

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANOAKIŞKANLI LEVHALI ISI DEĞİŞTİRİCİ  
KANALLARINDA ISI GEÇİŞİNİN DENEYSEL VE  
SAYISAL İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**  
**Murat ÜNVERDİ**

**Enstitü Anabilim Dalı** : **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı** : **ENERJİ**  
**Tez Danışmanı** : **Prof. Dr. Yaşar İSLAMOĞLU**

**Ekim 2016**

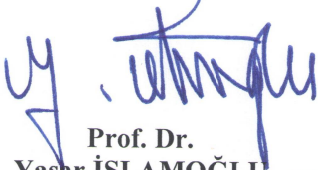
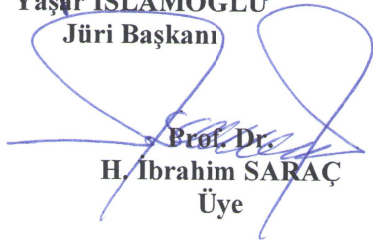
T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

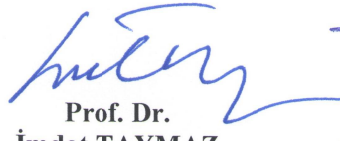
NANOAKIŞKANLI LEVHALI ISI DEĞİŞTİRİCİ  
KANALLARINDA ISI GEÇİŞİNİN DENEYSEL VE  
SAYISAL İNCELENMESİ

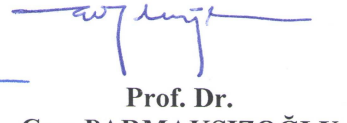
DOKTORA TEZİ  
Murat ÜNVERDİ

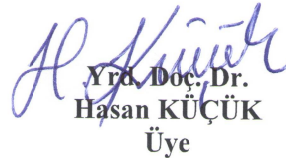
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 28 / 10 /2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr.  
Yaşar İSLAMOĞLU  
Jüri Başkanı  
  
Prof. Dr.  
H. İbrahim SARAC  
Üye

  
Prof. Dr.  
İmdat TAYMAZ  
Üye

  
Prof. Dr.  
Cem PARMAKSIZOĞLU  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr.  
Hasan KÜÇÜK  
Üye

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Murat ÜNVERDİ

28.10.2016

## TEŞEKKÜR

Doktor eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tım aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden ve aynı titizlikte beni yölendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Yaşar İSLAMOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde pay sahibi olan, her zaman manevi desteklerini esirgemeyen annem Mebrure YÖRÜK'e, anneannem Safiye YÖRÜK'e ve ailemin diğer fertlerine teşekkürlerimi sunarım.

Sayısal çözümlerler aşamasında iç istasyonu bilgisayarımı benimle paylaşan ve tez yazımında desteğini esirgemeyen değerli meslektaşlarım Arş. Gör. Dr. Gökhan COŐKUN, Arş. Gör. Dr. N. Gökhan ADAR ve Arş. Gör. Usame DEMİR'e teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi ačıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2013-01-06-033) teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY .....	xiv

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Levhalı Isı Değiştiricilerinde Kullanılan Levha Geometrileri ve Isı Geçişinde Önemi .....	4
1.2. Isı Geçişinde Nanoakışkanlar .....	5
1.3. Önceki Çalışmalar .....	7
1.3.1. Deneysel çalışmalar.....	8
1.3.2. Sayısal çalışmalar .....	11
1.3.3. Çalışmanın amacı .....	16
1.4. Tanımlar ve Teorik Esaslar .....	17
1.4.1. Levhalı ısı değiştiricide geometrinin ısı geçişine etkisi .....	17
1.4.2. Nanoakışkanlarda ısı geçişinde etkili mekanizmalar ve termofiziksel özelliklerin hesaplanması .....	19
1.4.3. Brownian hareketi .....	19
1.4.4. Ara yüzey sıvı tabaka teorisi (Interfacial Liquid Layering).....	20
1.4.5. Partiküllerin kümelenmesi (Particle Aggregation).....	21
1.4.6. Fonon (Kafes titreşimi) hareketi .....	22
1.4.7. Termoforez kuvvetler (Thermophoretic Forces).....	23

1.4.8. Yüzeğe yakın ısı ışınım etkisi (Near Field Radiation) .....	23
1.4.9. Newton olmayan (Non-Newtonian) akış biçimi .....	24
1.5. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerin Hesaplanması .....	24
1.5.1. Yoğunluk .....	24
1.5.2. Özgül ısı .....	26
1.5.3. Dinamik viskozite .....	28
1.5.4. Isı iletim katsayısı.....	32
1.5.5. Nanoakışkanın hazırlanması .....	38
1.5.6. Suyun sıcaklığa bağlı özellikleri .....	40
1.6. Isı Taşınım Katsayısı ve Sürtünme Faktörünün Hesaplanması .....	44
1.6.1. Isı geçişi yüzey alanı .....	45
1.6.2. Ortalama kanal yüksekliği.....	46
1.6.3. Hidrolik çap .....	46
1.6.4. Kütle akısı .....	47
1.6.5. Basınç düşümü .....	47
1.6.6. Isı taşınım katsayısının hesaplanması .....	48
1.6.7. Isı geçişi iyileştirilmiş yüzeylerde etkenlik ölçütünün belirlenmesi .....	50

## BÖLÜM 2.

DENEY TESİSATI.....	52
2.1. Tesisatının Çalışması.....	52
2.1.1. Test bölgesi .....	55
2.1.2. Tesisat ekipmanları .....	56
2.1.2.1. Isıtıcı direnç ve sıcaklık kontrol cihazı .....	56
2.1.2.2. Santrifüj pompalar .....	57
2.1.2.3. Rotametre.....	57
2.1.2.4. Türbin tipi debimetre ve göstergesi .....	58
2.1.2.5. Fark basınç ölçer .....	58
2.1.2.6. PT-100 (Platinum Resistance Thermometers) sıcaklık ölçer .....	59
2.1.2.7. Soğutucu tank.....	60

2.1.2.8. Sıcak akışkan tankı .....	60
2.1.2.9. Nanoakışkanın hazırlanması .....	60
2.2. Deneysel Sonuçlar .....	63
BÖLÜM 3.	
MODELLEME VE SAYISAL ÇÖZÜM .....	76
3.1. Nanoakışkanlarda Taşınımın Isı Geçişi İçin Sayısal Yaklaşımlar .....	78
3.1.1. Sayısal çözüm denklemleri .....	80
3.1.1.1. Tek fazlı (Single phase) Model .....	80
3.1.1.2. Türbülans modeli .....	82
3.1.1.3. Karışım (Mixture) modeli .....	84
3.1.1.4. Euler (Eulerian) modeli .....	85
3.1.2. Partiküllü akışların sınıflandırılması .....	87
3.1.3. Sayısal çözüm alanının belirlenmesi .....	88
3.1.3.1. Ağ yapısı ve sınır şartları .....	90
3.1.3.2. Sayısal çözüm sonuçları .....	93
3.1.3.3. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması .....	107
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	114
KAYNAKLAR .....	119
EKLER .....	138
ÖZGEÇMİŞ .....	156

## SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Alan	[m <sup>2</sup> ]
B	: Boyut	
b	: Ortalama kanal boşluğu	[m]
c	: Özgül ısı	[J/kgK]
CFD	: Computational Fluid Dynamics	
D	: Çap	[m]
ε	: Epsilon	
f	: Sürtünme faktörü	
G	: Kütle akısı	[kg/sm <sup>2</sup> ]
HAD	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği	
k	: Isı iletim katsayısı	[W/mK]
L	: Levha uzunlukları	[m]
m	: Kütle	[kg]
ṁ	: Kütle debi	[kg/s]
n	: nano	
Nu	: Nusselt sayısı	
p	: Dış taraf derinliği	[m]
P	: Basınç	[Pa]
Pr	: Prandtl sayısı	
Q	: Isı geçişi	[W]
q	: Isı akısı	[W/m <sup>2</sup> ]
Re	: Reynolds sayısı	
T	: Sıcaklık	[°C]
t	: Levha kalınlığı	[m]
U	: Toplam ısı geçiş katsayısı	[W/m <sup>2</sup> K]
V	: Hacim	[m <sup>3</sup> ]



$\beta$	: Balıksırtı şeklinde aç	[°]
$\Delta T$	: Sıcaklık farkı	[°C]
$\mu$	: Dinamik viskozite, mikro	[N s/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	: Yoğunluk	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi_p$	: Yüzey iyileşme oranı	
$\emptyset$	: Hacimsel oran	[%]
$\Omega, \omega$	: Omega	

## ALT İNDİSLER

b	: Serbest ortam
c	: Soğuk akışkan
hd	: Hidrolik çap
h	: Sıcak akışkan
i	: Giriş
l	: Katman
lm	: Logaritmik ortalama
nf	: Nanoakışkan
ort	: Ortalama
o	: Çıkış
p	: Partikül
pt	: Port
s	: Akışkan
y	: Yüzey

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Isı geçişi iyileştirme yöntemleri.....	2
Şekil 1.2. Levhalı ısı değiştiricilerinde en çok kullanılan levha geometrileri .....	5
Şekil 1.3. Yaygın olarak kullanılan bazı katıların, polimerlerin ve sıvıların ısı iletim katsayına göre karşılaştırılması.....	6
Şekil 1.4. Levhalı ısı değiştiricide ısı geçişindeki iyileşmenin şematik gösterimi.....	18
Şekil 1.5. Brownian hareketiyle parçacığın taşınması .....	20
Şekil 1.6. Ara yüzey sıvı tabaka teorisi şematik gösterimi .....	21
Şekil 1.7. Nanopartiküllerin kümelenmesi ve ısı iletimde izlediği yol .....	21
Şekil 1.8. Kristal kafeste titreşimle dalga oluşumunun şematik gösterimi .....	22
Şekil 1.9. Küresel partiküllerin termoforez hareketleri.....	23
Şekil 1.10. Nanoakışkan bileşimi.....	25
Şekil 1.11. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su nanoakışkanın hacimsel oranına bağlı olarak oda sıcaklığındaki yoğunluğun değişiminin deneysel ve teorik karşılaştırılması .....	26
Şekil 1.12. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su nanoakışkanın hacimsel oranına bağlı olarak teorik ve deneysel özgül ısı değerlerinin oda sıcaklığında değişimi.....	28
Şekil 1.13. Nanoakışkanın yapısal olarak kesit alanının şematik gösterimi .....	37
Şekil 1.14. Suyun sıcaklığa bağlı yoğunluğu .....	42
Şekil 1.15. Suyun sıcaklığa bağlı özgül ısı.....	42
Şekil 1.16. Suyun sıcaklığa bağlı dinamik viskozitesi .....	43
Şekil 1.17. Suyun sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı .....	44
Şekil 1.18. Levhalı ısı değiştiricinin başlıca boyutları [178] .....	45
Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi .....	53
Şekil 2.2. Deney düzeneğinin fotoğrafı.....	54
Şekil 2.3. Isıtıcı direnç (a) sıcaklık kontrol cihazı (b).....	56
Şekil 2.4. Santrifüj pompa (a) pompa çalışma eğrisi (b).....	57

Şekil 2.5. Rotametre (a) iğne uçlu vana (b) .....	57
Şekil 2.6. Türbin debimetre (a) gösterge (b) .....	58
Şekil 2.7. Fark basınç ölçer .....	59
Şekil 2.8. Sıcaklık ölçer .....	59
Şekil 2.9. Hazırlanan nanoakışkanlar .....	62
Şekil 2.10. Ultrasonik banyo .....	62
Şekil 2.11. Zaman rölesi.....	63
Şekil 2.12. Literatürdeki Nusselt sayısı korelasyonları.....	63
Şekil 2.13. Hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	64
Şekil 2.14. Deneysel ve teorik toplam ısı geçiş katsayısının kütleli debiye bağlı olarak değişimi .....	65
Şekil 2.15. Hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	65
Şekil 2.16. Hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	66
Şekil 2.17. Hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	66
Şekil 2.18. Hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	67
Şekil 2.19. Nanoakışkanlı kanallarda hacimsel oranlara bağlı olarak Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	67
Şekil 2.20. Suyu göre Nusselt sayısındaki iyileşme oranları .....	68
Şekil 2.21. Hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi .....	69
Şekil 2.22. Hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi .....	69
Şekil 2.23. Hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi .....	70
Şekil 2.24. Hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi .....	70

Şekil 2.25. Hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi .....	71
Şekil 2.26. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ve hacimsel orana göre değişimi .....	72
Şekil 2.27. Nanoakışkanlı kanallarda hacimsel oranlara bağlı olarak Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre elde edilen bağıntılar .....	73
Şekil 2.28. Nanoakışkanlı kanallarda hacimsel oranlara bağlı olarak sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre elde edilen bağıntılar.....	74
Şekil 2.29. Nanoakışkanlı kanallarda hacimsel oranlara bağlı olarak etkenlik katsayılarının Reynolds sayısına göre değişimi.....	75
Şekil 3.1. Sonlu hacimler yöntemiyle yapılan çözümün eleman sayısına bağımlılığı.....	77
Şekil 3.2. 2B çözüm alanı ve tek bir hatve için ağ yapısı .....	89
Şekil 3.3. 3B çözüm alanı ve tek bir hatve için ağ yapısı .....	90
Şekil 3.4. ANSYS-Fluent işlem akış şeması.....	92
Şekil 3.5. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi.....	94
Şekil 3.6. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	94
Şekil 3.7. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	95
Şekil 3.8. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	95
Şekil 3.9. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi.....	96
Şekil 3.10. 2B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	96
Şekil 3.11. 2B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	97
Şekil 3.12. 2B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	97

Şekil 3.13. 2B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	98
Şekil 3.14. 2B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	98
Şekil 3.15. 2B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	99
Şekil 3.16. 2B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	99
Şekil 3.17. 2B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi.....	100
Şekil 3.18. 3B “tek fazlı” yaklaşımında hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi.....	100
Şekil 3.19. 3B “tek fazlı” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	101
Şekil 3.20. 3B “tek fazlı” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	101
Şekil 3.21. 3B “tek fazlı” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	102
Şekil 3.22. 3B “tek fazlı” yaklaşımında hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi.....	102
Şekil 3.23. 3B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi.....	103
Şekil 3.24. 3B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	103
Şekil 3.25. 3B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	104
Şekil 3.26. 3B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	104
Şekil 3.27. 3B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	105

Şekil 3.28. 3B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	105
Şekil 3.29. 3B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	106
Şekil 3.30. 3B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	106
Şekil 3.31. 2B “tek fazlı” yaklaşımda sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması .....	108
Şekil 3.32. 3B “tek fazlı” yaklaşımda sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması .....	108
Şekil 3.33. 2B “karışım” yaklaşımında sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması .....	109
Şekil 3.34. 3B “karışım” yaklaşımında sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması .....	109
Şekil 3.35. 2B “Euler” yaklaşımında sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması .....	110
Şekil 3.36. 3B “Euler” yaklaşımında sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması .....	110

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Levhalı ısı değiştirici ısı geçiş katsayısı ve sürtünme faktörü korelasyonları .....	13
Tablo 1.2. Nanoakışkanlar için viskozite ifadeleri.....	29
Tablo 1.3. Nanoakışkan ısı iletim katsayısı modelleri .....	33
Tablo 1.4. Isı iletim katsayısı model ve deneysel karşılaştırılması.....	36
Tablo 1.5. Hacimsel orana ve sıcaklığa göre deneysel ısı iletim katsayısı değerleri .....	37
Tablo 1.6. Suyun sıcaklığa bağlı termofiziksel zellikleri.....	41
Tablo 2.1. Levhalı ısı değiştiricinin bilinen ve hesaplanan boyutları .....	55
Tablo 2.2. Basınç oler teknik zellikleri .....	59
Tablo 2.3. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanopartikül zellikleri .....	61
Tablo 2.4. Hazırlanan nanoakışkan ve karışıma eklenen miktarlar .....	61
Tablo 2.5. Reynolds sayısına bağlı deneysel basınç düşüşü .....	72
Tablo 3.1. Deneysel ve sayısal sürtünme faktörü karşılaştırılması.....	112

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Nanoakışkan, contalı levhalı ısı değiştirici, nanoakışkanlarda ısı geçişi, sayısal çözüm

Bu çalışma, nanoakışkanlı contalı levhalı ısı değiştirici kanallarında taşınım ile ısı geçişi ve basınç düşüşünü deneysel ve sayısal olarak incelemek amacıyla yapılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalarda, balıksırtı şeklinde geometriye sahip dalgalı yüzeyli ısı değiştirici levhaları ve  $Al_2O_3/su$  (40 nm) nanoakışkanı kullanılmıştır.

Deneysel süresince ısıyı veren sıcak akışkanın kütleli debisi 90 kg/h, ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı 40 °C'de sabit tutulmuştur. Isıyı alan soğuk akışkanın (nanoakışkan) ise kütleli debisi 90, 120, 150, 180, 240 ve 300 kg/h debi aralığında değiştirilmiş ve ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı 17,5 °C'de sabit tutulmuştur.

Levhalı ısı değiştirici kanalları için oluşturulan iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) modellerin, ANSYS-Fluent yazılım (paket) programı ile sayısal çözümlenmeleri de yapılmıştır. Sayısal çözümlenmelerde tek fazlı (single phase) ve çift fazlı (mixture, Euler) yaklaşımları kullanılmıştır. Sayısal çözüm ile elde edilen ısı taşınım katsayısı ve sürtünme faktörü değerleri, deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak sayısal sonuçlar doğrulanmıştır.

Deneysel ve sayısal çözümlenmeler, hacimsel oranları % 0,25, % 0,5, % 0,75 ve % 1 olan nanoakışkanları için yapılmış ve Reynolds sayısı 500-2000 aralığında seçilmiştir. Nanoakışkanın hacimsel oranı ve kütleli debisiyle ısı taşınım katsayısının arttığı ancak sürtünme faktörünün azaldığı deneysel olarak belirlenmiştir. Isı geçişinde suya göre iyileşme en küçük hacimsel oran için ortalama % 7,72 en yüksek hacimsel oran için ise ortalama % 42,4 belirlenmiştir.

Nanoakışkanlı ısı geçişi için literatürdeki sonuçlar dikkate alındığında, çalışmalarımız sırasında elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların uygun olduğu görülmektedir.



# EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN THE PLATE HEAT EXCHANGER CHANNELS USING NANOFLUIDS

## SUMMARY

Keywords: Nanofluids, gasket plate heat exchanger, nanofluids heat transfer, numerical analysis

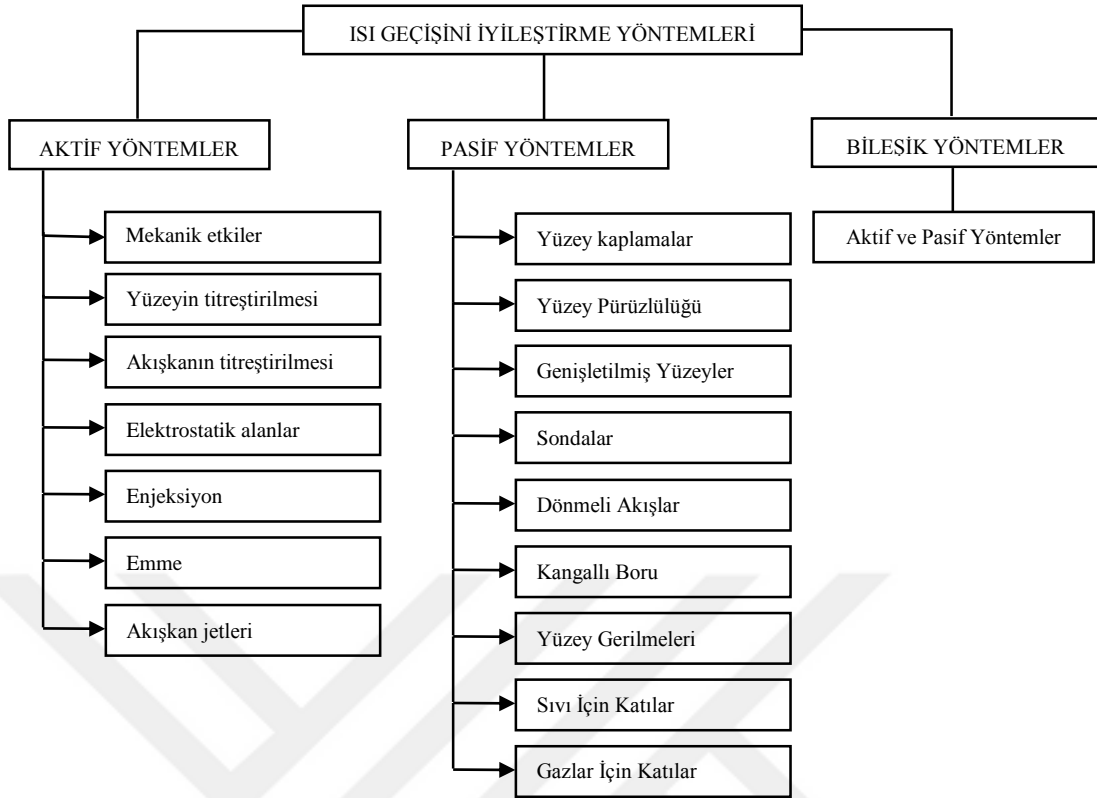
The aim of this study is to investigate convection heat transfer and pressure drop experimentally and numerically by using nanofluids in the gasket plate heat exchanger channels. In the experimental and numerical studies, chevron type corrugated plates in the plate heat exchanger and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$  (40 nm) as nanofluids have been used. During the experiments, the mass flow rate of the hot fluid which loss heat was kept constant at 90 kg/h while the heat exchanger inlet temperature was kept constant at 40 °C. In addition to the mass flow rate of the cooling fluid (nanofluids) that the inlet temperature was kept constant at 17.5 °C has been changed as 90, 120, 150, 180, 240 and 300 kg/h.

Numerical analysis of the two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) models set up for plate heat exchanger channels has also been carried out using ANSYS-Fluent software (package) programme. Single phase and two phase (mixture, Eulerian) approaches have been used in the numerical analyzes. In order to verify the numerical result of convection heat transfer coefficient and friction factor values obtained with the numerical analyzes were compared with the results of the experiments. Experiments and numerical analyzes were carried out in the nanofluids volume fraction of 0.25 %, 0.5 %, 0.75 % and 1 % and in the range of 500-2000 Reynolds number. In the experiments, it has been observed that increases with the volume fraction and mass flow rate of the nanofluids the convection heat transfer coefficient increases while the friction factor decreases. The enhancement heat transfer has been determined to be about 7.72 % for the minimum volume fraction while it is about 42.4 % for the maximum volume fraction compared to water.

Upon taking the results of the heat transfer using nanofluids in the literature into consideration, experiments and numerical results obtained have been found out to be coherent.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Isı değiştiricileri, farklı sıcaklıklardaki iki ya da daha fazla akışkan arasında ısı geçişi sağlayan cihazlardır. Isı değiştiricileri enerji üretiminde, kimya ve gıda endüstrisinde, elektronik cihazlarda, atık ısının geri kazanımında ve klimalardaki ısı geçişi uygulamalarında geniş bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Küresel piyasada endüstriyel gelişimle birlikte yüksek verimli ve kompakt ısı geçişi sağlayan sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gerekçeyle, ısı geçişi sağlayan cihazların tasarımı ve aracı akışkanların geliştirilmesine yönelik yoğun çalışmalar yapılmaktadır [2]. Bu çalışmalarda, ısı geçişi sistemlerinin performansının iyileştirilmesi ve enerjinin verimli kullanımını önemli rol oynamaktadır. Böylece malzeme, enerji ve işletme maliyetlerinin azaltılarak istenilen ısı geçişi, fiziksel olarak küçük boyutlardaki ısı değiştiricileri ile daha az miktardaki aracı akışkanlarla sağlanacaktır. Sonuç olarak, ısı geçişi hedeflerine uygun ısı geçişi sağlayacak ısı değiştiricinin boyutları küçültülerek kapasitesi artırılabilecektir, fakat sıcaklık farkı ve pompa gücü azalacaktır. Isı geçişinde iyileşme sağlamak ve verimliliği artırmak 3 farklı şekilde yapılabilmektedir: ısı geçiş katsayısında önemli bir değişim olmaksızın yüzey alanını artırmak, ısı geçiş katsayısını artırmak ve ısı geçiş katsayısı ile yüzey alanının her ikisi de artırarak ısı geçişinde iyileştirmeler yapılabilir. Ayrıca, Şekil 1.1.'de verildiği gibi ısı geçişini iyileştirme yöntemleri aktif, pasif ve bileşik yöntemler olmak üzere 3 grupta incelenir. Aktif yöntemler dış güç gerektirirken, pasif yöntemler dış güç gerektirmemektedir, bileşik yöntemlerde ise her iki yöntem kullanılmaktadır [3,4].



Şekil 1.1. Isı geçişi iyileştirme yöntemleri

#### a. Aktif Yöntemler

Isı geçişinde iyileşme sağlayan aktif yöntemleri şu şekilde özetleyebiliriz.

1. Mekanik etkiler: Akışkanın mekanik yollarla ya da yüzeyinin döndürülerek karıştırılmasını içermektedir. Kimya endüstrisinde viskoz sıvılar için geniş bir şekilde kullanılan mekanik yüzey kazımaları, kanal akışındaki gazlara uygulanabilir.
2. Yüzeyin titreştirilmesi: Tek fazlı akışta ısı geçişini iyileştirmek için düşük ya da yüksek frekanslarda titreşim oluşturularak kullanılmaktadır.
3. Akışkanın titreştirilmesi: Ses dalgaları yardımıyla akışkanın titreştirilmesidir. Tek fazlı akışkanların ısı geçişinin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır.
4. Elektrostatik alanlar: Daha çok dielektrik (uygulanan elektriksel alandan etkilenen) akışkanlara doğru akım ya da alternatif akımla uygulanmaktadır. Elektrostatik alan, akışkanı karıştırarak ısı geçişini iyileştirmektedir.
5. Enjeksiyon (Püskürtme): Gözenekli yüzeyden gazın gönderilmesi ya da ısı geçişi bölgesinde hemen önce bazı sıvıların enjeksiyonuyla ısı geçişi iyileştirilmektedir.

6. Emme: Buharın emilmesi, çekirdekli ya da film kaynamada veya tek fazlı akışlarda gözenekli ısı geçişi yüzeyinden akışkanın çekilmesi yoluyla iyileşme sağlanmaktadır.
7. Akışkan jetleri: Tek fazlı akışlarda, akışkanın yüzeye doğru çarpması sonucunda ısı geçişinde iyileşme sağlanmaktadır.

#### b. Pasif Yöntemler

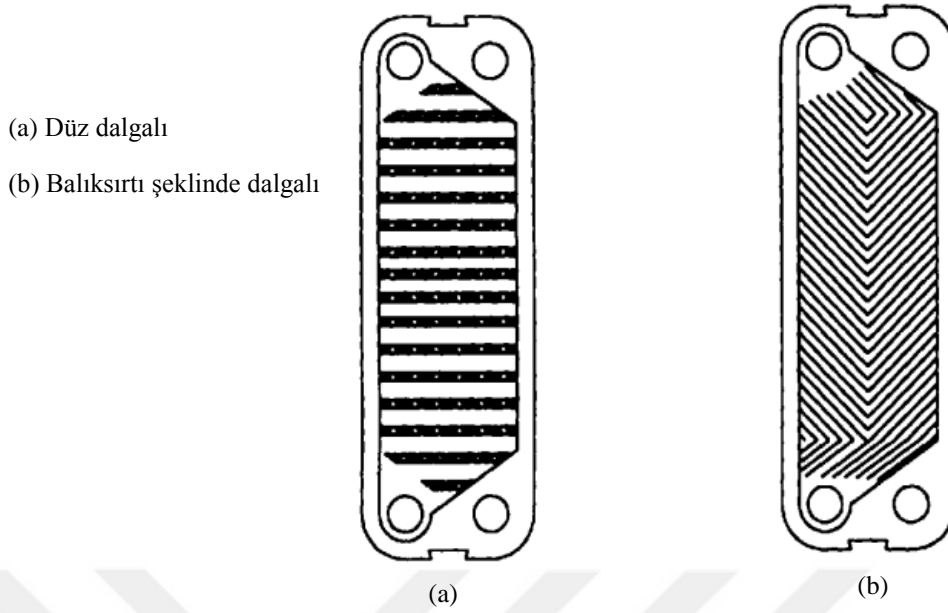
1. Yüzey kaplamaları: Isı geçişi sağlayan yüzeylerin metal ya da metal olmayan malzemelerle kaplanmasıdır. Bu uygulamalar daha çok tek fazlı taşınım ya da yoğunlaşmada iyileşme yapmak için kullanılır.
2. Yüzey pürüzlülüğü: Isı geçişinin olduğu yüzeyin tamamına ya da ısı geçişinin olduğu bitişik yüzeyden hemen önce pürüzlülük verilerek ısı geçişinde iyileştirme yapılmaktadır.
3. Genişletilmiş yüzeyler: Kompakt ve gövde (kovan) borulu ısı değiştiricilerinde yaygın kullanılmaktadır. Bu yüzeyler periyodik olarak daha ince sınır tabakasının gelişmesine neden olmaktadır. Özel kanallar, sınır tabakada ayrılmalara sebep olmakta ve iyi karışım sağlamaktadır.
4. Sondalar: Akış kanalı içerisine yerleştirilen sondalar tek fazlı ve iki fazlı akışlarda kullanılan araçlardır. Zorlanmış taşınımda türbülansı artırarak ve ısı sınır tabakayı parçalayarak ısı geçişinde iyileşme sağlanmaktadır.
5. Dönmeli akışlar: Akış yolu uzatılarak ve türbülans artırılarak ısı geçişinde iyileştirme sağlamak amacıyla kanal içerisine yerleştirilen araçlardır.
6. Kangallı borular: Daha çok kompakt ısı değiştiricilerinde kullanılan bu yöntemde, özellikle tek fazlı akışlarda yüksek ısı geçiş katsayısı elde etmek için kullanılmaktadır.
7. Yüzey gerilmeleri: Kaynama ve yoğunlaşmada ısı geçişinin olduğu sıvı film yüzeylerinde, yüzey gerilme kuvvetlerinden yararlanılarak ısı geçişinde iyileşme sağlanmaktadır. Yüzeyde akışı yönlendiren fitil ve yüzeydeki oluklar örnek verilebilir.
8. Sıvılar için katılar: Tek fazlı akışlarda, gaz kabarcıkları ya da katı partiküller ve kaynama sistemleri için sıvı tanecikleri ilave edilerek ısı geçişinde iyileşme sağlanmaktadır.
9. Gazlar için katılar: Sıvı tanecikleri ve katı partiküller kullanarak ısı geçişinde iyileşme sağlanmaktadır.

### c. Bileşik Yöntemler

Aynı anda birden fazla yöntemin kullanıldığı aktif ve pasif yöntem uygulamalarıdır. İmalattan dolayı yüzeyde oluşan pürüzler, üretim aşamasında kalan veya daha sonra oluşan katı tanecik çökeltileri, dönel makinelerin etkisi veya akış darbeleriyle yüzeylerin titreşmesi, pompalama sırasında oluşan akış titreşimleri ve elektrikli cihazlarda oluşan elektrik alanları örnek verilebilir.

#### **1.1. Levhalı Isı Değiştiricilerinde Kullanılan Levha Geometrileri ve Isı Geçişinde Önemi**

Günümüze kadar levhalar, kabartmalı ya da dalgalı geometride olmak üzere değişik türlerde üretilmiştir. Dalgalı yüzeylerdeki temel amaç, ısı değiştirici içinden geçen akışkana düşük hızlarda yüksek türbülans etkisi kazandırarak ısı sınır tabakada parçalanmalar meydana getirmek ve bunun sonucunda da yüksek ısı geçiş katsayısı elde etmektir. Levha üzerinden bulunan bu kabartmalı geometriler aynı zamanda yüzey alanını artırmaktadır. Levhalar 0,5-1,2 mm kalınlıklara kadar kullanılabilir. Şekil 1.2.'de en çok kullanılan dalga geometrisi düz dalgalı (interminging troughs or washboard) ve balıksırtı şeklinde dalgalı (chevron or herringbone) geometrilerdir.



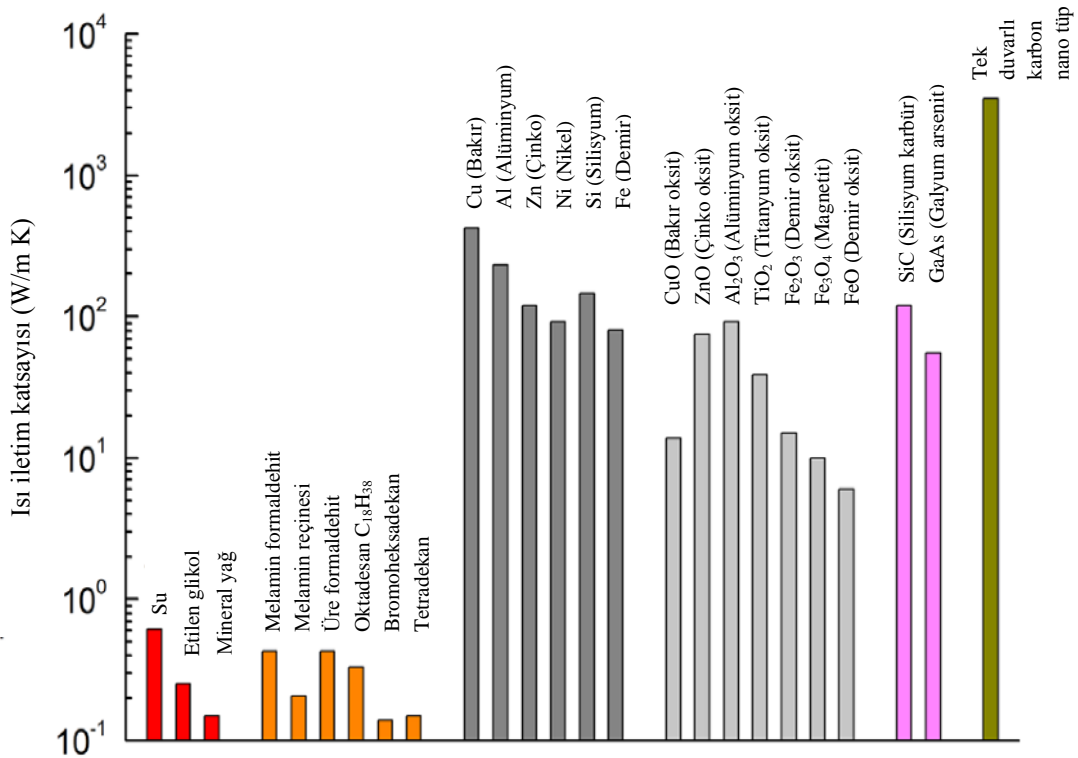
Şekil 1.2. Levhalı ısı değıştiricilerinde en çok kullanılan levha geometrileri [4]

Düz dalgalı geometriye sahip levhalar için maksimum kanal genişliği 3-5 mm iken minimum kanal genişliği 1,5-3 mm arasındadır. Basınç düşümüne ve türbülanslı akış şartlarına bağlı olarak akışkan hızı 0,2-3 m/s aralığındadır. Balıksırtı şeklinde dalgalı geometri için, kanal genişliği 3-5 mm ve türbülanslı akış şartlarına bağlı olarak akışkan hızı 0,1-1 m/s aralığındadır. Düz dalgalı geometriye sahip levhalar, balıksırtı şeklinde dalgalı geometriye sahip olan levhalara göre, levhalar arasında daha az temas noktası bulunduğundan çalışma basıncı daha düşüktür. Endüstride levha boyutları 4,3 m yüksekliğinde ve 1,1 m genişliğe kadar yaygın kullanılmaktadır. Tek bir levha için ısı geçiş alanı 0,01-3,6 m<sup>2</sup> arasındadır. Levhaların genişliği boyunca akışkanın düzgün dağılımını sağlamak için, minimum uzunluk/genişlik oranı 1,8 olmalıdır. Levhaların hidrolik çapları ise 4-10 mm aralığındadır [4-7].

## 1.2. Isı Geçişinde Nanoakışkanlar

Metrenin 10<sup>9</sup> da biri nanometre olarak ifade edilmektedir. Normal atom boyutu metrenin 10<sup>10</sup> da biridir ve Angstrom olarak adlandırılmaktadır. Bu yüzden nano ölçek çok küçüktür ve insan gözüyle görülememektedir. Nanoakışkan, nano seviyedeki partiküllerin bir sıvı içerisinde oluşturduğu kolloid (gerçek çözelti ile heterojen karışımlar arasında yer alan ara karışım) karışımdır. Bir başka değışle, nano

seviyesindeki partiküller sıvı içerisinde belli büyüklüklerde ve hacimsel oranda katılarak oluşturulan süspansiyonlardır (herhangi bir sıvı içerisinde katı maddenin çözünmeden asılı olarak kalması). Nanoakışkanlar, iki maddeden oluşan tek bir kimyasal bileşen değildir. Kolloid karışımda, bu iki madde görülebilir ancak zayıf yüzey moleküler kuvvetlerle birbiriyle etkileşim içindedir. Gelişen teknoloji ile birlikte bilinen ısı geçişi sağlayan akışkanların içerisinde kullanılan partiküller daha küçük boyutlarda ve biçimsel açıdan da daha homojen yapıda akışkan içerisinde dağılması sağlanabilmektedir.



Şekil 1.3. Yaygın olarak kullanılan bazı katıların, polimerlerin ve sıvıların ısı iletim katsayısına göre karşılaştırılması [8]

Şekil 1.3.'de gösterildiği gibi bilinen ısı geçişi sağlayan akışkanlardan olan yağ, su, etilen glikol gibi akışkanlar, düşük ısı geçiş katsayısına sahip akışkanlardır. Bu yüzden çeşitli yöntemlerle bu akışkanlara ilave edilen nano/mikro ya da daha büyük partiküller ile ısı geçişinde iyileşme yapılabilen süspansiyonlar elde edilebilmektedir. Nano partiküller yüksek ısı iletimine sahip olan Cu (Bakır), Au (Altın), Ag (Gümüş) gibi metal ya da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alüminyum oksit), CuO (Bakır oksit), SiO<sub>2</sub> (Silisyum oksit) ve TiO<sub>2</sub> (Titanyum oksit) oksit bileşikleri gibi çeşitli elementlerden oluşmaktadır (Şekil

1.3.). Düşük oranlarda oluşturulan süspansiyonlarda bile ısı geçiş katsayısını önemli derece artırmaktadır [9-11].

Bundan dolayı, nanoakışkanlar ısı geçişi uygulamalarında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Nanokışkanlar, taşıtlarda (motor soğutmada, araçların ısı kontrolünde), elektronik devrelerin soğutulmasında, koruma amaçlı (askeri), uzay teknolojilerinde, nükleer sistemlerin soğutulmasında, ısı değiştiricilerinde, biomedikal (kanseri hücre tedavisinde), ısı boruları, yakıt hücreleri, güneş enerjileri, merkezi sistem ısıtma ve soğutma, buzdolapları, içten yanmalı dizel motorlarda, sondajlar, yağlama, ısı depolama alanlarında geniş kullanım alanına sahiptir [12]. Akışkan içerisine ilave edilen nano partiküller, ısı geçişini iyileştirmektedir. Bunun yanında diğer avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir [9,13].

1. Akışkan içine ilave edilen partiküller akışkanın yüzey alanının hacme oranını artırır.
2. Akışkan içindeki partiküller, akışkanın ısı iletim katsayısını artırır.
3. Partiküler arasındaki etkileşimler ve çarpışmalar akışkan ile akışkanın geçtiği yüzeydeki etkileşimi artırır.
4. Akışkandaki çalkantılar ve türbülansın şiddetini artırır.
5. Akışkan içerisinde nanopartiküllerin dağılımı, akışkan içerisinde düzgün sıcaklık dağılımı oluşturur.

### **1.3. Önceki Çalışmalar**

İç akışta zorlanmış taşınım ile ısı geçişinde nano partiküllerin kullanımı önemli bir araştırma konusu olmuştur. Son yıllarda yapılan araştırmalar, nano akışkan kullanımının ısı geçişini ve aracı akışkanın ısı iletim katsayısını iyileştirdiğini göstermiştir. Araştırmacılar çeşitli akışkan-nano partikül ve farklı geometriye sahip kanal türleri için nanoakışkanların ısı geçişini incelemiştir.



### 1.3.1. Deneysel çalışmalar

Pantzali ve ark. (2009) balıksırtı açısı  $50^\circ$ , ortalama kanal yüksekliği 4 mm, levha kalınlığı 0,5 mm, levha genişliği 75 mm, ısı geçişi yüzey alanı  $0,26 \text{ m}^2$  ve 16 adet levhadan oluşan nanoakışkanlı levhalı ısı değiştiricide zorlanmış taşınım ile ısı geçişini ve sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında % 4 hacimsel oranda Cu/su (11 nm) nanoakışkan kullanılmış ve Reynolds  $20 \leq Re \leq 400$  aralığı seçilmiştir. Nanoakışkanların kanal içerisindeki akışında akış türünün (laminer ve türbülans) nanoakışkanların verimliliğinde önemli rol oynadığını belirtmişlerdir [14].

Pantzali ve ark. (2009) genişliği ve boyu 60 mm olan % 4 hacimsel oranda CuO/su (30 nm) nanoakışkanlı ısı değiştiricide zorlanmış taşınım ile ısı geçişindeki iyileşmeyi ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemişlerdir. Düşük hacimsel debilerde toplam ısı geçiş katsayısında yüksek iyileşme olduğunu, ısı değiştiricinin yüzeyindeki değişikliklerle düz levhaya göre ısı geçişinde % 60 iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [15].

Fard ve ark. (2011) boyutları genişliği 72 mm, boyu 189 mm, toplam ısı geçiş alanı  $0,024 \text{ m}^2$ , 4 levhadan oluşan ve % 0,5 hacimsel oranda ZnO/su nanoakışkanının 10-40 g/s kütleli debi aralığı için taşınım ile ısı geçiş katsayısını deneysel olarak incelemişlerdir. Isı geçiş katsayısında suya oranla % 20 iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [16].

Kwon ve ark. (2011) levhalı ısı değiştiricide ZnO/su ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /su nanoakışkanlarının ısı geçişi ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemişlerdir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoakışkanının % 6 hacimsel oranda toplam ısı geçiş katsayısında % 30 kadar iyileşme sağlandığını belirtmişlerdir [17].

Mare ve ark. (2011) levha genişliği 7,1 mm, ortalama kanal yüksekliği 1,94 mm, levha kalınlığı 0,3 mm, ısı geçiş alanı  $0,216 \text{ m}^2$  olan 20 adet levhadan oluşan nanoakışkanlı levhalı ısı değiştiricide ısı geçişini ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, hacimsel oranları sırasıyla, % 1 ve % 0,55 olan

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su (37 nm), karbon nanotüp (9-10 nm, 2 µm uzunlukta) nanoakışkanları laminer akış koşullarında ( $Re < 200$ ) incelemiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve karbon nano tüp nanoakışkanları için ısı geçiş katsayısında sırasıyla % 42 ve % 50 iyileşme olduğunu, basınç düşümünde ise suya oranla sırasıyla 3 kat ve 7 kat artış olduğunu belirtmişlerdir [18].

Zamzamian ve ark. (2011) levha uzunluğu 60 mm, nanoakışkanlı dalga yüzeyli levhada zorlanmış taşınım ile ısı geçiş katsayısını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında, hacimsel oranları sırasıyla % 0,1 - % 1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/etilen glikol (20 nm) ve Cu/etilen glikol (20 nm) nanoakışkanlarını türbülanslı akış koşullarında incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda ısı geçiş katsayısında en az % 3 en fazla % 49 iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [19].

Pandey ve Nema (2012) dalga eğim açısı 30°, levha kalınlığı 1,27 mm, levha boyu 350 mm, levha genişliği 80 mm olan nanoakışkanlı dalga yüzeyli levhada zorlanmış taşınım ile ısı geçişini ve sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında, 3 farklı hacimsel oranda ( % 2, % 3, % 4 ) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su ( 40-50 nm ) nanoakışkanını 7 farklı kütleli debi ( 2 - 5 lt/dak ) için incelemiştir. % 2, % 3, % 4 hacimsel oranlar için toplam ısı geçiş katsayısında sırasıyla % 10, % 7,3 ve % 4,6 iyileşme sağlandığını belirtmişlerdir [20].

Tiwari ve ark. (2013) balıksırtı açısı 30°, ortalama kanal yüksekliği 2,8 mm, levha kalınlığı 0,5 mm, levha boyu 355 mm, levha genişliği 100 mm, ısı geçişi yüzey alanındaki artışı  $\Phi_p=1,15$  ve 10 adet levhadan oluşan dalga yüzeyli nanoakışkanlı kanalda zorlanmış taşınım ile ısı geçişi ve sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında, 4 farklı nanoakışkan türünü (CeO<sub>2</sub>-30 nm (Seryum oksit), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-45 nm, TiO<sub>2</sub>-10 nm ve SiO<sub>2</sub>-10 nm), 4 farklı kütleli debide (1-4 lt/dak) ve 7 farklı hacimsel oranda (% 0,5 - % 3) incelemiştir. En uygun değerdeki hacimsel oranın Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı için % 1, CeO<sub>2</sub>/su, SiO<sub>2</sub>/su, TiO<sub>2</sub>/su nanoakışkanları için % 0,75 olduğunu belirtmişlerdir. Isı geçiş katsayısında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanında % 26,3, SiO<sub>2</sub>/su nanoakışkanının % 13,9, CeO<sub>2</sub>/su nanoakışkanında % 35,9, TiO<sub>2</sub>/su nanoakışkanında % 24,1 iyileşme sağlandığını belirtmişlerdir [21].

Kabeel ve ark. (2013) balıksırtı açısı  $30^\circ$ , ısı geçişi yüzey alanındaki artışı  $\Phi_p=1,17$ , levha boyu 719 mm, levha genişliği 231 mm ve 6 adet levhadan oluşan dalga yüzeyli nanoakışkanlı levhada zorlanmış taşınım ile ısı geçişini ve sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemiştirlerdir. Çalışmalarında, 4 farklı hacimsel oranda (% 1 - % 4)  $Al_2O_3/su$  (47 nm) nanoakışkan kullanılmış ve Reynolds  $750 \leq Re \leq 1800$  aralığı seçilmiştir. % 4 hacimsel oranda ısı geçiş katsayısında % 13 iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [22].

Anoop ve ark. (2013) levha boyu 70 mm, levha genişliği 200 mm ve 10 adet levhadan oluşan nanoakışkanlı balıksırtı şeklinde dalgalı levhalı ısı değiştiricide zorlanmış taşınım ile ısı geçişini ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemiştirlerdir. Çalışmalarında, % 2, % 4, % 6 hacimsel oranda  $SiO_2/su$  (20 nm) nanoakışkan kullanılmış ve 0,1-3 kg/s kütleli debi aralığı için incelemiştirlerdir. Nanoakışkan hacimsel oranı ve kütleli debiye bağlı olarak ısı geçiş katsayısında hem artış hem de bozulma meydana geldiğini belirtmişlerdir [23].

Ray ve ark. (2014) balıksırtı açısı  $45^\circ$  kalınlığı 0,142 mm, ortalama kanal yüksekliği 2 mm, ısı geçişi yüzey alanındaki artışı  $\Phi_p=1,1$ , levha uzunluğu 154 mm, levha genişliği 71 mm ve 3 adet levhadan oluşan nanoakışkanlı levhalı ısı değiştiricide zorlanmış taşınım ile ısı geçişini ve sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemiştirlerdir. Çalışmalarında, % 0,5 hacimsel oranda  $Al_2O_3/etilen$  (45 nm) nanoakışkan kullanılmış ve Reynolds  $700 \leq Re \leq 2700$  aralığı seçilmiştir. Isı geçiş katsayısında % 11 iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [24].

Khoshvaght-Aliabadi ve ark. (2014) içerisinde kanatçıklar bulunan nanoakışkanlı kanalda nanoakışkanın ağırlıkça % 0 - % 0,4 oranda  $Cu/su$  (30-50 nm) nanoakışkan kullanılmış, 2-5 lt/dak hacimsel debi aralığı için zorlanmış taşınım ile ısı geçişini deneysel olarak incelemiştirlerdir. Çalışmalarında kanatçık kalınlığı 0,4 mm, kanal yüksekliği 10 mm, kanal hatvesi 10 mm ve kanal uzunluğu 400 mm olan 7 farklı kanatçık türünü incelemiştirlerdir. Isı geçiş katsayısı artan hacimsel debiyle ve nanopartikül oranıyla arttığına, ısı geçiş katsayısının ve basınç düşümünü düz kanatçıklı kanalda en düşük olduğunu belirtmişlerdir [25].

### 1.3.2. Sayısal çalışmalar

Pantzali ve ark. (2009) genişliği ve boyu 60 mm, hacimce % 4 CuO/su (30 nm) nanoakışkanlı ısı değiştiricide zorlanmış taşınımında ısı geçişindeki iyileşmeyi ve basınç dűřümünü üç boyutlu modelle sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmada k- $\Omega$  (omega) türbülans modeli ve tek fazlı akış yaklaşımını kullanmışlardır. Sayısal çözümlenmeyle elde edilen sonuçları deneysel çalışmayla karşılaştırmışlardır. CuO/su nanoakışkanın çıkış sıcaklığı ve basınç dűřümündeki hatanın % 5'den az, ısı geçişindeki hatanın ise % 10'dan az olduğunu belirtmişlerdir [14].

Fard ve ark. (2011) boyutları genişliği 72 mm, boyu 189 mm olan levhalı ısı değiştiricinin hacimsel oranı % 0,5 ZnO/su nanoakışkanının, 10 - 40 g/s kütleli debi aralığı için ısı geçiş katsayısını üç boyutlu modelle sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmada, laminer ve tek fazlı akış yaklaşımını kullanmışlardır. Sayısal çözümlenme ile deneysel sonuçların iyi bir uyum içerisinde olduğunu maksimum hatanın % 7,5 olduğunu belirtmişlerdir [16].

Tiwari ve ark. (2013) balıksırtı açısı 30°, ortalama kanal yüksekliği 2,8 mm, levha kalınlığı 0,5 mm, levha boyu 355 mm ve levha genişliği 100 mm olan dalga yüzeyli nanoakışkanlı kanalda zorlanmış taşınımında ısı geçişi ve sürtünme faktörünü sonlu hacimler yaklaşımıyla üç boyutlu modelle sayısal çözümlenmeyle incelemişlerdir. Sayısal çalışmada k- $\epsilon$  (epsilon) türbülans modeli ve tek fazlı akış yaklaşımını seçmişlerdir. Kurulan modelin doğruluğunu deneysel çalışmayla karşılaştırmışlar ve maksimum % 3,75 hata olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, iki farklı nanoakışkan türünü (CeO<sub>2</sub>-30nm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-45nm), dört farklı kütleli debide (1-4 lt/dak) ve uygun değerdeki oranda (CeO<sub>2</sub>-% 0,75, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-% 1) incelemişlerdir. Toplam ısı geçiş katsayısında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanında % 19 ve CeO<sub>2</sub>/su nanoakışkanında % 28 iyileşme sağlandığı belirtmişlerdir. Artan hacimsel oranda basınç dűřüşünün arttığına, en yüksek ısı geçişinin % 0,75 hacimsel oranda meydana geldiğini ve nanoakışkan kullanılması levhalı ısı değiştiricinin verimliliğini arttırdığını belirtmişlerdir [21,26].

Jokar ve O'Halloran (2013) nanoakışkanlı dalga yüzeyli levhalı ısı değiştiricinin üç boyutlu modelinde  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanın etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmada, Fluent yazılımıyla  $Al_2O_3$  nanoakışkanın 4 farklı hacimsel oranda (% 1-% 4),  $60^\circ/60^\circ$ ,  $27^\circ/60^\circ$  ve  $27^\circ/27^\circ$  balıksırtı açısı için incelemişlerdir. Sayısal çözümlemede  $k-\omega$  (omega) türbülans modeli ve tek fazlı yaklaşım kullanmışlardır. Sayısal çözümlemeyi su için elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Hacimsel orandaki artışla ısı iletim katsayısının yükseldiğini, ısı geçişinde ise çok az bir azalma gösterdiğini belirtmişlerdir [27].

Khoshvaght Aliabadi ve ark. (2014) içerisinde 7 farklı kanatçık bulunan nanoakışkanlı kanalda Cu/su (40 nm) nanoakışkanın ağırlıkça % 0 - % 0,3 oranda kullanılmış ve üç boyutlu modelle Reynolds 200 - 1800 sayı aralığı için zorlanmış taşınım ısı geçişini sonlu hacimler yöntemiyle çözmüşlerdir. Sayısal çözümlemede tek fazlı (homogenous) ve çift fazlı (mixture ve Eulerian) modeller kullanmışlardır. Deneysel ve sayısal çözümlemeden elde edilen Nusselt sayılarında % 0,1 hacimsel oran için sırasıyla tek fazlı, çift fazlı "mixture" ve "Eulerian" modelleri arasında % 12,9, % 4,2, % 8,3, % 0,3 hacimsel oran için sırasıyla % 16,8, % 1,4 ve % 5,8 hata olduğunu belirtmişlerdir [25].

Gherasim ve ark. (2013) % 4 hacimsel oranda CuO/su ve  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanlı levhalı ısı değiştiricide ısı geçişini ve basınç düşümünü sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmada hem laminer hem de türbülanslı ( $k-\epsilon$ ) akış koşulları için incelemişlerdir. Nanoakışkanları homojen tek fazlı akış kabulüyle ele almışlardır. Nanoakışkanları kullanarak suya oranla ısı geçişinde önemli ölçüde bir iyileşme olduğunu, basınç düşümünün suya oranla artış gösterdiğini belirtmişlerdir [28].

Majdi ve Abed (2015) % 0 - % 4 hacimsel orandaki  $SiO_2$ /su nanoakışkanlı (20-70 nm) dalga eğim açısı  $60^\circ$  olan V şekilli dalga yüzeyli levhalı ısı değiştiricide ısı geçişini laminer akış şartlarında sayısal çözümlemeyle incelemişlerdir. Nanoakışkan kullanıldığında suya oranla ısı geçiş katsayısında % 35 iyileşme sağlandığını belirtmişlerdir [29].

Ayrıca, literatürde levhalı ısı değiştiricilerinde ısı geçiş katsayısı ve sürtünme faktörünü belirlemek için elde edilen korelasyonlar Tablo 1.1.'de verilmektedir.

