T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NANOAKIŞKAN KULLANARAK VE İÇ ELEMAN YERLEŞTİRİLMİŞ DÜZ YATAY BORUDA ISI TRANSFERİNİN TAGUCHI YÖNTEMİ YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI

Hazırlayan
Toygun DAĞDEVİR

Danışman
Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN

Doktora Tezi

Temmuz 2020
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NANOAKIŞKAN KULLANARAK VE İÇ ELEMAN YERLEŞTİRİLMİŞ DÜZ YATAY BORUDA ISI TRANSFERİNİN TAGUCHI YÖNTEMİ YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Toygun DAĞDEVİR

Danışman
Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2018-7977 kodlu proje ve TÜBİTAK tarafından 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt içi Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

Temmuz 2020
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Toygun DAĞDEVİR

İmza

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Toygun DAĞDEVİR

"NANOAKIŞKAN KULLANARAK VE İÇ ELEMAN YERLEŞTİRİLMİŞ DÜZ YATAY BORUDA ISI TRANSFERİNİN TAGUCHI YÖNTEMİ YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI" adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Toygun DAĞDEVİR

Danışman

Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN

Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN

Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN danışmanlığında **Toygun DAĞDEVİR** tarafından hazırlanan **"Nanoakışkan Kullanarak ve İç Eleman Yerleştirilmiş Düz Yatay Boruda Isı Transferinin Taguchi Yöntemi Yardımıyla Araştırılması"** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

...../ ...../ .....

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN .....

Üye : Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP .....

Üye : Prof. Dr. Sebahattin ÜNALAN .....

Üye : Prof. Dr. Hüseyin AKILLI .....

Üye : Prof. Dr. Hüsamettin BULUT .....

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ……...… tarih ve ……..……sayılı kararı ile onaylanmıştır.

……. /……../ ……

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince bilgi ve birikimlerini esirgemeyerek her türlü yardımda bulunan, başta danışmanın Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN olmak üzere; hocalarım Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP ve Prof. Dr. Sebahattin ÜNALAN'a çok teşekkür eder ve saygılarımı sunarım. Tez çalışmalarım boyunca omuz omuza çalışarak hiçbir yardımını esirgemeyen arkadaşım Arş. Gör. Dr. Orhan KEKLİKCİOĞLU başta olmak üzere; Dr. Öğrt. Üyesi Doğan ERDEMİR, Dr. Öğrt. Üyesi Umut ÇALIŞKAN ve Arş. Gör. Mevlüt HAKAN'a paylaştıkları bilgiler ve yaptıkları yardımlardan dolayı kendilerine teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde en büyük paya sahip olan, maddi ve manevi her konuda sürekli destekçim olan değerli, annem Seycan DAĞDEVİR'e, babam Yüksel DAĞDEVİR'e ve ablam Seval ÖZGÜL'e canı gönülden teşekkür ederim. Birçok konuda anlayışları ve destekleri için değerli eşimin ailesi annem Rukiye KARACAOĞLAN'a, babam Coşkun KARACAOĞLAN'a ve kardeşlerim Ceyda KARACAOĞLAN ve Seyit Can KARACAOĞLAN'a saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Zor zamanlarımda beni anlayışla karşılayan ve sevgisini her daim hissedeceğim, hayatımı birleştirdiğim canım eşim Eda DAĞDEVİR'e gönülden çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamı desteleyen "TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığına" ve "Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine" teşekkür ederim.

Toygun DAĞDEVİR

Temmuz 2020, KAYSERİ

NANOAKIŞKAN KULLANARAK VE İÇ ELEMAN YERLEŞTİRİLMİŞ DÜZ YATAY BORUDA ISI TRANSFERİNİN TAGUCHI YÖNTEMİ YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI

Toygun DAĞDEVİR

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2020
Danışman: Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN

ÖZET

Bu tez çalışması sabit ısı akısı ile ısıtılan ve türbülanslı akış şartlarında bir ısı değiştirici borusu üzerinde deneysel olarak ısı transferi iyileştirme çalışmalarını kapsamaktadır. Baz akışkan olarak su ve su-etilen glikol karışımı kullanılmıştır. Deneyler, Reynolds sayısı 6000-23000 arasında gerçekleştirilmiştir. Isı transferi iyileştirme çalışmaları boru içerisine 7 farklı tasarımda bükülmüş levhalar (BL) yerleştirilerek ve baz akışkanlara %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00 olmak üzere 4 farklı ağırlıksal oranlarda (wt) TiO_2 nano partikülü katılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bükülmüş levhalar, tipik bükülmüş levha (TBL), delinmiş bükülmüş levha (DBL) ve gamzeli bükülmüş levha (GBL) olmak üzere 3 farklı ana tasarımdadır. BL'lar üzerindeki delik ve gamzeler arası mesafenin büküm uzunluğuna oranı (P/y) 1.00, 0.50 ve 0.25 şeklinde tasarlanmıştır. En yüksek termo-hidrolik performans değeri, içerisine GBL (P/y=0.25) yerleştirilmiş boru çalışmasında, nano partikül ağırlıkça oranı %1.00 olduğu Su-TiO_2 nanoakışkanı kullanımında ve Reynolds sayısının 6319 olduğu deneyde elde edilmiştir. Deney sonuçlarının en yüksek ısı transferi katsayısı ve en düşük basınç düşümüne göre optimizasyonu yapılmıştır. Su baz akışkanı için en optimum deney, 0.25 m^3/h hacimsel debi, ağırlıkça wt=%1.0 nano partikül kullanımında ve boru içerisine GBL (P/y=0.25) yerleştirildiği konfigürasyonudur. Su-etilen glikol karışımı baz akışkanı için en optimum deney, 1.04 m^3/h hacimsel debi, ağırlıkça wt=%1.0 nano partikül kullanımında ve boş boru konfigürasyonudur.

Anahtar Kelimeler: Isı transferi iyileştirilmesi, nanoakışkan, bükülmüş levha

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER ON A HORIZONTAL TUBE USING NANOFLUID AND INSERT BY TAGUCHI METHOD

Toygun DAĞDEVİR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
PhD Thesis, July 2020
Supervisor: Prof. Veysel ÖZCEYHAN

ABSTRACT

Thesis study includes experimental heat transfer augmentation studies on a heat exchanger tube that is heated under a constant heat flux and turbulent flow conditions. Water and water-ethylene glycol mixture were chosen as a base fluid. The experiments are conducted for Reynolds number between 6000 and 23000. Heat transfer augmentation studies are performed by placing twisted tapes with 7 different designs in the tube and 4 different weight ratios (wt) of TiO_2 nanoparticles into the base fluids as 0.25%, 0.50%, 0.75% and 1.00%. Twisted tapes are in three main designs which are typically twisted tape, perforated twisted tapes and dimpled twisted tapes. The ratio of the distance between the holes and dimples on the twisted tapes to the twist length (P/y) is designed as 1.00, 0.50 and 0.25. While the amount of nanoparticle increases in the base fluid in the same Reynolds number increases, the Nusselt number increases and the friction factor does not change. Inserting of twisted tape in the tube causes to increase both the Nusselt number and the friction factor. The highest THP value was obtained by using of dimpled twisted tapes (P/y = 0.25) in the tube, the nanoparticle ratio was 1.00% by weight in the use of water-TiO_2 and Reynolds number of 6319. The optimum test configuration for the water base fluid is obtained as volumetric flow of 0.25 m^3/h, wt=%1.0 and DTT (P/y=0.25) in the pipe. The optimum test configuration for the water-ethylene glycol mixture base fluid is volumetric flow of 1.04 m^3/h, wt=%1.0 and smooth pipe.

Keywords: Heat transfer augmentation, nanofluid, twisted tape

İÇİNDEKİLER

NANOAKIŞKAN VE İÇ ELEMAN KULLANILAN DÜZ YATAY BORUDA ISI TRANSFERİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİ YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE iii
KABUL ONAY iv
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR xiv
TABLOLAR LİSTESİ xvii
ŞEKİLLER LİSTESİ xx

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Tezin Konusu ve İçeriği 4
1.2. Isı transferi İyileştirme Yöntemleri 5
1.2.1. Aktif Yöntemler 5
1.2.1.1. Elektro Hidrodinamik 5
1.2.1.2. Jet 6
1.2.1.3. Sprey 6
1.2.1.4. Periyodik Haraketli Duvar 7
1.2.1.5. Yüzey Titreşimi 7
1.2.1.6. Akışkan Titreşimi 8
1.2.2. Pasif Yöntemler 8

1.2.2.1.Yüzey Alanı Genişletilmesi 9

1.2.2.2. Akış Bozulması 9

1.2.2.3. İkincil Akış 11

1.2.2.4. Yüzey Pürüzlülüğü 12

1.2.2.5. Nanoakışkanlar 12

1.2.2.5.1. Nanoakışkan Hazırlama Yöntemleri 14

1.2.2.5.1.1. Tek Adım Yöntemi 14

1.2.2.5.1.2. İki Adım Yöntemi 15

1.2.2.5.1.2.1. Yüzey Aktif Madde Eklenmesi 16

1.2.2.5.1.2.2. Akışkanın pH Seviyesi Ayarlanması 18

1.2.2.5.1.2.3. Partiküllerin Yüzey Modifikasyonu 18

1.2.2.5.2. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri 22

1.2.2.5.2.1. Yoğunluk 22

1.2.2.5.2.2. Özgül Isı 23

1.2.2.5.2.3. Isıl İletkenlik 23

1.2.2.5.2.4. Viskozite 24

1.3. Deney Tasarımı ve Taguchi Yöntemi 24

1.3.1. Deney Tasarımı 24

1.3.2. Taguchi Yöntemi 25

1.3.2.1. Ortogonal Dizinler 26

1.3.2.2. Sinyal / Gürültü Oranları (SNR) 27

1.3.3. Varyans Analizi 28

1.3.4. Doğrulama Testi 29

1.3.5. Gri İlişki Analizi 29

1.4. Literatür Araştırması 31

1.4.1. Giriş 31

1.4.2. Bükülmüş Levha Kullanımı ile Isı transferi İyileştirme Çalışmaları 32

1.4.3. Nanoakışkan Kullanımı ile Isı transferi İyileştirme Çalışmaları 44

1.4.4. Taguchi Yöntemi ile Yapılmış Olan Optimizasyon Çalışmaları 47

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 48

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Deneysel Yöntem 50
2.1.1. Deney Düzeneği 50
2.1.2. Deney Şematiği 50
2.1.2.1. Isıtma Sistemi 52
2.1.2.2. Sıcaklık Ölçümü 52
2.1.2.3. Basınç Ölçümü 53
2.1.2.4. Debi Ölçümü 54
2.1.2.5. Veri Kaydetme Sistemi 54
2.1.3. Kullanılan İç Elemanlar 55
2.2. Nanoakışkan Hazırlanması 56
2.2.1. Kullanılan Malzemeler 56
2.2.1.1. Baz Akışkanlar 56
2.2.1.2. Nano partiküller 57
2.2.1.3. Yüzey aktif maddeler 58
2.2.2. Karıştırma yöntemi 59
2.3. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi 61
2.3.1. Yoğunluk ve özgül ısı 62
2.3.3. Isıl iletkenlik 62
2.3.4 Viskozite 63
2.4. Nanoakışkanların kararlılığının değerlendirilmesi 63
2.5. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 64
2.5.1. Nusselt sayısının hesaplanması 65
2.5.2. Sürtünme faktörü hesaplanması 68
2.5.3. Performans kriteri 68
2.6. Belirsizlik Analizi 69

2.7. Sayısal Analiz.....70

3. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Nanoakışkanların Hazırlanması.....72

3.1.1. Al_2O_3 Nano Partikülü ile Nanoakışkanın Hazırlanması.....72

3.1.2. TiO_2 Nano Partikülü ile Nanoakışkanın Hazırlanması.....74

3.1.3. Nanoakışkan Hazırlama Sürecinin Optimizasyonu.....74

3.1.3.1. Taguchi Yöntemi.....75

3.1.3.2. Tek Amaçlı Optimizasyon.....76

3.1.3.3. Varyans Analizi.....78

3.1.3.4. Doğrulama Testi.....80

3.1.3.5. Çok Amaçlı Optimizasyon.....82

3.1.4. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....84

3.1.4.1. Yoğunluk.....84

3.1.4.2. Özgül Isı.....85

3.1.4.3. Isıl İletkenlik.....86

3.1.4.4. Viskozite.....88

3.1.5. Nanoakışkanların Kararlılığının Belirlenmesi.....89

3.2. Deneysel Bulgular.....91

3.2.1. Deney Sistematiğinin Doğrulanması.....91

3.2.1.1. Boş Boru Deneyinin Doğrulanması.....91

3.2.1.2. Tipik Bükülmüş Levha Yerleştirilmiş Deneylerin Doğrulanması.....93

3.2.2. Sayısal Analiz Yönteminin Doğrulanması.....94

3.2.2.1. Ağ Bağımsızlığı.....94

3.2.2.2. Sayısal Analiz Yönteminin Doğrulanması.....95

3.2.3. İç Eleman Kullanılarak Elde Edilen Bulgular.....96

3.2.3.1. Isıl Performans Açısından Bulgular.....98

3.2.3.2. Hidrolik Performans Açısından Bulgular.....101

3.2.3.3. Termo-Hidrolik Performans Açısından Bulgular 103

3.2.4. Nanoakışkan Kullanımı ile Edilen Bulgular 104

3.2.4.1. Isıl Performansı Açısından Bulgular 104

3.2.4.2. Hidrolik Performans Açısından Bulgular 106

3.2.4.3. Termo-Hidrolik Performans Açısından Bulgular 107

3.2.5. Nanoakışkan ve İç Eleman Kullanımı ile Edilen Bulgular 109

3.2.5.1. Isıl Performansı Açısından Bulgular 109

3.2.5.2. Hidrolik Performans Açısından Bulgular 111

3.2.6. Termo-Hidrolik Performans Açısından Bulgular 113

3.3. Deneysel Bulgular Kullanılarak Bağıntılar Geliştirilmesi 115

3.3.1. Boş Boru Deneyleri İçin Geliştirilen Bağıntıları 116

3.3.2. Bükülmüş Levha Yerleştirilmiş Deneyler İçin Geliştirilen Bağıntıları ... 117

3.3.2.1. TBL Yerleştirilmiş Boru Çalışmaları İçin Bağıntılar 117

3.3.2.2. DBL Yerleştirilmiş Boru Çalışmaları İçin Bağıntılar 119

3.3.2.3. GBL Yerleştirilmiş Boru Çalışmaları İçin Bağıntılar 121

3.4. Deneysel Bulguların Optimizasyonu 123

3.4.1. Su Bazlı Çalışmalarının Optimizasyonu 124

3.4.1.1. DBL Kullanıldığı Çalışmalarının Optimizasyonu 124

3.4.1.2. GBL Kullanıldığı Çalışmalarının Optimizasyonu 127

3.4.1.3. Su Bazlı Çalışmaların Çok Amaçlı Optimizasyonu 131

3.4.2. Su:EG Karışımı Bazlı Çalışmalarının Optimizasyonu 131

3.4.2.1. DBL Kullanıldığı Çalışmalarının Optimizasyonu 131

3.4.2.2. GBL Kullanıldığı Çalışmalarının Optimizasyonu 135

3.4.2.3. Su:EG Bazlı Çok Amaçlı Optimizasyonu 139

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçların Değerlendirilmesi 141

4.2. Sonuçların Literatür ile Kıyaslanması 144

4.3. Öneriler **145**

KAYNAKÇA **146**

EKLER…… **162**

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **163**

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları .. **172**

ÖZGEÇMİŞ **181**

KISALTMALAR

A : Alan [m^2]

CTAB : Setil trimetil amonyum bromid

Cp : Özgül ısı [J/kgK]

D : Çap [m]

DBL : Delinmiş bükülmüş levha

EG : Etilen glikol

f : Sürtünme faktörü [-]

g : Yer çekimi ivmesi [m/s^2]

GBL : Gamzeli bükülmüş lehva

h : Taşınım ile ısı transferi katsayısı [W/m^2K]

H : 360° büküm uzunluğu

k : Isıl iletkenlik katsayısı [W/mK]

L : Boru uzunluğu

m : kütle [kg]

Nu : Nusselt sayısı [-]

P : Bükülmüş levha üzerinde yapılan işlemler arası mesafe [m]

Pr : Prandtl sayısı [-]

ΔP : Basınç düşümü [Pa]

$\dot{Q}$: Isı transferi miktarı [W]

q” : Isı akısı [W/m^2]

R : Radyus

r : yarı çap [m]

Re : Reynolds sayısı [-]

s : Bükülmüş levha ile boru iç cidarı arası mesafe [m]

SNR : Sinyal / gürültü oranı

t : Kalınlık [m]

T : Sıcaklık [^{0}]

TBL : Tipik bükülmüş levha

THP : Isıl ve hidrolik performans kriteri [-]

U : Hız [m/s]

V : Hacim [m^3]

$\dot{V}$: Hacimsel debi [m^3/h]

w : Bükülmüş levha genişliği

y : 180° büküm oranı

YAM : Yüzey aktif madde

B : Isıl genleşme katsayısı [K^{-1}]

φ : Hacimsel nanoakışkan oranı

ρ : Yoğunluk [kg/m^3]

μ : Dinamik viskozite [kg/ms]

indisler

0 : Herhangi bir teknik uygulanmamış

T : Isı transferi iyileştirme tekniği uygulanmış

y : Yalıtım

v : Hacimsel

f : Akışkan

b : Yığın

doğ : Doğal

ç : Çevre

ort : Ortam

dd : Dış duvar

id : İç duvar

D : Boru içi

h : Hidrolik

i : İç

d : Dış

bf : Baz akışkan

np	: Nano partikül
nf	: Nanoakışkan
wt	: Ağırlıksal nanoakışkan oranı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Su ve Su:EG (40:60) karışımına ait özellikler 57
Tablo 2.2. Kullanılan nano partiküllerin özellikleri 57
Tablo 2.3. Kullanılan nano partikül ve yüzey aktif maddelerin miktarları 61
Tablo 2.4. Türbülanslı boru içi akışta *Nu* bağıntıları 64
Tablo 2.5. Türbülanslı boru içi akışta *f* bağıntıları 65
Tablo 2.6. Kullanılan parametrelerin ölçüm cihazları ve hata oranları 70
Tablo 2.7. Kullanılan parametrelerin ölçüm cihazları ve hata oranları 70
Tablo 3.1. Nanoakışkan karıştırma yönteminde seçilen faktörler ve seviyeleri 75
Tablo 3.2. L_{16} Deney tasarımı, bu deneylerin ölçümleri ve SNR değerleri 76
Tablo 3.3. Isıl iletkenlik için ortalama SNR değerleri 77
Tablo 3.4. Zeta potansiyel için ortalama SNR değerleri 78
Tablo 3.5. Isıl iletkenlik açısından ANOVA sonuçları 79
Tablo 3.6. Zeta potansiyel açısından ANOVA sonuçları 79
Tablo 3.7. Isıl iletkenlik için doğrulama testi sonuçları 81
Tablo 3.8. Zeta potansiyel için doğrulama testi sonuçları 81
Tablo 3.9. GRA sonuçları 83
Tablo 3.10. İş akışkanlarına ait yoğunluk bağıntılarındaki katsayılar 85
Tablo 3.11. İş akışkanlarına ait özgül ısı bağıntılarındaki katsayılar 86
Tablo 3.12. İş akışkanlarına ait ısıl iletkenlik bağıntılarındaki katsayılar 88
Tablo 3.13. İş akışkanlarına ait viskozite bağıntılarındaki katsayılar 89
Tablo 3.14. Su bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri 124
Tablo 3.15. Su bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmalar için deney tasarımı, deney sonuçları ve sonuçların SNR değerleri 125
Tablo 3.16. h için ortalama SNR değerleri 126
Tablo 3.17. ΔP için ortalama SNR değerleri 126
Tablo 3.18. h açısından ANOVA sonuçları 126
Tablo 3.19. ΔP açısından ANOVA sonuçları 127

Tablo 3.20. h için doğrulama testi sonuçları 127
Tablo 3.21. Su bazlı ve GBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri 128
Tablo 3.22. Su bazlı ve GBL kullanıldığı çalışmalar için deney tasarımı, deney sonuçları ve sonuçların SNR değerleri 128
Tablo 3.23. h için ortalama SNR değerleri 129
Tablo 3.24. ΔP için ortalama SNR değerleri 129
Tablo 3.25. h açısından ANOVA sonuçları 130
Tablo 3.26. ΔP açısından ANOVA sonuçları 130
Tablo 3.27. h için doğrulama testi sonuçları 131
Tablo 3.28. Su:EG karışımı bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri 132
Tablo 3.29. Su:EG karışımı bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmalar için deney tasarımı, deney sonuçları ve sonuçların SNR değerleri 132
Tablo 3.30. h için ortalama SNR değerleri 133
Tablo 3.31. ΔP için ortalama SNR değerleri 133
Tablo 3.32. h açısından ANOVA sonuçları 134
Tablo 3.33. ΔP açısından ANOVA sonuçları 134
Tablo 3.34. h için doğrulama testi sonuçları 135
Tablo 3.35. Su:EG karışımı bazlı ve GBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri 135
Tablo 3.36. Su bazlı ve GBL kullanıldığı çalışmalar için deney tasarımı, deney sonuçları ve sonuçların SNR değerleri 136
Tablo 3.37. h için ortalama SNR değerleri 137
Tablo 3.38. ΔP için ortalama SNR değerleri 137
Tablo 3.39. h açısından ANOVA sonuçları 138
Tablo 3.40. ΔP açısından ANOVA sonuçları 138
Tablo 3.41. h için doğrulama testi sonuçları 139

Tablo 4.1. Su baz akışkanı ile yapılan çalışmalarında elde edilen THP sonuçların aralıkları 142
Tablo 4.2. Su:EG karışımı baz akışkanı ile yapılan çalışmalarında elde edilen THP sonuçların aralıkları 143
Tablo 4.3. Literatür ile kıyaslanan çalışmaların özellikleri ve görselleri 145

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Isı değiştiricileri uygulama alanları 4
Şekil 1.2. Jet uygulamasının şematik yapısı ve bölgeleri 6
Şekil 1.3. Sprey uygulamasının şematik yapısı ve bölgeleri 7
Şekil 1.4. Pasif ısı transferi iyileştirme yöntemleri 8
Şekil 1.5. Isı transferi yüzeyi arttırmaya yönelik uygulamalar 9
Şekil 1.6. Boru iç yüzeyi modifikasyonu ile ısı transferi iyileştirme uygulamaları 10
Şekil 1.7. Isı transferi iyileştirme uygulamalarında kullanılan türbülatörlerden örnekler. 10
Şekil 1.8. Helisel sarmal boru üzerinde oluşan ikincil akış 11
Şekil 1.9. Boru içerisine yerleştirilmiş bükülmüş levhaların oluşturduğu ikincil akış 12
Şekil 1.10. Maddelerin boyutsal kıyaslanması 14
Şekil 1.11. Direk buharlaşma yöntemi ile nanoakışkan hazırlanması 15
Şekil 1.12. İki adım yöntemi ile nanoakışkan hazırlama süreci 16
Şekil 1.13. a) Yüzey aktif maddenin yapısı, b) polar sıvı içerisinde partikül-yüzey aktif madde etkileşimi, c) apolar sıvı içerisinde partikül-yüzey aktif madde etkileşimi 17
Şekil 1.14. Yüzeyi modifiye edilmiş karbon nano tüp 19
Şekil 1.15. Nanoakışkan kararlılık değerlendirme yöntemleri 19
Şekil 1.16. Bir ürün veya sürecin genel modeli 25
Şekil 1.17. Boru içerisine yerleştirilmiş tipik bir bükülmüş levhanın boyutsal gösterimi 32
Şekil 1.18. Smithberg ve Landis tarafından kullanılan deney düzeneği (a) ve bükülmüş levhalar (b) 33
Şekil 1.19. Chang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma 34
Şekil 1.20. Eiamsa-ard ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma 35
Şekil 1.21. Eiamsa-ard ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma 36

Şekil 1.22. Eiamsa-ard ve Promvonge tarafından yapılan çalışma 37
Şekil 1.23. He ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma 37
Şekil 1.24. Baş ve Özceyhan tarafından yapılan çalışma 38
Şekil 1.25. Nanan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma 39
Şekil 1.26. Rahimi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma 39
Şekil 1.27. Bükülmüş levha üzerinde farklı delik sayıları ile yapılmış çalışmalar 40
Şekil 1.28. Bükülmüş levha üzerinde kare ve damla formunda delik ile yapılmış çalışmalar 41
Şekil 1.29. Eiamsa-ard ve arkadaşları tarafında yapılan çalışma 41
Şekil 1.30. Seemawute ve Eiamsa-ard tarafından yapılan çalışma 42
Şekil 1.31. Eiamsa-ard ve Promvonge tarafından yapılan çalışma 43
Şekil 1.32. Eiamsa-ard ve Promvonge tarafından yapılan çalışma 43
Şekil 1.33. Farklı şekillerde ((a) dikdörtgen, (b)kare, (c) üçgen, (d) trapez ve (e) yarım daire çentik açılan bükülmüş levha çalışmaları 44
Şekil 1.34. Nanoakışkan ile ısı transferi iyileştirilme çalışmalarında kullanılan nano partikül ve akışkan sayıları 45
Şekil 1.35. Etilen glikol-su karışımı içerisindeki hacimsel EG miktarının kaynama ve donma noktası sıcaklıklarına etkisi 48
Şekil 2.1. Deney düzeneğinin görüntüsü 51
Şekil 2.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü 52
Şekil 2.3. Test borusunun detaylı görünümü 53
Şekil 2.4. Isıl eleman çifti yerleşimi (kesit görünüm) 53
Şekil 2.5. FLUKE 718 100G basınç kalibratör cihazı 54
Şekil 2.6. Debi ölçer 54
Şekil 2.7. Veri kaydedici 55
Şekil 2.8. Tipik bükülmüş levha ve modifikasyonlarına ait boyutsal özellikler 55
Şekil 2.9. Kullanılan iç eleman konfigürasyonların görüntüsü 56
Şekil 2.10. a) Al_2O_3 ve b) TiO_2 nano partikülleri 58

Şekil 2.11. a) Al_2O_3 ve b) TiO_2 ye ait taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri 58
Şekil 2.12. Kullanılan yüzey aktif maddeler a) SDBS ve b) CTAB 59
Şekil 2.13. Nanoakışkan hazırlama süreci 60
Şekil 2.14. Mekanik karıştırıcı, b) hassas terazi ve c) ultrasonik karıştırıcı 61
Şekil 2.15. Şematik olarak ısıl iletkenlik ölçüm sistemi 62
Şekil 2.16. a) Ultrasonik banyo, b) KD2 Pro ısıl iletkenlik ölçüm cihazı 63
Şekil 2.17. ERNAM da yer alan a) bilgisayar ve b) Zetasizer cihazı 63
Şekil 2.18. Test borusu kesit görüntüsü 65
Şekil 2.19. Sayısal analizde kullanılan modelin şematik görünümü ve boyutları 71
Şekil 2.20. Sayısal analizde kullanılan ağ yapılarının görüntüleri (a) Boru kesiti, b) boru yüzeyi ve c) BL yüzeyi) 71
Şekil 3.1. Al_2O_3-Su nanoakışkanının pH seviyesine göre zeta potansiyel değişimi 73
Şekil 3.2. Al_2O_3-Su nanoakışkanın pH seviyesinin korozif etkisi 74
Şekil 3.3. Nanoakışkan hazırlama sürecinin optimizasyon işlem adımları 75
Şekil 3.4. Isıl iletkenlik için ortalama SNR grafiği 77
Şekil 3.5. Zeta potansiyel için ortalama SNR grafiği 78
Şekil 3.6. Faktörlerin ısıl iletkenlik üzerindeki katkı seviyeleri 80
Şekil 3.7. Faktörlerin zeta potansiyel üzerindeki katkı seviyeleri 80
Şekil 3.8. a) En az, b) orta ve c) en yüksek zeta potansiyele sahip nanoakışkan numunelerin boyut analizi ve STEM görüntüleri 82
Şekil 3.9. Karıştırma parametreleri seviyelerine göre ortalama GRG değerleri 83
Şekil 3.10. Kullanılan iş akışkanlara ait sıcaklığa bağlı yoğunluk grafiği 84
Şekil 3.11. Kullanılan iş akışkanlara ait sıcaklığa bağlı özgül ısı grafiği 85
Şekil 3.12. Su (100:0) ve Su: EG karışımı (40:60) için ölçülen ve referans ısıl iletkenlik değerleri 87
Şekil 3.13. Kullanılan iş akışkanlara ait sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik grafiği 87
Şekil 3.14. Kullanılan iş akışkanlara ait sıcaklığa bağlı viskozite grafiği 88

Şekil 3.15. Kullanılan nanoakışkanların çökelme miktarının gözlemlenmesi a) 21 gün sonraki durum, b) 30 gün sonraki durum 90
Şekil 3.16. Kullanılan nanoakışkanların zeta potansiyel değerleri 91
Şekil 3.17. Baz akışkanların kullanıldığı boş boru deneylerinin Nusselt sayısı sonuçlarının literatür ile kıyaslanması 92
Şekil 3.18. Baz akışkanların kullanıldığı boş boru deneylerinin sürtünme faktörü sonuçlarının literatür ile kıyaslanması 92
Şekil 3.19. Baz akışkanların kullanıldığı boru içerisine TBL yerleştirilmiş deneylerinin Nusselt sayısı sonuçlarının literatür ile kıyaslanması 93
Şekil 3.20. Baz akışkanların kullanıldığı boru içerisine TBL yerleştirilmiş deneylerinin sürtünme faktörü sonuçlarının literatür ile kıyaslanması 94
Şekil 3.21. Ağ bağımsızlığı çalışması sonuçları 95
Şekil 3.22. Boş boru ve BL yerleştirilmiş boruya ait sayısal analiz Nusselt sayısı sonuçlarının literatür ile kıyaslanması 96
Şekil 3.23. Boş boru ve BL yerleştirilmiş boruya ait sayısal analiz sürtünme faktörü sonuçlarının literatür ile kıyaslanması 96
Şekil 3.24. 15000 Reynolds sayısındaki a) Boş boru, b) TBL, c) DBL ve d) GBL ya ait ikincil akış hız vektörü ve konturları 97
Şekil 3.25. 15000 Reynolds sayısındaki a) Boş boru, b) TBL, c) DBL ve d) GBL ya ait birincil akış hız konturları 97
Şekil 3.26. 15000 Reynolds sayısındaki a) Boş boru, b) TBL, c) DBL ve d) GBL ya ait türbülans kinetik enerji konturları 98
Şekil 3.27. Su (100:0) akışkanının kullanıldığı çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 99
Şekil 3.28. Su:EG (40:60) karışımının kullanıldığı çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 99
Şekil 3.29. Su (100:0) akışkanının kullanıldığı çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 101
Şekil 3.30. Su:EG (40:60) karışımının kullanıldığı çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 102

Şekil 3.31. Su (100:0) akışkanının kullanıldığı çalışmaların termo hidrolik performans (THP) sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 103
Şekil 3.32. Su:EG (40:60) karışımının kullanıldığı çalışmaların termo hidrolik performans (THP) sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 104
Şekil 3.33. Boş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 105
Şekil 3.34. Boş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 105
Şekil 3.35. Boş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 106
Şekil 3.36. Boş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 107
Şekil 3.37. Boş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların termo-hidrolik performans kriteri sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 108
Şekil 3.38. Boş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların termo-hidrolik performans kriteri sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 109
Şekil 3.39. Su-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 110
Şekil 3.40. Su:EG-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 111
Şekil 3.41. Su-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 112
Şekil 3.42. Su:EG-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 113
Şekil 3.43. Su-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların THP sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 114
Şekil 3.44. Su:EG-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların THP sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı 115
Şekil 3.45. Boş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı 116

Şekil 3.46. Boş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı 117

Şekil 3.47. TBL yerleştirilmiş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı 118

Şekil 3.48. TBL yerleştirilmiş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı 119

Şekil 3.49. DBL yerleştirilmiş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı 120

Şekil 3.50. DBL yerleştirilmiş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı 121

Şekil 3.51. GBL yerleştirilmiş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı 122

Şekil 3.52. GBL yerleştirilmiş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı 123

Şekil 4.1. Su baz akışkanı ile elde edilen en iyi THP değerinin literatür ile kıyaslanması 144

GİRİŞ

Dünya çapında nüfusun hızla artması ve küreselleşme, yerel kaynakların hızla tükenmesinin ve sanayi üretim hacimlerinin büyümesinin başlıca sebepleridir. Bu nedenle gün geçtikçe harcanan enerji miktarı da dünya çapında artmaktadır [1-4]. Enerji kullanımının azaltılamayacağı, aksine gün geçtikçe daha da fazla artacağından dolayı, bu problemlerin çözümünün yine gün geçtikçe gelişen teknoloji ve yapılacak yenilikçi araştırmalara muhtaç olduğu aşikardır.

Hemen hemen tüm enerji dönüşüm sistemlerinde var olan ısı transferi mekanizmaları üzerinde yapılacak olan performans geliştirme çalışmaları daha az enerji tüketimi ile aynı miktarda iş yapılmasını ve/veya daha küçük ölçekte sistemlerin tasarlanmasını mümkün kılmaktadır [5, 6]. Isıtma veya soğutma sistemlerinde ısı transferinin gerçekleştiği kısım üzerinde yapılan iyileştirmeler ile daha az maliyetle aynı miktarda ısıtma veya soğutma sağlanabilmektedir.

Geçmişten günümüze birçok farklı ısı transferi iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Pasif teknikler içerisinde yer alan türbülans yaratıcı iç eleman kullanımı en yaygın olarak kullanılan ısı transferi iyileştirme uygulamasıdır [7-9]. Boru içi akışta türbülans yaratılarak, boru iç yüzeyi civarındaki sınır tabakaların parçalanarak, ikincil akışın ve dönel akış oluşumu sağlanarak ısı transferi performansının iyileştiği birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur [10-14]. Boru içerisine yerleştirilen iç elemanlar ısı transferini iyileştirirken basınç düşümünü arttırmasından dolayı daha güçlü pompa kullanılması ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Isı transferi iyileştirmesi çalışması yapılırken bu durum da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kapsamda ısı değiştirticisi borusu içerisine yerleştirilecek iç elemanlar ısı transferinin iyileştirecek akış karakteristiği oluşturacak yapıda olması gerekirken, en az basınç düşümü artıracak yapıda olması da gerekmektedir.

Isı değiştiricilerinde en yaygın kullanılan iş akışkanı sudur [15]. Ancak özellikle Alaska, Kanada, Norveç ve Rusya gibi yılın büyük bir bölümünü çok soğuk hava şartları altında geçiren ülkelerde, iş akışkanı suya belirli miktarlarda etilen glikol katılmaktadır. Suya etilen glikol katılmasının amacı, etilen glikolün kimyasal yapısı gereği Su:Etilen glikol karışımının donma noktasını düşürmesi ve kaynama noktasını yükseltmesidir. Uygulamada genellikle Su:Etilen glikol karışımının hacimsel oranı 40:60 olarak kullanılmakta ve suyun donma sıcaklığı 0°C dereceden -40°C ye düşmekte, kaynama noktası ise 100°C den 110°C ye çıkmaktadır [16]. Uygulama açısından soğuk bölgelerde bu karışımın kullanılabilir olması bir avantaj iken; 20°C deki suyun ısıl iletkenliği 0.598 W/mK den 40:60 oranındaki Su:Etilen glikol karışımının ısıl iletkenliği 0.334 W/mK değerine düştüğünden ısıl açıdan dezavantaj doğurmaktadır.

Gelişen teknoloji ile birlikte bilim dünyası nano teknoloji alanında hızlı bir ilerleme kaydetmiştir. Nano teknolojinin ısı transferi alanında kullanılabilmesi için son 20 yıldır çalışmalar yapılmaktadır. Nano boyutlarda (çapı 100 nm den küçük) yüksek ısıl iletkenlik özelliğine sahip metal oksit malzemelerin iş akışkanı olarak kullanılan su, etilen glikol, yağ gibi akışkanlara uygun metotlar ile karıştırılarak elde edilen *nanoakışkan*ların ısı transferi iyileştirmesine önemli derecede katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir [17]. Nanoakışkanların ısı değiştiricilerinde kullanılmasının ısı transferi iyileştirme de önemli bir katkısı bulunurken, katı nano partiküllerin sıvı içerisinde çökelmesi sistemde mekanik problemler doğuracağından bir dezavantaj yaratmaktadır. Nanoakışkanların mümkün olabildiği kadar fazla bir süre çökelmeden kararlı halde kalmasının sağlanması, uygulamada en çok zorlanan aşama olan nanoakışkanın hazırlanması aşaması ile ilgilidir [18-21].

Bu tez çalışmasında, hemen hemen tüm ısı değiştiricilerinde, ısı transferinin gerçekleştiği kısımda düz bir boru bulunması sebebiyle; düz yatay bir boru esas alınmıştır. Deneyler, düz yatay borunun sabit ısı akısı altında ve türbülanslı akış şartlarında gerçekleştirilmiştir. Boru içerisine farklı konfigürasyonlara sahip bükülmüş levhaların yerleştirilerek ısı transferi performansı artışı sağlanmaya çalışılmıştır. İncelenmiş bükülmüş levhalar sabit bükülme oranına sahipken, bükülmüş levha üzerinde üç farklı aralık mesafelerine sahip delikler ve patlatılmamış delikler (çukur/tümsek) bulunmaktadır. Bundan sonraki kısımlarda çukur/tümsek tanımlaması gamze olarak adlandırılacaktır. Literatürde delinmiş bükülmüş levhalar üzerine birçok

çalışma mevcut iken, bükülmüş levhalar üzerinde gamzelerin ısı transferi performansına katkısı henüz deneysel olarak incelenmemiştir. Gamzeli bükülmüş levhalar boru merkezinde ısı transferi ile etkileşimde olmayan akışı boru iç yüzeylerine yönlendirerek, ısıtılan boru cidarından daha fazla enerjinin akışkana geçiş edilmesini sağlamaktadır. Bükülmüş levhaların diğer iç elemanlara kıyasla en büyük avantajlarından biri, akışı direk bir engel oluşturmaması sebebiyle basınç düşümünü daha az artırmaktadır. Bu sayede ısıl ve hidrolik performansın uygulanabilir değerlerde olacağı ön görülmektedir.

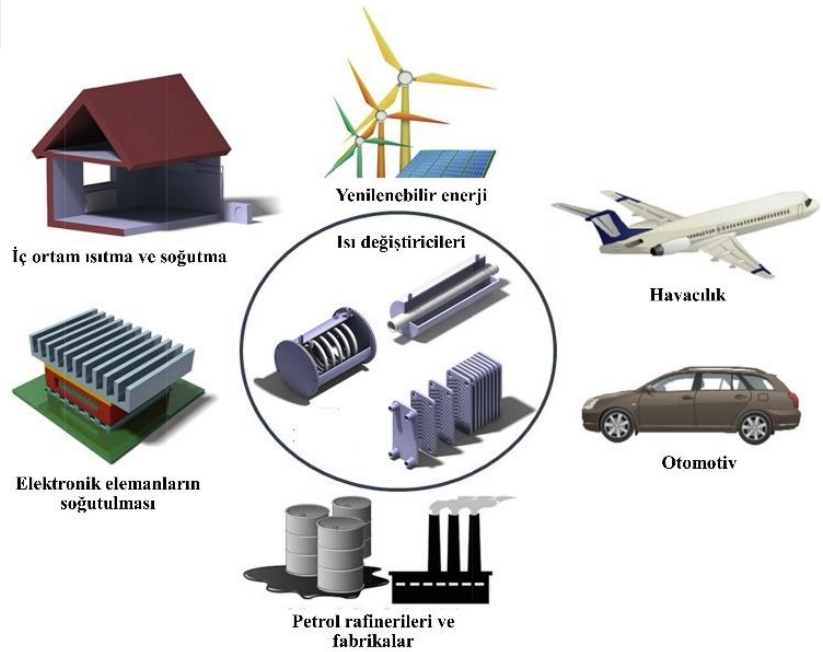
Gerçekleştirilen deneylerde iş akışkanı olarak su ve Su:Etilen glikol karışımları kullanılmıştır. Bu sayede hem ılıman bölgelerde hem de soğuk bölgelerde kullanılan ısı değiştiricileri kapsayan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu akışkanların ısıl iletkenliklerinin arttırılması amacıyla %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00 olarak dört farklı ağırlıksal oranlarda Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikül katılmıştır. Yapılan çalışmalarda Al_2O_3 kullanılan nanoakışkanların çökelme süresinin yeteri kadar sağlanamadığı ve hazırlanan karışımın da çok asidik olması sebebiyle metal parçaların bulunduğu sistemde korozyona neden olacağından dolayı, deneysel çalışmalar TiO_2 nano partikülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkan uygulamasında en kritik, önemli ve zorlayıcı sürecin çökelme süresinin olabildiğince uzun olan karışım metodun uygulanmasıdır. Ayrıca hazırlanan nanoakışkan mümkün olan en yüksek ısıl iletkenlik değerine sahip olması gerekmektedir. Karışım yöntemlerinde özellikle yüzey aktif madde kullanımı çökelme süresini arttırırken ısıl iletkenliği düşürdüğünden dolayı optimum karışım yöntemini bulma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda nanoakışkanın kararlılığı ve ısıl iletkenlik açısından en optimum karışım yönteminin belirlenebilmesi için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon çalışması Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada karışım metotlarının (mekanik karıştırma süresi, ultrasonik karıştırma süresi, ultrasonik karıştırıcı gücü ve ağırlıksal olarak yüzey aktif maddenin nano partiküle oranı) çökelme süresi ve ısıl iletkenliğe olan etkileri de ANOVA (Analysis of variance) ile ortaya konulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen veriler (h ve ΔP) de Gri ilişki analizi (Grey Relation Analysis) yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. İncelenen deney sonuçları üzerinde etkisi olan parametrelerin (nanoakışkanın ağırlıksal oranı, Reynolds sayısı (Re), iç eleman konfigürasyonları gibi) göreceli olarak ne kadar etki ettiği ANOVA kullanılarak ortaya konulmuştur.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Tezin Konusu ve İçeriği

Isıtma, soğutma ve yanma uygulamalarına ek olarak birçok mühendislik uygulamasında enerji dönüşüm sistemlerinde ısı transferi mekanizmaları yer almaktadır. Isı transferi mekanizmalarında yer alan cihazlara genel olarak ısı değiştiricileri denmektedir. Şekil 1.1'de ısı değiştiricilerinin uygulandığı alanlara ilişkin bazı örneklere yer verilmiştir.



Şekil 1.1. Isı değiştiricileri uygulama alanları [22]

Uygulamalardaki ısı değiştiricileri ne kadar verimli ve etkin bir performans gösterirse, sistemlerin verimleri o kadar artmaktadır. Dolayısıyla harcanan enerji miktarı da azalacağından maliyetler azalacaktır. Ayrıca daha yüksek oranlarda ısı transferi gerçekleştirilebilecek uygulamalar ile sistem ölçeklerinde küçülme, daha kompakt

cihazlar üretilebilmesiyle; havacılık ve otomobil gibi sektörlerde ağırlıklar ciddi şekilde azaltılabilmektedir. Bu açıdan ısı değiştiricilerinin verimlerinin arttırılması yıllardır popüler ve gerekli bir araştırma konusu olmakla birlikte gelişen teknoloji ile birlikte verimleri artırılabilmektedir. Isı değiştiricilerinin verimlerini artırma amacıyla uygulanan yöntemler, ısı transferi iyileştirme teknikleri olarak adlandırılmakta ve aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

1.2. Isı transferi İyileştirme Yöntemleri

Isı transferini arttırma yöntemleri sistemde ekstra bir enerji harcanması gerekip gerekmediğine göre ana iki kategoriye ayrılmaktadır. Sisteme dışarıdan enerji harcanması gereken metotlar aktif yöntemler, enerji harcanmasına gerek olmayan yöntemler ise pasif metotlar olarak adlandırılmaktadır. Bu iki yöntemin birlikte kullanıldığı yöntem de birleşik yöntemler olarak adlandırılmaktadır [23].

1.2.1. Aktif Yöntemler

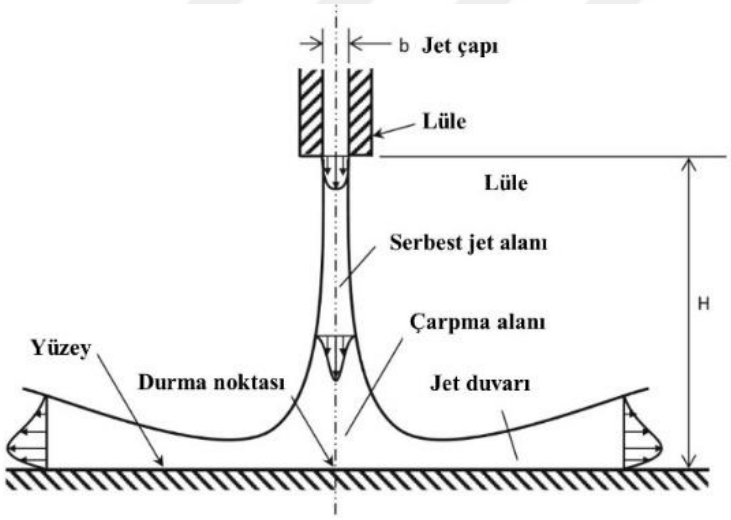
Isı transferini iyileştirmek için enerji harcanan yöntemler aktif yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Dışarıdan ekstra bir güç harcanmasından dolayı uygulamada kullanım alanı oldukça sınırlı olmasının yanı sıra özellikle ısı transferinin kritik derecede önemli olduğu yerlerde tercih edilmektedir. Aktif yöntemlere örnek olarak elektro hidrodinamik, jet, sprey, yüzey titreşimi ve akış titreşimi uygulamaları verilebilir [24].

1.2.1.1. Elektro Hidrodinamik

Elektro hidrodinamik yöntemi ile ısı transferi iyileştirilmesi, elektrik alanının yalıtkan akışkan ortamındaki akış alanı ile birleştirilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemde, yüksek voltajlı düşük akımlı elektrik alanı akışkana uygulanmaktadır. Elektro hidrodinamik yöntemin amaçlarından biri elektrik enerjisini kinetik enerjiye dönüştürmektir. Bu sayede elektro hidrodinamik kuvvetler yalıtkan akışkanı hareketlendirerek ısı transferini iyileştirmektedir [24].

1.2.1.2. Jet

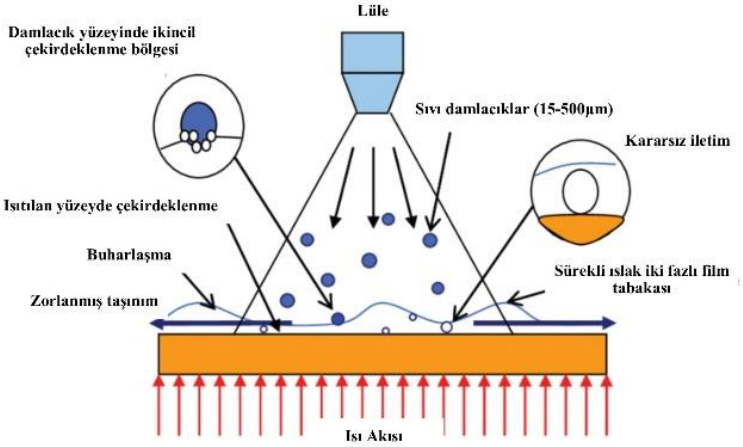
Akışkanın bir yüzeye yüksek hızla düşürülmesi ile adlandırılan jetin, sınır tabakayı parçalaması ve yüzey yakınındaki akışkanı karıştırması sayesinde taşınımla ısı transferi artmaktadır. Jetler içten yanmalı motorların soğutulması, yüksek ısı akılı cihazların ısıl kontrolü, X ışınları, optikler, gaz türbinleri gibi birçok sanayi uygulamasında kullanılmaktadır. Jetler, uygulanan yüzey üzerinde lokal olarak oldukça yüksek ısı taşınım katsayıları sunmasıyla ünlüdür. Bu teknik genellikle çoklu jet uygulaması şeklinde yüzeyi ısıtma veya soğutma amaçlı kullanılmaktadır [25]. Jet uygulamasının şematik yapısı Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Jet uygulamasının şematik yapısı ve bölgeleri [26]

1.2.1.3. Sprey

Hava veya basınçlandırılmış atomizer yardımıyla sıvı damlacıklardan oluşan yapılar sprey olarak tanımlanmaktadır. Isıtılmış bir yüzeye damlacıklar gönderilmesiyle yüzeye yayılan damlalar ve buharlaşma ya da ince bir sıvı film tabakası oluşması sebebiyle bu bölgede ısı transferi performansı iyileşmektedir. Buharlaşma, taşınım ve ikincil çekirdeklenme düşük sıcaklıklarda dahi ısı transferi yüksek oranda gerçekleşmektedir. Sprey soğutma, damlacık hızı, damlacık yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü, lüle ile sıcak yüzey arasındaki mesafe, lülenin açısı, hava basıncı gibi birçok parametreye bağlı olduğundan oldukça kompleks bir uygulamadır. [27]. Sprey uygulamasının şematik yapısı Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Sprey uygulamasının şematik yapısı ve bölgeleri [28]

1.2.1.4. Periyodik Haraketli Duvar

Isı transferini arttırmak için duvar etrafındaki akışın bozulması ve hareketlendirilmesi temel amaçtır. Aktif teknikler genel olarak duvarla temas eden sıvı yüzeyine etki etmektedir. Isı transferinin en verimli yöntemleri, duvarın hemen yakınındaki akışkanın yenilenmesini sağlayan yöntemlerdir. Bu amaçla, ısı transferinin gerçekleştiği duvarın periyodik olarak hareketlendirilmesiyle akış bozularak ısı transferi performansı oldukça artmaktadır. Ancak, bu yöntem, duvarda yapısal problemlere ve malzemenin zaman içerisinde karakterinin bozulmasına neden olduğundan dolayı dezavantajları bulunmaktadır. Duvarın periyodik hareketiyle ısı transferi iyileştirme yöntemi üçe ayrılmaktadır. Her üç durumda da, yüzey hareketi ile akışın karışması, sınır tabakanın bozulması sonuçlarıyla ısı transferi iyileşmektedir [24]:

1. Bir zarın yüksek frekanslı salınımı ile üretilen akustik dalgalar
2. Akışta bir boşluğu sınırlayan bir diyaframın hareketi ile yapay jet oluşturulması
3. Yüksek genlik ile duvarın dinamik deformasyonu

1.2.1.5. Yüzey Titreşimi

Tek fazlı akışkanların kullanıldığı ısı değiştiricilerinde düşük frekansta yüzeyler titreştirilerek ısı transferinin iyileştirilmesi yöntemidir. Piezoelektrik cihazlar ile yüzeye titreşim uygulanır ve yüzeye yapışmış durumda olan akışkan moleküllerin yüzeyden kopmasını sağlayacak yüzey gerilimi verilir. Bu sayede ısınan yüzey ile akışkan

arasındaki molekül taşınımı arttırılmış olur ve taşınımla ısı transferi iyileşmektedir [29].

1.2.1.6. Akışkan Titreşimi

Isı değiştiricilerin boyutlarının çok fazla olması sebebiyle, çoğu uygulamada yüzey titreşimi yerine akışkan titreşimi kullanılmaktadır. Akışkanın ısı değiştiricisine gönderildiği noktada 1 Hz a kadar ses üstü dalga frekansı ile verilen titreşimle akışkan moleküllerinin ısı değiştiricisi boyunca karışımı istenmektedir. Akışkan titreşimi metodu, genellikle uygulamada tek fazlı akışkanların kullanıldığı ısı değiştiricilerinde tercih edilmektedir [30], [31].

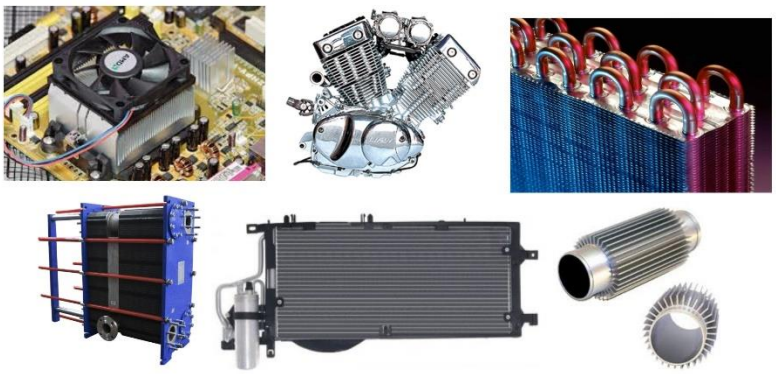
1.2.2. Pasif Yöntemler

Isı transferi iyileştirme yöntemlerinde sistemde herhangi bir ekstra güç harcanmaması durumunda uygulanan yöntemlere pasif yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Pasif yöntemler ile daha az bakım maliyeti, daha kolay kurulum ve kullanım gibi avantajlar olmasının yanı sıra ısı transferindeki iyileşme oranı sınırlı kalabilmektedir. Pasif ısı transferi iyileştirme yöntemler, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi ara başlıklara ayrılabilmektedir [13].

Şekil 1.4. Pasif ısı transferi iyileştirme yöntemleri

1.2.2.1. Yüzey Alanı Genişletilmesi

Yaygın olarak bilindiği üzere, ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı ne kadar fazla arttırılabilirse, gerçekleşen ısı transferi miktarı da o aranda artmaktadır. Genel olarak kanatçık adı verilen ısı transferinin oluştuğu bölgelere yerleştirilen metalik yüzeyler ısı transferinin taşınım ile artışında önemli rol oynamaktadır. Yüzey alanı genişletilmesi ile ısı transferi iyileştirilmesi, bilgisayar ana kartında yer alan ve işlem yaptıkça ısınan işlemcilerin soğutulmasında, otomobil radyatörlerinde, plakalı ısı değiştiricilerinde ve hava soğutmalı motosiklet motorlarındaki gibi yaygın şekilde kullanılmaktadır. Şekil 1.5'te yüzey alanı genişleterek ısı transferi iyileştirme uygulamalarından birkaç örnek verilmiştir.

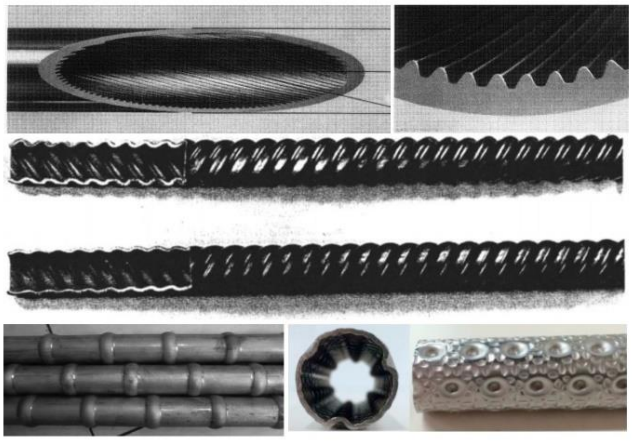


Şekil 1.5. Isı transferi yüzeyi arttırmaya yönelik uygulamalar

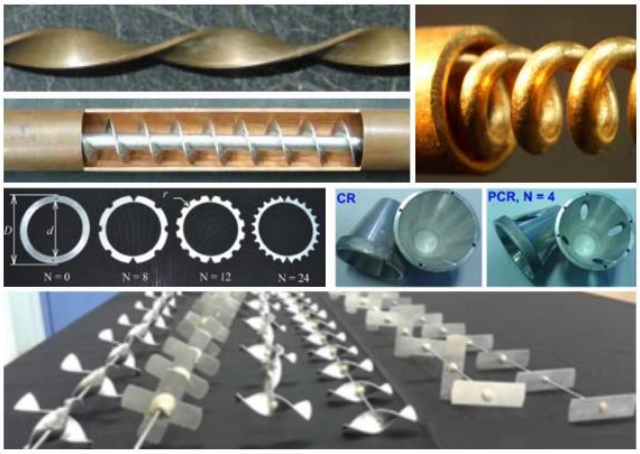
1.2.2.2. Akış Bozulması

Pasif ısı transferi iyileştirme teknikleri arasında en yaygın kullanılan tekniklerden birisi ısı değiştiricisi borusundaki iç akışın bozulmasıdır. Boru içi akışın bozulmasıyla, sınır tabakalar parçalanmakta ve bu tabakaların parçalandığı bölgelerde taşınımla ısı transferi artmaktadır. Boru içi akışın bozulmasını sağlayacak yöntemler, boru iç yüzeyinde diş açma gibi düzenlemeler yapmak ve boru içerisine türbülans arttırıcı elemanlar yerleştirmek üzere iki ana gruba ayrılabilir.

Daha önce de bahsedildiği üzere, ısı transferinin iyileştirilmesi için ısı transferinin gerçekleştiği ve sıcaklık farkının olduğu ara yüzey (katı-akışkan) civarında akışın bozulması gerekmektedir. Bu bilgi ile boru iç yüzeyinde diş açma, çukur ve tümsek oluşturma gibi uygulamalar ile ısı transferi miktarı iyileştirilebilmektedir. Bu uygulamalara ait görsellere Şekil 1.6'da yer verilmiştir.



Şekil 1.6. Boru iç yüzeyi modifikasyonu ile ısı transferi iyileştirme uygulamaları [32-35].

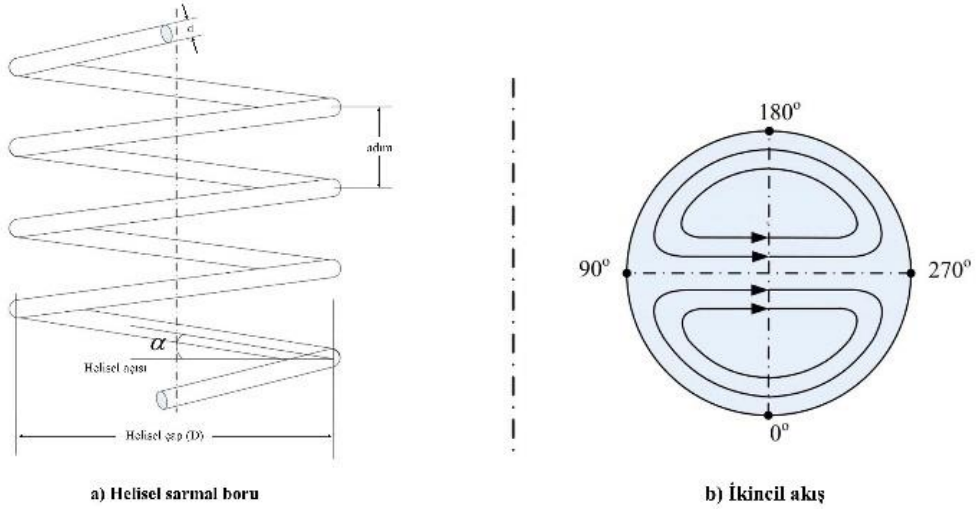


Şekil 1.7. Isı transferi iyileştirme uygulamalarında kullanılan türbülatörlerden örnekler [36-41].

Isı değiştiricisi borusu içerisine türbülans arttırma ve akış bozma amacıyla yerleştirilen elemanlara genel olarak türbülatör ismi verilmektedir. Türbülatörler ısı transferinin gerçekleştiği yüzeye yakın akışı bozarak ve boru merkezinde akan ve ısı transferine pek maruz kalmayan akışkanı karıştırarak ısı transferinin artmasını sağlamaktadırlar. Türbülatörlere bükülmüş levhalar, yaylar, lüle elemanlar, halkalar örnek verilebilir. Bu tez çalışmasında kullanılan bükülmüş levhalara ait literatür taraması bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde yer verilmiş olup, bu bölümde genel olarak türbülatörler hakkında bilgi verilmiştir. Şekil 1.7'de birtakım türbülatör örneklerine ait görsellere yer verilmiştir [36][37][38][39][40][41].

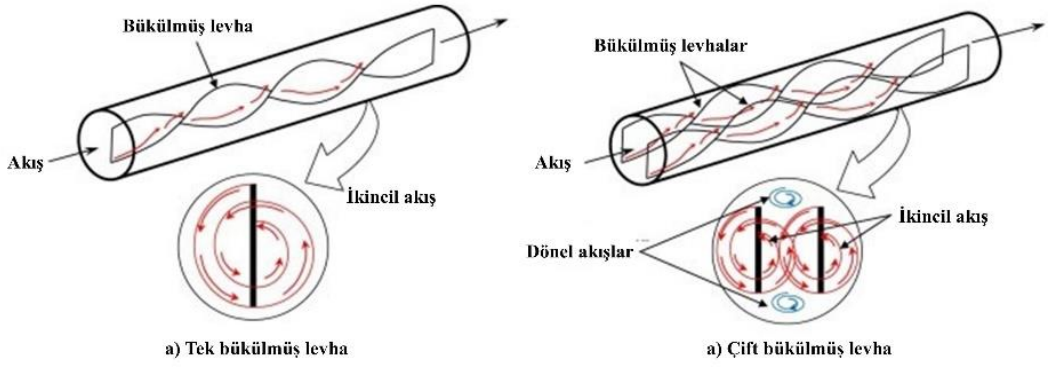
1.2.2.3. İkincil Akış

Akış denildiğinde ilk akla gelen akış türü olan boru içi akışta örnek vermek gerekirse eksenel; bir başka deyişle boru boyunca olan akıştır. Bu akışa birincil akış denmektedir. Boru boyunca eksenel akışa ek olarak hız vektörlerin radyal düzlemde oluşmasından dolayı ikincil akış da oluşabilmektedir. Eksenel düzlemde incelenen hidrolik ve ısıl sınır tabakaların gelişiminin, oluşumunun ve bozulmasının ısı transferi iyileştirilmesine sebep olduğu daha önce bahsedilmişti. İkincil akış özellikle dirsek gibi elemanlarda eksen düzleminin bozulduğu yapılarda oluşmaktadır. Ayrıca, akışkan sıcaklığının artışıyla birlikte akışkanın yoğunluğu azalacak ve bu sebeple yer çekimi tersi yönünde oluşacak kaldırma kuvveti ile de ikincil akış şiddetlenebilmektedir. Bu durumda ısıl sınır tabaka incelmekte ve ısı transferi iyileşmektedir [42-44].



Şekil 1.8. Helisel sarmal boru üzerinde oluşan ikincil akış [45]

İkincil akışın en yoğun gerçekleştiği ve uygulandığı ısı transferi iyileştirme uygulamaları sarmal borulardır. Şekil 1.8'de sarmal boru modeli ve ona ait ikincil akış gösterilmiştir. Sarmal borulara ek olarak düz borular içerisine yerleştirilen türbülatörler ile de ikincil akışın oluşumuna katkı ve ısı transferinde iyileşme sağlanmaktadır [46]. Bükülmüş levhaların yerleştirildiği boru içi akışta oluşan ikincil akış türleri Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Boru içerisine yerleştirilmiş bükülmüş levhaların oluşturduğu ikincil akış [47]

1.2.2.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü ısı transferi gerçekleşen yüzeyde, ısıl sınır tabakanın bozulması ve yüzey alanı artmasından dolayı ısı transferine olumlu katkıda bulunmaktadır. Üretim metotlarından dolayı birçok hali hazırda mikron düzeylerde de olsa (10^{-2} µm – 5 µm) pürüzlülüğe sahiptir [48][49]. Makro ölçekli kanal ve borularda bu pürüzlülük ihmal edilecek oranda olsa bile özellikle mikro kanallarda etkisi önemli ölçüdedir [50]. Pürüzlü yüzeyler özellikle kaynama ile ısı transferi uygulamalarında ısıtılan yüzey ile akışkan arasında akış ayrılmasını kolaylaştırarak taşınım hızını arttırmaktadır [51].

1.2.2.5. Nanoakışkanlar

Isı değiştiricilerinde kullanılan iş akışkanlarının ısıl iletkenlik değerleri sınırlıdır. Nano partiküllerin ısı transferi iş akışkanları (su, etilen glikol, motor yağı gibi) içerisinde homojen bir şekilde dağılmasıyla elde edilen karışımlar nanoakışkan olarak isimlendirilmişlerdir. Bazı nano partiküller ve ısı transferi iş akışkanı olarak kullanılan sıvıların ısıl iletkenlik değerleri Tablo 1.1 ve Tablo 1.2 de belirtilmiştir. Isı transferi akışkanı içerisine katı partiküller katarak akışkanın ısıl iletkenliğini arttırarak ısı transferini iyileştirme fikri ilk olarak 1995 yılında Choi tarafından ileri sürülmüştür [17]. 1-100 nm arasında boyutlara sahip seramik, metal, metal oksit ve karbon içerikli partiküllere nano partikül olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1.10). Nano partiküllerin baz akışkana göre çok daha yüksek ısıl iletkenlik değerlerine sahip olduğundan, nanoakışkanların ısıl iletkenlikleri baz akışkana göre iyileşmektedir. Bu sayede akışkan molekülleri arası iletim ile ısı transferi hızı artacağından ısı transferi iyileşmektedir.

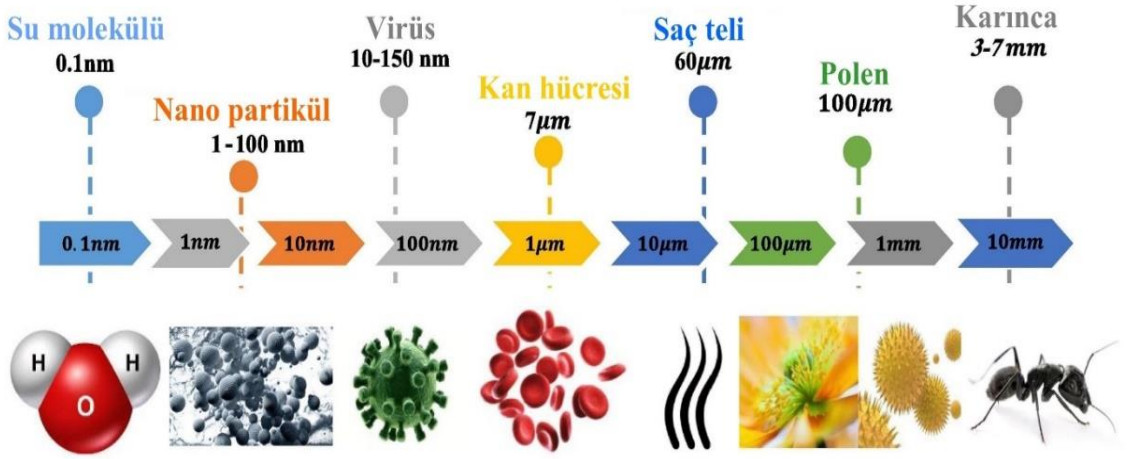
Ayrıca, sıvı içerisindeki katı nano partiküller taşınım olayının rastgeleliğini arttırarak ısı transferi iyileşmektedir. Metalik nano partiküllerin oksit türlerine göre çok daha fazla ısıl iletkenliği olmasına rağmen nanoakışkan hazırlamada kimyasal yapısı gereği oksit nano partiküllerin, metalik nano partiküllere göre daha uygun olduğu araştırmacılar tarafından Solangi ve arkadaşları [52] tarafından belirtilmiştir.

