

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BORULARDA DÖNEN AKIŞTA YÜKSEK VİSKOZİTELİ NANOAKIŞKANIN
ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Furkan Erman KAN

MART 2024
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BORULARDA DÖNEN AKIŞTA YÜKSEK VİSKOZİTELİ NANOAKIŞKANIN
ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Furkan Erman KAN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (ANABİLİM DALI ADI)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 02 / 2024
Tezin Savunma Tarihi : 27 / 03 / 2024**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Borularda Dönen Akışta Yüksek Viskoziteli Nanoakışkanın Isı Transferine Etkisinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI’ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU’ na ve Sayın Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK’ e eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Arş. Gör. Mehmet SAĞLAM’ a teşekkür ederim.

Bu çalışmada kullanılan donanımın büyük bir kısmını 9981 numaralı BAP 01 Temel Araştırma Projesi ile sağlayan Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne teşekkür ederim. Ayrıca tez kapsamında yapılan ölçüm işlemlerinde destek sağlayan Doç. Dr. Burak BARUT’ a ve KTÜ Eczacılık Fakültesi çalışanlarına, nanoakışkan hazırlama ve sentezleme işlemlerinde desteklerini sağlayan, BAP projemizde araştırmacı olarak görev alan Prof. Dr. Lütfü NAMLI ve Arş. Gör. Dr. Fevzi ŞAHİN’ e ve Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Öte yandan, hayatımın her safhasında her koşulda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşime ve aileme tüm kalbi duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Doktora tezimi Baturalp Furkan KAN ve Konuralp KAN beylere ithaf ediyorum.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Furkan Erman KAN

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum“Borularda Dönen Akışta Yüksek Viskoziteli Nanoakışkanın Isı Transferine Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 27/03/2024

Furkan Erman KAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Nanoakışkanlar ve Uygulama Alanları.....	2
1.3. Isı Transferinin İyileştirilmesi.....	3
1.4. Literatür Özeti.....	4
1.4.1. Teorik Çalışmalar.....	5
1.4.2. Sayısal Çalışmalar.....	6
1.4.3. Deneysel Çalışmalar.....	8
1.4.4. Temel İncelemeler.....	16
1.4.5. Çeşitli Mühendislik Sistemlerindeki Uygulamalar.....	17
1.4.6. Boru İçerisinde Akışın Döndürülmesi.....	20
1.5. Tezin Amaç Kapsam ve Önemi.....	23
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Deneysel Çalışma.....	24
2.1.1. Nanoakışkan Hazırlama ve Termofiziksel Özelliklere ait Deneyler.....	26
2.1.2. Deney Düzenekli ve Parametreler.....	31
2.1.3. Baz Akışkanlı Deneyler.....	38
2.1.4. Nanoakışkan Deneyleri.....	39
2.1.5. Belirsizlik Analizi.....	41
2.2. Sayısal Çalışma.....	42
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	50
3.1. Baz Akışkanlı Sayısal Çalışma Bulguları.....	50
3.2. Baz Akışkanlı Deneysel Çalışma Bulguları.....	67

3.3. Nanoakışkanlı Deneysel Çalışma Bulguları.....	82
3.4. Nanoakışkanlı Sayısal Çalışma Bulguları	95
3.5. Performans Değerlendirme Bulguları	103
3.5.1. Baz Akışkanlı Sayısal Çalışma İçin <i>PDK</i> Bulguları	104
3.5.2. Nanoakışkanlı Sayısal Çalışma İçin <i>PDK</i> Bulguları.....	110
3.5.3. Deneysel <i>PDK</i> Bulguları.....	128
4. SONUÇLAR.....	137
5. ÖNERİLER.....	139
6. KAYNAKLAR	140
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

BORULARDA DÖNEN AKIŞTA YÜKSEK VİSKOZİTELİ NANOAKIŞKANIN ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Furkan Erman KAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI
2024, 172 Sayfa

Isı taşınım problemleri ile ilgili araştırmalar, ısı taşınım katsayısının belirlenmesi ve artırılması amacıyla yapılmaktadır ve bunların ısı transferi katsayısının artırılması amacına yönelik olanları ısı transferini iyileştirme olarak bilinmektedir. Bilinen klasik iyileştirme teknikleri üzerindeki çalışmalar on yıllar önce başlamış ve halen devam etmektedir. Akışkana nanoparçacık ilavesi ile ısı transferinin iyileştirilmesi daha yakın geçmişte başlamış ve yeni bir teknik olarak kabul edilmiştir. Bu tez, söz konusu olan bu iki tekniğin birlikte ele alındığı çalışmadır. Akışın döndürülmesi ve yağ akışkana Al_2O_3 parçacığı ilavesi sırasıyla klasik teknik ve nanoakışkanlaştırma olarak uygulanan işlemlerdir. Çalışmanın özgünlüğü, klasik bir iyileştirme tekniği ile nanoparçacık ilavesi uygulamasının üstünlüklerinden yararlanılmasıdır. Çalışma sayısal ve deneysel olarak yürütüldü ve sayısal çalışmada boru içerisinde dönmeli akış ve ısı transferi problemi ANSYS FLUENT yazılımı ile çözüldü. Çalışma kapsamında bazı geometrik büyüklükler, hidrodinamik değişkenler ve fiziksel özellikler parametre olarak seçildi. Çalışma bulguları, ısı transferindeki iyileşme ve basınç kaybındaki artışın akış döndürücü elamanın kanatçık geometrisine ve parçacık kütle oranına bağlı olduğunu göstermektedir. En uygun performans 4 kanatçıklı durumda, $l^* = 0,75r_0$ kanatçık boyu, 90° burulma açısında, sayısal olarak $Re = 800$, $Pr = 400$ ve deneysel olarak ise $Pe = 10^5$) değerlerinde olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Isı transferi iyileştirme, Yüksek viskoziteli akışkan, Nanoparçacık

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HIGH VISCOUS NANOFLUID ON HEAT TRANSFER IN SWIRLING FLOW IN PIPES

Furkan Erman KAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Statistics and Computer Sciences Graduate Program
Supervisor: Prof. Mehmet Emin ARICI
2024, 172 Pages

Heat convection problem related researches aim to determine and to increase heat convection coefficient, and the heat convection coefficient increment studies are known as the heat transfer enhancement. Works on the known classical enhancement techniques has been initiated before decades and are still on the way. Heat transfer enhancement by means of nanoparticles addition is started relatively in near past and accepted as a new technique. Subject of this thesis is these two techniques under the consideration. Fluid swirling and Al_2O_3 particle addition to the oil are the classical technique and nanofludization, respectively. Originality of the work is to use the advantage of a classical enhancement technique and to apply the nanoparticle addition. The work was performed in both numerically and experimentally, and the swirling flow and heat transfer problem were solved by ANSYS FLUENT software. Some geometrical quantities, hydrodynamic variables and the physical properties were taken as parameters under the context of the work. Findings of the work show that enhancement in heat transfers and increment in pressure loss depend on the fin angle of the swirl device and the mass fraction of the particles. The best performance was obtained for the case of 4 fins with the length $l^* = 0,75r_0$ and swirl angle of 90° at $Re = 800$, $Pr = 400$ for the numerical prediction and at $Pe = 10^5$ for the experimental investigation.

Key Words: Heat transfer enhancement, High viscous fluid, Nanoparticle

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Nanoakışkan hazırlama aşamaları	3
Şekil 2. Nanoakışkan sentezlemesi; ön sentezleme sonucu çökeltme testleri	27
Şekil 3. Sentezlemede kullanılan; (a) nanoparçacık ve (b) hassas terazi.....	27
Şekil 4. Manyetik ve Ultrasonik karıştırıcı görüntüleri	27
Şekil 5. Nanoparçacıkların SEM görüntüleri; (a) 50x ve (b)2x	28
Şekil 6. Isı iletim katsayısı ve özgül ısı ölçüm cihazları.....	29
Şekil 7. Kinematik viskozitenin belirlenmesi ölçüm aleti	29
Şekil 8. Isı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi.....	30
Şekil 9. Özgül Isının sıcaklıkla değişimi	30
Şekil 10. Kinematik Viskozitenin sıcaklıkla değişimi	31
Şekil 11. Deney düzeneğinin şematik resmi	32
Şekil 12. Deney düzeneği	33
Şekil 13. Test bölgesi ısıtıcı kabloları.....	34
Şekil 14. Sıcaklık ve basınç ölçüm sistemi ve ölçüm noktaları	34
Şekil 15. Akış döndürücü elemanlar, 4 kanat $l^* = 0,75r_0$, a) 0° b) 30° c) 60° d) 90° burulma açısı.....	35
Şekil 16. a) Karışım odası, b) düzenekteki yeri	35
Şekil 17. Tank bölgesi ve dönüş hattı	36
Şekil 18. Düzenek giriş bölgesindeki kontrol elemanları	37
Şekil 19. Akış döndürücü, a) $l = 0$ b) $l = 0,75 / 2$ kanat c) $l = 0,75 / 4$ kanat d) $l = 0,75 / 4$ kanat 30° burulma açısı	44
Şekil 20. Sayısal çözümleme için boru-döndürücü eleman birleşik görüntüsü	44
Şekil 21. ANSYS Fluent'te modellenen kanatçıklı durum görseli	46
Şekil 22. ANSYS Fluent'te modellenen kanatçıklı durum görseli	47
Şekil 23. Yönlendirici elemanın ağ yapısının farklı açılardan görüntüleri.....	47
Şekil 24. Sayısal programın ağ bağımsız çalışma sonuçları	51
Şekil 25. Sayısal programın (a) Sürtünme katsayısını ve (b) Nu sayısını sağlama çalışması	51
Şekil 26. Sayısal çalışma için sıcaklık ve hız konumlarının gösterimi.....	52
Şekil 27. Deneysel çalışmada sıcaklık ölçüm konumlarının gösterimi	52
Şekil 28. Boru giriş bölgesi için sıcaklık dağılımı (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $Re = 800$ / $Pr = 100$).....	53

Şekil 29.	Boru boyunca sıcaklık dağılımı (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 30^\circ / Re = 200 / Pr = 100$)	53
Şekil 30.	Boru boyunca sıcaklık dağılımı (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 30^\circ / Re = 800 / Pr = 100$)	54
Şekil 31.	Boru boyunca sıcaklık dağılımı (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Re = 200 / Pr = 100$)	54
Şekil 32.	Boru boyunca sıcaklık dağılımı (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Re = 800 / Pr = 100$)	55
Şekil 33.	Boru giriş gölgesindeki hız vektörleri 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ (a) $\alpha = 30^\circ / Re = 200 / Pr = 100$ (b) $\alpha = 30^\circ / Re = 800 / Pr = 100$ (c) $\alpha = 90^\circ / Re = 200 / Pr = 100$ (d) $\alpha = 90^\circ / Re = 800 / Pr = 100$	56
Şekil 34.	Sıcaklık dağılımları 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Re = 800 / Pr = 400$ (a) 1. konum (b) 2. konum (c) 3. konum (d) 4. Konum (e) 5. konum (f) 6. konum	57
Şekil 35.	Sıcaklık dağılımları 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Re = 800 / Pr = 400$ (a) 7. konum (b) 8. konum (c) 9. konum (d) 10. Konum (e) 11. konum (f) 12. konum	58
Şekil 36.	Hız dağılımları 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Re = 800 / Pr = 400$ (a) 1. konum (b) 2. konum (c) 3. konum (d) 4. Konum (e) 5. konum (f) 6. konum	59
Şekil 37.	Hız dağılımları 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Re = 800 / Pr = 400$ (a) 7. konum (b) 8. konum (c) 9. konum (d) 10. Konum (e) 11. konum (f) 12. konum	60
Şekil 38.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $Pr = 10$).....	61
Şekil 39.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $Pr = 100$).....	62
Şekil 40.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $Pr = 200$).....	62
Şekil 41.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $Pr = 400$).....	63
Şekil 42.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $Pr = 10$).....	63
Şekil 43.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $Pr = 100$).....	64
Şekil 44.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $Pr = 200$).....	64
Şekil 45.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $Pr = 400$).....	65
Şekil 46.	Sürtünme faktörünün kanatçık burulma açısı ile değişimi (2 kanatçık)	66
Şekil 47.	Sürtünme faktörünün kanatçık burulma açısı ile değişimi (4 kanatçık)	66
Şekil 48.	Yerel Nu sayısının ilave elemansız durumdaki sonuçları.....	67
Şekil 49.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Pe = 48446$).....	68
Şekil 50.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Pe = 80138$).....	68

