerinin ve basınç fark ölçerlerin yerleşim sıralaması.....                                      | 41  |
| Şekil 5.1. Su ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Nusselt sayısı korelasyonu ....   | 62  |
| Şekil 5.2. Oluşturulan Nusselt sayısı korelasyonunun literatürde bulunan korelasyonlar ile karşılaştırılması.....   | 63  |
| Şekil 5.3. İki nanoakışkan konsantrasyonu için geliştirilmiş Nusselt sayısı korelasyonları .....  | 65  |
| Şekil 5.4 Su ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su nanoakışkanları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Nusselt sayısı korelasyonlarının karşılaştırılması ..... | 66  |
| Şekil 5.5. Deneyler sonucunda elde edilen ısı transferi katsayılarının karşılaştırılması .....  | 67  |
| Şekil 5.6. Isı transferi katsayısında Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su nanoakışkanını kullanımı ile elde edilen iyileştirme oranları .....                        | 67  |
| Şekil 5.7. Su ile yapılan deneyler sırasında sıcak ve soğuk devre için basınç düşümü değişimleri .....  | 69  |
| Şekil 5.8. Sürtünme katsayısı için elde edilen korelasyon .....   | 69  |
| Şekil 5.9. Oluşturulan sürtünme katsayısı korelasyonunun literatürde plakalı ısı değiştirgeçleri için belirtilen korelasyonlar ile karşılaştırılması .....          | 71  |
| Şekil 5.10. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su nanoakışkanını kullanımının basınç düşümüne olan etkisi .....  | 72  |
| Şekil 5.11. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su nanoakışkanlarının sürtünme katsayılarının su ile karşılaştırılması .....  | 73  |
| Şekil 5.12. Deneyler sonucunda elde edilen performans kriterleri .....  | 74  |
| Şekil Ek2.1 Kullanılan plakalı ısı değiştirgecinin teknik resmi .....   | 97  |
| Şekil Ek4.1. Kulurumu yapılan deney düzeneğinin şeması .....  | 102 |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|   |     |
|---|-----|
| Çizelge 1.1. Plaka üretiminde kullanılan malzemeler ve 100 °C'deki ısıl iletkenlikleri[9].....              | 5   |
| Çizelge 1.2. Contalı plakalı ısı değiştirgeçlerinde kullanılan contalar[9].....                             | 7   |
| Çizelge 2.1. Alınan ısı çiftlerin özellikleri.....  | 33  |
| Çizelge 2.2. Deneyleerde kullanılan debimetrelerin özellikleri.....   | 34  |
| Çizelge 2.3. Deneyleerde kullanılan basınç fark ölçerlerin özellikleri.....                                 | 35  |
| Çizelge 2.4. Deneyleerde kullanılan plakalı ısı değiştirgecinin plaka boyutları.....                        | 36  |
| Çizelge 2.5. Kullanılan sirkülasyon pompalarının özellikleri.....   | 38  |
| Çizelge 3.1. Deney parametreleri.....   | 47  |
| Çizelge 3.2. Alınan nanoakışkanın özellikleri .....   | 49  |
| Çizelge 4.1. Ölçümlerdeki belirsizlik oranları .....  | 60  |
| Çizelge 5.1. Plakalı ısı değiştirgeçleri için literatürde bulunan bazı Nusselt sayısı korelasyonları.....   | 62  |
| Çizelge 5.2. Reynolds sayısı 400 iken elde edilen iyileştirme oranları .....                                | 68  |
| Çizelge 5.3. Literatürde plakalı ısı değiştirgeçleri için kullanılan sürtünme katsayısı korelasyonları..... | 70  |
| Çizelge 5.4. Deneyleer sonucu elde edilen en büyük belirsizlik yüzdeleri .....                              | 74  |
| Çizelge Ek1.1. Su ile yapılan deneyleerde alınan veriler.....   | 81  |
| Çizelge Ek1.2. Kütlece %1'lik Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su nanoakışkanıdeney verileri .....           | 85  |
| Çizelge Ek1.3. Kütlece %0.5'lik Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su nanoakışkanıdeney verileri.....          | 88  |
| Çizelge Ek3.1. Deney düzeneğinde kullanılan bileşenler ve kayıp katsayıları .....                           | 95  |
| Çizelge Ek3.2. Her iki devre için hesaplamalarda kullanılan değerler.....                                   | 96  |
| Çizelge Ek3.3. Soğuk devre için kabul edilen üst limit değerleri.....                                       | 97  |
| Çizelge Ek3.4. Sıcak devre için kabul edilen üst limit değerleri.....                                       | 98  |
| Çizelge Ek4.1. Hesaplamalarda kullanılan sistem ve akışkan özellikleri.....                                 | 102 |
| Çizelge Ek5.1. Alınan malzemelerin fiyat listesi.....   | 107 |



## KISALTMALAR

|              |   |
|--------------|---|
| <b>PID</b>   | : Plakalı Isı Değiştirgeci                |
| <b>LMTD</b>  | : Logarithmic Mean Temperature Difference |
| <b>NPSH</b>  | : Net Positive Suction Head               |
| <b>MWCNT</b> | : Multi Wall Carbon Nano Tubes            |
| <b>TEM</b>   | : Transmission Electron Microscopy        |





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler  | Açıklama   |
|-----------|--|
| A         | Isı transferi alanı ( $m^2$ )                      |
| b         | Plaka kanal derinliği (m)                          |
| $C_p$     | Özgül ısı ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )                     |
| $D_e$     | Eşdeğer çap (m)                                    |
| $D_h$     | Hidrolik çap (m)                                   |
| $D_p$     | Geçit çapı (m)                                     |
| f         | Sürtünme katsayısı                                 |
| g         | Yerçekimi ivmesi ( $m.s^{-2}$ )                    |
| $G_c$     | Kanallardaki kütleli hız ( $kgm^{-2}s^{-1}$ )      |
| $G_p$     | Portlardaki kütleli hız ( $kgm^{-2}s^{-1}$ )       |
| h         | Isı transferi katsayısı ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )        |
| k         | Isıl iletkenlik ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )                |
| $K_L$     | Bileşenlerin kayıp katsayıları                     |
| $K_\beta$ | Boltzmann sabiti                                   |
| $L_h$     | Port merkezleri arası plaka genişliği (m)          |
| $L_p$     | Portlar arası plaka uzunluğu (m)                   |
| $L_v$     | Port merkezleri arası plaka uzunluğu (m)           |
| $L_w$     | Contalar arası plaka genişliği (m)                 |
| $\dot{m}$ | Kütleli debi ( $kg s^{-1}$ )                       |
| n         | Nanoparçacık şekil faktörü                         |
| $N_{cp}$  | Kanal sayısı                                       |
| $N_p$     | Geçiş sayısı                                       |
| Nu        | Nusselt sayısı                                     |
| $P_c$     | Kanal merkezleri arasındaki mesafe (m)             |
| Pr        | Prandtl sayısı                                     |
| Q         | Isı transferi oranı (W)                            |
| r         | Boru yarıçapı (m)                                  |
| Re        | Reynolds sayısı                                    |
| t         | Plaka kalınlığı                                    |
| T         | Sıcaklık   |
| U         | Toplam ısı transferi katsayısı ( $Wm^{-2}K^{-1}$ ) |
| V         | Hız (m/s)  |
| z         | Yükseklik (m)                                      |

|                 |                                    |
|-----------------|------------------------------------|
| $\beta$         | Chevron açısı ( $^{\circ}$ )       |
| $\Delta P$      | Basınç düşümü (Pa)                 |
| $\Delta T_{LM}$ | Logaritmik ortalama sıcaklık farkı |
| $\rho$          | Özkütle ( $kg.m^{-3}$ )            |
| $\phi$          | Nanoakışkan hacimsel konsantrasyon |
| $\Psi$          | Nanoparçacık küreselliği           |
| $\mu$           | Viskozite (Pa.s)                   |

## İndisler

## Açıklama

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| A         | Aslında olan         |
| $Al_2O_3$ | Alimünyum oksit      |
| b         | Bulk                 |
| Brown     | Brown hareketi       |
| c         | Soğuk akışkan, devre |
| ç         | Çıkış                |
| ch        | Kanal                |
| cold      | Soğuk akışkan, devre |
| eff       | Efektif              |
| f         | Akışkan              |
| g         | Giriş                |
| h         | Sıcak akışkan, devre |
| hot       | Sıcak akışkan, devre |
| in        | Giriş                |
| lp        | İz düşüm             |
| nf        | Nanoakışkan          |
| out       | Çıkış                |
| p         | Nanoparçacık         |
| pe        | Akışkan ara katman   |
| port      | Port                 |
| R         | Gereken              |
| static    | Statik               |
| tot       | Toplam               |
| vol       | Hacimce oran         |
| w         | Duvar                |
| wt        | Kütlece oran         |

## RESİM LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Resim 2.1. Kullanılacak olan EM-LDG15 model elektromanyetik debimetre.....   | 34 |
| Resim 2.2. Deney Düzeneginde kullanılan basınç fark ölçerler .....   | 35 |
| Resim 2.3. Deneyleerde kullanılan contalı plakalı ısı değiştirgeci .....   | 36 |
| Resim 2.4. Deney tesisatında kullanılan soğuk ve sıcak akışkan depoları .....  | 40 |
| Resim 2.5. Deney düzeneğinde kullanılan pompalar ve by-pass hattı.....   | 40 |
| Resim 2.6. Deney düzeneğinde kullanılan elektromanyetik debimetreler.....  | 41 |
| Resim 2.7. Plakalı ısı değiştirgecinin giriş ve çıkışındaki ısıl çiftlerin ve basınç fark ölçerlerin yerleşimi.....  | 42 |
| Resim 2.8. Plakalı ısı değiştirgecinin giriş ve çıkışındaki ısıl çiftlerin ve basınç fark ölçerlerin yerleşimi.....  | 42 |
| Resim 2.9. Deney düzeneğinde kullanılan plakalı ısı değiştirgeci.....  | 43 |
| Resim 2.10. Deneyleerde kullanılan veri toplayıcısı .....  | 43 |
| Resim 2.11. Deney düzeneğinde akışkan debilerini ayarlamak için kullanılan sürgülü vanalar .....   | 44 |
| Resim 2.12. Deney düzeneğinde ısıtıcı olarak kullanılan 2 kW gücündeki elektrikli ısıtıcı.....   | 44 |
| Resim 2.13. Kurulan deney düzeneği .....   | 45 |
| Resim 2.14. Deney düzeneğinin öncen ve yandan görünümü .....   | 45 |
| Resim 3.1. Sigma-Aldrich firmasından alınan Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su nanoakışkanları .....   | 48 |
| Resim 3.2. Konsantrasyon ayarlanırken kullanılan manyetik karıştırıcı .....  | 49 |
| Resim 3.3. Deneyleerde sıcak devrede kullanılan akışkanlar, a) şebeke suyu, b) kütlece %1'lik Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su karışımı, c) kütlece %0.5'lik Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su karışımı ..... | 51 |





## 1. GİRİŞ

“Isı transferi, sıcaklık farkından kaynaklanan bir enerji aktarımıdır.”[1] Sıcaklık farkının olduğu her ortamda ya da ortamlar arasında ısı transferi gerçekleşir. Isı değiştirgeçleri ise farklı sıcaklıktaki iki ya da daha fazla akışkan arasında ısı transferinin gerçekleşmesini sağlarlar [2]. Nükleer güç santralleri, fosil yakıtlı santraller, gaz türbinleri, ısıtma ve soğutma işlemleri, gıda ve kimya sektörlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan plakalı ısı değiştirgeçlerinin ortaya çıkışı 19. yüzyıla dayanmaktadır. 1850’li yıllarda Louis Pasteur’un şarapların bozulması hakkında yaptığı çalışmalar sonucu pastörizasyon işlemini bulması ile birlikte hızlı bir şekilde ısıtma ve soğutma işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi adına, 1878 yılında Albrecht Dracke ilk plakalı ısı değiştirgecinin patentini almıştır. Plakalı ısı değiştirgeçlerinin endüstriyel alanlarda kullanımı ise 1923 yılında APV International firması tarafından gerçekleştirilmiştir [3].

### 1.1 Motivasyon

Fosil yakıtların azalması ve gelişen teknoloji ile enerji ihtiyacının artması, Dünya genelinde enerjinin verimli olarak kullanılmasının gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Diğer tipteki ısı değiştirgeçlerine oranla daha kompakt ve verimli olan plakalı ısı değiştirgeçleri birçok alanda kullanılmaktadır. Bu nedenle ısı transferini arttırmak, ısı değiştirgecinin boyutlarını küçültmek ve daha verimli hale getirebilmek amacı ile birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar çoğunlukla plakaların geometrisine odaklanmış ve bu sayede ısı değiştirgeci içerisinde türbülanslı bir akış elde edilip, ısı transferinin artırılması hedeflenmiştir. Ancak son zamanlarda bu gelişim, ısı değiştirgeçleri içerisinde kullanılan akışkanlar nedeniyle limitlerine ulaşmış durumdadır. Bu nedenle kullanılan akışkanların termofiziksel özelliklerini geliştirmek amacı ile akışkanlar içerisine termofiziksel özellikleri çok daha iyi olan metal ya da metal olmayan katı parçacıkları ekleme fikri ortaya çıkmıştır.

İlk olarak 1995 yılında Choi [4] tarafından nanometre boyutlarında metal ya da metal oksitlerin akışkanların içerisine eklenerek, nanoakışkan isminde yeni bir ısı transferi

sıvısı oluşturulmuştur. O tarihten bu yana nanoakışkan alanında birçok çalışma yapılmış ve ısı değiştirgeçlerindeki ısı transferi arttırılmaya çalışılmıştır. Nanoakışkanların kullanımı ile birlikte aynı miktarda ısının transferi için gereken ısı değiştirgeçlerinin boyutları daha küçük hale gelecektir.

Bu doğrultuda çalışmalar yapabilmek ve nanoakışkan kullanımının plakalı ısı değiştirgeçlerinin termal ve hidrolik performansına etkisini incelemek adına deney düzeneği tasarlanıp, TOBB ETÜ Isı Değiştirgeçleri Laboratuvarında kurulumu gerçekleştirilmiştir.

## **1.2 Isı Değiştirgeçleri**

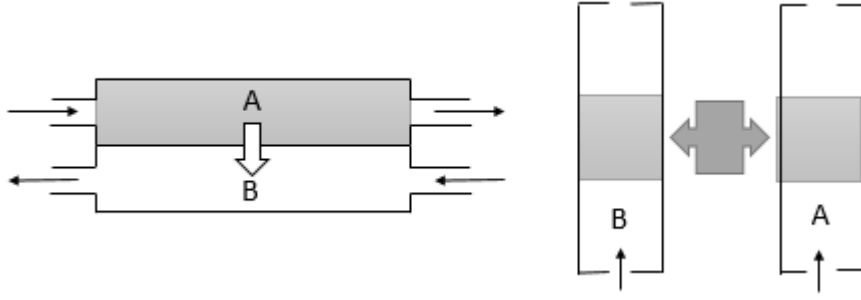
Isı değiştirgeci farklı sıcaklıklardaki iki ya da daha fazla akışkan arasında ısı transferini sağlayan araçlar olarak tanımlanmaktadır [2]. Elektrik üretimi, ısıtma, soğutma, kimya ve gıda sektörü gibi birçok farklı alanda kullanılmakta olan ısı değiştirgeçleri, beş farklı kritere göre sınıflandırılmaktadır. Bu kriterler Bölüm 1.2.1'de verilmiştir [1, 2]. TOBB ETÜ'de ısı değiştirgeçleri ile birçok deneysel ve nümerik çalışmalar da yapılmıştır ve bu bilgi birikimi bu çalışmada kullanılmıştır [5], [6], [7], [8].

### **1.2.1 Isı Değiştirgeçlerinin Sınıflandırma Kriterleri**

#### **1.2.1.1 Geri Kazanım ve Yeniden Üretim**

Geri kazanım amacıyla kullanılan ısı değiştirgeçleri (recupator), ısı transferini, birbirine göre ters akmakta olan iki akışkan arasında gerçekleştirir. Bu tip ısı değiştirgeçleri genellikle yanma gerçekleşen birçok olayda dışarı atılan egzoz gazların sıcaklığını değerlendirmek için kullanılır.

Yeniden üretim tipinde (regenerator) ise yüksek sıcaklıktaki akışkandan alınan ısı aralıklı olarak ortak bir ortama aktarılır ve daha sonra bu ortamdan düşük sıcaklıktaki akışkana aktarılır. Şekil 1.1'de bu tipteki ısı değiştirgeçlerinin diyagramları gösterilmiştir [2].



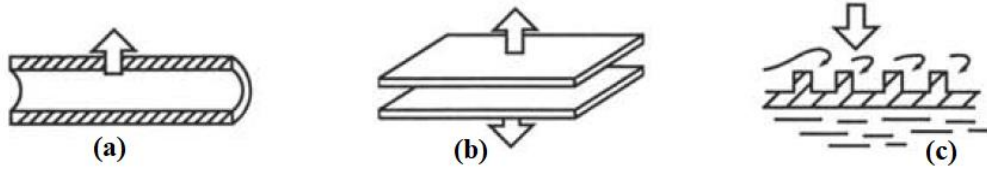
Şekil 1.1. Geri kazanım ve yeniden üretim tipindeki ısı değiştirgeçlerinin diyagramları

### 1.2.1.2 Isı Transferi İşlemi

Isı değiştirgeçleri ısı transferinin işlemine göre akışkanların birbirine doğrudan kontakt olan ve olmayan olarak ikiye ayrılır. Akışkanların arasında herhangi bir yüzey olmaması, akışkanların doğrudan kontakt olmaları anlamına gelmektedir ve bu tip ısı değiştirgeçleri farklı fazlarda ya da birbirine karışmayan akışkanların kullanıldığı durumlarda tercih edilir. Akışkanların karışmasının istenmediği durumlarda ise akışkanlar arasında bir yüzey bulunur ve ısı transferi doğrudan kontakt olmadan gerçekleşir [2].

### 1.2.1.3 Geometrik Yapı

Isı değiştirgeçleri üç farklı geometrik yapıda bulunmaktadır. Bunlar borulu, plakalı ve genişletilmiş yüzeyli ısı değiştirgeçleri olarak adlandırılmaktadır. Bu ısı değiştirgeçleri de kendi aralarında geometrik özelliklerine göre tiplere ayrılmaktadır. Şekil 1.2'de geometrik yapılarına göre ayrılan ısı değiştirgeçlerinin basit diyagramları gösterilmiştir[2].



Şekil 1.2. Geometrik yapılarına göre ısı değiştirgeçleri (a) Borulu ısı değiştirgeci, (b) Plakalı ısı değiştirgeci, (c) Genişletilmiş yüzeyli ısı değiştirgeci[2]

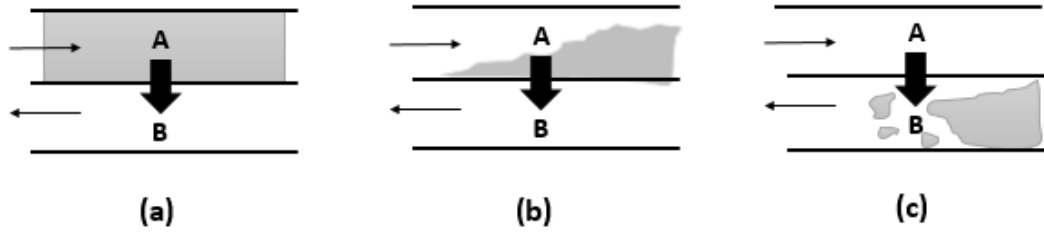
#### ❖ Borulu Isı Değiştirgeçleri

- Gövde-Boru Tipi Isı Değiştirgeci
- Çift Borulu Isı Değiştirgeci
- Spiral Borulu Isı Değiştirgeci

- ❖ Plakalı Isı Değiştirgeçleri
  - Contalı Plakalı Isı Değiştirgeci
  - Spiral Plakalı Isı Değiştirgeci
  - Lamelli Isı Değiştirgeçleri
- ❖ Genişletilmiş Yüzeyle Isı Değiştirgeci
  - Kanatçıklı Borulu Isı Değiştirgeci
  - Kanatçıklı Plakalı Isı Değiştirgeci

#### 1.2.1.4 Isı Transferi Mekanizması

Isı değiştirgeçleri, ısı transferi mekanizmalarına göre üç ayrı gruba ayrılır. Bunlar iki akışkanın da tek fazda, iki akışkanın da iki fazda ve bir akışkanın tek fazda iken, diğerinin iki fazlı olduğu durumlardır[2]. Şekil 1.3.'de bu durumlar ayrıntılı bir biçimde gösterilmiştir.



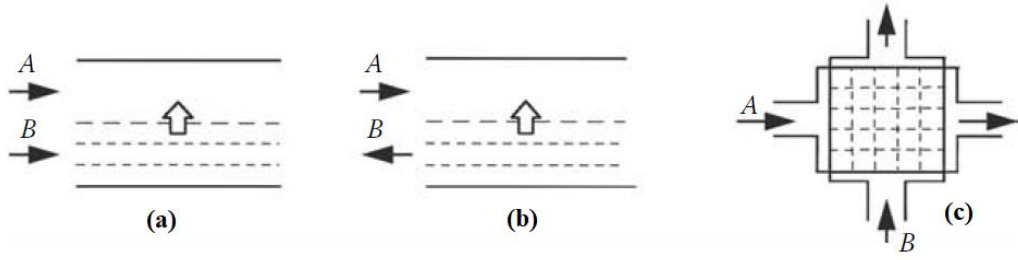
Şekil 1.3. Isı transferine göre gruplandırılmış farklı tipteki ısı değiştirgeçleri. (a) Tek-tek fazlı ısı değiştirgeci, (b) Çift-çift fazlı ısı değiştirgeci, (c) Tek-çift fazlı ısı değiştirgeci

#### 1.2.1.5 Akış Düzeni

Isı değiştirgeçlerini sınıflandırmak için kullanılan son kriter ise akış düzenidir. Akışkanların akış durumuna göre üç farklı ısı değiştirgeci sınıfı vardır. Bunlar paralel akışlı, ters akışlı ve çapraz akışlı ısı değiştirgeçleridir ve Şekil 1.4'de gösterilmektedir [2].

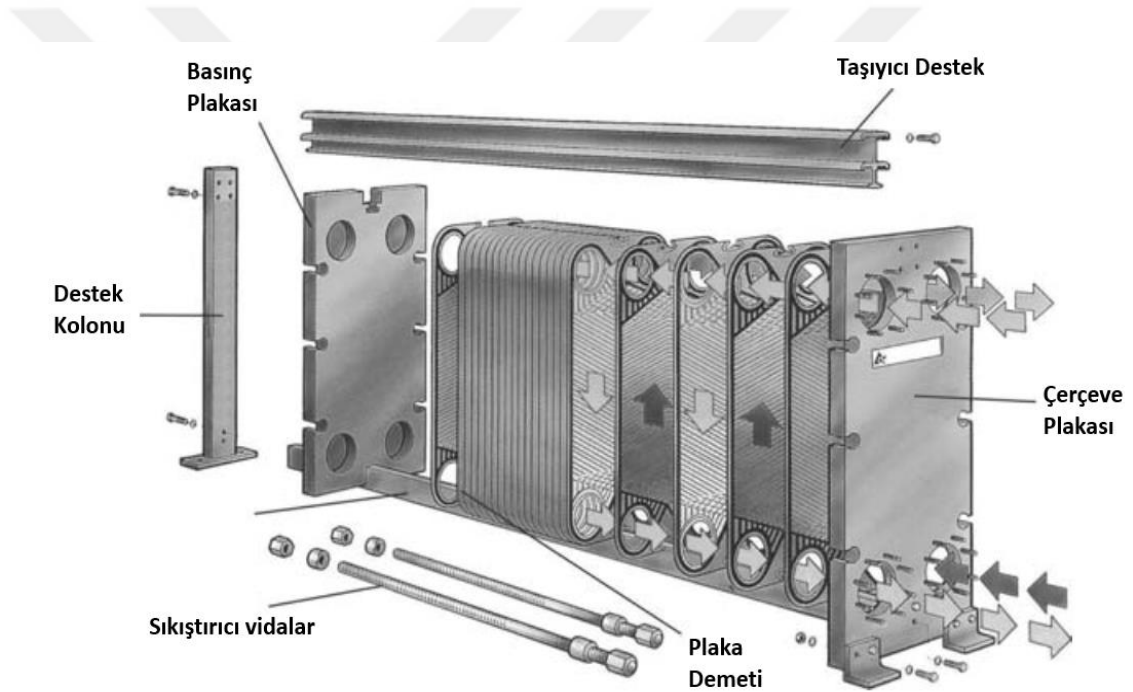
#### 1.2.2 Contalı Plakalı Isı Değiştirgeçleri

Contalı plakalı ısı değiştirgeçleri ön ve arkasında bulunan baskı plakalarının arasına yerleştirilen, akışkanları birbirinden ayırıp ısı transferinin gerçekteştiği ortamı yaratan plakalardan oluşmaktadır. Ayrıca plakaların arasına yerleştirilen contalar sayesinde sızdırmazlık sağlanmaktadır.



Şekil 1.4. Akış düzenine göre ısı değiştirgeçlerinin sınıflandırılması. (a) Paralel akışlı ısı değiştirgeci, (b) Ters akışlı ısı değiştirgeci, (c) Çapraz akışlı ısı değiştirgeci[2]

Ön baskı plakasının dört köşesinde akışkanın giriş ve çıkış yapabilmesi için delikler konumlandırılmıştır. Şekil 1.5.'de contalı bir plakalı ısı değiştirgecinin şematik gösterimi verilmiştir[2].



Şekil 1.5. Contalı plakalı ısı değiştirgecinin şematik gösterimi[2].

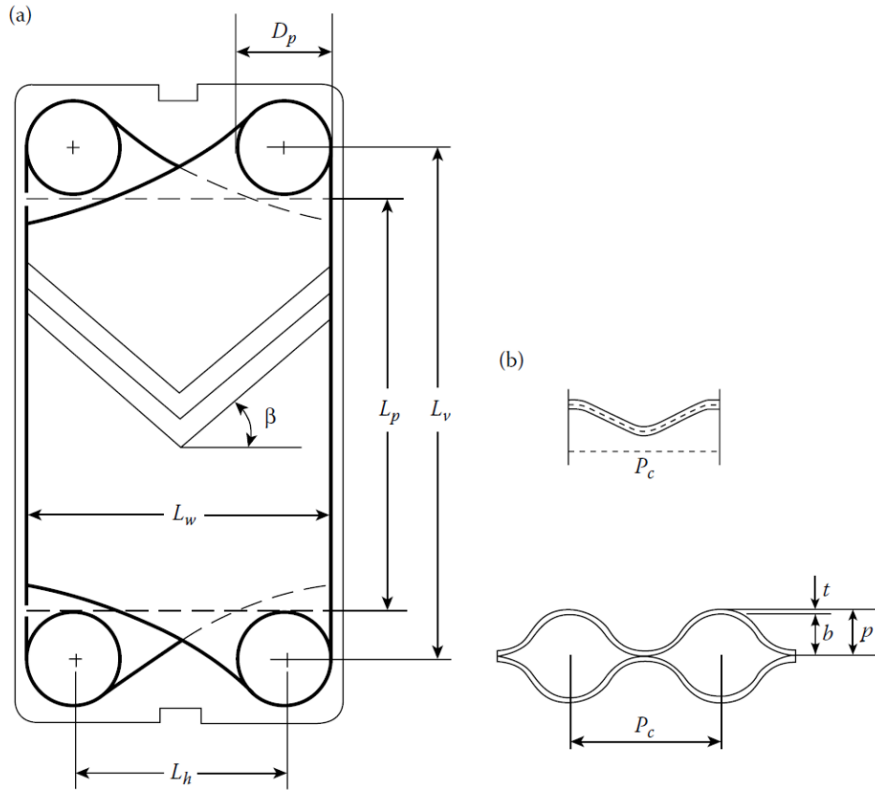
Kullanılan plakaların bir tarafından sıcak akışkan geçerken diğer taraftan soğuk akışkan geçmektedir. Böylece iki akışkan arasında ısı transferi gerçekleşir. Plakalar birçok farklı malzeme ile farklı boyutlarda ve farklı desenlerde üretilebilmektedir. Plaka yapımında kullanılan malzemeler ve malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları Çizelge 1.1'de verilmiştir [2, 5].

Çizelge 1.1.1. Plaka üretiminde kullanılan malzemeler ve 100 °C'deki ısı iletkenlikleri[9]

| Malzeme | Isıl iletkenlik | Malzeme | Isıl iletkenlik |
|---------|-----------------|---------|-----------------|
|---------|-----------------|---------|-----------------|

|                   | (W/m.K) |                 | (W/m.K) |
|-------------------|---------|-----------------|---------|
| Bakır             | 389     | Monel 400™      | 26      |
| Alüminyum         | 208     | Titanyum        | 20      |
| Nikel 200         | 66      | Paslanmaz çelik | 17      |
| 90/10 Cupro-Nikel | 52      | Inconel 600™    | 16      |
| 70/30 Cupro-Nikel | 35      | Incoloy 825™    | 12      |

En yaygın olarak kullanılan plaka tiplerinden birisi olan chevron tipi plakalarda, kanallarda akışın girdap hareketi yapması sağlanarak ısı transferine katkı sağlanmaktadır. Şekil 1.6.'da chevron tipi plaka gösterilmiştir. Burada  $\beta$  açısı, chevron açısı olarak adlandırılmakta olup, genel olarak  $25^\circ$ - $65^\circ$  arasında değişmektedir. Chevron tipi plakaların kullanıldığı ısı değiştirgeçlerinde plakalar birbirine çok fazla noktada temas etmesinden dolayı plaka kalınlıkları çok ince olarak üretilebilmektedir.



Şekil 1.6. Chevron tipi plakaların genel yapısı ve karakteristik parametreleri[2]

Burada,  $\beta$  chevron açısını,  $D_p$  port çapını,  $L_h$  portlar arasındaki genişliği,  $L_v$  portlar arasındaki uzunluğu,  $t$  plaka kalınlığını ve  $b$  plakalar üzerindeki desenin derinliğini ifade etmektedir.

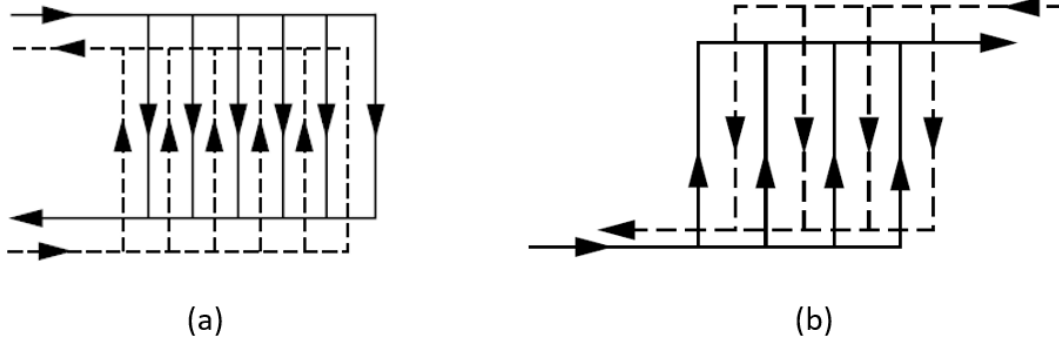
Kullanılan contalar ve plakalardan dolayı yüksek sıcaklık ve basınçta çalışmaları uygun olmayan contalı plakalı ısı değiştirgeçlerinin maksimum çalışma sıcaklıkları 150-260 °C arasında değişirken maksimum çalışma basıncı ise 25-30 bar arasındadır. Kullanılan akışkana ve alana bağlı olarak conta malzemesi farklılık gösterebilir. Çizelge 1.2’de genel olarak kullanılan conta malzemeleri verilmiştir.

Çizelge 1.2. Contalı plakalı ısı değiştirgeçlerinde kullanılan contalar[9]

| Conta Malzemesi                         | Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C) |
|---|---------------------------------|
| Nitril                                  | 135                             |
| Stiren Butadiyen (SBR)                  | 85                              |
| Kauçuk                                  | 70                              |
| Sentetik kauçuk                         | 70                              |
| Nitrile Butadine Rubber (NBR)           | 160                             |
| Fluoroelastomer (FKM)                   | 180                             |
| Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) | 155                             |

Plakalı ısı değiştirgeçleri içerisinde U ve Z tipi olarak adlandırılan iki farklı akış tipi, akışkanın ısı değiştirgeçine giriş ve çıkış portlarının konumu ile elde edilebilmektedir. U düzenine sahip bir plakalı ısı değiştirgeçinin tüm giriş ve çıkış portları ön baskı plakasında bulunur. Bu durum plakaların temizlenmesinde, plaka ekleme ve çıkarma işleminde kolaylık sağlar.

Z tipi düzende ise her iki baskı plakasında giriş ve çıkış portu bulunmaktadır. Bu nedenle, plakaların eklenme ve çıkarılma işleminin daha zor olmasına karşın, akışın kanallara dağılması sebebi ile daha fazla sayıda plaka ile çalışılabilmektedir. Şekil 1.7.’de U ve Z tipi akış düzenlerinin Şeması verilmiştir. Şekil 1.7.’de de görülebileceği üzere U tipi akış düzeninde akışkan giriş ve çıkış portları ısı değiştirgeçinin tek bir tarafında bulunurken, Z tipi akış düzeninde giriş ve çıkış portları her iki tarafta da mevcuttur.



Şekil 1.7. Plakalı ısı değıştirgeçleri içerisindeki akış tipleri. (a) U tipi akış, (b) Z tipi akış

Birçok alanda kullanılan plakalı ısı değıştirgeçleri diğeri tip ısı değıştirgeçlerine göre oldukça fazla avantaja sahiptirler. Bu avantajları sıralamak gerekirse;

- ❖ Plakaların sahip olduğu desenler sayesinde akış boyunca girdap hareketleri sağlayıp ısı transferinde artış sağlamaktadır.
- ❖ Hacim olarak daha kompakt bir tasarıma sahiptirler.
- ❖ Farklı tip ve boyutta plakalar ile dizayn esnekliğine sahiptirler.
- ❖ Plaka ekleme ve çıkarma işlemiyle kolayca istenilen ısı transferi alanına ulaşabilirler.
- ❖ Yüksek verimlilikte çalışırlar.
- ❖ Sadece plakaların kenarlarının atmosfere açık olduğundan dolayı dışarıya ısı kaybı çok azdır.
- ❖ Contalarda bir sıkıntı olsa dahi akışkanlar birbirine karışmaz.
- ❖ Temizliği ve bakımı kolaydır.

### 1.3 Nanoakışkanlar

Plakalı ısı değıştirgeçlerinin verimini arttırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda plaka üzerindeki desenler ile oynanarak plakalar arasındaki akışın türbülanslı hale getirilip, ısı transferini arttırmak amaçlanmıştır. Ancak ticari olarak ısı değıştirgeçleri içerisinde kullanılan su, etilen-glikol, yağ gibi akışkanların termofiziksel özellikleri nedeniyle bu çalışmalar sınırlarına ulaşmıştır. Bu sıvıların termofiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla, ısı iletkenlikleri akışkanlara oranla çok daha yüksek olan metal ya da metal olmayan küçük boyutlardaki katı parçacıkları akışkanlar içerisine eklemek ilk kez Maxwell [10] tarafından ortaya atılmıştır. İlk çalışmalarda milimetre ve makrometre boyutundaki parçacıklar ile



denemeler yapılmış ancak yüzeylerin aşınması, kanalların tıkanması, basınç düşümünde meydana gelen yüksek artışlar gibi sorunlar yaşanmıştır.

Nanometre boyunda parçacıkların üretilmesi ile birlikte, Choi ve Eastman [4], nanometre boyutundaki metal veya metal oksitlerin akışkanlara eklenmesi ile oluşturulan nanoakışkan adı verilen akışkanlar ile çalışmalar yapmışlardır. Nanoakışkanların üretimi iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir. Bunlar tek adım method ve iki adım methodudur.

İki adım methodunda nanoakışkan, önceden üretilmiş olan nanoparçacıkları akışkan içerisinde çözerek elde edilmektedir. Bu yöntem büyük miktarda akışkan üretiminde oldukça avantajlıdır ancak nanoparçacıkların akışkan içerisinde topaklanması nedeniyle iyi çözülmemesi gibi bir dezavantajı da vardır.

Tek adım methodunda ise nanoparçacıkların üretimi ve nanoakışkanın hazırlanması tek bir adımda gerçekleştirilir. Gaz halinde bulunan nanoparçacıkların, akışkan içerisinde katı hale getirilmesi sonucu nanoakışkanlar hazırlanır. Bu yöntemle hazırlanan nanoakışkanın stabilitesi çok daha yüksek olmasına karşın büyük kütlelerde nanoakışkan üretimi için uygun değildir [11].

### 1.3.1 Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Farklı tip ve konsantrasyondaki nanoakışkanların özkütle, özgül ısı, viskozite ve ısı iletkenlik gibi termofiziksel özellikleri literatürde yapılan çalışmalar ile belirlenmiş olan klasik modeller yardımı ile hesaplanabilir.

#### 1.3.1.1 Özkütle

Literatürde mikrometre mertebesindeki katıların sıvılar içine eklenmesi ile elde edilen karışımların özkütle hesabı için kullanılan denklem, Pak ve Cho [12] tarafından nanometre mertebesindeki katı parçacıkların kullanıldığı durumlar için de kullanılmıştır. Bu eşitlik Denklem 1.1'de verilmiştir.

$$\rho_{nf} = \rho_p \phi + \rho_f (1 - \phi) \quad (1.1)$$

Pak ve Cho bu denklemi doğrulamak amacı ile hacimce % 4.5'e kadar olan ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarıyla hazırlanmış nanoakışkanlar ile deneyler yapmışlardır. Ancak deneylerini sadece 25 °C sıcaklıkta yaptıklarından dolayı kullanılan modelin sıcaklık ile değişimi hakkında bir bilgi sunulamamıştır.

Daha sonra Vajjha ve Das [13] farklı sıcaklık ve konsantrasyonlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su-etilenglikol nanoakışkanları ile deneyler yapmışlar ve Denklem 1.1'in verdiği sonuçlar ile maksimum % 1.2 hata ile eşleştiğini gözlemlemişlerdir. Bu nedenle verilen bu model nanoakışkanların özkütlesini hesaplamak için kullanılmaktadır.

### 1.3.1.2 Özgül Isı

Özgül ısı bir maddenin birim kütesinin sıcaklığını 1 °C arttırabilmek için gereken ısı miktarıdır [1]. Nanoakışkanların özgül ısı değerlerini belirlemek için literatürde Pak ve Cho [12] ve Xuan-Roetzel [14] tarafından açıklanan modeller kullanılmaktadır. Bu modeller aşağıda verilmiştir.

$$C_{p_{nf}} = \phi C_{p_p} + (1 - \phi) C_{p_f} \quad (1.2)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_p + (1 - \phi) (\rho C_p)_f \quad (1.3)$$

### 1.3.1.3 Viskozite

Viskozite parametresi uygulamalardaki basınç düşümüne doğrudan etki ettiğinden dolayı oldukça önemlidir. Bu nedenle nanoakışkanların viskozitesini belirlemek amacıyla literatürde bulunan modeller kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar viskozitenin parçacık konsantrasyonu ile artmakta olduğunu göstermektedir. Ayrıca parçacıkların boyutlarına, sıcaklığına, topaklanmasına ve şekline bağlıdır.

