



**FARKLI EN/BOY ORANLARINA SAHİP
DÖRTGEN KANALLARDA NANOAKIŞKAN
AKIŞININ VE ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Oğuzhan ASLAN

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ**

**FARKLI EN/BOY ORANLARINA SAHİP DÖRTGEN KANALLARDA
NANOAKIŞKAN AKIŞININ VE ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Oğuzhan ASLAN

**T.C.
KARABÜK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALINDA
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ**

**KARABÜK
Temmuz 2021**

Oğuzhan ASLAN tarafından hazırlanan “FARKLI EN/BOY ORANLARINA SAHİP DÖRTGEN KANALLARDA NANOAKIŞKAN AKIŞININ VE ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ

.....

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 13/07/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof.Dr. Ali KEÇEBAŞ(MSKÜ)

.....

Üye : Prof.Dr. Muhammet KAYFECİ(KBÜ)

.....

Üye : Doç.Dr. Engin GEDİK(KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Oğuzhan ASLAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI EN/BOY ORANLARINA SAHİP DÖRTGEN KANALLARDA NANOAKIŞKAN AKIŞININ VE ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Oğuzhan ASLAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ

Temmuz 2021, 74 sayfa

Bu çalışmada, dörtgen kesitli kanaldaki hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan SiO_2/su nanoakışkan akışının akış ve ısı transferi karakteristikleri laminer akış şartları altında ($400 < Re < 2000$) deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmaların yapılabilmesi için bir deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Üç farklı en boy oranı ($\alpha=0.33$; 0.66 ve 1.0) tasarlanmış ve her kanal için deney düzeneğinde 1500 mm uzunluk kullanılmıştır. Kanal yüzeyine $500 W/m^2$ sabit ısı akısı uygulanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin doğruluğunu kanıtlamak amacı ile aynı çalışmalar Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (*HAD*) programı olan ANSYS Fluent 19.0 kullanarak aynı sınır şartları altında analiz edilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda Reynold sayısının (Re), en boy oranının ve nanoakışkan kullanımının Nusselt sayısı (Nu) sayısı ve Darcy sürtünme faktörü (f) üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre saf su yerine nanoakışkan kullanımı ısı transferinde yaklaşık %5 kadar bir artış sağlamıştır. Ek olarak, en/boy oranı ve Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak genel bir Nusselt sayısı korelasyonu geliştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler : En/boy oranı, nanoakışkan, laminar Akış, termofiziksel özellikler, Isı Transferi, ısı iletkenlik.

Bilim Kodu : 91412

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF NANOFLUID FLOW AND HEAT TRANSFER IN QUADRANGULAR CHANNELS WITH DIFFERENT ASPECT RATIOS

Oğuzhan ASLAN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ

July 2021, 74 pages

In this study, flow, and heat transfer characteristics of hydrodynamic and thermally developing $SiO_2/water$ nanofluid flow in a quadrangular cross-section channel have been studied experimentally and numerically under laminar flow conditions ($400 < Re < 2000$). An experimental assembly has been designed and manufactured to carry out experimental studies. The three different aspect ratios ($\alpha = 0.33; 0.66$ and 1.0) have been designed and the length of 1500 mm has been used in the experimental rig for each channel. A constant heat flux of $500 W/m^2$ has been conducted to the channel surface. In order to demonstrate the accuracy of the data obtained from the experimental studies, the same studies have been analysed under same boundary conditions by using ANSYS Fluent 19.0, which is Computational Fluid Dynamics (CFD) program. As result of experimental and numerical studies, the effects of Reynolds (Re) number, aspect ratio and nanofluid on the Nusselt number (Nu) and Darcy friction factor (f) have been determined. According to the results obtained from experimental and numerical studies, the usage of nanofluid instead of pure water has been resulted an increase in heat transfer rate by 5%. In addition, a general Nusselt

number correlation as the function of aspect ratio and Reynolds number has been developed.

Key Word : Aspect ratio, nanofluid, Laminar flow, thermophysical properties, heat transfer, heat conductivity.

ScienceCode : 91412

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam sayın Prof.Dr. Muhammet KAYFECİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney düzeneğinin kurulmaya başlanmasından itibaren maddi ve manevi desteğini esirgemeyen hocalarım Prof.Dr. Ali KEÇEBAŞ'a, Doç.Dr. Engin GEDİK'e, Dr.Öğr.Üyesi Ali UYSAL'a ve Dr. Edip TAŞKESEN'e teşekkür ederim. Yüksek lisans tezim boyunca her türlü fedakârlıklara katlanarak bilgi ve birikimini benden esirgemeyen değerli arkadaşlarım Makine Mühendisi Hayati Kadir PAZARLIOĞLU'na ve Endüstriyel Tasarım Yüksek Mühendisi Ecem Tuğçe ÖZBEK'e teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans tez çalışması Karabük Üniversitesi KBÜBAP-FYL-2020-2206 nolu Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) kapsamında desteklenmiştir. Karabük Üniversitesi'ne verdiği desteklerden dolayı teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak, iyi bir öğrenim görmem için imkanlar sağlayan, bana her zaman güvenen ve destek olan en başta annem Songül ASLAN olmak üzere sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
BÖLÜM 3	13
NANOAKIŞKANLAR	13
3.1. NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	13
3.1.1. Isıl İletkenlik.....	13
3.1.1.1. Isıl iletkenliği Etkileyen Faktörler	14
3.1.2. Viskozite	21
3.1.3. Yoğunluk	21
3.1.4. Özgül ısı.....	22
3.2. NANOAKIŞKAN HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ	22
3.2.1. Tek Adım Yöntemi.....	23
3.2.2. İki Adım Yöntemi	24
3.3. NANOAKIŞKAN TÜRLERİ	25

	<u>Sayfa</u>
3.4. KULLANIM ALANLARI	24
3.4.1.Ulaşım	25
3.4.2. Elektronikte	25
3.4.3. Havalandırma ve İklimlendirme Sistemlerinde.....	25
3.4.4. Malzemelerde	26
BÖLÜM 4	27
MATERYAL VE METOT	27
4.1. DENEYSEL YÖNTEM	27
4.1.1. Deney Düzenegi.....	27
4.1.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Ekipmanlar	30
4.1.2.1. Debimetre.....	30
4.1.2.2. Veri Toplayıcı	31
4.1.2.3.Ultrasonik Banyo	31
4.1.2.4.Ampermetre	32
4.1.2.5. Pompa	33
4.1.2.6. Basınç Transmitteri.....	33
4.1.3. Deneylerin Yapılışı	34
4.1.4.Belirsizlik Analizi	35
4.2. METOT	36
4.2.1.Sayısal Yöntemler	36
4.2.1.1 Sonlu Hacimler Yöntemi	36
4.2.1.2AnsysFluent	37
4.2.1.3. Geometri ve Ağ Yapısının Oluşturulması	38
4.2.2. Sınır Koşulları	40
4.2.3. Isı Transfer Performansı	40
BÖLÜM 5	43
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	43
5.1. DENEYSEL SONUÇLAR.....	43
5.1.1. Saf su ile Doğrulama	43

	<u>Sayfa</u>
5.1.2.Nanoakışkan Akışı.....	45
5.1.3. Isı Taşınım Katsayısı (h).....	46
5.1.4.Nusselt Sayısı (Nu).....	47
5.1.5. Darcy Sürtünme Faktörü (f).....	48
5.2. SAYISAL SONUÇLAR.....	50
5.2.1 Nusselt Sayısı (Nu).....	50
5.2.2. Darcy Sürtünme Faktörü (f).....	51
5.2.3. Basınç Düşümü (ΔP).....	53
5.2.4. Isı Taşınım Katsayısı (h).....	54
5.2.5. Performans Değerlendirme Kriteri (PEC).....	59
5.3 DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	60
BÖLÜM 6.....	62
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. a) Yıllara göre nanoakışkan ile ilgili yapılan çalışmalar, a) yayınlanan makale b) yapılan atıflar.	7
Şekil 2.2. Lee ve arkadaşlarının, yapmış oldukları çalışmada hacimsel oran ile ısı iletim katsayısının artış grafiği.	9
Şekil 2.3. Partikül boyutlarının nanoakışkanlarda ısı iletimindeki etkileri [54]	10
Şekil 3.1. a) Al ₂ O ₃ -su b) CuO- su nanoakışkanlarının hacim konsantrasyonunun ısı iletim katsayısının artış oranına etkisi.....	15
Şekil 3.2. a) Al ₂ O ₃ -su b) CuO-su nanoakışkanının pH değerlerinin ısı iletim katsayısının artış oranına etkisi.....	15
Şekil 3.3. Al ₂ O ₃ -su nanoakışkanında sıcaklığın ısı iletim katsayısının artış oranına etkisi... ..	16
Şekil 3.4. Temel akışkanın ısı iletim katsayısının artış oranına etkisi	16
Şekil 3.5. a) Su ve b) Etilen glikol temel akışkanları için partikül malzemesinin ısı iletim katsayısının artış oranına etkisi.....	17
Şekil 3.6. CuO-su nanoakışkanı için partikül boyutunun ısı iletim katsayısının artış oranına etkisi.	18
Şekil 3.7. a) SiC-su b) SiC-EG nanoakışkanları için partikül şeklinin ısı iletim katsayısının artışına etkisi[.	18
Şekil 3.8. Nanoakışkanların hazırlama işlemleri.....	23
Şekil 4.1. Deney düzeneği resmi.....	28
Şekil 4.2. Deney Düzeneği şematik resmi.	28
Şekil 4.3. Isıtıcı rezistans bağlantısı.....	30
Şekil 4.4. Debimetre Arduino devresi.....	31
Şekil 4.5. Veri toplayıcı	31
Şekil 4.6. Ultrasonik Banyo	32
Şekil 4.7. Pens Ampermetre.....	32
Şekil 4.8. Sirkülasyon pompası.....	33
Şekil 4.9. Basınç Transmitteri.....	34
Şekil 4.10. Problem geometrisi şematik gösterimi	38
Şekil 4.11. Hesaplanan Nu değerlerinin hücre sayısına bağlı değişimi.	39
Şekil 4.12. Farklı boyutlardaki dörtgen kanallarda çözüm ağı yapısı.....	39

Şekil 5.1. Saf suyun deneysel çalışmalardaki farklı boyutlardaki Nusselt değişimi..	44
Şekil 5.2. Saf suyun deneysel çalışmalardan (10x30) elde edilen sonuçların literatür ile karşılaştırılması.	
Şekil 5.3. Saf suyun deneysel çalışmalardan (20x30) elde edilen sonuçların literatür ile karşılaştırılması.	
Şekil 5.4. Saf suyun deneysel çalışmalardan (30x30) elde edilen sonuçların literatürle	
Şekil 5.5. SiO ₂ -Su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Re değerine göre değişimi.	
Şekil 5.6. SiO ₂ -Su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Re değerine göre değişimi.	
Şekil 5.7. SiO ₂ -Su nanoakışkanı için Darcy sürtünme faktörü değerinin Re değerine göre değişimi.	
Şekil 5.8. SiO ₂ -Su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Re değerine göre değişimi..	51
Şekil 5.9. SiO ₂ -Su nanoakışkanı için Darcy sürtünme faktörü değerinin Re değerine göre değişimi.	
Şekil 5.10. SiO ₂ -Su nanoakışkanı için basıncın Re değerine göre değişimi.	
Şekil 5.11. SiO ₂ -Su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Re değeri göre değişimi.	
Şekil 5.12. 10x30 en-boy oranında dörtgen kanalda Nu değişimi, a)Saf su Re=400, b)Saf su, Re=1200, c) Saf su, Re=2000, d) Nanoakışkan, Re=400, e) Nanoakışkan, Re=1200, f) Nanoakışkan, Re=2000.	
Şekil 5.13. 20x30 en-boy oranında dörtgen kanalda Nu değişimi, a)Saf su Re=400, b)Saf su, Re=1200, c) Saf su, Re=2000, d) Nanoakışkan, Re=400, e) Nanoakışkan, Re=1200, f) Nanoakışkan, Re=2000.	
Şekil 5. 14. 30x30 en-boy oranında dörtgen kanalda Nu değişimi, a)Saf su Re=400, b)Saf su, Re=1200, c) Saf su, Re=2000, d) Nanoakışkan, Re=400, e) Nanoakışkan, Re=1200, f) Nanoakışkan, Re=2000.	
Şekil 5.15. Duvar sıcaklığı değişimi	58
Şekil 5.16. Performans Değerlendirme Kriteri	
Şekil 5.17. Deneysel ve Sayısal Nusselt Sonuçlarının Karşılaştırılması	60
Şekil 5.18. Deneysel ve Sayısal Darcy Sürtünme Faktörü Sonuçlarının Karşılaştırılması.	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Sıkça kullanılan malzemelerin ısı iletkenlikleri.....	14
Çizelge 3.2. Katı-sıvı süspansiyonları için efektif ısı iletkenlik modelleri.....	20
Çizelge 3.3. Farklı süspansiyonların viskozite tahmini için yapılan modeller.	21
Çizelge 3.4. Literatürde bulunan bazı nanoakışkanlar ve hazırlanma metotları.....	24
Çizelge 4.1. Ölçüm cihazlarında belirsizlikler.....	36

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

q''	: Isı akısı, (W/m ²)
Q	: Isı transferi miktarı, (W)
m	: Kütle, (kg)
\dot{m}	: Kütledebisi, (kg/s)
C_p	: Isı kapasitesi, (kJ/kgK)
ρ	: Yoğunluk, (kg/m ³)
$C_{p,nf}$: Nanoakışkanın özgül ısısı, (kJ/kgK)
ρ_{nf}	: Nanoakışkan yoğunluğu, (kg/m ³)
k_{nf}	: Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı, (W/mK)
L	: Uzunluk, (m)
$T_{\dot{c}}$: Çıkış sıcaklığı, (K)
T_w	: Kanalyüzey sıcaklığı, (K)
T_b	: Ortalama akışkan sıcaklığı, (K)
A_s	: Yüzey alanı, (m ²)
v	: Akışkan hızı, (m/s)
f	: Sürtünme faktörü
Nu	: Nusselt sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
Re	: Reynolds sayısı
ΔP	: Basınç kaybı, (Pa)
μ	: Dinamikviskozite, (Pa.s)
Φ	: Nano partikül hacimsel konsantrasyonu (%)

KISALTMALAR

CFD : Computational Fluid Dynamics (Hesaplama Akışkanlar Mekaniki)

HAD : Hesaplama Akışkanlar Dinamiki

SHY : Sonlu Hacimler Yöntemi

PDK : Performans Değerlendirme Katsayısı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsanoğlunun ilerleyen dönemlerde ve yıllarda üzerinde durması gereken konulardan biri olarak gösterilen enerji, hayatımızda büyük önem kazanmaya başlamıştır [1]. Sürekli gelişen dünya ile birlikte artan nüfusun fosil yakıt rezervlerinin gittikçe azalıyor olması nedeniyle enerjiye olan eğilimi arttırdığı bilinmektedir. Sürekli kendisini yenilemesine rağmen günümüz dünyasında en çok kullanılan fosil yakıtların bitme noktasına gelmesinden dolayı, olması gerektiğinden fazla enerji tüketimi ve atmosfere salınan zararlı gazların minimum seviyeye düşürülmesi insanoğlunun ve gelecek neslin sağlığı noktasında hayati önem kazanmıştır [2].

Tüm dünya yaşamı için gerekli olan enerji tükendiği zaman kendi kendini yenilemeyen kaynak olarak bilinen fosil yakıtlar; petrol, doğal gaz ve kömürden oluşmaktadır. Gelişen ve büyüyen Türkiye olarak artan nüfus enerjiye olan ihtiyacı arttırmakta ve yapısal reformlar gerektirmektedir. Türkiye'nin fosil yakıtlara olan düşkünlüğünde ise yıllara oranla kullanıma bakıldığında sırasıyla; 1970 yılında %88, 2000 yılında %87,2; 2010 yılında %80 ve son olarak 2013 yılında ise en yüksek ve alarm veren seviyeye %88,9 olarak kayda geçmiştir [3,4]. Sonuçların bu denli alarm vermesi bir ülkenin enerjiye olan bakışını değiştirmesi gerektiğini göstermektedir [5]. Gelişen teknoloji ve bilinçlenen bireylerin sayısının artması ile fosil yakıt kullanımının dünyaya verdiği olumsuz tablo görüldüğünde alternatif enerji kaynaklarına olan merak artmış ve bu alandaki çalışmalar hız kazanmıştır. Sıkça kullanılan hazır enerji kaynakları, ısı enerjisinden dönüştürülerek elde edilebilir [9]. Isı enerjisi; evlerde ısıtma ve soğutma sistemlerinde, elektronikte soğutma uygulamalarında, arabalarda radyatörlerde vb. uygulama sahalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Diğer yandan gündelik hayatta ana ihtiyaç olarak görülen konutlarda, sanayide vb. yerlerde sıkça karşımıza çıkmaktadır [6,7]. Cihazların soğutulmasında en önemli özelliklerinden olan ısı iletim katsayısı çalışan hücrelerde ve ısı değiştiricilerin

soğutma kapasitesindeki verimliliğini etkileyen en önemli husus olarak kabul edilmektedir [8].

Sanayi ve soğutma endüstrisi gibi birçok alanı doğrudan etkileyen konu olan ısı transferi, enerjiye yönelik çalışmaları yani enerji tasarrufu alanındaki çalışmalar hız kazanmıştır [10].

Isı transferinin söz konusu olduğu çalışmalarda ısı geçişinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanan birçok metot bulunmakta ve bu konuda en etkili tekniğin termofiziksel özelliklerinden olan ısı transferini geliştirmektir. Bu bağlamda ısı değiştiricilerin ısı transferini iyileşirmek için yüzey alanını arttırmak gözle görülür yükseliş sağlamaktadır. Fakat geometrik yapısı ve büyüklüğünün artması ısı değiştiricinin kullanım alanını daraltmaktadır. Bu olumsuzluklar düşünüldüğünde, küçük boyutlardaki materyaller ile çalışmak daha elverişli ve verimli olduğundan dolayı çok küçük boyutlarda olan nanoakışkanlar ile çalışmalar hız kazanmıştır [11].

Isı transferinin etkinliğini artırmak için çeşitli teknikler yapılmakta; ısı transfer yüzey alanını artırmak, ısı transferinin söz konusu olduğu noktalarda kanatçıklar kullanmak pürüzler eklemek gibi metotlar tercih edilebilmektedir [12]. Termofiziksel özelliklerinden en hayati öneme sahip olan ısı iletkenlik mevcut akışkanın içerisine kendi ısı transfer iletkenliğinden daha gelişmiş olan nanopartikül ekleyerek ısı transferini daha iyi noktalara getirilebilmektedir. Metal ve metal oksit nanopartiküllerin literatürdeki diğer birçok çalışmadaki gibi içerisine belirli oranlarda süspansiyon edilerek meydana getirilen bu akışkanlar nanoakışkan olarak adlandırılmakta ve geleneksel akışkanlara göre üstün ısı transferi özellikleri sergilemektedirler. [8].

Isı transferini istenilen seviyelere getirdiği için nanoakışkanlarla ilgili literatürde çeşitli birçok çalışma bulunmaktadır [13,19]. Çalışmalarda baz akışkanın termofiziksel özelliklerinde ısı transferini önemli noktalara getirmek için sayısız analitik, teorik çalışmalar görülebilmekte ve bilim insanları soğutma, ısıtma endüstrisi gibi alanlarda büyüklüğü 100 nanometreden daha küçük olan nanoakışkanları harmanlayarak kullanmaktadır [20-22].

Nanoakışkanların ısı transferi çalışmaları son yüzyılda önem kazanmış ve bu üstün özelliklere yakından bakıldığında; yüksek çalışma performansı, enerji kapasitesinin istenilen seviyelerde olması ve yüksek ısıl etkinliğidir. Belirtilen birçok üstün özelliklerinden de anlaşılacağı gibi çeşitli alanlarda tercih edilmektedir. Örneğin; ulaşımdan sağlığa, elektronikten enerji endüstrisi gibi sayısız alanda faydaniılmaktadır. Diğer bir yandan farklı formda ve değişik akışkan özelliğine sahip olan nanoakışkanlar dünya çapında ısı transferi konularında yaygın bir şekilde hem deneysel hem de sayısal çalışmalara tabii olmuştur [23]. Sıcaklık, nanoakışkanın ısı iletimini doğrudan değiştiren diğer bir etkidir. Bu düşünceye bağlı olarak Yu ve ark. [24] içerisinde farklı hacimsel oranda etilen glikol bazlı bakır nanopartikül bulunduran nanoakışkan yapmışlardır. Nanoakışkanların literatürdeki araştırmalarından sıcaklık ile doğrudan ilişkisi olduğunu ve artan sıcaklık seyrinde ısı transferine olan etkisini ölçmüşlerdir. Deneysel gözlemlerinde sıcaklığın artması ısı iletimini de doğru orantılı olarak arttırdığını tespit etmişlerdir. Farklı bir çalışmada ise hacimsel oranın ısı iletimine olan etkisini belirleyebilmek amacıyla %0,2- 5,0 dolaylarında hacimsel oranında etilen glikol bazlı alüminyum oksit nanoparçacıklarının tesirini incelemişler ve 24-50 °C sıcaklık değerlerinde değişim gösteren bir ısı iletiminde artış görülmüştür [25]. Isı iletiminin sıcaklık ile doğru orantılı gelişmenin görüldüğü başka bir deneyde ise, su bazlı gümüş nanoakışkanı hacimsel oranı %0,0001 hesaplayarak ayarlanmış ve akışkanın ısı transferinde 30°C ve 60°C de sırasıyla %3,2 ve %4,5 gelişme gösterdiği görülmüştür [26].

Demir oksit nanopartiküllerini harmanlayarak birincil akışkanı su olan ve su olmayan iki cins nanoakışkan elde eden Shima ve arkadaşları [27], çöküntü ve topaklanmalar düzeneğin zorlanmasına ve verimliliğin azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu olumsuz durumu gidermek veya çöküntünün başlayacağı evreyi geciktirmek için birçok çalışma yapılmıştır [16, 28-32]. Nanoakışkan kararlılığı yapılacak farklı yöntem ve metodlar ile kendi içerisinde birçok etkene bağlıdır. Nanoakışkanların endüstriyel bir çıktı olarak görülmesi ve ısı sistemlerinde herkes tarafından kullanılabilmesinin önündeki en ciddi evre kararlılık konusudur [11].

Yapılan bu çalışmada, teknolojinin gelişmesi ile birlikte ısı transferini arttırmaya yönelik çalışmalar hız kazanmış ve bu doğrultuda nanonakışkanlara öncesinde

belirlenen nanoakışkanlardan kat ve kat küçük bir yapıya sahip nanopartiküller ile harmanlayıp nanoakışkanların çalışılan ısı değiştiricisinde ısıl üretkenliğini iyileştirmek, hedeflenmiş ve ısı değiştiricinin randımanını daha iyi konuma getirmek, akışkanın kendine özgü ısıl değerlerini geliştirmek maksadıyla nanoakışkanın çalışma alanını genişletmek ve geliştirmek amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Termodinamik, bir sistemin bir işlem sırasında, bir denge konumundan diğerine geçerken meydana gelen toplam ısı transferi miktarıyla ilgilenir. Isı transferi bilimi ise ısı transferi hızıyla ilgilenir. Isı transferi hızı, ısı transferi donanımlarının tasarımı ve değerlendirmesindeki en temel niceliktir. Bir sistemdeki bütün enerji biçimlerinin toplamı, sistemdeki toplam enerjiyi verir ve iç, kinetik ve potansiyel enerjileri içerir. Isı transferi iki ortam arasındaki sıcaklık farkından dolayı transferi gerçekleşen duyulur ve gizli enerji biçimleridir. Birim zamanda gerçekleşen ısı transferi miktarı, ısı transfer hızı olarak adlandırılır [33].