Şekil 51.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Pe = 136153$).....	69
Şekil 52.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 0^\circ$)	70
Şekil 53.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 30^\circ$)	71
Şekil 54.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 60^\circ$)	71
Şekil 55.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ$)	72
Şekil 56.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 0^\circ$)	72
Şekil 57.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 30^\circ$)	73
Şekil 58.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 60^\circ$)	73
Şekil 59.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ$)	74
Şekil 60.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 0^\circ$)	74
Şekil 61.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 30^\circ$)	75
Şekil 62.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 60^\circ$)	75
Şekil 63.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ$)	76
Şekil 64.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 0^\circ$)	76
Şekil 65.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 30^\circ$)	77
Şekil 66.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 60^\circ$)	77
Şekil 67.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ$)	78
Şekil 68.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$).....	79
Şekil 69.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$).....	80
Şekil 70.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$).....	80
Şekil 71.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$).....	81
Şekil 72.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 1$).....	82

Şekil 73.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 1$).....	83
Şekil 74.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 1$).....	83
Şekil 75.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 1$).....	84
Şekil 76.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 2$).....	84
Şekil 77.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 2$).....	85
Şekil 78.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 2$).....	85
Şekil 79.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 2$).....	86
Şekil 80.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 3$).....	86
Şekil 81.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 3$).....	87
Şekil 82.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 3$).....	87
Şekil 83.	Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 3$).....	88
Şekil 84.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 1 / l^* = 0,25r_0$).....	89
Şekil 85.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 1 / l^* = 0,75r_0$).....	90
Şekil 86.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 1 / l^* = 0,25r_0$).....	90
Şekil 87.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 1 / l^* = 0,75r_0$).....	91
Şekil 88.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 2 / l^* = 0,25r_0$).....	91
Şekil 89.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 2 / l^* = 0,75r_0$).....	92
Şekil 90.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 2 / l^* = 0,25r_0$).....	92
Şekil 91.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 2 / l^* = 0,75r_0$).....	93
Şekil 92.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 3 / l^* = 0,25r_0$).....	93

Şekil 93.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 3 / l^* = 0,75r_0$)	94
Şekil 94.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 3 / l^* = 0,25r_0$)	94
Şekil 95.	Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 3 / l^* = 0,75r_0$)	95
Şekil 96.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \%1$)	96
Şekil 97.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \%2$)	96
Şekil 98.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \%3$)	97
Şekil 99.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%1$)	97
Şekil 100.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%2$)	98
Şekil 101.	Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%3$)	98
Şekil 102.	Sürtünme faktörünün kanatçık burulma açısıyla değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \%1$)	99
Şekil 103.	Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 2$)	100
Şekil 104.	Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \%3$)	100
Şekil 105.	Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%1$)	101
Şekil 106.	Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%2$)	101
Şekil 107.	Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%3$)	102
Şekil 108.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$)	104
Şekil 109.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$)	105
Şekil 110.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$)	106
Şekil 111.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$)	107
Şekil 112.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$	108
Şekil 113.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$	109
Şekil 114.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \Phi = \% 1$)	110
Şekil 115.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \Phi = \% 2$)	111
Şekil 116.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \Phi = \% 3$)	112
Şekil 117.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \Phi = \% 1$)	113
Şekil 118.	PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \Phi = \% 2$)	114

Şekil 119. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\Phi = \% 3$)	115
Şekil 120. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\Phi = \% 1$)	116
Şekil 121. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\Phi = \% 2$)	117
Şekil 122. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\Phi = \% 3$)	118
Şekil 123. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\Phi = \% 1$)	119
Şekil 124. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\Phi = \% 2$)	120
Şekil 125. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\Phi = \% 3$)	121
Şekil 126. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık / $\Phi = \% 1$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$	122
Şekil 127. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık / $\Phi = \% 2$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$	123
Şekil 128. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık / $\Phi = \% 3$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$	124
Şekil 129. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi 4 kanatçık / $\Phi = \% 1$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$	125
Şekil 130. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi 4 kanatçık / $\Phi = \% 2$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$	126
Şekil 131. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi 4 kanatçık / $\Phi = \% 3$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$	127
Şekil 132. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 0^\circ$)	128
Şekil 133. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 30^\circ$)	129
Şekil 134. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 60^\circ$)	129
Şekil 135. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$)	130
Şekil 136. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75 r_0$ / $\alpha = 0^\circ$)	130
Şekil 137. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75 r_0$ / $\alpha = 30^\circ$)	131
Şekil 138. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 60^\circ$)	131
Şekil 139. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$)	132
Şekil 140. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 0^\circ$)	132
Şekil 141. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 30^\circ$)	133
Şekil 142. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 60^\circ$)	133
Şekil 143. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$)	134
Şekil 144. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 0^\circ$)	134
Şekil 145. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 30^\circ$)	135
Şekil 146. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 60^\circ$)	135
Şekil 147. PDK' 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$)	136

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Düzenek doğrulama çalışmaları özeti.....	25
Tablo 2. Baz akışkan deney parametreleri	38
Tablo 3. Nanoakışkanlı çalışma durumlarının özeti	39
Tablo 4. Ölçüm cihazlarının belirsizlikleri	42
Tablo 5. Sayısal çalışma durumlarının özeti.....	48
Tablo 6. Revize sayısal çalışma durumlarının özeti	49



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Pr	: Prandtl sayısı
Pe	: Peclet sayısı
Re	: Reynolds sayısı
Nu	: Nusselt sayısı
Nu_x	: Yerel Nusselt Sayısı
PDK	: Performans Değerlendirme Kriteri
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_d	: Duvar sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_a	: Akışkan sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_m	: Bulk (Yığın) sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_g	: Giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{\dot{c}}$	: Çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
ΔT	: Sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
k	: Isı iletim katsayısı (W/mK)
k_{nf}	: Nanoakışkan ısı iletim katsayısı (W/mK)
k_f	: Baz akışkan ısı iletim katsayısı (W/mK)
k_p	: Nanoparçacık ısı iletim katsayısı (W/mK)
μ	: Dinamik viskozite (kg/ms)
μ_{nf}	: Nanoakışkan dinamik viskozite (kg/ms)
μ_f	: Baz akışkan dinamik viskozite (kg/ms)
μ_p	: Nanoparçacık dinamik viskozite (kg/ms)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
ρ_{nf}	: Nanoakışkan yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_f	: Baz akışkan yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_p	: Nanoparçacık yoğunluğu (kg/m^3)
C_p	: Özgül ısı (J/kgK)
$C_{p_{nf}}$	: Nanoakışkan özgül ısısı (J/kgK)
C_{p_f}	: Baz akışkan özgül ısısı (J/kgK)
C_{p_p}	: Nanoparçacık özgül ısısı (J/kgK)
A	: Alan (m^2)

A_y	: Yüzey alanı (m^2)
q''	: Isı akısı (W/m^2)
q_e''	: Elektrikli ısıtıcının ısı akısı (W/m^2)
q_{ke}''	: Kayıp ısı akısı (W/m^2)
α	: Kanatçık burulma açısı
Φ	: Nanoparçacık kütle oranı
f	: Sürtünme faktörü
f_0	: İlk durumdaki sürtünme faktörü (boş boru)
P	: Basınç (Pa)
ΔP	: Basınç farkı (Pa)
W_p	: Pompalama gücü (W)
L	: Yükseklik (mm)
v	: Radyal doğrultudaki hız bileşeni (m/s)
u	: Eksenel doğrultudaki hız bileşeni (m/s)
w	: Açısal doğrultudaki hız bileşeni (m/s)
$\dot{m}$	: Kütleli debi (kg/s)
l^*	: Kanatçık yüksekliği (mm)
r	: Radyal koordinat
r_0	: Yarıçap (mm)
z	: Eksenel koordinat
$\dot{V}$	: Hacim (m^3)
h	: Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
$\bar{h}$	: Ortalama ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Isı taşınım problemleri ile ilgili araştırmalar çoğunlukla ısı taşınım katsayısını belirlemek için yapılır. Bu çalışmaların ısı taşınım katsayısının artırılması amacına yönelik olanları ısı transferini iyileştirme olarak bilinir. Klasik iyileştirme teknikleri üzerindeki çalışmalar on yıllar önce başlamış ve halen devam etmektedir. Diğer taraftan, akışkana nanoparçacık ilavesi ile ısı transferinin iyileştirilmesi daha yakın geçmişte başlamış ve yeni bir teknik olarak kabul edilmiştir. Konu ile ilgili yüksek performanslı sistem arayışları iyileştirme teknikleri çeşitliliğini artırmıştır. Bu arayışlar daha çok sistem performansını düşüren etkenlerin azaltılmasına yöneliktir. Düşük sistem performansının başlıca nedenleri, klasik tekniklerde basınç kaybı ve nanoparçacık ilavesi uygulamalarında parçacık çökmesidir. Isı taşınım katsayısının düşük değerler aldığı durumlarda ısı transferinin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulur. Genel olarak laminar akışlarda, özelde ise gazların ve düşük ısıl iletkenliğe sahip yüksek viskoziteli yağların akışında etkili sonuç alabilmek için birden çok iyileştirme tekniğinin birlikte kullanılması gereksinimi artar. Ancak bu şekilde karma teknik kullanılması durumunda, eşleştirilecek tekniklerin sistem performansı üzerindeki birleşik etkisinin dikkate alınması gerekir. Akışın periyodik aralıklarla engellenmesi ve akışın yönlendirilmesi gibi daha çok geometrik düzenlemelere dayalı klasik tekniklerin uygulanması ile de ısı transferinde iyileşme sağlanabilmektedir. Bu tekniklerde harici güç kullanmaya ihtiyaç yoktur. Bir diğer klasik iyileştirme tekniği de dairesel kesitli borularda uygulanabilen dönmeli akış oluşturmaktır. Dönmeli akış koşulları, boru içerisine bükülmüş bant veya girişe akış yönlendirici eleman yerleştirerek sağlanabilmektedir. Yönlendirici elemanınlar bükülmüş bant uygulamasına kıyasla hem basınç kaybı hem de nanoparçacık ilaveli akışkan kullanılması durumunda çökme açısından daha avantajlıdır.

Bu tez kapsamında, klasik bir teknikle nanoparçacık ilave edilmiş akışkan uygulaması birlikte ele alınmıştır. Akışın döndürülmesi ve yağ akışkana (bilinen adıyla Heat Transfer Oil S2/3) Al_2O_3 (8 nm boyutunda ve %99 saflıkta) nanoparçacığı ilavesi sırasıyla klasik teknik ve nanoakışkanlaştırma olarak uygulanan işlemlerdir. Viskozitenin nanoparçacıkların akışkan içerisinde tutunma süresini ve dağılım düzgünlüğünü etkileyen

önemli bir faktör olduğu ve böylece nanoparçacığın yüksek viskoziteli akışkan içerisindeki tutunma süresinin görece uzun olduğu rapor edilmektedir Bashirnezhad vd. (2016). Böylece, yüksek viskoziteli yağın nanoparçacığı uzun süre tutabilme özelliğinden yararlanma söz konusu olabilmektedir. Diğer taraftan yüzey pürüzlendirme ve sınır tabakanın periyodik engellerle yenilenmesi gibi ısı transferinin iyileştirilmesi için kullanılan pasif tekniklerin nanoparçacık ilavesi ile birlikte kullanılması durumunda pürüzlerde veya engel tabanlarında çökmeden kaynaklanan parçacık birikimi gibi problemlerle karşılaşılmaktadır.