Einstein [15]'in küresel parçacıklar içeren nanoakışkanların dinamik viskozitesini belirlemek için geliştirdiği model Denklem 1.4'de verilmiştir. Bu modelde nanoparçacıkların etkileşimi göz ardı edilmiştir.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi) \mu_f \quad (1.4)$$

Brinkman [16] bu modeli geliştirerek Denklem 1.5'de verilen modeli nanoakışkanların viskozitesini belirlemek için kullanmıştır.

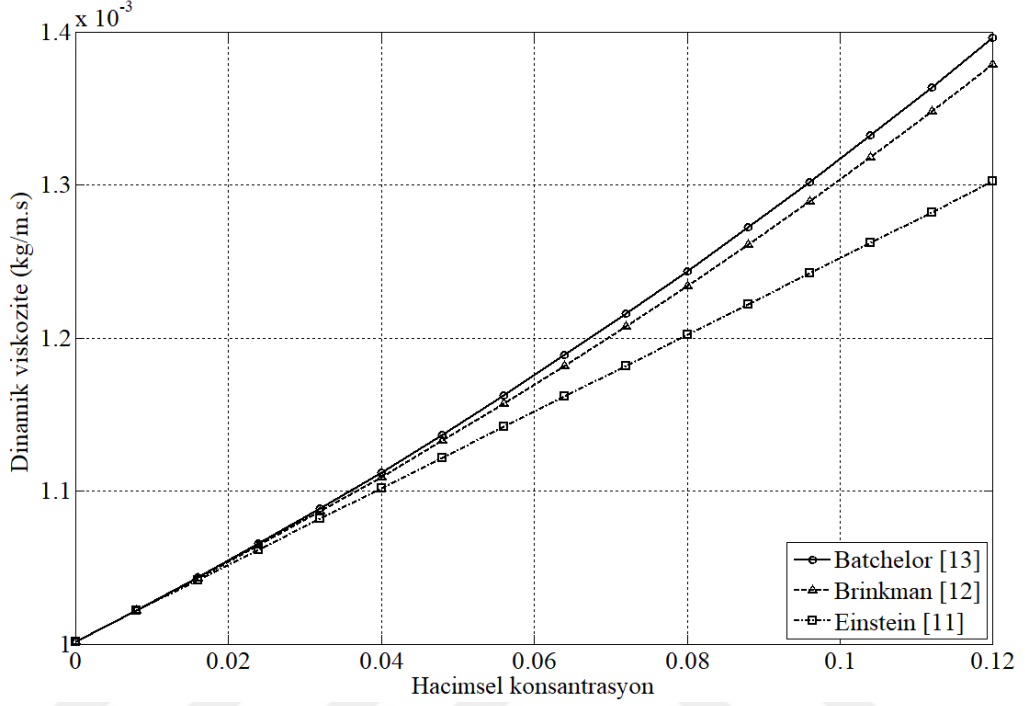
$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \mu_f \quad (1.5)$$

Batchelor [17]'in geliştirmiş olduğu modelde ise parçacıkların Brown hareketleri de modele dahil edilip, Denklem 1.6 elde edilmiştir.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \mu_f \quad (1.6)$$

Maiga [18] ise hacimsel konsantrasyonu %0-6 arasında olan  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanları için oluşturduğu model aşağıda verilmiştir.

$$\mu_{nf} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2)\mu_f \quad (1.7)$$



Şekil 1.8. Literatürdeki bazı viskozite modellerinin nanoakışkan hacimsel konsantrasyonu ile değişimi

Literatürde nanoakışkanların viskozitesini belirlemek amacıyla geliştirilen modellerin farklı hacimsel konsantrasyonlardaki karşılaştırılması Şekil 1.8'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere düşük konsantrasyonlarda bütün modeller benzer sonuçlar vermektedir. Nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça, akışkanın viskozitesi de artarken, Batchelor'un önerdiği modelde artış miktarı çok daha fazladır. Bunun nedeni hesaplamalara dahil edilen, nanoparçacıkların akışkan içerisinde yaptıkları Brown hareketidir.

#### 1.3.1.4 Isıl İletkenlik

Sıvılar içerisinde ısı iletkenliği yüksek olan nanoparçacıkların karıştırılması ile akışkanın ısı iletkenliği oldukça artırılabilir. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini kullanan nanoparçacıkların türü, şekli, boyutu, akışkan içinde toplanması, kullanılan baz akışkan ve nanoakışkan konsantrasyonu gibi birçok

parametre etkilemektedir. Oluşturulan nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerini belirlemek amacı ile birçok çalışma yapılmış ve modeller geliştirilmiştir.

Maxwell [10] küresel nanoparçacık içeren nanoakışkanlar için bir model geliştirmiştir. Ancak bu modelde parçacıkların boyutu, şekli gibi parametrelerin etkisi göz ardı edilmiştir. Maxwell'in ısı iletkenlik modeli Denklem 1.8'de verilmiştir

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} k_f \quad (1.8)$$

Bu model düşük konsantrasyonlarda ve homojen olarak karışmış, parçacıkların boyutlarının eş olduğu ve birbiri ile etkileşim içinde olmadığı akışkanlar için kullanılabilir.

Bruggman [19] ise Maxwell'in modelinden yola çıkararak daha yüksek konsantrasyonlardaki nanoakışkanlar için yeni bir model geliştirmiştir. Bruggman'ın modeli ağağıda Denklem 1.9'de verilmiştir.

$$1 - \phi = \frac{k_p - k_{nf}}{k_p - k_f} \left( \frac{k_f}{k_{nf}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.9)$$

Hamilton ve Crosser [20] Maxwell'in modeline parçacıkların şeklinin etkisini de ekleyerek yeni bir model geliştirmişlerdir.

$$k_{nf} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} k_f \quad (1.10)$$

Burada n şekil faktörü olup aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

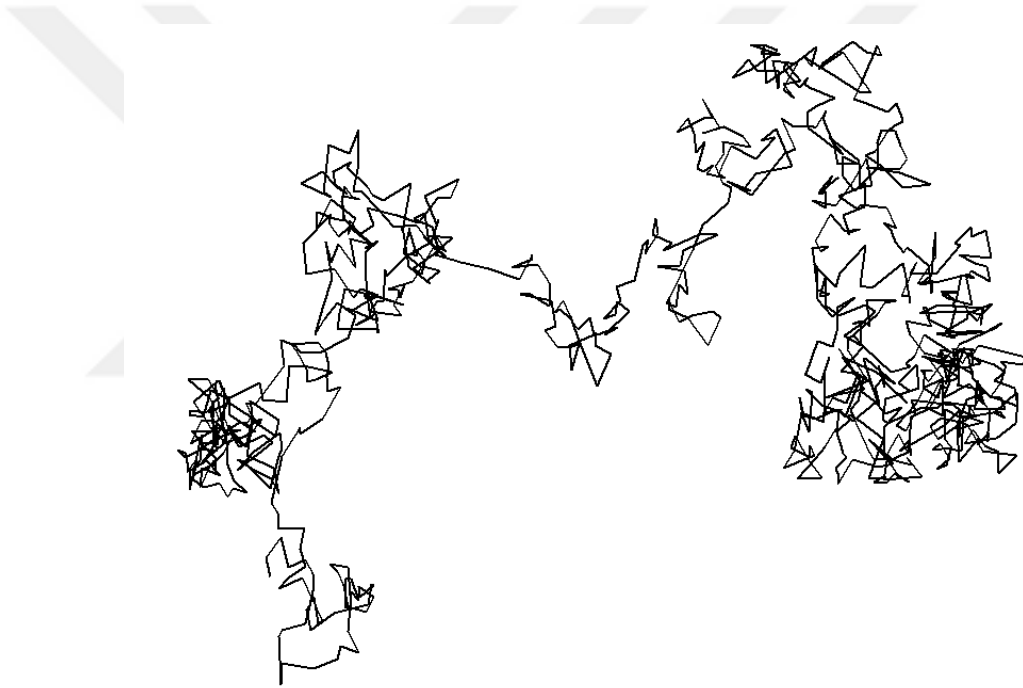
$$n = \frac{3}{\psi} \quad (1.11)$$

Denklem 1.11'de  $\Psi$  parçacıkların küreselliğini temsil etmektedir ve parçacıklarla aynı hacime sahip olan kürenin yüzey alanının, parçacıkların yüzey alanına oranı olarak tanımlanmıştır. n'in 3 olduğu durumda parçacıklar küresel olmakta ve model Maxwell'in modeline eş olmaktadır ve konsantrasyonun %30'dan düşük olduğu durumlarda deneysel verilerle uyum içerisindedir. Sıcaklık, parçacıkların boyutları ve birbiri ile etkileşimi bu modellerde dahil edilmediğinden, ısı iletkenlik değerleri deneysel verilerden düşük olmaktadır [21].

Nanoakışkanlar içerisindeki nanoparçacıkların hareketleri ve birbiri ile etkileşimini de kapsayan modeller daha doğru sonuçlar vermektedir. Nanoparçacıkların akışkan içerisindeki rastgele hareketleri Brown hareketi olarak adlandırılmaktadır. Bu hareketler enerjinin aktarılmasına yardımcı olmakta ve akışkanın ısı iletkenlik değerine katkıda bulunmaktadır. Literatürde bu konuda çalışma yapmış ve model geliştirmiş birçok değerli bilim insanı vardır.

Bhattacharya vd. [22] nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerini belirlemek amacıyla Brown Dinamik Simülasyonu (Brownian Dynamic Simulation) kullanmış ve efektif ısı iletkenlik katsayısı için aşağıdaki modeli oluşturmuşlardır.

$$k_{nf} = \phi k_p + (1 - \phi)k_f \quad (1.12)$$



Şekil 1.9. Parçacıkların akışkan içerisindeki rastgele hareketi (Brown Hareketi)

Koo ve Kleinstreuer [23] nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayısının iki parçadan oluştuğunu düşünmüşler ve kendi modellerini geliştirmişlerdir.

$$k_{nf} = k_{statik} + k_{Brown} \quad (1.13)$$

Burada  $k_{statik}$  literatürdeki herhangi bir ısı iletkenlik modeli iken  $k_{Brown}$ , parçacıkların akışkan içerisindeki hareketlerinin etkilerini temsil etmekte olup ve aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.

$$k_{Brown} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_f C_{p_f} \sqrt{\frac{K_\beta T}{\rho_p d_p}} \cdot \eta \quad (1.14)$$

Burada  $K_\beta$ , Boltzmann sabiti olup değeri  $1,3807 \times 10^{-23}$  J/K'dir.  $\beta$  ve  $\eta$  ise Das vd.[24]'in birçok nanoakışkan için yaptıkları deneylerin verileri kullanılarak belirlenmiştir. Çoğu nanoakışkan için  $\eta$  değeri 1 olarak kullanılmaktadır.

Li ve Peterson [25] hacimsel oranı %2-10 arasında olan  $Al_2O_3/su$  ve  $CuO/su$  nanoakışkanları ile çalışmalar yapmışlar ve sıcaklığın ısı iletkenliğe olan etkisini de hesaba katma amacıyla farklı sıcaklıklarda çalışmışlardır.  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanı için aşağıdaki modeli geliştirmişlerdir.

$$k_{nf} = 0.7644815\phi + 0.018689T + 0.537853 \quad (1.15)$$

Nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen en önemli parametrelerden birisi de parçacıkların etrafında oluşan sıvı katmandır. Bu nano mertebesindeki katmanın efektif ısı iletkenliği, sıvınınkinden daha yüksek olup, nanoparçacıklarından daha düşüktür.

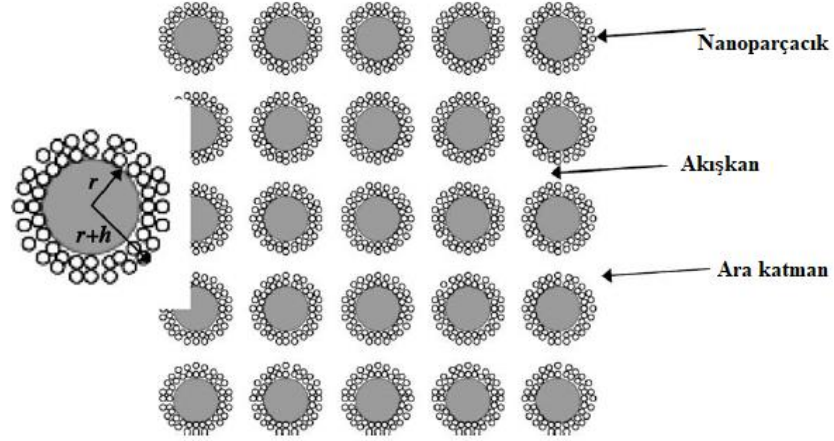
Yu ve Choi [26] Maxwell'in ısı iletkenlik modelinden yola çıkarak bu ara katmanın da hesaba dahil edilgi bir model geliştirmişlerdir. Bunu da ara katman için eşdeğer bir ısı iletkenlik modeli tanımlayarak yapmışlardır. Bu model Denklem 1.16'da verilmiştir.

$$k_{pe} = \frac{[2(1-\gamma) + (1-\beta)^3(1+2\gamma)\gamma]}{(\gamma-1) + (1+\beta)^3(1+2\gamma)} k_p \quad (1.16)$$

Burada,  $\gamma$ , ara katmanın ısı iletkenliğinin, nanoparçacıkların ısı iletkenliğine oranı iken,  $\beta$  ise katmanın kalınlığının, nanoparçacıkların yarıçapına oranıdır. Sonuç olarak nanoakışkanlar için geliştirilen yeni model Denklem 1.17'de verilmiştir.

$$k_{nf} = \frac{k_{pe} + 2k_f + 2(k_{pe} - k_f)(1-\beta)^3\phi}{k_{pe} + 2k_f - (k_{pe} - k_f)(1-\beta)^3\phi} k_f \quad (1.17)$$

Bu modelin, ara katmanı 10 nanometreden daha az olduğu durumlarda çok daha doğru sonuçlar verdiği belirtilmiş ve ısı iletkenliğinin parçacıkların boyutlarının küçülmesi ile arttığı gözlenmiştir.



Şekil 1.10. Nanoakışkan içerisindeki nanoparçacıklar ve nano mertebesindeki ara katmanlar[26]

Maiga vd. [18] ise Hamilton-Crosser'in modelini kullanarak  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı için yeni bir denklem geliştirmişlerdir ve kendi nümerik çalışmalarında kullanmışlardır.

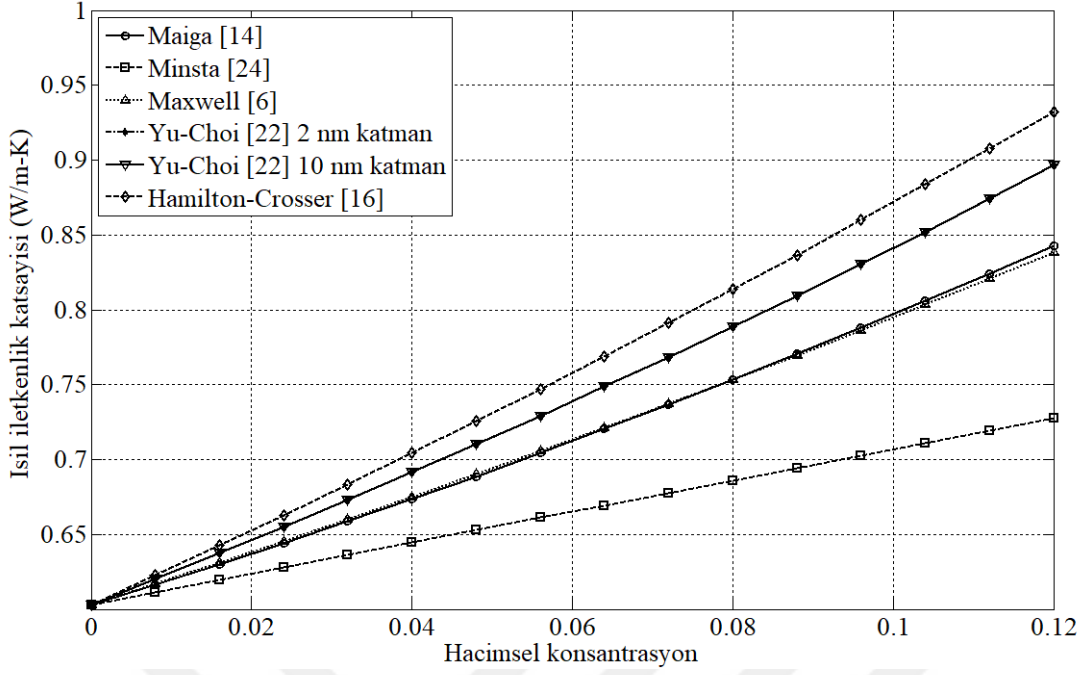
$$k_{nf} = (1 + 2.72\phi + 4.97\phi^2)k_f \quad (1.18)$$

Buongiorno [27] ise Pak ve Cho [12]'nin deneysel sonuçlarını kullanarak  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  nanoparçacıklarıyla hazırlanmış ve hacimsel oranı %4'ten az olan nanoakışkanlar için yeni bir regresyon denklemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu model deneysel veriler ile maksimum % 1 farkla uyduğu gözlenmiştir. Aşağıda  $Al_2O_3$ /su için oluşturulan model verilmiştir.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 7.47\phi \quad (1.19)$$

Minsta vd.[28]  $Al_2O_3$ /su ve  $CuO$ /su nanoakışkanlarının ısı iletkenliklerini belirlemek amacıyla farklı sıcaklık ve konsantrasyonlardaki nanoakışkanlar ile deneyler gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık değerleri 25-50 °C arasında değişirken, maksimum nanoakışkan hacimsel oranı %18 olmuştur. Kullanılan nanoparçacıkların boyutları  $Al_2O_3$  için 36-47 nm ve  $CuO$  için ortalama 29 nm olarak belirtilmiştir. Aşağıda  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı için geliştirilen model verilmiştir.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 1.72\phi \quad (1.20)$$



Şekil 1.11. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini belirlemek için kullanılan ısı iletkenlik modellerinin karşılaştırılması

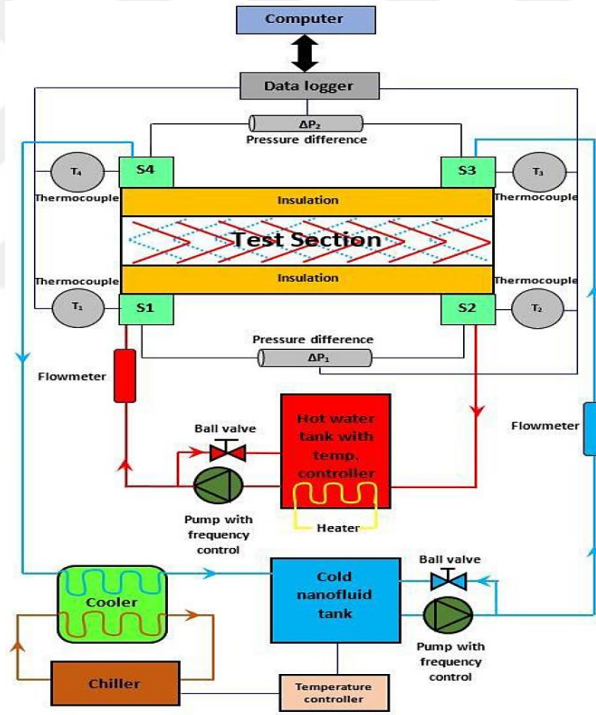
Literatürde bulunan ve çalışmalarda kullanılan modellerin,  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanları için hacimsel konsantrasyon ile değişimi Şekil 1.11'de verilmiştir. Hesaplamalarda Hamilton-Crosser modelinin Maxwell'in modelinden farklı olması adına ve kullanılan nanoparçacıkların şeklinin etkisini görmek adına, nanoparçacıkların şekli silindirik olarak alınmıştır. Yu-Choi modelinde ise nanoparçacıklar etrafında su molekülleri tarafından oluşturulan ara katmanın kalınlığının etkisini gözlemlemek amacıyla iki farklı katman kalınlığında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.11'den de görülebileceği üzere sonuçlar oldukça yakın çıkmıştır. Özellikle düşük konsantrasyonlarda katman kalınlığının etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Minsta'nın modeli diğer modellere göre ısı iletkenlik katsayısını daha düşük tahmin etmektedir. Düşük konsantrasyonlarda modeller arasındaki fark az olurken, konsantrasyon arttıkça aradaki fark da artmaktadır.

#### 1.4 Literatür Taraması

Ünverdi ve İslamoğlu [29] chevron tipi plakalı ısı değiştirgeçleri içerisinde  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanı kullanımının ısı transferi ve basınç düşümü üzerine olan etkilerini incelemek amacı ile deneysel çalışmalar yapmışlardır. Şekil 1.12'de kullandıkları deney düzeneğinin şeması verilmiştir. Deneylerindeki amaç farklı debi ve



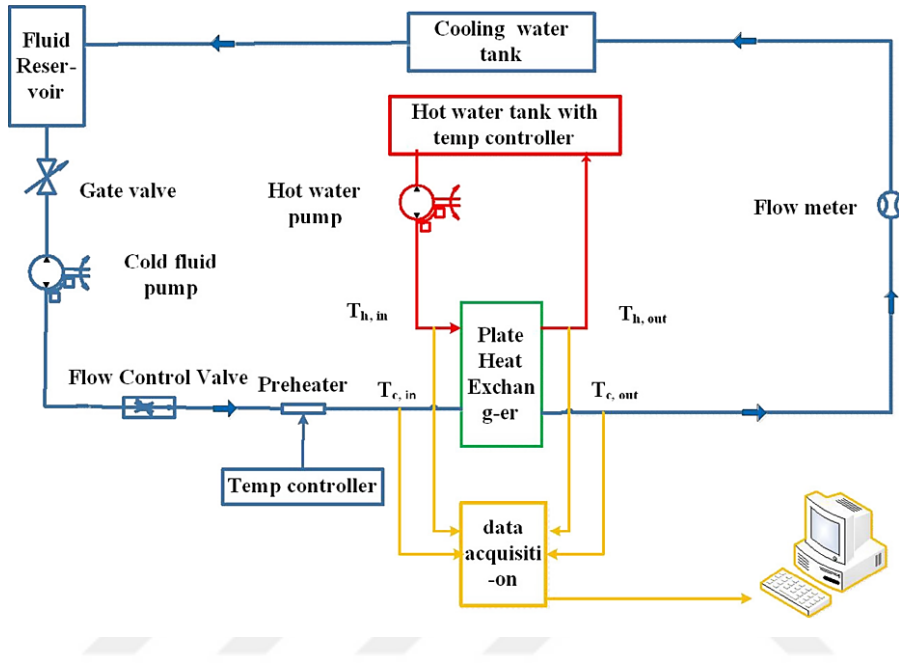
konsantrasyonlardaki nanoakışkan kullanımları için ısı transferi katsayısı ve basınç düşümünü belirlemek olmuştur. Deneyleerde hacimsel olarak %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranında dört farklı konsantrasyonda nanoakışkan kullanılmıştır. Deneyleer sonucunda Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve akışkan konsantrasyonu ile artmakta olduğu gözlenmiştir. Isı transferindeki iyileşmenin nedeni nanoakışkanın iletkenlik katsayısının artmasının yanı sıra yüksek Reynolds sayısına sahip akışlarda parçacıkların hareketleri olmuştur. En yüksek konsantrasyon kullanımında saf suya kıyasla Nusselt sayısında %42.4 oranında bir artış gözlenmiştir. Ayrıca nanoakışkan kullanımındaki basınç düşümü, su kullanımındaki en yüksek Reynolds sayısındaki basınç düşümü ile yaklaşık olarak aynı olduğu belirtilmiştir. Maksimum konsantrasyon ve maksimum Reynolds sayısında basınç düşümü suya oranla %6.4 ve %8.4 artış göstermiştir.



Şekil 1.12. Ünverdi ve İslamoğlu'nun çalışmalarında kullandıkları deney düzeneği[29]

Bin Sun vd.[30] plakalı ısı değiştirgeci içerisinde Cu, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparçacıkları ile hazırlanmış olan nanoakışkanlar kullanıp, ısıl ve hidrolik özellikler üzerindeki etkiler deneyleer yardımıyla incelenmiştir. Kullandıkları deney düzeneğinin şeması Şekil 1.13'de verilmiştir. Nanoakışkanların stabil kalması için hazırlanma aşamasında 'SDBS' dağıtıcı madde olarak kullanılmıştır. Deneyleer sonucunda aynı Reynolds sayısında ortalama ısı transferi katsayısı nanoparçacık ilavesi ile

artmaktadır. Stabilité karşılaştırması yapıldığında  $Al_2O_3$  ile hazırlanan akışkanın en iyi olduğu gözlenmiştir. Isı transferi iyileştirmesi konusunda ise Cu ile hazırlanan akışkan daha iyi sonuçlar vermiştir. Her üç nanoakışkanın konsantrasyonunun aynı olduğu durumda (%0.5) Cu,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  için sırasıyla ısı transferi katsayısındaki artış %34.55, %34,53 ve %30.39 olarak kaydedilmiştir.



şekil 1.13. Bin Sun vd.'nin deneylerinde kullanılan düzeneğin şeması [30]

Huang vd. [31] chevron tipi plakalı ısı değiştirgeçlerinde  $Al_2O_3/su$  ve  $MWCNT/su$  karışımlarının kullanımının ısı transferi ve basınç dűřümü üzerine etkilerini incelemek için yaptıkları deneyler sonucunda Nusselt sayısı ve sűrtünme katsayısı için yeni korelasyonlar oluşturmuşlardır. Sabit Reynolds sayısında ısı transferi, nanoakışkan kullanımı ile iyileştirilmiştir. Bunun en büyük nedeni akışkanın ısıl iletkenliğinin ciddi bir biçimde artmış olmasıdır. Buna ek olarak viskozitenin artmasından dolayı aynı Reynolds sayısında deneyler yapılabilmesi için nanoakışkanın debisi su debisinden yüksek olmaktadır. Bu da ısı transferine ek olarak olumlu bir katkı yapmaktadır. Sabit hızlarda karşılaştırma yapıldığında ise ısı transferinde kötüleşme gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak da viskozitedeki artış gösterilmiştir. Basınç dűřümü ise artan parçacık konsantrasyonu ile artış göstermiştir. Sűrtünme katsayısı için elde edilen korelasyonun deney verileri ile büyük bir uyuşma gösterdiğini belirtmişlerdir.

Prashant vd. [32] lehimli plakalı ısı değiştirgeci içerisinde soğutucu olarak  $Al_2O_3/su$  nanoakışkan kullanımının ısı transferine ve sürtünme katsayısına olan etkilerini deneysel yollarla incelemişlerdir. Deneplerinde ısı değiştirgecinin açısının etkilerini de incelemek amacıyla  $0-90^\circ$  aılar arasında deneyler yapılmıştır. Deneplerinde %0.1 ve %0.2 olmak üzere iki farklı konsantrasyonda nanoakışkan kullanmışlar ve ısı transferinde maksimum %34 oranında bir iyileşme elde etmişlerdir. Plakalı ısı değiştirgecinin konumunun dikey konumdan yatay konuma getirilmesinin ısı transferinde ekstra bir iyileşme sağladığı gözlenmiştir.

Kumar vd. [33] plakalı ısı değiştirgeçleri içerisinde iki farklı nanoakışkan kullanarak deneyler yapmışlardır. Isı transfer oranı, ısı transferi katsayısı, pompa gücü, ekserji kaybı ve nanoakışkan ekserji verimini içeren genel ısı transferi performansı incelenmiştir. Deneplerinde hacimsel oranları % 0.5-2 arasında değişen  $CeO_2/su$  ve  $ZnO/su$  nanoakışkanları kullanılmıştır. Denepler sonucunda  $ZnO/su$  karışımının diğer karışıma göre ısı transferini ortalama %4, ısı transferi katsayısını %10 daha fazla iyileştirmiştir. Ayrıca pompa gücü konusunda da  $ZnO/su$  karışımı kullanımında ortalama %15 daha az gücü gerekmektedir. Ekserji kayıplarında ise yine aynı şekilde  $ZnO/su$  karışı daha iyi sonuçlar vermiştir. Bütün testler sonucunda her alanda  $ZnO/su$  karışımının  $CeO_2/su$  karışımına göre iyi olduğu gözlenmiştir.

Tiwari vd. [34] ise yine plakalı bir ısı değiştirgecinde  $CeO_2/su$  karışımın ısıl ve hidrolik özelliklere olan etkilerini deneysel olarak incelemek adına bir deney düzeneği kurup, deneyler gerçekleştirmişlerdir. Nanoparçacık oranı hacimsel olarak % 0.5-3 arasında değişen geniş bir aralıktaki çalışmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde konsantrasyonun belli bir değerine kadar ısı transferindeki iyileşme devam ederken o değerden sonra ters yönde bir değişim gözlenmiştir. Optimum konsantrasyon %0.75 olarak belirlenmiş ve bu durumda ısı transferi katsayısı suya göre %39 daha fazla olarak belirlenmiştir. Bu konsantrasyondaki basınç düşümünün ise ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir. Aynı ekip [35]'de yapmış oldukları çalışmalarında ise farklı nanoakışkanların karışılaştırmasını yapmışlar ve optimum konsantrasyon değerlerini belirlemişlerdir.  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$  ve  $CeO_2$  nanoparçacıklarıyla hazırlanmış akışkanlar için belirlenen optimum konsantrasyon değerleri sırasıyla %1, %0.75, %1.25 ve %0.75 olmuştur. Optimum konsantrasyonlarda yapılan deneylerde alınan sonuçlara göre en iyi akışkan ısı transferindeki %35.9 luk iyileştirme oranı ile  $CeO_2/su$  karışımı olmuştur. Ayrıca verimlilik oranları karışılaştırıldığında da

%13.5'lik oranla daha iyi sonuçlar veren CeO<sub>2</sub>/su karışımı en uygun akışkan olarak belirlenmiştir.

Singh vd.[36] ise plakalı ısı değiştirgeci içerisinde CuO ve SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları ile hazırlanmış akışkanları karşılaştırmışlardır. Her iki akışkan için de hacimsel oran olarak %0.1 ve %0.2 kullanarak deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Ortalama ısı transferi katsayısı, hacimsel olarak %0.2 ve %0.1 oranındaki CuO ile hazırlanan akışkan için sırası ile %56 ve %40 artarken, SiO<sub>2</sub> için artış miktarları %30 ve %26 değerlerinde kalmıştır. Deneyler sonucunda CuO ile hazırlanmış akışkanın SiO<sub>2</sub> ile hazırlanmış akışkana oranla çok daha uygun olduğu belirtilmiştir.

Z. Taghizadeh Tabari vd. [37] ise süt pastörizasyonunda kullanılan plakalı bir ısı değiştirgeci içerisinde TiO<sub>2</sub>/su nanoakışkan kullanımının etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerinde kütlece %0.25, %0.35 ve %0.80 olmak üzere üç farklı oranda nanoakışkan kullanmışlardır. Nanoakışkan kullanımının etkilerini gözlemlemek amacı ile ısı transferi katsayılarının Peclet sayısına göre değişimlerinin grafiği çizdirilmiş ve yükselen konsantrasyon ile arttığı gözlenmiştir. Nusselt sayısındaki maksimum artış %17 olarak kaydedilmiştir. Bütün Reynolds sayılarındaki ve konsantrasyondaki değerlere bakıldığında termal performansın çok daha iyi olduğu ve suyun yerine nanoakışkan kullanımının özellikle yüksek Reynolds sayılarında ekonomik olduğu belirtilmiştir. Basınç düşümü verileri incelendiğinde ise basınç düşümündeki maksimum artış %8 olmuştur.

Pantzali vd.[38] küçük bir plakalı ısı değiştirgecinde nanoakışkan kullanımının etkilerini hem deneysel hem de nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında CuO/su nanoakışkanı kullanmışlardır. Isıl iletkenlikte yüksek bir artış gözlenirse de viskozitede yükselme ve ısı kapasitesinde ciddi bir düşüş gözlenmiştir. Ayrıca ısı transferindeki iyileştirmenin düşük Reynolds sayılarında daha net olduğu, yüksek Reynolds sayılarında yeni ana ısı transferi mekanizmasının taşınımli ısı transferi olduğu ve nanoparçacık katkısının limitli olduğu belirtilmiştir.

Mare' T. vd. [39] iki farklı nanoakışkanın plakalı ısı değiştirgeçleri içerisindeki termal performanslarını belirlemek amacı ile deneyler yapmışlardır. Deneylerinde suda çözülmüş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparçacıkları ve sıvı karbon nanotüp karışımı kullanılmıştır. Test düzeneği kurulduktan sonra öncelikle saf su ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Laminer akışta taşınımli ısı transferinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve karbon

nanotüpler için saf suya oranla, sırasıyla %42 ve %50 oranında iyileştirme sağlanmıştır.

Khairul vd. [40] plakalı ısı değiştirgeçleri içerisinde soğutucu akışkan olarak CuO/su nanoakışkanı kullanımının ısı transferi katsayısı, ısı transferi oranı, sürtünme kaybı, basınç düşümü, pompa gücü ve ekserji kaybı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. %0.5, %1.0 ve %1.5 olmak üzere üç farklı hacimsel konsantrasyon için deneyler yapmışlardır. Bu konsantrasyonlar için ısı transferi katsayısındaki iyileştirme sırasıyla %17.7, %21.8 ve %24.7 olurken, ekserji kaybındaki azalma ise %8, %16.25 ve %24 olmuştur. Sonuç olarak suya kıyasla ekserjetik ısı transferi verimliliğinde ortalama %12, %22 ve %34 oranında bir iyileşme gözlemlediklerini belirtmişlerdir.

Anoop vd. [41] plakalı ısı değiştirgeçleri içerisinde SiO<sub>2</sub>/su nanoakışkanların ısı performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Deney düzeneği hem plakalı hem de gövde boru tipi ısı değiştirgeçlerini test etmek amacıyla tasarlanmıştır. Vana yardımıyla test edilen ısı değiştirgeci belirlenebilmektedir. Kullanılan nanoparçacıkların ortalama boyutları 20 nm iken, nanoakışkan konsantrasyonları %2 ile %6 arasındadır. Deneyler sonucunda nanoparçacık eklenmesi toplam ısı transferi katsayısında büyük bir etkisi vardır. En düşük debide, kütlece %2'lik nanoakışkan kullanıldığında toplam ısı transferi katsayısındaki maksimum artış %5 olmuştur.

Kabeel vd. [42] nanoparçacıkların plakalı ısı değiştirgecinin performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. %4 hacimsel oranda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su karışımının laminar akıştaki ısı transferi katsayısının %13'e kadar arttırmaktadır. Plakalı ısı değiştirgecinin verimliliğinin Reynolds sayısının artması ile düştüğü gözlenmiş ve aynı konsantrasyon için basınç düşümü ve güç tüketimi suya kıyasla sırasıyla %45 ve %95 artmıştır.

Ray vd. [43] kompakt plakalı ısı değiştirgeci içerisinde nanoakışkanların performansını incelemek amacıyla deneyler yapmışlardır. Deneylerinde su-etilen karışımı içerisinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO ve SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları kullanarak hazırlanmış nanoakışkanlar kullanılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için aynı debi, ısı transferi oranı ve pompalama gücünde deneyler yapmışlardır. %0.5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoakışkanı kullanımında ısı transferi katsayısı ve toplam ısı transferi katsayısı %11 ve %4.85 oranında artmıştır. Ayrıca ısı değiştirgecinin yüzey alanının %2 azaltılması ile

pompalama gücü %5.65 oranında azalmaktadır. Debi 0.2 kg/s iken  $Al_2O_3$  ve CuO için ısı transferi katsayısındaki artış sırasıyla %4.75 ve %4.78 olmuştur. Aynı ısı transferi oranındaki deneyler sonucunda ise pompalama gücündeki artış,  $Al_2O_3$  için %4.72, CuO için %3.01 olmuştur. Aynı pompalama gücünde  $Al_2O_3$  yüzey alanında %0.86 oranında azalma sağlamıştır.

Chen vd.[44] plakalı ısı değiştirgeci içerisinde  $Al_2O_3$  nanoparçacıkları eklenmiş ve eklenmemiş Lityum Bromür çözeltisinin kullanımının ısı transferi karakteristiğini incelemişlerdir. Deneyler farklı oluk açıları ve debilerde yapılmıştır. Deneyler sonucunda sıcak akışkan debisinin artması ile ısı transferi katsayısı artmaktadır. Optimum nanoakışkan konsantrasyonunda (%3) ısı transferi oranı ve plakalı ısı değiştirgeci verimliliği sırasıyla %116.5 ve %93.7 oranında artmıştır.

Barzegarian vd. [45] lehimli plakalı ısı değiştirgeci içerisinde  $TiO_2$ /su nanoakışkanı kullanımının ısı transferi karakteristiği ve basınç düşümü üzerine olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Kütlece %0.3, %0.8 ve %1.5 olmak üzere üç farklı konsantrasyonda nanoakışkan kullanmışlardır. Türbülanslı akışta yapılan deneylerde Reynolds sayısının ve akışkan konsantrasyonunun ısı transferine etkilerini gözlemlemişlerdir. Deneyler sonucunda ısı transferi katsayısı ve toplam ısı transferi katsayısı hem Reynolds sayısı ile hem de nanoparçacık oranı ile artış göstermiştir. Kütlece %0.3, %0.8 ve %1.5 oranlarındaki nanoakışkanlar için ısı transferindeki maksimum artış sırasıyla %6.6, %13.5 ve %23.7 olurken, toplam ısı transferi katsayısındaki maksimum artış ise %2.2, %4.6 ve %8.5 olmuştur. Basınç düşümü karşılaştırması yapıldığında ise artışın ısı transferindeki artışa oranla ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Ahmad vd. [46] deneysel olarak nanoakışkan kullanımının plakalı ısı değiştirgecinin performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Deneylerinde chevron tipi contalı plakalı ısı değiştirgeci kullanmışlardır. Nanoakışkan olarak ise boyutları 50 nm olan CuO nanoparçacıkları ile hazırlanmış nanoakışkan kullanmışlardır. Akış debisi 8-11 l/dk arasında değişirken, nanoakışkan konsantrasyonları % 0.1, 0.3 ve 0.5 olmuştur. Deneylerinin sonucunda ısı transferindeki iyileştirme en fazla konsantrasyonun %0.3 olduğu durumda gerçekleşmiştir. Bu durumda ısı transferi kapasitesi %52 oranında iyileştirilmiştir.

Sarafraz vd. [47] chevron tipi plakalı ısı deęiřtirgeçleri içersinde CuO/su nanoakıřkanı kullanıp, ısı deęiřtirgeci içerisinde birikmeleri azaltmak amacı ile dūřuk frekansta titreřimler kullanarak deneyler yapmıřlardır. Titreřimler ile birlikte ısı deęiřtirgeci içerisindeki birikmeler azalırken, ısı transferi de artış gōstermiřtir. Kūtlece nanoparçacık oranı %0.1, %0.2, %0.3 ve %0.4 olmak ūzere dōrt farklı nanoakıřkan konsantrasyonu kullanmıřlardır. Deneyler sonucu nanoakıřkan kullanımını ısı transferi katsayısını arttırırken, %0.3'lūk konsantrasyona sahip nanoakıřkan en iyi iyileřtirmeyi saęlamıřtır. Daha yūksek konsantrasyonlardaki azalmanın nedeni olarak yūksek konsantrasyondaki nanoakıřkanların stabil olmaması olarak gōsterilmiřtir. Akıř tūrbūlanslı iken %0.3'lūk akıřkanın Nusselt sayısı %0.1'lik akıřkandan %26 daha yūksektir. Basınç dūřümü ise nanoakıřkan kullanımını ile artmakta olup en yūksek nanoakıřkan konsantrasyonunda basınç dūřūmünde suya oranla %51 artış gōzlenmiřtir.