Tablo 1.1. Levhalı ısı değiştirici ısı geçiş katsayısı ve sürtünme faktörü korelasyonları

Araştırmacı	Korelasyon	Açıklamalar
Savostin ve Tikhonov (1970) [30]	$\left. \begin{aligned} Nu &= 1,26[0,62 + 0,38\cos(2,3\psi)]\phi_p^{1-a_1}Pr^{1/3}Re^{a_1} \\ f &= 6,25(1 + 0,95\psi^{1,72})\phi_p^{1,84}Re^{-0,84} \\ a_1 &= 0,22(1 + 1,1\psi^{1,5}) \end{aligned} \right\} 200 \leq Re/\phi_p \leq 600$ $\left. \begin{aligned} Nu &= 0,072\phi_p^{0,33}Pr^{1/3}Re^{0,67}\exp(0,5\psi + 0,17\psi^2) \\ f &= 0,925[0,62 + 0,38\cos(2,6\psi)]\phi_p^{1+a_2}Re^{-a_2} \\ a_2 &= 0,53[0,58 + 0,42\cos(1,87\psi)] \\ \psi &= 2\beta \text{ radyan} \end{aligned} \right\} 600 \leq Re/\phi_p \leq 4000$	$57^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ Hava/Su
Okada ve ark.[31] (1972)	$Nu = \begin{cases} 0,157Re^{0,66}Pr^{0,4}, & \beta = 30^\circ \\ 0,249Re^{0,64}Pr^{0,4}, & \beta = 45^\circ \\ 0,327Re^{0,65}Pr^{0,4}, & \beta = 60^\circ \\ 0,478Re^{0,62}Pr^{0,4}, & \beta = 75^\circ \end{cases}$ $700 < Re < 25000$	Su
Maslov ve Kovalenko (1972) [32]	$\left. \begin{aligned} Nu &= 0,78Re^{0,5}Pr^{1/3} \\ f &= 95,6Re^{-0,25} \end{aligned} \right\} 50 \leq Re \leq 20000$	$\beta = 60^\circ$
Tovazhnyanski ve ark. (1980) [33]	$\left. \begin{aligned} Nu &= 0,074Re^{0,73}Pr^{0,33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,25} \\ f &= 0,204Re^{-0,215} \end{aligned} \right\} 2000 \leq Re \leq 25000$ $\left. \begin{aligned} Nu &= 0,051e^{[0,64\tan\beta]}Re^{0,73}Pr^{0,43}\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,25} \\ f &= 0,085\exp(1,52\tan\beta)Re^{-(0,25-0,06\tan\beta)} \end{aligned} \right\}$	$\beta = 30^\circ$ $\beta = 45^\circ$ $\beta = 60^\circ$ $\phi_p = 1,16$
Bond (1981) [34]	$Nu = \begin{cases} 0,329Re^{0,529}Pr^{0,33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,17}, & 23 \leq Re \leq 468 \\ 0,113Re^{0,719}Pr^{0,33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,17}, & Re > 468 \end{cases}$ $f = \begin{cases} 3,01Re^{-0,457}, & 47 \leq Re \leq 468 \\ 0,735Re^{-0,213}, & Re > 468 \end{cases}$	$\beta = 30^\circ$ $\phi_p = 1,17$
Focke ve ark.(1985) [35]	$Nu = \begin{cases} 1,67Re^{0,44}Pr^{0,5}, & 45 < Re < 300 \\ 0,405Re^{0,7}Pr^{0,5}, & 300 < Re < 2000 \\ 0,84Re^{0,6}Pr^{0,5}, & 2000 < Re < 20000 \end{cases}$ $f = \begin{cases} 0,3025 + \frac{91,75^{0,44}}{Re}, & 150 < Re < 1800 \\ 1,46Re^{-0,177}, & 1800 < Re < 30000 \end{cases}$ $Nu = \begin{cases} 0,77Re^{0,54}Pr^{0,5}, & 120 < Re < 1000 \\ 0,44Re^{0,64}Pr^{0,5}, & 1000 < Re < 42000 \end{cases}$ $f = \begin{cases} 57,5Re^{-1} + 0,093, & 260 < Re < 3000 \\ 0,8975Re^{-0,263}, & 3000 < Re < 50000 \end{cases}$	$\beta = 45^\circ$ $\beta = 30^\circ$ $\phi_p = 1,464$

Tablo 1.1. (Devamı)

Araştırmacı	Korelasyon	Açıklamalar																																																																																																								
Chisholm ve Wanniarachchi (1992) [36]	$\text{Nu} = \begin{cases} 0,768\text{Re}^{0,59}\text{Pr}^{0,4}, & 1000 \leq \text{Re} < 40000 \\ 0,799\text{Re}^{0,59}\text{Pr}^{0,4}, & 1000 \leq \text{Re} < 40000 \end{cases}$ $f = \begin{cases} 0,973\text{Re}^{-0,25}, & 1000 \leq \text{Re} \leq 40000 \\ 1,098\text{Re}^{-0,25}, & 1000 \leq \text{Re} \leq 40000 \end{cases}$	$30^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$ $\phi_p = 1,17$ $\phi_p = 1,288$																																																																																																								
Kumar(1984) [37,38]	$\text{Nu} = 0,72\text{Re}^{0,59}\text{Pr}^{0,4}\phi_p^{0,41}\left(\frac{\beta}{30}\right)^{0,66}$ $f = 0,8\text{Re}^{-0,25}\phi_p^{1,25}\left(\frac{\beta}{30}\right)^{3,6}$	$30^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$																																																																																																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\beta</math> açısı</th> <th colspan="2">Isı Geçişi</th> <th colspan="3">Basınç Düşüşü</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Reynold Sayısı</th> <th><math>C_h</math></th> <th>n</th> <th>Reynolds Sayısı</th> <th><math>K_p</math></th> <th>m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2"><math>\leq 30^\circ</math></td> <td><math>\leq 10</math></td> <td>0,718</td> <td>0,349</td> <td><math>&lt; 10</math></td> <td>50</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><math>&gt; 10</math></td> <td>0,348</td> <td>0,663</td> <td>10 – 100</td> <td>19,4</td> <td>0,589</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"><math>45^\circ</math></td> <td><math>&lt; 10</math></td> <td>0,718</td> <td>0,349</td> <td><math>&lt; 15</math></td> <td>47</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>10 – 100</td> <td>0,4</td> <td>0,598</td> <td>15 – 300</td> <td>18,29</td> <td>0,652</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"><math>50^\circ</math></td> <td><math>&gt; 100</math></td> <td>0,3</td> <td>0,663</td> <td><math>&gt; 300</math></td> <td>1,441</td> <td>0,206</td> </tr> <tr> <td><math>&lt; 20</math></td> <td>0,63</td> <td>0,333</td> <td><math>&lt; 20</math></td> <td>34</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"><math>60^\circ</math></td> <td>20 – 300</td> <td>0,291</td> <td>0,591</td> <td>20 – 300</td> <td>11,25</td> <td>0,631</td> </tr> <tr> <td><math>&gt; 300</math></td> <td>0,13</td> <td>0,732</td> <td><math>&gt; 300</math></td> <td>0,772</td> <td>0,161</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"><math>65^\circ \geq</math></td> <td><math>&lt; 20</math></td> <td>0,562</td> <td>0,326</td> <td><math>&lt; 40</math></td> <td>24</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>20 – 400</td> <td>0,306</td> <td>0,529</td> <td>40 – 400</td> <td>3,24</td> <td>0,457</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"><math>65^\circ \geq</math></td> <td><math>&gt; 400</math></td> <td>0,108</td> <td>0,703</td> <td><math>&gt; 400</math></td> <td>0,76</td> <td>0,215</td> </tr> <tr> <td><math>&lt; 20</math></td> <td>0,562</td> <td>0,326</td> <td><math>&lt; 50</math></td> <td>24</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"><math>65^\circ \geq</math></td> <td>20 – 500</td> <td>0,331</td> <td>0,503</td> <td>50 – 500</td> <td>2,8</td> <td>0,451</td> </tr> <tr> <td><math>&gt; 500</math></td> <td>0,087</td> <td>0,718</td> <td><math>&gt; 500</math></td> <td>0,639</td> <td>0,213</td> </tr> </tbody> </table>	$\beta$ açısı	Isı Geçişi		Basınç Düşüşü				Reynold Sayısı	$C_h$	n	Reynolds Sayısı	$K_p$	m	$\leq 30^\circ$	$\leq 10$	0,718	0,349	$< 10$	50	1	$> 10$	0,348	0,663	10 – 100	19,4	0,589	$45^\circ$	$< 10$	0,718	0,349	$< 15$	47	1	10 – 100	0,4	0,598	15 – 300	18,29	0,652	$50^\circ$	$> 100$	0,3	0,663	$> 300$	1,441	0,206	$< 20$	0,63	0,333	$< 20$	34	1	$60^\circ$	20 – 300	0,291	0,591	20 – 300	11,25	0,631	$> 300$	0,13	0,732	$> 300$	0,772	0,161	$65^\circ \geq$	$< 20$	0,562	0,326	$< 40$	24	1	20 – 400	0,306	0,529	40 – 400	3,24	0,457	$65^\circ \geq$	$> 400$	0,108	0,703	$> 400$	0,76	0,215	$< 20$	0,562	0,326	$< 50$	24	1	$65^\circ \geq$	20 – 500	0,331	0,503	50 – 500	2,8	0,451	$> 500$	0,087	0,718	$> 500$	0,639	0,213	$\beta$ , açısına göre; $\text{Nu} = C_h\text{Re}^m\text{Pr}^{1/3}$ Basınç düşümü $f = \frac{K_p}{\text{Re}^m}$
$\beta$ açısı	Isı Geçişi		Basınç Düşüşü																																																																																																							
	Reynold Sayısı	$C_h$	n	Reynolds Sayısı	$K_p$	m																																																																																																				
$\leq 30^\circ$	$\leq 10$	0,718	0,349	$< 10$	50	1																																																																																																				
	$> 10$	0,348	0,663	10 – 100	19,4	0,589																																																																																																				
$45^\circ$	$< 10$	0,718	0,349	$< 15$	47	1																																																																																																				
	10 – 100	0,4	0,598	15 – 300	18,29	0,652																																																																																																				
$50^\circ$	$> 100$	0,3	0,663	$> 300$	1,441	0,206																																																																																																				
	$< 20$	0,63	0,333	$< 20$	34	1																																																																																																				
$60^\circ$	20 – 300	0,291	0,591	20 – 300	11,25	0,631																																																																																																				
	$> 300$	0,13	0,732	$> 300$	0,772	0,161																																																																																																				
$65^\circ \geq$	$< 20$	0,562	0,326	$< 40$	24	1																																																																																																				
	20 – 400	0,306	0,529	40 – 400	3,24	0,457																																																																																																				
$65^\circ \geq$	$> 400$	0,108	0,703	$> 400$	0,76	0,215																																																																																																				
	$< 20$	0,562	0,326	$< 50$	24	1																																																																																																				
$65^\circ \geq$	20 – 500	0,331	0,503	50 – 500	2,8	0,451																																																																																																				
	$> 500$	0,087	0,718	$> 500$	0,639	0,213																																																																																																				
Heavner ve ark. (1993) [39]	$\text{Nu} = \text{Pr}^{1/3}\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,17} \times \begin{cases} 0,278\phi_p^{0,317}\text{Re}^{0,683}, & \beta = 45^\circ/0^\circ \\ 0,308\phi_p^{0,333}\text{Re}^{0,667}, & \beta = 67^\circ/0^\circ \\ 0,195\phi_p^{0,308}\text{Re}^{0,692}, & \beta = 45^\circ/45^\circ \\ 0,118\phi_p^{0,28}\text{Re}^{0,72}, & \beta = 67^\circ/45^\circ \\ 0,089\phi_p^{0,282}\text{Re}^{0,718}, & \beta = 67^\circ/67^\circ \end{cases}$ $f = \begin{cases} 1,715\phi_p^{1,0838}\text{Re}^{-0,0838}, & \beta = 45^\circ/90^\circ \\ 1,645\phi_p^{1,1353}\text{Re}^{-0,1353}, & \beta = 23^\circ/90^\circ \\ 0,81\phi_p^{1,1405}\text{Re}^{-0,1405}, & \beta = 45^\circ/45^\circ \\ 0,649\phi_p^{1,1555}\text{Re}^{-0,1555}, & \beta = 23^\circ/45^\circ \\ 0,571\phi_p^{1,1814}\text{Re}^{-0,1814}, & \beta = 23^\circ/23^\circ \end{cases}$	$400 \leq \text{Re}/\phi_p \leq 10000$ Su																																																																																																								
Talik ve ark. (1995) [40]	$\text{Nu} = 0,248\text{Re}^{0,7}\text{Pr}^{0,4}, \quad 1450 < \text{Re} < 11460, \quad 2,5 < \text{Pr} < 5$ $f = 0,3323\text{Re}^{-0,042}, \quad 1450 < \text{Re} < 11460$	$\beta = 30^\circ$ $\phi_p = 1,22$ Su																																																																																																								
	$\text{Nu} = 0,2\text{Re}^{0,75}\text{Pr}^{0,4}, \quad 10 < \text{Re} < 720, \quad 70 < \text{Pr} < 450$ $f = 12,065\text{Re}^{-0,74}, \quad 10 < \text{Re} < 80$	$\beta = 30^\circ$ $\phi_p = 122$ Su/Glikol																																																																																																								

Tablo 1.1. (Devamı)

Araştırmacı	Korelasyon	Açıklamalar
Martin (1996) [41]	$Nu = 0,122Pr^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{1/6} [fRe^2 \sin(2\beta)]^{0,374}$	
	$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{\cos\beta}{\sqrt{btan\beta + c\sin\beta + (f_0 Re / \cos\beta)}} + \frac{1 - \cos\beta}{\sqrt{f_1(Re)}}$	$65^\circ \leq \beta \leq 25^\circ$
	$a = 3,8, \quad b = 0,18, \quad c = 0,36$	
Muley ve Manglik (1997) [42]	$Nu = \begin{cases} 0,471Re^{0,5}Pr^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0,14}, & 2 \leq Re \leq 200 \\ 0,1Re^{0,76}Pr^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0,14}, & Re \geq 1000 \end{cases}$	$\beta = 30^\circ$ $\beta = 60^\circ$
	$f = \begin{cases} [(40,32/Re)^5 + (8,12Re^{-0,5})^5]^{0,2}, & 2 \leq Re \leq 200 \\ 1,274Re^{-0,15}, & Re \geq 1000 \end{cases}$	$1 \leq \phi_p \leq 1,5$ Yağ-Su
Muley ve Manglik (1999) [43]	$Nu = C_1(\beta)C'_1(\phi_p)Re^{p_1(\beta)}Pr^{0,33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$	
	$f = C_2(\beta)C'_2(\phi_p)Re^{p_2(\beta)}$	
	$C_1 = (0,2668 - 6,967x10^{-3}\beta + 7,244x10^{-5}\beta^2)$	$30^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$
	$C_2 = (2,917 - 0,1277\beta + 2,016x10^{-3}\beta^2)$	
	$p_1 = [0,728 + 0,0543 \sin\{\pi\beta/45\} + 3,7]$	
	$p_2 = [0,2 + 0,0577 \sin\{\pi\beta/45\} + 2,1]$	
	$C'_1 = (20,78 - 50,94\phi_p + 41,16\phi_p^2 - 10,51\phi_p^3)$	
	$C'_2 = (5,474 - 19,02\phi_p + 18,93\phi_p^2 - 5,341\phi_p^3)$	
Muley ve ark. (1999) [44]	$Nu = 1,6774(d_e/L)^{1/3}(\beta/30)^{0,38}Re^{0,5}Pr^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0,14}, 30 \leq Re \leq 400$	$30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$
	$f = [(30,2/Re)^{0,5} + (6,28/Re^{0,5})^{0,2}(\beta/30)^{0,83}], 2 \leq Re \leq 300$	$\gamma = 0,56$
Kanaris ve ark. (2006) [45]	$Nu = 0,51Re^{0,58}Pr^{1/3}$	İkizkenar yamuk şekli, Su
	$f = 9,38Re^{-0,135}$	
Rao ve ark. (2006) [46]	$f = 1,059Re^{-0,145}, 900 < Re < 10000$	$\beta = 60^\circ$
Jain (2007) [47]	$Nu = 0,488Re^{0,626}Pr^{0,4}$	$\beta = 60^\circ$
Warnakulasuriya ve Worek (2008) [48]	$Nu = 0,292Re^{0,705}Pr^{0,35}\left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0,14}$	
	$f = 23,8Re^{-0,205}$	$250 < Re < 1050$
Kanaris ve ark. (2009) [49]	$f = 11,26Re^{-0,135}$	Üçgen levha yapısı, Su
Pantzali ve ark. (2009) [14]	$Nu = 0,247Re^{0,66}Pr^{0,4}$	CuO/su
	$f = 14,5Re^{-0,135}$	( hac. kons.% 6 ) Soğutucu olarak Su Laminer/Türbülans
Khan ve ark. (2010) [50]	$Nu = 0,1449Re^{0,8414}Pr^{0,35}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}, \quad \beta = 60^\circ/60^\circ$	$\left. \begin{array}{l} 500 < Re < 2500 \\ 3.5 < Pr < 6 \end{array} \right\}$
	$Nu = 0,1437Re^{0,781}Pr^{0,35}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}, \quad \beta = 30^\circ/60^\circ$	
	$Nu = 0,1368Re^{0,1424}Pr^{0,35}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}, \quad \beta = 30^\circ/30^\circ$	
Shaji ve Das (2010) [51]	$Nu = 0,132Re^{0,7065}Pr^{1/3}$	Su
	$Pe = 8311,1Re^{-0,8812}$	$\beta = 30^\circ$
Pandey ve Nema (2012) [52]	$Nu = (0,26 + 0,02\phi - 0,0051\phi^2)Pe^{0,27}$	$Al_2O_3/su$
	$f = (2,9 + 5,6\phi + 0,12\phi^2)Pe^{-0,13}$	( hac. kons.% 2-% 4 )
Shaji ve Das (2013) [53]	$Nu = 0,094Re^{0,758}(\beta/45)^{0,756}Pr^{0,333}$	$\left. \begin{array}{l} \beta = 30^\circ/30^\circ \\ \beta = 30^\circ/60^\circ \\ \beta = 60^\circ/60^\circ \end{array} \right\}$
	$Pe = 67,04Re^{-0,147}(\beta/45)^{0,455}$	
	$f = 4,66Re^{-0,262}(\beta/45)^{1,558}$	
Ray ve ark. (2014) [54]	$Nu = 0,3053Re^{0,75}Pr^{0,3}, 150 < Re < 1500$	$Al_2O_3/Etilen$ glikol:Su (hac. oran % 0,5)
	$f = 13,64Re^{-0,2719}, 120 < Re < 1000$	
	$4 < Pr < 27$	



Tablo 1.1. (Devamı)

Araştırmacı	Korelasyon	Açıklamalar
Gülenoğlu ve ark. (2014) [55]	$Nu = \begin{cases} 0,32867Re^{0,68}Pr^{0,1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}, & 300 \leq Re \leq 5000 \\ 0,32867Re^{0,675}Pr^{0,1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}, & 300 \leq Re \leq 5000 \end{cases}$ $f = \begin{cases} 259,9Re^{-0,9227} + 1,246, & 300 < Re < 5000 \\ 1371Re^{-1,146} + 1,139, & 300 < Re < 5000 \end{cases}$ $Nu = 0,17422Re^{0,7}Pr^{0,1/3}(\mu/\mu_w)^{0,14}, \quad 300 \leq Re \leq 5000$ $f = 0,003743Re^{0,5981} + 0,9132, \quad 300 < Re < 5000$	$\beta = 30^\circ$ $\Phi_p = 1,17$ $\beta = 30^\circ$ $\Phi_p = 1,288$
Nilpuen ve Wongwises (2015) [56]	$Nu = 0,428Re^{0,664}Pr^{1/3}, \quad 1300 < Re < 3200, \quad 4,74 < Pr < 5,12$ $Nu = 0,061Re^{0,831}Pr^{1/3}(\epsilon/D_h)^{0,122}, \quad 1300 < Re < 3200, \quad 5,55 < Pr < 5,69$ $f = 0,88Re^{-0,074}(\epsilon/D_h)^{0,138}, \quad 1300 < Re < 3200, \quad 5,55 < Pr < 5,69$ $0,936 \mu m < \epsilon < 3,312 \mu m$	$\beta = 25^\circ$ $\epsilon$ , yüzey pürüzlülük
Khan ve ark. (2015) [57]	$Nu = 0,0566Re^{0,88}Pr^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0,14} \quad \left. \begin{matrix} 500 < Re < 2500 \\ 3 < Pr < 8 \end{matrix} \right\}$	$\beta = 30^\circ/60^\circ$ $\Phi_p = 1,117$
Huang ve ark. (2016) [58]	$Nu = 0,2302Re^{0,745}Pr^{0,3}$ $f = 20,202Re^{-0,191}$	$\beta = 60^\circ$ $Al_2O_3/Su$ Çok duvarlı karbon nanotüp /Su

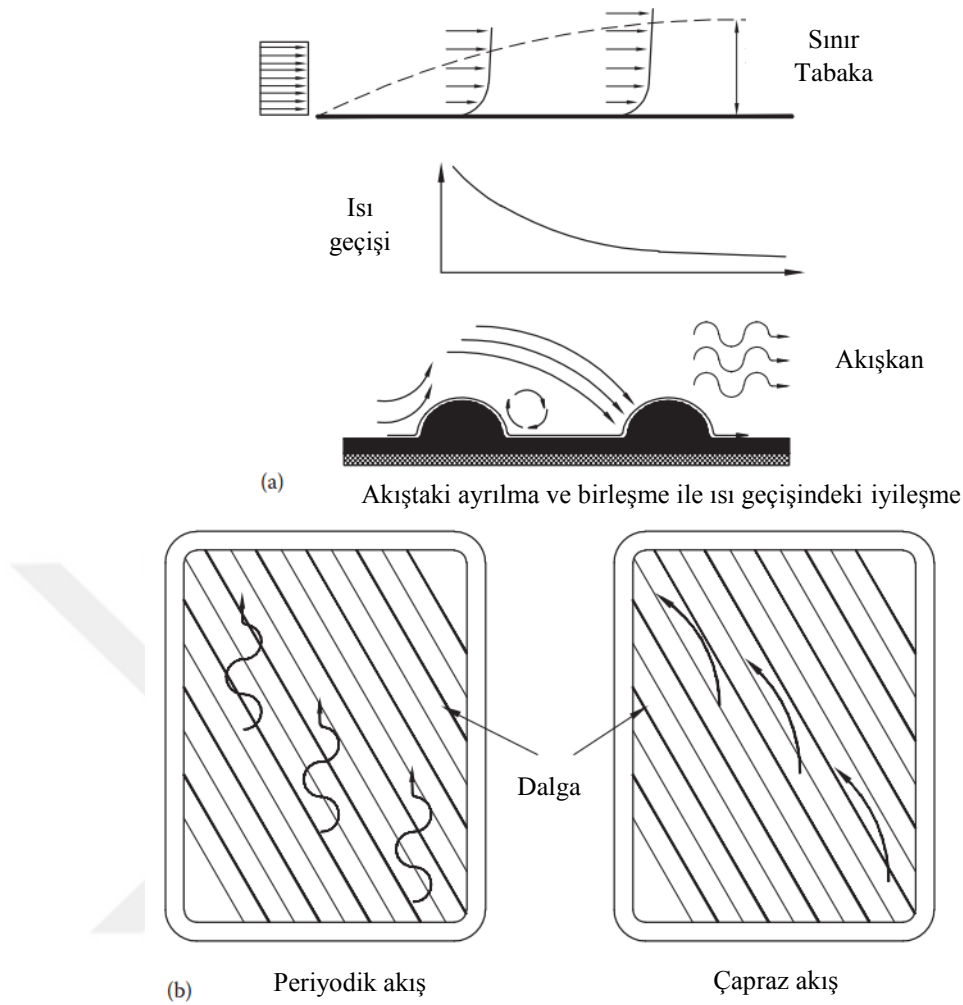
### 1.3.3. Çalışmanın amacı

Bu çalışma, nanoakışkanlı contalı levhalı ısı değiştirici kanallarında taşınım ile ısı geçişi ve basınç düşüşünü deneysel ve sayısal olarak incelemek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, endüstriyel olarak kullanılan balıksırtı şeklinde dalgalı geometriye sahip T2 modeli olan levhalar Alfa Laval firmasından tedarik edilmiştir. Levhalı ısı değiştiricinin sıcak tarafı için elektrikli ısıtıcı ile ısıtılan sıcak su, soğuk tarafı için ise deney akışkanı olan 4 farklı hacimsel oranda (% 0,25, % 0,5, % 0,75 ve % 1) laboratuvar ortamında hazırladığımız saf su- $Al_2O_3$  (ortalama çapı 40 nm) karışımından oluşan nanoakışkanlar kullanılmıştır. Söz konusu levhalı ısı değiştiricinin sıcak ve soğuk akışkan taraflarının geometrik modelini oluşturabilmek amacıyla levhalı ısı değiştiricinin katı modeli tersine mühendislik yöntemiyle elde edilmiştir. Bu katı modeldeki levhalı ısı değiştirici deney şartlarında olduğu gibi Solidworks programı yardımıyla ısı değiştiricinin hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller, sonlu hacimler yöntemiyle çözüm yapan ANSYS – Fluent yazılım programı kullanılarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu sayısal çözümler yapılmıştır. Deney düzeneğinin kurulumu ve sayısal çözümleme için gerekli olan maddi olanaklar Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje (Proje no: 2013-01-06-033) koordinatörlüğü tarafından sağlanmıştır.

## 1.4. Tanımlar ve Teorik Esaslar

### 1.4.1. Levhalı ısı değiştiricide geometrinin ısı geçişine etkisi

Contalı levhalı ısı değiştiricileri ince, dikdörtgen şeklindeki metal levhaların bir araya getirilmesiyle oluşturulan, levhalar arasındaki sızdırmazlığın contalar yardımıyla sağlandığı ve levhalar üzerinde akışkanların köşelerinden giriş ve çıkış boşluklarından oluşan kompakt bir yapıdadır. Levha üzerindeki kabartma şeklinde geometriler, düşük akış hızlarında yüksek türbülans etkisi oluşturmaktadır. Örneğin, düz dalgalı (washboard) geometride akışkanın yönü ve hızı sürekli değiştirilerek türbülans etkisi artırılırken, balıksırtı şeklindeki geometri için dalgaların akışkana girdap hareketi veren birbiri ardına gelen uç kısımlarıyla akışkanın yönü değiştirilerek türbülans etkisi oluşturulmaktadır. Bu türbülans etkisi sonucunda yüksek ısı geçiş katsayıları elde edilmektedir. Levhalı ısı değiştiricilerinde Reynolds 300-400'den ve 3-5 kanal hatvesinden sonra türbülanslı akış gelişmektedir. Kanal içerisindeki düz dalgalı ile balıksırtı şeklinde dalgalı geometrik şekiller ve bu şekillere bağlı oluşan türbülans ısı geçişinde etkin olan sınır tabakalarda ayrılmalar, tekrar birleşmelere ve girdaplar neden olan bir yapıdadır [4-7].



Şekil 1.4. Levhalı ısı değiştiricide ısı geçişindeki iyileşmenin şematik gösterimi [4]

Şekil 1.4. (a)'da görüldüğü gibi dalgalı yüzeyin hemen başında başlayan akışta ayrılma ve tekrar birleşme meydana gelmektedir. Ayrılmış akışkan yüzeyi ile dalga yüzeyli levha arasında girdaplar oluşmaktadır ve bu bölgelere girdap bölgesi denilmektedir. Bu bölge içerisinde akışkanın hızı yavaşlar ve bu bölgede eddy (eddy) girdaplı akış meydana gelmektedir. Akışta tekrar birleşme olduğu bölgelerde ısı geçiş katsayısında artış olurken, oluşan girdap bölgesinde eddy girdaplarından dolayı yalıtım oluşmaktadır ve ısı geçişi azalmaktadır. Şekil 1.4. (b) levhalı ısı değiştiricide meydana gelen hem periyodik akışı hem de türbülanslı akışı ifade etmektedir. Levhalı ısı değiştiricide akış, bu iki akış şeklinin birleşiminden meydana gelmektedir [4].

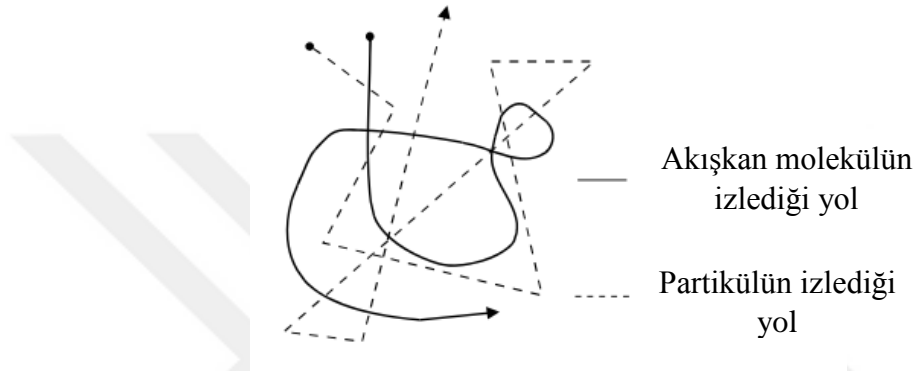
### 1.4.2. Nanoakışkanlarda ısı geçişinde etkili mekanizmalar ve termofiziksel özelliklerin hesaplanması

Nanoakışkanların ısı geçişini iyileştirmede etkili mekanizmalar bazı araştırmacılar tarafından şu şekilde ifade edilmektedir. Bu mekanizmalar, Brownian hareketi, ara yüzey sıvı tabakası teorisi, akışkanların incelen akışkan davranışı göstermesi, kümelenme ve dağılma ile diğer mekanizmalardan (atomsal ve moleküler seviyedeki titreşim, termoforez kuvvetler, yüzeye yakın ısıl ışıınım etkisi, Newton olmayan akış biçimi) oluşmaktadır. Sergis ve Hardalupas [59] nanoakışkanların ısı geçişini iyileştirmede etkili olan mekanizmalar için istatistiksel analiz yapmışlardır. Ele aldıkları 85 araştırma içerisinde Brownian hareketi % 33, ara yüzey sıvı tabakası teorisi % 23, incelen akışkan davranışı % 5, kümelenme-dağılma % 2 ve diğer mekanizmalardan oluştuğunu belirtmişlerdir.

### 1.4.3. Brownian hareketi

Isının moleküler kinetik teoriye göre, bir sıvı hacmi içerisinde askıda kalan mikroskobik olarak gözlemlenebilir boyuttaki kütlelerin hareketidir. Nano partiküllerin rastgele hareketiyle enerji, partiküllerden akışkana taşınmaktadır. Nano partiküller, akış sırasında soğuk tarafa geçmeden önce, yüksek kütleli oranlarda, yüksek nano partikül momentumu ve akışkan içerisinde uzun mesafelerde yüksek ısıl enerjisinden dolayı, moleküler çarpışmalar için büyük yüzey alanı sağlar. Ayrıca nano partikül etrafında akışkanın karışmasından dolayı mikro seviyedeki taşınım etkisi de ısı geçişini iyileştirmede önemli rol oynamaktadır. Bu hareketi bir örnekle açıklamak gerekirse; çapı 10 metre olan büyük bir balon düşünelim. Bu balon futbol stadyumu gibi kalabalık bir yerde olsun. Balon o kadar büyüktür ki aynı anda kalabalıktaki birçok kişinin üzerinde olacaktır. Taraftarlar heyecanlı oldukları için balona herhangi bir zaman diliminde rastgele yönlerde vuracaklardır. Sonuçta balon rastgele yönlere itileceği için ortalama olarak çok fazla hareket etmeyecektir. 20 taraftarın balonu sağa, 21 taraftarın da sola ittiğini ve her taraftarın kuvvetinin eşit olduğunu varsayalım. Bu durumda iki yönden uygulanan kuvvetler dengede değildir ve balon yavaşça sola gidecektir. Bu dengesiz kuvvet her an vardır ve balonun rastgele hareketine yol açan

budur. Eğer bu stadyuma taraftarları göremeyecek şekilde yukarıdan bakarsak büyük balonu rastgele hareketler yapan küçük bir nesne olarak görürüz. Bir diğer örnekte, bir su molekülü yaklaşık 1 nm boyutundadır, polen parçacığı ise yaklaşık 1  $\mu\text{m}$ 'dir. Yani su molekülünden yaklaşık 1000 kat büyüktür. Bu yüzden polen parçacığını minik su molekülleri tarafından sürekli itilen büyük bir balon olarak düşünebiliriz. Sıvıdaki Brownian hareketinin sebebi parçacığa uygulanan kuvvetlerdeki anlık dengesizliklerdir (Şekil 1.5.).

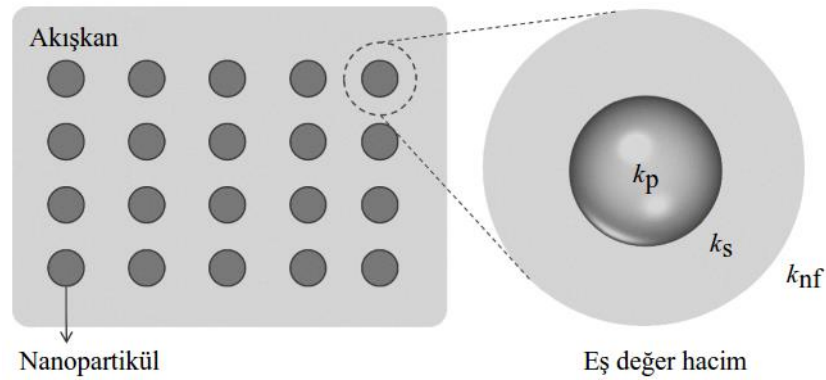


Şekil 1.5. Brownian hareketiyle parçacığın taşınması [60]

Partiküllerin hareketindeki diğer önemli bir noktada da sadece Brownian hareketinin etkisi değil aynı zamanda diğer partiküller arasındaki etkileşim kuvvetleridir. Bu etkileşimlere, Van der Waals ve komşu iki partikül arasında oluşan elektrostatik etkileşim ile partiküllerin hareketi sırasında meydana gelen termoforez ve sürtünme kuvvetleri örnek gösterilebilir [61-64].

#### 1.4.4. Ara yüzey sıvı tabaka teorisi (Interfacial Liquid Layering)

Isı geçişini iyileştirmede etkili olan bu mekanizmada, sıvı molekülleri katı yüzeyler etrafında yapısal olarak katmanlaşmıştır (Şekil 1.6.). Moleküler dinamik analizler sonucunda sıvı - katı yüzeyi arasındaki kuvvetin önemli olduğu belirtilmiştir. Katı yüzeyi ile sürekli temasta olan sıvıda, birbirinden farklı atomik mesafedeki güçlü sıvı katmandan dolayı yüksek bir etkileşim oluşurken, katı yüzeyi ile sürekli olarak temasta olmayan sıvıda zayıf sıvı katmanlar ve yüksek ısı direnç meydana gelmektedir [65,66]. Örneğin, Yu and Choi akışkana oranla ısı iletim katsayısındaki artışa nano katmanın neden olduğunu ileri sürmüşlerdir [67].

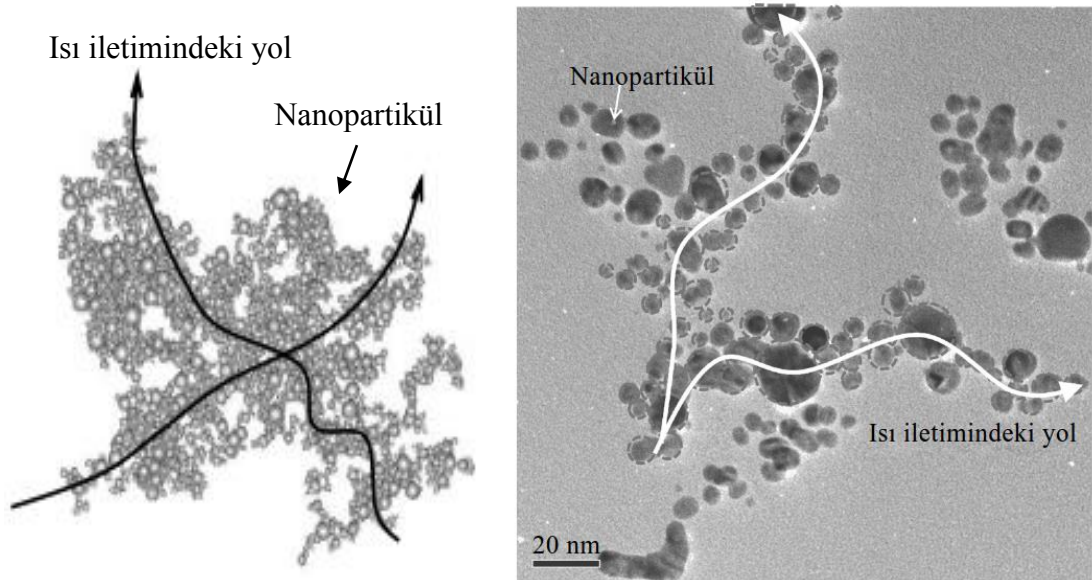


Şekil 1.6. Ara yüzey sıvı tabaka teorisi şematik gösterimi [68]

Eapen ve ark. [69] moleküler dinamik analizlerinde yüzeyde oluşan sıvı tabakasının, ısı iletim katsayısını iyileştirmede önemli rol oynadığını ve % 3,5 hacimsel oranda % 55'lik bir artış elde edildiğini belirlemişlerdir.

#### 1.4.5. Partiküllerin kümelenmesi (Particle Aggregation)

Şekil 1.7.'de gösterildiği gibi, nanoakışkan karışımlarında nanopartiküllerde zincir yapılar formunda kümelenme meydana gelebilir. Bu şekilde oluşan zincir yapı formlarının birleşmesi, nanoakışkanlarda ısı yayılımını hızlandırdığı düşünülmektedir [70].

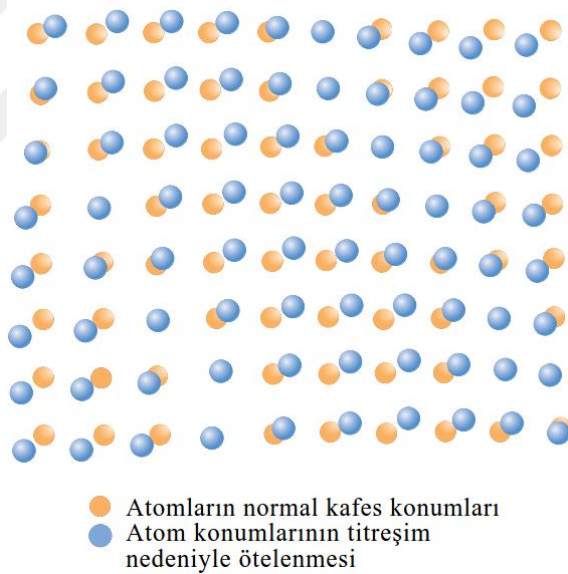


Şekil 1.7. Nanopartiküllerin kümelenmesi ve ısı iletiminde izlediği yol [71,72]

Philip ve ark. [73] tarafından yapılan deneysel çalışmalarda,  $Fe_3O_4$  nanoakışkanına manyetik alan uygulayarak % 0,82 hacimsel oranda % 300 e kadar ısı iletim katsayında artış elde edildiğini belirlemişlerdir.

#### 1.4.6. Fonon (Kafes titreşimi) hareketi

Bir kristal kafeste bulunan atomların ortak titreşmesi sonucu oluşan titreşim fonon (phonon) olarak adlandırılmaktadır. Nanoakışkanlarda ısı geçişini iyileştirmek için önerilen mekanizmalardan birisi olan fonon geçişi, nano ölçekte yayılma / atımlı (pulsate) ısı geçişinde fonon ve elektron etkileşimini belirlemek için kullanılmaktadır. Isı, titreşimin her bir modunda fononlar tarafından iletilen enerjinin miktarı olarak nitelendirilir. Yani fononların taşıdığı ısı enerjisi, titreşim dalgalarının doğrultusunda iletilir (Şekil 1.8.).

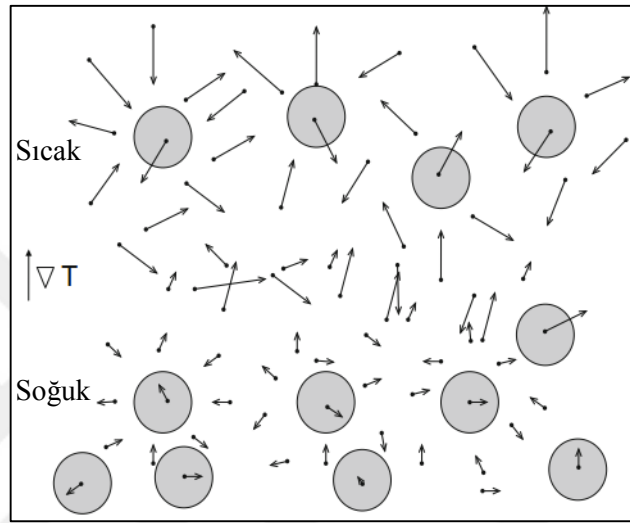


Şekil 1.8. Kristal kafeste titreşimle dalga oluşumunun şematik gösterimi [74]

Sıcaklık gradyeni bulunan bir kütlenin kesitinde, yüksek sıcaklıklı bölgelerden düşük sıcaklıklı bölgelere ısı geçişi, fononların net hareketiyle sağlanır. Katıdaki atomlar birbirine yaklaştıkça, katının diğer kısımlarının sıcaklığını yükselterek nanoakışkanların ısı geçişini iyileştirmektedir [75].

### 1.4.7. Termoforez kuvvetler (Thermophoretic Forces)

Şekil 1.9.'da gösterildiği gibi nanopartiküllerde termoforez kuvvetler, akışkan içerisindeki sıcaklık gradyeninin varlığından dolayı meydana gelmektedir. Akışkan içerisinde nanopartiküllerin oranı, partiküllerin taşınması ve hidrodinamik yayılımdan dolayı ısıtılan ve soğutulan bölgelerde değişmektedir.



Şekil 1.9. Küresel partiküllerin termoforez hareketleri [76].

Bu partikül düzensizliği sonucunda ısı iletim katsayısı iyileşme gösterir. Brownian hareketinden dolayı bu kuvvet göz önüne alınmaktadır ve sistemin soğuk bölgesine partiküller taşınmaktadır [77].

### 1.4.8. Yüzeğe yakın ısı ışınım etkisi (Near Field Radiation)

Nano ölçekte yüzeğe yakın bölgelerde, kızılötesi ışınım ile yayma ve yutma ile ısı geçişi artmaktadır. Bu olay, ısıtılan yüzeğe nanopartiküller/akışkan molekülleri arasında ve nanopartiküllerin kendileriyle olduğu kabul edilmektedir [78].



#### 1.4.9. Newton olmayan (Non-Newtonian) akış biçimi

Nanoakışkanların taşınımıyla ısı geçişinde, Newton olmayan karakteristikte incelen akışkan davranışı gösterdiği kabul edilmektedir. Nanoakışkanın yüzeylerde olan hız gradyeni arttıkça, nanoakışkanın katı sınırlarındaki viskozitesi azalmaktadır. Bu yüzden ısı sınır tabaka kalınlığı azalmaktadır ve böylece akışkan ile duvar arasındaki ısı geçişi artmaktadır. Bazı araştırmacılar, ısı geçişini iyileştirmede etkili olan bu mekanizmanın viskoziteden dolayı hız profilinin düzgün yayılı olduğunu öne sürmüşlerdir. İç akışlarda taşınımıyla ısı geçişinde, nanoakışkanların viskozitesinin değişimi akışkanın beklenen parabolik hız profili yerine düzgün yayılı hız profili oluşturmasına neden olmaktadır [79,80].

#### 1.5. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerin Hesaplanması

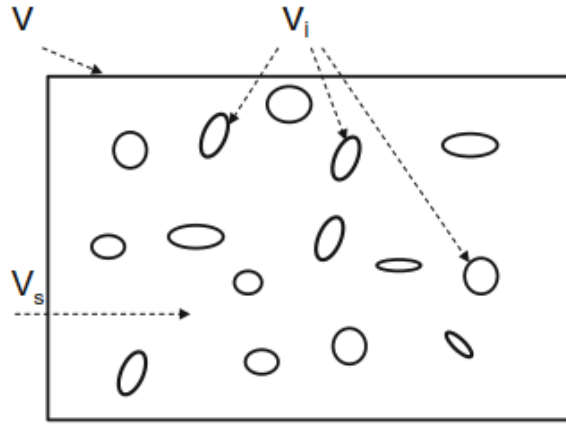
Nanopartiküller akışkan içerisine çok küçük miktarda ilave edilse bile akışkanın ısı iletim katsayısı, viskozitesi, ısı kapasitesi ve yoğunluk gibi termofiziksel özelliklerinin değişeceği bilinmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından bu termofiziksel özelliklerin nanoakışkanların hazırlanmasında, nanopartiküllerin sıvı içerisinde dağılımı, nanopartikül tipi, hacimsel oran, sıcaklık, akışkan, nanopartikül boyutu, dağılım davranışı gibi faktörlere bağlı olarak farklı değerler alabileceği belirtilmektedir.

##### 1.5.1. Yoğunluk

Şekil 1.10.'da gösterildiği gibi nanoakışkanın yoğunluğu, karışımın termodinamik özelliklerinin dengesi temel alınarak analitik olarak belirlenebilmektedir.

$$V_p = \sum_{i=1}^{i=n} V_i \quad (1.1)$$

$V_p$ =n tane nanopartikülün kapladığı hacim



Şekil 1.10. Nanoakışkan bileşimi [76]

$$\rho_{nf} = (m/V)_{nf} = \frac{m_s + m_p}{V_s + V_p} = \frac{\rho_s V_s + \rho_p V_p}{V_s + V_p} \quad (1.2)$$

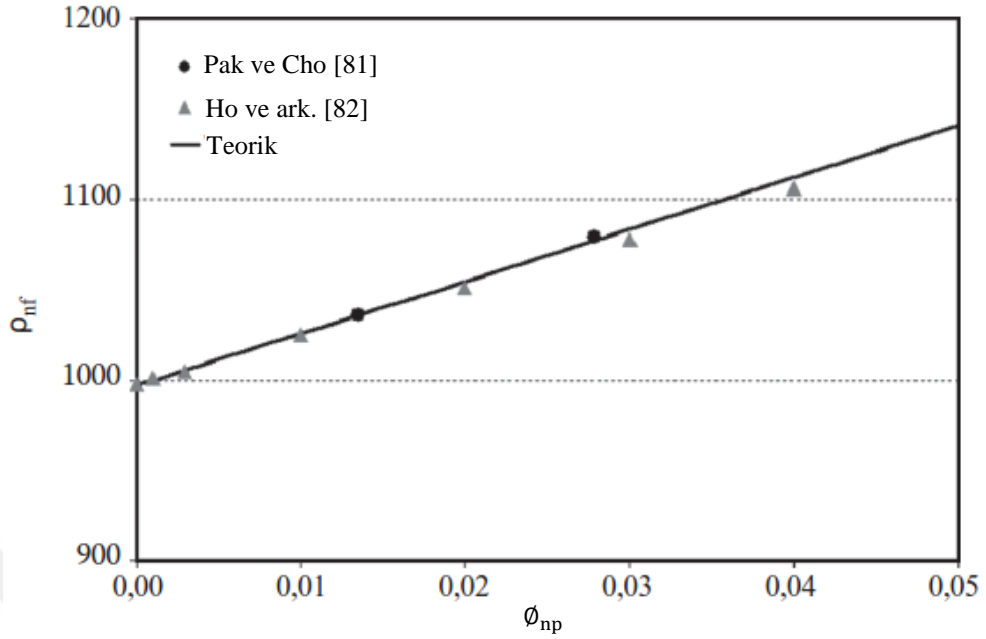
Hacimsel oran, katı partiküllerin toplam hacminin toplam akışkan hacmine oranı şeklinde tanımlanırsa,

$$\varnothing = V_p / V \quad (1.3)$$

$\varnothing = V_p / (V_s + V_p)$  şeklinde yazılırsa,

$$\rho_{nf} = (1 - \varnothing)\rho_s + \varnothing \rho_p \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.4)$$

elde edilir.



Şekil 1.11. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanın hacimsel oranına bağlı olarak oda sıcaklığındaki yoğunluğun değişiminin deneysel ve teorik karşılaştırılması [12]

Denklem 1.4'ün geçerliliği, Pak ve Cho [81], Ho ve ark. [82] tarafından Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanı için oda sıcaklığında yapılan deneysel çalışmalarla gösterilmiştir (Şekil 1.11.).

### 1.5.2. Özgül ısı

Nanoakışkan üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda nanopartikül ile akışkan arasındaki ısıl denge göz önüne alınarak özgül ısı için geçerli olan analitik model aşağıda verilmektedir.

$$Q_{nf} = m_{nf} c_{nf} \Delta T \rightarrow c_{nf} = \left( \frac{Q}{m \Delta T} \right)_{nf} \xrightarrow[\rho_{nf} \text{ ile çarpılırsa}]{\text{denklemin her iki tarafı}} \rho_{nf} c_{nf} = \rho_{nf} \left( \frac{Q}{m \Delta T} \right)_{nf}$$

$$m_{nf} = m_s + m_p, \quad Q_{nf} = Q_s + Q_p \text{ denklemde yerine yazılırsa,}$$

$$\rho_{nf} c_{nf} = \rho_{nf} \frac{Q_s + Q_p}{(m_s + m_p) \Delta T}$$

elde edilir.

$$Q_s = m_s c_{p,s} \Delta T = \rho_s V_s c_{p,s} \Delta T$$

$$Q_p = m_p c_{p,p} \Delta T = \rho_p V_p c_{p,p} \Delta T$$

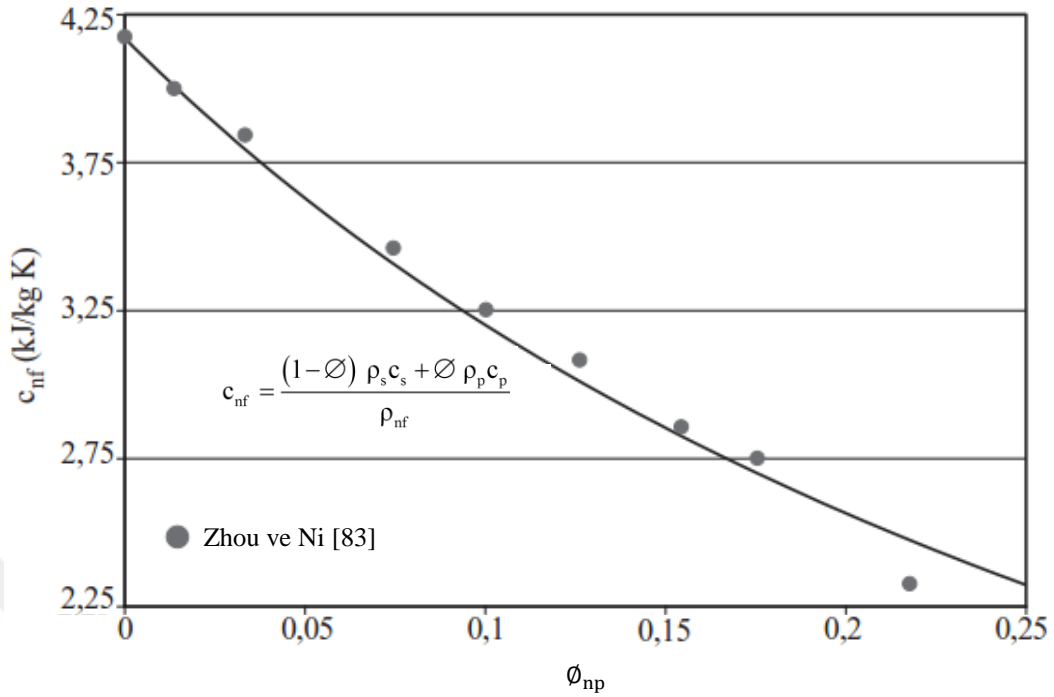
şeklindedir.

$$\rho_{nf} c_{nf} = \frac{\rho_s V_s c_{p,s} \Delta T + \rho_p V_p c_{p,p} \Delta T}{(m_s + m_p) \Delta T}$$

$$\rho_{nf} c_{nf} = \frac{\rho_s V_s c_{p,s} \Delta T + \rho_p V_p c_{p,p} \Delta T}{(m_s + m_p) \Delta T}$$

$$c_{nf} = \frac{(1-\phi) \rho_s c_s + \phi \rho_p c_p}{\rho_{nf}} \left[ \frac{J}{kgK} \right] \quad (1.5)$$

elde edilir.



Şekil 1.12. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanın hacimsel oranına bağlı olarak teorik ve deneysel özgül ısı değerlerinin oda sıcaklığında değişimi [12]

Denklem 1.5'in geçerliliği, Zhou ve Ni [83] tarafından Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanı için oda sıcaklığında yapılan deneylerle gösterilmiştir (Şekil 1.12.). Bu çalışmada nanoakışkanın özgül ısısının hesaplanmasında  $c_p = 880 \text{ J/kgK}$  olarak alınmıştır [84].

### 1.5.3. Dinamik viskozite

Literatürde nanoakışkanların viskozitesi, hacimsel oranın fonksiyonu olarak farklı nano partiküller için farklı analitik modeller ve deneysel çalışmalardan elde edilen ifadeler geliştirilmiştir. Doğru viskozite modelinde, nanoakışkanların hem ısı geçişinde iyileştirme yapması hem de istenen basınç düşüşleri sağlaması beklenmektedir. Ne var ki günümüze kadar benzer nanoakışkan tipi ve hacimsel oran için geçerli olan tek bir viskozite ifadesi elde edilememiştir. Yaygın kullanılan modeller, genişletilmiş Einstein modeli [85], Brinkmann modeli [86] ya da deneysel ölçümlerin eğri uydurulmasından elde edilen yarı ampirik modellerdir. Nanoakışkanların viskozitesi için literatürde elde edilen ifadeler Tablo 1.2.'de özetlenmiştir.