Tablo 1.1. Nano partiküllerin ısıl iletkenlik özellikleri [53]

Partikül	**Isıl iletkenlik [W/mK]**
Al_2O_3	40
CuO	76.5
Fe_2O_3	6
MgO	54.9
SiO_2	1.34-1.38
TiO_2	8.9538
ZnO	29
Ag	429
Al	238—273
Au	310
Cu	401
Fe	75-80
SiC	490

Tablo 1.2. Isı transferi iş akışkanı olarak kullanılan sıvıların ısıl iletkenlik özellikleri [53]

Sıvı	**Isıl iletkenlik [W/mK]**
Etilen glikol	0.257
Motor yağı	0.139-0.146
Etanol	0.161-0.171
Gliserol	0.285
Kerosen	0.145-0.168
Toluen	0.133
Su	0.608



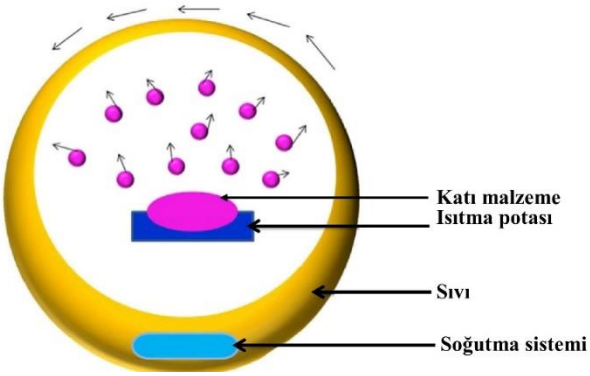
Şekil 1.10. Maddelerin boyutsal kıyaslanması [22]

1.2.2.5.1 Nanoakışkan Hazırlama Yöntemleri

Nanoakışkanların uygulamada en çok zorlanılan kısmı çökelme süresinin olabildiğince uzun olacak şekilde hazırlanabilmesidir. Araştırmacıların başlıca amaçları bu sürelerin mümkün olabildiğince yüksek tutabilmek ve mümkün olabildiğince yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahip nanoakışkanlar elde edebilmektir. Nano teknolojinin gelişmesiyle ve bu konuda yapılan çalışmaların niteliği ve niceliğinin artmasıyla, nanoakışkanları uygulamada daha fazla karşılık bulmaya devam edecektir. Nanoakışkanlar tek adım ve iki adım olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak hazırlanmaktadırlar.

1.2.2.5.1.1. Tek Adım Yöntemi

Tek adım yönteminde nano partikül üretime ve akışkan içerisinde dağılımları eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Bu yöntemin avantajları nano partiküllerin depolanma, kuruma ve nakliyeleri gerekmediğinden dolayı nano partiküllerin topaklanması en az ve kararlılıkları en fazla derecede olmaktadır. Ancak, bitmemiş tepkimelere bağlı tepkime sonrası kalıntı varlığı, yöntemin doğal bir dezavantajı olmuştur. Tek adım yöntemi birçok farklı yöntem kullanılarak yapılmaktadır [54].



Şekil 1.11. Direk buharlaşma yöntemi ile nanoakışkan hazırlanması

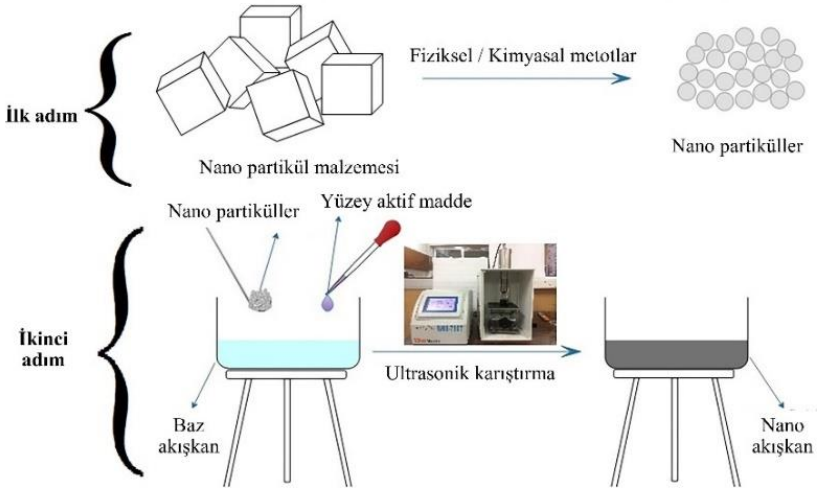
En sık kullanılan ve en çok bilinen tek adım yöntemi, Choi'nin patentini aldığı buharlaştırma tekniğidir (Şekil 1.11) [55]. Bu yöntemde, merkezinde ısıtılan pota içerisinde katı malzeme ve içerisinde sıvı bulunan bir silindir kullanılmaktadır. Burada katı malzeme nano partikülleri; sıvı ise nanoakışkanın baz akışkanını oluşturacaktır. Sistemi ısıl dengede tutabilmek için soğutma sistemi kullanılmaktadır. Katı malzeme yüksek sıcaklıktan dolayı bir anda buharlaşmakta ve merkez kaç kuvvetinden dolayı sıvı ile temas etmektedir. Buhar, soğutulan sıvı ile temas ederek yoğuşmaktadır. Bu işlemin sonucunda kullanılan malzemelerden oluşan nanoakışkan elde edilmektedir. Bu tekniğin diğer dezavantajı ise düşük buharlaşma basıncı özelliğine sahip sıvı kullanılması gerektiğinden, baz akışkan seçimi sınırlı kalmaktadır. Diğer tek adım tekniği ile nanoakışkan hazırlama yöntemleri de aşağıda maddelenmiştir.

- Lazer ile eritme
- Ark ile nano partikül sentezi
- Mikro dalga ışınımı
- Faz geçişi
- Poliol yöntemi
- Fiziksel buhar yoğuşturma
- Plasma deşarjı

1.2.2.5.1.2. İki Adım Yöntemi

Bu yöntemde birinci adım olarak nano partiküller, kimyasal, fiziksel ve mekanik yöntemler ile üretilir [17]. Üretilen nano partikülleri baz akışkanı içerisine katılarak çeşitli yöntemler ile karıştırılmak suretiyle (ikinci adım) partiküllerin sıvı içerisinde

homojen bir şekilde dağılım elde edilmesi (kararlılığı) sağlanır. İki adım yöntemi ile büyük hacimlerde ve çeşitli baz akışkanlar ile nanoakışkan hazırlanabilmesiyle, tek adım yöntemine göre oldukça ekonomik ve kullanışlı bir yöntemdir. Bu yüzden en yaygın kullanılan yöntemdir. Nanoakışkanlar yüksek yüzey alanı ve aktivitesinden dolayı çökelme eğilimindedirler [17]. Nanoakışkanın kararlılığının sağlanması ve arttırılması amacıyla, ultrasonik karıştırma, akışkanın pH seviyesinin ayarlanması, çeşitli yüzey aktif maddelerin katılması ve yüzey modifikasyonu gibi işlemler yapılmaktadır. Genel olarak uygulanan nanoakışkan hazırlama süreci Şekil 1.12'de gösterilmiştir.

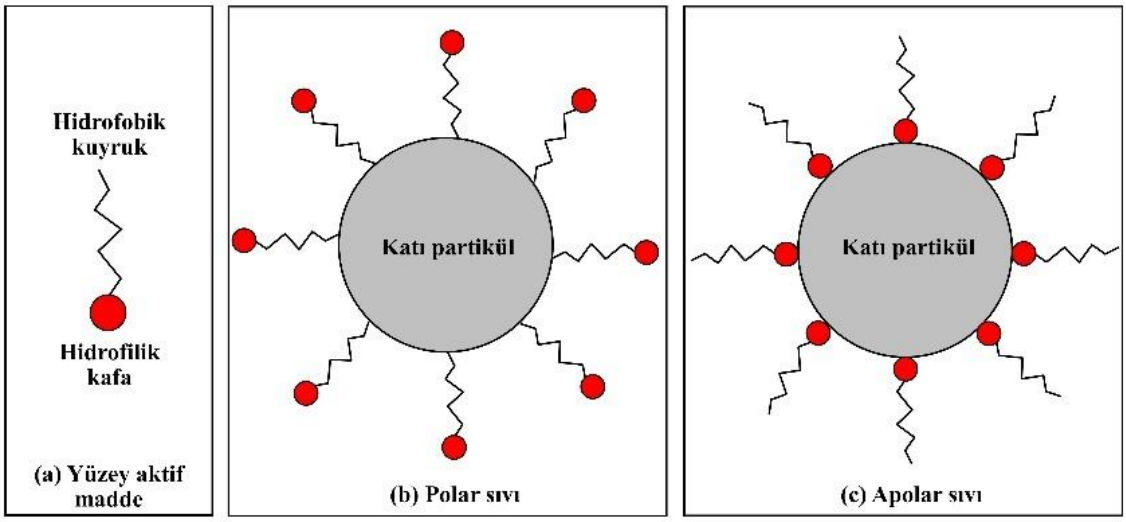


Şekil 1.12. İki adım yöntemi ile nanoakışkan hazırlama süreci [56]

1.2.2.5.1.2.1. Yüzey Aktif Madde Eklenmesi

Nanoakışkanların kararlılıkları baz akışkan ve nano partiküllerin yapısına bağlıdır. Nano partiküller hidrofobik (suyu sevmeyen) veya hidrofilik (suyu seven), baz akışkanlar ise polar veya apolar olabilir. Oksit nano partiküller gibi hidrofilik nano partiküller su gibi polar sıvı içerisinde kolayca homojen dağılım oluşturabilirler. Karbon nano tüp gibi hidrofobik partiküller ise yağ gibi apolar sıvılar içerisinde kolaylıkla homojen dağılım oluşturabilirler. Bu durumlarda nanoakışkanların kararlılığını güçlendirmek ve tersi durumlar olan hidrofilik partikül-apolar sıvı ve hidrofobik partikül-polar sıvı karışımlarının kararlılığını sağlamak için üçüncü bir madde eklenmesi gerekmektedir. Bu maddelere yüzey aktif madde denmektedir. Yüzey aktif maddeler nano partiküller ile sıvı molekülleri arasında bir köprü oluşturarak nano partiküllerin sıvı içerisinde homojen dağılımını desteklemektedirler [57-59].

Şekil 1.13a'da yüzey aktif maddenin yapısı gösterilmiştir. Yüzey aktif maddeler kafa grubundaki yüke bağlı olarak çeşitlenmektedir. Yüzey aktif maddeler, alkali benzen sülfonat ($RC_6H_4SO^-_3Na^+$) gibi anyonik (negatif yüklü), kuvaterner amonyum klorid ($RN(CH_3)^+_3Cl^-$) gibi katyonik (pozitif yüklü), polietilen alkol ($R(OC_2H_4)_xOH$) gibi nan-iyonik (yüksüz) ya da sülfobetin ($RN^+(CH_3)_2CH_2CH_2SO^-_3$) gibi amfoterik (hem pozitif hem negatif yüklü) olabilmektedirler [59]. Şekil 1.13b'de polar karışım içerisindeki yüzey aktif maddenin hidrofobik kuyruklar partiküle yapışarak, hidrofilik kafalar dışarda kalır. Hidrofobik kafa sürekli su molekülleri ile arasında farklı yönlerde çekme kuvvetleri oluşmaktadır. Ayrıca bir başka partikül etrafında toplanmış yüzey aktif madde yine başka bir yüzey aktif maddenin kafası ile arasında itme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu itme-çekme kuvvetlerinden dolayı partiküller sıvı içerisinde askıda kalma özelliği oluşmaktadır. Şekil 1.13c'de ise apolar karışım içerisindeki yüzey aktif maddenin hidrofilik kafası partiküle yapışarak hidrofobik kuyruklar dışarda kalmaktadır. Hidrofobik kuyruklar su molekülleri ile arasında itme kuvveti oluşmaktadır. Yine bir partikül etrafında toplanmış yüzey aktif maddenin kuyruğu ile başka bir partikül etrafında toplanmış yüzey aktif maddenin kuyruğu arasında itme kuvveti oluşmaktadır. Bu itme kuvvetlerinden dolayı karışım içerisindeki partiküller askıda kalma eğilimindedir [60]. Bazı yüzey aktif maddeler Tablo 1.3 de verilmiştir.



Şekil 1.13. a) Yüzey aktif maddenin yapısı, b) polar sıvı içerisinde partikül-yüzey aktif madde etkileşimi, c) apolar sıvı içerisinde partikül-yüzey aktif madde etkileşimi [60]

Tablo 1.3. Türlerine göre yüzey aktif madde örnekleri [59]

Yüzey aktif madde tipi	Örnekler
Negatif yüklü	Sodyum dodesilbenzen sülfonat (SDBS), Soldyum dodesil sülfat (SDS), Amonyum laurik sülfat, Potasyum laurik sülfat, Sodyum sterat
Pozitif yüklü	Setil trimetil amonyum bromid (CTAB), Benzalkonyum klorid, Cetrimonyum klorid, Distearil dimetilamonyum klorid
Yüksüz	Arap sakızı (GA), Polyoksietilen (10) nonilfenil eter, Polivinil pirolid (PVP), Tween 80, Tween X-100, Steril alkol, Oleik asit, Oleil amin, Rokanol K7, Rokaset O7
Hem negatif hem pozitif yüklü	Lesitin, Sodyum lauroamfoasetat, Hidroksisultan, Kokamidopropil betan

Yüzey aktif madde kullanımı nanoakışkanların kararlılığını ve dolayısıyla çökelme süresini iyileştirirken, bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Yüzey aktif maddeler, nanoakışkan içerisinde köpük oluşturarak, ısıl sistemlerin ısı transferi performansını kötüleştirmektedir [61-64]. Ayrıca yüzey aktif madde kullanımı nanoakışkanın ısıl iletkenlik özelliğini de katıldığı miktar kadar azaltmaktadır [57-59, 62, 65].

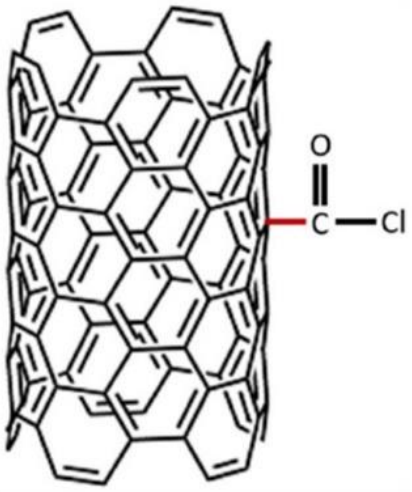
1.2.2.5.1.2.2. Akışkanın pH Seviyesi Ayarlanması

İzoelektrik nokta partiküllerin elektrik yükü taşımadığı ve hidrasyon kuvvetlerinin ihmal edilebilir olduğu pH değeridir. Nanoakışkanlarda yüksek kararlılık durumu için sıvı içerisindeki nano partiküller arası hidrasyon kuvveti yüksek olmalıdır. Nanoakışkanların pH değeri izoelektrik değerine eşit ya da yakın olduğu zaman nanoakışkanların durumu kararlı değildir. İzoelektrik noktada nanoakışkanın zeta potansiyel değeri sıfır olup, nanoakışkan çökelme eğiliminde olur. Ancak çok düşük (asidik) ve yüksek (bazik) pH değerlerinde akışkanlar korozif etkide bulunduklarından dolayı uygulamaya uygun değillerdir [66-68]. Nanoakışkanların en kararlı olduğu pH seviyesi, partikül ve baz akışkana göre çeşitlilik göstermektedir.

1.2.2.5.1.2.3. Partiküllerin Yüzey Modifikasyonu

Bu yöntem ile nano partikül veya nano tüplerin yüzeyleri baz akışkanı içerisine katılmadan modifiye edilir. Şekil 1.14’te yüzey modifikasyonu yapılmış karbon nano

tüp gösterilmiştir. Yüzey modifikasyonu, elektro kimyasal bölgeler kazandırır ve bu sayede sıvı içerisinde dağılım iyileşmektedir [69].



Şekil 1.14. Yüzeyi modifiye edilmiş karbon nano tüp [69]

1.2.2.5.2. Nanoakışkanların Kararlılığın Değerlendirilmesi

Nanoakışkanların uygulamada kullanımının kolaylaşması ve artması için kararlılığının araştırılması, değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi kritik öneme sahiptir. Şekil 1.15'te nanoakışkanların kararlılığın değerlendirildiği yöntemler gösterilmiştir.

Şekil 1.15. Nanoakışkan kararlılık değerlendirme yöntemleri [70]

Nanoakışkan kararlılığının belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntem zeta potansiyel ölçümüdür. Zeta potansiyel, nano partikül etrafındaki sıvı tabaka ile sıvı ortam arasındaki elektriksel potansiyel farkıdır. Bu elektriksel potansiyel farkı [mV] biriminde olup, nanoakışkan türüne göre negatif veya pozitif olabilir. Elektriksel potansiyel farkı mutlak değer içerisinde ne kadar yüksek olursa, nanoakışkanın çökelme eğilimi o kadar az olmaktadır [70]. Zeta potansiyel değer aralıklarına göre nanoakışkanların kararlılık durumları Tablo 1.4 de verilmiştir.

Doğal çökelme gözlemlenmesi, optik spektrum analizi, elektron mikroskopu ve ışık saçım analizi gibi yöntemler nanoakışkan kararlılık değerlendirilmesi için geliştirilmiş başka yöntemlerdir. Her bir yöntemin kendine göre avantajı olsa da, bu yöntemler genellikle beraber kullanılarak nanoakışkanların kararlılıkları değerlendirilir [70].

Nano partikül ve baz akışkan arasında yoğunluk farklı olduğundan dolayı, sıvı içerisinde askıda kalan partiküller zaman içerisinde çökelme eğilimindedirler. Eşitlik 1.1 de Stokes yasasına göre kararlı durumda (sabit hız) akışkan içerisindeki katı partikülün çökelme hızı tanımlanmıştır. Burada V, g, r, ρ_p, ρ ve μ sırasıyla partikül hızı, yer çekimi ivmesi, partikül çapı, partikül yoğunluğu, sıvı yoğunluğu ve sıvı dinamik viskozitesini temsil etmektedir.

Tablo 1.4. Zeta potansiyel değer aralıklarına göre nanoakışkanların kararlılık durumları [71]

Zeta potansiyel [mV]	**Kararlılık durumu**
0	Kararlı değil
15	Biraz kararlı ama çökelme başlamakta
30	Orta derecede kararlı
45	Kararlı, uygulama için uygun
60	Çok kararlı

$$U = \frac{2gr^2(\rho - \rho_p)}{9\mu} \tag{1.1}$$

Zamana göre çökelme oranı, nanoakışkanın kararlılığına bağlıdır. Kararsız nanoakışkanlar, hızlı bir şekilde partiküller çöker ve ilk durumdaki homojen görünüm hızlı bir şekilde ayrışarak heterojen görünüme sahip olur. Nanoakışkanların kararlılığını değerlendirmek için nanoakışkan numuneleri belirli aralıklarla fotoğrafları çekilerek, kararlılıkları niteliksel olarak değerlendirilir. İyi kararlılığa sahip nanoakışkanlar için kısa süre içerisinde herhangi bir çökelme gözlenmemektedir. Bu özellikteki nanoakışkanların kararlılığının değerlendirilmesi için ise santrifüj çökelme yöntemi kullanılmaktadır [70].

Nanoakışkanların kararlılıklarının niceliksel olarak değerlendirilebilmesi için optik spektrum (görünge) analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem temel olarak çökelmiş ve dağılım halinde bulunan iki farklı nanoakışkan numunesinin farklı ışık emme ve dağıtma davranışlarına dayanmaktadır. Nanoakışkanların zamana bağlı ışık emme görüngeleri en yaygın UV-vis görünge ölçer cihazı ile kaydedilmektedir. Bu sayede nanoakışkan içerisindeki partikül dağılım kalitesi kolay bir şekilde kıyaslanarak değerlendirilebilmektedir. Santrifüj işlemine tabi tutulmuş nanoakışkan numuneleri de bu yöntem ile hızlı bir şekilde kararlılıkları hakkında bilgi vermektedir. Santrifüj işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış iki numunenin görüngeleri üst üste örtüştüğü durumda, bu nanoakışkanın kararlılığı oldukça iyidir denebilmektedir [70].

Yukarıda bahsedilen yöntemler zamana veya bu zamanı hızlandırmak için yapılan işleme bağlı farklı durumlardaki nanoakışkanların kıyaslanmasına dayanmaktadır. Elektron mikroskopu yöntemi sayesinde nanoakışkan içerisindeki nano partiküllerin boyutları, şekilleri ve dağılım özelliği gözlemlenebilmektedir. Nano ölçüde partikülleri gözlemlemek için yayılımlı elektron mikroskopu (transmision electron microscope) (TEM) ve taramalı elektron mikroskopu (scanning electron microscope) (SEM) kullanılmaktadır. Bu mikroskoplar ile çekilen fotoğraflar bir yazılım ile analiz edilmektedirler. Çekilen fotoğraflarda partiküller ne kadar ayrışmamış ve topaklanmış iseler, bu nanoakışkanın kararlılığı o kadar kötü ve çökelme hızı o kadar yüksektir. Bu mikroskoplar ile analiz edilen numuneler, nanoakışkandan alınan çok düşük miktardaki sıvıların kurutulması ile hazırlanmaktadır. Bu yüzden kurutma süreci oldukça dikkatli ve standartlara göre yapılması gerektiği unutulmamalıdır. Bu durumla ilgili başka bir durum ise yağ bazlı nanoakışkanlardır. Partikül üzerinden yağ, su gibi kolay bir şekilde

buharlaşmadığından dolayı çekilen mikroskop görüntüleri bulanık görünmektedir. Bu yüzden yağ bazlı nanoakışkanların değerlendirilmesi oldukça zor bir süreçtir [70].

Bir başka nanoakışkan dağılımını analiz etme yöntemi dinamik ışık saçma (dynamic light scattering) yöntemidir. Bu yöntem ile numuneleri kurutma işlemine gerek yoktur. Bu yöntem tipik lazer ışının akışkan içerisindeki partiküller tarafından oluşan Rayleigh saçılmasını kullanmaktadır. Nano partiküllerin boyutuna bağlı olarak değişen Brownian hareketi gelen lazer ışınlarının yoğunluğunun dağılmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla ışın yoğunluğu partiküllerin boyutsal dağılımı hakkında bilgi vermektedir [70].

1.2.2.5.2. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Sıvı akışkana farklı termofiziksel özellikteki katı partiküllerin katılması üzerine akışkanın termofiziksel özelliklerin değişeceği aşikardır. Nanoakışkanların da kullanılan nano partikülün cinsi, türü, saflığı, boyutu gibi özelliklere bağlı olarak termofiziksel özelliklileri farklılık göstermektedir. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri değişen nano partikül oranına göre aşağıdaki parametreleri de etkilemekte olduğundan hesaplanması oldukça önemlidir [22].

- Prandtl sayısı (Pr)
- Reynolds sayısı (Re)
- Taşınımla ısı transferi katsayısı (h)
- Isıl yayınım katsayısı (α)
- Pompalama gücü
- Isıl ve hidrolik performans katsayısı (THP)

1.2.2.5.2.1. Yoğunluk

Nano partikül ve baz akışkan farklı yoğunluklarda olmasından dolayı, nano partikül oranına göre nanoakışkanın yoğunluk özelliği de değişmektedir. Akışkanların yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterirken, katılarda atomlar arası

bağlardan dolayı böyle bir durum ihmal edilebilir seviyededir. Literatürde sıcaklığa bağlı nanoakışkan yoğunluğu çalışmaları çok sınırlıdır [22]. En yaygın kullanılan nanoakışkan yoğunluklarının hacimsel (Eşitlik 1.2) [72] ve ağırlıksal (Eşitlik 1.3) [73] nano partikül oranına göre hesaplandığı Eşitlikler yer almaktadır.

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np} \tag{1.2}$$

$$\frac{1}{\rho_{nf}} = \frac{wt}{\rho_{np}} + \frac{1-wt}{\rho_{bf}} \tag{1.3}$$

1.2.2.5.2.2. Özgül Isı

Özgül ısı, birim kütlede maddenin sıcaklığını bir santigrat derece arttırabilmek için verilmesi gereken enerji miktarıdır. Dolayısıyla özgül ısı da ısı transferi üzerinde etkisi bulunan parametrelerden biridir. Nanoakışkanların özgül ısıları için yoğunluğun hesaba katıldığı (Eşitlik 1.4) [72] ve katılmadığı (Eşitlik 1.5) [74] olmak üzere iki Eşitlik bulunmaktadır.

$$C_{p_{nf}} = (1-\varphi)C_{p_{bf}} + \varphi C_{p_{np}} \tag{1.4}$$

$$C_{p_{nf}} = \frac{(1-\varphi)\left(\rho C_p\right)_{bf} + \varphi\left(\rho C_p\right)_{np}}{(1-\varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np}} \tag{1.5}$$

1.2.2.5.2.3. Isıl İletkenlik

Nanoakışkan fikrinin ilk olarak çıkmasının sebebi, yüksek ısıl iletkenlik özelliğine sahip katı nano partiküller ile çok daha düşük ısıl özelliğe sahip sıvıların bu özelliğini iyileştirmekti. Nanoakışkanlarda ısıl iletkenlik özelliğini etkileyen parametreler partikül boyutu, partikül ve baz akışkan malzemesi ve sıcaklık olarak belirtilmiştir [75]. Genel olarak varılan sonuca göre, nanoakışkanın sıcaklığı arttığında ve partikül boyutunun azaldığında, nanoakışkanların ısıl iletkenliği artmaktadır [76, 77]. Birçok araştırmacı bu konuda çalışma yaparak, nanoakışkanların ısıl iletkenliğini veren bağıntılar ortaya çıkarmışlardır. Her araştırmacı kendi çalışma aralığına göre bağıntı ortaya koymuş olsa da, genel olarak kabul edilen ve kıyaslama için kullanılan bağıntılar Maxwell (Eşitlik 1.6) [78], Hamilton ve Crosser (Eşitlik 1.7) [79] ve Wasp (Eşitlik 1.8) [73] tarafından

geliştirilen bağıntılarıdır. Eşitlik 1.6 daki n değeri amprik şekil faktörü olup ($n = 3/\psi$) ve ψ partikül küreselliğidir ve genellikle 1 değerinde alınır.

$$k_{nf} = k_{bf}\left[\frac{2k_{bf} + k_{np} + 2\varphi\left(k_{np} - k_{bf}\right)}{2k_{bf} + k_{np} - \varphi\left(k_{np} - k_{bf}\right)}\right] \tag{1.6}$$

$$k_{nf} = k_{bf}\left[\frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)\varphi\left(k_{bf} - k_{np}\right)}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + \varphi\left(k_{bf} - k_{np}\right)}\right] \tag{1.7}$$

$$k_{nf} = k_{bf}\left[\frac{2k_{bf} + k_{np} - 2\varphi\left(k_{bf} - k_{np}\right)}{2k_{bf} + k_{np} + \varphi\left(k_{bf} - k_{np}\right)}\right] \tag{1.8}$$

1.2.2.5.2.4. Viskozite

Viskozite, yoğunluk gibi ısı değiştiricilerinde ihtiyaç duyulan pompalama gücünü etkilediğinden dolayı, nanoakışkan uygulamalarını etkileyen bir parametredir. Nanoakışkanların viskozitesi, partikül çapına, sıcaklığa ve kullanılan partikülün hacimsel oranına bağlı olarak değişmektedir. Partikül çapı ve hacimsel oran arttıkça viskozite artmakta, sıcaklık arıttıkça ise viskozite azalmaktadır [75]. Isıl iletkenlik özelliğinde olduğu gibi literatürde birçok viskozite bağıntısı bulunmasıyla birlikte en yaygın kullanılan ve genel olan viskozite bağıntıları aşağıda verilmiştir[80-82].

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\varphi) \tag{1.9}$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}\frac{1}{(1-\varphi)^{2.5}} \tag{1.10}$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2) \tag{1.11}$$

1.3. Deney Tasarımı ve Taguchi Yöntemi

1.3.1. Deney Tasarımı

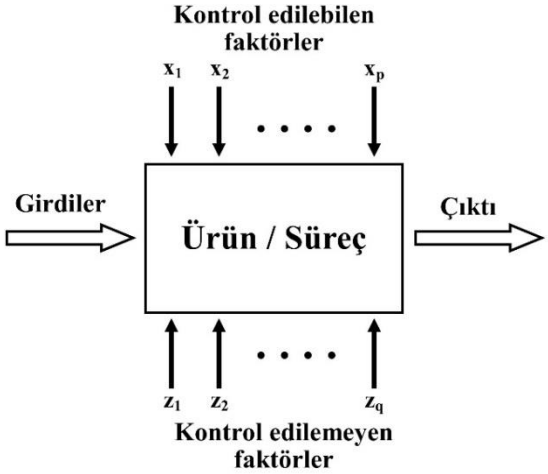
Deney, incelenen sistemin girdilerinde değişiklik yapılarak ortaya çıkan sonuçların gözlemlenmesi ve analiz edilmesidir. Deney tasarımı ise, incelenen sistem üzerindeki girdi değişkenlerin üzerinde değişiklikler yapılarak çıktı üzerinde oluşan değişikliklerin gözlemlenmesi ve yorumlanmasıdır. Deney tasarımında amaç en fazla bilgiyi, en az

zaman, maliyet ve çaba ile deneyi yapılan sistemin kalitesini etkileyen en önemli değişkenleri bulmaktır [83]. Deneyi yapılan bir ürün veya sürecin, bir veya birden fazla girdisi, kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörleri ve sonuç olarak bir veya birden fazla çıktısı bulunmaktadır (Şekil 1.16).

Deney tasarımı ilk olarak 1920 lerde İngiliz Sir Ronald Aylmer Fisher tarafından ortaya konulmuştur. Bu yöntem ilk olarak Amerika'da tarım sektöründe kullanılmıştır. İklim koşullarına göre çeşitli gübre ve miktarının etkilerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar ile Amerika'da tarım sektörüne büyük katkı sağlanmıştır [83].

1.3.2. Taguchi Yöntemi

Deney tasarım yöntemi 1950 li yıllara kadar tarım, kimya ve ilaç sanayilerinde kullanılmıştır. 1950 lerin başında Genichi Taguchi bu yöntemi geliştirerek mühendislik uygulamalarına uyarlamıştır. 1970 li yıllarda Japon sanayisinde gerçekleşen yükselmenin sebebi bu yöntemin kullanılması olarak görülmektedir. Taguchi yöntemi, istatistiksel yöntemler ile mühendislik tasarım ve süreçlerin iyileştirilmesi üzerine bir optimizasyon yöntemidir. Taguchi düşük kaliteli bir ürün veya sürecin temel sebebinin aşırı fazla değişkene bağlı olduğunu fark ederek, kaliteyi arttırmak için faktör olarak isimlendirilen tasarım parametrelerin dikkatli bir şekilde seçilmesine odaklanmıştır [84]. Şekil 1.16'da bir ürün veya sürecin genel modeli gösterilmiştir. Taguchi yöntemi, sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı felsefesi üzerine kurulu deney tasarım ve optimizasyon yöntemidir [83].



Şekil 1.16. Bir ürün veya sürecin genel modeli [85]

- **Sistem tasarımı:** Yeni bir ürün veya sürecin kavramsal olarak geliştirildiği aşamadır. Bu aşamada normal şartlar altında çalışan sistemlerin teknik bilgiler kullanılmasıyla geliştirilerek, müşteri beklentilerinin giderilmesi amaçlanır [86].
- **Parametre tasarımı:** Sistem tasarımından sonraki aşama olan parametre tasarımı, performans ve maliyet açısından en uygun tasarım parametrelerinin belirlenmesi için kontrol edilebilen faktörlerin en iyi kombinasyonunun seçimine dayanmaktadır. Bu amaçla yapılan ürün veya süreç tasarımına sağlam tasarım (robust design) denmektedir. Bu aşamada parametreler bloklanarak, ortogonal dizinler kullanılır. Bu aşamada sinyal / gürültü oranı (SNR) (Signal/Noise ratio) analizi ile de hesaplanma yapılmaktadır [86].
- **Tolerans tasarımı:** Parametre tasarımı sonrasında istenilen hedefe ulaşılamadığında tolerans tasarımı çalışması uygulanmaktadır. Hedef üzerinde büyük olumsuzluklar oluşturan tasarım faktörleri için daha dar tolerans aralıkları belirlenerek kalite arttırılmaya çalışılır. Ancak daha hassas ve pahalı bileşenler kullanılacağından tolerans tasarımı üretim ve işlem maliyetini arttırır [86].

Taguchi yöntemi, daha iyi bir tasarım için kontrol edilebilir faktörlerin kontrol edilemeyen faktörlere oranla daha fazla seçildiği bir deneysel tasarımı sunmaktadır. Taguchi yöntemi, sonucu etkileyen tüm faktörler hakkında en fazla bilgiyi en az deney sayısı ile veren ortogonal dizinler adı verilen özel bir diziyi kullanmaktadır [85]. Serbestlik derecesi yaklaşımı ile en fazla bilgiyi en az sayıda deney sayısı ile hesaplamaktadır (Eşitlik 1.12). Burada $N_{Taguchi}$, NV ve L sırasıyla yapılması gereken en az deney sayısı, kontrol edilebilen faktör sayısı ve bu faktörlerin seviye sayısını temsil etmektedir [87].

1.3.2.1. Ortogonal Dizinler

Bazı deney tasarımlarında birden fazla faktör ve bu faktörlerin seviyeleri bulunabilmektedir. Bu deneylerin tamamını yapmak çok fazla zaman ve maliyete sebep olabilmektedir (tam faktöriyel deney tasarımı). Taguchi, geliştirdiği ortogonal dizinler ile daha az deney ile tam faktöriyel deney sonuçlarına ulaşmayı amaçlamıştır. Deney sayısı azaltma işlemi, faktörlerin seviyeleri eş zamanlı olarak değiştirildiği ortogonal dizinler ile sağlanmaktadır [88].

Örnek olarak 3 er seviyeli 4 faktörden oluşan bir deney tasarımında yapılması gereken toplam deney sayısı 3^4=81 iken; Taguchi yöntemi ile Eşitlik 1.2 ile de hesaplanabildiği üzere 9 deney yapılması yeterli olacaktır. Bu dizin L_9 ile gösterilmektedir ve L_9 ortogonal dizin Tablo 1.5 de gösterilmiştir.

$$N_{Taguchi} = 1 + \sum_{i=1}^{NV} (L_i - 1) \tag{1.12}$$

Tablo 1.5. L_9 ortogonal dizini

Deney numarası	**Faktörler**			
	1	**2**	**3**	**4**
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

1.3.2.2. Sinyal / Gürültü Oranları (SNR)

Taguchi yönteminde deneysel değer ile istenen değer arasındaki sapmayı hesaplamak için kayıp fonksiyonu kullanılır. Bu kayıp fonksiyonu SNR olarak bilinen istatistiksel performans ölçüsüne dönüştürülür. Sinyal faktörü deney sonucunda olumlu etki eden değeri, gürültü faktörü ise deney tasarımına katılmayan ancak deney sonucunda olumsuz etkisi olan faktör olarak tanımlanır. SNR değeri yüksek olan deney tasarımı en uygun deney tasarımı olarak değerlendirilir. Taguchi, problemleri “En küçük - En iyi” (Eşitlik 1.13), “En büyük - En iyi” (Eşitlik 1.14), ve “Hedef değer – En iyi” (Eşitlik 1.15), olmak üzere üç farklı SNR tanımlamıştır. Eşitliklerde Y_i deneysel verileri, n deney sayısını Y deneylerin ortalamasını ve S standart sapmayı temsil etmektedir.

Çalışmanın amacına göre bu üç kriterden biri seçilir. Her üç tip problemde de SNR büyütülmeye çalışılmaktadır [83].

En küçük – En iyi:

$$\eta = -10log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} {Y_i}^2\right) \tag{1.13}$$

En büyük – En iyi:

$$\eta = -10log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{{Y_i}^2}\right) \tag{1.14}$$

Hedef değer – En iyi:

$$\eta = -10log\left[\frac{\bar{Y}^2}{S^2}\right] \tag{1.15}$$

1.3.3. Varyans Analizi

Varyans analizi yöntemi, deney faktörlerinin çıktı üzerinde diğer faktörlere oranla ne kadar etkisinin bulunduğunu ortaya koyan istatistiksel bir yöntemdir. Varyans analizi sonucunda faktörlerin deney çıktısı üzerindeki etkisinin ne kadar önemli olduğunun testi F-test (Eşitlikler 1.16-1.21) ile yapılmaktadır. Varyans analizinde ve F-test için kullanılan Eşitlikler aşağıda belirtilmiştir. Burada, *SS, V, F, N,* η ve *df* sırasıyla; kareler toplamı, varyans, F-test değeri, tekrarlama sayısı, SNR performans değeri ve serbestlik derecesini temsil etmektedir. İndis olarak kullanılan *i, j, m, T, A, E* ve *A0* ise sırasıyla; faktör seviyesi, ortogonal dizindeki deney sayısı, değişim, toplam değişim, A faktörü (örnek olarak), hata değeri ve A faktörünün test değerini temsil etmektedir.

$$SS_m = \frac{(\sum \eta_i)^2}{j} \tag{1.16}$$

$$SS_T = \sum {\eta_i}^2 - SS_m \tag{1.17}$$

$$SS_A = \frac{(\sum \eta_{Ai}{}^2)^2}{N} - SS_m \tag{1.18}$$

$$SS_E = SS_T - \sum SS_A \tag{1.19}$$

$$V_A = \frac{SS_A}{df_A} \tag{1.20}$$

$$F_{A0} = \frac{V_A}{V_E} \tag{1.21}$$

1.3.4. Doğrulama Testi

Kullanılan analiz yöntemlerinin doğruluğunun tespiti için doğrulama testi yapılmaktadır. Doğrulama testi için ilk olarak yapılan deneyler içerisindeki en iyi sonucu veren deney başlangıç deneyi olarak seçilir. Taguchi analizi sonucunda, her bir faktör içindeki en yüksek SNR değerine sahip seviyelerin oluşturduğu kombinasyon en iyi deneyi işaret etmektedir. Bu tahmin edilen deneydir. Tahmin edilen deneyin SNR değeri ($\hat{\eta}$) Eşitlik 1.22 ile hesaplanabilir. Bu en iyi deney ortogonal dizin içiresinde olabilir veya olmayabilir. Tahmin edilen deney gerçekleştirilerek tekrar Taguchi analizi yapılarak doğrulanması incelenir. Tahmin edilen ve doğrulanan deneyin sonuçları arasındaki fark ne kadar az ise, uygulanan analiz yöntemi o kadar başarılı demektir. Ayrıca en iyi deney ile başlangıç deneyi arasındaki sonuç farkı ne kadar ise o kadar iyileştirilme yapılmış demektir.

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^{p} (\hat{\eta}_i - \eta_m) \tag{1.22}$$

1.3.5. Gri İlişki Analizi

Bu bölüme kadar yapılan analiz ve yöntemler, tek çıktı üzerine yapılmış çalışmalardı. Deney sistemlerinde birden fazla çıktı olduğunda ve bu çıktıları eş zamanlı analiz ederek en optimum deney kombinasyonu bulunmak istenildiğinde istatiksel “Gri ilişki analizi yöntemi” kullanılmaktadır. Gri ilişki analizi yöntemi adımları şu şekilde sıralanabilir:

1. Deney sonuçlarının normalleştirilmesi
2. Normalleştirilen verilerin gri ilişki katsayısının (GRC) hesaplanması
3. Gri ilişki derecesinin (GRG) hesaplanması

Normalleştirme kriterleri deney sonunun daha yüksek olduğunda daha iyi ve daha düşük olmasında daha iyi olması olarak ikiye ayrılmaktadır.

En küçük daha iyi:

$$x_i^*(k) = \frac{maxx_i^0(k) - x_i^0(k)}{max_i^0(k) - minx_i^0(k)} \tag{1.23}$$

En yüksek daha iyi:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - minx_i^0(k)}{maxx_i^0(k) - minx_i^0(k)} \tag{1.24}$$

Burada, $x_i^*(k)$ i sırasındaki deneyin k çıktısının normalleştirilmiş değerini, $maxx_i^0(k)$ ve $minx_i^0(k)$ sırasıyla en yüksek ve en küçük $x_i^*(k)$ değerini temsil etmektedir. Daha sonra Eşitlik 1.25 ile GİK (ξ) hesaplanır.

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta\Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta\Delta_{max}} \tag{1.25}$$

Δ_{0i}, referans değer ($x_0^*(k)$) ile kıyaslanan ($x_i^*(k)$) normalleştirilmiş değerler arasındaki mutlak farktır (Eşitlik 1.26). Burada referans değer 1 olarak alınır. ζ ayırma katsayısı olarak 0 ile 1 arasında olup genellikle 0.5 olarak alınmaktadır [89]. Δ_{min} ve Δ_{max} sırasıyla Δ_{0i} nin en küçük (Eşitlik 1.27) ve en yüksek (Eşitlik 1.28) değerlerini temsil etmektedirler.

$$\Delta_{0i} = \|x_o^*(k) - x_i^*(k)\| \tag{1.26}$$

$$\Delta_{min} = \underset{\forall j \in i}{min} \; \underset{\forall k}{min} \left\| x_o^*(k) - x_j^*(k) \right\| \tag{1.27}$$

$$\Delta_{max} = \underset{\forall j \in i}{max} \; \underset{\forall k}{max} \left\| x_o^*(k) - x_j^*(k) \right\| \tag{1.28}$$

GİK değerlerine göre ortogonal dizin referans sıra ve kıyaslanan sıra arasındaki bağıntı seviyesini temsil eden GRD, Eşitlik 1.29 a göre hesaplanmaktadır. Daha sonra ortogonal dizindeki GRD ler sıralanarak en yüksek GRD değerine sahip deney, eş zamanlı olarak incelenen çıktılar açısından bu ortogonal dizindeki en başarılı deney olarak ortaya çıkmaktadır.

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \xi_i(k) \tag{1.29}$$

Her bir faktör ve seviyenin GRD değerleri incelenerek en yüksek GRD lere sahip deney kombinasyonu ortogonal dizin içerisinde olsun ya da olmasın çıktılar açısından en uygun deneyi temsil etmektedir [90].

1.4. Literatür Araştırması

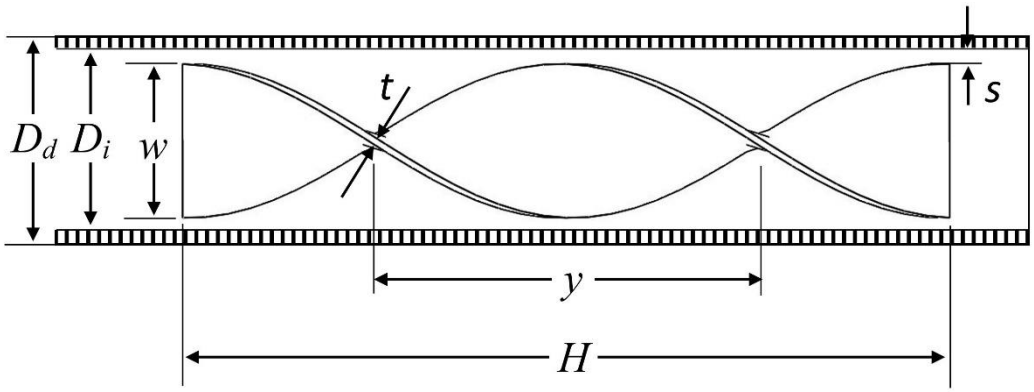
1.4.1. Giriş

Isı transferi iyileştirme yöntemleri arasında pasif yöntemlerden olan ısı değiştirici borusu içerisine türbülans arttırması amacıyla iç eleman yerleştirilmesi ve baz akışkanına nano partikül katılarak nanoakışkan kullanılması bu çalışmada kullanılan ısı transferi iyileştirme yöntemleridir. Çalışma kapsamında, iç eleman olarak bükülmüş levha, nano partikül olarak TiO_2 kullanılmıştır. Ayrıca elde edilen deneysel sonuçlar optimizasyon çalışması ile optimize edilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Literatür araştırması kullanılan bu malzeme ve yöntemler üzerinde odaklanılarak yapılmıştır. Bu bölümde sırası ile bükülmüş levha ile ısı transferi iyileştirme yöntemleri, nanoakışkan kullanımı ile ısı transferi iyileştirme yöntemleri ve Taguchi optimizasyon yöntemi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar detaylı bir şekilde sunulmuştur.

1.4.2. Bükülmüş Levha Kullanımı ile Isı transferi İyileştirme Çalışmaları

Türbülans arttırıcı elemanlara kısaca türbülatör denmekte ve literatürde en çok karşılaşılan türbülatör türlerinden biri bükülmüş levhalardır (BL). BL'ların kullanımının yaygın olmasının en büyük sebebi türbülans ve dönel akış oluşturarak ısı transferini yüksek oranda arttırma ve basınç düşümünde diğer türbülatörlere göre çok fazla negatif etkisinin olmamasıdır. BL hava, su, su-etilen glikol karışımı ve nanoakışkanlar gibi birçok akışkanın kullanıldığı uygulamada kullanılmaktadır. Sabit ısı akısı ve türbülanslı akış şartları altında olan ısıl sistemlerde kullanılan bükülmüş levhaların ısı transferine iyileştirme sonuçları bu bölümde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

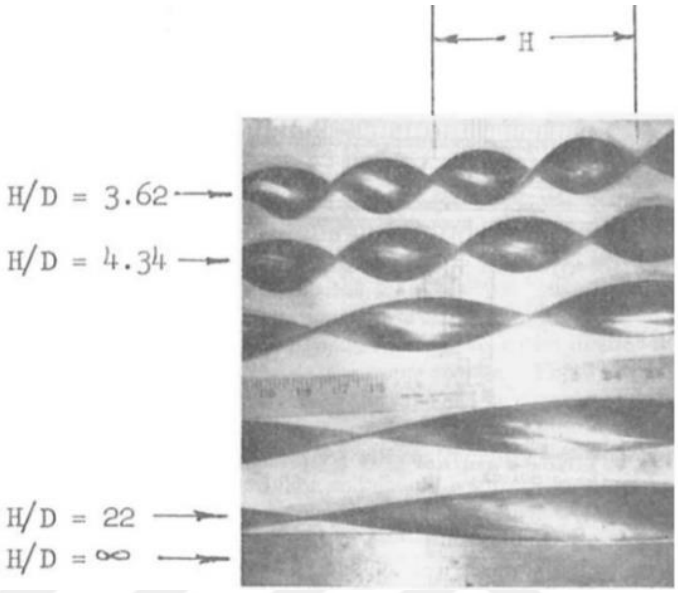
Bir BL da bulunan genel boyutsal parametreler (genişlik (w), adım uzunluğu (y), 360° büküm uzunluğu (H) ve kalınlık (δ)) Şekil 1.17'de gösterilmiştir. Tipik bükülmüş levha (TBL) kullanımı ile birçok ısı transferi iyileştirmesi çalışması yapılmış olup, daha iyi performans edilebilmesi amacıyla bükülmüş levhalar farklı şekillerde modifiye edilerek araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Sırasıyla 1964 ve 1993 yıllarında olmak üzere Smithberg ve Landis [91] ve Manglik ve Bergles [92] tarafından türbülanslı akışta TBL'ların ısı transferi ve basınç düşümüne etkisi araştırılmıştır.



Şekil 1.17. Boru içerisine yerleştirilmiş tipik bir bükülmüş levhanın boyutsal gösterimi

Smithberg ve Landis [91] tam gelişmiş akış karakteristiğinin sağlandığı bir ısı değiştiricisi borusu içerisine Şekil 1.18'de gösterilmiş bükülmüş levhaların hız dağılımını, sürtünme kaybını ve ısı transferi karakteristiği üzerine etkilerini analitik ve deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada iş akışkanları olarak hava ve su kullanılmış ve izotermal ve zorlanmış ısı taşınım şartları uygulanmıştır. Çalışmalar sonucunda boru

içerisine bükülmüş levha eklenmesinin ısı transferini iyileştirdiği ve basınç düşümünü arttırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 1.18. Smithberg ve Landis tarafından kullanılan deney düzeneği (a) ve bükülmüş levhalar (b) [91]

Manglik ve Bergles [92] izotermal ve türbülanslı akış sınır şartlarında büküm oranı y/D nin 3.0, 4.5 ve 6.0 olduğu bükülmüş levhalar ile deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışmalarda su ve etilen glikol kullanılmıştır. Nu (Eşitlik 1.30) ve f (Eşitlik 1.31) sonuçlarını bağıntılar geliştirerek sunmuşlardır. Bu bağıntılar aşağıda maddelinmiş sınırlar arasında geçerlidir:

i. $3.0 \leq y/w \leq 6.0$

ii. $3000 \leq Re \leq 23{,}000$

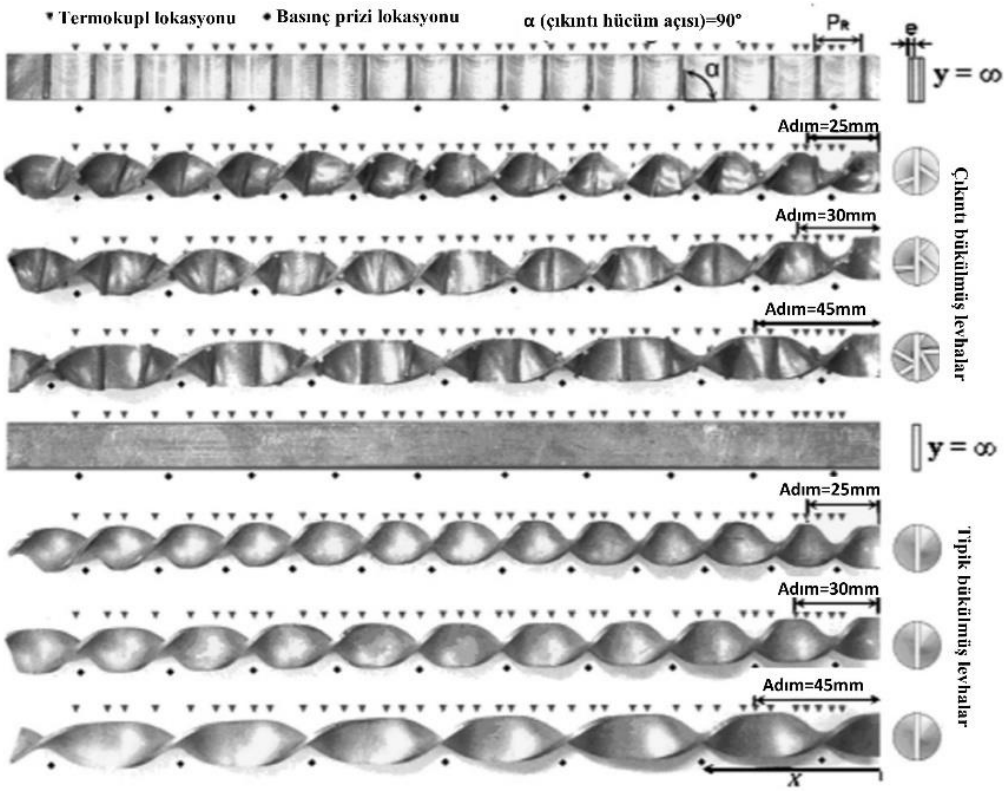
iii. $3.0 < Pr$

iv. $t/D_i \leq 0.05$

$$Nu = \left(1 + \frac{0.769}{y/D}\right)\left[0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}\left(\frac{\pi}{\pi - 4t/D}\right)^{0.8}\left(\frac{\pi + 2 - 2t/D}{\pi - 4t/D}\right)^{0.2}\right] \quad (1.30)$$

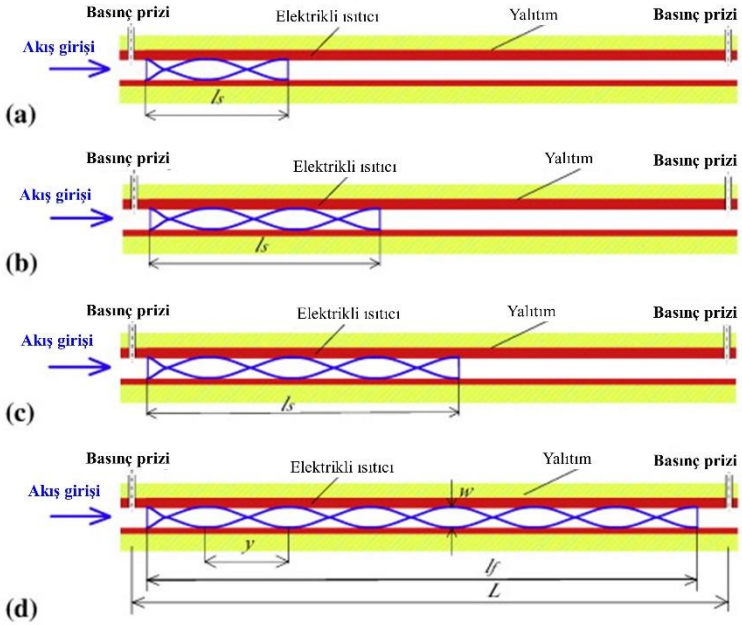
$$f = \left(1 + 2.06\left(1 + \left(\frac{2}{y/w}\frac{1}{\pi}\right)^2\right)^{-0.74}\right)\left[\frac{0.0791}{Re^{0.25}}\left(\frac{\pi}{\pi - 4t/D}\right)^{1.75}\left(\frac{\pi + 2 - 2t/D}{\pi - 4t/D}\right)^{1.25}\right] \quad (1.31)$$

Araştırmacılar tarafından modifiye edilen bükülmüş levhalar, yapılan modifikasyon ile ne kadar iyileşme sağlandığının tespit edilebilmesi için, yine çalışmalarında tipik bükülmüş levhalara yer vermektedirler.



Şekil 1.19. Chang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma [93]

Chang ve arkadaşları [93] 2007 yılında, iş akışkanı olarak suyun kullanıldığı ısı değiştiricisi borusu içerisine yerleştirilen çıkıntılı bükülmüş levha ve farklı kombinasyonlarının (Şekil 1.19) ısıl ve hidrolik performansına etkisini incelemişlerdir. Akış şartları Reynolds sayısının 5000-25000 arasında olduğu türbülanslı akıştır. Çalışmalarının sonucunda en yüksek termo-hidrolik performans (THP) değeri tipik bükülmüş levha ile en düşük Reynolds sayısının 5000 olduğu akışta 1.60 olarak elde etmişlerdir. Ayrıca büküm oranının artmasının basınç düşümünü çok fazla arttırdığından dolayı ısı transferi performansını iyileşse de THP değerini düşürdüğünü belirtmişlerdir.

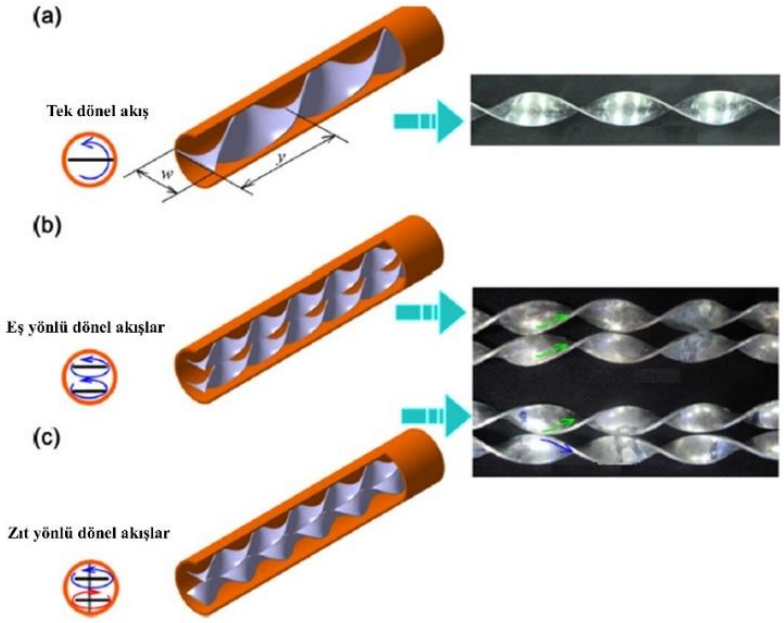


Şekil 1.20. Eiamsa-ard ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma [94]

Eiamsa-ard ve arkadaşları [94] iş akışkanı olarak havanın kullanıldığı bir deney düzeneğinde, tipik bükülmüş levhaları büküm oranı sabit kalmak kaydıyla farklı uzunluklarda girişten itibaren yerleştirerek ısı transferi performansını incelemişlerdir (Şekil 1.20). Deneyler, akış şartlarının Reynolds sayısının 4000-20000 arasında, bükülmüş levhaların büküm oranının 4.0 olduğu ve bükülmüş levhaların uzunluklarının tam bükülmüş levhaya uzunluğuna olan oranının (*ls/lf*) 0.29-1.0 arasında olduğu durumlarda gerçekleştirilmiştir. Bükülmüş levha uzunluğunun azalmasıyla basınç düşümü azalmasına rağmen ısı transferi performansının da azaldığı bu yüzden literatüre kıyasla yüksek THP değerleri elde edilemediğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen en yüksek THP değeri 1.04 olarak, en düşük Reynolds sayısının 4000 olduğu ve *ls/lf*=1.0 olduğu; yani tam bükülmüş levha ile sağlandığı ortaya konulmuştur.

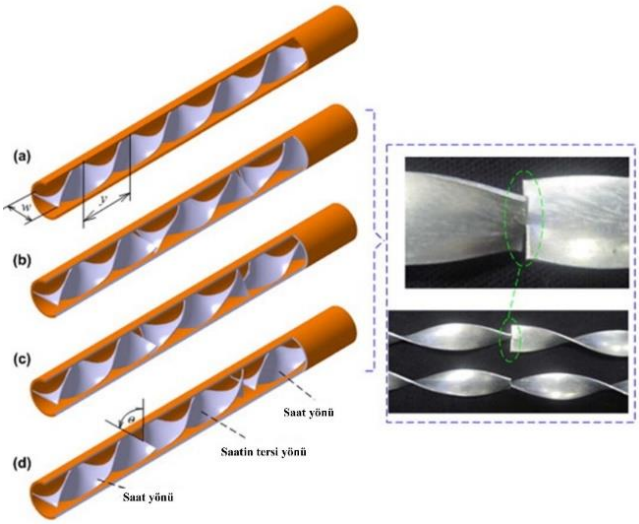
Eiamsa-ard ve arkadaşları [95] iş akışkanı olarak suyun kullanıldığı bir başka çalışmalarında, boru içerisine iki adet bükülmüş levhayı aynı anda yerleştirilmesinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında Reynolds sayısı 3700-21000 arasında ve bükülmüş levhaların büküm oranları 2.5-4.0 arasındadır. Boru içerisine yerleştirilen bükülmüş levhalar, bir adet Şekil 1.21a, ikisi aynı yönde Şekil 1.21b ve ikisi de farklı yönlerde Şekil 1.21c olmak üzere üç farklı kombinasyon ile yerleştirilmiştir. Burada araştırmacıların temel amacı, bükülmüş levha kullanımı ile boru içi akışta oluşturulan

dönel ve ikincil akışın, iki bükülmüş levha ile farklı bir karakteristik kazanarak şiddetlenmesi ve farklı yönlerde yerleştirerek de ikincil akışın ters yönlü olması durumunda nasıl bir ısı transferi ve basınç düşümü performansı göstereceğini incelemektir. Çalışmaların sonucunda en yüksek THP değerini 1.39 olarak, en düşük Reynolds sayısının 3700 olduğu, büküm oranının 2.5 olduğu iki bükülmüş levhanın farklı yönlerde yerleştirildiği konfigürasyonda elde etmişlerdir.



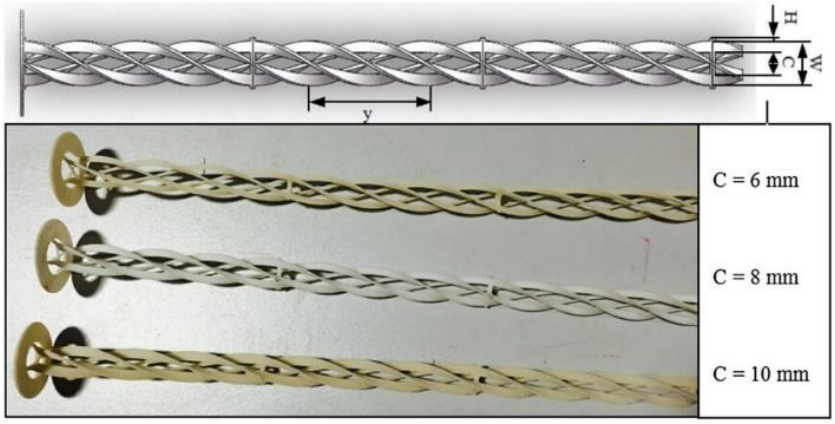
Şekil 1.21. Eiamsa-ard ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma [95]

Eiamsa-ard ve Promvonge [96] iş akışkanı olarak suyun kullanıldığı Reynolds sayısının 3000-27000 arasında olduğu genellikle türbülanslı akış şartlarında bükülmüş levhaların dönme açısını değiştirerek deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada bükülmüş levhaların büküm oranları 3.0, 4.0 ve 5.0 olup; 0° (Şekil 1.22a), 30° (Şekil 1.22b), 60° (Şekil 1.22c) ve 90° (Şekil 1.22d) dönme açıları göz önünde bulundurulmuştur. Araştırmacılar tarafından bükülmüş levhaların ani bir şekilde açı değiştirmesi ile daha iyi akışkan karışımı sağlanarak ısı transferi iyileştirildiği öne sürülmüştür. Dönüş açısının daha fazla değişmesiyle, akış düzleminin daha fazla dönerek akışın daha fazla bozulduğu ve bu sayede ısı transferi performansının iyileştiği belirtilmiştir. Bu çalışmada en yüksek THP değeri 1.4 olarak, Reynolds sayısının 3000 olduğu, bükülmüş levhanın büküm oranının 3 ve dönüş açısının 90° olduğu konfigürasyonda elde edilmiştir.



Şekil 1.22. Eiamsa-ard ve Promvonge tarafından yapılan çalışma [96]

He ve arkadaşları [97] iş akışkanı olarak suyun kullanıldığı bir ısı değiştiricisi borusu içerisine içi boş çapraz bükülmüş levha yerleştirerek ısı transferini türbülanslı akışta iyileştirmeye çalışmışlardır. Türbülanslı akış şartları Reynolds sayısının 5600-18000 arasındadır. İnceledikleri bükülmüş levhaların geometrik özellikleri, sabit büküm oranı 3 ve bükülmüş levhalar arasındaki genişlikler (C=6, 8 ve 10 mm) olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 1.23). Araştırmacılar bükülmüş levhaları 3D yazıcı kullanarak üretmişlerdir. Araştırmacıların sonucunda, kullandıkları içi boş çapraz bükülmüş levhaların sürtünme faktörü sonuçları boş boruya nazaran çok fazla arttırdığı, bu yüzden THP değerleri birin altında kaldığını belirtmişlerdir. En yüksek THP değeri 0.98 olarak, Reynolds sayısının 5600 ve C=10 mm konfigürasyonunda elde edilmiştir.



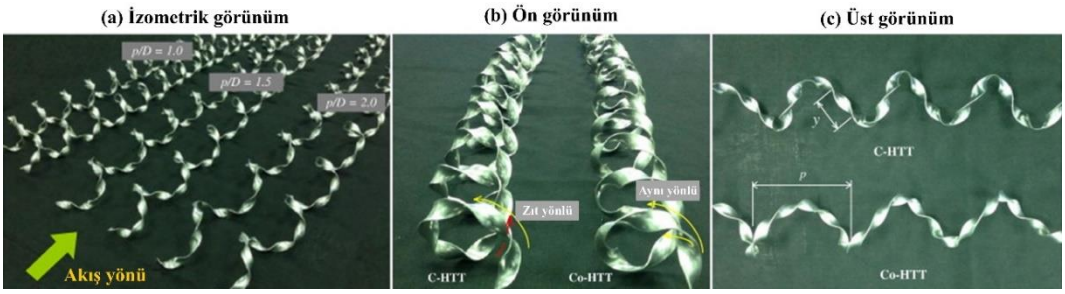
Şekil 1.23. He ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma [97]

Baş ve Özceyhan [98] iş akışkanı olarak havanın kullanıldığı boru içerisine yerleştirilen bükülmüş levhaların boru iç cidarıyla arasındaki mesafenin ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalılarında Reynolds sayısı 5132-24989 arasında olacak şekilde belirlenmiştir. Bükülmüş levhaların boru iç cidarına olan mesafenin değişmesiyle ısıl sınır tabakanın farklı karakterlere sahip olacak şekilde bozulacağını ön görerek ısı transferi performansına etkileyeceğini öngörmüşlerdir. Boru iç yüzeyi ile bükülmüş levhalar arasındaki mesafeyi, bükülmüş levhalara sıcaklığa dayanıklı teflon halkalar koyarak ayarlamışlardır. İnceledikleri bükülmüş levhaların büküm oranları 2.0, 3.0 ve 4.0 olarak üretilmiş ve bu bükülmüş levhalar, boru içerisine boru iç yüzeyi ile mesafelerinin boru çapına oranı (c/D) 0-0.0357 arasında olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 1.24). Çalışmalarının sonucunda, boru iç yüzeyi civarındaki laminer alt sınır tabakanın en güçlü şekilde parçalandığı c/D=0.0178, en düşük büküm oranının 2.0 ve en düşük Reynolds sayısının 5132 olduğu konfigürasyonda en yüksek THP değeri 1.756 olarak elde edilmiştir.