Wang vd [48] minyatūr plakalı ısı değiştirgecinde dōrt farklı konsantrasyonda (%0.01, %0.1, %0.5, %1) GnP/EG-W nanoakışkanı ile deneyler yapmışlar ve termal ve hidrolik açıdan etkilerini incelemişlerdir. Őnce su ile deneylerini gerçekleştirmişler ve plakalı ısı değiştirgecinin ısı ve hidrolik karakteristiğini belirlemişlerdir. Daha sonra sıcak dōngūde nanoakışkan kullanılmıştır. Deneyler sonucunda nanoakışkan kullanımının ısı transferi katsayısında artış gōsterdięi ve bu artışın konsantrasyon arttıka arttığı belirtilmiştir. Maksimum artış oranı %4 olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda nanoakışkan kullanımının basınç dūřūmūnū olumsuz yōnde etkilediği belirtilmiştir.

Bhattad vd. [49] ise plakalı bir ısı değiştirgeci içerisinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve MWCNT parçacıklarının bir arada kullanıldığı nanoakışkanın ısı transferine ve basınç dūřūmūne olan etkilerini hem deneysel olarak hem de nūmerik olarak incelemişlerdir. Deneyler farklı nanoakışkan konsantrasyonları, farklı giriş sıcaklıkları ve farklı debiler için gerçekleştirilmiştir. Kullanılan nanoakışkanların hacimsel konsantrasyonları %0.01, 0.015, 0.02, 0.025 ve 0.03 iken, debile 2, 2.5, 3, 3.5 ve 4 l/dk'dır. Deneyler sonucunda ısı tranferi katsayısındaki maksimum iyileştirme oranı %39.16 olurken, pompalama gūcūndeki artış %1.23 olarak bulunmuştur.

Pourhoseini vd. [50] yine plakalı bir ısı değiştirgeci içerisinde alūminyum nanoparçacıkları kullanılarak hazırlanmış olan nanoakışkanın kullanımının ısı

transferi performansına olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Kullanılan akışkanların konsantrasyonları 0-10 mg/litre arasında değişmektedir. Yapılan deneyler sonucunda nanoakışkanların ısı transferini iyileştirmiş ve maksimum iyileştirme, konsantrasyonun 25 mg/litre olduğu durumda elde edilmiştir. Ayrıca akışın debisi arttıkça iyileştirme oranının daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Behrangzade ve Heyhat [51] ticari olarak kullanılan plakalı bir ısı değiştirgecinde verimliliği geliştirmek adına alüminyum/su nanoakışkanını kullanmışlardır. 100 ppm alüminyum/su nanoakışkan için, toplam ısı transferi katsayısı yaklaşık olarak %10 artmıştır. Nanoakışkan kullanımının basınç düşüme olan etkisi ise ihmal edilebilecek oranda olmuştur. Akışkanın giriş sıcaklıklarının ve debisinin plakalı ısı değiştirgeçlerinde nanoakışkan kullanımına sağladığı yardımın çok önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Khoshvaght-Aliabadi [52] girdap üretici kanalların ve CuO/su nanoakışkan kullanımının kanatçıklı plakalı ısı değiştirgecinin performansına olan etkilerini incelemek amacıyla bir deney düzeneği kurmuşlar ve deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda, normal kanallar yerine girdap oluşturucu kanalların kullanılması ısı transferini büyük ölçüde arttırmıştır. Ayrıca bu kanalların kullanılması ile ısı transferindeki elde edilen artış miktarının, nanoakışkan kullanımında elde edilen artışa göre yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu iki iyileştirme methodunun birlikte kullanılmasıyla termal-hidrolik performanstaki artışın %67'ye kadar ulaştığını gözlemlemişlerdir.

Abed vd. [53] ikizkenar yamuk şeklindeki plakalı bir ısı değiştirgecinde nanoakışkanların ısı transferine olan etkilerini incelemişlerdir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, SiO<sub>2</sub>, ve ZnO olmak üzere dört farklı malzemedan hazırlanmış, farklı konsantrasyonlarda nanoakışkanlar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek Nusselt sayısı SiO<sub>2</sub> ile hazırlanan nanoakışkan ile elde edilmiştir. Isı transferinin suya oranla %35'e kadar arttığı gözlenmiştir.

Javadi vd. [54] plakalı ısı değiştirgeçlerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları içeren nanoakışkanları ile deneyler yapmışlardır. Nanoparçacıkların eklenmesi ile ısı iletkenlik, ısı transferi ve ısı transferi katsayısı artmakta olup, TiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile hazırlanmış olan nanoakışkanların kullanıldığı durumda bu artış daha yüksek olmaktadır. Isı transferi katsayısı en yüksek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> durumda elde edilirken,



nanoakışkanın konsantrasyonu %0.2'dir. Bu durumda SiO<sub>2</sub>'ye oranla ısı transferindeki iyileştirme %30 daha yüksek olmuştur. Diğer bir yandan, basınç düşümündeki artış en az SiO<sub>2</sub> ile gözlenmiş ve diğer akışkanlara oranla %50 daha düşük olmuştur.

Pandey ve Nema [55] plakalı ısı değiştirgeçlerinde soğutucu olarak su yerine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanının kullanımının etkilerini incelemek için deneyler yapmışlardır. Isı transferi karakteristiğindeki iyileştirmenin Reynolds sayısı ve Peclet sayısındaki artış ve nanoakışkan konsantrasyondaki azalma ile arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca aynı ısı yükünde, gereken pompalama gücü nanoakışkan konsantrasyonu ile artmaktadır. Buna ek olarak boyutsuz ekserji kaybının en düşük olduğu durum nanoakışkan konsantrasyonu hacimce %2 ve debi 3.7 l/dk iken elde edilmiştir. Plakalı ısı değiştirgecinin etkinliği, soğutucu su iken %84, soğutucu nanoakışkan iken %87 olmuştur.

Selvam vd. [56] çift borulu ısı değiştirgeci içerisinde su-etilen glikol karışımı ve alüminyum nanoparçacıkları ile hazırlanmış nanoakışkanların ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerinde hacimsel konsantrasyonu %0.05-%0.45 arasında değişen 5 farklı konsantrasyonda nanoakışkan kullanmışlardır. Isı transferi katsayısındaki maksimum artış konsantrasyon %0.45 iken %42 olmuştur. Basınç düşümü incelendiğinde ise artışın konsantrasyonun %0.15'den daha az olduğu durumlarda ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir. Daha yüksek konsantrasyonlarda ise basınç düşümündeki artış daha fazla olmaktadır.

Farajollahi vd. [57] Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su ve TiO<sub>2</sub>/su nanoakışkanlarının gövde-boru tipi ısı değiştirgeci içerisinde kullanımının ısı transferine olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Peclet sayısı, hacim konsantrasyonu ve parçacık tipinin etkilerini gözlemlemişlerdir. Her iki akışkan için de beş farklı konsantrasyonda deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda toplam ısı transferi katsayısı, Peclet sayısı ve nanoakışkan konsantrasyonu ile artmaktadır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı için Peclet sayısı yaklaşık olarak 50000 iken, toplam ısı transferi katsayısındaki maksimum artış konsantrasyon %0.5 iken yaklaşık %20 olmuştur. Hacimsel olarak %0.3, %0.75, %1.0 ve %2'lik konsantrasyonlar için ise toplam ısı transferi katsayısındaki artış oranı sırasıyla %14, %16, %15 ve %9 olmuştur. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su akışkanı için optimum konsantrasyon değerinin %0.5 olduğu belirtilmiştir. TiO<sub>2</sub>/su için ise optimum değer

%0.3 olurken, %0.15, %0.3, %0.5 ve %0.75'lik konsantrasyonlar için toplam ısı transferi katsayısındaki artışlar sırasıyla %11, %24, %16 ve %13 olmuştur.

Albadr vd. [58] farklı konsantrasyonlardaki  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanının gövde-boru tipi ısı değiştirgeçlerinde kullanımının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneplerinde nanoakışkan hacim konsantrasyonu %0.3 – 2 arasında değışirken, nanoparçacıkların boyutları yaklaşık 30 nm'dir. Nanoparçacıkların suda çözünmesi ile akışkanın ısı iletkenliğinin ve viskozitesinin arttığı belirtilmiştir. Denepler sonucunda konsantrasyon %2 iken toplam ısı transferi katsayısı suya oranla yaklaşık olarak %57 daha iyi olurken, Nusselt sayısı ise aynı durumda %62.6 daha yüksektir. Sürtünme katsayısının ise viskozite artışından dolayı yaklaşık iki katına çıktığı belirtilmiştir.

Madji ve Abed [74] oluklu kanallar içerisinde  $SiO_2$  ile hazırlanmış nanoakışkan kullanımının ısı transferi ve basınç düşümündeki etkilerini nümerik olarak incelemiştirlerdir. Çalışmalarında parçacık oranlarının, boyutlarının ve baz akışkan tipinin etkilerini incelemek adına farklı koşullarda çalışmalarını tekrarlamışlardır. Sonuç olarak  $SiO_2$  ile hazırlanan nanoakışkanların saf suya oranla Nusselt sayısı ve basınç düşümünde artış gözlenmiş olup, bu artış miktarı nanoakışkan konsantrasyonu ile artmaktadır. Reynolds sayısı 8000 iken maksimum iyileştirme oranı yaklaşık olarak %18 olmuştur.

Gherasin vd. [75]  $CuO$ /su ve  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanlarının plakalı ısı değıştirgeçleri içerisindeki ısıl karakteristiklerini nümerik olarak incelemiştirlerdir. Çalışmalarında türbülans modeli olarak k-ε türbülans modeli kullanılmış, nanoakışkanın modellenmesinde ise homojen tek faz akışkan modelini kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda nanoakışkanlar ile ısı transferinin iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir.

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'nde daha önce ısı değıştirgeçleri ile hem deneysel hem de nümerik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. İhsan Deveci [8] yapmış olduğu çalışmada U borulu şaşırtma levhalı bir ısı değıştirgecinin performansını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmasında Bell-Delaware ve Kern methodlarını ve deney verilerini kullanarak performans analizleri yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Denepler sonucunda test edilen ısı değıştirgecinin performans değerleri %14 – 22 arasında olduğu belirlenmiştir.

Fatih Aktürk [7] tarafından tasarlanan düzenekte contalı plakalı ısı değiştirmeceğlerinin performansı deneysel olarak incelenmek adına bir test düzeneği tasarlanıp kurulmuştur. Deneplerinde Reynolds sayısı 450 ile 5250 arasında değişmektedir. Denepler sonucunda Nusselt sayısı ve sirtünme katsayıları için korelasyonlar geliştirilmiştir. Daha sonra aynı deney düzeneğinde Çağın Gülenoğlu [6] tarafından farklı plakaların ve düzgün olmayan akış dağılımlarının ısı değiştirgecinin performansına olan etkileri incelenmiştir. Her bir plaka tipi için ısı ve hidrolik karakteristikleri veren korelasyonlar geliştirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Özkaya [5] ise plakalı ısı değiştirgeçlerinin plakalarının hesaplamalı akışkanlar mekaniği ile performans belirlemesi için bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem, deney verileri ile kıyaslanmış ve doğrulanmıştır. Yeni plaka tasarımı yaparken ise kanalların yüksekliği, genliği gibi geometrik parametrelerin etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada contalı plakalı bir ısı değiştirgecinde  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanı kullanımının ısı ve hidrolik etkilerini incelemek amacıyla bir deney düzeneği kurulmuş ve denepler gerçekeştirilmiştir. Denepler su ve iki farklı konsantrasyonda (%1 wt. ve %0.5 wt.) olmak üzere üç farklı akışkan ile yapılmıştır. Denepler sonucunda Nusselt sayısı ve sirtünme katsayısı için korelasyonlar oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır.



## 2. DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI VE KURULUMU

### 2.1 DeneY DüZeneğİ Tasarımı

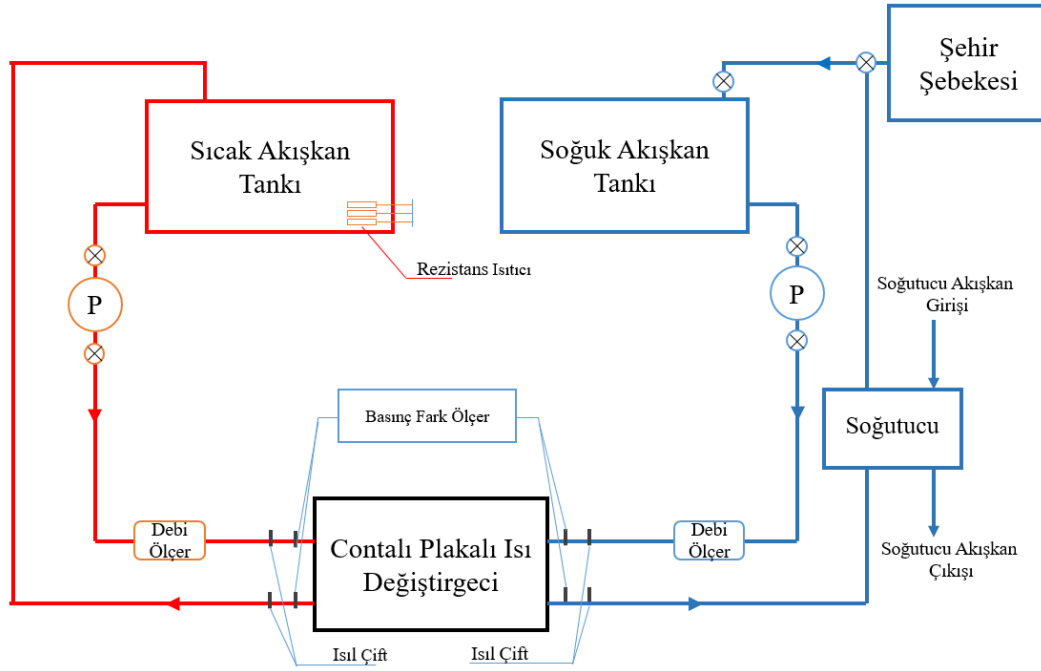
Bu çalışmada kullanılacak olan deney düzeneğİ tasarlanırken, literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan düzenekler incelenmiş, farklı tip ve konsantrasyonda nanoakışkanların ve farklı türde ısı değiştirgeçlerinin kullanılabilceğİ bir deney düzeneğİ tasarımı kullanılmıştır.

Isı değiştirgeçlerinin test edildiğİ düzeneklerde, ısı değiştirgeçlerine giren sıcak ve soğuk akışkanların girişteki sıcaklıklarının sabit olması gerekmektedir [8]. Kullanılan ölçü aletlerinin birbiri ile etkileşimi olmamalı ve doğru sonuçlar verebilmesi için kalibrasyonlarının yapılmış olması gerekmektedir. Kurulacak olan düzende, gelecek çalışmalarda farklı tip ısı değiştirgeçlerinin de kullanılabilmesi için seçilen cihazların ölçüm aralıkları geniş tutulmuştur.

Yapılan literatür taramasından faydalanarak seçimler yapılmıştır. Deneylerde alınmak istenen verilerin belirlenmesi ile birlikte sistemde kullanılacak bileşenlere karar verilmiştir. Kullanılacak olan bileşenler şu şekilde sıralanabilir; contalı plakalı ısı değiştirgeci, elektrikli ısıtıcı, her iki çevrim için elektromanyetik debimetre, sirkülasyon pompası, ısı çift, basınç fark ölçer ve akışkan deposu.

Plakalı ısı değiştirgecinde nanoakışkan kullanımının etkilerini görmek amacıyla yapılacak olan deneylerde, elimizde var olan küçük boyutlu, Tanpera markalı ORW-1 model contalı plakalı ısı değiştirgeci kullanılacaktır. DeneY düzeneğİ tasarlanırken Fatih Aktürk [7]'ün yapmış olduğu çalışmadan yola çıkılmıştır ve tasarım birçok aşamadan geçmiştir. İlk yapılan tasarım Şekil 2.1.'de verilmiştir. Bu tasarımda nanoakışkanın, sistemin soğuk çevriminde kullanılması düşünölmüştür. Ancak böyle bir durumda giriş sıcaklıklarını sabit tutmak amacıyla soğuk tarafta, ısı değiştirgecinin çıkışından sonra sıcaklığı artan nanoakışkanın soğutmak için ekstra soğutu bir sistem eklenmiştir. Nanoakışkanlar ile çalışmanın getirebileceğİ zorluklardan birisi olan çökelleme durumunun yaşanabileceğİ göz önünde tutulduğunda, nanoakışkanın mümkün olduğunca az işlemde geçmesi ve tasarımın

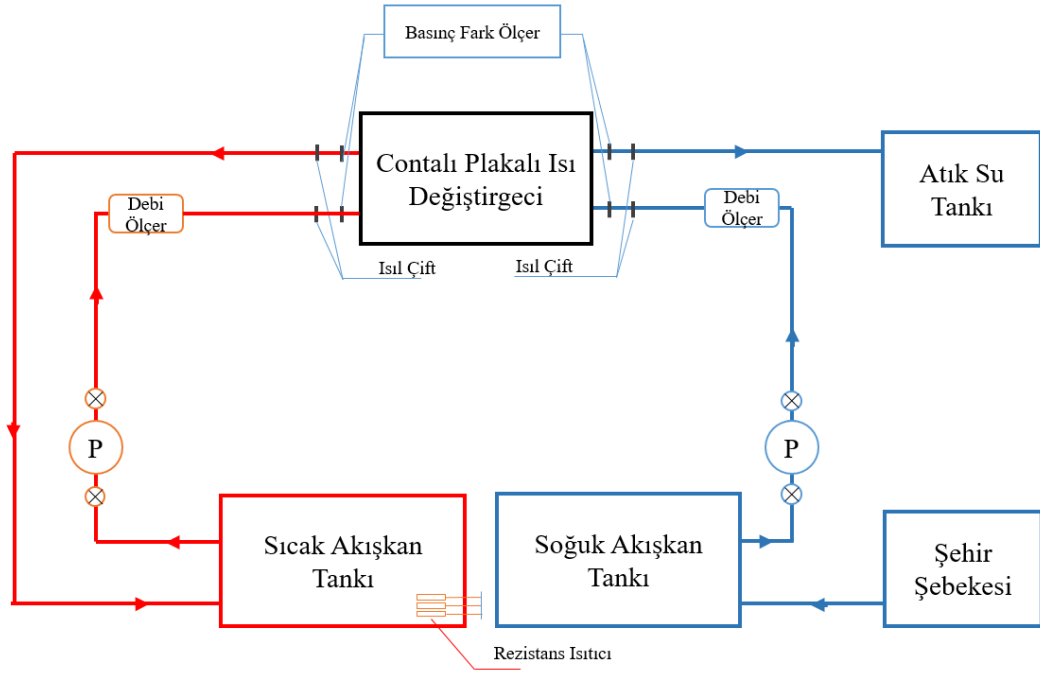
bunu destekleyecek şekilde olması gerektiği düşünülmüştür. Bu nedenle yapılan ilk tasarımdan vazgeçilmiş ve nanoakışkanların sıcak çevrimde kullanılmasına karar verilmiştir.



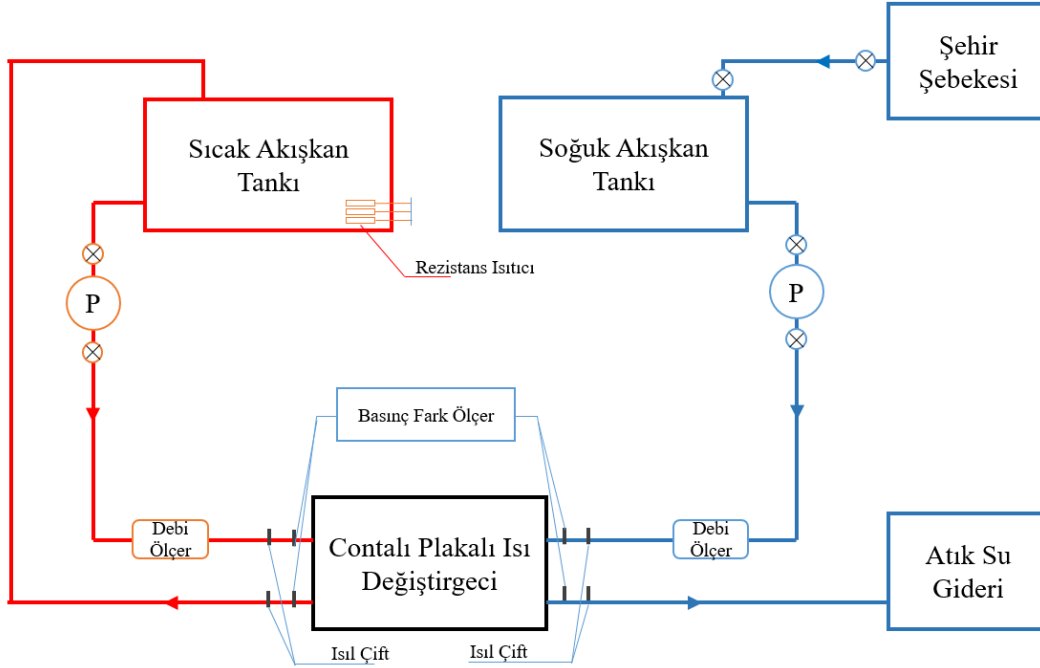
Şekil 2.1. Deney düzeneği için yapılan ilk tasarım

Şekil 2.2'de önceki tasarım değiştirilerek, nanoakışkan sıcak çevrimde kullanılmıştır. Soğuk çevrimde ise şebeke suyu kullanılmış ve çevrimin açık çevrim olmasına karar verilmiştir. Böylece sıcaklığı artan su soğuk su deposuna dönmediğinden, soğuk çevrimde ısı değiştirgecine giren akışkanın sabit tutulabilmektedir. Soğuk çevrimin çıkışı ise atık su deposuna bağlanmasına karar verilmiştir. Sıcak çevrimde ise akışkan tankının içinde yer alan ısıtıcı ile soğuyan akışkanın sıcaklığa olan etkisinin giderileceği düşünülmüştür. Bu tasarımda sıcak ve soğuk akışkan depoları pompalar ile aynı seviyede tutulduğundan, pompalarda kavitasyonun oluşacağı fark edilmiş ve tasarım kavitasyon oluşmayacak şekilde yeniden düzenlenmiştir.

Düzenlenen ve son haline getirilen tasarım Şekil 2.3.'de verilmiştir. Pompalarda kavitasyon oluşmaması için hesaplamalar yapılarak, akışkan tanklarının olması gereken yükseklikleri belirlenmiştir. Bu hesaplamalar daha sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 2.2. Deney düzeneği için yapılan ikinci tasarım



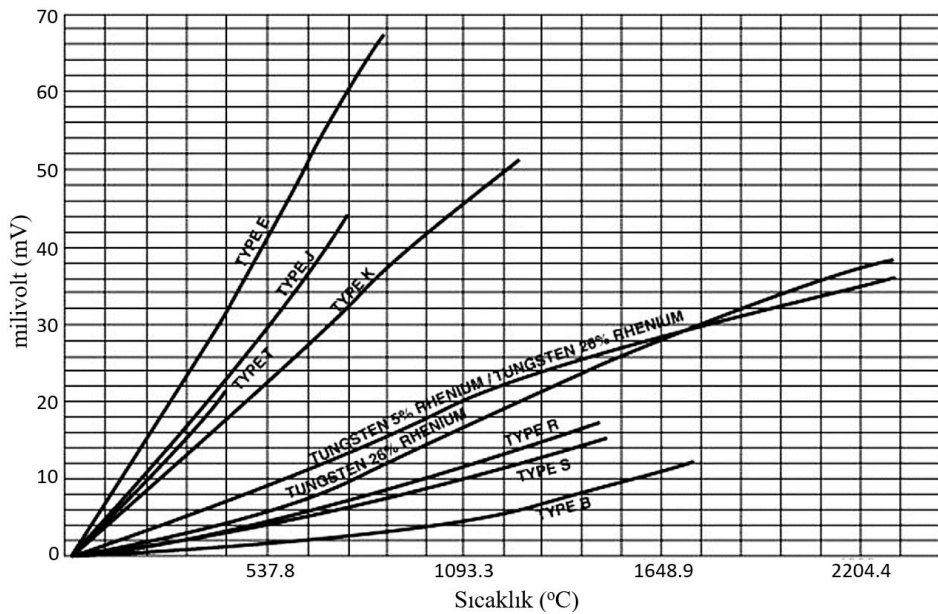
Şekil 2.3. Kurulması planlanan deney düzeneğinin şeması

Düzenekte her çevrim birer adet sirkülasyon pompası, elektromanyetik debimetre, J tipi ısıl çift, basınç fark ölçer ve akışkan tankı içermektedir. Seçilen pompalar ve ölçüm cihazlarının seçim aşamaları ayrıntılı olarak Bölüm 2.2'de anlatılmıştır. Sistemde debiyi ayarlamak adına sürgülü (şiber) vanalar tercih edilmiştir. Ayrıca pompalarda düşük debilerde yeterli akışın olabilmesi için by-pass hattı kullanılmıştır.

## 2.2 Deney Düzenğinde Kullanılan Cihazlar

### 2.2.1 Sıcaklık Ölçümünde Kullanılan J-Tipi Isıl Çift

Deneylerde ısı değıştirgecinin girişleri ve çıkışlarında sıcaklık ölçümü yapmak amacıyla ısı çiftlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Isıl çiftler farklı iki iletken malzemeden oluşur ve ucunda herhangi bir sıcaklık değışimi yaşandığında, bir gerilim farkı elde edilir ve bu gerilim farkının okunması ile sıcaklık değeri okunur [59],[60]. Oluşan bu gerilim farkı ısı çiftinin oluşturulduğu metallere bağlıdır ve birçok farklı türü mevcuttur. Seçilecek ısı çifti tipinin, 0-100 °C arasında ölçüm yapabilmesi, deneyde nanoakışkan kullanılacağından dolayı kirlenmeye karşı korumalı olması ve boyutlarının kullanılacak olan boru boyutlarına uygun olması gerekmektedir. Daha önce TOBB ETÜ Isı Değıştirgeçleri Laboratuvarında, Fatih Aktürk [7] tarafından tasarlanan ve kurulumu gerçekleştirilen düzenekte olduğu gibi J tipi ısı çiftlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışmada J tipi, demir ve konstantan yapılan ısı çiftlerinin, diğer tipteki ısı çiftlerine göre 0-100 °C arasında milivolt- sıcaklık eğrisinin daha doğrusal olduğu ve ağa doğru sonuçların alındığını belirtmiştir [56], [59], [60]. Isıl çiftlerin milivolt-sıcaklık eğrilerinin verildiği Şekil 2.4 aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.4. Farklı tipteki ısı çiftlerinin mV-Sıcaklık eğrileri [60]



Yapılan pazar araştırmasının ardından, montajı ve kullanımı kolay olan, dışında kaplaması bulunan J tipi ısıtıcı çiftler GENTEK A.Ş. firmasından alınmıştır. Alınan ısıtıcı çiftlerin kalibrasyonu firma tarafından yapılarak gönderilmiştir.

Çizelge 2.1. Alınan ısıtıcı çiftlerin özellikleri

|                   |        |
|-------------------|--------|
| Isıtıcı Çift Tipi | J      |
| Dalma Boyu (mm)   | 20     |
| Dalma Çapı (mm)   | 6      |
| Bağlantı          | G:1/2" |
| Koruma Sınıfı     | IP65   |

Seçilen ısıtıcı çiftlerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Buna göre dalma boyu ve dalma çapı, kullanılacak olan boru çapına göre seçilmiştir. Isıtıcı çiftlerin sisteme montajı, bağlantı çapına uygun T-boru bağlantısı ile sağlanabilecektir.

### 2.2.2 Debi Ölçümünde Kullanılan Debimetreler

Deneysel sıralarda akışkanların debilerini en doğru şekilde okumak çok önemlidir. Sistemde kullanılacak debimetrenin seçilmesinden önce birçok farklı tipteki debimetreler incelenmiş ve kullanımı kolay olan, daha doğru sonuçlar veren elektromanyetik debimetrelerin kullanılmasına karar verilmiştir. Elektromanyetik debimetrenin seçimi ise kullanılacak akışkanların türüne, boruların çapına, akışkanların sıcaklığına bağlı olarak seçilmiştir. Araştırmalar sonucu GENTEK A.Ş. firmasının EM-LDG15 model debimetresi seçilmiş ve alınmıştır. Alınan debimetrede sahip olduğu LED ekrandan anlık geçen debi miktarları okunabilirken, mA çıkışı ile de veri toplayıcı ile bağlantı sağlayıp, debi değerleri kayıt altına alınabilecektir. Çizelge 2.2’de alınan debimetrenin özellikleri Şekil 2.6’da ise fotoğrafı verilmiştir.

### 2.2.3 Basınç Düşümü Ölçümünde Kullanılan Basınç Fark Ölçerler

Deneysel sıralarda ölçümü yapılacak diğer bir parametre ise basınçtır. Isı değiştirgeçlerinin performans analizlerinde basınç düşümü önemli bir etkiye sahiptir. Isı değiştirgecinin sıcak ve soğuk taraflarında oluşan basınç düşümünü ölçmek amacıyla iki farklı yol izlenebilir.



Resim 2.1. Kullanılacak olan EM-LDG15 model elektromanyetik debimetre

Çizelge 2.2. Deneyleerde kullanılan debimetrelerin özellikleri

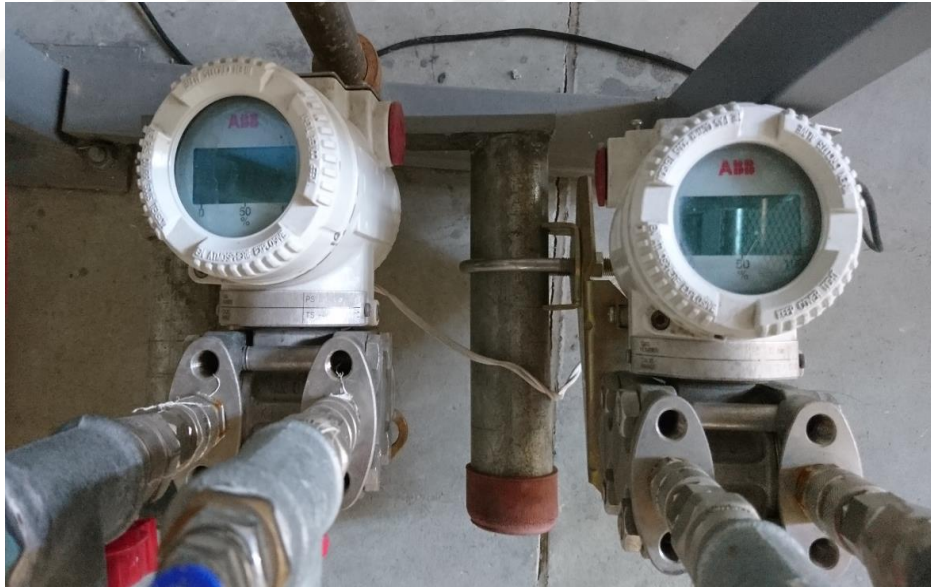
|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| Bağlantı                           | DN15         |
| Ölçme Aralığı (m <sup>3</sup> /sa) | 0.06-6.36    |
| Akış Hızı Ölçümü (m/s)             | 0.1-10       |
| Güç (V/Hz)                         | 220 / 50     |
| Hassasiyet                         | %0.5         |
| Sıcaklık (°C)                      | -10...150    |
| Çıkış                              | 4-20 mA,puls |
| İç Kaplama                         | PTFE         |
| Koruma                             | IP65,IP67    |

Bu yollardan birincisi, ısı değiştirgecinin her giriş ve çıkışına basınç değerini ölçen bourdan tüp basınç ölçerlerini kullanmak ve giriş ve çıkış değerlerinin farkını hesaplayarak gerçekteşen basınç düşümünü belirlemektir. İkinci yol ise direkt olarak oluşan basınç düşümünü ölçebilen basınç fark ölçer kullanmaktır. Hali hazırda elimizde bulunan, önceki çalışmalarda kullanılmış ABB Instrumentation firmasının 264DSHSSA2A1/B1.L1 model basınç fark ölçerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Aşağıda verilen Çizelge 2.3.'de kullanılması kararlaştırılan basınç fark ölçerin özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. Deneylerde kullanılan basınç fark ölçerlerin özellikleri

|                          |                                  |
|--------------------------|----------------------------------|
| Marka                    | ABB Instrumentation              |
| Tip                      | 264DSHSSA2A1/B1.L1               |
| Span Limitleri           | 1,6 ... 160 KPa (16...1600 mbar) |
| Kalibrasyon              | 0...50 KPa                       |
| Besleme                  | 10,5...42 V DC                   |
| Diyafram Maddesi         | AISI 316 L SS                    |
| Dolgu Sıvısı             | Silikon yağı                     |
| Gövde Malzemesi          | Alüminyum alaşımı                |
| Bağlantı Çıkışı          | 4-20 mA, HART Dijital bağlantı   |
| Doğruluk                 | 0,075 %                          |
| Çalışma Ortamı Sıcaklığı | -40°C...+85°C                    |
| Koruma                   | IP 67                            |
| Gösterge                 | Dijital LCD bütünleşik gösterge  |

Şekil 2.6’da kullanılan basınç fark ölçerler gösterilmiştir. Buna göre basınç fark ölçerlerin biri sıcak devre için ölçüm yaparken, diğeri soğuk devre için ölçüm yapmaktadır.



Resim 2.2. Deney Düzeneginde kullanılan basınç fark ölçerler

#### 2.2.4 Contalı Plakalı Isı Değiştirgeci

Bu çalışmada Tanpera firmasının ORW-1 model plakalı ısı değiştirgeci kullanılmıştır. Bu model, küçük boyutlarından dolayı, nanoakışkanların etkisini gözlemlemek için oldukça uygun olup aynı zamanda daha önceden alındığı için

ekstra bir maliyete neden olmamıştır. Çizelge 2.4’de bu pakalı ısı değıştirgecinin özellikleri ve plakalarının boyutları verilmiştir.



Resim 2.3. Deneylerde kullanılan contalı plakalı ısı değıştirgeci

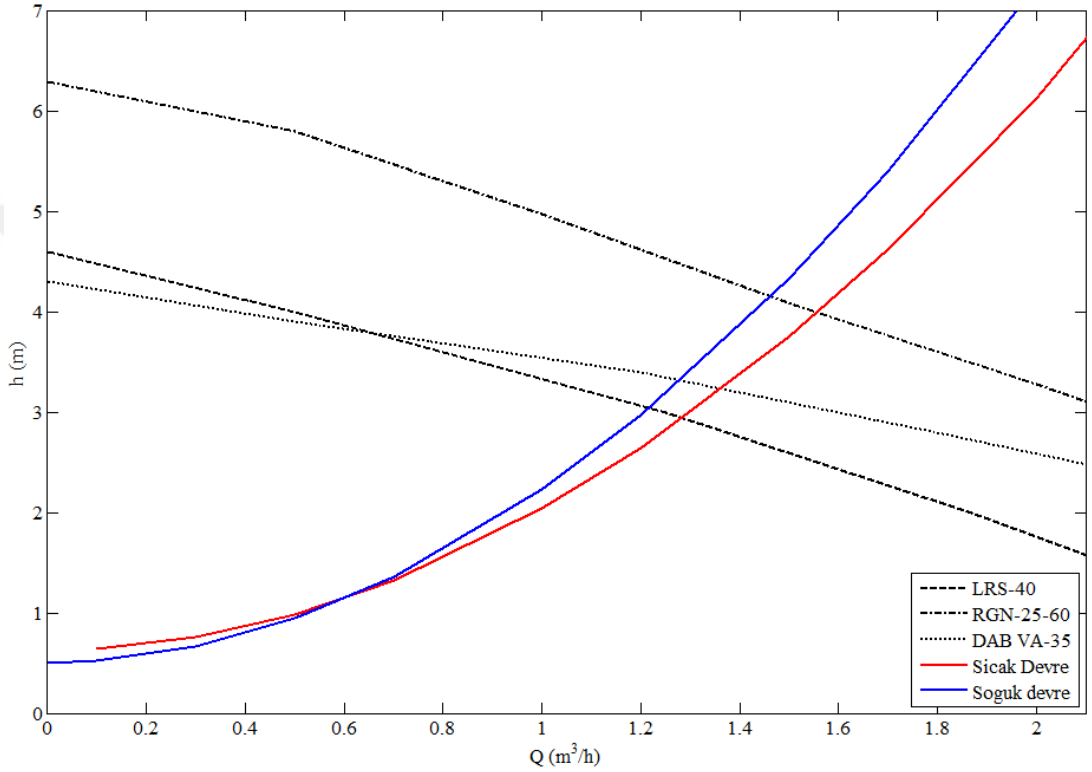
Çizelge 2.4. Deneylerde kullanılan plakalı ısı değıştirgecinin plaka boyutları

| Parametre                     |                            | Plaka   |
|-------------------------------|----------------------------|---------|
| Port çapı                     | $D_p$ (m)                  | 0.0211  |
| Portlar arası plaka genişliği | $L_w$ (m)                  | 0.0711  |
| Chevron alan uzunluğu         | $L_v$ (m)                  | 0.178   |
| Portlar arası uzunluk         | $L_p$ (m)                  | 0.1569  |
| Plaka kıvrım derinliği        | $b$ (m)                    | 0.00255 |
| Plaka kalınlığı               | $t$ (m)                    | 0.0005  |
| Etkin ısı transferi alanı     | $A_l$ (m <sup>2</sup> )    | 0.02    |
| Plaka iz düşüm yüzey alanı    | $A_{lp}$ (m <sup>2</sup> ) | 0.0112  |
| Genişleme faktörü             | $\phi$                     | 1.7928  |
| Eşdeğer çap                   | $D_e$ (m)                  | 0.0051  |
| Hidrolik çap                  | $D_h$ (m)                  | 0.00284 |
| Plaka ısı iletkenliği         | $k_w$ (W/mK)               | 16.2    |

### 2.2.5 Düzenekte Kullanılan Pompalar

Deney düzeneğinde kullanılacak ölçüm aletleri belirlendikten sonra son olarak pompa seçimi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle nanoakışkanlar için uygun ve sisteme yeterli debiyi sağlayabilecek farklı tip pompalar araştırılmıştır. İçerisinde katı parçacıklar içeren nanoakışkanların pompa malzemelerinde herhangi bir aşınmaya neden olmaması için peristaltik pompalar düşülmüştür. Ancak bu pompaların sağlayabilecekleri debinin yeterli olmaması ve maliyetinin oldukça yüksek olması nedeniyle bu pompalardan vazgeçilmiştir. Aynı şekilde yüksek maliyeti nedeniyle

dişli pompalardan da vazgeçilmiştir. Bunlar yerine çoğu sistemde kullanılan maliyeti düşük, kurulumu ve bakımı kolay olan sirkülasyon pompalarının kullanılmasına karar verilmiştir. Pompa türü belirlendikten sonra, tasarlanan düzenek için karakteristik hesaplamalar yapılmış ve gereken pompalama gücü belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar Ek-C’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Hesaplamalar sonucu elde edile değerlere göre pompa araştırması yapılmış ve pompa ve sistem karakteristik eğrileri çizdirilmiştir. Bu eğriler Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.5. Sistem ve seçilen bazı pompaların karakteristik eğrileri

Şekil 2.8’de sıcak ve soğuk devrenin sistem karakteristikleri ve yapılan araştırma sonucu kullanılabilir birkaç pompanın karakteristik eğrileri çizdirilmiştir. Sistem karakteristik hesaplamalarında kullanılan kabuller Ek-C’de verilmiştir. Buna göre sistem ve pompa eğrilerinin kesişim noktası maksimum çalışma debisini göstermektedir. Deneylerde daha kolay ulaşılabilir ve daha ucuz olan LRS-40 model pompalar kullanılmıştır.