Bu çerçevede, biri klasik diğeri görece güncel olan iki farklı tekniğin kullanılması mümkün olabilmektedir. Boru girişinde yönlendirici eleman ile akışkanın döndürülmesi ve nanoparçacık ilaveli akışkanın birlikte kullanılması parçacık çökme miktarını azaltacak ve çökme süresini uzatacaktır. Böylece tezin özgünlüğü, bir klasik iyileştirme tekniğinin ve nanoparçacık ilavesi uygulamasının üstünlüklerinden yararlanılmasıdır. Çalışma, sayısal ve deneysel olarak yürütülmüştür. Sayısal çalışmada, boru içerisinde dönmeli akış ve ısı transferi problemi ANSYS FLUENT yazılımı ile çözülmüştür. Deneysel çalışmada, boru çapı ve boru boyu sabit tutularak, kanatçık için geometrik değişkenler, hidrodinamik değişkenler ve termodinamik özellikler deney parametreleri olarak seçilmiştir. Kanatçık için geometrik değişkenler kanatçık sayısı, kanatçık açısı ve kanatçık yüksekliği iken hidrodinamik değişken olarak Re sayısı ve fiziksel özellikler olarak Pr sayısı ve parçacık kütle oranı göz önüne alınmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, ön sayısal çalışma bulguları arasından uygun olan durumlar seçilerek belirlenmiştir.

1.2. Nanoakışkanlar ve Uygulama Alanları

Nanoteknolojinin ilerlemesi, nano ölçekte tasarlanmış malzemelerin ve sistemlerin keşfedilmesinin ve geliştirilmesinin yolunu açmıştır. Bu alanın önemli bir parçası olan nanoakışkanlar, son yıllarda araştırmacıların ve endüstrinin ilgisini çekerek bir araştırma alanı haline gelmiştir. Nanoakışkanlar geleneksel akışkanlarla karşılaştırıldığında kullanım alanlarına göre farklı şekilde üretilen, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip tek fazlı yapı karakteristiği gösteren akışkan yapılarıdır. Nanoakışkanların bu özellikleri çok sayıda uygulama alanında kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Nanoakışkanlar ısı transferi çalışmalarında giderek yaygın hale gelmektedir. Nanoakışkanlarla ilgili çalışmalar, termodinamik özelliklerinin belirlenmesi ile başlamış ve günümüzde mikro

ölçekli sistemlere soğutucu akışkan olarak kullanımına kadar uzanan bir yol izlemiştir. Nanoakışkanlar, termofiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimlerin yanı sıra parçacıkların rastgele hareketleri sonucunda da ısı transferinde artışa neden olabilmektedirler. Nanoakışkanlarla ilgili ısı transferi uygulamalarına geçmeden önce ilgili akışkanların ısı iletkenlik, viskozite, özgül ısı ve yoğunluk gibi özelliklerinin farklı kütle oranları için belirlenmesi gerekmektedir. Bu özellikler, yalnızca nanoparçacıkların miktarına değil, aynı zamanda şekil, yüzey aktif madde miktarı ve karışım hazırlama tekniğine göre değişkenlik göstermektedir. Yapılan çalışmalar, nanoakışkan hazırlanması sonucunda baz akışkana kıyasla termofiziksel özelliklerdeki en yüksek artış yüzdesinin viskozitede olduğu göstermektedir. Endüstriyel uygulamaların artması ve yeni teknolojilerin gelişmesi ile nanoakışkan kullanımının yaygınlaşacağı ve özellikle ısı transferi uygulamalarında öneminin artacağı düşünülmektedir. Nanoakışkanların oluşturma aşamalarını gösteren görsel Şekil 1 'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Nanoakışkan hazırlama aşamaları

1.3. Isı Transferinin İyileştirilmesi

Mühendislik alanında, ısı transferini hem artırmak hem de azaltmak üzerine yapılan çalışmalar, ısı transferinin önemli bir konusudur. İletim yoluyla ısı transferini artırmak için fiziksel bir özellik olan ısı iletim katsayısını değiştirmek, yani yüksek iletkenlik özelliğine sahip bir ortam oluşturmak gerekir. Işıma ile ısı transferi ise yüzeylerin ışıma özelliklerini ve yüzeyler arasındaki konumlandırmayı değiştirme yoluyla iyileştirilebilir.

Taşınmıla ısı transferini artırmak için ise yüksek ısı taşınım katsayısı elde etmek gerekir ve bu kapsamdaki çalışmalar ısı transferinin iyileştirmesi olarak bilinir. Isı transferini iyileştirmek amacıyla kullanılan teknikler genellikle aktif ve pasif teknikler olarak sınıflandırılır. Aktif tekniklerde, ısı transferi yüzeyinde titreşim, iş akışkanında titreşim, yüzeyde emme veya basma ve manyetik alan oluşturma gibi yöntemlerle ısı transferi katsayısını arttırılması hedeflenir ve bu teknikler harici güç kullanmayı gerektirir. Diğer taraftından, pasif teknikler olarak bilinen uygulamalarda akışın periyodik aralıklarla engellenmesi ve akışın yönlendirilmesi gibi daha çok geometrik değişikliklere dayalı yöntemler uygulanır ve bu durumda harici güç kullanmaya ihtiyaç duyulmaz. Mühendislik uygulamalarında taşınmıla ısı transferinin iyileştirilmesine çeşitli sistemlerde gereksinim duyulabilir. Akışın periyodik olarak engellenmesi, sınır tabakanın bozulmasını sağlayan yaygın bir pasif iyileştirme tekniğidir. Bu tekniğin uygulanabilirliği ve performansa katkısı kullanılan yöntem ve sistem özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu uygulamalar, ısı değiştiriciler, kazanlar gibi büyük ölçekli olabileceği gibi elektronik soğutucular ve benzeri küçük ölçekli sistemler de olabilir. Isı transferinin iyileştirme ihtiyacı, ısı taşınım katsayısının düşük olduğu durumlarda ortaya çıkar. Akış hidrodinamiği ve akışkan türünün ısı taşınım katsayısı için belirleyici iki temel faktör olduğu ve düşük hızlı laminar akışlarda ısı taşınım katsayısının yüksek hızlı türbülanslı akışlara göre daha düşük olduğu bilinmektedir. Bu sistemlerde ısı transferini iyileştirme gerekliliği özellikle yüksek viskoziteli akışkanlarda ortaya çıkar. Bu kapsamdaki akışkanlar arasında, yağlı ısıtma sistemlerinde kullanılan ısı transferi yağları, gıda endüstrisinde kullanılan akışkan gıdalar, kimyasal süreçlerde kullanılan bazı akışkanlar, ilaç ve kozmetik endüstrisinde kullanılan sıvılar bulunmaktadır. İyileştirme tekniklerinin uygulanmasında akışkan-iyileştirme yöntemi eşleşmesinin önerildiği çalışmalar yaygın olmamakla birlikte herhangi bir iyileştirme tekniği uygulaması sonucunda akışkanın özelliklerine bağlı olarak farklı sonuçların ortaya çıktığı durumlar da mevcuttur.

1.4. Literatür Özeti

Isı transferinin iyileştirilmesi konusu, küçük ölçekli sistem ile yüksek miktarda ısı transferi gereksinimleri, ekonomik sistemler imal etme, yüksek verimlilik ve benzeri nedenlerden dolayı önemli bir araştırma alanıdır. Isıl performansı yüksek ürün geliştirilmesine yönelik çalışmalar kapsamında düşük maliyet ve ucuz işletme arayışları,

konu ile ilgili uygulanan tekniklerin çeşitliliğini artırmıştır. Yapılan literatür taraması nanoakışkanlar ile ısı transferi çalışmalarını ve boru içinde dönen akışta ısı transferi çalışmalarını özetleyecek şekilde ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

1.4.1. Teorik Çalışmalar

Bergles (1997), bilinen klasik iyileştirme tekniklerinin çeşitli sınıflandırmalara tabii tutularak birbirlerine göre üstünlük ve sakıncaları bakımından karşılaştırılmasının gerekliliğinden bahsetmiştir. Kakaç vd. (1999), tarafından iyileştirme teknikleri ile ilgili çalışmaların 1950’li yıllardan başlayıp günümüze kadar devam ettiğini belirtilmektedir. Kaynakta sunulan grafikten, çalışmaların 1970’li yıllarda hız kazandığı, 1980 ve 1990’lı yıllarda bu çalışmaların en yüksek sayıya ulaştığı görülmektedir. Konu ile ilgili literatür incelendiğinde, bu alandaki çalışmaların 2018 yılına kadar kesintisiz olarak devam ettiği, son yıllarda ise yeni yaklaşımlar ile artarak devam ettiği anlaşılmaktadır.

Wang & Mujumdar (2007), gerçekleştirmiş oldukları inceleme çalışmasında (review) nanoakışkanlar ile ilgili araştırmaları; nanoakışkan hazırlama, ısı iletim katsayısı ölçüm yöntemi, viskozite ölçümü, taşınım ile ısı transferi, kaynamada ısı transferi, teorik yaklaşımlar, nanoakışkan mekanizması ve sayısal analiz başlıkları ile incelemişlerdir. Yaptıkları değerlendirmeler sonucunda nanoakışkanın modellenmesi konusunda iki ayrı yaklaşım olduğunu, ısı iletim katsayısı belirlemede farklı ampirik ifadelerin mevcut olduğunu ve bu ifadelerden bazılarının özel koşullarda geçerli olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki bazı uyumsuzlukların olduğu ve bunların uygulanan modellerin daha iyi analiz edilip yenilenmesi ile giderilebileceği sonucuna varmışlardır.

Kakaç & Pramuanjaroenkij (2009), gerçekleştirmiş oldukları inceleme çalışmasında nanoakışkanların klasik ısı transfer akışkanlarına göre önemli üstünlükleri olduğunu savunmaktadırlar. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda nanoakışkanların etkin ısıl iletkenliğini ve viskozitesini ölçmeye ve modellemeye odaklanıldığını belirtmişlerdir. Yakın zamanda yapılan çalışmalarda ise ısı transfer akışkanlarında metalik veya metalik olmayan nanometre boyutunda katı parçacık kullanılarak ısı transferinin artırılmasına yönelik önemli teorik ve deneysel araştırmalar ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında geniş bir alana sahip olan nanoakışkanlar konusunun zorlanmış taşınım ile ısı transferi başlığını ayrıntılı olarak araştırmışlardır.

1.4.2. Sayısal Çalışmalar

Wen & Ding (2004), deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmada laminar akış koşullarına sahip boru akışında nanoakışkanların ısı transferini incelemişlerdir. Al₂O₃ nanoparçacık ilaveli baz akışkan olarak su kullanılan çalışmaları taşıyıcıyla ısı transferinde önemli bir artışın nanoparçacık ilavesi ile sağlandığını göstermişlerdir. Yerel olarak inceledikleri problemlerinde giriş bölgesindeki artışın ısı iletim katsayısındaki artıştan kaynaklandığını ve klasik Shah (Bejan&Kraus,2003) denklemleri olarak bilinen denklemler ile nanoakış problemlerinin davranışlarının belirlenemeyeceğini belirtmişlerdir. Nanoakışkandaki ısı transfer miktarının artmasına sadece ısı iletim katsayısındaki artışın değil, parçacık hareketi ile ortaya çıkan sınır tabaka yapısındaki bozulmanın da neden olduğunu belirtmişlerdir.

Akhavan-Behabadi vd. (2014), pürüzsüz ve mikro ölçekte pürüzlendirilmiş boru akışında nanoakışkan kullanılması durumunda ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Baz akışkan olarak ısı transferi yağı, nanoparçacık olarak CuO kullanmışlardır. Duvarlarında sabit sıcaklık sınır koşulu olan sistemlerinde akış kontrol sistemi kullanarak akış rejimini sürekli laminar bölgede olacak şekilde belirlemişlerdir. % 0,5-1-1,5 hacim oranlarında elde ettikleri nanoakışkanları saf ısı transferi yağına göre kıyaslamışlardır. Nanoparçacıkların ve mikro pürüz kombinasyon kullanımının sadece baz akışkana kıyasla % 230'a kadar ısı transferinin artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Elde ettikleri sonuçların, ısı transfer miktarının ve basınç düşüşünün tahmin edilmesinde önemli olacağını ortaya koymuşlardır.

Akdağ vd. (2014) sayısal olarak gerçekleştirdikleri çalışmada, yivlendirilmiş boru içerisinde gerçekleşen akışta Al₂O₃ – su nanoakışkanı için atımlı (pulsatif) akış koşulları altında ısı transferini incelemişlerdir. Atımlı akışa ait frekans ve genliğe ilave olarak parçacık oranının etkisini de CFD analizinde incelemişlerdir. Boru duvarında sabit yüzey sıcaklığı sınır koşulunu, akışı ise hem termal hemde hidrodinamik olarak geliştirmekte olan akış olarak ele almışlardır. Atımlı akış çalışmalarında nanoakışkan kullanımının termal performansı artırma potansiyeli olduğunu, akışın nanoakışkanın kararlılığı üzerinde pozitif etkisi olduğunu, atımsız akış ile karşılaştırmalı olarak göstermişlerdir.