Tablo 1.2. Nanoakışkanlar için viskozite ifadeleri

Model adı	Viskozite ifadesi	Açıklamalar
Einstein (1906) [85]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 2,5\phi)$	Çok küçük hacimsel oranlarda ( $\phi < \%2$ )
Saito (1950) [87]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + \frac{2,5}{1-\phi}\phi)$	Küresel rigid çok küçük partiküller
Mooney (1951) [88]	$\mu_{nf} = \exp(\frac{2,5\phi}{1-k\phi})\mu_s$ $1,35 < k < 1,91$	Yüksek oranlarda geçerli değildir.
Brinkman (1952) [86]	$\mu_{nf} = \mu_s/(1-\phi)^{2,5}$	Genişletilmiş Einstein modeli ( $\phi < \%4$ )
Simha (1952) [89]	$\mu_{nf} = \mu_s[1 + 2,5\phi + (\frac{125}{64\phi_{max}})\phi^2 + \dots]$	Küresel partiküller
Frankel ve Acrivos (1967) [90]	$\mu_{nf} = \mu_s[\frac{9}{8}(\frac{(\phi/\phi_{max})^{1/3}}{1-(\phi/\phi_{max})^{1/3}})]$	Düzgün dağılmış katı partiküller
Happel (1957) [91]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 5,5\phi)$	Küresel partiküller
Lundgren (1972) [92]	$\mu_{nf} = \mu_s(\frac{1}{1-2,5\phi})$	Küresel süspansiyonlarda
Batchelor (1977) [93]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 2,5\phi + 6,5\phi^2)$	Brownian hareketi ve izotropik süspansiyonlarda ( $\phi < \%10$ )
Graham (1981) [94]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 2,5\phi) + \mu_s \left[ \frac{4,5}{\left(\frac{h}{r_p}\right)\left(\frac{2+h}{r_p}\right)\left(\frac{1+h}{r_p}\right)^2} \right]$ h, iki partikül arasındaki mesafe, $r_p$ partikül yarıçapı	Çok küçük hacimsel oranlarda ( $\phi < \%2$ )
Masoumi ve ark. (2009) [95]	$\mu_{nf} = \mu_s + \left(\frac{\rho_s V_B d_p^2}{72C\delta}\right)$ $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi} d_p}, V_B = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18k_s T}{\pi\rho_s d_p}}, C = \frac{(a\phi + b)}{\mu_s}$	$Al_2O_3/Su$ ( $d_p=13$ nm, 28 nm)
Maiga ve ark. (2005) [96]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 7,3\phi + 123\phi^2)$ $\mu_{nf} = \mu_s(1 - 0,19\phi + 306\phi^2)$	$Al_2O_3/Su$ ( $d_p=28$ nm) $Al_2O_3$ /Etilen glikol ( $d_p=28$ nm)
Song ve ark. (2005) [97]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 56,5\phi)$	$SiO_2/Su$
Buongiorno ve ark. (2006) [98]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 5,45\phi + 108,2\phi^2)$ $\mu_{nf} = \mu_s(1 + 39,11\phi + 533,9\phi^2)$	$TiO_2/Su$ $Al_2O_3/Su$
Nguyen ve ark. (2007) [99]	$\mu_{nf} = \mu_s \times 0,904 \times e^{0,1482\phi}$ $\mu_{nf} = \mu_s(1 + 0,025\phi + 0,015\phi^2)$ $\mu_{nf} = \mu_s(1,475 - 0,319\phi + 0,051\phi^2 + 0,009\phi^3)$	$Al_2O_3/Su$ ( $d_p=47$ nm) $Al_2O_3/Su$ ( $d_p=36$ nm) $CuO/Su$ ( $d_p=29$ nm)
Grag ve ark. (2008) [100]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 11\phi)$	$Su$ / Etilen glikol $Cu$ / Etilen glikol

Tablo 1.2. (Devamı)

Model adı	Viskozite ifadesi	Açıklamalar
Duangthongsu ve Wongwises (2009) [101]	$\mu_{nf} = \mu_s(1,0266 + 0,0477\phi - 0,0112\phi^2)$ $\mu_{nf} = \mu_s(1,013 + 0,092\phi - 0,015\phi^2)$ $\mu_{nf} = \mu_s(1,018 + 0,112\phi - 0,0177\phi^2)$	TiO <sub>2</sub> /Su, T=15°C (%0,2 ≤ φ ≤ %2) TiO <sub>2</sub> /Su, T=25°C (%0,2 ≤ φ ≤ %2) TiO <sub>2</sub> /Su, T=35°C (%0,2 ≤ φ ≤ %2)
Chandrasekar ve ark. (2010) [102]	$\mu_{nf} = \mu_s \left[ 1 + 1631 \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right)^{2,8} \right]$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su
Corcione (2011) [103]	$\mu_{nf} = \mu_s \left( \frac{1}{1 - 34,87(d_p/d_s)^{-0,3}\phi^{1,03}} \right)$ $d_s = (6M/N\pi\rho_s)^{1/3}$	Su/ Etilen glikol oksit ve metal oksitpartiküller 10nm < d <sub>p</sub> < 150 nm 294 < T < 324 K (% 0,2 ≤ φ ≤ % 9)
Sundar ve ark. (2014) [104]	$\mu_{nf} = Ae^{B\phi}$ $A = 0,9396 \text{ \& } B = 24,16 \text{ (20:80 Etilen Glikol/Su)}$ $A = 0,9299 \text{ \& } B = 67,43 \text{ (40:60 Etilen Glikol/Su)}$ $A = 1,1216 \text{ \& } B = 77,56 \text{ (60:40 Etilen Glikol/Su)}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen glikol: Su
Hemmat Esfe ve ark. (2015) [105]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 32,795\phi - 7214\phi^2 + 714600\phi^3 - 0,1941 \times 10^8\phi^4)$	Ag-MgO/Su Hibrid nanoakışkan (0 ≤ φ ≤ % 2)
Bobo ve ark. (2012) [106]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 - 0,50437\phi + 1,74486\phi^2)$	Tek duvarlı karbon nanohorn/Su TiO <sub>2</sub> /Su
Khanafar ve Vafai (2011) [107]	$\mu_{nf} = \mu_s(1 + 0,164\phi + 302,34\phi^2)$ $\mu_{nf} = \mu_s(1 + 23,09\phi + 1525,3\phi^2)$ $\mu_{nf} = \mu_s(1 + 3,544\phi + 169,46\phi^2)$ $\mu_{nf} = 0,444 - 0,254\phi + 0,0368\phi^2 + 26,333\phi/T - 59,311\phi^2/T^2$ $\mu_{nf} = -0,4892 + 26,9036/T + 0,6837\phi + 24,1141/T^2 - 0,1785\phi^2 + 0,1818\phi/T + 27,015\phi^2/T^2 + 0,0132\phi^3 - 2940,1775\phi/T^3$ $\mu_{nf} = -0,1011 + 18,0162/T + 0,3619\phi + 164,0837/T^2 - 0,0966\phi^2 + 0,1609\phi/T + 22,4901\phi^2/T^2 + 0,0078089\phi^3 - 2316,3754\phi/T^3$ $\mu_{nf} = -0,4491 + 28,837/T + 0,574\phi - 0,1634\phi^2 + 23,053\phi^2/T^2 + 0,0132\phi^3 - 2354,735\phi/T^3 + 23,498\phi^2/d_p^2 - 3,0185\phi^3/d_p^2$ $\frac{\mu_{nf}}{\mu_s} = 1,0538 + 0,1448\phi - 3,363 \times 10^{-3}T - 0,0147\phi + 6,735 \times 10^{-5}T^2 - 1,337\phi/T$ $\mu_{nf} = 0,6002 - 0,569\phi + 0,0823\phi^2 + 28,8763\phi/T - 204,2202\phi^2/T^2 + 561,3175\phi^3/T^3$ $\mu_{nf} = -0,4262 + 8,4312/T + 0,898\phi + 524,7147/T^2 - 0,2217\phi^2 - 4,7329\phi/T + 70,3105\phi^2/T^2 + 0,0176\phi^3 - 5559,4641\phi/T^3$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen Glikol (d <sub>p</sub> =28 nm) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su (d <sub>p</sub> =13 nm) φ = 0 – 0,04 TiO <sub>2</sub> /Su (d <sub>p</sub> =27 nm) φ = 0 – 0,1 20 ≤ T(°C) ≤ 70 φ = %1,34, %2,78 (d <sub>p</sub> =13 nm) 20 ≤ T(°C) ≤ 70 %1 ≤ φ ≤ %9,4 (d <sub>p</sub> =47 nm) 20 ≤ T(°C) ≤ 70 % 1 ≤ φ ≤ % 9,1 (d <sub>p</sub> =36 nm) 20 ≤ T(°C) ≤ 70 % 1 ≤ φ ≤ % 9 13 nm ≤ d <sub>p</sub> ≤ 131 nm 15 ≤ T(°C) ≤ 35 % 0,2 ≤ φ ≤ % 2 TiO <sub>2</sub> /Su (d <sub>p</sub> =21 nm) 20 ≤ T(°C) ≤ 70 φ = %0,99, %2,04, %3,16 TiO <sub>2</sub> /Su (d <sub>p</sub> =27 nm) 20 ≤ T(°C) ≤ 70 %1 ≤ φ ≤ %9 CuO/Su (d <sub>p</sub> =29 nm)
Kulkarni ve ark. (2007) [108]	$\ln(\mu_{nf}) = A \left( \frac{1}{T} \right) - B$ $A = 20587\phi^2 + 15857\phi + 1078,3$ $B = -107,12\phi^2 + 53,54\phi + 2,8715$	CuO/Su (d <sub>p</sub> =29 nm) 278 < T(K) < 323 φ = % 5 – % 15

Tablo 1.2. (Devamı)

Model adı	Viskozite ifadesi	Açıklamalar
Koo ve Kleinstruer (2005) [109]	$\mu_{nf} = \mu_{statik} + \mu_{Brownian}$ $\mu_{Brownian} = \frac{k_{Brownian}}{k_s} + \frac{\mu_s}{Pr_s}$ $k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \rho_s \phi \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} f(\phi, T)$ $f(\phi, T) = (-6,04\phi + 0,4705)T + (1722,3\phi - 134,63)$ $\beta = \begin{cases} 0,0137(100\phi)^{-0,8229}, & \phi < 0,01 \\ 0,0011(100\phi)^{-0,7272}, & \phi > 0,01 \end{cases}$ $\phi = \%1 < \phi < \%4, \quad 300 < T < 325 \text{ K}$ $k_B, \text{ Stefan-Boltzmann sabiti}$	CuO/Su 300<T(K)<325 $\phi = \%1 - \%4$
Namburu ve ark. (2009) [110]	$\log(\mu_{nf}) = Ae^{-BT}$ $A = -0,29956\phi^3 + 6,738\phi^2 - 55,444\phi + 236,11$ $B = (-6,4745\phi^3 + 140,03\phi^2 - 1478,5\phi + 20341)/10^6$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen Glikol+Su (d <sub>p</sub> =53 nm) 278<T<323 K $\phi = \%1 - \%10$
Eilers (1941) [111]	$\mu_{nf} = \mu_s \left(1 + \frac{1,25\phi}{1 - \phi/0,78}\right)$	Zift küresellerin süspansiyonu
Tseng ve Lin (2003) [112]	$\mu_{nf} = 13,47e^{35,98\phi}$	TiO <sub>2</sub> /su $\phi = 0,05 - 0,12$
Abu-Nada (2009) [113]	$\mu_{nf} = -0,155 - \frac{19,582}{T} + 0,794\phi + \frac{2094,47}{T^2} - 0,192\phi^2 - \frac{8,11\phi}{T}$ $- \frac{27463,863}{T^3} + 0,0127\phi^3 + \frac{1,6044\phi^2}{T} + \frac{2,175}{T^2}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su (d <sub>p</sub> =36 nm, 47 nm) CuO/su (d <sub>p</sub> =27 nm) $\phi = \%1 - \%9,4$ 295< T <348 K
Timofeeva ve ark.(2009) [114]	$\mu_{nf} = \mu_s (1 + A_1\phi + A_2\phi^2)$ <p>Yassı tanecik <math>\begin{cases} A_1 = 37,1 \\ A_2 = 612,6 \end{cases}</math>            Kanat <math>\begin{cases} A_1 = 14,6 \\ A_2 = 123,3 \end{cases}</math>            Silindir <math>\begin{cases} A_1 = 13,5 \\ A_2 = 904,4 \end{cases}</math>            Küp <math>\begin{cases} A_1 = 1,9 \\ A_2 = 471,4 \end{cases}</math></p>	Küresel olmayan partiküller
Esfe ve Saedodin (2014) [115]	$\mu_{nf} = 0,9118\exp(5,49\phi - 0,00001359T^2) + 0,033\ln(T)$	ZnO/Etilen Glikol (d <sub>p</sub> =18 nm) $\phi = \%0,25 - \%5$ 298 <T< 323 K
Esfe ve ark. (2014) [116]	$\mu_{nf} = \mu_s (1 + 11,61\phi + 109\phi^2)$	MgO/Su (d <sub>p</sub> =40 nm) $\phi = \%0,0625 - \%1$
Sharma ve ark. (2014) [117]	$\mu_{nf} = \mu_s \left(1 + \frac{\phi}{100}\right)^{11,3} \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{-0,038} \left(1 + \frac{d_p}{170}\right)^{-0,061}$	SiO <sub>2</sub> /Su TiO <sub>2</sub> /su $\phi = \%0 - \%4$ 20< d <sub>p</sub> <150 nm 293< T < 343 K
Esfe ve ark. (2015) [118]	$\mu_{nf} = \mu_s [1 + (0,1 \phi^{0,69574} d_p^{0,44708})]$	Fe/Su (37nm, 71nm, 98nm) $\phi = \%0,0313 - \%1$

Bu çalışmada, dinamik viskozite hesaplamalarında Einstein [85] tarafından elde edilen model kullanılmıştır. Çünkü bu model, partikül boyutundan, tipinden, akışkan türünden ve nanoakışkan sıcaklığından bağımsızdır. Bu model;



$$\mu_{nf} = (1 + 2,5 \varnothing) \mu_s \text{ [kg / ms]} \quad (1.6)$$

şeklindedir.

Bu model sonsuz seyreltilmiş karışımda partiküllerin birbiriyle olan etkileşimlerin ihmal edildiği kavramsal hidrodinamik denklemlerle elde edilmiştir ve % 2 hacimsel orandan düşük nanoakışkanlar için geçerlidir.

#### 1.5.4. Isı iletim katsayısı

Literatürde dinamik viskozitede olduğu gibi nanoakışkanların ısı iletim katsayısının tahmin edilmesinde teorik modeller geliştirilmiştir. Isı iletim katsayısındaki iyileşmenin altında yatan 6 farklı mekanizma şu şekilde özetlenebilir: (a) etrafındaki sıvıyı etkileyen nanopartiküllerin Brownian hareketinden dolayı mikro seviyedeki karışım, (b) karbon nanotüplerin bağlandığı ya da partiküllerin kümelenmesinden oluşan yüksek ısı iletim yolu, (c) düşük ısıl dirençten dolayı sıvı moleküllerin etrafında nanopartiküllerin katmanlaşması, (d) bazı metalik partiküllerin olması durumunda yüksek ısı iletimi, (e) nanopartikül ve kayma gerilmesi-katman etkileşimi şeklindedir. Ayrıca nanoakışkanların ısı iletim katsayısı nanopartikül tipine, boyutuna, şekline, hacimsel oranına, akışkan türüne, katkı maddelerine ve kümelenmeye, sıcaklığa, sıcaklık gradyanına ve ısı iletimde akışkan ile nanopartikül etkileşime gibi diğer faktörlere de bağlı olmaktadır. Genel olarak, ısı iletim katsayısının tahmininde kullanılan modeller iki kategoriye ayrılmaktadır: (1) ısının iletimi sırasında akışkanda nanopartiküllerin hareketsiz durduğu varsayılan Maxwell [119] ve Hamilton-Crosser [120] modeli, (2) nanopartiküllerin akışkan içerisinde sahip olduğu rastgele hareket (Brownian hareketi) ya da dolaylı yollardan partikül hareketiyle mikro sıvının taşınması fikri temel alındığı modellerdir [12]. Tablo 1.3.'de de literatürdeki nanoakışkanlar için elde edilen ısı iletim katsayısındaki ifadeler verilmektedir.

Tablo 1.3. Nanoakışkan ısı iletim katsayısı modelleri

Araştırmacı	Isı iletim katsayısı ifadesi	Açıklamalar
Maxwell (1904) [119]	$k_{nf} = \left[ \frac{k_p + 2k_s + 2(k_p - k_s)\phi}{k_p + 2k_s - (k_p - k_s)\phi} \right] k_s$	Akışkan içerisinde askıda kalan katı partiküller
Hamilton ve Crosser (1962) [120]	$k_{nf} = \left[ \frac{k_p + (n-1)k_s - (n-1)(k_s - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_s + (k_s - k_p)\phi} \right] k_s$ $n = \begin{cases} 3, & \text{küresel partiküller} \\ 6, & \text{silindirik partiküller} \end{cases}$	Partikül şeklinin göz önüne alındığı genişletilmiş Maxwell ifadesinin
Yu ve Choi (2003) [67]	$k_{nf} = \left[ \frac{k_{np} + 2k_s + 2(k_{np} - k_s)(1 + \beta_1)^3\phi}{k_{np} + 2k_s - (k_{np} - k_s)(1 + \beta_1)^3\phi} \right] k_s$ $k_{nf} = \left[ \frac{2(1-\gamma) + (1 + \beta_1)^3(1 + 2\gamma)\gamma}{-(1-\gamma) + (1 + \beta_1)^3(1 + 2\gamma)} \right] k_s$ $\beta_1 = \frac{h}{r_p}, \gamma = \frac{k_{katman}}{k_p}$	Genişletilmiş Maxwell Küresel partiküller, nanokatman
Koo ve Kleinstreuer (2005) [121]	$k_{nf} = k_{statik} + k_{Brownian}$ $= \left[ \frac{k_p + 2k_s - 2(k_s - k_p)\phi}{k_p + 2k_s + (k_s - k_p)\phi} \right] k_s$ $+ 5 \times 10^4 \beta \rho_s c_{p,s} \phi \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} f(T, \phi)$ $f(\phi, T) = (-6,04\phi + 0,4705)T + (1722,3\phi - 134,63)$ $\beta = \begin{cases} 0,0137(100\phi)^{-0,8229}, & \phi < 0,01 \\ 0,0011(100\phi)^{-0,7272}, & \phi > 0,01 \end{cases}$ $\phi = \% 1 < \phi < \% 4, \quad 300 < T < 325 \text{ K}$	Maxwell modeli Brownian hareketi Cu/Su, CuO/Su, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su, Ti <sub>2</sub> O/Su
Bruggeman (1935) [122]	$k_B = 1,3807 \times 10^{-23} \text{ J/K, Stefan-Boltzmann sabiti}$ $k_{nf} = \frac{1}{4} [(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_s] + \frac{k_s}{4} \sqrt{\Delta}$ $\Delta = [(3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_p}{k_s}\right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{k_p}{k_s}\right)]$	Partikül hacimsel oranının göz önüne alınmadan küresel partiküller
Wasp (1977) [123]	$k_{nf} = \left[ \frac{k_p + 2k_s + 2(k_p - k_s)\phi}{k_p + 2k_s - (k_p - k_s)\phi} \right] k_s$	Hamilton ve Crosser n=3
Jeffery (1973) [124]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = 1 + 3\eta\phi^2 + \phi^2(3\eta^2 + \frac{3\eta^2}{4} + \frac{9\eta^3}{16} \frac{\kappa + 2}{2\kappa + 3} + \dots)$ $\kappa = \frac{k_p}{k_f}, \eta = \frac{\kappa - 1}{\kappa + 2}$	Küresel partiküllerin birbiriyle rastgele etkileşimi
Davis (1986) [125]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = 1 + \frac{3(\kappa - 1)}{(\kappa + 2) - \phi(\kappa - 1)} [\phi + f(\kappa)\phi^2 + 0(\phi^3)]$ $\kappa = \frac{k_p}{k_f}, \quad \kappa = 10 \text{ için } f(\kappa) = 2,5$ $\kappa = \infty \text{ için } f(\kappa) = 0,5$	Partiküllerin birbiriyle rastgele etkileşimi
Lu ve Lin (1996) [126]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = 1 + a\phi + b\phi^2$ küresel partiküller $\begin{cases} \kappa = 10 \text{ için } & a = 2,25, & b = 2,27 \\ \kappa = \infty \text{ için } & a = 3, & b = 4,51 \end{cases}$	Küresel ve küresel olmayan partiküller
Yu ve Choi (2004) [127]	$k_{nf} = \left( 1 + \frac{\eta f_e A}{1 - f_e A} \right) k_s$ $A = \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} \frac{(k_{pj} - k_s)}{k_{pj} + (n-1)k_s}$ $f_e = \frac{\phi \sqrt{(a^2 + t)(b^2 + t)(c^2 + t)}}{abc}, \quad t, \text{ nanokatman,}$ iğne şekilli elipsoit $a \gg b = c, \quad a = 0, \quad b = c = 1/2$ disk şekilli elipsoit $a = b \gg c, \quad a = 0, \quad b = 0, \quad c = 1$ küre şekilli $a = b = c, \quad a = b = c = 1/3$ $n = \begin{cases} 3, & \text{küresel partiküller} \\ 6, & \text{silindirik partiküller} \end{cases}$	Hamilton-Crosser modeli küresel olmayan partiküller, nanokatman

Tablo 1.3. (Devamı)

Araştırmacı	Isı iletim katsayısı ifadesi	Açıklamalar
Xue (2003) [128]	$9 \left( 1 - \frac{\phi}{\lambda} \right) \frac{k_{nf} - k_s}{2k_{nf} + k_s} + \frac{\phi}{\lambda} \frac{k_{nf} - k_s}{k_{nf} + B_{2,x}(k_{c,x} - k_{nf})} + \frac{\phi}{\lambda} \frac{4}{2k_{nf} + (1 - B_{2,x})(k_{c,y} - k_{nf})} = 0$ $\lambda = \frac{abc}{(a+t)(b+t)(c+t)}$	Maxwell modeli temelli Küresel partiküller nanokatman
Xue ve Xu (2005) [129]	$\left( 1 - \frac{\phi}{\kappa} \right) \frac{k_{nf} - k_s}{2k_{nf} + k_s} + \frac{\phi}{\kappa} \frac{(k_{nf} - k_{küre})(2k_{küre} + k_p) - \kappa(k_p - k_{küre})(2k_{küre} + k_{nf})}{2(k_{nf} + k_{küre})(2k_{küre} + k_p) + 2\kappa(k_p - k_{küre})(k_{küre} - k_{nf})} = 0$	Bruggeman modeli temelli Küresel partiküller nanokatman
Xie ve ark. (2005) [130]	$\frac{k_{nf} - k_s}{k_s} = 3\theta\phi_T + \frac{3\theta^2\phi_T^2}{1 - \theta\phi_T}$ $\phi_T = \frac{4}{3}\pi(r_p + t)^3 N_p = \phi(1 + \beta), \beta = \frac{t}{r_p}$	Fourier soğuma yasası, düşük partikül oranı, nanokatman
Wang ve ark. (2003) [131]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = \frac{1 - \phi + 3\phi \int_0^\infty \left( \frac{k_{cl}(r)n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_s} \right) dr}{1 - \phi + 3\phi \int_0^\infty \left( \frac{k_s n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_s} \right) dr}$	Nanopartikülün yüzeyde toplanma ve boyut etkisinin göz önüne alındığı
Xuan ve ark. (2003) [132]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = \frac{k_p + 2k_s - 2\phi(k_s - k_p)}{k_p + 2k_s + \phi(k_s - k_p)} + \frac{\rho_p \phi c_p}{2k_s} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \mu}}$	Sıcaklık, hacimsel oran, partikül boyutu, rastgele hareket etkisi
Jang ve Choi (2004) [133]	$k_{nf} = k_s(1 - \phi) + k_p\phi + 3C \frac{d_s}{d_p} k_s Re_{dp}^2 Pr\phi$ <p>C, orantı sabiti</p>	Sıvı moleküllerin çarpışması, nanopartikülün ısı yayılımı, Brownian hareketinden dolayı partiküllerin birbiriyle çarpışması, sıvı molekül ile nanopartikül etkileşimi
Prasher ve ark. (2005) [134]	$k_{nf} = (1 + A Re^m Pr^{0,33} \phi) \left[ \frac{k_p + 2k_s + 2\phi(k_p - k_s)}{k_p + 2k_s + \phi(k_p - k_s)} \right]$ <p>CuO için A = 40000, m = 2,5</p>	Maxwell temelli model, nanopartiküllerin Brownian hareketinden dolayı taşınımın göz önüne alındığı
Minsta ve ark. (2009) [135]	$k_{nf} = (1 + 1,72\phi)k_s$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su
Timofeeva ve ark. (2007) [136]	$k_{nf} = (1 + 3\phi)$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su
Khanafer ve Vafai (2011) [137]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = 1 + 1,0112\phi + 2,4375\phi \left( \frac{47}{d_p} \right) - 0,0248\phi \left( \frac{k_p}{0,613} \right)$	CuO/Su Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su
Corcione (2011) [138]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = 1 + 4,4 Re_p^{0,4} Pr_s^{0,66} \left( \frac{T_{nf}}{T_{fr}} \right)^{10} \left( \frac{k_p}{k_s} \right)^{0,03} \phi^{0,66}$ $Re = \frac{2\rho_s k_B T}{\pi \mu_s^2 d_p}$ $k_B = 1,3807 \times 10^{-23} \text{ J/K, Stefan-Boltzmann sabiti}$ $T_{fr}, akışkanın donma noktası$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su
Yiamsawasd (2012) [139]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = A \phi^B T^C \left( \frac{k_p}{k_s} \right)^D$ $\left. \begin{array}{l} A = 0,945867 \\ B = 0,073528 \\ C = 0,03616 \\ D = -0,00585 \end{array} \right\} \text{Al}_2\text{O}_3/\text{Su}$ $\left. \begin{array}{l} A = 0,916205 \\ B = 0,066817 \\ C = 0,018789 \\ D = 0,016229 \end{array} \right\} \text{TiO}_2/\text{Su}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su TiO <sub>2</sub> /Su

Tablo 1.3. (Devamı)

Araştırmacı	Isı iletim katsayısı ifadesi	Açıklamalar
Patel ve ark. (2010) [140]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = 1 + 0,135 \left(\frac{k_p}{k_s}\right)^{0,273} \phi^{0,467} \left(\frac{T}{20}\right)^{0,547} \left(\frac{100}{d_p}\right)^{0,234}$	Metal ve metal oksitler için kabul edilebilir
Hassani ve ark. (2015) [141]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = 1,04\phi^{1,11} \left(\frac{k_p}{k_s}\right)^{0,33} Pr^{-1,7} \left[ \frac{1}{Pr^{-1,7}} - \frac{262}{\left(\frac{k_p}{k_s}\right)^{0,33}} + \left( 135 \left( 0,135 \left(\frac{d_{ref,cap}}{d_p}\right)^{0,23} \left(\frac{v_s}{d_p V_{browian}}\right)^{0,82} \left(\frac{c_p}{T^{-1}V_{browian}^2}\right) \left(\frac{T_s}{T}\right)^{-7} \right) \right]$ $V_{browian} = \sqrt{\frac{18 k_B T}{\pi \rho_s d_p^3}}$	Çeşitli nanoakışkanlar için Buckingham- $\pi$ teorimi
Azmi ve ark. (2012) [142]	$k_{nf} = k_s 0,8938 \left(1 + \frac{\phi}{100}\right)^{1,37} \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{0,2777} \left(1 + \frac{d_p}{150}\right)^{-0,0336} \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_s}\right)^{0,01737}$	Okside nanopartiküller /Su 20 ≤ d <sub>p</sub> ≤ 150 nm 293 < T < 343 K ( $\phi$ < % 4)
Hemmat Esfe ve ark. (2015) [143]	$k_{nf} = \frac{0,1747 \times 10^5 + \phi}{(0,1747 \times 10^5 - 0,1498 \times 10^6 \phi + 0,1117 \times 10^7 \phi^2 + 0,1997 \times 10^9 \phi^3)} k_s$	Ag-MgO/Su hibrid nanoakışkan $\phi = 0 - 0,03$
Sundar ve ark. (2014) [144]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = A + B\phi$ A = 1,1236 & B = 8,0175 (20:80 Etilen Glikol/Su) A = 1,0806 & B = 10,164 (40:60 Etilen Glikol/Su) A = 1,0618 & B = 10,448 (60:40 Etilen Glikol/Su)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen glikol :Su
Chon ve ark. (2005) [145]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = 1 + 64,7\phi^{0,764} \left(\frac{d_s}{d_p}\right)^{0,369} \left(\frac{k_p}{k_s}\right)^{0,7476} Re^{1,2321} Pr^{0,9955}$ $Re = \frac{\rho_s k_B T}{3\pi\mu_s^2 l_s}, Pr = \frac{H_s}{\rho_s \alpha_s}$ $k_B = 1,3807 \times 10^{-23} \text{ J/K, Stefan- Boltzmann sabiti}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su Brownian hareketi
Li (2008) [146]	$k_{nf} = \left[ \frac{k_p + 2k_s - 2(k_s - k_p)\phi}{k_p + 2k_s + (k_s - k_p)\phi} \right] k_s + 5 \times 10^4 \beta \rho_s c_{p,s} \phi \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} g(T, \phi, d_p)$ $g(T, \phi, d_p) = (a + b \ln(d_p) + c \ln(\phi) + d \ln(d_p) \ln(\phi) + e \ln(d_p)^2) \ln(T) + (g + h \ln(d_p) + i \ln(\phi) + j \ln(\phi) \ln(d_p) + k(d_p)^2)$	Koo ve Kleinstreue modeli yeniden gözden geçirilerek
Kihm ve ark. (2011) [147]	$\frac{k_{nf}}{k_s} = [1 + C \frac{\phi^a k_B \rho_p c_{p,p} T^{1,5}}{k_f h \mu^{0,5} d_p^{0,5}} \exp(-3,8 T_{kaynama}/T) \left(\frac{c_{p,s}}{c_{p,p}}\right)^b]$ $k_B = 1,3807 \times 10^{-23} \text{ J/K, Stefan- Boltzmann sabiti}$ a = 0,7, b = 1,5, C = 3,58 × 10 <sup>-14</sup> , h Planck sabiti	Mikro taşınım hızı, nanopartikül ısı yayılımı ve topaklanma etkisini Brownian hareketinin göz önüne alındığı Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CuO 10 ≤ d <sub>p</sub> ≤ 150

Bu çalışmada, Yu ve Choi [67] tarafından elde edilen ısı iletim katsayısı modeli kullanılmıştır. Çünkü bu model partikül boyutundan, tipinden, akışkan türünden ve nanoakışkan sıcaklığından bağımsızdır. Bu model, nano katmanın etkisini içeren küresel partiküller için Maxwell [119] tarafından önerilen denklem geliştirilerek elde edilmiştir.

Literatürde daha çok Maxwell ısı iletim katsayısı model kullanımı tercih edilmektedir. Ancak, Hamilton-Crosser [120] ve Yu-Choi [67] ısı iletim katsayısı modelleri Maxwell modeline göre daha iyi sonuçlar vereceği bilinmektedir.

Vajpai ve ark. [148] tarafından yapılan çalışmada Hamilton-Crosser [120] ve Yu-Choi [67] modelleri ile KD-2 pro cihazıyla ölçülen deneysel ısı iletim katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Yu-Choi modelinin deneysel ısı iletim katsayısına daha yakın sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.  $k_{np} = 8,4 \text{ W/mK}$  ve  $k_s = 0,61 \text{ W/mK}$  değerleri için hesaplanan ve ölçülen ısı iletim katsayıları Tablo 1.4.'de verilmektedir.

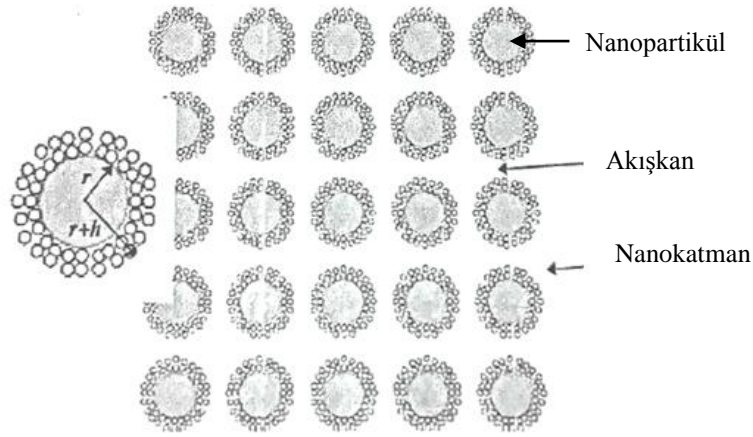
Tablo 1.4. Isı iletim katsayısı model ve deneysel karşılaştırılması

Hacimsel oran (%)	Hamilton-Crosser model ısı iletim katsayısı (W/mK)	Yu-Choi model ısı iletim katsayısı (W/mK)	Deneysel ısı iletim katsayısı (W/mK)
0,25	0,614	0,617	0,640
0,5	0,619	0,625	0,669
0,75	0,623	0,633	0,706
1	0,628	0,641	0,777

Yu-Choi [67] modeli,

$$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2k_s + 2(k_{np} - k_s)(1 + \beta_1)^3 \phi}{k_{np} + 2k_s - (k_{np} - k_s)(1 + \beta_1)^3 \phi} k_s \left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right] \quad (1.7)$$

şeklindedir.



Şekil 1.13. Nanoakışkanın yapısal olarak kesit alanının şematik gösterimi [148]

Şekil 1.13.'de görüldüğü gibi  $\beta_1$  nanokatman olup, nano katman kalınlığının ( $h$ ) orijinal partikül yarı çapına oranı ( $r$ ) şeklindedir. Nano katman kalınlığı genel olarak nanopartikül yarıçapının % 19-% 22 arasında olduğu belirtilmiştir. Hesaplamalarda  $\beta_1 = 0,2$  ve  $k_n = 35 \text{ W/mK}$  alınmıştır [84,149].

Yu-Choi [67] modelinin geçerliliği, Samsun 19 Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Ana Bilim Dalı laboratuvarında bulunan KD-2 Pro ısı iletim katsayısı cihazıyla yapılan ölçümlerle de doğrulanmıştır. Ölçümleri yapılmasında akışkanın viskozitesine uygun Agar kimyasalı hazırlanan nanoakışkanlara ilave edilmiştir. 24 °C oda sıcaklığında her bir hacimsel oranda 5 farklı ölçüm için elde edilen sonuçlar Tablo 1.5.'de verilmektedir.

Tablo 1.5. Hacimsel orana ve sıcaklığa göre deneysel ısı iletim katsayısı değerleri

Hacimsel oran	% 0,25		% 0,5		% 0,75		% 1	
	Sıcaklık (°C)	k (W/mK)	Sıcaklık (°C)	k (W/mK)	Sıcaklık (°C)	k (W/mK)	Sıcaklık (°C)	k (W/mK)
Ölçüm sayısı								
1	21,41	0,576	20,63	0,586	20,81	0,634	21,68	0,625
2	21,41	0,572	20,67	0,596	20,81	0,594	21,69	0,626
3	21,43	0,575	20,39	0,586	20,8	0,606	21,69	0,631
4	21,4	0,569	20,72	0,588	20,82	0,604	21,68	0,634
5	21,32	0,567	20,7	0,586	20,82	0,608	21,68	0,633

Deneysel olarak elde edilen ısı iletim katsayısı değerleri ile Yu-Choi modeli ile hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri arasında en fazla % 5,6 en az % 0,45 lik bir hata görüldüğünden, seçilen ısı iletim katsayısı modelinin ısı iletim katsayısının hesaplanmasında tercih edilmiştir.

### 1.5.5. Nanoakışkanın hazırlanması

Nanoakışkanların hazırlanmasında nanopartikülün kullanımı ısı geçişini iyileştirmesi, termofiziksel özelliklerin kontrolü ve süspansiyonun kararlılığının sağlanması önemlidir. Literatürde, nanoakışkanların hazırlama yöntemleri iki şekildedir. Tek adım (single step) ve iki adım (two step) yöntemleridir.

Tek adım yönteminde, nanopartiküllerin ve nanoakışkanın hazırlanması eş zamanlı olarak yapılmaktadır. Nanopartiküller direkt olarak fiziksel buhar birikimi (physical vapour deposition-PVD) yöntemiyle ya da sıvı kimyasal yöntemiyle (condensing nanophase powders from the vapour phase directly into a flowing low-vapor-pressure fluid, VEROS) hazırlanmaktadır. Bu yöntemde, nanopartiküllerin çökmesi en aza inmekte ve depolama, taşıma, kurutma ve nanopartikül dağılım gibi nanoakışkan kararlılığı artmaktadır. Ancak bu yöntem, küçük miktarlarda ve sadece düşük buhar basıncına sahip olan akışkanlar için uygun olup, hazırlama maliyetinin yüksek olmasından dolayı endüstriyel ölçekteki üretimler için tercih edilmemektedir [150-153].

İki adım yönteminde, nanopartikül üretimi ve nanoakışkanın hazırlanması iki kısma ayrılmıştır. Önce, kuru nanopartikül/nanotüpler üretilir daha sonra bu partiküllerin uygun akışkan içerisinde fiziksel ve mekanik işlemlerle dağılımı sağlanır. Bu yöntemle, farklı boyutlarda ve geometride partiküller kullanılarak çeşitli nanoakışkanlar elde edilebilir. Ayrıca, bu yöntem tek adım yöntemine göre daha basittir. Çünkü hazır nanopartiküller piyasadan kolayca satın alınıp, akışkan içerisinde dağılımı yapılır. Fakat partiküllerin yüksek yüzey enerjisine sahip olmasından dolayı partiküllerin bir araya toplanması, kümelenmesinin yanı sıra bazı zamanlarda da nanoakışkan kabının dipinde çökme ve kanallarda da tıkanmalara sebep

olabilmektedir. Bundan dolayı nanoakışkanlarda partiküller kısmi olarak dağılacak ve bu durum da tek adım yöntemiyle kıyaslandığında ısı geçişinde iyileşme daha düşük olacaktır. Bu yöntem oksitlenen partiküller ve karbon nanotüpler için uygun bir yöntem olup, metal nanopartiküller için daha az uygun olduğu bilinmektedir. Bu yüzden çoğu araştırmacılar tarafından kararlı nanoakışkan hazırlanması bakımından ve daha güvenilir bir yöntem olduğu için iki adım yöntemini tercih etmektedirler [154-156].

Bu yöntemle iyi bir nanoakışkan hazırlanmasından iki önemli kriter vardır [157].

Bunlar;

- a. Dağılma: Nano partiküllerin akışkan içerisinde dağılması.
- b. Yüzey Yükü (Zeta Potansiyeli): Süspansiyonda partiküller arasındaki itme kuvvetine neden olan bu etkiden dolayı partiküller arasındaki zeta potansiyelinin mutlak değeri mümkün olduğunca büyük olmalıdır.

Ghadimi ve ark. [158] tarafından yapılan çalışmada, nanopartiküllerin bir araya toplanması, çökmesi ve süspansiyonun kararlılığının sağlanmasında ve iyileşmesinde üç yaygın yöntemin olduğunu belirtmişlerdir. Bu yöntemler: (1) yüzey aktif maddesi (surfactant) / katalizör (activator), (2) partikülün yüzey kimyasının değiştirilmesi (yüzey yükünden dolayı), (3) süspansiyonlarda partiküllerin bir araya gelmesini önlemek için ultrasonik enerji kullanılmasıdır. Nanoakışkan hazırlamak için bu yöntemlerin tümü kullanıldığı gibi, iki ya da tek yöntem birlikte kullanılabilir. Bu yüzden nanoakışkanın kararlılığı için standart bir yöntem yoktur [15, 71, 102, 159-163]. Bu çalışmada nanoakışkanın hazırlanmasında kolay ve hızlı bir yöntem olduğundan ultrasonik enerji yöntemi tercih edilmiştir. Ultrasonik enerji yönteminde; süspansiyon içerisindeki partiküllerin bir araya toplanması ve çökmesi ultrasonik enerjiyle engellenmektedir. Fakat bu yöntemde hızlı çökme sonucunda tıkanma ve bir araya toplanma problemi meydana gelebilir [101, 159, 164-174]. İstenilen hacimsel oranda nanoakışkan hazırlamak için, karışıma eklenmesi gereken nano partikül miktarı hesaplanarak saf suyun içerisine ilave edilmektedir. Bu miktar (1 lt nanoakışkan için),

$$m_p = \emptyset \times 1 \times 10^{-3} \rho_p \text{ [kg]} \quad (1.8)$$



şeklindedir. Burada  $\emptyset$  partikülün hacimsel oranı  $\rho_p$  partikülün yoğunluğu (3700 kg/m<sup>3</sup>) olup  $m_p$  karışıma eklenmesi gereken partikül miktarıdır [175, 176].

Sergis ve Hardalupas [59] yapmış oldukları istatistiksel çalışma sonuçlarından elde ettikleri diğer önemli sonuç da, literatürde daha çok Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano partikülün kullanıldığıdır. Çünkü Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano partikülü diğer partiküllere nazaran daha ucuz ve daha kolay piyasadan temin edilebilmektedir. Şekil 1.3.'e göre de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülünün ısı iletim katsayısı diğer metal oksitlere göre daha yüksektir. Ayrıca, literatürde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoakışkanında ısı geçişindeki iyileşme % 1 hacimsel orandan sonra azaldığı belirtilmiştir. Bu gerekçeyle nanoakışkanın hazırlanmasında kullanılacak nano partikülün maliyetleri, uygulamaları ve ısı geçişindeki iyileşmeleri göz önüne alındığında bu çalışmada da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ortalama çapı 40 nm, küresel şekilli, alfa fazlı, beyaz renkli) nano partikülü ve bu partikül için en yüksek hacimsel oran % 1 tercih edilmiştir.

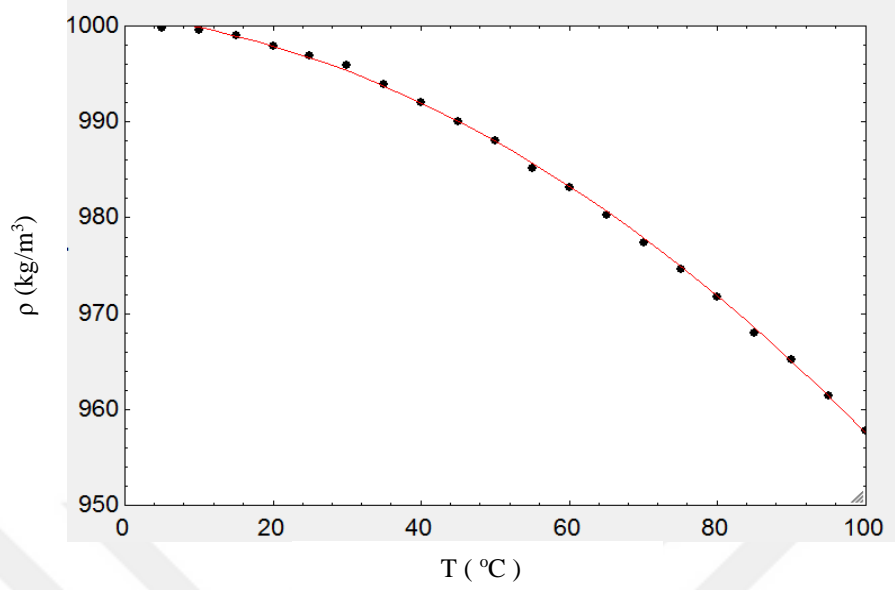
#### 1.5.6. Suyun sıcaklığa bağlı özellikleri

Tablo 1.6.'da verilen suyun sıcaklığa bağlı özellikleri kullanılarak yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve dinamik viskozite değerleri elde edilmiştir. Bu özelliklerin, her bir sıcaklık değeri için tablo okumada karşılaşılan zaman kaybını ve hesaplamalardan kaynaklanabilecek hataları önlemek amacıyla en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle, suyun sıcaklığa (0 °C-100 °C) bağlı özellikleri kullanılarak her bir özellik için yazılım programıyla sıcaklığa bağlı polinomlar elde edilmiştir. Suyun sıcaklığa bağlı özellikleri için elde edilen polinomları Şekil 1.14., Şekil 1.15., Şekil 1.16. ve Şekil 1.17.'de verilmektedir [177].

Tablo 1.6. Suyun sıcaklığa bağlı termofiziksel özellikleri

Sıcaklık (°C)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül Isı (J/kgK)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Dinamik Viskozite (kg/ms)
0,01	999,8	4217	0,561	1,792x10 <sup>-3</sup>
5	999,9	4205	0,571	1,519x10 <sup>-3</sup>
10	999,7	4194	0,580	1,307x10 <sup>-3</sup>
15	999,1	4185	0,589	1,138x10 <sup>-3</sup>
20	998,0	4182	0,598	1,002x10 <sup>-3</sup>
25	997,0	4180	0,607	0,891x10 <sup>-3</sup>
30	996,0	4178	0,615	0,798x10 <sup>-3</sup>
35	994,0	4178	0,623	0,720x10 <sup>-3</sup>
40	992,1	4179	0,631	0,653x10 <sup>-3</sup>
45	990,1	4180	0,637	0,596x10 <sup>-3</sup>
50	988,1	4181	0,644	0,547x10 <sup>-3</sup>
55	985,2	4183	0,649	0,504x10 <sup>-3</sup>
60	983,3	4185	0,654	0,467x10 <sup>-3</sup>
65	980,4	4187	0,659	0,433x10 <sup>-3</sup>
70	977,5	4190	0,663	0,404x10 <sup>-3</sup>
75	974,7	4193	0,667	0,378x10 <sup>-3</sup>
80	971,8	4197	0,670	0,355x10 <sup>-3</sup>
85	968,1	4201	0,673	0,333x10 <sup>-3</sup>
90	965,3	4206	0,675	0,315x10 <sup>-3</sup>
95	961,5	4212	0,677	0,297x10 <sup>-3</sup>
100	957,9	4217	0,679	0,282x10 <sup>-3</sup>

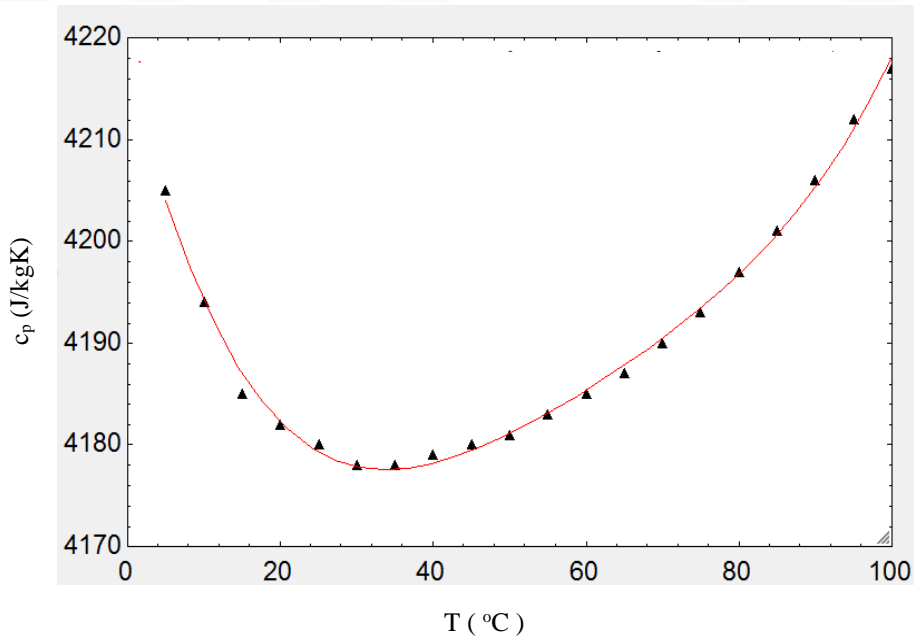
Yoğunluk;



Şekil 1.14. Suyun sıcaklığa bağlı yoğunluğu

$$\rho_s = 1001,07 - 0,0885789 \times T - 0,00346617 \times T^2 \left[ \text{kg} / \text{m}^3 \right] \quad (R^2 = \%99,94) \quad (1.9)$$

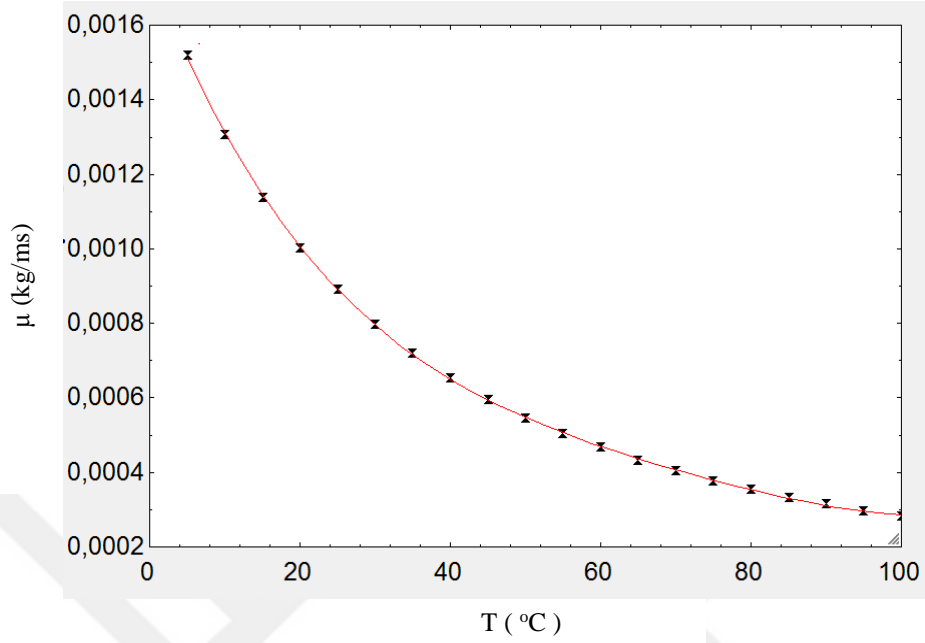
Özgül ısı;



Şekil 1.15. Suyun sıcaklığa bağlı özgül ısı

$$c_{p,s} = 4217,25 - 3,01528 \times T + 0,0780849 \times T^2 - 0,000810854 \times T^3 + 0,00000332379 \times T^4 \left[ \text{J} / \text{kgK} \right] \quad (R^2 = \%99,61) \quad (1.10)$$

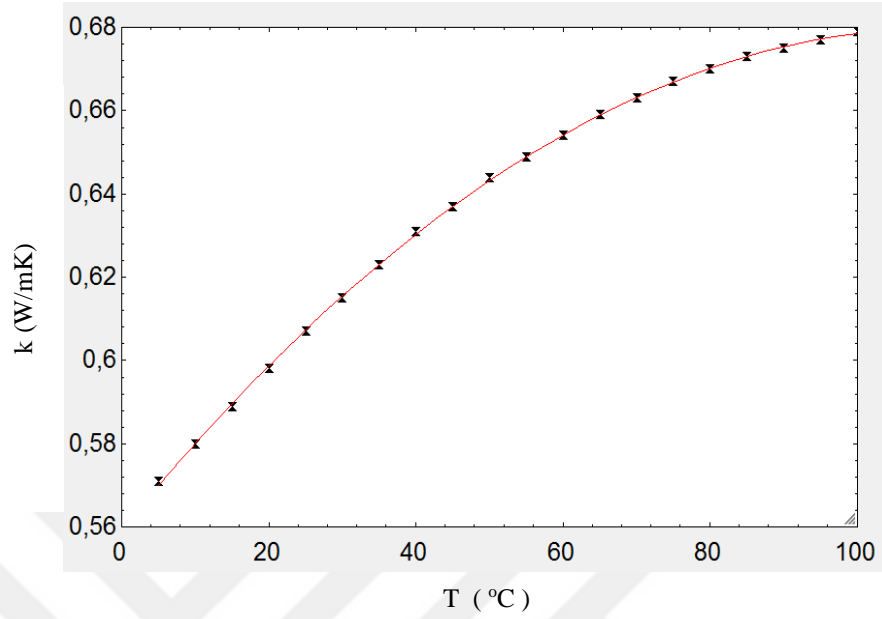
Viskozite;



Şekil 1.16. Suyun sıcaklığa bağlı dinamik viskozitesi

$$\mu_s = 0,00175015 - 0,0000517503 \times T + 8,65854 \times 10^{-7} \times T^2 - 7,53662 \times 10^{-9} \times T^3 + 2,58918 \times 10^{-11} \times T^4 \quad \left[ \text{N s / m}^2 \right] \quad (R^2 = \%99,99) \quad (1.11)$$

Isı iletim katsayısı;



Şekil 1.17. Suyun sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı

$$k_s = 0,559434 + 0,00215742 \times T - 0,00000965824 \times T^2 \quad [\text{W} / \text{mK}] \quad (1.12)$$

$(R^2 = \%99,98)$

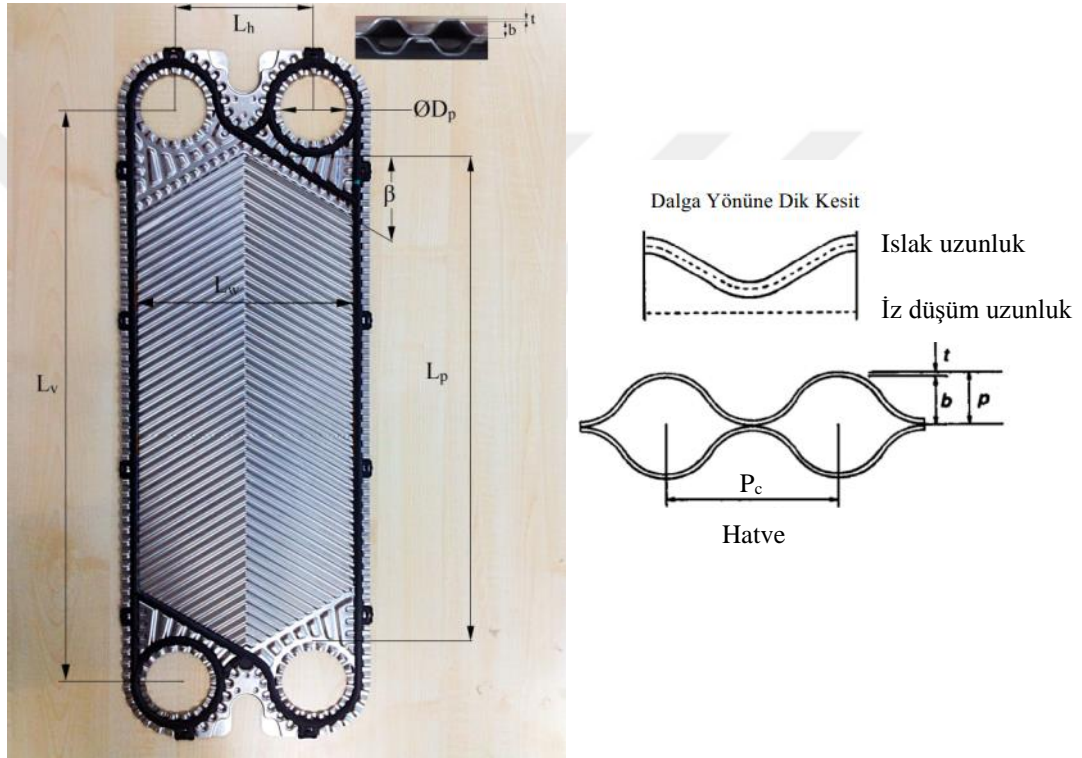
## 1.6. Isı Taşınım Katsayısı ve Sürtünme Faktörünün Hesaplanması

Levhalı ısı değiştirici tasarımı ve kendisinden beklenen görevler bakımından performanslarını belirlemek amacıyla türetilen korelasyonlar, değişen geometrilerinden dolayı üretici firmalar tarafından gizli tutulmaktadır. Ancak, ısı geçişi analizi için gerekli olan yöntemler literatürde mevcuttur. Levhalı ısı değiştiricinin başlıca boyutları Şekil 1.18.'de verilmiştir ve tasarım yöntemlerine ait ifadelerin tümü Kaynak [6]'dan alınmıştır.