Şekil 1.24. Baş ve Özceyhan tarafından yapılan çalışma [98]

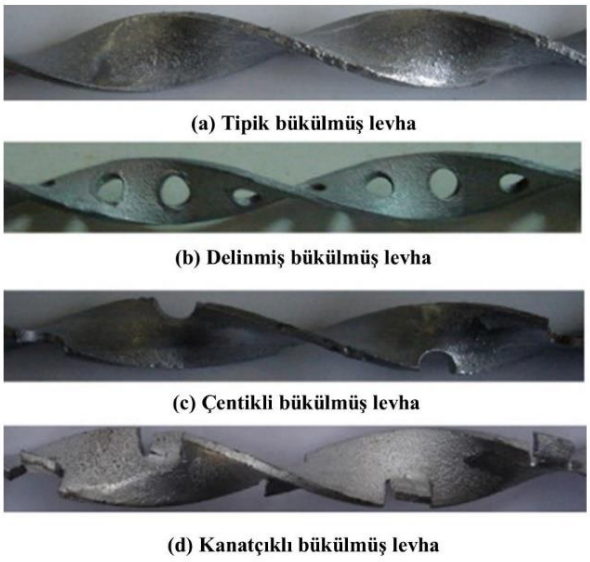
Nanan ve arkadaşları [99] iş akışkanı olarak havanın kullanıldığı boruya aynı yönlü (Co-HTT) ve zıt yönlü (C-HTT) olmak üzere helisel bükülmüş levhalar yerleştirmişlerdir. Çalışmalarında Reynolds sayısı 6000-20000 arasında olup bükülmüş levhaların adım oranları (p/D) 1.0, 1.5 ve 2.0 olmak üzere üç farklı şekilde tasarlanmıştır (Şekil 1.25). Araştırmalarındaki en dikkate değer sonuç, helisel bükülmüş levhaların, boru merkezindeki akış ile cidar civarındaki akışın karıştırılarak ve ikincil akış şiddetinin arttırılarak ısı transferi performansının iyileştirildiği üzerinedir. En yüksek THP sonucu 1.29 olarak, eş yönlü ve adım oranı 2.0 olan bükülmüş levha

kullanımı ile Reynolds sayısının 6000 değerinde olduğu konfigürasyon ile elde edilmiştir.



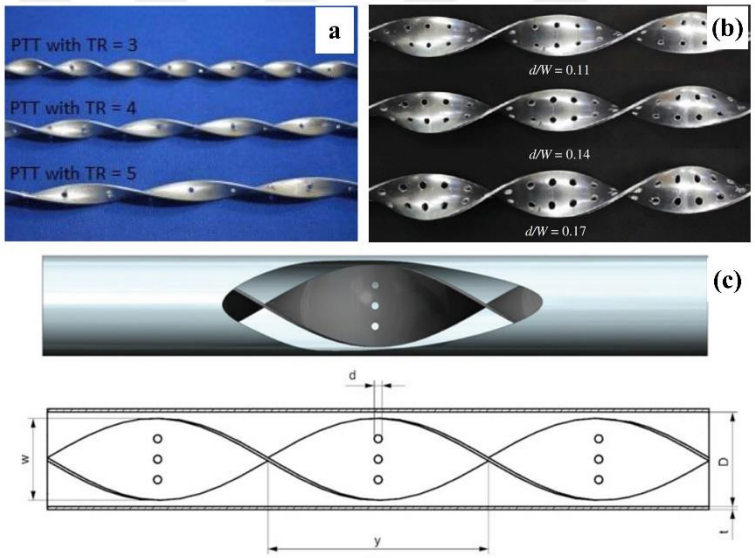
Şekil 1.25. Nanan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma [99]

Bükülmüş levhalarda farkı tasarımlar ve yerleşim şekillerinde değişiklilerin yapılmasına ek olarak, Rahimi ve arkadaşları [100] tarafından bükülmüş levhaların üzerinde delik açma (Şekil 1.26b), çentik yapma (Şekil 1.26c), ve kanatçık yapma (Şekil 1.26d), gibi uygulamalar ile merkezdeki akışın karıştırılması, sınır tabakaların bozulması ve türbülans yoğunluğunun arttırılması amaçlanmıştır. Çalışmalarında Reynolds sayısı 2950-11800 arasında tutulmuştur. Araştırmacılar bu bükülmüş levhaları iş akışkanı olarak suyun kullanıldığı ısı değiştiricisi borusu içerisine yerleştirerek ısı değiştiricisinin ısı transferi performansını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında en yüksek THP değerini 1.22 olarak kanatçıklı bükülmüş levha tasarımı en düşük Reynolds sayısı olan 2950 değerinde elde edilmiştir.



Şekil 1.26. Rahimi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma [100]

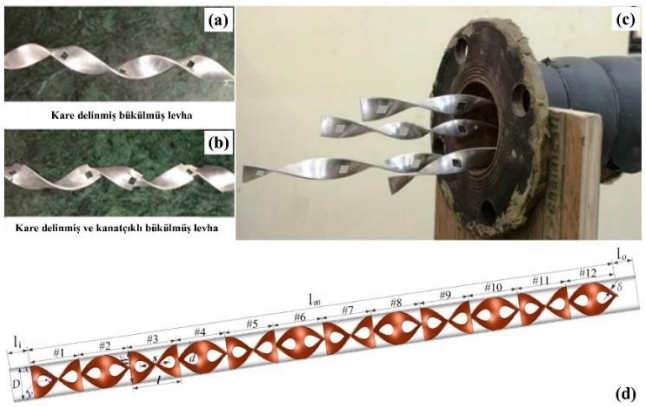
Genel olarak bükülmüş levhalar üzerinde açılan delikler dairesel olacak şekilde çalışılmıştır. Çalışmaların özgünlükleri, bu dairesel deliklerin sayısı, yerleşimi ve delik çapı büyüklüğüne göre değişmektedir. Şekil 1.27 de Ponnada ve arkadaşları [101] (Şekil 1.27a) tarafından yapılan tek delikli, Thianpong ve arkadaşları [102] tarafından iki delikli (Şekil 1.27b) ve Güneş ve Karakaya [103] tarafından çalışılmış üç delikli bükülmüş levhalar (Şekil 1.27c) gösterilmiştir. Bu çalışmalarda Ponnada ve arkadaşları [101] delikli bükülmüş levhaların dönme eksenleri yönlerini de değiştirerek daha iyi akışkan karışımını sağlamış iken; Thianpong ve arkadaşları [102] ve Güneş ve Karakaya [103] ise bükülmüş levha üzerlerindeki deliklerin çaplarını değiştirerek, farklı delik çaplarının akışkan karışımın ve türbülansın ısı transferi iyileştirilmesi üzerine etkilerini incelemişlerdir.



Şekil 1.27. Bükülmüş levha üzerinde farklı delik sayıları ile yapılmış çalışmalar [101], [102], [103]

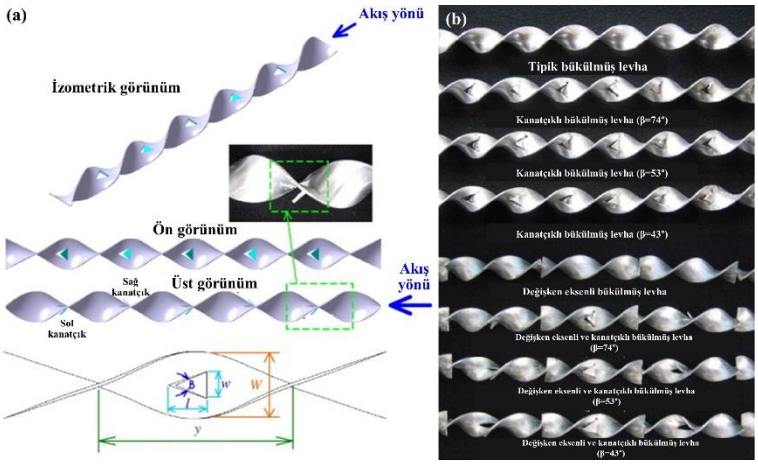
Bükülmüş levhalar üzerinde dairesel deliklerin incelenmesine ek olarak Suri ve arkadaşları [104], [105] tarafından karesel ve Meng ve arkadaşları [106] tarafından damla formunda (Şekil 1.28d) delinmiş bükülmüş levhaların ısı transferi iyileştirmesine etkisi incelenmiştir. Suri ve arkadaşları [104], kare delinmiş bükülmüş levhaya ek olarak kanatçık ile de ısı transferini iyileştirmeye çalışmışken (Şekil 1.28a ve Şekil 1.28b), bir başka çalışmalarında [105] ise ısı değiştiricisi borusu içerisine birden dört adet kare delinmiş bükülmüş levha yerleştirerek (Şekil 1.28c) ısı transferini iyileştirmeye çalışmışlardır. Meng ve arkadaşları [106] damla formunda delinmiş

bükülmüş levhaların her tek adımında dönme ekseni yönünü değiştirerek akışkan karışımını arttırmayı da hedeflemişelerdir. Bu çalışmalarda aynı zamanda dairesel delinmiş çalışmalar bulunmadığından dolayı delik formunun akış üzerinde etki net bir şekilde ortaya konulmamıştır.



Şekil 1.28. Bükülmüş levha üzerinde kare ve damla formunda delik ile yapılmış çalışmalar [104], [105], [106]

Eiamsa-ard ve arkadaşları [107] ise çalışmalarında bükülmüş levha üzerine üçgen şekilde kesip, bir kenarını kesmeyerek ve farklı açılarda (β=74°, 53° ve 43°) kıvırarak üçgen şeklinde kanatçık oluşturmuşlardır (Şekil 1.29). Kanatçıklara ek olarak bükülmüş levhaların dönme eksenlerini değiştirerek de akışın bozulmasını arttırmayı amaçlamışlardır. Bükülmüş levhaların büküm oranı sabit olarak 3.0 olarak seçilmiştir. Çalışmalarında iş akışkanı olarak suyu kullanıp, Reynolds sayısı 5200-22000 arasındadır. En yüksek THP değeri 1.4 olarak Reynolds sayısının 3000, kanatçık açısı β nın 74° ve değişken dönme eksenli bükülmüş levha konfigürasyonunda elde edilmiştir.

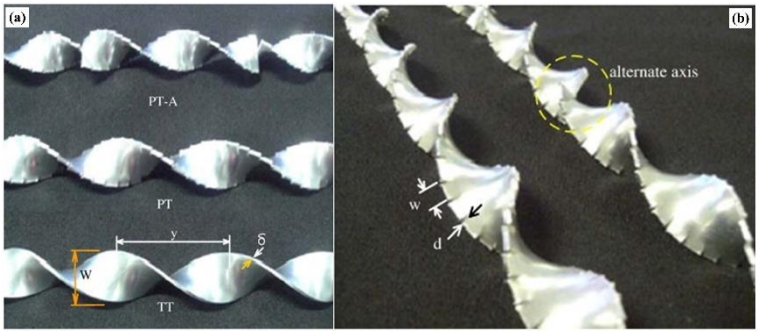


Şekil 1.29. Eiamsa-ard ve arkadaşları tarafında yapılan çalışma [107]

Bükülmüş levhaların ortasında delik açma işlemleri boru merkezindeki akışkanın karışımını sağlayarak ve ikincil akışı şiddetlendirerek ısı transferini arttırırken, bükülmüş levha kenarında yapılan kesme veya çentik açma işlemleri ile boru iç yüzeyi civarındaki sınır tabakaların bozularak ve bu bölgelerde akışkan karışımı sağlanarak ısı transferi iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda birçok çalışma yapılmıştır.

Bükülmüş levhalar üzerinde yapılan modifikasyonlar, levhanın ortasında yapıldığı gibi birçok çalışmada levhaların kenarlarında da yapılmıştır. Bu uygulamadaki temel amaç boru merkezindeki akışı bozmaktan çok, boru iç yüzeyi etrafındaki sınır tabakaları bozarak ısı transferini iyileştirmektir.

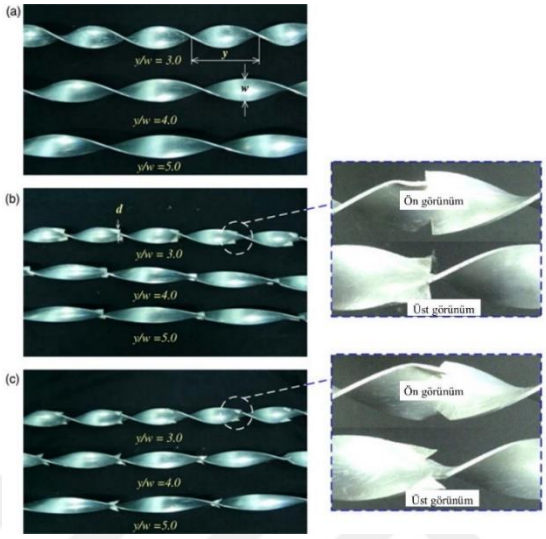
Seemawute ve Eiamsa-ard [108] büküm oranı 3.0 olan bükülmüş levhanın tüm çevresinde olacak şekilde çentikler açarak boru içerisinde sınır tabakaları bozarak ısı transferini iyileştirmeyi amaçlamışlardır (Şekil 1.30). Ayrıca, bükülmüş levhaların dönme ekseni açısını da değiştirmişlerdir. İş akışkanı olarak suyun kullanıldığı deneylerde Reynolds sayısı 5000-20,000 arasında çalışılmıştır. Çentikli bükülmüş levha boş boruya kıyasla ısı transferini %102 arttırırken, pompalama gücünü ise 1.11 kat daha fazla olması gerektiği sonucuna ulaşmıştır. En yüksek THP değeri 1.25 ile dönme ekseni değiştirilmiş çentikli bükülmüş levha ile en düşüş Reynolds sayısı olan 5000 deneyinde elde edilmiştir.



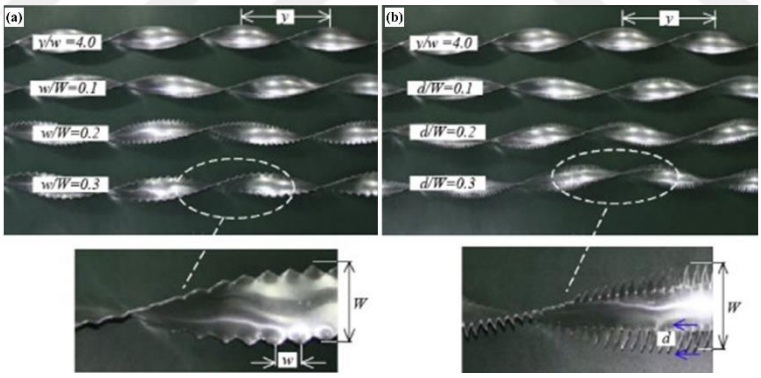
Şekil 1.30. Seemawute ve Eiamsa-ard tarafından yapılan çalışma [108]

Eiamsa-ard ve arkadaşları [109] Reynolds sayısının 3000-27000 aralığında ve iş akışkanının su olduğu çalışmalarında bükülmüş levha kenarlarında akış yönüne paralel (Şekil 1.31b) ve dik (Şekil 1.31c) kanatçıklar keserek boru iç yüzey etrafında akış bozulmasının ısı transferi iyileştirilmesine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada bükülmüş levhaların büküm oranları (y/w) 3.0, 4.0 ve 5.0 olacak şekilde kanatçık kesim oranları

(d/w) 0.0, 0.11, 0.21 ve 0.32 olmak üzere toplamda on iki farklı şekilde konfigüre edilmiştir. Elde edilen en yüksek THP 1.24 değerinde Reynolds sayısının 3000, büküm oranının 3.0 ve kesim oranı 0.32 olduğu deneyde elde edilmiştir.



Şekil 1.31. Eiamsa-ard ve Promvonge tarafından yapılan çalışma [109]

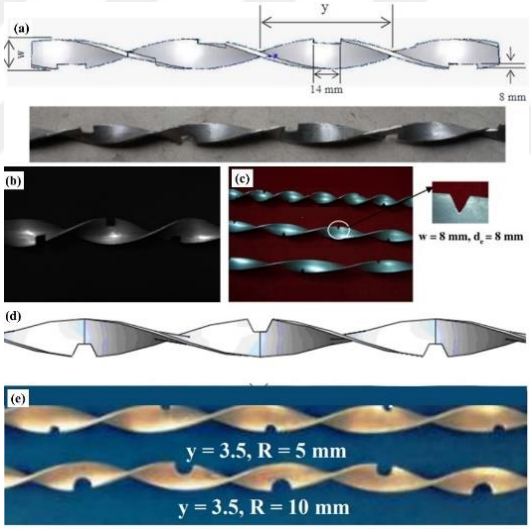


Şekil 1.32. Eiamsa-ard ve Promvonge tarafından yapılan çalışma [110]

Eiamsa-ard ve arkadaşları [110] iş akışkanının hava olduğu ısı değiştiricisi borusu içerisine testere dişi açılmış bükülmüş levhalar (Şekil 1.32a) yerleştirerek boru iç cidarı etrafındaki akışı bozmayı amaçlamışlardır. Deneyleri Reynolds sayısı 4000-20000 arasında gerçekleşmiştir. Ayrıca, bükülmüş levhalar üzerindeki testere dişlerin derinliğinin (Şekil 1.32b) etkisini de araştırmalarına konu etmişlerdir. Kullanılan testere dişli bükülmüş levhaların hepsi tipik bükülmüş levhaya göre ısı transferini iyileştirirken aynı zamanda da sürtünme faktörünü de arttırdığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak en yüksek THP değerini 1.17 olarak, en yüksek genişlik oranının (w/W) 1.0 ve en düşük

derinlik oranının (d/W) 0.1 olduğu bükülmüş levha ile en düşük Reynolds sayısı olan 4000 deneyinde elde edilmiştir.

Bükülmüş levha kenarında açılan çentiklerin farklı şekillerde olan çalışmalar da literatürde mevcuttur. Dikdörtgen [111], kare [112], üçgen [113], trapez [114] ve yarım daire [115] şeklinde çentiklerin açıldığı bükülmüş levhalar ile yapılmış çalışmalar sırasıyla Şekil 1.33'te gösterilmiştir. Saravanan ve Jaisankar [116] güneş kolektörüne yerleştirdikleri bükülmüş levhalara V şeklinde ve kare şeklinde çentikler açarak bu ikisinin ısı transferi iyileştirilmesine etkisini kıyaslamışlardır. Çalışmalarının sonucunda, V şeklinde çentikli bükülmüş levhaların kare şeklinde çentikli bükülmüş levhalara oranla daha yüksek hızlarda ikincil akış oluşturarak ısı transferini daha fazla arttırdığını iler sürmüşlerdir.

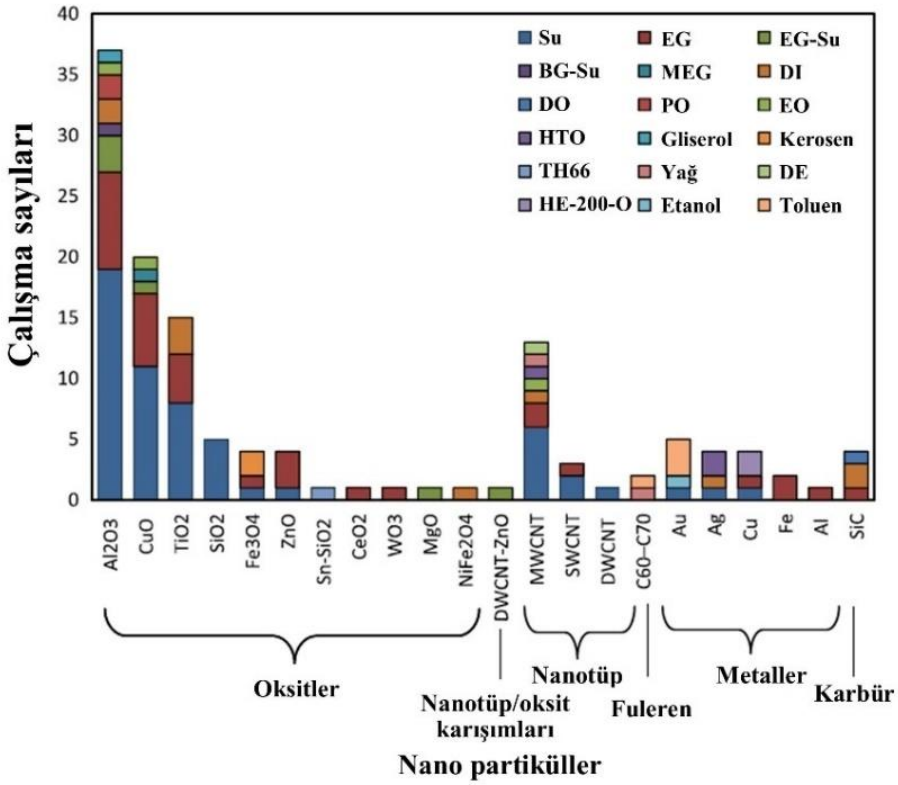


Şekil 1.33. Farklı şekillerde ((a) dikdörtgen [111], (b)kare [112], (c) üçgen [113], (d) trapez [114] ve (e) yarım daire [115]) çentik açılan bükülmüş levha çalışmaları

1.4.3. Nanoakışkan Kullanımı ile Isı transferi İyileştirme Çalışmaları

Nanoakışkanlar ile ısı transferi iyileştirme çalışmaları son yıllarda en fazla araştırılan ısı transferi iyileştirme yöntemlerinden biridir. Şekil 1.34'te 2017 yılında yapılan derleme çalışması sonucunda kullanılan nano partikül ve baz akışkan sayıları paylaşılmıştır [53]. Araştırmacılar baz akışkan içerisindeki nano partikül miktarı arttıkça nanoakışkanın ısıl iletkenlik özelliğinin iyileştiği ve ısı transferi performansının arttığını sonucunda

birleşmişlerdir. Ayrıca nanoakışkanı kullanımının aynı Reynolds sayısı değerinde sürtünme faktörüne de çok fazla negatif etkisinin olmadığı belirtilmiştir [117]. Isı transferi performansının iyileşmesi sadece ısıl iletkenliğin iyileşmesine değil; aynı zamanda partikül-partikül, partikül-sıvı ve nanoakışkanlarda mikro taşınım, Brownian hareketi ve partiküllerin rastgele dağılmasına da bağlı olduğu Yu ve arkadaşları [118] tarafından belirtilmiştir.



Şekil 1.34. Nanoakışkan ile ısı transferi iyileştirilme çalışmalarında kullanılan nano partikül ve akışkan sayıları (Kısaltmalar: BG: biyoglikol, DO: diatermik yağ, HTO: ısı transferi yağı, TH66: terminol 66, HE-200 yağı, EG: etilen glikol, MEG: mono etilen glikol, PO: pompa yağı, DI: saf su, EO: Motor yağı, DE: decene) [53]

Tez çalışması kapsamında su ve su-etilen glikol karışımı bazlı TiO_2 nano partiküllü nanoakışkan kullanıldığından dolayı literatür araştırması bu malzemelerin kullanıldığı, sabit ısı akısı ve türbülanslı akış şartları altında gerçekleştirilen ısı transferi iyileştirilmesi çalışmalarına odaklanmıştır.

Duangthongsuk ve Wongwises [119] düz yatay bir boruda, su bazlı TiO_2 nanoakışkanın kullanıldığı (%0.2 < φ < %2) ve akış karakteristiğinin 3000 < *Re* < 18,000 arasında

olduğu deneyler yapmışlardır. Deney sonuçlarında nanoakışkanın hacimsel oranı ve Reynolds sayısı arttıkça ısı transferi miktarının arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca nanoakışkan hacimsel oranı arttıkça aynı Reynolds sayısında basınç düşümünün dikkate alınacak miktarda artmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Duangthongsuk ve Wongwises [119] ye karşın, Sajadi ve Kazemi [120] yine su bazlı TiO_2 nanoakışkan kullanarak; $\%0.05 < \varphi < \%0.25$ ve $5000 < Re < 29{,}312$ sınırlarında yaptıkları çalışmalarında ısı transferi açısından benzer sonuç bulsalar da nanoakışkan hacimsel oranı artmasının basınç düşümünü arttırdığını ileri sürmüşlerdir.

Srinivas ve Vinod [121] bir ısı değiştiricisinde Al_2O_3, CuO ve TiO_2 nano partiküllerini su bazlı nanoakışkan hazırlamada kullanarak, ısı değiştiricisi performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. En yüksek verimi sırasıyla CuO, Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülü kullanımında elde etmişlerdir. Azmi ve arkadaşları [122] ise SiO_2 ile TiO_2 nano partiküllerini kıyasladıkları çalışmalarında en yüksek ısıl performansı TiO_2 ile elde etmişlerdir. Bu iki çalışmadan çıkarılan ortak sonuç, ısıl iletkenlik özelliği yüksek olan nano partikülün daha iyi ısı transferi performansı gösterdiğidir.

Düz yatay boruda su bazlı çalışmalara ek olarak Sandhya ve arkadaşları [123] otomobil radyatöründe Su:EG (60:40) karışımı bazlı ve hacimsel oranın %0.1-%0.5 arasında olduğu çalışmaları ile radyatörün soğutma performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Reddy ve Rao [124] ise Su:EG (60:40) karışımı bazlı TiO_2 nanoakışkanının içerisine yay yerleştirilmiş ısı değiştiricisi ile Reynolds sayısının 4000-15000 arasında deneyler gerçekleştirmişlerdir.

Bükülmüş levha ve TiO_2 nano partikülü kullanılarak gerçekleştirilen ısı transferi iyileştirme çalışmaları az da olsa literatürde mevcuttur. Azmi ve arkadaşları [117] bükülmüş levha yerleştirilmiş boru içerisinde Su-TiO_2 nanoakışkanı kullanarak ısı transferi iyileştirilmesini %29 daha arttırmışlardır. Eiamsa-ard ve arkadaşları boru içerisinde biri değişken büküm oranlı diğeri sabit olmak üzere iki bükülmüş levha yerleştirirken [125]; bir başka çalışmalarında [126] ise boru içerisinde bir, iki, üç ve dört adet bükülmüş levha yerleştirerek ısı transferi iyileştirme çalışması yapmışlardır. Her iki çalışmada da iş akışkanı olarak da hacimsel oranları %0.07-0.21 olan su bazlı TiO_2 nanoakışkanı kullanmışlardır.

1.4.4. Taguchi Yöntemi ile Yapılmış Olan Optimizasyon Çalışmaları

Özellikle deney sayısının azaltarak zaman ve maliyet tasarrufu sağlayan Taguchi yöntemi tarım [127], kimya [128], makine imalat [129] ve eğitim [130] gibi bir çok alanda optimizasyon çalışmalarında kullanılmaktadır. Taguchi yöntemi, ısı transferi iyileştirme çalışmalarında da kullanılmıştır.

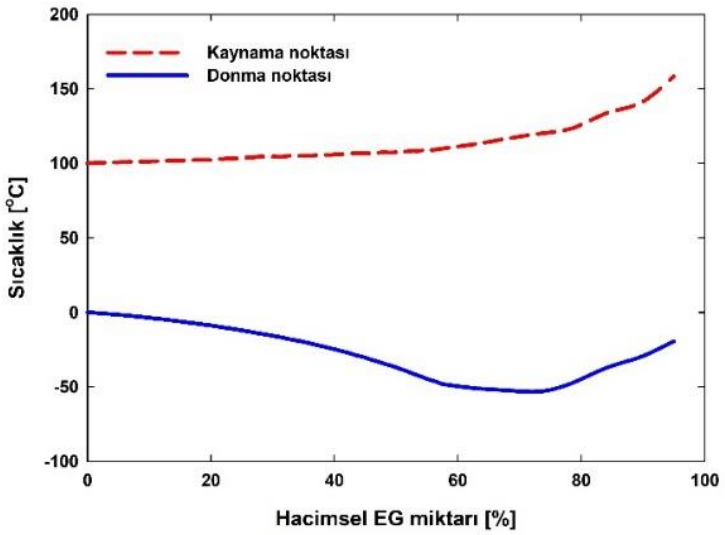
Jamshidi ve arkadaşları [131], helisel borulu ısı değiştiricisi tasarımındaki geometrik parametrelerin ısı transferi performansı olan etkisini incelemişlerdir. Bilen ve arkadaşları [132], kanal üzerine yerleştirilmiş dikdörtgen engellerin pozisyonun en iyi ısı transferi performansını vermesi için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Şahin ve Demir [133], delinmiş kanatçık tasarımlarının (akış yönüne göre kanatçık sayısı, kanatçıkları arası mesafe ve Reynolds sayısı) en uygun ısı değiştiricısı transferi performansının elde edilmesinde Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Güneş ve arkadaşları [134] ısı değiştiricisi borusu içerisine yerleştirdikleri üçgen kesitli yayların geometrik özellikleri ve akış şartlarını en yüksek ısı transferi ve en düşük basınç düşümünü sağlayacak tasarımı bulmak için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Benzer şekilde Çelik ve arkadaşları [135] da ısı değiştiricisi borusuna yerleştirdikleri katlanmış levhaların geometrik özellikleri ve akış şartını optimize ederek en yüksek ısı transferi ve en düşük basınç düşümü sağlayan konfigürasyonu elde etmişlerdir.

Taguchi yöntemi, nanoakışkan hazırlama sürecinde homojen ve kararlı bir nanoakışkan elde edilmesinde birçok parametre (sıcaklık, pH değeri, yüzey aktif madde türü ve miktarı, nano partikül türü ve miktarı) bulunduğundan dolayı bu çalışmalarda da kullanılmıştır [136-138]. Bu çalışmalarda temel amaç en uzun çökelme süresini, en yüksek ısıl iletkenlik ve en düşük viskozite değerini sağlayacak hazırlama yöntemini bulmaktır.

Isı değiştiricilerinde nanoakışkan kullanmak, ısı transferi performansını arttırırken daha fazla pompalama gücü gerektirdiğinden bu konuda da optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır [139-142].

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında bir ısı değiştiricisinde yer alan yatay bir boru ele alınmıştır. Söz konusu ısı değiştiricisi borusu sabit ısı akısı ve türbülanslı akış şartları altında çalışmaktadır. Bu yatay boru içerisinden geçen iş akışkanı su ve hacimsel oranı 60:40 olan etilen glikol-su karışımı olarak ele alınmıştır. Isı değiştiricilerinde iş akışkanı olarak suyun kullanılmasının başlıca sebepleri erişimi çok kolay ve ucuz olması ve doğaya zararsız olmasıdır. Su: Etilen glikol (Su:EG) karışımının kullanılmasının sebebi ise, etilen glikolün (EG) suya katılarak donma sıcaklığı düşük ve kaynama noktası sıcaklığının yüksek olan karışım elde edilerek, bu karışımın kritik alanlarda uygulamasının olmasıdır. Şekil 1.35'te Su:EG karışımı içerisindeki hacimsel olarak EG miktarının donma noktası sıcaklığı ve kaynama noktası sıcaklığına olan etkisi gösterilmektedir [16]. S:EG karışımı yılın büyük bir bölümü sıfırın altındaki sıcaklıklarda olan bölgelerde kullanılması gerekmekte ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sebeple iş akışkanı olarak Su:EG karışımının da kullanılması çalışmasının kapsamını genişletmektedir.



Şekil 1.35. Etilen glikol-su karışımı içerisindeki hacimsel EG miktarının kaynama ve donma noktası sıcaklıklarına etkisi [16]

Su:EG karışımın suya göre ısıl iletkenlik özelliği neredeyse yarı yarıya azalmaktadır. Su:EG karışımı kullanılmasındaki bu dezavantajı kısmen gidermek için bu karışıma nano partikül katılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İş akışkanı su ve 40:60 hacimsel oranında Su:EG karışımı olan akışkanlara nano partikül takviye edilerek iş

akışkanlarının ısıl iletkenlik özelliği iyileştirilerek ısı transferi performanslarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada nano partikül olarak TiO_2 nano partikülleri seçilmiştir. Deneylerde ağırlıksal oran olarak farklı değerlerde nanoakışkanlar kullanılmıştır. Ayrıca, söz konusu ısı değiştiricisi borusunda gerçekleşen ısı transferini iyileştirmek için boru içerisine farklı konfigürasyonlarda bükülmüş levhalar yerleştirilmiştir. Uygulanan bu yöntemler ısı transferi iyileştirme metotlarından pasif yöntemler arasında yer almaktadır. Bir sonraki bölümde tezin konusu ile ilgili temel bilgiler ve literatürde yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur.

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

Bu tez çalışması kapsamında, yüzeyinde sabit ısı akısı uygulanan düz yatay boru içerisine farklı şekillerde bükülmüş levhalar yerleştirilerek ve iş akışkanına farklı ağırlıksal oranlarda TiO_2 nano partikülü katarak, ısı transferi iyileştirilmesi deneysel olarak araştırılmıştır. Boru içi akış türbülanslı olup, iş akışkanı olarak su ve Su:Etilen glikol (Su:EG) karışımları kullanılmıştır.

2.1. Deneysel Yöntem

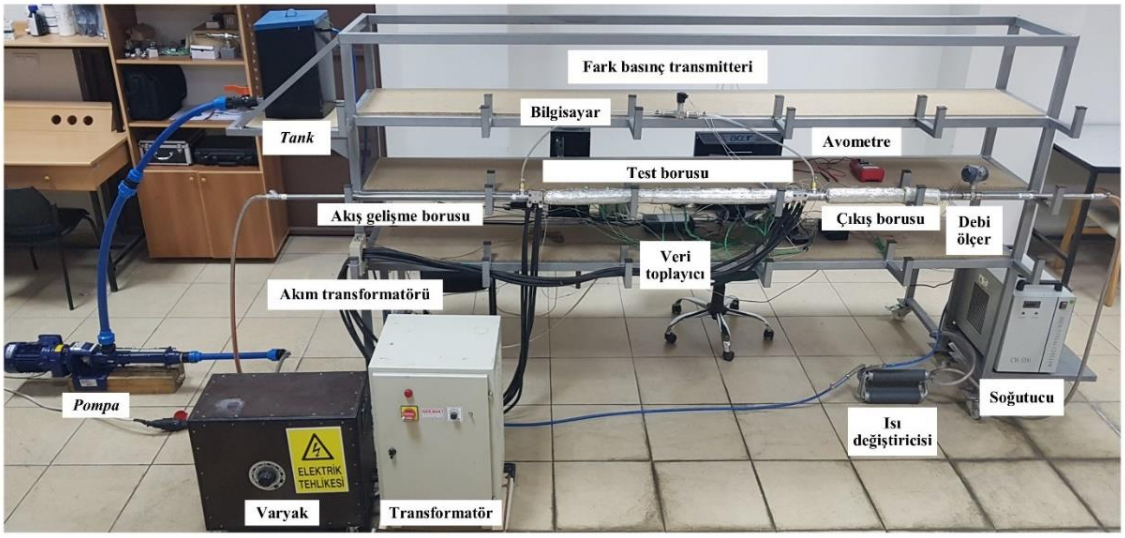
2.1.1. Deney Düzeneği

Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Biriminden sağlanan proje desteğiyle birlikte Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Termodinamik Laboratuvarında Şekil 2.1'de görüntüsü verilmiş olan deney düzeneği kurulmuştur.

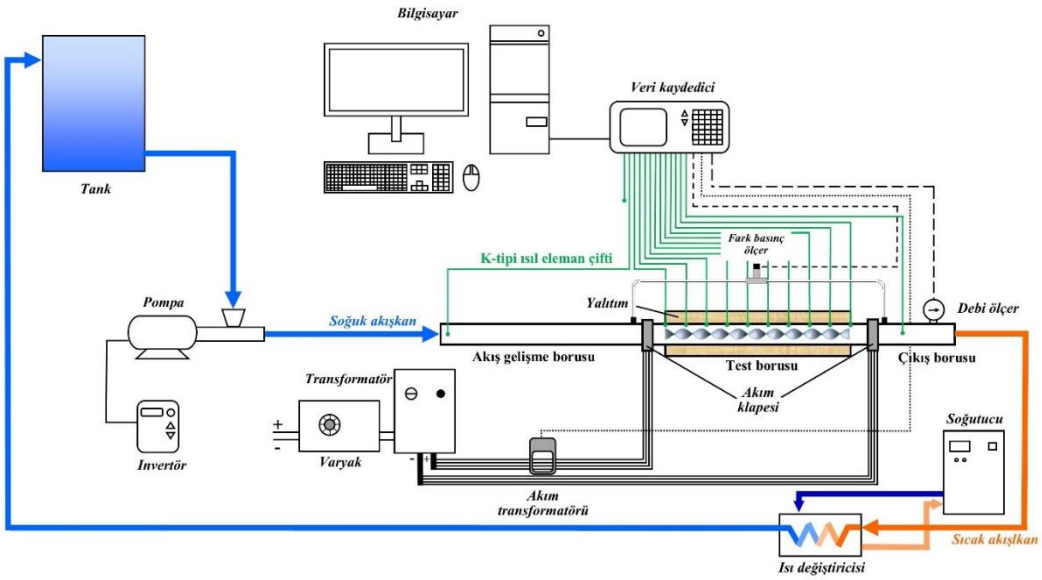
2.1.2. Deney Şematiği

Şekil 2.2'de şematik görüntüsü verilen deney düzeneğinde toplama tankında biriken akışkan, farklı debi değerlerini sağlamak amacıyla frekans invertörü kullanılarak bir pompa ile basılmaktadır. Akışkan sırasıyla akış gelişme borusu, test borusu ve çıkış borusundan geçmektedir. Akış gelişme borusu, türbülanslı akışın hidrolik sınır tabaka karakteristiği kazanması için en az iç çapın 10 katı kadar uzunlukta olması gerektiğinden 1 m uzunluğunda olarak seçilmiştir [143]. Test borusu ve çıkış borusu sırasıyla 1.1m ve 0.5m uzunluklarındadır. Bu üç boru paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş olup, iç ve dış çapı eşit olarak 17 mm ve 21 mm boyutundadır. Test bölgesi giriş ve çıkışlarında yerleştirilen T bağlantı elemanları ile bu bölgelerdeki basınç

değerleri fark basınç ölçer cihazı ile ölçülmüştür. Varyak-transformatör kullanılarak test borusuna kısa devre yöntemi ile sabit ısı akısı sağlanmıştır. Test borusundan dış ortama ısı kaybını en aza indirmek için taş yünü ile test borusu dış yüzeyine yalıtım sağlanmıştır. Akışın debisini ölçmek ve akışın basınç değerini etkilenmemesi için çıkış borusu sonrasına debi ölçer yerleştirilmiştir. Test borusunda ısınan akışkanın sıcaklığını başlangıç sıcaklığına düşürmek için soğutucu ve ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Isı değiştiricisinden çıkan soğumuş akışkan tanka gönderilmiş ve bu şekilde sirkülasyon sağlanmıştır. Varyak transformatörden test borusuna giden kablolardan akım transformatörü ile test borusuna verilen akım değeri ölçülmüştür. Kabloların test borusuna bağlandığı klapelerden voltaj değerleri de avometre ile doğrulanarak kayıt alınmıştır. 23 adet sıcaklık, birer fark basınç, debi, akım ve voltaj olmak üzere toplam 27 adet veri, veri kaydedici aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Alınan verilerden özellikle sıcaklık verileri zamana göre değişmediği; bir başka deyişle kararlı hale ulaştığı andan itibaren yaklaşık 30-35 dakika daha kayıt alınarak, bu sabit değerlerin ortalamaları alınarak ölçümdeki hata payı en aza indirilmeye çalışılmıştır. Ortalaması alınan değerler düzenlenerek MATLAB da yazılan kod ile boyutsuz parametreler olan Reynolds sayısı (*Re*), Nusselt sayısı (*Nu*) ve sürtünme faktörü (*f*) hesaplanmıştır.



Şekil 2.1. Deney düzeneğinin görüntüsü



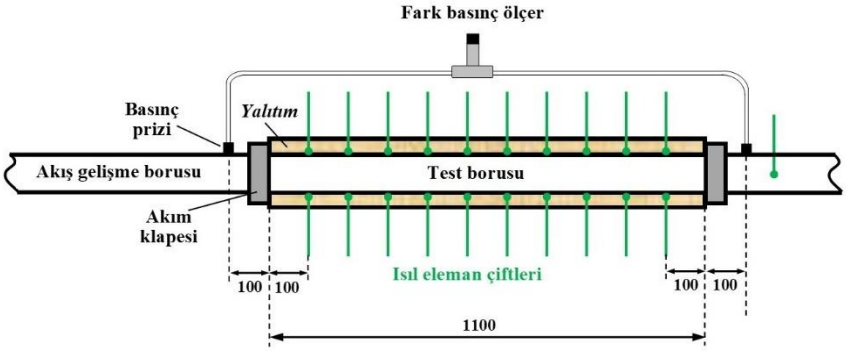
Şekil 2.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü

2.1.2.1. Isıtma Sistemi

Isıtma sistemi varyak ile verilen elektrik gücünün ayarlanarak ve transformatörle doğru akımın test borusundan kısa devre yapılarak sağlanmaktadır. İş sağlığı açısından verilen elektrik gücü düşük voltaj (en fazla 10V) ve yüksek akım oluşturacak şekilde ayarlanmıştır. 3 kW gücündeki transformatör ile ısıtılan boru arasında bağlanan kablolarda enerji kaybını en aza indirmek için test borusunun giriş ve çıkışında bulunan klapelere dörder adet olmak üzere toplam 8 adet kalın bakır kablolar bağlanmıştır. Klapeler alüminyum malzemeden ve enerji kaybını engellemek için yüzey alanı yüksek olacak şekilde tasarlanmıştır.

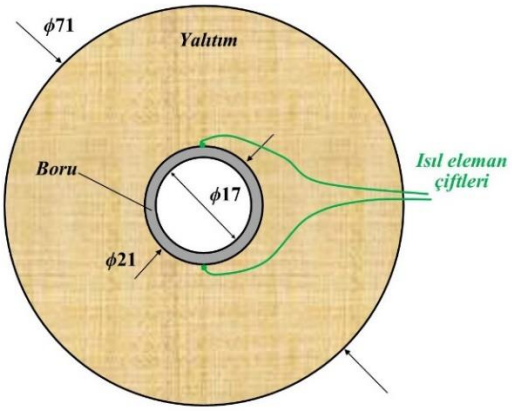
2.1.2.2. Sıcaklık Ölçümü

Sıcaklık ölçümleri için K tipi ELİMKO marka ısıl eleman çifti kullanılmıştır. Şekil 2.3'teki gibi test borusunda 10 adet konuma, borunun alt ve üst yüzeyi olmak üzere toplam 20 adet K-tipi ısıl eleman çifti bağlanarak yüzey sıcaklıkları alınmıştır. Klapeler ile ısıl elaman çiftleri arasında 100 mm mesafe bırakılmıştır. Her bir ısıl eleman çifti arasında da 100 mm olacak şekilde bağlanmıştır. Ayrıca tank içerisinde 1 adet, çıkış borusunda 1 adet ve ortamda 1 adet olmak üzere 3 adet daha ısıl eleman çiftinden sırasıyla, giriş, çıkış ve ortam sıcaklıkları alınmıştır.



Şekil 2.3. Test borusunun detaylı görünümü

Isıl elman çiftleri Şekil 2.4'teki gibi borunun alt ve üst yüzeylerine bağlanmışlardır. Bu işlemde ısıl elman çiftlerinin boruya bağlanmasında herhangi bir temas problemi yaşandığında farklı değer ölçüm yapılıp yapılmadığının kontrolü sağlanmıştır. Ölçümlerde ikili ısıl eleman çiftlerinden alınan ölçümler arasında çok düşük farklılıklar gözlenmiş olup daha hassas bir hesaplama için bu iki değerin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 2.4. Isıl eleman çifti yerleşimi (kesit görünüm)

2.1.2.3. Basınç Ölçümü

Test borusuna yerleştirilen iç elemanların lokal olarak basınç değerini etkilememsi amacıyla, test bölgesinin giriş ve çıkışından 10 ar santimetre uzaklıkta basınç prizleri yerleştirilmiştir (Şekil 2.3). Basınç prizleri ile fark basınç ölçer arasındaki bağlantı plastik şeffaf hortumlar ile sağlanmıştır. Kullanılan fark basınç ölçer 0-1 Bar basınç kapasitesinde ve 4-20 mA sinyal çıkışlıdır. Fark basınç ölçer, deneylerden önce Şekil 2.5'te gösterilen FLUKE 718 100G cihazı ile kalibre edilmiştir.

Şekil 2.5. FLUKE 718 100G basınç kalibratör cihazı

2.1.2.4. Debi Ölçümü

Çıkış borusunun çıkışına akış debisini ölçmek için türbin tipi debi ölçer (Şekil 2.6) kullanılmıştır. 24 V doğru akım ile çalışmakta olan debi ölçerin üzerinde bulunan çevirici kart ile, türbinin dönüş hızına göre akışın debisi hesaplanmıştır. Debi ölçer ölçüm aralığı 0.1-6 m^3/h dir. Ölçülen debi değerleri 4-20 mA sinyal çıkışı ile veri kaydediciye aktarılmıştır.

2.1.2.5. Veri Kaydetme Sistemi

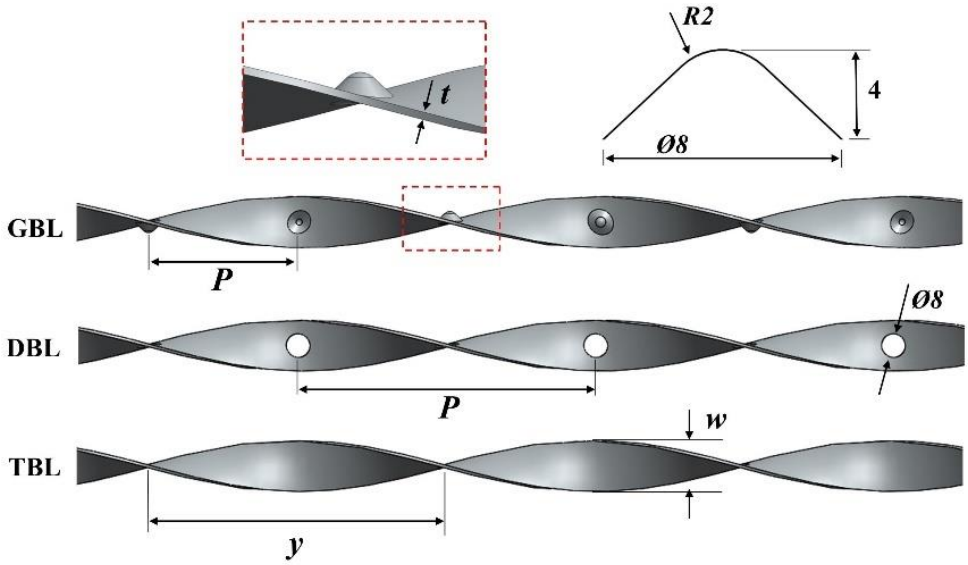
Deney düzeneğinden alınan tüm veriler, Şekil 2.7'de gösterilmiş olan 40 kanallı GRAPHTEC markla veri kaydedici aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Veri kaydedicinin özelliği gereği ısıl elaman çifti seçimi, voltaj sinyal giriş türü aralığı seçimi ve gelen sinyal güçlerinin skalası yapılabilmektedir. 4-20 mA çıkışlı cihazlardan gelen sinyaller, veri kaydedici firmasının temin etti dirençler kanallara bağlanarak veri kaydetmeye uygun olmuştur. Veri kaydedicinin bu özelliklerinden dolayı deney düzeneği ölçümleri için gerekli tüm özellikleri kapsamaktadır.

Şekil 2.6. Debi ölçer

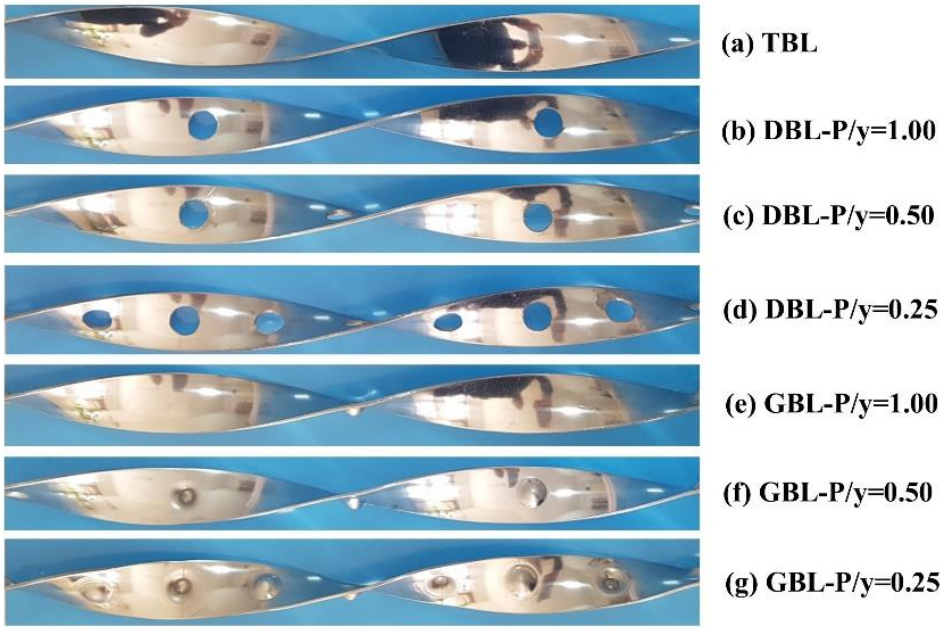
Şekil 2.7. Veri kaydedici

2.1.3. Kullanılan İç Elemanlar

Literatür araştırmasında detaylı bir şekilde yer verildiği üzere bükülmüş levhalar (BL) ve çeşitli şekilleri ısı transferi iyileştirme çalışmalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Tez çalışmasında tipik bükülmüş levha (TBL) ve farklı modifikasyonları kullanılmıştır. TBL ve modifikasyonlarında sabit olmak üzere uzunluk 1m, kalınlık (*t*) 1mm, genişlik (*w*) 16.5 mm, büküm uzunluğu (*y*) 100 mm olarak seçilmiştir. BL modifikasyonları delinmiş BL (DBL) ve gamzeli BL (GBL) olmak üzere ana iki yapıda tasarlanmıştır (Şekil 2.8). DBL üzerinde 8 mm çapında 25 mm, 50 mm ve 100 mm aralıklarla (*P*) delikler açılmıştır. GBL üzerinde ise yine 8 mm çapında patlatılmadan 4 mm yüksekliğe sahip olacak şekilde 25 mm, 50 mm ve 100 mm aralıklarla gamzeler oluşturulmuştur. Üretilmiş BL'lar Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Tipik bükülmüş levha ve modifikasyonlarına ait boyutsal özellikler



Şekil 2.9. Kullanılan iç eleman konfigürasyonların görüntüsü

2.2. Nanoakışkan Hazırlanması

2.2.1. Kullanılan Malzemeler

2.2.1.1. Baz Akışkanlar

Tez çalışmasında baz akışkan olarak su ve hacimsel olarak 40:60 Su:EG karışımı kullanılmıştır. Su, ısı değiştiricilerinde en yaygın kullanılan iş akışkanı olması sebebiyle tercih edilmiştir. Su:EG (40:60) karışımı ise hava sıcaklığının çok fazla düştüğü bölgelerdeki ısı değiştiricilerinde ve antifriz uygulamalarında kullanılması sebebiyle tercih edilmiştir. Su ve Su:EG (40:60) karışımına ait özellikler Tablo 2.1 de verilmiştir. Tablo 2.1 de verilen akışkanların termofiziksel özellikler 20℃ sıcaklık, donma ve kaynama noktası özellikleri ise 101.3 kPa basınç altındaki değerleridir. Tablo 2.1 den görüldüğü üzere Su:EG karışımının ısıl iletkenlik özelliği suya göre çok fazla düşmektedir. Bu durum Su:EG karışımının ısı transferi performansını olumsuz etkilemektedir. Tez çalışması kapsamında, Su:EG karışımına nano partikül eklenmesi suretiyle, akışkanın bu olumsuz özelliği giderilerek ısı transferi performansı iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Tablo 2.1. Su ve Su:EG (40:60) karışımına ait özellikler

Özellikler	**Su**	**EG**	**Su:EG (40:60)**
Yoğunluk [kg/m^3]	998.0	1113	1086.27
Özgül ısı [j/kgK]	4182	2347	3084
Isıl iletkenlik [W/mK]	0.598	0.257	0.334
Dinamik viskozite [kg/ms]	1.002E-3	20.9E-3	5.38E-3
Donma sıcaklığı [℃]	0	-12.7	-49
Kaynama sıcaklığı [℃]	100	198	111

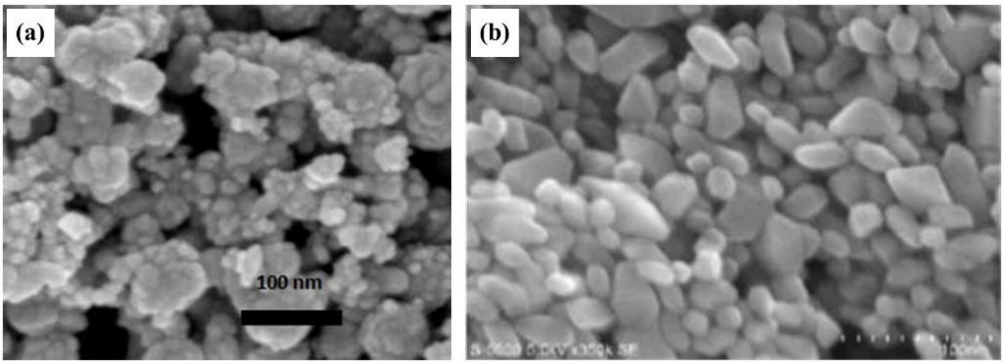
2.2.1.2. Nano partiküller

Su ve Su-EG (40:60) karışımı baz akışkanlar olmak üzere Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri kullanılarak nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri kullanılarak elde edilen nanoakışkanların kararlılıklarını iyileştirmek için sırasıyla sodyum dodesilbenzensülfanat (SDBS) ve setil trimetil amonyum bromid (CTAB) yüzey aktif maddeleri kullanılmıştır. Kullanılan malzemeler Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri Nanografi Ltd. firmasında alınmış olup özellikleri Tablo 2.2 de verilmiştir. Nanoakışkanlar %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.0 olmak üzere 4 farklı ağırlıksal oranlarda hazırlanmıştır.

Tablo 2.2. Kullanılan nano partiküllerin özellikleri [144]

Özellikler	**Al_2O_3**	**TiO_2**
Boyut [nm]	4	28
Özgül yüzey alanı [m^2/g]	>20	50
Isıl iletkenlik [W/mK]	40	8.9538
Yoğunluk [kg/m^3]	3900	4250
Özgül ısı kapasitesi [j/kgK]	890	686
Biçim	Küresele yakın	Küresele yakın
Saflık	%99.995	%99.995+
Renk	Beyaz	Beyaz

Şekil 2.10. a) Al_2O_3 ve b) TiO_2 nano partikülleri



Şekil 2.11. a) Al_2O_3 ve b) TiO_2 ye ait taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri

2.2.1.3. Yüzey aktif maddeler

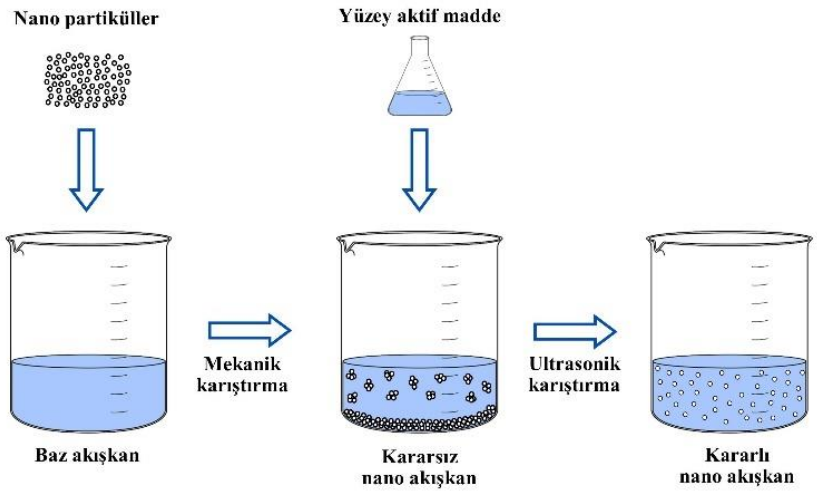
Nano partiküllerin akışkan içerisinde çökelmeden kararlı bir halde kalabilmeleri için yüzey aktif madde kullanımı uygulanan metotlardan biridir. Al_2O_3 nano partikülünün kullanılan baz akışkanlar içerisinde homojenliğinin ve kararlılığının sağlanması için yapılan çalışmalarda SDS, SDBS, CTAB, Triton-X100 yüzey aktif maddeleri denenmiştir. Al_2O_3 nano partikülü için en iyi kararlılık SDBS (Şekil 2.12a) ile elde edilmiştir. TiO_2 için CTAB (Şekil 2.12b) kullanılarak istenen kararlılık sağlanmıştır.

Şekil 2.12. Kullanılan yüzey aktif maddeler a) SDBS ve b) CTAB

2.2.2. Karıştırma yöntemi

Kullanılan deney düzeneğinde yaklaşık 6 litrelik bir akışkan devir daim edildiğinden dolayı her bir nanoakışkan konfigürasyonu için en az 6 litrelik nanoakışkan hazırlanması gerekmektedir. Bu kapsamda yüksek hacimde nanoakışkan hazırlanmasında en uygun yöntem olan iki adım yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan işlem adımları Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

Su ve Su-EG (40:60) karışımlarına ağırlıkça oranda eklenen nano partikül oranları (*wt*) %0.25, %0.50 %0.75 ve %1.0 olarak seçilmiştir. Nano partikül miktarı arttıkça nano partiküllerin sıvı içerisinde çökelmesinin kolaylaşması ve viskozite değerlerini çok fazla arttırması sebebiyle, literatürde en sık çalışılan aralık olan aralık göz önüne alınmıştır [145]. Literatürde birçok bağıntı hacimsel oran şeklinde verilmesine rağmen uygulamada, nano partiküllerin ağırlıkları hacimlerinin ölçülmesinden daha basit olduğundan dolayı ağırlıksal oran bazlı çalışılmıştır. Kullanılan akışkana katılması gereken nano partikül ağırlığını veren ifade Eşitlik 2.1 de verilmiştir. Nanoakışkanların hacimsel oranı kullanılan miktarlara göre Eşitlik 2.2 ile de hesaplanabilir. Gerekli hesaplamalar yapıldığında hacimsel oran aralığı %0.06 - %0.26 arasında olmaktadır. Hazırlanan nanoakışkanlar için kullanılan maddeler ve miktarları Tablo 2.3 de verilmiştir.



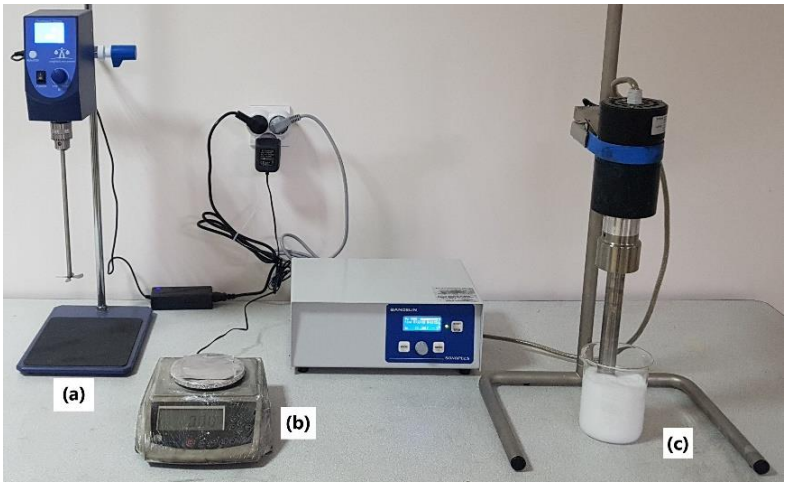
Şekil 2.13. Nanoakışkan hazırlama süreci

$$m_{np} = m_{bf}\frac{wt}{1-wt} \tag{2.1}$$

$$\varphi = \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)_{np}}{\left(\frac{m}{\rho}\right)_{np} + \left(\frac{m}{\rho}\right)_{bf}} \tag{2.2}$$

Nano partiküllerin ağırlıkları hassas terazi (Şekil 2.14b) kullanılarak ölçülmüştür. Nanoakışkan partikülleri baz akışkan ile Şekil 2.14a'da gösterilen karıştırıcıda 30 dk süre ile karıştırılmıştır. Diğer bir yandan yüzey aktif madde baz akışkan ile karıştırılmıştır. Yüzey aktif madde miktarı, nano partikül miktarının 10 da 2 si kadar kullanılmıştır. Daha sonra bu iki karışım birbirleri ile birleştirilerek ultrasonik karıştırıcıda (Şekil 2.14c) 120 dakika süre karıştırılmıştır. Ultrasonik karıştırıcı 120 W gücünde ve 20 kHz frekansında çalıştırılmıştır.

Tüm bu karıştırma işlemlerinde seçilen parametrelerin değerleri, Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilen değerlerdir. Optimizasyon işlemi en yüksek ısıl iletkenlik ve en yüksek zeta potansiyel değerini vermektedir. Uygulanan optimizasyon yönteminin ayrıntıları ve sonuçlar, bölüm 3.1.3 de verilmiştir.



Şekil 2.14. Mekanik karıştırıcı, b) hassas terazi ve c) ultrasonik karıştırıcı

Tablo 2.3. Kullanılan nano partikül ve yüzey aktif maddelerin miktarları

Baz akışkan	**Ağırlıksal oran (wt) [%]**	**Kullanılan miktar [gr]**			
		Al_2O_3	**SDBS**	**TiO_2**	**CTAB**
Su	0.25	20.01	4.00	20.01	4.00
	0.50	40.12	8.02	40.12	8.02
	0.75	60.33	12.07	60.33	12.07
	1.00	80.65	16.13	80.65	16.13
Su-EG (40:60)	0.25	21.60	4.32	21.60	4.32
	0.50	43.30	8.66	43.30	8.66
	0.75	65.12	13.02	65.12	13.02
	1.00	87.05	17.41	87.05	17.41

2.3. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

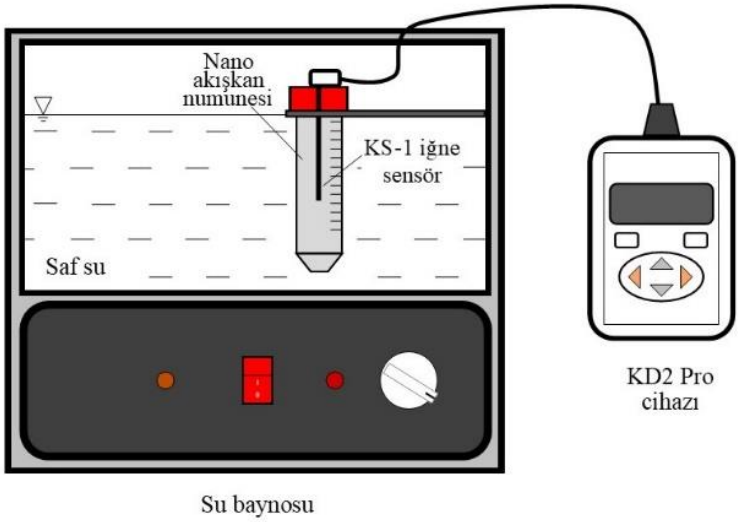
Hazırlanan nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi deney sonuçlarının de değerlendirilmesinde kullanılan boyutsuz parametreler üzerinde etkisi olması sebebiyle oldukça önem teşkil etmektedir. Kullanılan nanoakışkanların yoğunluk ve özgül ısı özellikleri literatürde yer alan Eşitlikler ile hesaplanarak; ısıl iletkenlik ve viskozite ise ölçüm cihazları kullanılarak ölçülerek belirlenmiştir. Bu özellikler farklı sıcaklıklar için belirlendikten sonra, sıcaklığa bağlı bağıntılar geliştirilmiştir. Bu bağıntılarda MATLAB da yazılan kod içerisine gömülerek, termofiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı değişmesi sağlanmıştır.

2.3.1. Yoğunluk ve özgül ısı

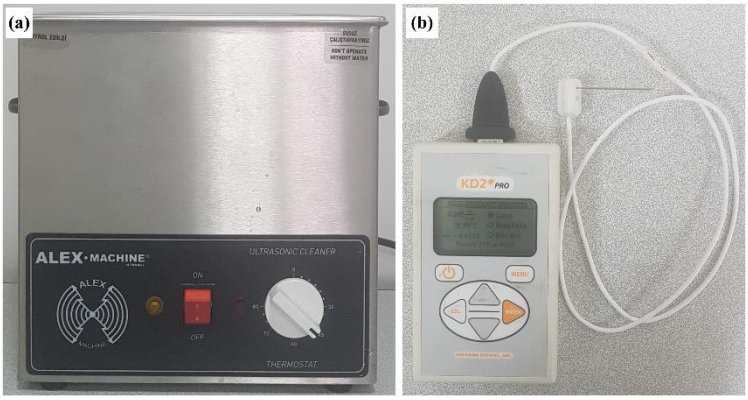
Nanoakışkan yoğunluğu ve özgül ısısı literatürde yaygın şekilde sırasıyla Eşitlik 1.2 ve Eşitlik 1.4 kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada φ nano partiküllerin akışkan içerisindeki hacimsel oranını ifade etmektedir. Çalışma kapsamında ağırlıksal oran baz alındığından dolayı, ağırlıksal oranlar Eşitlik 2.2 ile hacimsel orana dönüştürülmüştür.

2.3.3. Isıl iletkenlik

Isı değiştiricilerinde nanoakışkan kullanımı, ısı transferi performansını akışkanın ısıl iletkenliğini iyileştirilmesine dayalı olduğundan akışkanların ısıl iletkenlik özellikleri ölçümü oldukça önem arz etmektedir. Şekil 2.15'te şematik yapısı gösterildiği gibi, nanoakışkan numunesi saf su ile çalıştırılan ultrasonik banyonun içerisine daldırılmaktadır. 4 litre hacminde, 320 W ısıtma gücüne, 80°C ye çıkabilme kapasitesine ve 32±5 kHz frekansına sahip Alex marka ultrasonik banyo (Şekil 2.16a) kullanılmıştır. Ultrasonik banyo sayesinde, numunenin sıcaklığı sabit olacak şekilde farklı sıcaklıklara ayarlanabilmektedir. Numune içerisinde KD2 Pro cihazının KS-1 iğne sensörü (Şekil 2.16b) daldırılarak ısıl iletkenlik özelliği ölçümü yapılmıştır. KD2 Pro cihazı -50°C ve +150°C sıcaklıkları aralığında %5 doğrulukta, 0.2-2.0 W/mK aralığında ölçüm yapabilmektedir. Her bir sıcaklık için ölçümler 5 kez tekrarlanıp ölçülen değerlerin ortalama değerleri alınmıştır. Ölçülen ısıl iletkenlik değerleri için her bir ağırlıksal oran göre sıcaklığa bağlı bağıntılar geliştirilmiştir.