Sarviya & Fuskele (2017), gerçekleştirmiş oldukları inceleme çalışmada araştırmacılar tarafından kullanılan çeşitli termal iletkenlik ölçüm teknikleri ve nanoakışkanların termal iletkenliğini etkileyen faktörler hakkındaki bilgi sunmuşlardır. Isıl

iletkenliğin, hacimsel orana, malzeme boyut ve oranına, baz akışkanın termo fiziksel özelliklerine, sıcaklığa ve aktif malzeme yüzeyine dayanan temel özellik olduğunu belirtmişlerdir. Geçmişte yapılan bazı çalışmaların nanoakışkanların termal iletkenliğinin artmasının nanoparçacıkların rastgele hareket etmesinden kaynaklandığını ortaya koymuşlardır.

Rahimi vd. (2018), gerçekleştirmiş oldukları deneysel ve sayısal çalışmalarını D şeklinde bir ısı değiştiricide nanoakışkan kullanarak ısı transferi geliştirmede modern bir yöntemi incelemişlerdir. Akışı ve ısı transferini çift MRT kafes Boltzmann metodunu kullanarak modellemişlerdir. Al₂O₃ nanoparçacık etilen glikol baz sıvısında %60-40 oranı ile ısı iletkenlik ve viskozite ölçümü gerçekleştirmişlerdir. Deneysel verilere dayanan farklı nanoparçacık konsantrasyonunu sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ortaya koyan bazı korelasyonlar geliştirmişlerdir. Elde ettikleri korelasyonları sayısal simülasyonlarında doğrulamak için kullanmışlardır. Çalışmalarında Ra sayısının 103-106 nanoparçacık konsantrasyonunu da %0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 ve %1 değerlerini parametrik olarak incelemişlerdir. Sonuçları akım çizgileri, eş sıcaklık eğrileri, yerel ve ortalama ısı transfer hızı, yerel ve ortalama entropi üretimi şeklinde sunmuşlardır.

Ghazanfari vd. (2024) nanoakışkanların ısı değiştiricilerde kullanımını 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak incelemişlerdir. Farklı bükülme oranı ile bükülen borularda gerçekleştirdikleri çalışmalarında ilk olarak literatürdeki yapılmış çalışmalardan analizlerini doğrulama işlemi gerçekleştirmişlerdir. 0,5 - 2 kg/s aralığındaki akış debilerinde gerçekleştirdikleri analizlerinde sonuçlarını akışkan çıkış sıcaklıklarına göre vermişlerdir. Bükülmüş borularda nanoakışkanların kullanılmasının ısı transferini basınç düşümüne göre daha önemli ölçüde artırdığını belirlemişlerdir. %0,1 Cu %0,15 Al₂O₃ nanoparçacıklarının kullanılması, ısı transferinde sırasıyla 1,04 ve 1,12 kat kadar iyileşme sağladığını belirtmişlerdir. Isı değiştirici verimliliğini arttırmada nanoakışkan uygulamasının potansiyelinin olduğunu ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda ısı transfer sistemlerinin tasarlanması ve optimize edilmesinde yaptıkları çalışma sonuçlarının kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Tao vd. (2024), mobil cihazların soğutulmasında kullanılan mikro kanallı ısı alıcılarda nanoakışkan ve elektrik alanın birleşik olarak ısı transferine olan etkilerini incelemişlerdir. Yüksek ısı akısı olması durumunda mikro kanalların ıslanabilirliği etkisini de içeren çalışmalarında Al₂O₃-su nanoakışkanını kullanmışlardır. Optimum konsantrasyona sahip nanoakışkanlarda elektrik alanının maksimum artışına, saf suya göre

1,6 kat kadar daha yüksek ısı akısında ulaşıldığını belirlemişlerdir. Nanoparçacıkların kuruma ve tıkanma problemlerinin ortadan kaldırmak için elektrik alanının ve duvar sıcaklığının eş zamanlı kontrol edilmesi gerekliliğinden bahsetmişlerdir. Kılcal ıslanma uzunluğunu tahmin için geliştirdikleri denklemlerinde nanoakışkan hacim oranının da parametre olarak kullanıldığını ve deneysel çalışma sonuçları ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

1.4.3. Deneysel Çalışmalar

Xuan & Li (2000), yaptıkları çalışmada bakır nanoparçacıkları kullanarak su ve trafo yağı ile nanoakışkan elde etmişlerdir. Bu araştırmacılar elde ettikleri akışkanların TEM (Transmission Electron Microscope) analizleri ile dağılım ve kümeleşme etkilerini incelemişlerdir. Gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmada farklı hacim oranlarında hazırladıkları karışımların ısı iletim katsayılarının ölçümü için kızgın tel anemometresi kullanmışlardır. Nanoparçacıkların oran, boyut, şekil ve özelliklerinin ısı transferi performansı açısından önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişler ve çalışma sonuçlarını bazı modeller kullanarak karşılaştırmışlardır. Katı parçacıkların dispersiyonunu (katı tanelerin sıvı içerisinde erime olmaksızın dağılması) hesaba katarak, bir boru içinde akan nanoakışkanın ısı transfer performansını tanımlamak için teorik bir model önermişlerdir.

Farajollahi vd. (2010), gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmalarında Al_2O_3 ve TiO_2 esaslı baz akışkan olarak su kullanılan çalışmalarında eş merkezli ve boru tipi ısı değiştiricisinde ısı transferi özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında Pe sayısının, hacim konsantrasyonunun ve parçacık tipinin etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak nanoparçacık ilavesinin beklendiği gibi ısı transferi performansında artışa sebep olduğunu, nanoakışkan cinsine göre hacim oranının bir optimum değerinin olduğunu belirtmişlerdir. Elde ettikleri optimum değerler üzerinde yaptıkları incelemede aynı Pe sayısında TiO_2 ilavesinin Al_2O_3 ilavesine göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Razi vd. (2011), sabit ısı akısı sınır koşulu altında değişken geometriye (yuvarlatılmış köşeli dikdörtgen profilden dairesel kesitli profile kadar kesitli) sahip borularda akış durumunda nanoakışkan kullanımını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarını ısı transferi ve basınç düşüşü özelliklerini incelemek üzere tasarlamışlardır. Baz akışkan olarak yağ kullanılan çalışmalarında CuO nanoparçacıkların homojen olarak dağılması için ultrasonik bir yöntem kullanmışlardır. 4 farklı hacim oranında (%0,2 - 0,5

– 1 - 2) hazırladıkları nanoakışkanları bakır borulardan imal edilmiş test bölgelerinde deneye tabii tutmuşlardır. Boru dışındaki sabit ısı akısını elektrikli ısıtma bobinleri ile sağlamışlardır. Akışı hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış olarak modellemişlerdir. *Re* sayısı, boru ve kanaldaki en/boy oranlarını parametre olarak seçmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmalarından boru profilinin düzleşmesi basınç düşümünün arttığını tespit etmişlerdir. Bunun yanında baz akışkanın tek başına kullanılmasına kıyasla nanoakışkan kullanılmasının ısı transferi ve basınç düşümünü arttırdığını belirlemişlerdir. Düzleşmiş tip boru durumunun ısı transferi ve basınç düşümü açısından daha efektif olduğunu ortaya koymuşlardır.

Nasiri vd. (2011) deneysel olarak gerçekleşen çalışmada Al_2O_3 ve TiO_2 nanoparçacıkları ile elde ettikleri su bazlı nanoakışkanlar ile türbülanslı akış rejiminde boru içi akışta ısı transferi karakteristiklerini incelemişlerdir. Parçacık oranı ve *Re* sayısının geniş bir alanında gerçekleşen çalışmada, sonuçları *Pe* sayısına bağlı olarak *Nu* sayısı değişimleri şeklinde sunmuşlardır. Elde ettikleri belirgin sonuç, Al_2O_3 ve TiO_2 nanoakışkanlarının ısı transferinde gerçekleşen artışta birbirlerine göre belirgin bir fark olmamasıdır.

Akhavan-Behabadi vd. (2015), yatay pürüzsüz bir boruda ısı transferi yağına nanoparçacık ilavesi konusunda gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında CuO nanoparçacığının taşınım ile ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının ilk aşamasında elde ettikleri nanoakışkanın, yoğunluk, hacimsel termal genleşme katsayısı, özgül ısı kapasitesi, viskozite ve termal iletkenlik gibi özelliklerini farklı çalışma sıcaklıklarında belirlemişlerdir. Duvarda sabit sıcaklık sınır koşulu altında inceledikleri çalışmalarında nanoparçacık ilavesinin baz akışkanın hacimsel genleşme katsayısını, viskozite ve ısı iletkenliğini arttırdığını tespit etmişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçları bazı teorik modeller ile de desteklemişlerdir. *Nu* sayısının % 1,5 hacim oranında sentezlenen nanoakışkanda % 32'lik artışı gösterdiğini belirtmişlerdir.

Derakhshan & Akhavan-Behadabi (2015) deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmada, boru içerisinde akmakta olan karma taşınım akışında MWCNT-yağ nanoakışkanı kullanarak akışkan özelliklerini belirlemişler ve sürtünme faktörü değerlerini elde etmişlerdir. Mikro pürüzlü ve pürüzsüz olarak iki ayrı iç yüzey durumunu ele aldıkları çalışmada ısı transfer yağını % 0,05, % 0,1 ve % 0,2 hacim oranlarında sentezleyerek nanoakışkan elde etmişlerdir. Richardson sayısının 0,1 ile 10 değeri arasında gerçekleşen çalışmada baz akışkana nanopartikül ilavesinin etkisinin hem basınç düşüşü hem de

sürtünme faktörü üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir. Nanoakışkan uygulamalarında pürüzsüz boru tercih edilmesinin daha yüksek Richardson sayılarında ısı olarak daha etkin sonuçlar verdiğini açıklamışlardır.

Akhavan-Behadabi vd. (2016), ısı transferi yağı ile CuO parçacıklarını sentezleyerek elde ettikleri nanoakışkan ile eğimli borularda karma ısı taşınımı deneysel olarak incelemişlerdir. Dört farklı eğim açısında (0, 30, 60, 90) gerçekleştirdikleri çalışmada nanoparçacık konsantrasyonun ısı transferi miktarında önemli ölçüde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Richardson sayısının etkisini de içerecek şekilde ampirik bir denklem üreterek %16 hata ile Nu sayısını belirlemişlerdir. Basınç düşüşünde meydana gelen değişimi belirlemek için de farklı bir korelasyon geliştirerek toplam sistem verimi üzerinde durmuşlardır. En iyi sonuçları, % 1,5 hacim oranında 30o açıda ve 0,7 Richardson sayısında elde etmişlerdir. Nanoakışkan kullanımının basınç düşüşünü arttırmaktan ziyade ısı transferinin artırılmasına daha yüksek katkı sağladığını vurgulamışlardır.

Kumar & Sonawane (2016), eş merkezli boru tipi bir ısı değiştiricide deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında, baz akışkan olarak su ve glikol kullanılarak CuO ve TiO_2 nanoparçacıkların etkisini incelemişlerdir. Nanoparçacık olarak CuO ve TiO_2 kullandıkları çalışmalarında baz akışkan olarak su kullanmışlardır. %0,02, %0,04 ve %0,06 hacim oranlarında elde ettikleri nanoakışkanlar ile boru tipi eşanjörde farklı akış hızlarında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında temel olarak Nu ve Re sayısının incelenmesi üzerinde durmuşlardır. Literatürdeki $Nu-Re$ korelasyonlarını elde ettikleri çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Nanoparçacıkların konsantrasyonu arttıkça, ısı iletkenliği ve parçacıklar arasındaki etkileşimin artmasından dolayı ısı transferinde önemli bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, sıcaklık arttıkça baz akışkanın ısı iletkenliğinde de bir iyileşme olduğunu ortaya koymuşlardır.