Isı transferini daha iyi konuma getirmek amacıyla yapılan çalışmalar aktif, pasif ve karma metotlar olmak üzere 3 ana başlık altında sınıflandırılır. Pasif yöntemler, dışarıdan herhangi bir çaba gerektirmeyen metottur. Aktif yöntemler, enerji üreten güç kaynağı olmaksızın devreye girmeyen; elektrostatik alanlar, mekanik mikser, yüzeyin ve akışkanın salınımı vs. bu tekniklere örnek sayılabilir. Karma yöntemlerde ise aktif, pasif ayrımı yapmaksızın ikisi veya daha fazlası da tercih edilebilir [34].

Galileo Galilei ısı transferi üzerine çalışmalar yapmaya başlayan tarihteki ilk kişi olmakla birlikte gazların ısıtıldıklarında genişmesi tekniğiyle çalışan bir gaz termoskobunu kullanmaya imkân sağlamış ve Newtonun bu gaz termometresinden esinlenerek soğuma yasası olarak da bilinen yani ısı transfer formülünün temellerini atılmasına öncülük etmiştir [35-36].

Isı transfer uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen etilen glikol, su ve yağ gibi akışkanların ısı transfer katsayıları metal ve metal oksit gibi malzemelere nazaran düşük olduğu bilinen bir gerçektir [37]. Yaygın olarak kullanılan elektronik cihazlar ısınmaları dolayısıyla performanslarını ve kullanım ömürlerini doğrudan

etkilemektedir. Bu bağlamda ısınan elektronik cihazlar başarılı tekniklerle ve hızlı bir biçimde ortamdan ısı akıları transfer edilir ve daha iyi noktaya getirilir. Bu durum mikrokanaalların ısı transfer noktalarının geliştirilmesini zorunlu hale getirmiş, kullanılan akışkanın belirlenen miktardan az olması, yüzey alanı, hacim oranı bağlantısı gibi parametrelerin üzerinde durulmasına olanak sağlamıştır. Mikrokanaalların ısı transfer noktalarını etkileyen parametreler ve ipuçlarıyla alakalı literatürde sayısal ve deneysel olmak üzere sayısız çalışma mevcuttur [38].

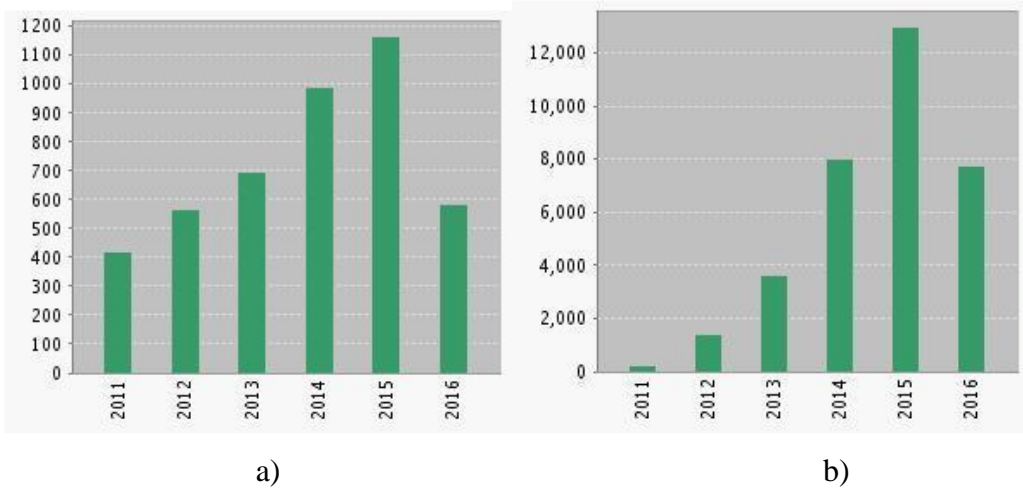
Lee ve arkadaşlarının yaptıkları deneysel çalışmada ısı transfer uygulamalarında klasik olarak yapılan kuramları incelemek maksadıyla 10 adet farklı en-boy oranlarında dikdörtgen paralel mikrokanaalda çalışmışlardır [39]. Owhaib ve Palm soğutma sistemlerinde çok yaygın olarak tercih edilen R-134a akışkanını sarmal mikrokanaallarda tek fazlı zorlanmış taşınım ısı transferini deneye başvurarak gözlemlemişlerdir [40]. Gunnasegaran ve arkadaşları, kanal geometrisi üzerine değişimlerini belirlemek maksadıyla bir deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada laminer akışta ve kararlı durum altında suyun akışını ve ısı transferini üç boyutlu olarak gerçekleştirmişlerdir [41].

Lee ve Mudawar, su bazlı alüminyum oksit ve HFE7100 içeren nanoakışkanlardan yararlanarak tek ve iki faz mikrokanaallarda ısı transfer düzeylerini araştırmışlardır [42].

Isı transferini iyileştirmek amacıyla yapılan ilk çalışmalarda geleneksel akışkanlar içerisine eklenecek partiküllerin boyutu milimetre ve mikro metre gibi çok küçük düzeylerde olmuştur [43]. Partiküllerin zamanla akışkan içerisinde dibe çökmesi ısı transferinin gelişmesine tam anlamıyla olanak sağlamamıştır [44]. Fakat partiküllerin boyutunda çok daha küçük nanometre seviyelerine getirildiğinde ısı iletimdeki gelişme dikkat çekmiştir [45]. Akışkanların ısı üretkenliğini artırma yöntemlerinde son zamanlarda en çok tercih edilen yöntem nanoakışkan kullanımudur ve çok küçük boyutlarda partiküllerinden seyreltilerek yapılan genellikle 1-100 nm boyutlarında olan akışkanlardır [47].

Isı iletimindeki bu farkla birlikte nanoakışkan tanımı yapılmaya başlanmış olup konu ile ilgili yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

Nanoakışkanlarla ilgili araştırmaların ve çalışmaların bu denli fazla olmasının sebebi, nanoakışkanların seçimi, hangi akışkanın ısı iletim katsayısının daha iyi olacağı, hangi boyutlarda ve oranlarda yapılacağı gibi parametrelerden anlaşılmaktadır. Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı değişimlerini sağlayan birçok nedenler bulunmaktadır. Literatür araştırmalarında da sıkça görüleceği gibi; baz akışkanın seçimi ve özellikleri, parçacıklarının boyutu ve biçiminin etkisi, sıcaklığın etkisi, hacimsel ve kütesel oranın etkisi karalılığın devam ettirilebilmesi gibi etkenler söylenebilir [43].



Şekil 2. 1. a) Yıllara göre nanoakışkan ile ilgili yapılan çalışmalar, a) yayınlanan makale b) yapılan atıflar [43].

Literatürde nanoakışkanların hazırlanma evresinde hangi parametrelere dikkat edilmeli ve hangi sırayla yapılması gerektiği üzerine çalışmalar yapan Xuan ve arkadaşları hazırlama tekniğinin uygulama yapılacak deney düzeneği özelliğine göre yapılması gerektiğini vurgulamıştır [46].

Nanoakışkanın partikül boyutunun basınçla ilişkisi kıyaslandığında partikül boyutu mikrokannardaki kadar küçük olması kabul göreceğ seviyede basınç seyrelmeleri ile akış yapmasını sağlar [48].

Nanoparçacıkların boyutu ve akışkanın hacimsel debisi üzerine çalışmalar yapan Khaleduzzaman ve arkadaşları nanoakışkanın debisini arttırdıkça buna bağlı olarak; viskozitesini, yoğunluğunu, enerji prodüktivitesini ve ekserjisini, ısı iletim katsayısını olumlu yönde geliştirdiği ancak özgül ısısının azaldığını belirtmişlerdir [49].

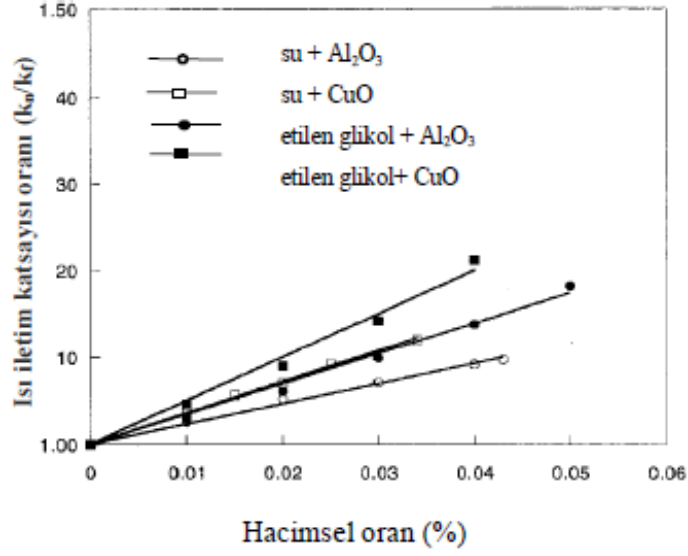
Baz akışkan olarak suyu nanopartikülolarak da bakırı kullanan Shang ve arkadaşları kapalı bir devrede sisteme titreşim vererek ve bakır-su nanoakışkanı kullanarak ısı borusunun ısı transfer karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda saf su yerine bakır-su nanoakışkan kullanımının ısı transferini %83 oranında iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir [50].

Sun ve arkadaşları, bakır oksit nanoakışkanı tercih edilerek yapılan tek bir noktaya nüfus eden jetin ısı transferi olayını denetlemiştir. Deneysel çalışma sonucunda ise; nanoakışkanın ısı transfer katsayısının suyla kıyaslandığında dikkate değer bir artışın olduğu fakat basınç değerlerinde değişimin gözlemlenmediği ancak dairesel nozul yerine kare biçiminde nozul kullanıldığında ısı transfer katsayısının gözardı edilmeyecek şekilde arttığı ve son olarak da jetin eğiminin 90° yapıldığı takdirde en başarılı ısı transferi gerçekleştirdiklerini ifade etmişlerdir [51].

Umer ve arkadaşlarının deneysel çalışmasında, su bazlı bakır oksit kullanarak sabit ısı akışı uygulayarak laminer akışta bir yüzeyden gerçekleşen birbirinden farklı değerdeki debilerde ısı transferi üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda ise ısı transfer katsayısının maksimum %61 partikül hacim oranı %4 ve $Re=605$ olduğu anda görülmüştür [52].

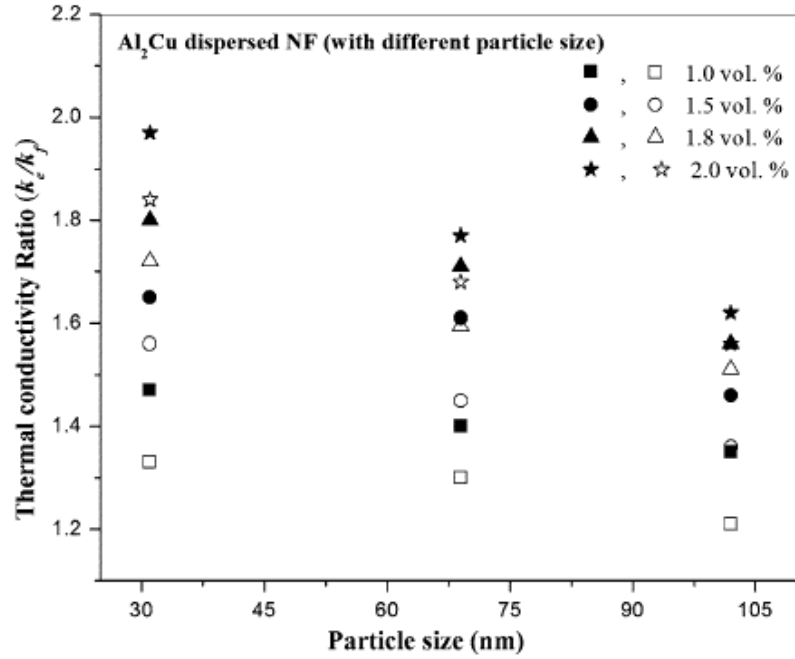
Lee ve arkadaşlarının yapmış oldukları deneysel çalışmada glikol ve su bazlı akışkanlar tercih edilerek alüminyum oksit ve bakır oksit nanoparçacıkları ile nanoakışkanlar kullanıma hazırlanmıştır. Yapılan deneysel çalışma ile ısı iletim katsayısının ısı transferini iyileştirmede en önemli parametre olduğu belirtilmiştir [53].

Yapılan çalışmada hacimsel oranın ısı iletim katsayısıyla doğru orantılı olarak artışın grafiği Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Lee ve arkadaşlarının, yapmış oldukları çalışmada hacimsel oran ile ısı iletim katsayısının artış grafiği [53].

Chopkar ve diğerleri, yapmış oldukları sayısal çalışma ile nanoakışkanların partikül büyüklüğüne etkileri Şekil 1.6’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ısı iletim katsayısının nanopartikül hacimsel konsantrasyon oranı arttıkça arttığı, parçacık boyutu ile de azaldığı görülmektedir [54].



Şekil 2.3. Partikül boyutlarının nanoakışkanlarda ısı iletimindeki etkileri [54].

Turgut ve arkadaşları, su bazlı Al₂O₃ akışkanını iki farklı boyutta (10nm ve 30nm), farklı hacimsel konsantrasyon oranına sahip nanoakışkanların viskozite ve ısı iletkenliği özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda ise ısı iletkenliğin, tanecik boyutuna bağlı kalmadığını Maxwell protitipinin ise ulaşılan verilerle birebir örtüştüğünü görmüşlerdir [55].

Seok ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışma verilerinde sıcaklık-viskozite ilişkisi üzerinde durmuşlar ve %0,01-%0,3 hacimsel konsantre aralığında su bazlı alüminyum oksit nanoakışkanın önce ısı iletkenliklerine odaklanmışlar daha sonra salınım modelli viskozimetre kullanıp sıcaklık değerindeki artışın viskozite düşüşüne, artan yüzde yoğunluğununsa viskozitenin yükselmesine sebebiyet verdiğini görmüşlerdir. Bu gözlemin yanısıra ısı iletkenliğin ise artma eğilimine girdiğini tespit etmişlerdir [56].

Yaptıkları çalışmada dairesel biçimde kesilerek imal edilen çelik tüpün içerisinden 13 nm büyüklüğünde su bazlı alüminyum oksit ve büyüklüğü 27 nm olan su bazlı titanyum oksit kullanan Pak ve Cho bu nanoakışkanların ısı transfer değişiklikleri üzerinde durmuşlardır [57].

Sekhar ve arkadaşları düşük hacim konsantrasyonlarında baz akışkan olarak suyu kullanarak Al₂O₃ nanoakışkanların termofiziksel özellikleri üzerinde durmuşlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda viskozite de %0,01- %1 hacimsel konsantrasyon oranlarında nanoparçacıkları hazırlayıp sıcaklığın nanoakışkanın viskozitesini 25°C – 45°C aralığında olduğu kanısına varmışlardır. Viskozitedeki bu artışın sebebinin parçacıkların birbirine yapışmasından kaynaklandığı düşünülmüş, özgül ısı yeteneğinin de hacimsel konsantrasyonun büyümesi gerekçesiyle düşme eğilimine girdiği sonucuna ulaşılmıştır [58].

Suresh ve ekibi yaptıkları çalışma ile Nusselt sayısının hacimsel parçacık ile oranının %1, %2, %3 gibi oranlarda çalışmış ve sırasıyla %19, %27 ve %39 dolaylarında artma olduğunu gözlemlemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmada ise spiral çukurlu boruda %0,1; %0,2; %0,3 hacimsel oranda nanoakışkanın, düz boru ile kıyaslandığında sürtünme katsayı faktöründe ihmal edilebilir bir artış olduğunu yani ısı transferini artırdığını ispatlamışlardır [59].

Xuan ve Roetzel, nanoakışkanın ısı transferini daha iyi konuma getirmek amacıyla sistem üzerinde çalışmaya yoğunlaşmışlardır. Bu değerlendirmede nanoakışkanın alışlagelmiş çalışmalardaki gibi değilde bir akışkan gibi hareket ettiğini kabul etmişler ve nanoakışkan için farklı iki yöntemle ısı transferi korelasyonu meydana getirmişlerdir.

Nusselt sayısı, tercih edilen esas akışkanın ve nanoparçacıkların hacimsel parçacık oranına, ısıl yeteneğine, nanoakışkanın viskozitesine, ısıl iletkenliği gibi parametrelere bağlı olsada akış türü kadar nanoparçacık şekli ve biçimine bağlı olması dolayısıyla Nusselt sayısının aşağıdaki gibi ifade edileceğini belirtmişlerdir [60].

$$Nu_{nf} = f \left(Re, Pr, \frac{k_p}{k_f}, \frac{(\rho C_p)_p}{(C_p)_f}, \phi, \text{parçacık şekli ve boyutu, akış yapısı} \right)$$

Nanoakışkanların geliştirilmesi amacıyla analitik, deneysel ve sayısal çalışmalarda baz akışkan olarak etilen, su ve motor yağı kullanılmıştır. Bununla birlikte nanoparçacık olarak genellikle silisyum oksit (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃), titanyum dioksit

(TiO₂), bakır oksit (CuO), bakır (Cu), altın (Au), gümüş (Ag), titanyum (Ti) ve karbon nanotüpler tercih edilmiştir.

Literatürdeki yapılan çalışmalardan da anlaşılacağı gibi nanoakışkanlar belirlenen hacimsel oranlarda değerlendirilerek ısı transfer katsayısı geliştirildiği görülür. Yapılan deneysel çalışmada saf suya nanoakışkan ilavesi yapmak ısı transfer katsayısını, basınç düşümü gibi değerleri geliştirdiği çalışmalar sonucunda hesaplanmıştır.

BÖLÜM 3

NANOAKIŞKANLAR

Nanoakışkanlar, metal ve metal oksit gibi nano boyuttaki (<100 nm) parçacıkların geleneksel ısı transferi akışkanları içerisindeki süspansiyonlarıdır. Son zamanlarda yapılan araştırma ve bulgular nanoakışkanların sıkça kullanılan akışkanlara nazaran kıyaslanamayacak düzeyde ısı transferini geliştirdiği gözlemlenmiş ve bu gelişimin sebebi; partiküllerin sıcaklık, pH, hacimsel oran, boyut oranı ve baz akışkanın ısıl yeteneğine bağlı olduğu belirtilmiştir [61].

3.1. NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Nanoakışkanlar diğer geleneksel akışkanlardan farklı ve üstün olmasını sağlayan kısas yoğunluk, viskozite, ısı iletim katsayısı ve ısıl iletkenliğidir [62].

3.1.1. Isıl İletkenlik

Akışkanların ısı transferi geliştirilmesinde öncelikli parametre ısıl iletkenliktir. Çizelge 3.1'de literatürde sıkça kullanılan malzemelerin ısıl iletkenlik özellikleri verilmiştir [63]. Akışkanın ısı transferini geliştirmek maksadıyla hayati önemde olan parametre ısıl iletkenliktir. Akışkanlara kıyasla ısıl iletkenliği gelişmiş olan katı metaller, nanopartikül olarak akışkanla harmanlanır ve ısı transferini daha iyi konuma getirmesine yardımcı olur [64]. Nanoakışkanların ısı iletimini artırmasını sağlayan bu düzenekler; nanopartiküllerin ısı taşıma formu, yüzeyin yük özelliği, katı ve sıvı ara yüzeyindeki tabaka ve nanoparçacıkların hareketi şeklinde belirtilmektedir [65].

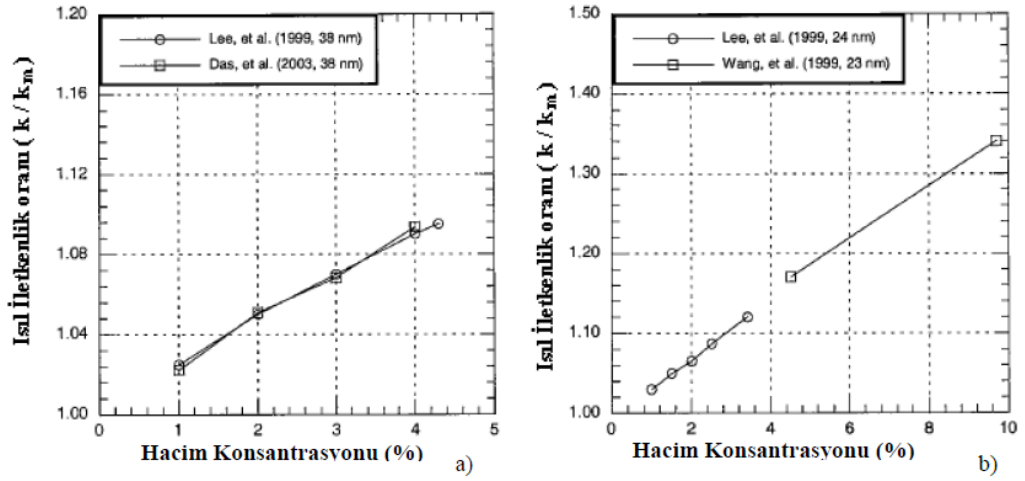
Çizelge 3. 1. Sıkça kullanılan malzemelerin ısı iletkenlikleri.

Katı/Sıvı	Malzeme	Isıl iletkenlik (W/mK)
Metalik Katılar	Gümüş	429
	Balar	401
	Alüminyum	237
Metalik Olmayan Katılar	Elmas	3300
	Karbon nauotüpler	3000
	Silisyum	148
	Alüminyumoksit (Al ₂ O ₃)	40
Metalik Sıvılar Metalik Olmayan Sıvılar	Sodyum (644 K'de)	72,3
	Su	0,613
	Etilen glikol (EG)	0,253
	Motor yağı (MY)	0,145

- Nanopartiküllerin Hareketi: Partikül büyüklüğü çok büyük yüzey alanı sağlamasından öte nanopartiküllerin uyumluluğuna, nanopartiküllerin taşıdığı kütle ve kimyasal tepkimelerle de ilişkilidir. Polimerik hücrelerle de yüzey tabakasının güçlü bir bağ kurması sağlanır [66].
- Katı-Sıvı Arayüzeyindeki Katman: Katı noktalarda düzenli bir etkileşim oluşturan akışkanlar ara yüzey meydana getirirler. Sıvı ve katı parçacıklardan harmanlayarak karışım oluşturur. Bu karışım birbirlerinden farklı termofiziksel özellikler gösterir. Sebebi ise nanopartiküllerin düzenli biçimlerinin iletkenliği normal akışkandan daha gelişmiş ve yüksek olmasından kaynaklanır [64].