Şekil 2.15. Şematik olarak ısıl iletkenlik ölçüm sistemi



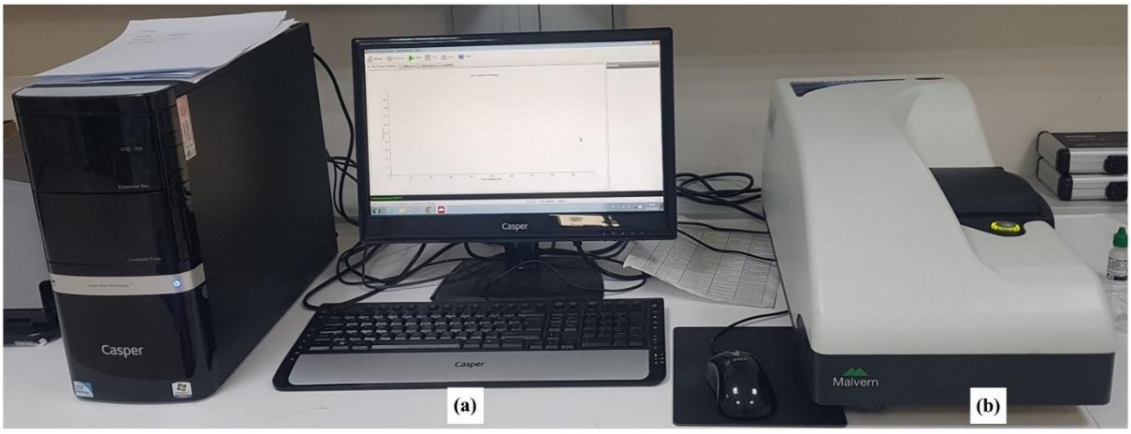
Şekil 2.16. a) Ultrasonik banyo, b) KD2 Pro ısıl iletkenlik ölçüm cihazı

2.3.4 Viskozite

Baz akışkanlardan suyun viskozite değerleri Çengel ve John [143], Su:EG karışımının viskozite değerleri ise ASHRAE [16] kaynağından alınmıştır. Nanoakışkanların viskozite değerleri ise Batchelor modeli [82] (1.11) kullanılarak hesaplanmıştır.

2.4. Nanoakışkanların kararlılığının değerlendirilmesi

Hazırlanan nanoakışkanların kararlılık seviyeleri için çökelme durumları gözlemlenerek ve numunelerin zeta potansiyel ve boyut analizi ölçümleri yapılarak değerlendirilmiştir. Hazırlanan numunelerin zeta potansiyel ve boyut analizi ölçümleri Erciyes Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (ERNAM) hizmet alımı şeklinde yapılmıştır. Zeta potansiyel ve boyut analizi ölçümleri Şekil 2.17'de gösterilen Malvern marka Zetasizer cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.17. ERNAM da yer alan a) bilgisayar ve b) Zetasizer cihazı

2.5. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında sabit ısı akısı ile ısıtılmakta olan bir ısı değiştiricisi borusu içerisine yerleştirilen bükülmüş levhaların baz akışkan olarak su ve hacimsel 40:60 oranında su-EG karışımı içerisine ağırlıkça %0.25-%1.0 aralığında TiO_2 nano partikül eklenmesinin ısı transferi ve hidrolik performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Boru içi akış, türbülanslı akış karakteristiğine sahiptir.

Deney çalışmalarının doğruluğunun gösterilmesi açısından literatürde yer alan boyutsuz Eşitlikler kullanılmaktadır. Isı transferi açısından Nusselt sayısı (Nu) boyutsuz sayısı kullanılmaktadır. *Nu* yüzey ile akışkan arasında gerçekleşen ısı transferinde taşınım ile ısı transferinin iletimle ısı transferine oranını ifade etmektedir. Literatürde boş boru için *Nu,* Reynolds (*Re*) ve Prandtl (*Pr*) sayılarına bağlı bağıntılar mevcuttur. *Re* akışkanda atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını ifade ederken, *Re* arttıkça türbülans şiddeti artmaktadır. Pr ise akışkanın momentum yayılımının ısıl yayınımına oranı ifade eder. Başka bir ifadeyle, *Pr* viskoz ve ısıl sınır tabakaların kalınlıkların bağıl olarak büyüklüğünü gösterir. Akışkanların *Pr* değeri 1 den büyükse, viskoz sınır tabaka kalınlığı ısıl sınır tabakasına göre büyüktür demektir [146]. Literatürde pürüzsüz dairesel boru içi tam gelişmiş türbülanslı akışta boş boru için verilen *Nu* bağıntıları Tablo 2.4 de verilmiştir.

Tablo 2.4. Türbülanslı boru içi akışta *Nu* bağıntıları

Eşitlik adı	Bağıntı	Geçerli koşullar	Eşitlik no
Dittus ve Boelter [147]	$Nu = 0.023{Re_D}^{0.8}Pr^n$	$0.6 \leq Pr \leq 160$ $Re \geq 10{,}000$ n=0.3 (soğutma) n=0.4 (ısıtma) $\frac{L}{D} \geq 10$	(2.6)
Gnielinski [148]	$Nu = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$	$0.5 \leq Pr \leq 2000$ $3000 \leq Re_D$ $\leq 5x10^6$ $\frac{L}{D} \geq 10$	(2.7)

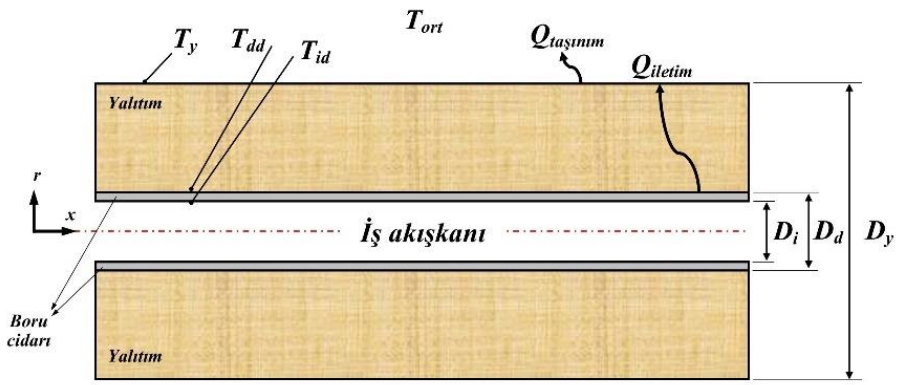
Tablo 2.5. Türbülanslı boru içi akışta *f* bağıntıları

Eşitlik adı	Bağıntı	Geçerli koşullar	Eşitlik no
Moody [149]	$f = 0.316{Re_D}^{-0.25}$	$Re_D \leq 2x10^4$	(2.8)
	$f = 0.184{Re_D}^{-0.20}$	$2x10^4 \leq Re_D$	(2.9)
Petukhov [150]	$f = (0.79lnRe_D - 1.64)^{-2}$	$3000 \leq Re_D \leq 5x10^6$	(2.10)

Deneysel çalışma sonuçlarının değerlendirilebilmesi için basınç düşümü açısından da doğrulanması gerekmektedir. Basınç düşümü açısından kullanılan boyutsuz sayı sürtünme faktörüdür (*f*). Sürtünme faktörü sadece *Re* a bağlı bir boyutsuz sayıdır. Sürtünme faktörü ile ilgili literatürde yer alan ve sıklıkla kullanılan Eşitlikler Tablo 2.5 de verilmiştir.

2.5.1. Nusselt sayısının hesaplanması

Nusselt sayısı ısıl sistemlerin ısı transferi performansını gösteren bir boyutsuz sayı olmasından dolayı, ısı transferini etkileyen tüm parametrelerin hesaplanması gerekmektedir. Sabit ısı akısı ile ısıtılan test borusu her ne kadar taş yünü malzeme ile yalıtılmış olsa da bir miktar test borusundan çevreye ısı kaybı olabilir. Bu ısı kaybı literatürde %2-3 olarak varsayıldığı görülse de bu tez çalışmasında hesaplanmıştır. Test borusunun kesit görüntüsü Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Test borusu kesit görüntüsü

Test borusundan ortama olan ısı kaybı Şekil 2.18'de gösterildiği gibi iletim ve taşınımdan oluşmaktadır. D_y yüzeyinde oluşan sınır şartı gereği Eşitlik 2.11a elde edilmektedir. Bu ifade açıldığında Eşitlik 2.11b elde edilir. Eşitlikte T_y ve h_{ort} bilinmediğinden ve daha sonraki eşitliklerde havanın termofiziksel özelliklerinin bağlı olduğu T_f sıcaklığı da T_y e bağlı olduğundan dolayı, T_y'na tahmini değer atanarak iteratif çözüm yapılmıştır. Isı taşınım katsayısı h_{ort} hesaplanabilmesi için de silindir üzeri doğal taşınımla ısı transferi veren ve Rayleigh sayısının (*Ra*) 10^3-10^6 arasında olduğu Eşitlik 2.12 bağıntısı kullanılmıştır. *Ra,* Grashof (Gr) (Eşitlik 2.13) ve ortamın Prandtl sayısının (Pr_{ort}) çarpımına eşittir. Eşitliklerde "ort" indisi hava olan ortamı temsil etmektedir. Havaya ait termofiziksel özellikler yalıtım yüzey sıcaklığı ve ortamın sıcaklığının ortalaması olan film sıcaklığına (T_f) göre alınmıştır (Eşitlik 2.14). β $[K^{-1}]$ ısıl genleşme katsayısıdır (Eşitlik 2.16).

$$\dot{Q}_{iletim} = \dot{Q}_{taşınım} \tag{2.11a}$$

$$\frac{T_{dd} - T_y}{\frac{ln(D_y/D_d)}{2\pi k_y L}} = \frac{T_y - T_{ort}}{\frac{1}{h_{ort}\pi D_y L}} \tag{2.11b}$$

$$Nu_{doğ} = 0.48Ra^{0.25} \tag{2.12}$$

$$Ra = Gr.Pr_{ort} \tag{2.13}$$

$$Gr = \frac{\rho_{ort}\beta(T_y - T_{ort}){D_y}^3}{{\vartheta_{ort}}^2} \tag{2.14}$$

$$T_f = \frac{T_y + T_{ort}}{2} \tag{2.15}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f + 273} \tag{2.16}$$

$$h_{ort} = k_{ort}\frac{Nu_{doğ}}{D_y} \tag{2.17}$$

Eşitlik 2.17 ile h_{ort} ın hesaplanmasıyla Eşitlik 2.18 de verilen kaybedilen ısı miktarı hesaplanabilmektedir.

$$\dot{Q}_{kayıp} = \frac{(T_{dd} - T_{ort})}{\frac{ln(D_y/D_d)}{k_y 2\pi L} + \frac{1}{h_{ort}\pi D_y L}} \tag{2.18}$$

Test borusuna verilen net güç (P_{net}), Eşitlik 2.19 de verildiği gibi verilen elektrik gücü ile kaybolan ısı miktarı arasındaki fark kadardır. Verilen elektrik gücü potansiyel voltaj farkı ile akım şiddetinin çarpımı kadardır. Test borusundan akışkana aktarılan ısı akısı Eşitlik 2.20 ile hesaplanmıştır. Test borusu boyunca ısıl eleman çiftlerinin yerleştirildiği noktalarda yerel ısı taşınım katsayısı Eşitlik 2.21 ile hesaplanmıştır. Eşitlik 2.21 de yerel ortalama akışkan sıcaklığı Eşitlik 2.25 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{P}_{net} = \Delta V . I - \dot{Q}_{kayıp} \tag{2.19}$$

$$q" = \frac{\dot{P}_{net}}{\pi D_i L} \tag{2.20}$$

$$h(x) = \frac{q"}{T_{id}(x) - T_b(x)} \tag{2.21}$$

Akışı ve sınır tabakaları bozmaması ve uygulama açısından sızıntı problemi olmaması için, ısıl eleman çiftleri boru dışına bağlanmıştır. Ancak, Eşitlik 2.21 de göründüğü üzere iç duvar sıcaklığının (T_{id}) bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, silindirik eleman üzerinde radyal yönde ısı iletimi çözümü yapılarak T_{id} hesaplanmıştır (Eşitlik 2.22). Burada P_v test borusunda hacim başına düşen elektrik gücünü temsil edip Eşitlik 2.23 ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(rk_t\frac{dT}{dr}\right) = -P_v \tag{2.22}$$

$$P_v = \frac{P_{net}}{\pi\left(\frac{{D_d}^2 - {D_i}^2}{4}\right)L} \tag{2.23}$$

Eşitlik 2.22, aşağıda verilen üç sınır şartı ile çözülerek Eşitlik 2.24 elde edilen T_{id} sıcaklığı hesaplanmaktadır.

i) $\boldsymbol{r = r_d \rightarrow -k_t \frac{dT}{dr} = 0}$

ii) $\boldsymbol{r = r_d \rightarrow T = T_{dd}}$

iii) $\boldsymbol{r = r_i \rightarrow T = T_{id}}$

$$T_{id}(x) = T_{dd} - \frac{P_v {D_d}^2}{k_t}\left[ln\left(\frac{D_d}{D_i}\right)^2 + \left(\frac{D_i}{D_d}\right)^2 - 1\right] \tag{2.24}$$

Eşitlik 2.21 deki ortalama akışkan sıcaklığının $\left(T_b(x)\right)$ hesaplanması için Δx uzunluğundaki bölge için enerji dengesi yazılarak Eşitlik 2.25 ile hesaplanmaktadır.

$$T_b(x) = T_b(x - \Delta x) + \frac{\dot{P}_{net}\Delta x}{\dot{m}c_p L} \tag{2.25}$$

Son olarak yerel Nusselt sayısı $\left(Nu(x)\right)$, Eşitlik 2.26 ile hesaplanmaktadır.

$$Nu(x) = \frac{h(x)D_i}{k_f} \tag{2.26}$$

2.5.2. Sürtünme faktörü hesaplanması

Sürtünme faktörü (*f*), test borusunun giriş ve çıkışındaki basınç prizlerinden basınç düşümünün (ΔP) ölçülmesiyle Eşitlik 2.27 ile hesaplanır. Eşitlikte ρ_f ve U_m sırasıyla iş akışkanının yoğunluğunu ve test borusu boyunca ortalama hızı temsil etmektedir.

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho_f {U_m}^2 \frac{L}{D_i}} \tag{2.27}$$

2.5.3. Performans kriteri

Isı değiştiricilerinde ısı transferini iyileştiren yöntemler (iç eleman ve nanoakışkan kullanımı) aynı zamanda basınç düşümünü de arttırmaktadır. Dolayısıyla ısıl olarak iyileştirme yapılırken hidrolik olarak kayıplar artmaktadır. Sabit pompalama gücü referans alınarak, bu iki sonucu aynı anda değerlendirmek ısıl-hidrolik performans

kriteri (*THP*) ile mümkün olmaktadır. Eşitlik 2.28-2.31 ile *THP* hesaplanabilmektedir. Eşitliklerde kullanılan *0* ve *T* indisleri sırasıyla, herhangi bir teknik kullanılmayan (boş boru ve baz akışkan) çalışmayı ve iç eleman ve/veya nanoakışkan kullanıldığı çalışmayı temsil etmektedir.

$$\left(\dot{V}\Delta P\right)_0 = \left(\dot{V}\Delta P\right)_T \tag{2.28}$$

$$(fRe^3)_0 = (fRe^3)_T \tag{2.29}$$

$$Re_0 = Re_T(f_T/f_0)^{1/3} \tag{2.30}$$

$$THP = \left.\frac{h_T}{h_0}\right|_{pp} = \left.\frac{Nu_T}{Nu_0}\right|_{pp} = \left(\frac{Nu_T}{Nu_0}\right)\left(\frac{f_T}{f_0}\right)^{-1/3} \tag{2.31}$$

2.6. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazların doğruluk ve hassasiyet payları olması sebebiyle, deney sonuçlarının da hata payı olmaktadır. Deney sonuçlarının hesaplanmasında birden fazla cihaz ve ölçüm kullanılıyor ise, sonuca etkiyen tüm bu parametrelerin analizi yapılmalıdır. Bu işleme belirsizlik analizi denmektedir. Bu tez çalışmasında deney sisteminin belirsizlik analizi Kline ve McKlinctock [151] tarafından önerilen yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Sistemde etkisi olan ve ölçülen parametre *R* nin *n* adet bağımsız değişkeni olabilir (Eşitlik 2.33). *R* parametresinin bağımsız değişkenlerin hata oranları W_1, W_2, W_3 … W_n şeklinde temsil edilerek, *R* parametresinin belirsizlik analizi 2.34 ile hesaplanmaktadır. Deneylerin sonuçları hesaplanırken kullanılan parametreler için hata oranları Tablo 2.6 da verilmiştir. Belirsizlik analizi sonuçları Tablo 2.7 verilmiş olup, güvenilir hata değerleri içinde olduğu görülmüştür.

$$R = R(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \tag{2.32}$$

$$W_R = R\left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1}W_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2}W_2\right)^2 + \cdots \left(\frac{\partial R}{\partial x_n}W_n\right)^2\right]^{1/2} \tag{2.33}$$

Tablo 2.6. Kullanılan parametrelerin ölçüm cihazları ve hata oranları

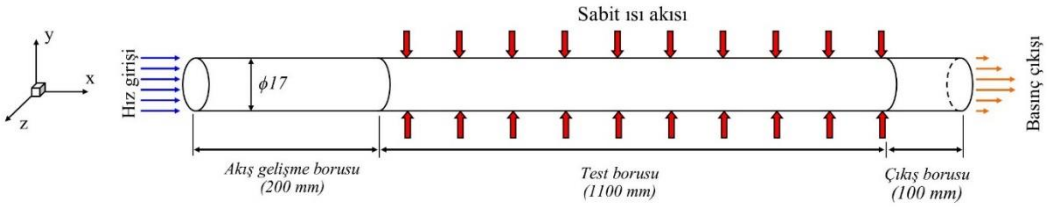
Parametre	**Ölçüm cihazı**	**Birim**	**Hata oranı [%]**
Sıcaklık	K-tipi ısıl eleman çifti	^{0}	$\pm$ 0.75
Uzunluk	Kumpas	m	$\pm$ 0.5
Voltaj	Avometre	V	$\pm$ 3
Akım	Akım transformatörü	A	$\pm$ 2
Basınç farkı	Fark basınç transmitteri	Pa	$\pm$ 0.25
Hacimsel debi	Debi ölçer	m^3/h	$\pm$ 0.5
Isıl iletkenlik	KD2 Pro cihazı	W/mK	$\pm$ 5
Viskozite	MRC VIS-8	kg/ms	$\pm$ 1

Tablo 2.7. Kullanılan parametrelerin ölçüm cihazları ve hata oranları

Hesaplanan parametre	**Belirsizlik oranı [%]**
Reynolds sayısı (*Re*)	$\pm$ 1.58
Nusselt sayısı (*Nu*)	$\pm$ 6.8
Sürtünme faktörü (*f*)	$\pm$ 2.36
Termohidrolik performans kriteri (*THP*)	$\pm$ 0.955

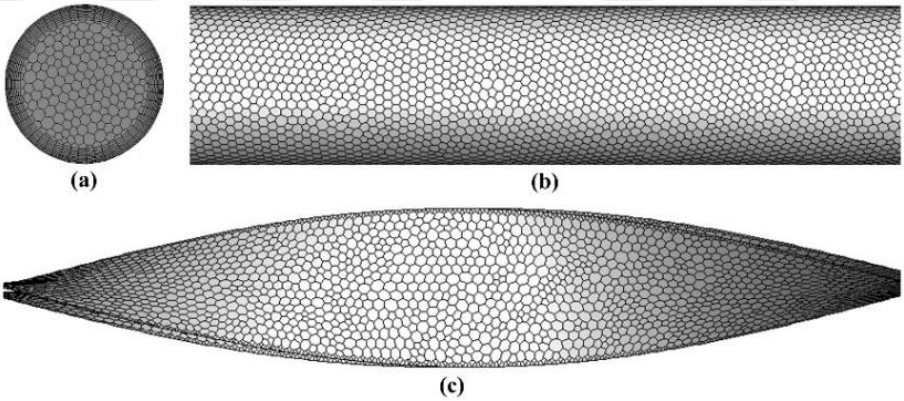
2.7. Sayısal Analiz

Çalışma kapsamında deneyleri gerçekleştirilen boru içerisine BL'ların akış karakteristiklerinin incelenebilmesi için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.19'da oluşturulan akış bölgesinin sayısal analiz modeli şematik olarak gösterilmiştir. Sayısal analiz modeli, deney düzeneğinde olduğu gibi akış gelişmesi borusu, sabit ısı akısı ile ısıtılan test borusu ve çıkış borusu olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Boru çapı deney düzeneğinde olduğu gibi boru iç çapları 17 mm olarak seçilmiştir. Türbülanslı akışta akış gelişme bölgesi uzunluğu en az çapın 10 katı olması gerektiğinden 200 mm olarak belirlenmiştir. Test borusu uzunluğu deney düzeneğinde olduğu gibi 1100 mm olarak belirlenmiştir. Çıkış borusu BL yüzünden bozulacak akışın çıkışta ters akış (reverse flow) hatası vermemesi için 100 mm uzunluğunda belirlenmiştir. Sabit ısı akısı 50 kW/m^2 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.19. Sayısal analizde kullanılan modelin şematik görünümü ve boyutları

Boru içi akış, iş akışkanının türünden ziyade iç eleman türüne göre karakteristik yapıda olacağından analizler iş akışkanı olarak su ile yapılmıştır. Analizler, suya ait ısıl ve fiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değiştiği dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Analizler 5000-25000 Reynolds sayısı arasında gerçekleştirilmiştir. Çözüm metodu olarak SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) Türbülans modeli olarak *k-ε* RNG (Re-Normalization Group) seçilmiştir. Enerji denklemi, süreklilik denklemindeki parametreler ve türbülans modeli katsayıları için yakınsama kriteri en az 10^{-6} olarak seçilmiştir.



Şekil 2.20. Sayısal analizde kullanılan ağ yapılarının görüntüleri (a) Boru kesiti, b) boru yüzeyi ve c) BL yüzeyi)

Sayısal analizin sonuçları üzerinde hücre sayısının etkisinin olmadığı ağ yapısının seçilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda ağ bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. Ağ bağımsızlığı çalışması sonucunda seçilen ağ yapısına ait görüntüler Şekil 2.20'de gösterilmiştir.

3. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1.Nanoakışkanların Hazırlanması

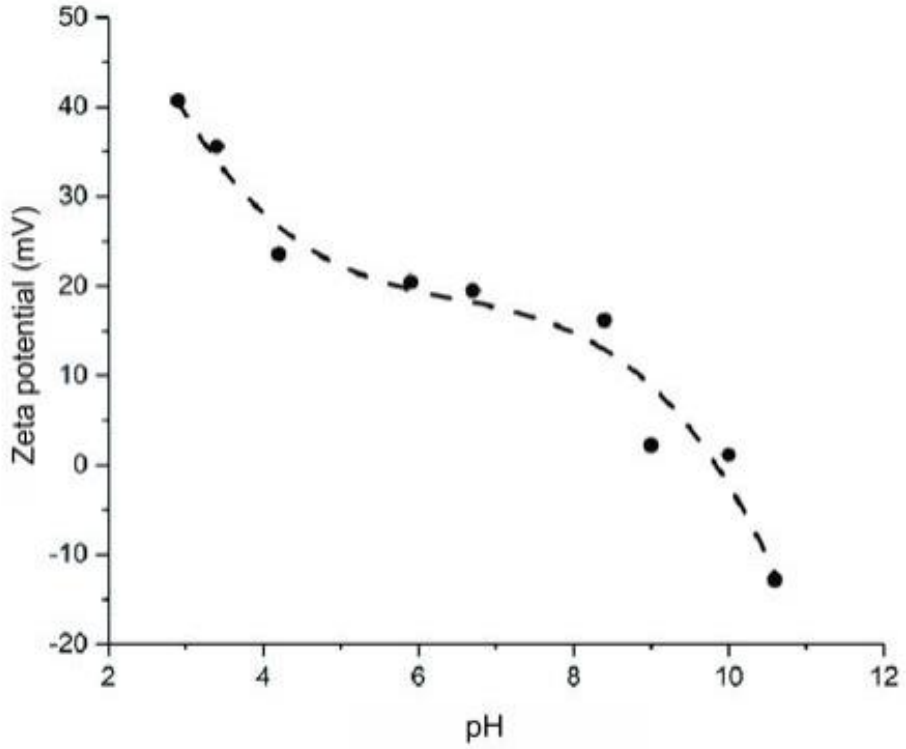
Tez çalışması kapsamında baz akışkan olarak su ve hacimsel oranı 40:60 olan Su:EG karışımlarına Al_2O_3 ve TiO_2 nano partikülleri katılarak nanoakışkan elde edilmiştir.

3.1.1. Al_2O_3 Nano Partikülü ile Nanoakışkanın Hazırlanması

İlk olarak baz akışkan olarak su içerisine Nanografi firmasından alınan 78nm çapındaki Al_2O_3 nano partikülleri katılarak nanoakışkan elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda yeterli homojen ve kararlı yapıda Su- Al_2O_3 nanoakışkanı elde edilmesinde zorluklar yaşanmıştır. Yapılan ilk çalışmalarda Su-Al_2O_3 nanoakışkanı 12 saat bile çökelmeden homojen bir şekilde kalamamıştır. Partikül çapı düştükçe çökelme süresinin arttığı bilgisiyle, nano partikül boyutları 48nm, 18nm ve 4nm olan olacak şekilde farklı partiküller denenmiştir. Ancak çok fazla olumlu netice alınamamıştır. Nanoakışkan kararlılığını ve çökelme süresini arttırmada kullanılan yüzey aktif madde ekleme metodu da kullanılmıştır. Al_2O_3 için önerilen en uygun yüzey aktif madde olan SDS ve SDBS kullanılmasına rağmen istenilen derecede olumlu bir sonuç görülememiştir. Bu durumda farklı yüzey aktif maddeler olan Triton-X100 ve CTAB de kullanılmıştır. Ancak çökelme açısından herhangi bir farklılık gözlemlenememiştir. Tüm bu çalışmalar birçok farklı mekanik karıştırma süresi, farklı ultrasonik karıştırma süresi ve gücü ve farklı yüzey aktif madde miktarları için gerçekleştirilmiştir.

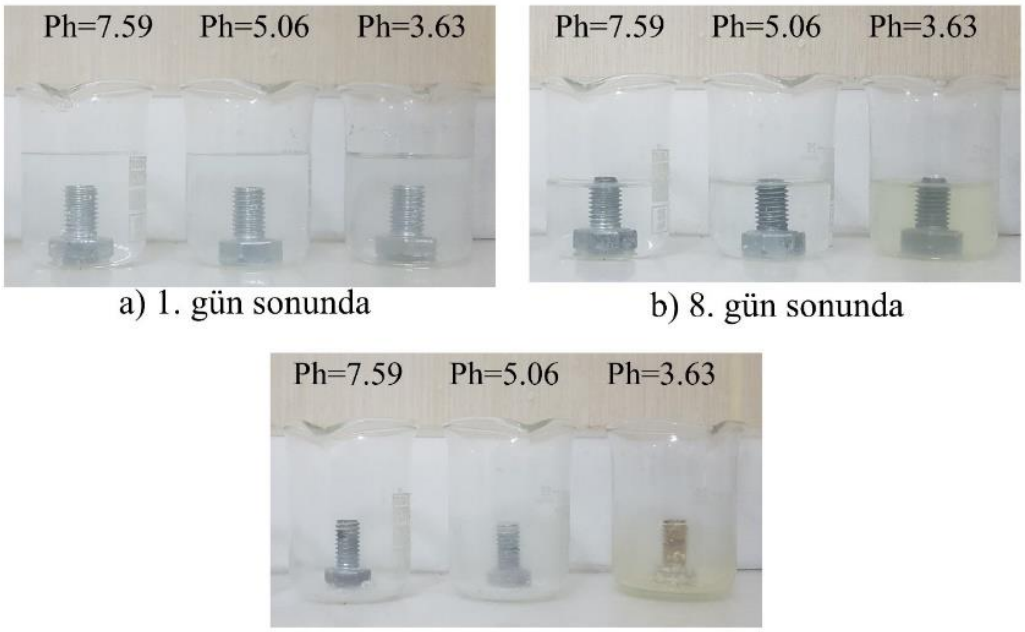
Literatürde nanoakışkan kararlılığını iyileştirmede kullanılan pH seviyesi ayarlama metodu da denenmiştir. Ürünün satın alındığı firma ile iletişime geçildiğinde nanoakışkanın pH seviyesi 3 civarında olduğunda kararlılık sağlanılabildiği öğrenilmiştir. Literatür incelendiğinde de çok düşük pH seviyelerinde zeta potansiyelin 40 seviyelerinde olduğu görülmüştür [152, 153]. Firmanın verdiği zeta potansiyel

değerinin pH seviyesiyle değişimi Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, kararlı denebilecek zeta potansiyel değeri olan 40 mV seviyeleri ancak pH 3 seviyesinde elde edilmiştir.



Şekil 3.1. Al_2O_3-Su nanoakışkanının pH seviyesine göre zeta potansiyel değişimi

Bu bilgiyle, baz akışkan olarak suya nitrik asit katarak pH seviyesi yaklaşık 3.63 seviyesine getirildiğinde 6 gün çökeleme durumu gözlemlenmeden Al_2O_3-Su nanoakışkanı elde edilebilmiştir. Ancak, yüksek asidik özellik metal parçalarda korozyona sebep olmaktadır. Al_2O_3-Su nanoakışkanın bir cıvata üzerindeki korozif etkisi, Şekil 3.2'de zamana göre gösterilmiştir. Deney düzeneğinde metal parçalara ve cihazlara (boru, pompa ve debi ölçer gibi) zarar vereceğinden dolayı deneylerde Al_2O_3 nano partikülü kullanılmamıştır.



a) 1. gün sonunda b) 8. gün sonunda

c) 15. gün sonunda

Şekil 3.2. Al_2O_3-Su nanoakışkanın pH seviyesinin korozif etkisi

3.1.2. TiO_2 Nano Partikülü ile Nanoakışkanın Hazırlanması

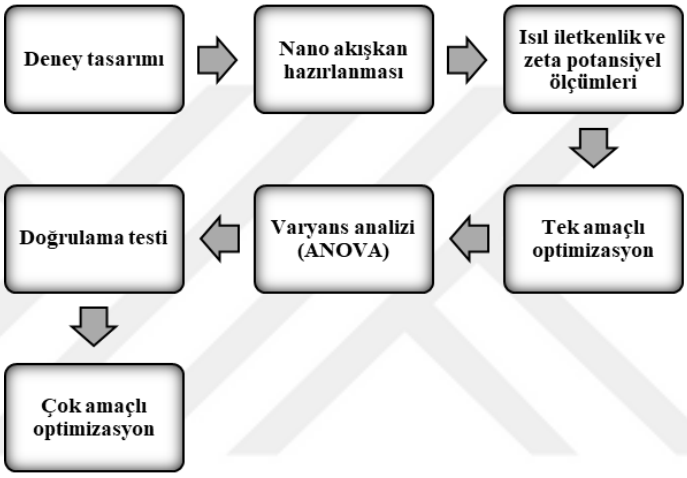
Al_2O_3 nano partikülü ile hazırlanan nanoakışkanın deney düzeneğinde kullanılmamasına karar verildikten sonra TiO_2 nano partikülü ile nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Yapılan ilk çalışmalarda pH seviyesi ayarlanmadan ve yüzey aktif madde olarak CTAB kullanılmasıyla 3 hafta çökelmeden kararlı halde TiO_2-Su nanoakışkanı hazırlanabilmiştir. Bu motivasyon ile en uygun nanoakışkan hazırlama yönteminin belirlenmesi için optimizasyon çalışması yapılmıştır.

3.1.3. Nanoakışkan Hazırlama Sürecinin Optimizasyonu

Nanoakışkan hazırlanırken eklenen yüzey aktif madde miktarının artması, kararlılığı olumlu yönde etkilerken; ısıl iletkenlik özelliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca nanoakışkan hazırlanırken, kullanılan karıştırma yöntemlerinin süresi ve karıştırıcı gücü de bu iki özellik üzerinde etkilidir. Bu yüzden, ısıl iletkenlik ve kararlılığa etkileri olan bu karıştırma işlemi parametrelerinin seçiminde optimizasyon çalışması yapılması gerekmektedir.

3.1.3.1 Taguchi Yöntemi

Taguchi yöntemi kullanılarak yürütülen optimizasyon işlemi adımları Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Nanoakışkan hazırlama sürecinde etkisi olan faktörler mekanik karıştırma süresi, ultrasonik karıştırma süresi, yüzey aktif madde / nano partikül oranı (Yam/Np) ve ultrasonik gücü olarak seçilmiştir. Seçilen faktörler ve seviyeleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Karışım işlemlerinin çok fazla zaman almaması açısından ultrasonik karıştırıcının en az hacim kapasitesi olan 0.5 litrelik karışımlar hazırlanmıştır.



Şekil 3.3. Nanoakışkan hazırlama sürecinin optimizasyon işlem adımları

Tablo 3.1. Nanoakışkan karıştırma yönteminde seçilen faktörler ve seviyeleri

Faktörler	**Seviyeler**			
	1	**2**	**3**	**4**
A – Mekanik karıştırma süresi (dk)	5	10	15	20
B – Ultrasonik karıştırma süresi (dk)	15	30	45	60
C – Yam/Np	1 / 10	2 / 10	3 / 10	4 / 10
D – Ultrasonik gücü (W)	60	80	100	120

Nanoakışkan karıştırma işleminde 4 faktör ve 4 seviye bulunduğundan dolayı yapılması gereken karıştırma kombinasyonu 4^4=256 adettir. Taguchi deney tasarımı bu sistem için L_{16} ortogonal dizgisini önererek 256 karıştırma yerine 16 karıştırma yapılması yeterli olmuştur. Taguchi yönteminin önerdiği 16 deney gerçekleştirilmiş ve ölçülen ısıl iletkenlik özellikleri ve zeta potansiyel değerleri ile birlikte bu sonuçların SNR değerleri Tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.2. L_{16} Deney tasarımı, bu deneylerin ölçümleri ve SNR değerleri

Deney No	Faktörler				Ölçüm		SNR	
	A	B	C	D	Isıl iletkenlik [W/mK]	Zeta potansiyel [mV]	Isıl iletkenlik	Zeta potansiyel
1	1	1	1	1	0.6119	5.4	-4.26639	14.6639
2	1	2	2	2	0.6156	17.0	-4.21403	24.6090
3	1	3	3	3	0.6103	35.9	-4.28913	31.1019
4	1	4	4	4	0.6140	46.7	-4.23663	33.3863
5	2	1	2	3	0.6171	11.5	-4.19289	21.2140
6	2	2	1	4	0.6201	9.9	-4.15077	19.9390
7	2	3	4	1	0.6009	39.8	-4.42396	31.9977
8	2	4	3	2	0.6196	36.5	-4.15777	31.2459
9	3	1	3	4	0.6186	27.7	-4.17180	28.8496
10	3	2	4	3	0.6040	40.3	-4.37926	32.1061
11	3	3	1	2	0.6212	16.3	-4.13537	24.2438
12	3	4	2	1	0.6205	25.8	-4.14516	28.2324
13	4	1	4	2	0.6022	34.1	-4.40518	30.6551
14	4	2	3	1	0.6023	18.4	-4.40374	25.2964
15	4	3	2	4	0.6194	33.0	-4.16058	30.3703
16	4	4	1	3	0.6220	17.6	-4.12419	24.9103

3.1.3.2. Tek Amaçlı Optimizasyon

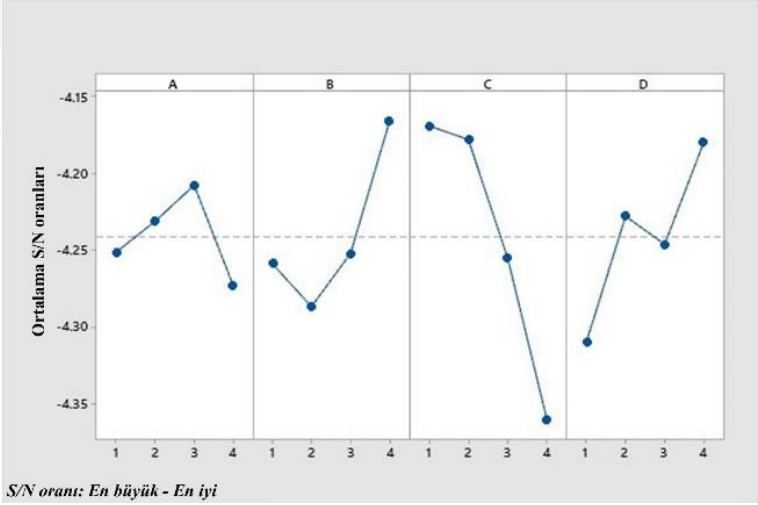
Tek amaçlı optimizasyon, karıştırma yönteminin ısıl iletkenlik ve zeta potansiyel değerleri açısından ayrı ayrı optimizasyonu anlamına gelmektedir. Hem ısıl iletkenlik hem de zeta potansiyel değerleri ne kadar büyük olursa o kadar iyi olduğu için her iki ölçümün optimizasyonu için “En büyük – En iyi” kriteri seçilmiştir. Taguchi analizinin SNR değerleri Tablo 3.2 de gösterilmiştir. Ayrıca ısıl iletkenlik ve zeta potansiyel için ortalama SNR değerleri sırasıyla Tablo 3.3 ve Tablo 3.4 de verilmiştir. Tablo 3.3 ve Tablo 3.4 deki sayısal değerler, daha iyi incelenebilmesi açısından Şekil 3.4’te ve Şekil 3.5’te sırasıyla verilmiştir.

Tablo 3.3'te ve Şekil 3.4'te görüldüğü gibi ısıl iletkenlik açısından en iyi sonucu veren (en yüksek SNR değerlerine sahip olan) parametrelerin oluşturduğu karışım konfigürasyonu A3B4C1D4 (mekanik karıştırma süresinin 15 dk, ultrasonik karıştırma süresinin 60 dk, Yam/Np 1/10 ve ultrasonik gücün 120 W) olarak ortaya çıkmıştır.

Tablo 3.3. Isıl iletkenlik için ortalama SNR değerleri

Faktörler	Seviyeler			
	1	2	3	4
A – Mekanik karıştırma süresi	-4.252	-4.231	-4.208[a]	-4.273
B – Ultrasonik karıştırma süresi	-4.259	-4.287	-4.252	-4.166[a]
C – Yam/Np	-4.169[a]	-4.178	-4.256	-4.361
D – Ultrasonik gücü	-4.31	-4.228	-4.246	-4.18[a]

Ortalama = -4.241 dB.
[a] Optimum seviye.



Şekil 3.4. Isıl iletkenlik için ortalama SNR grafiği

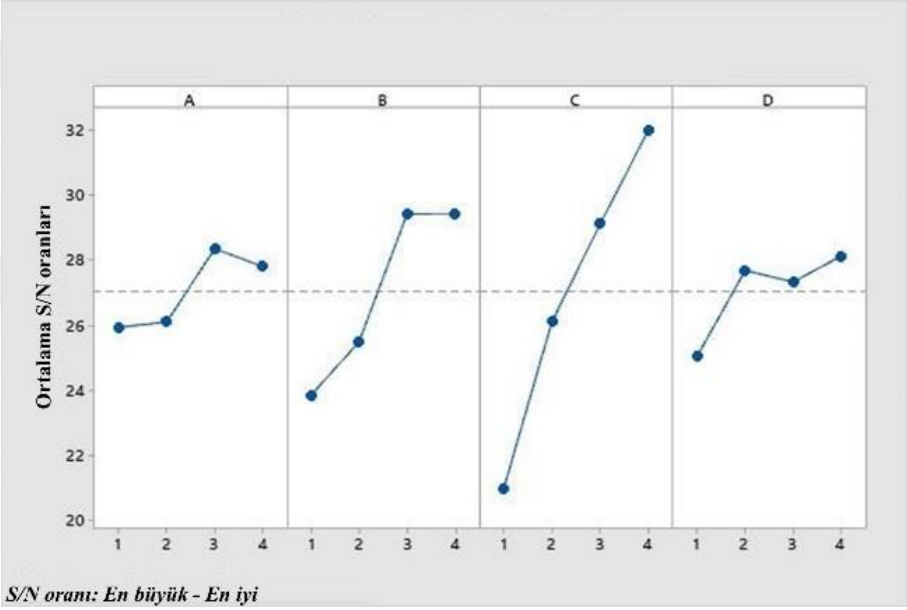
Zeta potansiyel açısından ise en iyi karışım konfigürasyonu, Tablo 3.5'te ve Şekil 3.4'te görüldüğü gibi A3B4C4D4 (mekanik karıştırma süresinin 15 dk, ultrasonik karıştırma süresinin 60 dk, Yam/Np 4/10 ve ultrasonik gücün 120 W) olarak ortaya çıkmıştır.

Tablo 3.4. Zeta potansiyel için ortalama SNR değerleri

Faktörler	**Seviyeler**			
	1	**2**	**3**	**4**
A – Mekanik karıştırma süresi	25.94	26.10	28.36[a]	27.81
B – Ultrasonik karıştırma süresi	23.85	25.49	29.43	29.44[a]
C – Yam/Np	20.94	26.11	29.12	32.04[a]
D - Ultrasonik gücü	25.05	27.69	27.33	28.14[a]

Ortalama = 27.0525 dB.

[a] Optimum seviye.



Şekil 3.5. Zeta potansiyel için ortalama SNR grafiği

3.1.3.3. Varyans Analizi

Nanoakışkan karıştırmada kullanılan yöntemlerin ısıl iletkenlik ve zeta potansiyel değerlerine etkilerinin incelenmesi için ANOVA kullanılmıştır. ANOVA %95 güvenirlik bandı içinde yapılmıştır. Isıl iletkenlik açısından ANOVA sonuçları Tablo 3.5 de verilmiştir.

Tablo 3.5. Isıl iletkenlik açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	3	0.009405	0.003135	23.35[a]	9.28	5.46
B	3	0.032794	0.010931	81.4[a]	9.28	19.03
C	3	0.095128	0.031709	236.12[a]	9.28	55.19
D	3	0.034635	0.011545	85.97[a]	9.28	20.09
Hata	3	0.000403	0.000134			0.94
Toplam	15	0.172365				

[a] %95 güvenilirlik

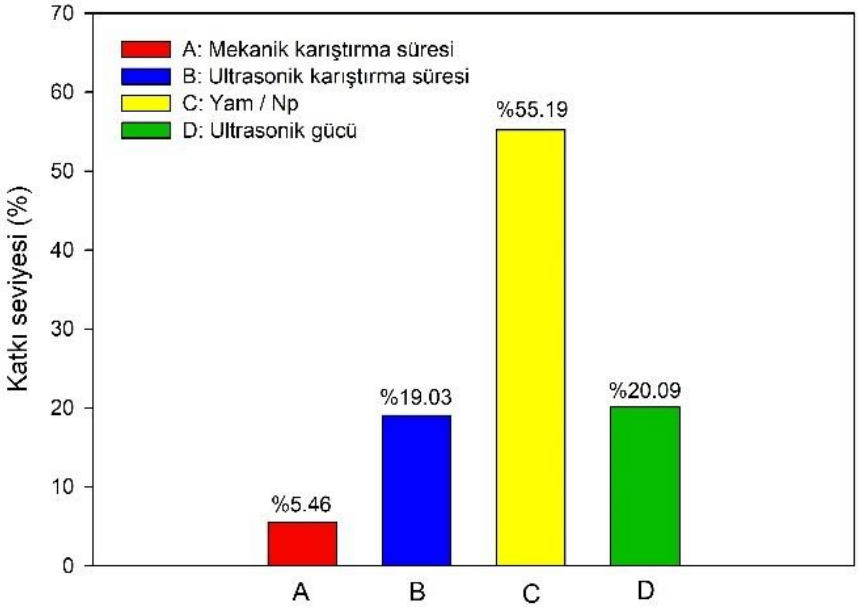
ANOVA sonuçları incelendiğinde, ısıl iletkenlik için tüm faktörlerin F-test değerleri $F_{0.05}$ değerinden yüksek olduğu için %95 güven aralığı içindedir. Nanoakışkan karıştırma sürecindeki faktörlerin ısıl iletkenliğe olan bağıl katkı seviyesi % olarak Tablo 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Isıl iletkenliğe en fazla etkisi olan faktör %55.19 ile Yam/NP oranı olduğu ortaya çıkmıştır. Yam/Np yi sırasıyla %20.09 ile ultrasonik gücü, %19.03 ile ultrasonik karıştırma süresi ve %5.46 ile mekanik karıştırma süresi takip etmektedir.

Zeta potansiyel açısından ANOVA sonuçları Tablo 3.6 da verilmiştir. Zeta potansiyel üzerinde ultrasonik karıştırma süresi ve Yam/NP oranının etkileri %95 güven aralığı içindedir. Şekil 3.7'de karıştırma faktörlerin katkı seviyeleri grafiksel olarak verilmiştir. Zeta potansiyel üzerinde etkisi olan faktör %65.37 ile Yam/Np oranı olduğu ortaya çıkmıştır. Yam/Np oranını sırasıyla %23.37 ile ultrasonik karıştırma süresi, %5.51 ile ultrasonik karıştırma gücü ve %4.29 ile mekanik karıştırma süresi takip etmektedir.

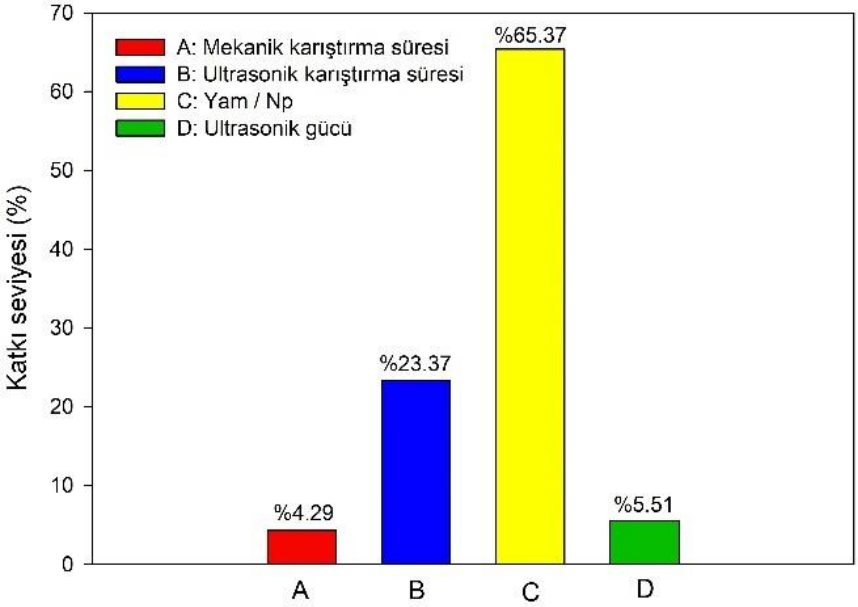
Tablo 3.6. Zeta potansiyel açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	3	17.684	5.895	2.92	9.28	4.29
B	3	96.382	32.127	15.93[a]	9.28	23.37
C	3	269.576	89.859	44.57[a]	9.28	65.37
D	3	22.710	7.570	3.75	9.28	5.51
Hata	3	6.049	2.016			1.47
Toplam	15					

[a] %95 güvenilirlik



Şekil 3.6. Faktörlerin ısıl iletkenlik üzerindeki katkı seviyeleri



Şekil 3.7. Faktörlerin zeta potansiyel üzerindeki katkı seviyeleri

3.1.3.4. Doğrulama Testi

Tek amaçlı optimizasyon sonuçları kullanılarak, yapılan optimizasyon işleminin doğruluğu test edilmiştir. Başlangıç parametreleri için ortogonal dizideki en yüksek SNR değerine sahip parametreler seçilmiştir. Tahmin edilen optimum parametreler ise Taguchi analizinin gösterdiği en yüksek SNR değerine sahip olan parametrelerdir.

Tahmin edilen parametreler ile karışım hazırlanarak, bu karışımların ısıl iletkenlik ve zeta potansiyel ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler ile tahmin edilen değerler arasındaki fark ne kadar az ise optimizasyon işlemi o kadar doğru demektir. Tablo 3.7 de görüldüğü üzere tahmin edilen ile yapılan karıştırma deneyinin ısıl iletkenlik değerleri arasındaki fark %0.78 hatayla yeterli doğrulukta odluğu sonucu görülmüştür.

Tablo 3.7. Isıl iletkenlik için doğrulama testi sonuçları

	Başlangıç parametreleri	**Optimum parametreler**	
		Tahmin	**Deney**
Seviye	A4B4C1D3	A3B4C1D4	A3B4C1D4
Isıl iletkenlik	0.6105	0.630825	0.6259
SNR (dB)	-4.1242	-4.000	-4.0699

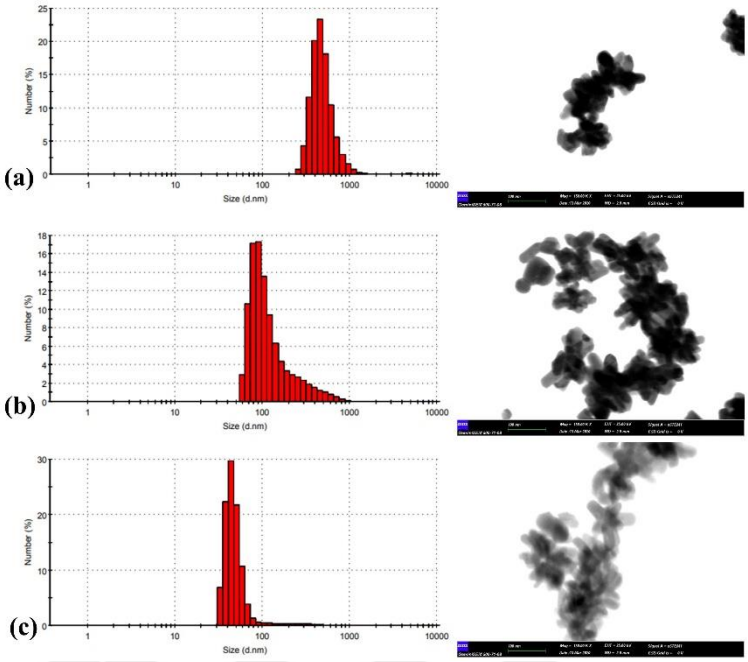
Isıl iletkenlik için geliştirilen SNR = 0.0543 dB.

Tablo 3.8. Zeta potansiyel için doğrulama testi sonuçları

	Başlangıç parametreleri	**Optimum parametreler**	
		Tahmin	**Deney**
Seviye	A1B4C4D4	A3B4C4D4	A3B4C4D4
Zeta potential	46.7	53.50	51.35
SNR (dB)	33.3863	36.8225	34.2108

Zeta potansiyel için geliştirilen SNR = 0.8245 dB.

Aynı işlemler zeta potansiyel için yapıldığında zeta potansiyel hatası yaklaşık %4 civarındadır. Nanoakışkanın kararlılığı hakkında daha detaylı bir incelemesi yapılmak için hazırlanan 3 numuneye ait boyut analizi ve STEM görüntüleri alınmıştır. Seçilen 3 numune en az, orta ve en yüksek zeta potansiyele sahip numunelerden seçilmiştir. Boyut analizinde bu 3 numune için sırasıyla ortalama 494.3nm, 141.8nm ve 51.93 nm değerlerinde partikül çapı ölçülmüştür. Zeta potansiyel değeri arttıkça topaklanan boyut çapı azaldığı görüldüğünden dolayı, zeta potansiyel ölçümü ile boyut analizi arasında doğru orantılı ve mantıklı bir ilişki gözlemlenmiştir.



Şekil 3.8. a) En az, b) orta ve c) en yüksek zeta potansiyele sahip nanoakışkan numunelerin boyut analizi ve STEM görüntüleri

3.1.3.5. Çok Amaçlı Optimizasyon

Karıştırma işleminin hem ısıl iletkenlik hem de zeta potansiyel açısından eş zamanlı olarak optimizasyonu yapılmıştır. Bu optimizasyon için Gri ilişki analizinde (GRA) kullanılan adımlar aşağıda sıralanmıştır.

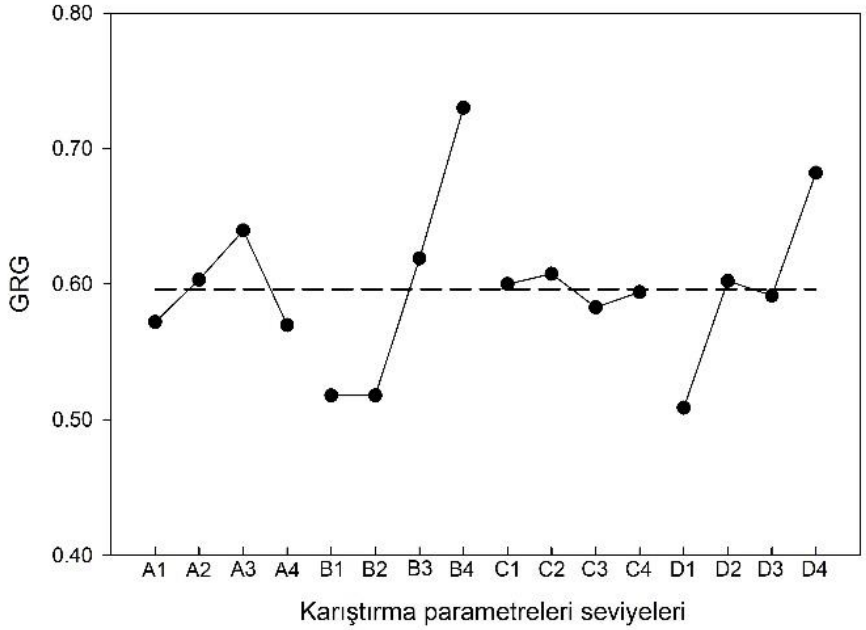
1. Ölçüm sonuçlarının normalleştirilmesi
2. Normalleştirilmiş verilerin gri ilişki katsayısının (GRC) hesaplanması
3. Gri ilişki seviyesinin (GRG) hesaplanması

Hem ısıl iletkenlik hem de zeta potansiyel verileri “en yüksek daha iyi” kriteri esas alınarak normalleştirilmiştir. GRA sonuçları Tablo 3.9 da verilmiştir. L_{16} ortogonal dizi içerisindeki en iyi karışım konfigürasyonu 4. Deney olan A1B4C4D4 olarak ortaya çıkmıştır. GRG seviyelerinin faktörler içindeki seviyelere göre ortalamaları alındığında en optimum karıştırma yöntemi Şekil 3.9’da gösterildiği gibi A3B4C2D4 karışım konfigürasyonu olduğu görülmüştür. Sonuç olarak hem ısıl iletkenlik açısından hem de zeta potansiyel açısından en uygun karıştırma yöntemi A3B4C2D4 (mekanik karıştırma

süresinin 15 dk, ultrasonik karıştırma süresinin 60 dk, Yam/Np 2/10 ve ultrasonik gücün 120 W) dür.

Tablo 3.9. GRA sonuçları

Deney No	Normalleştirilmiş veri		Sapma sırası		GRC		GRG	Sıralama
	Isıl iletkenlik	Zeta potansiyel	Isıl iletkenlik	Zeta potansiyel	Isıl iletkenlik	Zeta potansiyel		
1	0.2491	0.0000	0.6386	0.9616	0.4100	0.3158	0.3629	16
2	0.3858	0.2699	0.5019	0.6917	0.4693	0.3909	0.4301	13
3	0.4195	0.7101	0.4682	0.2515	0.4867	0.6383	0.5625	6
4	0.5693	0.9616	0.3184	0.0000	0.5823	1.0000	0.7912	1
5	0.4195	0.1418	0.4682	0.8197	0.4867	0.3512	0.4189	14
6	0.7041	0.1053	0.1835	0.8563	0.7075	0.3414	0.5244	10
7	0.0000	0.8009	0.8876	0.1607	0.3333	0.7342	0.5338	9
8	0.6030	0.7240	0.2846	0.2375	0.6093	0.6514	0.6303	4
9	0.2884	0.5191	0.5993	0.4425	0.4255	0.5008	0.4631	12
10	0.1258	0.8125	0.7618	0.1490	0.3681	0.7486	0.5584	8
11	0.7303	0.2536	0.1573	0.7080	0.7383	0.3853	0.5618	7
12	0.6929	0.4748	0.1948	0.4867	0.6950	0.4769	0.5860	5
13	0.0169	0.6681	0.8708	0.2934	0.3376	0.6020	0.4698	11
14	0.0674	0.3025	0.8202	0.6591	0.3511	0.4024	0.3768	15
15	0.8352	0.6425	0.0524	0.3190	0.8943	0.5818	0.7381	2
16	0.8876	0.2839	0.0000	0.6777	1.0000	0.3957	0.6979	3



Şekil 3.9. Karıştırma parametreleri seviyelerine göre ortalama GRG değerleri

3.1.4. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

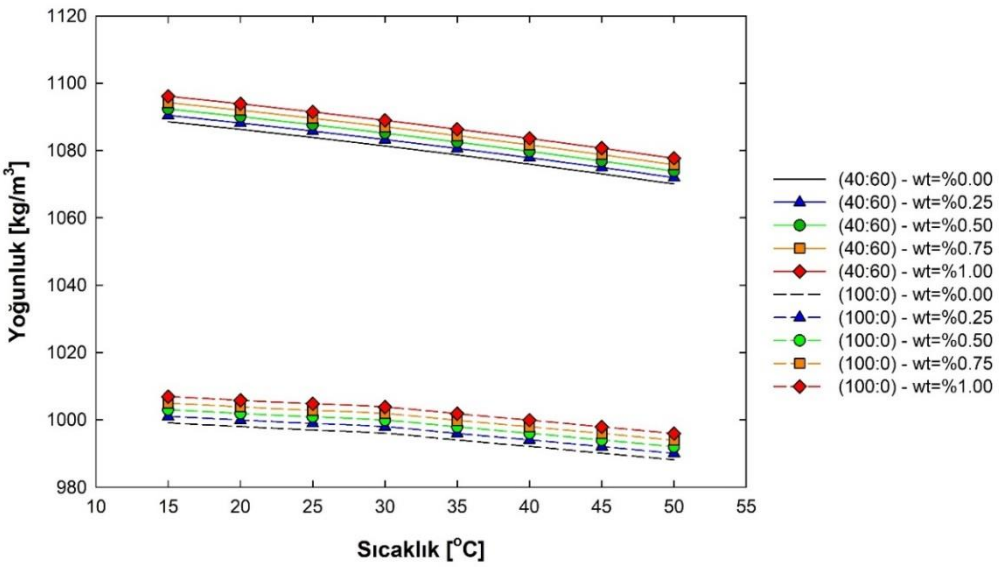
Nano partiküllerin nanoakışkan içerisindeki ağırlıksal oranları olan %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.0 değerleri Eşitlik 2.2 ile sırasıyla hacimsel oranlara %0.06, %0.12, %0.18 ve %0.24 e dönüştürülmüştür.

Nanoakışkanların yoğunluk ve özgül ısıları literatürde yer alan bağıntılar ile hesaplanmıştır. Isıl iletkenlik ve viskozite özellikleri ise daha önce bahsedilen metot ve cihazlar ile ölçülmüştür. Hesaplanan ve ölçülen özellikler için Eşitlik 3.1 de ki format yapısında sıcaklığa bağlı olarak bağıntılar türetilmiştir. Bağıntılarda sıcaklık birimi K dir.

$$f(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \tag{3.1}$$

3.1.4.1. Yoğunluk

Baz akışkanlar olan su (100:0) ve Su-EG (40:60) karışımının yoğunluk değerleri literatürden alınmıştır [16]. Eşitlik 2.3 ile hesaplanan iş akışkanlara ait yoğunluk özellikleri sıcaklığa bağlı olarak Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Yoğunluk özelliği sıcaklık arttıkça azalırken; nanoakışkan içerisindeki ağrılıkça nano partikül oranı arttıkça artmaktadır. Hesaplanan yoğunluk değerlerine ait Eşitlik 3.1 de ki katsayılar Tablo 3.10 da verilmiştir.



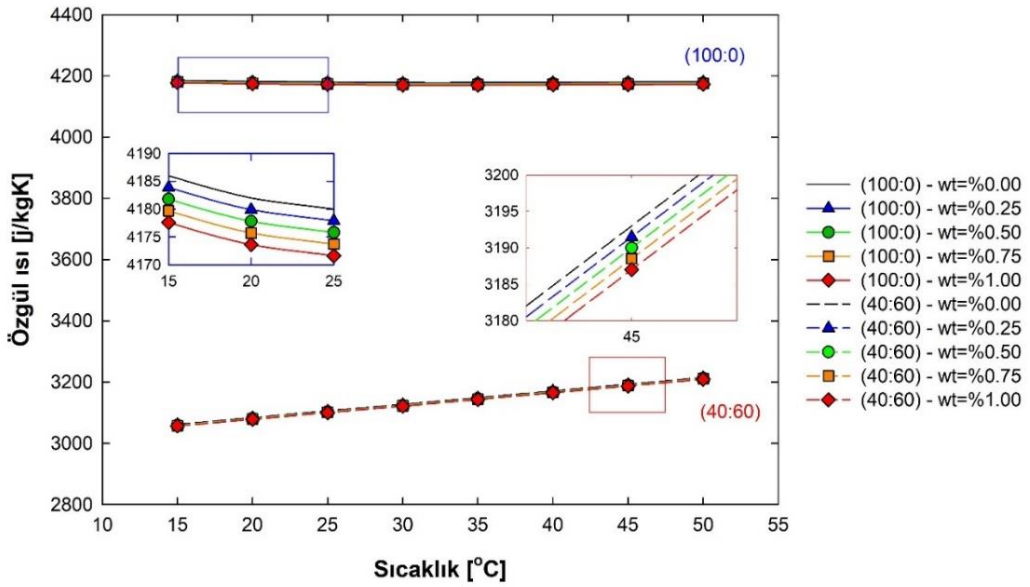
Şekil 3.10. Kullanılan iş akışkanlara ait sıcaklığa bağlı yoğunluk grafiği

Tablo 3.10. İş akışkanlarına ait yoğunluk bağıntılarındaki katsayılar

Baz akışkan	wt (%)	φ (%)	Yoğunluk bağıntılarındaki katsayılar			
			a	b	c	d
Su	0	0	-937.527	18.2592	-0.0563432	5.6565E-05
	0.25	0.06	-934.824	18.2523	-0.0563226	5.6545E-05
	0.50	0.12	-931.336	18.2377	-0.0562767	5.6498E-05
	0.75	0.18	-928.297	18.2274	-0.0562453	5.6467E-05
	1.00	0.24	-925.132	18.216	-0.0562098	5.6431E-05
Su:EG (40:60)	0	0	1014.13	0.959247	-0.0024325	-9.1639E-10
	0.25	0.06	1016.19	0.957527	-0.00242733	-4.9422E-09
	0.50	0.12	1018.03	0.957877	-0.00242888	-1.6709E-09
	0.75	0.18	1019.9	0.958026	-0.00242982	9.8192E-10
	1.00	0.24	1021.88	0.957078	-0.00242714	-3.6692E-10

3.1.4.2.Özgül Isı

İş akışkanlarının özgül ısı değerleri Eşitlik 2.4 ile hesaplanarak elde edilmiştir. Hesaplanan özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Şekil 3.11'de görüldüğü üzere nanoakışkan içerisindeki ağırlıkça nano partikül oranının özgül ısı değerinde çok fazla bir etkisi olmamaktadır. Su baz akışkanı için sıcaklık arttıkça özgül ısı neredeyse sabit kalırken, Su:EG karışımı için sıcaklık arttıkça özgül ısı da artış görülmektedir. Bu sonuç, özgül ısı değerlerinin ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) [16] kaynağından alındığından kaynaklanmıştır. Özgül ısı için üretilen bağıntı katsayıları Tablo 3.11 de verilmiştir.



Şekil 3.11. Kullanılan iş akışkanlara ait sıcaklığa bağlı özgül ısı grafiği

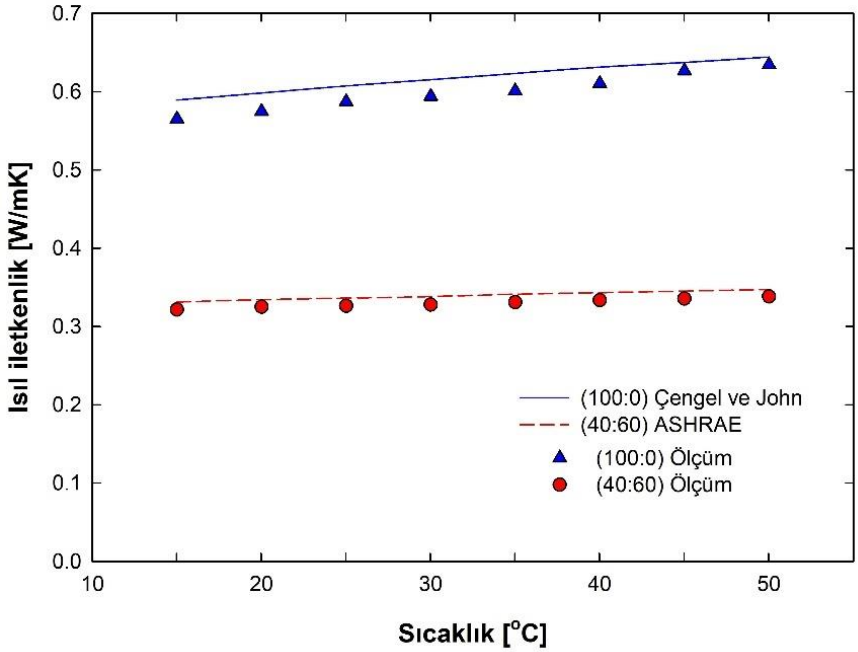
Tablo 3.11. İş akışkanlarına ait özgül ısı bağıntılarındaki katsayılar

Baz akışkan	wt (%)	φ (%)	Özgül ısı bağıntılarındaki katsayılar			
			a	b	c	d
Su	0	0	16217.8	-112.725	0.351087	-3.637E-04
	0.25	0.06	16207.6	-112.648	0.350847	-3.634E-04
	0.50	0.12	16198.2	-112.58	0.350634	-3.632E-04
	0.75	0.18	16188.8	-112.511	0.350419	-3.630E-04
	1.00	0.24	16179.7	-112.446	0.350216	-3.628E-04
Su:EG (40:60)	0	0	-961.265	31.919	-0.0914182	1.010E-04
	0.25	0.06	-960.703	31.9041	-0.09138	1.010E-04
	0.50	0.12	-959.122	31.8791	-0.09130	1.009E-04
	0.75	0.18	-958.124	31.8599	-0.09125	1.008E-04
	1.00	0.24	-957.868	31.8479	-0.09122	1.008E-04

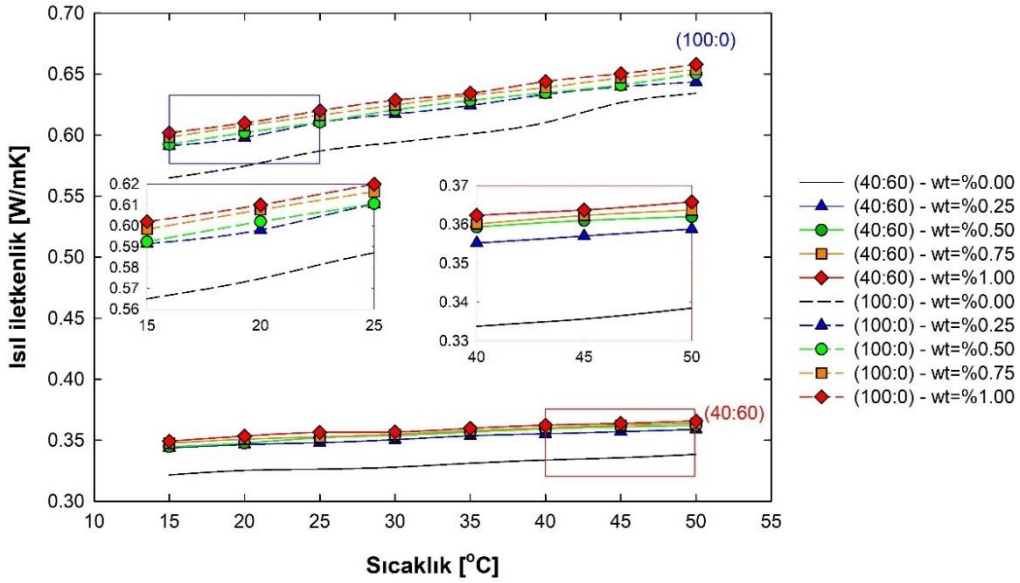
3.1.4.3. Isıl İletkenlik

Isıl iletkenlik ölçüm yönteminin doğruluğunun gösterilmesi için su (100:0) ve Su:EG (40:100) karışımı ısıl iletkenlik ölçümleri literatür ile kıyaslanmıştır. Su için Çengel ve John [143], Su:EG karışımı için ise ASHRAE [16] verileri kullanılmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak ısıl iletkenlik ölçümleri ve literatür değerleri Şekil 3.12'de verilmiştir. Şekil 3.12'de görüleceği üzere literatür ile ölçümler arasında oldukça yakın bir sonuç elde edilmiştir. Ölçümler ile kaynaklardan alınan veriler arasında en fazla hata oranı % 4.07 olduğu görülmüştür. Suyun Su:EG karışımına göre ısıl iletkenlik değeri daha yüksektir. Bir başka deyişle, etilen glikol miktarı arttıkça, Su:EG karışımının ısıl iletkenlik özelliğini azalmaktadır.