Hekmatipour vd. (2016), yatay bir boru akışında ısı transferi yağına ilave edilmiş CuO yapısının zorlanmış ve doğal taşınım durumlarında ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Akış rejimini laminar ve duvarda sabit sıcaklık sınır koşulu belirlemişlerdir. Richardson sayısının 0,1 ile 0,7 arasında değiştiği çalışmalarında hacim oranının % 0 dan % 1,5 e çıkması sonucunda ısı transferinde önemli bir artış olduğunu belirlemişlerdir. Bu tür uygulama ve problemlerde kullanılmak üzere üç ayrı korelasyon geliştirmişlerdir. Elde ettikleri korelasyonların % 5-10 arasında bir sapma ile doğru sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında Ra sayısının $1,6 \times 10^5 - 8 \times 10^5$ aralığındaki değişimini incelemişlerdir.

Singh vd. (2017), gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmalarında, kesme işlemleri sırasında kullanılan sıvılarda iyileştirme yapılması gerektiğini ve bu iyileşmenin hem ısı özelliklerinde hem de tribolojik özelliklerinde olması gerektiği üzerinde durmuşlardır. Çalışmada, nanoakışkan hazırlanması için baz akışkan olarak bitkisel yağ-su emülsiyonu ve nanoparçacık olarak da Titanyum dioksit (TiO_2), Silikon oksit (SiO_2) ve Alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanmışlardır. Farklı konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında nanoakışkanın önce ısı iletkenlik ve özgül ısı değerlerini ölçmüşlerdir. Elde ettikleri üç ayrı nanoakışkanın soğutma kapasiteleri incelendiğinde Al_2O_3 'ün diğer sıvı süspansiyonlara göre daha iyi soğutma performansı gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Hekmatipour vd. (2017), dikey bir boru içerisinde akmakta olan ısı transferi yağına CuO parçacığı ilavesi ile ısı transferi ve basınç düşümü ilişkisini deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında nanoparçacığın etkisini laminar akış ve sabit sıcaklık sınır koşulu altında parametrik olarak çalışmışlardır. Borunun dikey konumlandırılmış olması nedeniyle problemi doğal ve zorlanmış taşınımı içerecek şekilde karma taşınım olarak ele almışlardır. Richardson sayısının 0,1 ile 0,7 arasında değiştiği çalışmalarında parçacık konsantrasyonunun ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Karma taşınım probleminde ısı transfer miktarının hem nanoparçacık konsantrasyonu hem de Richardson sayısı ile arttığı gözlemlenmiştir. Nanoakışkanın Nu sayısının daha doğru belirlenmesi için yeni korelasyonlar önermişlerdir. Maksimum ısı transferini 0,7 Richardson sayısı ve % 1,5 parçacık konsantrasyonunda elde etmişlerdir. Çalışma sonuçlarının özellikle düşük debilere sahip ısı değiştiricilerin tasarlanmasında kullanılabileceği üzerinde durmuşlardır.

Wei vd. (2017), nanoteknolojinin hızlı bir şekilde gelişme gösterdiğini ve geleneksel ısı transferi akışkanlarının da buna paralel olarak değişim gösterdiğinden bahsetmişlerdir. Gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında dia metrik yağ içerisinde TiO_2 nanoparçacık ilavesi ile kararlılık ve ısı iletim katsayısı değerlerini belirlemişlerdir. Nanoakışkanı literatürde de yaygın olarak kullanılan 2 adım metodu ile hazırlamışlardır. Çalışmalarında ilk olarak çökme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Akışkan ortamda herhangi bir tabaklanmanın gözlemlenmediği çalışmalarında artan hacim oranı ile ısı iletim katsayısının arttığını deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Isıl iletkenlik artma oranının hacim oranı ile doğrusal ilişki içinde olduğu üzerinde durmuşlardır.

Raei vd. (2018), gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmada nanoakışkanların ısı transferine olan katkısının basınç düşüşündeki artışa oranla daha düşük olduğu konusunu

vurgulamışlardır. Baz akışkan olarak su kullandıkları çalışmalarında farklı konsantrasyonlarda nanoakışkanlar üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Sürtünme azaltıcı madde (DRA) kullanımının basınç düşüşüne olumlu etki etmesine karşın ısı transferine olumsuz etkide bulunduğunu ortaya koymuşlardır. Tek başına nanoparçacık eklenmesinin ısı transferi ve basınç düşüşünün arttırdığı göz önünde bulundurularak bir korelasyon ile bu etkinin toplam olumlu etkiye dönüştürülmesini incelemişlerdir. Sonuç olarak % 0,2 hacim oranında nanoparçacık ilavesinin basınç düşümünde % 5'lik artış yapmasına karşı ısı transferinde % 20'lik bir artış sağladığını, ısı transferinin DRA kullanılması durumunda % 17,2 arttığını basınç düşümünün ise % 4,8 azaldığını tespit etmişlerdir.

Alirezaie vd. (2018), gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmada nanoakışkanların ısı performansı ve ekonomik etkinliği incelemişlerdir. Endüstride yer bulması ve nanoakışkan teknolojisinin ilerlemesi için en önemli faktör olarak fiyat-performans analizini ampirik ifadelerde vermişlerdir. Soğutma sistemlerinde ısı transfer hızını arttırmak için çözümler sunmaya duyulan ihtiyaç birçok araştırmacının dikkatini bu konuya çektiğini ortaya koymuşlardır. Nanoakışkanların ısı transferi araştırmacılarının beklentilerini karşılayıp karşılamadığını ve ısı transferi alanında büyük bir dönüşüm sağlayıp sağlamadığı sorusu kendilerine motivasyon kaynağı olduğunu belirtmişlerdir. Nanoakışkanların, iddia edildiği gibi, performansı arttırıp maliyetleri düşürmeyeceğini ve bunların yakın gelecekte ısı transfer alanında etkili bir konumda olup olmayacağını incelemeye çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada, farklı nanoakışkanların (sulu Ag, MgO, MWCNT ve DWCNT) etkinliğini deneysel verileri gözden geçirmiş, etkinlik-fiyat endeksi sonucunu ortaya koymuşlardır. Daha sonra elde ettikleri bu bilgileri nanoakışkanların fiyatına ve en etkin nanoakışkanın belirlenmesine göre karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır. Sonuç olarak nanoakışkanların, kritik uygulamalara sahip ileri teknoloji cihazlar haricinde ekonomik bir gerekçeye sahip olmadığını göstermişlerdir.

Hamid vd.(2018), gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmalarında TiO₂-SiO₂ hibrit nanoakışkan kullanarak ısı transfer performansının arttırılmasını incelemişlerdir. Baz akışkan olarak su kullanılan çalışma beş farklı hacim oranında %0,1'lik süspansiyon ile gerçekleştirmiştir. Isıl iletkenliğin belirlenmesi ve viskozite analizi için sırasıyla literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan KD2 Pro Termal Özellikler Analiz cihazını ve Brookfield LVDV III Ultra Reometre ölçüm aletlerini kullanmışlardır. Çalışma sıcaklık aralığını 30-80 ° C olarak belirlemişlerdir. TiO₂-SiO₂ için en yüksek ısı iletkenliği 20:80 oranında ve

en düşük ısı iletkenliğin 50:50 oranında olduğunu ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak, TiO₂-SiO₂ için optimum karışma oranının 40:60 ve 80:20 oranlarında olduğunu belirtmişlerdir.

Moldoveanu vd.(2018), gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmalarında baz akışkan olarak su, nanoparçacık olarak Al₂O₃-SiO₂ hibrit yapısını kullanmışlardır. Çalışmalarındaki temel amacın ısı iletim katsayısını belirlemek olduğunu ifade etmişlerdir. Teorik ve deneysel modeller ile elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Farklı hacim oranlarının ısı iletkenlik üzerindeki etkisinin açıkça ortaya koyulduğu çalışmalarında kullandıkları nanoparçacık yapısı için bir korelasyon ortaya koymuşlardır. Çalışmanın önemli sonuçlarından biri de artan sıcaklıkla ısı iletkenliğin doğrusal değişiminin bir regresyon denklemi ile gösterilmesidir. Ayrıca elde ettikleri sonuçların hacim oranıyla ilişkisi içinde regresyon analizi gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda hem nanoakışkan hem de hibrit nanoakışkanlar için korelasyonlar önermişlerdir.

Kumar vd.(2018), Al₂O₃ nanoparçacık kullanarak su, parafin ve etilen glikol baz sıvılarında gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmalarında ısı iletkenlik, taşınım ısı transfer katsayısı ve sürtünme faktörü değerlerini incelemişlerdir. Eş merkezli boru tipli değiştiricide gerçekleştirdikleri çalışmada tam gelişmiş laminar akış ve türbülanslı akış koşullarında çalışmışlardır. *Re* sayısı ve nanoparçacık konsantrasyonu değerlerinin ısı transfer özellikleri üzerindeki etkisinin incelemişlerdir. Nanoparçacıkların konsantrasyonu arttıkça, ısı transfer katsayısının da gözlenebilir olarak arttığını tespit etmişlerdir. Türbülanslı akış rejiminde daha yüksek türbülans değerinin ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisinin nanoakışkanlarda da benzer olduğunu belirlemişlerdir. Nanoakışkanın basınç düşüş değerinin türbülanslı durumda baz akışkana göre daha yüksek olduğunu ancak laminar durumda önemli bir değişikliğin olmadığını gözlemlemişlerdir.

Loni vd. (2018), güneş enerjisi sistemlerinin çanak yoğunlaştırıcılarında kullanılan akışkanın termal performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sıvısı olarak Al₂O₃ ve SiO₂ ilaveli ısı transferi yağı içeren nanoakışkan ve nanoparçacık ilavesi olmayan ısı transferi yağı kullanmışlardır. Kararlı durumda yaptıkları ölçümler sonucunda Al₂O₃ ilaveli nanoakışkanın diğer tüm durumlara göre daha yüksek ısı transferi gerçekleştirdiğini belirlemişlerdir. Nanoparçacık ilavesinin olmadığı durumun tüm durumlara göre daha yüksek ısı kayıp oluşturduğunu bu yüzden nanoparçacık ilave etmenin bu tür uygulamalarda faydalı olacağını belirtmişlerdir.

Patel vd. (2018), nanoparçacıkların ağır yağ akışkanlarına ilavesi durumunda viskozitesinin değişimini içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Üç ayrı nanoparçacık (CuO, Fe₂O₃ ve NiO) viskoziteye etkisini %0,05-0,1-0,5 hacim oranlarında incelemişlerdir. Çalışma sıcaklığını 27 - 71 °C arasında seçmişlerdir. Endüstride ağır yağ olarak nitelendirilen iki ayrı yağ örneği ile çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Nanoparçacık ilavesinin her iki ayrı numunede de viskozitede %50-70 aralığında azalma gösterdiğini belirtmişlerdir. Çalışmaları ile bu tür akışkanların viskozitesinin belirlenmesi için bir optimum konsantrasyon belirlemişlerdir. Optimum konsantrasyona parçacık tipine ve sıvı sıcaklığına dâhil olduğundan bahsetmişlerdir. Elde ettikleri viskozite değişimini çeşitli fiziksel ve kimyasal etkileşimler ile açıklamışlardır. Çalışma sonuçlarının özellikle endüstri de ekonomik olarak uygulanabilir sonuçlar verdiğini ve nanoparçacık kullanımının güçlenerek benzer çalışmalardaki problemlere çözüm olacağından bahsetmişlerdir.

Meyer & Abolarin (2018), dairesel kesitli bir boru içindeki bükülmüş bant ilavesinin geçiş akış rejiminde ısı transferi ve basınç düşüşü özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Isı transfer akışkanı olarak su kullandıkları çalışmalarında boru cidarlarında üç farklı ısı akısı sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Farklı *Re* ve *Pr* sayılarında gerçekleşen çalışmada bükülme oranı ve ısı akısını parametreler halinde incelemişlerdir. Sonuçların analizinde büküm oranı, ısı akısı ve *Re* sayısını dikkate alan boyutlandırılmamış ısı transfer katsayıları ve sürtünme faktörleri için korelasyonların geliştirmişlerdir. Aynı ısı akısı için büküm oranları azaldıkça Colburn *j* faktörlerinin arttığı ve rejim geçişin daha erken başladığı tespit etmişlerdir.