Kullanılacak olan boruların çapları, ısı değiştirgecinin giriş ve çıkış çapları ile aynı (DN20) seçilmiştir. Böylece ısı değiştirgeci içerisinde oluşacak yanlış dağılıma bir nebze de olsa engellenmiş olacaktır [63]. Ayrıca kullanılacak olan bağlantı ve diğer elemanların çapları da aynı seçilmiştir ve sistemde kullanılması gereken redüksiyon

sayısı çok fazla olmayacak ve bu nedenle oluşacak basınç düşümü engellenecektir. Seçilen pompanın teknik özellikleri Çizelge 2.5.'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Kullanılan sirkülasyon pompalarının özellikleri

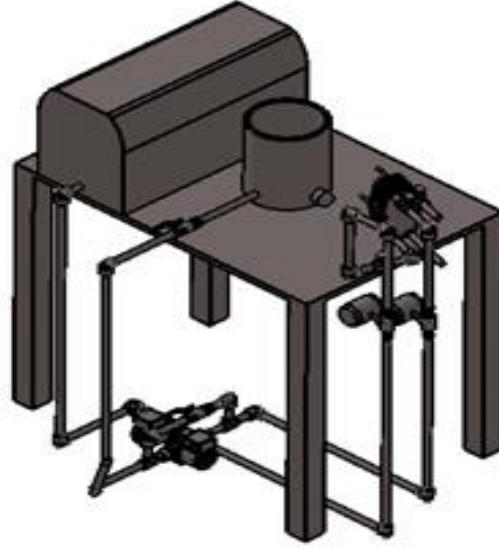
| Parametre             | Teknik Özellikler |
|-----------------------|-------------------|
| Su Sıcaklığı (°C)     | -10 ...+110       |
| Çalışma Basıncı (Bar) | Maks. 10          |
| Güç (V/Hz)            | 230 / 50          |
| Pompa Gövdesi         | Dökme Demir       |
| Fan                   | PPO               |
| Rulman / Yatak        | Grafir / Seramik  |

### 2.3 Kaviteasyon Hesabı

Deneyler esnasında pompalarda kaviteasyonun oluşmaması için hesaplamalar yapılmış ve akışkan tanklarının bulunması gereken yükseklikler belirlenmiştir. Hesaplamalar farklı debiler için yapılmıştır ancak pompanın üretici firmasından alınması gereken  $NPSH_R$  değerleri firmadan alınamamıştır. Sistem içinde kullanılacak olan güçteki pompaların üreticileri ile iletişime geçilmesi rağmen bu konuda herhangi bir bilgi alınamamıştır. Bu nedenle seçenekler arasından bir pompa seçilmiştir. Hesaplamalar farklı tank yükseklikleri için tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda tankların pompalardan 0.9 m yüksekliğe yerleştirilmesine karar verilmiştir. Bu durumda pompa girişinde elde edilen basıncın yeterli olduğu, düzeneğin kurulumun tamamlanmasından sonra, testler esnasında pompalarda kaviteasyonun oluştuğu gözlemlendiği taktirde tank yüksekliklerinin ayarlanabileceği düşünülmüştür. Kaviteasyon hesaplamaları ayrıntılı bir şekilde Ek-D'de verilmiştir. Hesaplamalara göre deneyler maksimum 90 °C sıcaklıkta ve 1 m<sup>3</sup>/s debide gerçekleştirilebilecektir.

### 2.4 Deney Düzeneğinin Kurulumu

Düzenek için seçilen cihazların temin edilmesinden sonra deney düzeneğinin kurulumuna TOBB ETÜ Isı Değiştirgeçleri Laboratuvarı'nda başlanmıştır. Dizayna göre, düzenekte soğuk ve sıcak olmak üzere iki çevrim bulunmaktadır. Bu çevrimlerde bulunan parçalar önceki bölümlerde anlatılmıştır. Tasarımı yapılan deney düzeneğinin üç boyutlu modeli Şekil 2.9.'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Yapılan tasarımın üç boyutlu katı modeli

Düzenekte metal borular yerine kurulumu kolay, maliyeti düşük olan kompozit katmanlı PP-R borular kullanılmıştır. Bu kompozit katmanın ısıl iletkenliği 0.040 mm/mK [64] gibi bir değere sahip olduğundan, olabilecek ısı kaybını azaltmaya yardımcı olmaktadır. Kurulumu akışkan tanklarının 0.9 m yüksekliğe sahip olan masaya yerleştirilmesiyle başlanmıştır. Soğuk çevrimde plastik su tankı, sıcak çevrimde ise çapı ve yüksekliği 35 cm olan, paslanmaz çelikten yapılmış, silindirik şeklinde bir tank kullanılmıştır. Sıcak akışkan tankının alt tarafına uygun boyutlarda manşon eklenerek, ısıtıcının bağlantısı için bölme hazırlanmıştır. Bu tanklardan akışkan çıkışı, tanklarının zemininde oluşabilecek herhangi bir tortu, pislik veya topaklanma nedeniyle, tankın alt kısmından değil, yan tarafta, tankın dip kısmından 2 cm yüksek olacak şekilde ayarlanmıştır. Her iki tank çıkışına kurulumun, temizliğin ve daha sonra yapılacak olası değişikliklerin daha kolay yapılabilmesi adına dişli rakorlar ve küresel vanalar kullanılmıştır. Soğuk çevrimde şebeke suyu kullanıldığından, tankın dolumu için şebekeden hat çekilmiş ve vanalardan yardımıyla gerekli miktarlara suyun alınması sağlanmıştır. Sıcak çevrimde ise çevrimin kapalı olmasından dolayı tankın dolumu el ile akışkanın tanka eklenmesi yoluyla yapılmaktadır ve tanktan dışarıya ısı kaybının azaltılması için tank cam elyaf ile kaplanmıştır. Anlatılan akışkan tankları Şekil 2.10.'da verilmiştir.



Resim 2.4. Deney tesisatında kullanılan soğuk ve sıcak akışkan depoları

Tanklardan çıkan akışkanlar dik bir şekilde indikten sonra yerde yatay olan yerleştirilen sirkülasyon pompalarına gelmektedir. Akışkanların pompaya düzgün bir halde ulaşabilmesi için 90°'lik dirsek ile pompa arasında 25 cm mesafe bırakılmıştır. Düşük debilerde çalışırken pompalarda yeterli akışın olabilmesi adına pompa çıkışı ile girişi arasında by-pass hattı oluşturulmuştur. Şekil 2.11'de sistemde kullanılan



Resim 2.5. Deney düzeneğinde kullanılan pompalar ve by-pass hattı

pompalar ve by-pass hattı gösterilmiştir.

Elektromanyetik debimetrelerin daha doğru ölçüm yapabilmesi için dikey olarak yerleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Böylece boru çapı boyunca, yer çekiminin de yardımıyla boşluklar oluşmayacaktır [7]. Ayrıca debimetrelerin kataloğundaki bilgilere dayanılarak, debimetrelerden önce boru çapının beş katı kadar, sonra ise iki

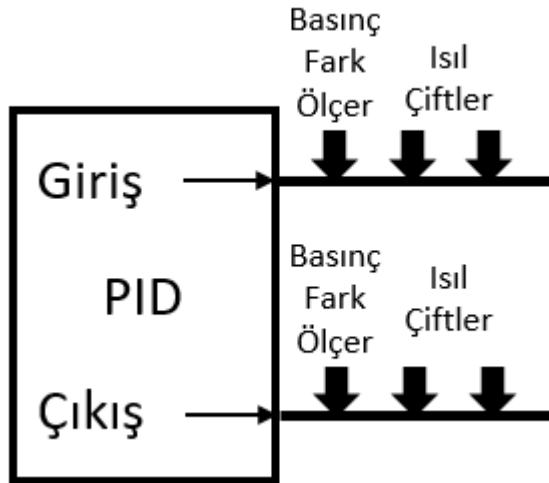


katı kadar mesafe bırakılmıştır. Kurulumu yapılan debimetreler Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Resim 2.6. Deney düzeneğinde kullanılan elektromanyetik debimetreler

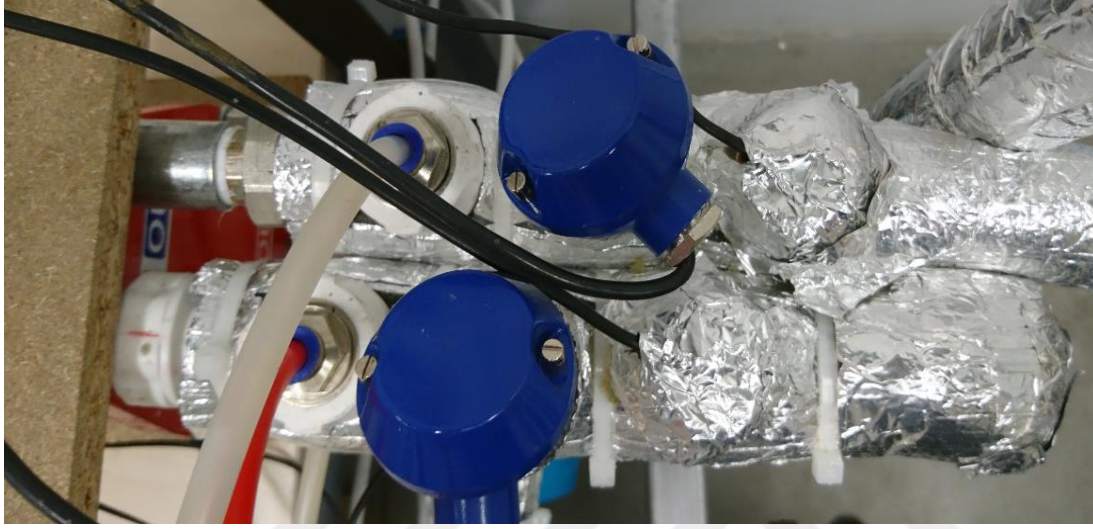
Debimetrelerden çıkan akış, plakalı ısı değiştirgecine kadar yatay olarak devam etmektedir. Akışkanların plakalı ısı değiştirgecine girmeden önce sıcaklık ve basınç ölçümleri yapmak amacıyla giriş ve çıkışlarına gerekli bağlantı elemanları yerleştirilmiş ve ölçümler bu noktalardan yapılmıştır. Giriş ve çıkışlardaki ısı çift ve basınç ölçerlerin yerleşim sıralaması Şekil 2.12’de verilmektedir.



Şekil 2.7. Plakalı ısı değiştirgecinin giriş ve çıkışındaki ısı çiftlerin ve basınç fark ölçerlerin yerleşim sıralaması

Şekil 2.13’den de görülebileceği üzere basınç ölçerler giriş ve çıkışlarda ısı değiştirgecine en yakın noktalara yerleştirilmiştir. Böylece sadece plakalı ısı

değiştirgeci içerisinde oluşan basınç dūřümü ölçülebileceği dūřnlmřtr. Daha sonra ise GENTEK A.ř. firmasından alınan J tipi ısıl çiftler ve okulda bulunan ve kalibrasyonu yapılan ısıl çiftler yerleştirilmiştir. Böylece iki farklı ısıl çift ile alınan değerlerin karşılaştırılması yapılacak ve değerlerin birbiriyle eşleşip eşleşmediği gözlenebilecektir. şekil 2.14 ve şekil 2.15.'de bu bağlantılar ve şekil 2.16'de kullanılan plakalı ısı değiştirgeci gösterilmiştir.



Resim 2.7. Plakalı ısı değiştirgecinin giriş ve çıkışındaki ısıl çiftlerin ve basınç fark ölçerlerin yerleşimi



Resim 2.8. Plakalı ısı değiştirgecinin giriş ve çıkışındaki ısıl çiftlerin ve basınç fark ölçerlerin yerleşimi



Resim 2.9. Deney düzeneğinde kullanılan plakalı ısı değiştirgeci

Isıl çiftler ve debimetrenin veri çıkışları Keysight marka 34972A LXI model veri toplayıcısına bağlanmıştır. Kullanılan veri toplayıcısı 2.17’de verilmiştir. Isı değiştirgecinden çıkan akışkanların debilerini ayarlamak için sürgülü vanalar kullanılmıştır. Vanalar sıcak çevrimde, akışın sıcak akışkan tankına girmeden önce, soğuk çevrimde ise akışın gidere bağlanmasından önce bağlanmıştır. Bağlantılar Şekil 2.18’de verilmiştir.



Resim 2.10. Deneylerde kullanılan veri toplayıcısı

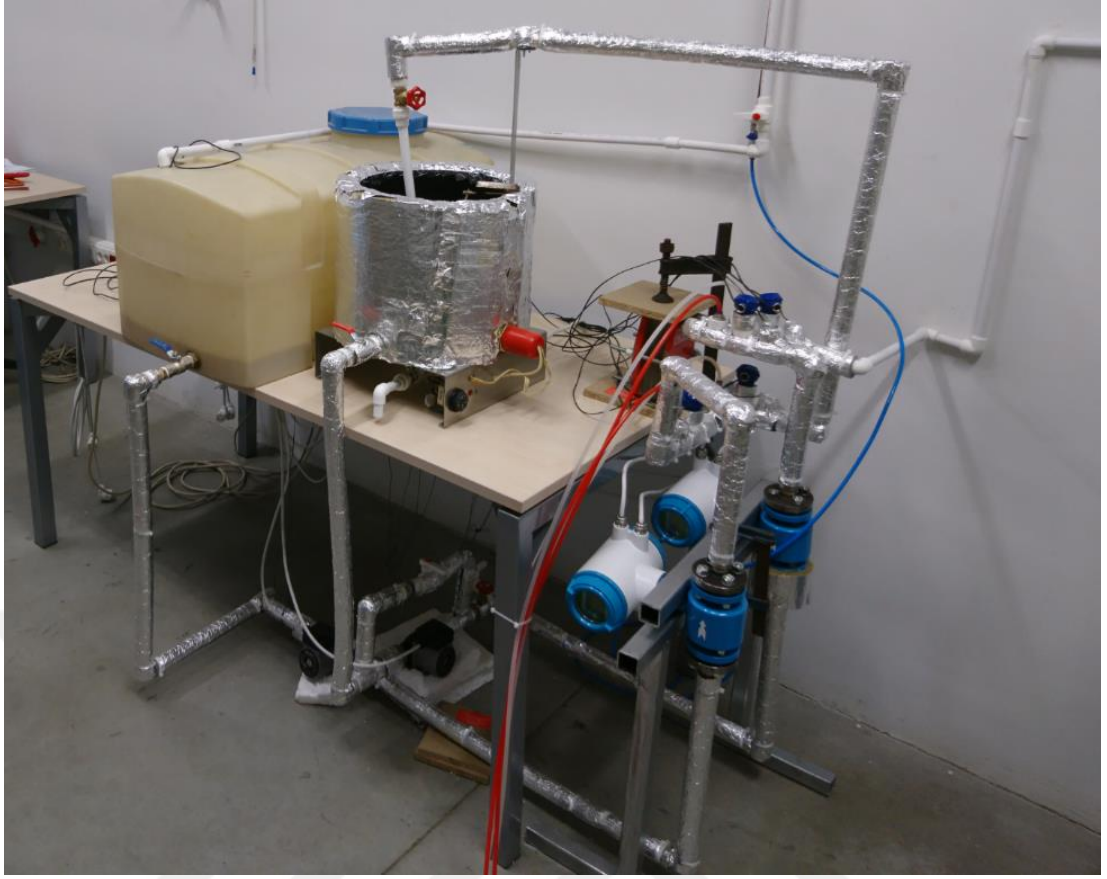


Resim 2.11. Deney düzeneğinde akışkan debilerini ayarlamak için kullanılan sürgülü vanalar

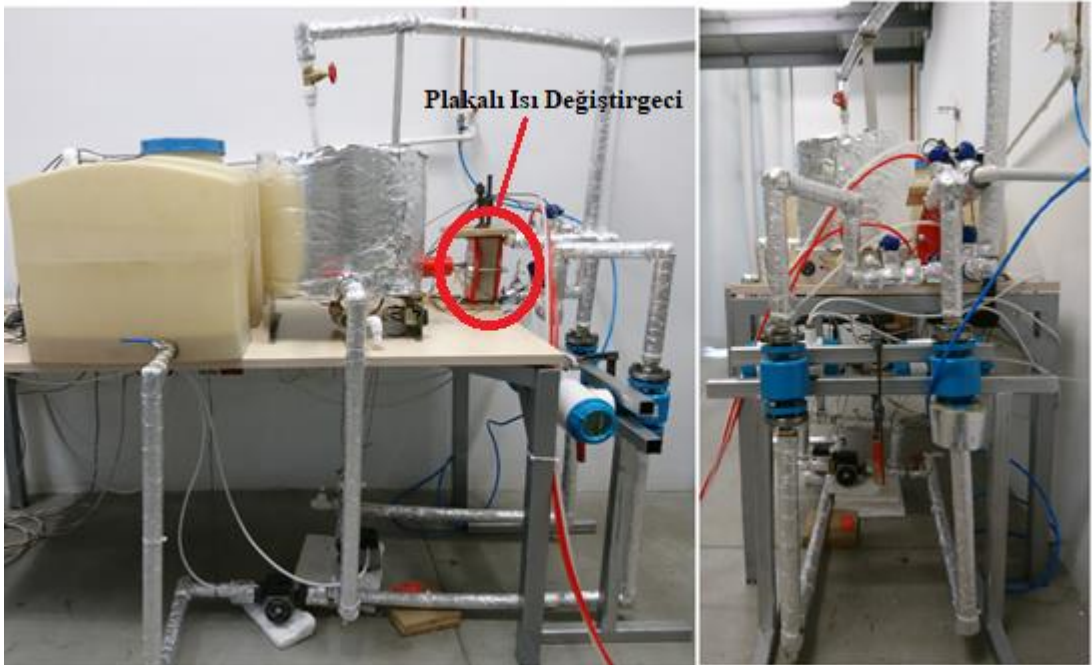
Sistemde ısıtıcı olarak ise 2 kW gücünde ısıtıcı rezistans kullanılmıştır. Kullanılan ısıtıcı Şekil 2.19’da verilmiştir. Kurulan sistemin genel görünümü ise Şekil 2.20 ve Şekil 21’de verilmiştir. Kurulumu tamamlanan deney düzeneğinin son hali Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’de verilmiştir.



Resim 2.12. Deney düzeneğinde ısıtıcı olarak kullanılan 2 kW gücündeki elektrikli ısıtıcı



Resim 2.13. Kurulan deney düzeneği



Resim 2.14. Deney düzeneğinin öncen ve yandan görünümü



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma için tasarlanan deney düzeneğinin kurulumu tamamlandıktan sonra her iki çevrimde de akışkan olarak su kullanılan durum için deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneyler esnasında plakalı ısı değiştirgecinin plaka tipi ve sayısı sabit tutulmuştur. Böylece sadece nanoakışkan kullanımının etkilerini incelemek mümkün olacaktır. Deneyler farklı giriş sıcaklıkları ve farklı debilerde tekrarlanmıştır. Her iki devre için 125, 175, 300 ve 400 litre/saat olmak üzere dört farklı debide deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında, verilerin alınmasından sonra bir devrenin debisi sabit tutulmuş, diğer devrenin debisi değiştirilmiştir. Böylece her bir deney seti 16 ayrı deneyden oluşmaktadır. Her deney için sistemin durağan olması beklenmiş ve ardından plakalı ısı değiştirgecinin giriş ve çıkışlarındaki sıcaklık, basınç düşümü değerleri her yirmi saniyede bir olacak şekilde 1 dakika boyunca veri toplayıcı yardımıyla kaydedilmiştir. Yapılan deneylerin doğruluğunun tespiti amacıyla deneyler farklı zamanlarda iki kere daha tekrarlanmıştır.

Su ile deneyler tamamlandıktan sonra, sıcak devrede kullanılmak üzere kütlece %1'lik ve %0.5'lik olmak üzere iki farklı konsantrasyonda nanoakışkan hazırlanmış ve deneyler aynı şekilde tekrarlanmıştır.

Çizelge 3.1. Deney parametreleri

| Parametre                           | Değerler           |
|-------------------------------------|--------------------|
| Sıcak Devre Debisi                  | 125-400 litre/saat |
| Soğuk Devre Debisi                  | 125-400 litre/saat |
| Sıcak Devre Akışkan Giriş Sıcaklığı | 22 – 40 °C         |
| Soğuk Devre Akışkan Giriş Sıcaklığı | 13 – 17 °C         |

Daha önce de bahsedildiği üzere her iki devre için dörder farklı debide deneyler yapılmıştır. Her deneyde, veriler alınırken ısı değiştirgeci giriş ve çıkış sıcaklıklarının sabit duruma gelmesi beklenmiştir. Deneylere sıcak akışkan tankı

doldurularak başlanmaktadır. Tank doldurulduktan sonra rezistan ısıtıcı çalıştırılıp, vanalar açılmaktadır. Vanalar açıldıktan sonra sıcak devrede kullanılan pompa devreye alınıp, sirkülasyon elde edilmektedir. Soğuk devrede ise akışkan olarak şebeke suyu kullanılmaktadır. Kullanılan soğuk akışkan tankı yeterli miktarda şebeke suyu ile doldurulduktan sonra pompa çalıştırılmaktadır. Tanktaki akışkan seviyesini, akışkan yüksekliğinin debi üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak amacıyla sabit tutlmaya çalışılmıştır. Bu da şebeke suyunun alındığı hatta vana eklenerek sağlanmıştır. Vana yardımıyla tankın içindeki su miktarı sabit tutulabilmektedir.Şebeke suyunun sıcaklığı ise belli bir süre sonra, deneyin yapıldığı saate bağlı olarak 14-16 °C arasında sabitlenmektedir. Her deney, vanalar yardımıyla istenilen debilerin ayarlanması ile başlayıp, sistemin durağan hale ulaşmasının ardından verilerin alınması ile bitmektedir.

### 3.1 Nanoakışkanların Hazırlanması

Deneylerde kullanılan nanoakışkanlar Sigma-Aldrich firmasından kütlece %20'lik  $Al_2O_3$ /su karışımı olarak alınmıştır. Şekil 3.1'de alınan nanoakışkanlar gösterilmektedir.



Resim 3.1. Sigma-Aldrich firmasından alınan  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanları



Çizelge 3.2. Alınan nanoakışkanın özellikleri

|                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| Nano parçacık         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Nano parçacık boyutu  | 30 – 60 nm (TEM)               |
| Baz akışkan           | H <sub>2</sub> O               |
| Kütlece konsantrasyon | %20                            |
| Özkütle               | 1.06 g/mL                      |

Alınan nanoakışkanların konsantrasyonları önce kütlece %1, ardından kütlece %0.5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Konsantrasyon ayarlanırken alınan nanoakışkanlara belirli miktarlarda saf su eklenmiş ve hazırlanan karışımın stabil olabilmesi adına, her bir nanoakışkan karışımı yaklaşık 1 saat boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Şekil 3.2’de kullanılan manyetik karıştırıcı verilmiştir.



Resim 3.2. Konsantrasyon ayarlanırken kullanılan manyetik karıştırıcı

Gerekli konsantrasyonun elde edilebilmesi için kullanılması gereken saf su miktarı hesaplanırken kullanılan hesaplamalar aşağıda anlatılmıştır.

Herhangi bir karışımda, kütlece oran, çözünen maddenin kütlesinin karışımın kütlesine olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada çözünen madde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparçacıkları, çözücü ise saf sudur.

$$\phi_{wt} = \frac{m_{Al_2O_3}}{m_{Al_2O_3/su}} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'de  $\phi_{wt}$  karışımın kütlece konsantrasyonunu simgelemektedir. Alınan nanoakışkanların her bir şişesi 100 mL olup kütlece %20  $Al_2O_3$  içermektedir. Ayrıca karışımın özkütlesi satıcı firma tarafından 1.06 g/mL olarak belirtilmiştir. Bu bilgiler ve Denklem 3.1 ile toplam nanoparçacık miktarı hesaplanabilir.

Hacmi 100 mL olan  $Al_2O_3/su$  karışımın kütlesi;

$$m_{Al_2O_3/su} = \rho_{Al_2O_3/su} \cdot V_{Al_2O_3/su} = 1.06 \frac{g}{mL} \cdot 100 mL = 106 g \quad (3.2)$$

Kütlece %20 olduğundan dolayı  $\phi_{wt}$  değeri 0.20'dir. Böylece;

$$0.20 = \frac{m_{Al_2O_3}}{106} \rightarrow m_{Al_2O_3} = 21.2 g \quad (3.3)$$

Tek bir şişe nanoakışkanda 21.2 gram  $Al_2O_3$  nanoparçacık bulunmaktadır. Kütlece %1'lik akışkan hazırlayabilmek için ise karışıma 1.9 litre saf su eklenmiştir. Böylece;

$$\phi_{wt,1} = \frac{21.2 g}{(106 + 1900) g} = 0.0105 \quad (3.4)$$

Aynı şekilde kütlece %0.5'lik akışkan için ise %1'lik karışıma 2 litre daha saf su eklenmiştir.

$$\phi_{wt,2} = \frac{21.2 g}{(106 + 1900 + 2000) g} = 0.0053 \quad (3.5)$$

Kütlece derişimleri belli olan nanoakışkanların hacimsel konsantrasyonları hesaplanırken,  $Al_2O_3$  nanoparçacıklarının hacmi hesaplanmış ve toplam karışımın hacmine olan oranı belirlenmiştir. Bu oran nanoakışkanın hacimsel konsantrasyonu olmaktadır.

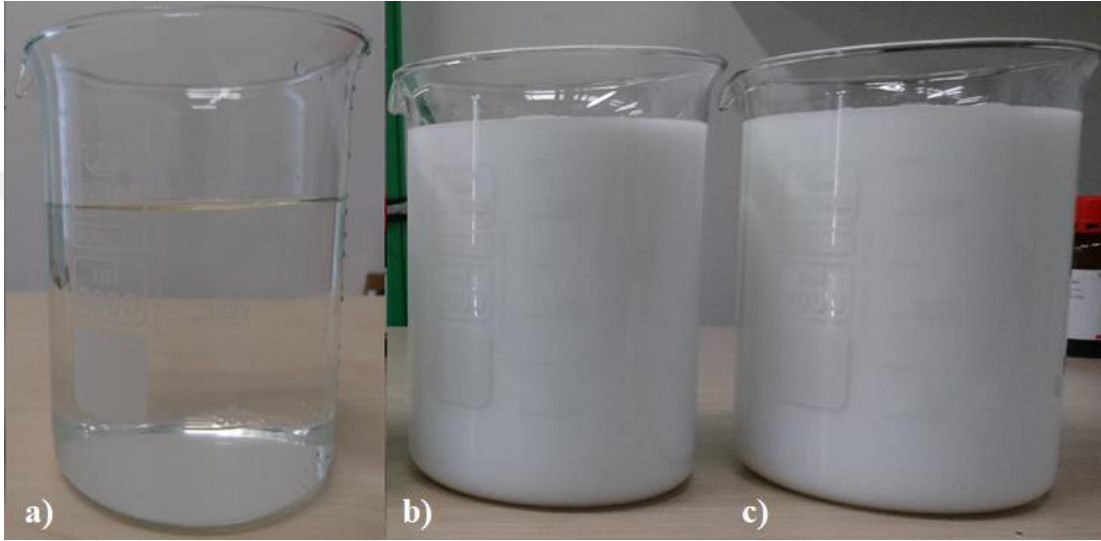
Tek bir şişede var olan 21.2 gram  $Al_2O_3$  nanoparçacıklarının hacmi, nanoparçacıkların özkütlesinin  $3.95 \text{ g/cm}^3$  olmasından dolayı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$V_{Al_2O_3} = \frac{21.2 g}{3.95 \frac{g}{cm^3}} = 5.367 cm^3 \quad (3.6)$$

$$\phi_{vol,1} = \frac{5.367cm^3}{2000cm^3} = 0.00268 \quad (3.7)$$

$$\phi_{vol,2} = \frac{5.367cm^3}{4000cm^3} = 0.00134 \quad (3.8)$$

Her birim şişeden küttelece %1'lik nanoakışkandan 2 litre, küttelece %0.5'lik nanoakışkandan 4 litre elde edilebilmektedir. Toplamda ise %20'lik akışkandan 4 (dört) şişe alınmıştır. Şekil 3.3'de hazırlanmış olan nanoakışkanlar gösterilmiştir.



Resim 3.3. Deneyselerde sıcak devrede kullanılan akışkanlar, a) şebeke suyu, b) küttelece %1'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su karışımı, c) küttelece %0.5'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su karışımı

### 3.2 Deneysel Süreç

Deneyseler yapılırken aşağıdaki adımlar sırasıyla takip edilmiştir;

- Sıcak su tankına yeterli miktarda akışkan doldurulur.
- Sıcak su tankı içerisindeki elektrikli rezistans ısıtıcı çalıştırılır ve tankın çıkışındaki vana açılır.
- Sıcak devre pompası çalıştırılır ve belli bir süre sıcak devrenin devridaim yapmasına ve akışkan sıcaklığının yükselmesine izin verilir.
- Soğuk akışkan tankına belli bir seviyeye ulaşana kadar şebekeden su verilir ve çıkış vanası açılır.
- Soğuk akışkan tankı belli bir seviyeye kadar doldurulduğunda soğuk devre pompası çalıştırılır ve seviyenin korunması için debiye göre şebekeden alınan su miktarı, hatta bağlanan bir vana yardımı ile ayarlanır.

- Şebeke suyu sıcaklığı yaklaşık üç dakika sonra sabit hale gelmektedir. Su seviyesinin olabildiğince düşük olması, suyun sıcaklığının korunabilmesi için oldukça önemlidir. Su seviyesi yüksek olduğunda uzun süren deneylerde, dış ortamın sıcaklığının yüksek olmasından dolayı su sıcaklığında artış meydana gelmektedir.
- Basınç fark ölçümlere giden pnömatik borularındaki sıkışan hava, açık uçlu vanalar yardımı ile alınır ve ölçümlerde herhangi bir hatanın önüne geçilir.
- Her iki devre için de vanalar yardımıyla istenilen debi değerleri ayarlanır ve sistemin durağan hale gelmesi beklenir.
- Plakalı ısı değiştirgeci girişi ve çıkışındaki sıcaklık değerleri sabit hale gelmesinin ardından, her yirmi saniyede bir 1 dakika boyunca sıcaklık, debi ve basınç düşümü değerleri alınır.
- Değerler alındıktan sonra bir devredeki debi sabit tutulur, diğer devredeki debi değiştirilir ve sistem durağan duruma ulaştıktan sonra veriler bu durum için tekrar alınır.
- Bu işlem her iki devrede dört farklı debi değeri için tekrarlanır ve bir deney seti tamamlanmış olur.
- Bütün bir deney seti için yapılan işlemler farklı zamanlarda iki kere daha tekrarlanır ve ölçümlerin tutarlılığı kontrol edilir.
- Yukarıdaki adımlar sıcak su tankında kullanılan üç farklı akışkan (su, %1'lik  $Al_2O_3$ /su ve %0.5'lik  $Al_2O_3$ /su karışımları) için tekrarlanır.

#### 4. DENEYSEL VERİLERİN ANALİZİ

Bu bölümde yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak plakalı ısı değiştirgecinin hem su hem de nanoakışkanın kullanıldığı durumlar için ısıl ve hidrolik analizi yapılırken uygulanan yöntemler anlatılmıştır.

##### 4.1 Plakalı Isı Değiştirgeci İçin Nusselt Sayısı Korelasyonlarının Oluşturulması

Deneysel verilerde kullanılan plakalı ısı değiştirgecinin ısıl karakteristiğinin belirlenmesi için Nusselt sayısı korelasyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Nusselt sayısı temel olarak taşınım ile aktarılan ısının, iletim ile aktarılan ısıya oranı olarak tanımlanabilir. Nusselt sayısı için korelasyon oluşturulurken kullanılan denklemler ve yöntemler bu bölümde anlatılacaktır.

Deneysel verilerde transfer edilen toplam ısı enerjisi, Denklem 4.1 ve Denklem 4.2’de verilen ısı transferi denklemleri kullanılarak hesaplanmaktadır [7].

$$Q = \dot{m}_{hot} C_{p,hot} (T_{hot,in} - T_{hot,out}) \quad (4.1)$$

$$Q = \dot{m}_{cold} C_{p,cold} (T_{cold,out} - T_{cold,in}) \quad (4.2)$$

Burada,  $\dot{m}$  kütle debisi olup,  $\dot{m} = \dot{V} \rho$  şeklinde hesaplanmaktadır.

Hesaplamalarda kullanılan akışkanların ısıl iletkenlik ( $k$ ), özgül ısı ( $C_p$ ), dinamik viskozite ( $\mu$ ), özkütle ( $\rho$ ) gibi termofiziksel özelliklerinin belirleneceği sıcaklıklar için ortalama sıcaklıklar ve duvar sıcaklıkları kullanılır. Ortalama sıcaklıklar, akışkanların ısı değiştirgecine giriş ve çıkışındaki sıcaklıkların ortalaması olarak, duvar sıcaklığı ise sıcak ve soğuk devrenin ortalama sıcaklıklarının ortalaması olarak hesaplanır.

$$T_{c,b} = \frac{T_{c,in} + T_{c,out}}{2} \quad (4.3)$$

$$T_{h,b} = \frac{T_{h,in} + T_{h,out}}{2} \quad (4.4)$$

$$T_w = \frac{T_{c,b} + T_{h,b}}{2} \quad (4.5)$$

Su ile yapılan deneylerin hesaplamaları yapılırken, suyun termofiziksel özellikleri literatürde belirtilmiş olan, sıcaklığa bağlı denklemlerin yardımı ile hesaplanmıştır. Bu denklemler aşağıda verilmiştir.

Özkütlenin hesabı için 0-150 °C arasındaki sular için geçerli olan Denklem 4.6 kullanılmıştır.

$$\rho = \frac{(999,83952 + 16,945196T - 7,9870401 \times 10^{-3}T^2 - \dots \dots 46,170461 \times 10^{-6}T^3 + 105,56302 \times 10^{-9}T^4 - 280,54253 \times 10^{-12}T^5)}{(1 + 16,89785 \times 10^{-3}T)} \quad (4.6)$$

Burada  $\rho$ 'nun birimi kg/m<sup>3</sup> iken, sıcaklıklar °C cinsindedir.

Özgül ısı (Cp) için ise geçerliliği 273 ile 430 Kelvin arasında olan bağıntılar kullanılmıştır.

$$Cp = 17,6611 - 0,147914T + 6,08619 \times 10^{-4}T^2 - 1,11867 \times 10^{-6}T^3 \dots \dots + 7,80297 \times 10^{-10}T^4 \quad (4.7)$$

Burada Cp'nin birimi kJ/kg-K, sıcaklıkların birimi Kelvindir.

Isıl iletkenlik için kullanılan bağıntı ise;

$$k = -0,61694 + 7,1785 \times 10^{-3}T - 1,167 \times 10^{-5}T^2 + 4,704 \times 10^{-9}T^3 \quad (4.8)$$

Bu bağıntı 273 ile 400 Kelvin arasında geçerli olup, k'nın birimi W/mK iken, sıcaklık değerleri Kelvin cinsindedir

Dinamik viskozite için kullanılan bağıntı;

$$\mu = (\exp(-3,7188 + (\frac{578,919}{-137,546 + T}))) \times 10^{-3} \quad (4.9)$$

Burada viskozitenin birimi (kg/ms) iken, sıcaklıklar Kelvin cinsindedir.

Nanoakışkan ile yapılan deneylerin hesaplama aşamasında ise nanoakışkanların termofiziksel özellikleri daha önce Bölüm 1.3.1'de de anlatılan modeller kullanılarak yapılmıştır.

Nanoakışkanların özkütlesinin belirlenmesinde Pak ve Cho [12]'nin modeli kullanılmıştır. Bu model aşağıda tekrar verilmiştir.

$$\rho_{nf} = \rho_p \phi + \rho_f (1 - \phi) \quad (4.10)$$

Burada  $\rho_p$  nanoparçacıkların özkütlesi,  $\rho_f$  kullanılan baz akışkanın özkütlesi,  $\phi$  ise nanoakışkanın hacimsel konsantrasyonudur.

Nanoakışkanların özgül ısısı ise;

$$C_{p_{nf}} = \phi C_{p_p} + (1 - \phi) C_{p_f} \quad (4.11)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Burada  $C_{p_p}$  nanoparçacıkların özgül ısısı,  $C_{p_f}$  ise kullanılan baz akışkanın özgül ısısıdır.

Nanoakışkanların viskozitesi ise Batchelor [17]'un geliştirmiş olduğu model kullanılarak belirlenmiştir. Bu modelin kullanılma nedeni ise Batchelor'un nanoakışkan içerisindeki nanoparçacıkların Brown hareketlerinin etkisini de modele dahil etmesidir. Bu model aşağıda verilmiştir.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \mu_f \quad (4.12)$$

Isıl iletkenlik değeri ise Yu&Choi[26]'nin geliştirmiş olduğu ısıl iletkenlik modeli ile hesaplanmıştır. Bu model ile ilgili detaylı açıklama Bölüm 1.3.1'de verilmiştir.

$$k_{pe} = \frac{[2(1 - \gamma) + (1 - \beta)^3(1 + 2\gamma)\gamma]}{(\gamma - 1) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)} k_p \quad (4.13)$$

$$k_{nf} = \frac{k_{pe} + 2k_f + 2(k_{pe} - k_f)(1 - \beta)^3 \phi}{k_{pe} + 2k_f - (k_{pe} - k_f)(1 - \beta)^3 \phi} k_f$$

Toplam ısı transferi katsayısı (U) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$Q = UA\Delta T_{LM} \quad (4.14)$$

Burada Q transfer edilen toplam ısı, A toplam ısı transferi alanı ve  $\Delta T_{LM}$  logaritmik ortalama sıcaklık farkıdır. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı Denklem 4.15 yardımı ile hesaplanır.

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln((T_{h,in} - T_{c,out}) / (T_{h,out} - T_{c,in}))} \quad (4.15)$$

Denklem 4.14 ,le hesaplanan toplam ısı transferi katsayısı ve duvarın ısıl iletkenlik değeri ( $k_w$ ) ile sıcak ve soğuk devrenin ısı transferi katsayılarının belirlenmesinde

Denklem 4.16' kullanılmaktadır. Bu denklemde kirlenme faktörleri dikkate alınmamıştır.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{t}{k_w} \quad (4.16)$$

Plakalı ısı değiştirgeçlerinde akışın Reynolds sayısı (Re) ve kütleli hızı ( $G_c$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_c = \frac{m\dot{x}}{N_{cp} b L_w} \quad (4.17)$$

Burada  $N_{cp}$  ısı değiştirgecinin geçiş sayısıdır, b kanalların derinliği  $L_w$  ise plakaların akış alanının enidir.  $D_e$  ise eşdeğer çap olup,  $D_e \sim 2b$  şeklinde tanımlıdır.

$$Re = \frac{G_c D_e}{\mu} \quad (4.18)$$

Deneyler sonucu elde edilen Nusselt sayıları ise Denklem 4.19'deki gibi hesaplanır.

$$Nu = \frac{h D_h}{k_f} \quad (4.19)$$

Denklem 4.19'da h ısı transferi katsayısı,  $k_f$  akışkanın ısı iletkenliği ve  $D_h$  hidrolik çaptır. Hidrolik çap,  $D_h = 2b/\phi$  olarak tanımlı olup,  $\phi$  ısı değiştirgeci plakalarının genişletme oranıdır.