Şekil 3.13'te ise kullanılan tüm iş akışkanlarına ait ısıl iletkenlik ölçümlerinin sıcaklıkla değişim grafiği verilmiştir. Sıcaklık arttıkça ısıl iletkenlik değerleri tüm iş akışkanları için artmaktadır. Her iki baz akışkana da katılan TiO_2 nano partikül miktarı arttıkça, elde edilen nanoakışkanın ısıl iletkenlik özelliği artmaktadır. Su baz akışkanı için ısıl iletkenlik özelliğindeki artış 20°C de %1.0 ağırlık oranıyla %2.57 olarak elde edilmiştir. Su:EG karışımı baz akışkanı için ısıl iletkenlik özelliğindeki artış 25°C de %1.0 ağırlık oranıyla %3.03 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.12. Su (100:0) ve Su: EG karışımı (40:60) için ölçülen ve referans ısıl iletkenlik değerleri



Şekil 3.13. Kullanılan iş akışkanlara ait sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik grafiği

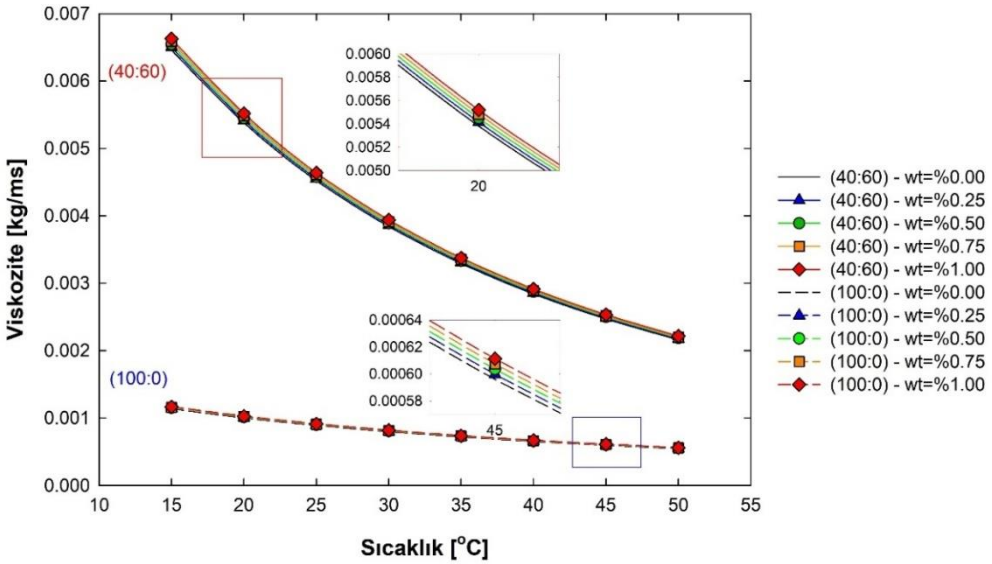
Kullanılan iş akışkanların ısıl iletkenlik özellikleri sıcaklığa bağlı bağıntılara dönüştürülmüştür. Isıl iletkenlik bağıntılarındaki katsayılar Tablo 3.12 de verilmiştir.

Tablo 3.12. İş akışkanlarına ait ısıl iletkenlik bağıntılarındaki katsayılar

Baz akışkan	wt (%)	φ (%)	Isıl iletkenlik bağıntılarındaki katsayılar			
			a	b	c	d
Su	0	0	-22.9383	0.229637	-0.000753	8.2843E-07
	0.25	0.06	12.5362	-0.124351	0.000426	-4.7875E-07
	0.50	0.12	-12.3849	0.121718	-0.000384	4.0808E-07
	0.75	0.18	-5.4471	0.054077	-0.000164	1.6972E-07
	1.00	0.24	-3.7320	0.037745	-0.000112	1.1520E-07
Su:EG (40:60)	0	0	-2.10956	0.02344	-7.6517E-05	8.4849E-08
	0.25	0.06	4.2254	-0.03959	1.3315E-04	-1.4747E-07
	0.50	0.12	2.18961	-0.02140	7.9384E-05	-9.4909E-08
	0.75	0.18	3.53932	-0.03283	1.1102E-04	-1.2323E-07
	1.00	0.24	-8.4217	0.08426	-2.7061E-04	2.9096E-07

3.1.4.4.Viskozite

Literatürde yer alan tablo değerleri ve bağıntılardan elde edilen sıcaklığa bağlı viskozite değerleri Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Sıcaklık arttıkça akışkanların viskozite değerleri azalmaktadır. Her iki baz akışkana katılan TiO_2 miktarı arttıkça viskozite değerleri artmaktadır. Kullanılan iş akışkanlarına ait üretilen viskozite bağıntılarındaki katsayılar Tablo 3.13 de verilmiştir.



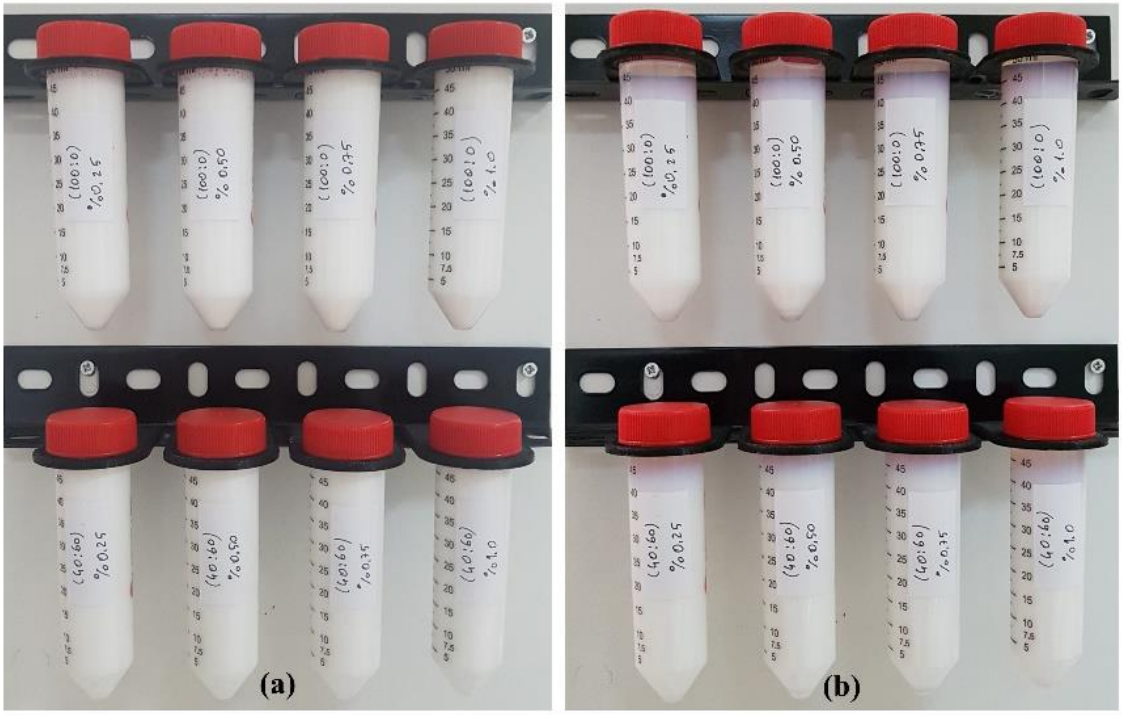
Şekil 3.14. Kullanılan iş akışkanlara ait sıcaklığa bağlı viskozite grafiği

Tablo 3.13. İş akışkanlarına ait viskozite bağıntılarındaki katsayılar

Baz akışkan	wt (%)	φ (%)	Viskozite bağıntılarındaki katsayılar			
			a	b	c	d
Su	0	0	0.150982	-0.001358	4.11333E-06	-4.18182E-09
	0.25	0.06	0.151933	-0.001367	4.13925E-06	-4.20817E-09
	0.50	0.12	0.152892	-0.001375	4.16538E-06	-4.23473E-09
	0.75	0.18	0.153869	-0.001384	4.19200E-06	-4.26181E-09
	1.00	0.24	0.154850	-0.001393	4.21871E-06	-4.28896E-09
Su:EG (40:60)	0	0	1.504170	-0.013748	4.2132E-05	-4.3232E-08
	0.25	0.06	1.513640	-0.013835	4.2397E-05	-4.3504E-08
	0.50	0.12	1.523230	-0.013923	4.2666E-05	-4.3780E-08
	0.75	0.18	1.532940	-0.014011	4.2938E-05	-4.4059E-08
	1.00	0.24	1.542720	-0.014101	4.3212E-05	-4.4340E-08

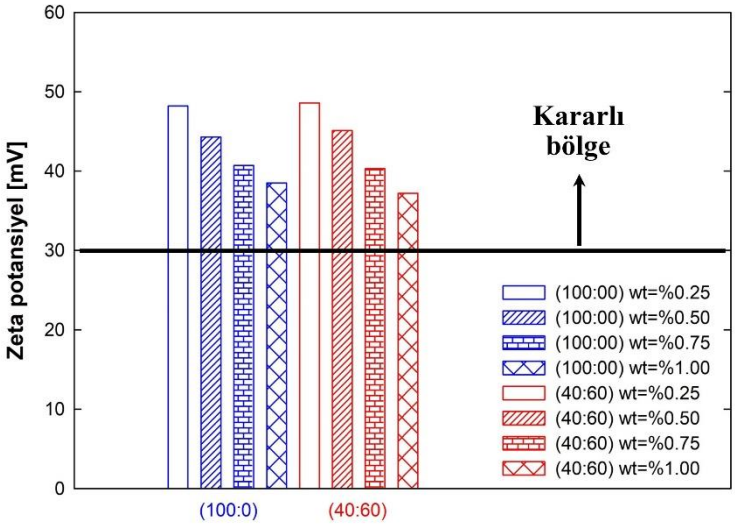
3.1.5. Nanoakışkanların Kararlılığının Belirlenmesi

Hazırlanan nanoakışkanların çökelme süreleri ve zeta potansiyel değerleri incelenerek kararlılıkları hakkında sonuca varılmıştır. Hazırlanan nanoakışkanlar deney tüpleri içerisinde bekletilerek zaman içerisinde çökelme miktarları gözlemlenerek incelenmiştir. Hazırlanan nanoakışkanların deney tüpleri içerisinde Şekil 3.15a'da 21 gün sonraki çökeleme durumu, Şekil 3.15b'de 30 gün sonraki çökelme durumu gösterilmiştir. İlk 21 gün içerisinde herhangi bir çökelme gözlemlenmemiştir. 30 gün sonra ise nanoakışkanın üst seviyesinde saydamlaşmaya başlanıldığı ve dipte çökelmelerin başlanıldığı gözlemlenmiştir. Baz akışkanların su veya Su:EG karışımı olması çökeleme durumunda gözlemlenebilir bir fark oluşturmamıştır. Bu gözlemlere dayanarak hazırlanan nanoakışkanlar 20-25 gün lük periyotlar ile çalışan bir ısı değiştiricisinde problem doğurmadan kullanılabilir olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.15. Kullanılan nanoakışkanların çökelme miktarının gözlemlenmesi a) 21 gün sonraki durum, b) 30 gün sonraki durum

Ayrıca, hazırlanan nanoakışkanlardan alınan numunelerin zeta potansiyel değerleri ölçülerek kararlılıkları hakkında niceliksel bilgiler de alınmıştır. Şekil 3.16'da kullanılan nanoakışkanların zeta potansiyel ölçüm sonuçları verilmiştir. Hazırlanan nanoakışkanların zeta potansiyel değerleri 30 mV değerinden yüksek olduğu için tümü kararlı haldedir. Nanoakışkan içerisindeki ağırlıkça TiO_2 miktarı arttıkça zeta potansiyel değerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu beklenen bir sonuç olmakla beraber, akışkan içerisindeki katı partiküllerin topaklanma ve birleşme ihtimallerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Aynı ağırlıksal oranlar dikkate alındığında, Su:EG karışımı baz akışkanı kullanılan nanoakışkanların zeta potansiyel değerleri, su baz akışkanı kullanılan nanoakışkanların zeta potansiyel değerlerinden genellikle daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sonucun en büyük sebebi, Su:EG karışımının yoğunluk ve viskozite özelliğinin daha yüksek olmasıyla akıcılığı azalan akışkan içerisindeki nano partiküllerin hareketleri kısıtlanarak partikül ile akışkan molekülleri arasında daha az güçlü elektriksel itme kuvveti oluşmasıdır.



Şekil 3.16. Kullanılan nanoakışkanların zeta potansiyel değerleri

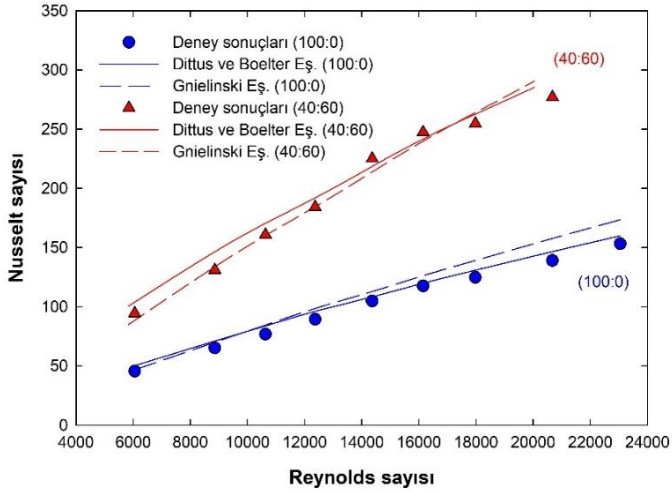
3.2. Deneysel Bulgular

3.2.1. Deney Sistematiğinin Doğrulanması

Deney düzeneği ve hesaplama sistematiğinin doğrulanması için kullanılan baz akışkanlar ile yapılan boş boru ve boru içerisine TBL yerleştirilmiş deney sonuçları ısıl açıdan ve hidrolik performans açısından literatürde yer alan bağıntılar ile kıyaslanmıştır. Isıl açıdan Nusselt sayısı (Nu), hidrolik açıdan sürtünme faktörü (f) boyutsuz sayıları kullanılmıştır.

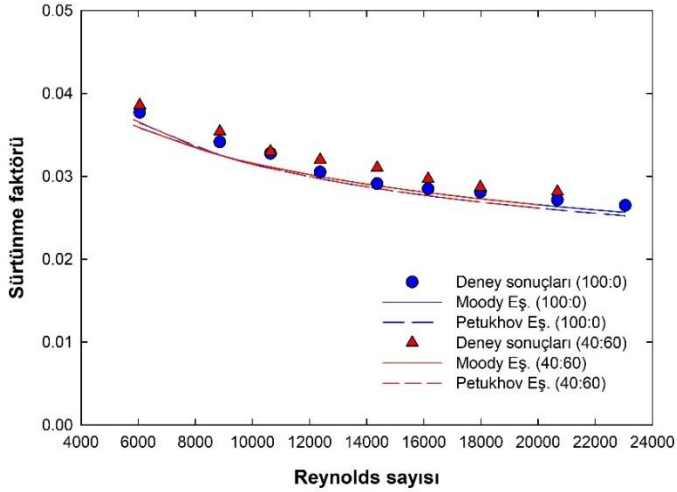
3.2.1.1. Boş Boru Deneyinin Doğrulanması

Boş boru deneylerin doğrulanması için ısıl açıdan Dittus ve Boelter eşitliği (Eşitlik 2.6) [147], Gnielinski eşitliği (Eşitlik 2.8) [148] kullanılmıştır. Şekil 3.17'de Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre dağılımı grafiği verilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısı artmaktadır. Ayrıca Su:EG (40:60) karışımının Nusselt sayısı değerleri suya (100:0) göre daha yüksektir. Bunun sebebi Dittus ve Boelter eşitliğinden de görüldüğü gibi Nusselt sayısı, Prandtl sayısı (Pr) ile doğru orantılı bir ilişkiye sahiptir. Suyun (100:0) Prandtl sayısı 7.0 civarında iken, Su:EG (40:60) karışımının Prandtl sayısı 40 civarındadır. Deney sonuçları Nusselt sayısı açısından Dittus ve Boelter eşitliği ile kıyaslandığında en yüksek hata oranı %9.23 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.17. Baz akışkanların kullanıldığı boş boru deneylerinin Nusselt sayısı sonuçlarının literatür ile kıyaslanması

Deney düzeneği ve sisteminin hidrolik açıdan doğrulanması için Moody eşitliği (Eşitlik 2.9) [149] ve Petukhov eşitliği (Eşitlik 2.10) [150] kullanılmıştır. Şekil 3.18'de ise sürtünme faktörünün Reynolds sayısına (Re) göre dağılım grafiği verilmiştir. Şekil 3.18'de görüldüğü gibi Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörü azalmaktadır. Deney sonuçları kullanılan iş akışkanları arasında incelendiğinde aynı *Re* değerinde Su:EG (40:60) karışımının sürtünme faktörleri su (100:0) akışkanının sürtünme faktörlerinden bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, ölçüm sisteminde fark basınç ölçer cihazının Su:EG karışımında çok daha yüksek basınç düşümü değerleri ölçmesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak her iki baz akışkan için en yüksek sürtünme faktörü hata oranı %8.67 olduğu görülmüştür.

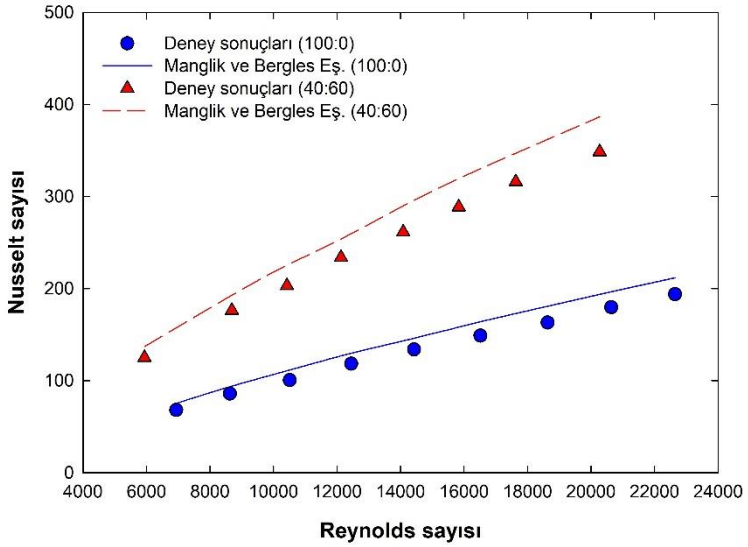


Şekil 3.18. Baz akışkanların kullanıldığı boş boru deneylerinin sürtünme faktörü sonuçlarının literatür ile kıyaslanması

Isıl ve hidrolik açıdan deney sisteminde elde edilen boyutsuz sayıların literatürdeki karışıklıkları ile arasında ±%10 dan daha az hata içerisinde kaldığından dolayı deney düzeneği ve sistematiği doğrulanması sağlanmıştır.

3.2.1.2.Tipik Bükülmüş Levha Yerleştirilmiş Deneylerin Doğrulanması

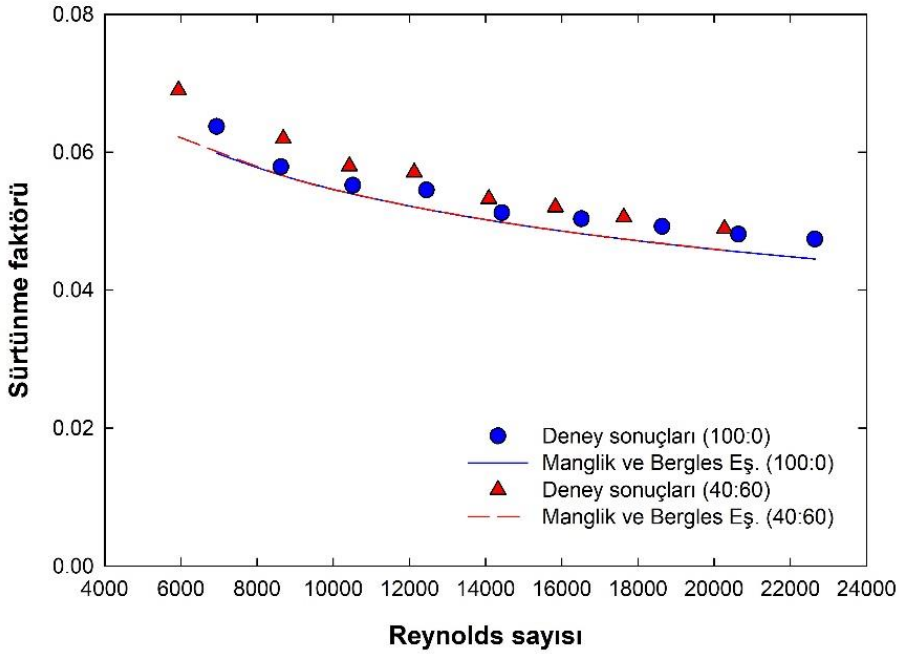
TBL yerleştirilmiş boru çalışmalarının sonuçlarının ısıl ve hidrolik açıdan doğruluğu, Manglik ve Bergles [92] eşitlikleri ile kıyaslanarak gösterilmiştir. Şekil 3.19'da kullanılan baz akışkanlar ile yapılan deney çalışmalarının *Nu* sonuçları ve Manglik ve Bergles [92] eşitliğinin Reynolds sayısı ile dağılımı verilmiştir. Şekil 3.19'da görüldüğü gibi deney sonuçları ile Manglik ve Bergles eşitliği arasında oldukça yakın bir ilişki mevcuttur. Bu ilişki su akışkanı için en fazla hata oranı %9.46, Su:EG karışımı için %9.82 kadar olduğundan TBL yerleştirilmiş boru deneyi sonuçları ısıl açıdan literatür ile uyumludur.



Şekil 3.19. Baz akışkanların kullanıldığı boru içerisine TBL yerleştirilmiş deneylerinin Nusselt sayısı sonuçlarının literatür ile kıyaslanması

Şekil 3.20'de baz akışkanlar kullanıldığı ve TBL yerleştirilmiş boru çalışmalarında elde edilen sürtünme faktörü sonuçlarının ve Manglik ve Bergles [92] eşitliği ile kıyaslanmıştır. TBL sürtünme faktörü sonuçları boş boru sonuçlarına karakteristik açıdan benzerlik taşımaktadır. Manglik ve Bergles eşitliğinde sürtünme faktörü Reynolds sayısının bir fonksiyonu olduğundan baz akışkanların sürtünme faktörleri aynı Reynolds sayısında aynı değere sahiptir. Ancak, deney sonuçlarına bakıldığında, Su:EG

karışımı TBL sürtünme faktörü sonuçları su akışkanından daha yüksek olduğu görülmüştür. Su (100:0) ve Su:EG (40:60) karışımı için elde edilen en yüksek sürtünme faktörü hata oranı sırasıyla %6.5 ve %10.85 olarak elde edilmiştir.



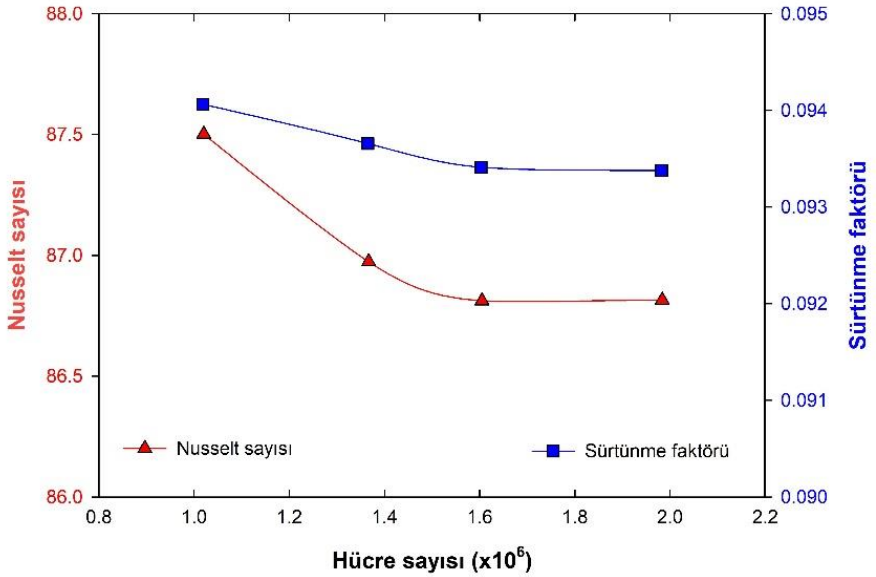
Şekil 3.20. Baz akışkanların kullanıldığı boru içerisine TBL yerleştirilmiş deneylerinin sürtünme faktörü sonuçlarının literatür ile kıyaslanması

3.2.2. Sayısal Analiz Yönteminin Doğrulanması

Deney sistematiğinin doğrulanmasının gerektiği gibi, kullanılan sayısal analiz yönteminin de doğrulanması gerekmektedir. Literatürde yer alan eşitlikler ile sayısal analiz çalışmasının sonuçları doğrulanmıştır.

3.2.2.1. Ağ Bağımsızlığı

Analiz yönteminin doğrulanmasından önce, analiz sonuçlarına ağ yapısının sahip olduğu hücre sayısının etkisinin olup olmadığı, ağ bağımsızlığı çalışması ile ortaya konulması gerekmektedir. Şekil 3.21'de Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün hücre sayısına göre değişimini veren grafikler gösterilmiştir.

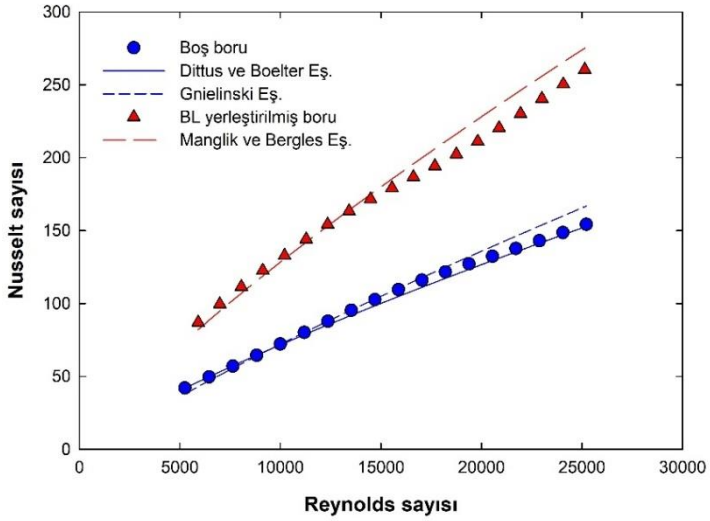


Şekil 3.21. Ağ bağımsızlığı çalışması sonuçları

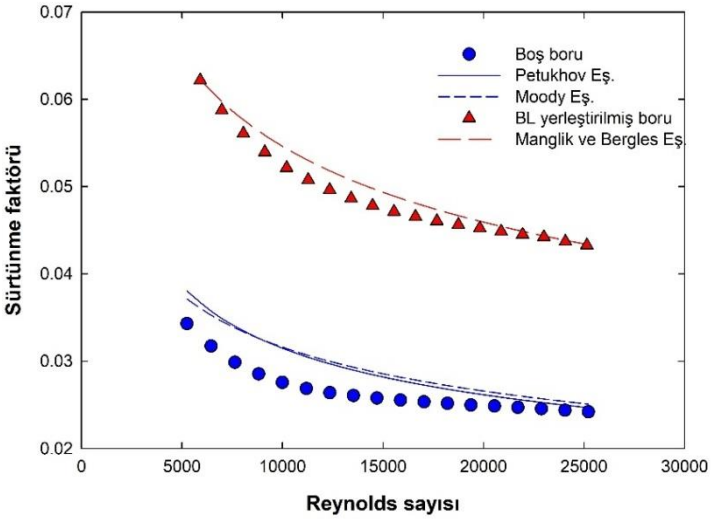
Hücre sayısının yaklaşık 1.6 milyon hücreyi geçtikten sonra Nusselt sayısının ve sürtünme faktörünün önemli derecede değişmediği görülmüştür. Bu sonuçla yapılan analiz çalışmaları bu ağ yapısıyla yapılmıştır. Ağ yapısında sınır tabaka ağının ilk tabaka yüksekliği 1 mm, tabaka sayısı 10 adet ve büyüme faktörü 1.1 olarak seçilmiştir. Hacimsel olarak ise elemanlar 1 mm olarak ölçülendirilmiştir.

3.2.2.2. Sayısal Analiz Yönteminin Doğrulanması

Sayısal analizde kullanılan çözüm metodu, türbülans modeli ve diğer seçeneklerin oluşturduğu metodolojinin boş boru ve BL yerleştirilmiş boru için doğrulanması yapılmıştır. Şekil 3.22'de Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi açısından boş boru ve BL yerleştirilmiş boru için analiz sonuçlarının literatürde yer alan eşitlikler ile kıyaslanması verilmiştir. Boş boru için en fazla %4.52, BL yerleştirilmiş boru için en fazla %6.72 hata ile sonuçlar literatüre yakın elde edilmiştir. Şekil 3.23'te boş boru ve BL yerleştirilmiş boru analizlerinin sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile değişimi literatürde yer alan eşitlikler ile kıyaslanarak verilmiştir. Boş boruya ait sürtünme faktörü sonuçları %12.76 hata oranı ile BL yerleştirilmiş boruya ait sürtünme faktörü sonuçları ise %4.23 hata oranı ile literatüre yakın olarak elde edilmiştir.



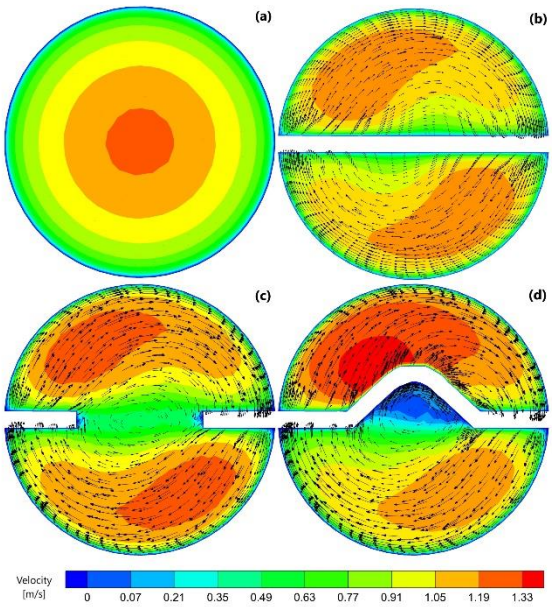
Şekil 3.22. Boş boru ve BL yerleştirilmiş boruya ait sayısal analiz Nusselt sayısı sonuçlarının literatür ile kıyaslanması



Şekil 3.23. Boş boru ve BL yerleştirilmiş boruya ait sayısal analiz sürtünme faktörü sonuçlarının literatür ile kıyaslanması

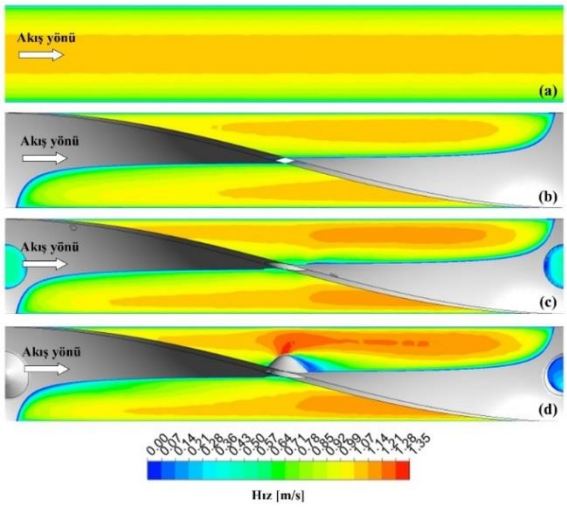
3.2.3. İç Eleman Kullanılarak Elde Edilen Bulgular

Çalışma kapsamında iç eleman olarak tipik bükülmüş levha (TBL) ve modifikasyonları kullanılmıştır. Modifiye edilmiş bükülmüş levhalar delinmiş bükülmüş levha (DBL) ve gamzeli bükülmüş levha (GBL) olarak ana iki tasarımdadır. Bu iki tasarım da kendi içerisinde deliklerin ve gamzelerin aralarındaki mesafenin büküm oranına oranı (P/y) değerinin 0.25, 0.50 ve 1.00 olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Toplamda yedi farklı bükülmüş levhanın kullanıldığı ve iş akışkanı olarak baz akışkanlar ile yapılan deney sonuçları bu kısımda incelenmiştir.

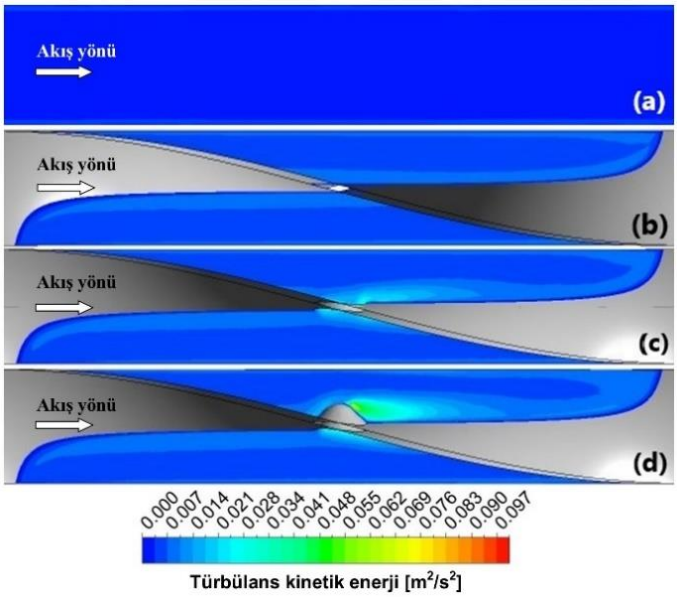


Şekil 3.24. 15000 Reynolds sayısındaki a) Boş boru, b) TBL, c) DBL ve d) GBL ya ait ikincil akış hız vektörü ve konturları

Akış karakteristikleri, deney düzeneğinde gözlemlenemediğinden sayısal analiz gerçekleştirilerek gelişen akış karakteristiklerinin yapıları kontur ve hız vektörleri görsel olarak sunulmuştur. BL yerleştirilmiş boru konfigürasyonlarının akış karakteristiklerinin görselleştirilmesiyle deney sonuçlarının daha etkin bir şekilde yorumlanabilmektedir. Bu kapsamda yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.24'te ikincil akış hız konturu, Şekil 3.25'te birincil akış hız konturu ve Şekil 3.26'da ise birincil akışta oluşan türbülans kinetik enerji konturu olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.25. 15000 Reynolds sayısındaki a) Boş boru, b) TBL, c) DBL ve d) GBL ya ait birincil akış hız konturları

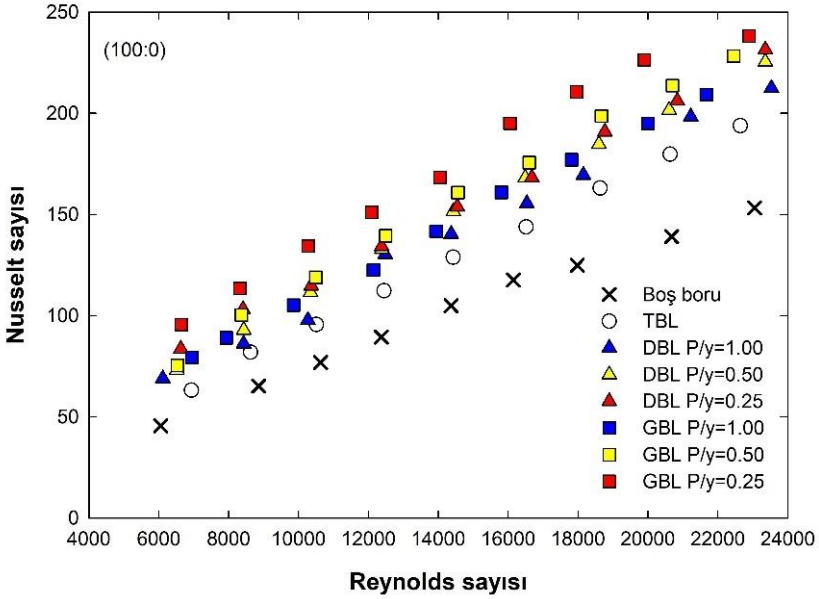


Şekil 3.26. 15000 Reynolds sayısındaki a) Boş boru, b) TBL, c) DBL ve d) GBL ya ait türbülans kinetik enerji konturları

3.2.3.1. Isıl Performans Açısından Bulgular

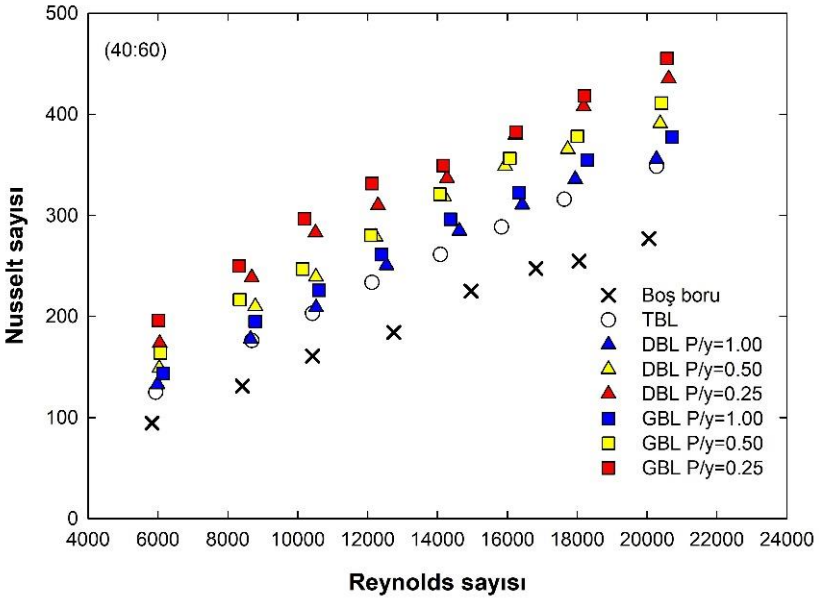
Şekil 3.27'de su (100:0) akışkanı için boş boru ve iç eleman yerleştirilmiş borular için yapılan deneylerin Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile değişimi grafiği verilmiştir. Tüm konfigürasyonlar için Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısının arttığı ortaya çıkmıştır. Reynolds sayısı türbülans şiddetini ifade eden bir boyutsuz sayısı olması gereğiyle, türbülans şiddeti arttıkça Nusselt sayısının artması beklenen bir sonuçtur.

Boş boruya kıyasla boru içerisine herhangi bir BL yerleştirilmesi de aynı Reynolds sayısında Nusselt sayısını artırdığı görülmüştür. Buradaki temel sebep, test borusu boyunca akan akışkan boş boru içerisinden akarken ikincil akış karakterine sahip değil iken, BL yerleştirilmiş boru içerisinden akışkanın hız profili cidar boyunca sürekli bozulmakta ve dönel akıştan kaynaklı ikincil akış karakteristiği kazanmasıdır. Şekil 3.24'te ikincil akış karakteristiklerinin gösterilmesi amacıyla sayısal analizden elde edilen boru kesitindeki hız profili ve hız vektörleri verilmiştir.



Şekil 3.27. Su (100:0) akışkanının kullanıldığı çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

Şekil 3.28 de Su:EG (40:60) karışımının iş akışkanı olarak kullanıldığı deneylerin Nusselt sayıları sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımları verilmiştir. Boş boruda olduğu gibi BL yerleştirilmiş boru deneylerinin de Nusselt sayıları su akışkanına göre yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Daha önce bahsedildiği gibi bu durum suya EG katılmasıyla karışımın Prandtl sayısındaki yükselmeden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.28. Su:EG (40:60) karışımının kullanıldığı çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

İç eleman türleri incelendiğinde, her iki baz akışkan için de boru içerisine yerleştirilmiş BL konfigürasyonlarının Nusselt sayıları birbirleri arasında benzer ilişki bulunmaktadır. TBL, BL'lar arasında en düşük Nusselt sayısı sunmaktadır. TBL levha üzerinde yapılan modifikasyonlar, Nusselt sayısının artmasına sebep olduğu görülmektedir.

İki ana grup olarak DBL ve GBL birbirleri arasında incelendiğinde aynı delik/gamze oranı göz önüne alındığında GBL'ların DBL'ya kıyasla daha yüksek Nusselt sayılarına sebebiyet verdiği görülmektedir.

TBL levha üzerine açılan delikler ile elde edilen DBL'lar, boru boyunca dönel akışa ek olarak deliklerden geçen akışkan BL nın her iki tarafındaki akışkanın karışmasını sağlayarak daha efektif bir taşınım gerçekleşmesini sağlamaktadır.

GBL'lardaki durum ise DBL'lardan farklıdır. GBL'lardaki gamzelerin tepesi ile boru cidarı arasında kalan akış bölgesi daraldığından dolayı bu bölgede sınır tabaka incelmektedir. Ayrıca, ikincil akış göz önüne alındığında dönel akıştan kaynaklanan ikincil akış, boru merkezinde yer alan gamzenin tepesinden ayrılan hız vektörlerinin hız kazanmasıyla ikincil akış büyüklüğü artmaktadır. Bu açıklamalar Şekil 3.24 ve Şekil 3.25 üzerinden yorumlanabilmektedir.

Şekil 3.26'da akış boyunca oluşan türbülans şiddetlerini gösteren türbülans kinetik enerji konturları gösterilmiştir. Türbülans kinetik enerjinin artmasıyla Nusselt sayısının artması arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. En yüksek türbülans şiddeti GBL yerleştirilmiş boru içi akışta gözlemlenmiştir.

DBL ve GBL levhalarda yapılan işlemin mesafe oranını veren P/y oranı arttıkça yapılan delik/gamze işlemi sayısı azaldığından, delik/gamze yapısının Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü üzerindeki etkileri de azalmaktadır.

Su (100:0) akışkanı kullanıldığında en yüksek Nusselt sayısı, GBL (P/y=0.25) kullanıldığında 238.19 ile en yüksek Reynolds sayısı olan 22898 değerinde görülmüştür. Aynı Reynolds sayısında boş boruya kıyasla en fazla Nusselt sayısı artışı 6645 Reynolds sayısında GBL (P/y=0.25) elemanı ile 1.979 olarak elde edilmiştir.

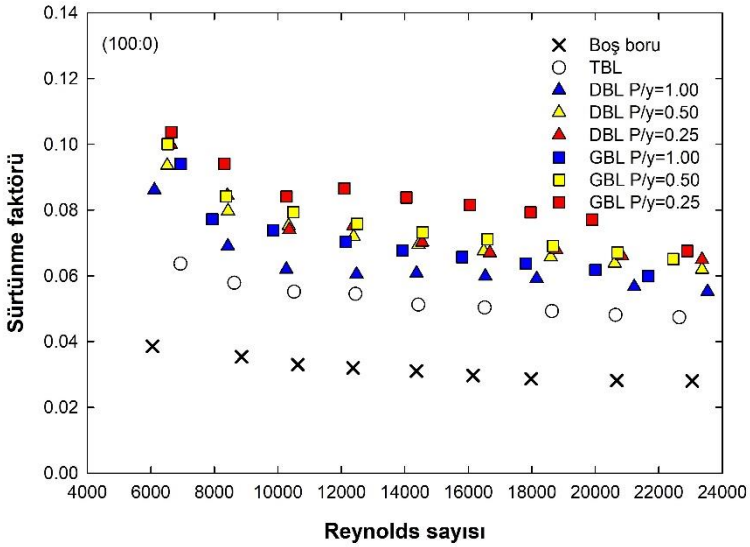
Su:EG (40:60) karışımının kullanıldığı deneylerde en yüksek Nusselt sayısı, GBL (P/y=0.25) kullanıldığında 455.49 ile en yüksek Reynolds sayısı olan 20564 değerinde

elde edilmiştir. Aynı Reynolds sayısında boş boruya kıyasla en yüksek Nusselt sayısı oranı GBL (P/y=0.25) kullanımı ile 6014 Reynolds sayısında 2.106 olarak elde edilmiştir.

Her iki akışkan için Nusselt sayısının BL/Boş boru oranı incelendiğinde, Su:EG (40:60) karışımında daha fazla bir Nusselt sayısı artışı elde edildiği görülmektedir. Bu sonucun sebebi, Su:EG karışımının daha yüksek Prandtl sayısına sahip olmasıdır. Ayrıca aynı Reynolds sayısının elde edilebilmesi için Su:EG karışımı daha fazla pompalama gücü kullanılarak daha yüksek debide akış hızı kullanılmaktadır. Akışkanın hızının artması, akışkan karışımını arttırarak zorlanmış taşınımla ısı transferini performansını iyileştirmektedir.

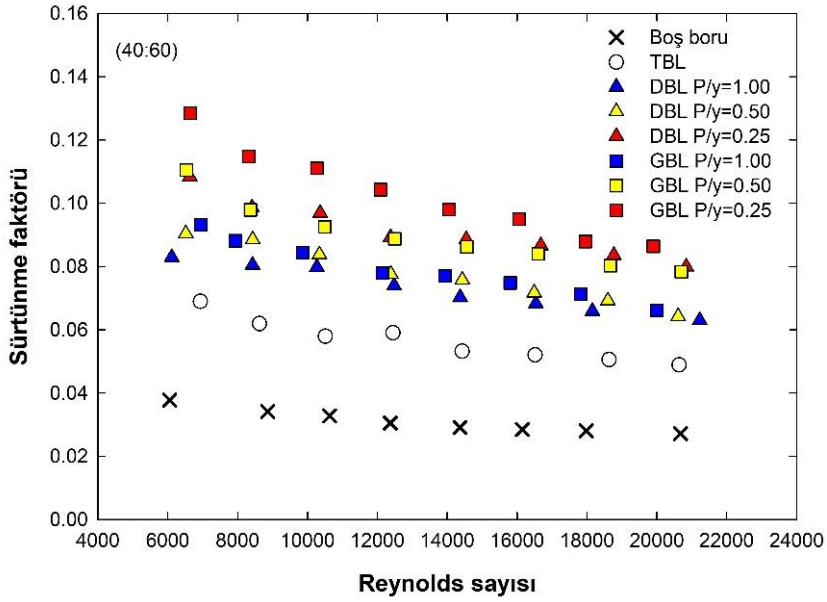
3.2.3.2. Hidrolik Performans Açısından Bulgular

Boru içerisine yerleştirilen iç elemanlar ısı transferini artırırken, akış doğrultusunda engel teşkil ettiğinden dolayı basınç düşümünü ve dolayısıyla sürtünme faktörünü arttırmaktadır. Şekil 3.29 ve Şekil 3.30 sırasıyla iş akışkanı olarak su (100:0) ve Su:EG (40:60) karışımının kullanıldığı iç elemanların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısına göre dağılımını göstermektedir. Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörü azalmaktadır. Boş boru içerisine yerleştirilen tüm BL'lar sürtünme faktörünü arttırmaktadır.



Şekil 3.29. Su (100:0) akışkanının kullanıldığı çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

Şekil 3.25'te görüldüğü gibi BL'lar birincil akış doğrultusunda teğetsel bir yüzey engeli oluşturarak, akışı direkt engellememektedir. Bir başka deyişle ani bir durma noktası oluşturmayarak akışı dönmeye yönelterek emsal iç elemanlara kıyasla daha az bir basınç düşümü sağlamaktadır. Ancak, ısı transferi performansını iyileştirmek için yapılan delik ve gamze işlemleri, akış doğrultusunda dik birer engel oluşturmaktadır. DBL üzerindeki deliklerden akış geçerek bu engellemeyi azaltırken, GBL üzerindeki gamzelerin oluşturduğu özellikle tümsek yapılar akışı daha fazla engellemektedir. BL üzerinde yapılan delik ve gamzeler arasındaki mesafenin büküm oranına oranının (P/y) azalmasıyla daha fazla delik/gamze işlemi anlamına gelmektedir. P/y azaldıkça engel sayısı arttığından dolayı sürtünme faktörü artmıştır.



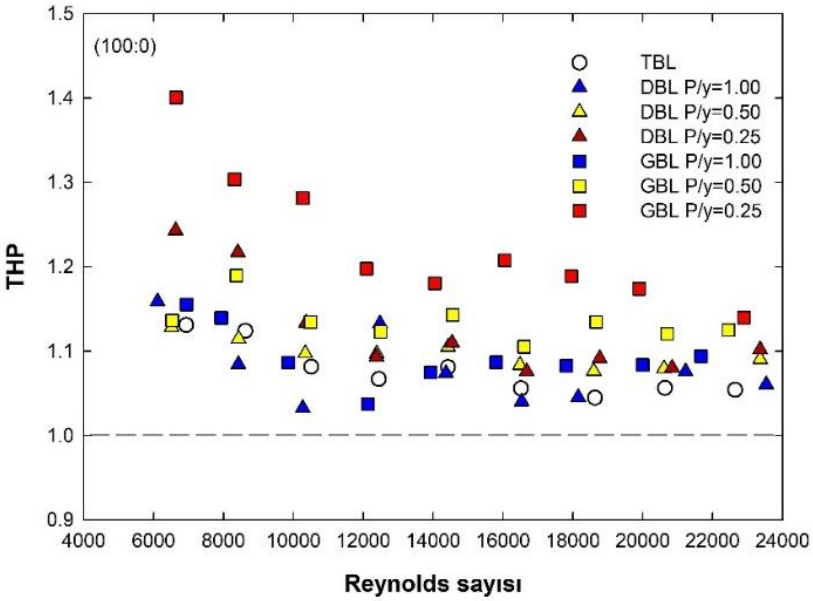
Şekil 3.30. Su:EG (40:60) karışımının kullanıldığı çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

İş akışkanı olarak su kullanıldığında en yüksek sürtünme faktörü 0.1037 değeri, GBL (P/y=0.25) iç elemanı ile 6644.6 Reynolds sayısında elde edilmiştir. Benzer şekilde en yüksek BL sürtünme faktörünün boş boru sürtünme faktörüne oranı 2.822 değeri, GBL (P/y=0.25) iç elemanı ile 6644.6 Reynolds sayısında elde edilmiştir. İş akışkanı olarak Su:EG kullanıldığında ise en yüksek sürtünme faktörü 0.1284 değeri GBL (P/y=0.25) iç elemanı ile 6014 Reynolds sayısında elde edilmiştir. En yüksek BL sürtünme faktörünün boş boru sürtünme faktörüne oranı 3.349 değeri ile, GBL (P/y=0.25) iç elemanı yerleştirilmiş boru deneyinin 6644.6 Reynolds sayısında elde edilmiştir.

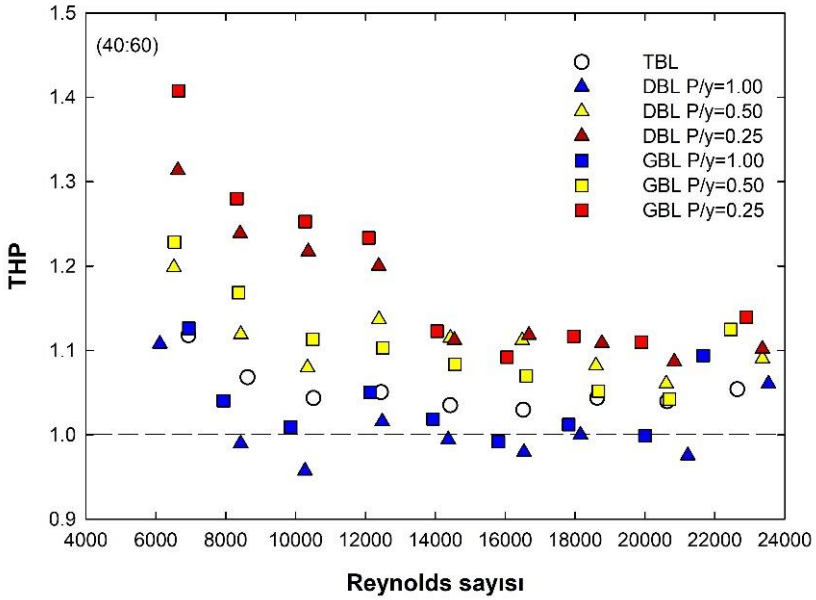
Sürtünme faktörü sonuçları iş akışkanları açısından incelendiğinde Su:EG karışımı suya göre daha yüksek sürtünme faktörü sonuçları vermiştir. Burada temel sebep Su:EG karışımının suya göre daha yüksek viskozite ve yoğunluk özelliğine sahip olduğundan basınç düşümünün daha yüksek olmasıdır.

3.2.3.3.Termo-Hidrolik Performans Açısından Bulgular

Boru içerisine yerleştirilen BL'ların hem ısıl hem de hidrolik açıdan performansının değerlendirildiği termo-hidrolik performans (THP) kriteri sonuçları, su (100:0) akışkanı ile Şekil 3.31'de Su:EG (40:60) karışımı ile Şekil 3.32'de verilmiştir. Her iki iş akışkanı için de Reynolds sayısı arttıkça THP değerinde azalma meydana gelmiş olup bu durum literatür ile uyum içerisindedir. Bu durum, Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısındaki artış oranı, sürtünme faktöründeki artış oranına göre daha az artmakta olduğundan kaynaklanmaktadır. İş akışkanı su olduğunda tüm BL konfigürasyonlarının THP sonuçları bir değerinden yüksek iken, Su:EG (40:60) karışımı iş akışkanı olarak kullanıldığında DBL (P/y=1.00) bazı Reynolds sayılarında bir değerinden aşağıda THP sonucu vermiştir. Her iki iş akışkanında da en yüksek THP değeri GBL (P/y=0.25) yerleştirilmiş boru konfigürasyonu ile 1.40 civarında en düşük Reynolds sayısında elde edilmiştir.



Şekil 3.31. Su (100:0) akışkanının kullanıldığı çalışmaların termo hidrolik performans (THP) sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı



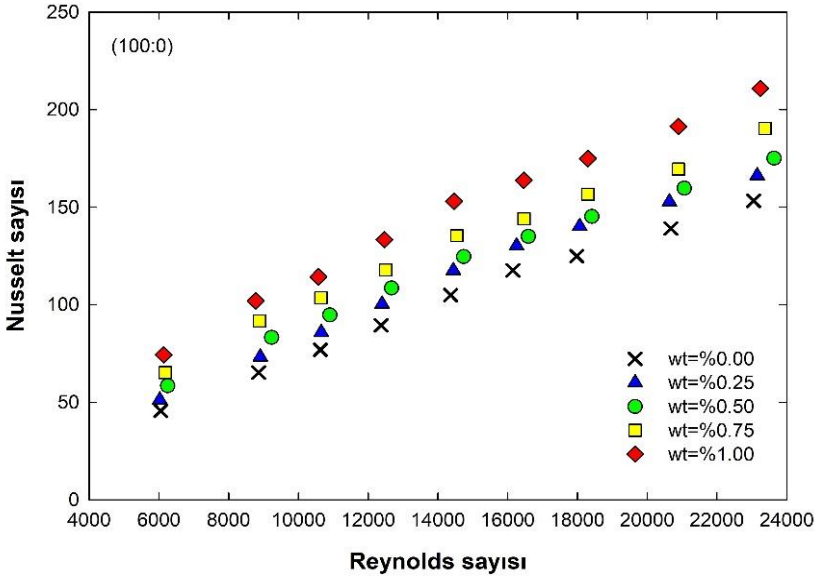
Şekil 3.32. Su:EG (40:60) karışımının kullanıldığı çalışmaların termo hidrolik performans (THP) sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

3.2.4. Nanoakışkan Kullanımı ile Edilen Bulgular

TiO_2 nano partikülü baz akışkanlara (Su ve Su:EG) ağırlıkça %0.0 (baz akışkan), %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.0 oranlarında katılmak üzere olmak üzere toplam 10 farklı iş akışkanı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu iş akışkanlarında BL konfigürasyonları deneyleri de gerçekleştirilmiş olup, bu kısımda nano partiküllerin ağrılıkça oranlarının ısıl performansa ve hidrolik performansa etkilerini incelemek için boş boru deney sonuçları ele alınmıştır.

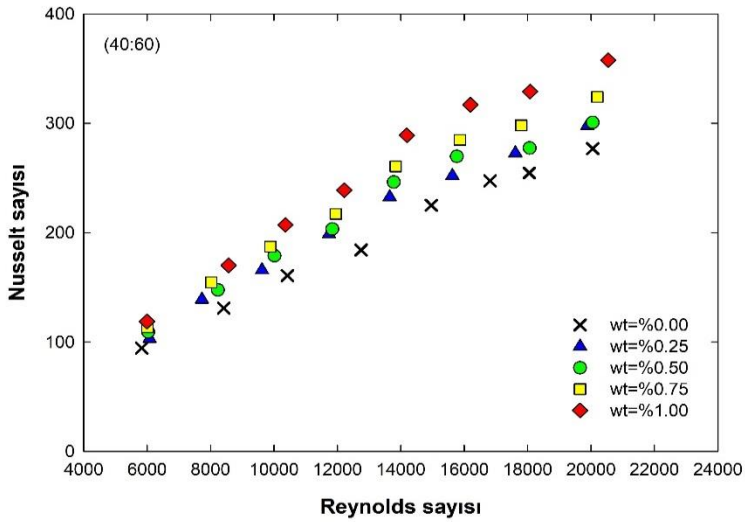
3.2.4.1. Isıl Performansı Açısından Bulgular

Şekil 3.33'te farklı ağırlıksal oranlarda su bazlı TiO_2 nanoakışkanı deneylerinin Nusselt sayılarının Reynolds sayısı ile dağılımı verilmiştir. Su içerisine katılan nano partikül miktarı arttıkça Nusselt sayısının arttığı görülmektedir. Baz akışkana oranla daha yüksek ısıl iletkenlik özelliğine sahip TiO_2 nano partikülleri, akışkan molekülleri arasında iletim ile ısı transferi hızını arttırmaktadır. Ayrıca, sıvı içerisindeki nano boyuttaki katı partiküller taşınım olayını daha kaotik yapıda gerçekleşmesini sağlayarak taşınımla ısı transferini de iyileştirmektedir.



Şekil 3.33. Boş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

Nusselt sayısındaki artış Su:EG karışımı için de geçerli olduğu Şekil 3.34'te görülebilmektedir. Su:EG karışımına katılan TiO_2 nano partikül miktarı artıkça Nusselt sayısı artmaktadır. Ancak her iki baz akışkan göz önüne alındığında su baz akışkanındaki Nusselt sayısındaki artış, Su:EG karışımı baz akışkanındaki Nusselt sayısındaki artıştan daha fazladır. Bu sonucun sebebi, Su:EG karışımın suyun neredeyse iki kat daha az ısıl iletkenlik özelliğine sahip olmasıdır. Ayrıca Su:EG karışımın yoğunluğu ve viskozitesi de daha yüksek olduğundan taşınım olayı daha yavaş ve düzenli bir şekilde gerçekleştiği düşünülmektedir.

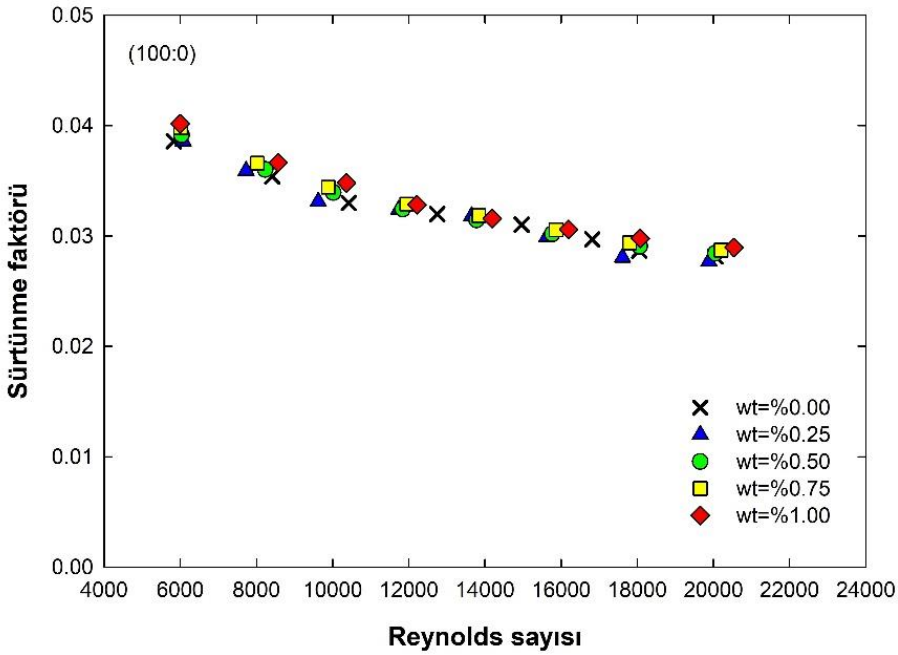


Şekil 3.34. Boş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

Nusselt sayısındaki en yüksek artış oranı su bazlı nanoakışkan için 1.626 oranıyla wt=%1.0 ağırlıksal oranı ve en düşük Reynolds sayısı olan 6137 değerinde elde edilmiştir. Su:EG karışımı bazlı nanoakışkan için ise, 1.297 oranıyla wt=%1.0 ağırlıksal oran ve 8570 Reynolds sayısında elde edilmiştir.

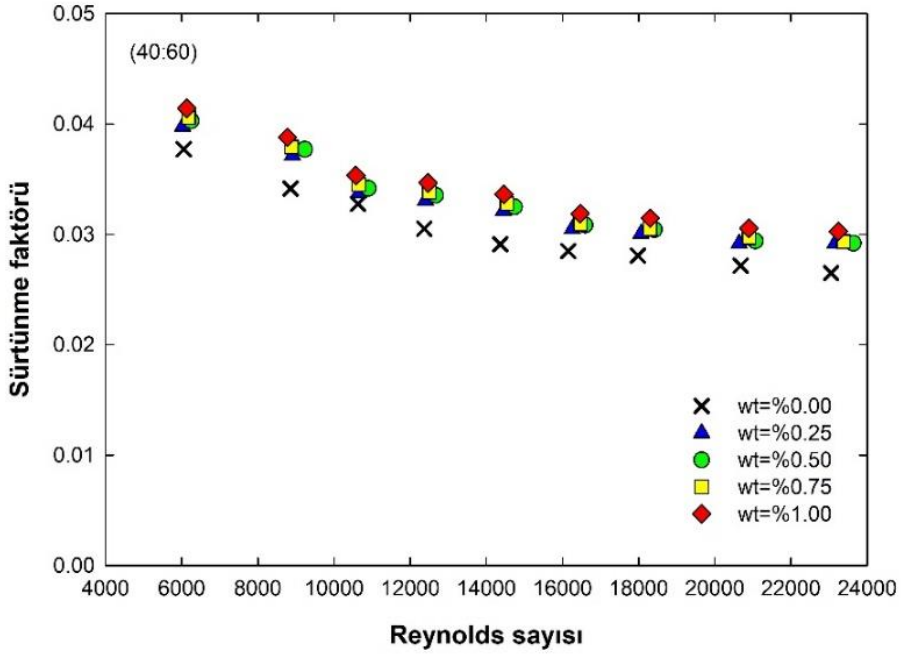
3.2.4.2.Hidrolik Performans Açısından Bulgular

Nanoakışkan kullanımı ile boş boruda yapılan deneylerin hidrolik performanslarının değerlendirilmesi sürtünme faktörü Reynolds sayısı grafiği ile gösterilmiştir. Şekil 3.35'te su bazlı nanoakışkan için elde edilen sürtünme faktörü sonuçları aynı Reynolds sayısı için ağırlıksal oranların artmasıyla neredeyse değişmemektedir. Bu sonuç literatürdeki bağıntıları destekler şekildedir. Nanoakışkanların ağırlıksal oranları arttıkça bilindiği üzere termo fiziksel özellikleri değişmektedir. Reynolds sayısını ilgilendiren yoğunluk ve viskozite özelliği artmaktadır. Sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı eşitlikleri göz önüne alındığında, sürtünme faktörünün aynı Reynolds sayısında yaklaşık sabit kalmasının sebebi basınç düşümündeki artış miktarının, nanoakışkanın yoğunluk ve aynı Reynolds sayısını verecek olan hız değerinin karesi ile dengede olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.35. Boş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

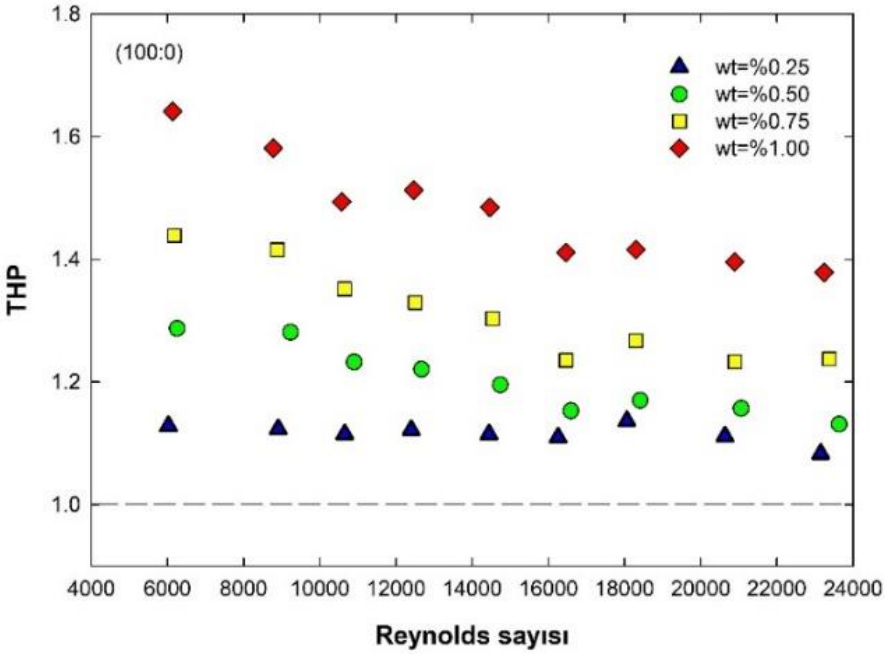
Ancak Şekil 3.36'da verilen Su:EG karışımı bazlı nanoakışkan deneyleri için bu durum farklıdır. Su:EG karışımının yoğunluğu ve viskozitesi sudan fazla olduğu için basınç düşümündeki artış oranı suya göre daha fazladır. Bu yüzden Su:EG-TiO_2 nanoakışkanına ait sürtünme faktörü sonuçlarında ağrılıksa oran arttıkça bir miktar artış görülmüştür. Nanoakışkan deneylerinin Su:EG baz akışkana oranla sürtünme faktöründeki en yüksek artış oranı 1.124 değeriyle wt=%1.0 ağırlıksal oranı ve 20,538 Reynolds sayısında görülmüştür.