Şahin & Namlı (2018), gerçekleştirdikleri çalışmada, nanoakışkanların kararlılığı üzerinde yapılan çalışmalardan sonuçlar alarak konuyu detaylı analiz eden bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Nanoakışkanların ısı transferini arttırmaya yönelik yapılan çalışmaların yanı sıra kararlılıklarının da incelenmesi gereken bir konu olduğu üzerinde durmuşlardır. Isı transferindeki iyileşmenin öncelikle yüksek kararlılık sağlanması, ardından gerekli ölçüm aşamalarına geçilmesi gerektiğini savunmaktadırlar. Nanoakışkanların kararlılıklarının artırılması üzerine ayrı bir başlık açarak önerilerde bundukları çalışmalarında ayrıca tablo yardımı ile kullanılan nanoakışkan hazırlama yöntemleri hakkında ayrıntılı bilgi sunmuşlardır.

Çuhadaroglu & Hacısalihoğlu (2022), CuO nanoakışkan ile modellenen bir ısıtma sistemindeki plakalı ısı değiştiricide hidrodinamik ve termal performansı deneysel olarak

analiz etmişlerdir. 4 farklı hacim oranında sentezledikleri akışkan ile 3 farklı debi değerinde ısı transferi deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Farklı hacim oranları ve debinin pompalama gücü, basınç düşüşü, ısı eşanjörü etkinliği ve Nu sayısı üzerine etkisini göstermişlerdir.

Kavitha vd. (2022), CuO-su nanoakışkanı ile çift borulu ısı değiştiricide farklı giriş sıcaklarında ısı transfer miktarlarını incelemişlerdir. Hacimsel olarak %0.004 konsantrasyona sahip nanoakışkan kullanılması durumunda ısı performansın analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada nanoakışkanın türü, boyutu, şekli, konsantrasyonu ve aynı zamanda baz akışkan cinsinin ısı transferinin artırılmasındaki rolü belirlenmiştir. Nanoakışkanların gelecekte daha sık kullanımı için deneysel çalışma sonuçlarının endüstriyel uygulamalarda daha sık kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Karataş & Bicen (2022), gerçekleştirmiş oldukları inceleme çalışmasında, transformatörlerde kullanılan dielektrik sıvıları yerine nanoakışkan kullanımı üzerinde durmuşlardır. Yalıtkan baz akışkanlar ve nanoparçacık türleri üzerine yapılan benzer çalışmalarda, dielektrik nanoakışkanların hazırlanması ve stabilizasyonu, dielektrik iyileştirmeleri, viskozite değişiklikleri, ısı iletkenlik seviyeleri, dağılım faktörleri, kısmi deşarj olayları, fizikokimyasal özellikler, yaşlanma özellikleri ve bunların özelliklerinin derinlemesine tartışıldığını belirtmişlerdir. Dielektrik nanoakışkan kullanılması ile sistemlerde % 21 seviyelerine ulaşan toplam iyileşme tespit edildiğini, bunların büyük bir kısmının da pozitif polarite esaslı olduğunu açıklamışlardır. Nanoakışkanların transformatörlerde kullanılan selülozik yalıtım malzemesi ile etkileşimi üzerine yeterli çalışma yapılmamış olsa da öncü deneysel çalışmaların özellikle yaşlanma sorunlarına yönelik olumlu sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmişlerdir.

Zhang vd. (2024), içten oyuklu olarak imal edilen boruda SiO₂-su nanoakışkanı kullanarak ısı transfer karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı Re sayısı ve hacim konsantrasyonlarında oluklu borudaki SiO₂-su nanoakışkanlarının konvektif ısı transfer özellikleri karşılaştırılmıştır. Nanoakışkan kullanımı ile birlikte Re sayısının arttıkça Nu sayısının arttığını, daha yüksek bir nanoakışkan konsantrasyonun taşınım ısı transfer katsayısında ciddi bir artışa neden olabileceğini belirtmişlerdir. Elde ettikleri nanoakışkanın ısı iletkenliğinin %12 ile 14 arasında olduğunu, toplam ısı transferindeki iyileşmenin ise %143 seviyelerine ulaştığını göstermişlerdir.

1.4.4. Temel İncelemeler

Sundar & Sharma (2010), içerisinde bükülmüş bant yerleştirilmiş bir boru akışında Al_2O_3 – su nanoakışkanı ile ısı transferi ve basınç düşümü etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında ilk adım olarak nanoakışkanın farklı çalışma sıcaklıkları ve hacim oranları için termofiziksel özelliklerin belirlenmesi işlemini gerçekleştirmişlerdir. Bükülmüş banda ait H/D (adım/çap) oranı ve Re sayısının geniş aralıkları için çalışmaları tekrarlamışlardır. Al_2O_3 – su nanoakışkanı için %0,5 hacim oranında ısı transferi ve sürtünme faktörü değerlerinin sırasıyla %33,5 ve %1,09 oranında artış sağlandığını belirtmişlerdir. Nu sayısına bağlı olarak ısı regresyon denklemleri geliştirerek sonuçları analiz etmişlerdir.

Azmi vd. (2016), gerçekleştirdikleri çalışmada nanoakışkanların etkin ısıl iletkenlik ve etkili dinamik viskozitesinin arttırılması ile ilgili kapsamlı bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. İnceledikleri nanoakışkan boyutları genel olarak 10 nm'nin üzerindeki parçacıklardan oluşmaktadır. Ayrıca, diğer araştırmacılar tarafından literatüre kazandırılmış olan modeller üzerinde ve bu modeller ile gerçekleştirilmiş çalışmaların incelenmesi üzerinde durmuşlardır. Bu kapsamda, ısıl iletkenlik ve dinamik viskozitenin tahmini için hacimsel konsantrasyonunun, sıcaklığın ve bazen de deneye özel olarak geçerli olan parçacık büyüklüğünün bir fonksiyonu olan denklemlerin geliştirildiğini göstermişlerdir. Sonuç olarak nanoakışkanların çoğunun %4 ün altında hacimsel konsantrasyonda Newton tipi davranış gösterdiğini belirtmişlerdir.

Sajid & Ali (2016), gerçekleştirmiş oldukları inceleme çalışmasında araştırmacılar tarafından nanoakışkanların ısıl iletkenliği üzerine yapılan deneysel, sayısal ve ANN (yapay sinir ağları) çalışmaları kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. İnceledikleri çalışmalar nanoakışkanların termal iletkenliğinin nanoparçacık tipi, nanoparçacık konsantrasyonu, baz akışkan türleri, nanoparçacık boyutu, sıcaklık etkisi, pH değişimi ve sonikasyon (Ultrasonik dalga altında karışıma tabi tutmak) süresi gibi etkenlere bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, hibrit nano kompozitlerin sentezi, hibrit nanoakışkanların hazırlanması, kararlılık ölçümü ve artırma yaklaşımları, termal iletkenlik ölçüm yöntemleri ve termal iletkenlik arttırma sebeplerini inceledikleri yayınların kapsamında rapor etmişlerdir. Hibrit nanoakışkanların ısıl iletkenlik tahmini için araştırmacılar tarafından geliştirilen çeşitli ampirik korelasyonları da derlemiş ve karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır. Sonuç olarak sıcaklık ve konsantrasyonun

arttırılmasının ısı iletkenliği arttırdığını ve hibrit nanoparçacıkların seçiminde, önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir.

Arslan & Günerhan (2017), nanoakışkanlar üzerine yapılan çalışmaları ısı özellik belirlleme ve ısı transferi kabiliyeti açısından değerlendirmenin gerektiğini vurgulamışlardır. Nanoakışkan özelliği kazandırılmış akışkanların ısı iletkenliklerinin değişiminin, ısı transferi miktarındaki değişimde öncü rol oynadığını, ayrıca farklı fiziksel olaylarında bu değişime katkı sağladığını belirtmişlerdir. Özel olarak enerji uygulamalarında kullanılan akışkanlar ile nanoakışkanlaştırma yaparak, karşılaştırmalı sonuçlar elde etmişlerdir. Isı transferindeki değişimden bağımsız olarak enerji uygulamalarında nanoakışkan kullanımının hareketli parçalarda mekanik olarak oluşabilecek sorunlardan da bahsedilmesi gerekliliğini belirtmişlerdir.

Das (2017), gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, nanoakışkanların ve hibrit nanoakışkanların ısı iletkenlik değerinin ısı transferine olan etkisini ve nanoakışkanlaşma mekanizmasını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Nanoakışkanların, çok az miktarda nanoparçacık içeren yapılar olmasına rağmen aşırı termal iletkenlik artışından dolayı dikkate değer bir konu olduğunu vurgulamıştır. Konu ile ilgili olarak son 30 yılda yapılmış çalışmaları, ısı iletkenlik değerinin teorik modellerini incelemiştir. Nanoakışkan hazırlamada uzun süreli ve kararlı bir yapı elde etmenin zorluklarından, sürdürülebilirlik ve verim açısından da incelemenin önemli olduğunu ifade etmiştir. Nanoparçacıkların ısı iletkenliğini etkileyen faktörlerin; nanoparçacık tipleri, katı/sıvı hacim oranı, baz akışkan türü, çalışma sıcaklığı, parçacık boyutu, pH değeri, sonikasyon ve çeşitli ısı mekanizmalar olduğunu belirtmiştir. Ayrıca sentez, hazırlama yöntemleri, ısı iletkenlik ve hibrit nanoakışkanların çalışma zorluklarından da bahsetmiştir. Çalışma sonucunda uygun nanoparçacık seçiminin zor bir işlem olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, daha iyi ısı iletkenlik için hibrit nanoakışkanları geliştirmek, bu alanlarda çalışmaların derinleşmesi ve arttırılması üzerinde durmuştur.

1.4.5. Çeşitli Mühendislik Sistemlerindeki Uygulamalar

Timofeeva vd. (2011), gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan sentetik yağların soğutma performansı üzerinde durmuşlardır. Özel olarak bir firma tarafından üretilen TH66 olarak bilinen yağa 15 nm boyutlarında SiO₂ ilavesi ile çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Nanoakışkanın hazırlanmasında baz

akışkanın polar özellikte olmaması nedeniyle inorganik olan nanoparçacıkların stabil süspansiyonunu sağlamak için BAC (Benzalkonyum Klorür) yüzey aktif maddesini kullanmışlardır. Elde edilen nanoakışkanın parçacık ve yüzey aktif madde konsantrasyonlarının nanoakışkanın termofiziksel özellikleri üzerindeki etkisini geniş bir sıcaklık aralığında incelemişlerdir. Yüzey aktif maddenin nanoparçacık oranına oranı olarak bilinen SN oranı üzerinde yüksek ısı iletkenlik düşük viskozite için optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Hem türbülans hem de laminar akış koşulları için bazı korelasyonlar geliştirmişlerdir.

Leong vd. (2012), gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarına motivasyon olarak iklim değişikliği, akaryakıt fiyatlarının artışı, yakıt güvenliği ve benzeri konuların ortaya çıkması olarak belirtmişler ve yüksek verimli cihazların gündeme gelmesi üzerinde durmuşlardır. Endüstrideki enerji tüketiminin büyük bir kısmının ısıtma tesislerinden kaynaklandığının belirtildiği çalışmalarında ısı geri kazanımlı bir ısı değiştiricisinde çalışma sıvısı olarak nanoakışkan kullanımını incelemişlerdir. Isı geri kazanım sisteminin ısı ve enerji performansını analiz etmek için literatürde bulunan ısı değiştirici özellikleri, nanoakışkan özellikleri ve analitik bağıntıları kullanmışlardır. Nanoakışkan olarak su-Cu ve etilen glikol-Cu kullandıkları çalışmalarının sonucunda ısı değiştiricisinde ısı transferindeki toplam artışın %7-8 arasında olduğunu ve bunun etilen glikol bazlı akışkan içerisine %1 Cu parçacıkları eklenmesi ile elde edildiğini belirtmişlerdir. Çalışmada, değiştiricideki soğutucu akışkanın farklı akış hızları da parametre olarak seçmişlerdir.