### 1.6.1. Isı geçişi yüzey alanı

Levhalı ısı değiştiricilerinde bulunan dalgalar, düz levhaya göre kıyaslandığında levhanın yüzey alanını artırmaktadır. Bu artış şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\phi_p = \frac{\text{Islak uzunluk}}{\text{İz düşüm uzunluk}} \quad (1.13)$$



şekil 1.18. Levhalı ısı değiştiricinin başlıca boyutları [178]

Bu ifade, hatve ve dalga derinliği ya da levha eğiminin fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Literatürde, yüzey iyileşme oranı 1,15 ile 1,25 değerleri arasındadır. Ortalama olarak bu değer 1,17 olarak kabul edilmektedir.

$$\phi_p = \frac{\text{Islak alan}}{\text{İz düşüm alan}} = \frac{A_l}{A_{lp}} \quad (1.14)$$

$$A_{1p} = L_p L_w$$

$$L_p \approx L_v - D_p$$

$$L_w \approx L_h + D_p$$

### 1.6.2. Ortalama kanal yüksekliği

Kanal yüksekliği, contalar arasında bulunan iki bitişik levhayla oluşturulmuş akış boşluğudur. Dalgalı yüzeyin kesit alanı çok karmaşık olduğu için ortalama kanal boşluğu  $b$  tanımlanmıştır.

$$b = p - t \quad (1.15)$$

Burada  $p$  levha eğimi ya da dalgalı levhanın dış taraf derinliği,  $t$  levha kalınlığıdır. Aynı zamanda  $b$ , levhaların dalgalı kısımlarının metal yüzeyleri temas halindeyken contanın tam olarak sıkıştırılması durumundaki kalınlığıdır. Kanal boşluğu  $b$  kütle hız ve Reynolds sayısının hesaplanması için gerekli olan, üreticilerin tarafından belirtilmeyen önemli bir parametredir. Bu parametre bilinmiyorsa,  $p$  değeri aşağıdaki ifadeyle hesaplanabilir.

$$p = \frac{L_c}{N_t} \quad (1.16)$$

Burada,  $L_c$  sabit baskı levhaları arasındaki (sıkıştırılmış levhalar arasındaki mesafe) mesafe,  $N_t$  levhaların toplam sayısıdır.

### 1.6.3. Hidrolik çap

Hidrolik çap  $D_{hd}$  şu şekilde tanımlanmıştır.

$$D_{hd} = \frac{4 \times \text{kanalın akış alanı}}{\text{ıslak çevre}} = \frac{4A_c}{P} \quad (1.17)$$

Burada,

$P = 2(b + \phi_p L_w)$  ve genel olarak  $b$ ,  $L_w$ 'ye oranla çok küçük  $b \ll L_w$  dir.

$$D_{hd} = \frac{4(b)L_w}{2(b + L_w \phi_p)} \approx \frac{2b}{\phi_p} \quad (1.18)$$

elde edilir.

#### 1.6.4. Kütle akısı

$$G = \frac{\dot{m}}{N_{cp} b L_w} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2} \right] \quad (1.19)$$

Burada,  $N_{cp}$  her geçişteki kanalların sayısı olup,

$$N_{cp} = (N_t - 1) / 2N_p \quad (1.20)$$

elde edilir. Burada  $N_t$  toplam levha sayısı,  $N_p$  kanal sayısıdır.

#### 1.6.5. Basınç düşümü

Contalı-levhali ısı değıştiricilerinde toplam basınç düşümü, sürtünmeye bağı kanal basınç düşümü  $\Delta P_f$  ve porttaki basınç düşümü  $\Delta p_p$  terimlerinden oluşur.

$$\Delta P_f = \left[ \frac{4fL_{eff} N_p G_c^2}{D_h 2\rho} \right] \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{-0.17} \quad (1.21)$$

$L_{eff}$  giriş ve çıkış portları arasındaki akış yolunun uzunluğudur ve sürtünme faktörünün tanımına uygun olarak  $L_{eff}$ 'te artırım faktörü,  $\phi_p$  hesaba katılırsa;  $L_{eff}$ , dikey kanal uzunluğu  $L_v$ 'ye eşit olur. Giriş ve çıkış portlarındaki toplam debi,  $\dot{m}$ , port çapı,  $D_{pt}$



olmak üzere bir kanaldaki kütle debisi  $G_{pt}$  ve toplam kanaldaki basınç düşümü şu şekilde hesaplanır.

$$G_{pt} = \frac{\dot{m}}{\pi D_p^2 / 4} \quad (1.22)$$

$$\Delta P_{pt} = 1,4 \frac{G_{pt}^2}{2\rho} N_p \quad (1.23)$$

Bu durumda toplam basınç düşümü ifadesi  $\mu_b = \mu_w$  kabulüyle Denklem 1.24'deki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_{pt} \quad (1.24)$$

#### 1.6.6. Isı taşınım katsayısının hesaplanması

Contalı levhalı ısı değiştiricide sıcak akışkan tarafından verilen ısı soğuk akışkan tarafından alınmaktadır. Contalı levhalı ısı değiştiricide toplam ısı geçiş katsayısı, sıcak akışkanın ısı geçiş katsayısı ve soğuk akışkanın ısı geçiş katsayısı hesaplamaları için daha önceden literatürde ortalama kanal boşluğuna(b) ya da balıksırtı açısına( $\beta$ ) göre elde edilmiş korelasyonlardan faydalanılmıştır. Sıcak ve soğuk akışkan için Reynolds sayısı Denklem 1.25 ve Denklem 1.26'daki gibi hesaplanmıştır.

$$Re_h = G_h D_{hd} / \mu_h \quad (1.25)$$

$$Re_c = G_c D_{hd} / \mu_c \quad (1.26)$$

Burada, h sıcak akışkan, c soğuk akışkan, G kütle akısı,  $\mu$  viskozite ve  $D_{hd}$  hidrolik çaptır.

Kütle akısı;

$$G_h = \dot{m}_h / N_{cp} bL_w \quad (1.27)$$

$$G_c = \dot{m}_c / N_{cp} bL_w \quad (1.28)$$

Burada  $\dot{m}$  kütleli debi,  $N_{cp}$  geçiş sayısı,  $b$  levhaların sıkıştırılmış haldeki kanal yüksekliği,  $L_w$  akışkanın izlediği yolun uzunluğudur.

Sıcak akışkan tarafından verilen ısı ve soğuk akışkan tarafından alınan ısı şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (1.29)$$

$$Q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (1.30)$$

Ortalama sıcaklığa bağlı olarak akışkan özelliklerin hesaplanması;

$$T_{ort,h} = (T_{h,i} + T_{h,o}) / 2 \quad (1.31)$$

$$T_{ort,nf} = (T_{nf,i} + T_{nf,o}) / 2 \quad (1.32)$$

Ortalama ısı geçişi;

$$Q = (Q_h + Q_c) / 2 \quad (1.33)$$

Sıcak akışkanın ısı taşınım katsayısı  $h_h$ , daha önceden literatürde  $\beta$  açısına göre elde edilmiş korelasyon kullanılarak hesaplanmıştır [37, 38].

$$Nu_h = 0,348 Re_h^{0,663} Pr_h^{0,33} \quad (1.34)$$

Burada Nu Nusselt sayısı olup Pr Prandtl sayısıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$Nu_h = h_h D_h / k_h \quad (1.35)$$

$$Pr_h = \mu_h c_p / k_h \quad (1.36)$$

Toplam ısı geçiş katsayısı Denklem 1.37'deki hesaplanmıştır.

$$U = Q / (A \Delta T_{lm}) \quad (1.37)$$

Burada, A ısı geçiş alanı ve  $\Delta T_{lm}$  logaritmik ortalama sıcaklık farkı olup,

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln((T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i}))} \quad (1.38)$$

şeklinindedir. Soğuk akışkanın ısı geçiş katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\frac{1}{U} = \left( \frac{1}{h_h} \right) + \left( \frac{t}{k} \right) + \left( \frac{1}{h_c} \right) \rightarrow \frac{1}{h_c} = \frac{1}{U} - \left( \frac{1}{h_h} \right) - \left( \frac{t}{k} \right) \quad (1.39)$$

### 1.6.7. Isı geçişi iyileştirilmiş yüzeylerde etkenlik ölçütünün belirlenmesi

Isı geçişi sağlayan yüzeylerin etkenlik ölçütlerinin hesaplanmasında Shah tarafından aşağıdaki bağıntı önerilmektedir [7].

$$\frac{j}{f} = \frac{Nu Pr^{-1/3}}{f Re} \quad (1.40)$$

Burada,  $j$  Colburn katsayısı,  $f$  sürtünme faktörü olmak üzere,  $j/f$  oranının Reynolds sayısına göre değişimleri hesaplanmaktadır. Bu katsayıya genellikle akış alanı iyileşme katsayısı (flow area goodness factor) denilmektedir.

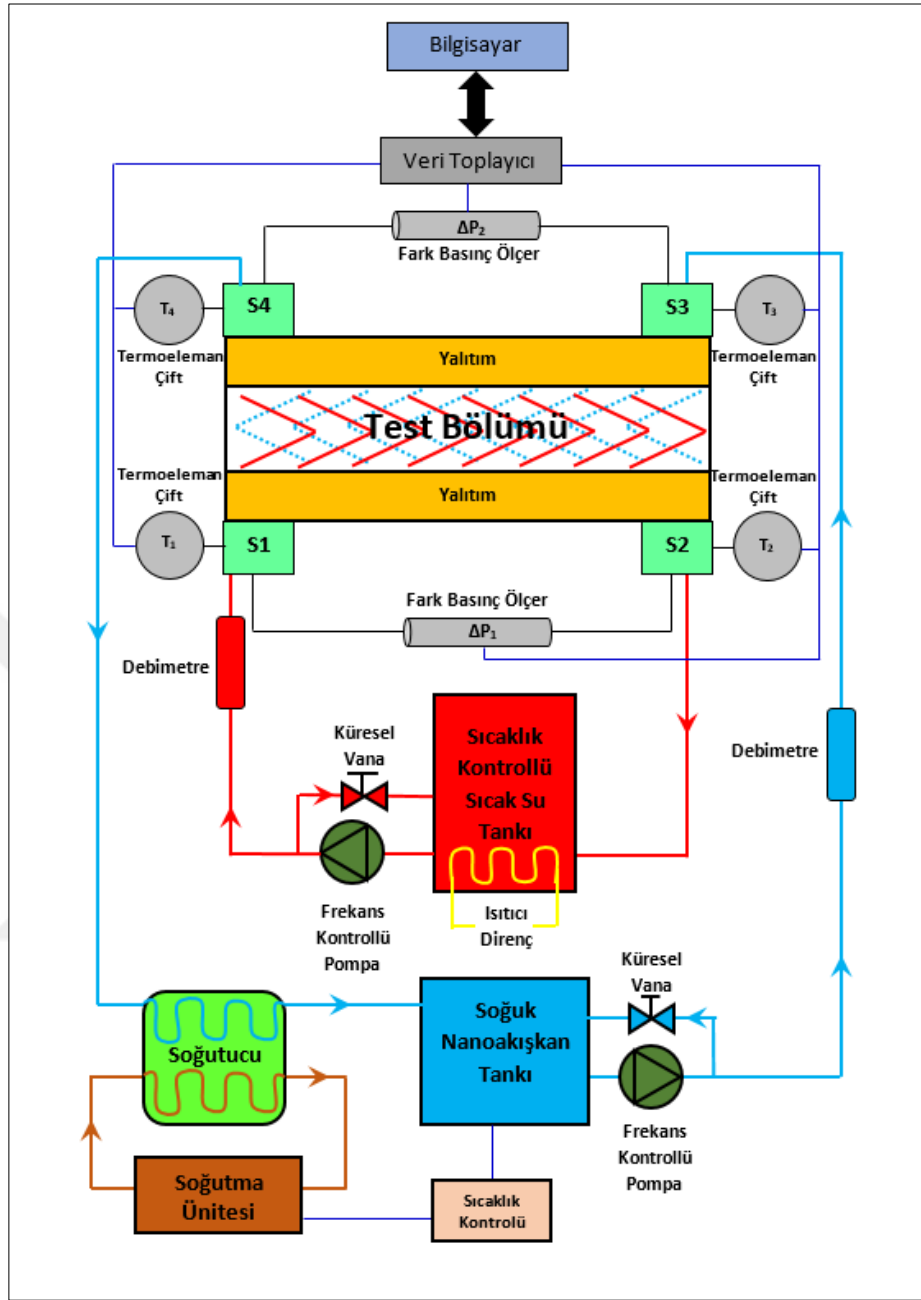


## BÖLÜM 2. DENEY TESİSATI

### 2.1. Tesisatının Çalışması

Nanoakışkanlı contalı levhalı ısı değiştirici kanallarında ısı geçişi ve basınç düşümünü hesaplamak amacıyla, Şekil 2.1.'de şematik resmi ve Şekil 2.2.'de fotoğrafı verilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Reynolds sayısı ve nanoakışkanın hacimsel oranı değişken parametreler kabul edilerek deneysel çalışmalar yapılmıştır. Contalı levhalı ısı değiştiricinin bilinen ve hesaplanan boyutları Tablo 2.1.'de verilmektedir. Şekil 2.1.'de şematik olarak gösterilmiş deney düzeneğinde iki kapalı çevrim bulunmaktadır. Isıyı veren sıcak akışkan (sıcak su) ve ısıyı alan soğuk akışkan (nanoakışkan), devir sayısı değiştirilebilen santrifüj pompalarla ısı değiştiricisine gönderilmektedir. Santrifüj pompalara bağlı frekans kontrolüyle sıcak akışkanın debisi sabit tutulmuş, soğuk akışkanın debisi değiştirilmiş ve böylece farklı Reynolds sayılarıyla çalışma yapmak mümkün olmuştur. Deneyler süresince sıcak akışkanın giriş sıcaklığı ve debisi sırasıyla 90 kg/h ve 40 °C'de sabit tutulmuştur. Nanoakışkanın debisi ise 90-300 kg/h arasında değiştirilirken, giriş sıcaklığı 17,5 °C'de sabit tutulmuştur. Deneyler sürekli rejim şartlarında yapılmıştır ve her bir Reynolds sayısına karşılık gelen deney süresi ortalama 45 dakikadır. Deneyler süresince ısı kaybını en aza indirebilmek için test bölümü yalıtılmıştır.

Ölçülen sıcaklık ve debi değerleriyle, hesaplanan özgül ısı değerleri kullanılarak sıcak akışkanın verdiği ısı ve nanoakışkan tarafından alınan ısı, Denklem 1.29 - 1.30 kullanarak hesaplanmıştır. Adyabatik kabul edilen ısı değiştiricilerinde alınan-verilen ısı miktarları eşit kabul edilmekte, ancak deneyler süresince her iki akışkandan çevreye ısı geçişinden dolayı, ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında literatürdeki benzer çalışmalar da dikkate alınarak, ortalama ısı geçişi esas alınmıştır.



Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi



1. Güç Panosu, 2. Sıcak akışkan tankı, 3. Nanoakışkan tankı, 4. Pompalar, 5. Test bölümü, 6. Fark basınç ölçer, 7. Termoeleman çifti, 8. Sıcak akışkan sıcaklık göstergesi ve pompa frekans kontrol panosu, 9. Veri toplama panosu, 10. Rotametre, 11. Türbin debimetre ve göstergesi, 12. Güç panosu, 13. Nanoakışkan tankı sıcaklık ölçer ve göstergesi, 14. Bilgisayar, 15. Soğutma Ünitesi.

Şekil 2.2. Deney düzeneğinin fotoğrafı

Sıcak akışkanın kütleli debisi, okuma hassasiyeti  $\pm$  % 3 olan rotametre ile nanoakışkanın kütleli debisi ise okuma hassasiyeti  $\pm$  % 5 olan FMTD serisi türbin tipi debi ölçer ile belirlenmiştir. Sıcak ve soğuk akışkanın ısı değiştiricisine giriş-çıkış sıcaklıkları hassasiyeti  $\pm$  % 0,4 olan Pt-100 (Platinum Resistance Thermometers) tipi sıcaklık ölçer ve fark basınçları ise hassasiyeti  $\pm$  % 0,5 olan marka basınç ölçerlerle ölçülmüştür.

Sıcak akışkanın, ısı değiştiricisine girişte istenilen sabit sıcaklığı sağlamak için sıcaklık kontrollü paslanmaz çelikten yapılmış bir su tankı kullanılmıştır. Sıcak akışkan tankı yaklaşık 90 L hacminde, 2 kW gücündedir. Tanktan çevreye olan ısı kaybını önlemek için tankın cidarı 10 cm kalınlığında poliüretan ile kaplanmıştır. Sıcak akışkan tankının sıcaklığı da dijital gösterge ile kontrol edilmiştir.

Soğuk akışkan olan nanoakışkan ise içerisinde karıştırıcı bulunan, karıştırıcının çalışma-durma sürelerini bir röle yardımıyla kontrol eden, paslanmaz çelikten yapılmış, 40 L hacmindeki bir tankta hazırlanmaktadır. Soğuk akışkanın sıcaklığı soğutma ünitesi tarafından ayarlanmaktadır.

Soğutma tankı, soğutucu ünitenin buharlaştırıcı borularının yer aldığı yalıtımlı paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Bu tank, yaklaşık 90 L hacminde olup içerisinden ısınan nanoakışkanın geçtiği 10 m uzunluğunda bakır bulunmaktadır. Soğutma sıvı olarak antifriz-su karışımı kullanılmıştır.

Sıcaklık ve fark basınç ölçer değerleri deneyler süresince tesisata bağlı bilgisayar yardımıyla kayıt altına alınmaktadır.

### 2.1.1. Test bölgesi

Deneysel çalışma için gerekli olan contalı levhalı ısı değiştirici levhaları Alfa Laval firmasından sağlanmıştır. Levha malzemesi 0,5 mm kalınlıkta, paslanmaz çelik 316, sızdırmazlığın sağlandığı contalar ise etilen propilen kauçuk (epdm) contadır.

Tablo 2.1. Levhalı ısı değiştiricinin bilinen ve hesaplanan boyutları

Bilinen boyutlar	
Levha uzunluğu (mm)	350
Levha genişliği (mm)	102
Contalar arasındaki genişlik, $L_w$ (mm)	70
Geçitler arası levha genişliği, $L_v$ (mm)	298
Geçitler arası levha uzunluğu, $L_h$ (mm)	50
Geçit çapı $D_{pt}$ (mm)	20
Toplam levha sayısı	3
Isı geçişi alanı, $A$ (m <sup>2</sup> )	0,02
Baliksırtı açısı, $\beta$	30°
Levha kalınlığı, $t$ (mm)	0,5
Hesaplanan boyutlar	
İki levha arasındaki boşluk, (mm)	2,4
Levha adımı, $p$ (mm)	3,05
Yüzey iyileşme oranı ( $\phi_p$ )	1,208
Hatve, $P_c$ (mm)	11,57
Ortalama kanal boşluğu, $b$ (mm)	2,5



## 2.1.2. Tesisat ekipmanları

### 2.1.2.1. Isıtıcı direnç ve sıcaklık kontrol cihazı

Deneyle süresinde sıcak akışkanın ısıtılmasında Şekil 2.3. a'da gösterilen 220 V gerilimle 2 kW güç üreten elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır.

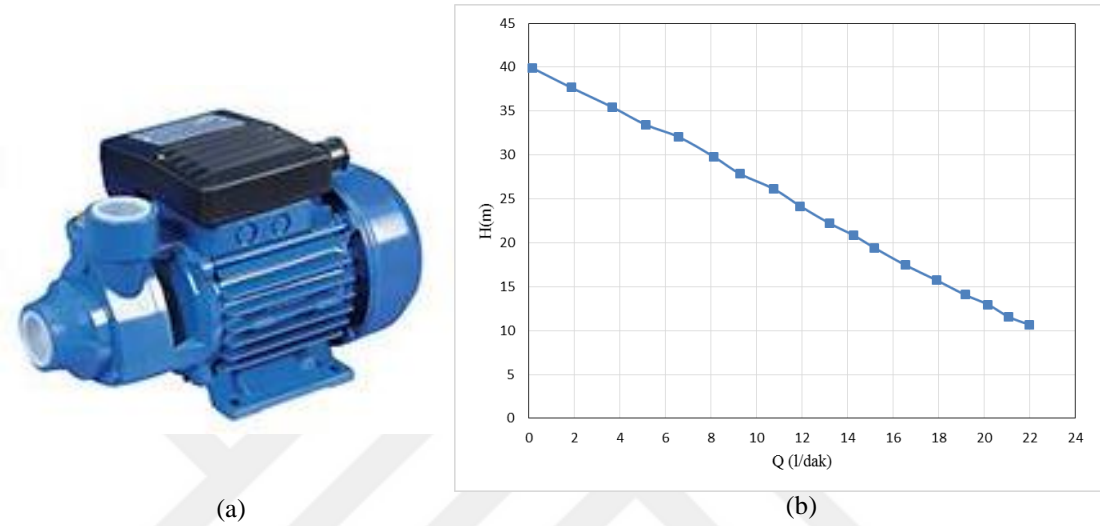


Şekil 2.3. Isıtıcı direnç (a) sıcaklık kontrol cihazı (b)

Sıcak akışkanı istenilen sıcaklıkta tutabilmek için Şekil 2.3. b'de gösterilen digital göstergeli açık-kapalı sıcaklık kontrolü sağlayan Emko (Model no: ESM-3710-N) marka cihaz kullanılmıştır.

### 2.1.2.2. Santrifüj pompalar

Deneyle süresince sıcak ve soğuk akışkanların akışını sağlamak için Şekil 2.4. a'da gösterilen 120 °C sıcaklığa dayanıklı, 3 fazlı Sumak marka SMT5 model pompalar kullanılmıştır.

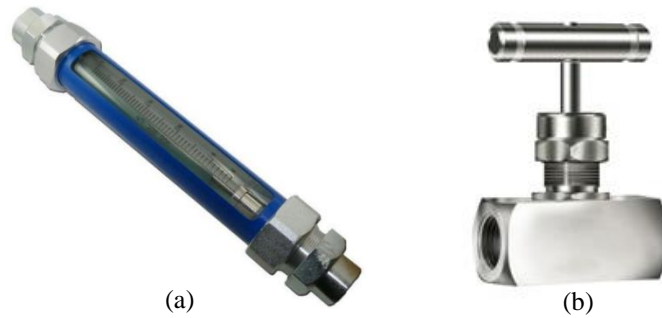


Şekil 2.4. Santrifüj pompa (a) pompa çalışma eğrisi (b)

Şekil 2.4. b'de pompaların karakteristik eğrisi verilmektedir. Santrifüj pompalar 380 V, 50 Hz ve 2900 dev/dak da 0,37 kW (0,5 HP) güç tüketmektedir.

### 2.1.2.3. Rotametre

Sıcak akışkanın kütleli debisi ölçmek için Şekil 2.5. a'da gösterilen 63-630 L/h ölçme aralığına sahip şamandıralı cam tüplü paslanmaz çelik debimetre kullanılmıştır.

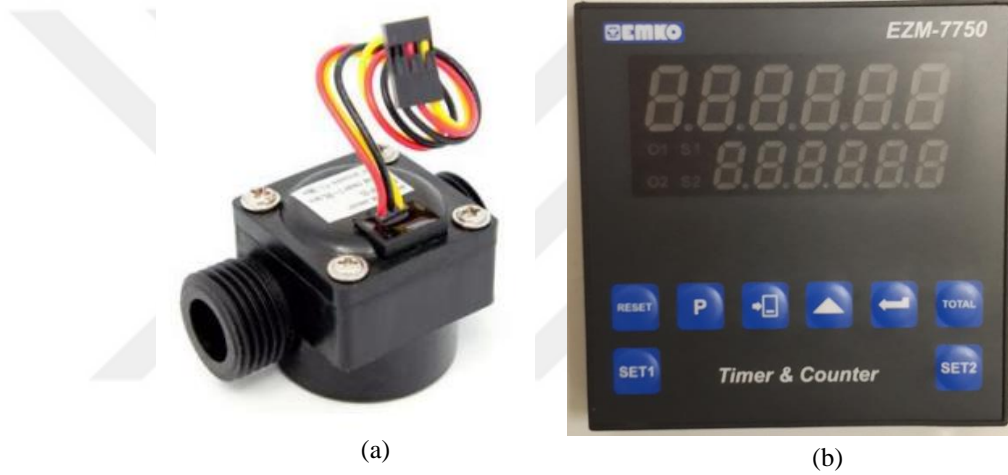


Şekil 2.5. Rotametre (a) iğne uçlu vana (b)

Ayrıca, hassas ölçümler yapabilmek için Şekil 2.5. b’de gösterilen iğne uçlu vana rotametrenin girişinde kullanılmıştır.

#### 2.1.2.4. Türbin tipi debimetre ve göstergesi

Soğuk akışkan olan nanoakışkanın kütleli debisinin ölçümünde Şekil 2.6. (a)’da gösterilen 1-30 L/dak ölçme aralığında ve yaklaşık litrede 340 atım (pulse) değeri veren minyatür türbin debimetre kullanılmıştır. Debimetre malzemesi akrilonitril bütadien stiren (abs) plastik malzemeden üretilmiş hafif ve sert bir polimerdir.



Şekil 2.6. Türbin debimetre (a) gösterge (b)

Debimetrede ölçülen değerin okunabilmesi için Şekil 2.6. (b)’de verilen Emko Marka EZM-7750 model numaralı bir zamanlayıcı-sayıcı göstergesi kullanılmıştır.

#### 2.1.2.5. Fark basınç ölçer

Nanoakışkanın basınç düşümünü ölçmek için test bölgesinin giriş ve çıkışına Şekil 2.7.’de resmi ve Tablo 2.2.’de teknik özellikleri verilen Mesens marka MPS 550 model fark basınç ölçer kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Fark basınç ölçer

Tablo 2.2. Basınç ölçer teknik özellikleri

Sensor Teknolojisi	Piezorezistif silikon
Diyafraam Malzemesi	AISI 316L
Gövde Malzemesi	AISI 304
Mekanik Bağlantı	1/2"
Dayanma Basıncı	2xMax.Ölçme
Sıcaklık	-40 °C...125 °C
Hassasiyet	% 0,5
Çıkış	4-20 mA
Besleme	10...32 VDC

#### 2.1.2.6. PT-100 (Platinum Resistance Thermometers) sıcaklık ölçer

Soğuk ve sıcak akışkanın test bölgesine giriş ve çıkıştaki sıcaklıklarını ölçmek için Şekil 2.8.'de gösterilen, -200 °C ile +850 °C ölçme aralığında, hassasiyeti yüksek, 4-20 mA çıkış sinyali veren Ordell firmasından temin edilen PT-100 tipi termo eleman çifti kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Sıcaklık ölçer

### **2.1.2.7. Soğutucu tank**

Isı geçişi sonunda ısınan nanoakışkanın istenilen giriş sıcaklığına getirebilmek için soğutucu tankı kullanılmıştır. Bu tank, yaklaşık 90 litre hacminde paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Tank içerisinde soğutma sıvısı olarak su-antifriz karışımı kullanılmıştır. Soğutma ünitesi, 380 volt gerilimde 3,5 HP gücündedir. Digital bir gösterge ile nanoakışkan tankının sıcaklığı kontrol edilmiştir.

### **2.1.2.8. Sıcak akışkan tankı**

Sıcak akışkan tankı, çift cidarlı olarak paslanmaz çelik malzemedden imal edilmiştir. Tanktan ısı kaybını önlemek için, cidarlar arası 10 cm kalınlığında poliüretan dolguluyula doldurulmuştur. Yaklaşık 90 L hacminde olan tanktaki akışkan sıcaklığı Welko marka bir termometre ile ölçülmüştür.

### **2.1.2.9. Nanoakışkanın hazırlanması**

Bölüm 1.5.5.'de anlatıldığı gibi istenilen hacimsel orandaki partiküller saf su içerisine ilavesi edildikten sonra, partiküllerde meydana gelen bir araya toplanmayı önlemek için ultrasonik banyo yardımıyla 60 dakika karıştırılmıştır (Şekil 2.10). Ayrıca, yüzey aktif maddesi, katalizör gibi maddeler karışıma ilave edilmemiştir. Deneyler süresince de herhangi bir çökelme problemi ile karşılaşmamak için hazırlanan karışımlar, mekanik bir karıştırıcı yardımıyla belli zaman aralıklarında karıştırılmıştır.

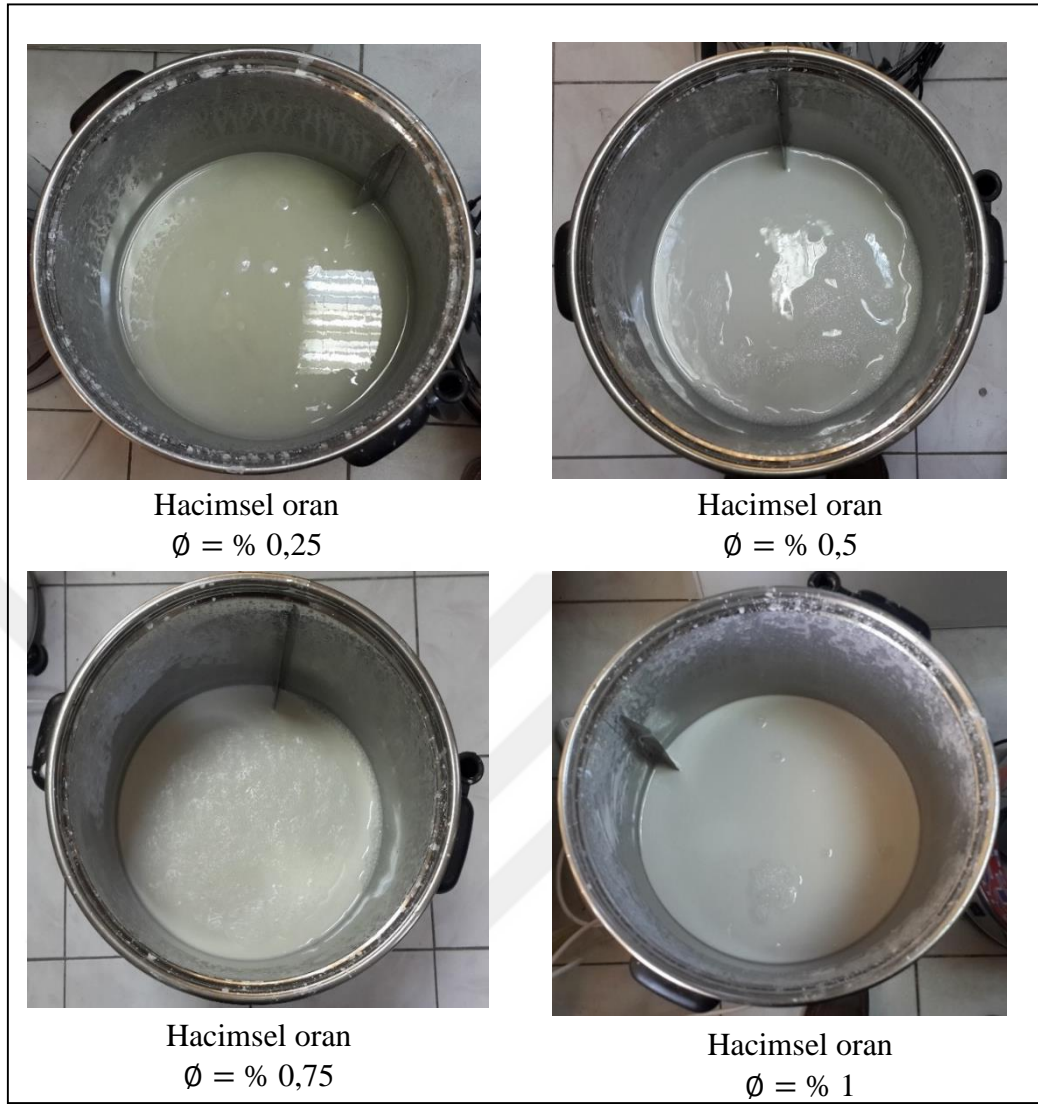
Tablo 2.3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül özellikleri

Özellikler	
Partikül Fazı	Alfa
Renk	Beyaz
Biçim	Küresele yakın
Safılık	% 99,9
Ortalama çap	40 nm
Özgül yüzey alanı	60 m <sup>2</sup> /gr

Tablo 2.4. Hazırlanan nanoakışkan ve karışıma eklenen miktarlar

İstenilen Miktar (L)	İstenilen Hacimsel Oran (%)	Partikül Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Karışıma Eklenen Partikül Miktarı (kg)	Karışıma Eklenen Partikül Miktarı (gr)
16	0,25	3700	0,148	148
16	0,50	3700	0,296	296
16	0,75	3700	0,444	444
16	1	3700	0,592	592

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü Grafen Kimya Endüstri Şirketinden sağlanmıştır. Tablo 2.3.'de nanopartikül özellikleri ve Tablo 2.4.'de hazırlanan nanoakışkan miktarları verilmektedir.



Şekil 2.9. Hazırlanan nanoakışkanlar



Şekil 2.10. Ultrasonik banyo

Şekil 2.9.'da içerisinde karıştırıcı kanatların bulunduğu paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiş 40 L hacmindeki nanoakışkan tankları görülmektedir.

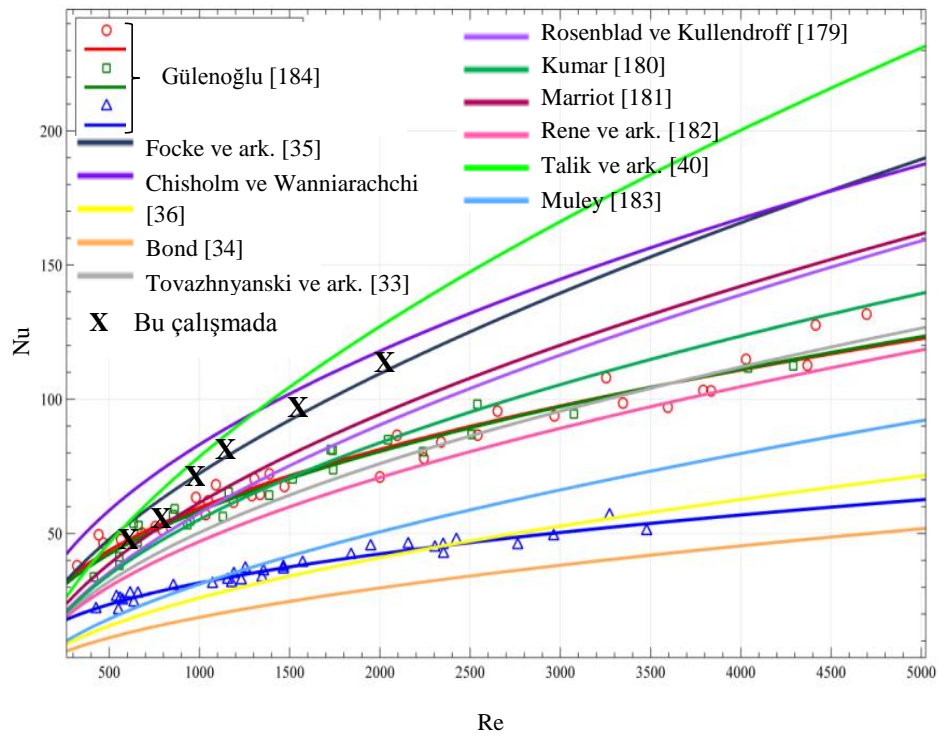


Şekil 2.11. Zaman rölesi

Deney süresince, nanopartiküllerin çökmesini önlemek için tanklar KRK marka KFLR 72 model numaralı zaman rölesi kullanılarak ortalama bir dakika ara ile karıştırılmıştır (Şekil 2.11.).

## 2.2. Deneysel Sonuçlar

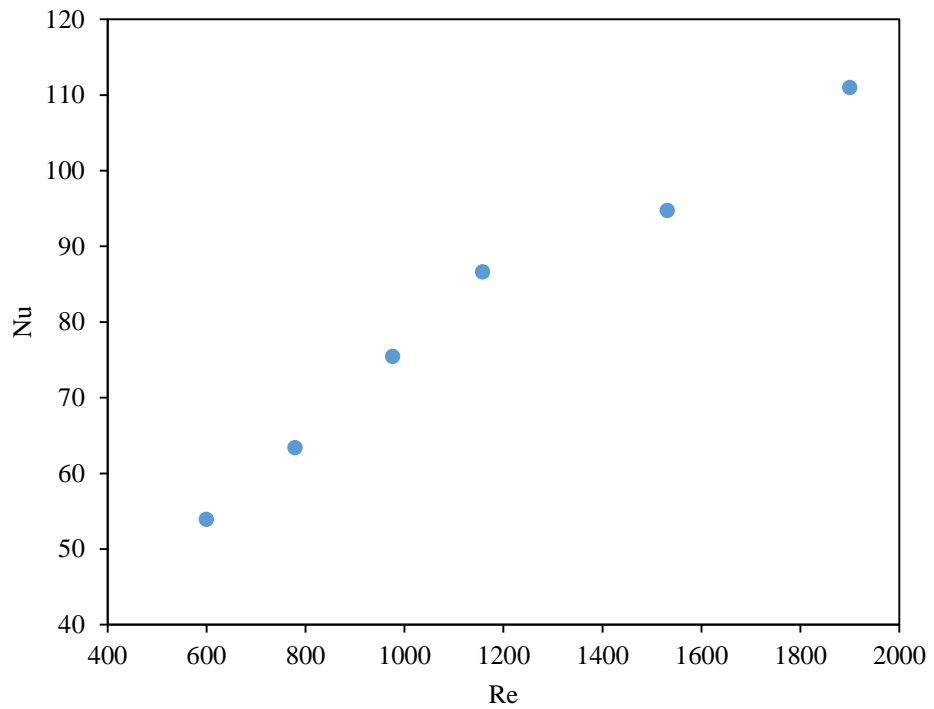
Hazırlanan deney düzeneği ile sudan-suya ısı geçişi deneyleri sonucunda elde edilen Nusselt sayıları, literatürdeki [33-36, 40, 179-184] korelasyonlarla Şekil 2.12.'de karşılaştırılmaktadır.



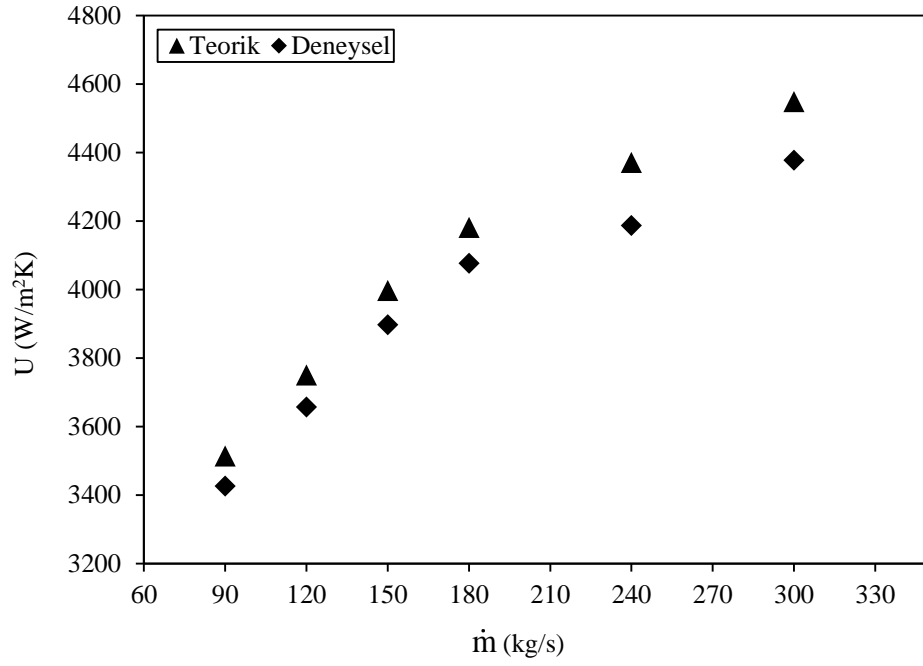
Şekil 2.12. Literatürdeki Nusselt sayısı korelasyonları



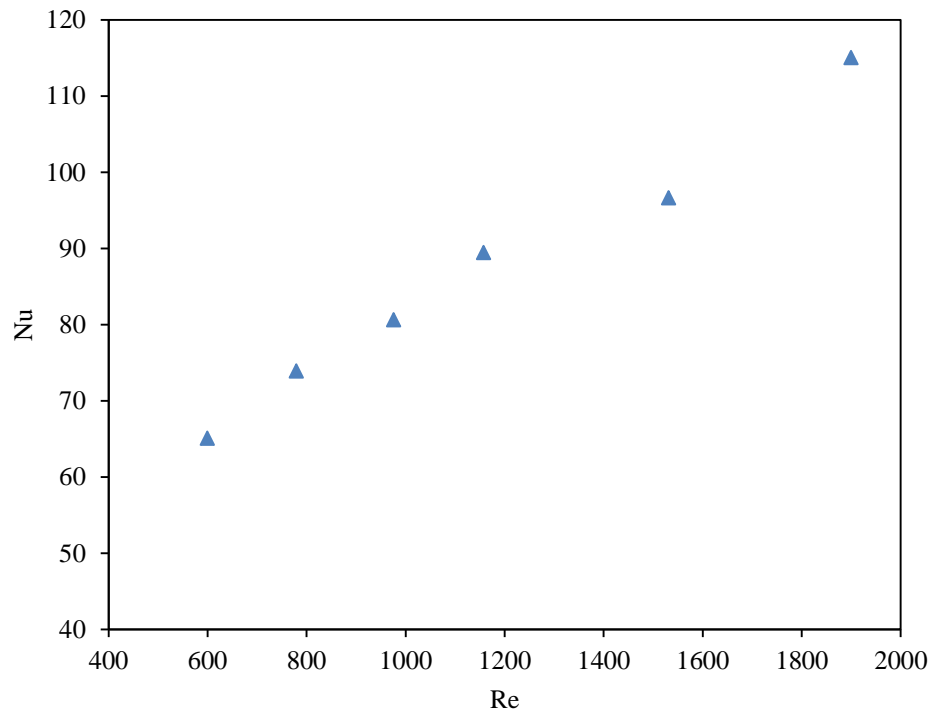
Bu karşılaştırmalar sonucunda, elde ettiğimiz deneysel veriler ile literatürde bulunan korelasyonların uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Deneysel verilerle hesaplanan toplam ısı geçiş katsayısı ile adyabatik kabulü ile teorik olarak hesaplanan toplam ısı geçiş katsayısının ortalama % 3 hata ile uyum içerisinde olduğu Şekil 2.14.'de görülmektedir. Sudan suya ısı geçişi için elde edilen Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi Şekil 2.13.'de gösterilmektedir. Nusselt sayısının artan Reynolds sayısına bağlı olarak arttığı gözlemlenmektedir. Yapılan bu doğrulama çalışmalarından sonra, dört farklı hacimsel oranda (% 0,25, % 0,5, % 0,75, % 1) hazırlanan nanoakışkanlar için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucundan ısı taşınım katsayısı Reynolds sayısı ve nanoakışkanın artan hacimsel oranı ile arttığı belirlenmiştir (Şekil 2.15., Şekil 2.16., Şekil 2.17., Şekil 2.18., Şekil 2.19.).



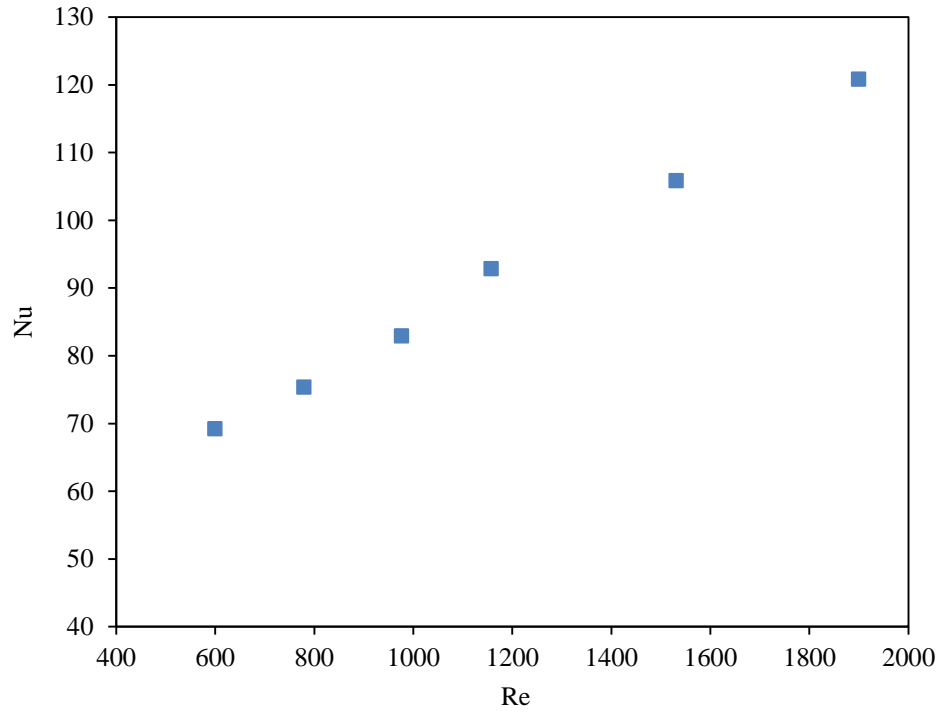
Şekil 2.13. Hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi



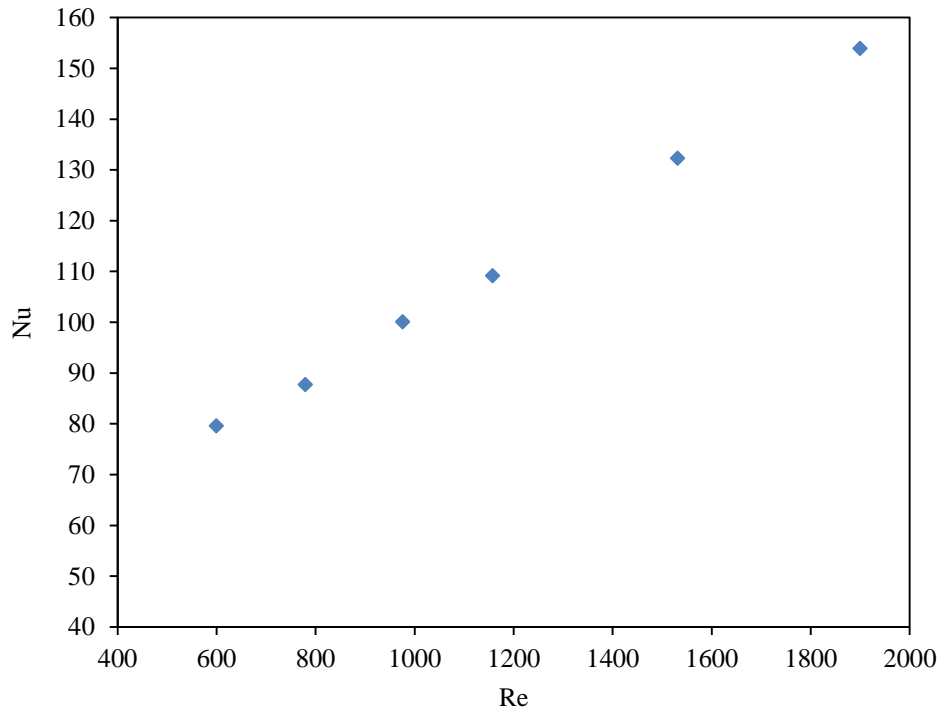
Şekil 2.14. Deneysel ve teorik toplam ısı geçiş katsayısının kütleli debiye bağlı olarak değişimi



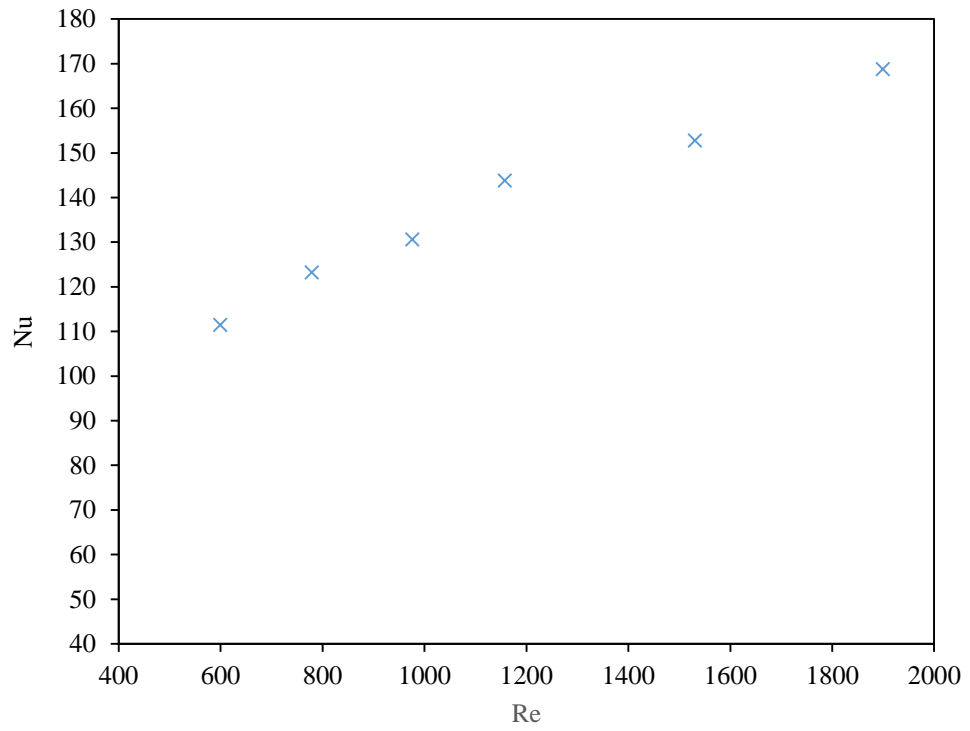
Şekil 2.15. Hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi



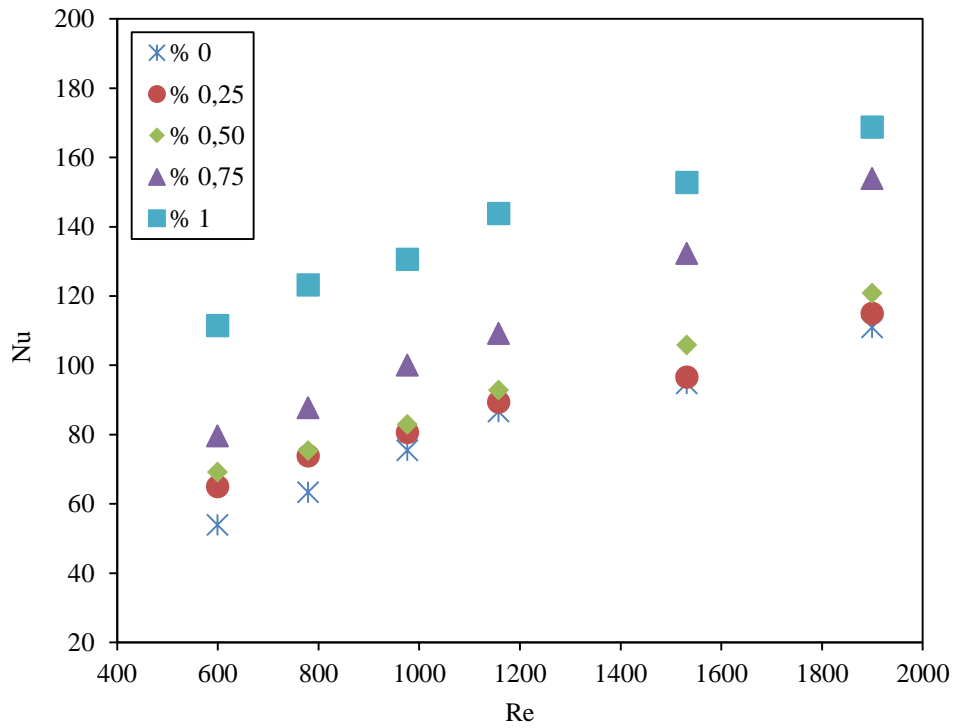
Şekil 2.16. Hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil 2.17. Hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi

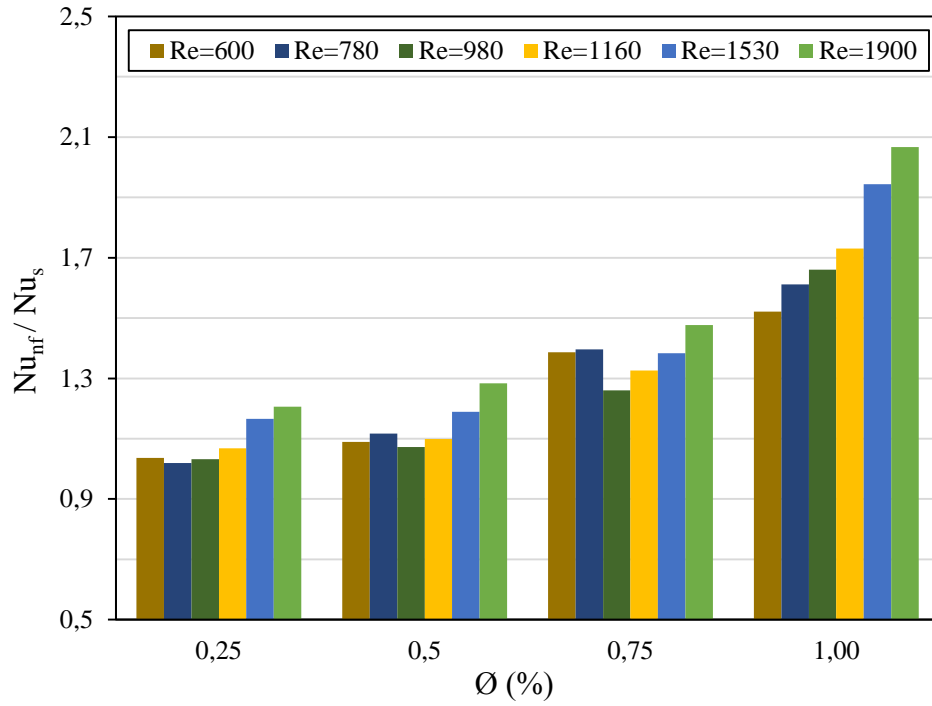


Şekil 2.18. Hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi



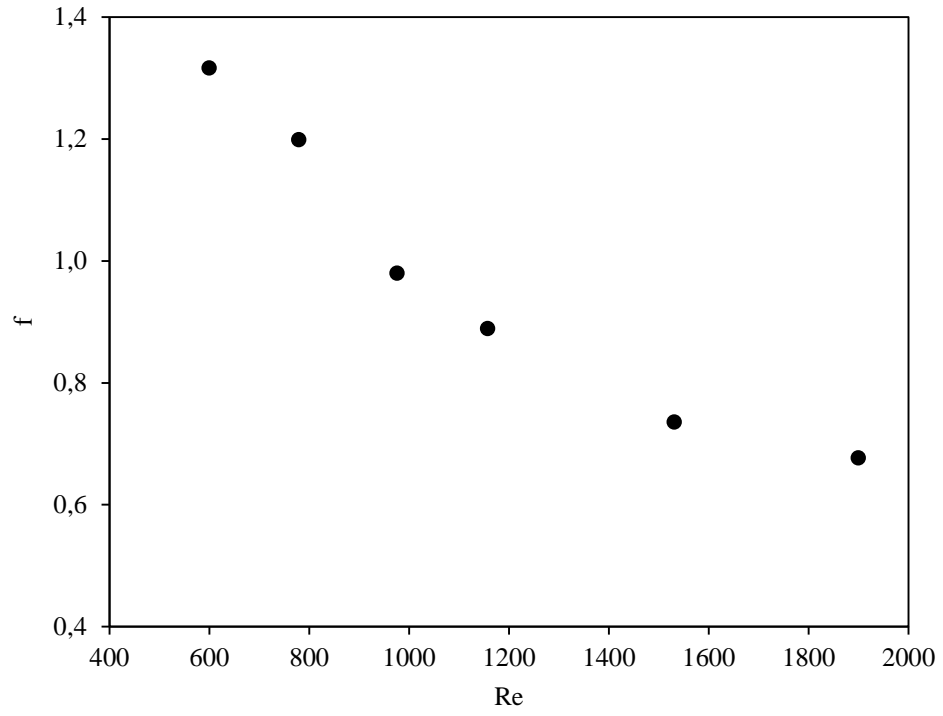
Şekil 2.19. Nanoakışkanlı kanallarda hacimsel oranlara bağlı olarak Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi

Nanoakışkanların hacimsel oranı arttıkça, suya göre Reynolds sayısına bağlı Nusselt sayısındaki iyileşme oranları Şekil 2.19. ve Şekil 2.20.'de gösterilmektedir. % 1 hacimsel oran için Nusselt sayısı yüksek çıkmaktadır. Suya çok küçük oranda partikül (% 0,25) eklenmesi durumunda bile Nusselt sayısında ortalama % 7,72 iyileşme meydana gelmektedir.