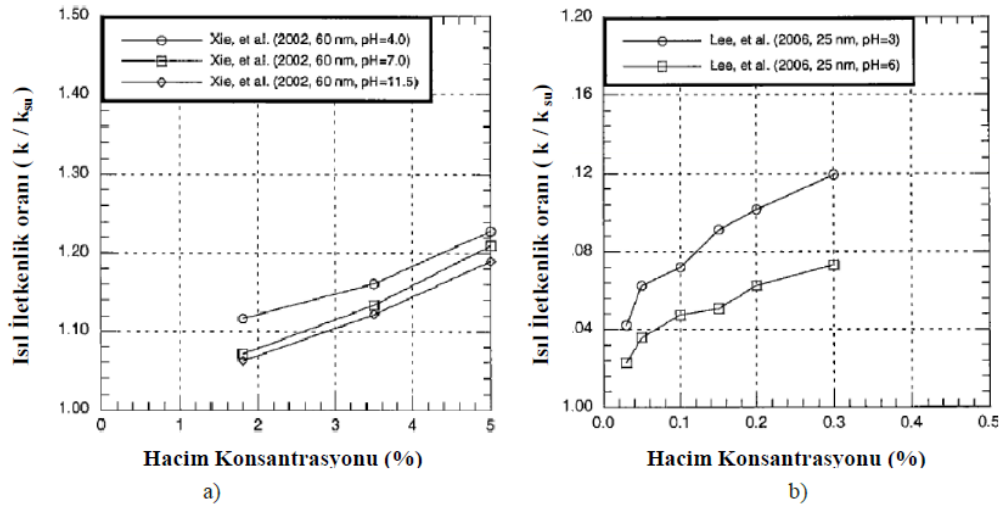
3.1.1.1. Isıl İletkenliği Etkileyen Faktörler

Nanoakışkanın ısı iletkenliği, baz akışkanın ısı iletkenlik değerine, nanoakışkanın viskozite değerine, partikülün gizli ısı ve yoğunluk gibi değerlerine ayrıca nanoakışkan içerisine harmanlanacak parçacıkların biçim ve büyüklüğüne bağlıdır. Şekil 3.1'de farklı iki nanoakışkanda aynı değerlerde yapılan çalışmalarda hacim oranının ısı iletkenliğine artış ilişkisi ifade edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında iki grafikte de hacimsel oran yükseldikçe ısı iletkenlikte artmıştır [67].



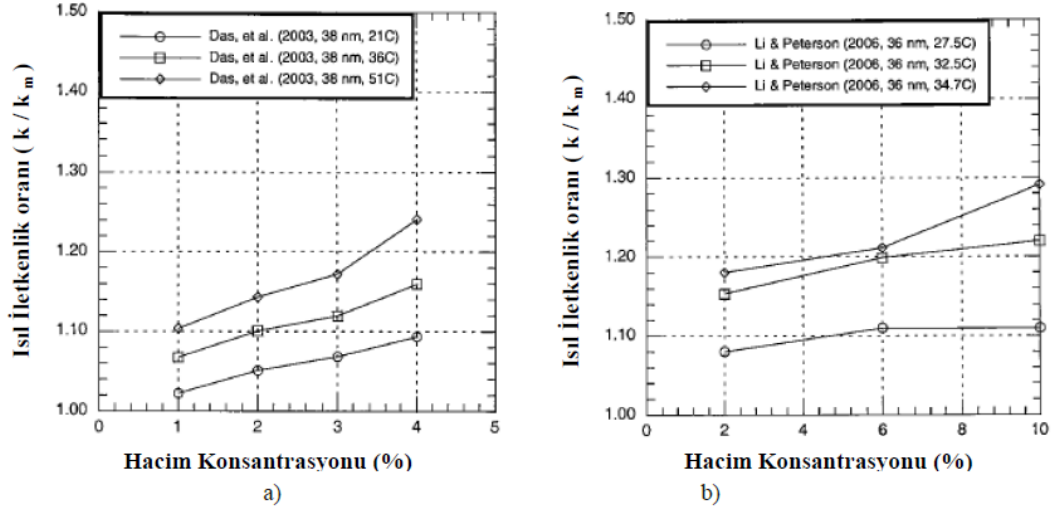
Şekil 3. 1. a) Al₂O₃-su b) CuO- su nanoakışkanlarının hacim konsantrasyonunun ısı iletkenlik artış oranına etkisi [67].

Şekil 3.2’de Baz akışkanı su olan Alüminyum oksit ve bakır oksit su nanoakışkanlarının nanoakışkanının pH değerlerinin ısı iletkenlik artış oranına etkisi verilmiştir [67].



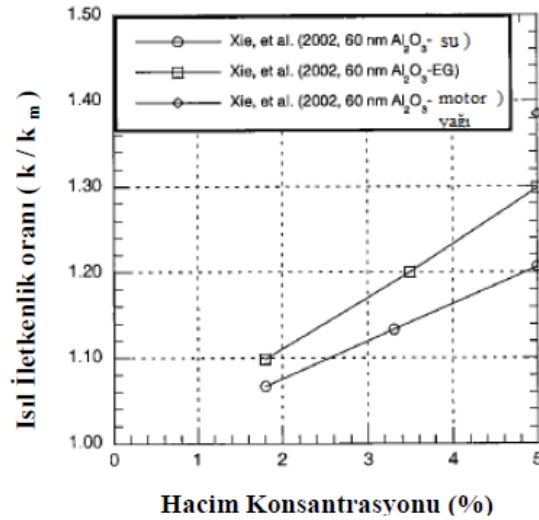
Şekil 3. 2. a) Al₂O₃-su b) CuO-su nanoakışkanının pH değerlerinin ısı iletkenlik artış oranına etkisi [67].

Şekil 3.3'te baz akışkanı su olan alüminyum oksit- nanoakışkanında sıcaklığın ısıl iletkenlik artış oranına etkisi verilmiştir [67]. Grafikler dikkatli bir şekilde incelendiğinde, sıcaklık arttıkça ısıl iletkenlikte de artış olduğu yönündedir.



Şekil 3. 3. Al_2O_3 -su nanoakışkanında sıcaklığın ısıl iletkenlik artış oranına etkisi [67].

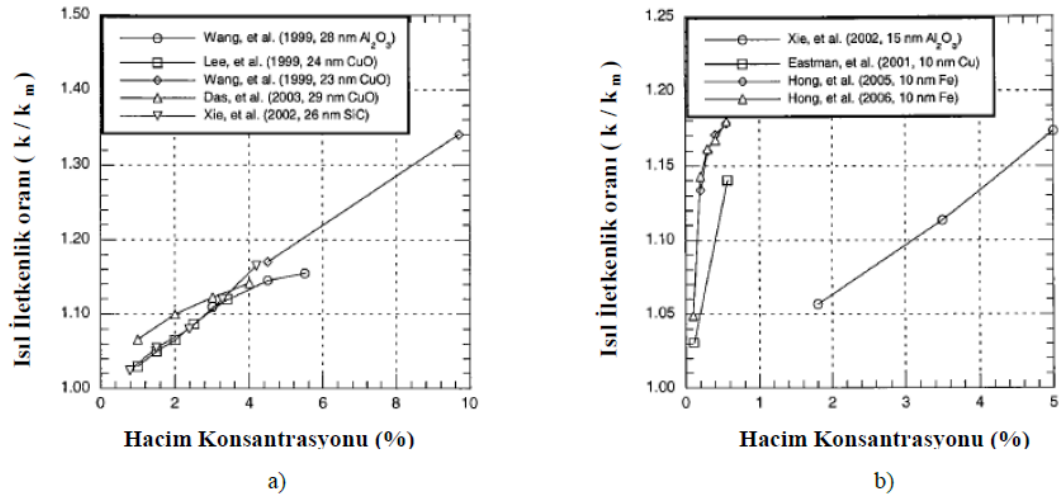
Şekil 3.4.'te temel akışkanın ısıl iletkenlik artış oranına etkisi verilmiştir. Temel akışkanın ısıl iletkenlik üzerindeki etkisi, genel olarak temel akışkanın ısıl iletkenliğindeki artışla iyileştirilmiş, ısıl iletkenlik oranının düştüğü yönündedir. Yani ısıl iletkenlik minimum seviyede olduğu zaman iletkenlik miktarındaki artışın fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3. 4. Temel akışkanın ısıl iletkenlik artış oranına etkisi [67].

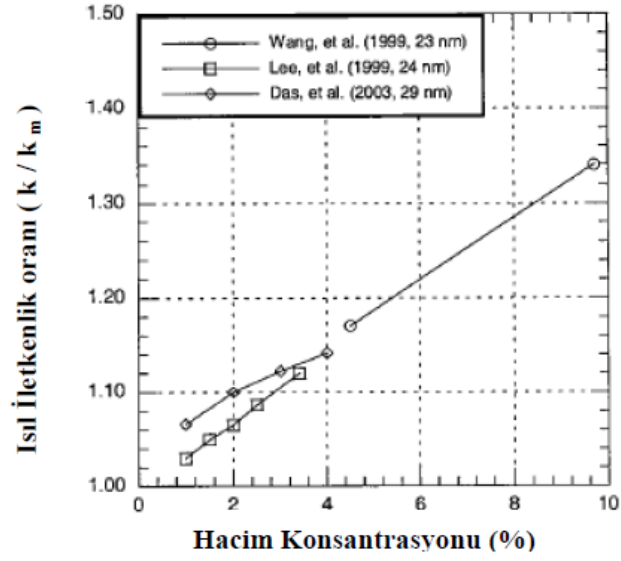
Şekil 3.5'te iki farklı partikül için, diğer tüm koşullar neredeyse tamamen benzer olduğunda tercih edilen malzemenin ısı iletkenliğinin yükselmesine etkisi verilmiştir [67].

Sonuçlar iletkenliği düşük olan parçacıklar için bir değişimin olmadığı saptanmıştır. Şekil 3.5b'de verilen bir oksit parçacık ile iki metal karşılaştırıldığında, oksit parçacıkların ısı iletkenliği metallere göre daha az gelişmiş oldukları için düşük ancak düşük hacimsel oranlarda metal ile oksit parçacıkların aynı oranda arttığı gözlemlenmiştir.



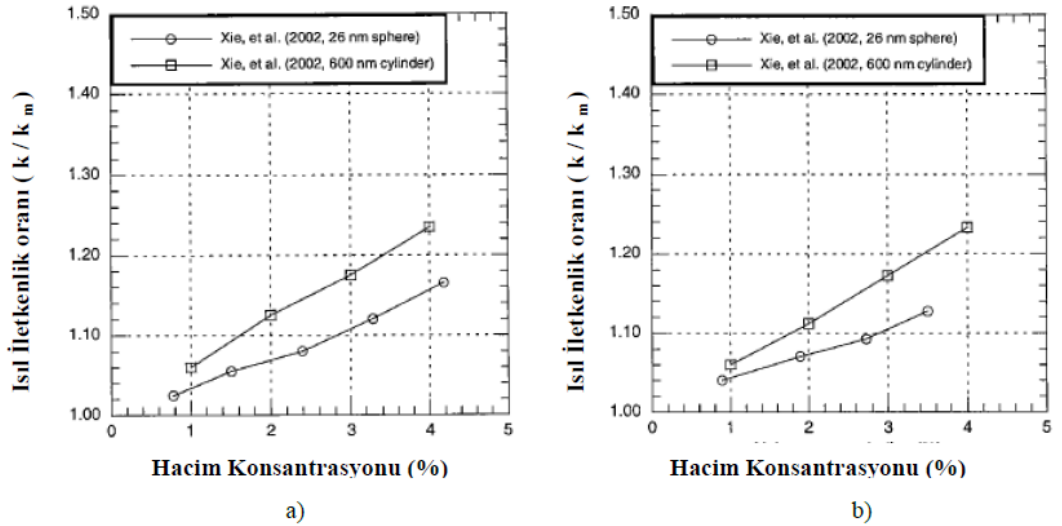
Şekil 3. 5. a) Su ve b) Etilen glikol temel akışkanları için partikül malzemesinin ısı iletkenlik artış oranına etkisi [67].

Şekil 3.6' da baz akışkanı su olan bakır oksit nanoakışkanı için partikül boyutunun ısı iletkenlik artış oranına etkisi verilmiştir [67].



Şekil 3. 6. CuO-su nanoakışkanı için partikül boyutunun ısı iletkenlik artış oranına etkisi [67].

Şekil 3.7' de SiC-su ve SiC-EG nanoakışkanları için partikül şeklinin ısı iletkenlik artışına etkisi verilmiştir [67]. Yapılan çalışmalardan da anlaşılacağı gibi silindirik partiküllerin ısı iletkenliği küresel partiküllerin ısı iletkenliğinden daha iyi olduğu sebebinin ise, silindirik partiküllerin çap-uzunluk oranının daha çok olduğu kabul olduğu belirtilmiştir.



Şekil 3. 7. a) SiC-su b) SiC-EG nanoakışkanları için partikül şeklinin ısı iletkenlik artışına etkisi[67].

Literatürde nanoakışkanlarla ilgili birçok çalışmaya ulaşmak mümkün ancak nanoakışkanların ısı iletkenliğine çok yakın değerlerde yaklaşımda bulunmak olası değildir. Son yıllarda ısı transferi gibi üstün özellikleri nedeniyle birçok çalışmalara konu olan nanoakışkanlarla ilgili olarak aşağıdaki Çizelge 3.2’de farklı modellerden formüller elde edilmiştir [68].

$$\frac{k_e}{k_1} = \frac{k_p + 2k_1 + 2(k_p - k_1)\phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)\phi} \quad (3.1)$$

3.1.2. Viskozite

Akışkanların karakteristik bir özelliği olan viskozite akmaya karşı gösterdikleri direnç olarak ifade edilmektedir [69]. Viskozite, basıncın düşmesi, pompa gücü gibi parametrelere bağlı olarak değiştiği bilinmektedir [70]. Deneysel çalışmalar sırasında yapılan gözlemlerde baz akışkanın viskozitesi nanoakışkanın hazırlığında harmanlanarak baz nanoakışkanın cinsine, şekline, büyüklüğüne, konsantrasyon oranına bağlı olduğunu göstermiş ve en önemli parametrenin derişim olduğu sebebinin ise derişimin artması ile birlikte viskozitenin artması [71], farklı derişimde farklı sonuçların elde edildiği görülmüştür [72]. Çizelge 3.3’te viskozite için farklı formlar ifade edilmiştir [73].

Batchelor Viskozite bağıntısı şu şekildedir;

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2)\mu_{bf} \quad (3.2)$$

Burada μ_{nf} nano akışkan nanoakışkan vizskozitesi, μ_{bf} baz akışkan vizskozitesini göstermektedir.

Çizelge 3. 2. Katı-sıvı süspansiyonları için efektif ısıl iletkenlik modelleri.

Modeller	İfadeler	Açıklamalar
Maxwell	$\frac{k_e}{k_1} = \frac{k_p + 2k_1 - 2(k_p - k_1)\phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)\phi}$	Küresel partiküller için geçerlidir.
Hamilton-Crosser	$\frac{k_e}{k_1} = \frac{k_p + (n-1)k_1 - (n-1)(k_1 - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_1 + (k_1 - k_p)\phi}$	Küresel ve küresel olmayan partiküller dikkate alınmıştır. Küresel partiküller için n=3, silindirik partiküller için n=6
Wasp	$\frac{k_e}{k_1} = \frac{k_p + 2k_1 - 2(k_1 - k_p)\phi}{k_p + 2k_1 + (k_1 - k_p)\phi}$	Katı-sıvı karışımların ısıl iletkenliğini hesaplamak için önerilmiştir.
Yu-Choi	$\frac{k_e}{k_1} = \frac{k_p + 2k_1 + (k_p - k_1)(1 + \beta)^3\phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)(1 + \beta)^3\phi}$	İki fazlı karışımların etkili ısıl iletkenliğini hesaplamak için alternatif bir teoridir.
Bruggeman	$k_e = \frac{1}{4}[(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_1] + \frac{k_1}{4}\sqrt{\Delta}$ $\Delta = [(3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_p}{k_1}\right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{k_p}{k_1}\right)]$	Homojen küresel partiküller içeren iki fazlı karışımlar için önerilmiştir.
Jeffery	$\frac{k_e}{k_1} = 1 + 3\beta\phi + (3\beta^2 + \frac{3\beta^3}{4} + \frac{9\beta^3}{16} \frac{a+2}{2a+3} + \frac{3\beta^4}{2^6} + \dots)\phi^2$	Yüksek dereceli terimler rastgele dağılmış olan küreciklerin etkileşimlerini ifade etmektedir.
Davis	$\frac{k_e}{k_1} = 1 + \frac{3(a-1)}{(a+2) - (a-1)\phi} [\phi + f(a)\phi^2 + 0(\phi^3)]$	Yüksek dereceli terimler rastgele dağılmış olan küreciklerin etkileşimlerini ifade etmektedir. f(10)=2.5 f(∞)=0.5
Lu-Lin	$\frac{k_e}{k_1} = 1 + a\phi + b\phi^2$	Küresel ve küresel olmayan partiküller için geçerlidir. Küresel partiküllerde a=10 için, b=2.27; a=∞ için a=3, b=4.51 Yakın ve uzak alan çiftlerin etkileşimleri dikkate alınır.

Çizelge 3. 3. Farklı süspansiyonların viskozite tahmini için yapılan modeller.

Model	Denklem	Açıklama
Einstein [51]	$\mu_{eff} = \mu_{bf}(1 + 2,5\varphi)$	Küresel partikül ve %1 konsantrasyona kadar olan akışkanlar için uygun.
De Bruijin [52]	$\mu_{eff} = \mu_{bf}\left(\frac{1}{1-2,5\varphi+1,552\varphi^2}\right)$	Yüksek konsantrasyonlu nanoakışkanlara uygunlanabilir.
Mooney [53]	$\mu_{eff} = \mu_{bf} \exp\left(\frac{2,5\varphi}{1-\frac{\varphi}{\varphi_m}}\right)$	Küresel partiküllerin seyreltik çözeltilerine uygundur.
Brinkman [54]	$\mu_{eff} = \mu_{bf}(1 - \varphi)^{-2,5}$	Seyreltik çözeltiler için uygulanabilir.
Batchelor [55]	$\mu_{eff} = \mu_{bf}(1 + 2,5\varphi + 6,5\varphi^2)$	Brownian hareketleri hesaba katılarak oluşturulmuştur.
Dougherty [56]	$\mu_{eff} = \mu_{bf}\left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-[\mu]\varphi_m}$	Bu model rijit partikül içeren süspansiyonlarda tüm konsantrasyonlar için kullanılabilir.
Hatschek [57]	$\mu_{eff} = \mu_{bf}(1 + 4,5\varphi)$	2 fazlı süspansiyonlar için uygun.
Wang et al. [7]	$\mu_{eff} = \mu_{bf} = (1 + 7,3\varphi + 123\varphi^2)$	-
Jeffrey ve Acrivos [58]	$\mu_{eff} = \mu_{bf}\left(3 + \frac{4}{3}\left(\frac{\varphi r^2}{\ln\left(\frac{\pi}{\varphi}\right)}\right)\right)$	Bu model çubuk şekilli partikül içeren seyreltik süspansiyonlar içindir.

3.1.3. Yoğunluk

Yoğunluk nanopartiküllerin konsantrasyonundan hareketle değişir ve akışın tipini açıklayan basınç kaybı Nusselt sayısı Reynolds sayısı sürtünme faktörü gibi kısaltmaların değişimi sağladığı bilinmektedir [76]. Nanopartiküllerin yoğunluğu geleneksel

sıvıların yoğunluğundan üstün tutan özelliği yani yoğunluğunun daha fazla olması sebebiyle nanoakışkanın bünyesindeki partikül miktarında yapılan ekleme araştırmacıların da beklediği sonuç gibi yoğunluğu artırır ve her birinin birbirinden farklı sonuçlar bulması olası durum olarak kabul edilmektedir [77]. Ünlü kimyacı olarak görülen Cheremisnoff tarafından 1986 yılında yoğunluk terimi konuşulmaya başlandıktan sonra Pak ve Cho arkadaşlar tarafından da araştırılmaya başlanmış ve nanoakışkanlara da aktararak çalışmışlardır [78].

$$\rho_{eff} = (1 - \varphi)\rho_{nf} + \varphi\rho_{bf} \quad (3.3)$$

Denklemden ρ_{nf} nanoakışkan yoğunluğunu ve ρ_{bf} baz akışkanın yoğunluğunu göstermektedir.

3.1.4. Özgül Isı

Nanoakışkan özgül ısı kapasitesi aşağıdaki denklem kullanılarak bulunabilir;

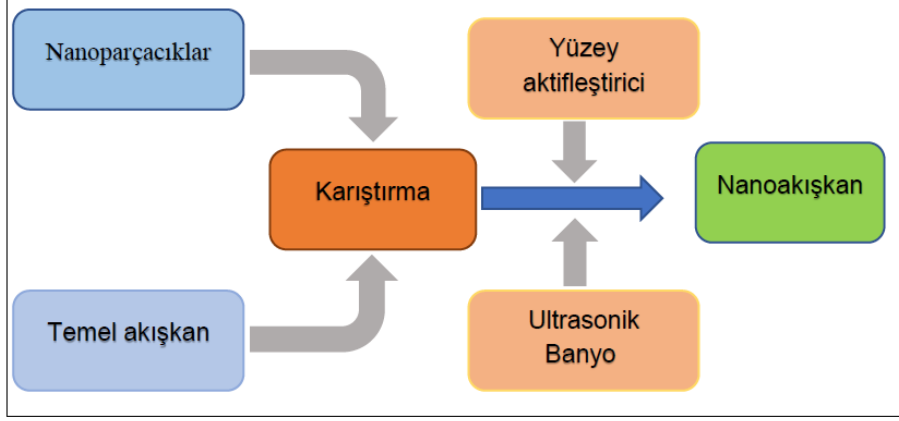
$$C_{p,eff} = \frac{(1 - \varphi)(\rho C_p)_{bf} + \varphi(\rho C_p)_p}{(1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_p} \quad (3.4)$$

Burada ρ_{bf} baz akışkan yoğunluğu, ρ_p nano partikül yoğunluğunu $C_{p,eff}$ ise nanoakışkan özgül ısını göstermektedir.

3.2. NANOAKIŞKAN HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ

Enerji kullanım aşamalarında en önemli hususlardan olan kurulum ve işletim ücretlerini minimuma indirmede ısı transferini iyileştirmek günümüzde hayati önem kazanmış ve son yıllarda nanoakışkan teriminin yaygınlaşmasıyla birlikte nanoakışkan endüstrisi meraklıları tarafından kuramsal ve deneye dayalı araştırmalara tabii olmuştur [79]. Nanoakışkanlar katı sıvı bileşimlerden farklı olup; kimyasal değişime uğraması, nanopartiküllerin tortulaşması ve topaklanması, kararlılık, dayanıklılık gibi geliştirilmesi gereken problemleri bulunmaktadır [80]. Nanoakışkanlar bünyesinde bulundurduğu çok küçük parçacıkların tüm noktalarda eşit dağılması ve

nanoakışkanlara özgü özelliklerine bağlı olarak iki ana yöntem ile hazırlanır. Bunlar tek aşamalı ve iki aşamalı method olmak üzeredir [81]. Şekilde 3.8’de nanoakışkanların hazırlama aşamaları detaylı şekilde verilmiştir.



Şekil 3. 8. Nanoakışkanların hazırlama işlemleri

3.2.1. Tek Adım Yöntemi

Bu yöntemde nanoparçacıkların dağılım ve imalat süreçleri tek bir adımda nanoakışkan kombinasyonuna dayanır [82]. Nanoakışkan uygulamalarında en yaygın seçim buhar depozisyon prosedir. Bu prosede buhar soğuk ana akışkan film ile karşı karşıya gelir ve bu esnada çok küçük boyutlardaki partiküller yoğunlaşır ve nanoakışkan kullanıma hazır hale gelir [73]. Bu prosenin en önemli özelliği ise taşıma, kurutma, depolama gibi hususlar gerektirmediği için nanoparçacıkların çökmesi gibi durumla karşılaşmaz ve akışkanın kararlılığı arttırılır [83]. Bütün bu olumlu etkenlerin dışında bu yöntemle oluşturulabilen nanoakışkan çalışma sayısı kapsamlıdır. Sebebi ise buhar basınçlı sıvıların işleme tabii olmasıdır [84]. Bu sebepten imalatının yavaş ve pahalı olması nedeniyle iki aşamalı yöntemle kıyasla noksanlıdır [85].