Dinesh vd. (2016), motor yağının nanoparçacık ilave edilmesi durumunda performansının değerlendirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Motor yağlarının kullanım alanlarında yağlama özelliklerinin yanı sıra soğutma amaçlı kullanıldığını ve bunun incelenmeye değer bir durum olduğu sonucuna varmışlardır. Özel bir firma tarafında üretilen ve piyasada 20W40 olarak bilinen motor yağında gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT) ve çinko oksit nanoparçacıklarını farklı hacim oranlarında kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçları aşınma direnci, sürtünme katsayısı, ısı iletkenlik ve viskozite gibi özellikler açısından incelemişlerdir. Bunun yanında bazı tribolojik özellikleri de inceleyerek çalışma sonucunda problemin çalışan bir motor üzerinde yapılan değerlendirmesinde kütle transferinin de incelenmesi gerektiğine vurgu yapmışlardır.

Kim vd. (2018), günümüzde ısı transferi problemlerinin daha çok mikro ve nano boyutlarda incelendiğini, sistemlerin küçülmesi ve özellikle de elektronik cihazların

çalışma sıcaklıklarının optimum değerlerde tutulması gerekliliğinin ısı transferi çalışmalarını yeni bir soğutma teknolojisi araştırmaya yöneldiğini vurgulamışlardır. Al₂O₃ ilaveli su bazlı nanoakışkan kullanılarak gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmalarında boru tipi ısı değiştirici kullanmışlardır. Üç ayrı çap değerinde ve farklı *Re* sayılarında gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında nanoparçacıkların homojen dağılımını sağlamak için 3 saat süren sonikasyon uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Akışkan içerisindeki nanoparçacık konsantrasyonunu UV-VIS spektrofotometre kullanarak, ısı iletim katsayısını ise kızgın tel anemometre ile belirlemişlerdir. Nanoakışkan içerisindeki Al₂O₃ konsantrasyonu arttıkça ısı iletkenliğinin arttığını deney bölgesindeki boru çapının küçültülmesi ile toplam ısı transferinin artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Optimum bir çap ve *Re* sayısı değerinde ısı transferinde yaklaşık % 160 oranında bir iyileşme olduğunu belirtmişlerdir.

Phanindra vd. (2018), iç borusu bakır ve dış borusu çelik olan eş merkezli boru tipi ısı değiştirici kullanılarak gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmada, baz akışkan olarak trafo yağı hibrit nanoparçacık olarak 60 nm boyutlarında Al₂O₃ / Cu kullanmışlardır. Nanoakışkanı iki ayrı yöntemi kullanarak sentezlemişlerdir. Bu aşamadan sonra ilk olarak elde ettikleri akışkanın ısı iletkenliği, yoğunluğu, viskozitesi gibi özelliklerini ölçmüşlerdir. Çalışmalarını zorlanmış taşınım problemi olarak ele almış ve ısı transferinin yanı sıra akış özelliklerini de incelemişlerdir. Çalışmalarında nanoparçacık ilaveli ve ilavesiz durumları incelemiş ve sonuç olarak *Nu* sayısının parçacık ilaveli durumda % 10,34 oranında artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca çalışmalarını değişken *Re* sayılarında incelemiş ve maksimum iyileşmenin % 12,06 ile 1820 *Re* sayısında sağlandığını göstermişlerdir.

Ko & Huh (2019), gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında nanoparçacık ilavesinin yağ ve türevi akışkanlarla ilgili uygulamalar üzerinde durmuşlardır. Konuyu daha çok kimyasal içerik olarak ele aldıkları çalışmalarında nanoparçacık yüzeylerinin özel bir yöntem ile kaplanarak kullanılması potansiyelinin bulunduğunu göstermişlerdir. Nanoparçacık ilavesinin tıp, biyoloji ve mühendislik alanlarında gelecekte önemli olacağı konusu üzerinde durmuşlardır. Ayrıca endüstriyel anlamda kullanılan yağların delme, çimentolama, kesme vb. işlevlerde yardımcı olarak kullanıldığı durumlarda nanoparçacığın işlevsel olarak fonksiyonu üzerinde durmuşlardır. Nanoparçacıkların yapısal performansı, güvenilirliği ve dayanıklılığı artırmak için uygulanabilen olağanüstü mekanik

mukavemete, elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olduğunu ve bununla özellikle petrol üretim uygulamalarında etkin olarak kullanılabileceğinden bahsetmişlerdir.

Şahin & Namlı (2020), alüminyum oksit (alümina) ve titanyum dioksit ile %1, %3 ve %5 kütle oranlarında sentezlenen farklı nanoakışkanları elektrikli yağ radyatör ısıtıcısında test etmişlerdir. Nanoakışkanların kararlılık değerlerini artırmak için optimum ultrasonik karıştırma süreleri ve yüzey aktif madde miktarları da çalışmalarında parametre olarak kullanılmıştır. Elde ettikleri nanoakışkanların kararlılıkları sedimantasyon yöntemi kullanılarak belirlemişlerdir. En iyi termal iyileşmenin % 5 kütle oranında alümina nanoakışkan için % 6, titanyum dioksit için ise yaklaşık % 9 seviyelerinde olduğunu belirtmişlerdir. Nanoakışkanların kararlılık değerlerinin uzun süre boyunca korunmasının endüstriyel cihazlarda kullanımına bir yol açtığını savunmuşlardır.

Khatoon vd. (2023), enerji tasarrufunun endüstrinin önemli kaygılarından biri olduğunu ve bu kaygının giderilmesi için akışkan-cihaz eşleşmesinin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Isı değiştiricilerinde nanoakışkan kullanımının giderek yaygınlaştığını ve doğru ısı değiştirici tipine göre akışkan tercihini önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çift borulu ısı değiştiricilerde kullanılan nanoakışkan türlerini analiz ettikleri çalışmalarında özel olarak Al_2O_3 -su ve CuO -su nanoakışkanlarına odaklanmışlardır. Bu nanoakışkanların ısı iletkenlik, yoğunluk ve viskozite gibi termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılabilmesinin gösterildiği bir çalışma yaparak nanoakışkanın normale göre daha iyi ısı transfer potansiyeli olduğunu belirlemişlerdir. Nanoparçacık konsantrasyonu, *Re* sayısı ve *Pr* sayısı değerlerinin ısı değiştiricilerdeki etkisini de incelemiş ve baz akışkandaki parçacık konsantrasyonuna bağlı olarak ısı transferinde değişimlerin olduğunu göstermişlerdir.

1.4.6. Boru İçerisinde Akışın Döndürülmesi

Nuntadusit & Eiamsa-ard (2011), dönen akış koşullarında konik halka ve bükülmüş bant takviyelerinin birleşimini içeren bir boruda ısı transferinin iyileştirilmesini araştırmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışma, endüstriyel uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan dönen akışın termal performansını artırma ihtiyacını ele almaktadır. Bu takviyelerin birlikte kullanılmasının ısı transferini artırdığını ve boru içindeki akışın termal performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Elde ettikleri bulgular, ısı

transferi optimizasyonunda yeni stratejiler geliştirmek için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Hosseini vd. (2012), tarafından, bir dairesel boru içindeki türbülanslı ısı transferinin artırılmasını amaçlayan helisel turblatrlerin kombinasyonlu sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. alışmalarında, Navier-Stokes denklemlerinin türbülans modellemesi ve ısı transferi ile birleştirilmiş bir yaklaşım kullanarak analiz edilmesini amaçlamışlardır.. Simülasyon sonuçları, helisel turblatrlerin kombinasyonunun türbülanslı akış koşullarında ısı transferini artırdığını ve termal performansı iyileştirdiğini göstermektedir. Turblatrlerin geometrisi, dönüş sayısı ve akış rejimi gibi parametrelerin ısı transferine etkisi de inceledikleri çalışmalarında, helisel turblatrlerin termal enerji transferini artırmak için etkili bir araç olduğunu ve endüstriyel ısı değişim uygulamalarında potansiyel bir optimizasyon aracı olarak kullanılabileceğini savunmaktadırlar.

Duangthongsuk & Wongwises (2013), borularda beş adet döner trbın tipi dönüş alışı reteci (RTSG) ile kurulu olan ısı transferi artışı ve akış davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deiyonize suyun çalışma akışkanı olarak kullanıldığı çalışmalarında 2 cm uzunluğunda ve 60° eğim açısına sahip akış dndrcler test bölümü boyunca eşit aralıklarla (0.46 m) yerleştirilmiştir. Akış, RTSG'lerden geçerken sürekli serbest dönüşlerin gözlemlendiği ve RTSG'lerden sonra dönen akışının oluşturulduğu belirlenmiştir. Test bölgesine ısı kaynağı olarak DC güç kaynağı kullanmışlardır. Deney sonuçları, RTSG takviyeli borunun yerel ısı transfer katsayısının düz boruya göre daha yüksek olduğunu ve çalışma akışkanının RTSG'lerden geçtiğinde basınç kaybının da arttığını göstermektedir.

Promvonge & Eiamsa-ard (2013), dairesel bir boruya takılan konik halka takviyelerinin laminar ve türbülanslı döner akış koşullarında ısı transferini artırmaya yönelik etkisini incelemişlerdir. Üç farklı konik geometrisinin incelendiği çalışmada döner akış oluşturmak için salyangoz geometrisi kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçları, % 206-278 oranlarında ısı transferinde iyileşme tespit edildiğini ve bu takviyelerin boru içindeki akışın termal performansını iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır.

Arslan & Aksoy (2015) tarafından, deneysel olarak gerçekleştirilen çalışma, dairesel bir boru içindeki dönen akışın ısı transferini ve akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneyleri, Reynolds sayısının değişen değerlerine sahip dönen akış rejimlerini sağlamak için gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, dönen akışın termal performansını önemli ölçüde artırdığını ve boru içindeki akışın akışkan dinamiğini değiştirdiğini

göstermektedir. Akışın dönüş hızı ve akışkanın viskozitesi gibi parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkileri de dahil etikleri çalışmalarında, dönen akışın ısı transferi performansını artırmak için potansiyel bir yöntem olarak öne çıktığını ve endüstriyel ısı değişim uygulamalarında dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Kuldeep & Vijayan (2018), laminar ve türbülanslı akış koşullarında farklı geometrik şekilli döndürülmüş bantların kullanımıyla dairesel bir boruda ısı transferinin artırılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler, farklı *Re* sayıları altında gerçekleştirilmiş olup hem laminar hem de türbülanslı akış rejimlerini temsil edecek şekilde gerçekleştirmişlerdir. Türbülanslı akış koşullarında, döndürülmüş bantların ısı transfer katsayısını yaklaşık %20 oranında artırdığı, bununla birlikte, laminar akış koşullarında bu artış oranı daha düşük olmakla birlikte belirgin bir iyileşme sağlandığı belirtmişlerdir. *Re* sayısı 5000'de döndürülmüş bant kullanımıyla ısı transfer katsayısı %10 artarken, *Re* sayısı 20000'de bu artış oranı %20 olarak elde etmişlerdir. Farklı şekillerdeki döndürülmüş bantların boru içindeki akışta ısı transferini artırdığını ve termal performansı iyileştirdiğini göstermektedir.

Chen vd. (2019) tarafından, gerçekleştirilen deneysel çalışmada, laminar dönen akış koşullarında bükülmüş bant takviyelerinin ısı transfer karakteristikleri incelemişlerdir. Deneyleri, farklı akış hızları altında gerçekleştirmiş ve boru içine yerleştirilen bükülmüş bantların ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, bükülmüş bant takviyelerinin boru içindeki akışta ısı transferini artırdığını ve termal performansı iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle, bükülmüş bant takviyelerinin ısı transfer katsayısını %25'e kadar artırdığı gözlemlenmiştir.