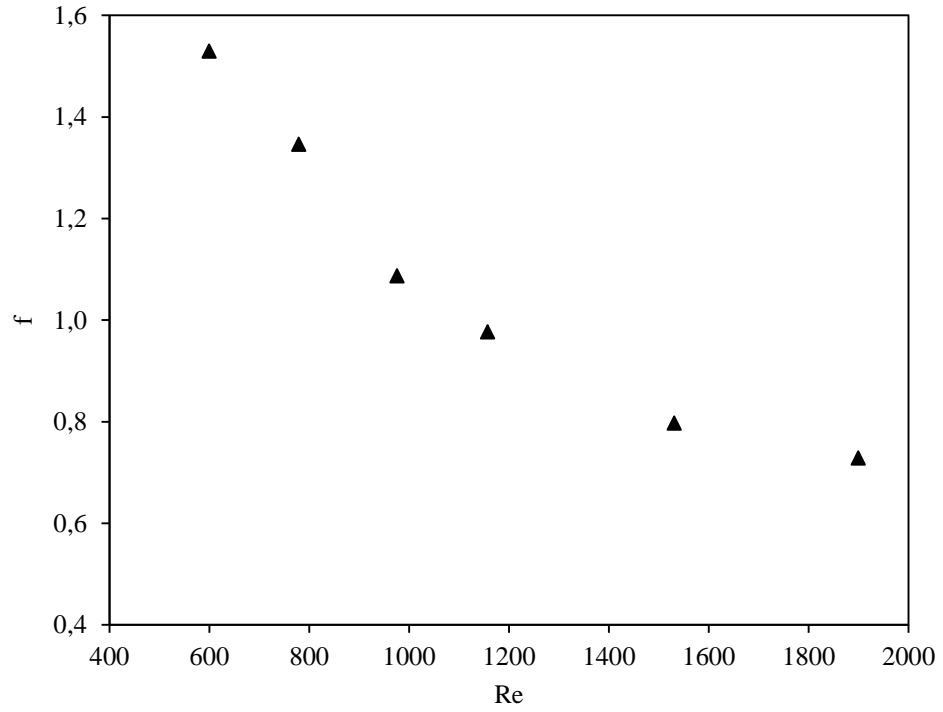


Şekil 2.20. Suya göre Nusselt sayısındaki iyileşme oranları

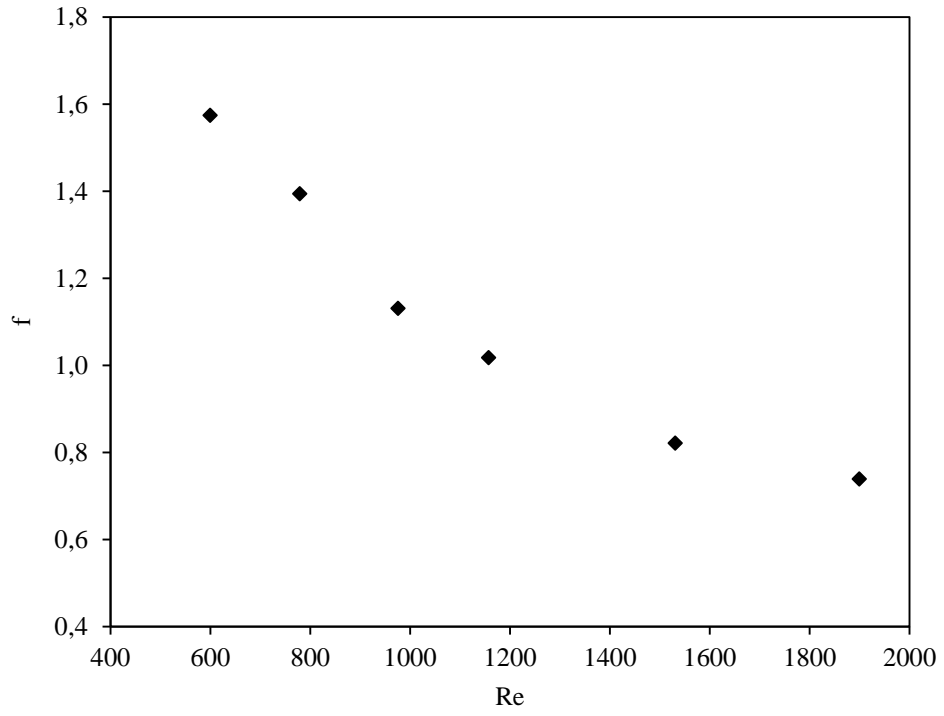
Şekil 2.21., Şekil 2.22., Şekil 2.23., Şekil 2.24., Şekil 2.25. ve Şekil 2.26.'da görüldüğü gibi hacimsel oran ve Reynolds sayısı arttıkça kanal içerisindeki sürtünme faktörü azalmaktadır.



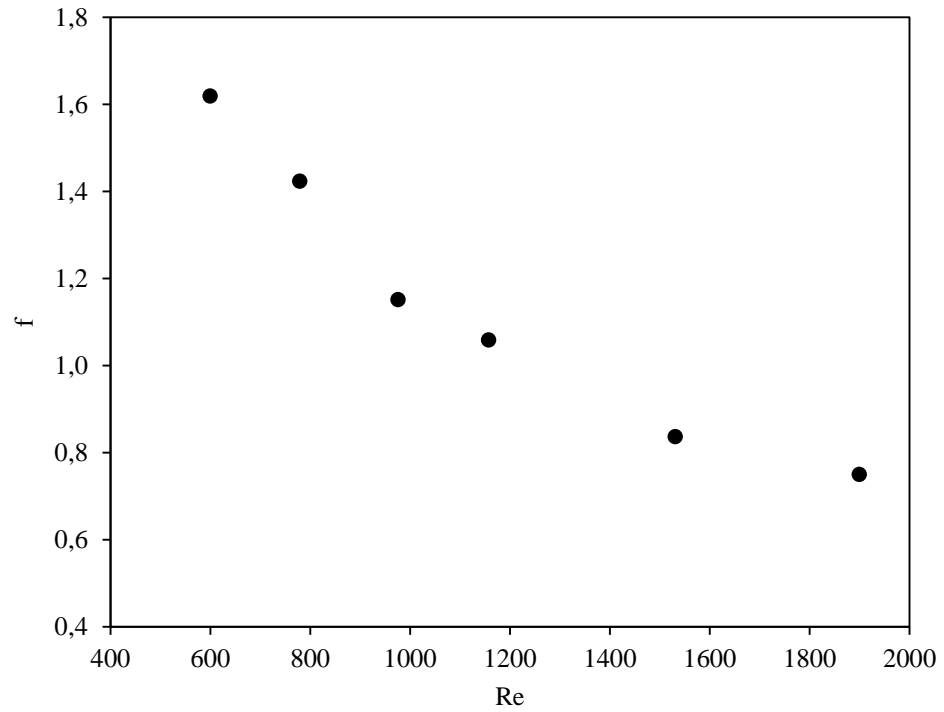
Şekil 2.21. Hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi



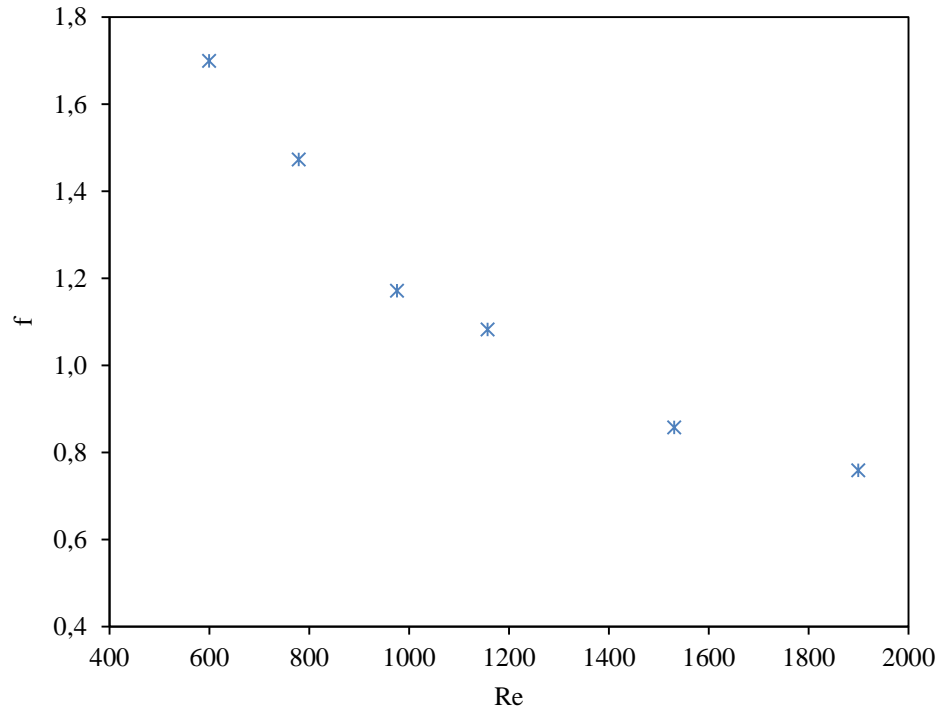
Şekil 2.22. Hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil 2.23. Hacimsel oranı % 0,5 olan nanoağışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değışimi



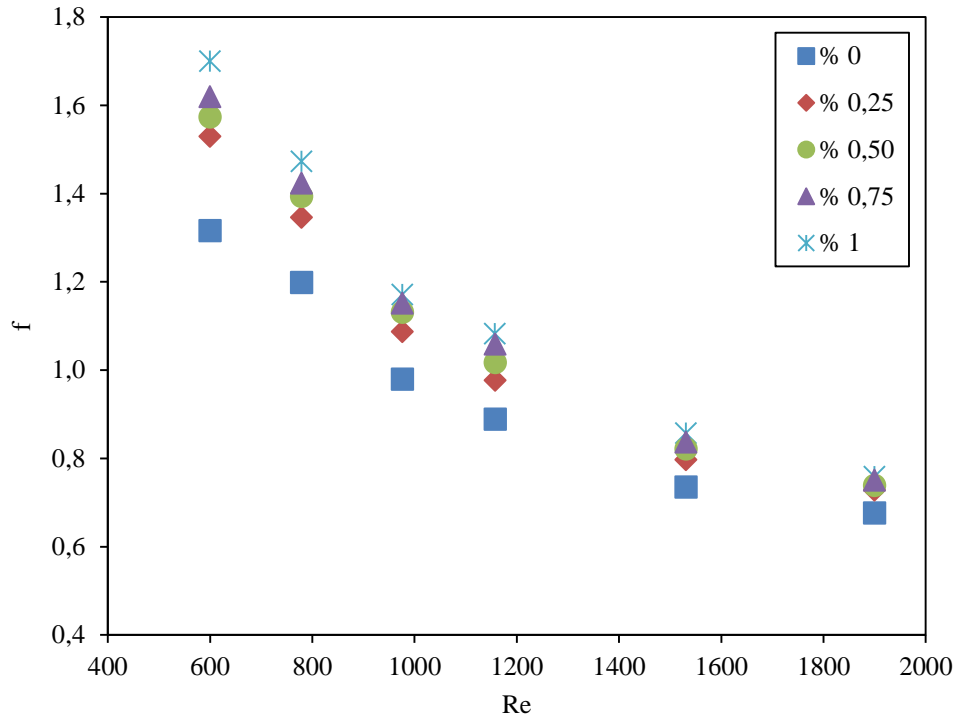
Şekil 2.24. Hacimsel oranı % 0,75 olan nanoağışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değışimi



Şekil 2.25. Hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi

Şekil 2.26.'da nanoakışkanlı levhalı ısı değiştirici kanalında sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ve hacimsel orana göre değişimi verilmektedir. Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörü azalmaktadır. Ayrıca artan Reynolds sayısına bağlı olarak sürtünme faktörü tüm hacimsel oranlar için birbirine yaklaşmaktadır. En yüksek ve en düşük Reynolds sayıları için suya-hacimsel orana göre aralarındaki fark sırasıyla ortalama % 10,8 ve % 22,55 kadar olmaktadır. Söz konusu farktaki azalma en yüksek Reynolds sayısında daha belirgin olmaktadır.





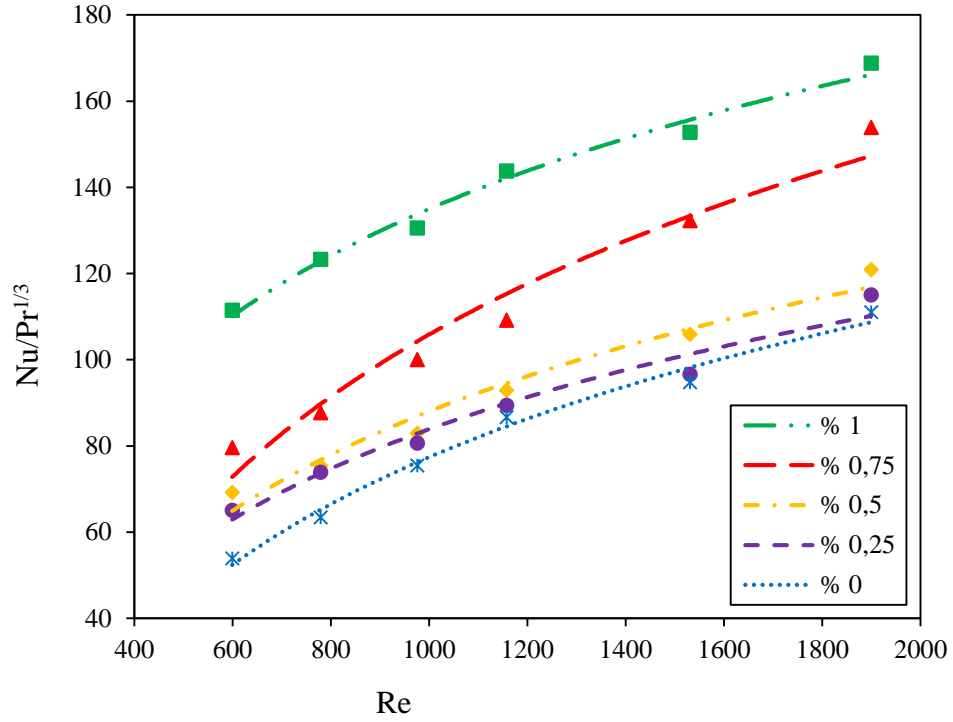
Şekil 2.26. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ve hacimsel orana göre değişimi

Tablo 2.5. Reynolds sayısına bağlı deneysel basınç düşüşü

Re	Basınç düşüşü (Pa)				
	Hacimsel oran (%)				
	0	0,25	0,5	0,75	1
600	3900	4500	4600	4700	4900
780	6190	6900	7100	7200	7400
980	8100	8900	9200	9300	9400
1160	10540	11500	11900	12300	12490
1530	15520	16700	17100	17300	17600
1900	22270	23800	24000	24200	24300

Tablo 2.5.'de dalgalı yüzeyli nanoakışkanlı kanallarda basınç düşümünün Reynolds sayısına göre değişimleri verilmektedir. Hem dalga yüzeyli kanaldan hem de suyun içerisine ilave edilen partiküllerle, akıştaki ayrılmalar ve girdap hareketlerinden dolayı nanoakışkanların basınç düşümü artmaktadır.

Şekil 2.27.'de su ve nanoakışkanlı kanalda Nusselt sayısı için elde edilen bağıntılar verilmektedir.



Şekil 2.27. Nanoakışkanlı kanallarda hacimsel oranlara bağlı olarak Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre elde edilen bağıntılar

$$Nu_{\%0} = 0,618 Re^{0,6} Pr^{0,3} \quad R^2 = 0,99$$

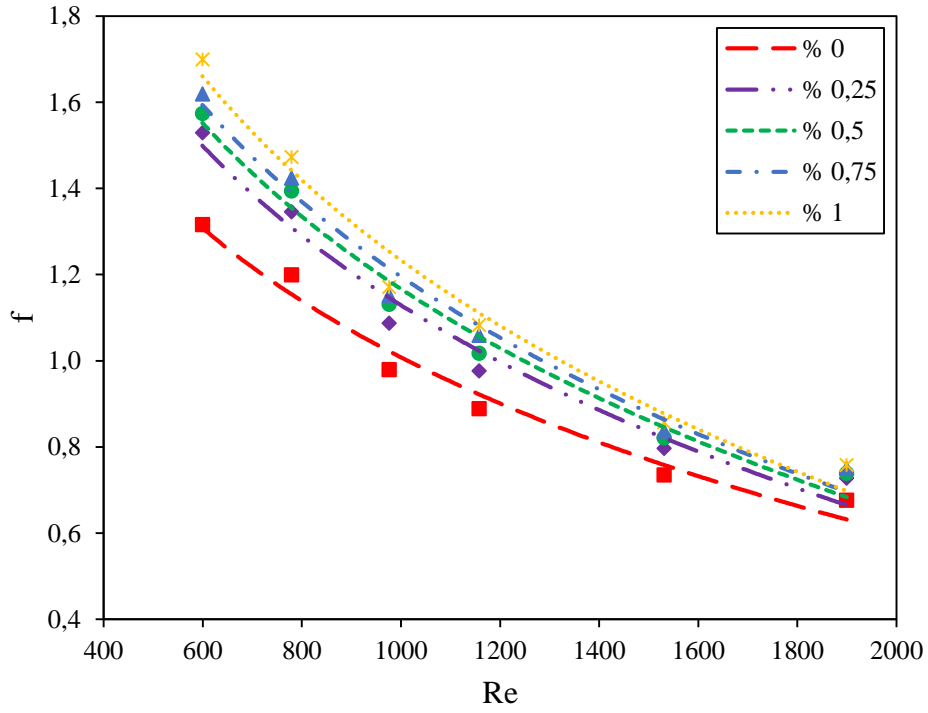
$$Nu_{\%0,25} = 1,86 Re_{nf}^{0,456} Pr_{nf}^{0,3} \quad R^2 = 0,97$$

$$Nu_{\%0,5} = 1,76 Re_{nf}^{0,471} Pr_{nf}^{0,3} \quad R^2 = 0,97$$

$$Nu_{\%0,75} = 1,2 Re_{nf}^{0,554} Pr_{nf}^{0,3} \quad R^2 = 0,97$$

$$Nu_{\%1} = 6,73 Re_{nf}^{0,342} Pr_{nf}^{0,3} \quad R^2 = 0,99$$

Şekil 2.28.'de su ve nanoakışkanlı kanalda sürtünme faktörü için elde edilen bağıntılar verilmektedir.



Şekil 2.28. Nanoakışkanlı kanallarda hacimsel oranlara bağlı olarak sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre elde edilen bağıntılar

$$f_{\% 0} = 66,21 Re^{-0,612} \quad R^2 = 0,98$$

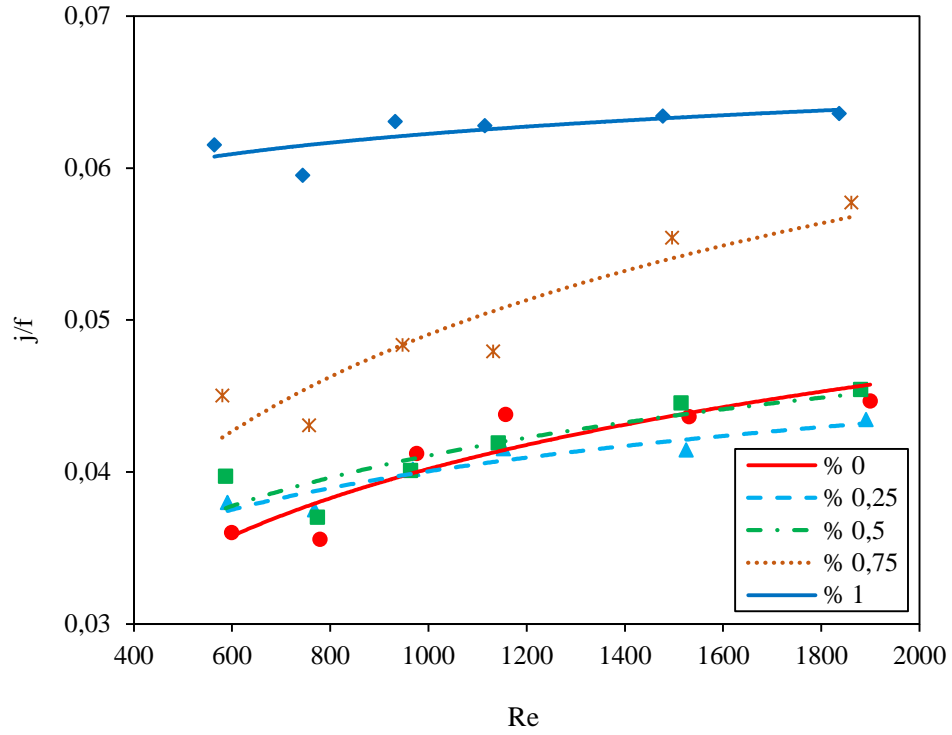
$$f_{\% 0,25} = 113,5 Re_{nf}^{-0,673} \quad R^2 = 0,98$$

$$f_{\% 0,5} = 119,4 Re_{nf}^{-0,676} \quad R^2 = 0,98$$

$$f_{\% 0,75} = 127,35 Re_{nf}^{-0,684} \quad R^2 = 0,98$$

$$f_{\% 1} = 147,23 Re_{nf}^{-0,703} \quad R^2 = 0,98$$

Şekil 2.29.'de su ve nanoakışkanlı kanalda etkenlik katsayılarının Reynolds sayısına göre değişimleri verilmektedir.



Şekil 2.29. Nanoakışkanlı kanallarda hacimsel oranlara bağlı olarak etkenlik katsayılarının Reynolds sayısına göre değişimi

### **BÖLÜM 3. MODELLEME VE SAYISAL ÇÖZÜM**

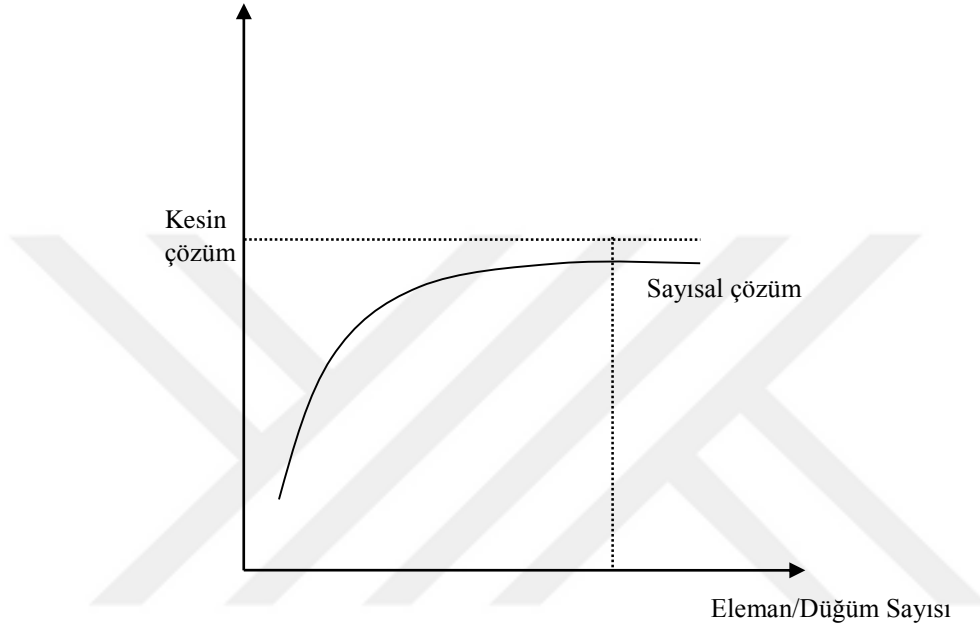
Günümüzde CFD (Computational Fluid Dynamics) olarak bilinen Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yönteminde ele alınan gerçek ürünler, sanal ürünlere dönüştürülerek bilgisayar ortamında modellenmektedir. Deneysel çalışmaların aksine yazılım (paket) programlarıyla tüm sistem ve sistemin davranışını çok yüksek bir doğruluk benzetimiyle yapılmaktadır. Ürüne ait istenen davranışlar, yüksek doğrulukta sağlanabilmektedir. Böylece, otomobil, uçak, gemi, turbo makine, ısı değiştirici gibi günlük yaşantımızın bir parçası olan ürünlerin herhangi bir parçasını üretmeden önce, bu ürünlere ait elde edilmek istenen sonuçlar önceden belirlenebilmektedir.

Isı geçişi problemlerinin çözümünde temelde deneysel, teorik ve hesaplamalı üç yaklaşım ya da yöntem kullanılmaktadır. Deneysel yaklaşım gerçek ürünü kullanarak ölçüme dayalı, teorik yaklaşım ise hesaplamalı ve sayısal yaklaşımın alternatifi olarak analitik çözümde tercih edilmektedir.

Sayısal çözümlemede sonlu hacimler, sonlu farklar, sonlu elemanlar ve Lattice Boltzmann gibi değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada ele alınan problemin çözümünde geniş bir uygulama alanına sahip olan sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Bu nedenle, ANSYS-Fluent sonlu hacimler yazılım programı kullanılarak sayısal çözümler elde edilmiştir.

Sayısal çözümlemede sınır şartları, değişken sayısı, ağ yapısı, ağ türü ve sayısı önemlidir. Sayısal çözümlemeye ait problem için uygun ağ yapısı oluşturularak çözümün önce yakınsayıp yakınsamadığı kontrol edilmelidir. Sonuçların doğruluğunu geçerli kılmak için deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmak gerekmektedir. Sayısal çözümleme için seçilen ağ yapısındaki eleman boyutları küçüldükçe ve sayısı arttıkça çözümden elde edilen hassasiyet artmakta, ancak çözüm için gerekli olan süre de

artmaktadır. Bu yüzden sonuçların daha hassas olması istenilen bölgelerde daha küçük veya farklı tip ağ yapısı oluşturulmalıdır. Eleman sayısı arttıkça elde edilmek istenen kesin çözüme daha da yaklaşılmaktadır, ancak belli bir eleman sayısından sonra kesin çözüm ile sayısal çözümler arasındaki fark Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi değişmemektedir.



Şekil 3.1. Sonlu hacimler yöntemiyle yapılan çözümün eleman sayısına bağımlılığı

Bu çalışmada ele alınan problem için deneysel ve sayısal çözümler yöntemleri kullanarak sonuçlar elde edilmiştir. Farklı sınır şartları için sayısal çözümlerle elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır. Sonlu hacimler yöntemiyle sayısal çözümlerlerde aşağıdaki aşamalar izlenmektedir [185-190].

1. Sayısal çözümler için uygun modelin seçilmesi ve oluşturulması,
2. Analiz bölgesinde sonlu hacimler yöntemiyle ağ yapısının oluşturulması,
3. Sınır şartlarının belirlenmesi,
4. Model ile uyumlu çözüm yöntemlerinin belirlenmesi,
5. Sayısal sonuçların elde edilmesi ve sonuçların doğrulanması şeklindedir.

Tez çalışmasında ele alınan problem, deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak çözülmüş ve sonuçlar karşılıklı olarak kontrol edilmiştir. Böylece, benzer problemlerin çözümünde, sayısal çözüm yöntemlerinin güvenli bir şekilde kullanılabilirliği konusunda da fikir sağlanmıştır.

### 3.1. Nanoakışkanlarda Taşınım İle Isı Geçişi İçin Sayısal Yaklaşımlar

Nanoakışkanların HAD ile sayısal çözümlemesinde literatürde (a) tek faz (single phase) (b) çift faz şeklinde iki farklı yaklaşım vardır.

Tek faz yaklaşımında, akışkan ile partikül arasındaki kayma hızı ihmal edilmekte ve bu iki fazın ısıl dengede olduğu varsayılmaktadır. Nanoakışkanlar, küçük partiküller ile akışkan karışımından oluştuğundan, ısı geçişi uygulamalarında tek bir akışkan gibi düşünülmektedir. Bu yaklaşımda, nanoakışkanın termofiziksel özellikleri hesaplanarak tek faz için geçerli olan yönetici denklemlerin (kütlenin korunumu, momentum ve enerji) çözümü yapılmaktadır.

Çift faz yaklaşımında, akışkan ile partikül arasındaki etkileşimler göz önünde alınarak yönetici denklemlerin çözümü yapılmaktadır. Çift faz yaklaşımında, farklı akış rejimleri için örneğin; “Euler-Euler” yaklaşımı (VOF-volume of fluid, mixture ve Euler modelleri ) ya da “Euler – Lagrange” (discrete phase-ayrık faz) yaklaşımlar esas alınmaktadır. Bu yaklaşımlar arasındaki temel fark, ikincil fazın (partikül) çözümüdür. Her iki yaklaşımda akışkan fazı sürekli ortamdır ve Navier-Stokes denklemleri sayısal olarak çözülmektedir. “Euler-Euler” yaklaşımında, ikincil faz (partikül) sürekli ortam olarak davranırken, “Euler Lagrange” yaklaşımında ikincil faz (partikül) “Lagrange” yaklaşımında, partikül izleme denklemleri çözülmektedir. Partiküllerin yüksek hacimsel oranları ( $\phi > \% 10$ ) için daha çok “Euler-Euler” yaklaşımı kullanılmaktadır. Partiküller çok küçük boyutlarda olduğundan dolayı, nanoakışkanların çok küçük hacimsel oranlarında bile, akışkan içerisindeki sayısı son derece fazla olacaktır. Nanoakışkana özgü bu durumda, “Lagrange-Euler” yaklaşımının kullanımı, hesaplama bakımından pratik olmamaktadır. Sonuç olarak, “Euler-Euler” yaklaşımı nanoakışkanları çift fazlı modellenmesinde daha çok tercih edilmektedir.

“Euler-Euler” yaklaşımında, “VOF” modeli birbiriyle karışmayan iki ya da daha fazla akışkanlar için tanımlanmıştır. Bu model için, bir sıvının püskürtme davranışı (prediction of jet breakup), sıvı içerisindeki büyük kabarcık hareketi (motion of large bubbles in a liquid), barajdan salınan sıvının hareketi (dam break), bazı sıvı-gaz ara yüzeyinde sürekli ya da geçici rejim durumunun izlenmesi gibi örnekler verilebilir. Bu model daha çok birbiriyle karışmayan iki akışkan için tercih edildiğinden bu çalışmada “VOF” modeli kullanılmamıştır.

“Karışım (Mixture) model” özellikle iki ya da daha fazla faz (akışkan ya da partikül) için tanımlanmıştır. Bu model, çok düşük hacimsel oranlı partiküllü akışlar için uygundur. Kontrol hacmi içinde fazların geçişine izin veren tek fazlı yaklaşım temel alınmıştır. Karışım modelinde kontrol hacmi içerisinde her faz farklı hızdadır ancak, bölgesel olarak denge olduğu kabul edilmiştir. Homojen olmayan karışım modelinde ise fazlar arasında çok güçlü bir etkileşim vardır ve fazlar aynı hızda (fazlar arasındaki göreceli hızı ihmal edilmiştir) hareket etmektedir. Bu model için, çökelme (sedimentation), siklonik ayrılma (cyclone separators), gazın hacimsel oranının düşük olduğu kabarcıklı akışlar (bubbly flows) gibi örnekler verilebilir.

“Euler model” yaklaşımı, en karmaşık çift fazlı akış modelidir. Çünkü bu modelde her bir faz için yönetici denklemler birbirinden bağımsız olarak çözülmektedir. Bu yaklaşımda faz sıvılar, gazlar ya da katıların neredeyse her kombinasyonu olabilir. Bu yaklaşımda “Euler-Lagrange” yaklaşımın aksine her bir faz “Euler” yaklaşımı olarak ele alınmaktadır [71, 191, 192].

Bu çalışmada akışkan ile partikül fazları aynı hızda kabul edildiğinden tek fazlı, homojen olmayan karışım (Mixture) model ve “Euler” yaklaşımları esas alınmıştır. Sayısal çalışmada kullanılan çözüm denklemleri aşağıda verilmektedir.



### 3.1.1. Sayısal çözüm denklemleri

ANSYS-Fluent sonlu hacimler yazılımıyla iki ve üç boyutlu akışlar Newton akışkanı, tek fazlı (single phase), çift fazlı (homojen olmayan mixture, Euler) ve çözüm bölgesinin değişmediği kabul edilerek, Kartezyen koordinatlarda süreklilik (kütlenin korunumu), momentum (Newtonun ikinci hareket yasası) ve enerji denklemleri (termodinamiğin 1. yasası), sonlu hacimler yöntemine göre ayrıştırılarak çözüm yapılmaktadır. Söz konusu fazlar ve seçilen türbülans modeli için genel denklemler şu şekildedir.

#### 3.1.1.1. Tek fazlı (Single phase) Model

Süreklilik denklemleri,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Momentum denklemleri,

$$\rho \frac{D(\mathbf{V})}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial(\mathbf{V})}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} \right] \quad (3.2)$$

Kartezyen koordinatlarda,

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (3.3)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] \quad (3.5)$$

Bir akışkan elemanına iki tür kuvvet etki etmektedir. Bunlar (1) hacme etki eden kuvvetler, (2) yüzeye etki eden kuvvetlerdir.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.6)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (3.7)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (3.8)$$

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \sigma_{ij}$$

$$\text{Kronecker delta-tensörü, } \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

$$\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{V}) + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.10)$$

$\mu$ , birincil viskozite katsayısı,  $\lambda$ , ikincil viskozite katsayısıdır.

$i = 1,2,3$  için  $u, v, w$  sırasıyla hız bileşenidir ve sıkıştırılmaz akış için  $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$ 'dir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho u w)}{\partial z} &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \\ \mu_e \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] &+ \Phi_u \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu_e \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \Phi_v \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu_e \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \Phi_w \quad (3.13)$$

Burada,  $\mu_e$ , etkili viskozite olup,  $\mu_e = \mu + \mu_t$  şeklindedir ve  $\Phi_u$ ,  $\Phi_v$  ve  $\Phi_w$  viskoz kayıplar terimi,  $\mu_t$  ise türbülans viskozitedir.

Sıkıştırılmaz akışkanlar için enerji denklemi,

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w c_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (3.15)$$

Burada,  $k$  ısı iletim katsayısı,  $\dot{q}$  ise hacimsel ısı üretimidir.

### 3.1.1.2. Türbülans modeli

Bu çalışmada, ANSYS-Fluent sonlu hacimler yazılım programında k-ε türbülanslı akış modeli kullanılarak sayısal çözümler elde edilmiştir.

Türbülans kinetik enerji denklemi (k),

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v k) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w k) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] &- \rho \varepsilon + \mu_t \Phi_Q \end{aligned} \quad (3.16)$$

Türbülans kinetik enerji kaybı (dissipation) oranı ( $\varepsilon$ ) denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] &- C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi_Q \end{aligned} \quad (3.17)$$

Viskoz ısı üretimi  $\Phi_Q$  bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$\Phi_Q = 2\mu_t \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (3.18)$$

Türbülans viskozite ifadesi,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.19)$$

şeklindedir.

Türbülans modele ait katsayılar  $C_1 = 1,44$ ,  $C_2 = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  şeklindedir.

### 3.1.1.3. Karışım (Mixture) modeli

Süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla(\rho_m \bar{V}_m) = 0 \quad (3.20)$$

$$\bar{V}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \bar{V}_k}{\rho_m} \quad (3.21)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \quad (3.22)$$

Burada,  $\rho_m$  karışımın yoğunluğu,  $\bar{V}_m$  ortalama hız,  $\phi_k$ , k tane fazın hacimsel oranıdır.

Momentum denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla(\rho_m \bar{V}_m \bar{V}_m) &= -\nabla p + \nabla \left[ \mu_m (\nabla \bar{V}_m + \nabla \bar{V}_m^T) \right] + \rho_m \bar{g} + \bar{F} \\ &+ \nabla \left( \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \bar{V}_{dr,k} \bar{V}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

n fazların sayısı,  $\bar{F}$  yüzey kuvvetleri ve  $\mu_m$  karışımın viskozitesi,

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \mu_k \quad (3.24)$$

$\bar{V}_{dr,k}$  ikincil faz k için sürüklenme hızı,  $\bar{V}_{dr,k} = \bar{V}_k - \bar{V}_m$

Enerji denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\phi_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\phi_k \vec{V}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + \dot{q} \quad (3.25)$$

$k_{\text{eff}}$  etkin ısı iletim katsayısı,  $k_{\text{eff}} = \sum \phi_k (k_k + k_t)$  'dir.

Burada  $k_t$  kullanılan türbülanslı modele göre türbülanslı ısı iletim katsayısı ve  $\dot{q}$  hacimsel ısı üretimidir.

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{V_k^2}{2} \quad (3.26)$$

Sıkıştırılamaz faz için  $E_k = h_k$  ve  $h_k$ , k fazı için entalpidir.

#### 3.1.1.4. Euler (Eulerian) modeli

Hacimsel oran denklemi,

q tane fazın hacmi,

$$V_q = \int \phi_k dV \quad (3.27)$$

Burada;

$$\sum_{q=1}^n \phi_q = 1 \quad (3.28)$$

q fazının yoğunluğu,

$$\hat{\rho}_q = \varnothing_q \rho_q \quad (3.29)$$

Süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varnothing_q \rho_q) + \nabla (\varnothing_q \rho_q \vec{V}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (3.30)$$

$\vec{V}_q$ , q fazının hızı,  $\dot{m}_{pq}$  p fazından q fazına kütle geçişi ve  $\dot{m}_{qp}$ , q fazından p fazına kütle geçişini karakterize etmektedir.  $S_q$ , her bir fazın kütle geçişinden dolayı ilave terimlerdir.

Momentum denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\varnothing_q \rho_q \vec{V}_q) + \nabla (\varnothing_q \rho_q \vec{V}_q \vec{V}_q) = -\varnothing_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \varnothing_q \rho_q \vec{g} + \\ \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{V}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{V}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{wm,q} + \vec{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad (3.31)$$

$\bar{\tau}_q$ , q fazının gerilme-şekil değiştirme tensörü

$$\bar{\tau}_q = \varnothing_q \mu_q (\nabla \vec{V}_q + \nabla \vec{V}_q^T) + \varnothing_q \left( \lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \nabla \right) \vec{V}_q \bar{I} \quad (3.32)$$

Burada,  $\mu_q$  ve  $\lambda_q$  sırasıyla q fazının kayma ve serbest ortam viskozitesi,  $\vec{F}_q$ , yüzeye etkiyen dış kuvvetler,  $\vec{F}_{lift,q}$ , kaldırma kuvveti,  $\vec{F}_{wl,q}$ , duvar yağlama kuvveti,  $\vec{F}_{wm,q}$ , gerçekte etkili olan kütle kuvveti ve  $\vec{F}_{td,q}$ , türbülans yayılım kuvvetidir.  $\vec{R}_{pq}$ , fazlar arasındaki etkileşim kuvvetleri ve p, tüm fazların oluşturduğu ortak basınçtır.  $\vec{V}_{pq}$ , fazlar arasındaki hızdır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varnothing_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\varnothing_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = \varnothing_q \frac{dp_q}{dt} + \vec{\tau}_q : \nabla \vec{u}_q - \nabla \vec{q}_q + S_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \quad (3.33)$$

Burada;  $h_q$ , q fazının entalpisi,  $\vec{q}_q$  ısı akısı,  $S_q$ , entalpi kaynakları (örneğin kimyasal reaksiyon ya da ışınım),  $Q_{pq}$ , p ve q fazları arasındaki ısı geçişi ve  $h_{pq}$  fazlar arası entalpidir.

### 3.1.2. Partiküllü akışların sınıflandırılması

Partikül-akışkan arasındaki karışımın hacimsel oranına göre partiküllü akışlar (a) seyreltik (dilute), (b) yoğun (dense) akışlar şeklinde sınıflandırılmaktadır. Seyreltik akışlarda hacimsel oran % 2'den az iken, yoğun akışlarda hacimsel oran % 6,5'den büyüktür. Yoğun akışlarda partikül çarpışmaları ve partiküller arasındaki etkileşim göz önüne alınırken, seyreltik akışlarda bu etkiler ihmal edilebilmektedir. Bu iki hacimsel oran arasındaki akışlar ise geçiş akışları olarak adlandırılmaktadır. Tez çalışmasında ele alınan en yüksek hacimsel oran % 1 olduğu için söz konusu nanoakışkanlar seyreltik akıştır.

Akışkan ile partikül arasındaki etkiyi modelleyebilmek amacıyla partiküllü akışlar 4 sınıfa ayrılmıştır [76]. Bunlar;

Tek yönlü etkileşim (One-way coupling): Akışkan, partikül hareketini hidrodinamik sürüklenme kuvvetleriyle etkilemektedir. Ancak partikülün akışkana olan etkileri ihmal edilmektedir. Çok düşük hacimsel orandaki partiküllü akışlar için tercih edilmektedir. Seyreltik pnömatik taşıma ya da partiküllerin kurutulması ve düşük hacimsel orandaki nanoakışkanlarda ısı geçişi örnek verilebilir.

İki yönlü etkileşim (Two-way coupling): Partiküllerin hacimsel oranı çok düşük olmasına rağmen, tek yönlü etkileşimin yanında partikül ve akışkan arasındaki etkiler



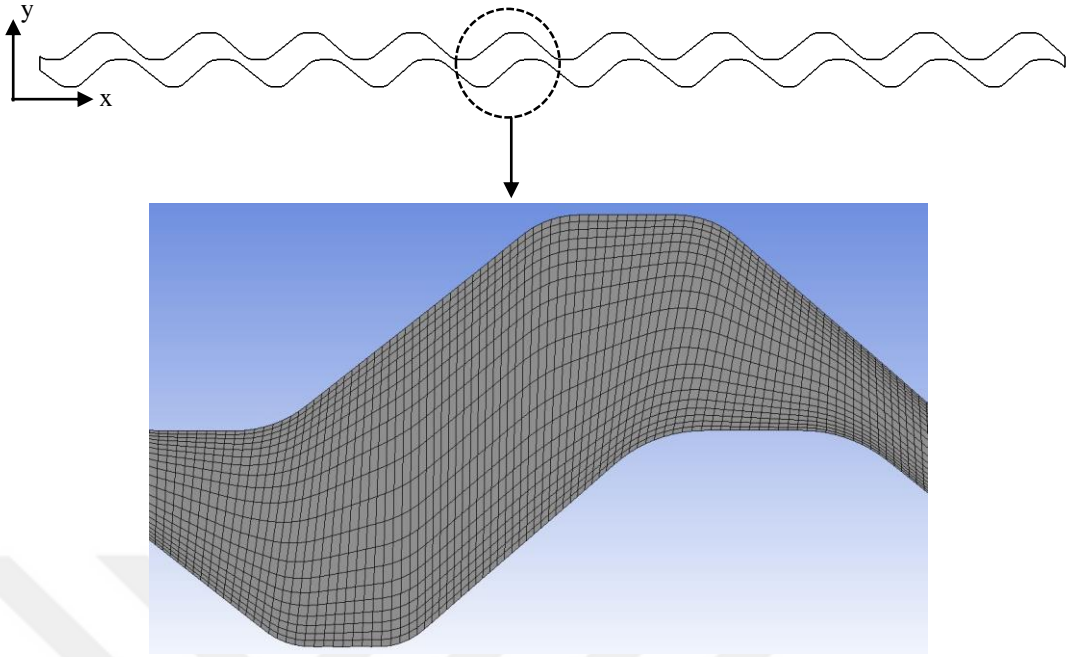
göz önüne alınmaktadır. Kaynama sonunda damlaların buharlaşması, tüm yanma işlemleri örnek verilebilir.

Üç yollu etkileşim (Three-way coupling): İki yollu etkileşimin yanında partiküller arasındaki etkileşim de göz önüne alınmaktadır. Yanma odasında ışınlımla ısı geçişi örnek verilebilir.

Dört yollu etkileşim (Four-way coupling): Bu durum özellikle yoğun akışlar için geçerlidir. Akışkan, partiküllerden olan ısı geçişi ve hareketinden etkilenirken partikülde hız ve sıcaklıkla akışkanı etkilemektedir. Ayrıca partiküller arasındaki partikül-partikül etkileşimleri ve partikül-yüzey etkileşimleri de göz önüne alınmaktadır. Akışkan yataklı reaktörler ve birçok kimyasal reaktör örnek verilebilir.

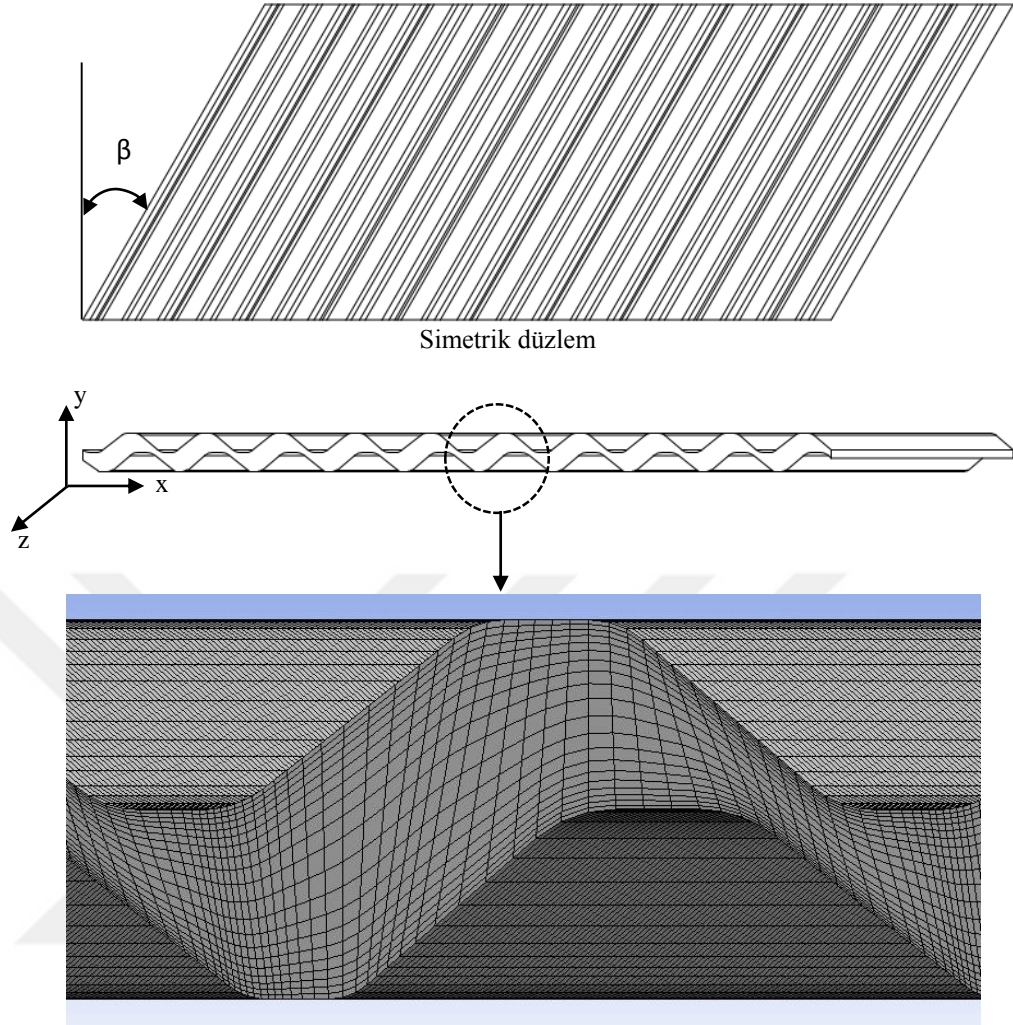
### **3.1.3. Sayısal çözüm alanının belirlenmesi**

Deneysel çalışmalarda, akış yönünde periyodik kesit alanına sahip dalgalı yüzeyli kanallarda, akışın düz kanallara göre daha kısa ve çabuk geliştiği belirlenmiştir [193]. Üç ile beş hatveden sonra akışın tam geliştiği kabul edilmektedir. Akış tam geliştikten sonra hız ve sıcaklık alanları periyodik olarak aynı değerleri alarak tekrarlamaktadır [194]. Sayısal çözümleme yapılırken bu esaslar dikkate alınmıştır ve bu yüzden hem iki boyutlu hem de üç boyutlu modelde 10 adet hatveden oluşan dalgalı yüzeyli kanal ele alınmıştır [195]. Çözümlemede, türbülanslı akış koşullarında zorlanmış ve nanoakışkanlı zorlanmış taşınım ile ısı geçişinde literatürde daha çok tercih edilen  $k-\epsilon$  türbülans modeli esas alınmıştır [196-206]. Tam gelişmiş akış halinde ısı geçiş katsayısı ve basınç düşümünü sayısal olarak incelemek için ele alınan 2 boyutlu (2B) ve 3 boyutlu (3B) geometriler Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.'de verilmektedir.



Şekil 3.2. 2B çözüm alanı ve tek bir hatve için ağ yapısı

3B sayısal çözümlmeyi basitleştirmek için tüm kanalı modellemek yerine söz konusu kanalların  $\beta$  açısına bağlı olarak akış geometrisinin simetri eksenine göre yarısı modellenmiştir.



Şekil 3.3. 3B çözüm alanı ve tek bir hatve için ağ yapısı

### 3.1.3.1. Ağ yapısı ve sınır şartları

Problemde giriş ve çıkış dağıtıcılarının etkisi ihmal edilerek, ele alınan model hem 2B hem de 3B olarak incelenmiştir. Söz konusu modeller için sıcak akışkan tarafından verilen ısı akısı değeri Denklem 3.34 ifadesiyle hesaplanmıştır.

$$q = \frac{\dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{c,o} - T_{c,i})}{2A} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (3.34)$$

2B model için geçerli olan en uygun ağ yapısında 40000 eleman olup, x ekseninde 2000 eş parçaya y ekseninde 20 eş parçaya bölünmüştür. Çözüm

hassasiyetini artırmak amacıyla kanalın üst ve alt kenarlarına yakın bölgelere merkezden yüzeye doğru daha sık ağ yapısı (bias: 4) seçilmiştir.

3B model için en uygun ağ yapısında 1,7 milyon eleman, ağ yapısının eleman düzgünlüğü (skewness) değeri maximum 0,91'dir. Çözüm hassasiyetini artırmak amacıyla kanalın üst ve alt kenarlarına yakın bölgelerde merkezden yüzeye doğru daha sık ağ yapısı (bias: 4) seçilmiş ve y ekseninde 20 eş parçaya bölünmüştür.

Modellerin geçerliliği ve deneysel çalışmayla olan uyumunu belirlemek için önce su için sayısal çözümler, daha sonra da hazırlanan nanoakışkanlar için sayısal çözümler yapılmıştır.

Sayısal çözümlemede, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri için gerekli olan yakınsama değerleri  $10^{-6}$  seçilerek, 2B model için ortalama 1000 iterasyonda, 3B model için ortalama ise 1500 iterasyon yapılmıştır. Çözümlemede SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) yöntemi seçilmiştir. En uygun eleman sayısı belirlendikten sonra, farklı sınır şartları için (parametrik çözüm) yapılmıştır. Sonlu hacimler yöntemiyle oluşturulan ağ yapısı aşağıda verilen sınır şartlarına uygun olarak çözülmüştür.

2B ve 3B sayısal çözümleme için yapılan kabuller şu şekildedir;

Girişte hız sabit olup yatay yöndedir. Düşey yöndeki hız bileşeni sıfırdır ( $u=u$ ,  $v=0, w=0$ ),

Kanal üzerinde hızlar sıfırdır ( $u=0, v=0, w=0$ ),

Yerçekimi etkisi ihmal edilmiştir,

Kanal boyunca akışkanın fiziksel özelliklerinin değişmediği kabul edilmiştir,

Akışkan izotropiktir,

Çıkışta basınç gradyeni sıfırdır,

Kanal boyunca ısı akışı sabittir,

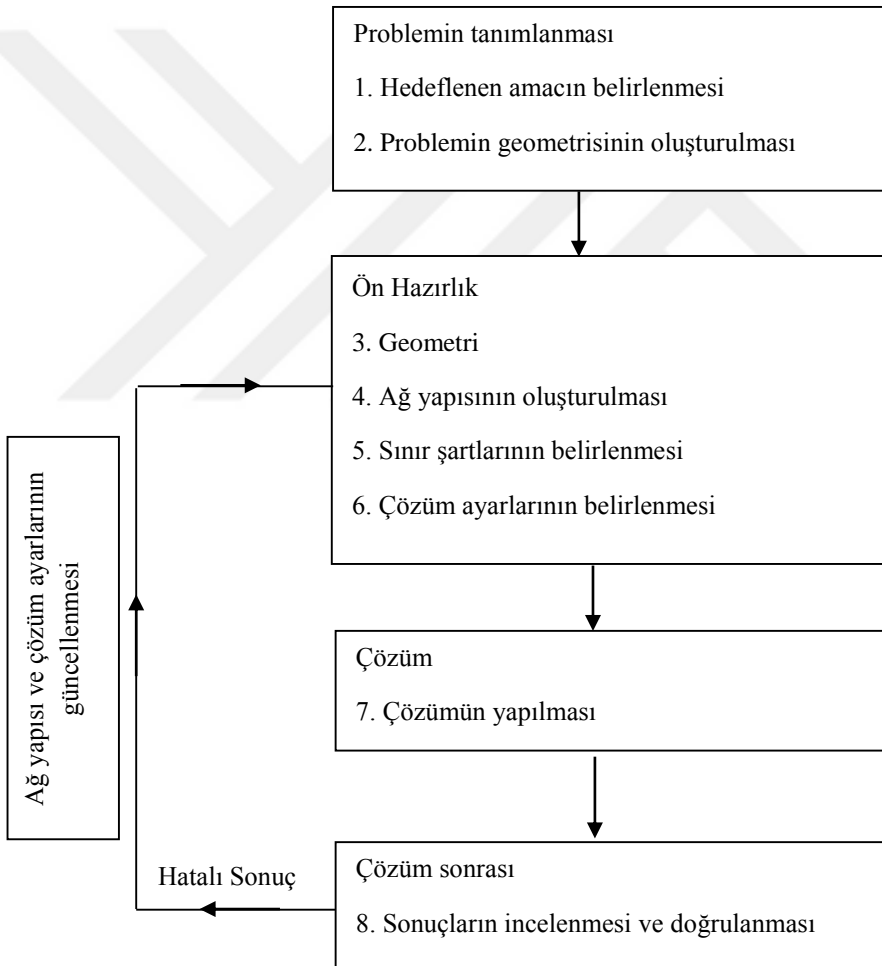
Akışan-partikül arasında kimyasal reaksiyon yoktur,

Dış kuvvetler ihmal edilmiştir,

Seyreltik karışımdır,  
 Viskoz yayılım ihmal edilmiştir,  
 Işınım ile ısı geçişi ihmal edilmiştir,  
 Partikül ve akışkan kanal girişinde aynı sıcaklıkta ve hızdadır.