3.2.2. İki Adım Yöntemi

Bu yöntemde nanoakışkan süreci başlığından da anlaşılacağı gibi iki adımda gerçekleşmektedir [87]. Öncelikli olarak patriküller, kimyasal ve fiziksel yöntemler ile toz haline getirildikten sonra ultrasonik banyo vb. cihazlar yardımıyla bir baz akışkan içine dağıtılmaktadır [86]. Büyük miktarlarda nanoakışkan üretildiği süreçlerde giriş ücreti bakımından iki aşamalı teknik daha avantajlı olduğu için en çok tercih edilen metot olmuştur [88]. Çizelge 3.4'te şimdiye kadar yapılmış olan farklı temel akışkanlar kullanılarak hazırlama biçimleri ile nanoakışkanlar verilmiştir [82].

3.3. NANOAKIŞKAN TÜRLERİ

Nanoakışkanlar içerisine karıştırılan veya istenilen malzemeye göre sınıflandırılır ve genel yaklaşımlar şu şekildedir; metaller (Au, Cu, Fe, Ag), tek veya çift duvarlı karbon (DWCNT, SWCNT, NWCNT), yarı iletkenler, nitrür seramik, oksit seramik, karbür seramik ve nanopartiküllerin polimer kompozit çekirdek kabuk gibi güçlü özellikleri birleştirilmiş olan kompozit malzemelerdir [89].

3.4. KULLANIM ALANLARI

Nanoakışkanlar önceki çalışmalarda sıkça kullanılan akışkanların termofiziksel özelliklerinden üstün özellikte olması (ısı transfer performansları) bu alanda çalışanların dikkatini çekmeye başlamıştır. Bu üstün özelliklerinin keşfedilmesiyle birlikte kullanım alanları aşağıda örneklendirilmiştir.

Çizelge 3. 4. Literatürde bulunan bazı nanoakışkanlar ve hazırlanma metotları.

Temel Akışkan	Nanopartikül	Partikül Boyutu (nm)	Hazırlanma Metodu
---------------	--------------	----------------------	-------------------

Etilen glikol	Cu	10-20	Tek adımlı metot
Etilen glikol/Etilen Glikol-su	Cu	20	Tek adımlı metot
Etilen glikol/su	Al ₂ O ₃ /CuO	38	İki adımlı metot
Etilen glikol/su/motoryağı	Al ₂ O ₃ /CuO	28/23	İki adımlı metot
Su	Al ₂ O ₃ /CuO	29/36	İki adımlı metot
Etilen glikol/su	ZnO	29 ve 77	İki adımlı metot
Su	Cu	75-100	Tek adımlı metot
Etilen glikol	Fe	10	Tek adımlı metot
Toliien	Ag	60-80	İki adımlı metot
Etanol	Au	10-20	İki adımlı metot
Su	TiO ₂	15	İki adımlı metot
Motor yağı	MWCNTs	20-50	İki adımlı metot

3.4.1. Ulaşım

Araçların radyatörlerinde sıkça kullanılmasının en önemli sebebi; akışkan içerisine partikül ekleyerek ısı transfer kabiliyeti artırılır ve bunun neticesinde ısıl iletkenlik sağlanır, istenilen işletme bacinı düşürülür, ucuz ve kolay yöntemle birden fazla parametre tek seferde halledilmiş olur [90].

3.4.2. Elektronikte

Elektronik cihazlarda istenilen ısı transferi hedefi iki aşamda gerçekleştirilir; ilk adım olarak önceden belirlenen uygun çizimdeki soğutma cihazı tasarlamak, ikincisi ise ısı iletim kabiliyetini artırmaktır [91].

3.4.3. Havalandırma ve İklimlendirme Sistemlerinde

Küresel ısınmanın önüne geçmek için yapılan çalışmalarda endüstriyel soğutma sistemlerinde en çok fayda sağlayan unsur nanoakışkan kullanımı minimum seviyede enerji kullanılacağı için emisyonlarda da gözle görülür düşüş sağlamaktadır. Çok az miktar da enerji kullanımı çevreyi minimum seviyede kirletir, az atık sağlar neticesinde küresel ısınmanın da önüne geçilmiş olur [92].

3.4.4. Malzemelerde

Malzeme ağırlığının minimum seviye ulaşması ve kullanım ömrünün uzaması sebebiyle sıkça tercih edilir. Bu üstün özellikler sebebiyle uzay ve savunma sanayisi, tıbbi uygulamalar ve soğutma vb. alanlarda kullanılır [93].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

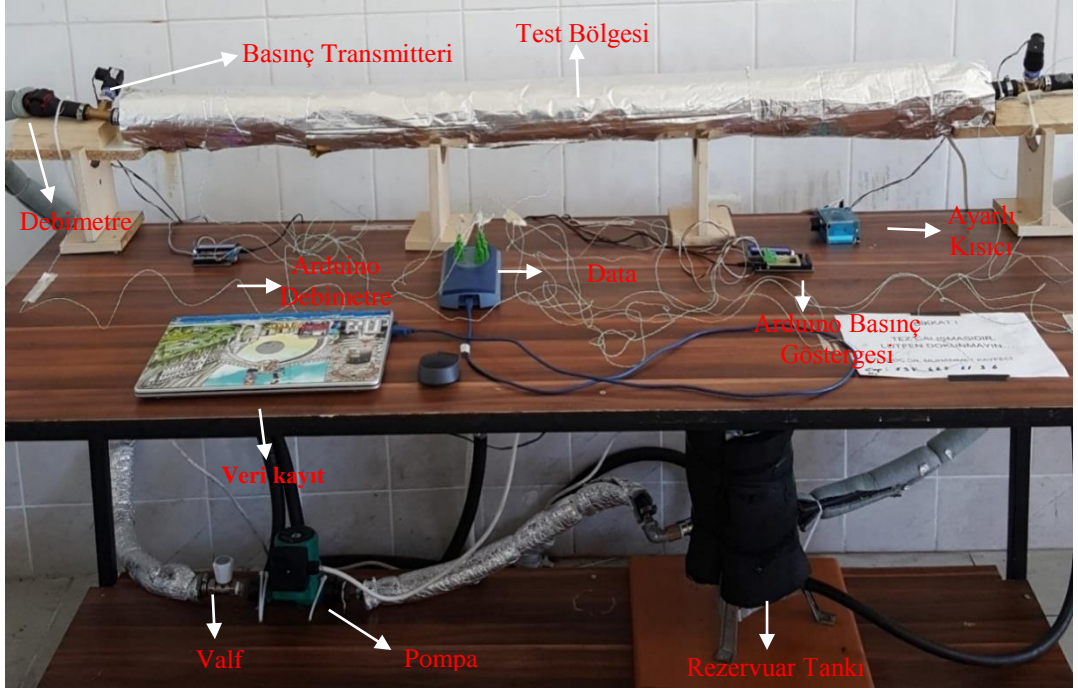
Dörtgen geometrili kanal içerisinde nanoakışkan kullanımının ve farklı en/boy oranlarının akış ve ısı transferi özelliklerine etkisini belirlemek için yapılan çalışma, deneysel ve olmak üzere iki bölümde gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalarda 1500 mm uzunluğunda ve $\alpha=0,33$; 0,66 ve 1.0 en boy oranlarındaki kanallar içerisinde saf su ve %0,2SiO₂/saf su nanoakışkanı farklı debilerde geçirilerek akış ve ısı transferi karakteristikleri belirlenmiştir.

4.1. DENEYSEL YÖNTEM

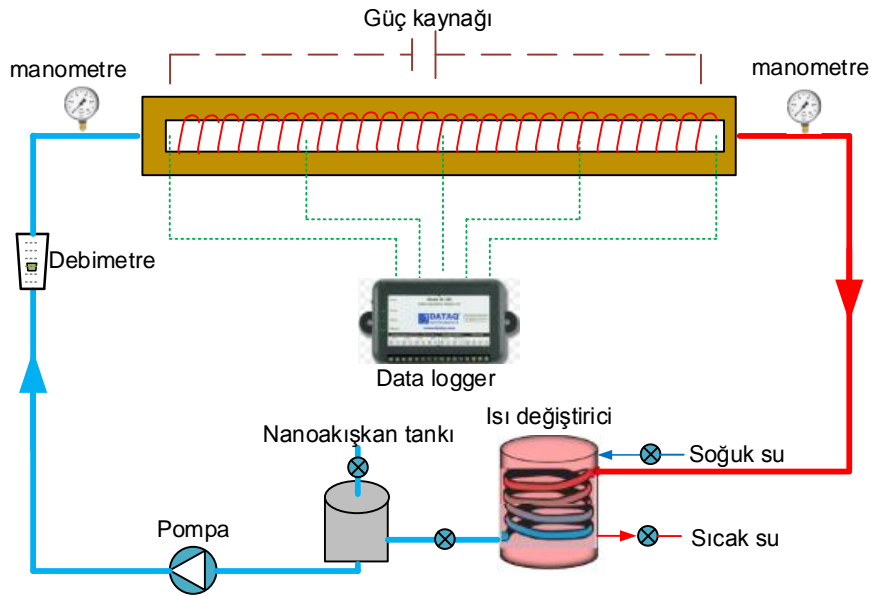
Bu bölümde, farklı boyutlardaki dörtgen kanal içerisinde akan saf su ve %0,2SiO₂/saf su nanoakışkanın ısı performansları ve akış özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar her dörtgen kesitteki kanal için sabit ısı akısı değerinde ve laminar akış şartlarında ($400 \leq Re \leq 1200$) gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Deney Düzeneği

Deneysel çalışmaları gerçekleştirebilmek için ilk aşama deney tesisatını tasarlamaktır. Deneysel tesisat tasarımı ile ilgili literatürden gerekli araştırma ve bulgular edinilmiş neticesinde deney düzeneği tasarlanıp imal edilmiştir. Deney düzeneği resmi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4. 1. Deneş düzeneği resmi.



Şekil 4. 2. Deneş düzeneği şematik resmi.

Şekil 4.2'de deneş düzeneğinden de görülebileceği gibi, ısıtıcı elemanın bulunduğu 1500mm'lik test kısmına giren nanoakışkan kanal duvarlarına uygulanacak sabit ısı akısı nanoakışkanın sıcaklığının artmasını sağlayacaktır. Buradan çıkacak akışkanın

sıcaklığı şebeke suyu ile düşürülerek test kısmına giriş sıcaklığı sabit tutulacaktır. Rezervuara akacak akışkan pompa yardımıyla tekrardan test kısmına girecek ve süreç kapalı çevrim olarak tekrarlanacaktır. Test kısmındaki ısı çiftlerinden ve basınç transmitterlerinden alınacak verilerle ve debimetre aracılığıyla alınacak değerlerle nanoakışkanların akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri belirlenecektir.

Deney düzeneğindeki kanal literatür araştırmaları sonrası alüminyum seçilmiş ve farklı dörtgen kesitlerinde 10x30, 20x30 ve 30x30 olup et kalınlığı 2 mm ve uzunluğu 1500 mm dir.

Deney düzeneğinde akışkanın devamlı ve düzenli olarak sağlanması amacıyla Nova marka sirkülasyon pompası tercih edilmiştir.

Deney düzeneğinin en önemli noktalarından olan akışkanın dolaşımını sağlayan hortum seçiminde yüksek su sıcaklığı ve çalışma basıncı düşünülerek hidrolik kalorifer sıcak su hortumu kullanılmıştır

Kanalın giriş ve çıkışındaki basınç farkını görebilmek için Atek marka basınç transmitterleri kullanılmıştır.

Test kısmında bulunan ısıtıcı rezistans seçimi için ısıtıcı tel gibi birçok seçim yapılarak testler yapılmış ve neticesinde kendinden yalıtkanlı kanal boyunca 500 W/m^2 gücünde ısıtıcı rezistans kablo ile sarılmış ve kanal boyunca ısıtma işlemi sağlanmıştır.

Test kanalındaki akışkanın giriş, çıkış ve kanal yüzeysıcaklığını ölçmek amacıyla Pico marka K tipi ısı çiftleri kullanılmıştır. Bu amaçla bir adet kanal girişine, 4 adet yüzey alanına (duvar sıcaklığı) ve bir adette kanalın çıkış bölümüne sabitlenmiştir. Dörtgen kanalın yüzey alanındaki sıcaklığı hatalı ölçüm yapmaması için termokupllar ile ısıtıcı kablo arasında 1,5 cm mesafe bırakılarak yapılmış ve ısıtıcı kablonun yüzey alanını ısıtması ile birlikte erimeyecek dayanıklıdaki plastik kelepçe sabitlenmiş ve Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4. 3. Isıtıcı rezistans bağlantısı.

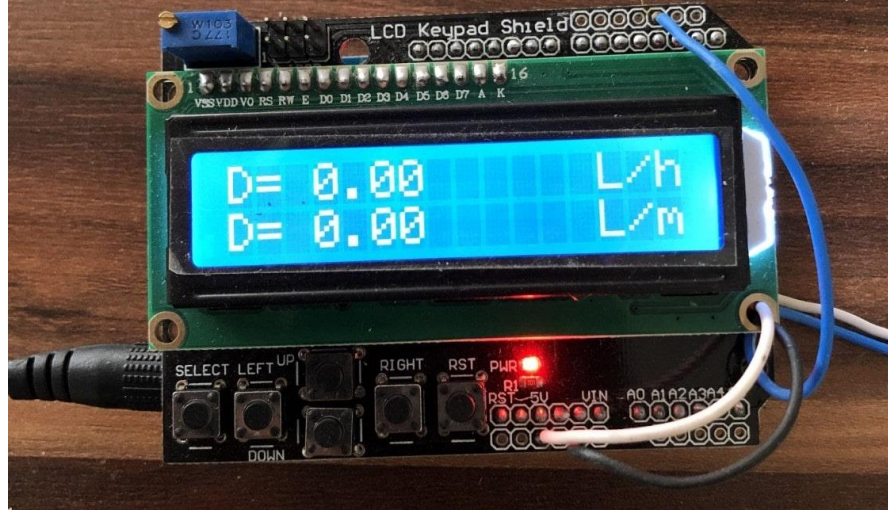
Sistemdeki akışkanın debi ölçümü için ardüno tasarlanıp hassasiyeti sağlanmıştır. Debi devir ayarı valfler yardımıyla sağlanmış ve deneyler 0,2- 5 l/dk hacimsel debide gerçekleştirilmiştir.

Deneysel işlemler sırasında ortamdaki ısı kaybının önüne geçmek amacıyla alüminyum folyo sarılı taş yünü ile yalıtım yapılmıştır.

4.1.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Ekipmanlar

4.1.2.1. Debimetre

Yapılan deneylerde sistemde dolaşan akışkanın debisini ölçmek için özel olarak hazırlanan 0,1-10,25 lt/dk ölçüm aralığında çalışan Şekil 4.4'deki Arduino debimetre devresi hazırlanmıştır. Debimetre Arduino devresi l/dk ve l/h olarak ölçmekte, hassasiyeti su ve hava ile test edilerek kontrolü sağlanmıştır. Ayrıca debimetrede istenilen akışkan debisi valfler ile sağlanmaktadır.



Şekil 4. 4. Debimetre Arduino devresi.

4.1.2.2. Veri Toplayıcı

Deney düzeneğinde yapılan çalışmalarda kanal yüzeyine sabitlenen ısı çiftleri sayesinde ısınan kanal içindeki akışkanın giriş, çıkış ve duvar sıcaklığı gibi gerekli verileri anlık olarak tespit etmek amacıyla PicoTech TC-08 marka data logger tercih edilmiştir (Şekil 4.5). Data logger aracılığıyla bilgisayara aktarılan veriler kayıt altına alınmış ve hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 4. 5. Veri toplayıcı.

4.1.2.3. Ultrasonik Banyo

Deney düzeneğinde dolaşan akışkanın belirli süre sonrasında aglomerasyon probleminin önüne geçmek ve bu durumdan kaynaklı akışkan debisinin ayarlanan

debide sabit kalması sağlamak amacıyla Alex Machine marka ultrasonik banyo kullanılmıştır. Ultrasonik banyo Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4. 6. Ultrasonik Banyo.

4.1.2.4. Ampermetre

Ayarlı kısıcı(dimmer) tarafından istenilen güce getirilen ve istenilen bu ısı akısı gücünün ne kadar olduğunu tespit etmek için pens ampermetre kullanılmış ve aşağıdaki Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4. 7. Pens Ampermetre

4.1.2.5. Pompa

Pompa verimini akışkanın çökelme yapması, yüksek bölgelerde kalan kısımlarda pompanın zorlanmaması gibi durumlar göz önünde bulundurularak 10 bar işletme basıncına kadar çalışabilen Novamarka sirkülasyon pompası (Şekil 4.8) kullanılmıştır. Pompa 3 farklı güç kademesinde çalıştırılabilmektedir. Debi değerine göre pompa gücü ve valfler kullanılarak istenilen akış debileri elde edilmiştir.



Şekil 4. 8. Sirkülasyon pompası.

4.1.2.6. Basınç Transmitteri

Deney düzeniğindeki test bölümünün giriş ve çıkış basınçlarını, piyasadaki basınç transmmitterleri araştırılmış ve çalışma basıncı(0-6bar) test düzeneğinin rahatlıkla çalışabileceği Şekil 4.9'da gösterilen Atek marka basınç transmmitterleri kullanılmış ve basınç farkları ölçülmüştür. Transmittere bağlı proplardan güvenli ve doğru sonuçlar alınabilmesi için kanalın test bölümünün giriş ve çıkışına sabitlenmiştir. Transmitterler 0-10 V aralığında analog gerilim üretmekte, bu veriler hazırlanan Arduino devresinde Pa cinsinden okunarak, kaydedilmiştir.



Şekil 4. 9. Basınç Transmitteri.

4.1.3. Deneylerin Yapılışı

Deney düzeneği tasarlandıktan ve tesisat kurulduktan sonra ilk aşama olarak deneyler saf su ile çalıştırılarak deney düzeneğine uygulanan ısı akısı, debi ayarı gibi kontroller yapıldıktan sonra sistemdeki ekipmanların çalışıp çalışmadığı kontrol edilmektedir.

Sistemde herhangi bir aksaklığın olmadığı anlaşıldıktan sonra deney düzeneğinin giriş suyu sıcaklığı sabit tutulması için şehir şebekesi suyu açılır, pompa aktif hale getirilir, istenilen laminer akış şartlarında hesaplanan Reynolds sayısı için debi valf yardımıyla ayarlanır, ısı akısı pens amper metre ile yapılır ve sistemin düzenli bir akışa (rejime) girmesi beklenir. Sistem rejime girdikten sonra basınç transmitterlerinden giriş ve çıkış değerleri, ısıtıcı rezistanslar vasıtasıyla ısınan akışkan; ısı çiftler aracılığıyla data loggerdan giriş, çıkış ve duvar sıcaklığı (ortalama sıcaklık) bilgisayardan okunur kayıt altına alınır. Debimetreden belirli aralıklarla debide oynama olup olmadığı sabit kaldığı teyit edilir. Deneydeki her Reynolds sayısı için belirlenen her debide deneysel çalışma üç kez tekrar yapılır ve sonuçların aynı çıkması halinde sistemin düzgün bir şekilde çalıştığı kontrol edilir.

4.1.4. Belirsizlik Analizi

Çalışmanın hesaplanan sonuçlardaki genel belirsizliği tahmin etmek için, öncelikle ölçülen parametrelerdeki belirsizliği tahmin etmek önemlidir. Belirli bir parametrenin (x) ölçümlerindeki (N) belirsizliği (w) tahmin etmek için aşağıdaki gibi istatistiksel bir yaklaşım kullanılabilir [94]:

$$x_m = \frac{1}{N} \sum x_i \quad (4.1)$$

$$V = \frac{1}{(N-1)} \sum (x_i^2 - x_m^2) \quad (4.2)$$

$$S = \sqrt{V} \quad (4.3)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (4.4)$$

$$w = \sqrt{\sum_{i=1}^r a_i^2 \cdot S_i^2} \quad (4.5)$$

burada (S) standartsapmadır. Hesaplanan verimliliklerdeki maksimum belirsizlikler aşağıdaki gibi belirlenebilir:

Bağımsız doğrusal parametrelerin (x_1, x_2, \dots, x_n) bir fonksiyondaki (R) belirsizlik (w_R), [95]:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

burada (w_1, w_2, \dots, w_n) bağımsız parametrelerdeki (x_1, x_2, \dots, x_n) belirsizlikler. Varsayılan parametrelerin ($x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_n$) belirsizliklerle ($w_1, w_2, \dots, w_m, w_{m+1}, \dots, w_n$) ve R fonksiyonu:

$$R = \frac{x_1 \times x_2 \times \dots \times x_m}{x_{m+1} \times x_{m+2} \times \dots \times x_n} \quad (4.7)$$

($x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_n$)'deki belirsizlik bağımsız ise, (R) fonksiyonundaki kesirli belirsizlik olarak ifade edilir [96]:

$$\frac{w_R}{R} = \left[\left(\frac{w_1}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{w_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{w_m}{x_m} \right)^2 + \left(-\frac{w_{m+1}}{x_{m+1}} \right)^2 + \dots + \left(-\frac{w_n}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

Çizelge 4. 1. Ölçüm cihazlarındaki belirsizlikler.

Cihaz/Ekipman	Ölçülen parametre	Belirsizlik
Picotech termokupl	Sıcaklık, °C	0,5
Türbin tipi akış ölçer	Debi, kg/s	%0,5
Kablo rezistans 50 W/m	Güç, W	1,0
Manometre	Basınç farkı, Pa	0,5

4.2. METOT

4.2.1. Sayısal Yöntemler

Bu bölümde çalışmanın analiz bölümü için kullanılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olan ANSYS Fluent programına ait gerekli bilgiler ve sayısal çözümler hakkında bilgiler verilmiştir.

4.2.1.1. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu Hacimler Yönteminde (SHY), çözümlemesi yapılacak olan geometri sonlu elemanlar tarzında olduğu gibi çok küçük parametrik kısımlara bölünür, her bir

parçanın kısmı için analiz yapılır ve çözümlenmeleri yapılan bu küçük parçalar birleştirilerek akabinde geometrik şekil bütününde çözümlenmiş olur. Sonlu hacimler yönteminde esas olarak sonlu farklar yöntemi tercih edilmesine rağmen sonlu farklar tekniği ile kıyaslandığında daha duyarlı analiz çözümlenmeleri oluşturmaktadır. Sonlu elemanlar ile kıyaslandığında bu teknik, akış analiz denklemlerini nümerik olarak çözümlenerek cebirsel eşitliklere benzetmek için kontrol hacmi kuramını kullanmaktadır. Kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal bir yöntem olan sonlu hacimler yöntemi HAD kodlarında en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde denklemler her bir kontrol hacmi için ayrıştırılarak iteratif olarak çözülür.