Şekil 3.36. Boş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

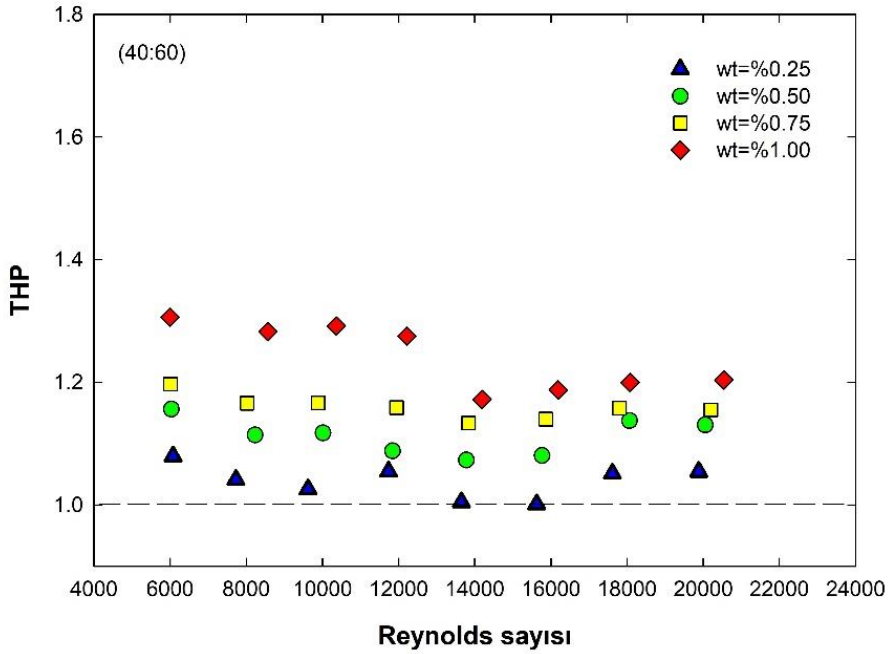
3.2.4.3. Termo-Hidrolik Performans Açısından Bulgular

Baz akışkanlara TiO_2 nano partikülü katılarak ısı transferi iyileştirme çalışmalarının ısıl ve hidrolik performans sonuçları termo-hidrolik performans (THP) kriteri ile ortaya konulmuştur. Şekil 3.37'de su (100:0), Şekil 3.38'de Su:EG (40:60) karışımı bazlı nanoakışkanların THP sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.37. Boş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların termo-hidrolik performans kriteri sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

Şekil 3.37'de ve Şekil 3.38'de görüldüğü gibi su baz akışkanı kullanılarak yapılan nanoakışkan çalışmalarının THP sonuçları Su:EG karışımına kıyasla daha yüksektir. Bu sonucun sebebi, yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahip Su:EG karışımının ısı taşınımı daha zor olmasından dolayı aynı Reynolds sayısında daha az ısıl performans vermesidir. Ayrıca aynı Reynolds sayısında Su:EG karışımı yoğunluk ve viskozitesinden dolayı daha fazla sürtünme faktörü sonucu verdiğinden dolayı THP değeri suya nazaran daha düşüktür. Her iki baz akışkan kullanımında elde edilen THP değerleri bir değerinin üzerinde elde edilmiştir. Her iki baz akışkan ile yapılan çalışmalarda kullanılan TiO_2 nano partikülün ağırlıkça oranı arttıkça THP değeri aynı Reynolds sayısında yükselmektedir. En yüksek THP değeri su baz akışkanında, ağırlıkça oranın (wt) %1.0 olduğu 6136 Reynolds sayısında 1.64 ile elde edilmiştir.

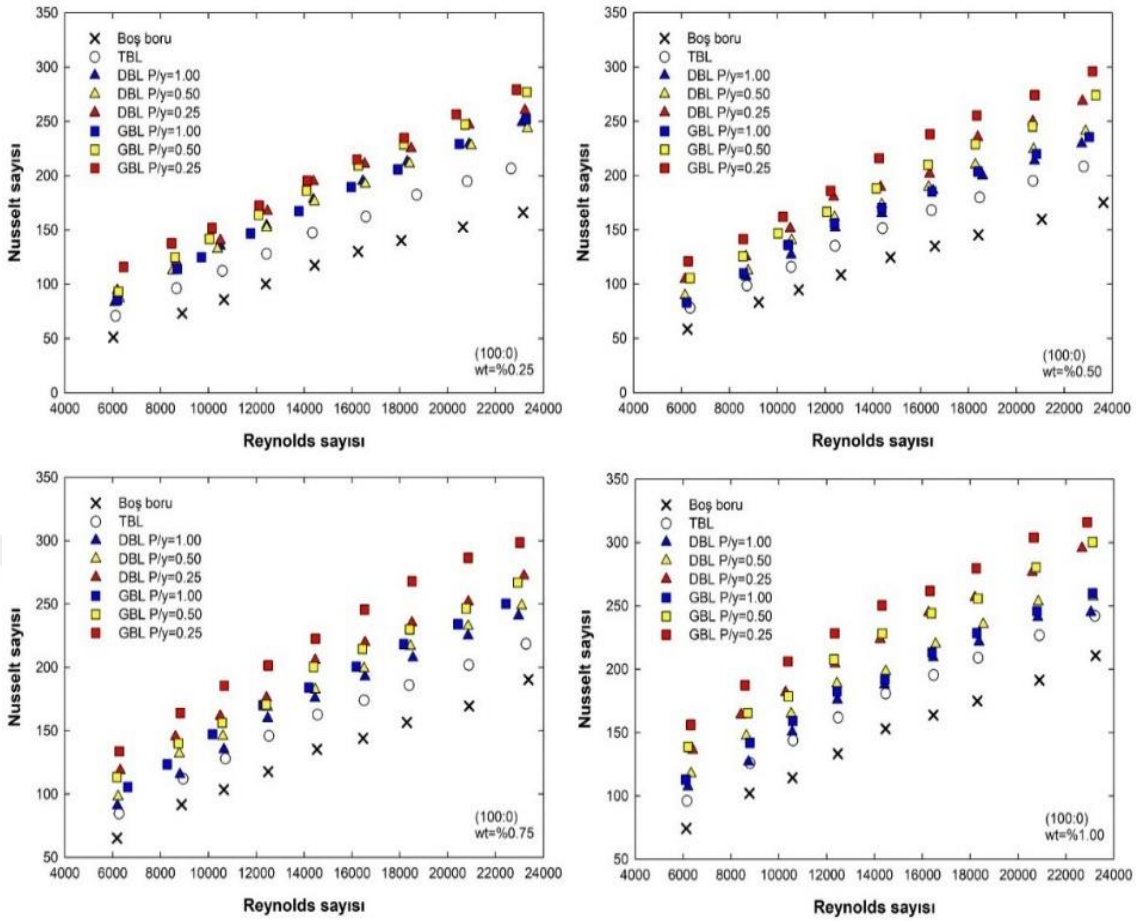


Şekil 3.38. Boş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan çalışmaların termo-hidrolik performans kriteri sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

3.2.5. Nanoakışkan ve İç Eleman Kullanımı ile Edilen Bulgular

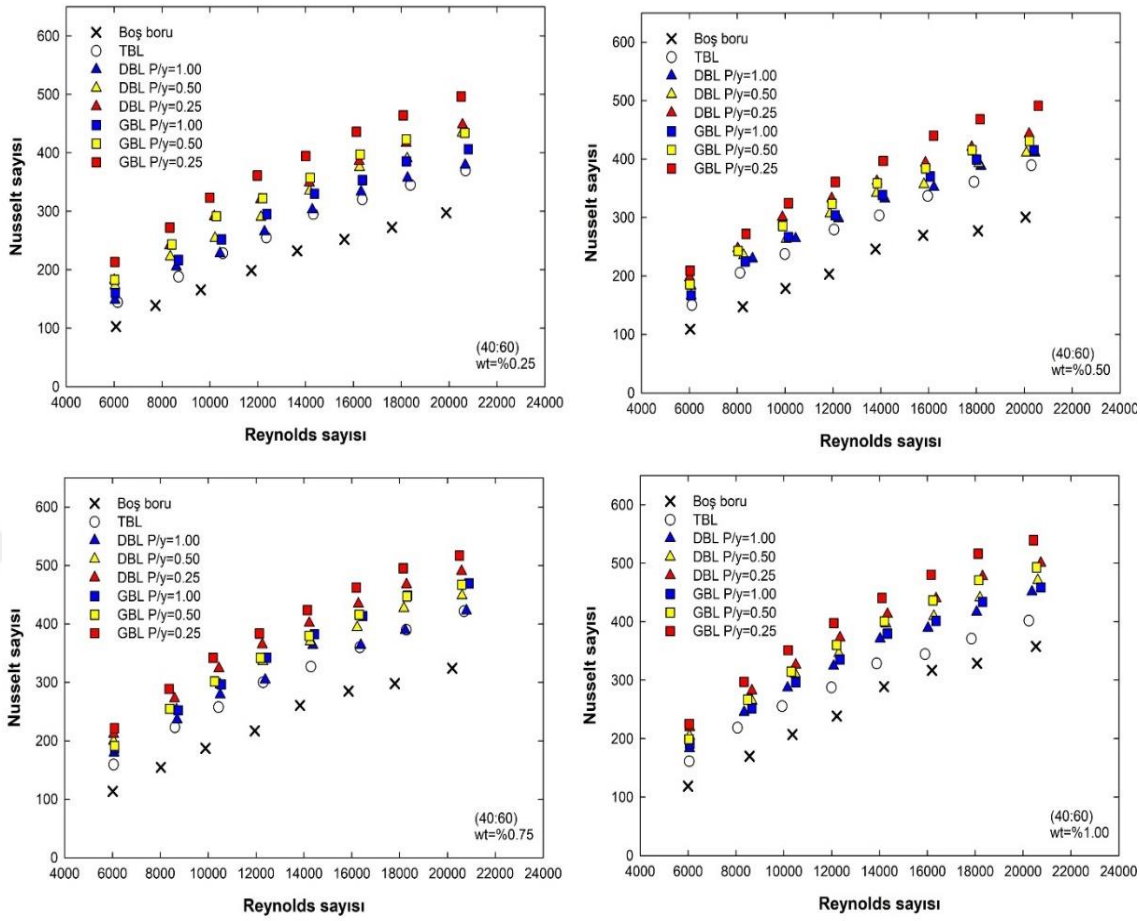
3.2.5.1. Isıl Performansı Açısından Bulgular

İş akışkanı olarak nanoakışkan kullanımı ve boru içerisine iç eleman olarak BL yerleştirilmesi ısıl performansı arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Hem nanoakışkan kullanımı hem de BL yerleştirilmesi ile ısıl performansın iyileşeceği beklenen bir sonuçtur. Şekil 3.39'da farklı ağırlıksal oranlarda su bazlı nanoakışkan kullanımı ve boru içerisine BL yerleştirilmesi ile elde edilen Nusselt sayılarının Reynolds sayısı ile dağılım grafikleri verilmiştir. Bu çalışmaların sonucu olarak da Reynolds sayısı arttıkça tüm konfigürasyonların Nusselt sayılarında artış görülmektedir. BL yerleştirilmesi ile artan Nusselt sayıları, nanoakışkanın ağırlıksal oranının artmasıyla daha da fazla artmaktadır. BL'ların boru içerisinde arttırdığı türbülans ve taşınım olayı, nanoakışkan ile desteklenerek daha efektif bir taşınım ile ısı transferi performansı ortaya koymuştur. En yüksek Nusselt sayısı 316 değeri ile GBL (P/y=0.25) yerleştirilmiş boruda 22,890 Reynolds sayısında ve ağırlıksal oranın %1.0 olduğu deney konfigürasyonunda elde edilmiştir.



Şekil 3.39. Su-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

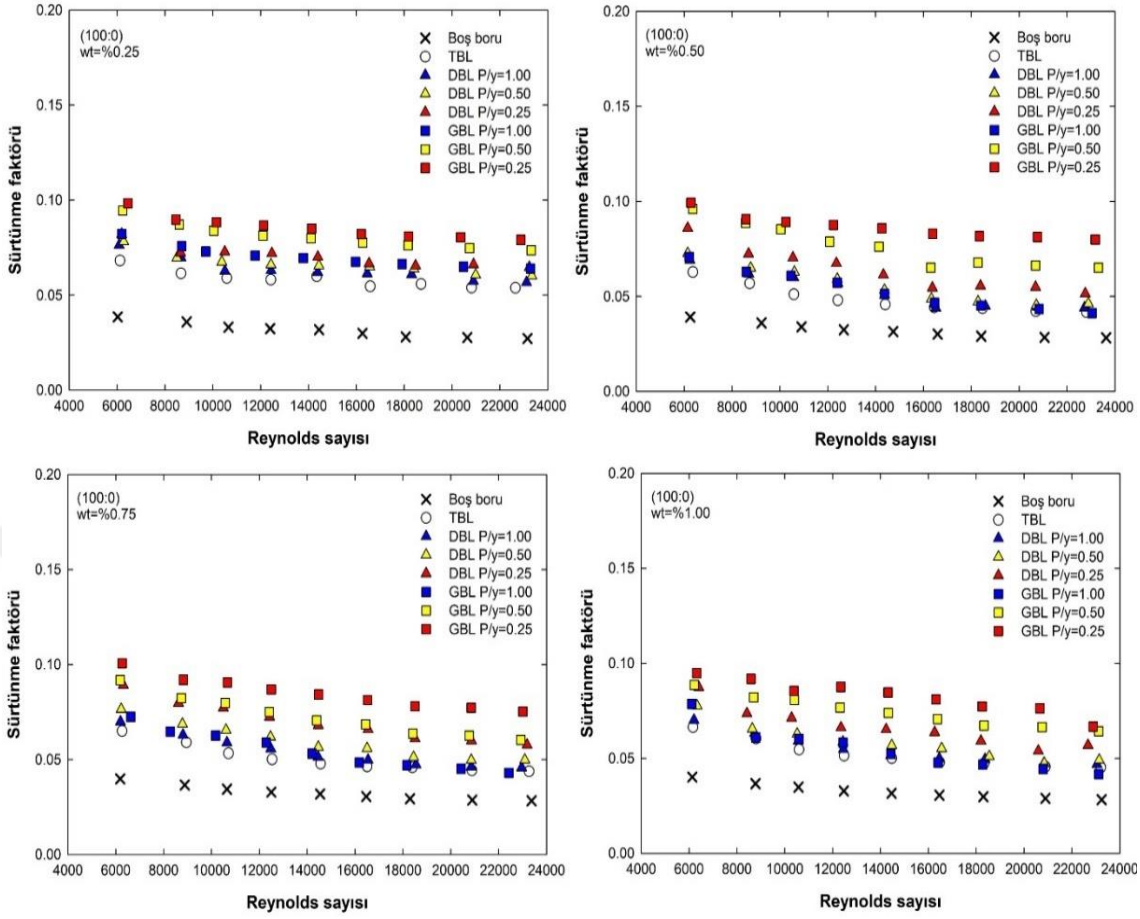
Şekil 3.40 da Su:EG karışımı bazlı nanoakışkanın kullanıldığı ve boru içerisine BL'ların yerleştirildiği deneylerin Nusselt sonuçlarının Reynolds sayısı ile değişim grafikleri verilmiştir. Su baz akışkanına benzer olarak Su:EG karışımı bazlı nanoakışkan kullanımında da BL yerleştirilmiş boru deneylerinde elde edilen Nusselt sayılarında artış görülmüştür. Ancak, Su:EG karışımının suya göre ısıl özelliklerinin ısıl açıdan daha elverişsiz olması sebebiyle, ağırlıksal oranın artmasıyla elde edilen Nusselt sayılarındaki artış daha azdır. Bu sonuç, Su:EG karışımının taşınım ile ısı transferi performansının suya göre daha kötü olmasından kaynaklanmaktadır. En yüksek Nusselt sayısı 539.7 değeri ile GBL (P/y=0.25) yerleştirilmiş boruda 20,437 Reynolds sayısında ve ağırlıksal oranın %1.0 olduğu deney konfigürasyonunda elde edilmiştir.



Şekil 3.40. Su:EG-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

3.2.5.2. Hidrolik Performans Açısından Bulgular

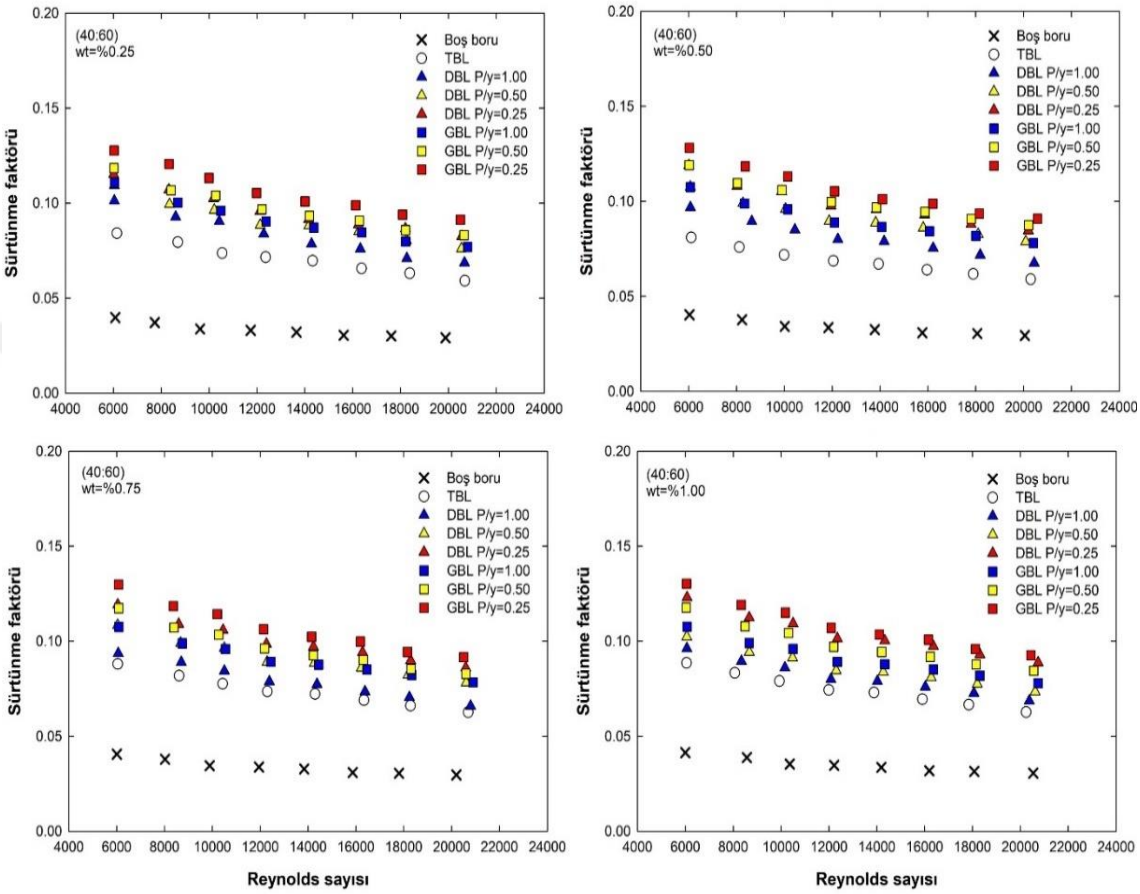
Şekil 3.41'de ve Şekil 3.42'de sırasıyla su ve Su:EG bazlı nanoakışkanların kullanıldığı BL'ların boruya yerleştirildiği deneylerin sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımlarını gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 3.41. Su-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörü sonuçları hem BL yerleştirilmesi açısından hem de nanoakışkanın ağırlıksal oranının artması açısından azalmaktadır. Aynı Reynolds sayısında baz akışkanlara nano partikül eklenerek elde edilen nanoakışkanın sürtünme faktörüne ciddi şekilde artırmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Sürtünme faktörünü esas arttıran boru içerisine BL yerleştirilmesidir. Boru boyunca olan akışta, akışkan içerisindeki partiküllerin nano boyutta ve çok az miktarda (ağırlıksal olarak en fazla %1) olması sebebiyle aynı Reynolds sayısında ciddi bir basınç düşümü gözlemlenmemiştir. Ancak, boru içerisine yerleştirilen BL levhalar, akış doğrultusunda akışa engel teşkil ettiklerinden dolayı basınç düşümü ve dolayısıyla sürtünme faktörü artmaktadır. Bu sonuçlar su ve Su:EG baz akışkanları için de geçerlidir. Bunlara ek olarak Su:EG karışımının yüksek yoğunluk ve viskozitesinden dolayı, suya nazaran daha yüksek sürtüneme faktörü sonuçları elde edilmiştir. En yüksek sürtünme faktörü

GBL (P/y=0.25) ve ağırlıksal oranın %1 olduğu deneylerde su baz akışkanı için 0.0948 değeri ile 6319.6 Reynolds sayısında; Su:EG baz akışkanı için 0.13 değeri ile 6048.8 Reynolds sayısında elde edilmiştir.



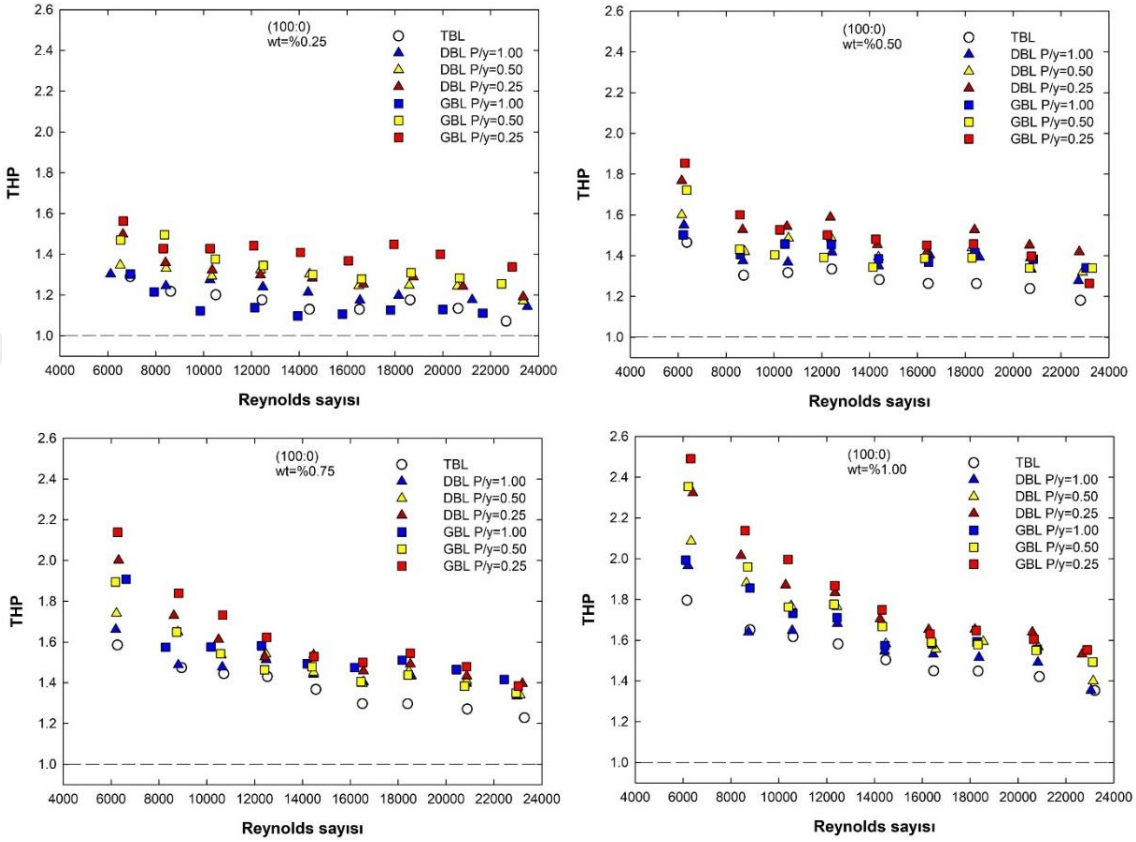
Şekil 3.42. Su:EG-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların sürtünme faktörü sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

3.2.6. Termo-Hidrolik Performans Açısından Bulgular

İş akışkanı olarak nanoakışkan kullanılması ve BL levhaların yerleştirilmesi ile yapılan deneylerin ısıl ve hidrolik performansı termo-hidrolik performans (THP) kriteri kullanılarak değerlendirilmiştir. THP sonuçlarının Reynolds sayısına göre dağılımları Şekil 3.43'te su bazlı, Şekil 3.44'te Su:EG karışımı bazlı olarak verilmiştir.

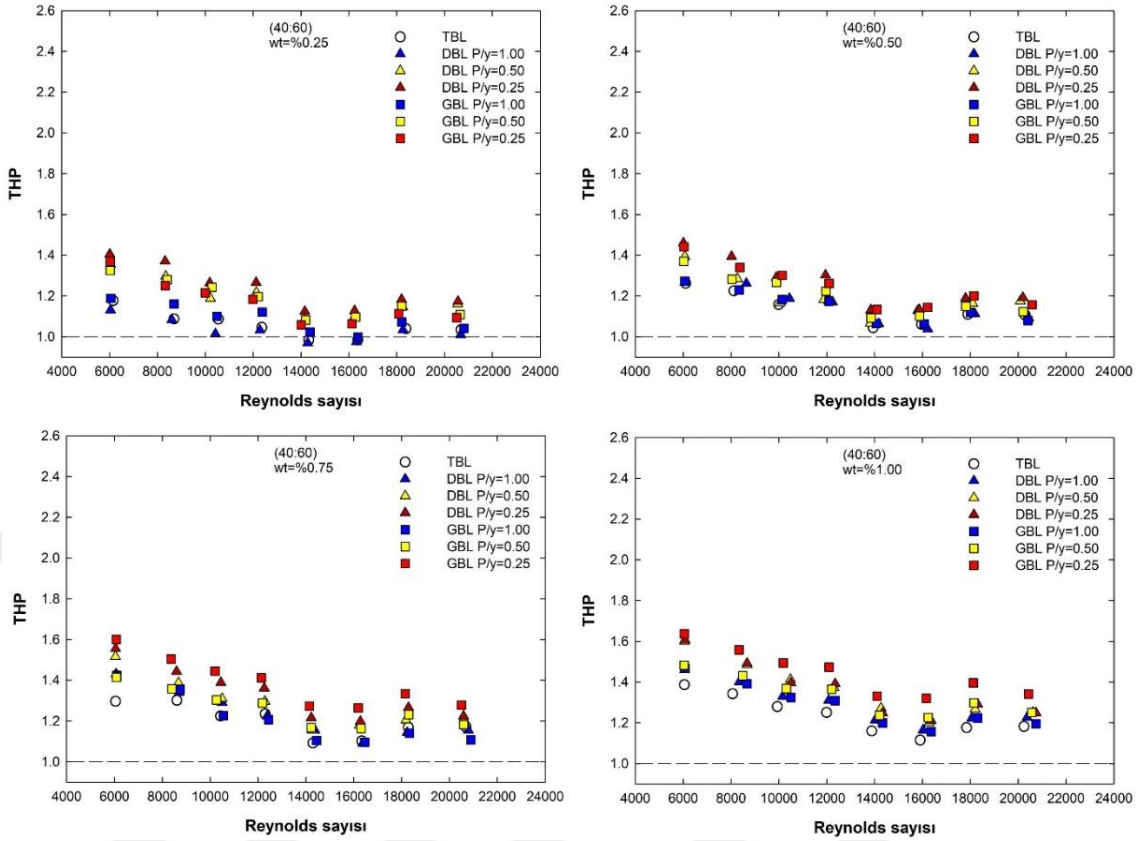
Su bazlı nanoakışkan kullanımında tüm BL yerleştirilmesi ile yapılan çalışmalarda THP değeri birin üzerinde elde edilmiştir. THP değeri, tüm ağırlıksal oranlarda ve BL konfigürasyonlarında Reynolds sayısı artarken azalmaktadır. Ağırlıksal oran arttıkça

THP değer tüm BL levha kullanımlarında artmaktadır. En yüksek THP değeri 2.49 ile 6319 Reynolds sayısında GBL (P/y=0.25) yerleştirilmesi ve %1.0 ağırlıksal oranda nanoakışkan kullanımında elde edilmiştir.



Şekil 3.43. Su-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların THP sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

Su:EG bazlı nanoakışkan ve BL yerleştirilmiş çalışmaların sonuçları karakteristik olarak Su bazlı nanoakışkan kullanımı ve BL yerleştirilmiş çalışmalara benzerlik taşımaktadır. Su:EG karışımı ısıl açıdan suya göre daha olumsuz ısıl ve fiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle daha az Nusselt sayısı ve daha yüksek sürtünme faktörüne sahip olduğundan THP değerleri daha düşük elde edilmiştir. En yüksek THP değeri 1.637 değeri ile 6048 Reynolds sayısında GBL (P/y=0.25) yerleştirilmesi ve %1.0 ağırlıksal oranda nanoakışkan kullanımında elde edilmiştir.



Şekil 3.44. Su:EG-TiO_2 nanoakışkan ve iç elaman çalışmaların THP sonuçlarının Reynolds sayısı ile dağılımı

3.3. Deneysel Bulgular Kullanılarak Bağıntılar Geliştirilmesi

Su bazlı çalışmalarda 9 Reynolds sayısı (6000-23,000), 5 ağırlıksal oranda nanoakışkan kullanımı (%0-%1.0) ve 8 farklı boru içerisine yerleştirilen BL konfigürasyonu olmak üzere toplam 360 deney gerçekleştirilmiştir. Su:EG karışımında ise nanoakışkan ve BL konfigürasyonları sabit kalmak üzere kullanılan pompa kapasitesinden dolayı ise 8 Reynolds sayısı olmak üzere toplam 320 deney gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneylerin sonuçları Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü olarak grafiksel olarak verilmiştir. Ancak incelenen parametrelerin ara değerlerindeki sonuçların da bilinmesi, başka çalışmalarda kullanılmasını kolaylaştıracağından dolayı sonuçlar bağıntılar halinde sunulması değerlidir. Bu kapsamda sonuçlar su ve Su:EG bazlı olmak üzere Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünü veren bağıntılar geliştirilmiştir.

3.3.1. Boş Boru Deneyleri İçin Geliştirilen Bağıntıları

Su bazlı iş akışkanı kullanılan boş boru deneylerinin Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü sonuçları için geliştirilen bağıntılar sırasıyla Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 de verilmiştir. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için geliştirilen bağıntıları en fazla $\pm$%5 hata oranı içerisinde sonuç vermektedir. Bu bağıntılar aşağıdaki sınırlar içerisinde geçerlidir.

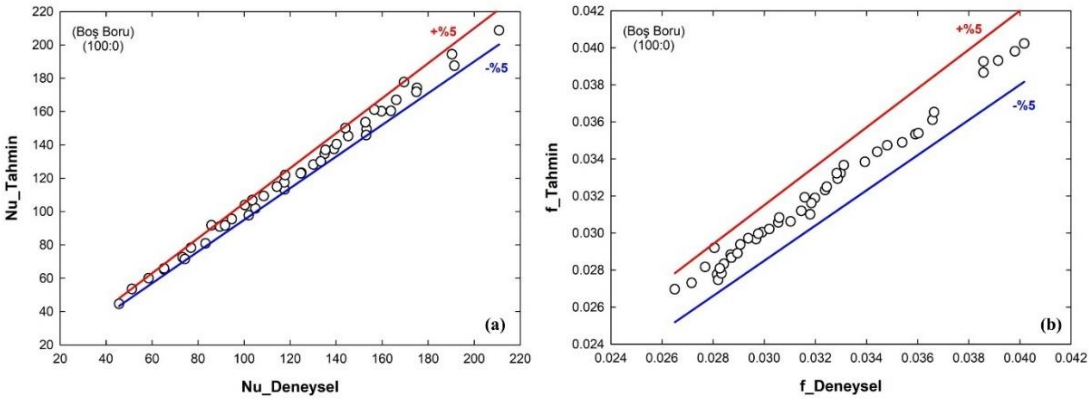
i. $5.60 \leq Pr \leq 7.58$

ii. $6025 \leq Re \leq 23.638$

iii. $0 \leq wt \leq 1.00$

$$Nu_{Boş\ boru\ (100:0)} = 0.012147Re^{0.758781}Pr^{0.887906}(1+wt)^{0.773855} \quad (3.2)$$

$$f_{Boş\ boru\ (100:0)} = 0.405047Re^{-0.26973}(1+wt)^{0.062409} \quad (3.3)$$



Şekil 3.45. Boş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı

Şekil 3.45a'da Nusselt sayısı için Şekil 3.45b'de sürtünme faktörü için geliştirilen bağıntılar ile tahmin edilen değerlerin deney sonuçları ile kıyaslanması gösterilmiştir.

Su:EG karışımının baz akışkan olarak kullanıldığı boş boru deneylerinin Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü sonuçları için geliştirilen bağıntılar sırasıyla Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5 de verilmiştir. Bu bağıntılar Nusselt sayısı için $\pm$%10 ve sürtünme faktörü için $\pm$%5 hata aralığı arasında doğru sonuç vermektedir. Bu bağıntılar ile tahmin edilen değerler deney sonuçları ile kıyaslanması Şekil 3.46a'da Nusselt sayısı için Şekil 3.46b'de

sürtünme faktörü için gösterilmiştir. Bu bağıntılar aşağıdaki sınırlar içerisinde geçerlidir.

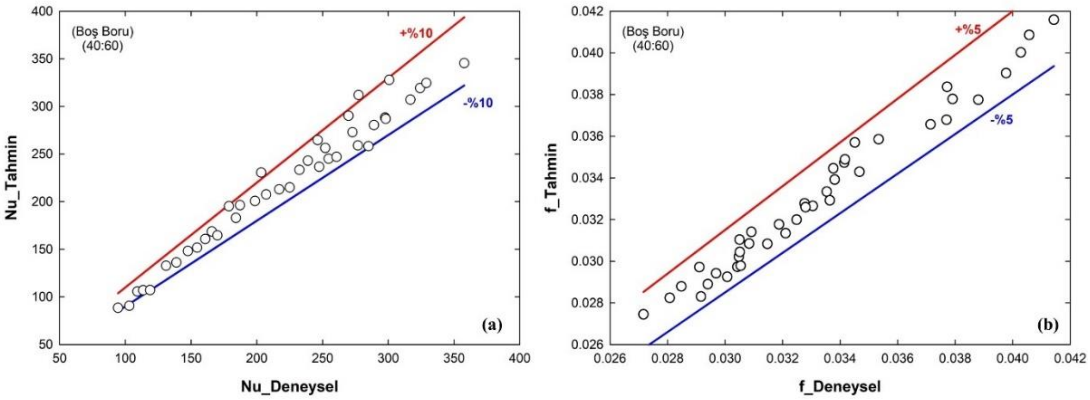
i. $26.52 \leq Pr \leq 43.42$

ii. $5830 \leq Re \leq 20537$

iii. $0 \leq wt \leq 1.00$

$$Nu_{Boş\ boru\ (40:60)} = 0.000578Re^{0.683308}Pr^{1.66372}(1+wt)^{1.056914} \quad (3.4)$$

$$f_{Boş\ boru\ (40:60)} = 0.4024877Re^{-0.27108}(1+wt)^{0.127255} \quad (3.5)$$



Şekil 3.46. Boş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı

3.3.2. Bükülmüş Levha Yerleştirilmiş Deneyler İçin Geliştirilen Bağıntıları

3.3.2.1. TBL Yerleştirilmiş Boru Çalışmaları İçin Bağıntılar

İş akışkanı olarak su bazlı akışkanların kullanıldığı ve boru içerisine TBL yerleştirilmiş deneylerin Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için sırasıyla Eşitlik 3.6 ve Eşitlik 3.7 deki bağıntılar geliştirilmiştir. Bu bağıntılar $\pm$%12 doğruluk ile sonuç vermekte olup Şekil 3.47'de grafiksel olarak tahmin edilen sonuçların deney sonuçları ile kıyaslanması verilmiştir. Bu bağıntılar aşağıdaki sınırlar içerisinde geçerlidir.

i. $5.60 \leq Pr \leq 7.58$

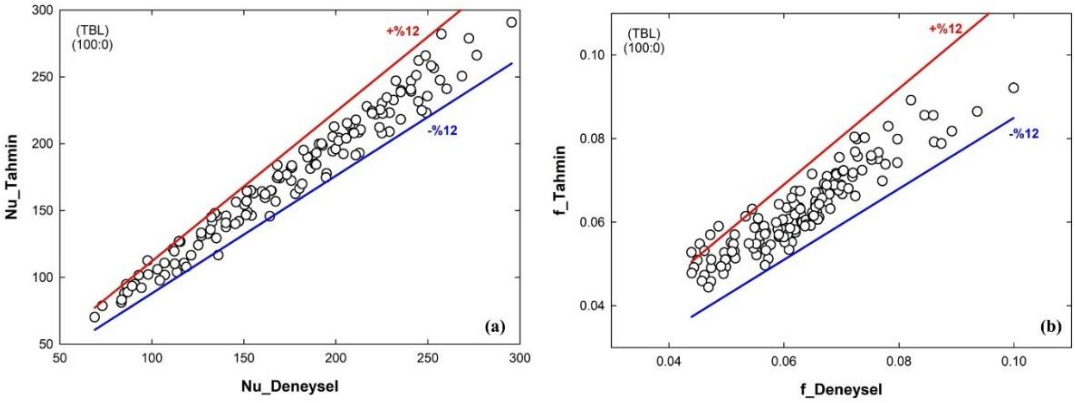
ii. $6123 \leq Re \leq 23275$

iii. $0 \leq wt \leq 1.00$

iv. $\frac{y}{w} = 6.06$

$$Nu_{TBL\,(100:0)} = 0.03024Re^{0.706626}Pr^{0.813325}(1+wt)^{0.622031} \quad (3.6)$$

$$f_{TBL\,(100:0)} = 0.735667Re^{-0.274072}(1+wt)^{-0.099985} \quad (3.7)$$



Şekil 3.47. TBL yerleştirilmiş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı

Su:EG karışımının baz akışkan olarak kullanıldığı ve boru içerisine TBL yerleştirilen deneylerin Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü sonuçları için geliştirilen bağıntılar sırasıyla Eşitlik 3.8 de ve Eşitlik 3.9 da verilmiştir. Bu bağıntılar $\pm$%5 doğruluk ile sonuç vermekte olup; bağıntılar ile elde edilen tahmini sonuçların deneysel sonuçlar ile kıyaslandığı grafikler Şekil 3.48a'da Nusselt sayısı için Şekil 3.48b'de sürtünme faktörü için verilmiştir. Bu bağıntılar aşağıdaki sınırlar içerisinde geçerlidir.

i. $26.52 \leq Pr \leq 43.42$

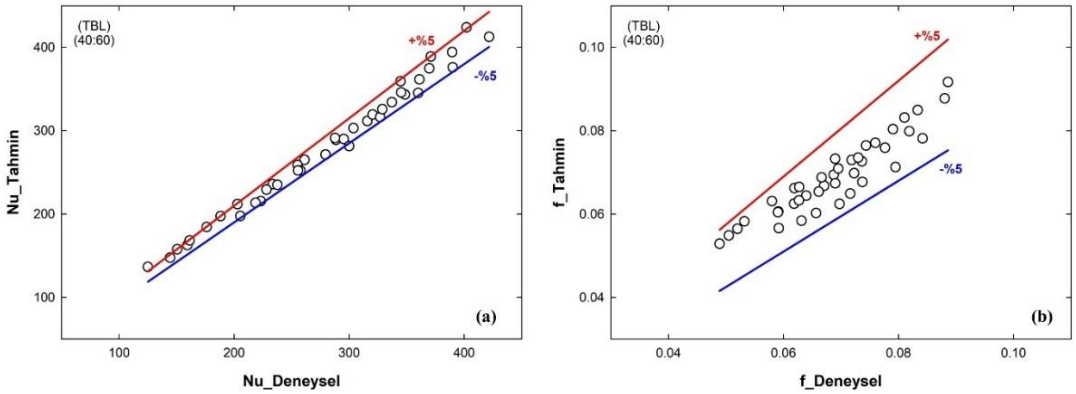
ii. $5936 \leq Re \leq 20{,}693$

iii. $0 \leq wt \leq 1.00$

iv. $\frac{y}{w} = 6.06$

$$Nu_{TBL\ (40:60)} = 0.094478Re^{0.718955}Pr^{0.284737}(1+wt)^{0.419419} \quad (3.8)$$

$$f_{TBL\ (40:60)} = 0.737641Re^{-0.265755}(1+wt)^{-0.330811} \quad (3.9)$$



Şekil 3.48. TBL yerleştirilmiş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı

3.3.2.2. DBL Yerleştirilmiş Boru Çalışmaları İçin Bağıntılar

İş akışkanı olarak su bazlı akışkanların kullanıldığı ve boru içerisine DBL yerleştirilmiş deneylerin Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için sırasıyla Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11 deki bağıntılar geliştirilmiştir.

i. $5.60 \leq Pr \leq 7.58$

ii. $6087 \leq Re \leq 23{,}534$

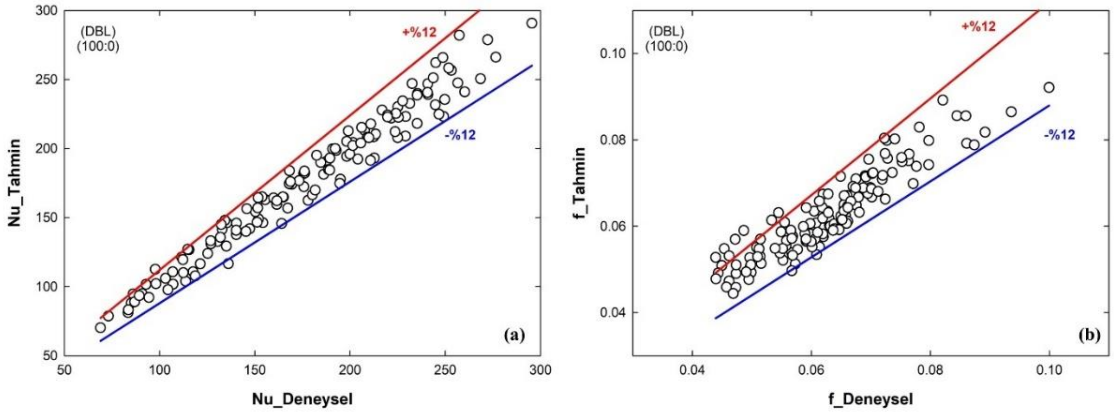
iii. $0 \leq wt \leq 1.00$

iv. $\frac{y}{w} = 6.06$

v. $0.25 \leq P/y \leq 1.00$

$$Nu_{DBL\ (100:0)} = 0.053374Re^{0.680546}Pr^{0.784343}(1+wt)^{0.616585}(1+P/y)^{-0.24405} \quad (3.10)$$

$$f_{DBL\ (100:0)} = 1.539885Re^{-0.310494}(1+wt)^{-0.24059}(1+P/y)^{-0.37556} \quad (3.11)$$



Şekil 3.49. DBL yerleştirilmiş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı

Su:EG karışımının baz akışkan olarak kullanıldığı ve boru içerisine DBL yerleştirilen deneylerin Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü sonuçları için geliştirilen bağıntılar sırasıyla Eşitlik 3.12 de ve Eşitlik 3.13 da verilmiştir. Bu bağıntılar aşağıdaki sınırlar içerisinde geçerlidir.

i. $26.52 \leq Pr \leq 43.42$

ii. $5985 \leq Re \leq 20{,}793$

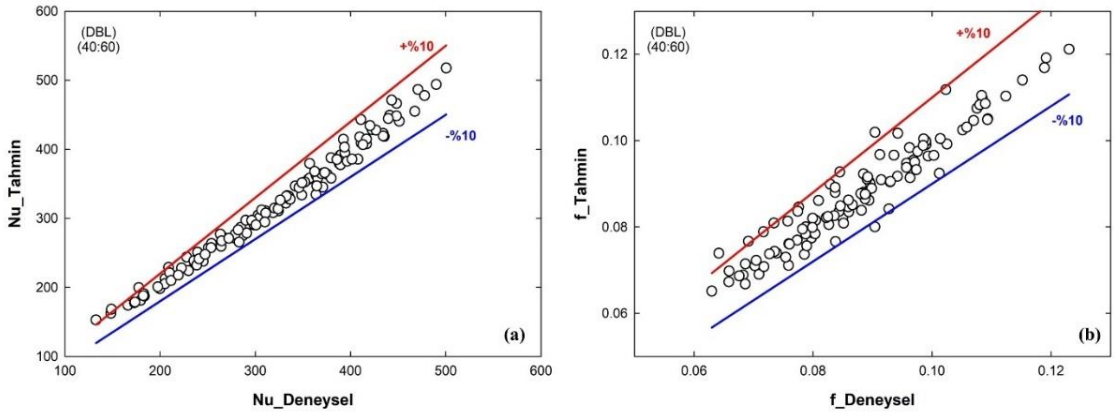
iii. $0 \leq wt \leq 1.00$

iv. $\frac{y}{w} = 6.06$

v. $0.25 \leq P/y \leq 1.00$

$$Nu_{DBL\,(40:60)} = 0.253163Re^{0.669169}Pr^{0.222415}(1+wt)^{0.389768}(1+P/y)^{-0.317449} \quad (3.12)$$

$$f_{DBL\,(40:60)} = 1.216631Re^{-0.264123}(1+wt)^{-0.135099}(1+P/y)^{-0.444295} \quad (3.13)$$



Şekil 3.50. DBL yerleştirilmiş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı

Bu bağıntılar $\pm$%10 doğruluk ile sonuç vermekte olup; bağıntılar ile elde edilen tahmini sonuçların deneysel sonuçlar ile kıyaslandığı grafikler Şekil 3.50a'da Nusselt sayısı için Şekil 3.50b'de sürtünme faktörü için verilmiştir

3.3.2.3. GBL Yerleştirilmiş Boru Çalışmaları İçin Bağıntılar

İş akışkanı olarak su bazlı akışkanların kullanıldığı ve boru içerisine GBL yerleştirilmiş deneylerin Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için sırasıyla Eşitlik 3.14 ve Eşitlik 3.15 deki bağıntılar geliştirilmiştir. Bu bağıntılar $\pm$%12 doğruluk ile sonuç vermekte olup Şekil 3.51'de grafiksel olarak tahmin edilen sonuçların deney sonuçları ile kıyaslanması verilmiştir. Bu bağıntılar aşağıdaki sınırlar içerisinde geçerlidir.

i. $5.60 \leq Pr \leq 7.58$

ii. $6112 \leq Re \leq 23{,}315$

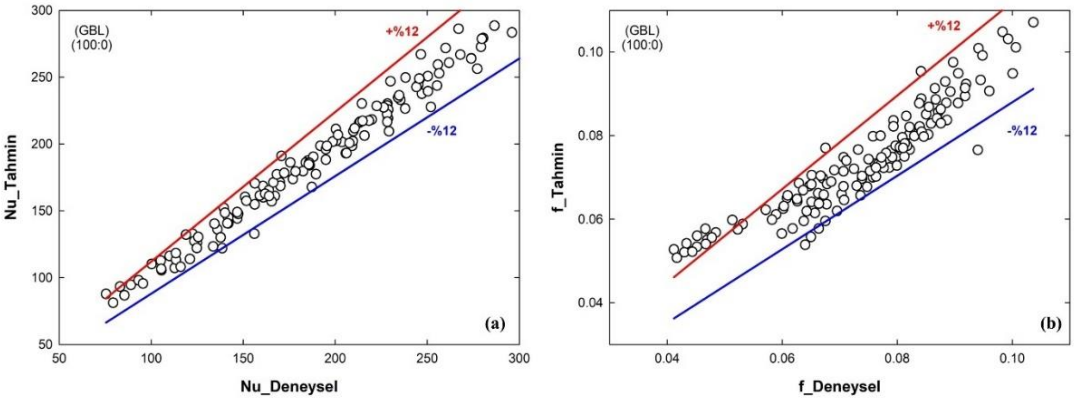
iii. $0 \leq wt \leq 1.00$

iv. $\frac{y}{w} = 6.06$

v. $0.25 \leq P/y \leq 1.00$

$$Nu_{GBL\,(100:0)} = 0.096637 Re^{0.667585} Pr^{0.615337} (1 + wt)^{0.598518} (1 + P/y)^{-0.408937} \quad (3.14)$$

$$f_{GBL\,(100:0)} = 1.303920 Re^{-0.266433} (1 + wt)^{-0.130414} (1 + P/y)^{-0.690019} \quad (3.15)$$



Şekil 3.51. GBL yerleştirilmiş boruda Su-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı

Su:EG karışımının baz akışkan olarak kullanıldığı ve boru içerisine GBL yerleştirilen deneylerin Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü sonuçları için geliştirilen bağıntılar sırasıyla Eşitlik 3.16 de ve Eşitlik 3.17 da verilmiştir. Bu bağıntılar $\pm$%10 doğruluk ile sonuç vermekte olup; bağıntılar ile elde edilen tahmini sonuçların deneysel sonuçlar ile kıyaslandığı grafikler Şekil 3.52a'da Nusselt sayısı için Şekil 3.52b'de sürtünme faktörü için verilmiştir. Bu bağıntılar aşağıdaki sınırlar içerisinde geçerlidir.

i. $26.52 \leq Pr \leq 43.42$

ii. $6014 \leq Re \leq 20{,}897$

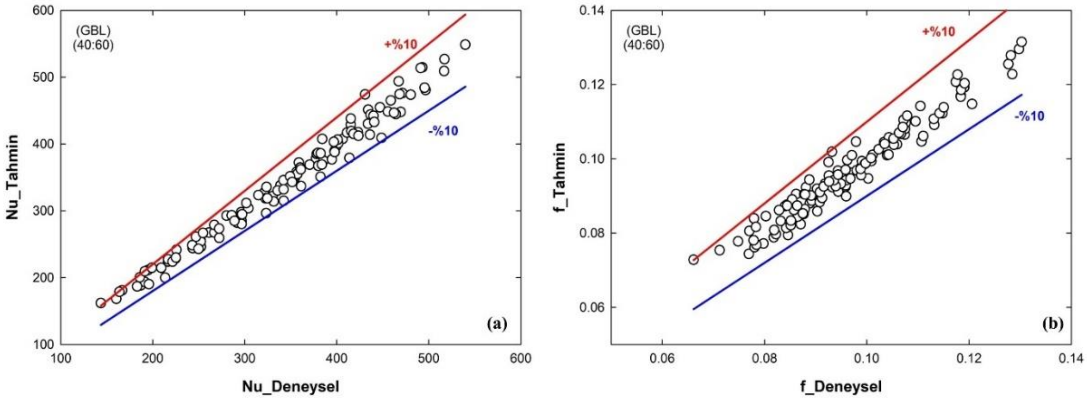
iii. $0 \leq wt \leq 1.00$

iv. $\frac{y}{w} = 6.06$

v. $0.25 \leq P/y \leq 1.00$

$$Nu_{GBL\ (40:60)} = 0.205079Re^{0.661649}Pr^{0.320436}(1+wt)^{0.424418}(1+P/y)^{-0.372347} \quad (3.16)$$

$$f_{GBL\ (40:60)} = 1.487018Re^{-0.27676731}(1+wt)^{-0.100769}(1+P/y)^{-0.38392} \quad (3.17)$$



Şekil 3.52. GBL yerleştirilmiş boruda Su:EG-TiO_2 nanoakışkan deneylerinin (a) Nusselt sayısı ve (b) sürtünme faktörü için oluşturulan bağıntıların deney sonuçlarına yakınlığı

3.4. Deneysel Bulguların Optimizasyonu

Daha önceki bölümlerde deney sonuçları ısıl performansı açısından Nusselt sayısı, hidrolik performans açısından ise sürtünme faktörü ile değerlendirilmişti. Ayrıca bu iki boyutsuz sayının kullanıldığı THP kriteri ile de hem ısıl performans hem de hidrolik performans aynı Reynolds sayısında değerlendirilmiştir.

Baz akışkana nano partikül katılmasıyla akışkanın ısıl ve fiziksel özelliklerini değişmesiyle bu boyutsuz sayıların uygulamada efektif şekilde kullanılamamaktadır. Isı değişicisi uygulamalarında sistemin sunduğu ısıl performansının belirlenmesinde taşınım ile ısı transferi katsayısı (h); kullanılacak pompanın gücünün belirlenmesinde ise hacimsel debi ve basınç düşümü bilinmesi gerekmektedir. Bu kapsamda h ve ΔP nin optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Optimizasyon yöntemi olarak Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon işleminde en yüksek taşınım ile ısı transferi katsayısı (h) ve en düşük basınç düşümü (ΔP) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında h ve ΔP e etkisi olan parametreler hacimsel olarak pompa debisi, nanoakışkanın ağırlıksal oranı ve test borusu konfigürasyonlarıdır. Bu parametreler Taguchi yönteminde faktör olarak isimlendirilmektedir. Tez çalışması kapsamında boş boru (BB), TBL, DBL (P/y=1.00), DBL (P/y=0.50), DBL (P/y=0.25), GBL (P/y=1.00), GBL (P/y=0.50), GBL (P/y=0.25), olmak üzere 8 farklı ve test borusu konfigürasyonu bulunmaktadır. Taguchi yönteminin sunduğu deney tasarımları içerisinden çalışma DBL ve GBL optimizasyonu olarak ikiye

ayrılmıştır. Ayrıca su ve Su:EG karışımı baz akışkanları da uygulama alanları farlı olduğundan bu çalışmaların da optimizasyonu kendi aralarında yapılmıştır. Toplamda 4 adet optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Çalışma kapsamına en uygun Taguchi yönteminin sunduğu 3 faktör-5 seviye deney tasarımı seçilmiştir. Bu kapsamda incelenen deney sayısı 5^3=125 dir. Taguchi yöntemi bu deney tasarımını 125 deney yerine 25 deney (L_{25} ortogonal dizisi) ile yapılabilmesini mümkün kılmaktadır.

3.4.1. Su Bazlı Çalışmalarının Optimizasyonu

3.4.1.1. DBL Kullanıldığı Çalışmalarının Optimizasyonu

Su bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri Tablo 3.14 de verilmiştir. Taguchi yönteminde L_{25} ortogonal dizisi kullanılarak oluşturulan deney tasarımı, bu deneylerden elde edilen h ve ΔP sonuçları ve bu sonuçların SNR değerleri Tablo 3.15 de verilmiştir. h ve ΔP in SNR değerlerinin hesaplanmasında sırasıyla en yüksek daha iyi ve en düşük daha iyi kriterleri göz önüne alınmıştır.

Tablo 3.14. Su bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri

Faktörler	**Seviyeler**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A – Hacimsel debi [m^3/h]	0.25	0.58	0.81	1.04	1.33
B- Nanoakışkanın ağırlıkça oranı (%)	0	0.25	0.5	0.75	1
C - Boru konfigürasyonları	Boş boru	TBL	DBL (P/y=1.00)	DBL (P/y=0.50)	DBL (P/y=0.25)

Taguchi analizi sonucunda elde edilen ortalama SNR değerleri h için Tablo 3.16 da ΔP için Tablo 3.17 de verilmiştir. Bu sonuçlara göre en optimum h değerini veren deney konfigürasyonu A5B5C5 ile hacimsel debinin1.33 m^3/h, wt=%1.0 nanoakışkanı ve DBL (P/y=0.25) yerleştirilmiş boru deneyidir. ΔP açısından ise en optimum deney konfigürasyonu A1B1C1 ile hacimsel debinin 0.25 m^3/h, wt=%1.0 nanoakışkanı ve boş boru deneyidir.

Tablo 3.15. Su bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmalar için deney tasarımı, deney sonuçları ve sonuçların SNR değerleri

Deney	Faktörler			Sonuçlar		SNR	
No	A	B	C	h	ΔP	h	ΔP
1	1	1	1	1643.92	117.00	64.32	-41.36
2	1	2	2	2565.31	264.23	68.18	-48.44
3	1	3	3	3094.88	313.68	69.81	-49.93
4	1	4	4	3594.87	354.95	71.11	-51.00
5	1	5	5	5014.74	502.08	74.00	-54.02
6	2	1	2	3411.71	618.38	70.66	-55.83
7	2	2	3	4331.78	814.02	72.73	-58.21
8	2	3	4	5055.35	891.61	74.08	-59.00
9	2	4	5	5869.13	1190.98	75.37	-61.52
10	2	5	1	4171.81	659.38	72.41	-56.38
11	3	1	3	2501.84	251.36	67.97	-48.01
12	3	2	4	6224.00	1495.99	75.88	-63.50
13	3	3	5	6794.31	1770.54	76.64	-64.96
14	3	4	1	4895.90	1041.11	73.80	-60.35
15	3	5	2	6571.29	1883.98	76.35	-65.50
16	4	1	4	6548.51	2147.07	76.32	-66.64
17	4	2	5	7504.70	2553.45	77.51	-68.14
18	4	3	1	5649.31	1592.13	75.04	-64.04
19	4	4	2	6712.81	2424.04	76.54	-67.69
20	4	5	3	8039.54	3118.69	78.10	-69.88
21	5	1	5	8232.81	3556.17	78.31	-71.02
22	5	2	1	5921.68	1850.85	75.45	-65.35
23	5	3	2	7451.27	3250.39	77.44	-70.24
24	5	4	3	8685.25	3785.73	78.78	-71.56
25	5	5	4	9327.79	4940.21	79.40	-73.87

Tablo 3.16. h için ortalama SNR değerleri

Faktörler	Seviyeler				
	1	2	3	4	5
A - Hacimsel debi	69.49	73.05	74.13	76.70	77.88[a]
B - Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	71.52	73.95	74.60	75.12	76.05[a]
C - Boru konfigürasyonları	72.20	73.84	73.48	75.36	76.37[a]

Ortalama = 74.24933 dB.
[a] Optimum seviye.

Tablo 3.17. ΔP için ortalama SNR değerleri

Faktörler	Seviyeler				
	1	2	3	4	5
A - Hacimsel debi	-48.95[a]	-58.19	-60.46	-67.28	-70.41
B - Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	-56.57[a]	-60.73	-61.63	-62.43	-63.93
C - Boru konfigürasyonları	-57.50[a]	-61.54	-59.52	-62.80	-63.93

Ortalama = -61.058 dB.
[a] Optimum seviye.

Deney parametrelerinin (faktörlerin) deney sonuçları üzerine etki seviyelerinin incelenmesi amacıyla ANOVA yapılmıştır. Tablo 3.18 ve Tablo 3.19 sırasıyla h ve ΔP açısından ANOVA sonuçlarını göstermektedir. h ve ΔP üzerinde en fazla etkisi olan faktör hacimsel debi en fazla olup etki yüzdesi sırasıyla %62.19 ve %78.85 dir. Her iki deney sonucu açısından da tüm faktörlerin F-test değerleri %95 güven aralığı içerisinde yer almaktadır.

Tablo 3.18. h açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	4	216.33	54.131	32.85[a]	3.26	62.19
B	4	58.50	14.624	8.88[a]	3.26	16.80
C	4	53.36	13.340	8.10[a]	3.26	15.33
Hata	12	19.77	1.648			5.68
Toplam	24	348.15				100

[a] %95 güvenilirlik

Tablo 3.19. ΔP açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	4	1406.52	351.631	46.49[a]	3.26	78.85
B	4	153.51	38.379	5.07[a]	3.26	8.61
C	4	132.95	33.237	4.39[a]	3.26	7.45
Hata	12	90.77	7.564			5.09
Toplam	24	1783.75				100

[a] %95 güvenilirlik

Test sonuçlarının doğruluğunun testi için doğrulama testi yapılmıştır. En yüksek h değerini veren deney konfigürasyonu olan A5B5C5 deney konfigürasyonu L_{25} ortogonal diziye eklenerek Taguchi analizi tekrarlanmıştır. Başlangıç parametresi olarak L_{25} ortogonal dizide yer alan en yüksek h değerini veren A5B5C4 deney konfigürasyonu ele alınmıştır. En düşük ΔP değerini veren deney konfigürasyonu A1B1C1 L_{25} ortogonal dizide yer aldığı için ΔP açısından doğrulama testi yapılmasına gerek kalmamıştır. Tablo 3.20 de h için yapılan doğrulama testi sonuçları verilmiştir. Yapılan doğrulama testi sonucunda göre tahmin edilen h değeri ve SNR değerine yakın değerler elde edilerek çalışma doğrulanmıştır. Ayrıca, başlangıç parametresinden 1.20 dB daha yüksek SNR değeri elde edilerek, sonuç iyileştirilmiştir.

Tablo 3.20. h için doğrulama testi sonuçları

	Başlangıç parametreleri	Optimum parametreler	
		Tahmin	Deney
Seviye	A5B5C4	A5B5C5	A5B5C5
h [w/m^2/K]	9327.79	10,046.77	10,710.04
SNR (dB)	79.40	81.7991	80.60

h için geliştirilen SNR = 1.20 dB.

3.4.1.2. GBL Kullanıldığı Çalışmalarının Optimizasyonu

Su bazlı ve boru içerisinde GBL'ların kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri Tablo 3.21 de verilmiştir. Taguchi yönteminde L_{25} ortogonal dizisi kullanılarak oluşturulan deney tasarımı, bu deneylerden elde edilen h ve ΔP sonuçları ve bu sonuçların SNR değerleri Tablo 3.22 de verilmiştir. h ve ΔP in SNR değerlerinin hesaplanmasında sırasıyla en yüksek daha iyi ve en düşük daha iyi kriterleri göz önüne alınmıştır.

Tablo 3.21. Su bazlı ve GBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri

Faktörler	**Seviyeler**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A – Hacimsel debi [m^3/h]	0.25	0.58	0.81	1.04	1.33
B- Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	0	0.25	0.5	0.75	1
C - Boru konfigürasyonları	Boş boru	TBL	GBL (P/y=1.00)	GBL (P/y=0.50)	GBL (P/y=0.25)

Tablo 3.22. Su bazlı ve GBL kullanıldığı çalışmalar için deney tasarımı, deney sonuçları ve sonuçların SNR değerleri

Deney	**Faktörler**			**Sonuçlar**		**SNR**	
No	**A**	**B**	**C**	**h**	**ΔP**	**h**	**ΔP**
1	1	1	1	1643.92	117.00	64.31759	-41.3639
2	1	2	2	2565.31	264.23	68.18281	-48.4395
3	1	3	3	3021.81	381.75	69.60535	-51.6355
4	1	4	4	4157.97	420.88	72.37762	-52.4832
5	1	5	5	5749.01	529.95	75.19186	-54.4846
6	2	1	2	3411.71	618.38	70.65944	-55.8251
7	2	2	3	4009.32	701.46	72.06141	-56.92
8	2	3	4	5288.99	1045.02	74.46746	-60.3825
9	2	4	5	6654.45	1445.19	76.46225	-63.1985
10	2	5	1	4171.81	659.38	72.4065	-56.3827
11	3	1	3	2871.12	283.21	69.16104	-49.0421
12	3	2	4	7195.37	1891.48	77.14106	-65.536
13	3	3	5	7747.66	2280.71	77.78342	-67.1614
14	3	4	1	4895.90	1041.11	73.79666	-60.3499
15	3	5	2	6571.29	1883.98	76.35301	-65.5015
16	4	1	4	7043.91	2538.41	76.95628	-68.0912
17	4	2	5	8179.80	3225.49	78.25485	-70.1719
18	4	3	1	5649.31	1592.13	75.03991	-64.0396
19	4	4	2	6712.81	2424.04	76.53809	-67.6908
20	4	5	3	8282.83	2912.46	78.36358	-69.2852
21	5	1	5	8427.01	3872.64	78.51347	-71.7601
22	5	2	1	5921.68	1850.85	75.4489	-65.3474
23	5	3	2	7451.27	3250.39	77.44461	-70.2387
24	5	4	3	9025.94	4102.88	79.10985	-72.2618
25	5	5	4	10884.18	6460.16	80.73591	-76.2049

Taguchi analizi sonucunda elde edilen ortalama SNR değerleri h için Tablo 3.23 de ΔP için Tablo 3.24 de verilmiştir. DBL yerleştirilmiş boru sonuçlarına benzer olarak, en optimum h değerini veren deney konfigürasyonu A5B5C5 ile hacimsel debinin 1.33 m^3/h, wt=%1.0 nanoakışkanı ve GBL (P/y=0.25) yerleştirilmiş boru deneyidir. ΔP açısından ise en optimum deney konfigürasyonu A1B1C1 ile hacimsel debinin 0.25 m^3/h, wt=%0 su akışkanı ve boş boru deneyidir.