Her iki model için sayısal çözümlemede nanoakışkanların ve suyun termofiziksel özellikleri Denklem 1.4-1.7 ve Denklem 1.9-1.12'den hesaplanmıştır.

Problemler aşağıdaki akış şemasına göre çözülmüştür.



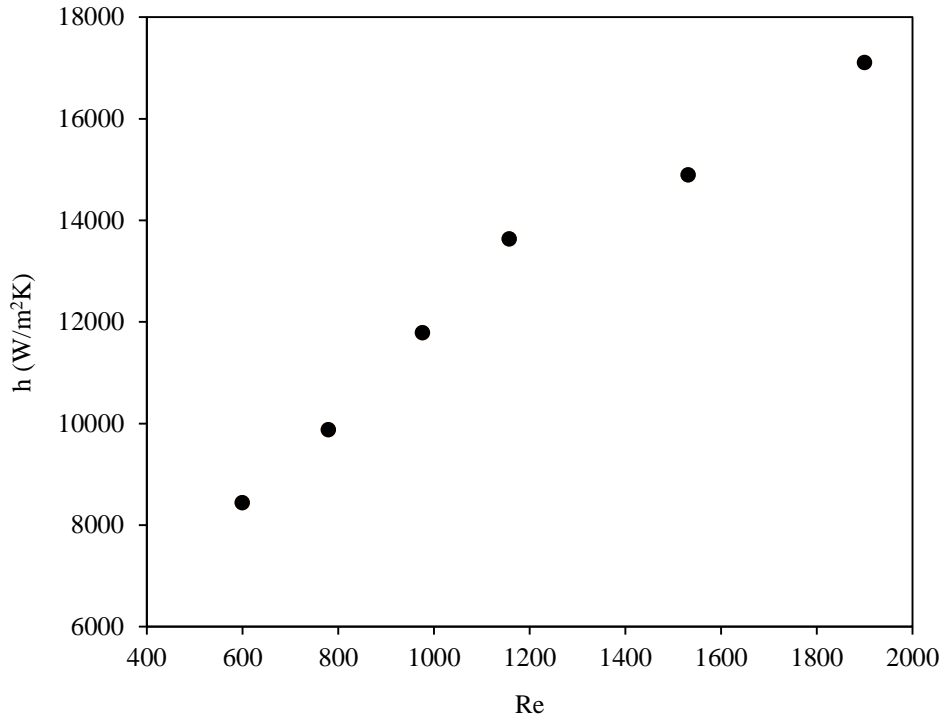
Şekil 3.4. ANSYS-Fluent işlem akış şeması

### 3.1.3.2. Sayısal çözüm sonuçları

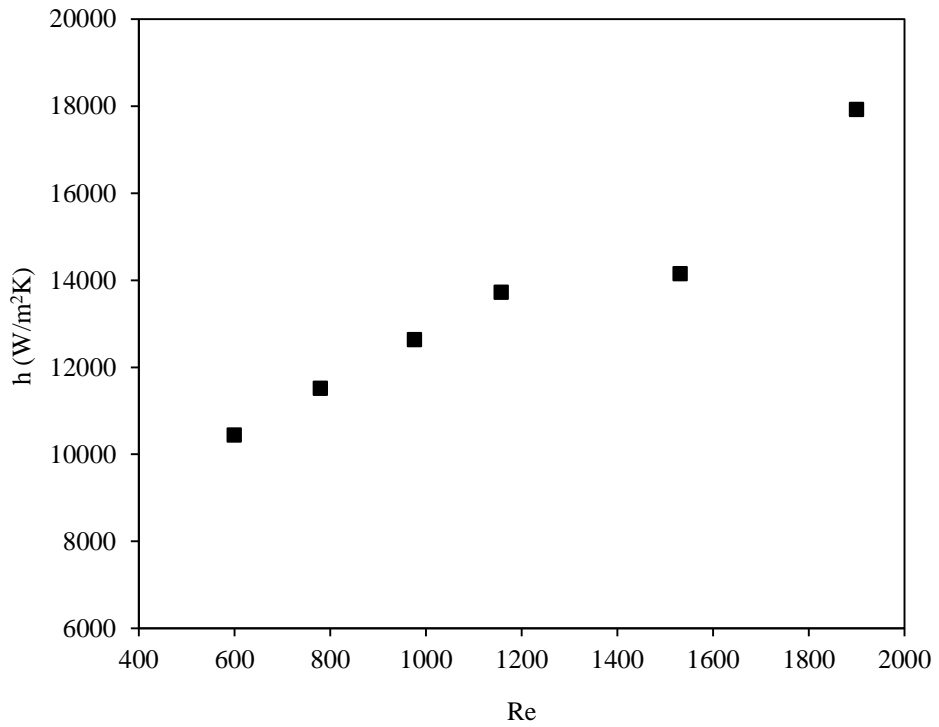
Deneysel incelenmelerde sıcak akışkan ve nanoakışkanın levhalar arasından akışı sırasında her bir kesitte sıcaklığı girişten-çıkışa değiştiğinden, nanoakışkan kanal boyunca değişken ısı akılarına maruz kalmaktadır. Fernandes ve ark. [207] HAD yöntemiyle levhalı ısı değiştiricide değişken ısı akılı ve sabit ısı akılı sınır şartlarını kullanarak akışkanın çıkış sıcaklığını belirleyerek elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Deneysel ve sayısal sonuçlardan giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki ortalama sapmanın değişken ve sabit ısı akılı sınır şartlarında sırasıyla % 6,9 ve % 7,3 olduğunu belirtmişlerdir. Bu gerekçeyle, çalışmamızda nanoakışkanlı dalgalı yüzeyli levhalarda ısı geçişi deneysel olarak incelendikten sonra, sayısal çözümler için ısı modeller oluşturulmuştur. Bu modellerin, ANSYS-Fluent sonlu hacimler yazılım programı ile sabit ısı akısı koşullarında çözümü yapılmış ve ısı taşınım katsayıları Denklem 3.35'e göre hesaplanmıştır.

$$h = \frac{q}{(T_y - T_{o,ort})} \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.35)$$

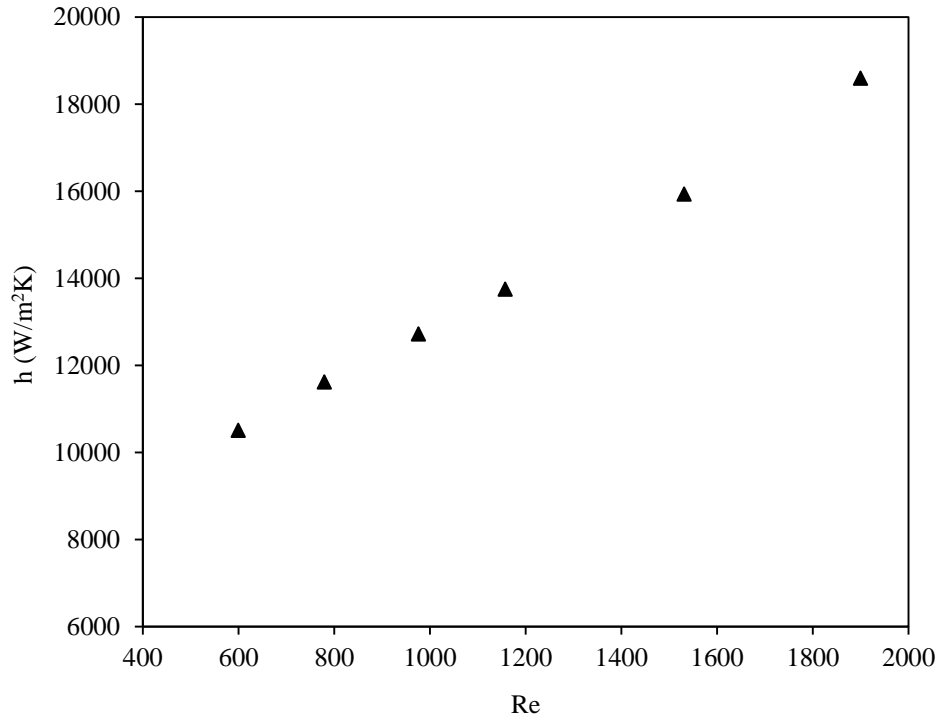
Dalgalı yüzeyli levha için ısı taşınım katsayıları farklı Reynolds sayılarına ve hacimsel orana göre Şekil 3.5. - Şekil 3.30.'da gösterilmektedir. Akışkan özelliklerinin değişmesi, hacimsel oranların değişmesi, kanal boyunca akışta ayrılmalar, tekrardan birleşmeler ve girdap hareketlerinden dolayı ısı taşınım katsayıları değişmektedir. Şekil 3.5. - Şekil 3.17.'de 2B model için elde edilen ısı taşınım katsayıları ve Şekil 3.18. - Şekil 3.30.'da 3B model için elde edilen ısı taşınım katsayıları görülmektedir.



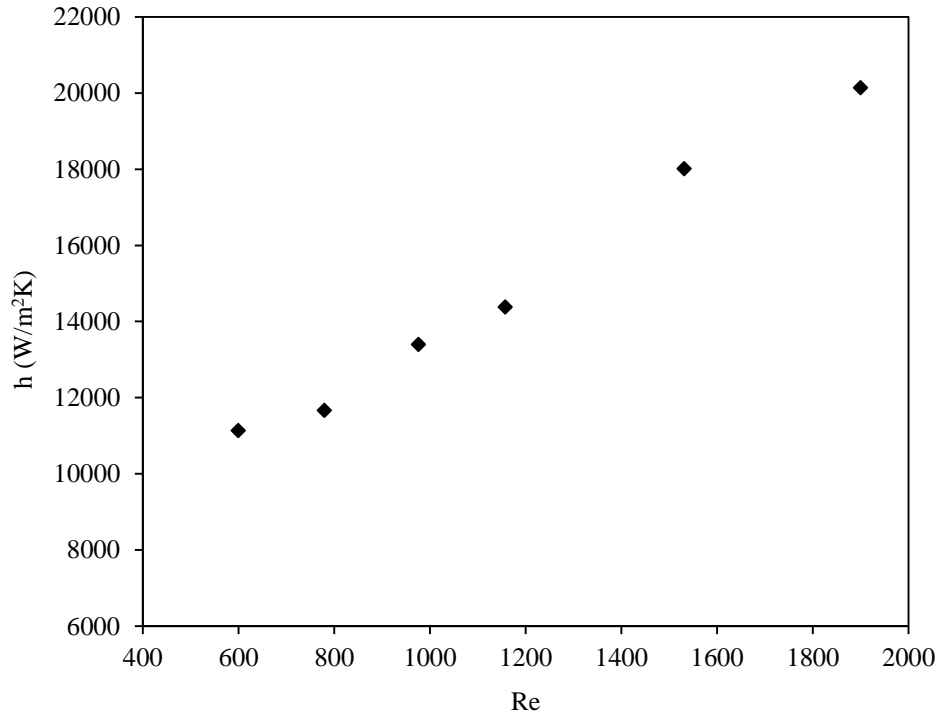
Şekil 3.5. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil 3.6. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

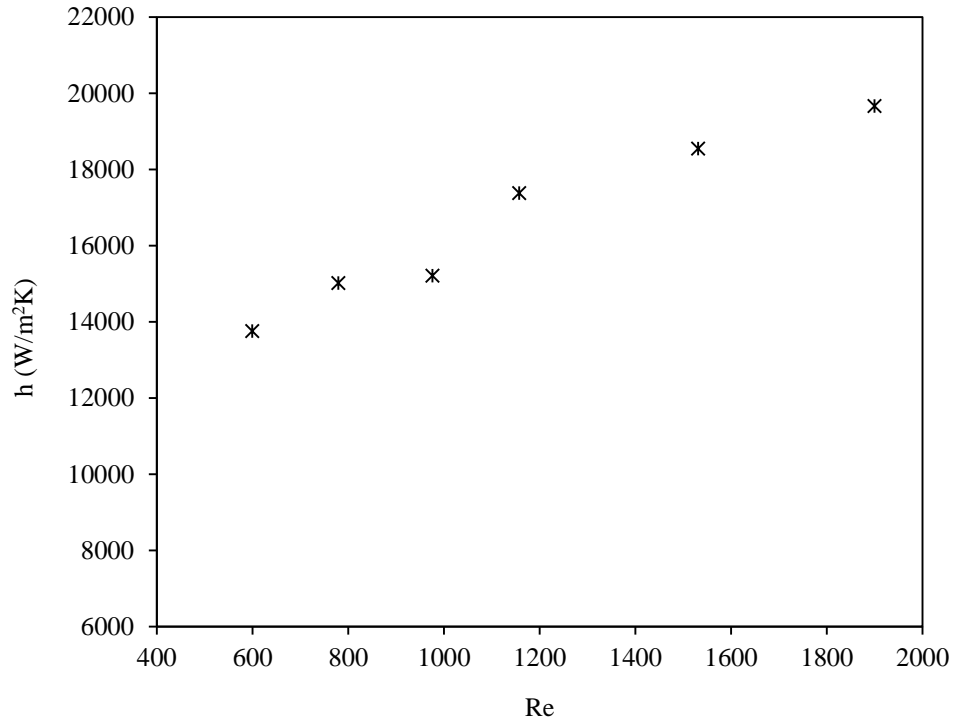


Şekil 3.7. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

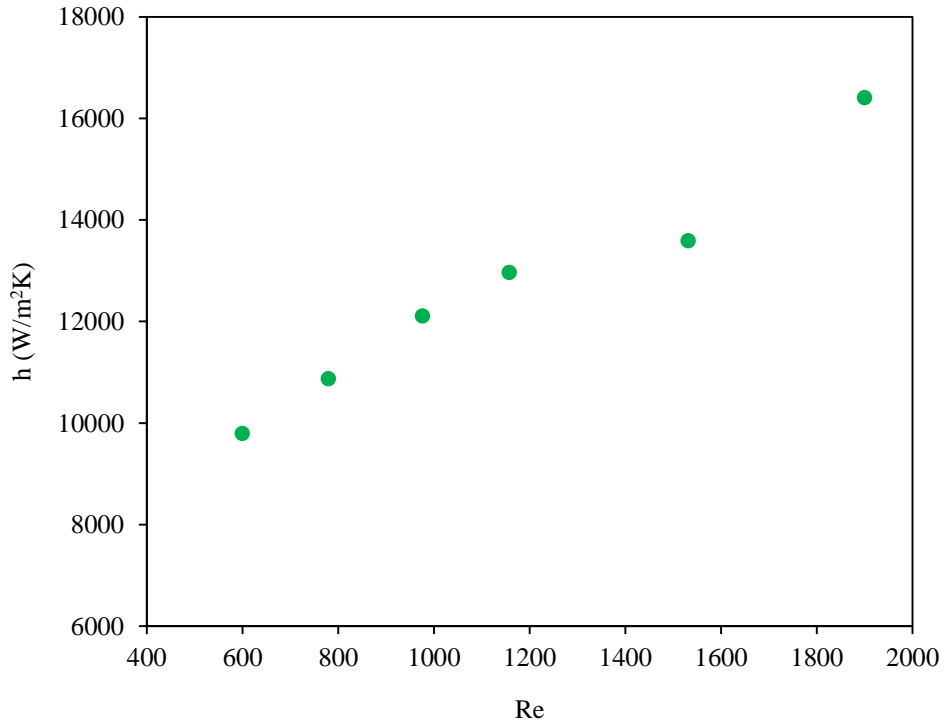


Şekil 3.8. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

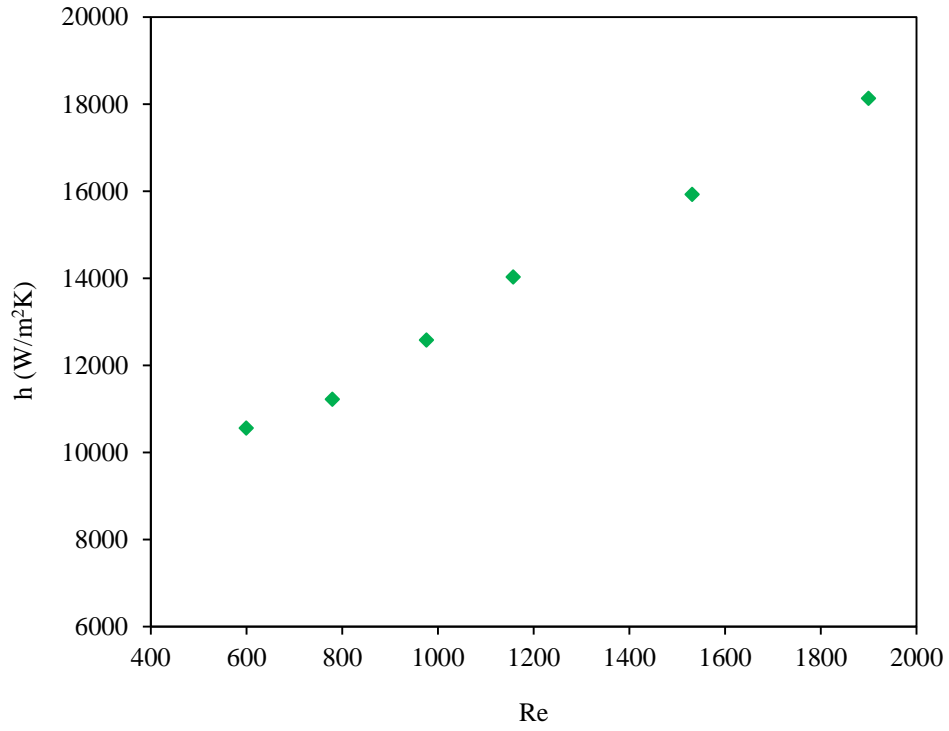




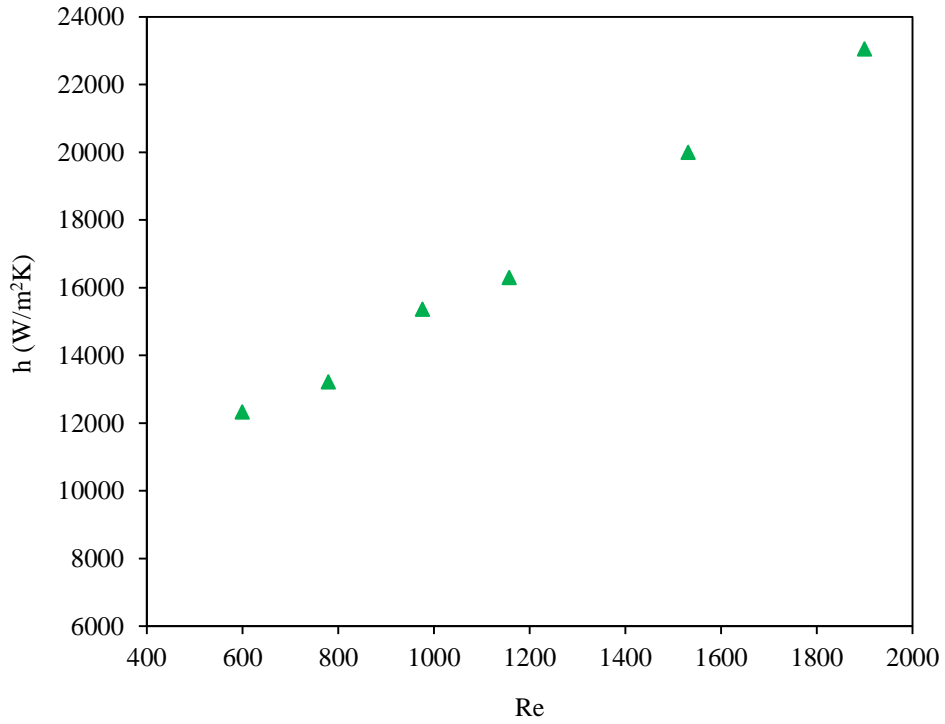
Şekil 3.9. 2B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



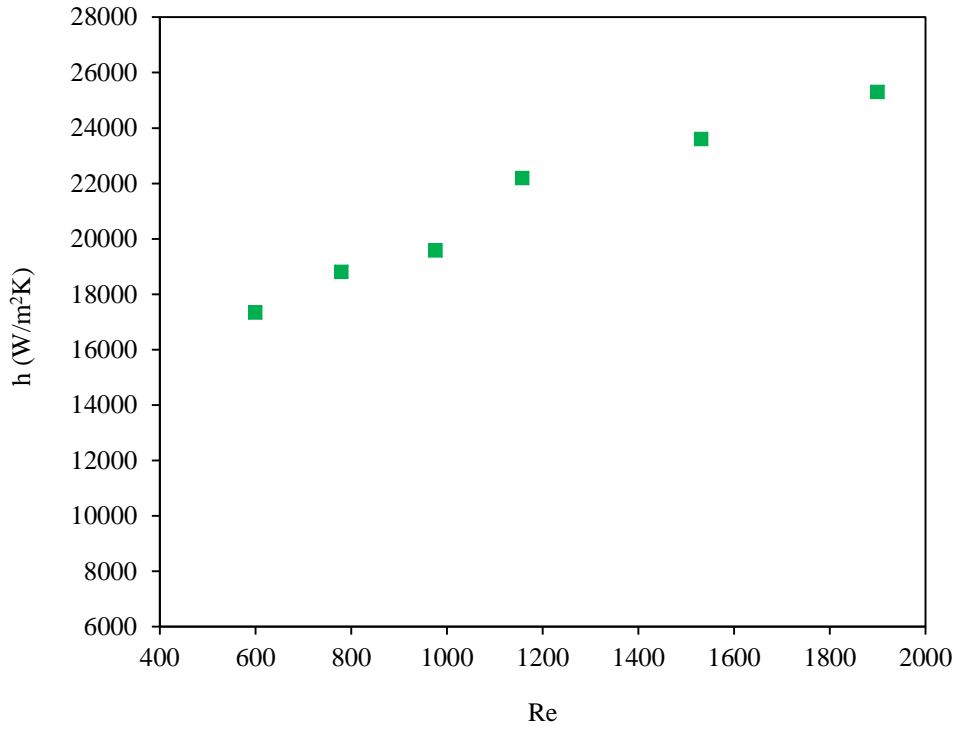
Şekil 3.10. 2B “karışım” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



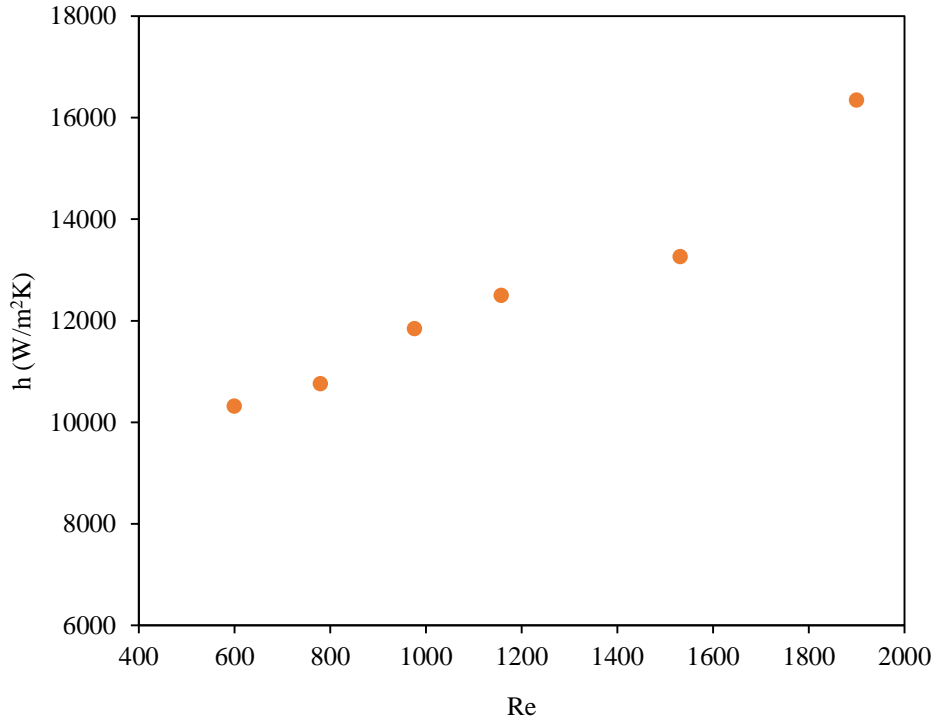
Şekil 3.11. 2B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



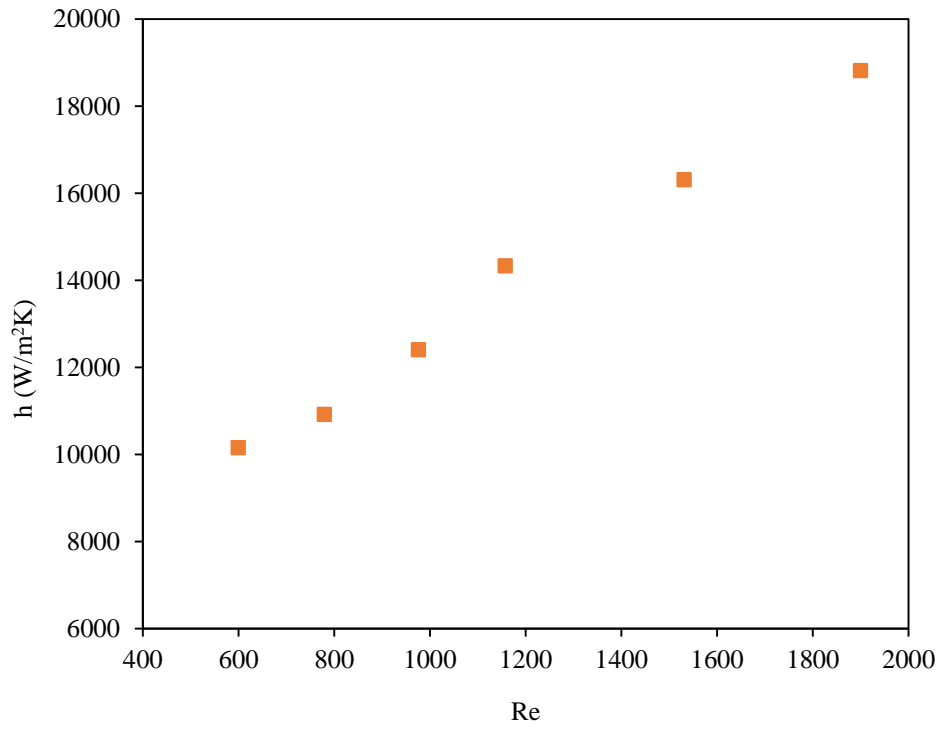
Şekil 3.12. 2B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



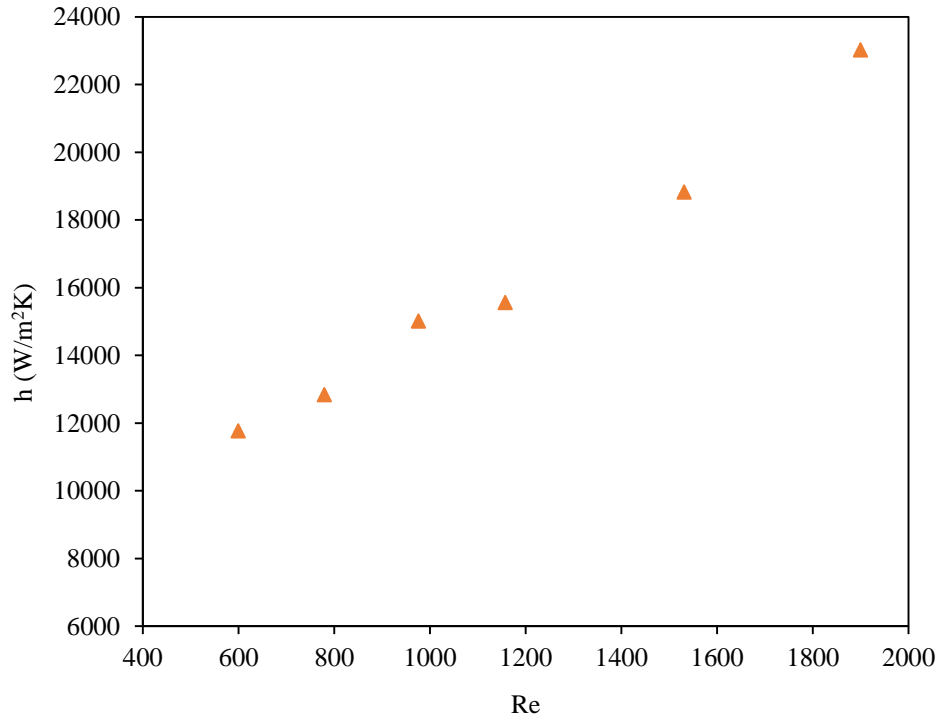
Şekil 3.13. 2B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



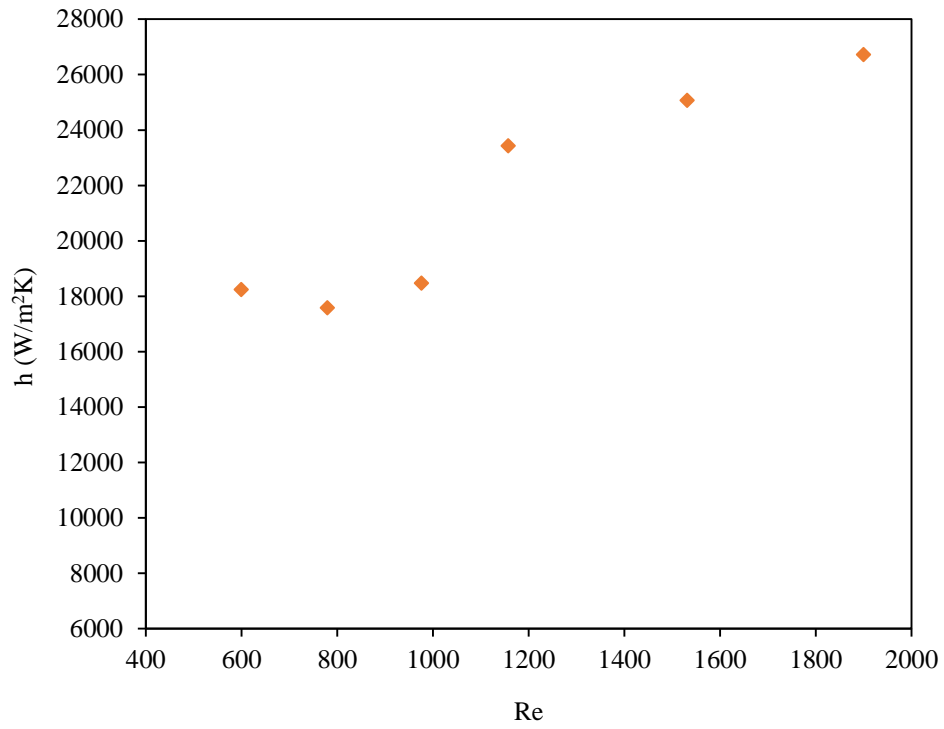
Şekil 3.14. 2B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



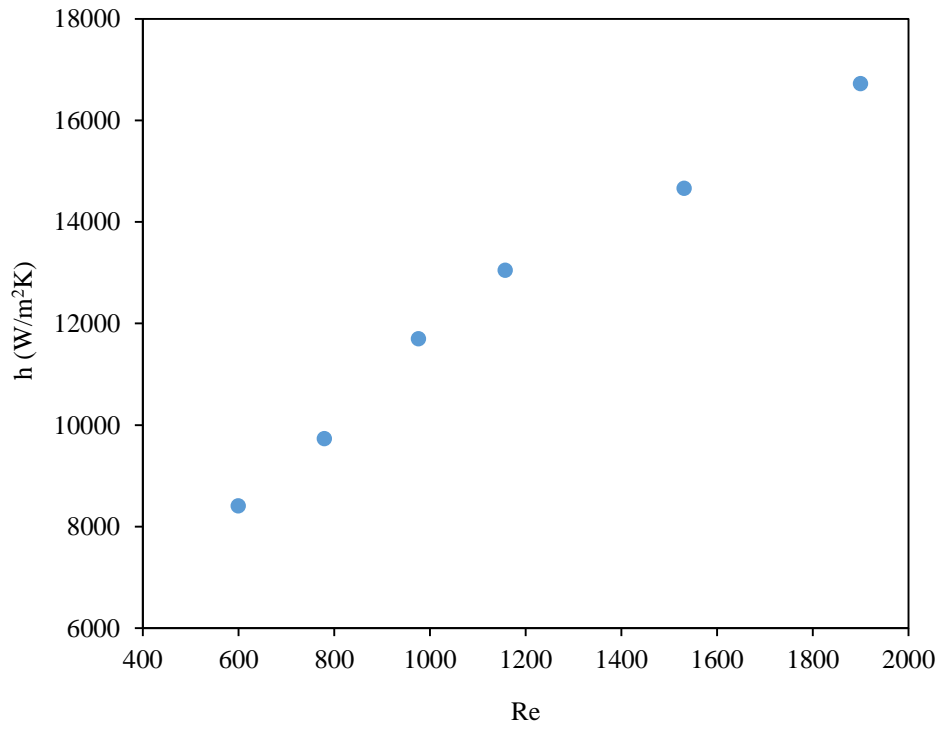
Şekil 3.15. 2B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,5 olan nanoaerosolde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



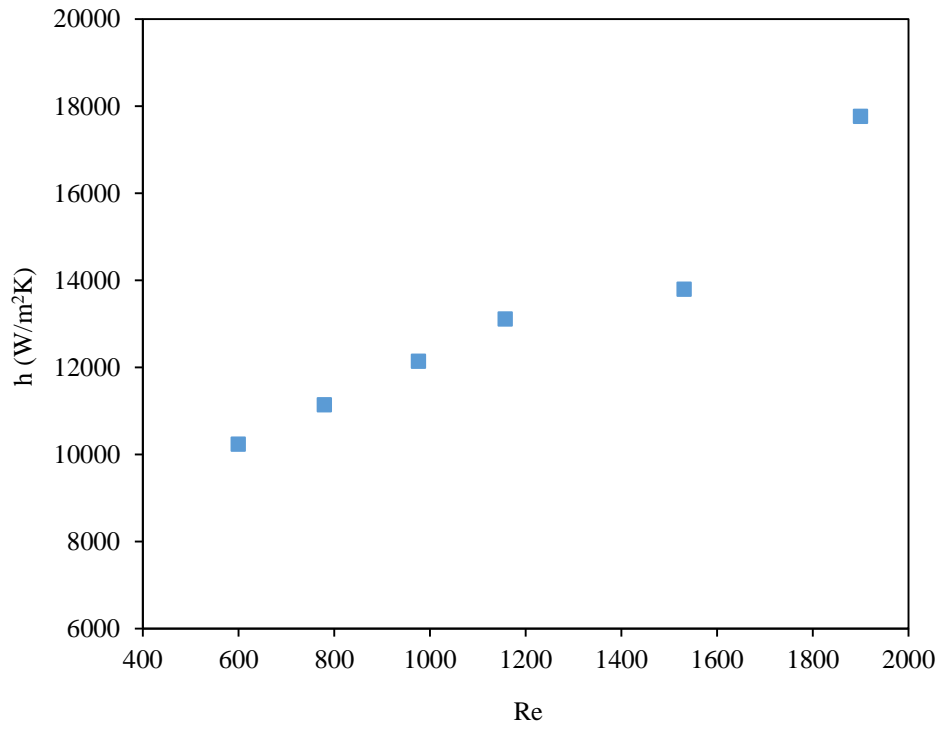
Şekil 3.16. 2B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,75 olan nanoaerosolde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



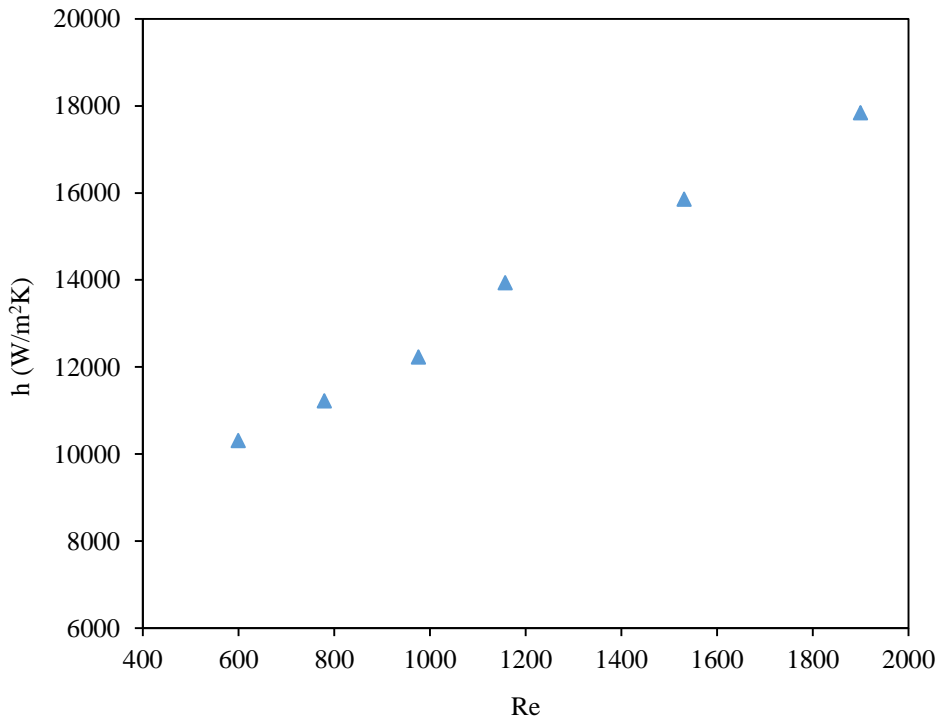
Şekil 3.17. 2B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



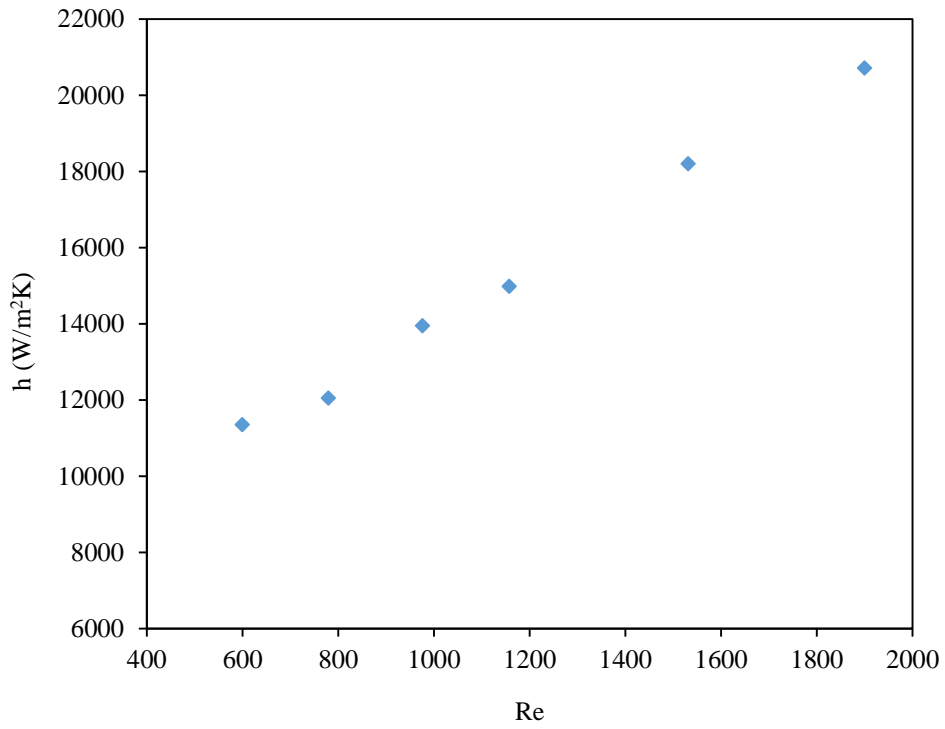
Şekil 3.18. 3B “tek fazlı” yaklaşımında hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



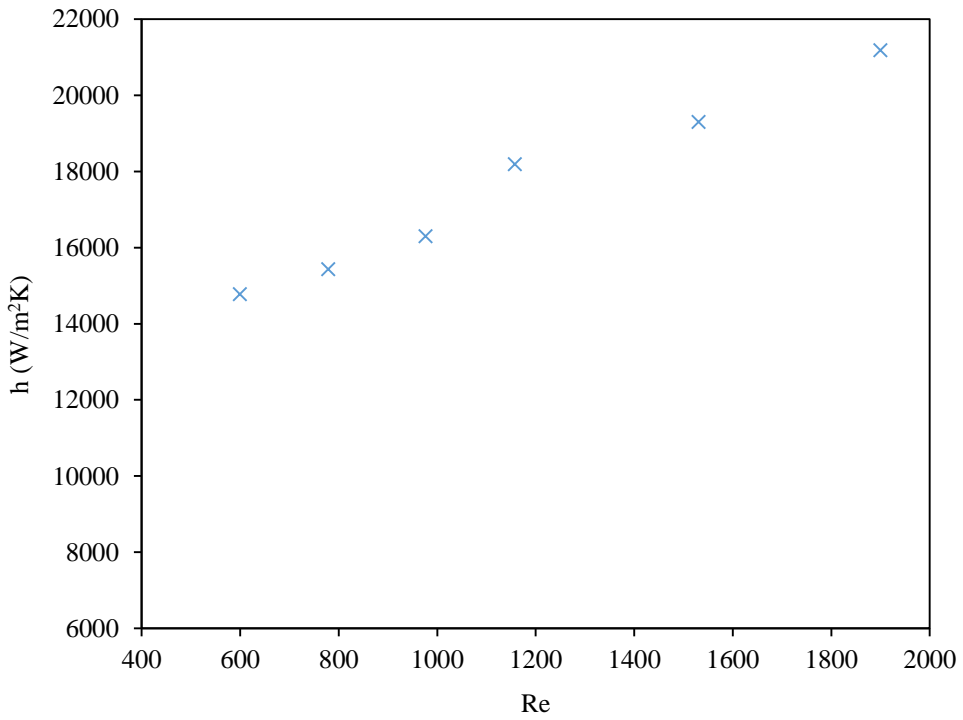
Şekil 3.19. 3B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



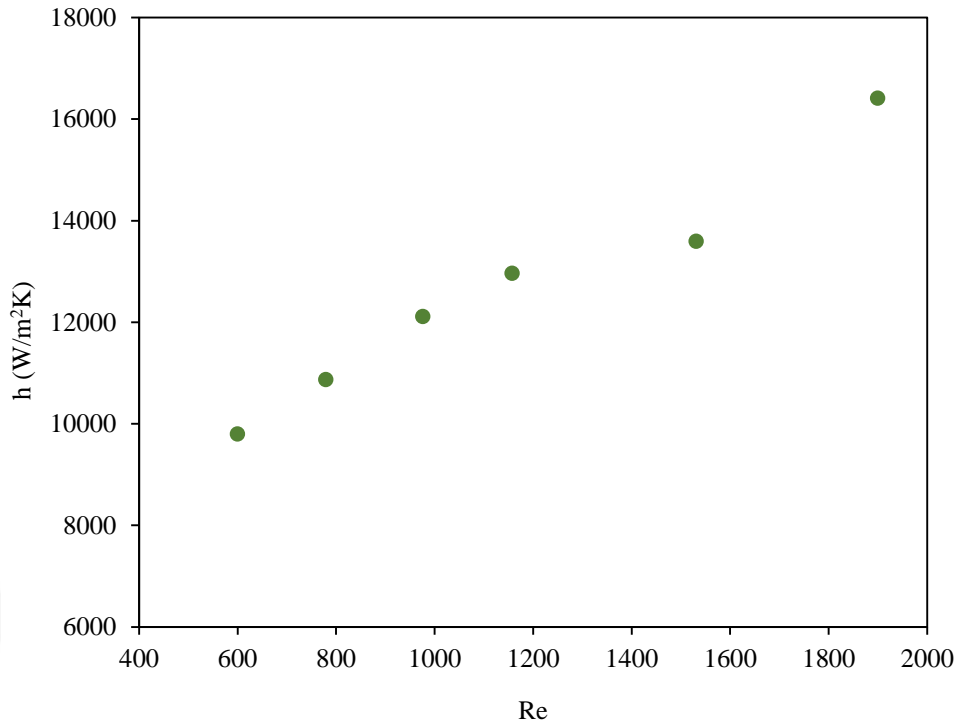
Şekil 3.20. 3B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



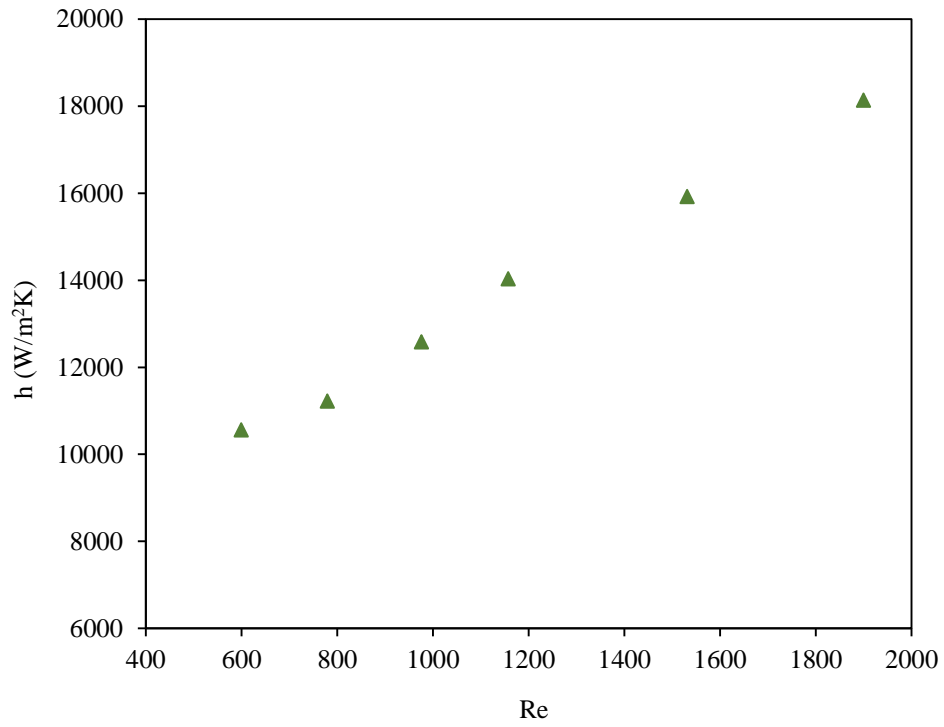
Şekil 3.21. 3B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 0,75 olan nanoağışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değışimi



Şekil 3.22. 3B “tek fazlı” yaklaşımda hacimsel oranı % 1 olan nanoağışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değışimi

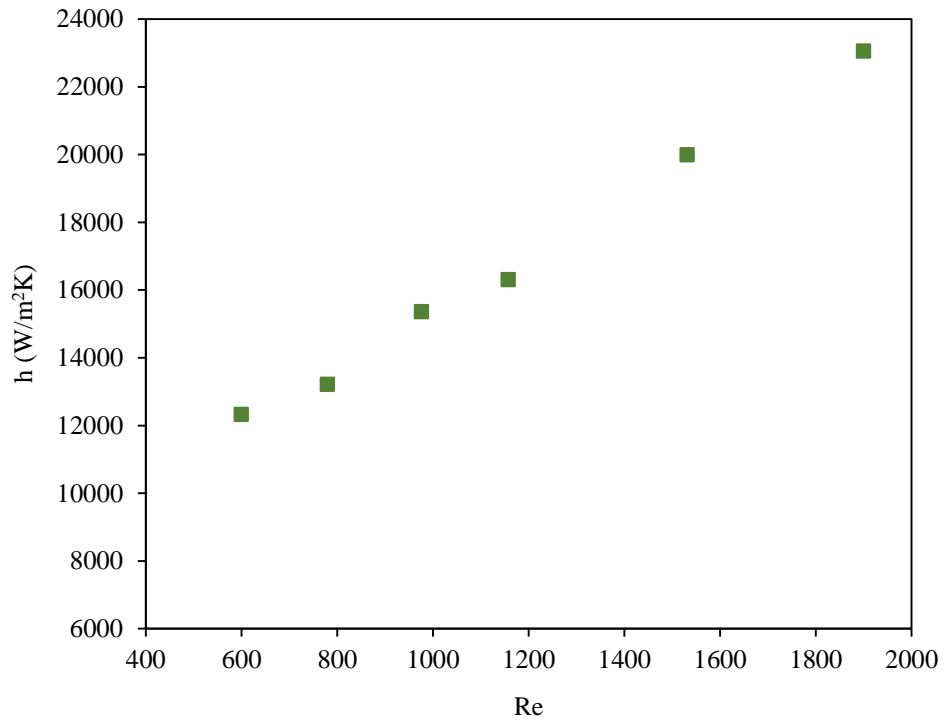


Şekil 3.23. 3B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

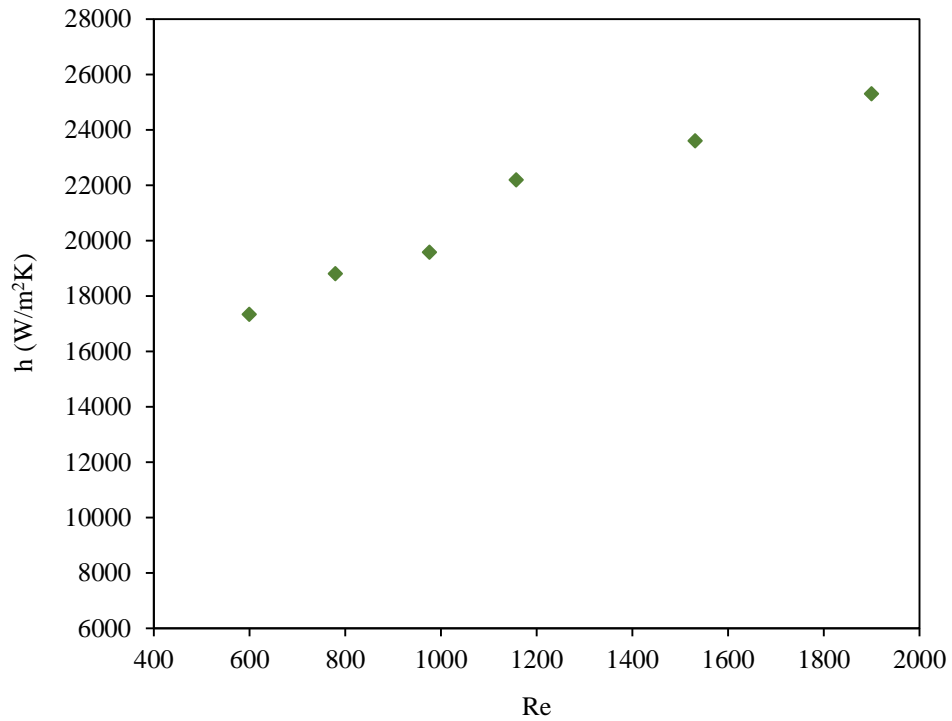


Şekil 3.24. 3B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

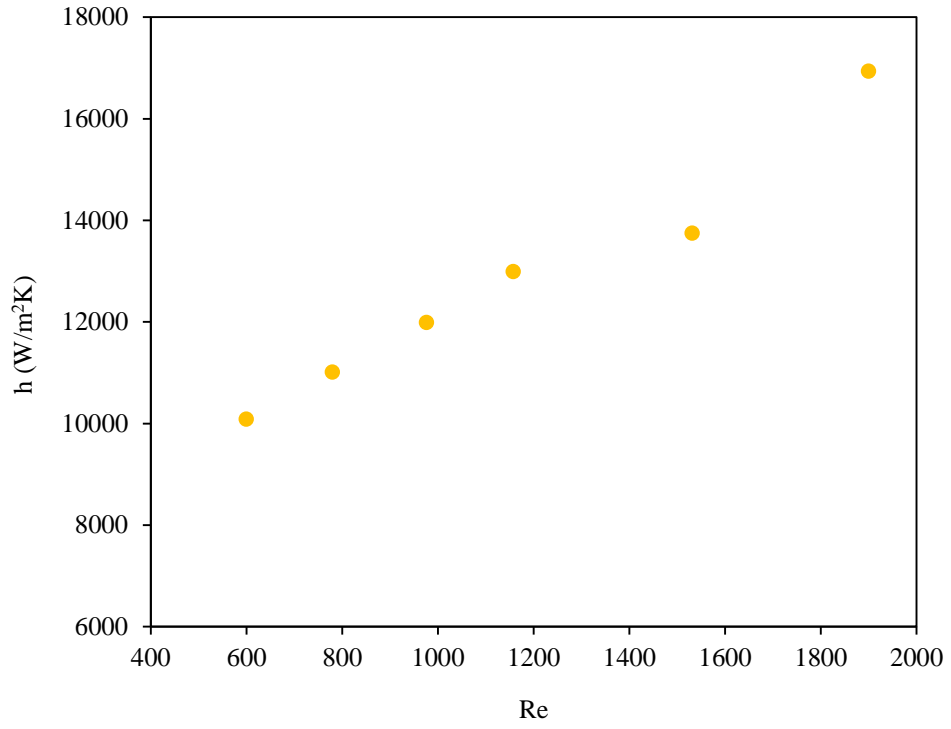




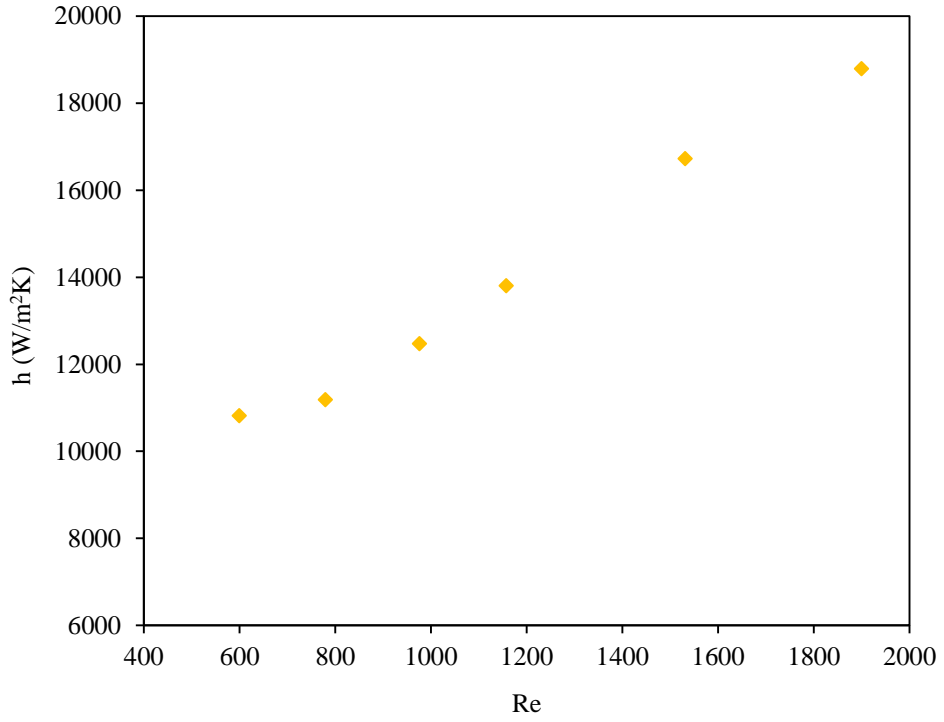
Şekil 3.25. 3B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