4.2.1.2. AnsysFluent

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği bilgisayar programı olan Fluent, sonlu hacimler methodu ile çözümlenme sunmaktadır. 1983 yılından sonra çeşitli alanlarda tercih edilen, her gün gelişen ve gelişmeye devam eden bu program dünya genelinde çözümlenmelerde çok sık kullanılmaya başlanmış ve gelişmiş teknolojik yapısı ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğininde çözümlenmesi çok zor olarak görülen denklemleri çok kısa zamanda kullanıcılarına sunmaktadır

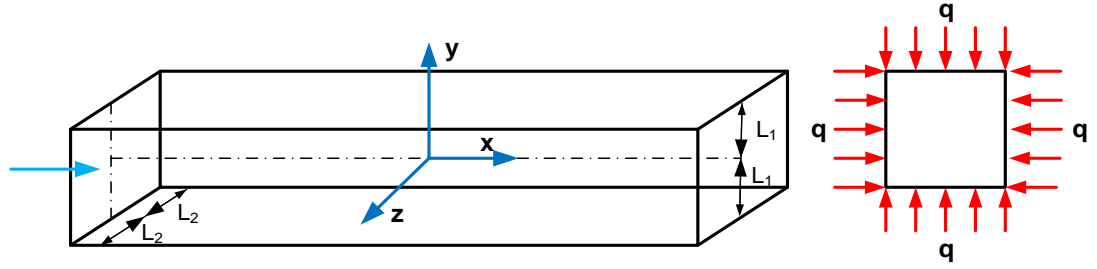
HAD yazılımı olan Fluent çeşitli endüstri alanında (kimya, havacılık, yiyecek vb.) ısı transferi ve akışkanlar mekaniği çözümlenmelerinde sıkça kullanılmaktadır. Çözümlenme teknikleri ile kullanıcılarını problem çözümünde hem zaman hem de ekonomik olarak işini kolaylaştırmaktadır. Fluent,üretim geçilmeden daha tasarım aşamasında olan bir fikri tüm yönleri ile çözümlenerek sağlıklı bir tercih yapılmasını sağlar ve kullanıcı sayısının fazla olması sebebi ile üretim firmaları arasında zorlu bir rekabet ortamı sunmaktadır.

Fluent, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve içinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde laminer, geçişsel ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve radyasyon ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, yakıt pilleri, akustik, akış kaynaklı gürültü, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı

ve güvenilir çözümler üreterek, Ar-Ge bölümlerinin tasarım esnasındaki en güvenilir aracı olmaya adaydır.

4.2.1.3. Geometri ve Ağ Yapısının Oluşturulması

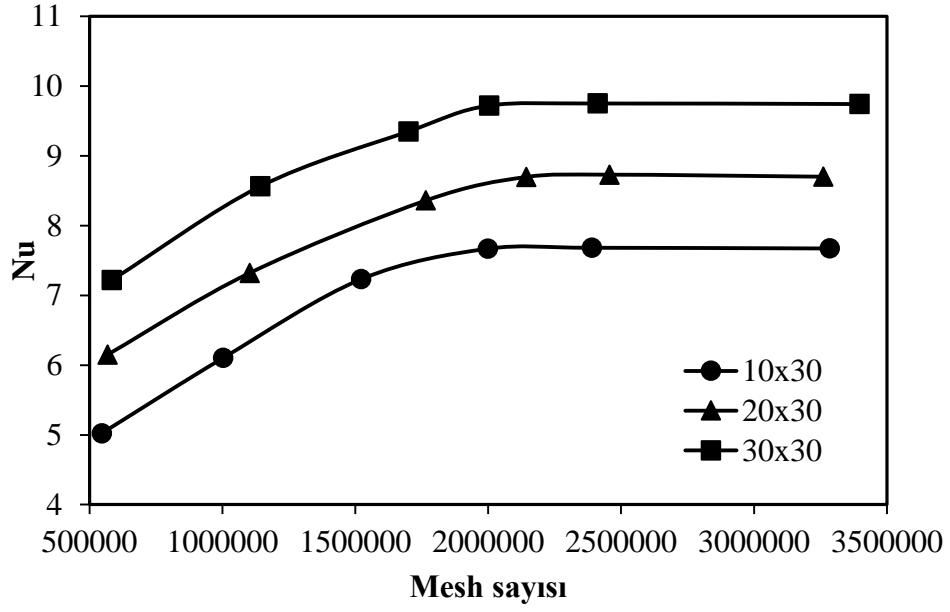
Sayısal sonuçların güvenilirliği açısından uygun mesh yapısının belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle oluşturulan geometride uygun sayısal ağ yapısının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.



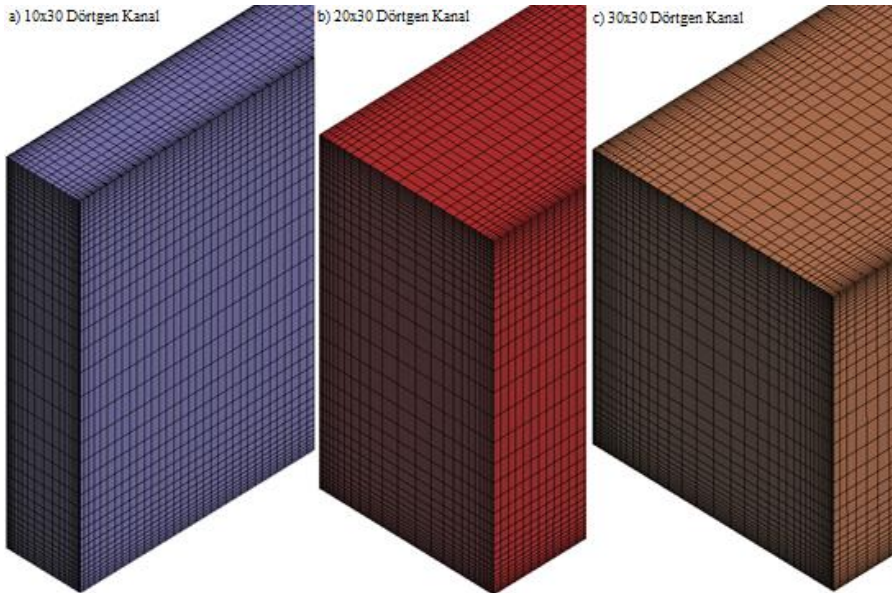
Şekil 4. 10. Problem geometrisi şematik gösterimi.

Sayısal çalışmaya başlamadan önce yapılan tasarımın çözüm ağının sonuçlarından bağımsız olup olmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Çözüm ağı bir sayısal çalışmada sistem çözüm maliyetinden sonuçların doğruluğuna kadar birçok çeşitli parametreyi etkilemektedir. Bu bağlamda çok fazla sayıda oluşturulmuş çözüm ağı operasyon çözüm zamanını çok arttırırken, az sayıda oluşturulmuş çözüm ağı sayısı ise yanlış sonuçlara yol açmaktadır. Bu sebeple; çözüm ağı adaptasyon çalışmasında gerekli yerlere ve hedef yüzeye (örn: geçişli yüzeyler, kanatçık yüzeyleri, köşeli geometriler) yoğun çözüm ağı uygulaması yapılırken, bunun haricindeki sınır tabakalara daha az yoğunlukta (çözümü etkilemeyecek kadar az yoğunlukta) çözüm ağı uygulaması yapılmalıdır [98]. Sayısal çalışmanın ilk bölümünde belirtilen şartlara bağlı kalmak esası ile çözüm ağı adaptasyon çalışması 3 kanal içinde ayrı ayrı en yüksek Reynolds değeri olan $Re=2000$ için yapılmıştır. Sonuç olarak, Şekil 4.11'den görüleceği üzere çözüm ağı sonuçları her kanal tipi için yaklaşık 2,300,000 çözüm ağı sayısında sabit değerlerde kalmaya başlamıştır. Ek olarak, sırasıyla, 10x30, 20x30,

30x30 dörtgen kanallar için 2,151,639, 2,285,504, 2,106,293 çözüm ağı eleman sayısında analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 11. Hesaplanan Nu değerlerinin hücre sayısına bağlı değişimi.



Şekil 4. 12. Farklı boyutlardaki dörtgen kanallarda çözüm ağı yapısı.

4.2.2. Sınır Koşulları

Kanal girişinde, Reynolds değerlerine bağlı olarak farklı hızlar kullanılmıştır. Akış laminar olduğu için nanoakışkanın giriş hızı 0,01 – 0,05 m/s aralığındadır. Giriş sıcaklığı 290,3K'dir. Nanoparçacıklar ve baz sıvı termal dengededir. Akış hidrodinamik olarak tamamen gelişmiştir. Dörtgen kanalın tüm yan duvarları boyunca sabit ısı akısına (500 W/m²) tabi tutulmuştur.

4.2.3. Isı Transfer Performansı

Uygun sayısal ağ yapısının belirlenmesinden sonra problemle ilgili olan denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayanan ANSYS Fluent Programının yardımıyla, deneysel çalışmada kullanılan başlangıç ve sınır şartlarına bağlı olarak farklı şartlar için çözümler gerçekleştirilecektir.

Reynoldsşağıda verilen Eş. (4.9) gibi hesaplanmaktadır [97]:

$$Re_D = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (4.9)$$

Nanoakışkanın fiziksel özellikleri aşağıdaki verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır. Nanoakışkan yoğunluğu Eş.(4.10)'ten hesaplanabilir:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_{bf} \quad (4.10)$$

Özgül ısı Cp şu şekilde hesaplanabilir:

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_{np} + (1 - \phi) (\rho C_p)_{bf} \quad (4.11)$$

Nano akışkan Isı iletim katsayısı (k)

$$k_{nf} = \frac{2k_{bf} + k_{np} + 2\phi (k_{np} - k_{bf})}{2k_{bf} + k_{np} - 2(k_{np} - k_{bf})} k_{bf} \quad (4.12)$$

Viskozite;

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi)\mu_{bf} \quad (4.13)$$

Yukarıdaki ilişkilerde ρ , μ , k ve ϕ nanoakışkanın yoğunluğu (kg/m^3), dinamik viskozitesi (Pa.s), ısı iletkenliği(W/mK) ve partikül oranıdır: alt indisler p ve bf sırasıyla nano parçacığı ve baz akışkanı ifade etmektedir.

Enerjinin korunum yasası gereğince kanal duvar yüzeyinden transfer edilen enerji akışkan tarafından kazanılan enerjiye eşit olup, Eş. (4.14) ile ifade edilmiştir.

$$Q = \dot{m}c_p\Delta T = hA_s\Delta T \quad (4.14)$$

Eşitlik 10 aşağıda verilen Eş. (4.15) şeklinde de ifade edilebilir.

$$Q = \dot{m}C_p(T_o - T_i) = hA_s(T_w - T_b) \quad (4.15)$$

Burada; \dot{m} kütleli debiyi, A_s ısı akışı uygulanan yüzey alanını, C_p özgül ısıyı ve T_o , T_i , T_w ve T_b ise sırasıyla çıkış sıcaklığı, giriş sıcaklığı, duvar sıcaklığı ve ortalama sıcaklığı ifade etmektedir.

Isı taşınım katsayısı, h Eş. (4.16) ile ifade edilmektedir.

$$h = \frac{Q}{A_s(T_w - T_b)} \quad (4.16)$$

Taşınım ısı transferi katsayısı ve Nusselt sayıları nanoakışkanların ısı performansını bulmak için en önemli verilerdir ve aşağıdaki denklemlerdeki gibi ifade edilmektedir;

$$T_b = \frac{T_{in,nf} + T_{out,nf}}{2} \quad (4.17)$$

$(T_w - T_b)_{avg}$ Kanalin giriş ve çıkış kesimleri arasındaki ortalama sıcaklık ile duvar sıcaklığının doğrusal ortalama farkını, h taşınım ile ısı transferi katsayısını, D_h hidrolik çapı, k ısı iletim katsayısını, nf nanoakışkanı, q ısı akısını temsil etmektedir.

Nusselts sayısı, taşınım ile ısı transferinin iletimle ısı transferine oranı şeklinde tanımlanmakta olup Eşitlik (4.18) ile gösterilmektedir.

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} \cdot D_h}{k_{nf}} \quad (4.18)$$

Darcy sürtünme faktörü;

$$f = 2 \frac{D}{L} \frac{\Delta P}{\rho V^2} \quad (4.19)$$

şeklinde Eşitlik (4.19) ile ifade edilmektedir.

Hausen korelasyonu:

$$Nu = 3,66 + \frac{0,19(RePrD/L)^{0,8}}{1 + 0,117(RePrD/L)^{0,467}} \quad (4.20)$$

Sistemde tercih edilen nanoakışkan akışının verimliliğini ifade eden Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) Eşitlik 4.21 ile hesaplanmaktadır.

$$PEC = \frac{(Nu_{na}/Nu_{ba})}{(\frac{f_{na}}{f_{ba}})^{1/3}} \quad (4.21)$$

BÖLÜM 5

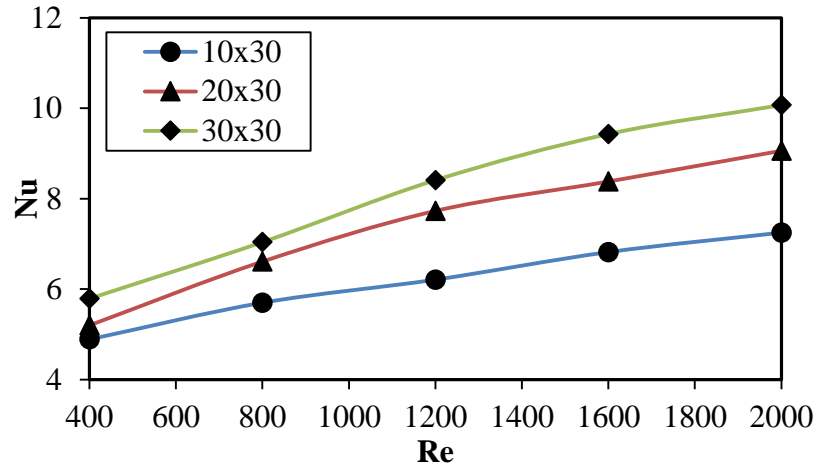
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. DENEYSEL SONUÇLAR

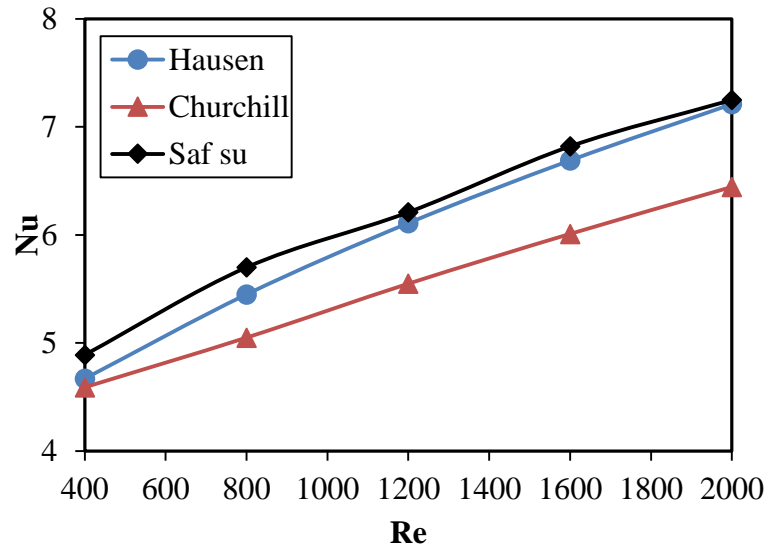
5.1.1. Saf Su ile Doğrulama

Çalışmanın bu bölümünde farklı en-boy oranına sahip ($\alpha=0,33$; 0,66 ve 1.0), dörtgen kanallarda deneysel çalışmalar içerisinde akan saf su ve %0,2 SiO₂ laminer akış şartlarında ($400 \leq Re \leq 2000$) incelenmiştir. Deneyler farklı boyutlardaki kanallar için her dörtgen kanal için sabit 500 W/m² ısı akısı uygulanmış ve ısı transferi üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Bu bölümde deneysel çalışmalar ve deneysel çalışmaların literatür ile uyum içerisinde olduğu sonuçlar sunulmuştur.

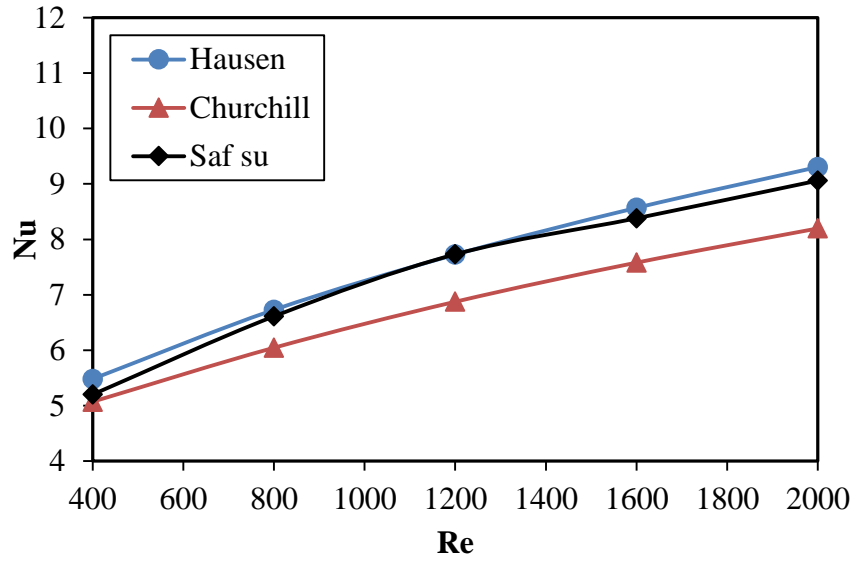
Çalışma kapsamında, nanoakışkan ile yapılacak deneysel çalışmalar öncesinde baz akışkan olan saf su ile laminer akış şartlarında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Saf su ile yapılan deneysel sonuçlardan alınan veriler ile ısı transfer hızı, basınç düşümü, farklı Reynolds değerlerine karşı gelen Nusselt değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür araştırmaları sonucu elde edilen denklemler neticesinde korelasyonlarla karşılaştırma yapılarak doğrulama sağlanmıştır. Şekil 5.1’de saf suyun farklı boyutlardaki kanalların Reynolds-nusselt değişimi, Şekil 5.2 ‘de saf suyun 10x30 boyutunda, Şekil 5.3’te 20x30 ve Şekil 5.4 ‘te 30x30 kanal içerisinde farklı Reynolds değerlerine karşı gelen Nusselt değerleri Hausen (Eşitlik 4.20) ve Churcillozoe korelasyonları ile karşılaştırılması verilmiştir. Deneysel sonuçlar Hausenve Churcillozoe [97] korelasyonlarında önerilen korelasyonda $\pm\%10$ aralığında olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde ve yapılan korelasyonlar da deney sisteminin hata oranı yeterli doğrulukta olduğu kabul edilmiştir.



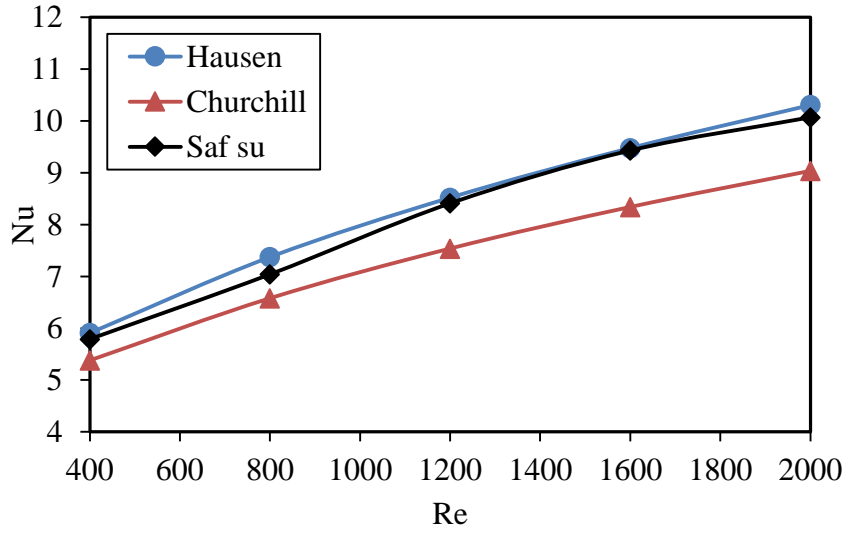
Şekil 5. 1. Saf suyun deneysel çalışmalardaki farklı boyutlardaki Nusselt değişimi.



Şekil 5. 2. Saf suyun deneysel çalışmalardan (10x30) elde edilen sonuçların literatür ile karşılaştırılması.



Şekil 5. 3. Saf suyun deneysel çalışmalardan (20x30) elde edilen sonuçların literatür ile karşılaştırılması.



Şekil 5. 4. Saf suyun deneysel çalışmalardan (30x30) elde edilen sonuçların literatür ile karşılaştırılması.

5.1.2. Nanoakışkan Akışı

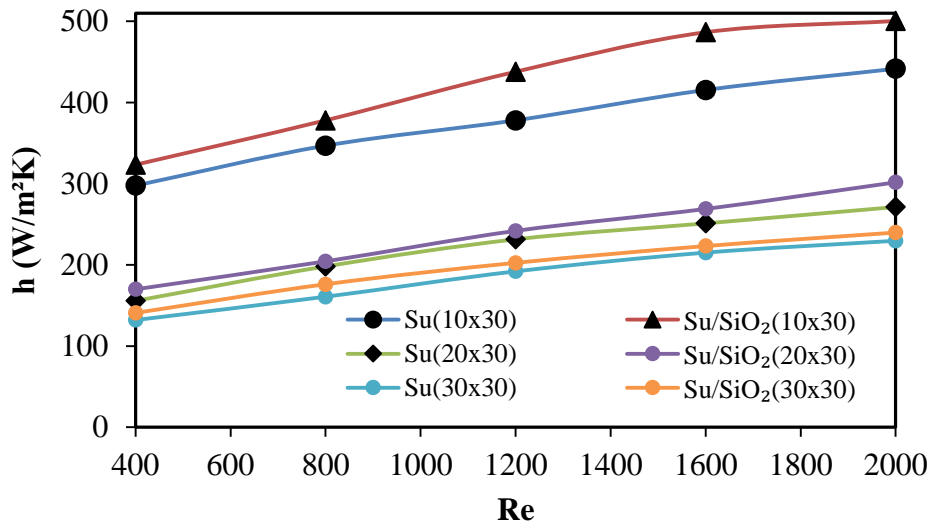
Bu bölümde farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda, %0,2 SiO₂ nanoakışkan akışının ısı transfer özelliklerini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Farklı boyutlardaki her kanal için hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan akış şartlarının belirlenmesi amacıyla tüm Reynolds değerleri için laminer akış şartlarında ($400 \leq Re \leq 2000$) sabit ısı akısı uygulanmıştır.