Nusselt sayısı, plakalı ısı değiştirgeçleri gibi karmaşık bir akış alanı için Reynolds sayısı, Prandtl sayısı ve akışkanın duvar ve ortalama sıcaklıklardaki viskozite değerlerinin oranına bağlı olan korelasyonlar ile belirlenir. Yapılan literatür taraması sonucu, plakalı ısı değiştirgeçleri için kullanılan Nusselt sayısı korelasyonunun formu Denklem 4.20'de verilmiştir [11].

$$Nu = C Re^a Pr^b \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^d \quad (4.20)$$

Denklem 4.19 ve 4.20'nin birlikte kullanılması ile ısı transferi katsayıları aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$h = \left( \frac{k_f}{D_h} \right) \left( C Re^a Pr^b \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^d \right) \quad (4.21)$$



Denklem 4.20’de b ve d katsayıları literatürde sırasıyla 1/3 ve 0.14 olarak belirtilmiştir ve hesaplamalarda bu değerler kullanılmıştır [11]. Değerleri bilinmeyen ‘a’ ve ‘C’ katsayıları ise Wilson Plot Yöntemi kullanılarak belirlenmektedir. Buna göre Denklem.4.21 hem sıcak hem de soğuk devre için yazılıp, bu denklemler ile birlikte Denklem.4.16’nın da kullanılmasıyla ‘a’ ve ‘C’ katsayıları belirlenir.

$$h_h = \frac{k_f}{D_h} C_h \text{Re}_h^a \text{Pr}_h^b \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_h^d \quad (4.22)$$

$$h_c = \frac{k_f}{D_h} C_c \text{Re}_c^a \text{Pr}_c^b \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_c^d \quad (4.23)$$

Ali Hashmi [65]’nin yaptığı çalışma sonucu oluşturduğu yöntem, başlangıç olarak bir ‘a’ katsayısı için Denklem 4.22 ve Denklem 4.23, Denklem 4.16’da yerine yazıldığı takdirde,

$$\frac{1}{U} - \frac{t}{k_f} = \frac{1}{\frac{k_c}{D_h} C_c \text{Re}_c^a \text{Pr}_c^{0.33} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_c^{0.14}} + \frac{1}{\frac{k_h}{D_h} C_h \text{Re}_h^a \text{Pr}_h^{0.33} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_h^{0.14}} \quad (4.24)$$

Denklem 4.24’de gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\left( \frac{1}{U} - \frac{t}{k_f} \right) \left( \frac{k_c}{D_h} \text{Re}_c^a \text{Pr}_c^{0.33} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_c^{0.14} \right) = \frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_h} \frac{\frac{k_c}{D_h} \text{Re}_c^a \text{Pr}_c^{0.33} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_c^{0.14}}{\frac{k_h}{D_h} \text{Re}_h^a \text{Pr}_h^{0.33} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_h^{0.14}} \quad (4.25)$$

Elde edilen bu denklemde sol taraf Y1,  $1/C_h$  çarpanına sahip terimi X1 olarak adlandırıp, 0 ile 1 arasında herhangi bir başlangıç a katsayısı için X1-Y1 grafiği çizdirilir. Bu grafikte doğrunun eksenini kestiği nokta  $1/C_c$ , doğrunun eğimi ise  $1/C_h$  olur.  $C_c$  ve  $C_h$ ’ın belirlenmesinden sonra Denklem 4.24’in yeniden düzenlenmesi ile birlikte aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\left( \frac{1}{U} - \frac{t}{k_w} - \frac{1}{\left( C_h \frac{k_h}{D_h} \text{Re}_h^a \text{Pr}_h^{0.33} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_h^{0.14} \right)} \right) \cdot \frac{k_c}{D_h} \text{Pr}_c^{0.33} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_c^{0.14} = \frac{1}{C_c} \cdot \frac{1}{\text{Re}_c^a} \quad (4.26)$$

Burada daha önceki hesaplamada bulunan  $C_h$  değeri denklemde kullanılır. Denklem sağı tarafı Z olarak adlandırılıp, her iki tarafın logaritması alındığında;

$$\ln(z) = -\ln(C_c) - a \cdot \ln(Re_c) \quad (4.27)$$

elde edilir. Denklem sağı tarafı Y2,  $\ln(Re_c)$  terimi X2 olarak adlandırılıp, X2-Y2 grafiğı çizdirildiğinde, grafiğın ekseni kestiğı nokta  $-\ln C_c$ , eğimi ise 'a' katsayısı olur. Böylece herhangi bir başlangıç 'a' değeri için yeni bir 'a' değeri elde edilir. Bu işlemler elde edilen 'a' katsayısı için tekrarlanır ve değerler arasındaki fark  $10^{-5}$ 'ten küçük olana kadar işlemler iteratif olarak devam eder.

Kullanılan iteratif yöntemin işlemleri şu şekilde sıralanabilir:

- Başlangıç 'a' değeri ile elde edilen X1-Y1 lineer grafiğinden  $C_h$  değerinin belirlenmesi.
- X2 ve Y2'nin logaritmik grafiğinden 'a' katsayısının yeni değerinin belirlenmesi.
- Yeni bulunan 'a' değerinin başlangıç değeri olarak kullanılması ve işlemlerin tekrarlanması.
- 'a' katsayısının değerleri arasındaki farkın  $10^{-5}$ 'ten küçük olana kadar bu işlemlerin devam etmesi,
- İstenilen yakınsama değerine ulaşılmasının ardından, işlemlerin bitirilmesi.

Oluşturulan Nusselt sayısı korelasyonunun katsayılarını belirlemek amacıyla yapılan bütün işlemler için MATLAB kodu yazılmıştır. Yazılan kod Ek-E'de verilmiştir.

#### 4.2 Isı Transferi Katsayısı Hesabı

Plakalı ısı değıştirgeci için Nusselt sayısı korelasyonlarının oluşturulmasının ardından, ısı transferi katsayıları Nusselt sayısının tanımından kolaylıkla elde edilebilir. Nusselt sayısı kısaca taşınım ile ısı transferinin, iletimle ısı transferine oranı olarak tanımlanabilir. Hesaplamalar için Denklem 4.19 kullanılırsa; Denklem 4.28 elde edilir.

$$h = \frac{Nu \cdot k_f}{D_h} \quad (4.28)$$

Nananoakışkan kullanımı ile ısı transferi katsayısındaki iyileşme oranı ise nanoakışkan ile elde edilen ısı transferi katsayılarının, su ile elde edilen ısı transferi katsayılarına oranı olarak tanımlanmaktadır [2].

$$\frac{h_{nf}}{h_f} = \frac{Nu_{nf}}{Nu_f} \cdot \frac{k_{nf}}{k_f} \quad (4.29)$$

Denklem 4.29'dan görüldüğü üzere ısı transferindeki iyileşme oranı, iki parçadan meydana gelmektedir. Bunlar Nusselt sayısında elde edilen iyileşme oranı ve ısıl iletkenlik değerinde elde edilen iyileşme oranıdır. Isı transferi katsayısındaki iyileştirme ise bu iki oranın çarpımına eşittir.

### 4.3 Plakalı Isı Değiştirgeci İçin Sürtünme Katsayısı Korelasyonlarının Oluşturulması

Plakalı ısı değiştirgeçlerinde toplam basınç düşümü kanallarda sürtünmeden dolayı gerçekleşen basınç düşümü ile ısı değiştirgecinin giriş ve çıkış portlarında meydana gelen basınç düşümünün toplamıdır [7], [11], [66].

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{port} + \Delta P_{ch} \quad (4.30)$$

Deneyleerde alınan basınç düşümü verileri toplam basınç düşümü değerleridir. Sürtünme katsayılarının hesaplanabilmesi için portlarda meydana gelen basınç düşümü Denklem 4.31'den hesaplanır ve toplam basınç düşümü ile olan farkı alınır. Bu değer kanallarda sürtünmeden dolayı meydana gelen basınç düşümüne eşittir [11].

$$\Delta P_{port} = 1.4 N_p \frac{G_p^2}{2\rho} \quad (4.31)$$

Burada  $N_p$ , ısı değiştirgecinin geçiş sayısı,  $G_p$  giriş ve çıkışlardaki kütle hız olup aşağıdaki gibi tanımlıdır [11].

$$G_p = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi D_p^2}{4}} \quad (4.32)$$

$$\Delta P_{ch} = \Delta P_{tot} - \Delta P_{port} \quad (4.33)$$

Kanallarda oluşan basınç düşümü ise aşağıdaki gibi tanımlanır [11].

$$\Delta P_{ch} = 4f \frac{L_{eff} N_p G_c^2}{D_h 2\rho} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{-0.17} \quad (4.34)$$

Burada  $f$  sürtünme katsayısı,  $L_{eff}$  akışkanın giriş ve çıkış portları arasında aldığı yolun uzunluğu,  $G_c$  kanallardaki kütlelesel hızdır.

Daha önce de bahsedildiği gibi, her bir deney verisi için portlarda oluşan basınç düşümü hesaplanmış ve Denklem 4.33'ün yardımı ile kanallarda oluşan basınç düşümü değeri belirlenmiştir. Daha sonra Denklem 4.34 kullanılarak her veri için sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Plakalı ısı değiştirgeçleri için sürtünme katsayısı korelasyonlarının formu Kakaç S. [11] tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$f = \frac{A}{Re^b} \quad (4.35)$$

Hesaplanan sürtünme katsayıları ile Reynolds sayılarının grafiği çizdirilmiş ve Excel'in eğri uydurma yöntemi ile korelasyonlar oluşturulmuştur.

#### 4.4 Belirsizlik Hesabı

Deneyel çalışmalarda belirsizlik analizi çok önemli bir konuma sahiptir. Deneyler sırasında ölçüm aletlerinin hassasiyeti sebebiyle belirsizlikler meydana gelmektedir. Bu çalışmada belirsizlikler için kullanılan yöntem matematiksel hata analizi yöntemidir. Bu yöntemle göre belirtilen eşitlik Denklem 4.36'da verilmiştir [67].

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

Kullanılan ölçüm aletlerinin belirsizlik oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ölçümlerdeki belirsizlik oranları

| Sıcaklık | Basınç Düşümü | Debi |
|----------|---------------|------|
| %0.4     | %0.075        | %0.5 |

Buna göre deneyler sonucu elde edilen toplam ısı transferi miktarı ( $Q$ ), toplam ısı transferi katsayısı ( $U$ ), Nusselt sayısı ( $Nu$ ) ve sürtünme katsayısındaki maksimum belirsizlik oranları belirlenmiştir.

## 5. DENEY VERİLERİNİN ISIL VE HİDROLİK ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Plakalı ısı değiştirgeçleri içerisinde akışkan olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanlarının kullanımının etkilerini belirlemek için su ve iki farklı konsantrasyonda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkan ile deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda her durum için Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı için korelasyonlar oluşturulmuştur.

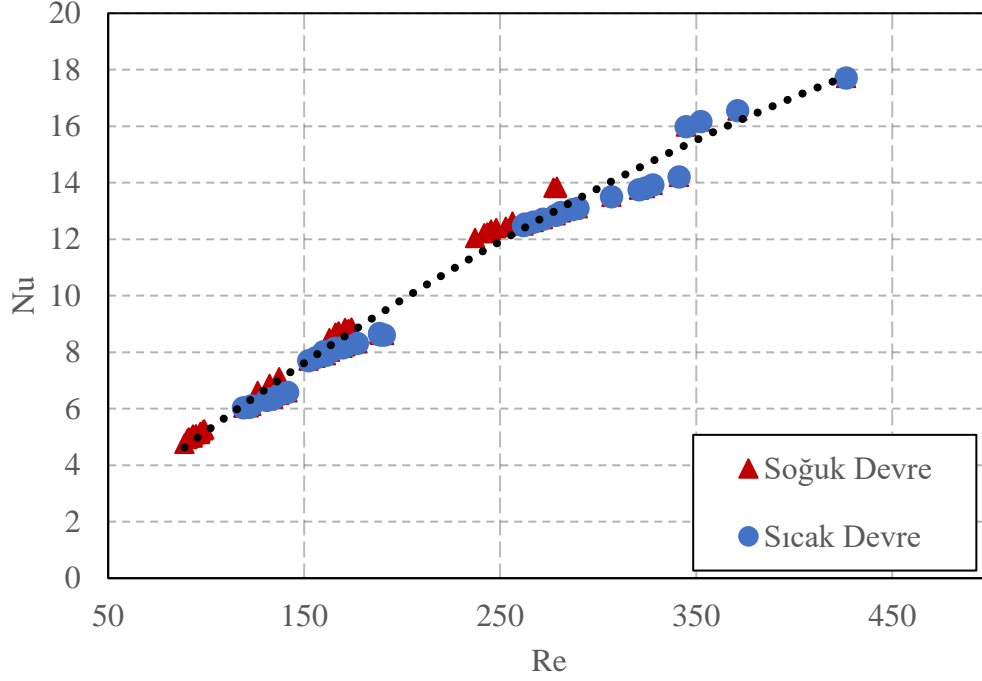
### 5.1 Isıl Sonuçlar

Deneyler sonucu alınan veriler hesaplamalarda kullanılmadan önce eleme işleminden geçirilmiştir. Böylece hesaplamalarda hatalı veri kullanımının etkileri azaltılmaya çalışılmıştır. Enerjinin korunumu ilkesinden ve enerji soğuk ve sıcak akışkanlar arasında transfer olduğundan dolayı akışkanlar arasındaki ısı transferinin birbirine eşit olması beklenmiştir [6], [7]. Toplam ısı transferi miktarı her iki tarafın verileri kullanılarak hesaplanmış ve bu değerden %8'den fazla farklılık gösteren veriler elenmiştir.

Öncelikle su ile yapılan deneyler için analizler yapılmış ve daha önce Bölüm 4'de de anlatıldığı gibi Nusselt sayısı için korelasyon geliştirilmiştir. Geliştirilen korelasyon Denklem 5.1'de verilmiştir. Deneysel verilerin korelasyona uyumu Şekil 5.1'de gösterilmektedir.

$$Nu = 0.0508 Re^{0.8754} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (5.1)$$

Şekil 5.1'den de görülebileceği gibi deney verilerinin oluşturulan korelasyona uyumu oldukça iyi seviyede olup R<sup>2</sup> değeri 0.9841'dir. Çalışmanın bu kısmında her iki devrede de (sıcak ve soğuk devreler) şebeke suyu kullanıldığı için korelasyonun oluşturulmasında bütün veriler kullanılmıştır.



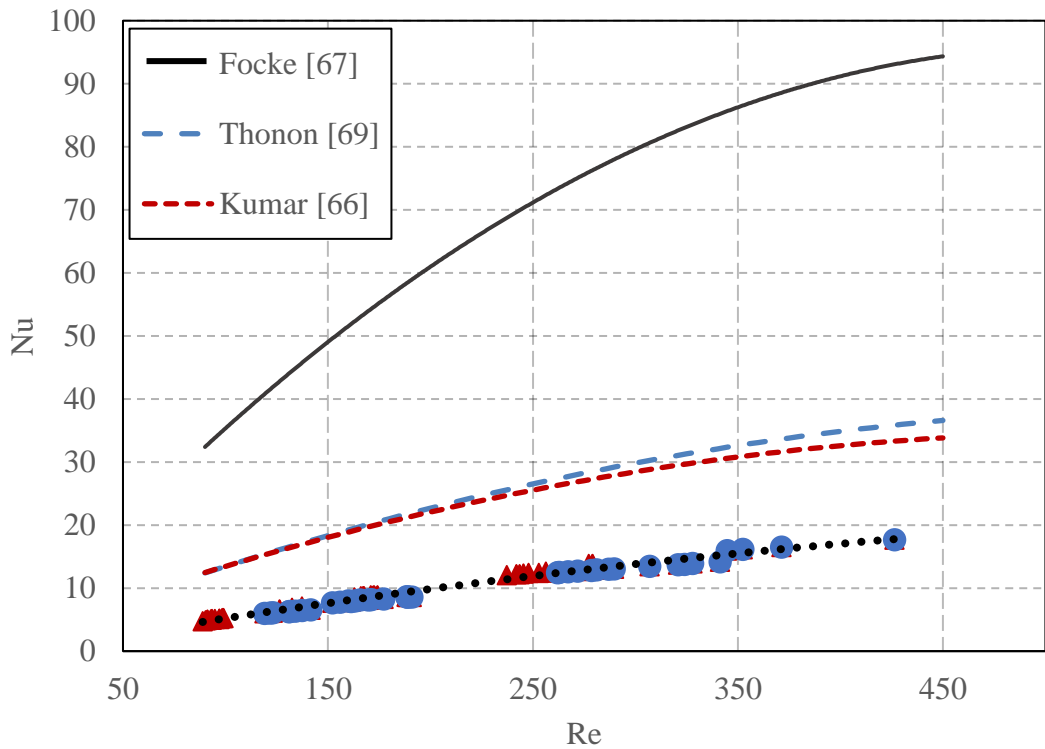
Şekil 5.1. Su ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Nusselt sayısı korelasyonu

Elde edilen Nusselt korelasyonu her iki devrenin verileri ile uyumludur. Geliştirilen yeni Nusselt korelasyonu literatürde plakalı ısı değiştirgeçleri için geliştirilmiş olan korelasyonlarla da karşılaştırılmıştır. Literatürdeki Nusselt korelasyonları Çizelge 5.1’de verilmiştir

Çizelge 5.1. Plakalı ısı değiştirgeçleri için literatürde bulunan bazı Nusselt sayısı korelasyonları

| Çalışma Sahibi | Reynolds Sayısı | Korelasyon   |
|----------------|-----------------|--|
| Kumar [68]     | >10             | $Nu = 0.348Re^{0.663}Pr^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.17}$    |
| Focke [69]     | 150-600         | $Nu = 0.57Re^{0.7}Pr^{0.5}$  |
| Emerson [70]   | 40-1000         | $Nu = 0.52Re^{0.61}Pr^{1/3}$   |
| Thonon [71]    | 450-5250        | $Nu = 0.2946e^{0.7}Pr^{\frac{1}{3}}$   |
| Fatih [7]      | 450 – 5250      | $Nu = 0.32673Re^{0.6125}Pr^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$ |

Plakalı ısı değiştirgeçlerinde akış, plakaların chevron açıları, baskı deseni, baskı desenin derinliği gibi bir çok parametre ile değiştirilip düşük Reynolds sayılarında bile kanallar içerisinde türbülanslı akış elde edip, ısı transferi önemli ölçüde arttırılabilmektedir. Bu durum neticesinde literatürde plakalı ısı değiştirgeçleri için kullanılan korelasyonlar sadece deneylerde kullanılan ısı değiştirgeçlerine ve plakalara özel hale gelmektedir. Çizelge 5.1'deki korelasyonların ve bu çalışmada geliştirilmiş olan korelasyonun Reynolds sayısına göre davranışları çizdirildiğinde bütün korelasyonlar Reynolds sayısı ile benzer şekilde artsa da birbirlerinden farklı oldukları görülmektedir.



şekil 5.2. Oluşturulan Nusselt sayısı korelasyonunun literatürde bulunan korelasyonlar ile karşılaştırılması

Yapılan deneyler sonucunda oluşturulan Nusselt sayısı korelasyonu ile literatürde plakalı ısı değiştirgeçleri için kullanılan korelasyonların karşılaştırması şekil 5.2'de yapılmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi her plakalı ısı değiştirgecinin ısı karakteristikleri, kullanılan plakaların fiziksel yapısına oldukça bağlıdır. Bu nedenle farklı plaka kullanan ısı değiştirgeçleri için oluşturulan Nusselt sayısı korelasyonlarını karşılaştırmak çok anlamlı değildir. şekil 5.2'de de görüldüğü zere literatürde bulunan korelasyonlar kullanıldığında, yeni oluşturulan korelasyona

oranla Nusselt sayıları oldukça yüksektir. Thonon [71] ve Kumar [68]'ın plakalı ısı değiştirgeçleri için oluşturmuş oldukları Nusselt sayısı korelasyonları birbirlerine oldukça yakın olmakla beraber, bu çalışma sonucu elde edilen korelasyon ile karşılaştırıldığında, Nusselt sayıları daha yüksek elde edilmektedir. Focke [69]'nin belirtmiş olduğu korelasyon ise diğer korelasyonlardan oldukça yüksek Nusselt sayısı sağlamaktadır. Karşılaştırması yapılan bu korelasyonların ortak noktası ise Reynolds sayısı ile olan davranışlarıdır. Bütün korelasyonlar benzer bir davranış sergilemektedir.

Su ile yapılan deneylerin verileri için yapılan işlemler nanoakışkan deney verileri için tekrarlanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan nanoakışkan ısı iletkenlik ve viskozite modelleri Bölüm 4'de anlatılmıştır. Isıl iletkenlik modelinin hesaplamalardaki etkisini belirlemek amacıyla iki farklı ısı iletkenlik modeli ile hesaplamalar yapılmıştır. Bunlar Maxwell ve Yu-Choi ısı iletkenlik modelleridir. Sonuçlar incelediğinde kullanılan nanoakışkanların konsantrasyonlarının çok düşük olmasından dolayı ısı iletkenlik modelinin Nusselt korelasyonunda etkisi bu çalışma için göz ardı edilebilecek seviyededir. Bu nedenle hesaplamaların devamında Yu-Choi ısı iletkenlik modeli kullanılmıştır. Ayrıca Nusselt korelasyonu için yapılan hesaplamalarda iki devrenin akışkanlarının farklı olmasından dolayı sadece sıcak devrenin verileri kullanılmıştır. Kütlece %1'lik ve %0.5'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı için geliştirilen Nusselt sayısı korelasyonları aşağıda verilmiştir. Denklem 5.2 Kütlece %1'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı için geliştirilen Nusselt sayısı korelasyonu iken, Denklem 5.3 ise kütlece %0.5'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı içindir. Geliştirilen korelasyonlar deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.3'de görülebilmektedir. Kütlece %1'lik ve %0.5'lik nanoakışkanlar için R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla 0.9893 ve 0.9896 olmuştur.

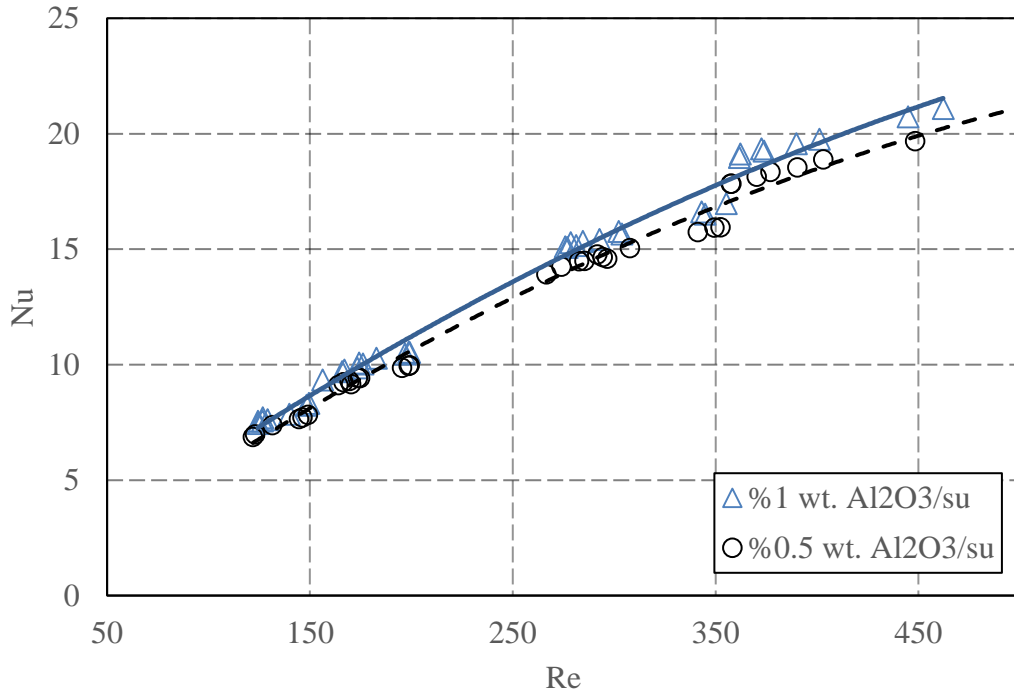
$$Nu = 0.0755 Re^{0.832} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (5.2)$$

$$Nu = 0.0722 Re^{0.830} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (5.3)$$

Su ve kütlece %1'lik ve %0.5'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanları için elde edilen Nusselt korelasyonlarının grafikleri Şekil 5.4'de verilmiştir. Buna göre kütlece %1'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı Nusselt sayısında ortalama %17 oranında bir iyileştirme



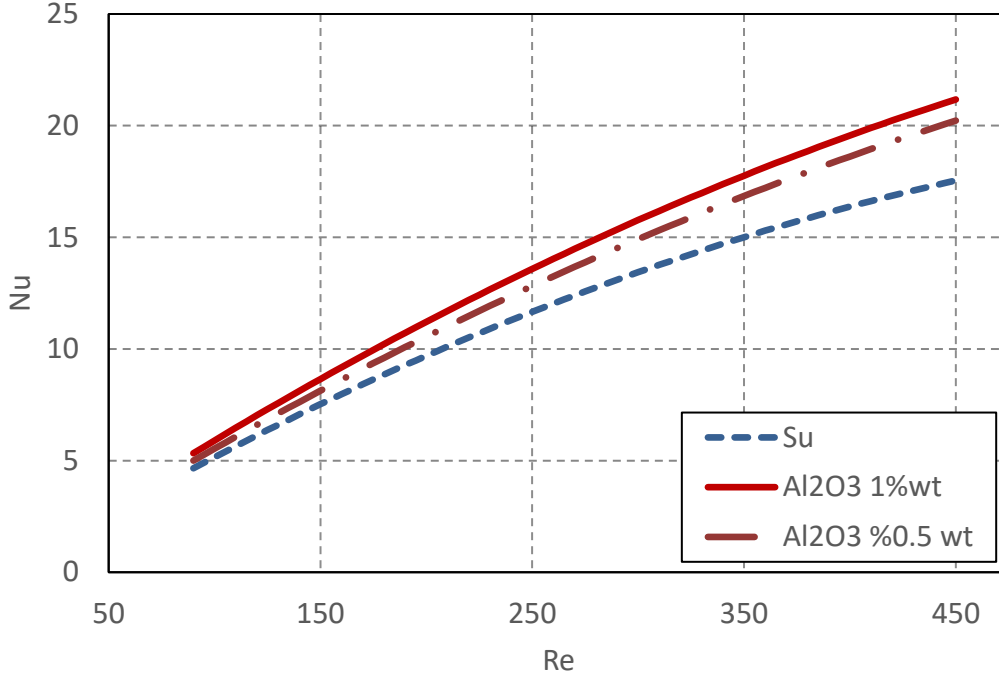
sağlarken, kütlece %0.5'lik  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanı ortalama %10.6 oranında artış sağlamaktadır.



Şekil 5.3. İki nanoakışkan konsantrasyonu için geliştirilmiş Nusselt sayısı korelasyonları

Deneylerde kullanılan bütün akışkanlar için Nusselt sayısı korelasyonlarının belirlenmesinden sonra ısı transferi katsayıları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Isı transferi katsayıları daha önce Bölüm 4'de de anlatıldığı gibi Nusselt sayısının tanımından kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Şekil 5.5'de üç durum için elde edilen ısı transferi katsayıları gösterilmiştir.

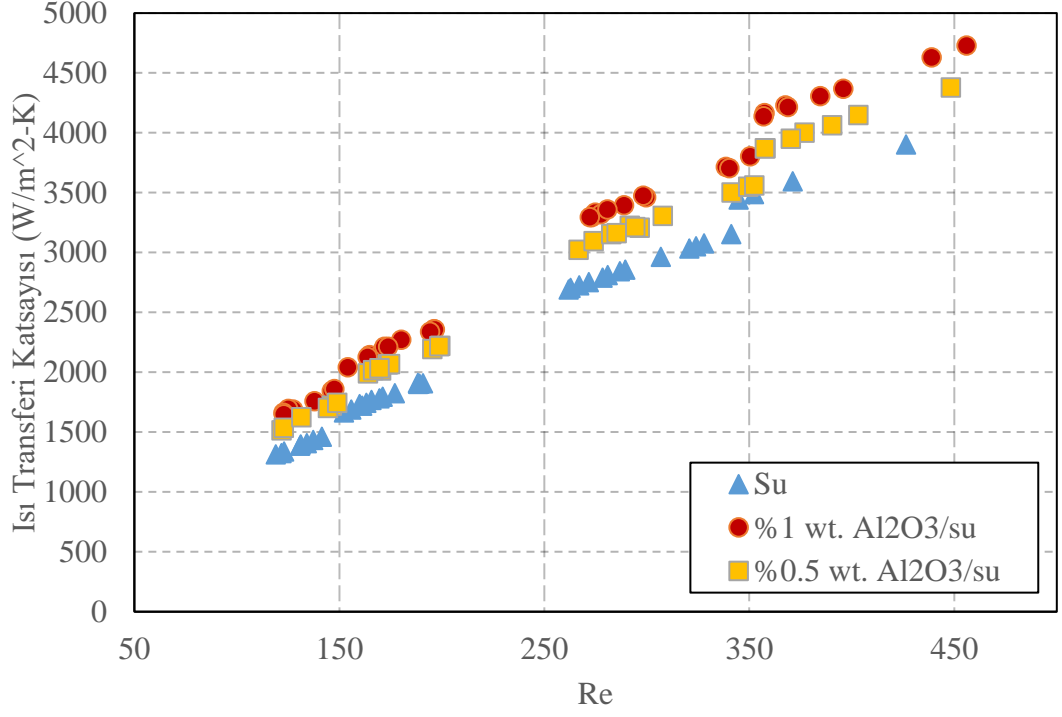
Nanoakışkan kullanımı ile ısı transferi katsayılarında önemli derecede iyileştirme gözlenmiştir. Şekil 5.5'de su ve kütlece %1'lik ve %0.5'lik  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanlarının ısı transferi katsayıları karşılaştırılmıştır. Şekilden de görülebileceği gibi,  $Al_2O_3/su$  nanoakışkan konsantrasyonu arttıkça, ısı transferi katsayısındaki iyileştirme oranı da artmaktadır. Isı transferi katsayısında kütlece %1'lik  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanı suya oranla ortalama %18.2, kütlece %0.5'lik  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanı ise ortalama %11.1 iyileştirme sağlamıştır.



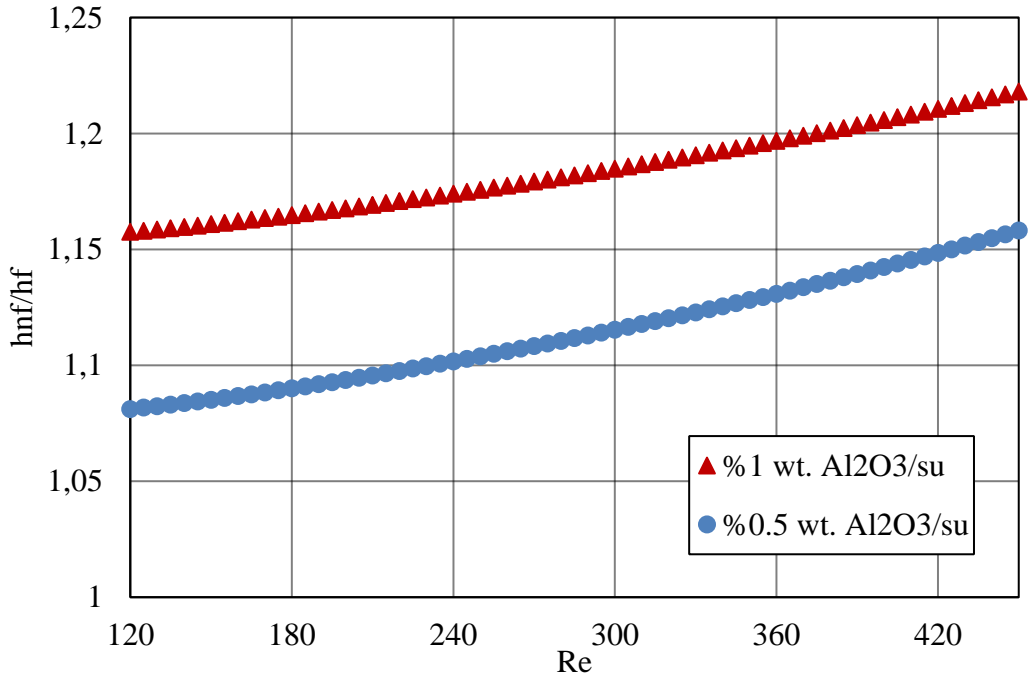
Şekil 5.4 Su ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Nusselt sayısı korelasyonlarının karşılaştırılması

Nanoakışkan kullanımı ile sağlanan ısı transferi katsayısındaki iyileştirme, Nusselt sayısındaki iyileştirme oranı ve ısıl iletkenlikteki iyileştirme oranı olmak üzere iki ayrı parçadan oluştuğu Bölüm 4’de detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Buna göre ısı transferindeki iyileştirme oranı bu iki parçanın çarpımına eşittir. Farklı Reynolds sayılarındaki ısı transferindeki iyileştirme oranları Şekil 5.6’da verilmiştir.

Şekil 5.6’da gösterilen iyileştirme oranlarına bakıldığında, her iki nanoakışkan konsantrasyon değerinde de benzer bir davranış göze çarpmaktadır. Reynolds sayısı arttıkça iyileştirme oranı da artış göstermektedir. Değerler göz önüne alındığında, bu çalışma için Nusselt sayısındaki iyileştirme miktarları, ısıl iletkenlik değerlerinde iyileştirme miktarlarından daha etkili bir rol oynamıştır. Bunun nedeni kullanılan nanoakışkanların konsantrasyonlarının oldukça düşük olmasıdır.



Şekil 5.5. Deneysel sonuçlarda elde edilen ısı transferi katsayılarının karşılaştırılması



Şekil 5.6. Isı transferi katsayısında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı kullanımı ile elde edilen iyileştirme oranları

Çizelge 5.2’de Reynolds sayısı 400 iken ısı transferi katsayısındaki, Nusselt sayısındaki ve ısı iletkenlikteki iyileştirme oranları verilmiştir. Hesaplamalarda ısı iletkenlik modelinin etkisini görebilmek amacıyla Maxwell ve Yu-Choi ısı iletkenlik

modelleri kullanılmıştır. Nusselt sayısı için korelasyon oluştururken ısı iletkenlik modoelinin etkisi ihmal edilebilecek düzeyde olduğundan, tek bir Nusselt sayısı korelasyonu kullanılmıştır.

Çizelge 5.2. Reynolds sayısı 400 iken elde edilen iyileştirme oranları

| Nanoakışkan Hacimsel Oranı | $\frac{Nu_{nf}}{Nu_f}$ | $\frac{h_{nf}}{h_f}$<br>(Maxwell Model) | $\frac{h_{nf}}{h_f}$<br>(Yu-Choi Model) |
|----------------------------|------------------------|---|---|
| %0.27                      | 1.1945                 | 1.2038                                  | 1.2057                                  |
| %0.13                      | 1.1370                 | 1.1414                                  | 1.1423                                  |

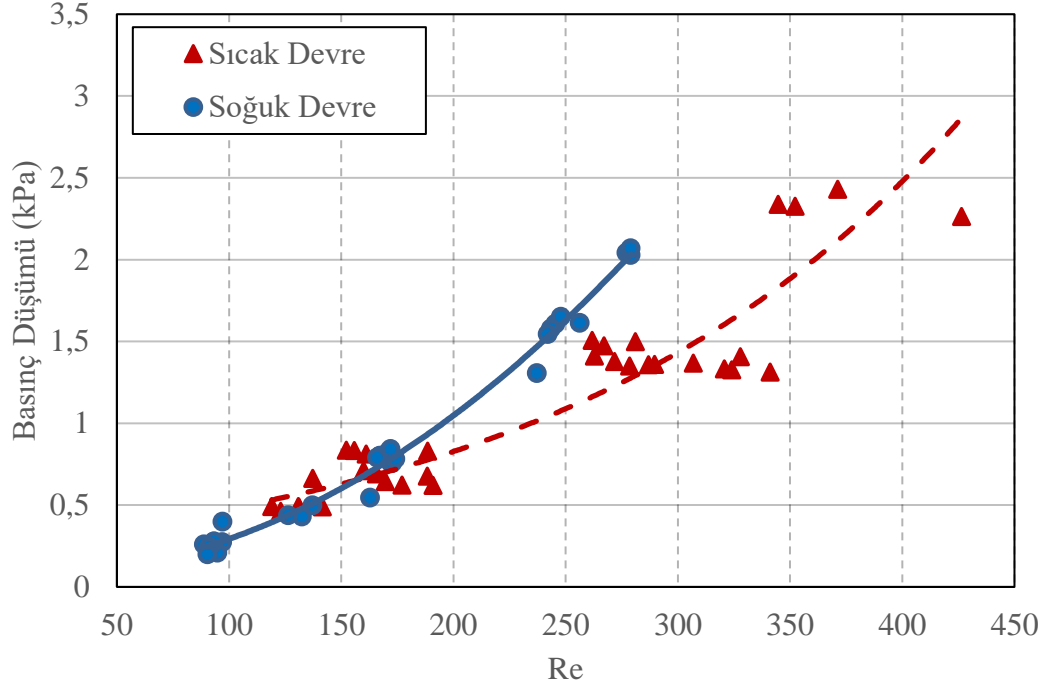
Elde edilen değerlerden de görüleceği üzere Nusselt sayısındaki iyileşme oranı, ısı iletkenlikteki iyileşme oranından baskındır. Kullanılan modellerin etkisi ise, nanoakışkan konsantrasyonları düşük olduğundan yok denecek kadar azdır. Daha yüksek konsantrasyonlara sahip nanoakışkanlarda bu durum değişebilir.

## 5.2 Hidrolik Sonuçlar

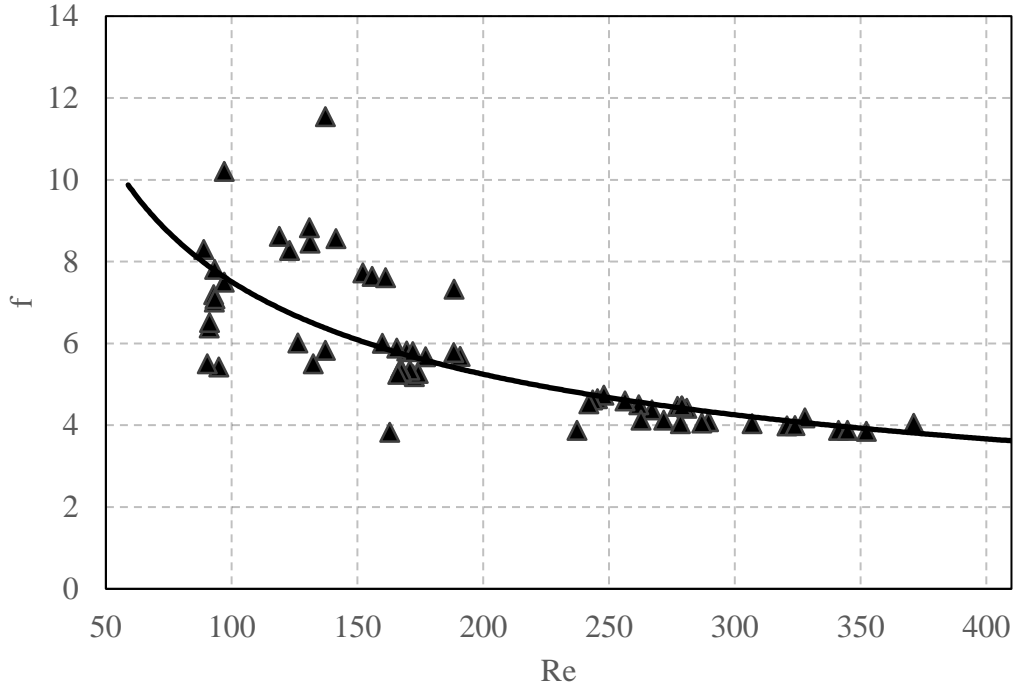
Deneyler sonucu elde edilen veriler ile nanoakışkan kullanımının plakalı ısı değiştirgecinin hidrolik karakteristiğine olan etkileri de incelenmiştir. Hesaplamalar Bölüm 4’de anlatılan yöntemler uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında alınan basınç düşümü değerleri, ikinci bir elemeye tabii tutulmuştur. Sürtünme katsayıları için korelasyonlar oluşturulurken EXCEL’in eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır. Su ile yapılan deneyler sonucu oluşturulan korelasyon Denklem 5.4’de verilmiştir.

$$f = 81.15 \text{Re}^{-0.517} \quad (5.4)$$

Su ile yapılan deneyler sonucu elde edilen basınç düşümü değerleri ve oluşturulan sürtünme katsayısı korelasyonu Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir. Buna göre deney verileri ile oluşturulan korelasyon eğrileri uyum içerisindedir.