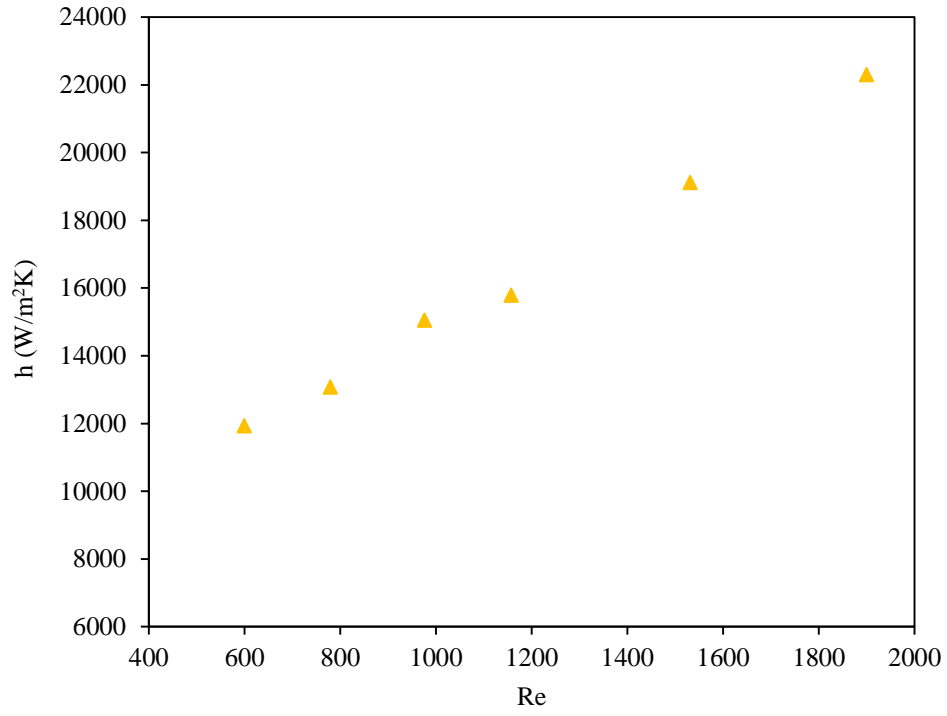
Şekil 3.26. 3B “karışım” yaklaşımında hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



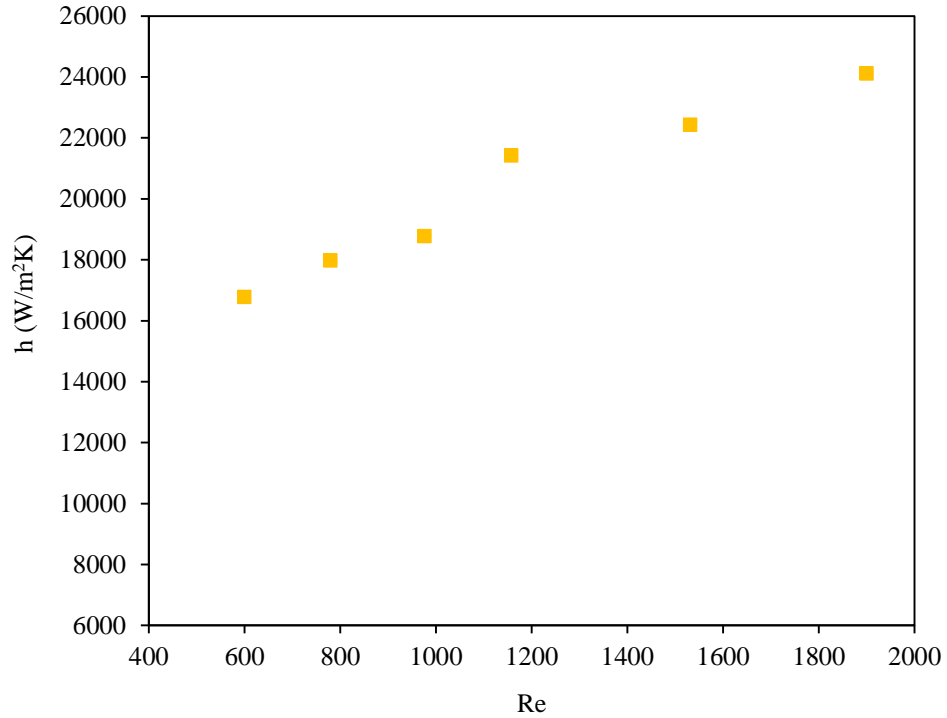
Şekil 3.27. 3B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil 3.28. 3B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil 3.29. 3B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

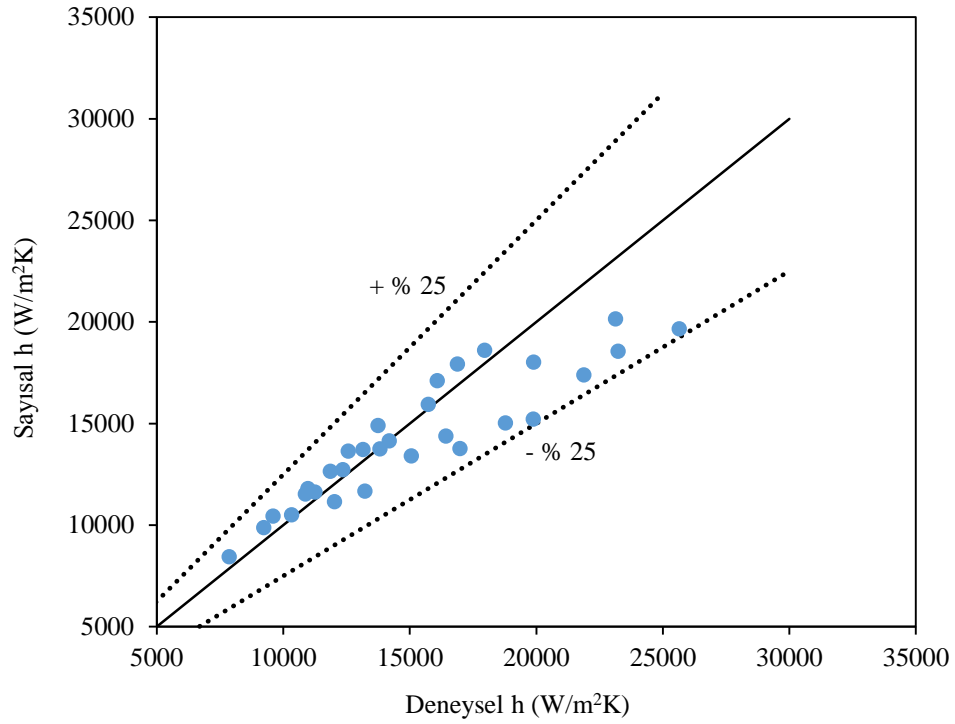


Şekil 3.30. 3B “Euler” yaklaşımında hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkanda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

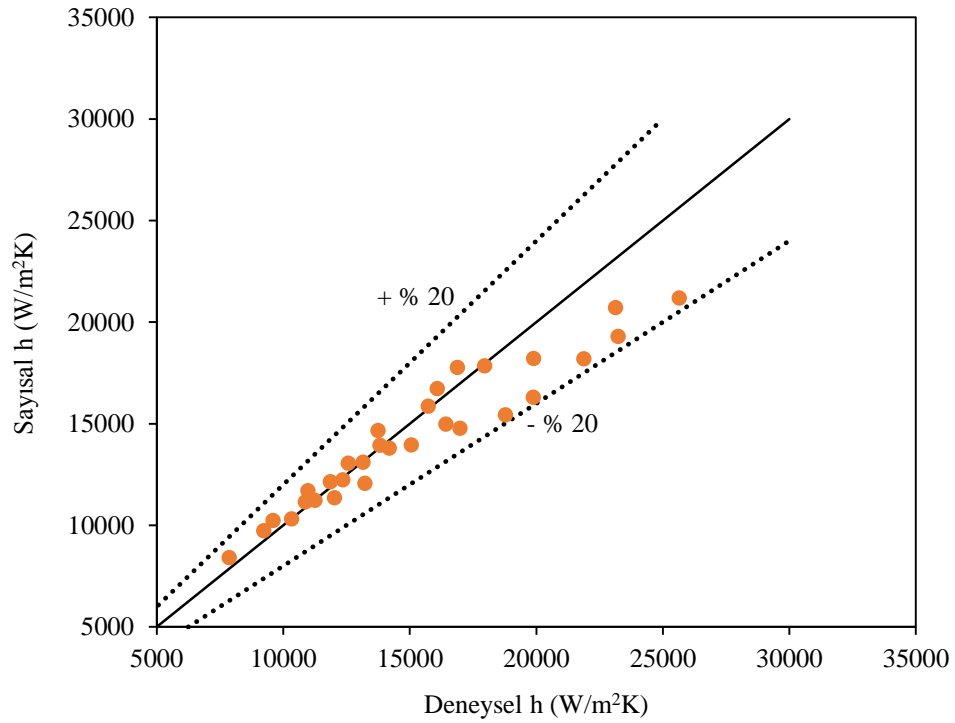
### 3.1.3.3. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Şekil 3.31., Şekil 3.33., Şekil 3. 35.'de nanoakışkanlı kanalda 2B model için deneysel ve sayısal ısı taşınım katsayılarının Reynolds sayısına göre değişimi gösterilmektedir. Benzer şekilde 3B model için elde edilen değişimler Şekil 3.32., Şekil 3.34., Şekil 3.36.'da verilmektedir. Tablo 3.1.'de ise deneysel ve sayısal sürtünme faktörü için elde sonuçlar görülmektedir. Reynolds sayısı ve hacimsel oran artınca ısı taşınım katsayısı artmakta ancak, sürtünme faktörü azalmaktadır. Gerek ısı taşınım katsayısı gerekse sürtünme faktörü sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir.

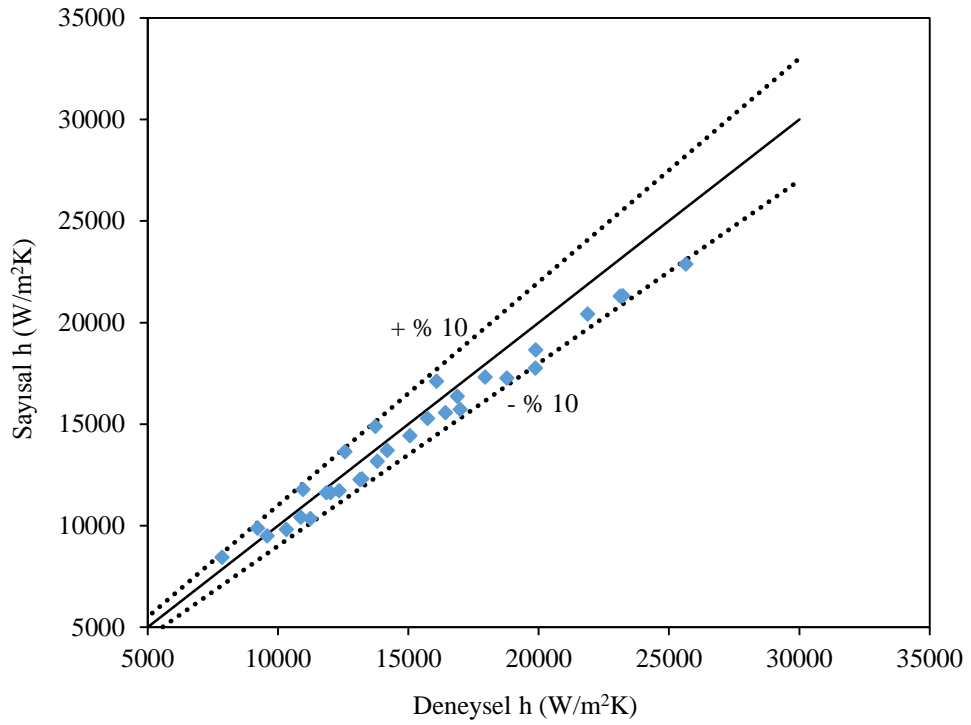
Contalı levhalı ısı değiştirici için tüm deneysel değerler ve sonuçlar ısı değiştiricinin giriş-çıkışı ve akışkanın dağıtımının sağlandığı portlardan elde edilmektedir. Literatürde, deneysel olarak elde edilen ısı taşınım katsayısı ile sayısal olarak elde edilen ısı taşınım katsayısı arasındaki farklar (sapma değeri) göz önüne alındığında, sonuçların doğruluğu  $\pm$  % 30-40 kadar kabul edilmektedir. Bu anlamda, tek fazlı sayısal yaklaşımla şimdiye kadar elde edilen sayısal sonuçların da doğru olduğu kabul edilebilir.



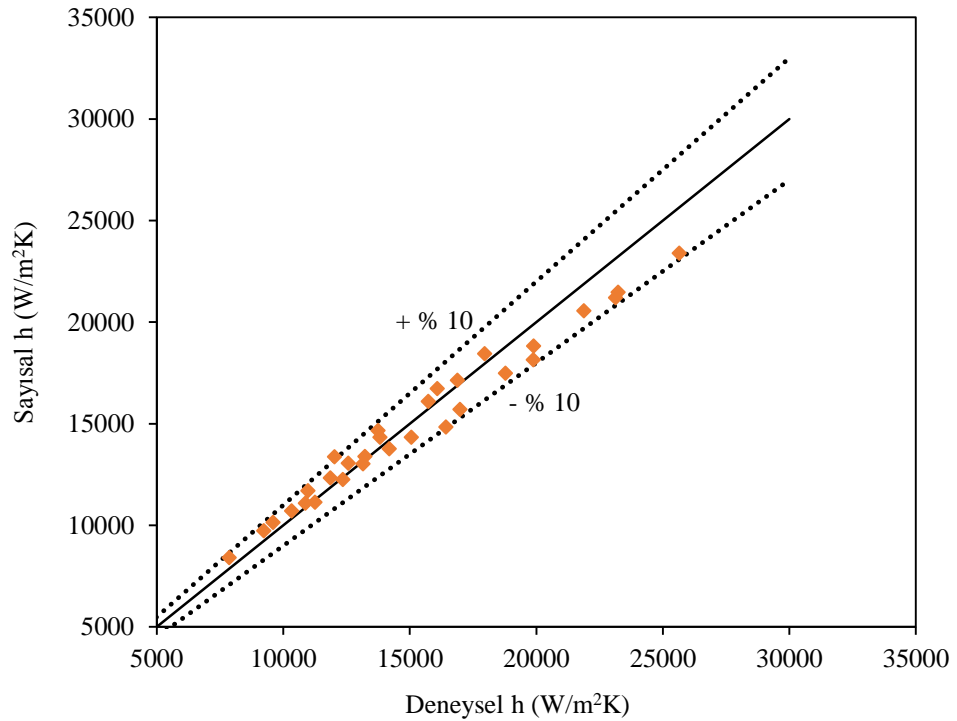
Şekil 3.31. 2B “tek fazlı” yaklaşımda sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması



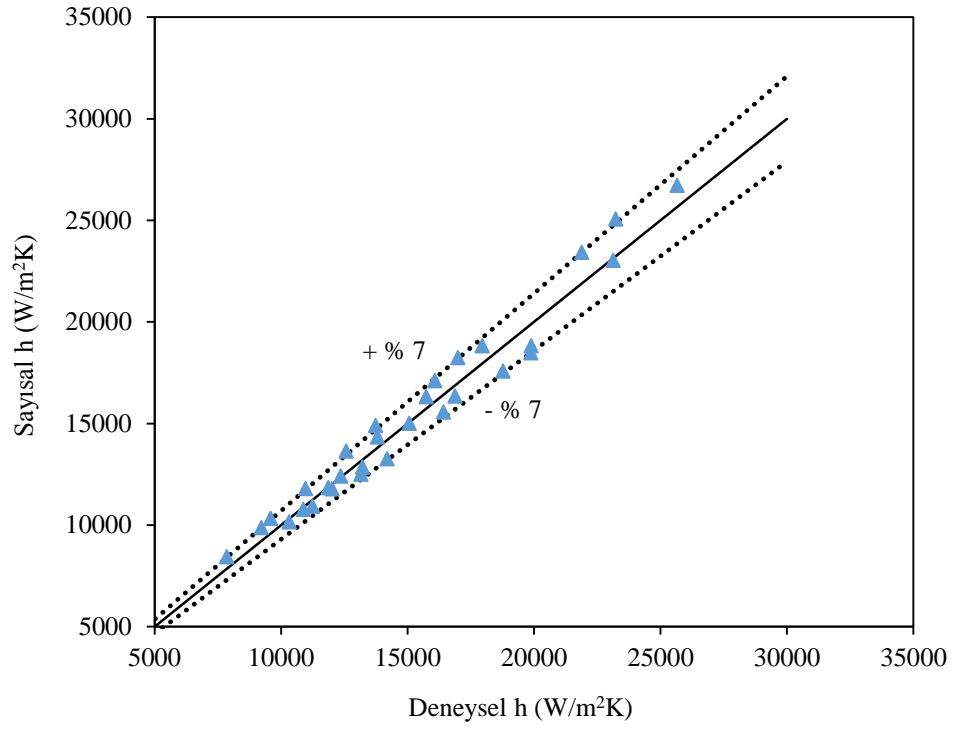
Şekil 3.32. 3B “tek fazlı” yaklaşımda sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması



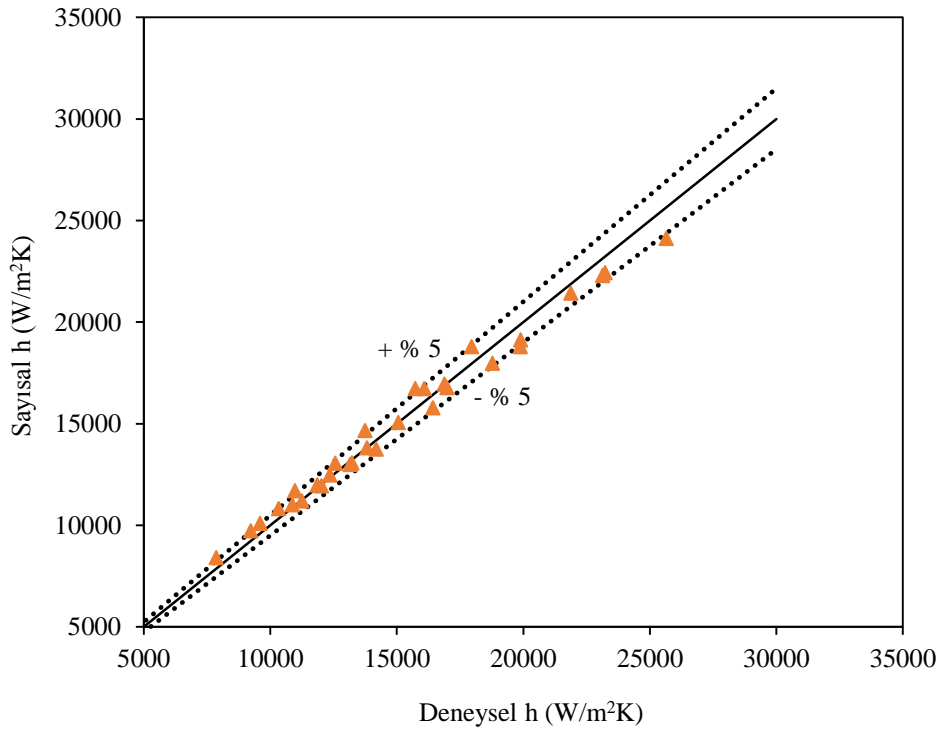
Şekil 3.33. 2B “karışım” yaklaşımında sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması



Şekil 3.34. 3B “karışım” yaklaşımında sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması



Şekil 3.35. 2B “Euler” yaklaşımında sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması



Şekil 3.36. 3B “Euler” yaklaşımında sayısal ve deneysel ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması

Liteartürde, ısı taşınım katsayısı geçerli olan durum sürtünme faktörü içinde söz konusudur. Deneysel olarak elde edilen sürtünme faktörü ile sayısal olarak elde edilen sürtünme faktörü arasındaki farklar (sapma değeri) göz önüne alındığında, sonuçların doğruluğu  $\pm$  % 30-40 kadar kabul edilmektedir. Çünkü deneysel olarak elde edilen sürtünme faktörü Reynolds sayısından bağımsızdır. Bu durumun, levha yüzeylerinin pürüzlü ve partiküllerden kaynaklı olduğu gösterilebilir. Böyle etkiler, sayısal hesaplamalarda göz önüne alınmamaktadır. Ayrıca, sayısal çözümlemede yapılan kabuller ve basitleştirmelerden dolayı sürtünme faktörü yüksek çıkmaktadır.





Tablo 3.1. Deneysel ve sayısal sürtünme faktörü karşılaştırılması

Hacimsel Oran	Deneysel	Sayısal sürtünme faktörü					
		Tek fazlı 2B	Tek fazlı 3B	Karışım 2B	Karışım 3B	Euler 2B	Euler 3B
% 0	1,32	1,20	1,24	-	-	-	-
	1,20	1,12	1,17	-	-	-	-
	0,98	1,06	1,11	-	-	-	-
	0,89	1,01	1,07	-	-	-	-
	0,74	0,85	0,90	-	-	-	-
	0,68	0,77	0,82	-	-	-	-
% 0,25	1,53	1,21	1,24	1,22	1,25	1,26	1,31
	1,35	1,13	1,17	1,10	1,22	1,13	1,17
	1,09	1,06	1,11	1,03	1,08	1,03	1,09
	0,98	1,01	1,06	0,99	1,04	0,99	1,05
	0,80	0,93	0,90	0,92	0,95	0,92	0,97
	0,73	0,88	0,88	0,87	0,91	0,86	0,90
% 0,5	1,57	1,21	1,24	1,27	1,30	1,24	1,28
	1,39	1,12	1,16	1,08	1,12	1,09	1,15
	1,13	1,07	1,12	1,03	1,07	1,04	1,10
	1,02	1,01	1,07	0,98	1,04	0,99	1,06
	0,82	0,94	1,00	0,92	0,97	0,92	0,97
	0,74	0,88	0,88	0,86	0,92	0,86	0,90
% 0,75	1,62	1,40	1,43	1,24	1,27	1,30	1,35
	1,42	1,13	1,17	1,08	1,12	1,09	1,13
	1,15	1,07	1,12	1,02	1,07	1,05	1,08
	1,06	1,02	1,08	0,98	1,03	0,98	1,03
	0,84	0,94	1,00	0,91	0,96	0,91	0,96
	0,75	0,88	0,88	0,86	0,92	0,86	0,91
% 1	1,70	1,35	1,47	1,33	1,35	1,33	1,40
	1,47	1,14	1,18	1,18	1,22	1,11	1,31
	1,17	1,07	1,12	1,01	1,05	1,02	1,22
	1,08	1,02	1,08	0,97	1,01	0,98	1,00
	0,86	0,94	1,01	0,91	0,97	0,91	0,94
	0,76	0,89	0,95	0,85	0,91	0,86	0,91

Tek fazlı yaklaşım için ısı taşınım katsayısında ve sürtünme faktöründe en yüksek sapma sırasıyla % 22 ve % 25 kadar iken, diğer yaklaşımlarda ısı taşınım katsayısında ve sürtünme faktöründe en yüksek sapmalar sırasıyla % 10'dan ve % 25'den azdır. Uygulamada tasarım problemlerinin birçoğunda, hem ısı geçiş katsayısı hem de sürtünme faktörü için elde edilen bu değerlerin yeterli olduğu kabul edilmektedir [5, 6, 208-215].



## BÖLÜM 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma, nanoakışkanlı contalı levhalı ısı değiştirici kanallarında taşınım ile ısı geçişi ve basınç düşüşünü deneysel ve sayısal olarak incelemek amacıyla yapılmıştır. Deneysel çalışmalar; Reynolds sayısı 500-2000 aralığında ve deney akışkanı olarak 4 farklı hacimsel oranda (% 0,25, % 0,5, % 0,75 ve % 1) saf su- $Al_2O_3$  (ortalama çapı 40 nm, küresel şekilli) nanoakışkanı kullanılarak yapılmıştır. Gerek ısı geçişi gerekse basınç düşüşü için deneysel ve sayısal sonuçların uygun oldukları belirlenmiştir.

- Nanoakışkanlı levhalı ısı değiştiricide akışkan özelliklerine bağlı olarak taşınım ile ısı geçiş katsayı değişmektedir. Nanoakışkanın hacimsel oranı artıkça ısı taşınım katsayısı artmaktadır. Dalgalı yüzeyli levhadan dolayı oluşan akış düzensizliğinin yanında akışkan içerisine ilave edilen partiküller de akış yapısındaki düzensizliği daha da artırmaktadır. Bu düzensizlik akış yapısındaki çalkantıları daha da artırarak, sınır tabakanın parçalanmasına ve incelmesine neden olmaktadır.

- Partiküllerin dalgalanmaları ve partikül-akışkan etkileşimleri özellikle yüksek Reynolds sayılarında akış yapısının değişmesine neden olmaktadır. Ayrıca artan Reynolds sayısı da yüksek ısı geçişine neden olmaktadır. Yüksek Reynolds sayılarında, sıcak ve soğuk akışkanın levhalı ısı değiştirici içerisinde daha az süre kalmasından dolayı giriş-çıkış sıcaklık farkları azalmaktadır. Ancak, aynı hacimsel oranda basınç kayıpları da dikkate alındığında, düşük Reynolds sayılarında çalışmak avantaj sağlamaktadır.

- Hacimsel oranı % 1 ( $Al_2O_3$ /su) olan nanoakışkanda suya göre ısı geçişindeki iyileşme ortalama % 40 değerine yaklaşırken, sürtünme faktörü ise ortalama % 18 kadar yüksek çıkmaktadır (şekil 2.19 ve şekil 2.26).

- Akışkan giriş sıcaklığı ve debisi sabit iken, partiküller tarafından kazanılan ısı, artan Reynolds sayısı ile birlikte artmaktadır. Bu artışa, Brownian hareketi, nanopartiküllerin ısı iletimi, nanopartiküllerin doğal taşınım ile sürüklenmesi, artan Reynolds sayısına bağlı olarak termoforez etkinin artması ve katı-sıvı ara yüzey tabakası neden olmaktadır.

-  $Al_2O_3$  nanopartikülün ısı iletim katsayısı, akışkanın ısı iletim katsayısından büyük olduğundan ve akışkan içerisinde askıda kalan partiküllerden dolayı, nanoakışkanın ısı iletim katsayısı yükselmektedir. Nanopartiküllerin yüzey/hacim oranının yüksek olmasından dolayı, nanoakışkanın ısı iletim katsayısı artmaktadır. Ayrıca, hem katı-sıvı ara yüzey tabakaları çoğaldığından, hem partiküllerin ısı iletiminden hem de doğal taşınım yoluyla partiküllerin sürüklenmesinden dolayı nanoakışkanın ısı iletim katsayısı artmaktadır.

- Sürtünme faktörünü hesaplamak için nanoakışkanların contalı levhalı ısı değiştiricisine giriş ve çıkışta fark basınç değerleri ölçülmüştür. Fark basınç, nanoakışkanın levhalar arasında akışı sırasında dalga yüzeyli levhadan ve akışkan içerisindeki partiküllerden dolayı artmaktadır. Sürtünme faktörünün değişmesinde, kütleli debi ve nanoakışkanın hacimsel oranı etkin rol almaktadır. Bunun nedeni, basınç düşümünün akışkanın viskozitesi ve yoğunluğuna bağlı olmasıdır. Nanoakışkanın hacimsel oranı arttıkça viskozitesi ve yoğunluğu da artmaktadır.

- Nanoakışkanın hacimsel oranı arttıkça basınç kayıpları artmakta, ancak hem Reynolds sayısı hem de hacimsel oran artarken sürtünme faktörü azalmaktadır. Reynolds sayısı sabit iken, artan hacimsel oranda dolayı nanoakışkan yoğunluğu arttığı için sürtünme faktörü de artmaktadır. Viskozitenin basınç düşüşü ve sürtünme faktörü değişimine etkisi az iken yoğunluğun adı geçen değişimlere etkisi daha yüksektir.

- Nanoakışkanların taşınım ile ısı geçiş problemlerinin sayısal modellenmesinde referans alınacak genel bir yaklaşım bulunmamaktadır. Genel olarak, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında çift faz yaklaşımının bazı hacimsel oran ve Reynolds sayısı değerlerine bağlı olarak daha iyi sonuçlar vermekte fakat, adı geçen

değişkenlerin bazı değerleri için farklı sonuçlar vermektedir. Ancak, literatürde yapılan bazı çalışmalarda da basit bir yaklaşım olan “tek faz” yaklaşımının sonuçlarının yeterli olduğu belirtilmiştir [26, 27, 216-223].

- Nanoakışkanlarda akışkanlar ile partiküller arasındaki ilişkiyi modellemede karşılaşılan zorluklardan dolayı, ısı geçişini sayısal çözümlenmesinde problemler yaşanmaktadır. Bu karmaşık ilişkiyi modellemek için tek fazlı yaklaşım uygun değildir. Nanoakışkanlar için hacimsel oran ve termo-fiziksel özelliklere bağlı basit bir modelleme önerilmektedir. Tek faz yaklaşımı sonuçları çoğunlukla nanoakışkanların ısı geçişini modellemede beklentileri karşılamamaktadır. Ancak, deneysel olarak elde edilen ısı taşınım katsayısı ile sayısal olarak elde edilen ısı taşınım katsayısı arasındaki ilişki göz önüne alındığında, sonuçların doğruluğu literatürde  $\pm$  % 30-40 kadar kabul edildiğinden, tek fazlı yaklaşımla şimdiye kadar elde edilen sayısal sonuçlar uygun bulunmaktadır.

- Çift fazlı yaklaşımlarda, fazlar arasındaki termo-fiziksel özelliklerin modellenmesi ve hesaplanması dezavantaj oluşturmakta, ancak bu yaklaşımlarla elde edilen sayısal sonuçların daha uygun olması avantaj sağlamaktadır. Nanopartiküllerin akışkan içerisinde düzgün dağılmamasından dolayı deneysel sonuçlardan gelen hata da, deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki uyumu bozmaktadır. Bu bağlamda, nanoakışkanlarda ısı geçişi için sayısal çözümlenmeler zor ve uğraştırıcıdır.

- Termo-fiziksel özelliklerin kolay tanımlanması ve daha az bilgisayar donanımı gerektirmesinden dolayı “karışım modeli” avantajlıdır. Fakat, partiküller ile akışkan arasındaki düşük bağıl hızlardan dolayı bazı çalışmalarda çift faz “karışım” ve “tek faz” modellerinin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir [218, 221, 224-226]. “Tek faz” ile çift faz “karışım” modeli arasındaki temel fark “karışım” modelinde partikül boyutuna bağlı fazlar arasındaki sürüklenme hızının etkisidir.

- “Euler” çift fazlı model daha karmaşık, daha fazla hesaplama zamanı ve yüksek bilgisayar donanımı gerektirmektedir. Çünkü bu yaklaşımda her faz için yönetici denklemler çözülmektedir. “Euler” model yaklaşımında enerji ve momentum

denklemlerinin fazlar arasındaki değişim parametreleri de tanımlanmaktadır. Bağlı hıza bağlı olarak, fazlar arasındaki momentum etkileşimi çok küçük olduğundan dolayı, “Euler” yaklaşımında elde edilen ısı geçişi sonuçları “tek fazlı” ve “karışım” modeline göre daha yüksek çıktığından deneysel sonuçlarla daha uyumludur [227-229].

- Nanoakışkanların hacimsel oranı artıkça Prandtl sayısı küçülmektedir. Prandtl sayısı küçüldükçe de ısıl sınır tabaka kalınlığı artmaktadır. Artan hacimsel orandan dolayı partiküller de ısıl sınır tabakanın parçalanmasına engel oluşturduğu için bu iki olumsuz etki taşınımıyla ısı geçişini azaltmaktadır.

- Nanoakışkanların hacimsel oranı artıkça birim hacimde depolanan enerji de azalmaktadır ve bu durum nanoakışkanların enerji depolama kabiliyetine olumsuz yönde etki etmektedir.

- Nanoakışkanların hacimsel oranı artıkça ısı iletim katsayısı artmakta, ancak ısı enerjisi depolama kabiliyeti azaldığı için nanoakışkanların hacimsel oranındaki artış ısı yayılım katsayısı artırarak iletimle olan ısı geçişine olumlu etki yapmaktadır.

- Nanoakışkanların viskozitesi ise artan hacimsel oranla artmakta ancak çok fazla bir değişim gözlemlenmemiştir.

Nanoakışkanların bazı dezavantajlarını ise şu şekilde özetleyebiliriz.

- Nanopartiküllerin akışkan içerisinde uzun süre düzgün dağılımı bazı kimyasal maddeler ile sağlanabilse de, ısı geçişi sağlayan sistemin çalışma süresi ve geometrisine bağlı olarak partiküllerde zamanla çökelme - topaklanmaya meydana gelebilir. Bu durumda nanoakışkan, ısı geçişindeki iyileşme özelliğini kaybedecektir. Bundan dolayı nanoakışkana ön karıştırma yapılması, nanoakışkan içerisindeki partiküllerin düzgün dağılımının kontrolü ve sistemin temizlenmesi gerekmektedir.

- Nanopartikülün akış içerisindeki davranışını ısı geçişini iyileştirici yönde etkileyecek farklı yüzey geometrileri geliştirebilir.

- Nanoakışkanların ısı iletim katsayısının tahmininde çeşitli teorik modeller bulunmaktadır. Fakat ısı iletim katsayısının belirlenmesinde şimdiye kadar geçerli ve doğru bir model bulunamamıştır. Isı iletim katsayısının aynı partikül türü için hacimsel orandan, partikül boyutundan, şeklinden ve akışkan sıcaklığından bağımsız olduğu bir model geliştirilebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] Genceli, O. F., Isı değiştiricileri, Birsen Yayınevi, 2010.
- [2] Nandigana, V., Selvaraju, N., Mahadevan, K., Convective Heat Transfer Coefficient Of Nanofluids, Lambert Academic Publishing, 2012.
- [3] Webb, R.L., Kim, N., Principles of Enhanced Heat Transfer Taylor & Francis Group, Second Edition, 2005.
- [4] Kuppan, T., Heat Exchanger Design Handbook CRC Press Newyork, Second Edition, 2013.
- [5] Wang, L., Sunden, B., Manglik, R.M. Plate Heat Exchanger: Design, Applications and Performance, WIT Press, 2007.
- [6] Kakac, S., Liu, H., Pramuanjaroenkij, A., Heat Exchangers Selection, Rating and Thermal Design, CRC Press Third Edition, 2012.
- [7] Shah, R.K., Sekulic, D.P., Fundamentals of Heat Exchanger Design, John Wiley & Sons. Inc., 2003.
- [8] Lomascolo, M., Colangelo, G., Milanese, M., Risi A., Review of heat transfer in nanofluids: Conductive, convective and radiative experimental results. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 1182–1198, 2015.
- [9] Prajapati O.S., Rajvanshi A.K., Heat Transfer with Nanofluid, Lambert Academic Publishing, 2011.
- [10] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/125898/colloid.>, Britannica Online Encyclopedia, Erişim Tarihi: 20.06.2016.
- [11] Levine I. N., Physical Chemistry, Boston: McGraw-Hill 5th Edition, 2001.
- [12] Minkowycz W. J., Sparrow E. M., Abraham J. P., Nanoparticle Heat Transfer And Fluid Flow, CRC Press Volume IV, 2013.
- [13] Wen, D., Lin G., Vafaei S., Zhang, K., Review of nanofluids for heat transfer applications. Particuology, 7,141–150, 2009.



- [14] Pantzali, M.N., Mouza, A.A., Paras, S.V., Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE). *Chem. Eng. Sci.*,64:3290–300, 2009.
- [15] Pantzali, M.N., Kanaris, A.G., Antoniadis, K.D., Mouza, A.A., Paras, SV., Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 30: 691–9, 2009.
- [16] Fard, M.H., Talaie, M.R., Nasr, S., Numerical and experimental investigation of heat transfer of ZnO/water nanofluid in the concentric tube and plate heat exchangers. *Thermal Sci.*, 5:183–94, 2011.
- [17] Kwon, Y.H., Kim, D., Li, C.G., Lee J.K., Hong, D.S., Lee, J.G., Lee, S.H., Cho, Y.H., Kim, S.H., Heat transfer and pressure drop characteristics of nanofluids in a plate heat exchanger. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, Jul;11(7):5769-74, 2011.
- [18] Maré, T., Halefadi, S., Sow, O., Estellé, P., Duret, S., Bazantay F., Comparison of the thermal performances of two nanofluids at low temperature in a plate heat exchanger. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 35:1535–43, 2011.
- [19] Zamzamian, A., Oskouie, S.N., Doosthoseini, A., Joneidi, A., Pazouki, M., Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 35:495–502, 2011.
- [20] Pandey, S.D., Nema, V.K., Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 38:248–56, 2012.
- [21] Tiwari, A.K., Ghosh, P., Sarkar, J., Performance comparison of the plate heat exchanger using different nanofluids. *Exp Therm. Fluid Sci.*, 49:141–51, 2013.
- [22] Kabeel, A.E., El Maaty, T.A., El Samadony, Y., The effect of using nanoparticles on corrugated plate heat exchanger performance. *Appl. Therm. Eng.*, 52:221–9, 2013.
- [23] Anoop, K., Cox, J., Sadr, R., Thermal evaluation of nanofluids in heat exchangers, *Int. Commun. Heat Mass*,49: 5–9, 2013.
- [24] Ray, D.R., Das, D.K., Vajjha, RS., Experimental and numerical investigations of nanofluids performance in a compact minichannel plate heat exchanger. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 71: 732–46, 2014.
- [25] Khoshvaght-Aliabadi, M., Hormozi, F., Zamzamian, A., Effects of geometrical parameters on performance of plate-fin heat exchanger: vortex-generator as core surface and nanofluid as working media. *Appl. Therm. Eng.*,70:565–79, 2014.

- [26] Tiwari, A.K., Ghosh, P., Sarkar, J., Dahiya, H., Parekh, J., Numerical investigation of heat transfer and fluid flow in plate heat exchanger using nanofluids. *Int. J. Therm. Sci.*, 85:93–103, 2014.
- [27] Jokar, A., O'Halloran, SP., Heat transfer and fluid flow analysis of nanofluids in corrugated plate heat exchangers using computational fluid dynamics simulation. *J. Therm. Sci. Eng. Appl.*, 5. 011002-1, 2013.
- [28] Gherasim, I., Galanis, N., Nguyen, C., Numerical study of nanofluid flow and heat transfer in a plate heat exchanger. *Comput. Therm. Sci. Int. J.*, 5: 317–32, 2013.
- [29] Majdi, H., Abed, A.M., Effect of nanofluids on the performance of corrugated channel within out-of-phase arrangement. *Int. J. Sci. Technol. Res.*, 3, 2014
- [30] Savostin, A. F., Tikhonov, A. M., Investigation of the characteristics of plate type heating surfaces, *Thermal Eng.*, 17(9), 113, 1976.
- [31] Wang, L., Sunden, B., Manglik, R.M., Plate heat exchanger Design, Applications and Performance, Southampton, Boston, WIT Press, 2007.
- [32] Maslov, A., Kovalenko, L., Hydraulic resistance and heat transfer in plate heat exchangers. *Mol. Promys.*, 10:20–2, 1972.
- [33] Tovazhnyanski, L.L., Kapustenko, P.A., Tsibulnik, V.A., Heat transfer and hydraulic resistance in channels of plate heat exchangers. *Energetica*, 9: 123–5, 1980.
- [34] Bond, M.P., Plate heat exchangers for effective heat transfer. *Chem Eng.*, 367:162–7, 1981.
- [35] Focke, W.W., Zachariades, J., Olivier, I., The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28: 1469–79, 1985.
- [36] Chisholm, D., Wanniarachchi, A.S., Maldistribution in single pass mixed channel plate heat exchanger. In: *Compact heat exchangers for power and process industries*, vol. 201. New York: HTD-ASME; 1992.
- [37] Saunders, E. A. D., *Heat Exchangers Selection, Design, and Construction*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [38] Kumar, H., The plate heat exchanger: construction and design, 1st UK National Conference on Heat Transfer, University of Leeds, 3-5 July, *Inst. Chem. Symp. Series*, No. 86, 1275–1286, 1984.

- [39] Heavner, R. L., Kumar, H., Wanniarachchi, A. S., Performance of an industrial plate heat exchanger: effect of chevron angle, *AIChE Symposium Series No. 295*, Vol. 89, AIChE, New York, 262, 1993.
- [40] Talik, A.C., Fletcher, L.S., Anand, N.K., Swanson, L.W., Heat transfer and pressure drop characteristics of a plate heat exchanger. In: *Proceedings of the ASME/JSME thermal engineering conference*. New York: ASME; p. 312–29, 1995.
- [41] Martin, H., A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 35(4), 301-310, 1996.
- [42] Muley, A., Manglik, R. M., Experimental investigation of heat transfer enhancement in a PHE with  $\beta = 60^\circ$  chevron plates, *Heat and Mass Transfer*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, India, 737, 1995.
- [43] Muley, A., Manglik, R. M., Enhanced heat transfer characteristics of single-phase flows in a plate heat exchanger with mixed chevron plates, *J. Enhanced Heat Transfer*, 4(3), 187, 1997.
- [44] Muley, A., Manglik, R. M., Metwally H. M., Enhanced heat transfer characteristics of viscous liquid flows in a chevron plate heat exchanger. *Journal of Heat Transfer*, 121(4), 1011-1017, 1999.
- [45] Kanaris, A. G., Mouza, A. A., Paras, S. V., Flow and heat transfer prediction in a corrugated plate heat exchanger using a CFD code. *Chemical engineering and technology*, 29(8), 923-930, 2006.
- [46] Bobbili, P. R., Sunden, B., and Das, S. K., An experimental investigation of the port flow maldistribution in small and large plate package heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 26(16), 1919-1926, 2006.
- [47] Jain, S., Joshi, A., Bansal, P. K., A new approach to numerical simulation of small sized plate heat exchangers with chevron plates. *Journal of Heat Transfer*, 129(3), 291-297, 2007.
- [48] Warnakulasuriya, F. S. K., Worek, W. M., Heat transfer and pressure drop properties of high viscous solutions in plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(1), 52-67, 2008.
- [49] Kanaris, A. G., Mouza, A. A., Paras, S. V., Optimal design of a plate heat exchanger with undulated surfaces. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(6), 1184-1195, 2009.

- [50] Khan, T. S., Khan, M. S., Chyu, M. C., Ayub Z. H., Experimental investigation of single phase convective heat transfer coefficient in a corrugated plate heat exchanger for multiple plate configurations. *Applied Thermal Engineering*, 30(8), 1058-1065, 2010.
- [51] Shaji, K., Das, S. K., The effect of flow maldistribution on the evaluation of axial dispersion and thermal performance during the single-blow testing of plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(7), 1591-1602, 2010.
- [52] Pandey, S.D., Nema, V.K., Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger. *Exp Therm Fluid Sci.*, 38:248–56, 2012.
- [53] Shaji, K., Das, S. K., Effect of plate characteristics on axial dispersion and heat transfer in plate heat exchangers. *Journal of Heat Transfer*, 135(4), 041801, 2013.
- [54] Ray, D.R., Das, D.K., Vajjha, RS., Experimental and numerical investigations of nanofluids performance in a compact minichannel plate heat exchanger. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 71: 732–46, 2014.
- [55] Gulenoglu, C., Akturk, F., Aradag, S., Uzol, N.S., Kakac, S., Experimental comparison of performances of three different plates for gasketed plate heat exchangers, *Int J. Therm. Sci.*, 75:249–56, 2014.
- [56] Nilpueng, K., Wongwises, S., Experimental study of single phase heat transfer and pressure drop inside a plate heat exchanger with a rough surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 268–275, 2015.
- [57] Khan, T. S., Khan, M. S., Ayub, Z. H., Experimental Investigation of Single-Phase Heat Transfer in a Plate Heat Exchanger. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 7(4), 044501, 2015.
- [58] Huang, D., Wu, Z., Sunden, B., Pressure drop and convective heat transfer of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$  and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 620-626, 2015.
- [59] Sergis, A., Hardalupas, Y., Anomalous heat transfer modes of nanofluids: a review based on statistical analysis. *Nanoscale Research Letters*, 6: 391, 2011.
- [60] Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., Tsuji, Y., *Multiphase Flows with droplets and particles* Second Edition Crc Press, London New York, 2012.
- [61] Prasher, R., Bhattacharya, P., Phelan, P.E., Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluids), *Phys Rev Lett*, 94, 1-4, 2005.

- [62] [https://tr.wikipedia.org/wiki/Brown\\_hareketi.](https://tr.wikipedia.org/wiki/Brown_hareketi.), Erişim Tarihi: 20.06.2016.
- [63] Sasmito, A. P., Khan, S. A., Mujumdar, A. S., Nanofluids heat transfer: preparation, characterization and theoretical aspects, 2013.
- [64] Nelson, E., Dynamical Theories of Brownian Motion (1967) Second edition, Princeton University Press, August, 2001.
- [65] Yu, C.J., Richter, A.G., Datta, A., Durbin, M.K., Dutta P., Observation of Molecular Layering in Thin Liquid Films Using X-Ray Reflectivity, *Phys. Rev. Lett.*, 82, 2326-2329, 1999.
- [66] Xue, L., Keblinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S., Eastman, J.A., Two Regimes of Thermal Resistance at a Liquid-Solid Interface, *J. Chem. Phys.*, 118, 337-339, 2003.
- [67] Yu W., Choi S.U.S., The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model, *J. Nanopart. Res.*, 5, 167-171, 2003.
- [68] Bianco, V., Manca, O., Nardini, S., Vafai, K. Heat transfer enhancement with nanofluids, CRC Press, 2015.
- [69] Eapen, J., Li, J., Yip, S., Beyond the Maxwell Limit: Thermal Conduction in Nanofluids with Percolating Fluid Structures, *Phys. Rev. E.*, 76, 062501, 2007.
- [70] Liao, J., Zhang, Y., Yu, W., Xu, L., Ge, C., Liu, J., Gu, N., Linear Aggregation of Gold Nanoparticles in Ethanol, *Colloid Surf. A. Physicochem. Eng. Aspects*, 223, 177-183, 2003.
- [71] Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., Eastman, J. A. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 no. 4,: 855–863, 2002.
- [72] Zhang, Y., Nanofluids Research, Development And Applications, Nova Science Publishers, Inc., NewYork, 2013.
- [73] Philip, J., Shima, P.D., Raj, B., Evidence for Enhanced Thermal Conduction Through Percolating Structures in Nanofluids, *Nanotechnology*, 19, 305706, 2008.
- [74] Callister, W. D., Rethwisch, D. G., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Çeviri Editörü Kenan Genel, Sekizinci Baskı, Nobel, Şubat, 2013.
- [75] Avsec, J., The combined analysis of phonon and electron heat transfer mechanism on thermal conductivity for nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51, 4589-4598, 2008.

- [76] Michaelides, E. E., Heat and Mass Transfer in Particulate Suspensions, Springer, New York, 2013.
- [77] Louge, M., Chen, X., Heat Transfer Enhancement in Suspensions of Agitated Solids. Part III: Thermophoretic Transport of Nanoparticles in the Diffusion Limit, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51, 5130-5143, 2008.
- [78] Fu, C.J., Zhang, Z.M., Nanoscale Radiation Heat Transfer for Silicon at Different Doping Levels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49, 1703-1718, 2006.
- [79] Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams R.A., Heat Transfer of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (CNT Nanofluids), *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49, 240-250, 2006.
- [80] Hwang, K.S., Jang, S.P., Choi, S.U.S., Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Water-Based  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanofluids in Fully Developed Laminar Flow Regime, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52, 193-199, 2009.
- [81] Pak. B.C., Cho. Y.I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer* 11, 151–170, 1999.
- [82] Ho, C.J., Liu, W.K., Chang, Y.S., Lin, C.C., Natural convection heat transfer of alumina- water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study, *International Journal of Thermal Sciences* 49, 1345–1353, 2010.
- [83] Zhou, S.Q., Ni, R., Measurement of the specific heat capacity of water-based  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluid, *Applied Physics Letters* 92, 093123, 2008.
- [84] Sundar, L. S., Farooky, Md. H., Sarada, S. N., Singh, M.K., Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and CuO nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 41, 41–46, 2013.
- [85] Einstein, A. Eine neue bestimmung der molekuldimensionen, *Annalen der Physik*, Leipzig, 19, 289–306, 1906.
- [86] Brinkman, H.C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J. Chem. Phys.*, 20, 571, 1952.
- [87] Saito, N., Concentration dependence of the viscosity of high polymer solutions, *Journal of Physical Society of Japan*, 5, 4–8, 1950.
- [88] Mooney, M., The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles, *Journal of Colloid Science*, 6, 162–170, 1951.
- [89] Simha, R.A., Treatment of the viscosity of concentrated suspensions, *Journal of Applied Physics*, 23, 1020–1024, 1952.

- [90] Frankel, N.A., Acrivos A., On the viscosity of a concentrate suspension of solid spheres, *Chemical Engineering Science*, 22, 847–853, 1967.
- [91] Happel, J., Viscosity of suspensions of uniform spheres. *Journal of Applied Physics*, 28, 1288–1292, 1957.
- [92] Lundgren, T., Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres, *J. Fluid Mechanics*, 51, 273–299, 1972.
- [93] Batchelor, G., The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *J. Fluid Mechanics*, 83, 97–117, 1977.
- [94] Graham, A.L., On the viscosity of suspensions of solid spheres, *Appl. Sci. Res.*, 37, 275–286, 1981.
- [95] Masoumi, N., Sohrabi, N., Behzadmehr, A., A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42, 055501–1–6, 2009.
- [96] Maiga, S., Palm, S., Nguyen, C., Roy, G., Galanis, N., Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26: 530–46, 2005.
- [97] Song, S., Peng, C., Gonzalez-Olivares, A., Lopez-Valdivieso A., Study on hydration layers near nanoscale silica dispersed in a queous solutions through viscosity measurement. *J. Colloid Interface Sci.*, 287:114–20, 2005.
- [98] Buongiorno, J. Convective transport in nanofluids. *J. Heat Transfer*, 128:240–50, 2006.
- [99] Nguyen, C.T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S., Mintsa, H.A., Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids–hysteresis phenomenon. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 28: 1492–506, 2007.
- [100] Grag J., Poudel B., Chiesa M., Gordon J.B., Ma J.J., Wang J.B., Ren Z. F., Kang Y. T., Ohtani H., Nanda J., McKinley G. H., Chen G., Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid. *J. Appl. Phys.*, 103:074301, 2008.
- [101] Duangthongsuk, W., Wongwises, S., Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>–water nanofluids. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 33:706–14, 2009.
- [102] Chandrasekar, M., Suresh, S., Chandra B. A., Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 34:210–6, 2010.

- [103] Corcione, M., Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Convers. Manage*, 52: 789–93, 2011.
- [104] Sundar, L., Venkata R. E., Singh, M.K., Sousa, A.C.M., Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids for heat transfer applications: an experimental study. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 56: 86–95, 2014.
- [105] Hemmat Esfe, M., Abbasian Arani A.A., Rezaie, M., Yan, W-M., Karimipour A., Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag–MgO/water hybrid nanofluid. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 66: 189–95, 2015.
- [106] Bobbo, S., Fedele, L., Benetti, A., Colla, L., Fabrizio, M., Pagura, C., Barison, S., Viscosity of water based SWCNH and  $\text{TiO}_2$  nanofluids. *Exp. Therm. Fluid. Sci.*, 36:65–71, 2012.
- [107] Khanafer, K., Vafai, K., A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer*, 54: 4410–28, 2011.
- [108] Kulkarni, D.P., Das, D.K., Patil, S.L., Effect of Temperature on Rheological Properties of Copper Oxide Nanoparticles Dispersed in Propylene Glycol and Water Mixture. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 7, 2318-2322, 2007.
- [109] Koo, J., Kleinstreuer, C., Laminar Nanofluid Flow in Microheat-Sinks. *Int J Heat Mass Transfer*, 48, 2652-2661, 2005.
- [110] Namburu, P.K., Das, D.K., Tanguturi, K.M., Vajjha, R.S., Numerical Study of Turbulent Flow and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids Considering Variable Properties. *Int. J. Therm. Sci.*, 48, 290-302, 2009.
- [111] Eilers, V.H., Die viskositat von emulsionen hochviskoser stoffe als funktion der konzentration. *Kolloid-Zeitschrift* 97, 313–321, 1941.
- [112] Tseng, W.J., Lin, K-C., Rheology and colloidal structure of aqueous  $\text{TiO}_2$  nanoparticle suspensions. *Materials Science and Engineering*, A355, 186/192, 2003.
- [113] Abu-Nada E., Effects of variable viscosity and thermal conductivity of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 679–690, 2009.
- [114] Timofeeva, E.V., Routbort, J.L, D. Singh, Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 106, 014304, 2009.