5.1.3. Isı Taşınım Katsayısı (h)

Farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda ısı taşınım katsayısı (h) Eşitlik 4.16'dan hesaplanmıştır. Saf su/SiO₂- nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının *Re* sayısına göre değişimi Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

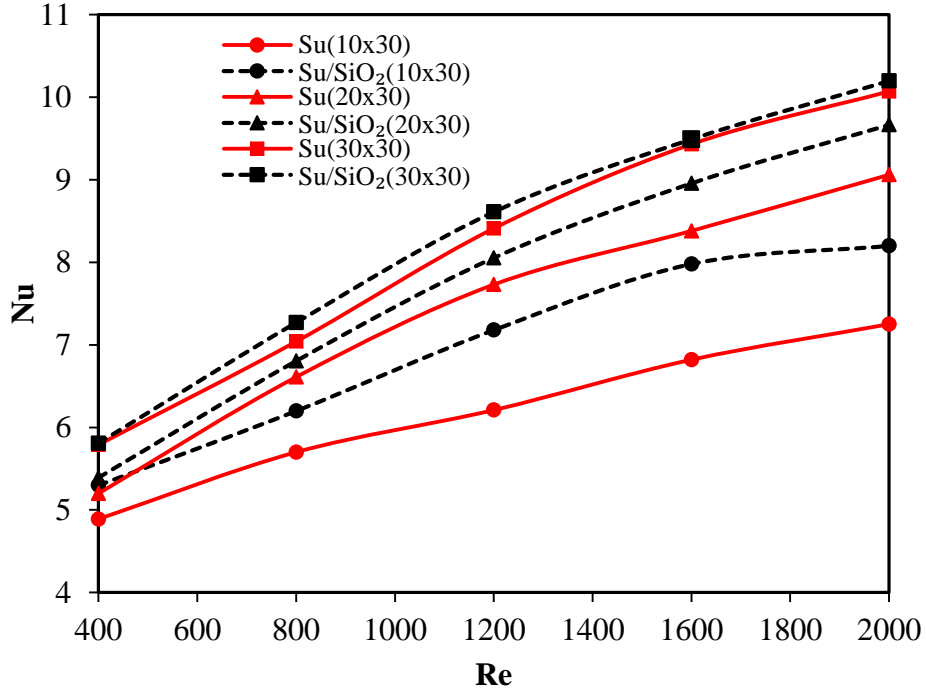
Şekil 5.5'te görüldüğü gibi saf suya nanoakışkan ilave edilmesi ile ısı taşınım katsayısı *h* artmakta, Reynolds sayısı arttıkça için ısı taşınım katsayısı da artış göstermektedir. *Re* 2000'de saf su için 10x30 dörtgen kanalda ısı taşınım katsayısı 441 W/m²K iken aynı Reynolds ve çapta SiO₂'de bu değer 500 W/m²K olarak hesaplanmıştır. Dörtgen kesitli kanallarda en boy ilişkisine bakıldığında en-boy oranı arttıkça ısı taşınım katsayısı *h* azaldığı Şekil 5.5'te görülmektedir. Saf su için *Re* 400'de 10x30 dörtgen kanalda ısı taşınım katsayısı 297 W/m²K iken, 20x30 dörtgen kanalda bu değer 155 W/m²K olarak hesaplanmıştır. SiO₂ nanoakışkanında bakıldığında *Re* 400'de 10x30 dörtgen kanalda ısı taşınım katsayısı 323 W/m²K iken, 20x30 dörtgen kesitli kanalda bu değer 161 W/m²K olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 5. SiO₂-Su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının *Re* değerine göre değişimi.

5.1.4. Nusselt Sayısı (Nu)

Farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda Nusselt sayısı ısı taşınımının ısı iletimine oranı olarak bilinmektedir ve Eşitlik 4.10'dan hesaplanmıştır. Nanoakışkan ve saf suyun Nu sayısının Re sayısına göre değişimi Şekil 5.6'da verilmiştir



Şekil 5. 6. SiO₂-Su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Re değerine göre değişimi.

Farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda Nusselt sayısı ısı taşınımının ısı iletimine oranı olarak bilinmektedir ve Eşitlik 4.10'dan hesaplanmıştır. Nanoakışkan ve saf suyun Nu sayısının Re sayısına göre değişimi Şekil 5.6'da verilmiştir.

Nusselt sayısı Reynolds sayısının artmasıyla arttığı deneysel ve sayısal çalışmalar ışığında tespit edilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça hız değerinin ve ısı taşınım katsayısının (h) artması ve buna bağlı olarak Nusselt değerinin de arttığı Şekil 5.6'da görülmektedir. SiO₂ için Re 10x30 dörtgen kesitli kanalda Nusselt değeri 5,3 iken, aynı en-boy oranlı dörtgen kesitte Re 800 de Nusselt değerinin 6,2 olduğu hesaplanmıştır. Saf su için Re 10x30 dörtgen kesitli kanalda Re sayısı 400'de Nusselt değeri 4,89 iken,

aynı en-boy oranlı dörtgen kanalda Reynolds 800'de bu değer 5,7 olduğu hesaplanmıştır. Diğer bir yandan en-boy karşılaştırmasına bakıldığı zaman en-boy oranı arttıkça Nusselt değerinin arttığı bunun sebebinin kanaldaki çap oranı arttıkça ısı taşınım katsayısı (h) artmasından dolayı olduğu görülmektedir. SiO₂ için *Re* 2000 de 10x30 dörtgen kanalda Nusselt değeri 8,2 iken aynı Reynolds değeri için 20x30 dörtgen kanalda Nusselt değeri 9,66 olarak hesaplanmıştır. Saf su için *Re* 2000 de 10x30 dörtgen kanalda Nusselt değeri 7,25 iken aynı Reynolds değeri için 20x30 dörtgen kanalda Nusselt değeri 9,06 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak saf suya nanoakışkan ilavesi Nusselt değerini arttırdığı deneysel sonuçlarla gözlemlenmiştir.

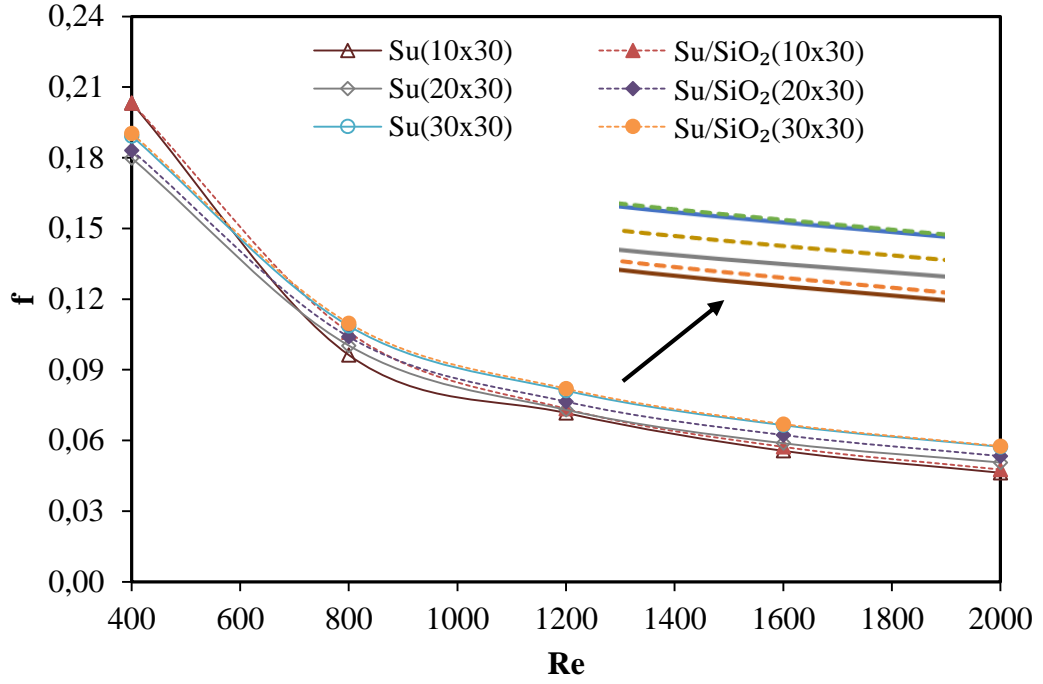
5.1.5. Darcy Sürtünme Faktörü (f)

Farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda Darcy sürtünme faktörü SiO₂ ve saf su için Eşitlik 4.11'den alınarak hesaplanmıştır. Yapılan sayısal hesaplamalar ışığında saf su ve SiO₂ nanoakışkanı için Darcy sürtünme faktörünün *Re* ve en-boy oranı değerine göre değişimi Şekil 5.7'de ifade edilmiştir.

Dörtgen kanalda en-boy oranı arttıkça akışın Darcy sürtünme faktörü de artmaktadır. Hesaplamalardaki bu doğru orantının sebebi ise en boy oranı arttıkça basınç düşümü değerinin artması sebeb olmaktadır. SiO₂ nanoakışkanı için *Re* 2000 de 10x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,046 iken, aynı Reynolds değerinde 20x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,05 olarak hesaplanmıştır. Saf su için *Re* 2000 de 10x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,046 iken aynı Reynolds değerinde 20x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,05 olarak hesaplanmıştır.

Akışın yerel sürtünme faktörü Reynolds sayısı ile ters orantılı bir ilişkisinin olduğu Şekil 5.7'de ifade edilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörünün azaldığı, aynı şekilde Reynolds sayısı arttıkça bu değere karşı gelen hız parametresi de artmakta ve hızdaki bu artış sistemdeki akışın basınç düşümüne aynı zamanda kayma gerilmesinin de artmasına sebep olmaktadır. SiO₂ nanoakışkanı için *Re* 400 de 10x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,2 iken, aynı en boy oranında dörtgen kanalda *Re* 800 değerinde Darcy sürtünme faktörü 0,1 olarak hesaplanmıştır. Saf su

için ise Re 400 de 10x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,2 iken, aynı en-boy oranında Re 800 de Darcy sürtünme faktörü 0,096 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak Reynolds sayısının artması Darcy sürtünme faktörünün azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 5. 7. SiO₂-Su nanoakışkanı için Darcy sürtünme faktörü değerinin Re değerine göre değişimi.

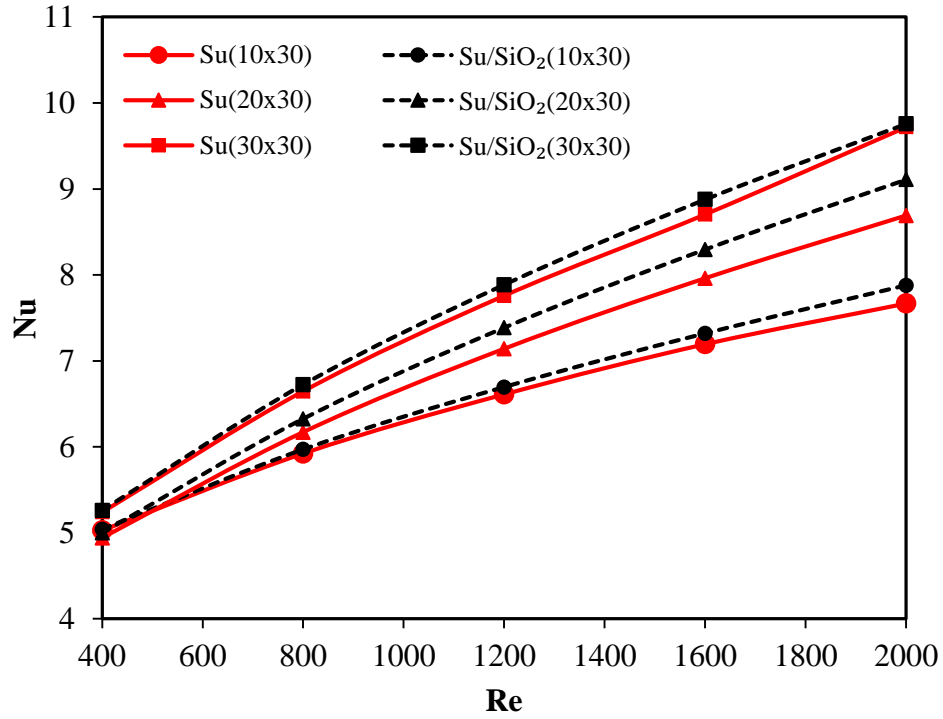
5.2. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda yapılan deneyler için saf su ve %0,2 SiO₂ kullanılarak laminer akış şartlarında ($400 \leq Re \leq 2000$) sayısal analiz sonuçları verilmiştir.

5.2.1. Nusselt Sayısı (Nu)

Farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda Nusselt sayısı ısı taşınımının ısı iletimine oranı olarak bilinmektedir ve Eşitlik 4.10'dan hesaplanmıştır. Nanoakışkan ve saf suyun Nu sayısının *Re* sayısına göre değişimi Şekil 5.8'de verilmiştir.

Nusselt sayısı Reynolds sayısının artmasıyla arttığı deneysel ve sayısal çalışmalar ışığında tespit edilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça hız değerinin ve ısı taşınım katsayısının (*h*) artması ve buna bağlı olarak Nusselt değerinin de arttığı Şekil 5.8'de görülmektedir. SiO₂ için *Re* 10x30 dörtgen kesitli kanalda Nusselt değeri 5,04 iken, aynı çap özelliğinde *Re* 800 de Nusselt değerinin 5,97 olduğu hesaplanmıştır. Saf su için *Re* 10x30 dörtgen kesitli kanalda *Re* 400 de Nusselt değeri 5,02 iken, bu değer aynı Reynolds ve çaptaki dörtgen kanalda 5,92 olduğu hesaplanmıştır. Saf su ve SiO₂-nanoakışkan Nusselt değerleri karşılaştırıldığında en yüksek Nusselt sayısı *Re*= 2000 değerinde %4,71'lik artış ile hesaplanmıştır. Bu artışın sebebi en yüksek Reynolds değerinde hızın artışı ile *h* ısı taşınım katsayısının artışı ile olduğu görülmektedir. *Re*= 400'de %1,21, *Re*= 800'de %2,43, *Re*= 1200'de %3,36, *Re*=1600'de %4,14 ve *Re*= 2000'de ise en yüksek artış ile %4,71'lik artış hesaplanmıştır. Diğer bir yandan en-boy karşılaştırmasına bakıldığı zaman en-boy oranı arttıkça Nusselt değerinin arttığı bunun sebebinin kanaldaki çap oranı arttıkça ısı taşınım katsayısı (*h*) artmasından dolayı olduğu görülmektedir. SiO₂ için *Re* 2000 de 10x30 dörtgen kanalda Nusselt değeri 7,87 iken aynı Reynolds değeri için 20x30 dörtgen kanalda Nusselt değeri 9,1 olarak hesaplanmıştır. Saf su için *Re* 2000 de 10x30 dörtgen kanalda Nusselt değeri 7,66 iken aynı Reynolds değeri için 20x30 dörtgen kanalda Nusselt değeri 8,69 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak saf suya nanoakışkan ilavesi Nusselt değerini arttırdığı deneysel ve sayısal sonuçlarla gözlemlenmiştir.



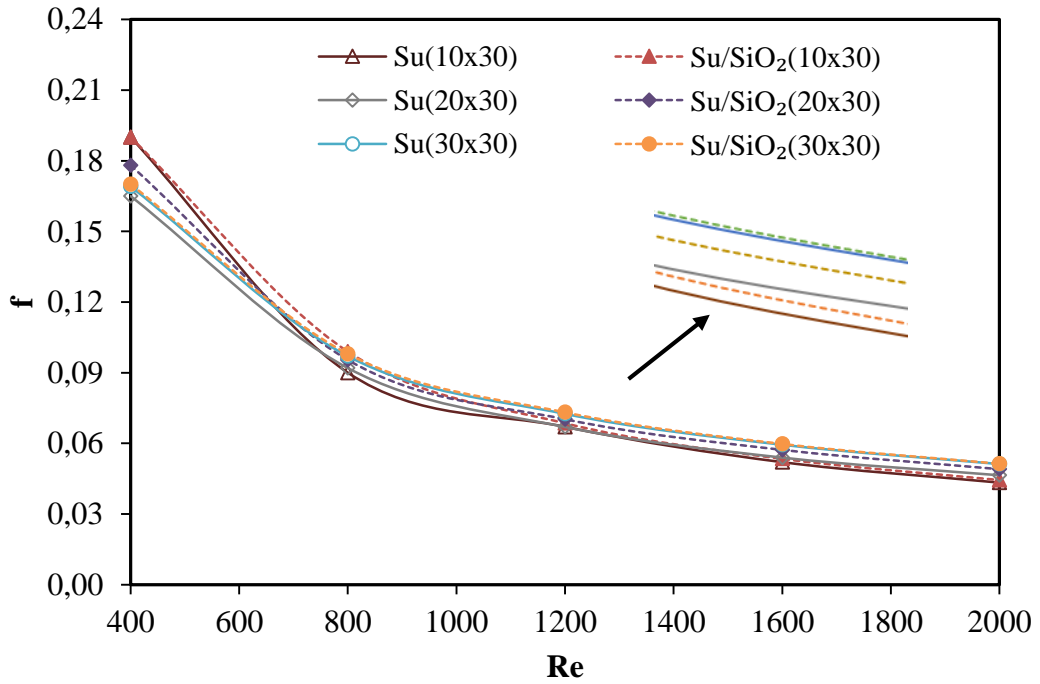
Şekil 5. 8. SiO₂-Sunanoakışkanı için Nusselt sayısının Re değerine göre değişimi.

5.2.2. Darcy Sürtünme Faktörü (f)

Farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda Darcy sürtünme faktörü SiO₂ ve saf su için Eşitlik 4.11'den alınarak hesaplanmıştır. Yapılan sayısal hesaplamalar ışığında saf su ve SiO₂ nanoakışkanı için Darcy sürtünme faktörünün Re ve en-boy oranı değerine göre değişimi Şekil 5.9'da ifade edilmiştir.

Dörtgen kanalda en-boy oranı arttıkça akışın Darcy sürtünme faktörü de artmaktadır. Hesaplamalardaki bu doğru orantının sebebi ise en boy oranı arttıkça basınç düşümü değerinin artması sebeb olmaktadır. SiO₂ nanoakışkanı için Re 2000 de 10x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,045 iken, aynı Reynolds değerinde 20x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,049 olarak hesaplanmıştır. Saf su için Re 2000 de 10x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,043 iken aynı Reynolds değerinde 20x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,047 olarak hesaplanmıştır.

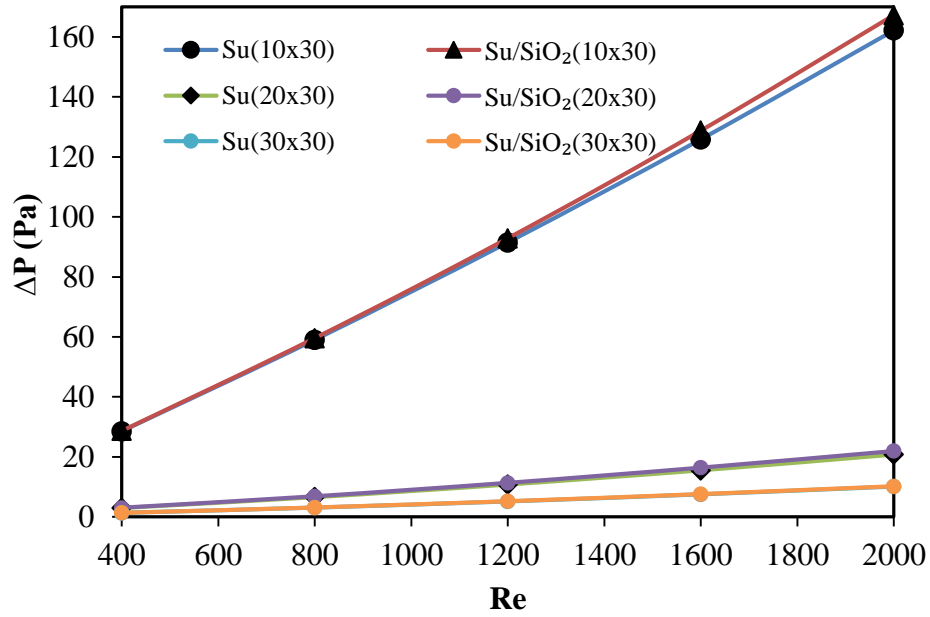
Akışın yerel sürtünme faktörü Reynolds sayısı ile ters orantılı bir ilişkisinin olduğu Şekil 5.9’da ifade edilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörünün azaldığı, aynı şekilde Reynolds sayısı arttıkça bu değere karşı gelen hız parametresi de artmakta ve hızdaki bu artış sistemdeki akışın basınç düşümüne aynı zamanda kayma gerilmesinin de artmasına sebep olmaktadır. SiO₂ nanoakışkanı için *Re* 2000 de 10x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,193iken, aynı en boy oranındaki kanaldaki *Re* 800 değerinde Darcy sürtünme faktörü 0,099 olarak hesaplanmıştır. Saf su için ise *Re* 400 de 10x30 dörtgen kesitli kanalda Darcy sürtünme faktörü 0,19 iken, aynı en-boy oranında *Re* 800 de Darcy sürtünme faktörü 0,090 olarak hesaplanmıştır. Saf su ve SiO₂ nanoakışkanı Darcy sürtünme faktörünün nanoakışkanın saf suya göre fazla çıkmasının en önemli sebebi viskozitesinin ve yoğunluğunun saf suya göre fazla olmasından kaynaklandığı hesaplamalar ile görülmektedir. Sonuç olarak Reynolds sayısının artması Darcy sürtünme faktörünün azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 5. 9. SiO₂-Su nanoakışkanı için Darcy sürtünme faktörü değerinin *Re* değerine göre değişimi.

5.2.3. Basınç Düşümü (ΔP)

Farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda sayısal hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler ile saf su ve SiO_2 nanoakışkanı için basınç düşümü Eşitlik 4.11'den hesaplanmıştır. Saf su ve SiO_2 nanoakışkanı için basınç düşümü Şekil 5.10'da ifade edilmiştir.



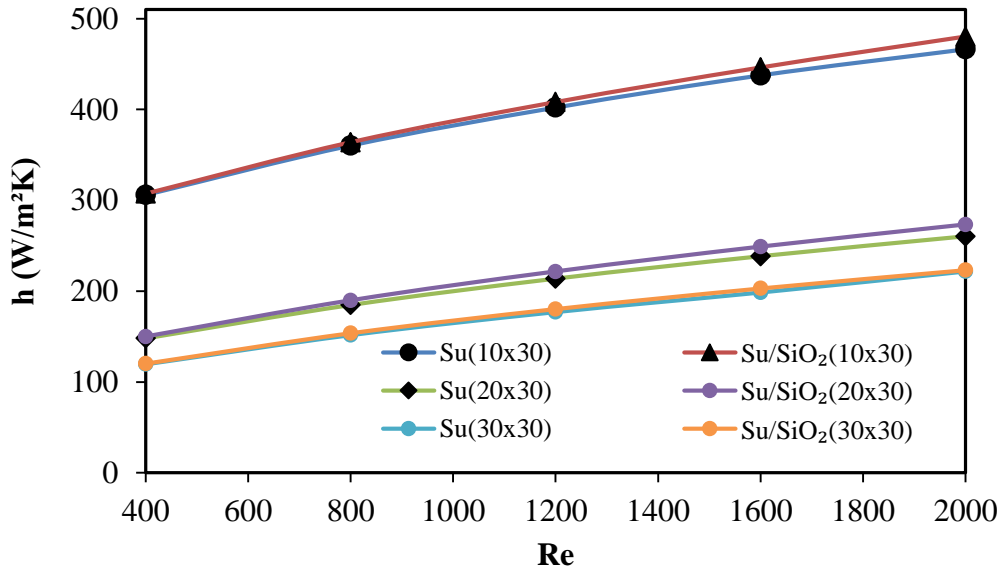
Şekil 5. 10. SiO_2 -Su nanoakışkanı için basınçın Re değerine göre değişimi.

Farklı en-boy oranında dörtgen kesitli kanalda Reynolds değeri arttıkça basınç düşümü (ΔP) arttığı Şekil 5.10'da ifade edilmiştir. Reynolds 400'de SiO_2 nanoakışkanı için 20x30 dörtgen kesitli kanalda basınç düşümü 3,02 Pa iken, aynı en-boy dörtgen kesitli kanalda Reynolds 800'de basınç düşümü 6,84 Pa olarak hesaplanmıştır. Reynolds 400'de saf su için 20x30 dörtgen kesitli kanalda basınç düşümü 2,96 Pa iken, aynı en-boy kesitli kanalda Reynolds 800'de 6,57 Pa olarak hesaplanmıştır. Saf su içerisine nanoakışkan ilavesi yapmak basınç düşümünü hızla doğru orantılı olarak artırdığı gözlemlenmiş ve nanoakışkanın saf suya göre basınç düşümünün fazla çıkmasının sebebi viskozitesinin ve yoğunluğunun fazla olmasından kaynaklandığı görülmektedir. Reynolds sayısı arttıkça basınç düşümünün artmasının sebebi hızında artmasından

kaynaklanmaktadır. Farklı en-boy oranında dörtgen kesitli kanalda en-boy oranı arttıkça basınç düşümü (ΔP) azalmaktadır. Reynolds 400'de SiO_2 nanoakışkanı için 10x30 kesitli dörtgen kanalda basınç düşümü (ΔP) 28,68 Pa iken, aynı Reynolds değerinde 20x30 en-boy kesitli dörtgen kanalda bu değer 3,02 Pa olarak hesaplanmıştır. Reynolds 400'de saf su için 10x30 dörtgen kesitli kanalda basınç düşümü 28,5 Pa iken aynı Reynolds değerinde 20x30 en-boy kesitli dörtgen kanalda bu değer 2,96 Pa olarak hesaplanmıştır. En- boy oranı artmasının basınç düşümünü artırmasının sebebi yüzey alanı arttığı için, ters orantılı olarak en-boy oranı arttıkça basınç düşümü azalmaktadır.