Şekil 5.7. Su ile yapılan deneyler sırasında sıcak ve soğuk devre için basınç düşümü değişimleri



Şekil 5.8. Sürtünme katsayısı için elde edilen korelasyon

Elde edilen sürtünme katsayısı korelasyonu ile verilerin uyum içerisinde olduğu Şekil 5.8'de görülebilmektedir. Buna göre sürtünme katsayılarının Reynolds sayısının daha düşük olduğu durumlarda daha büyük olduğu, Reynolds sayısının

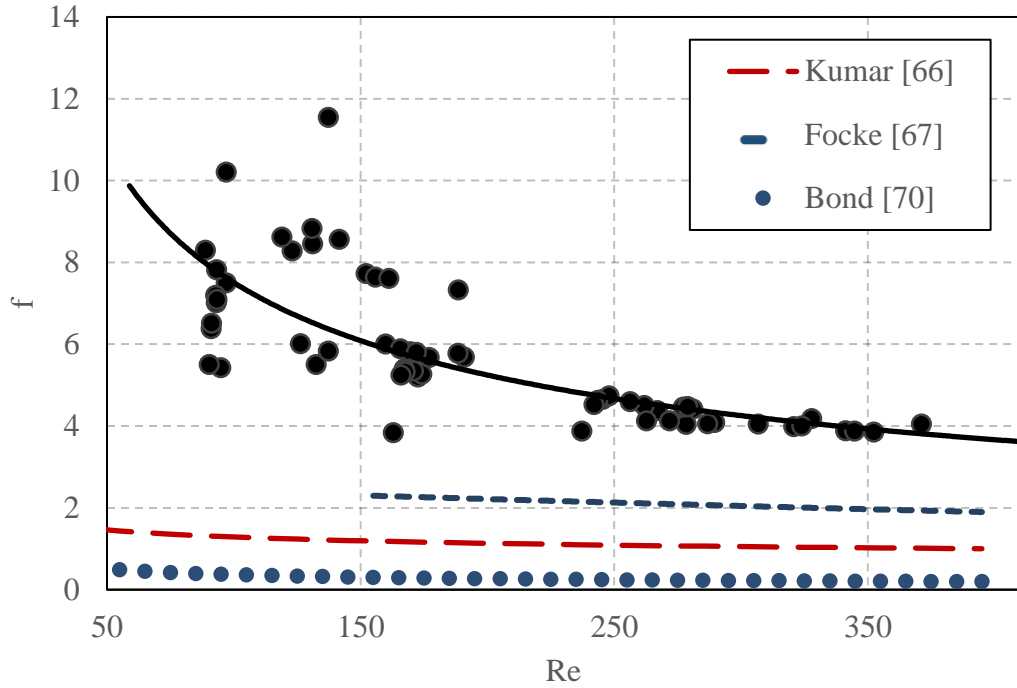
artması ile viskozitenin etkisinin azalmasından dolayı sürtünmeden kaynaklanan kayıpların daha az hale geldiği görülmektedir.

Plakalı ısı değiştirgeçleri için literatürde bulunan sürtünme katsayısı korelasyonları Çizelge 5.3’de paylaşılmıştır. Buna göre aynı Reynolds sayısı aralığında korelasyonlar çizdirildiğinde, bu çalışmada elde edilen sürtünme katsayılarının, literatürdeki korelasyonlar ile belirlenen değerlerden yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni olarak sürtünme katsayısının kullanılan plakalı ısı değiştirgecinin plaka malzemesine, plakaların desenine ve desenin baskı derinliği gibi geometrik ölçülerine bağlı olmasıdır. Kullanılan ısı değiştirgecinin plakalarının baskı derinliği oldukça yüksektir. Bu durum daha yüksek ısı transferi oranı sağlarken, sürtünme katsayısını da arttırabilmektedir. Ayrıca plakaların yüzey pürüzlülüğü de önemli bir etkiye sahiptir.

Çizelge 5.3. Literatürde plakalı ısı değiştirgeçleri için kullanılan sürtünme katsayısı korelasyonları

| Çalışma Sahibi | Reynolds Sayısı   | Korelasyon                     |
|----------------|-------------------|--------------------------------|
| Kumar [68]     | $Re > 100$        | $f = 2,99Re^{-0.183}$          |
| Focke [69]     | $150 < Re < 600$  | $f = 6,7Re^{-0.209}$           |
| Bond [72]      | $47 < Re < 468$   | $f = 3,016Re^{-0.457}$         |
| Fatih [7]      | $450 < Re < 5250$ | $f = 60550Re^{-1.72} + 0.4299$ |

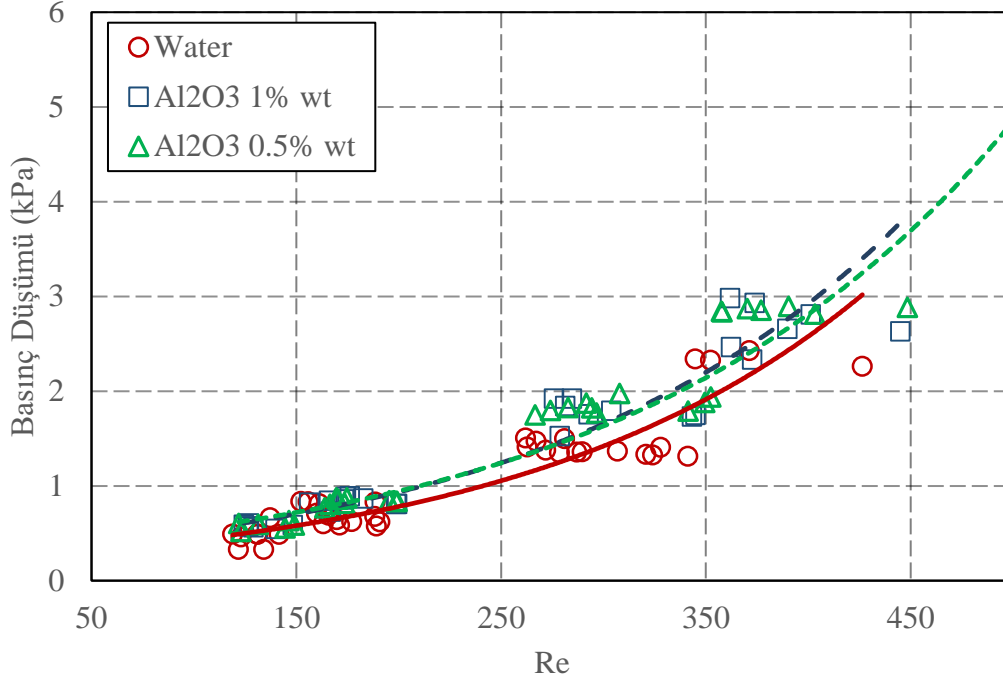
Şekil 5.9’da su ile yapılan deneyler sonucunda oluşturulan sürtünme katsayısı korelasyonunun, literatürde bulunan ve plakalı ısı değiştirgeçleri için kullanılan korelasyonlar ile karşılaştırması verilmiştir. Buna göre elde edilen sürtünme katsayısı korelasyonu, diğer korelasyonlara oranla sürtünme katsayılarını daha yüksek belirlemektedir. Bu durumun nedeni olarak kullanılan plakaların malzeme özelliklerinin ve geometrik özelliklerinin farklılık göstermesidir. Bond [72]’un belirtmiş olduğu korelasyon sürtünme katsayılarını en düşük olarak korelasyon olarak görülmekte olup, Kumar [68] ve Focke [69]’nin belirttikleri korelasyon ise daha yüksek olarak hesaplanmaktadır. Genel olarak bakıldığında, kullanılan bütün korelasyonların Reynolds sayısı ile ilişkisi benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.9. Oluşturulan sürtünme katsayısı korelasyonunun literatürde plakalı ısı değiştirgeçleri için belirtilen korelasyonlar ile karşılaştırılması

Şebeke suyunun kullanıldığı durum için yapılan bütün işlemler  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanları için de aynı şekilde tekrarlanmıştır. Nanoparçacık eklenmesinden dolayı, nanoakışkanların viskoziteleri daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle suya oranla daha viskoz olan akışkan kullanımı sürtünmeden kaynaklanan basınç düşümünü bir miktar arttıracaktır. Şekil 5.10'da kütlece %1'lik ve %0.5'lik  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanlarının kullanıldığı durumlar için elde edilen basınç düşümü değerleri gösterilmiştir.

Şekil 5.10'dan da görüldüğü üzere nanoakışkan kullanımı basınç düşümü üstünde beklenildiği gibi bir artışa sebep olmuştur. Basınç düşümündeki ortalama artış oranı kütlece %1'lik  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanı için %17.67 olurken, kütlece %0.5'lik nanoakışkanda ise bu oran %17.25 olmuştur. İki farklı nanoakışkan konsantrasyonu için de basınç düşümü değerleri birbirine oldukça yakın gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak kullanılan  $Al_2O_3/su$  nanoakışkanlarının konsantrasyonunun düşük olmasıdır. Düşük Reynolds sayılarında nanoakışkan ve su verileri arasında bir fark olmasa da Reynolds sayısının artması ile birlikte basınç düşümünde artış görülmektedir. Deneylerde maksimum Reynolds sayısı 450 olduğundan, daha yüksek Reynolds sayılarındaki nanoakışkan etkisi gözlenememiştir.



Şekil 5.10. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanının kullanımının basınç düşümüne olan etkisi

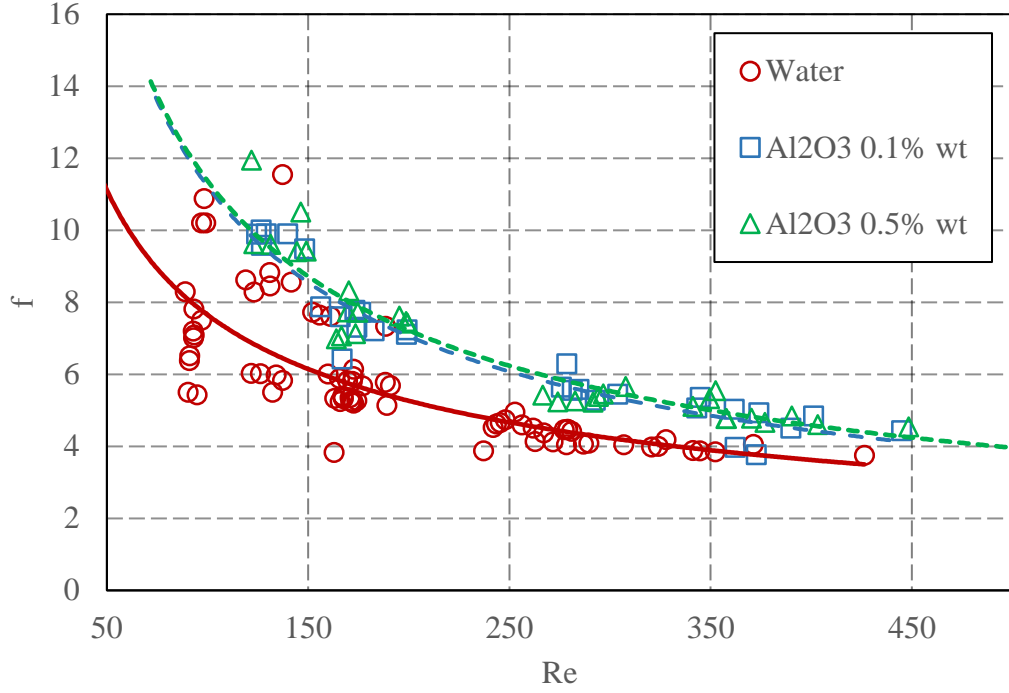
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanlarının viskozite değerlerinin sudan daha yüksek olması nedeniyle sürtünme katsayılarının da daha yüksek olması beklenmektedir. Hesaplamalar sonucu her iki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkan için elde edilen sürtünme katsayısı korelasyonları aşağıda verilmiştir. Denklem 5.5 kütlece %1'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanın sürtünme katsayısı korelasyonu iken, Denklem 5.6 kütlece %0.5'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanının sürtünme katsayısı korelasyonudur.

$$f = 182.62 Re^{-0.632} \quad (5.5)$$

$$f = 155.46 Re^{-0.603} \quad (5.6)$$

Buna göre her iki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkan konsantrasyonu için üretilen korelasyonlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bu değerler su ile karşılaştırıldığında, sürtünme katsayısındaki ortalama artış %21.2 olurken, maksimum artış Reynolds sayısı 120 iken %27.8 olmuştur.



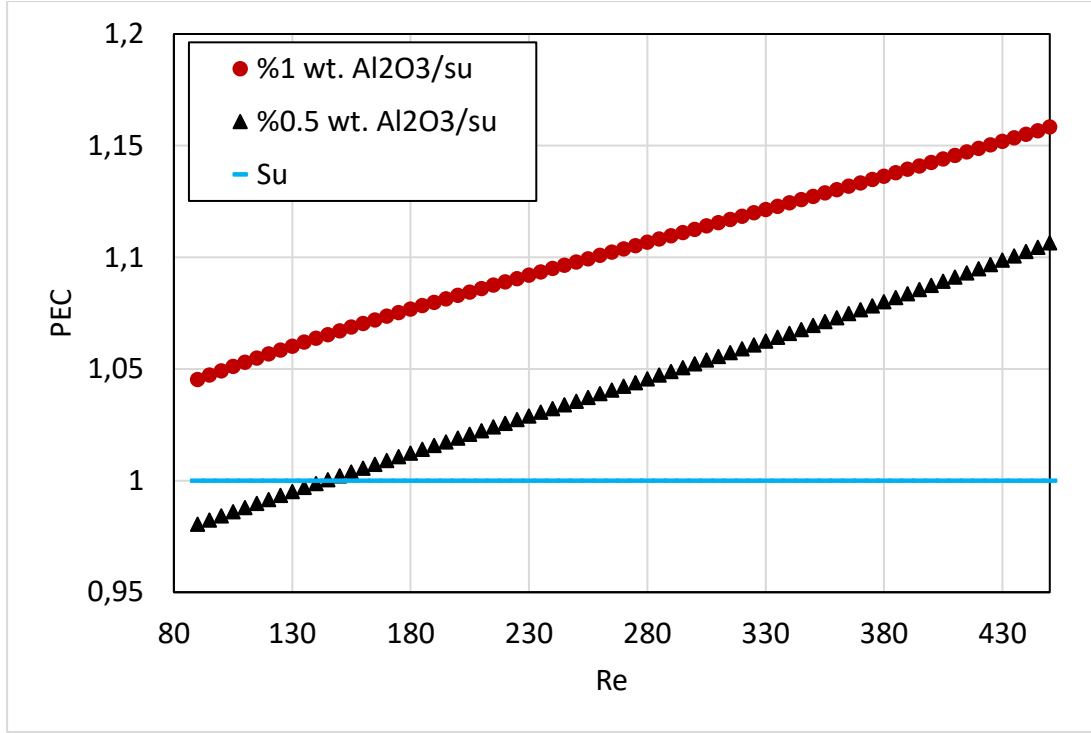


Şekil 5.11. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanlarının sürtünme katsayılarının su ile karşılaştırılması

Performans belirleme kriteri Denklem 5.7’de verilmiştir. Buna göre nanoakışkan kullanımı ile elde edilen ısı transferindeki iyileşmenin, basınç düşümündeki artışa olan oranı performans kriterini belirlemektedir.

$$PEC = \frac{Nu_{nf}}{Nu_f} \frac{f_f}{f_{nf}^{\frac{1}{3}}} \quad (5.7)$$

Deneyler sonucunda elde edilen veriler yardımı ile performans kriterleri hesaplanmış ve Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Şekle göre nanoakışkan kullanımı ile performans kriteri 1’den büyük olmaktadır. Bu da nanoakışkan kullanımı ile ısı değiştirgecinin performansının arttırılabileceğini göstermektedir. Ayrıca daha yüksek Reynolds sayılarında performans kriteri daha yüksek olmaktadır.



Şekil 5.12. Deneyler sonucunda elde edilen performans kriterleri

### 5.3 Belirsizlik Analizi

Yapılan belirsizlik analizi sonucunda elde edilen en yüksek % belirsizlikler aşağıdaki Çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 5.4. Deneyler sonucu elde edilen en büyük belirsizlik yüzdeleri

| Parametre   | Su    | %0.5 wt.<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su | %1 wt.<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su |
|---|-------|--|--|
| Isıl Yük, Q (W)   | %1.49 | %1,45  | %1,42  |
| Toplam ısı transferi katsayısı,<br>U (W/m <sup>2</sup> K) | %0.79 | %0.77  | %0.76  |
| LMTD, ΔT <sub>LM</sub> (K)                                | %0.38 | %0.43  | %0.41  |
| Nusselt sayısı, Nu  | %1.23 | %1.54  | %1.43  |
| Sürtünme katsayısı, f                                     | %2.96 | %4.32  | %3.81  |

## 6. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, contalı plakalı bir ısı değiştirgecinde nanoakışkan kullanımının termal ve hidrolik etkilerini gözlemlemek amacıyla bir deney düzeneği tasarlanıp, kurulmuş ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

Endüstriyel alanda ısı transferi oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu işlemi gerçekleştirmek için ısı değiştirgeci denilen cihazlar kullanılmaktadır. Isı değiştirgeçlerinden daha yüksek verim alabilmek, gerçekleşen ısı transferini arttırmak amacıyla, geçmişte bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle akışı daha türbülanslı hale getirebilmek amacıyla, ısı değiştirgeçlerinin geometrileri üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalar kendi sınırlarına ulaşmış olup, daha yüksek ısı transferi miktarlarına, daha küçük ısı değiştirgeçleri ile ulaşmak adına termo fiziksel özellikleri yetersiz olan endüstriyel akışkanların içerisine nanoparçacıkların eklenmesi düşünülmüştür. Nanoparçacıkların eklenmesi ile akışkanların termo fiziksel özellikleri oldukça iyi hale gelmektedir. Böylece aynı boyutlara sahip ısı değiştirgeci ile daha yüksek miktarlarda ısı transferi gerçekleştirilebilmektedir.

İlk olarak çalışmanın amacına yönelik bir deney düzeneği tasarlanmış, tasarımı tamamlanan düzeneğin kurulumu TOBB ETÜ Isı Değiştirgeçleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Kurulumu gerçekleştirilen deney düzeneğinde öncelikle şebeke suyu ile deneyler yapılmış ve kullanılan plakalı ısı değiştirgeci için Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı için korelasyonlar elde edilmiştir.

Su ile deneylerin tamamlanmasının ardından, kütlece %1 ve %0.5'lik  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanları ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanlar kütlece konsantrasyonları %20 olarak Sigma-Aldrich firmasından satın alınmış, deneylerde kullanılmak üzere belirli miktarda saf su ile seyreltilerek istenilen konsantrasyon değerleri elde edilmiştir. Nanoakışkanların hazırlanması süresince manyetik karıştırıcı kullanılmış, böylece  $Al_2O_3$  nanoparçacıklarının akışkan içerisinde askıda kalması, bir başka deyişle çökmemesi sağlanmıştır.

Deneyler sonucunda nanoakışkanların kullanıldığı durumlar için de Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı korelasyonları oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, plakalı ısı değiştirgecinin ısı karakteristiğinde nanoakışkan konsantrasyonu ile iyileşme elde edilmiştir. Kütlece %1'lik  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı ile ısı transferi katsayısındaki ortalama iyileştirme oranı %18.2 olurken, maksimum oran %21.8 olmuştur. Bu oranlar kütlece %0.5'lik  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı ile sırasıyla %11.1 ve %15.8 olarak kaydedilmiştir. Buradan çıkartılacak sonuç, ısı transferi katsayısındaki iyileşme oranları  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanının konsantrasyonu ile artmaktadır olarak açıklanabilir.

Nanoakışkanların plakalı ısı değiştirgecinin hidroluk karakteristiğine olan etkilerini gözlemlemek amacıyla, deneyler sırasında ısı değiştirgeci içerisinde gerçekleşen basınç düşümü değerleri de kaydedilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, kütlece %1'lik ve %0.5'lik nanoakışkan kullanımı ile basınç düşümünde sırasıyla ortalama %17.65 ve %17.25 artış gözlenmektedir olup, iki farklı nanoakışkan konsantrasyonu için bu değerler birbirine çok yakın seviyededir. Reynolds sayısının artması ile birlikte, basınç düşümündeki nanoakışkan kullanımından kaynaklanan artış miktarı yükselmektedir. Sürtünme katsayılarına bakıldığında ise, kütlece %1'lik ve %0.5'lik  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanları için elde edilen değerler birbirine çok yakın çıkmaktadır. Sürtünme katsayılarındaki nanoakışkan kullanımından kaynaklanan artış oranı ortalama %21.2 olurken, bu oran maksimum %27.8 seviyesine kadar çıkmaktadır.

Elde edilen sonuçlar ışığında, çok düşük nanoakışkan konsantrasyonlarında dahi ısı transferi katsayısında önemli bir iyileştirme oranı elde etmek mümkün olup, basınç düşümündeki artış miktarı özellikle düşük Reynolds sayılarında göz ardı edilebilecek seviyededir. Plakalı ısı değiştirgeçleri içerisinde akışkan olarak nanoakışkanların kullanılması gelecek için umut vadetmektedir. Ancak nanoakışkanların üretim zorluğu, maliyeti, daha yüksek konsantrasyonlardaki nanoakışkanların sebep olabileceği basınç düşümleri dolayısıyla gerekecek olan ekstra pompalama gücü, nanoparçacıkların akışkan içerisinde çökmesi, sistemin parçası olan pompa ve diğer cihazlarda yaşanabilecek aşınmalar gibi bir çok sorunun olması, bu konuda daha fazla çalışmanın yapılmasını gerektirmektedir.

## 6.1 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Yapılan bu çalışmanın devamında, kullanılan plakalı ısı değiştirgecinin plakaları lazer tarayıcı ile taranıp, plaka geometrisi elde edilebilir. Böylece yapılmış olan deneysel çalışma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak tekrarlanabilir ve deneysel sonuçlar ile uyumu karşılaştırılabilir. Ayrıca kurulumu gerçekleştirilen deney düzeneği ile farklı tür nanoakışkanların da plakalı ısı değiştirgecinin termal ve hidrolik performansına olan etkisi deneysel olarak incelenebilir. Daha yüksek konsantrasyonlarda nanoakışkanlar ile deneyler yapılabilir ve deneylerde farklı konsantrasyonların kullanımı ile konsantrasyona bağlı korelasyonlar oluşturulabilir. Ayrıca daha yüksek Reynolds sayılarında deneyler gerçekleştirilip, türbülanslı akıştaki nanoakışkan etkisi gözlemlenebilir.

Kurulan deney düzeneğinin tasarımı farklı türde ısı değiştirgeçlerinin kullanılmasını da sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle düzenekte kullanılan ısı değiştirgeci, pompa gibi aletlerin değiştirilebilmesi için uygun bağlantılar kullanılmıştır. Böylece nanoakışkanların farklı tip ısı değiştirgeçleri içerisinde kullanılmasının etkileri de bu deney düzeneği kullanılarak incelenebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine,** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, vol. 7th. (2011).
- [2] **Sadik Kakac, L.Hangtan,** “Heat exchangers selection, design and construction,” *Fuel Processing Technology*, vol. 23, no. 1. pp. 87–88, (1989).
- [3] **C. S. Fernandes, R. P. Dias, and J. M. Maia,** (2008)“New Plates for Different Types of Plate Heat Exchangers,” *Recent Patents Mech. Eng.*, vol. 1, pp. 198–205.
- [4] **S. U. S. Choi and J. A. Eastman,** (1995)“Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,” *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo.*, vol. 66, no. March, pp. 99–105.
- [5] **E. Ozkaya, (2014)** “Plate dependent heat transfer modelling of plate heat exchangers (inTurkish),” , Master Thesis.
- [6] **C. Gulenoglu, (2015)** “Investigation of thermal and hydraulic characteristics and flow maldistribution for chevron type gasketed- plate heat exchangers (inTurkish),” , Master Thesis.
- [7] **F. Aktürk, (2011)** “Contalı Levha Tipi Plakalı Isı Değiştirgeçlerinin Deneysel Performans Analizi,” TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Master Tezi, p. 153.
- [8] **İhsan Deveci, (2009)** “U-Borulu Gövde-Boru Tipi Bir Isı Değiştirgecinin Deneysel Olarak İncelenmesi,” TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Master Tezi.
- [9] **C. B. Raju, K. S. N. and Jagdish,** (1983)“Plate Heat Exchangers and Their Performance. In “Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers,”.
- [10] **J. C. Maxwell,** (1873) “A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol.II,” *Clarendon Press*, vol. I,.
- [11] **S. Kakac,** (2012) "*HEAT Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design*" *Third Edition*.
- [12] **B. C. Pak and Y. I. Cho,** (1998) “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles,” *Exp. Heat Transf.*, vol. 11, no. 2, pp. 151–170.
- [13] **R. S. Vajjha, D. K. Das, and B. M. Mahagaonkar,** (2009) “Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory,” *Pet. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 6, pp. 612–624.
- [14] **Y. Xuan and W. Roetzel,** (2000) “Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 43, no. 19, pp. 3701–3707.
- [15] **A. Einstein,** (1906) “A New Determination of Molecular Dimensions,”

*Annalen der Physik*, vol. 324, no. 2. pp. 289–306.

- [16] **H. C. Brinkman**, (1952) “The viscosity of concentrated suspensions and solutions,” *J. Chem. Phys.*, vol. 20, no. 4, p. 571.
- [17] **G. K. Batchelor**, (1977) “The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles,” *J. Fluid Mech.*, vol. 83, no. 1, pp. 97–117.
- [18] **S. E. B. Maïga, C. T. Nguyen, N. Galanis, and G. Roy**, (2004) “Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube,” *Superlattices Microstruct.*, vol. 35, no. 3–6, pp. 543–557.
- [19] **D. A. G. Bruggeman**, (1937) “Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. III. Die elastischen Konstanten der quasiisotropen Mischkörper aus isotropen Substanzen,” *Ann. Phys.*, vol. 421, no. 2, pp. 160–178.
- [20] **R. L. Hamilton**, (1962) “Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems,” *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 1, no. 3, pp. 187–191.
- [21] **W. H. Azmi, K. V. Sharma, R. Mamat, G. Najafi, and M. S. Mohamad**, (2016) “The enhancement of effective thermal conductivity and effective dynamic viscosity of nanofluids - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53. pp. 1046–1058.
- [22] **P. Bhattacharya**, (2004) “Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids,” *J. Appl. Phys.*, vol. 95, no. 11, p. 6492.
- [23] **J. Koo and C. Kleinstreuer**, (2004) “A new thermal conductivity model for nanofluids,” *J. Nanoparticle Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 577–588.
- [24] **S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel**, (2003) “Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids,” *J. Heat Transfer*, vol. 125, no. 4, p. 567.
- [25] **C. H. Li and G. P. Peterson**, (2006) “Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids),” *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 8.
- [26] **W. Yu and S. U. S. Choi**, (2003) “The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model,” *J. Nanoparticle Res.*, vol. 5, no. 1–2, pp. 167–171.
- [27] **J. Buongiorno**, (2006) “Convective Transport in Nanofluids,” *J. Heat Transfer*, vol. 128, no. 3, p. 240.
- [28] **H. A. Mintsa, G. Roy, C. T. Nguyen, and D. Doucet**, (2009) “New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 363–371.
- [29] **M. Unverdi and Y. Islamoglu**, (2016) “Characteristics of heat transfer and pressure drop in a chevron-type plate heat exchanger with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids,” *Therm. Sci.*, no. 0, p. 97.
- [30] **B. Sun, C. Peng, R. Zuo, D. Yang, and H. Li**, (2016) “Investigation on the flow and convective heat transfer characteristics of nanofluids in the plate heat exchanger,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 76, pp. 75–86.



- [31] **D. Huang, Z. Wu, and B. Sunden**, (2015) “Pressure drop and convective heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 89, pp. 620–626.
- [32] **Prashant, G. Singh, and T. Sarao**, (2016) “Experimental Analysis of Heat Transfer and Friction Factor in Plate Heat Exchanger with Different Orientations Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids,” *Int. J. Eng.*, vol. 29, no. 10, pp. 1450–1458.
- [33] **V. Kumar, A. K. Tiwari, and S. K. Ghosh**, (2017) “Characterization and performance of nanofluids in plate heat exchanger,” *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 4070–4078.
- [34] **A. K. Tiwari, P. Ghosh, and J. Sarkar**, (2013) “Heat transfer and pressure drop characteristics of CeO<sub>2</sub>/water nanofluid in plate heat exchanger,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 57, no. 1–2, pp. 24–32.
- [35] **A. K. Tiwari, P. Ghosh, and J. Sarkar**, (2015) “Particle concentration levels of various nanofluids in plate heat exchanger for best performance,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 89, pp. 1110–1118.
- [36] **B. Singh, B. Singh, and G. Singh**, (2016) “Comparison Analysis Between CuO And SiO<sub>2</sub> Nanofluids Heat Transfer In PHE,” vol. 12, no. 4, pp. 15–23.
- [37] **Z. Taghizadeh-Tabari, S. Zeinali Heris, M. Moradi, and M. Kahani**, (2016) “The study on application of TiO<sub>2</sub>/water nanofluid in plate heat exchanger of milk pasteurization industries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1318–1326.
- [38] **M. N. Pantzali, A. G. Kanaris, K. D. Antoniadis, A. A. Mouza, and S. V. Paras**, (2009) “Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 30, no. 4, pp. 691–699.
- [39] **T. Maré, S. Halelfadl, O. Sow, P. Estellé, S. Duret, and F. Bazantay**, (2011) “Comparison of the thermal performances of two nanofluids at low temperature in a plate heat exchanger,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 35, no. 8, pp. 1535–1543.
- [40] **M. A. Khairul, M. A. Alim, I. M. Mahbubul, R. Saidur, A. Hepbasli, and A. Hossain**, (2014) “Heat transfer performance and exergy analyses of a corrugated plate heat exchanger using metal oxide nanofluids,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 50, pp. 8–14.
- [41] **K. Anoop, J. Cox, and R. Sadr**, “Thermal evaluation of nanofluids in heat exchangers, (2013)” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 49, pp. 5–9.
- [42] **A. E. Kabeel, T. Abou El Maaty, and Y. El Samadony**, (2013) “The effect of using nano-particles on corrugated plate heat exchanger performance,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 52, no. 1, pp. 221–229.
- [43] **D. R. Ray, D. K. Das, and R. S. Vajjha**, (2014) “Experimental and numerical investigations of nanofluids performance in a compact minichannel plate heat exchanger,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 71, pp. 732–746.
- [44] **T. Chen, J. Kim, and H. Cho**, (2014) “Theoretical analysis of the thermal performance of a plate heat exchanger at various chevron angles using lithium bromide solution with nanofluid,” *Int. J. Refrig.*, vol. 48, pp. 233–244.

- [45] **R. Barzegarian, M. K. Moraveji, and A. Aloueyan**, (2016) “Experimental investigation on heat transfer characteristics and pressure drop of BPHE (brazen plate heat exchanger) using TiO<sub>2</sub>-water nanofluid,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 74, pp. 11–18.
- [46] **S. A. Ahmad, M. N. Javed, M. Z. Saeed, H. Syed, and M. A. Aslam**, (2016) “Experimental Investigation of plate heat exchanger using Nanofluids,” pp. 28–34.
- [47] **M. M. Sarafraz, V. Nikkhah, S. A. Madani, M. Jafarian, and F. Hormozi**, (2017) “Low-frequency vibration for fouling mitigation and intensification of thermal performance of a plate heat exchanger working with CuO/water nanofluid,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 121, pp. 388–399.
- [48] **Z. Wang, Z. Wu, F. Han, L. Wadsö, and B. Sundén**, (2018) “Experimental comparative evaluation of a graphene nanofluid coolant in miniature plate heat exchanger,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 130, no. February, pp. 148–156.
- [49] **A. Bhattad, J. Sarkar, and P. Ghosh**, (2018) “Discrete phase numerical model and experimental study of hybrid nanofluid heat transfer and pressure drop in plate heat exchanger,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 91, pp. 262–273.
- [50] **S. H. Pourhoseini, N. Naghizadeh, and H. Hoseinzadeh**, (2018) “Effect of silver-water nanofluid on heat transfer performance of a plate heat exchanger: An experimental and theoretical study,” *Powder Technol.*, vol. 332, pp. 279–286.
- [51] **A. Behrangzade and M. M. Heyhat**, (2016) “The effect of using nano-silver dispersed water based nanofluid as a passive method for energy efficiency enhancement in a plate heat exchanger,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 102, pp. 311–317.
- [52] **M. Khoshvaght-Aliabadi, M. Khoshvaght, and P. Rahnama**, (2016) “Thermal-hydraulic characteristics of plate-fin heat exchangers with corrugated/vortex-generator plate-fin (CVGPF),” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 98, pp. 690–701.
- [53] **A. N. Al-Shamani, K. Sopian, A. M. Abed, M. A. Alghoul, M. H. Ruslan, and S. Mat**, (2015) “Study of heat transfer due to turbulent flow of nanofluids through rib-groove channel,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* vol. 88, no. 1.
- [54] **F. S. Javadi et al.**, (2013) “The effects of nanofluid on thermophysical properties and heat transfer characteristics of a plate heat exchanger,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 44, pp. 58–63.
- [55] **S. D. Pandey and V. K. Nema**, (2012) “Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 38.
- [56] **C. Selvam, E. C. Muhammed Irshad, D. M. Lal, and S. Harish**, (2016) “Convective heat transfer characteristics of water-ethylene glycol mixture with silver nanoparticles,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 77, pp. 188–196.
- [57] **B. Farajollahi, S. G. Etemad, and M. Hojjat**, (2010) “Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol.

53, no. 1–3, pp. 12–17.

- [58] **J. Albadr, S. Tayal, and M. Alasadi**, (2013) “Heat transfer through heat exchanger using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid at different concentrations,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 38–44.
- [59] T. Basics, T. Measurement, and U. Thermocouples, “CRITERIA FOR TEMPERATURE SENSOR SELECTION OF T / C AND RTD SENSOR TYPES The Basics of Temperature Measurement Using,” no. April, pp. 1–14.
- [60] **T. E. C. Thermocouple**, (2012) “Industrial Thermocouples,” pp. 1–29.
- [61] **Y. Islamoglu and C. Parmaksizoglu**, (2003) “The effect of channel height on the enhanced heat transfer characteristics in a corrugated heat exchanger channel,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 979–987.
- [62] **F. S. K. Warnakulasuriya and W. M. Worek**, (2008) “Heat transfer and pressure drop properties of high viscous solutions in plate heat exchangers,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 1–2, pp. 52–67.
- [63] **P. R. Bobbili, B. Sunden, and S. K. Das**, (2006) “An experimental investigation of the port flow maldistribution in small and large plate package heat exchangers,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 16, pp. 1919–1926.
- [64] **Firat Boru A.Ş.**, (2017), “Firat PPRC kompozit boru broşürü.pdf.” .
- [65] **A. Hashmi, F. Tahir, and U. Hameed**, (2012) “Empirical Nusselt Number Correlation for Single Phase Flow through a Plate Heat Exchanger,” in *Recent Advances in Fluid Mechanics, Heat & Mass Transfer and Biology - Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on HEAT and MASS TRANSFER (HMT '12)*, pp. 41–46.
- [66] **C. Gulenoglu, F. Akturk, S. Aradag, N. Sezer Uzol, and S. Kakac**, (2014) “Experimental comparison of performances of three different plates for gasketed plate heat exchangers,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 75, pp. 249–256.
- [67] **J. P. Holman**, (1853) "*Experimental Methods for Engineers*", 8th Editio., vol. s1–VIII, no. 193. McGraw Hill.
- [68] **H. Kumar**, (1984) “The plate heat exchanger: construction and design.,” IN: *FIRST U.K. NAT. CONF. ON HEAT TRANSFER, (LEEDS, U.K.: JUL. 3-5, 1984)*, vol. 2, Rugby, no. 86.
- [69] **W. W. Focke, J. Zachariades, and I. Olivier**, (1985) “The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 28, no. 8, pp. 1469–1479.
- [70] **W. H. Emerson**, (1995) "*The Thermal and Hydrodynamic Performance of a plateheat Exchanger:*" II. A DeLaval Exchanger. Glasgow: National Engineering Laboratories.
- [71] **B. Thonon, R. Vidil, and C. Marvillet**, (1995) “Recent Research and Developments in Plate Heat Exchangers,” *J. Enhanc. Heat Transf.*, vol. 2, no. 1–2, pp. 149–155.
- [72] **M. P. Bond**, (1981) “Plate heat exchangers for effective heat transfer,” *Chem. Eng.*, pp. 367, 162–167,.
- [73] **B. Munson, D. Young, T. Okiishi, and W. Huebesch**, (2015) "*Fundamentals*

*of Fluid Mechanics"*, vol. 1,6th Edition, Wiley.

- [74] **Majdi H, Abed AM.,** (2014), "Effect of nanofluids on the performance of corrugated channel within out-of-phase arrangement." *Int J Sci Technol Res.*
- [75] **Gherasim I, Galanis N, Nguyen C.** (2013) "Numerical study of nanofluid flow and heat transfer in a plate heat exchanger." *Comput Therm Sci: Int J.*;5:317–32.