Tablo 3.23. h için ortalama SNR değerleri

Faktörler	**Seviyeler**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A - Hacimsel debi	69.94	73.21	74.85	77.03	78.25[a]
B - Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	71.92	74.22	74.87	75.66	76.61[a]
C - Boru konfigürasyonları	72.20	73.84	73.66	76.34	77.24[a]

Ortalama = 74.656 dB.

[a] Optimum seviye.

Tablo 3.24. ΔP için ortalama SNR değerleri

Faktörler	**Seviyeler**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A - Hacimsel debi	-49.68[a]	-58.54	-61.52	-67.86	-71.16
B - Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	-57.22[a]	-61.28	-62.69	-63.20	-64.37
C - Boru konfigürasyonları	-57.50[a]	-61.54	-59.83	-64.54	-65.36

Ortalama = -61.7527 dB.

[a] Optimum seviye.

Deney parametrelerinin (faktörlerin) deney sonuçları üzerine etki seviyelerinin incelenmesi amacıyla ANOVA yapılmıştır. Tablo 3.25 ve Tablo 3.26 sırasıyla h ve ΔP açısından ANOVA sonuçlarını göstermektedir. h ve ΔP üzerinde en fazla etkisi olan faktör hacimsel debi en fazla olup etki yüzdesi sırasıyla %57.08 ve %75.81 dir. Her iki deney sonucu açısından da tüm faktörlerin F-test değerleri %95 güven aralığı içerisinde yer almaktadır.

Tablo 3.25. h açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	4	214.85	53.712	50.01[a]	3.26	57.08
B	4	62.67	15.668	14.59[a]	3.26	16.65
C	4	85.96	21.489	20.01[a]	3.26	22.84
Hata	12	12.89	1.074			3.42
Toplam	24	376.37				100

[a] %95 güvenilirlik

Tablo 3.26. ΔP açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	4	1409.38	352.345	50.55[a]	3.26	75.81
B	4	153.12	32.280	5.49[a]	3.26	8.24
C	4	213.03	53.257	7.64[a]	3.26	11.46
Hata	12	83.65	6.970			4.50
Toplam	24	1859.17				100

[a] %95 güvenilirlik

GBL yerleştirilmiş boru çalışmaları sonuçlarının doğruluğunun testi için de doğrulama testi yapılmıştır. En yüksek h değerini veren deney konfigürasyonu olan A5B5C5 deney konfigürasyonu L_{25} ortogonal diziye eklenerek Taguchi analizi tekrarlanmıştır. Başlangıç parametresi olarak L_{25} ortogonal dizide yer alan en yüksek h değerini veren A5B5C4 deney konfigürasyonu ele alınmıştır. En düşük ΔP değerini veren deney konfigürasyonu A1B1C1 L_{25} ortogonal dizide yer aldığı için ΔP açısından doğrulama testi yapılmasına gerek kalmamıştır. Tablo 3.27 de h için yapılan doğrulama testi sonuçları verilmiştir. Yapılan doğrulama testi sonucunda göre tahmin edilen h değeri ve SNR değerine yakın değerler elde edilerek çalışma doğrulanmıştır. Ayrıca, başlangıç parametresinden 1.20 dB daha yüksek SNR değeri elde edilerek, sonuç iyileştirilmiştir.

Tablo 3.27. h için doğrulama testi sonuçları

	Başlangıç parametreleri	Optimum parametreler	
		Tahmin	Deney
Seviye	A5B5C4	A5B5C5	A5B5C5
h [w/m^2/K]	10884.18	11022.67	11464.64
SNR (dB)	80.7359	82.7921	81.1796

h için geliştirilen SNR = 0.4437 dB.

3.4.1.3. Su Bazlı Çalışmaların Çok Amaçlı Optimizasyonu

En yüksek h ve en düşük ΔP değerlerini veren deney konfigürasyonlarının bilinmesi yeterli değildir. Isı değiştiricisi tasarımında her iki sonuç da birlikte değerlendirileceğinden bu iki değerin aynı anda optimizasyonu gerekmektedir. Bu kapsamda, GRA kullanılarak en yüksek h ve en düşük ΔP yi aynı anda veren deney konfigürasyonu bulunması amaçlanmıştır. GRA sonucunda elde edilen veriler Ek-1 de verilmiştir. Ek-1 den de görüldüğü gibi en yüksek h ve en düşük ΔP'yi aynı anda sunan deney konfigürasyonu, 0.25 m^3/h hacimsel debi, ağırlıkça wt=%1.0 nanoakışkan kullanımında ve boru içerisine GBL (P/y=0.25) yerleştirildiği konfigürasyonudur.

3.4.2. Su:EG Karışımı Bazlı Çalışmalarının Optimizasyonu

3.4.2.1. DBL Kullanıldığı Çalışmalarının Optimizasyonu

Su:EG (40:60) karışımı bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri Tablo 3.28 de verilmiştir. Taguchi yönteminde L_{25} ortogonal dizisi kullanılarak oluşturulan deney tasarımı, bu deneylerden elde edilen h ve ΔP sonuçları ve bu sonuçların SNR değerleri Tablo 3.29 de verilmiştir. h ve ΔP in SNR değerlerinin hesaplanmasında sırasıyla en yüksek daha iyi ve en düşük daha iyi kriterleri göz önüne alınmıştır.

Tablo 3.28. Su:EG karışımı bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri

Faktörler	Seviyeler				
	1	2	3	4	5
A – Hacimsel debi [m^3/h]	1.04	2.10	3.09	3.73	4.11
B- Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	0	0.25	0.5	0.75	1
C - Boru konfigürasyonları	Boş boru	TBL	DBL (P/y=1.00)	DBL (P/y=0.50)	DBL (P/y=0.25)

Tablo 3.29. Su:EG karışımı bazlı ve DBL kullanıldığı çalışmalar için deney tasarımı, deney sonuçları ve sonuçların SNR değerleri

Deney	Faktörler			Sonuçlar		SNR	
No	A	B	C	h	ΔP	h	ΔP
1	1	1	1	1878.76	2145.31	65.4774	-66.6298
2	1	2	2	2890.42	5330.97	69.2192	-74.5361
3	1	3	3	3258.39	8965.60	70.2601	-79.0516
4	1	4	4	4050.03	8895.72	72.1492	-78.9836
5	1	5	5	4479.33	8668.02	73.0243	-78.7584
6	2	1	2	4024.27	14257.57	72.0938	-83.0809
7	2	2	3	4526.40	23549.25	73.1151	-87.4395
8	2	3	4	5305.05	24335.78	74.4938	-87.7249
9	2	4	5	6534.57	25704.00	76.3043	-88.2000
10	2	5	1	4216.66	8618.23	72.4994	-78.7084
11	3	1	3	2654.92	3661.20	68.4810	-71.2725
12	3	2	4	7006.12	38579.95	76.9096	-91.7272
13	3	3	5	7483.19	46043.20	77.4817	-93.2633
14	3	4	1	5247.14	14893.34	74.3985	-83.4598
15	3	5	2	7013.39	35409.01	76.9186	-90.9823
16	4	1	4	7222.57	49096.08	77.1738	-93.8209
17	4	2	5	8669.71	71280.28	78.7601	-97.0594
18	4	3	1	5992.33	23974.31	75.5519	-87.5949
19	4	4	2	7840.78	56927.12	77.8872	-95.1064
20	4	5	3	8453.45	62790.33	78.5407	-95.9579
21	5	1	5	8603.81	77879.52	78.6938	-97.8285
22	5	2	1	5910.89	26331.62	75.4331	-88.4096
23	5	3	2	7846.54	66055.70	77.8936	-96.3982
24	5	4	3	8495.06	74122.63	78.5833	-97.3990
25	5	5	4	9547.68	73432.28	79.5980	-97.3177

Taguchi analizi sonucunda elde edilen ortalama SNR değerleri h için Tablo 3.30 da ΔP için Tablo 3.31 de verilmiştir. Bu sonuçlara göre en optimum h değerini veren deney konfigürasyonu A5B5C5 ile hacimsel debinin 4.11 m^3/h, wt=%1.0 nanoakışkanı ve DBL (P/y=0.25) yerleştirilmiş boru deneyidir. ΔP açısından ise en optimum deney konfigürasyonu A1B1C1 ile hacimsel debinin 1.04 m^3/h, wt=%0 Su:EG (40:60) karışımı ve boş boru deneyidir.

Tablo 3.30. h için ortalama SNR değerleri

Faktörler	**Seviyeler**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A - Hacimsel debi	70.03	73.70	74.84	77.58	78.04[a]
B - Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	72.38	74.69	75.14	75.86	76.12[a]
C - Boru konfigürasyonları	72.67	74.80	73.80	76.06	76.85[a]

Ortalama = 74.8373 dB.

[a] Optimum seviye.

Tablo 3.31. ΔP için ortalama SNR değerleri

Faktörler	**Seviyeler**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A - Hacimsel debi	-75.59 [a]	-85.03	-86.14	-93.91	-95.47
B - Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	-82.53 [a]	-87.83	-88.81	-88.63	-88.34
C - Boru konfigürasyonları	-80.96	-88.02[a]	-86.22	-86.91	-91.02

Ortalama = -87.0273 dB.

[a] Optimum seviye.

Deney parametrelerinin (faktörlerin) deney sonuçları üzerine etki seviyelerinin incelenmesi amacıyla ANOVA yapılmıştır. Tablo 3.32 ve Tablo 3.33 sırasıyla h ve ΔP açısından ANOVA sonuçlarını göstermektedir. h ve ΔP üzerinde en fazla etkisi olan faktör hacimsel debi en fazla olup etki yüzdesi sırasıyla %63.85 ve %66.69 dir. h sonucu açısından da tüm faktörlerin F-test değerleri %95 güven aralığı içerisinde yer almaktadır. ΔP açısından A ve C faktörleri %95 güven aralığı içerisindedir. B faktörünün güven aralığı içerisinde almamasının sebebi diğer faktörlere nazaran ΔP sonucuna çok daha az göreceli etkisi olmasıdır.

Tablo 3.32. h açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	4	211.18	52.795	33.85[a]	3.26	63.85
B	4	44.11	11.027	7.07[a]	3.26	13.34
C	4	56.72	14.179	9.09[a]	3.26	17.15
Hata	12	18.72	1.560			5.66
Toplam	24	330.72				100

[a] %95 güvenilirlik

Tablo 3.33. ΔP açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	4	1269.8	317.46	21.08[a]	3.26	66.69
B	4	140.9	35.22	2.34	3.26	7.40
C	4	312.7	78.16	5.19[a]	3.26	16.42
Hata	12	180.8	15.06			9.49
Toplam	24	1904.1				100

[a] %95 güvenilirlik

Test sonuçlarının doğruluğunun testi için doğrulama testi yapılmıştır. En yüksek h değerini veren deney konfigürasyonu olan A5B5C5 deney konfigürasyonu L_{25} ortogonal diziye eklenerek Taguchi analizi tekrarlanmıştır. Başlangıç parametresi olarak L_{25} ortogonal dizide yer alan en yüksek h değerini veren A5B5C4 deney konfigürasyonu ele alınmıştır. En düşük ΔP değerini veren deney konfigürasyonu A1B1C1 L_{25} ortogonal dizide yer aldığı için ΔP açısından doğrulama testi yapılmasına gerek kalmamıştır. Tablo 3.34 de h için yapılan doğrulama testi sonuçları verilmiştir. Yapılan doğrulama testi sonucunda göre tahmin edilen h değeri ve SNR değerine yakın değerler elde edilerek çalışma doğrulanmıştır. Ayrıca, başlangıç parametresinden 0.5307 dB daha yüksek SNR değeri elde edilerek, sonuç iyileştirilmiştir.

Tablo 3.34. h için doğrulama testi sonuçları

	Başlangıç parametreleri	Optimum parametreler	
		Tahmin	**Deney**
Seviye	A5B5C4	A5B5C5	A5B5C5
h [w/m^2/K]	9547.68	10,044.90	10,149.24
SNR (dB)	79.5980	81.3341	80.1287

h için geliştirilen SNR = 0.5307 dB.

3.4.2.2. GBL Kullanıldığı Çalışmalarının Optimizasyonu

Su:EG (40:60) karışımı bazlı ve boru içerisinde GBL'ların kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri Tablo 3.35 de verilmiştir. Taguchi yönteminde L_{25} ortogonal dizisi kullanılarak oluşturulan deney tasarımı, bu deneylerden elde edilen h ve ΔP sonuçları ve bu sonuçların SNR değerleri Tablo 3.36 de verilmiştir. h ve ΔP in SNR değerlerinin hesaplanmasında sırasıyla en yüksek daha iyi ve en düşük daha iyi kriterleri göz önüne alınmıştır.

Tablo 3.35. Su:EG karışımı bazlı ve GBL kullanıldığı çalışmaların optimizasyonu için kullanılan faktörler ve seviyeleri

Faktörler	**Seviyeler**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A – Hacimsel debi [m^3/h]	1.04	2.10	3.09	3.73	4.11
B- Nanoakışkanın ağırlıkça oranı [%]	0	0.25	0.5	0.75	1
C - Boru konfigürasyonları	Boş boru	TBL	GBL (P/y=1.00)	GBL (P/y=0.50)	GBL (P/y=0.25)

Tablo 3.36. Su bazlı ve GBL kullanıldığı çalışmalar için deney tasarımı, deney sonuçları ve sonuçların SNR değerleri

Deney No	Faktörler			Sonuçlar		SNR	
	A	B	C	h	ΔP	h	ΔP
1	1	1	1	1878.76	2145.31	65.4774	-66.6298
2	1	2	2	2890.42	5330.97	69.2192	-74.5361
3	1	3	3	3389.55	9283.55	70.6028	-79.3543
4	1	4	4	3880.44	7906.58	71.7776	-77.9598
5	1	5	5	5115.25	9111.35	74.1773	-79.1917
6	2	1	2	4024.27	14257.57	72.0938	-83.0809
7	2	2	3	5008.64	24863.73	73.9944	-87.9113
8	2	3	4	5960.08	26046.45	75.5050	-88.315
9	2	4	5	7671.83	28463.35	77.6980	-89.0857
10	2	5	1	4216.66	8618.23	72.4994	-78.7084
11	3	1	3	2611.53	4398.58	68.3379	-72.8662
12	3	2	4	7095.90	45006.10	77.0202	-93.0654
13	3	3	5	8401.95	52036.75	78.4876	-94.3262
14	3	4	1	5247.14	14893.34	74.3985	-83.4598
15	3	5	2	7013.39	35409.01	76.9186	-90.9823
16	4	1	4	7473.71	60155.01	77.4707	-95.5854
17	4	2	5	9216.26	75214.96	79.2911	-97.5261
18	4	3	1	5992.33	23974.31	75.5519	-87.5949
19	4	4	2	7840.78	56927.12	77.8872	-95.1064
20	4	5	3	8800.89	72679.63	78.8905	-97.2283
21	5	1	5	8994.89	86595.11	79.0799	-98.7499
22	5	2	1	5910.89	26331.62	75.4331	-88.4096
23	5	3	2	7846.54	66055.70	77.8936	-96.3982
24	5	4	3	8634.68	89068.03	78.7249	-98.9944
25	5	5	4	9996.40	95417.32	79.9969	-99.5925

Taguchi analizi sonucunda elde edilen ortalama SNR değerleri h için Tablo 3.37 de ΔP için Tablo 3.38 de verilmiştir. DBL yerleştirilmiş boru sonuçlarına benzer olarak, en optimum h değerini veren deney konfigürasyonu A5B5C5 ile hacimsel debinin 4.11

m^3/h, wt=%1.0 nanoakışkanı ve GBL (P/y=0.25) yerleştirilmiş boru deneyidir. ΔP açısından ise en optimum deney konfigürasyonu A1B1C1 ile hacimsel debinin 1.04 m^3/h, wt=%0 nanoakışkanı ve boş boru deneyidir.

Tablo 3.37. h için ortalama SNR değerleri

Faktörler	**Seviyeler**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A - Hacimsel debi	70.25	74.36	75.03	77.82	78.23[a]
B - Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	72.49	74.99	75.61	76.10	76.50[a]
C - Boru konfigürasyonları	72.67	74.80	74.11	76.35	77.75[a]

Ortalama =75.1373 dB.

[a] Optimum seviye.

Tablo 3.38. ΔP için ortalama SNR değerleri

Faktörler	**Seviyeler**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A - Hacimsel debi	-75.53 [a]	-85.42	-86.94	-94.61	-96.43
B - Nanoakışkanın ağırlıkça oranı	-83.38 [a]	-88.29	-89.20	-88.92	-89.14
C - Boru konfigürasyonları	-80.96 [a]	-88.02	-87.27	-90.90	-91.78

Ortalama = -87.786 dB.

[a] Optimum seviye.

Deney parametrelerinin (faktörlerin) deney sonuçları üzerine etki seviyelerinin incelenmesi amacıyla ANOVA yapılmıştır. Tablo 3.39 ve Tablo 3.40 sırasıyla h ve ΔP açısından ANOVA sonuçlarını göstermektedir. h ve ΔP üzerinde en fazla etkisi olan faktör hacimsel debi en fazla olup etki yüzdesi sırasıyla %58.18 ve %67.67 dir. h sonucu açısından da tüm faktörlerin F-test değerleri %95 güven aralığı içerisinde yer almaktadır. ΔP açısından A ve C faktörleri %95 güven aralığı içerisindedir. B faktörünün güven aralığı içerisinde almamasının sebebi diğer faktörlere nazaran ΔP sonucuna çok daha az göreceli etkisi olmasıdır.

Tablo 3.39. h açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	4	206.10	51.526	30.23[a]	3.26	58.18
B	4	50.05	12.512	7.34[a]	3.26	14.13
C	4	77.67	19.418	11.39[a]	3.26	21.92
Hata	12	20.46	1.705			5.77
Toplam	24	354.28				100

[a] %95 güvenilirlik

Tablo 3.40. ΔP açısından ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (*df*)	Kareler toplamı (*SS*)	Varyans (*V*)	F-test	$F_{0.05}$	Katkı seviyesi (%)
A	4	1388.3	347.07	23.56[a]	3.26	67.67
B	4	123.8	30.95	2.10	3.26	6.03
C	4	362.7	90.68	6.16[a]	3.26	17.68
Hata	12	176.8	14.73			8.62
Toplam	24	2051.6				100

[a] %95 güvenilirlik

GBL yerleştirilmiş boru çalışmaları sonuçlarının doğruluğunun testi için de doğrulama testi yapılmıştır. En yüksek h değerini veren deney konfigürasyonu olan A5B5C5 deney konfigürasyonu L_{25} ortogonal diziye eklenerek Taguchi analizi tekrarlanmıştır. Başlangıç parametresi olarak L_{25} ortogonal dizide yer alan en yüksek h değerini veren A5B5C4 deney konfigürasyonu ele alınmıştır. En düşük ΔP değerini veren deney konfigürasyonu A1B1C1 L_{25} ortogonal dizide yer aldığı için ΔP açısından doğrulama testi yapılmasına gerek kalmamıştır. Tablo 3.41 de h için yapılan doğrulama testi sonuçları verilmiştir. Yapılan doğrulama testi sonucunda göre tahmin edilen h değeri ve SNR değerine yakın değerler elde edilerek çalışma doğrulanmıştır. Ayrıca, başlangıç parametresinden 1.20 dB daha yüksek SNR değeri elde edilerek, sonuç iyileştirilmiştir.

Tablo 3.41. h için doğrulama testi sonuçları

	Başlangıç parametreleri	**Optimum parametreler**	
		Tahmin	**Deney**
Seviye	A5B5C4	A5B5C5	A5B5C5
h [w/m^2/K]	9996.40	10776.18	12159.86
SNR (dB)	79.9969	82.1948	81.6986

h için geliştirilen SNR = 1.7017 dB.

3.4.2.3. Su:EG Bazlı Çok Amaçlı Optimizasyonu

GRA sonucunda elde edilen veriler Ek-2 de verilmiştir. Ek-2 den de görüldüğü gibi en yüksek h ve en düşük ΔP yi aynı anda sunan deney konfigürasyonu, 1.04 m^3/h hacimsel debi, ağırlıkça wt= %1.0 nanoakışkan kullanımında ve boş boru konfigürasyonudur.

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında sabit ısı akısı ile ısıtılan ısı değiştirici borusu içerisine yerleştirilen farklı bükülmüş levha (BL) konfigürasyonlarıyla ve baz akışkana TiO_2 nano partikülü katılarak ısı transferi iyileştirilmesinin deneysel olarak incelenmesi yapılmıştır. Deneyler türbülanslı akış şartlarında olup Reynolds sayısı yaklaşık 6000 – 23,000 arasında gerçekleştirilmiştir. Su baz akışkanı için 9 farklı Reynolds sayısı, Su:EG baz akışkanı için 8 farklı Reynolds sayısı içeren deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında içerisine 7 farklı iç eleman yerleştirilmiş boru ve boş boru olmak üzere toplam 8 farklı boru konfigürasyonu ve 5 farklı nanoakışkan konfigürasyonu kullanılmıştır. Su baz akışkanı için 360; Su:EG baz akışkanı için 320 olmak üzere toplam 680 farklı deney gerçekleştirilmiştir.

BL konfigürasyonları tipik bükülmüş levha (TBL), delinmiş bükülmüş levha (DBL) ve gamzeli bükülmüş levha (GBL) olmak üzere 3 ana yapıda kullanılmıştır. DBL ve GBL'ların delik ve gamzelerinin arasında mesafe (P) nin BL büküm uzunluğuna (y) oranı (P/y) 1.00, 0.50 ve 0.25 olarak ele alınmıştır. Tüm BL'ların büküm uzunluğu y=100 mm, genişliği w=16.5 mm ve toplam uzunlukları 1 m olacak şekilde üretilmiştir.

Baz akışkan olarak su (100:0) ve Su:EG (40:60) karışımı kullanılmıştır. Baz akışkanlara katılan TiO_2 nano partikülünün ağırlıksal oranı (wt) %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00 olarak seçilmiştir. Nanoakışkanların ısıl iletkenlik özelliği ölçülerek; yoğunluk, özgül ısı ve viskozitesi literatürde yer alan eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Nanoakışkanların hazırlanması süreci Taguchi yöntemi kullanılarak en iyi kararlılık (en yüksek zeta potansiyel değeri) ve en yüksek ısıl iletkenlik özelliğini veren yöntem bulunarak optimize edilmiştir. Nanoakışkanların kararlılıklarının belirlenmesinde zeta potansiyel ölçümü ve çökelme durumu gözlemleme yöntemleri kullanılmıştır.

Deneyler elde edilen verilerin MATLAB programında yazılan yazılımın kullanılmasıyla, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü elde edilmiştir. Elde edilen Nusselt sayıları ve sürtünme faktörü sonuçları kullanılarak her bir baz akışkan için ayrı olmak üzere; boş boru için, TBL, DBL ve GBL yerleştirilmiş boru için Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü bağıntıları geliştirilmiştir.

Deney sonuçlarının boyutsuz sayılar ile ortaya konulmasının yanı sıra, uygulamada etkin bir şekilde kullanılması amacıyla deney sonuçları ısıl açıdan ısı taşınım katsayısı (h) ve hidrolik açıdan basınç düşümü (ΔP) açısından ortaya konulmuştur. Bu sonuçlar Taguchi yöntemi ve GRA (Gri ilişki analizi) kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyonda aynı anda en yüksek h ve en düşük ΔP yi veren deney konfigürasyonları bulunmuştur.

4.1. Sonuçların Değerlendirilmesi

Nanoakışkan hazırlanmasında kullanılan yöntem ile uygulamada kullanımı için yeterli süre (en az 20 gün) çökelmeden kalabilen Su-TiO_2 ve Su:EG-TiO_2 nanoakışkanları hazırlanabilmiştir. Nanoakışkan hazırlama sürecinde yer alan mekanik karıştırma süresi, ultrasonik karıştırma süresi, katılan yüzey aktif madde miktarı ve ultrasonik karıştırıcı gücü değerleri optimizasyon yöntemi ile optimize edilerek en yüksek ısıl iletkenlik ve en iyi kararlılık performansı sunan nanoakışkan hazırlanmıştır. Ayrıca başka çalışmalara da ışık tutma açısından, nanoakışkan hazırlama sürecinde yer alan parametrelerin ısıl iletkenlik ve kararlılık değerlerine etkileri yüzdesel olarak sunulmuştur. Nanoakışkana eklenen yüzey aktif madde miktarı nanoakışkanların ısıl iletkenliği ve kararlılığı üzerinde en fazla etkisi olan parametre olarak ortaya çıkmıştır. Mekanik karıştırma süresi ise ısıl iletkenliği ve kararlılığı üzerinde en az etkisi olan parametre olduğu ortaya çıkmıştır. Her iki baz akışkan için de nanoakışkan kullanılması ısı transferi performansını iyileştirmiştir. Ayrıca, her iki baz akışkan için de boru içerisine BL yerleştirilmesi ısı transferi performansını iyileştirmiştir.

BL'lar arasında ısıl açıdan en faydalı model GBL (P/y=0.25) modeli olmuştur. Ağrılıkça oran açısından kullanılan en yüksek oran olan wt=%1.0 ısıl açıdan en faydalı nanoakışkan olarak ortaya çıkmıştır. Su baz akışkanında en yüksek Nusselt sayısı 316 değeri ile aynı Reynolds sayısında boş boru ve su akışkanı (wt=%0) kullanıldığındaki değerden %63.7 kadar daha yüksek olarak elde edilmiştir. Su:EG karışımı baz

akışkanında ise en yüksek Nusselt sayısı 539.7 değeri ile aynı Reynolds sayısında boş boru ve Su:EG karışımı (wt=%0) kullanıldığındaki değerden %94.8 kadar daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Deney sonuçları hidrolik performans açısından değerlendirildiğinde, boru içerisine BL yerleştirilmesi sürtünme faktörünü oldukça arttırırken; baz akışkana katılan nano partikül miktarı sürtünme faktörünü çok fazla arttırmamıştır. Sürtünme faktörünü en fazla arttıran BL her iki baz akışkanda da GBL (P/y=0.25) modeli olmuştur. Su baz akışkanında en yüksek sürtünme faktörü 0.1303 değeri ile aynı Reynolds sayısında boş boru ve su akışkanı (wt=%0) kullanıldığındaki değerden %245.6 kadar daha yüksek olarak elde edilmiştir. Su:EG karışımı baz akışkanında ise en yüksek sürtünme faktörü 0.1303 değeri ile aynı Reynolds sayısında boş boru ve Su:EG karışımı (wt=%0) kullanıldığındaki değerden %345.6 kadar daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Deney sonuçları ısıl ve hidrolik açıdan aynı anda termo-hidrolik performans (THP) kriteri kullanılarak değerlendirilmiştir. Tablo 4.1 de su baz akışkanı; Tablo 4.2 de Su:EG baz akışkanı ile yapılan çalışmalarda elde edilen en az ve en yüksek THP sonuçları verilmiştir. Her iki tablodan da görüldüğü gibi nanoakışkanın ağırlıkça oranı artmasıyla THP değerinde artış görülmüştür. Modifiye edilmiş BL'larda yapılan işlemin (delik/gamze) aralarındaki mesafe azaldıkça THP değerinde artış gözlemlenmiştir. Her iki baz akışkan için de GBL, DBL den daha yüksek THP sonuçları vermiştir. Su baz akışkanı için en iyi konfigürasyon ağırlıkça oranın wt=%1.0 olması ve GBL (P/y=0.25) kullanılmasıyla THP sonuçları 1.55-2.59 arlığında elde edilmiştir.

Tablo 4.1. Su baz akışkanı ile yapılan çalışmalarında elde edilen THP sonuçların aralıkları

wt [%]	Boş Boru	TBL	DBL (P/y=1.00)	DBL (P/y=0.50)	DBL (P/y=0.25)	GBL (P/y=1.00)	GBL (P/y=0.50)	GBL (P/y=0.25)
0.00	1	1.04-1.13	1.03-1.16	1.08-1.13	1.08-1.24	1.04-1.16	1.11-1.19	1.14-1.40
0.25	1.08-1.14	1.07-1.29	1.14-1.30	1.17-1.35	1.19-1.60	1.10-1.30	1.34-1.56	1.25-1.77
0.50	1.13-1.29	1.18-1.47	1.28-1.55	1.32-1.60	1.41-1.77	1.34-1.50	1.34-1.72	1.26-1.95
0.75	1.23-1.44	1.23-1.59	1.33-1.66	1.34-1.74	1.40-2.00	1.42-1.91	1.35-1.89	1.38-2.14
1.00	1.38-1.64	1.35-1.80	1.35-1.97	1.40-2.09	1.53-2.32	1.49-1.99	1.49-2.35	1.55-2.59

Tablo 4.2. Su:EG karışımı baz akışkanı ile yapılan çalışmalarında elde edilen THP sonuçların aralıkları

wt [%]	Boş Boru	TBL	DBL (P/y=1.00)	DBL (P/y=0.50)	DBL (P/y=0.25)	GBL (P/y=1.00)	GBL (P/y=0.50)	GBL (P/y=0.25)
0.00	1	1.03-1.12	0.96-1.11	1.06-1.20	1.09-1.31	0.99-1.13	1.04-1.23	1.09-1.41
0.25	1.0-1.08	0.98-1.18	0.97-1.13	1.09-1.36	1.12-1.40	1.0-1.19	1.08-1.32	1.16-1.51
0.50	1.07-1.16	1.04-1.26	1.04-1.27	1.07-1.39	1.13-1.46	1.06-1.27	1.09-1.37	1.25-1.58
0.75	1.13-1.20	1.09-1.30	1.09-1.43	1.15-1.52	1.20-1.56	1.10-1.42	1.16-1.41	1.39-1.76
1.00	1.17-1.31	1.11-1.39	1.16-1.46	1.20-1.60	1.21-1.61	1.16-1.47	1.23-1.48	1.45-1.80

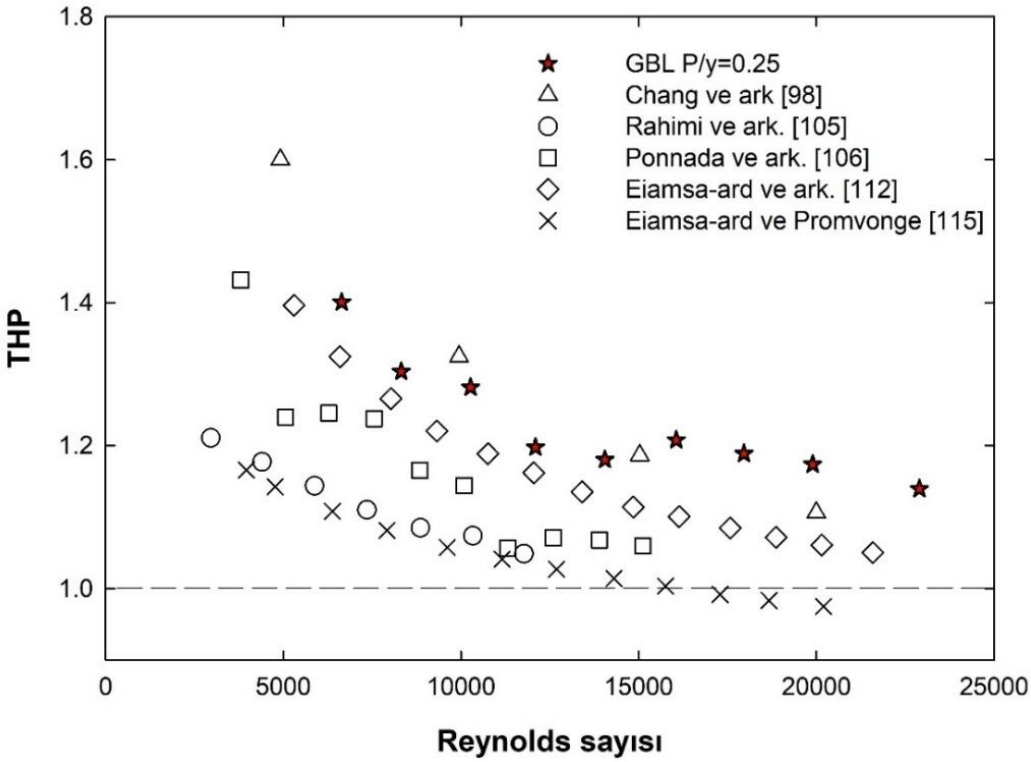
Su baz akışkanı ile Su:EG karışımı kendi arasında THP açısından incelendiğinde, su akışkanı kullanılmasıyla daha yüksek THP sonuçları elde edilmiştir. Su:EG karışımı kullanıldığında en yüksek THP değeri ağırlıkça oranın wt=%1.0 olması ve GBL (P/y=0.25) kullanılmasıyla 1.45-1.80 arlığında elde edilmiştir. Sonuçlar baz akışkan açısından değerlendirildiğinde su baz akışkanı Su:EG karışımına göre ısıl ve hidrolik açıdan çok daha iyi bir iş akışkanı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak burada Su:EG karışımı donma noktası daha düşük olduğundan soğuk bölgelerde kullanıma uygun olduğu gözden kaçırılmamalıdır.

Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve THP gibi boyutsuz sayılar ile sonuçların değerlendirilmesine ek olarak, su ve Su:EG karışımı ayrı ayrı olmak üzere yapılan deneylerin ısı taşınım katsayıları (h) ve basınç düşümü (ΔP) sonuçları açısından optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda su baz akışkanında en yüksek h ve en düşük ΔP yi veren çalışma 0.25 m^3/h hacimsel debi, ağırlıkça wt=%1.0 nanoakışkan kullanımında ve boru içerisine GBL (P/y=0.25) yerleştirildiği konfigürasyonudur. Su:EG baz akışkanında ise en yüksek h ve en düşük ΔP yi veren çalışma 1.04 m^3/h hacimsel debi, ağırlıkça wt= %1.0 nanoakışkan kullanımında ve boş boru konfigürasyonudur. Her iki baz akışkanda da en düşük hacimsel debi değeri ve en yüksek ağırlıkça nano partikül oranı en optimum sonucu vermiştir. Ancak, su baz akışkanında GBL kullanımı olumlu sonuç verirken, Su:EG baz akışkanında BL kullanılması olumlu sonuç vermemiştir.

Optimizasyon çalışmasına ek olarak hacimsel debi, nanoakışkanın ağırlıkça oranı ve boru konfigürasyonlarının h ve ΔP ne etkileri incelenmiştir. Kullanılan her iki baz akışkan için de h ve ΔP üzerinde en fazla etkisi olan hacimsel debi parametresidir.

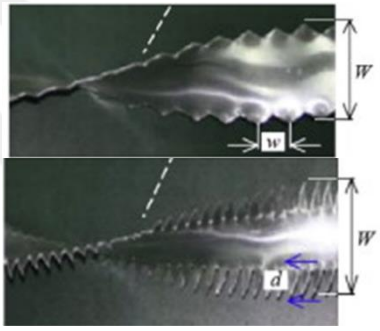
4.2. Sonuçların Literatür ile Kıyaslanması

Deneylerden elde edilen sonuçlar, literatür ile kıyaslanabilmesi için baz akışkan olan su akışkanı ile yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Literatür ile kıyaslamada deneylerde en yüksek THP değerini veren iç eleman olan GBL (P/y=0.25) modeli kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen THP değerlerinin Reynolds sayısına göre değişiminin literatür ile kıyaslanması Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere elde edilen en yüksek THP değerini veren GBL (P/y=0.25) iç elemanı literatür ile kıyaslandığında oldukça iyi bir performans sunmaktadır.



Şekil 4.1. Su baz akışkanı ile elde edilen en iyi THP değerinin literatür ile kıyaslanması

Tablo 4.3. Literatür ile kıyaslanan çalışmaların özellikleri ve görselleri

Araştırmacı	Kullanılan iç eleman	Kullanılan iç elemana ait görsel
Tez çalışması	GBL (P/y=0.25) (y/w=6.06)	
Chang ve ark. [93]	TBL (y/w=1.56)	
Rahimi ve ark. [100]	Çentikli BL (y/w=2.94)	
Ponnada ve ark. [101]	Delinmiş bükülmüş levha (y/w=3)	
Eiamsa-ard ve ark. [107]	Dönem ekseni değiştirilmiş ve 78° açı ile kesilmiş üçgen kanatçıklı BL (y/w=3.0)	
Eiamsa-ard ve Promvonge [110]	Testere dişli BL (y/w=4.0, w/W=0.1 ve d/W=0.1)	

4.3. Öneriler

Tez kapsamında yapılan çalışmalar ile elde edilen bulgular neticesinde, su baz akışkanı kullanılan bir ısı değiştiricisinde nanoakışkan kullanımı ve ısı değiştiricisi boruları içerisine iç eleman yerleştirilmesi termal ve hidrolik performansı iyileştirdiğinden, kullanımı önerilmektedir. Ancak, Su:EG karışımı kullanılan bir ısı değiştiricisinde nanoakışkan kullanımı ısıl ve hidrolik performansı iyileştirirken; ısı değiştiricileri boruları içerisine yerleştirilen iç elamanlar basınç düşümünü oldukça fazla arttırmaktadır. Bu yüzden Su:EG karışımı kullanılan bir ısı değiştiricisinde nanoakışkan kullanımı önerilirken; ısı değiştiricileri boruları içerisine iç eleman yerleştirilmesi fazla pompalama gücü gerektireceğinden önerilmemektedir.

KAYNAKÇA

1. Isaac, M. ve D.P. van Vuuren, 2009. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. **Energy Policy, 37**(2): 507–521.

2. Auffhammer, M. ve E.T. Mansur, 2014. Measuring climatic impacts on energy consumption: A review of the empirical literature. **Energy Economics, 46**: 522–530.

3. Ediger, V.Ş. ve H. Tatlıdil, 2002. Forecasting the primary energy demand in Turkey and analysis of cyclic patterns. **Energy Conversion and Management, 43**(4): 473–487.

4. Wen, D., G. Lin, S. Vafaei ve K. Zhang, 2009. Review of nanofluids for heat transfer applications. **Particuology, 7**(2): 141–150.

5. Zhang, J., X. Zhu, M.E. Mondejar ve F. Haglind, 2019. A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101**: 305–328.

6. Qasem, N.A.A. ve S.M. Zubair, 2018. Compact and microchannel heat exchangers: A comprehensive review of air-side friction factor and heat transfer correlations. **Energy Conversion and Management, 173:** 555–601.

7. Sheikholeslami, M., M. Gorji-Bandpy ve D.D. Ganji, 2015. Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49**: 444–469.

8. Liu, S. ve M. Sakr, 2013. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19**: 64–81.

9. Kumar, B., G.P. Srivastava, M. Kumar ve A.K. Patil, 2018. A review of heat transfer and fluid flow mechanism in heat exchanger tube with inserts. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 123**: 126–137.

10. Zheng, N., F. Yan, K. Zhang, T. Zhou ve Z. Sun, 2020. A review on single-phase convective heat transfer enhancement based on multi-longitudinal vortices in heat exchanger tubes. **Applied Thermal Engineering, 164**: 114475.

11. Alam, T. ve M.-H. Kim, 2018. A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81**: 813–839.

12. Ji, W.-T., A.M. Jacobi, Y.-L. He ve W.-Q. Tao, 2017. Summary and evaluation on the heat transfer enhancement techniques of gas laminar and turbulent pipe flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 111**: 467–483.

13. Sidik, N.A.C., M.N.A.W. Muhamad, W.M.A.A. Japar ve Z.A. Rasid, 2017. An overview of passive techniques for heat transfer augmentation in microchannel heat sink. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 88**: 74–83.

14. Varun, M.O. Garg, H. Nautiyal, S. Khurana ve M.K. Shukla, 2016. Heat transfer augmentation using twisted tape inserts: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 63**: 193–225.

15. Tawfik, M.M., 2017. Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75**: 1239–1253.

16. American Society of Heating, R. and A.-C.E., 2017. 2017 ASHRAE handbook : fundamentals. Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.

17. Choi, S.U.S., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **ASME FED, 231**: 99–103.

18. Pandya, N.S., H. Shah, M. Molana ve A.K. Tiwari, 2020. Heat transfer enhancement with nanofluids in plate heat exchangers: **A comprehensive review. European Journal of Mechanics - B/Fluids, 81**: 173–190.

19. Hajatzadeh Pordanjani, A., S. Aghakhani, M. Afrand, B. Mahmoudi, O. Mahian ve S. Wongwises, 2019. An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy. **Energy Conversion and Management, 198**: 111886.

20. Sajid, M.U. ve H.M. Ali, 2019. Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 103**: 556–592.

21. Abbas, F., H.M. Ali, T.R. Shah, H. Babar, M.M. Janjua, U. Sajjad ve M. Amer, 2020. Nanofluid: **Potential evaluation in automotive radiator. Journal of Molecular Liquids, 297:** 112014.

22. Hajatzadeh Pordanjani, A., S. Aghakhani, M. Afrand, B. Mahmoudi, O. Mahian ve S. Wongwises, 2019. An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy. **Energy Conversion and Management, 198**: 111886.

23. Omidi, M., M. Farhadi ve M. Jafari, 2017. A comprehensive review on double pipe heat exchangers. **Applied Thermal Engineering, 110**: 1075–1090.

24. Léal, L., M. Miscevic, P. Lavieille, M. Amokrane, F. Pigache, F. Topin, B. Nogarède ve L. Tadrist, 2013. An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 61**: 505–524.

25. Oyakawa, K., A. Umeda, M.D. Islam, N. Saji ve S. Matsuda, 2009. Flow structure and heat transfer of impingement jet. **Heat and mass transfer, 46**(1): 53.

26. Poitras, G.J., A. Babineau, G. Roy ve L.-E. Brizzi, 2017. Aerodynamic and heat transfer analysis of a impinging jet on a concave surface. **International Journal of Thermal Sciences, 114**: 184–195.

27. Horacek, B., K.T. Kiger ve J. Kim, 2005. Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 48**(8): 1425–1438.

28. Yan, Z., R. Zhao, F. Duan, T. Neng, K. Chuan, K. Fah, P. Keong ve Y. Sheng, 2011. Spray Cooling, Two Phase Flow, Phase Chang. Numer. Model., InTech.

29. Sathyabhama, A. ve A. Dinesh, 2017. Augmentation of heat transfer coefficient in pool boiling using compound enhancement techniques. **Applied Thermal Engineering, 119**: 176–188.

30. Liu, W., Z. Yang, B. Zhang ve P. Lv, 2017. Experimental study on the effects of mechanical vibration on the heat transfer characteristics of tubular laminar flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 115**: 169–179.

31. Sastre, F. ve A. Velazquez, 2017. Experimental study on heat transfer enhancement caused by the flow-induced vibration of a prism inside a channel. **Applied Thermal Engineering, 125**: 412–424.

32. Al-Fahed, S., L.M. Chamra ve W. Chakroun, 1998. Pressure drop and heat transfer comparison for both microfin tube and twisted-tape inserts in laminar flow. **Experimental Thermal and Fluid Science, 18**(4): 323–333.

33. Chen, X.D., X.Y. Xu, S.K. Nguang ve A.E. Bergles, 2001. Characterization of the Effect of Corrugation Angles on Hydrodynamic and Heat Transfer Performance of Four-Start Spiral Tubes. **Journal of Heat Transfer, 123**(6): 1149–1158.

34. Han, H.-Z., B.-X. Li, B.-Y. Yu, Y.-R. He ve F.-C. Li, 2012. Numerical study of flow and heat transfer characteristics in outward convex corrugated tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 55**(25–26): 7782–7802.

35. Li, M., T.S. Khan, E. Al-Hajri ve Z.H. Ayub, 2016. Single phase heat transfer and pressure drop analysis of a dimpled enhanced tube. **Applied Thermal Engineering, 101:** 38–46.

36. Esmaeilzadeh, E., H. Almohammadi, A. Nokhosteen, A. Motezaker ve A.N. Omrani, 2014. Study on heat transfer and friction factor characteristics of γ-Al2O3/water through circular tube with twisted tape inserts with different thicknesses. **International Journal of Thermal Sciences, 82**: 72–83.

37. Pimple, D.S., B.H. Shreeshail ve A. Kulkarni, 2014. Heat Transfer Enhancement of Shell and Tube Heat Exchanger Using Conical Tapes. **Internatonal Journal of Engineering Research and Applications, 4**(12): 6–11.

38. Goering, A., Numerical Investigation of Wire Coil Heat Transfer Augmentation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016.

39. Ruengpayungsak, K., K. Wongcharee, C. Thianpong, M. Pimsarn, V. Chuwattanakul ve S. Eiamsa-ard, 2017. Heat transfer evaluation of turbulent flows through gear-ring elements. **Applied Thermal Engineering, 123**: 991–1005.

40. Promvonge, P. ve S. Eiamsa-ard, 2007. Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 34**(1): 72–82.

41. Nanan, K., C. Thianpong, M. Pimsarn, V. Chuwattanakul ve S. Eiamsa-ard, 2017. Flow and thermal mechanisms in a heat exchanger tube inserted with twisted cross-baffle turbulators. **Applied Thermal Engineering, 114**: 130–147.

42. Gau, C., C.W. Liu, T.M. Huang ve W. Aung, 1999. Secondary flow and enhancement of heat transfer in horizontal parallel-plate and convergent channels heating from below. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 42**(14): 2629–2647.

43. Liu, C.W. ve C. Gau, 2004. Onset of secondary flow and enhancement of heat transfer in horizontal convergent and divergent channels heated from below. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 47**(25): 5427–5438.

44. Stroh, A., K. Schäfer, P. Forooghi ve B. Frohnapfel, 2020. Secondary flow and heat transfer in turbulent flow over streamwise ridges. **International Journal of Heat and Fluid Flow, 81**: 108518.

45. Gou, J., H. Ma, Z. Yang ve J. Shan, 2017. An assessment of heat transfer models of water flow in helically coiled tubes based on selected experimental datasets. **Annals of Nuclear Energy, 110**: 648–667.

46. Zheng, N., F. Yan, K. Zhang, T. Zhou ve Z. Sun, 2020. A review on single-phase convective heat transfer enhancement based on multi-longitudinal vortices in heat exchanger tubes. **Applied Thermal Engineering, 164**: 114475.

47. Vashistha, C., A.K. Patil ve M. Kumar, 2016. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a circular tube with multiple inserts. **Applied Thermal Engineering, 96**: 117–129.

48. Richard, J. ve R. Demellayer, 2013. Micro-EDM-milling Development of New Machining Technology for Micro-machining. **Procedia CIRP, 6**: 292–296.

49. Lai, L.-J., H. Zhou ve L.-M. Zhu, 2016. Fabrication of microlens array on silicon surface using electrochemical wet stamping technique. **Applied Surface Science, 364**: 442–445.

50. Lu, H., M. Xu, L. Gong, X. Duan ve J.C. Chai, 2020. Effects of surface roughness in microchannel with passive heat transfer enhancement structures. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 148**: 119070.

51. Vlachou, M.C., J.S. Lioumbas ve T.D. Karapantsios, 2015. Heat Transfer Enhancement in Boiling Over Modified Surfaces: A Critical REVIEW. **Interfacial Phenomena and Heat Transfer, 3**(4): 341–367.

52. Solangi, K.H., S.N. Kazi, M.R. Luhur, A. Badarudin, A. Amiri, R. Sadri, M.N.M. Zubir, S. Gharehkhani ve K.H. Teng, 2015. A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids. **Energy, 89**: 1065–1086.

53. Tawfik, M.M., 2017. Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75**: 1239–1253.

54. Li, Y., J. Zhou, S. Tung, E. Schneider ve S. Xi, 2009. A review on development of nanofluid preparation and characterization. **Powder Technology, 196**(2): 89–101.

55. Choi, S.U.S. ve J.A. Eastman, 2001. Enhanced heat transfer using nanofluids.

56. Kumar, A. ve S. Subudhi, 2019. Preparation, characterization and heat transfer analysis of nanofluids used for engine cooling. **Applied Thermal Engineering, 160**: 114092.

57. Yu, H., S. Hermann, S.E. Schulz, T. Gessner, Z. Dong ve W.J. Li, 2012. Optimizing sonication parameters for dispersion of single-walled carbon nanotubes. **Chemical Physics, 408**: 11–16.

58. Mukherjee, S. ve S. Paria, 2013. Preparation and Stability of Nanofluids-A Review. **Journal of Mechanical and Civil Engineering, 9**(2): 63–69.

59. Babita, S.K. Sharma ve S.M. Gupta, 2016. Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review. **Experimental Thermal and Fluid Science, 79**: 202–212.

60. Colangelo, G., E. Favale, P. Miglietta, M. Milanese ve A. de Risi, 2016. Thermal conductivity, viscosity and stability of Al 2 O 3 -diathermic oil nanofluids for solar energy systems. **Energy, 95**: 124–136.

61. Wu, S., D. Zhu, X. Li, H. Li ve J. Lei, 2009. Thermal energy storage behavior of Al2O3–H2O nanofluids. **Thermochimica Acta, 483**(1–2): 73–77.

62. Nasiri, A., M. Shariaty-Niasar, A. Rashidi, A. Amrollahi ve R. Khodafarin, 2011. Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science, 35**(4): 717–723.

63. Wen, D. ve Y. Ding, 2005. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ-alumina nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research, 7**(2–3): 265–274.

64. Wang, X.-Q. ve A.S. Mujumdar, 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. **International journal of thermal sciences, 46**(1): 1–19.

65. Wang, J.J., R.T. Zheng, J.W. Gao ve G. Chen, 2012. Heat conduction mechanisms in nanofluids and suspensions. **Nano Today, 7**(2): 124–136.

66. Zawrah, M.F., R.M. Khattab, L.G. Girgis, H. El Daidamony ve R.E. Abdel Aziz, 2016. Stability and electrical conductivity of water-base Al 2 O 3 nanofluids for different applications. **HBRC Journal, 12**(3): 227–234.

67. Lee, S.W., S.D. Park, S. Kang, I.C. Bang ve J.H. Kim, 2011. Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 54**(1–3): 433–438.

68. Elimelech, M., J. Gregory ve X. Jia, **2013**. Particle deposition and aggregation: measurement, modelling and simulation. Butterworth-Heinemann.

69. Sezer, N., M.A. Atieh ve M. Koç, 2019. A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids. **Powder Technology, 344**: 404–431.

70. Yu, F., Y. Chen, X. Liang, J. Xu, C. Lee, Q. Liang, P. Tao ve T. Deng, 2017. Dispersion stability of thermal nanofluids. **Progress in Natural Science: Materials International, 27**(5): 531–542.

71. Ghadimi, A., R. Saidur ve H.S.C. Metselaar, 2011. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 54**(17–18): 4051–4068.

72. Pak, B.C. ve Y.I. Cho, 1998. Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide Particles. **Experimental Heat Transfer, 11**(2): 151–170.

73. Wasp, E.J., J.P. Kenny ve R.L. Gandhi, 1977. Solid--liquid flow: slurry pipeline transportation.[Pumps, valves, mechanical equipment, economics]. Ser. Bulk Mater. Handl.;(United States), 1(4):.

74. Xuan, Y. ve W. Roetzel, 2000. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 43**(19): 3701–3707.

75. Gupta, M., V. Singh, R. Kumar ve Z. Said, 2017. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74**: 638–670.

76. Paul, G., T. Pal ve I. Manna, 2010. Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique. **Journal of Colloid and Interface Science, 349**(1): 434–437.

77. Teng, T.-P., Y.-H. Hung, T.-C. Teng, H.-E. Mo ve H.-G. Hsu, 2010. The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. **Applied Thermal Engineering, 30**(14–15): 2213–2218.

78. Maxwell James Clerk, 1881. A Treatise on Electricity and Magnetism. The Clarendon Press.

79. Hamilton RL ve Crosser OK, 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **Industrial & Engineering chemistry fundamentals, 1**(3): 187–191.

80. Einstein, A., 1906. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. **Annalen der Physik, 324**(2): 289–306.

81. Brinkman, H.C., 1952. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. **The Journal of Chemical Physics, 20**(4): 571–571.

82. Batchelor, G.K., 1977. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. **Journal of Fluid Mechanics, 83**(1): 97–117.

83. Okumuş, F., Taşyünü üretim tesisinde hata türü ve etkileri analizi ile Taguchi deney tasarımının birlikte uygulanması, Kocaeli Üniversitesi, 2015.

84. Taguchi, G., 1987. Taguchi Techniques for Quality Engineering.

85. Rao, S., P. Samant, A. Kadampatta ve R. Shenoy, 2013. An overview of Taguchi method: evolution, concept and interdisciplinary applications. **International journal of scientific & engineering research, 4**(10): 621–626.

86. S., Y., Ürün Tasarım Geliştirilmesi: Taguchi Tasarımı, Başkent Üniversitesi, 2011.

87. Kotcioglu, I., A. Cansiz ve M. Nasiri Khalaji, 2013. Experimental investigation for optimization of design parameters in a rectangular duct with plate-fins heat exchanger by Taguchi method. **Applied Thermal Engineering, 50**(1): 604–613.

88. Uyğur, B., Açık ocaklarda patlama kaynaklı sarsıntıların Taguchi yöntemi kullanılarak parametre optimizasyonu ile azaltılması, Dumlupınar Üniversitesi, 2009.

89. Naqiuddin, N.H., L.H. Saw, M.C. Yew, F. Yusof, H.M. Poon, Z. Cai ve H.S. Thiam, 2018. Numerical investigation for optimizing segmented micro-channel heat sink by Taguchi-Grey method. **Applied Energy, 222**: 437–450.

90. Kumar, S. ve R. Singh, 2019. Optimization of process parameters of metal inert gas welding with preheating on AISI 1018 mild steel using grey based Taguchi method. **Measurement, 148**: 106924.

91. Smithberg, E. ve F. Landis, 1964. Friction and forced convection heat-transfer characteristics in tubes with twisted tape swirl generators. **Journal of Heat Transfer, 86**(1): 39–48.

92. Manglik, R.M. ve A.E. Bergles, 1993. Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Twisted-Tape Inserts in Isothermal Tubes: Part II—Transition and Turbulent Flows. **Journal of Heat Transfer, 115**(4): 890–896.

93. Chang, S.W., Y.J. Jan ve J.S. Liou, 2007. Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape. **International Journal of Thermal Sciences, 46**(5): 506–518.

94. Eiamsa-ard, S., C. Thianpong, P. Eiamsa-ard ve P. Promvonge, 2009. Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 36**(4): 365–371.

95. Eiamsa-ard, S., C. Thianpong ve P. Eiamsa-ard, 2010. Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes. **Experimental Thermal and Fluid Science, 34**(1): 53–62.

96. Eiamsa-ard, S. ve P. Promvonge, 2010. Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 53**(7–8): 1364–1372.

97. He, Y., L. Liu, P. Li ve L. Ma, 2018. Experimental study on heat transfer enhancement characteristics of tube with cross hollow twisted tape inserts. **Applied Thermal Engineering, 131**: 743–749.

98. Bas, H. ve V. Ozceyhan, 2012. Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube wall. **Experimental Thermal and Fluid Science, 41**: 51–58.

99. Nanan, K., K. Yongsiri, K. Wongcharee, C. Thianpong ve S. Eiamsa-ard, 2013. Heat transfer enhancement by helically twisted tapes inducing co- and counter-swirl flows. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 46:** 67–73.

100. Rahimi, M., S.R. Shabanian ve A.A. Alsairafi, 2009. Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 48**(3): 762–770.

101. Ponnada, S., T. Subrahmanyam ve S.V. Naidu, 2019. A comparative study on the thermal performance of water in a circular tube with twisted tapes, perforated twisted tapes and perforated twisted tapes with alternate axis. **International Journal of Thermal Sciences, 136**: 530–538.

102. Thianpong, C., P. Eiamsa-ard ve S. Eiamsa-ard, 2012. Heat transfer and thermal performance characteristics of heat exchanger tube fitted with perforated twisted-tapes. **Heat and Mass Transfer, 48**(6): 881–892.

103. Gunes, S. ve E. Karakaya, 2015. Thermal Characteristics in a Tube With Loose-Fit Perforated Twisted Tapes. **Heat Transfer Engineering, 36**(18): 1504–1517.

104. Singh Suri, A.R., A. Kumar ve R. Maithani, 2017. Effect of square wings in multiple square perforated twisted tapes on fluid flow and heat transfer of heat exchanger tube. **Case Studies in Thermal Engineering, 10:** 28–43.

105. Suri, A.R.S., A. Kumar ve R. Maithani, 2017. Heat transfer enhancement of heat exchanger tube with multiple square perforated twisted tape inserts: Experimental investigation and correlation development. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 116**: 76–96.

106. Meng, H., G. Zhu, Y. Yu, Z. Wang ve J. Wu, 2016. The effect of symmetrical perforated holes on the turbulent heat transfer in the static mixer with modified Kenics segments. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 99**: 647–659.

107. Eiamsa-ard, S., K. Wongcharee, P. Eiamsa-ard ve C. Thianpong, 2010. Thermohydraulic investigation of turbulent flow through a round tube equipped with twisted tapes consisting of centre wings and alternate-axes. **Experimental Thermal and Fluid Science, 34**(8): 1151–1161.

108. Seemawute, P. ve S. Eiamsa-ard, 2010. Thermohydraulics of turbulent flow through a round tube by a peripherally-cut twisted tape with an alternate axis. International Communications in Heat and Mass Transfer, 37(6): 652–659.

109. Eiamsa-ard, S., K. Wongcharee, P. Eiamsa-ard ve C. Thianpong, 2010. Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts. **Applied Thermal Engineering, 30**(4): 310–318.

110. Eiamsa-ard, S. ve P. Promvonge, 2010. Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape. **Applied Thermal Engineering, 30**(13): 1673–1682.

111. Salam, B., S. Biswas, S. Saha ve M.M.K. Bhuiya, 2013. Heat Transfer Enhancement in a Tube using Rectangular-cut Twisted Tape Insert. **Procedia Engineering, 56**: 96–103.

112. Murugesan, P., K. Mayilsamy ve S. Suresh, 2010. Turbulent Heat Transfer and Pressure Drop in Tube Fitted with Square-cut Twisted Tape. **Chinese Journal of Chemical Engineering, 18**(4): 609–617.

113. Murugesan, P., K. Mayilsamy, S. Suresh ve P.S.S. Srinivasan, 2011. Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 38**(3): 329–334.

114. Murugesan, P., K. Mayilsamy, S. Suresh ve P.S.S. Srinivasan, 2009. Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics Of Turbulent Flow,In a Tube Fitted With Trapezoidal-Cut Twisted Tape Insert. **International Journal of Academic Research, 1**(1): 123–128.

115. Sawarkar, P.A. ve P.R. Rachghare, 2015. Experimental Analysis of Augmentation in Heat Transfer Coefficient Using Twisted Tape with SemiCircular Cut Insert. **International Journal of Science and Research, 4**(4): 1174–1179.

116. Saravanan, A. ve S. Jaisankar, 2019. Heat transfer augmentation techniques in forced flow V-trough solar collector equipped with V-cut and square cut twisted tape. **International Journal of Thermal Sciences, 140**: 59–70.

117. Azmi, W.H., K.V. Sharma, P.K. Sarma, R. Mamat ve S. Anuar, 2014. Comparison of convective heat transfer coefficient and friction factor of TiO2 nanofluid flow in a tube with twisted tape inserts. **International Journal of Thermal Sciences, 81**: 84–93.

118. Yu, W., H. Xie, Y. Li, L. Chen ve Q. Wang, 2012. Experimental investigation on the heat transfer properties of Al2O3 nanofluids using the mixture of ethylene glycol and water as base fluid. **Powder Technology, 230:** 14–19.

119. Duangthongsuk, W. ve S. Wongwises, 2010. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO2-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 53**(1–3): 334–344.

120. Sajadi, A.R. ve M.H. Kazemi, 2011. Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO2/water nanofluid in circular tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 38**(10): 1474–1478.

121. Srinivas, T. ve A. Venu Vinod, 2016. Heat transfer intensification in a shell and helical coil heat exchanger using water-based nanofluids. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 102**: 1–8.

122. Azmi, W.H., K.V. Sharma, P.K. Sarma, R. Mamat ve G. Najafi, 2014. Heat transfer and friction factor of water based TiO2 and SiO2 nanofluids under turbulent flow in a tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 59**: 30–38.

123. Devireddy, S., C.S.R. Mekala ve V.R. Veeredhi, 2016. Improving the cooling performance of automobile radiator with ethylene glycol water based TiO2 nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 78**: 121–126.

124. Chandra Sekhara Reddy, M. ve V. Vasudeva Rao, 2014. Experimental investigation of heat transfer coefficient and friction factor of ethylene glycol water based TiO2 nanofluid in double pipe heat exchanger with and without helical coil inserts. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 50**: 68–76.

125. Eiamsa-ard, S., K. Kiatkittipong ve W. Jedsadaratanachai, 2015. Heat transfer enhancement of TiO2/water nanofluid in a heat exchanger tube equipped with overlapped dual twisted-tapes. **Engineering Science and Technology, an International Journal, 18**(3): 336–350.

126. Eiamsa-ard, S. ve K. Kiatkittipong, 2014. Heat transfer enhancement by multiple twisted tape inserts and TiO2/water nanofluid. **Applied Thermal Engineering, 70**(1): 896–924.

127. Ruchika, D., A.A. Likhite, D.R. Zanwar ve G. Majumdar, 2007. Design of experiments by Taguchi method in agricultural research. **Journal of Soils and Crops, 17**(2): 320–325.

128. Yadav, A.K., M.E. Khan, A. Pal ve D. Sharma, 2015. Optimisation of biodiesel production from bitter groundnut oil using Taguchi method and its performance and emissions characteristics on a 4-cylinder Tata Indica engine. **International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics, 1**(4): 285.

129. Tang, S.H., Y.J. Tan, S.M. Sapuan, S. Sulaiman, N. Ismail ve R. Samin, 2007. The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage. **Journal of Materials Processing Technology, 182**(1–3): 418–426.

130. Ree, S., Y.H. Park ve H. Yoo, 2014. A study on education quality using the Taguchi method. **Total Quality Management & Business Excellence, 25**(7–8): 935–943.

131. Jamshidi, N., M. Farhadi, D.D. Ganji ve K. Sedighi, 2013. Experimental analysis of heat transfer enhancement in shell and helical tube heat exchangers. **Applied Thermal Engineering, 51**(1–2): 644–652.

132. Bilen, K., S. Yapici ve C. Celik, 2001. A Taguchi approach for investigation of heat transfer from a surface equipped with rectangular blocks. **Energy Conversion and Management, 42**(8): 951–961.

133. Sahin, B. ve A. Demir, 2008. Thermal performance analysis and optimum design parameters of heat exchanger having perforated pin fins. **Energy Conversion and Management, 49**(6): 1684–1695.

134. Gunes, S., E. Manay, E. Senyigit ve V. Ozceyhan, 2011. A Taguchi approach for optimization of design parameters in a tube with coiled wire inserts. **Applied Thermal Engineering, 31**(14–15): 2568–2577.

135. Celik, N., G. Pusat ve E. Turgut, 2018. Application of Taguchi method and grey relational analysis on a turbulated heat exchanger. **International Journal of Thermal Sciences, 124**: 85–97.

136. Abadeh, A., M. Passandideh-Fard, M.J. Maghrebi ve M. Mohammadi, 2019. Stability and magnetization of Fe3O4/water nanofluid preparation characteristics using Taguchi method. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 135**(2): 1323–1334.

137. Abdullah, M.I.H.C., A. Othman, R. Abdullah ve M.F. Abdollah, 2019. Optimization on the Nanoparticles Stability in Liquid Phased Condition by Using Taguchi Analysis. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 61**(1): 140–150.

138. Mondragon, R., J.E. Julia, A. Barba ve J.C. Jarque, 2012. Characterization of silica–water nanofluids dispersed with an ultrasound probe: A study of their physical properties and stability. **Powder Technology, 224**: 138–146.

139. Bhalla, V., V. Khullar ve H. Tyagi, 2019. Investigation of factors influencing the performance of nanofluid-based direct absorption solar collector using Taguchi method. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 135**(2): 1493–1505.

140. Naraki, M., S.M. Peyghambarzadeh, S.H. Hashemabadi ve Y. Vermahmoudi, 2013. Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator. **International Journal of Thermal Sciences, 66**: 82–90.

141. Jamshidi, N., M. Farhadi, K. Sedighi ve D.D. Ganji, 2012. Optimization of design parameters for nanofluids flowing inside helical coils. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 39**(2): 311–317.

142. Mohammadi, M., A. Abadeh, R. Nemati-Farouji ve M. Passandideh-Fard, 2019. An optimization of heat transfer of nanofluid flow in a helically coiled pipe using Taguchi method. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 138**(2): 1779–1792.

143. Cengel, Y.A. ve C.M. John, 2012. Fuid Mechanics: Fundamentals and Applications. MCGraw-Hill Education.

144. Sharifpur, M., A.B. Solomon, T.L. Ottermann ve J.P. Meyer, 2018. Optimum concentration of nanofluids for heat transfer enhancement under cavity flow natural convection with TiO2 – Water. **International Communications in Heat and Mass Transfer, 98**: 297–303.

145. Yang, L. ve K. Du, 2017. A comprehensive review on heat transfer characteristics of TiO2 nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 108**: 11–31.

146. Bergman, T.L., A.S.L. and F.P. Incropera ve D.P. DeWitt, 2011. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th baskı. Wiley Global Education.

147. Dittus, F.W. ve L.M.K. Boelter, 1930. Publications on engineering. University of California, Berkeley, 2: 443.

148. Gnielinski V., 1976. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. **International Chemical Engineering, 27**: 359–368.

149. Moody, L.F., 1944. Friction factors for pipe flow. **Trans. Asme, 66**: 671–684.

150. Petukhov, B.S., T.F. Irvine ve J.P. Hartnett, 1970. Advances in heat transfer. Academic, New York, 6: 503–564.

151. Kline ve McClintock F.A., 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. **Mech Eng, 75**(1): 3–8.

152. Sajid, M.U. ve H.M. Ali, 2019. Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 103**: 556–592.

153. Umar, S., F. Sulaiman, N. Abdullah ve S.N. Mohamad, 2018. Investigation of the effect of pH adjustment on the stability of nanofluid, AIP Conference Proceedings, s: 020031.