5.2.4. Isı Taşınım Katsayısı (h)

Farklı en-boy oranına sahip dörtgen kanallarda ısı taşınım katsayısı (h) Eşitlik 4.8'den hesaplanmıştır. Saf su ve SiO_2 - nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Re sayısına göre değişimi Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 11. SiO_2 -Sunanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Re değeri göre değişimi.

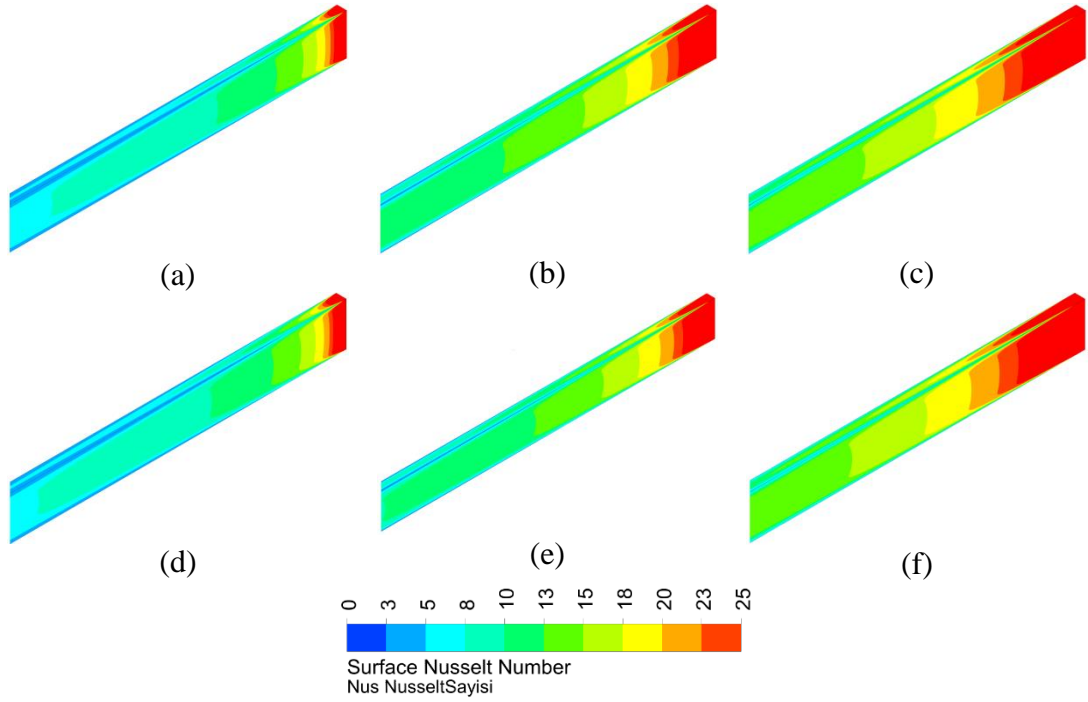
Yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi saf suya nanoakışkan ilave edilmesi ile ısı taşınım katsayısı h artmakta, Reynolds sayısı artması durumunda ısı taşınım katsayısı

da artış göstermektedir. Reynolds sayısının artmasıyla doğru orantılı olarak akış hızı artış göstermekte ve hızdaki bu artış akışkanın sıcaklığını azaltmakta bununla birlikte cidar sıcaklığı azaltmakta ancak cidardaki sıcaklığın düşümü akışkanın sıcaklık düşümünden daha fazla olmaktadır. Bu sebepten dolayı Re sayısının artması ile birlikte cidarın sıcaklığı ile akışkanın kendi sıcaklığı arasındaki fark azaldığı için ısı taşınım katsayısını ifade eden h değerinin yükselmesine sebep olmaktadır. Re 400'de saf su için 10x30 dörtgen kanalda ısı taşınım katsayısı 305,8 W/m²K iken ve Re 800'de aynı en-boy kesitli dörtgen kanalda bu değer 360,3W/m²K olarak hesaplanmıştır. Re 400'de SiO₂ nanoakışkanı için 10x30 kesitli dörtgen kanalda 307,3 iken, Re 800'de aynı en-boy kesitli dörtgen kanalda bu değer 363,9 olarak hesaplanmıştır ve h ısı taşınım katsayı değerleri Saf su ve SiO₂ nanoakışkanı için kıyaslandığında en yüksek artış %5 lik artış ile 2000 Reynolds'ta görülmüştür. Nedeni ise en yüksek Reynolds değerinde hız değerinin fazla olması ve artan hız ile duvar sıcaklığının azalması ve çeper sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki farkın en aza inmesi ile h ısı taşınım katsayısı artmakta ve sonuç olarak en yüksek $Re=2000$ değerinde görülmüştür. $Re=400$ 'de %1,35, $Re=800$ 'de %2,71, $Re=1200$ 'de %3,75, $Re=1600$ 'de %4,2 ve $Re=2000$ 'de en yüksek artış olan %5'lik artış hesaplanmıştır.

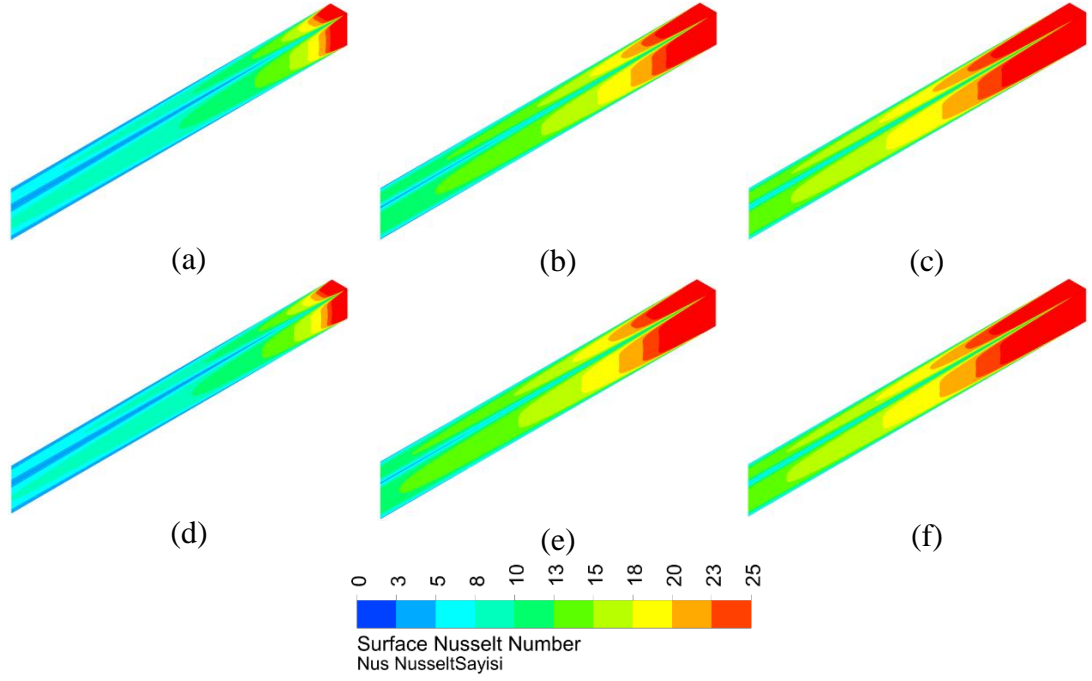
Dörtgen kesitli kanallarda en boy ilişkisine bakıldığında en-boy oranı arttıkça ısı taşınım katsayısı h azaldığı Şekil 5.11'de görülmektedir. Saf su için Re 400'de 10x30 dörtgen kanalda ısı taşınım katsayısı 305 W/m²K iken, 20x30 dörtgen kanalda bu değer 148 W/m²K olarak hesaplanmıştır. SiO₂ nanoakışkanında bakıldığında Re 400'de 10x30 dörtgen kanalda ısı taşınım katsayısı 307 W/m²K iken, 20x30 dikgörtgen kesitli kanalda bu değer 150 W/m²K olduğu görülmektedir. En boy oranı arttıkça ısı taşınım katsayısının azalmasının sebebi ise cidar sıcaklığının artması ve akışkan sıcaklığı ile arasındaki bu sıcaklık farkının artmasına sebebiyet vermesidir. Buradan sonuçla ısı taşınım katsayı değeri azalmaktadır.

Şekil 5.12'ye bakıldığında öncelikle saf su ve nanoakışkan kendi içerisinde karşılaştırıldığında Reynolds sayısı arttıkça Nusselt değerinin arttığı sebebinin ise artan Nusselt değeri ile hızın ve ısı taşınım katsayısının da artmasından dolayı olduğu söylenebilir. Saf su ve nanoakışkanın Nusselt artışları kıyaslandığında ise çok az farkla nanoakışkanın Nusselt değerinin fazla olduğu ve aradaki farkın $Re=1200$ ve 2000

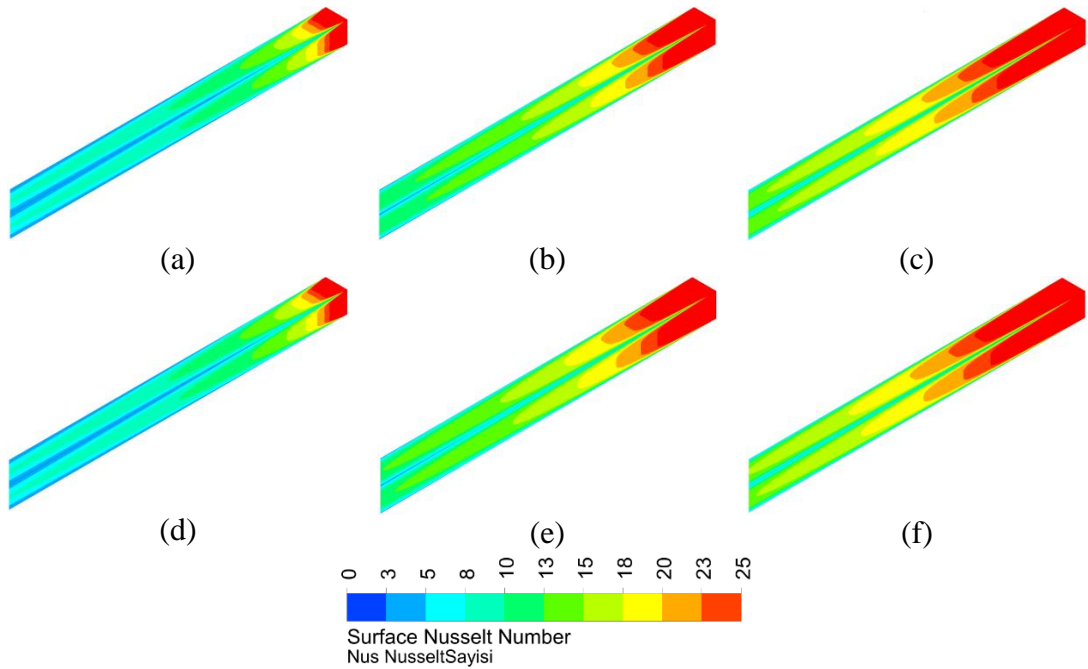
değerinde açıkça görülmektedir. Nusselt değerindeki değişimin en-boy değişiminin etkisine bakıldığında Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 birbiri arasında kıyaslandığında Nusselt değerinin en-boy oranı arttıkça arttığı görülmektedir. Bu farkın en-boy oranı arttıkça ısı taşınım katsayısının artışından olduğu söylenebilir. Şekil 5.14 dikkatli bir şekilde incelendiğinde Reynolds sayısı arttıkça hızın arttığı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5. 12. 10x30 en-boy oranında dörtgen kanalda Nu değişimi, a)Saf su Re=400, b)Saf su, Re=1200, c) Saf su, Re=2000, d) Nanoakışkan, Re=400, e) Nanoakışkan, Re=1200, f) Nanoakışkan, Re=2000.

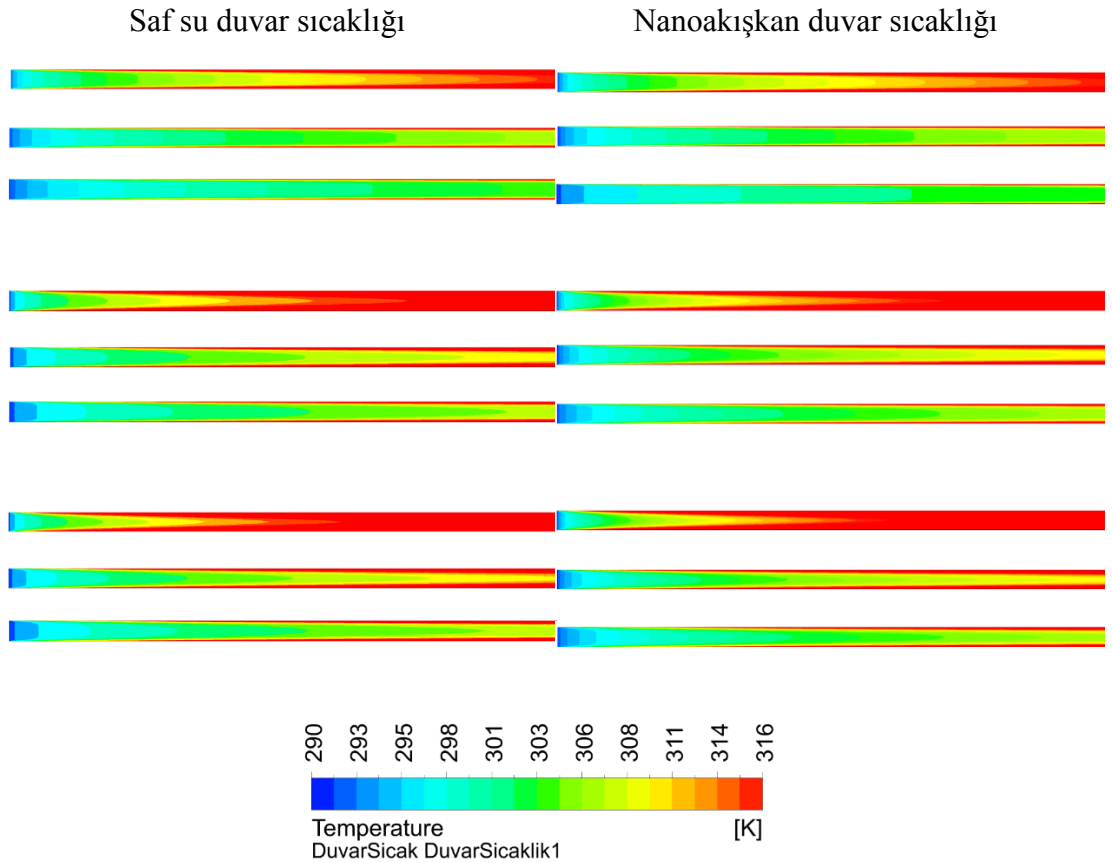


Şekil 5. 13. 20x30 en-boy oranında dörtgen kanalda Nu değişimi, a)Saf su Re=400, b)Saf su, Re=1200, c) Saf su, Re=2000, d) Nanoakışkan, Re=400, e) Nanoakışkan, Re=1200, f) Nanoakışkan, Re=2000.



Şekil 5. 14. 30x30 en-boy oranında dörtgen kanalda Nu değişimi, a)Saf su Re=400, b)Saf su, Re=1200, c) Saf su, Re=2000, d) Nanoakışkan, Re=400, e) Nanoakışkan, Re=1200, f) Nanoakışkan, Re=2000.

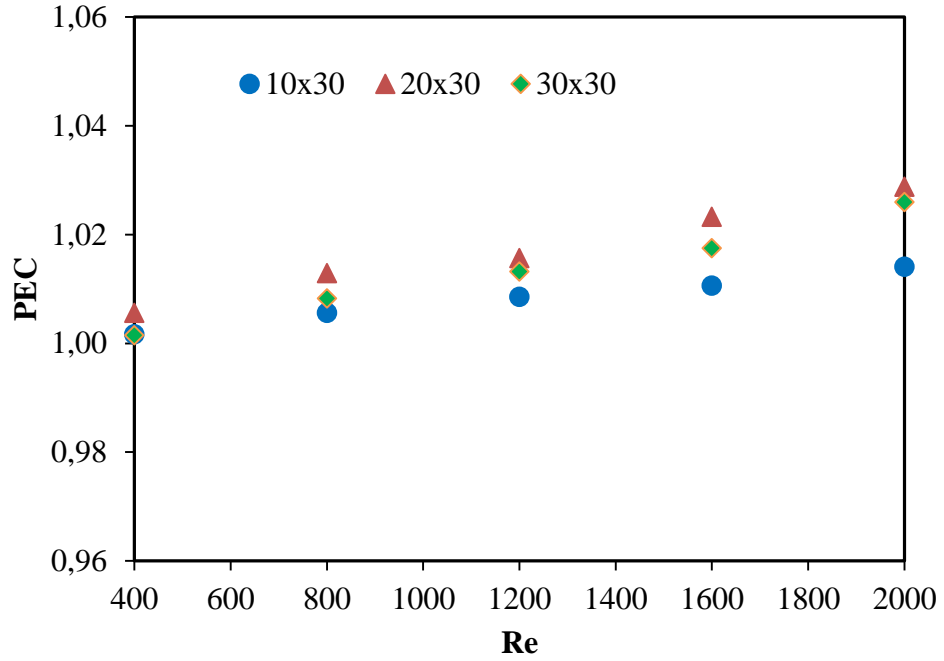
Analiz sonuçları Şekil 5.16’da dikkatli bir şekilde incelendiğinde akışkanlar öncelikle kendi Reynolds değerlerinde kıyaslandığında Reynolds değeri arttıkça hız değeri artmakta ve buna bağlı olarak da duvar sıcaklığı değerinin azaldığı dikkat çekmektedir. En-boy oranının arttığında cidar sıcaklığının yani duvar sıcaklığının arttığı Şekil 5.15’te görülmektedir ve sebebinin ise yüzey alanının artışından olduğu söylenebilir. Nanoakışkan ve Saf su karşılaştırıldığında nanoakışkanın ısıl iletkenlik değerinin saf suya oranla daha yüksek olması da duvar sıcaklığındaki bu farkı meydana getirmiştir. Diğer bir yandan SiO₂ nanoakışkanı ile saf su karşılaştırıldığında nanoakışkanın duvar sıcaklığının saf suya oranla azaldığı göze çarpmaktadır. Nanoakışkan ve saf suyun duvar sıcaklığı arasındaki farkın küçük olmasının sebebi düşünüldüğünde ise nanoakışkan konsantrasyonunun 0,2 olması ve buna bağlı olarak termofiziksel özelliklerinden dolayı değişimin küçük farkla olduğu söylenebilir.



Şekil 5. 15. Duvar sıcaklığı değişimi.

5.2.5. Performans Değerlendirme Kriteri (PEC)

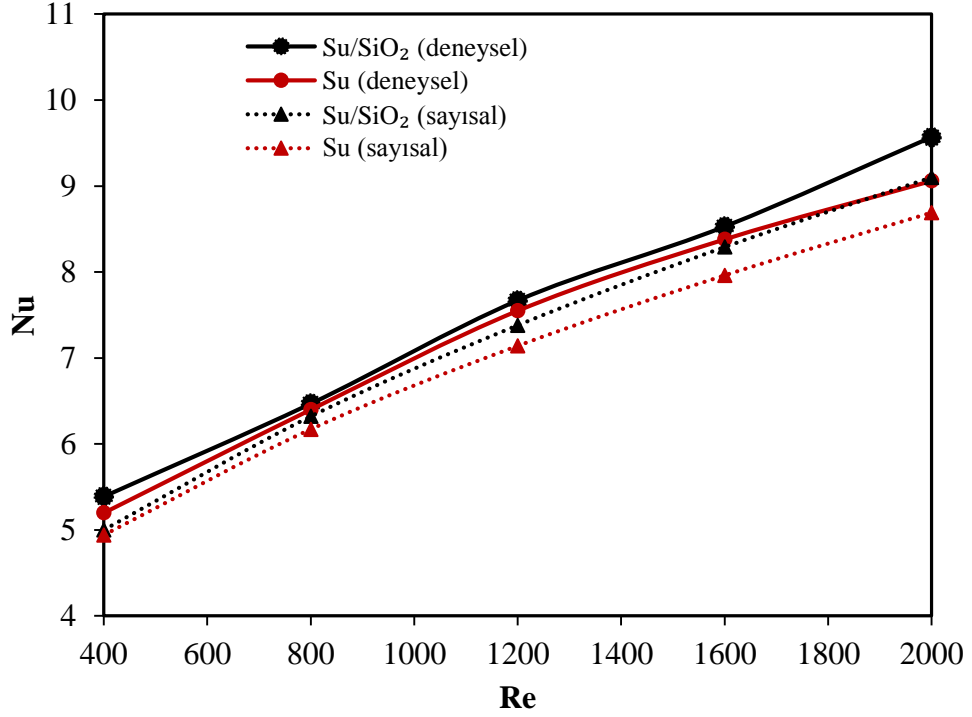
Performans değerlendirme kriteri olarak bilinen PEC, Eşitlik 4.13'te verilmiştir ve sistem veri analizlerinin etkinliğini (verimliliğini) ifade etmektedir [97]. Şekil 5.16'da laminar akış şartlarında verimliliği ifade edilmiştir.



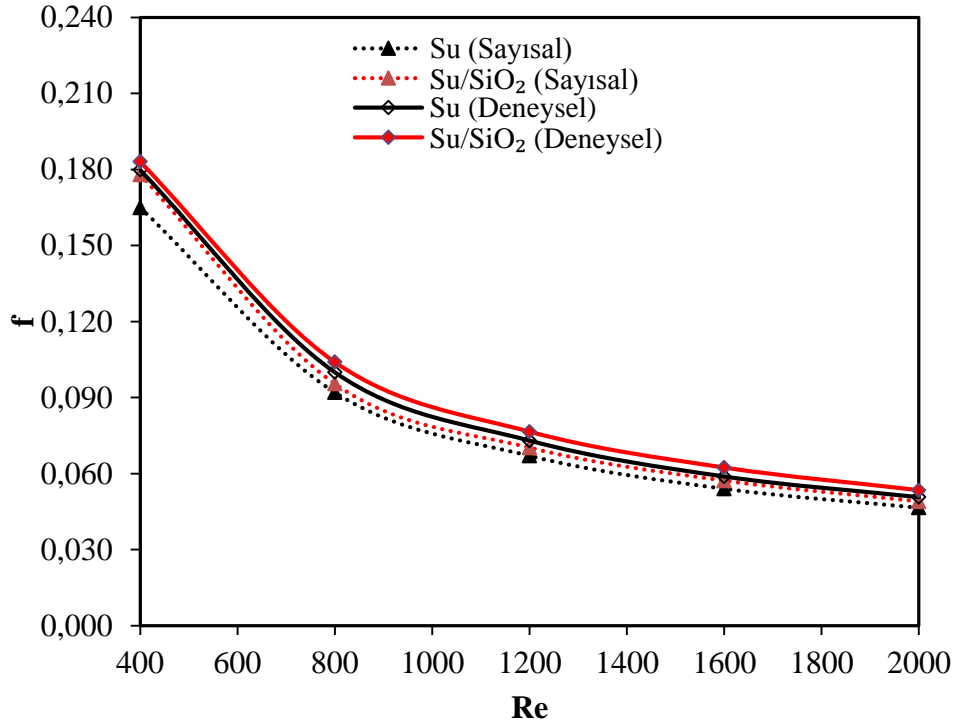
Şekil 5. 16. Performans Değerlendirme Kriteri.