## **EKLER**

EK 1: Deney Verileri

EK 2: Plakalı Isı Değiştirgecinin Teknik Resmi

EK 3: Sistem Karakteristik Hesaplamaları

EK 4: Kavitasyon Hesaplamaları

EK 5: Hesaplamalarda Kullanılan Matlab Kodu

EK 6: Maliyet Çizelgesi

EK 7: Karakteristik Hesaplamalarında Kullanılan Matlab Kodu



**EK 1**

Çizelge Ek1.1. Su ile yapılan deneylerde alınan veriler

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | $\Delta P$ sıcak (kPa) | $\Delta P$ soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 123,93           | 100,25           | 38,80              | 26,52              | 17,24              | 32,50              | 0,49                   | 0,27                   |
| 123,88           | 100,14           | 38,88              | 26,56              | 17,28              | 32,54              | 0,49                   | 0,27                   |
| 124,09           | 100,20           | 38,84              | 26,54              | 17,27              | 32,51              | 0,49                   | 0,28                   |
| 124,81           | 146,44           | 35,01              | 22,45              | 16,41              | 27,42              | 0,49                   | 0,43                   |
| 124,55           | 146,30           | 35,03              | 22,46              | 16,41              | 27,43              | 0,49                   | 0,43                   |
| 124,52           | 146,25           | 35,04              | 22,48              | 16,41              | 27,45              | 0,49                   | 0,43                   |
| 122,46           | 198,51           | 33,09              | 20,14              | 15,84              | 24,26              | 0,46                   | 0,75                   |
| 122,28           | 198,64           | 33,05              | 20,13              | 15,84              | 24,28              | 0,46                   | 0,75                   |
| 122,50           | 198,51           | 33,07              | 20,19              | 15,91              | 24,33              | 0,46                   | 0,76                   |
| 172,14           | 199,31           | 30,45              | 20,91              | 15,80              | 24,31              | 0,64                   | 0,77                   |
| 172,27           | 199,30           | 30,45              | 20,91              | 15,78              | 24,30              | 0,65                   | 0,75                   |
| 172,39           | 199,45           | 30,42              | 20,87              | 15,76              | 24,29              | 0,64                   | 0,75                   |
| 171,49           | 141,13           | 32,69              | 23,13              | 15,56              | 27,27              | 0,62                   | 0,44                   |
| 171,22           | 141,45           | 32,64              | 23,11              | 15,52              | 27,23              | 0,62                   | 0,45                   |
| 171,24           | 141,34           | 32,71              | 23,15              | 15,57              | 27,26              | 0,63                   | 0,43                   |
| 170,78           | 98,71            | 36,35              | 27,02              | 16,01              | 31,59              | 0,62                   | 0,28                   |
| 170,79           | 98,71            | 36,36              | 27,01              | 16,00              | 31,58              | 0,62                   | 0,27                   |
| 170,64           | 98,74            | 36,29              | 26,94              | 15,95              | 31,53              | 0,62                   | 0,27                   |
| 299,08           | 92,85            | 35,30              | 29,91              | 16,04              | 32,64              | 1,31                   | 0,25                   |
| 299,45           | 92,97            | 35,34              | 29,95              | 16,03              | 32,67              | 1,31                   | 0,25                   |
| 299,32           | 92,95            | 35,33              | 29,92              | 16,03              | 32,66              | 1,31                   | 0,27                   |
| 299,41           | 152,90           | 30,29              | 24,58              | 15,97              | 27,13              | 1,36                   | 0,50                   |
| 299,80           | 152,94           | 30,29              | 24,62              | 15,99              | 27,12              | 1,37                   | 0,50                   |
| 299,86           | 152,94           | 30,33              | 24,64              | 16,01              | 27,16              | 1,37                   | 0,49                   |
| 297,74           | 201,11           | 28,14              | 22,25              | 15,69              | 24,48              | 1,36                   | 0,78                   |
| 297,16           | 201,06           | 28,03              | 22,15              | 15,60              | 24,41              | 1,36                   | 0,78                   |
| 297,51           | 201,20           | 28,08              | 22,21              | 15,65              | 24,42              | 1,36                   | 0,79                   |
| 124,81           | 99,20            | 36,75              | 25,16              | 15,93              | 30,73              | 0,67                   | 0,26                   |
| 124,66           | 99,02            | 36,70              | 25,16              | 15,90              | 30,72              | 0,66                   | 0,26                   |
| 124,46           | 99,95            | 36,67              | 25,10              | 15,84              | 30,70              | 0,66                   | 0,26                   |
| 124,42           | 201,37           | 31,50              | 19,09              | 14,81              | 23,09              | 0,68                   | 0,78                   |
| 124,16           | 201,49           | 31,52              | 19,10              | 14,82              | 23,10              | 0,68                   | 0,76                   |
| 124,98           | 201,14           | 31,60              | 19,13              | 14,83              | 23,13              | 0,67                   | 0,78                   |
| 122,82           | 300,73           | 29,62              | 16,96              | 14,17              | 19,85              | 0,68                   | 1,54                   |
| 122,82           | 301,03           | 29,65              | 16,98              | 14,15              | 19,87              | 0,68                   | 1,55                   |
| 122,70           | 301,05           | 29,62              | 16,94              | 14,11              | 19,83              | 0,68                   | 1,55                   |

Çizelge Ek1.1 Su ile yapılan deneylerde alınan veriler

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | ΔP sıcak (kPa) | ΔP soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 121,46           | 351,12           | 29,13              | 16,30              | 13,87              | 18,78              | 0,68           | 2,01           |
| 121,42           | 351,99           | 29,14              | 16,30              | 13,87              | 18,80              | 0,68           | 2,00           |
| 121,54           | 351,69           | 29,12              | 16,29              | 13,84              | 18,77              | 0,68           | 2,01           |
| 170,54           | 352,52           | 26,18              | 16,46              | 13,56              | 18,60              | 0,83           | 2,03           |
| 170,52           | 352,34           | 26,15              | 16,45              | 13,56              | 18,59              | 0,84           | 2,05           |
| 170,70           | 352,67           | 26,19              | 16,45              | 13,55              | 18,60              | 0,84           | 2,05           |
| 171,27           | 306,39           | 27,03              | 17,29              | 13,93              | 19,69              | 0,84           | 1,61           |
| 171,22           | 306,56           | 26,98              | 17,28              | 13,93              | 19,69              | 0,83           | 1,60           |
| 171,22           | 306,43           | 27,06              | 17,30              | 13,91              | 19,72              | 0,83           | 1,61           |
| 169,42           | 204,73           | 28,91              | 19,29              | 14,31              | 22,57              | 0,82           | 0,84           |
| 169,40           | 204,99           | 28,97              | 19,29              | 14,32              | 22,58              | 0,81           | 0,81           |
| 169,34           | 205,16           | 28,95              | 19,28              | 14,31              | 22,61              | 0,81           | 0,82           |
| 174,31           | 101,77           | 34,56              | 25,44              | 14,61              | 29,97              | 0,83           | 0,27           |
| 174,31           | 101,94           | 34,60              | 25,48              | 14,65              | 29,99              | 0,82           | 0,25           |
| 174,44           | 102,10           | 34,59              | 25,47              | 14,63              | 29,99              | 0,83           | 0,27           |
| 298,68           | 102,42           | 33,53              | 27,95              | 14,95              | 30,74              | 1,43           | 0,21           |
| 298,70           | 102,59           | 33,54              | 27,96              | 14,94              | 30,72              | 1,37           | 0,21           |
| 298,75           | 102,74           | 33,59              | 28,02              | 15,01              | 30,77              | 1,42           | 0,21           |
| 299,83           | 307,33           | 24,17              | 18,38              | 14,15              | 20,02              | 1,47           | 1,65           |
| 299,67           | 307,49           | 24,16              | 18,39              | 14,21              | 20,03              | 1,47           | 1,66           |
| 299,22           | 307,34           | 24,14              | 18,37              | 14,17              | 20,00              | 1,47           | 1,64           |
| 298,86           | 350,32           | 23,42              | 17,70              | 14,01              | 19,10              | 1,51           | 2,01           |
| 299,28           | 350,96           | 23,37              | 17,67              | 13,99              | 19,07              | 1,51           | 2,03           |
| 298,55           | 350,71           | 23,36              | 17,66              | 13,98              | 19,06              | 1,50           | 2,04           |
| 300,97           | 200,68           | 26,10              | 20,51              | 14,14              | 22,58              | 1,52           | 0,80           |
| 300,78           | 201,55           | 26,19              | 20,54              | 14,14              | 22,62              | 1,49           | 0,80           |
| 300,26           | 200,65           | 26,11              | 20,52              | 14,13              | 22,59              | 1,49           | 0,80           |
| 399,79           | 202,48           | 25,28              | 20,96              | 13,96              | 22,56              | 2,43           | 0,80           |
| 398,42           | 201,19           | 25,24              | 20,95              | 13,97              | 22,54              | 2,41           | 0,79           |
| 399,72           | 201,45           | 25,20              | 20,92              | 13,97              | 22,51              | 2,44           | 0,81           |
| 399,95           | 304,26           | 22,92              | 18,52              | 13,85              | 19,75              | 2,31           | 1,59           |
| 401,19           | 305,11           | 22,81              | 18,45              | 13,81              | 19,69              | 2,34           | 1,57           |
| 400,84           | 303,32           | 22,90              | 18,52              | 13,85              | 19,76              | 2,32           | 1,57           |
| 400,83           | 354,23           | 21,98              | 17,68              | 13,71              | 18,74              | 2,36           | 2,05           |
| 401,13           | 354,00           | 21,92              | 17,64              | 13,67              | 18,72              | 2,34           | 2,06           |
| 399,42           | 353,32           | 21,92              | 17,59              | 13,60              | 18,68              | 2,32           | 2,10           |
| 400,07           | 104,14           | 31,43              | 27,32              | 14,07              | 29,21              | 2,26           | 0,28           |
| 399,70           | 103,70           | 31,45              | 27,34              | 14,06              | 29,25              | 2,25           | 0,28           |
| 399,42           | 103,63           | 31,46              | 27,36              | 14,09              | 29,26              | 2,28           | 0,27           |

Çizelge Ek1.1. Su ile yapılan deneylerde alınan veriler

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | ΔP sıcak (kPa) | ΔP soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 124,21           | 202,72           | 30,64              | 18,38              | 14,20              | 22,11              | 0,49           | 0,79           |
| 123,62           | 201,73           | 30,69              | 18,40              | 14,24              | 22,15              | 0,49           | 0,79           |
| 124,00           | 202,63           | 30,66              | 18,36              | 14,23              | 22,10              | 0,49           | 0,80           |
| 122,50           | 100,79           | 35,63              | 23,43              | 14,53              | 29,22              | 0,49           | 0,24           |
| 122,10           | 100,78           | 35,58              | 23,37              | 14,46              | 29,20              | 0,49           | 0,23           |
| 122,78           | 100,87           | 35,54              | 23,36              | 14,44              | 29,16              | 0,49           | 0,23           |
| 121,61           | 297,46           | 29,02              | 16,34              | 13,57              | 19,19              | 0,50           | 1,50           |
| 121,37           | 298,44           | 29,06              | 16,38              | 13,59              | 19,21              | 0,50           | 1,51           |
| 121,12           | 300,11           | 29,08              | 16,37              | 13,58              | 19,20              | 0,50           | 1,52           |
| 178,17           | 304,66           | 26,12              | 17,02              | 13,69              | 19,36              | 0,71           | 1,54           |
| 178,14           | 303,76           | 26,09              | 17,00              | 13,67              | 19,32              | 0,71           | 1,54           |
| 178,23           | 304,99           | 26,12              | 16,99              | 13,66              | 19,33              | 0,71           | 1,54           |
| 177,95           | 203,05           | 27,95              | 18,67              | 13,54              | 21,88              | 0,69           | 0,79           |
| 177,05           | 202,34           | 27,96              | 18,68              | 13,55              | 21,88              | 0,69           | 0,78           |
| 177,05           | 202,84           | 27,90              | 18,63              | 13,52              | 21,85              | 0,69           | 0,80           |
| 177,24           | 101,69           | 33,71              | 24,81              | 14,12              | 29,19              | 0,68           | 0,24           |
| 176,49           | 101,37           | 33,68              | 24,82              | 14,12              | 29,18              | 0,67           | 0,25           |
| 177,45           | 101,29           | 33,68              | 24,83              | 14,12              | 29,18              | 0,68           | 0,24           |
| 298,28           | 99,32            | 32,58              | 27,17              | 14,35              | 29,84              | 1,35           | 0,20           |
| 297,57           | 99,01            | 32,54              | 27,14              | 14,33              | 29,81              | 1,32           | 0,20           |
| 297,40           | 100,08           | 32,58              | 27,17              | 14,35              | 29,86              | 1,32           | 0,20           |
| 298,38           | 196,83           | 26,17              | 20,44              | 13,99              | 22,64              | 1,35           | 0,55           |
| 297,77           | 195,17           | 26,21              | 20,51              | 13,99              | 22,66              | 1,35           | 0,54           |
| 297,90           | 196,08           | 26,10              | 20,45              | 13,98              | 22,62              | 1,35           | 0,54           |
| 301,91           | 301,72           | 23,26              | 17,50              | 13,14              | 19,12              | 1,40           | 1,31           |
| 301,15           | 301,88           | 23,09              | 17,43              | 13,14              | 19,03              | 1,42           | 1,30           |
| 301,37           | 300,93           | 23,13              | 17,44              | 13,13              | 19,04              | 1,41           | 1,31           |
| 297,76           | 307,92           | 24,99              | 19,51              | 15,58              | 21,10              | 1,37           | 1,61           |
| 297,76           | 308,73           | 24,95              | 19,50              | 15,59              | 21,08              | 1,38           | 1,62           |
| 299,04           | 308,47           | 24,95              | 19,47              | 15,53              | 21,10              | 1,38           | 1,61           |
| 297,95           | 199,26           | 27,31              | 21,94              | 15,85              | 24,06              | 1,35           | 0,84           |
| 298,69           | 199,43           | 27,29              | 21,93              | 15,82              | 24,05              | 1,37           | 0,84           |
| 298,49           | 198,65           | 27,21              | 21,86              | 15,83              | 24,01              | 1,35           | 0,84           |
| 297,48           | 103,97           | 33,09              | 27,98              | 16,15              | 30,55              | 1,35           | 0,40           |
| 296,49           | 103,84           | 33,05              | 27,95              | 16,13              | 30,52              | 1,32           | 0,40           |
| 296,47           | 103,82           | 33,00              | 27,89              | 16,10              | 30,46              | 1,32           | 0,40           |
| 172,90           | 104,64           | 34,84              | 26,09              | 16,24              | 30,55              | 0,58           | 0,44           |
| 173,59           | 106,06           | 34,89              | 26,13              | 16,27              | 30,58              | 0,58           | 0,43           |
| 173,18           | 104,42           | 34,90              | 26,11              | 16,26              | 30,57              | 0,57           | 0,43           |



Çizelge Ek1.1 Su ile yapılan deneylerde alınan veriler

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | $\Delta P$ sıcak (kPa) | $\Delta P$ soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 173,39           | 197,36           | 30,51              | 21,33              | 16,40              | 24,83              | 0,60                   | 0,87                   |
| 172,52           | 196,34           | 30,45              | 21,31              | 16,42              | 24,81              | 0,58                   | 0,86                   |
| 172,70           | 195,99           | 30,51              | 21,31              | 16,42              | 24,81              | 0,58                   | 0,87                   |
| 173,47           | 300,62           | 28,35              | 18,95              | 15,78              | 21,56              | 0,60                   | 1,65                   |
| 172,84           | 301,86           | 28,30              | 18,97              | 15,81              | 21,52              | 0,61                   | 1,66                   |
| 173,61           | 302,32           | 28,32              | 19,01              | 15,86              | 21,57              | 0,59                   | 1,65                   |
| 127,91           | 302,15           | 30,77              | 18,36              | 15,56              | 21,26              | 0,38                   | 1,66                   |
| 127,84           | 302,20           | 30,77              | 18,36              | 15,54              | 21,25              | 0,38                   | 1,66                   |
| 128,59           | 302,47           | 30,74              | 18,35              | 15,53              | 21,25              | 0,38                   | 1,66                   |
| 121,33           | 198,37           | 33,02              | 20,27              | 16,13              | 24,39              | 0,33                   | 0,86                   |
| 120,84           | 197,95           | 33,00              | 20,27              | 16,15              | 24,39              | 0,33                   | 0,84                   |
| 120,92           | 198,06           | 33,02              | 20,27              | 16,15              | 24,39              | 0,33                   | 0,85                   |
| 121,19           | 105,47           | 37,06              | 24,82              | 16,45              | 30,58              | 0,34                   | 0,41                   |
| 121,85           | 105,77           | 37,09              | 24,84              | 16,45              | 30,59              | 0,33                   | 0,41                   |
| 122,01           | 105,44           | 37,12              | 24,83              | 16,43              | 30,58              | 0,33                   | 0,41                   |

Çizelge Ek1.2. Kütlece %1'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı deney verileri

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | ΔP sıcak (kPa) | ΔP soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 123,31           | 302,34           | 33,20              | 19,80              | 15,78              | 21,05              | 0,60           | 1,59           |
| 122,24           | 301,74           | 33,20              | 19,79              | 15,77              | 21,05              | 0,60           | 1,59           |
| 123,45           | 303,12           | 33,22              | 19,80              | 15,77              | 21,04              | 0,60           | 1,58           |
| 174,79           | 297,97           | 29,54              | 19,63              | 15,86              | 21,26              | 0,73           | 1,54           |
| 174,61           | 297,75           | 29,58              | 19,63              | 15,84              | 21,28              | 0,73           | 1,55           |
| 173,71           | 297,89           | 29,58              | 19,61              | 15,82              | 21,27              | 0,72           | 1,54           |
| 298,76           | 297,03           | 26,32              | 20,03              | 15,50              | 21,11              | 1,38           | 1,54           |
| 299,11           | 295,82           | 26,29              | 20,01              | 15,48              | 21,09              | 1,37           | 1,54           |
| 298,42           | 296,16           | 26,29              | 20,02              | 15,51              | 21,09              | 1,38           | 1,54           |
| 403,94           | 296,80           | 25,36              | 20,51              | 15,55              | 21,16              | 2,33           | 1,51           |
| 404,77           | 296,45           | 25,31              | 20,48              | 15,55              | 21,14              | 2,34           | 1,54           |
| 404,06           | 296,99           | 25,35              | 20,52              | 15,56              | 21,15              | 2,33           | 1,54           |
| 405,80           | 409,00           | 24,04              | 19,18              | 15,37              | 19,46              | 2,46           | 2,76           |
| 404,97           | 408,85           | 24,03              | 19,18              | 15,37              | 19,44              | 2,48           | 2,76           |
| 404,50           | 408,07           | 24,04              | 19,18              | 15,38              | 19,46              | 2,46           | 2,73           |
| 306,52           | 400,44           | 25,33              | 19,14              | 15,56              | 19,71              | 1,53           | 2,62           |
| 307,44           | 399,11           | 25,32              | 19,14              | 15,58              | 19,71              | 1,53           | 2,62           |
| 307,22           | 398,04           | 25,33              | 19,14              | 15,55              | 19,72              | 1,52           | 2,62           |
| 176,71           | 400,79           | 28,35              | 18,37              | 15,48              | 19,51              | 0,61           | 2,65           |
| 176,20           | 402,37           | 28,40              | 18,40              | 15,49              | 19,54              | 0,61           | 2,64           |
| 176,40           | 400,31           | 28,46              | 18,43              | 15,50              | 19,57              | 0,62           | 2,65           |
| 117,17           | 397,30           | 32,27              | 17,99              | 15,35              | 19,40              | 0,53           | 2,60           |
| 117,02           | 399,43           | 32,22              | 17,95              | 15,31              | 19,35              | 0,54           | 2,65           |
| 117,59           | 397,91           | 32,30              | 18,03              | 15,38              | 19,41              | 0,55           | 2,60           |
| 123,91           | 199,05           | 34,18              | 20,89              | 15,96              | 23,92              | 0,57           | 0,85           |
| 124,05           | 198,58           | 34,24              | 20,88              | 15,96              | 23,93              | 0,57           | 0,86           |
| 123,68           | 197,81           | 34,27              | 20,91              | 15,98              | 23,93              | 0,57           | 0,84           |
| 171,25           | 197,59           | 32,13              | 21,88              | 16,10              | 24,30              | 0,86           | 0,83           |
| 172,16           | 200,12           | 32,10              | 21,85              | 16,09              | 24,27              | 0,86           | 0,85           |
| 171,44           | 201,13           | 32,16              | 21,88              | 16,11              | 24,31              | 0,85           | 0,86           |
| 297,94           | 203,07           | 28,99              | 22,65              | 15,94              | 24,11              | 1,76           | 0,86           |
| 297,31           | 202,93           | 28,99              | 22,65              | 15,95              | 24,13              | 1,76           | 0,87           |
| 297,30           | 202,74           | 29,01              | 22,68              | 15,95              | 24,14              | 1,76           | 0,86           |
| 394,50           | 199,87           | 28,38              | 23,49              | 16,11              | 24,45              | 2,64           | 0,85           |
| 395,93           | 201,32           | 28,37              | 23,46              | 16,11              | 24,42              | 2,67           | 0,85           |
| 395,61           | 202,54           | 28,37              | 23,46              | 16,10              | 24,42              | 2,66           | 0,87           |
| 395,47           | 105,18           | 34,52              | 29,85              | 16,20              | 31,06              | 2,63           | 0,40           |
| 395,75           | 104,87           | 34,46              | 29,79              | 16,22              | 31,00              | 2,64           | 0,41           |
| 395,72           | 104,35           | 34,43              | 29,79              | 16,22              | 31,01              | 2,62           | 0,40           |
| 301,72           | 98,90            | 35,69              | 29,82              | 16,55              | 31,74              | 1,73           | 0,36           |

Çizelge Ek1.2. Kütlece %1'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı deney verileri

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | ΔP sıcak (kPa) | ΔP soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 301,05           | 99,62            | 35,75              | 29,86              | 16,55              | 31,80              | 1,73           | 0,29           |
| 300,50           | 99,24            | 35,80              | 29,89              | 16,55              | 31,83              | 1,74           | 0,30           |
| 174,51           | 99,05            | 37,60              | 28,07              | 16,88              | 31,84              | 0,81           | 0,40           |
| 173,79           | 98,82            | 37,64              | 28,10              | 16,88              | 31,87              | 0,81           | 0,40           |
| 174,29           | 98,08            | 37,65              | 28,12              | 16,90              | 31,90              | 0,80           | 0,40           |
| 121,91           | 97,64            | 39,71              | 26,74              | 17,10              | 31,89              | 0,54           | 0,38           |
| 122,02           | 97,04            | 39,62              | 26,70              | 17,06              | 31,84              | 0,55           | 0,39           |
| 121,25           | 98,09            | 39,63              | 26,69              | 17,05              | 31,82              | 0,55           | 0,39           |
| 395,16           | 98,12            | 36,40              | 31,72              | 17,23              | 32,94              | 2,71           | 0,38           |
| 396,38           | 98,48            | 36,36              | 31,65              | 17,26              | 32,89              | 2,72           | 0,38           |
| 395,33           | 98,48            | 36,41              | 31,72              | 17,25              | 32,92              | 2,71           | 0,39           |
| 172,61           | 97,63            | 38,18              | 28,66              | 17,50              | 32,39              | 0,81           | 0,39           |
| 172,62           | 97,59            | 38,09              | 28,58              | 17,42              | 32,33              | 0,81           | 0,37           |
| 173,17           | 98,05            | 38,12              | 28,62              | 17,43              | 32,37              | 0,81           | 0,38           |
| 128,48           | 96,72            | 39,51              | 27,37              | 17,48              | 32,23              | 0,59           | 0,33           |
| 128,42           | 97,65            | 39,49              | 27,34              | 17,50              | 32,21              | 0,58           | 0,33           |
| 128,79           | 98,33            | 39,48              | 27,26              | 17,50              | 32,12              | 0,58           | 0,34           |
| 294,40           | 96,72            | 37,19              | 31,19              | 17,57              | 33,12              | 1,74           | 0,32           |
| 293,93           | 96,51            | 37,20              | 31,19              | 17,57              | 33,12              | 1,76           | 0,35           |
| 294,75           | 96,46            | 37,17              | 31,17              | 17,57              | 33,10              | 1,75           | 0,33           |
| 295,71           | 198,24           | 31,06              | 24,54              | 17,48              | 26,09              | 1,79           | 0,65           |
| 296,08           | 199,13           | 31,01              | 24,52              | 17,47              | 26,07              | 1,79           | 0,67           |
| 295,97           | 197,52           | 31,01              | 24,54              | 17,45              | 26,05              | 1,79           | 0,66           |
| 123,78           | 189,81           | 35,17              | 22,10              | 17,46              | 25,42              | 0,56           | 0,62           |
| 123,15           | 191,32           | 35,19              | 22,09              | 17,47              | 25,43              | 0,56           | 0,63           |
| 123,50           | 193,27           | 35,19              | 22,08              | 17,48              | 25,42              | 0,57           | 0,63           |
| 392,19           | 193,76           | 30,05              | 25,05              | 17,25              | 25,95              | 2,82           | 0,61           |
| 393,48           | 192,94           | 30,10              | 25,07              | 17,25              | 25,96              | 2,79           | 0,59           |
| 392,02           | 193,53           | 30,10              | 25,04              | 17,24              | 25,92              | 2,82           | 0,60           |
| 180,01           | 191,37           | 32,20              | 22,56              | 16,90              | 25,06              | 0,86           | 0,60           |
| 179,12           | 194,33           | 32,22              | 22,56              | 16,88              | 25,08              | 0,88           | 0,59           |
| 179,37           | 195,54           | 32,21              | 22,57              | 16,88              | 25,08              | 0,87           | 0,61           |
| 179,82           | 303,41           | 30,27              | 20,13              | 16,25              | 21,79              | 0,88           | 1,60           |
| 179,63           | 303,24           | 30,21              | 20,11              | 16,23              | 21,76              | 0,88           | 1,60           |
| 179,53           | 303,44           | 30,19              | 20,11              | 16,21              | 21,75              | 0,88           | 1,61           |
| 297,84           | 303,82           | 27,37              | 20,89              | 16,08              | 21,66              | 1,84           | 1,60           |
| 297,37           | 303,34           | 27,28              | 20,85              | 16,09              | 21,63              | 1,85           | 1,62           |
| 296,78           | 304,03           | 27,22              | 20,82              | 16,09              | 21,60              | 1,84           | 1,58           |
| 129,51           | 299,15           | 31,79              | 19,29              | 16,16              | 21,27              | 0,60           | 1,58           |
| 129,33           | 299,26           | 31,73              | 19,26              | 16,16              | 21,24              | 0,60           | 1,57           |

Çizelge Ek1.2. Kütlece %1'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı deney verileri

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | ΔP sıcak (kPa) | ΔP soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 130,53           | 299,73           | 31,73              | 19,27              | 16,15              | 21,26              | 0,60           | 1,58           |
| 396,94           | 296,48           | 26,21              | 21,31              | 16,08              | 21,68              | 2,94           | 1,54           |
| 397,52           | 298,29           | 26,20              | 21,30              | 16,07              | 21,67              | 2,93           | 1,52           |
| 398,14           | 297,82           | 26,40              | 21,43              | 16,16              | 21,77              | 2,93           | 1,55           |
| 397,10           | 405,61           | 24,86              | 19,95              | 15,92              | 19,99              | 2,98           | 2,69           |
| 397,34           | 404,58           | 24,86              | 19,97              | 15,94              | 19,98              | 2,99           | 2,69           |
| 397,00           | 405,08           | 24,86              | 19,92              | 15,85              | 19,97              | 2,98           | 2,68           |
| 166,94           | 407,14           | 28,55              | 18,51              | 15,80              | 19,53              | 0,83           | 2,73           |
| 167,69           | 406,79           | 28,49              | 18,50              | 15,78              | 19,52              | 0,82           | 2,74           |
| 167,26           | 407,51           | 28,48              | 18,50              | 15,79              | 19,49              | 0,82           | 2,73           |
| 301,45           | 410,41           | 25,82              | 19,47              | 15,80              | 19,82              | 1,92           | 2,75           |
| 301,35           | 410,44           | 25,83              | 19,46              | 15,79              | 19,82              | 1,93           | 2,74           |
| 300,81           | 410,57           | 25,83              | 19,46              | 15,78              | 19,83              | 1,92           | 2,75           |
| 302,33           | 310,83           | 26,92              | 20,59              | 15,93              | 21,28              | 1,92           | 1,66           |
| 302,58           | 310,62           | 26,95              | 20,63              | 15,94              | 21,30              | 1,93           | 1,67           |
| 303,48           | 310,75           | 26,92              | 20,60              | 15,92              | 21,27              | 1,91           | 1,65           |
| 172,64           | 307,47           | 30,00              | 19,75              | 16,06              | 21,29              | 0,85           | 1,73           |
| 172,11           | 308,22           | 29,95              | 19,69              | 16,02              | 21,27              | 0,84           | 1,65           |
| 172,30           | 308,69           | 29,99              | 19,73              | 16,06              | 21,29              | 0,85           | 1,65           |
| 126,05           | 304,52           | 32,44              | 19,20              | 16,01              | 21,24              | 0,59           | 1,62           |
| 126,50           | 304,58           | 32,43              | 19,21              | 16,02              | 21,21              | 0,59           | 1,63           |
| 126,53           | 304,83           | 32,48              | 19,21              | 16,03              | 21,23              | 0,59           | 1,62           |
| 175,85           | 207,98           | 31,73              | 21,65              | 16,20              | 23,96              | 0,89           | 0,92           |
| 175,64           | 208,18           | 31,75              | 21,68              | 16,22              | 23,98              | 0,90           | 0,91           |
| 175,34           | 208,08           | 31,77              | 21,69              | 16,22              | 24,02              | 0,88           | 0,92           |
| 302,75           | 206,94           | 29,52              | 23,24              | 16,38              | 24,40              | 1,99           | 0,91           |
| 303,66           | 206,94           | 29,50              | 23,23              | 16,39              | 24,38              | 1,98           | 0,89           |
| 303,93           | 207,84           | 29,57              | 23,28              | 16,43              | 24,44              | 1,98           | 0,91           |
| 121,38           | 208,14           | 34,41              | 20,94              | 16,54              | 24,01              | 0,58           | 0,92           |
| 121,59           | 207,25           | 34,43              | 20,93              | 16,52              | 24,01              | 0,58           | 0,92           |
| 121,99           | 207,89           | 34,40              | 20,90              | 16,51              | 23,98              | 0,58           | 0,91           |
| 172,14           | 102,65           | 37,90              | 27,96              | 16,87              | 31,57              | 0,87           | 0,45           |
| 172,58           | 102,62           | 37,88              | 27,95              | 16,86              | 31,56              | 0,87           | 0,41           |
| 172,32           | 102,54           | 37,88              | 27,94              | 16,86              | 31,55              | 0,87           | 0,41           |
| 131,10           | 102,85           | 39,03              | 26,72              | 17,10              | 31,24              | 0,64           | 0,41           |
| 131,12           | 103,00           | 39,04              | 26,72              | 17,11              | 31,25              | 0,63           | 0,42           |
| 130,75           | 103,42           | 39,02              | 26,71              | 17,10              | 31,24              | 0,64           | 0,42           |
| 305,88           | 102,78           | 36,75              | 30,74              | 17,28              | 32,45              | 2,07           | 0,34           |
| 305,43           | 101,55           | 36,92              | 30,88              | 17,31              | 32,54              | 2,06           | 0,34           |
| 304,86           | 101,61           | 36,85              | 30,79              | 17,30              | 32,50              | 2,06           | 0,35           |

Çizelge Ek1.3. Kütlece %0.5'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı ile yapılan deneyler

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | ΔP sıcak (kPa) | ΔP soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 403,82           | 102,82           | 39,54              | 35,68              | 22,58              | 37,57              | 2,79           | 0,47           |
| 404,20           | 102,96           | 39,43              | 35,58              | 22,49              | 37,51              | 2,80           | 0,47           |
| 403,88           | 103,21           | 39,42              | 35,56              | 22,44              | 37,49              | 2,80           | 0,46           |
| 304,94           | 107,42           | 34,09              | 29,03              | 17,55              | 31,50              | 1,80           | 0,38           |
| 305,26           | 107,36           | 34,19              | 29,12              | 17,57              | 31,57              | 1,80           | 0,38           |
| 305,91           | 106,66           | 34,16              | 29,10              | 17,55              | 31,58              | 1,77           | 0,39           |
| 171,87           | 107,54           | 36,91              | 27,77              | 17,80              | 32,27              | 0,85           | 0,42           |
| 172,74           | 107,93           | 36,91              | 27,76              | 17,77              | 32,24              | 0,84           | 0,43           |
| 172,16           | 108,11           | 36,97              | 27,78              | 17,80              | 32,30              | 0,84           | 0,41           |
| 127,64           | 106,78           | 39,02              | 26,83              | 17,95              | 32,44              | 0,63           | 0,41           |
| 126,44           | 107,48           | 38,94              | 26,78              | 17,91              | 32,41              | 0,63           | 0,42           |
| 128,77           | 107,15           | 38,98              | 26,79              | 17,94              | 32,43              | 0,64           | 0,42           |
| 116,68           | 196,93           | 35,21              | 21,65              | 17,26              | 25,75              | 0,60           | 0,83           |
| 116,60           | 197,28           | 35,09              | 21,65              | 17,27              | 25,72              | 0,60           | 0,85           |
| 116,48           | 196,70           | 35,08              | 21,63              | 17,27              | 25,70              | 0,61           | 0,89           |
| 166,72           | 192,36           | 32,16              | 22,45              | 17,09              | 25,77              | 0,86           | 0,80           |
| 167,18           | 192,86           | 32,19              | 22,45              | 17,09              | 25,79              | 0,86           | 0,81           |
| 166,38           | 192,39           | 32,15              | 22,44              | 17,09              | 25,77              | 0,86           | 0,81           |
| 294,14           | 190,75           | 29,56              | 23,83              | 17,07              | 25,97              | 1,77           | 0,78           |
| 294,30           | 191,49           | 29,60              | 23,87              | 17,07              | 25,99              | 1,76           | 0,79           |
| 294,32           | 191,95           | 29,57              | 23,82              | 17,07              | 25,94              | 1,78           | 0,81           |
| 403,08           | 192,90           | 28,43              | 24,21              | 16,83              | 25,74              | 2,82           | 0,79           |
| 402,96           | 192,52           | 28,44              | 24,22              | 16,84              | 25,76              | 2,82           | 0,78           |
| 403,61           | 194,69           | 28,49              | 24,23              | 16,83              | 25,77              | 2,80           | 0,78           |
| 403,40           | 308,72           | 25,43              | 21,10              | 16,31              | 22,19              | 2,86           | 1,49           |
| 403,38           | 308,83           | 25,41              | 21,08              | 16,31              | 22,17              | 2,85           | 1,49           |
| 404,81           | 308,23           | 25,38              | 21,09              | 16,30              | 22,16              | 2,86           | 1,49           |
| 309,42           | 305,99           | 26,40              | 20,87              | 16,45              | 22,31              | 1,87           | 1,46           |
| 309,99           | 306,07           | 26,41              | 20,85              | 16,46              | 22,30              | 1,87           | 1,45           |
| 309,49           | 305,81           | 26,43              | 20,87              | 16,45              | 22,30              | 1,88           | 1,45           |
| 120,74           | 305,73           | 32,51              | 19,20              | 16,25              | 21,97              | 0,58           | 1,44           |
| 121,01           | 305,79           | 32,49              | 19,21              | 16,26              | 21,98              | 0,60           | 1,44           |
| 121,16           | 305,60           | 32,54              | 19,22              | 16,28              | 21,98              | 0,58           | 1,46           |
| 171,90           | 306,38           | 29,05              | 19,33              | 15,87              | 21,68              | 0,77           | 1,39           |
| 171,70           | 305,76           | 29,06              | 19,34              | 15,87              | 21,67              | 0,77           | 1,38           |
| 172,16           | 305,81           | 29,07              | 19,35              | 15,86              | 21,67              | 0,78           | 1,40           |
| 167,63           | 399,65           | 28,51              | 18,52              | 15,78              | 20,33              | 0,76           | 2,46           |
| 167,58           | 399,94           | 28,51              | 18,53              | 15,79              | 20,34              | 0,76           | 2,45           |
| 167,40           | 398,64           | 28,51              | 18,52              | 15,80              | 20,33              | 0,77           | 2,44           |
| 123,02           | 399,67           | 31,24              | 18,07              | 15,62              | 20,10              | 0,53           | 2,49           |

Çizelge Ek1.3. Kütlece %0.5'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı deney verileri

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | ΔP sıcak (kPa) | ΔP soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 123,15           | 407,02           | 31,23              | 18,07              | 15,63              | 20,10              | 0,54           | 2,50           |
| 123,53           | 400,81           | 31,24              | 18,08              | 15,64              | 20,11              | 0,54           | 2,49           |
| 293,52           | 401,70           | 25,04              | 19,11              | 15,61              | 20,21              | 1,75           | 2,49           |
| 293,79           | 401,55           | 24,98              | 19,08              | 15,60              | 20,15              | 1,75           | 2,46           |
| 293,42           | 400,21           | 25,01              | 19,10              | 15,62              | 20,18              | 1,74           | 2,49           |
| 398,50           | 401,03           | 23,80              | 19,41              | 15,58              | 20,16              | 2,84           | 2,48           |
| 397,77           | 401,36           | 23,77              | 19,40              | 15,58              | 20,16              | 2,83           | 2,48           |
| 398,30           | 402,14           | 23,78              | 19,40              | 15,60              | 20,16              | 2,84           | 2,47           |
| 398,47           | 402,29           | 23,72              | 19,35              | 15,55              | 20,13              | 2,84           | 2,48           |
| 398,38           | 402,02           | 23,73              | 19,37              | 15,54              | 20,13              | 2,84           | 2,49           |
| 398,25           | 402,18           | 23,71              | 19,36              | 15,55              | 20,12              | 2,85           | 2,48           |
| 303,61           | 401,92           | 24,79              | 19,04              | 15,54              | 20,13              | 1,79           | 2,47           |
| 302,78           | 402,88           | 24,76              | 19,04              | 15,53              | 20,12              | 1,79           | 2,48           |
| 301,80           | 401,56           | 24,77              | 19,05              | 15,56              | 20,12              | 1,81           | 2,48           |
| 176,75           | 400,53           | 27,73              | 18,27              | 15,50              | 20,03              | 0,82           | 2,47           |
| 176,72           | 399,98           | 27,75              | 18,28              | 15,49              | 20,01              | 0,81           | 2,47           |
| 177,39           | 399,68           | 27,72              | 18,27              | 15,49              | 20,02              | 0,82           | 2,46           |
| 123,29           | 399,40           | 30,72              | 17,85              | 15,47              | 19,89              | 0,56           | 2,46           |
| 124,60           | 399,34           | 30,76              | 17,84              | 15,48              | 19,88              | 0,54           | 2,47           |
| 123,54           | 399,60           | 30,76              | 17,84              | 15,48              | 19,90              | 0,54           | 2,43           |
| 122,68           | 298,38           | 31,63              | 18,69              | 15,62              | 21,40              | 0,52           | 1,27           |
| 122,68           | 298,38           | 31,64              | 18,68              | 15,61              | 21,39              | 0,53           | 1,27           |
| 122,68           | 298,38           | 31,65              | 18,69              | 15,62              | 21,37              | 0,54           | 1,26           |
| 304,07           | 299,20           | 25,81              | 20,27              | 15,80              | 21,67              | 1,82           | 1,28           |
| 303,92           | 299,80           | 25,78              | 20,23              | 15,78              | 21,64              | 1,83           | 1,27           |
| 305,28           | 298,49           | 25,78              | 20,23              | 15,76              | 21,64              | 1,83           | 1,27           |
| 400,44           | 301,73           | 25,03              | 20,72              | 15,81              | 21,70              | 2,89           | 1,28           |
| 399,99           | 301,89           | 25,00              | 20,67              | 15,76              | 21,66              | 2,86           | 1,26           |
| 399,71           | 301,67           | 25,07              | 20,75              | 15,80              | 21,70              | 2,86           | 1,28           |
| 174,50           | 301,80           | 28,82              | 19,36              | 15,80              | 21,61              | 0,80           | 1,26           |
| 175,39           | 302,17           | 28,81              | 19,36              | 15,79              | 21,59              | 0,82           | 1,28           |
| 175,19           | 303,26           | 28,82              | 19,33              | 15,77              | 21,60              | 0,80           | 1,27           |
| 175,27           | 209,90           | 30,66              | 21,15              | 15,98              | 24,12              | 0,82           | 0,67           |
| 174,88           | 209,42           | 30,65              | 21,16              | 15,99              | 24,10              | 0,81           | 0,67           |
| 175,65           | 209,90           | 30,66              | 21,18              | 15,99              | 24,12              | 0,82           | 0,66           |
| 120,80           | 205,47           | 33,90              | 20,59              | 16,19              | 24,39              | 0,53           | 0,63           |
| 120,45           | 206,03           | 33,89              | 20,59              | 16,19              | 24,38              | 0,51           | 0,61           |
| 120,51           | 205,28           | 33,87              | 20,57              | 16,21              | 24,36              | 0,53           | 0,61           |
| 300,23           | 208,21           | 28,28              | 22,52              | 16,03              | 24,36              | 1,83           | 0,62           |
| 300,54           | 209,68           | 28,28              | 22,52              | 16,05              | 24,38              | 1,82           | 0,63           |