EKLER

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları

	$\dot{V}$ [m^3/h]	wt [%]	h [W/m^{2}K]	ΔP [Pa]	Normalleştirilmiş veriler		Sapma sırası		GRC		GRG	Sıralama
					h	ΔP	h	ΔP	h	ΔP		
Boş Boru	0.25	0.00	1643.92	117.00	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.3333	1.0000	0.6667	3
Boş Boru	0.58	0.00	2743.10	359.10	0.1120	0.9625	0.8880	0.0375	0.3602	0.9302	0.6452	42
Boş Boru	0.81	0.00	3724.72	660.83	0.2121	0.9157	0.7879	0.0843	0.3882	0.8558	0.6220	53
Boş Boru	1.04	0.00	4423.15	994.69	0.2833	0.8640	0.7167	0.1360	0.4109	0.7861	0.5985	90
Boş Boru	1.33	0.00	5424.75	1610.50	0.3854	0.7686	0.6146	0.2314	0.4486	0.6836	0.5661	145
Boş Boru	0.25	0.25	1854.39	135.91	0.0215	0.9971	0.9785	0.0029	0.3382	0.9942	0.6662	5
Boş Boru	0.58	0.25	3062.10	445.17	0.1446	0.9491	0.8554	0.0509	0.3689	0.9077	0.6383	43
Boş Boru	0.81	0.25	4185.29	802.60	0.2590	0.8938	0.7410	0.1062	0.4029	0.8247	0.6138	68
Boş Boru	1.04	0.25	4988.07	1197.41	0.3409	0.8326	0.6591	0.1674	0.4314	0.7491	0.5902	98
Boş Boru	1.33	0.25	5921.68	1850.85	0.4360	0.7313	0.5640	0.2687	0.4699	0.6505	0.5602	158
Boş Boru	0.25	0.50	2126.60	163.58	0.0492	0.9928	0.9508	0.0072	0.3446	0.9858	0.6652	6
Boş Boru	0.58	0.50	3412.97	493.38	0.1803	0.9417	0.8197	0.0583	0.3789	0.8955	0.6372	44
Boş Boru	0.81	0.50	4472.05	921.73	0.2883	0.8753	0.7117	0.1247	0.4126	0.8004	0.6065	82
Boş Boru	1.04	0.50	5197.71	1403.64	0.3622	0.8006	0.6378	0.1994	0.4395	0.7149	0.5772	124
Boş Boru	1.33	0.50	6263.95	2236.72	0.4709	0.6715	0.5291	0.3285	0.4859	0.6035	0.5447	183
Boş Boru	0.25	0.75	2390.14	186.05	0.0761	0.9893	0.9239	0.0107	0.3511	0.9790	0.6651	7
Boş Boru	0.58	0.75	3760.54	548.87	0.2157	0.9331	0.7843	0.0669	0.3893	0.8819	0.6356	45
Boş Boru	0.81	0.75	4895.90	1041.11	0.3315	0.8568	0.6685	0.1432	0.4279	0.7774	0.6026	86
Boş Boru	1.04	0.75	5649.31	1592.13	0.4083	0.7714	0.5917	0.2286	0.4580	0.6862	0.5721	136
Boş Boru	1.33	0.75	6864.62	2515.14	0.5321	0.6284	0.4679	0.3716	0.5166	0.5736	0.5451	182
Boş Boru	0.25	1.00	2734.91	218.34	0.1112	0.9843	0.8888	0.0157	0.3600	0.9695	0.6648	8
Boş Boru	0.58	1.00	4171.81	659.38	0.2577	0.9159	0.7423	0.0841	0.4025	0.8561	0.6293	47

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

Boş Boru	0.81	1.00	5562.82	1263.11	0.3995	0.8224	0.6005	0.1776	0.4543	0.7379	0.5961	93
Boş Boru	1.04	1.00	6340.77	1968.18	0.4787	0.7131	0.5213	0.2869	0.4896	0.6354	0.5625	150
Boş Boru	1.33	1.00	7640.18	3074.53	0.6112	0.5417	0.3888	0.4583	0.5626	0.5217	0.5421	189
TBL	0.25	0.00	2302.45	218.57	0.0671	0.9843	0.9329	0.0157	0.3489	0.9695	0.6592	17
TBL	0.58	0.00	3411.71	618.38	0.1802	0.9223	0.8198	0.0777	0.3788	0.8655	0.6222	52
TBL	0.81	0.00	4574.23	1197.92	0.2987	0.8325	0.7013	0.1675	0.4162	0.7491	0.5826	110
TBL	1.04	0.00	5783.86	1978.69	0.4220	0.7115	0.5780	0.2885	0.4638	0.6341	0.5490	179
TBL	1.33	0.00	6868.93	2875.81	0.5326	0.5725	0.4674	0.4275	0.5168	0.5391	0.5280	199
TBL	0.25	0.25	2565.31	264.23	0.0939	0.9772	0.9061	0.0228	0.3556	0.9564	0.6560	32
TBL	0.58	0.25	3999.00	695.98	0.2401	0.9103	0.7599	0.0897	0.3968	0.8479	0.6223	51
TBL	0.81	0.25	5242.63	1239.10	0.3668	0.8261	0.6332	0.1739	0.4412	0.7420	0.5916	97
TBL	1.04	0.25	6495.86	2033.45	0.4946	0.7030	0.5054	0.2970	0.4973	0.6274	0.5623	151
TBL	1.33	0.25	7366.10	2976.87	0.5833	0.5568	0.4167	0.4432	0.5454	0.5301	0.5378	195
TBL	0.25	0.50	2835.21	240.65	0.1214	0.9808	0.8786	0.0192	0.3627	0.9631	0.6629	11
TBL	0.58	0.50	4179.61	804.77	0.2585	0.8934	0.7415	0.1066	0.4027	0.8243	0.6135	69
TBL	0.81	0.50	5434.12	1513.15	0.3863	0.7836	0.6137	0.2164	0.4490	0.6980	0.5735	133
TBL	1.04	0.50	6433.99	2353.23	0.4882	0.6535	0.5118	0.3465	0.4942	0.5906	0.5424	188
TBL	1.33	0.50	7451.27	3250.39	0.5919	0.5144	0.4081	0.4856	0.5506	0.5073	0.5290	198
TBL	0.25	0.75	3103.14	306.35	0.1487	0.9707	0.8513	0.0293	0.3700	0.9446	0.6573	27
TBL	0.58	0.75	4650.00	858.40	0.3064	0.8851	0.6936	0.1149	0.4189	0.8131	0.6160	62
TBL	0.81	0.75	5885.91	1525.06	0.4324	0.7818	0.5676	0.2182	0.4683	0.6962	0.5823	112
TBL	1.04	0.75	6712.81	2424.04	0.5167	0.6425	0.4833	0.3575	0.5085	0.5831	0.5458	181
TBL	1.33	0.75	7882.56	3729.25	0.6359	0.4402	0.3641	0.5598	0.5786	0.4718	0.5252	200
TBL	0.25	1.00	3539.77	353.32	0.1932	0.9634	0.8068	0.0366	0.3826	0.9318	0.6572	28
TBL	0.58	1.00	5248.83	1022.90	0.3674	0.8596	0.6326	0.1404	0.4415	0.7808	0.6111	73

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

TBL	0.81	1.00	6571.29	1883.98	0.5022	0.7262	0.4978	0.2738	0.5011	0.6461	0.5736	132
TBL	1.04	1.00	7577.53	2975.56	0.6048	0.5570	0.3952	0.4430	0.5585	0.5302	0.5444	184
TBL	1.33	1.00	8773.14	4584.50	0.7267	0.3077	0.2733	0.6923	0.6466	0.4193	0.5330	197
DBL (P/y=1.00)	0.25	0.00	2501.84	251.36	0.0874	0.9792	0.9126	0.0208	0.3540	0.9600	0.6570	30
DBL (P/y=1.00)	0.58	0.00	3482.91	641.03	0.1874	0.9188	0.8126	0.0812	0.3809	0.8603	0.6206	58
DBL (P/y=1.00)	0.81	0.00	4987.11	1284.21	0.3408	0.8191	0.6592	0.1809	0.4313	0.7343	0.5828	109
DBL (P/y=1.00)	1.04	0.00	6011.59	2040.87	0.4452	0.7019	0.5548	0.2981	0.4740	0.6265	0.5502	175
DBL (P/y=1.00)	1.33	0.00	7557.92	3069.88	0.6028	0.5424	0.3972	0.4576	0.5573	0.5221	0.5397	193
DBL (P/y=1.00)	0.25	0.25	2688.58	279.85	0.1065	0.9748	0.8935	0.0252	0.3588	0.9520	0.6554	33
DBL (P/y=1.00)	0.58	0.25	4331.78	814.02	0.2740	0.8920	0.7260	0.1080	0.4078	0.8223	0.6151	64
DBL (P/y=1.00)	0.81	0.25	5691.42	1370.80	0.4126	0.8057	0.5874	0.1943	0.4598	0.7201	0.5900	100
DBL (P/y=1.00)	1.04	0.25	6808.16	2113.58	0.5264	0.6906	0.4736	0.3094	0.5136	0.6177	0.5656	146
DBL (P/y=1.00)	1.33	0.25	7990.73	3115.63	0.6469	0.5353	0.3531	0.4647	0.5861	0.5183	0.5522	173
DBL (P/y=1.00)	0.25	0.50	3094.88	313.68	0.1479	0.9695	0.8521	0.0305	0.3698	0.9425	0.6562	31
DBL (P/y=1.00)	0.58	0.50	4574.34	828.87	0.2987	0.8897	0.7013	0.1103	0.4162	0.8192	0.6177	60
DBL (P/y=1.00)	0.81	0.50	5921.81	1602.10	0.4360	0.7699	0.5640	0.2301	0.4699	0.6848	0.5774	123
DBL (P/y=1.00)	1.04	0.50	7155.10	2486.70	0.5618	0.6328	0.4382	0.3672	0.5329	0.5765	0.5547	166
DBL (P/y=1.00)	1.33	0.50	8199.73	3608.97	0.6682	0.4589	0.3318	0.5411	0.6011	0.4802	0.5407	191
DBL (P/y=1.00)	0.25	0.75	3329.26	321.59	0.1718	0.9683	0.8282	0.0317	0.3764	0.9404	0.6584	21
DBL (P/y=1.00)	0.58	0.75	4915.69	937.45	0.3335	0.8729	0.6665	0.1271	0.4286	0.7973	0.6129	71
DBL (P/y=1.00)	0.81	0.75	6353.60	1612.77	0.4801	0.7682	0.5199	0.2318	0.4902	0.6832	0.5867	104
DBL (P/y=1.00)	1.04	0.75	7492.20	2540.21	0.5961	0.6245	0.4039	0.3755	0.5532	0.5711	0.5621	153
DBL (P/y=1.00)	1.33	0.75	8685.25	3785.73	0.7177	0.4315	0.2823	0.5685	0.6392	0.4679	0.5535	170
DBL (P/y=1.00)	0.25	1.00	3944.48	378.00	0.2345	0.9596	0.7655	0.0404	0.3951	0.9252	0.6601	16
DBL (P/y=1.00)	0.58	1.00	5488.93	1100.29	0.3919	0.8476	0.6081	0.1524	0.4512	0.7664	0.6088	79

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

DBL (P/y=1.00)	0.81	1.00	6822.25	1924.56	0.5278	0.7199	0.4722	0.2801	0.5143	0.6409	0.5776	122
DBL (P/y=1.00)	1.04	1.00	8039.54	3118.69	0.6519	0.5348	0.3481	0.4652	0.5896	0.5180	0.5538	168
DBL (P/y=1.00)	1.33	1.00	8879.95	4681.64	0.7376	0.2926	0.2624	0.7074	0.6558	0.4141	0.5350	196
DBL (P/y=0.50)	0.25	0.00	2662.60	285.38	0.1038	0.9739	0.8962	0.0261	0.3581	0.9504	0.6543	36
DBL (P/y=0.50)	0.58	0.00	3976.25	858.88	0.2377	0.8850	0.7623	0.1150	0.3961	0.8130	0.6046	85
DBL (P/y=0.50)	0.81	0.00	5381.31	1438.43	0.3809	0.7952	0.6191	0.2048	0.4468	0.7094	0.5781	120
DBL (P/y=0.50)	1.04	0.00	6548.51	2147.07	0.4999	0.6854	0.5001	0.3146	0.5000	0.6138	0.5569	164
DBL (P/y=0.50)	1.33	0.00	7999.76	3317.77	0.6478	0.5040	0.3522	0.4960	0.5867	0.5020	0.5444	185
DBL (P/y=0.50)	0.25	0.25	2801.09	274.36	0.1180	0.9756	0.8820	0.0244	0.3618	0.9535	0.6576	24
DBL (P/y=0.50)	0.58	0.25	4498.60	785.18	0.2910	0.8965	0.7090	0.1035	0.4136	0.8284	0.6210	57
DBL (P/y=0.50)	0.81	0.25	6224.00	1495.99	0.4668	0.7863	0.5332	0.2137	0.4840	0.7006	0.5923	96
DBL (P/y=0.50)	1.04	0.25	7206.66	2401.92	0.5670	0.6459	0.4330	0.3541	0.5359	0.5854	0.5607	156
DBL (P/y=0.50)	1.33	0.25	8344.38	3521.83	0.6830	0.4724	0.3170	0.5276	0.6120	0.4865	0.5493	176
DBL (P/y=0.50)	0.25	0.50	3249.62	321.12	0.1637	0.9684	0.8363	0.0316	0.3742	0.9405	0.6573	26
DBL (P/y=0.50)	0.58	0.50	5055.35	891.61	0.3477	0.8800	0.6523	0.1200	0.4339	0.8064	0.6202	59
DBL (P/y=0.50)	0.81	0.50	6217.90	1692.09	0.4662	0.7559	0.5338	0.2441	0.4837	0.6720	0.5778	121
DBL (P/y=0.50)	1.04	0.50	7512.85	2609.18	0.5982	0.6138	0.4018	0.3862	0.5545	0.5642	0.5593	159
DBL (P/y=0.50)	1.33	0.50	8609.72	3825.92	0.7100	0.4252	0.2900	0.5748	0.6329	0.4652	0.5491	178
DBL (P/y=0.50)	0.25	0.75	3594.87	354.95	0.1989	0.9631	0.8011	0.0369	0.3843	0.9313	0.6578	23
DBL (P/y=0.50)	0.58	0.75	5295.68	1034.11	0.3722	0.8579	0.6278	0.1421	0.4433	0.7787	0.6110	74
DBL (P/y=0.50)	0.81	0.75	6599.74	1777.34	0.5051	0.7427	0.4949	0.2573	0.5026	0.6602	0.5814	114
DBL (P/y=0.50)	1.04	0.75	7821.41	2716.83	0.6297	0.5971	0.3703	0.4029	0.5745	0.5538	0.5641	148
DBL (P/y=0.50)	1.33	0.75	8970.76	4171.99	0.7468	0.3716	0.2532	0.6284	0.6639	0.4431	0.5535	171
DBL (P/y=0.50)	0.25	1.00	4331.58	436.30	0.2740	0.9505	0.7260	0.0495	0.4078	0.9099	0.6589	19
DBL (P/y=0.50)	0.58	1.00	6013.75	1159.77	0.4454	0.8384	0.5546	0.1616	0.4741	0.7557	0.6149	66

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

DBL (P/y=0.50)	0.81	1.00	7207.01	2132.58	0.5670	0.6876	0.4330	0.3124	0.5359	0.6155	0.5757	127
DBL (P/y=0.50)	1.04	1.00	8535.48	3274.47	0.7025	0.5107	0.2975	0.4893	0.6269	0.5054	0.5662	144
DBL (P/y=0.50)	1.33	1.00	9327.79	4940.21	0.7832	0.2525	0.2168	0.7475	0.6976	0.4008	0.5492	177
DBL (P/y=0.25)	0.25	0.00	3031.88	324.57	0.1415	0.9678	0.8585	0.0322	0.3680	0.9396	0.6538	37
DBL (P/y=0.25)	0.58	0.00	4090.13	779.83	0.2493	0.8973	0.7507	0.1027	0.3998	0.8296	0.6147	67
DBL (P/y=0.25)	0.81	0.00	5465.69	1518.97	0.3896	0.7827	0.6104	0.2173	0.4503	0.6971	0.5737	131
DBL (P/y=0.25)	1.04	0.00	6771.02	2506.06	0.5226	0.6298	0.4774	0.3702	0.5116	0.5746	0.5431	187
DBL (P/y=0.25)	1.33	0.00	8232.81	3556.17	0.6716	0.4670	0.3284	0.5330	0.6036	0.4840	0.5438	186
DBL (P/y=0.25)	0.25	0.25	3379.47	337.19	0.1769	0.9659	0.8231	0.0341	0.3779	0.9361	0.6570	29
DBL (P/y=0.25)	0.58	0.25	4722.86	950.75	0.3138	0.8708	0.6862	0.1292	0.4215	0.7947	0.6081	80
DBL (P/y=0.25)	0.81	0.25	6270.27	1643.61	0.4716	0.7634	0.5284	0.2366	0.4862	0.6788	0.5825	111
DBL (P/y=0.25)	1.04	0.25	7504.70	2553.45	0.5974	0.6224	0.4026	0.3776	0.5539	0.5698	0.5618	154
DBL (P/y=0.25)	1.33	0.25	8702.58	3654.94	0.7195	0.4517	0.2805	0.5483	0.6406	0.4770	0.5588	161
DBL (P/y=0.25)	0.25	0.50	3797.46	349.10	0.2195	0.9640	0.7805	0.0360	0.3905	0.9329	0.6617	14
DBL (P/y=0.25)	0.58	0.50	5450.70	935.08	0.3880	0.8732	0.6120	0.1268	0.4496	0.7977	0.6237	49
DBL (P/y=0.25)	0.81	0.50	6794.31	1770.54	0.5250	0.7438	0.4750	0.2562	0.5128	0.6612	0.5870	103
DBL (P/y=0.25)	1.04	0.50	8419.05	2721.98	0.6906	0.5963	0.3094	0.4037	0.6177	0.5533	0.5855	106
DBL (P/y=0.25)	1.33	0.50	9606.17	4028.11	0.8116	0.3939	0.1884	0.6061	0.7263	0.4520	0.5892	101
DBL (P/y=0.25)	0.25	0.75	4350.74	426.21	0.2759	0.9521	0.7241	0.0479	0.4085	0.9125	0.6605	15
DBL (P/y=0.25)	0.58	0.75	5869.13	1190.98	0.4307	0.8336	0.5693	0.1664	0.4676	0.7503	0.6089	77
DBL (P/y=0.25)	0.81	0.75	7437.14	2138.87	0.5905	0.6867	0.4095	0.3133	0.5498	0.6148	0.5823	113
DBL (P/y=0.25)	1.04	0.75	8488.18	3259.58	0.6976	0.5130	0.3024	0.4870	0.6232	0.5066	0.5649	147
DBL (P/y=0.25)	1.33	0.75	9819.02	4869.51	0.8333	0.2635	0.1667	0.7365	0.7499	0.4044	0.5772	125
DBL (P/y=0.25)	0.25	1.00	5014.74	502.08	0.3436	0.9403	0.6564	0.0597	0.4324	0.8934	0.6629	12
DBL (P/y=0.25)	0.58	1.00	6633.47	1257.29	0.5086	0.8233	0.4914	0.1767	0.5043	0.7389	0.6216	55

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

DBL (P/y=0.25)	0.81	1.00	8129.94	2371.47	0.6611	0.6506	0.3389	0.3494	0.5960	0.5887	0.5923	95
DBL (P/y=0.25)	1.04	1.00	9304.17	3655.90	0.7808	0.4516	0.2192	0.5484	0.6952	0.4769	0.5861	105
DBL (P/y=0.25)	1.33	1.00	10710.04	5495.63	0.9241	0.1665	0.0759	0.8335	0.8682	0.3749	0.6216	56
GBL (P/y=1.00)	0.25	0.00	2871.12	283.21	0.1251	0.9742	0.8749	0.0258	0.3637	0.9510	0.6573	25
GBL (P/y=1.00)	0.58	0.00	3748.59	808.88	0.2145	0.8928	0.7855	0.1072	0.3890	0.8234	0.6062	83
GBL (P/y=1.00)	0.81	0.00	5028.43	1385.86	0.3450	0.8034	0.6550	0.1966	0.4329	0.7177	0.5753	128
GBL (P/y=1.00)	1.04	0.00	6266.24	2081.67	0.4712	0.6955	0.5288	0.3045	0.4860	0.6215	0.5538	169
GBL (P/y=1.00)	1.33	0.00	7414.11	2999.08	0.5882	0.5534	0.4118	0.4466	0.5483	0.5282	0.5383	194
GBL (P/y=1.00)	0.25	0.25	2755.47	344.66	0.1133	0.9647	0.8867	0.0353	0.3606	0.9341	0.6473	40
GBL (P/y=1.00)	0.58	0.25	4009.32	701.46	0.2411	0.9094	0.7589	0.0906	0.3972	0.8466	0.6219	54
GBL (P/y=1.00)	0.81	0.25	5350.22	1366.32	0.3778	0.8064	0.6222	0.1936	0.4455	0.7209	0.5832	108
GBL (P/y=1.00)	1.04	0.25	6586.03	2188.79	0.5037	0.6789	0.4963	0.3211	0.5019	0.6090	0.5554	165
GBL (P/y=1.00)	1.33	0.25	8084.22	2999.38	0.6565	0.5533	0.3435	0.4467	0.5927	0.5282	0.5604	157
GBL (P/y=1.00)	0.25	0.50	3021.81	381.75	0.1404	0.9590	0.8596	0.0410	0.3678	0.9242	0.6460	41
GBL (P/y=1.00)	0.58	0.50	4901.71	909.78	0.3321	0.8771	0.6679	0.1229	0.4281	0.8028	0.6154	63
GBL (P/y=1.00)	0.81	0.50	6100.82	1609.18	0.4543	0.7688	0.5457	0.2312	0.4781	0.6838	0.5810	116
GBL (P/y=1.00)	1.04	0.50	7288.70	2416.69	0.5754	0.6436	0.4246	0.3564	0.5408	0.5839	0.5623	152
GBL (P/y=1.00)	1.33	0.50	8421.44	3393.37	0.6908	0.4923	0.3092	0.5077	0.6179	0.4962	0.5570	163
GBL (P/y=1.00)	0.25	0.75	3870.83	349.69	0.2270	0.9639	0.7730	0.0361	0.3928	0.9327	0.6628	13
GBL (P/y=1.00)	0.58	0.75	5351.25	807.69	0.3779	0.8930	0.6221	0.1070	0.4456	0.8237	0.6346	46
GBL (P/y=1.00)	0.81	0.75	6655.07	1629.47	0.5108	0.7656	0.4892	0.2344	0.5055	0.6808	0.5931	94
GBL (P/y=1.00)	1.04	0.75	7876.61	2613.62	0.6353	0.6131	0.3647	0.3869	0.5782	0.5638	0.5710	141
GBL (P/y=1.00)	1.33	0.75	9025.94	4102.88	0.7524	0.3823	0.2476	0.6177	0.6688	0.4474	0.5581	162
GBL (P/y=1.00)	0.25	1.00	4153.99	411.05	0.2558	0.9544	0.7442	0.0456	0.4019	0.9165	0.6592	18
GBL (P/y=1.00)	0.58	1.00	5806.40	1125.87	0.4243	0.8437	0.5757	0.1563	0.4648	0.7618	0.6133	70

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

GBL (P/y=1.00)	0.81	1.00	6978.33	1954.69	0.5437	0.7152	0.4563	0.2848	0.5229	0.6371	0.5800	119
GBL (P/y=1.00)	1.04	1.00	8282.83	2912.46	0.6767	0.5668	0.3233	0.4332	0.6073	0.5358	0.5715	138
GBL (P/y=1.00)	1.33	1.00	9423.21	4190.84	0.7929	0.3687	0.2071	0.6313	0.7072	0.4420	0.5746	130
GBL (P/y=0.50)	0.25	0.00	2749.13	292.99	0.1127	0.9727	0.8873	0.0273	0.3604	0.9483	0.6543	35
GBL (P/y=0.50)	0.58	0.00	4241.97	843.22	0.2648	0.8875	0.7352	0.1125	0.4048	0.8163	0.6105	75
GBL (P/y=0.50)	0.81	0.00	5710.61	1595.63	0.4145	0.7709	0.5855	0.2291	0.4606	0.6857	0.5732	134
GBL (P/y=0.50)	1.04	0.00	7043.91	2538.41	0.5504	0.6248	0.4496	0.3752	0.5265	0.5713	0.5489	180
GBL (P/y=0.50)	1.33	0.00	8093.98	3468.56	0.6575	0.4806	0.3425	0.5194	0.5934	0.4905	0.5420	190
GBL (P/y=0.50)	0.25	0.25	3463.91	407.51	0.1855	0.9550	0.8145	0.0450	0.3804	0.9174	0.6489	39
GBL (P/y=0.50)	0.58	0.25	5344.88	921.02	0.3772	0.8754	0.6228	0.1246	0.4453	0.8005	0.6229	50
GBL (P/y=0.50)	0.81	0.25	7195.37	1891.48	0.5659	0.7250	0.4341	0.2750	0.5352	0.6452	0.5902	99
GBL (P/y=0.50)	1.04	0.25	8875.33	3072.11	0.7371	0.5420	0.2629	0.4580	0.6554	0.5219	0.5887	102
GBL (P/y=0.50)	1.33	0.25	10198.42	4692.43	0.8720	0.2909	0.1280	0.7091	0.7961	0.4135	0.6048	84
GBL (P/y=0.50)	0.25	0.50	3835.69	402.47	0.2234	0.9558	0.7766	0.0442	0.3917	0.9187	0.6552	34
GBL (P/y=0.50)	0.58	0.50	5288.99	1045.02	0.3715	0.8562	0.6285	0.1438	0.4431	0.7766	0.6099	76
GBL (P/y=0.50)	0.81	0.50	6749.36	1988.89	0.5204	0.7099	0.4796	0.2901	0.5104	0.6328	0.5716	137
GBL (P/y=0.50)	1.04	0.50	8191.44	3083.25	0.6674	0.5403	0.3326	0.4597	0.6005	0.5210	0.5608	155
GBL (P/y=0.50)	1.33	0.50	9799.05	4852.30	0.8312	0.2662	0.1688	0.7338	0.7477	0.4052	0.5765	126
GBL (P/y=0.50)	0.25	0.75	4157.97	420.88	0.2563	0.9529	0.7437	0.0471	0.4020	0.9139	0.6580	22
GBL (P/y=0.50)	0.58	0.75	5678.09	1251.35	0.4112	0.8242	0.5888	0.1758	0.4592	0.7399	0.5995	89
GBL (P/y=0.50)	0.81	0.75	7246.90	2199.00	0.5711	0.6774	0.4289	0.3226	0.5383	0.6078	0.5730	135
GBL (P/y=0.50)	1.04	0.75	8298.41	3365.16	0.6783	0.4966	0.3217	0.5034	0.6085	0.4983	0.5534	172
GBL (P/y=0.50)	1.33	0.75	9629.34	4975.39	0.8139	0.2471	0.1861	0.7529	0.7288	0.3991	0.5639	149
GBL (P/y=0.50)	0.25	1.00	5104.57	478.91	0.3527	0.9439	0.6473	0.0561	0.4358	0.8991	0.6675	2
GBL (P/y=0.50)	0.58	1.00	6514.53	1455.90	0.4965	0.7925	0.5035	0.2075	0.4982	0.7067	0.6025	87

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

GBL (P/y=0.50)	0.81	1.00	8292.36	2720.70	0.6777	0.5965	0.3223	0.4035	0.6080	0.5534	0.5807	117
GBL (P/y=0.50)	1.04	1.00	9275.01	4214.71	0.7778	0.3650	0.2222	0.6350	0.6924	0.4405	0.5664	143
GBL (P/y=0.50)	1.33	1.00	10884.18	6460.16	0.9419	0.0170	0.0581	0.9830	0.8958	0.3372	0.6165	61
GBL (P/y=0.25)	0.25	0.00	3433.60	329.34	0.1824	0.9671	0.8176	0.0329	0.3795	0.9383	0.6589	20
GBL (P/y=0.25)	0.58	0.00	4780.84	891.89	0.3197	0.8799	0.6803	0.1201	0.4236	0.8063	0.6150	65
GBL (P/y=0.25)	0.81	0.00	5977.09	1709.16	0.4417	0.7533	0.5583	0.2467	0.4724	0.6696	0.5710	140
GBL (P/y=0.25)	1.04	0.00	7459.31	2738.09	0.5928	0.5938	0.4072	0.4062	0.5511	0.5518	0.5514	174
GBL (P/y=0.25)	1.33	0.00	8427.01	3872.64	0.6914	0.4180	0.3086	0.5820	0.6183	0.4621	0.5402	192
GBL (P/y=0.25)	0.25	0.25	3974.41	454.60	0.2375	0.9477	0.7625	0.0523	0.3961	0.9053	0.6507	38
GBL (P/y=0.25)	0.58	0.25	5242.68	1045.75	0.3668	0.8561	0.6332	0.1439	0.4412	0.7765	0.6089	78
GBL (P/y=0.25)	0.81	0.25	6775.60	2075.10	0.5231	0.6966	0.4769	0.3034	0.5118	0.6223	0.5671	142
GBL (P/y=0.25)	1.04	0.25	8179.80	3225.49	0.6662	0.5183	0.3338	0.4817	0.5997	0.5093	0.5545	167
GBL (P/y=0.25)	1.33	0.25	9802.90	4701.54	0.8316	0.2895	0.1684	0.7105	0.7481	0.4131	0.5806	118
GBL (P/y=0.25)	0.25	0.50	4402.47	406.94	0.2812	0.9551	0.7188	0.0449	0.4102	0.9175	0.6639	9
GBL (P/y=0.25)	0.58	0.50	5836.86	1138.78	0.4274	0.8417	0.5726	0.1583	0.4662	0.7595	0.6128	72
GBL (P/y=0.25)	0.81	0.50	7747.66	2280.71	0.6222	0.6647	0.3778	0.3353	0.5696	0.5986	0.5841	107
GBL (P/y=0.25)	1.04	0.50	9137.49	3739.07	0.7638	0.4387	0.2362	0.5613	0.6792	0.4711	0.5751	129
GBL (P/y=0.25)	1.33	0.50	9905.42	5889.26	0.8421	0.1055	0.1579	0.8945	0.7600	0.3585	0.5593	160
GBL (P/y=0.25)	0.25	0.75	4840.33	474.28	0.3258	0.9446	0.6742	0.0554	0.4258	0.9003	0.6631	10
GBL (P/y=0.25)	0.58	0.75	6654.45	1445.19	0.5107	0.7942	0.4893	0.2058	0.5054	0.7084	0.6069	81
GBL (P/y=0.25)	0.81	0.75	7943.74	2652.46	0.6421	0.6071	0.3579	0.3929	0.5828	0.5600	0.5714	139
GBL (P/y=0.25)	1.04	0.75	9539.03	4165.35	0.8047	0.3726	0.1953	0.6274	0.7192	0.4435	0.5813	115
GBL (P/y=0.25)	1.33	0.75	10627.73	6257.72	0.9157	0.0484	0.0843	0.9516	0.8557	0.3444	0.6001	88
GBL (P/y=0.25)	**0.25**	**1.00**	**5749.01**	**529.95**	**0.4184**	**0.9360**	**0.5816**	**0.0640**	**0.4623**	**0.8865**	**0.6744**	**1**
GBL (P/y=0.25)	0.58	1.00	7524.11	1539.49	0.5994	0.7796	0.4006	0.2204	0.5552	0.6940	0.6246	48

EK-1. Su baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

GBL (P/y=0.25)	0.81	1.00	9101.08	3113.90	0.7601	0.5356	0.2399	0.4644	0.6758	0.5184	0.5971	92
GBL (P/y=0.25)	1.04	1.00	10140.48	4805.42	0.8660	0.2734	0.1340	0.7266	0.7887	0.4076	0.5982	91
GBL (P/y=0.25)	1.33	1.00	11454.64	6569.88	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6667	3

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları

	$\dot{V}$ [m^3/h]	wt [%]	h [W/m^{2}K]	ΔP [Pa]	Normalleştirilmiş veriler		Sapma sırası		GRC		GRG	Sıralama
					h	ΔP	h	ΔP	h	ΔP		
Boş Boru	1.04	0.00	1878.76	2145.31	0	1	1.0000	0.0000	0.3333	1.0000	0.6667	4
Boş Boru	2.10	0.00	3182.60	7573.35	0.1268	0.9464	0.8732	0.0536	0.3641	0.9032	0.6337	33
Boş Boru	3.09	0.00	4449.22	14597.58	0.2500	0.8770	0.7500	0.1230	0.4000	0.8026	0.6013	55
Boş Boru	3.73	0.00	5034.14	20571.00	0.3069	0.8181	0.6931	0.1819	0.4191	0.7332	0.5761	79
Boş Boru	4.11	0.00	5476.50	24075.74	0.3499	0.7835	0.6501	0.2165	0.4348	0.6978	0.5663	90
Boş Boru	1.04	0.25	2063.56	2389.60	0.0180	0.9976	0.9820	0.0024	0.3374	0.9952	0.6663	6
Boş Boru	2.10	0.25	3295.88	7091.71	0.1378	0.9512	0.8622	0.0488	0.3671	0.9110	0.6390	30
Boş Boru	3.09	0.25	4616.62	14368.39	0.2663	0.8793	0.7337	0.1207	0.4053	0.8056	0.6054	53
Boş Boru	3.73	0.25	5414.09	21667.37	0.3439	0.8072	0.6561	0.1928	0.4325	0.7218	0.5771	77
Boş Boru	4.11	0.25	5910.89	26331.62	0.3922	0.7612	0.6078	0.2388	0.4513	0.6768	0.5641	91
Boş Boru	1.04	0.50	2220.37	2495.69	0.0332	0.9965	0.9668	0.0035	0.3409	0.9931	0.6670	2
Boş Boru	2.10	0.50	3606.37	8223.40	0.1680	0.9400	0.8320	0.0600	0.3754	0.8928	0.6341	32
Boş Boru	3.09	0.50	4952.71	15978.82	0.2990	0.8634	0.7010	0.1366	0.4163	0.7854	0.6009	56
Boş Boru	3.73	0.50	5881.47	24745.31	0.3893	0.7769	0.6107	0.2231	0.4502	0.6914	0.5708	84
Boş Boru	4.11	0.50	6356.22	29059.50	0.4355	0.7343	0.5645	0.2657	0.4697	0.6530	0.5613	93
Boş Boru	1.04	0.75	2303.98	2612.21	0.0414	0.9954	0.9586	0.0046	0.3428	0.9909	0.6668	3
Boş Boru	2.10	0.75	3777.05	7486.99	0.1846	0.9473	0.8154	0.0527	0.3801	0.9046	0.6424	26
Boş Boru	3.09	0.75	5247.14	14893.34	0.3276	0.8741	0.6724	0.1259	0.4265	0.7989	0.6127	49
Boş Boru	3.73	0.75	5992.33	23974.31	0.4001	0.7845	0.5999	0.2155	0.4546	0.6988	0.5767	78
Boş Boru	4.11	0.75	6515.49	30471.49	0.4510	0.7203	0.5490	0.2797	0.4766	0.6413	0.5590	95
Boş Boru	**1.04**	**1.00**	**2532.44**	**2760.39**	**0.0636**	**0.9939**	**0.9364**	**0.0061**	**0.3481**	**0.9880**	**0.6680**	**1**
Boş Boru	2.10	1.00	4216.66	8618.23	0.2274	0.9361	0.7726	0.0639	0.3929	0.8867	0.6398	29

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

Boş Boru	3.09	1.00	5472.00	16012.69	0.3495	0.8631	0.6505	0.1369	0.4346	0.7850	0.6098	50
Boş Boru	3.73	1.00	6273.31	25761.65	0.4274	0.7668	0.5726	0.2332	0.4662	0.6820	0.5741	81
Boş Boru	4.11	1.00	6855.52	32647.62	0.4841	0.6988	0.5159	0.3012	0.4922	0.6241	0.5581	96
TBL	1.04	0.00	2442.85	3250.63	0.0549	0.9891	0.9451	0.0109	0.3460	0.9786	0.6623	8
TBL	2.10	0.00	4024.27	14257.57	0.2087	0.8804	0.7913	0.1196	0.3872	0.8070	0.5971	58
TBL	3.09	0.00	5051.22	26765.21	0.3086	0.7569	0.6914	0.2431	0.4197	0.6729	0.5463	108
TBL	3.73	0.00	6045.42	41267.42	0.4053	0.6137	0.5947	0.3863	0.4567	0.5642	0.5104	161
TBL	4.11	0.00	6557.27	51078.31	0.4551	0.5168	0.5449	0.4832	0.4785	0.5086	0.4935	184
TBL	1.04	0.25	2890.42	5330.97	0.0984	0.9685	0.9016	0.0315	0.3567	0.9408	0.6488	17
TBL	2.10	0.25	4530.27	20332.95	0.2579	0.8204	0.7421	0.1796	0.4025	0.7357	0.5691	85
TBL	3.09	0.25	5860.92	35914.10	0.3873	0.6666	0.6127	0.3334	0.4494	0.5999	0.5247	138
TBL	3.73	0.25	6854.83	52084.26	0.4840	0.5069	0.5160	0.4931	0.4921	0.5035	0.4978	177
TBL	4.11	0.25	7341.62	61805.46	0.5313	0.4109	0.4687	0.5891	0.5162	0.4591	0.4876	189
TBL	1.04	0.50	3060.17	5827.65	0.1149	0.9636	0.8851	0.0364	0.3610	0.9322	0.6466	21
TBL	2.10	0.50	4786.31	19546.02	0.2828	0.8282	0.7172	0.1718	0.4108	0.7443	0.5775	75
TBL	3.09	0.50	6136.62	31737.03	0.4141	0.7078	0.5859	0.2922	0.4605	0.6312	0.5458	109
TBL	3.73	0.50	7270.42	54594.37	0.5244	0.4821	0.4756	0.5179	0.5125	0.4912	0.5019	174
TBL	4.11	0.50	7846.54	66055.70	0.5805	0.3690	0.4195	0.6310	0.5438	0.4421	0.4929	185
TBL	1.04	0.75	3232.64	5849.57	0.1317	0.9634	0.8683	0.0366	0.3654	0.9318	0.6486	19
TBL	2.10	0.75	5198.49	18810.46	0.3229	0.8355	0.6771	0.1645	0.4248	0.7524	0.5886	61
TBL	3.09	0.75	6581.46	36077.16	0.4574	0.6650	0.5426	0.3350	0.4796	0.5988	0.5392	116
TBL	3.73	0.75	7840.78	56927.12	0.5799	0.4591	0.4201	0.5409	0.5434	0.4804	0.5119	159
TBL	4.11	0.75	8474.97	69848.12	0.6416	0.3315	0.3584	0.6685	0.5825	0.4279	0.5052	170
TBL	1.04	1.00	3465.02	6203.34	0.1543	0.9599	0.8457	0.0401	0.3716	0.9258	0.6487	18
TBL	2.10	1.00	5461.88	17972.64	0.3485	0.8437	0.6515	0.1563	0.4342	0.7619	0.5980	57

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

TBL	3.09	1.00	7013.39	35409.01	0.4994	0.6716	0.5006	0.3284	0.4997	0.6035	0.5516	105
TBL	3.73	1.00	7901.61	56180.53	0.5858	0.4665	0.4142	0.5335	0.5469	0.4838	0.5154	153
TBL	4.11	1.00	8560.93	68707.28	0.6499	0.3428	0.3501	0.6572	0.5882	0.4321	0.5101	162
DBL (P/y=1.00)	1.04	0.00	2654.92	3661.20	0.0755	0.9850	0.9245	0.0150	0.3510	0.9709	0.6610	9
DBL (P/y=1.00)	2.10	0.00	4140.56	17077.41	0.2200	0.8526	0.7800	0.1474	0.3906	0.7723	0.5815	66
DBL (P/y=1.00)	3.09	0.00	5629.68	33172.65	0.3648	0.6936	0.6352	0.3064	0.4405	0.6201	0.5303	124
DBL (P/y=1.00)	3.73	0.00	6636.27	48039.69	0.4627	0.5468	0.5373	0.4532	0.4820	0.5246	0.5033	173
DBL (P/y=1.00)	4.11	0.00	6869.32	59501.05	0.4854	0.4337	0.5146	0.5663	0.4928	0.4689	0.4809	195
DBL (P/y=1.00)	1.04	0.25	2951.74	7965.97	0.1044	0.9425	0.8956	0.0575	0.3583	0.8969	0.6276	39
DBL (P/y=1.00)	2.10	0.25	4526.40	23549.25	0.2575	0.7887	0.7425	0.2113	0.4024	0.7029	0.5527	102
DBL (P/y=1.00)	3.09	0.25	6006.21	41133.16	0.4015	0.6150	0.5985	0.3850	0.4551	0.5650	0.5101	163
DBL (P/y=1.00)	3.73	0.25	7083.53	59826.10	0.5062	0.4305	0.4938	0.5695	0.5031	0.4675	0.4853	192
DBL (P/y=1.00)	4.11	0.25	7531.20	72458.00	0.5498	0.3057	0.4502	0.6943	0.5262	0.4187	0.4724	199
DBL (P/y=1.00)	1.04	0.50	3258.39	8965.60	0.1342	0.9327	0.8658	0.0673	0.3661	0.8813	0.6237	46
DBL (P/y=1.00)	2.10	0.50	5196.54	25034.22	0.3227	0.7740	0.6773	0.2260	0.4247	0.6887	0.5567	98
DBL (P/y=1.00)	3.09	0.50	6599.22	44648.02	0.4591	0.5803	0.5409	0.4197	0.4804	0.5437	0.5120	157
DBL (P/y=1.00)	3.73	0.50	7654.29	63970.46	0.5618	0.3896	0.4382	0.6104	0.5329	0.4503	0.4916	186
DBL (P/y=1.00)	4.11	0.50	8097.74	73329.31	0.6049	0.2971	0.3951	0.7029	0.5586	0.4157	0.4871	190
DBL (P/y=1.00)	1.04	0.75	3641.02	9260.81	0.1714	0.9297	0.8286	0.0703	0.3763	0.8768	0.6266	42
DBL (P/y=1.00)	2.10	0.75	5629.06	26696.12	0.3648	0.7576	0.6352	0.2424	0.4404	0.6735	0.5570	97
DBL (P/y=1.00)	3.09	0.75	7120.49	45027.40	0.5098	0.5766	0.4902	0.4234	0.5050	0.5415	0.5232	140
DBL (P/y=1.00)	3.73	0.75	7822.15	64350.81	0.5781	0.3858	0.4219	0.6142	0.5424	0.4488	0.4956	181
DBL (P/y=1.00)	4.11	0.75	8495.06	74122.63	0.6435	0.2893	0.3565	0.7107	0.5838	0.4130	0.4984	176
DBL (P/y=1.00)	1.04	1.00	3749.62	6758.74	0.1820	0.9544	0.8180	0.0456	0.3794	0.9165	0.6479	20
DBL (P/y=1.00)	2.10	1.00	5842.38	20486.42	0.3855	0.8189	0.6145	0.1811	0.4486	0.7341	0.5914	60

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

DBL (P/y=1.00)	3.09	1.00	7531.12	39095.16	0.5498	0.6352	0.4502	0.3648	0.5262	0.5781	0.5522	104
DBL (P/y=1.00)	3.73	1.00	8453.45	62790.33	0.6395	0.4012	0.3605	0.5988	0.5811	0.4550	0.5180	149
DBL (P/y=1.00)	4.11	1.00	9150.23	76166.92	0.7073	0.2691	0.2927	0.7309	0.6307	0.4062	0.5185	148
DBL (P/y=0.50)	1.04	0.00	2980.82	3899.35	0.1072	0.9827	0.8928	0.0173	0.3590	0.9665	0.6628	7
DBL (P/y=0.50)	2.10	0.00	4744.70	18000.89	0.2788	0.8434	0.7212	0.1566	0.4094	0.7616	0.5855	64
DBL (P/y=0.50)	3.09	0.00	6308.72	31560.85	0.4309	0.7096	0.5691	0.2904	0.4677	0.6326	0.5501	106
DBL (P/y=0.50)	3.73	0.00	7222.57	49096.08	0.5198	0.5364	0.4802	0.4636	0.5101	0.5189	0.5145	155
DBL (P/y=0.50)	4.11	0.00	7743.02	54117.99	0.5704	0.4868	0.4296	0.5132	0.5379	0.4935	0.5157	152
DBL (P/y=0.50)	1.04	0.25	3634.13	6248.46	0.1707	0.9595	0.8293	0.0405	0.3761	0.9250	0.6506	15
DBL (P/y=0.50)	2.10	0.25	5416.35	21168.33	0.3441	0.8122	0.6559	0.1878	0.4326	0.7269	0.5797	68
DBL (P/y=0.50)	3.09	0.25	7006.12	38579.95	0.4987	0.6403	0.5013	0.3597	0.4994	0.5816	0.5405	114
DBL (P/y=0.50)	3.73	0.25	8188.97	57799.78	0.6138	0.4505	0.3862	0.5495	0.5642	0.4764	0.5203	145
DBL (P/y=0.50)	4.11	0.25	8960.33	66622.13	0.6888	0.3634	0.3112	0.6366	0.6164	0.4399	0.5281	128
DBL (P/y=0.50)	1.04	0.50	3711.50	8597.57	0.1783	0.9363	0.8217	0.0637	0.3783	0.8870	0.6326	34
DBL (P/y=0.50)	2.10	0.50	5305.05	24335.78	0.3333	0.7809	0.6667	0.2191	0.4285	0.6953	0.5619	92
DBL (P/y=0.50)	3.09	0.50	6874.01	41599.04	0.4859	0.6104	0.5141	0.3896	0.4930	0.5621	0.5276	131
DBL (P/y=0.50)	3.73	0.50	8395.46	61503.47	0.6339	0.4139	0.3661	0.5861	0.5773	0.4604	0.5188	147
DBL (P/y=0.50)	4.11	0.50	9171.95	69126.26	0.7094	0.3386	0.2906	0.6614	0.6324	0.4305	0.5315	122
DBL (P/y=0.50)	1.04	0.75	4050.03	8895.72	0.2112	0.9333	0.7888	0.0667	0.3880	0.8824	0.6352	31
DBL (P/y=0.50)	2.10	0.75	5973.86	25653.09	0.3983	0.7679	0.6017	0.2321	0.4538	0.6830	0.5684	86
DBL (P/y=0.50)	3.09	0.75	7441.86	45972.25	0.5411	0.5673	0.4589	0.4327	0.5214	0.5361	0.5287	127
DBL (P/y=0.50)	3.73	0.75	8678.42	63964.87	0.6614	0.3896	0.3386	0.6104	0.5962	0.4503	0.5233	139
DBL (P/y=0.50)	4.11	0.75	9411.52	71452.37	0.7327	0.3157	0.2673	0.6843	0.6516	0.4222	0.5369	118
DBL (P/y=0.50)	1.04	1.00	4191.42	7183.50	0.2249	0.9503	0.7751	0.0497	0.3921	0.9095	0.6508	14
DBL (P/y=0.50)	2.10	1.00	6327.59	23102.05	0.4327	0.7931	0.5673	0.2069	0.4685	0.7073	0.5879	62

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

DBL (P/y=0.50)	3.09	1.00	8051.30	42915.93	0.6004	0.5974	0.3996	0.4026	0.5558	0.5540	0.5549	100
DBL (P/y=0.50)	3.73	1.00	8944.58	67938.00	0.6873	0.3504	0.3127	0.6496	0.6152	0.4349	0.5251	136
DBL (P/y=0.50)	4.11	1.00	9547.68	73432.28	0.7459	0.2961	0.2541	0.7039	0.6631	0.4153	0.5392	115
DBL (P/y=0.25)	1.04	0.00	3468.74	5203.38	0.1547	0.9698	0.8453	0.0302	0.3717	0.9430	0.6574	11
DBL (P/y=0.25)	2.10	0.00	5610.45	20456.75	0.3630	0.8192	0.6370	0.1808	0.4397	0.7344	0.5871	63
DBL (P/y=0.25)	3.09	0.00	6661.97	38491.55	0.4652	0.6411	0.5348	0.3589	0.4832	0.5822	0.5327	121
DBL (P/y=0.25)	3.73	0.00	8061.22	62455.92	0.6013	0.4045	0.3987	0.5955	0.5564	0.4564	0.5064	167
DBL (P/y=0.25)	4.11	0.00	8603.81	77879.52	0.6541	0.2522	0.3459	0.7478	0.5911	0.4007	0.4959	180
DBL (P/y=0.25)	1.04	0.25	3829.22	8973.44	0.1897	0.9326	0.8103	0.0674	0.3816	0.8812	0.6314	35
DBL (P/y=0.25)	2.10	0.25	5882.87	24724.42	0.3895	0.7771	0.6105	0.2229	0.4502	0.6916	0.5709	83
DBL (P/y=0.25)	3.09	0.25	7322.87	45659.50	0.5295	0.5703	0.4705	0.4297	0.5152	0.5378	0.5265	134
DBL (P/y=0.25)	3.73	0.25	8669.71	71280.28	0.6605	0.3174	0.3395	0.6826	0.5956	0.4228	0.5092	165
DBL (P/y=0.25)	4.11	0.25	9307.23	80540.86	0.7225	0.2259	0.2775	0.7741	0.6431	0.3924	0.5178	150
DBL (P/y=0.25)	1.04	0.50	4021.16	9824.37	0.2084	0.9242	0.7916	0.0758	0.3871	0.8683	0.6277	38
DBL (P/y=0.25)	2.10	0.50	6060.38	26045.07	0.4067	0.7640	0.5933	0.2360	0.4573	0.6794	0.5684	87
DBL (P/y=0.25)	3.09	0.50	7483.19	46043.20	0.5451	0.5666	0.4549	0.4334	0.5236	0.5357	0.5296	126
DBL (P/y=0.25)	3.73	0.50	8761.11	72934.28	0.6694	0.3010	0.3306	0.6990	0.6020	0.4170	0.5095	164
DBL (P/y=0.25)	4.11	0.50	9534.31	81980.66	0.7446	0.2117	0.2554	0.7883	0.6619	0.3881	0.5250	137
DBL (P/y=0.25)	1.04	0.75	4289.40	7919.96	0.2345	0.9430	0.7655	0.0570	0.3951	0.8976	0.6464	22
DBL (P/y=0.25)	2.10	0.75	6534.57	25704.00	0.4529	0.7674	0.5471	0.2326	0.4775	0.6825	0.5800	67
DBL (P/y=0.25)	3.09	0.75	8081.96	47976.22	0.6034	0.5475	0.3966	0.4525	0.5576	0.5249	0.5413	111
DBL (P/y=0.25)	3.73	0.75	9396.42	77395.04	0.7312	0.2570	0.2688	0.7430	0.6504	0.4023	0.5263	135
DBL (P/y=0.25)	4.11	0.75	9848.74	94791.24	0.7752	0.0852	0.2248	0.9148	0.6899	0.3534	0.5216	144
DBL (P/y=0.25)	1.04	1.00	4479.33	8668.02	0.2529	0.9356	0.7471	0.0644	0.4009	0.8859	0.6434	25
DBL (P/y=0.25)	2.10	1.00	6639.61	27781.94	0.4631	0.7469	0.5369	0.2531	0.4822	0.6639	0.5730	82

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

DBL (P/y=0.25)	3.09	1.00	8388.59	51883.73	0.6332	0.5089	0.3668	0.4911	0.5768	0.5045	0.5407	113
DBL (P/y=0.25)	3.73	1.00	9689.09	82545.55	0.7597	0.2061	0.2403	0.7939	0.6754	0.3864	0.5309	123
DBL (P/y=0.25)	4.11	1.00	10149.24	102090.30	0.8044	0.0132	0.1956	0.9868	0.7188	0.3363	0.5276	130
GBL (P/y=1.00)	1.04	0.00	2611.53	4398.58	0.0713	0.9778	0.9287	0.0222	0.3500	0.9574	0.6537	13
GBL (P/y=1.00)	2.10	0.00	4067.51	19205.88	0.2129	0.8315	0.7871	0.1685	0.3885	0.7480	0.5682	88
GBL (P/y=1.00)	3.09	0.00	5319.55	36477.41	0.3347	0.6610	0.6653	0.3390	0.4291	0.5960	0.5125	156
GBL (P/y=1.00)	3.73	0.00	6368.59	55985.47	0.4367	0.4684	0.5633	0.5316	0.4702	0.4847	0.4775	197
GBL (P/y=1.00)	4.11	0.00	6771.94	68942.87	0.4759	0.3405	0.5241	0.6595	0.4883	0.4312	0.4597	200
GBL (P/y=1.00)	1.04	0.25	3195.43	8744.02	0.1281	0.9348	0.8719	0.0652	0.3644	0.8847	0.6246	44
GBL (P/y=1.00)	2.10	0.25	5008.64	24863.73	0.3044	0.7757	0.6956	0.2243	0.4182	0.6903	0.5543	101
GBL (P/y=1.00)	3.09	0.25	6551.98	45583.12	0.4545	0.5711	0.5455	0.4289	0.4783	0.5383	0.5083	166
GBL (P/y=1.00)	3.73	0.25	7651.07	66532.43	0.5614	0.3643	0.4386	0.6357	0.5327	0.4402	0.4865	191
GBL (P/y=1.00)	4.11	0.25	8066.78	81623.98	0.6019	0.2152	0.3981	0.7848	0.5567	0.3892	0.4729	198
GBL (P/y=1.00)	1.04	0.50	3389.55	9283.55	0.1469	0.9295	0.8531	0.0705	0.3695	0.8765	0.6230	47
GBL (P/y=1.00)	2.10	0.50	5380.06	25015.06	0.3406	0.7742	0.6594	0.2258	0.4312	0.6889	0.5601	94
GBL (P/y=1.00)	3.09	0.50	6811.36	46372.07	0.4798	0.5633	0.5202	0.4367	0.4901	0.5338	0.5119	158
GBL (P/y=1.00)	3.73	0.50	8043.81	67976.96	0.5996	0.3500	0.4004	0.6500	0.5553	0.4348	0.4951	182
GBL (P/y=1.00)	4.11	0.50	8398.02	82391.32	0.6341	0.2077	0.3659	0.7923	0.5774	0.3869	0.4822	194
GBL (P/y=1.00)	1.04	0.75	3792.29	9362.02	0.1861	0.9287	0.8139	0.0713	0.3806	0.8753	0.6279	37
GBL (P/y=1.00)	2.10	0.75	5582.62	26757.58	0.3603	0.7570	0.6397	0.2430	0.4387	0.6729	0.5558	99
GBL (P/y=1.00)	3.09	0.75	7094.46	47654.13	0.5073	0.5507	0.4927	0.4493	0.5037	0.5267	0.5152	154
GBL (P/y=1.00)	3.73	0.75	8216.48	73152.99	0.6164	0.2989	0.3836	0.7011	0.5659	0.4163	0.4911	187
GBL (P/y=1.00)	4.11	0.75	8634.68	89068.03	0.6571	0.1417	0.3429	0.8583	0.5932	0.3681	0.4807	196
GBL (P/y=1.00)	1.04	1.00	3909.67	7580.38	0.1975	0.9463	0.8025	0.0537	0.3839	0.9031	0.6435	24
GBL (P/y=1.00)	2.10	1.00	6030.91	24388.97	0.4039	0.7804	0.5961	0.2196	0.4561	0.6948	0.5755	80

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

GBL (P/y=1.00)	3.09	1.00	7714.57	45452.54	0.5676	0.5724	0.4324	0.4276	0.5363	0.5390	0.5376	117
GBL (P/y=1.00)	3.73	1.00	8800.89	72679.63	0.6733	0.3036	0.3267	0.6964	0.6048	0.4179	0.5114	160
GBL (P/y=1.00)	4.11	1.00	9300.86	89558.59	0.7219	0.1369	0.2781	0.8631	0.6426	0.3668	0.5047	171
GBL (P/y=0.50)	1.04	0.00	3278.16	5110.03	0.1361	0.9707	0.8639	0.0293	0.3666	0.9447	0.6556	12
GBL (P/y=0.50)	2.10	0.00	4892.24	19035.81	0.2931	0.8332	0.7069	0.1668	0.4143	0.7499	0.5821	65
GBL (P/y=0.50)	3.09	0.00	6345.30	38057.63	0.4344	0.6454	0.5656	0.3546	0.4692	0.5851	0.5272	132
GBL (P/y=0.50)	3.73	0.00	7473.71	60155.01	0.5442	0.4272	0.4558	0.5728	0.5231	0.4661	0.4946	183
GBL (P/y=0.50)	4.11	0.00	8122.23	75848.60	0.6073	0.2723	0.3927	0.7277	0.5601	0.4073	0.4837	193
GBL (P/y=0.50)	1.04	0.25	3644.09	9276.27	0.1717	0.9296	0.8283	0.0704	0.3764	0.8766	0.6265	43
GBL (P/y=0.50)	2.10	0.25	5810.73	23035.18	0.3824	0.7937	0.6176	0.2063	0.4474	0.7080	0.5777	74
GBL (P/y=0.50)	3.09	0.25	7095.90	45006.10	0.5074	0.5768	0.4926	0.4232	0.5038	0.5416	0.5227	141
GBL (P/y=0.50)	3.73	0.25	8397.88	70880.41	0.6341	0.3213	0.3659	0.6787	0.5774	0.4242	0.5008	175
GBL (P/y=0.50)	4.11	0.25	8819.00	86956.02	0.6750	0.1626	0.3250	0.8374	0.6061	0.3739	0.4900	188
GBL (P/y=0.50)	1.04	0.50	3775.71	9501.36	0.1845	0.9274	0.8155	0.0726	0.3801	0.8732	0.6266	40
GBL (P/y=0.50)	2.10	0.50	5960.08	26046.45	0.3970	0.7640	0.6030	0.2360	0.4533	0.6794	0.5663	89
GBL (P/y=0.50)	3.09	0.50	7249.48	47351.72	0.5224	0.5536	0.4776	0.4464	0.5115	0.5283	0.5199	146
GBL (P/y=0.50)	3.73	0.50	8556.38	71013.80	0.6495	0.3200	0.3505	0.6800	0.5879	0.4237	0.5058	169
GBL (P/y=0.50)	4.11	0.50	9078.31	89172.84	0.7003	0.1407	0.2997	0.8593	0.6252	0.3678	0.4965	179
GBL (P/y=0.50)	1.04	0.75	3880.44	7906.58	0.1947	0.9431	0.8053	0.0569	0.3831	0.8979	0.6405	28
GBL (P/y=0.50)	2.10	0.75	6086.78	24243.61	0.4093	0.7818	0.5907	0.2182	0.4584	0.6962	0.5773	76
GBL (P/y=0.50)	3.09	0.75	7640.38	45731.03	0.5604	0.5696	0.4396	0.4304	0.5321	0.5374	0.5348	119
GBL (P/y=0.50)	3.73	0.75	8984.71	73650.68	0.6912	0.2940	0.3088	0.7060	0.6182	0.4146	0.5164	151
GBL (P/y=0.50)	4.11	0.75	9390.05	91420.49	0.7306	0.1185	0.2694	0.8815	0.6499	0.3619	0.5059	168
GBL (P/y=0.50)	1.04	1.00	4071.40	8202.78	0.2133	0.9402	0.7867	0.0598	0.3886	0.8932	0.6409	27
GBL (P/y=0.50)	2.10	1.00	6408.76	25598.02	0.4406	0.7684	0.5594	0.2316	0.4720	0.6835	0.5777	73

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

GBL (P/y=0.50)	3.09	1.00	8143.45	47926.58	0.6093	0.5480	0.3907	0.4520	0.5614	0.5252	0.5433	110
GBL (P/y=0.50)	3.73	1.00	9559.17	76561.05	0.7470	0.2652	0.2530	0.7348	0.6640	0.4049	0.5345	120
GBL (P/y=0.50)	4.11	1.00	9996.40	95417.32	0.7896	0.0791	0.2104	0.9209	0.7038	0.3519	0.5278	129
GBL (P/y=0.25)	1.04	0.00	3919.44	5759.00	0.1985	0.9643	0.8015	0.0357	0.3842	0.9334	0.6588	10
GBL (P/y=0.25)	2.10	0.00	5877.31	23034.09	0.3889	0.7937	0.6111	0.2063	0.4500	0.7080	0.5790	69
GBL (P/y=0.25)	3.09	0.00	6906.24	43764.02	0.4890	0.5891	0.5110	0.4109	0.4946	0.5489	0.5217	143
GBL (P/y=0.25)	3.73	0.00	8263.01	67125.86	0.6210	0.3584	0.3790	0.6416	0.5688	0.4380	0.5034	172
GBL (P/y=0.25)	4.11	0.00	8994.89	86595.11	0.6922	0.1662	0.3078	0.8338	0.6189	0.3749	0.4969	178
GBL (P/y=0.25)	1.04	0.25	4250.46	10016.21	0.2307	0.9223	0.7693	0.0777	0.3939	0.8655	0.6297	36
GBL (P/y=0.25)	2.10	0.25	6429.52	25692.96	0.4426	0.7675	0.5574	0.2325	0.4729	0.6826	0.5777	72
GBL (P/y=0.25)	3.09	0.25	7833.31	49441.71	0.5792	0.5330	0.4208	0.4670	0.5430	0.5171	0.5300	125
GBL (P/y=0.25)	3.73	0.25	9216.26	75214.96	0.7137	0.2785	0.2863	0.7215	0.6359	0.4093	0.5226	142
GBL (P/y=0.25)	4.11	0.25	9863.51	91158.24	0.7766	0.1211	0.2234	0.8789	0.6912	0.3626	0.5269	133
GBL (P/y=0.25)	1.04	0.50	4476.52	11269.46	0.2527	0.9099	0.7473	0.0901	0.4009	0.8473	0.6241	45
GBL (P/y=0.25)	2.10	0.50	6883.93	27723.60	0.4868	0.7474	0.5132	0.2526	0.4935	0.6644	0.5790	70
GBL (P/y=0.25)	3.09	0.50	8401.95	52036.75	0.6345	0.5074	0.3655	0.4926	0.5777	0.5037	0.5407	112
GBL (P/y=0.25)	3.73	0.50	9925.15	78020.21	0.7826	0.2508	0.2174	0.7492	0.6970	0.4003	0.5486	107
GBL (P/y=0.25)	4.11	0.50	10422.17	93316.60	0.8310	0.0998	0.1690	0.9002	0.7474	0.3571	0.5522	103
GBL (P/y=0.25)	1.04	0.75	4992.79	12115.02	0.3029	0.9016	0.6971	0.0984	0.4177	0.8355	0.6266	41
GBL (P/y=0.25)	2.10	0.75	7671.83	28463.35	0.5635	0.7401	0.4365	0.2599	0.5339	0.6580	0.5960	59
GBL (P/y=0.25)	3.09	0.75	9473.88	53003.89	0.7387	0.4978	0.2613	0.5022	0.6568	0.4989	0.5779	71
GBL (P/y=0.25)	3.73	0.75	11064.53	80093.66	0.8935	0.2304	0.1065	0.7696	0.8243	0.3938	0.6091	51
GBL (P/y=0.25)	4.11	0.75	11544.87	100130.36	0.9402	0.0325	0.0598	0.9675	0.8931	0.3407	0.6169	48
GBL (P/y=0.25)	1.04	1.00	5115.25	9111.35	0.3148	0.9312	0.6852	0.0688	0.4219	0.8791	0.6505	16
GBL (P/y=0.25)	2.10	1.00	7948.74	27478.27	0.5904	0.7499	0.4096	0.2501	0.5497	0.6665	0.6081	52

EK-2. Su:EG baz akışkanlı çalışmaların çok amaçlı optimizasyon sonuçları **devamı**

GBL (P/y=0.25)	3.09	1.00	9945.17	51846.96	0.7846	0.5093	0.2154	0.4907	0.6989	0.5047	0.6018	54
GBL (P/y=0.25)	3.73	1.00	11642.03	83401.13	0.9496	0.1977	0.0504	0.8023	0.9085	0.3839	0.6462	23
GBL (P/y=0.25)	4.11	1.00	12159.86	103423.47	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6667	4

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Toygun DAĞDEVİR
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri: 04.08.1988 - Ankara
Medeni Durum: Evli
e-mail: toygun@erciyes.ed.tr
Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Melikgazi, Kayseri, 38039.

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2015
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2012
Lise	Tuzluçayır Lisesi, Ankara	2006

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2015-Halen	Erciyes Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2013-2014	Bayburt Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

SCI, E-SCI INDEKSLERINE GIREN DERGILERDE YAYIMLANAN MAKALELER

1. Akansu, S. O., Akansu, Y. E., Dağdevir, T., Daldaban, F., Yavas, F. (2015). Experimental and numerical aerodynamic investigation of a prototype vehicle, *Wind and Structures*, 20(1), ss 811-827.

2. Keklikcioğlu, O., Dağdevir, T., Özceyhan, V. (2016). A Cfd Based Thermo-Hydraulic Performance Analysis in a Tube Fitted With Stepped Conical Nozzle Turbulators, *International Journal of Thermal Engineering*, 2(1), ss 913-920.

3. Akansu, S. O., Dağdevir, T., Kahraman, N. ,(2017). Numerical Investigation of The Effect of Blade Airfoils on a Vertical Axis Wind Turbine, *Isı Bilimıı ve Tekniği Dergisi-Journal Of Thermal Science And Technology*, 37(1), ss 115-125.

4. Dağdevir, T., Keklikcioğlu, O., Özceyhan, V. (2019). The Effect of Chamfer Length on Thermal And Hydraulic Performance By Using Al2O3-Water Nanofluid Through A Square Cross-Sectional Duct, *Heat Geçiş Research*, 50(1), ss 1183-1204.

5. Dağdevir, T., Keklikcioğlu, O., Özceyhan, V. (2019). Heat geçiş performance and flow characteristic in enhanced tube with the trapezoidal dimples, *Iinternational Communications In Heat And Mass Geçiş*, 108(1), 104299.

6. Keklikcioğlu, O., Dağdevir, T., Özceyhan, V. (2019). Heat geçiş and pressure drop investigation of graphene nanoplatelet-water and titanium dioxide-water nanofluids in a horizontal tube, *Applied Thermal Engineering*, 162(1), ss 114256.

7. Keklikcioğlu, O., Dağdevir, T., Özceyhan, V. (2020). Second law analysis of a mixture of ethylene glycol/water flow in modified heat exchanger tube by passive heat geçiş enhancement technique, *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 140(1), ss 1307-1320.

DİĞER DERGİLERDE YAYIMLANAN MAKALELER

1. Dağdevir, T., Keklikcioğlu, O., Özceyhan, V. (2016). Numerical Investigation to Enhance Heat Geçiş in a Circular Tube with Nozzles Formed Sinusoidal Geometry, *International Journal of Scientific and Technological Research*, 2(1), ss 1-15.
2. Güneş, S., Özceyhan, V., Dağdevir, T., Keklikcioğlu, O., (2017). Numerical Investigation of Heat Geçiş Enhancement in a Tube with Hexagonal Cross Sectioned Coiled Wire, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(1) ss 96-100.
3. Dağdevir, T., Keklikcioğlu, O., Özceyhan, V., Güneş, S., (2019). Numerical Investigation on Heat Enhancement Method with Using Circular Dimpled Tube, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi (MAKUUBD), 3*(1), ss 19-31.
4. Dağdevir, T., Keklikcioğlu, O., Özceyhan, V. (2019). Numerical Investigation of the Effect of Twisted Tape in a Tube Using Water-TiO_2 Nanofluid on Heat Geçiş Enhancement, *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3(1), ss 65-73.