5.3. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmanın bu bölümünde, farklı kesitlerdeki dörtgen kanallar için %0,2 SiO₂/su nanoakışkan akışının çalışmalar sonucunda deneysel ve nümerik çalışma sonuçları akış ve ısı transferi karakteristik özelliklerine bağlı olarak karşılaştırmaları verilmiştir.



Şekil 5.17. Deneysel ve Sayısal Nusselt Sonuçlarının Karşılaştırılması.



Şekil 5.18. Deneysel ve Sayısal Darcy Sürtünme Faktörü Sonuçlarının Karşılaştırılması.

Şekil 5.17 ve 5.18’de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal çalışmadaki saf su ve %0,2 SiO₂’nin Nu ve f değerleri Reynolds değerine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil dikkatli bir şekilde incelendiğinde sayısal ve deneysel sonuçların birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Deneysel ve nümerik sonuçlar birbiri ile karşılaştırıldığında Nu ortalama 10x30 dörtgen kesitli kanalda %5,56, 20x30 kesitli kanalda %4,2 ve 30x30 kesitli kanalda %5,8 fark çıkmıştır. Diğer bir parametre olan Darcy sürtünme faktörü değerleri incelendiğinde deneysel ve nümerik analiz çalışmaların birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Darcy sürtünme faktörü f ortalama 10x30 dörtgen kesitli kanal için %6, 20x30 kesitli kanal için %7,87 ve son olarak 30x30 kesitli kanalda %10 ,83 fark çıkmıştır.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı en-boy oranında $\alpha=0,33$ 0,66 ve 1 olan dörtgen kesitli kanallarda saf su ve hacimsel oranı %0,2 olan SiO_2 nanoakışkanının ısı transferi karakteristik özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Akış hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan laminer akış koşullarında Re sayısı 400-2000 arasında çalışılmıştır. Çalışmada her boyut için 500 W/m^2 ısı akısı uygulanmıştır. Farklı en-boy oranındaki akışta ısı ve hidrodinamik etkinliği üzerinde durulmuştur. Akış analizi sonucunda 3 farklı en boy ve 5 farklı Reynolds değerlerinde sonuçlar karşılaştırılmış ve tez kapsamında elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Saf suya nanoparçacık eklenmesi durumunda ısı taşınım katsayısı artmakta bunun sebebinin ise, deney sisteminde aktif olarak kullanılan akışkanın çeper sıcaklığı ile ortalama akışkan sıcaklık değerinin arasındaki farkın minimum seviyeye gelmesinden olmaktadır. En-boy oranı arttıkça ısı taşınım katsayısı azalmaktadır sebebi ise çeper sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki farkın açılmasından olduğu görülmektedir. Isı taşınım katsayısındaki en yüksek artış %5'lik artış ile Re 2000 değerinde hesaplanmıştır ve Reynolds sayısı arttıkça ısı taşınım katsayısı artmaktadır sebebi ise, hızın artmasının akabinde akış sıcaklığının azalması ve çeper sıcaklığı ile aradaki dengenin minimum seviyeye gelmesiyle ısı taşınım katsayısı h artmaktadır.
- Saf suya nanoakışkan ilavesi Nu değerini, Re değerinin artmasıyla arttırdığı sebebinin ise hızın ve bununla doğru orantılı olarak ısı taşınım katsayısının artması ile artmıştır. En boy oranının artmasıyla ise kanaldaki çap oranının artması ve doğru orantılı olarak Nusselt değeri artmaktadır. Nusselt değeri en fazla %4,71'lik artış ile Re 2000 değerinde artış göstermiş ve Re sayısındaki artışın Nusselt değerini artırması teoremini doğrulamıştır.

- Saf su içerisine nanoakışkan ilavesi yapmak basınç değerini hızla doğru orantılı olarak arttırdığı ve saf suya nanoakışkan ilavesinin basınç düşümünü artırmasındaki sebebin nanoakışkanın viskozitesinin ve yoğunluğunun saf suya oranla daha fazla olmasından kaynaklandığı görülmektedir. Basınç düşümü değeri maksimum 162 Pa olarak Re 2000 değerinde görülmüştür. Nedeni ise Re sayısının artışı ile doğrusal olarak artan hızdan kaynaklanmaktadır.
- Darcy sürtünme faktörü maksimum 0,193 olarak hesaplanmıştır. Nanoakışkanın Darcysürtünme faktörünün saf sudan daha fazla çıkmasının sebebinin nanoakışkanın yoğunluk ve viskozite değerlerinin saf suya göre yüksek olmasından kaynaklandığı ve Re değerinin artması ile azaldığı gözlemlenmiştir.
- Saf su yerine %0,2 SiO_2 nanoakışkanı tercih edildiğinde dörtgen kesitli kanalların duvar sıcaklığında gözle görülür bir düşme ve daha dar bir aralıkta seyretmeye başlamıştır. Bu sonuçla gelecek çalışmalarda konsantrasyon miktarı artırılarak çeşitli çalışmalar yapılabilir.
- Termodinamik ve kimyasal özellikler düşünüldüğünde ısı transferinin gelişimine önemli işlevler yapabilecek nanoakışkanlar hazırlanabilir ve deneysel ve sayısal çalışmalar yapılabilir.
- Literatürde bulunan sayısız çalışmalar detaylı inceleme sonucunda sentezlenerek farklı çözümlenme yöntemleri ile performans geliştirme çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Şahin, F., “Farklı nanoakışkanların ısı değıştircilerindeki ısıl performanslarının deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Samsun, (2016).
2. Tekir, M., “Farklı dalga tiplerinde alternatif manyetik alan etkisi altında dairesel kesitli kanal içerisindeki hibritnanoakışkanın akış ve ısı transferi karakteristiklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Karabük, (2020).
3. İnternet: BP, Statistical Review of World Energy June 2013. **www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statisticalreview_ofworldenergy_2013.pdf**, (2021).
4. İnternet: International Energy Agency, “IEA World Energy Outlook 2012”, **www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2012**, (2021).
5. İnternet: Tamzok, D.N., “Enerjide yerli kaynak sorunu 1”. **www.enerjigunlugu.net/enerjide-yerli-kaynak-sorunu1_11123**, (2021).
6. Goodarzi, M. and Mazharmanesh, S., “Heat transfer enhancement in parallel-plate double-pass heat exchanger using sinusoidal separating plate”, **International Journal of Thermal Sciences**, 72: 115–124 (2013).
7. Kurşun, B. and Sivrioğlu, M., “Heat transfer enhancement using U-shaped flow routing plates in cooling printed circuit boards”, **Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 40 (1): 13 (2018).
8. Uysal, C., “Dörtgen kesitli mikrokanallarda ZnO-etilen glikol nanoakışkanının akış ve ısı transferi karakteristiklerinin sayısal olarak modellenmesi”, Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2016).
9. Katı, E., Selver, R., “Farklı soğuk duvar sıcaklıklarının osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyona geçişe etkileri”, **DEU Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 13 (1): 24-38 (2011).
10. Babita, S.K.S., Gupta, S.M., "Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review". **Experimental Thermal and Fluid Science**, Cilt 79, 202-212, 2016.

11. Şahin, F., Namlı, L., “Nanoakışkanlarda kararlılığın ısı transferini iyileştirme açısından önemi”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7, (2): 880-898 (2018).
12. Incropera, F., P. DeWitt, D., L. Bergman, T., and S. Lavine, A., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, *John Wiley & Sons* (2007).
13. Abu-Nada, E., Ziyad, K., Saleh, M. and Ali, Y., “Heat Transfer Enhancement in Combined Convection Around a Horizontal Cylinder Using Nanofluids”, *Journal of Heat Transfer*, 130(8) 084505 (4 pages), (2008).
14. Albadr, J., Tayal, S. and Alasadi, M., “Heat transfer through heat exchanger using Al₂O₃ nanofluid at different concentrations”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 1(1): 38-44 (2013).
15. Chang, M.H., Liuc, H.S., Tai, Y., “Preparation of copper oxide nanoparticles and its application in nanofluid”, *Powder Technology*, 207(1-3): 378-386 (2011).
16. Choi, C., Yooj, H.S. and Oh, M., “Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants”, *Current Applied Physics*, 8(6), 710-712 (2008).
17. Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, F.E. and Grulke, E.A., “Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions”, *Applied physics letters*, 79(14), 2252-2254 (2001).
18. Chopkar, M., Sudarshan, S., Das, P. K. and Manna, I., “Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(7): 1535-1542(2008).
19. Chung, S.J., Leonard, J.P., Nettleship, I., Lee, J.K., Soong, Y., Martello, D.V. and Chyu, M.K., “Characterization of ZnO nanoparticle suspension in water: Effectiveness of ultrasonic dispersion”, *Powder Technology*, 194(1-2) 75-80 (2009).
20. Özerinç, S., Kakaç, S., and Yazıcıoğlu, A. G., “Enhanced thermal conductivity of nanofluids: A state-of-the-art review”, *Microfluidics and Nanofluidics*, 8(2): 145–170 (2010).
21. Nassan, T., Zeinali Heris, S. and Noie, S.H., “A comparison of experimental heat transfer characteristics for Al₂O₃/water and CuO/water nanofluid in square cross-section duct”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: 924–928 (2010).

22. Ogut, E. B., Akyol, M., and Arici, M., “Natural convection of nanofluids in an inclined square cavity with side wavy walls”, *Journal of Thermal Science and Technology*, 37 (2): 139–150 (2017).
23. Şenay, G., “Turbulent convective heat transfer of nanofluid flow in a square cross-sectioned duct”, Master Thesis, *Karabük University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Karabük, (2017).
24. Yu, W., Xie, H., Chen, L., and Li, “Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles”, *Powder Technology*, 197(3): 218-221 (2010).
25. Esfe, M.H., Karimipour, A., Yan, W. M., Akbari, M., “Experimental study on thermal conductivity of ethylene glycol based nanofluids containing Al₂O₃nanopariciple”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88:728–734 (2015).
26. Patel, H.E., Das, S.K., Sundararajan, T., Nair, A.S., George, B. andPradeep, T., “Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects”, *Applied Physics Letters*, 83(14): 2931-2933, (2003).
27. Shima, P.D., Philip, J. andRaj, B., “Iron Oxide Nanofluids and Study of TemperatureDependence on Thermal Conductivity and Viscosity”, *The Journal of Physical Chemistry C*, 114:18825-18833, (2010).
28. Habibzadeh, S., Beydokhti, A.K., Khodadadi, A.A., Mortazavi, Y., Omanovicm, S., Niassar, M.S., “Stability and thermal conductivity of nanofluids of tin dioxide synthesized via microwave-induced combustion route”, *Chemical Engineering Journal*, 156(2), 471-478 (2010).
29. Li, X., Zhu, D. and Wang, X., “Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 310(2): 456-463 (2007).
30. Manjula, S., Mahesh, S. K., Raichur, A. M., Madhu, G. M., Suresh, R. andRaj, M.A.L., “A sedimentation study to optimize the dispersion of alumina nanoparticles in water”, *Ceramica*, 51:121-127 (2005).
31. Sato, T., Ruch, R., “Stabilization of colloidal dispersion by polymer adsorption”, *Marcel Dekker Inc.*, New York (1980).

32. Zhu, D., Li, X., Wang N., Wang X., Gao, J. and Li H., “Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃–H₂O nanofluids”, *Current Applied Physics*, 9: 131-139 (2008).
33. Çengel, Y.A. and Ghajar, A.J., “Isı ve Kütle Transferi: Esaslar ve Uygulamalar”, *Palme Yayınevi*, (2015).
34. Bergles, A., E., “The Imperative to Enhance Heat Transfer”, Proceeding of the NATO Advanced Study on Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers, *Kluwer Academic Publishers*, 13-29 (1999).
35. Khrgian, A. K., “Meteorology: A Historical Survey”, *Israel Program for Scientific Translations*, (1970).
36. Cheng, K. C. and Fujii, T., “Heat in history Isaac Newton and heat transfer”, *Heat Transfer Engineering*, 19 (4): 9–21 (1998).
37. Kakaç, S., Pramuanjaroenkij, A., “Review of Convective Heat Transfer Enhancement with Nanofluids”, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 52: 3187-3196 (2009).
38. Manay E., “Mikrokanallarda nano akışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum (2014).
39. Lee, P.S., Garimella, S.V. and Liu D., Investigation of heat transfer in rectangular microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48: 1688–1704 (2005).
40. Owhaib, W. and Palm, B., “Experimental investigation of single phase convective heat transfer in circular microchannels”, *Experimental thermal and fluid science*, 28: 105-110 (2004).
41. Gunnasegaran, P., Mohammed, H.A., Shuaib, N.H. and Saidur, R., “The effect of geometrical parameters on heat transfer characteristics of microchannels heat sink with different shapes” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: 1078–1086 (2010).
42. Lee, J. and Mudawar, I., “Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50: 452–463 (2007).

43. Şahin, F., “Farklı nanoakışkanların ısı değiştiricilerindeki ısı performanslarının deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun (2016).
44. Choi, S.U.S., “Nanofluid Technology: Current Status and Future Research, in Korea- U.S”. *Technical Conference on Strategic Technologies Conference*, (1998).
45. Özerinç, S., Kakaç, S. and Yazıcıoğlu, A.G., “Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review”, *Microfluidics and Nanofluidics*, 8(2):145-170 (2009).
46. Xuan, Y. and Li, Q., “Heat Transfer Enhancement of Nanofluids”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21 (1): 58-64 (2000).
47. Choi S. U. S. and Eastman J. A., “Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles in Proceedings”, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition San Francisco*, USA (1995).
48. Jang, S.P. and Choi S.U.S., “Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Nanofluids”, *Applied Thermal Engineering*, 26:2457–2463 (2006).
49. Khaleduzzaman, S.S., Sohel, M.R., Saidur, R., Mahbubul, I.M., Akash, B.A., Selvaraj, J., “Energy and Exergy Analysis of Alumina-water Nanofluid for an Electronic Liquid Cooling System”, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 57, 118-127 (2014).
50. Shang, F.M., Liu, D.Y., Xian, H.Z., Yang, Y.P. and Du, X.Z., “Flow and Heat Transfer Characteristics of Different Forms of Nanometer Particles in Oscillating Heat Pipe”, *Journal of Chemical Industry*, 58, 2200-2204 (2007).
51. Sun, B., Qu, Y. ve Yang, D., “Heat transfer of single impinging jet with Cu nanofluids”, *Applied Thermal Engineering*, 102, 701-707 (2016).
52. Umer, A., Naveed, S. ve Ramzan, N., “Experimental study of laminar forced convection heat transfer of deionized water based copper (I) oxide nanofluids in tube with constant wall heat flux”, *Heat Mass Transfer*, 52, 2015-2025 (2015).
53. Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., Eastman, J. A., “Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles” *Journal of Heat Transfer*, 121(2): p. 280 (1999).

54. Chopkar, M., Sudarshan, S., Das, P. K. and Manna, I., “Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(7): 1535-1542 (2008).
55. Turgut, A., Sağlanmak, Ş. Ve Doğanay, S., “Nanoakışkanların ısı iletkenlik ve viskozitesinin deneysel incelenmesi: Tanecik boyutu etkisi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 1:95-103 (2016).
56. Lee, J.H., Hwang, K.S, Seok, P.J., Lee, B.H., Kim, J.H., Choi, S.U.S. and Choi, C.J., “Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51:11-12 (2008).
57. Pak, B.C. and Cho, Y.I., “Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles”, *Experiment Heat Transfer*, 11(2): 151–170 (1998).
58. Sekhar, Y.R., Sharma, K.V. (2015). Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids at low particle concentrations, *Journal of Experimental Nanoscience* 10:86-102.
59. Suresh, S., Chandrasekar, M. and Sekhar, S.C., “Experimental Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of CuO/Water Nanofluid under Turbulent Flow in a Helically Dimpled Tube”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35: 542-549, (2011).
60. Xuan, Y., and Roetzel, W., Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids, *Int. J. Heat Mass Trans.*, Cilt No: 43(19), Sayfa No: 3701-3707, (2000).
61. Goharshadi E.K., Ahmadzadeh H., Samiee S., and Hadadian M., “Nanofluids for Heat Transfer Enhancement-A Review”, *Phys. Chem. Res.*, 1(1): 1-33 (2013).
62. Kumar, V., Tiwari, A. K., and Ghosh, S. K., “Application of nanofluids in plate heat exchanger: a review”, *Energy conversion and management*, 105, 1017-1036 (2015).
63. Kakaç, S. and Pramuanjaroenkij, A., “Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52, 3187–3196 (2009).

64. Şahin, B., Çomaklı, K., Çomaklı, Ö., Yılmaz, M., Karlı, S., Özyurt, Ö., Karagöz, Ş.ve Kaya, M., “Nanoakışkanların Isı Transferi ve Akış Karakteristiklerinin İncelenmesi”, *Tübitak, Proje No: 105M292*, Erzurum (2010).
65. Goharshadi, E.K., Ahmadzadeh, H., Samiee S. and Hadadian M., “Nanofluids for heat transfer enhancement-a review”, *Phys. Chem. Res*, 1(1): 1–33 (2013).
66. Peter, H., Bruske-Hohlfeld, I. and Salata, O., “Nanoparticles – Known and Unknown Health Risks”, *Journal of Nanobiotechnology*, 2 (1):12 (2004).
67. Yu, W., France, D.M., Choi, S.U.S. and Routbort, J.L., “Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications, *Energy Systems Division, Argonne National Laboratory*, ANL/ESD/07-9 (2007).
68. Choi, S.U.S., Zhang, Z. G, Yu, W., Lockwood, F. E., Grulke, E.A., “Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions”, *Applied Physics Letters*, 79(14), 2252- 2254 (2001).
69. Albay, N. Z., “Polietilenglikol-tuz-susistemlerinde viskoziteyi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2005).
70. Nagarajan, P. K., Subramani, J., Suyambazhahan, S. and Sathyamurthy, R., “Nanofluids for solar collector applications: A Review”, *Energy Procedia*, 61, 2416–2434 (2014).
71. Sundar, S. L., Singh, M. K. and Sousa, A. C. M., “Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe₃O₄ nanofluid for heat transfer applications”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44:7-14 (2013).
72. Mishra, P. C., Mukherjee, S., Nayak, S. K. and Panda, A., “A brief review on viscosity of nanofluids”, *International Nano Letters*, 4(4), 109–120 (2014).
73. Altun, A., “Yüzey Aktif Maddelerin Nanoakışkanların Termal Özellikleri ve Isı Transferi Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa (2020).
74. Babar, H. and Ali, H. M., “Towards hybrid nanofluids: Preparation, thermophysical properties, applications, and challenges”, *Journal of Molecular Liquids*, 281, 598–633 (2019).
75. Khanlar, A., “Plakalı Isı Değiştiricilerin Deneysel ve Sayısal Analizi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-12 (2018).

76. Vajjha, R. S., Das, D. K. and Mahagaonkar, B. M., “Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory”, *Petroleum Science and Technology*, 27(6), 612–624 (2009).
77. Said, Z. and Saidur, R., “Nanofluid Heat and Mass Transfer in Engineering Problems: Thermophysical Properties of Metal Oxides Nanofluids”, *Rijeka: Intech*, 39-63 (2017).
78. Pak, B. C. and Cho, Y. I., “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles” *Experimenta l- Heat Transfer*, 11:151–170 (1998).
79. Sheikholeslami, M. and Ganji, D.D., “Applications of Nanofluid for Heat Transfer Enhancement: Nanofluid: Definition and applications” *New York: William Andrew*, 1–52 (2016).
80. Wang, X. Q. and Mujumdar, A. S., “A Review on Nanofluids-Part II: Experiments and Applications”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(4), 631-648(2008).
81. Ho, C. J., Liao, J. C., Li, C. H., Yan, W. M. and Amani, M., “Experimental study of cooling characteristics of water-based alumina nanofluid in a minichannel heat sink”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 14: 1–9 (2019).
82. Yılmaz Aydın, D., “Dolomit ve Boksit Esaslı Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi ve Isıl Sistemlerdeki Performansa Etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2019).
83. Öcal, S., “Isı Transferi Uygulamaları İçin Çeşitli Hibrit Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde (2019).
84. Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E. and Xi, S., “A review on development of nanofluid preparation and characterization”, *Powder Technology*, 196(2), 89-101 (2009).
85. Mohammed, H. A., Al-aswadi, A. A., Shuaib, N. H. and Saidur, R., “Convective heat transfer and fluid flow study over a step using nanofluids: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2921–2939 (2011).
86. Nagar, H., “A review on nanofluids: Properties and applications”, *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 3(3), 3185-3209 (2017).

87. Bigdeli, M. B., Fasano, M., Cardellini, A., Chiavazzo, E. and Asinari, P., “A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1615–1633 (2016).
88. Ali, N., Teixeira, J. A. and Addali, A., “A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties”, *Journal of Nanomaterials*, 6978130, 33 (2018).
89. Hassan, A.U., “Nanosıvılar Dolu Dikdörtgensel KapalıKutularda Doğal Konveksiyon”, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen BilimleriEnstitüsü*, Eskişehir, (2014)
90. Wang, X.Q., and Mujumdar, A. S., “A review on nanofluids- Part II: Experiments and applications”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(4), 631–648 (2008).
91. Ganvir, R. B., Walke, P. V. and Kriplani, V. M., “Heat transfer characteristics in nanofluid-A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75:451–460 (2017)
92. Devendiran, D. K., andAmirtham, V. A., “A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 21–40 (2016).
93. Yu, W., France, D., Choi, S. and Routbort, J., “Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications”, *Renewable Energy*, Medium: ED, (2007).
94. Ceylan, İ. and Ergun, A., "Thermodynamic analysis of a new design of temperature controlled parabolic trough collector", *Energy Conversion And Management*, 74: 505–510 (2013).
- 95.Kline, S. J., "Describing uncertainty in single sample experiments", *Mech. Engineering*, 75: 3–8 (1953).
96. Taylor, J., “Introduction to Error Analysis, the Study of Uncertainties in Physical Measurements”, (1997).
97. Suresh, S., Venkataraj, K. P., Selvakumar, P., and Chandrasekar, M., "Effect of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38: 54–60 (2012).
- 98.Pazarlıoğlu, H.K., Ekiciler, R. and Arslan, K., Boyuna Kanatlı Güneş Hava

Isıtıcılarının Soğutulması Üzerine Vuruşlanan Jetin Sayısal Analiz, *Heat Transfer Research*, 52(11),47,61 (2021).

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan ASLAN ilk ve ortaöğrenimini Osman Zeki Üngör İ.Ö.O. bitirdikten sonra Atatürk Anadolu Lisesi sayısal bölümünden mezun olmuştur. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümüne başlayıp 2018 yılında mezun olmuştur. Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği anabilim dalında 2018 yılında yüksek lisans eğitimine başlamış ve halen devam etmektedir.