- [115] Esfe, M.H., Saedodin, S., An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO–EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions. *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, 55:1–5, 2014.
- [116] Esfe, M.H., Saedodin, S., Mahmoodi M. Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO–water nanofluid under turbulent flow. *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 52:68–78, 2014.
- [117] Sharma, K.V., Sarma, P.K., Azmi, W.H., Mamat, R., Kadrigama, K., Correlations to predict friction and forced convection heat transfer coefficients of water based nanofluids for turbulent flow in a tube, vol. 3. p. 1–25, 2012.
- [118] Esfe, M.H., Saedodin, S., Wongwises, S., Toghraie, D., An experimental study on the effect of diameter on thermal conductivity and dynamic viscosity of Fe/water nanofluids. *J. Thermal Anal. Calorimetry*, 119:1817–24, 2015.
- [119] Maxwell, J.C., A treatise on electricity and magnetism. 2nd ed. Cambridge(UK): Oxford University Press, 1904.
- [120] Hamilton, R.L., Crosser, O.K., Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *I&EC Fundam* 1, 182–191, 1962.
- [121] Koo, J., Kleinstreuer, C., Laminar Nanofluid Flow in Microheat-Sinks. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 2652-2661, 2005.
- [122] Bruggeman, D.A.G., Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und leitfähigkeiten der mischkörper aus isotropen substanzen. *Annalen der Physik, Leipzig*, 24, , 636–679, 1935.
- [123] Wasp, F.J., Solid-Liquid Slurry Pipeline Transportation. *Trans. Tech.*, Berlin, Germany, 1977.
- [124] Jeffrey, D.J., Conduction through a random suspension of spheres. *Proceedings of Royal Society (London)* A335, 355–367, 1973.
- [125] Davis, R.H., The effective thermal conductivity of a composite material with spherical inclusions. *International Journal of Thermophysics* 7, 609–620, 1986.
- [126] Lu, S., Lin, H., Effective conductivity of composites containing aligned spherical inclusions of finite conductivity. *Journal of Applied Physics* 79, 6761–6769, 1996.
- [127] Yu, W., Choi, S.U.S., The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Hamilton-Crosser Model. *J. Nanopart. Res.*, 6, 355-361, 2004.

- [128] Xue, Q., Model for Effective Thermal Conductivity of Nanofluids. *Phys. Lett. A.*, 307, 313-317, 2003.
- [129] Xue, Q., Xu, W.M., A Model of Thermal Conductivity of Nanofluids with Interfacial Shells. *Mater Chem. Phys.*, 90, , 298-301, 2005.
- [130] Xie, H., Fujii, M., Zhang, X., Effect of Interfacial Nanolayer on the Effective Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 2926-2932, 2005.
- [131] Wang, B.X., Zhou, L.P., Peng, X.F., A Fractal Model for Predicting the Effective Thermal Conductivity of Liquid with Suspension of Nanoparticles. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 2665-2672, 2003.
- [132] Xuan, Y., Li, Q., Hu, W., Aggregation Structure and Thermal Conductivity of Nanofluids. *AIChE J.*, 49, 1038-1043, 2003.
- [133] Jang, S.P., Choi, S.U.S., Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids. *Appl. Phys. Lett.*, 84, 4316-4318, 2004.
- [134] Prasher, R., Bhattacharya, P., Phelan, P.E., Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluids). *Phys. Rev. Lett.*, 94, 1-4, 2005.
- [135] Mintsas, H.A., Roy, G., Nguyen, C.T., Doucet, D., New temperature dependent thermal conductivity data for water based nanofluids. *Int. J. Therm. Sci.*, 48:363–71, 2009.
- [136] Timofeeva, E.V., Gavrilov, A.N., McCloskey, J.M., Tolmachev, Y.V., Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. *Phys. Rev.*, 76:061203, 2007.
- [137] Khanafer, K., Vafai, K., A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 54: 4410–28, 2011.
- [138] Corcione, M., Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Convers. Manage*, 52: 789–93, 2011.
- [139] Yiamsawasd, T., Dalkilic, A.S., Wongwises S., Measurement of the thermal conductivity of titania and alumina nanofluids. *Thermochim Acta*, 545: 48–56, 2012.
- [140] Patel, H.E., Sundararajan, T., Das, S.K., An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids. *J. Nanopart. Res.*, 12:1015–31, 2010.

- [141] Hassani, S., Saidur, R., Mekhilef, S., Hepbasli, A., A new correlation for predicting the thermal conductivity of nanofluids; using dimensional analysis. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 90: 121–30, 2015.
- [142] Azmi, W.H., Sharma, K.V., Mamat, R., Alias, A.B.S, Misnon II., Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 36:012029, 2012.
- [143] Hemmat Esfe, M., Abbasian Arani, A.A., Rezaie, M., Yan, W-M., Karimipour, A., Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag–MgO/water hybrid nanofluid. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 66: 189–95, 2015.
- [144] Sundar, L.S., Ramana, E.V., Singh, M.K., Sousa, A.C.M., Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids for heat transfer applications: an experimental study. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 56: 86–95, 2014.
- [145] Chon C.H., Kihm K.D., Lee S.P., Choi S.U.S., Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) Thermal Conductivity Enhancement. *Appl. Phys. Lett.*, 87, 153107, 2005.
- [146] Li, J., Computational Analysis of Nanofluid Flow in Microchannels with Applications to Micro-Heat Sinks and bio-MEMS, PhD Thesis NC State University, Raleigh, NC, United States, 2008.
- [147] Kihm, K.D., Chon, C.H., Lee, J.S., Choi, S.U.S., A New Heat Propagation Velocity Prevails over Brownian Particle Velocities in Determining the Thermal Conductivities of Nanofluids. *Nanoscale Res. Lett.* 6, 361, 2011.
- [148] Vajpai, A., Rajvanshi, A.K., Prajapati, O. S., Thermal Conductivity of Nanofluids. Lambert Academic Publishing, Germany, 2012.
- [149] Tillman, P., Hill, J.M., Determination of nanolayer thickness for a nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 34, 399 – 407, 2007.
- [150] Koblinski, P., Eastman, J.A., Cahill, D.G., Nanofluids for thermal transport. *Mater. Today* 8 (6) 36–44, 2005.
- [151] Goldstein, R.J., Joseph, D.D., Pui, D.H., Convective Heat Transport in Nanofluids, proposal, Faculty of Aerospace Engineering and Mechanics, University of Minnesota, Minnesota, September, 2000.
- [152] Wang, X.Q., Mujumdar, A.S., Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *Int. J. Therm. Sci.* 46 (1)1–19, 2007.

- [153] Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., Xi, S., A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technol.*, 196 (2) 89–101, 2009.
- [154] Das, S.K., Choi, S.U.S., Yu, W.H., Pradeep, T., *Nanofluid: Science and Technology*, John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [155] Swanson, E.J., Tavares, J., Coulombe, S., Improved dual-plasma process for the synthesis of coated or functionalized metal nanoparticles. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 36 (4) 886–887, 2008.
- [156] Das, S.K., Choi, S.U.S., Patel, H.E., Heat Transfer in Nanofluids – a review. *Heat Transfer Eng.* 27 (10)3–19, 2006.
- [157] Chang, H., Wu, Y.C., Chen, X.Q., Kao, M.J., *Fabrication of Cu Based Nanofluid with Superior Dispersion*, 2006.
- [158] Ghadimi, A., Saidur, R., Metselaar, H.S.C., A Review of Nanofluid Stability Properties and Characterization in Stationary Conditions. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 54, 4051-4068, 2011.
- [159] Zhu, D., Li, X., Wang, N., Wang, X., Gao, J., Li, H., Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluids. *Curr. Appl Phys.*, 9 (1) 131–139, 2009.
- [160] Wang, X.-J., Zhu, D.-S., Yang, S., Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids. *Chem. Phys. Lett.*, 470 (1–3) 107–111, 2009.
- [161] Assael, M.J., Metaxa, I.N., Arvanitidis, J., Christofilos, D., Lioutas, C., Thermal conductivity enhancement in aqueous suspensions of carbon multi-walled and double-walled nanotubes in the presence of two different dispersants. *Int. J. Thermophys.* 26 (3) 647–664, 2005.
- [162] Wei, X., Kong, T., Zhu, H., Wang, L.,  $\text{CuS/Cu}_2\text{S}$  nanofluids: synthesis and thermal conductivity. *Int. J. Heat Mass Transfer* 53 (9-10),1841–1843, 2010.
- [163] Meibodi, M.E., Vafaie-Sefti, M., Rashidi, A.M., Amrollahi, A., Tabasi, M., Kalal, H.S., The role of different parameters on the stability and thermal conductivity of carbon nanotube/water nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*. 37 (3) 319–323, 2010.
- [164] Hwang, Y., Lee, J.K., Lee, C.H., Jung, Y.M., S.I. Cheong, Lee, C.G., Ku, B.C., Jang, S.P., Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. *Thermochim. Acta* 455, 70–74, 2007.

- [165] Kavitha, T., Rajendran, A., Durairajan, A., Synthesis, characterization of TiO<sub>2</sub> nano powder and water based nanofluids using two step method. *Eur. J. Appl. Eng. Sci. Res.* 1 (4), 235-240, 2012.
- [166] Drzazga, M., Dzido, G., Lemanowicz, M., Gierczycki, A., Influence of nonionic surfactant on nanofluid properties, 14th European Conference on Mixing. Warszawa, 2012.
- [167] Khairul, M.A., Saidur, R., Hossain, A., Alim, M.A., Mahbubul, I.M., Heat Transfer Performance of Different Nanofluids Flows in a Helically Coiled Heat Exchanger. *Adv. Mat. Res.* 832, 160-165, 2014.
- [168] Manimaran, R., Palaniradja, K., Alagumurthi, N., Sendhilnathan, S., Hussain, J., Preparation and characterization of copper oxide nanofluid for heat transfer applications. *Appl. Nanosci.* 4, 163–167, 2014.
- [169] Zawrah, M.F., Khattab, R.M., Girgis, L.G., Daidamony, H.E., Aziz, R.E.A., Stability and electrical conductivity of water-base Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids for different applications. *Hous. Build. National Res. Centre*, (In press), 2015.
- [170] Ahammed, N., Asirvatham, L.G., Wongwises, S., Thermoelectric cooling of electronic devices with nanofluid in a multiport minichannel heat exchanger. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 74, 81–90, 2016.
- [171] Huang, J., Wang, X., Influence of pH on the stability characteristics of nanofluids. School of Chemical and Energy Engineering, IEEE, Wuhan, 2009.
- [172] Hong, T.-K., Yang, H.-S., Nanoparticle-Dispersion-Dependent Thermal Conductivity in Nanofluids. *J. Korean Phys. Soc.* 47, 321-324, 2005.
- [173] Yu, W., France, D.M., Smith, D.S., Singh, D., Timofeeva, E.V., Routbort, J.L., Heat transfer to a silicon carbide/water Nanofluid. *Int. J. Heat Mass Transfer* 52, 3606–3612, 2009.
- [174] Yang, L., Du, K., Niu, X., Li, Y., Zhang, Y., An experimental and theoretical study of the influence of surfactant on the preparation and stability of ammonia-water nanofluids. *Int. J. Refrig.* 34,1741-1748, 2011.
- [175] Heris, S. Z., Esfahany, M.N., Etemad, S. Gh., Experimental investigation of convective heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in circular tube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 203–210, 2007.
- [176] Darzi, A.A. R., Farhadi, M., Sedighi, K., Heat transfer and flow characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nanofluid in a double tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 47,105–112, 2013.
- [177] Çengel, Y., Introduction to thermodynamics and heat transfer, Second Edition, 2007.

- [178] Kakaç, S., Aradağ S., Gülenoğlu Ç., Contalı-plaka tipi ısı değiştirgeçlerinin tasarım esasları ve ısı ve hidrolik performanslarının deneysel incelenmesi. Mühendis ve Makine, Cilt:54, Sayı: 644.
- [179] Rosenblad, G., Kullendroff, A., Estimating Heat Transfer from Mass Transfer Studies on Plate Heat Exchanger Surfaces. *Warme-und Stoffubertragung* 8 (3), pp. 187-191, 1975.
- [180] Havner, R., Kumar, H., Wanniarachchi, A.S., Performance of an Industrial Heat Exchanger: Effect of Chevron Angle. *AIChE Symposium Series 89 (295)*, AIChE, New York, pp. 262-267, 1993.
- [181] Marriot, J., Performance of an Alfaflex Plate Heat Exchangers. *Chemical Engineering Progress* 73 (2), pp. 73-78, 1977.
- [182] Rene, F., Leuliet, J., Lanlande, M., Heat Transfer to Newtonian and Non-Newtonian Food Fluids in Plate Heat Exchangers: Experimental and Numeric Approaches. *Food and Bioproducts Processing: Transaction of the IchE, Part C*, vol. 69, no. 3, pp. 115-126, 1991.
- [183] Muley, A., Manglik, R. M., Enhanced Thermal-Hydraulic Performance Optimization of Chevron Plate Heat Exchangers. *International Journal of Heat Exchangers*, Vol. 1, pp. 3-18, February 2000.
- [184] Gülenoğlu Ç., Chevron Tipi Contalı-Plakalı Isı Değiştirgeçlerinin Isıl ve Hidrolik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Düzgün Olmayan Akış Dağılımının İncelenmesi. *Tobb Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Temmuz 2013.*
- [185] Versteeg, H. K., Malalasekera, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, Second Edition, England, 2007.
- [186] Zikanov, O., *Essential Computational Fluid Dynamics*, John Wiley & Sons, Canada, 2010.
- [187] Blazek, J., *Computational Fluid Dynamics Principles and Applications*. Elsevier, USA, 2005.
- [188] Anderson, J. D., *Computational Fluid Dynamics The Basics with Applications*. McGraw-Hill, 1995.
- [189] Hirsch, C., *Numerical Computation of Internal and External Flows, Volume 1 Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. Second edition, Elsevier, USA, 2007.
- [190] Ferziger, J. H., Peric, M., *Computarional Methods for Fluid Dynamics*. third, rev. Edition, Springer, USA, 2002.

- [191] Rebay, M., Kakac, S., Cotta, R. M., *Microscale and nanoscale heat transfer, Analysis, desing and applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- [192] ANSYS Fluent Theory Guide, 2015.
- [193] Yuan, Z., Tao, W., Wang, Q., Numerical prediction for laminar forced convection heat transfer in parallel-plate channels with streamwise-periodic rod disturbances, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 28: 1371–1387, 1998.
- [194] Asako, Y., Fahgri, M., *Finite-Volume Solutions for Laminar Flow and Heat Transfer in a Corrugated Duct*. Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer, August, Vol. 109/627-634, 1987.
- [195] Nonino, C., Comini, G., *Finite-Element Analysis Of Convection Problems In Spatially Periodic Domains*. Numerical Heat Transfer, Part B, 34: 361-378, 1998.
- [196] Sunden, B., Di Piazza, I., *Numerical Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in Plate and flame Heat Exchangers*. ASME HTD, vol. 361-3, pp. 287-293, 1998.
- [197] Ikegami, Y., Mutair, S., Kawabata, Y., *Experimental and Numerical Investigations on Plate-Type Heat Exchanger Performance*. Open Journal of Fluid Dynamics, 5, 92-98, 2015.
- [198] Rostamani, M., Hosseinizadeh, S., Gorji, M., Khodadai, J., Numerical study of turbulent forced convection of nanofluids in a long horizontal duct considering variable properties. *Int. Commu. Heat and Mass Transfer*, 37:1426-31, 2010
- [199] Hussein, A.M., Sharma, K., Bakar, R. Kadirgama, K., The effect of cross sectional area of tube on friction factor and heat transfer Nanofluid turbulent flow. *Int. Commu. Heat and Mass Transfer*, 47:49-55, 2013.
- [200] Rakhsha, M., Akbaridoust, F., Abbassi, A., Safar-Avval, M., *Experimental and numerical investigation of turbulent forced convection flow of nano-fluid in helical coiled tubes at constant surface temperature*. Powder Technol., 2015.
- [201] Bayat, J., Nikseresht, A.H., *Thermal performance and pressure drop analysis of nanofluids in turbulent forced convective flows*. *Int. J. Thermal Sci.*, 60:263-43, 2012.
- [202] Perro, T., Clodic, D., *Thermal-hydraulic CFD study in louvered fin-and-flat-tube heat exchangers*. *Int. J. Refrigeration*, 27, 422-432, 2004.
- [203] Zhang, Z., Li, Y.Z., *CFD simulation on inlet configuration of plate-fin heat exchangers*. *Cryogenics*, 43, 673-678, 2003.

- [204] Wen, J., Li, Y.Z., Study of flow distribution and its improvement on the header of plate-fin heat exchanger. *Cryogenics*, 44, 823-831, 2004.
- [205] Fernandes, C.S., Dias, R.P., Nobrega, J.M., Afonso, I.M., Melo, L.F., Maia, J.M., Thermal behavior of stirred yoghurt during cooling in plate heat exchangers. *J. Food Eng.*, 76, 433-439, 2006.
- [206] Wasewar, K.L., Hargunani, S., Atluri, P., Kumar, N., Simulation of flow distribution in the header of plate-fin heat exchangers. *Chem. Eng. Tech.*, 30 (10), 1340-1346, 2007.
- [207] Fernandes, C.S., Dias, R., Nobrega, J.M., Afonso, I.M., Melo, L.F., Maia, J.M., Simulation of stirred yoghurt processing in plate heat exchangers. *Journal of Food Engineering*, 69, 281–290, 2005.
- [208] Bejan, A., Heat transfer, John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [209] Bejan, A., Kraus, A.D., Heat Transfer Handbook, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [210] Kakaç, S., Yener Y., Pramuanjaroenkij, A., Convective heat transfer, CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.
- [211] Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., Cho, Y.I., Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill, Third Edition, 1998.
- [212] Bejan, A. Convection heat transfer, Wiley, 4th edition, 2013.
- [213] Bergman, T.L., F.P., Lavine, Incopera, A.S., Dewitt, A.S., Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Palme Yayıncılık, 2015.
- [214] Çengel, Y., Isı ve Kütle Transferi Pratik bir yaklaşım, Üçüncü Basım, Güven Bilimsel, 2010.
- [215] Demir, H., Dalkilic, A.S., Kürekci, N.A., Duangthongsuk, W., Wongwises, S., Numerical investigation on the single phase forced convection heat transfer characteristics of TiO<sub>2</sub> nanofluids in a double-tube counter flow heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 218–228, 2011.
- [216] Akbari, M., Galanis, N., Behzadmehr, A., Comparative assessment of single and two-phase models for numerical studies of nanofluid turbulent forced convection. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, no. 37: 136–146, 2012.



- [217] Behzadmehr, A., Saffar-Avval, M., Galanis, N., Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, no. 28 (2):211–219, 2007.
- [218] Bianco, V., Chiacchio, F., Manca, O., Nardini, S., Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes. *Applied Thermal Engineering*, no. 29 (17–18):3632–3642, 2009.
- [219] Lotfi, R., Saboohi, Y., Rashidi, A. M., Numerical study of forced convective heat transfer of nanofluids: Comparison of different approaches. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, no. 37 (1):74–78, 2010.
- [220] Hejazian, M., Moraveji, M. K., A comparative analysis of single and two-phase models of turbulent convective heat transfer in a tube for TiO<sub>2</sub> nanofluid with CFD. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, no. 63 (10):795–806, 2013.
- [221] Sert, I.O., Sezer-Uzol, N., Yazicioglu, A.G., Kakac, S., Enhancement of convective heat transfer with nanofluids, single-phase and two-phase analysis. 2013 Fifth ICAPM, Cluj-Napoca, Romania, August 25–28, 2013.
- [222] Fard, M.H., Esfahany, M.N., Talaie, M.R. Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two-phase model versus single-phase model. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 37, 91–97, 2010.
- [223] Akbari, M., Galanis, N., Behzadmehr, A., Comparative analysis of single and two-phase models for CFD studies of nanofluid heat transfer. *Int. J. Therm. Sci.*, 50, 1343–1354, 2011.
- [224] Mirmasoumi, S., Behzadmehr, A., Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model. *Appl. Therm. Eng.*, 28, 717–727, 2008.
- [225] Beg, O.A., Rashidi, M.M., Akbari, M., Hosseini, A., Comparative numerical study of single-phase and two phase models for bio-nanofluid transport phenomena. *J. Mech. Mde. Biol.* 14, 1450011, 2014.
- [226] Majid, H., Mostafa, K.M., Alireza B., Comparative study of Euler and mixture models for turbulent flow of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid inside a horizontal tube. *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, 52, 152-158, 2014.
- [227] Peng, W., Minli, B., Jizu, L., Chengzhi, H., Yuyan W., Numerical investigation on the turbulent flow characteristic of nanofluids in a horizontal circular tube. *Numer. Heat Transfer, Part A* 66, 646-668, 2014.

- [228] Moraveji, M.K., Reza, M.A., CFD modeling (comparing single and two-phase approaches) on thermal performance of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /water Nanofluid in mini-channel heat sink. *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, 44,157-164, 2013.
- [229] Kalteh, M., Abbassi, A., Majid, S.A., Frijns, A., Darhuber, A., Harting, J., Experimental and numerical investigation of Nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink, *Appl. Therm. Eng.*, 36, 260-268, 2012.
- [230] White, F.M., *Fluid Mechanics*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 1998.
- [231] Holman, J.P, *Experimental Methods For Engineers*, Eight Edition, McGraw-Hill, 2012.



## EKLER

### EK A. Belirsizlik Analizi

Ölçüm belirsizliği, elde edilen sonucun kalitesinin sayısal göstergesidir. Elde edilen sonuçla birlikte ölçüm belirsizliği de verilirse, sonucu kullananlara ölçümün kalitesi hakkında bilgi aktarılmış olur. Başka deyişle, sonucun, gerçek değeri ne ölçüde temsil ettiğini gösterir. Ölçüm ekipmanlarındaki sürtünme ve elektronik salınımlardan dolayı ölçümler sırasında sapmalar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden, deneyler süresince ölçüm cihazlarındaki belirsizliklerin deneysel sonuçlara etkisinin hesaplanması gerekmektedir. Ölçüm cihazlarının belirsizlik değerleri Tablo A.1’de verilmektedir. Kline and McClintock tarafından ifade edilen belirsizlik analizi yöntemiyle, hesaplanan büyüklükler için toplam belirsizlik değerleri Tablo A.2’de verilmektedir [230, 231].

Verilen bir  $W$  fonksiyonu (bağımlı değişken)  $n$  tane bağımsız değişkene bağlı olarak  $W = W(x_1, x_2, x_3 \dots \dots x_n)$  şeklindedir. Her bir bağımsız değişkenin hata oranı örneğin;  $x_1$  için  $\delta x_1$  ve  $\delta W$  toplam belirsizlik olsun. Bu bağımlı değişken  $W$ ’nun toplam belirsizlik değeri;

$$\delta W = \left[ \left( \frac{\partial W}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial W}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial W}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.1})$$

şeklindedir. Bağımlı değişkenin  $W = C x_1^{n_1} x_2^{n_2} x_3^{n_3}$  ( $C = \text{sabit}$ ) bağımsız değişkenin fonksiyonu şeklinde olduğunu varsayalım. Bu durumda Denklem A.1’deki ifadeleri;

$$\frac{\partial W}{\partial x_1} = \frac{n_1 W}{x_1}, \frac{\partial W}{\partial x_2} = \frac{n_2 W}{x_2}, \frac{\partial W}{\partial x_3} = \frac{n_3 W}{x_3}, \dots \quad (\text{A.2})$$

şeklinde yazabiliriz.

Denklem A.1 ile Denklem A.2'yi yeniden düzenlersek,

$$\frac{\delta W}{W} = \left[ \left( n_1 \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left( n_2 \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \left( n_3 \frac{\delta x_3}{x_3} \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

ifadesi elde edilir. Belirsizlikleri veren ifadeler şu şekildedir.

Reynolds sayısı için;

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[ \left( \frac{\delta D_{hd}}{D_{hd}} \right)^2 + \left( \frac{\delta G}{G} \right)^2 + \left( \frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

Isı geçişi için;

$$\frac{\delta Q}{Q} = \left[ \left( \frac{\delta c_p}{c_p} \right)^2 + \left( \frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{\delta \Delta T}{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

Toplam ısı geçiş katsayısı için;

$$\frac{\delta U}{U} = \left[ \left( \frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left( \frac{\delta A}{A} \right)^2 + \left( \frac{\delta \Delta T_{lm}}{\Delta T_{lm}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.6})$$

Logaritmik ortalama sıcaklık farkı için;

$$\frac{\partial \Delta T_{lm}}{\partial \Delta T_1} = \frac{1}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} - \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\left[\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)\right]^2} \frac{1}{\Delta T_1} \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial \Delta T_{lm}}{\partial \Delta T_2} = -\frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\left[\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)\right]^2} \frac{1}{\Delta T_2} - \frac{1}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (\text{A.8})$$

$$\delta \Delta T_{lm} = \left[ \left( \frac{\delta \Delta T_1}{\partial \Delta T_1} \partial \Delta T_{lm} \right)^2 + \left( \frac{\delta \Delta T_2}{\partial \Delta T_2} \partial \Delta T_{lm} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.9})$$

Sürtünme faktörü için;

$$\frac{\delta f}{f} = \left[ \left( \frac{\delta \Delta P}{\Delta P} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_{hd}}{D_{hd}} \right)^2 + \left( \frac{\delta L_{eff}}{L_{eff}} \right)^2 + \left( 2 \frac{\delta G}{G} \right)^2 + \left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.10})$$

Tablo A.1. Ölçüm ekipmanlarının belirsizlik değerleri

Değişken	Belirsizlik değeri (%)
Sıcak akışkan giriş ve çıkış sıcaklığı	± 0,4
Nanoakışkan giriş ve çıkış sıcaklığı	± 0,4
Türbin debimetre	± 5
Rotametre	± 3
Tablo değerleri	± 1
Fark basınç	± 0,5
Levha boyutları	± 0,01

Tablo A.2. Hesaplanan büyüklükler için toplam belirsizlik

Sıcak akışkan tarafı Reynolds sayısı	% 2,42
Nanoakışkan tarafı Reynolds sayısı	% 3,07
Isı geçişi	% 7,39
Toplam ısı geçiş katsayısı	% 6,52
Sürtünme faktörü	% 8,74

## EK B. Deneysel Sonuçlar ve Hesap Yöntemi

Tablo B.1. Sıcak akışkan deneysel sonuçlar ve hesaplanan değerler

Hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkan													
Giriş sıcaklığı (°C)	Çıkış sıcaklığı (°C)	Debi (kg/s)	Ortalama sıcaklık (°C)	Verilen ısı miktarı (W)	Kütle akışı (kg/m <sup>2</sup> s)	Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ (kg/sm)	Özgül ısı $c_p$ (J/kgK)	Isı iletim katsayısı k (W/mK)	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Nusselt sayısı	Isı taşınım katsayısı h (W/m <sup>2</sup> K)
37,63	29,23	0,025	33,43	877,29	142,86	994,24	7,39E-04	4177,57	0,621	796,92	4,97	49,548	7465,40
37,62	28,51	0,025	33,07	951,44	142,86	994,35	7,44E-04	4177,58	0,620	790,92	5,01	49,438	7442,18
37,63	27,93	0,025	32,78	1013,07	142,86	994,44	7,49E-04	4177,59	0,620	786,24	5,05	49,352	7424,00
37,53	27,37	0,025	32,45	1061,11	142,86	994,55	7,54E-04	4177,61	0,619	780,82	5,09	49,251	7402,91
37,47	26,88	0,025	32,18	1106,03	142,86	994,63	7,58E-04	4177,62	0,619	776,32	5,12	49,168	7385,30
37,56	26,52	0,025	32,04	1153,03	142,86	994,67	7,60E-04	4177,63	0,619	774,11	5,13	49,126	7376,64
Hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkan													
Giriş sıcaklığı (°C)	Çıkış sıcaklığı (°C)	Debi (kg/s)	Ortalama sıcaklık (°C)	Verilen ısı miktarı (W)	Kütle akışı (kg/m <sup>2</sup> s)	Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ (kg/sm)	Özgül ısı $c_p$ (J/kgK)	Isı iletim katsayısı k (W/mK)	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Nusselt sayısı	Isı taşınım katsayısı h (W/m <sup>2</sup> K)
37,67	28,59	0,025	33,13	948,31	142,86	994,33	7,43E-04	4177,58	0,620	791,99	5,00	49,457	7446,32
37,61	28,00	0,025	32,81	1003,67	142,86	994,43	7,48E-04	4177,59	0,620	786,65	5,04	49,359	7425,60
37,73	27,79	0,025	32,76	1038,13	142,86	994,45	7,49E-04	4177,59	0,620	785,91	5,05	49,35	7422,73
37,80	27,50	0,025	32,65	1075,73	142,86	994,48	7,51E-04	4177,60	0,620	784,10	5,06	49,312	7415,70
37,70	27,00	0,025	32,35	1117,51	142,86	994,58	7,55E-04	4177,61	0,619	779,18	5,10	49,221	7396,51
37,65	26,60	0,025	32,13	1154,07	142,86	994,65	7,59E-04	4177,63	0,619	775,50	5,12	49,152	7382,09

Tablo B.1. (Devamı)

Hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkan													
Giriş sıcaklığı (°C)	Çıkış sıcaklığı (°C)	Debi (kg/s)	Ortalama sıcaklık (°C)	Verilen ısı miktarı (W)	Kütle akısı (kg/m <sup>2</sup> s)	Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ (kg/sm)	Özgül ısı $c_p$ (J/kgK)	Isı iletim katsayısı k (W/mK)	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Nusselt sayısı	Isı taşınım katsayısı h (W/m <sup>2</sup> K)
37,53	28,32	0,025	32,93	961,89	142,86	994,40	7,46E-04	4177,58	0,620	788,62	5,03	49,395	7433,25
37,74	28,20	0,025	32,97	996,35	142,86	994,38	7,46E-04	4177,58	0,620	789,36	5,02	49,409	7436,12
37,68	27,68	0,025	32,68	1044,40	142,86	994,47	7,50E-04	4177,59	0,620	784,60	5,06	49,321	7417,62
37,52	27,14	0,025	32,33	1084,09	142,86	994,58	7,56E-04	4177,61	0,619	778,86	5,10	49,215	7395,23
37,44	26,76	0,025	32,10	1115,43	142,86	994,66	7,59E-04	4177,63	0,619	775,09	5,13	49,145	7380,49
37,55	26,46	0,025	32,01	1158,25	142,86	994,68	7,61E-04	4177,63	0,619	773,54	5,14	49,116	7374,40
Hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkan													
Giriş sıcaklığı (°C)	Çıkış sıcaklığı (°C)	Debi (kg/s)	Ortalama sıcaklık (°C)	Verilen ısı miktarı (W)	Kütle akısı (kg/m <sup>2</sup> s)	Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ (kg/sm)	Özgül ısı $c_p$ (J/kgK)	Isı iletim katsayısı k (W/mK)	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Nusselt sayısı	Isı taşınım katsayısı h (W/m <sup>2</sup> K)
37,77	27,96	0,025	32,87	1024,55	142,86	994,42	7,47E-04	4177,59	0,620	787,63	5,04	49,377	7429,43
37,74	27,51	0,025	32,63	1068,42	142,86	994,49	7,51E-04	4177,60	0,620	783,69	5,06	49,305	7414,10
37,70	27,04	0,025	32,37	1113,33	142,86	994,57	7,55E-04	4177,61	0,619	779,51	5,09	49,227	7397,79
37,76	26,84	0,025	32,30	1140,49	142,86	994,59	7,56E-04	4177,62	0,619	778,37	5,10	49,206	7393,31
37,68	26,32	0,025	32,00	1186,45	142,86	994,69	7,61E-04	4177,64	0,619	773,45	5,14	49,114	7374,07
37,67	26,02	0,025	31,85	1216,74	142,86	994,73	7,63E-04	4177,65	0,618	770,92	5,16	49,067	7364,12

Tablo B.1. (Devamı)

Hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkan													
Giriş sıcaklığı (°C)	Çıkış sıcaklığı (°C)	Debi (kg/s)	Ortalama sıcaklık (°C)	Verilen ısı miktarı (W)	Kütle akısı (kg/m <sup>2</sup> s)	Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ (kg/sm)	Özgül ısı $c_p$ (J/kgK)	Isı iletim katsayısı k (W/mK)	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Nusselt sayısı	Isı taşınım katsayısı h (W/m <sup>2</sup> K)
36,87	26,50	0,025	31,69	1083,06	142,86	994,78	7,66E-04	4177,66	0,618	768,31	5,18	49,018	7353,83
36,99	26,35	0,025	31,67	1111,26	142,86	994,79	7,66E-04	4177,66	0,618	768,06	5,18	49,013	7352,87
36,67	26,00	0,025	31,34	1114,40	142,86	994,89	7,72E-04	4177,69	0,618	762,59	5,22	48,911	7331,29
37,00	25,92	0,025	31,46	1157,22	142,86	994,85	7,70E-04	4177,68	0,618	764,63	5,21	48,949	7339,35
37,12	25,76	0,025	31,44	1186,46	142,86	994,86	7,70E-04	4177,68	0,618	764,31	5,21	48,943	7338,06
37,14	25,55	0,025	31,35	1210,49	142,86	994,89	7,72E-04	4177,69	0,618	762,76	5,22	48,914	7331,94

Tablo B.2. Nanoakışkan deneysel sonuçlar ve hesaplanan değerler

Hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkan										
Debi (kg/s)	Kütle akısı (kg/m <sup>2</sup> s)	Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ (kg/sm)	Özgül ısı $c_p$ (J/kgK)	Isı iletim katsayısı k (W/mK)	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Toplam ısı geçiş katsayısı U (W/m <sup>2</sup> K)	Nanoakışkan ısı taşınım katsayısı h (W/m <sup>2</sup> K)	
0,025	142,86	997,59	9,71E-04	4181,25	0,601	605,93	6,76	3425,94	7857,66	
0,033	188,57	997,76	9,89E-04	4181,74	0,600	785,79	6,89	3656,56	9221,97	
0,042	238,29	997,88	1,00E-03	4182,12	0,599	979,96	6,99	3897,48	10964,54	
0,050	285,71	997,96	1,01E-03	4182,40	0,598	1164,13	7,07	4076,42	12569,71	
0,067	381,14	998,09	1,03E-03	4182,85	0,597	1530,85	7,18	4186,47	13738,95	
0,083	476,00	998,15	1,03E-03	4183,06	0,597	1899,46	7,24	4377,61	16077,92	



Tablo B.2. (Devamı)

Hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkan									
Debi ( kg/s )	Kütle akısı ( kg/m <sup>2</sup> s )	Yoğunluk $\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ ( kg/sm )	Özgül ısı $c_p$ ( J/kgK )	Isı iletim katsayısı k ( W/mK )	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Toplam ısı geçiş katsayısı U ( W/m <sup>2</sup> K )	Nanoakışkan ısı taşıma katsayısı h ( W/m <sup>2</sup> K )
0,025	142,86	1004,26	9,68E-04	4150,60	0,607	607,90	6,62	3713,85	9588,40
0,033	188,57	1004,48	9,91E-04	4151,22	0,605	783,94	6,80	3886,31	10873,21
0,042	238,29	1004,61	1,01E-03	4151,62	0,604	976,83	6,90	4004,77	11861,52
0,050	285,71	1004,71	1,02E-03	4151,95	0,604	1158,64	6,99	4139,45	13148,57
0,067	381,14	1004,82	1,03E-03	4152,37	0,603	1525,02	7,09	4230,80	14186,81
0,083	476,00	1004,89	1,04E-03	4152,60	0,602	1891,03	7,15	4436,72	16876,51
Hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkan									
Debi ( kg/s )	Kütle akısı ( kg/m <sup>2</sup> s )	Yoğunluk $\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ ( kg/sm )	Özgül ısı $c_p$ ( J/kgK )	Isı iletim katsayısı k ( W/mK )	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Toplam ısı geçiş katsayısı U ( W/m <sup>2</sup> K )	Nanoakışkan ısı taşıma katsayısı h ( W/m <sup>2</sup> K )
0,025	142,86	1010,98	9,71E-04	4120,50	0,613	606,38	6,53	3816,02	10325,51
0,033	188,57	1011,18	9,91E-04	4121,06	0,611	783,77	6,69	3935,64	11244,18
0,042	238,29	1011,34	1,01E-03	4121,55	0,610	973,48	6,82	4057,76	12352,98
0,050	285,71	1011,47	1,02E-03	4121,98	0,609	1150,62	6,93	4196,31	13810,70
0,067	381,14	1011,55	1,03E-03	4122,27	0,608	1520,62	7,00	4353,04	15733,79
0,083	476,00	1011,61	1,04E-03	4122,49	0,608	1885,59	7,06	4504,67	17949,26

Tablo B.2. (Devamı)

Hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkan									
Debi ( kg/s )	Kütle akısı ( kg/m <sup>2</sup> s )	Yoğunluk $\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ ( kg/sm )	Özgül ısı $c_p$ ( J/kgK )	Isı iletim katsayısı k ( W/mK )	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Toplam ısı geçiş katsayısı U ( W/m <sup>2</sup> K )	Nanoakışkan ısı taşıma katsayısı h ( W/m <sup>2</sup> K )
0,025	142,86	1017,71	9,74E-04	4090,83	0,615	604,44	6,47	4024,04	12014,65
0,033	188,57	1017,94	9,98E-04	4091,49	0,613	778,19	6,66	4145,98	13219,74
0,042	238,29	1018,10	1,02E-03	4091,97	0,612	966,78	6,79	4305,85	15062,04
0,050	285,71	1018,18	1,02E-03	4092,22	0,612	1149,35	6,85	4408,92	16425,54
0,067	381,14	1018,30	1,04E-03	4092,63	0,611	1512,82	6,96	4617,35	19884,85
0,083	476,00	1018,35	1,04E-03	4092,84	0,610	1877,37	7,01	4768,51	23126,32

Hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkan									
Debi ( kg/s )	Kütle akısı ( kg/m <sup>2</sup> s )	Yoğunluk $\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik viskozite $\mu$ ( kg/sm )	Özgül ısı $c_p$ ( J/kgK )	Isı iletim katsayısı k ( W/mK )	Reynold sayısı	Prandtl sayısı	Toplam ısı geçiş katsayısı U ( W/m <sup>2</sup> K )	Nanoakışkan ısı taşıma katsayısı h ( W/m <sup>2</sup> K )
0,025	142,86	1024,35	9,69E-04	4061,35	0,624	607,41	6,31	4433,90	16984,57
0,033	188,57	1024,62	9,96E-04	4062,05	0,622	780,00	6,50	4546,84	18776,93
0,042	238,29	1024,79	1,01E-03	4062,54	0,621	968,38	6,63	4600,12	19877,16
0,050	285,71	1024,89	1,03E-03	4062,89	0,620	1147,24	6,72	4703,08	21881,95
0,067	381,14	1025,04	1,04E-03	4063,37	0,619	1506,27	6,85	4761,84	23227,53
0,083	476,00	1025,12	1,05E-03	4063,68	0,618	1862,60	6,92	4853,22	25651,33

Tablo B.3. Basınç düşümü deneysel sonuçlar ve hesaplanan değerler

Hacimsel oranı % 0 olan nanoakışkan				Hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkan				Hacimsel oranı % 0,5 olan nanoakışkan			
Basınç düşüşü (Pa)	Porttaki akışkan debisi (kg/m <sup>2</sup> s)	Giriş ve çıkış portları basınç düşüşü (Pa)	Sürtünme faktörü (f)	Basınç düşüşü (Pa)	Porttaki akışkan debisi (kg/m <sup>2</sup> s)	Giriş ve çıkış portları basınç düşüşü (Pa)	Sürtünme faktörü (f)	Basınç düşüşü (Pa)	Porttaki akışkan debisi (kg/m <sup>2</sup> s)	Giriş ve çıkış portları basınç düşüşü (Pa)	Sürtünme faktörü (f)
3900	79,58	4,44	1,32	4500	79,58	4,41	1,53	4600	79,58	4,38	1,57
6190	105,04	7,74	1,20	6900	105,04	7,69	1,35	7100	105,04	7,64	1,39
7500	132,74	12,36	0,91	8900	132,74	12,28	1,09	9200	132,74	12,19	1,13
10540	159,15	17,77	0,89	11500	159,15	17,65	0,98	11900	159,15	17,53	1,02
15520	212,31	31,61	0,74	16700	212,31	31,40	0,80	17100	212,31	31,19	0,82
22270	265,15	49,31	0,68	23800	265,15	48,97	0,73	24000	265,15	48,65	0,74

Hacimsel oranı % 0,75 olan nanoakışkan			
Basınç düşüşü (Pa)	Porttaki akışkan debisi (kg/m <sup>2</sup> s)	Giriş ve çıkış portları basınç düşüşü (Pa)	Sürtünme faktörü (f)
4700	79,58	4,36	1,62
7200	105,04	7,59	1,42
9300	132,74	12,11	1,15
12300	159,15	17,41	1,06
17300	212,31	30,99	0,84
24200	265,15	48,33	0,75

Hacimsel oranı % 1 olan nanoakışkan			
Basınç düşüşü (Pa)	Porttaki akışkan debisi (kg/m <sup>2</sup> s)	Giriş ve çıkış portları basınç düşüşü (Pa)	Sürtünme faktörü (f)
4900	79,58	4,33	1,70
7400	105,04	7,54	1,47
9400	132,74	12,03	1,17
12490	159,15	17,30	1,08
17600	212,31	30,78	0,86
24300	265,15	48,01	0,76

## Örnek Hesaplamalar

### Deneysel Hesaplama

Dalgalı yüzeyli levhalar arasında akmakta olan akışkanlar için ısı taşınım katsayısı ve sürtünme faktörünün hesaplamasında sırasıyla aşağıda verilen işlemler yapılmaktadır. Sıcak akışkan ve nanoakışkanın termo-fiziksel özelliklerinin hesaplanmasında ortalama sıcaklık değeri kullanılmıştır.

Sıcak akışkan için;

Denklem 1.9-1.12'den suyun termofiziksel özellikleri ortalama sıcaklık kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\left. \begin{array}{l} T_{h,i} = 37,65 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_{h,o} = 26,60 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right\} T_{\text{ort,h}} = 32,13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sıcak su özgül ısı,

$$c_{p,s} = 4217,25 - 3,01528 \times 32,13 + 0,0780849 \times (32,13)^2 - 0,000810854 \times (32,13)^3 + 0,00000332379 \times (32,13)^4 = 4177,63 \text{ [ J/kgK]}$$

$$\dot{m}_h = 0,025 \text{ kg/s}$$

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p,s} (T_{h,i} - T_{h,o}) = 1154,07 \text{ W}$$

$$G_h = \frac{\dot{m}_h}{N_{cp} b L_w} = \frac{0,025}{1 \times 0,0025 \times 0,07} = 142,86 \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

$$L_w \approx L_h + D_p = 50 + 20 = 70 = 0,07 \text{ m}$$

Etkin levha sayısı,

$$N_e = N_t - 1 = 3 - 1 = 2$$

Bir geçişteki kanalların sayısı,

$$N_{cp} = \frac{N_t - 1}{2N_p} = \frac{3 - 1}{2 \times 1} = 1$$

Sıkıştırılmış levhalar arasında kalan mesafe,  $L_c = 0,009$  m

$$p = \frac{L_c}{N_t} = \frac{0,009}{3} = 0,003 \text{ m}$$

Levha kalınlığı,  $t = 0,0005$  m

$$b = p - t = 0,003 - 0,0005 = 0,0025 \text{ m}$$

Reynolds sayısı,

$$Re_h = \frac{G_h D_{hd}}{\mu_h} = \frac{142,86 \times 0,00412}{7,59 \times 10^{-4}} = 775,5$$

$$D_{hd} \cong \frac{2b}{\phi_p} = \frac{2 \times 0,0025}{1,208} = 0,00412 \text{ m}$$

Sıcak su dinamik viskozite,

$$\mu_s = 0,00175015 - 0,0000517503 \times (32,13) + 8,65854 \times 10^{-7} \times (32,13)^2 \\ - 7,53662 \times 10^{-9} \times (32,13)^3 + 2,58918 \times 10^{-11} \times (32,13)^4$$

$$\mu_s = 7,59 \times 10^{-4} \text{ [kg/sm]}$$

Sıcak su Prandtl sayısı,

$$Pr = \frac{\mu_s c_{p,s}}{k_s} = \frac{7,59 \times 10^{-4} \times 4177,63}{0,619} = 5,12$$

Sıcak su ısı iletim katsayısı,

$$k_s = 0,559434 + 0,00215742 \times (32,13) - 0,00000965824 \times (32,13)^2$$

$$k_s = 0,619 \text{ [W/mK]}$$

Sıcak su ısı taşınım katsayısı,

$$Nu_h = 0,348 Re_h^{0,663} Pr_h^{0,33} = 0,348 \times (775,5)^{0,663} (5,12)^{0,33} = 49,152$$

$$Nu_h = \frac{h_h D_{hd}}{k_s} \rightarrow h_h = \frac{49,152 \times 0,619}{0,00412} = 7382,09 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

Soğuk akışkan ( % 0,25) için;

$$\left. \begin{array}{l} T_{c,i} = 17,43 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_{c,o} = 20,61 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right\} T_{ort,c} = 19,02 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Suyun termofiziksel özellikleri,

$$\rho_s = 1001,07 - 0,0885789 \times 19,02 - 0,00346617 \times (19,02)^2$$

$$\rho_s = 998,131 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\begin{aligned} \mu_s = & 0,00175015 - 0,0000517503 \times (19,02) + 8,65854 \times 10^{-7} \times (19,02)^2 \\ & - 7,53662 \times 10^{-9} \times (19,02)^3 + 2,58918 \times 10^{-11} \times (19,02)^4 \end{aligned}$$

$$\mu_s = 1,031 \times 10^{-3} \text{ [kg/sm]}$$

$$c_{p,s} = 4217,25 - 3,01528 \times 19,02 + 0,0780849 \times (19,02)^2 - 0,000810854 \\ \times (19,02)^3 + 0,00000332379 \times (19,02)^4 = 4183,003 \text{ [J/kgK]}$$

$$k_s = 0,559434 + 0,00215742 \times (19,02) - 0,00000965824 \times (19,02)^2$$

$$k_s = 0,597 \text{ [W/mK]}$$

Nanoakışkanın özellikleri Denklem 1.4 - 1.7 kullanılarak şu şekilde hesaplanmıştır.

$$\rho_p = 3700 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_s + \phi\rho_p = (1 - 0,0025) \times 998,131 + (0,0025) \times 3700$$

$$\rho_{nf} = 1004,885 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$c_{np} = 880 \text{ [J/kgK]}$$

$$c_{nf} = \frac{(1 - \phi)\rho_s c_{p,s} + \phi\rho_p c_p}{\rho_{nf}}$$

$$c_{nf} = \frac{(1 - 0,0025) \times 998,131 \times 4183,003 + (0,0025 \times 3700 \times 880)}{1004,885}$$

$$c_{nf} = 4152,6 \text{ [J/kgK]}$$

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi)\mu_s = (1 + 2,5 \times 0,0025) \times 1,031 \times 10^{-3}$$

$$\mu_{nf} = 1,0374 \times 10^{-3} \text{ [kg/sm]}$$

$$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2k_s + 2(k_{np} - k_s)(1 + \beta_1)^3\phi}{k_{np} + 2k_s - (k_{np} - k_s)(1 + \beta_1)^3\phi} k_s$$

$$k_{nf} = \frac{35 + (2 \times 0,597) + 2(35 - 0,597)(1 + 0,2)^3(0,0025)}{35 + 2 \times 0,597 - (35 - 0,597)(1 + 0,2)^3(0,0025)} \times 0,597$$

$$k_{nf} = 0,604 \text{ [W/mK]}$$

Nanokışkana geçen ısı miktarı,

$$Q_c = \dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{c,o} - T_{c,i}) = 0,0833 \times 4152,6 \times (20,61 - 17,43) = 1099,99 \text{ W}$$

Reynolds sayısı,

$$Re_{nf} = \frac{G_{nf} D_{hd}}{\mu_{nf}} = \frac{476 \times 0,00412}{1,0374 \times 10^{-3}} = 1890,418$$

Prandtl sayısı,

$$Pr = \frac{\mu_s c_{p,s}}{k_s} = \frac{1,0374 \times 10^{-3} \times 4152,6}{0,604} = 7,13$$

Kütle akısı,

$$G_{nf} = \frac{\dot{m}_{nf}}{N_{cp} b L_w} = \frac{0,0833}{1 \times 0,0025 \times 0,07} = 476 \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

Ortalama ısı geçişi,

$$Q = \frac{Q_h + Q_c}{2} = \frac{1154,07 + 1099,99}{2} = 1127,03 \text{ W}$$

Logaritmik ortalama sıcaklık farkı,

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \left( \frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}} \right)} = \frac{(37,65 - 20,61) - (26,60 - 17,43)}{\ln \left( \frac{37,65 - 20,61}{26,60 - 17,43} \right)}$$



$$\Delta T_{lm} = 12,70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Isı geçişi alanı,

$$A = 0,02 \text{ m}^2$$

Toplam ısı geçişi katsayısı,

$$Q = UA\Delta T_{lm} \rightarrow 1127,03 = U \times 0,02 \times 12,70 \rightarrow U = 4437,13 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Levha kalınlığı,

$$t = 0,0005 \text{ m}$$

Levhanın ısı iletim katsayısı,

$$k = 16,3 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Nanoakışkanın ısı taşınım katsayısı,

$$\frac{1}{U} = \left(\frac{1}{h_h}\right) + \left(\frac{t}{k}\right) + \left(\frac{1}{h_{nf}}\right) \rightarrow \frac{1}{h_{nf}} = \frac{1}{4437,13} - \left(\left(\frac{1}{7382,09}\right) + \left(\frac{0,0005}{16,3}\right)\right)$$

$$h_{nf} = 16876,51 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Nanoakışkan Nusselt sayısı,

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf}D_{hd}}{k_{nf}} = \frac{16876,51 \times 0,00412}{0,604} = 115,12$$

Sürtünme faktörü,

Giriş-çıkış portundaki kütleli debi,

$$G_{pt} = \frac{\dot{m}_{nf}}{\pi D_p^2/4} = \frac{0,0833}{\pi(0,02^2/4)} = 265,152 \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

Giriş-çıkış portundaki basınç düşümü,

$$\Delta P_{pt} = 1,4 \frac{G_{pt}^2}{2\rho_{nf}} N_p = 1,4 \frac{265,152^2}{2 \times 1004,885} \times 1 = 48,975 \text{ Pa}$$

Toplam basınç düşümü,

$$\Delta P = 23800 \text{ Pa}$$

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_{pt} \rightarrow \Delta P_f = \Delta P - \Delta P_{pt} = 23800 - 48,975 = 23751,025 \text{ Pa}$$

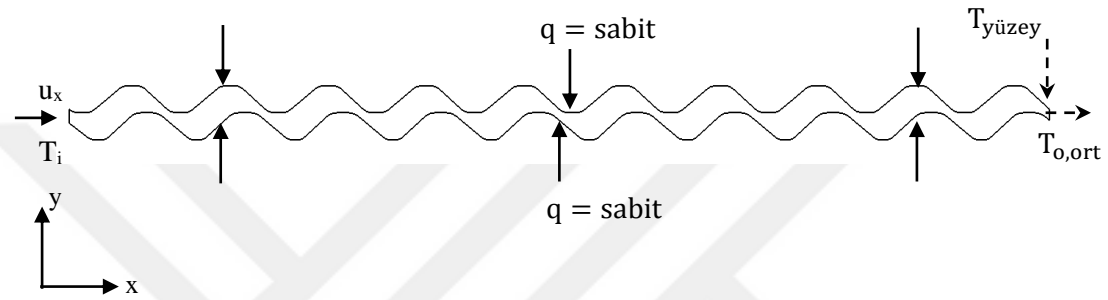
Kanaldaki basınç düşümü,

$$\Delta P_f = \left[ \frac{4fL_{eff}N_p G_c^2}{D_h 2\rho_{nf}} \right] \rightarrow f = \frac{2\Delta P_f D_h \rho_{nf}}{4L_{eff}N_p G_c^2} = \frac{2 \times 23751,025 \times 0,00412 \times 998,147}{4 \times 0,298 \times 1 \times 476^2}$$

$$f = 0,73$$

## Sayısal Hesaplama

Nanoakışkanın ısı taşınım katsayısının hesaplanması için oluşturulan 2B hesaplama alanı Şekil B.1.'de verilmektedir. Nanoakışkanın giriş hızı, sıcaklığı ve ısı akısı değeri deneysel çalışmalardaki sonuçlar kullanılarak elde edilmiştir. Sayısal çözümde, nanoakışkana kanal boyunca sabit ısı akısı uygulanarak, kanal çıkışındaki yüzey ve ortalama akışkan sıcaklıkları elde edilmiştir. Newton soğuma yasasından sayısal ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil B.1. Sayısal hesaplama için akış alanı

Isı akısı,

$$q_{nf} = \frac{\dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{c,o} - T_{c,i})}{2A} = \frac{0,0833 \times 4152,6 \times (20,61 - 17,43)}{2 \times 0,02} \cong 27500 \text{ W/m}^2$$

Akışkan giriş hızı,

$$u_{nf} = \frac{G_{nf}}{\rho_{nf}} = \frac{476}{1004,885} = 0,474 \text{ m/s}$$

Isı taşınım katsayısı,

$$h_{nf} = \frac{q_{nf}}{(T_{yüzey} - T_{o,ort})} = \frac{27500}{(297,78 - 296,25)} = 17923,47 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3B sayısal çözüm için de hesaplanan sayısal ısı taşınım katsayılarının belirlenmesinde aynı yol izlenmiştir.

Tablo B.4. Örnek hesaplamada hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkan için ısı taşınım katsayılarının deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılması

Deneysel ısı taşınım katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)	Tek fazlı		Sayısal ısı taşınım katsayısı (W/m <sup>2</sup> K) Karışım		Euler	
	2B	3B	2B	3B	2B	3B
	16876,51	17923,47	17770,98	16367,72	17142,71	16348,01
Deneysel-Sayısal Hata (%)	6,20	5,30	3,01	1,58	3,13	0,37

Tablo B.5. Örnek hesaplamada hacimsel oranı % 0,25 olan nanoakışkan için sürtünme faktörünün deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılması

Deneysel sürtünme faktörü	Tek fazlı		Sayısal sürtünme faktörü Karışım		Euler	
	2B	3B	2B	3B	2B	3B
	0,73	0,88	0,88	0,87	0,91	0,86
Deneysel-Sayısal Hata (%)	20,55	20,55	19,18	24,66	17,81	23,29

## ÖZGEÇMİŞ

Murat ÜNVERDİ, 19.11.1984'de Aydın/Bozdoğan ilçesinde doğdu. İlkokul ve ortaokul eğitimini Bozdoğan'da, lise eğitimini Nazilli'de tamamladı. 2000 yılında Nazilli Lisesinden mezun oldu. 2003-2004 öğretim yılında başladığı Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2007-2008 öğretim yılında ikincilik derecesiyle tamamladı. 2008-2009 öğretim yılında başladığı Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimini 2010-2011 öğretim yılında tamamladı. 2011 yılında Sakarya Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaya ve aynı yıl Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde doktora eğitimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.