Çizelge Ek1.3. Kütlece %0.5'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkan deney verileri

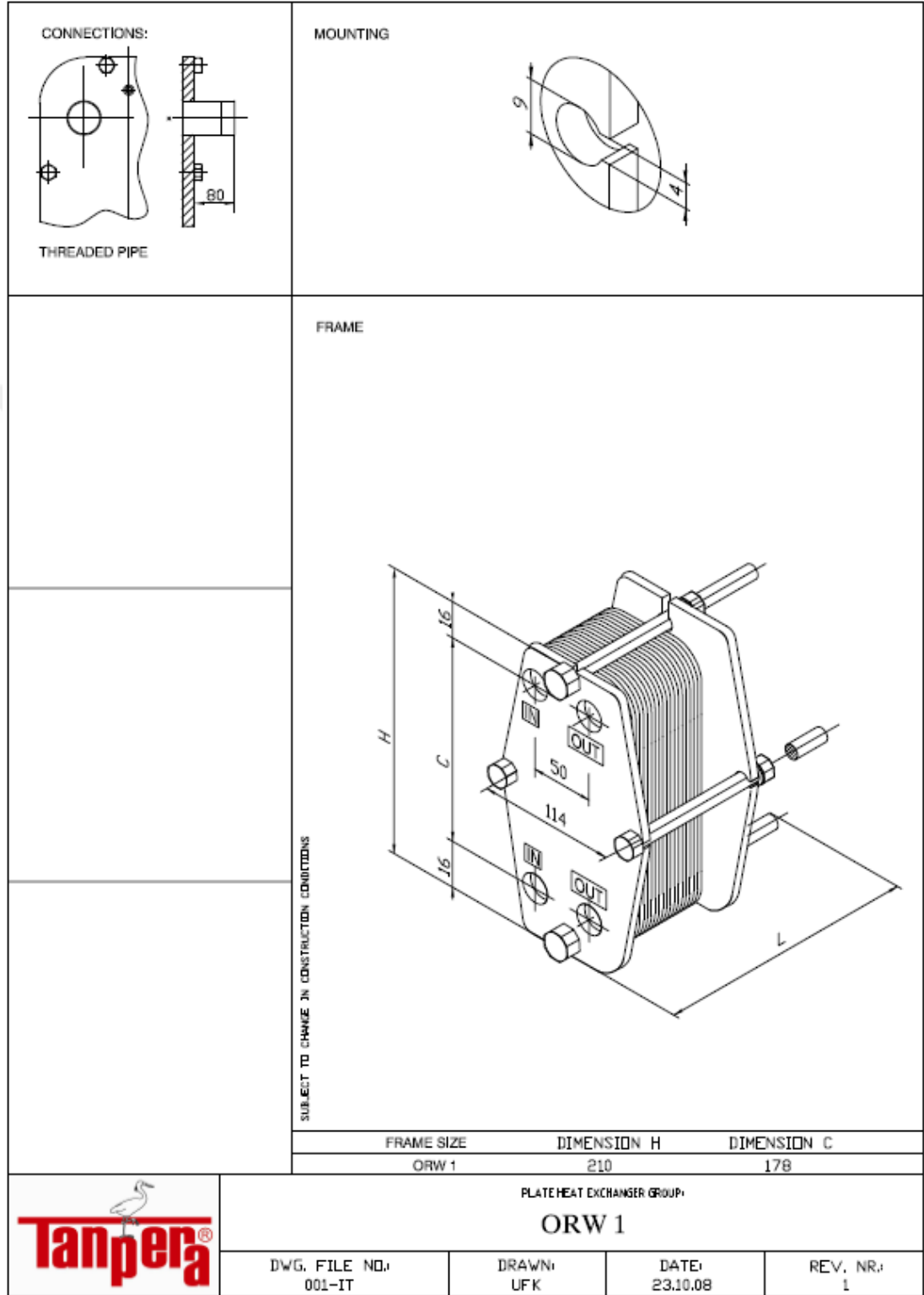
| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | ΔP sıcak (kPa) | ΔP soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 300,48           | 208,92           | 28,31              | 22,54              | 16,04              | 24,38              | 1,82           | 0,61           |
| 398,79           | 211,29           | 27,52              | 23,13              | 16,12              | 24,45              | 2,89           | 0,63           |
| 398,62           | 212,83           | 27,59              | 23,18              | 16,12              | 24,49              | 2,90           | 0,60           |
| 399,37           | 211,36           | 27,54              | 23,14              | 16,13              | 24,45              | 2,90           | 0,60           |
| 397,33           | 106,09           | 34,11              | 29,90              | 16,69              | 31,52              | 2,88           | 0,43           |
| 398,07           | 106,29           | 34,07              | 29,90              | 16,69              | 31,51              | 2,89           | 0,44           |
| 399,04           | 107,48           | 34,08              | 29,89              | 16,70              | 31,48              | 2,89           | 0,42           |
| 307,05           | 104,32           | 35,21              | 29,82              | 17,15              | 32,09              | 1,88           | 0,40           |
| 307,41           | 104,51           | 35,25              | 29,82              | 17,16              | 32,11              | 1,89           | 0,40           |
| 306,39           | 104,64           | 35,27              | 29,85              | 17,16              | 32,14              | 1,88           | 0,40           |
| 126,68           | 106,08           | 39,08              | 26,49              | 17,29              | 31,98              | 0,55           | 0,41           |
| 126,53           | 105,50           | 39,11              | 26,48              | 17,29              | 32,00              | 0,55           | 0,41           |
| 125,46           | 104,99           | 39,16              | 26,51              | 17,29              | 32,01              | 0,56           | 0,41           |
| 174,21           | 106,68           | 37,71              | 28,02              | 17,19              | 32,28              | 0,83           | 0,42           |
| 173,52           | 106,14           | 37,72              | 28,04              | 17,20              | 32,30              | 0,84           | 0,41           |
| 173,55           | 104,95           | 37,76              | 28,07              | 17,21              | 32,31              | 0,84           | 0,40           |
| 173,56           | 105,41           | 37,66              | 28,08              | 17,19              | 32,31              | 0,84           | 0,40           |
| 173,01           | 105,26           | 37,68              | 28,06              | 17,19              | 32,28              | 0,84           | 0,40           |
| 173,35           | 104,12           | 37,73              | 28,14              | 17,22              | 32,33              | 0,83           | 0,40           |
| 129,25           | 104,46           | 39,35              | 26,83              | 17,17              | 32,18              | 0,58           | 0,41           |
| 129,20           | 104,44           | 39,38              | 26,86              | 17,17              | 32,21              | 0,59           | 0,41           |
| 129,75           | 104,61           | 39,35              | 26,85              | 17,18              | 32,21              | 0,59           | 0,40           |
| 305,10           | 104,40           | 36,10              | 30,39              | 17,16              | 32,63              | 1,94           | 0,40           |
| 304,67           | 104,56           | 36,11              | 30,41              | 17,17              | 32,65              | 1,93           | 0,40           |
| 305,73           | 105,23           | 36,08              | 30,40              | 17,17              | 32,64              | 1,95           | 0,41           |
| 305,09           | 200,95           | 29,82              | 23,76              | 16,45              | 25,71              | 1,99           | 0,78           |
| 305,52           | 203,34           | 29,78              | 23,68              | 16,36              | 25,63              | 1,96           | 0,79           |
| 305,19           | 203,24           | 29,73              | 23,61              | 16,28              | 25,59              | 1,97           | 0,79           |
| 129,15           | 210,56           | 33,70              | 20,72              | 16,06              | 24,47              | 0,59           | 0,81           |
| 128,93           | 210,91           | 33,72              | 20,72              | 16,08              | 24,47              | 0,59           | 0,84           |
| 128,81           | 209,13           | 33,71              | 20,72              | 16,09              | 24,47              | 0,60           | 0,83           |
| 174,48           | 211,91           | 31,39              | 21,46              | 16,05              | 24,46              | 0,87           | 0,82           |
| 174,09           | 212,92           | 31,47              | 21,51              | 16,04              | 24,48              | 0,87           | 0,83           |
| 174,36           | 212,69           | 31,42              | 21,48              | 16,05              | 24,45              | 0,88           | 0,82           |
| 174,12           | 297,16           | 30,14              | 20,09              | 16,10              | 22,35              | 0,88           | 1,28           |
| 174,73           | 297,04           | 30,19              | 20,13              | 16,12              | 22,37              | 0,87           | 1,28           |
| 173,68           | 297,38           | 30,09              | 20,09              | 16,10              | 22,33              | 0,87           | 1,29           |
| 123,36           | 299,84           | 32,76              | 19,17              | 15,86              | 21,93              | 0,58           | 1,29           |
| 123,25           | 300,04           | 32,79              | 19,16              | 15,88              | 21,91              | 0,58           | 1,29           |
| 123,11           | 299,46           | 32,80              | 19,17              | 15,87              | 21,94              | 0,58           | 1,29           |

Çizelge Ek1.3. Kütlece %0.5'lik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı deney verileri

| Debi sıcak (l/h) | Debi soğuk (l/h) | T,sıcak giriş (°C) | T,sıcak çıkış (°C) | T,soğuk giriş (°C) | T,soğuk çıkış (°C) | ΔP sıcak (kPa) | ΔP soğuk (kPa) |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 303,00           | 301,89           | 26,74              | 20,73              | 15,75              | 21,98              | 1,99           | 1,28           |
| 302,25           | 301,77           | 26,70              | 20,71              | 15,73              | 21,96              | 1,98           | 1,28           |
| 302,35           | 301,42           | 26,64              | 20,69              | 15,73              | 21,93              | 2,00           | 1,28           |



## EK 2



Şekil Ek2.1 Kullanılan plakalı ısı değiştirgecinin teknik resmi

### EK 3

Şekil 2.3’de şeması verilen deney düzeneğinde kullanılan bileşenler aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge Ek3.1. Deney düzeneğinde kullanılan bileşenler ve kayıp katsayıları

| Bileşen                 | $K_L$ | Sıcak Devredeki Sayısı | Soğuk Devredeki Sayısı |
|-------------------------|-------|------------------------|------------------------|
| 90° Dirsek              | 1,5   | 7                      | 15                     |
| Te Bağlantı             | 0,9   | 9                      | 6                      |
| Küresel Vana (Tam Açık) | 0,05  | 1                      | 1                      |
| Şiber Vana (3/4 Kapalı) | 17    | 1                      | 1                      |
| Şiber Vana (Tam Açık)   | 0,15  | 1                      | -                      |
| Redüksiyon              | 0,3   | 1                      | 1                      |
| Rekor-Nipel-Manşon      | 0,08  | 11                     | 13                     |

Sistemdeki her iki devre için karakteristik hesabı yapılırken, Bernouli denklemi kullanılmaktadır[73]. Sistemde giriş ve çıkış noktaları arasında Bernouli denklemi yazılırsa;

$$\frac{P_g}{\rho g} + \frac{V_g^2}{2g} + z_g + H_p = \frac{P_\zeta}{\rho g} + \frac{V_\zeta^2}{2g} + z_\zeta + h_f + h_m + h_{PID} \quad (C.1)$$

Burada tanklar atmosfere açık olduğundan  $P_g$  ve  $P_\zeta$  atmosfer basıncına eşittir. Ayrıca tanklardaki akışkanlar durgun olarak kabul edildiğinde  $V_g$  ve  $V_\zeta$  sıfır olarak kabul edilebilir. Sistemde kullanılan boru çapı 21.2 mm’dir. Akışkan tanklarından çıkış ve giriş arasındaki toplam boru uzunlukları ve toplam  $K_L$  değerleri Çizelge Ek3.2’de verilmiştir.

Çizelge Ek3.2. Her iki devre için hesaplamalarda kullanılan değerler

| Parametre           | Sıcak Devre | Soğuk Devre |
|---------------------|-------------|-------------|
| Boru Uzunluğu (m)   | 6.1         | 7.3         |
| $z_{\zeta}-z_g$ (m) | -0.4        | 0           |
| $\Sigma K_L$        | 36.98       | 45.49       |

Denklem C.1’de değerler yerine yazıldığında,

$$H_p = h_f + h_m + h_{PID} + (z_{\zeta} - z_g) \quad (C.2)$$

elde edilir. Burada,  $h_f$  borularda sürtünmeden dolayı gerçekleşen kayıpları,  $h_m$  kullanılan sistem bileşenlerinin neden olduğu minör kayıpları,  $h_{PID}$  ise plakalı ısı değiştirgeci içerisinde olan kayıpları temsil etmektedir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır[73].

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (C.3)$$

$$h_m = \sum K_L \frac{V^2}{2g} \quad (C.4)$$

$$h_{PID} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (C.5)$$

Boru içindeki hız, debi ve boru kesit alanı cinsinden bulunduğunda,

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (C.6)$$

elde edilir. Denklem C.3, Denklem C.4, Denklem C.5 ve Denklem C.6 , Denklem C.1’de yerine yazılırsa, basma gücü,

$$H_p = f \frac{L}{D} \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} + \sum K_L \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} + h_{PID} + (z_{\zeta} - z_g) \quad (C.7)$$

olarak bulunur. Böylece Denklem C.7 kullanılarak sistemin karakteristiği belirlenebilecektir. Farklı Q değerleri için sistem için gereken pompa gücü hesaplanacaktır. Sürtünme katsayıları için aşağıda verilen sürtünme katsayısı korelasyonları kullanılabilir[11].

$$f = 0.316 \text{Re}_D^{-0.25} \rightarrow \text{Re} < 2.10^4 \quad (\text{C.8})$$

$$f = 0.184 \text{Re}_D^{-0.20} \rightarrow \text{Re} > 2.10^4 \quad (\text{C.9})$$

Burada Reynolds sayısı ise aşağıdaki gibi tanımlıdır.

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (\text{C.10})$$

Hesaplamalarda her iki devre için akışkanların üst limit parametreleri Çizelge Ek3.3’de verilmiştir. Buna göre sistemdeki maksimum sıcaklık soğuk devre için 50 °C olarak, sıcak devre içinse 70 °C olarak belirlenmiştir. Sıcak çevrimde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su kullanılacağından, sıcak devre için yapılan hesaplamalarda kullanılan akışkanın termo fiziksel özellikleri tezde anlatılan modeller kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılacak nanoakışkanın hacimsel konsantrasyonu ise maksimum %1 olarak kabul edilmiştir. PID içerisindeki oluşabilecek maksimum basınç kaybı ise suya oranla 2 kat artacağı kabul edilmiştir.

Çizelge Ek3.3. Soğuk devre için kabul edilen üst limit değerleri

| Soğuk Devre İçin Sistem Üst Limit Parametreleri        |                        |
|--|------------------------|
| Dinamik Viskozite (Pa.s)                               | 5.471x10 <sup>-4</sup> |
| Özkütle (kg/m <sup>3</sup> )                           | 988.14                 |
| PID içerisinde olabilecek maksimum basınç düşümü (kPa) | 5                      |

0 ile 3 m<sup>3</sup>/s arasında değişen debiler için H<sub>P</sub> hesaplamaları yapılmış ve Q-H(m) değerleri kullanılarak sistemin karakteristik eğrisi çizdirilmiştir. Sistemde kullanılan pompalar karakteristiği ise üretici tarafından sağlanan veriler kullanılarak çizdirilmiştir. Hesaplamalar için MATLAB kodu yazılmış ve bu kod EK 7’ de verilmiştir.

Çizelge Ek3.4. Sıcak devre için kabul edilen üst limit değerleri

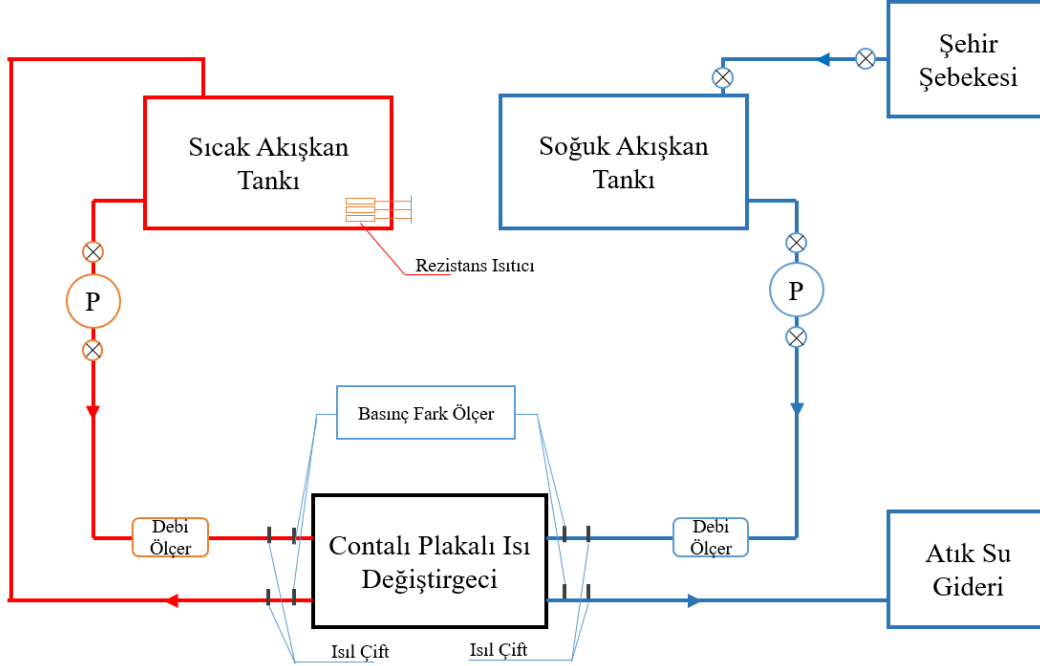
| Sıcak Devre İçin Sistem Üst Limit Parametreleri |                        |
|---|------------------------|
| Dinamik Viskozite (Pa.s)                        | 4.157x10 <sup>-4</sup> |

|  |        |
|--|--------|
| Özkütle (kg/m <sup>3</sup> )                           | 1007.5 |
| PID içerisinde olabilecek maksimum basınç düşümü (kPa) | 10     |



## EK-D KAVİTASYON HESAPLAMALARI

Deneyler sırasında pompalarda kavitasyon oluşmasını engellemek adına kavitasyon hesaplamaları yapılmış ve akışkan tanklarının yerleştirileceği yükseklikler belirlenmiştir. Şekil Ek4.1’de kurulumu gerçekleştirilen deney düzeneğinin şeması verilmiştir. Hesaplamalar her iki devre için ayrı ayrı yapılmıştır.



Şekil Ek4.1. Kurulumu yapılan deney düzeneğinin şeması

Sıcak devre için pompa ve akışkan tankı arasında net pozitif emme yükü Denklem D.1 ile hesaplanabilir.

$$NPSH_A = \frac{P_{atm}}{\rho g} - \frac{V_2^2}{2g} + h - \sum H_{L(1-2)} - \frac{P_b}{\rho g} \quad (D.1)$$

Burada,  $P_{atm}$  ve  $P_b$  atmosfer basıncını ve akışkanın buhar basıncını temsil etmektedir.

Sıcaklığın soğuk devreye göre daha yüksek olmasından dolayı, sıcak devrede kavitasyonun oluşması daha olasıdır. Hesaplamalar sıcak devrede maksimum 70 °C, soğuk devrede ise 50 °C olacağı kabul edilmiş ve hesaplamalar bu sıcaklıklar için yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan akışkan özellikleri ve sistem bileşenleri hakkında bilgiler Çizelge Ek4.1’de verilmiştir. Sıcak devrede nanoakışkan kullanılacağından dolayı hacimsel konsantrasyon maksimum %1 olarak kabul edilmiş ve termo fiziksel özellikleri tez içerisinde kullanılan modeller kullanılarak

hesaplanmıştır. Nanoakışkan buharlaşma basıncı ise su ile aynı olacak şekilde kabul edilmiştir. Bunun nedeni buharlaşacak moleküllerin su molekülleri olacağı düşünülmesidir.

Çizelge Ek4.1. Hesaplamalarda kullanılan sistem ve akışkan özellikleri

| Parametre                           | Sıcak Devre                        | Soğuk Devre            |
|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Akışkan                             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su | Su                     |
| Maks. Sıcaklık (°C)                 | 70                                 | 50                     |
| P <sub>buhar</sub> (kPa)            | 31.20                              | 12.34                  |
| P <sub>atm</sub> (kPa)              | 91.64                              | 91.64                  |
| Boru Uzunluğu (m)                   | 1.5                                | 1.5                    |
| Bileşenlerin Toplam Kayıp Katsayısı | 5.91                               | 5.01                   |
| Sürtünme Katsayısı                  | 0.0404                             | 0,02507                |
| Viskozite (Pa.s)                    | 4.157x10 <sup>-4</sup>             | 5.471x10 <sup>-4</sup> |
| Özkütle (kg/m <sup>3</sup> )        | 1007.5                             | 988.14                 |
| Yükseklik Farkı (m)                 | 0.9                                | 0.9                    |

Hesaplamalarda maksimum akışkan debisi 1 m<sup>3</sup>/sa olarak alınmıştır. Bu debi değerinde sistemin NPSH değeri hesaplanacak ve pompa üreticisi tarafından verilen kaviteasyon oluşmaması için gereken NPSH<sub>R</sub> değeri ile karşılaştırılacaktır. Eğer hesaplanan NPSH<sub>A</sub> değeri NPSH<sub>R</sub> değerinden büyük ise, pompalarda kaviteasyon oluşmayacaktır.

Kullanılan boruların akış alanının hesaplanması ile, debi değerinden akışkanın hızı kolaylıkla aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$Q = VA \quad (D.2)$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1m^3/sa}{\frac{\pi(0.0211)^2}{4}} = 0.794 m/s \quad (D.3)$$

Sistemde akışkan tankı ile pompa arasındaki bileşenlerden kaynaklanan ve boru içerisindeki sürtünmeden dolayı meydana gelen kayıpların hesapları aşağıda verilmiştir. Kullanılan kayıp katsayıları ÇizelgeEk4.1’de verilmiştir. Buna göre sıcak ve soğuk devredeki kayıplar aşağıdaki gibidir.

$$h_{l,bileşen,soğuk} = \sum K_L \frac{V^2}{2g} = 5.01 \cdot \frac{0.794^2}{2 \cdot 9.81} = 0.161 \quad (D.4)$$

$$h_{l,sürtünme,soğuk} = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.02507 \frac{1.5}{0.0211} \frac{0.794^2}{2 \cdot 9.81} = 0.0572 \quad (D.5)$$

$$h_{l,bileşen,sıcak} = \sum K_L \frac{V^2}{2g} = 5.91 \cdot \frac{0.794^2}{2 \cdot 9.81} = 0.190 \quad (D.6)$$

$$h_{l,sürtünme,sıcak} = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.0404 \frac{1.5}{0.0211} \frac{0.794^2}{2 \cdot 9.81} = 0.0922 \quad (D.7)$$

Akışkan tankları ve pompalar arasındaki toplam kayıp ise bileşenlerden ve sürtünmeden dolayı oluşan kayıpların toplamına eşittir. Bu durumda iki devre için toplam kayıplar;

$$\sum H_{L(1-2),soğuk} = h_{l,bileşen,soğuk} + h_{l,sürtünme,soğuk} = 0.161 + 0.0572 = 0.2182 \quad (D.8)$$

$$\sum H_{L(1-2),sıcak} = h_{l,bileşen,sıcak} + h_{l,sürtünme,sıcak} = 0.19 + 0.0972 = 0.2872 \quad (D.9)$$

Elde edilen bütün değerler Denklem D.1’de yerine yazıldığında,

$$NPSH_{A,soğuk} = \frac{91637}{988.14 \times 9.81} - \frac{0.794^2}{2 \times 9.81} + 0.9 - 0.2182 - \frac{12344}{988.14 \times 9.81} = 8.8295 \quad (D.10)$$

$$NPSH_{A,sıcak} = \frac{91637}{988.14 \times 9.81} - \frac{0.794^2}{2 \times 9.81} + 0.9 - 0.2872 - \frac{31202}{1007.5 \times 9.81} = 6.877 \quad (D.11)$$

olarak bulunur. Kullanılan pompaların üreticisi ile irtibata geçilmiş ancak  $NPSH_R$  değerlerine ulaşamamıştır. Ancak benzer pompalar ile karşılaştırma yapıldığında sağlanan  $NPSH_A$  değerlerinin, pompalarda kavitasyonun oluşmayacağını göstermektedir. Kurulum tamamlandıktan sonra testler sırasında sistemde herhangi



bir anda kavitasyon oluşmamış, oluşması halinde ise akışkan tanklarının yükseklikleri artırılarak bu sorunun çözüleceği düşünülmüştür. Deneyler sırasında ise hesaplamalarda kabul edilen maksimum sıcaklıklara ulaşılmadığından dolayı herhangi bir kavitasyon oluşması daha zor hale gelmiştir.



## EK 5

```
clc
clear all
format long
syms C hh hc
%Veri okuma%
VV=xlsread('suveri');
%Column names 3-12 (K) 13-20 (C) (1:FRate_h, 2:FRate_c, 3:Thi, 4:Tho,
5:Tci, 6:Tco,
%       7:DelP_h, 8:DelP_c, 9:Tcb, 10:Thb, 11:Tw, 12:DelTLM
%       13:Thi, 14:Tho, 15:Tci, 16:Tco, 17:Tcb, 18:Thb,
19:Tw, 20:DelTLM)

Dp=0.0211;
Aef=0.02;
Nt=19;
Np=1;
b=0.00255;
Lv=0.178;
Lh=0.05;
Lw=Lh+Dp;
Lp=Lv-Dp;
A=Lp*Lw;
Fi=Aef/A;
Ncp=(Nt-1)/(2*Np);
Dh=2*b/Fi;
De=2*b;
kp=16.2;
t=0.0005;
% Avg %
for j=1:20
    for i=1:38
        V(i,j)=(VV(3*i-2,j)+VV(3*i-1,j)+VV(3*i,j))/3;
    end
end
%Thermal Properties%

for i=1:38
    %First column values belong to the hot cycle%
    %rho (kg/m3)
    rho(i,1)=(999.83592+16.94517*V(i,18)-0.00798704*V(i,18)^2-
0.000046170461*V(i,18)^3+1.0556302*10^-7*V(i,18)^4-2.8054253*10^-
10*V(i,18)^5)*(1+0.01687985*V(i,18))^-1;
    rho(i,2)=(999.83592+16.94517*V(i,17)-0.00798704*V(i,17)^2-
0.000046170461*V(i,17)^3+1.0556302*10^-7*V(i,17)^4-2.8054253*10^-
10*V(i,17)^5)*(1+0.01687985*V(i,17))^-1;
    %Cp (kj/kgK)
    Cp(i,1)=1000*(17.6611-0.147914*V(i,10)+6.08619*10^-4*V(i,10)^2-
1.11867*10^-6*V(i,10)^3+7.80297*10^-10*V(i,10)^4);
    Cp(i,2)=1000*(17.6611-0.147914*V(i,9)+6.08619*10^-4*V(i,9)^2-
1.11867*10^-6*V(i,9)^3+7.80297*10^-10*V(i,9)^4);
    %Conductivity k (W/mK)
    k(i,1)=-0.61694+7.1785*10^-3*V(i,10)-1.167*10^-
5*V(i,10)^2+4.704*10^-9*V(i,10)^3;
    k(i,2)=-0.61694+7.1785*10^-3*V(i,9)-1.167*10^-
5*V(i,9)^2+4.704*10^-9*V(i,9)^3;
```

```

k(i,3)=-0.61694+7.1785*10^-3*V(i,11)-1.167*10^-
5*V(i,11)^2+4.704*10^-9*V(i,11)^3;
%viscosity nu (kg/m s)
nu(i,1)=(exp(-3.7188+(578.919/(-137.546+V(i,10)))))*10^-3;
nu(i,2)=(exp(-3.7188+(578.919/(-137.546+V(i,9)))))*10^-3;
nuw(i,1)=(exp(-3.7188+(578.919/(-137.546+V(i,11)))))*10^-3;
nuw(i,2)=(exp(-3.7188+(578.919/(-137.546+V(i,11)))))*10^-3;
%Prandtl Number
Pr(i,1)=Cp(i,1)*nu(i,1)/k(i,3);
Pr(i,2)=Cp(i,2)*nu(i,2)/k(i,3);
% Mass flow rate of channel Gc
Gc(i,1)=rho(i,1)*V(i,1)/(Ncp*b*Lw);
Gc(i,2)=rho(i,2)*V(i,2)/(Ncp*b*Lw);
%Re Number
Re(i,1)=Gc(i,1)*De/nu(i,1);
Re(i,2)=Gc(i,2)*De/nu(i,2);
%Uort%
Q(i,1)=(rho(i,1)*V(i,1)*Cp(i,1)*(V(i,3)-
V(i,4))+rho(i,2)*V(i,2)*Cp(i,2)*(V(i,6)-V(i,5)))/2;
U(i,1)=Q(i,1)/((Nt-2)*Aef*V(i,20));
%delp
Gp(i,1)=rho(i,1)*V(i,1)/(pi*Dp^2/4);
Gp(i,2)=rho(i,2)*V(i,2)/(pi*Dp^2/4);
delp(i,1)=(1.4*Np*Gp(i,1)^2/(2*rho(i,1)))/1000;
delp(i,2)=(1.4*Np*Gp(i,2)^2/(2*rho(i,2)))/1000;
delpch(i,1)=V(i,7)-delp(i,1);
delpch(i,2)=V(i,8)-delp(i,2);
%friction factor
fric(i,1)=(1000*delpch(i,1)/4)*(Dh/(Lv*Np))*(2*rho(i,1)/Gc(i,1)^2)*
(nu(i,1)/nuw(i,1))^0.17;
fric(i,2)=(1000*delpch(i,2)/4)*(Dh/(Lv*Np))*(2*rho(i,2)/Gc(i,2)^2)*
(nu(i,2)/nuw(i,2))^0.17;
end

er=1;
a=0.9;
ccc=0;
X1=zeros(1,38);
Y1=zeros(1,38);
while er>10^-5
    ccc=ccc+1
    for i=1:38
        Y1(1,i)=(1/U(i,1)-
t/kp)*(k(i,2)/Dh)*(Re(i,2)^a*Pr(i,2)^(1/3))*(nu(i,2)/nuw(i,1))^0.14);
X1(1,i)=((k(i,2)/Dh)*(Re(i,2)^a*Pr(i,2)^(1/3))*(nu(i,2)/nuw(i,1))^0.1
4)/((k(i,1)/Dh)*(Re(i,1)^a*Pr(i,1)^(1/3))*(nu(i,1)/nuw(i,1))^0.14));
    end
    g1=(polyfit(X1,Y1,1));
    s1=g1(1,1);
    i1=g1(1,2);
    c1=1/s1;
    c2=1/i1;

    X2=zeros(1,38);
    Y2=zeros(1,38);
    for j=1:38
        yq1(j)=(1/U(j,1)-t/kp);

```

```

        f1(j)=(k(j,1)/Dh);
        f2(j)=(k(j,2)/Dh);

h1(j)=c1*(Re(j,1)^a*Pr(j,1)^(1/3)*(nu(j,1)/nuw(j,1))^0.14)*f1(j);
h2(j)=c2*(Re(j,2)^a*Pr(j,2)^(1/3)*(nu(j,2)/nuw(j,1))^0.14)*f2(j);
        Y2(1,j)=log((yq1(j)-
(1/h1(j))*Pr(j,2)^(1/3)*f2(j)*(nu(j,2)/nuw(j,1))^0.14);
        X2(1,j)=log(Re(j,2));
end
g2=(polyfit(X2,Y2,1));
s2=abs(g2(1,1));
er=abs(s2-a);
i2=abs(g2(1,2));
cc=(exp(-i2))
a=s2
end

```



**EK 6**

Çizelge Ek6.1. Alınan malzemelerin fiyat listesi

| Kalem Adı                       | Adet | Adet Fiyatı (TL) | Toplam (TL) |
|---------------------------------|------|------------------|-------------|
| Al2O3/su Nanoakışkan            | 4    | 1191,07          | 4764,28     |
| Manyetik Debimetre              | 2    | 2046,11          | 4092,22     |
| J-Tip Termo Çift                | 4    | 88,19            | 352,78      |
| Sirkülasyon Pompası             | 2    | 250              | 500         |
| 20 mm PPRC Kompozit Boru        | 16   | 2,46             | 39,36       |
| 11/2 x 1 Pompa Rekoru           | 4    | 4,45             | 17,8        |
| 20 mm PPRC Dirsek               | 14   | 0,32             | 4,48        |
| 20 mm PPRC Küresel Vana         | 4    | 9,9              | 39,6        |
| 15 mm Glob Vana Dişli           | 2    | 155              | 310         |
| 1x1/2 Redüksiyon                | 4    | 1,71             | 6,84        |
| 20 x 1/2 PPRC Erkek Oynar Rekor | 12   | 5                | 60          |
| 20 x 1/2Dişli Filanş            | 4    | 15,5             | 62          |
| 20 x 1/2 Erkek Adaptör          | 4    | 2,78             | 11,12       |
| 11/4 x1 Prinç Pompa Rekoru      | 2    | 38,5             | 77          |
| 1/2 Küresel Vana                | 2    | 7,9              | 15,8        |
| 1/2 Şiber Vana                  | 3    | 12,35            | 37,05       |
| 20 x 1/2 x 20 Erkek Te          | 16   | 2,72             | 43,52       |
| 1/2 Galvaniz Nipel              | 4    | 1,35             | 5,4         |
| 20 x 1/2 Dişi Adaptör           | 6    | 1,9              | 11,4        |
| 20 x 1/2 Erkek Adaptör          | 6    | 2,27             | 13,62       |
| 2 x 1/2 Redüksiyon              | 1    | 8,95             | 8,95        |
| 1/2 1 cm Musluk Uzatma          | 4    | 5,27             | 21,08       |
| 12 mm Cıvata                    | 16   | 2,5              | 40          |
| 12 mm Cıvata Somunu             | 16   | 0,4              | 6,4         |
| Manyetik Karıştırıcı            | 1    | 666,51           | 666,51      |
| Manyetik Balık                  | 10   | 12,07            | 120,7       |
| Cam Beher 2000 ml               | 6    | 20,97            | 125,82      |
| 3x1,5 TTR Kablo                 | 10   | 4                | 40          |
| 3x2,5 TTR Kablo                 | 5    | 6                | 30          |
| Pnömatik Boru                   | 15   | 1                | 15          |
|                                 |      |                  |             |
| Malzeme Toplam                  |      | 11538,73         |             |
| Nakliye                         |      | 75               |             |
| KDV (%18)                       |      | 2090,4714        |             |
| KDV Dahil Toplam                |      | 13704,2014       |             |

## EK 7

```
clc
clear all
%% Soguk Cevrim %%
K=45.49;
g=9.807;
v=[5.5366*10^-7 3.26*10^-7];
L=7.3;
D=0.0211;

QQ=[0 0.1 0.3 0.5 0.7 1 1.2 1.5 1.7 2 2.5 3 ];
Qpump=[0 0.5 1 1.25 1.75];
hpump=[2.4 2 1.5 1.2 0.5];
Qpump35=[0 0.5 1 1.5 2];
hpump35=[3.5 3 2.5 1.7 1];
Qpump55=[0 0.5 1.25 1.87 2.25];
hpump55=[4.6 4 3 2 1.3];
for i=1:12
    Q(i)=QQ(i)/3600;
    V(i)=4*Q(i)/(pi*D^2);
    for j=1:2
        Re(i,j)=V(i)*D/v(j);
        f(i,j)=((-1)/(1.8*log10((7.109*10^-5/3.7)^1.11+6.9/Re(i,j))))^2;
    end
    Hpsg4(i,j)=8*f(i,j)*L*Q(i)^2/(pi^2*D^5*g)+K*8*Q(i)^2/(pi^2*D^4*g)+0.5;
    Hpsg0(i,j)=8*f(i,j)*L*Q(i)^2/(pi^2*D^5*g)+K*8*Q(i)^2/(pi^2*D^4*g);
end
end
%figure
%plot(QQ,Hpsg4,QQ,Hpsg0,Qpump,hpump,Qpump35,hpump35,Qpump55,hpump55)

% SICak Cevrim %%
K=36.98;
g=9.807;
v=[4.126*10^-7 6.52*10^-7];
L=6.1;
D=0.0211;

QQ=[0 0.1 0.3 0.5 0.7 1 1.2 1.5 1.7 2 2.5 3 ];
% LRS
Qpump=[0 0.5 1 1.25 1.75];
hpump=[2.4 2 1.5 1.2 0.5];
Qpump35=[0 0.5 1 1.5 2];
hpump35=[3.5 3 2.5 1.7 1];
Qpump55=[0 0.5 1.25 1.87 2.25];
hpump55=[4.6 4 3 2 1.3];
% RGN 25-60
Q2=[0 0.5 1 1.51 2 2.51];
h2=[6.29 5.8 4.97 4.07 3.28 2.38];
% DAB VA 35
Q3=[0 0.5 1.2 1.8 2.4 3];
h3=[4.3 3.9 3.4 2.8 2.15 1.4];

for i=1:12
```

```

Q(i)=QQ(i)/3600;
V(i)=4*Q(i)/(pi*D^2);
for j=1:2
Re(i,j)=V(i)*D/v(j);
f(i,j)=0.5814*Re(i,j)^-0.2986;

HpSC4(i,j)=8*f(i,j)*L*Q(i)^2/(pi^2*D^5*g)+K*8*Q(i)^2/(pi^2*D^4*g)+1.
02-0.4;

HpSC0(i,j)=8*f(i,j)*L*Q(i)^2/(pi^2*D^5*g)+K*8*Q(i)^2/(pi^2*D^4*g)-
0.4;
end
end
%figure
%plot(QQ,HpSC4,QQ,HpSC0,Qpump,hpump,Qpump35,hpump35,Qpump55,hpump55)
figure
plot(Qpump55,hpump55,'k--','LineWidth',2)
hold on
plot(Q2,h2,'k-.','LineWidth',2)
hold on
plot(Q3,h3,'k:','LineWidth',2)
hold on
plot(QQ,HpSC4(:,1),'r-','LineWidth',2)
plot(QQ,HpSC0(:,1),'b-','LineWidth',2)
axis([0,2.1,0,7])
title('Pump and System Characteristics')
xlabel('Q (m^3/h)','FontSize',20)
ylabel('h (m)','FontSize',20)

```

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Ufuk Kayabaşı  
**Uyruğu** : Türkiye Cumhuriyeti  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 15.02.1993 Yenimahalle  
**E-posta** : ufkayabasi@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2018, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

| Yıl        | Yer                                 | Görev   |
|------------|-------------------------------------|---------|
| 2014-Eylül | Eüaş Bursa Orhaneli Termik Santrali | Stajyer |
| 2015-Eylül | TAEK ÇNAEM                          | Stajyer |

**YABANCI DİL:** İngilizce (Orta üstü seviye), İtalyanca, Fransızca (Giriş Seviyesi)

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kayabasi, U., Aradag, S., Kakac, S.,** “Experimental investigation of thermal and hydraulic performance of a plate heat exchanger using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> % nanofluid”, 6th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2018), June 2018.
- **Kakac, S., Kayabasi, U., Aradag, S.,** “Experimental investigation of thermal and hydraulic performance of a plate heat exchanger using nanofluids, X. Minsk International Seminar: Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”, September 2018.