Yao vd. (2019), kabarcıklı bir boru içinde dönen akışın ısı transferi ve basınç düşüşü karakteristikleri incelemişlerdir. Deneyleri, farklı akış hızları ve pürüzlülük oranına sahip boru geometrileri altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kabarcıklı yapıların boru içindeki akışın termal performansını artırdığını ve ısı transferini iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle, pürüzlülüğün varlığında ısı transfer katsayısının %15 oranlarında arttığı ve basınç düşüşünün ise görece daha düşük seviyelerde olduğu belirtmişlerdir. Ayrıca, farklı akış hızları altında ısı transferi ve basınç düşüşü arasındaki ilişkinin incelenmesiyle, optimum akış koşullarının belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

1.5. Tezin Amaç Kapsam ve Önemi

Klasik ısı transferi iyileştirme teknikleri arasında yer alan pürüzlendirilmiş yüzey ve sınır tabakanın periyodik engellerle bozularak yenilenmesi gibi uygulamaların nanoparçacık ilavesi ile birlikte kullanılması durumunda pürüzlerde veya engel tabanlarında çökmeden kaynaklanan parçacık birikmesi sorunu ile karşılaşılacağı kaçınılmazdır. Klasik iyileştirme tekniklerinden biri de dairesel kesitli borularda uygulanabilme imkânı olan dönmeli akış oluşturmaktır. Dönmeli akış koşulları, boru içerisine bükülmüş bant veya girişe akış yönlendirici eleman yerleştirerek sağlanabilmektedir. Yönlendirici elemanın bükülmüş bant, pürüzlendirilmiş boru veya içten engelli boru gibi diğer uygulamalara göre, akışkanın daha küçük yüzeyle teması nedeniyle, basınç kaybı ve çökme açısından avantajlı olacağı beklenir.

Diğer taraftan, ısı transferi iyileştirme uygulamalarında performansı düşüren başlıca etkenin klasik teknik için basınç düşüşü ve nanoparçacık ilavesi için çökme problemi olduğu bilinmektedir. Bu problemlerin çözümüne yönelik olarak, klasik teknikle nanoparçacık ilavesinin birleştirildiği karma bir teknik kullanarak basınç kaybını azaltıcı ve parçacık çökmesini geciktirici geometrik ve hidrodinamik iyileştirmeler yapılabilir.

Bu tezin amacı, ısı taşınım performansı düşük olan yüksek viskoziteli yağ akışkanlar için, klasik bir teknik olan akışkanın boru içerisinde döndürülmesi ile nanoparçacık ilavesinin birlikte uygulandığı karma bir yöntemin incelenmesidir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmalar deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Sayısal çalışmanın ilk aşamasından elde edilen bulgularla deneysel çalışmadaki hidrodinamik parametreler ve yine bu çalışmada kullanılan akış döndürücü elemanın geometrik parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler ile gerçekleştirilen deneysel çalışma, nanoakışkan termo-fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve ısı transferi deneyleri aşamalarından oluşmaktadır.

2.1. Deneysel Çalışma

Isı transferi deneylerinde akışkan tarafından çekilen net ısı, elektrikli ısıtıcıdan sağlanan ısının kayıp ısının çıkarılması sonunda kalan ısıya eşit olacaktır. Böylece,

$$q_{Net} = q_e - q_k \quad (1)$$

ve buradan da boru içerisinde akmakta olan akışkana geçen ısı Denklem (2) ile belirlenmektedir.

$$q_{Net} = \dot{m}c_p(T_{\zeta} - T_g) \quad (2)$$

Diğer taraftan, akışkanı sistemde dolaştırmak için gerekli olan pompalama gücü,

$$W_p = \dot{V}\Delta p \quad (3)$$

şeklindedir. Denklem (4) boru duvarlarından sisteme giren net ısı akısının yüzey alanı ile ilişkisini göstermektedir.

$$q''_{Net} = \frac{q_{Net}}{A_y} \quad (4)$$

Buradaki net ısı akısı aynı zamanda akışkana yüzeyden taşınım ile geçen ısı akısıdır. Bu ısı miktarı belirlenerek akış ısı taşınım katsayısı Denklem (5) yardımı ile belirlenir.

$$q_{Net}'' = h(T_d - T_a) \quad (5)$$

Ortalama Nu sayısı ise Denklem (6) ile

$$Nu = \frac{q_{Net}'' D}{(T_d - T_a)k} \quad (6)$$

tanımlanmıştır.

Bu durumda istenilen Nu sayısının hesaplanması, ısı akısı, boru duvar sıcaklığı ve akışkanın giriş ve çıkıştaki sıcaklıklarının ölçülmesi ile mümkün olabilmektedir. Burada her ne kadar giriş borusu kullanılmış ise de, akış yönlendirici elemanın etkisiyle hidrodinamik olarak tam gelişmişlik koşulu ortadan kalkmaktadır. Bu nedenle akış döndürücü elemanlı deneyler hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan akış koşulları altında gerçekleşmektedir. Akış yönlendirici etkilerinin olmadığı gelişmekte olan bölgelerde yerel Nu sayıları Kakaç vd. (2014) tarafından verilen Denklem (7) 'deki ifadede bulunmaktadır.

$$Nu_x = 1,6393 \left(\frac{x/r_0}{Pe} \right)^{-1/3} \quad (7)$$

Denklem (6) ve (7) birlikte incelendiğinde, deneysel sonuçlarla analitik denklemden elde edilen değerlerin uyum içerisinde olabilmesi için kanatçiksız boru sonuçları ile birebir örtüşmesi gerekmektedir. Bu durumun belirlenmesi için Tablo 1'deki gösterilen durumlar için deneyler yapılarak analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Düzenek doğrulama çalışmaları özeti

Kanatçık sayısı	Kanatçık burulma açısı	Kanatçık yüksekliği [$l^* = (r_0 - r)$]	Pe sayısı	Kütle oranı (Φ), [%]
0	Boş boru	$l^* = 0$	74936, 139494, 192373	0, 1, 2, 3

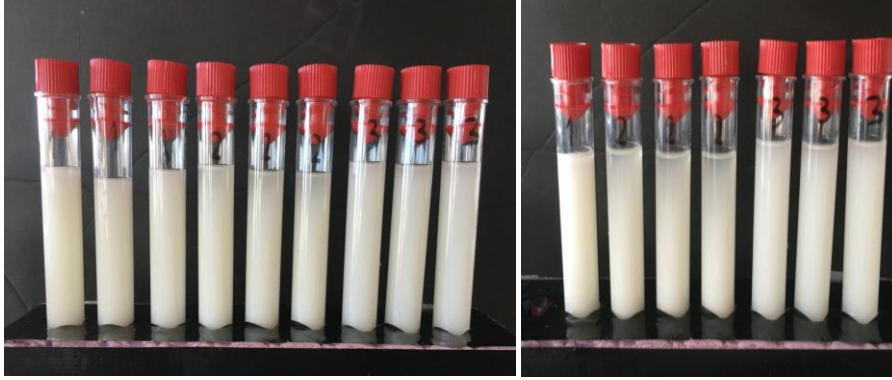
2.1.1. Nanoakışkan Hazırlama ve Termofiziksel Özelliklere ait Deneyler

Nanonakışkanın sentezlenmesi %1, %2 ve %3 kütle oranları için gerçekleştirilmiştir. Sentezleme işlemine ön sentezleme ve doğru yüzey aktif madde oranının belirlenmesi çalışmaları ile başlanmıştır. Yüzey aktif madde olarak literatürde yaygın olarak kullanılan oleik ve askorbik asit kullanılmıştır. Yapılan ön sentezleme çalışmaları sonucunda, kullanılan yüzey aktif madde kullanımında beklenen çökeltme süresini uzatma ve topaklanma oluşumunu azaltmasının aksine aktif madde katkısız duruma göre görece erken çökme gözlenmiştir. Gerçekleştirilen sentezleme işlemi sonunda uygulanan işlemle ilgili yüzey aktif madde ve çökeltme testi resimleri Şekil 2’de görülmektedir.

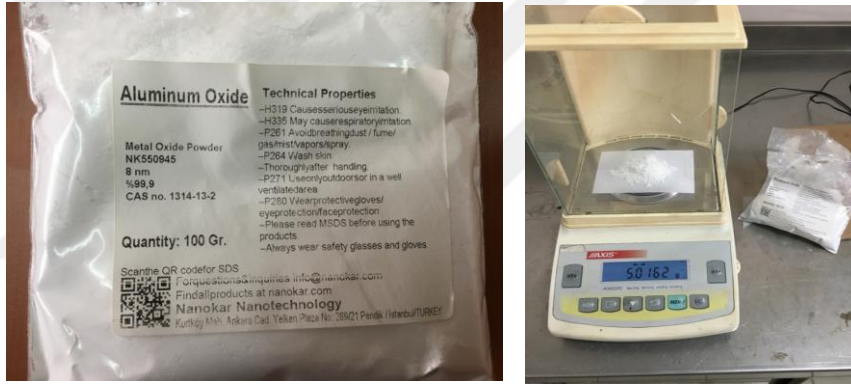
Yüzey aktif madde katkılı nanoakışkanda çökeltme süresi kısaldığı için sentezleme işlemine aktif madde kullanılmadan devam edilmiştir. İşlem, “iki adım yöntemi” kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki adım yönteminde öncelikle akışkan ve parçacık ayrı olarak temin edilir (ya da elde edilir). Daha sonra uygun (cihaz kapasitesine göre) karışım oranları belirlenir ve devamında mekanik ve ultrasonik karışıma tabii tutulur. Sentezleme işleminde baz akışkan olarak ısı transfer yağ (shell heat transfer oil s2) nanopartikül olarak ise Al_2O_3 (8 nm %99 saflık) kullanılmıştır. % kütle oranı belirlenen parçacık miktarı hassas teraziler yardımı ile tartılmış (Şekil 3) ve tek seferde yapılabilecek en yüksek kapasiteye göre (ultrasonik karıştırıcının sentez kapasitesi 600 ml) toz ve sıvı bir araya getirilmiştir. Daha sonra karışım manyetik karıştırıcıda yaklaşık olarak 30-45 dakika süre ile mekanik olarak karıştırılmıştır. Yapılan işlemlere ait fotoğraflar Şekil 4’te görülmektedir. Manyetik karıştırma işleminden sonra elde edilen karışım ultrasonik sonikatör (ultrasonik homojenizatör) cihazında 1 saat süre ile işleme tabii tutulmuştur. İşlem sırasında hem cihaz probunun hem de akışkanın zarar görmemesi için belirli aralıklarda sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.

Nanoakışkanların SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri, parçacıkların boyutu, morfolojisi, dağılımı, yoğunluğu ve yüzey özellikleri gibi kritik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Bu görüntüler, sentezlenen nanoakışkanın karakterizasyonunda önemli bir rol oynar, çünkü parçacık boyutu ve şekli gibi özellikler, nanoakışkanın stabilitesi, performansı ve uygulanabilirliği üzerinde doğrudan etkili olabilir. Ayrıca, SEM görüntüleri kirlilik veya kontaminasyonun varlığını tespit etmek için de kullanılabilir, bu da nanoakışkanın kalitesini ve kullanılabilirliğini belirlemede önemli

bir faktördür. Tez kapsamında sentezlenen nanoakışkana ait SEM görüntüleri Şekil 5'te görülmektedir.



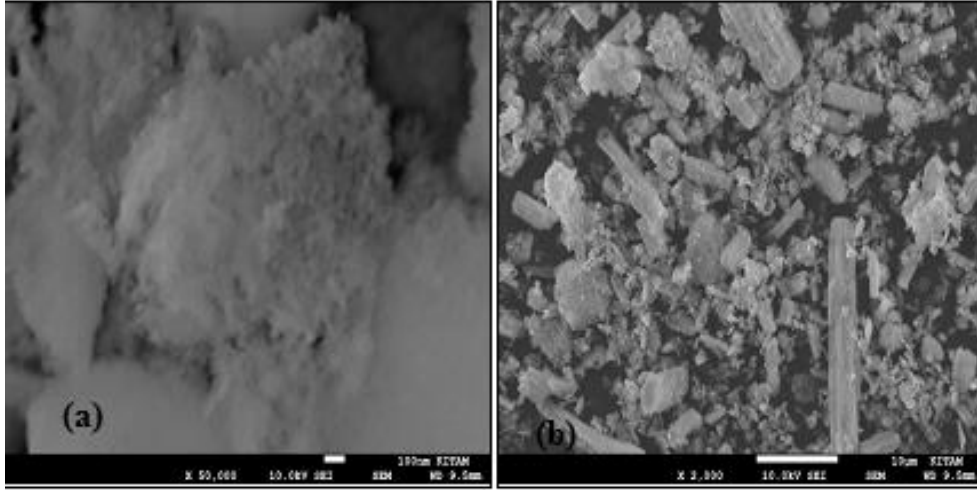
Şekil 2. Nanoakışkan sentezlemesi; ön sentezleme sonucu çökeltme testleri



Şekil 3. Sentezlemede kullanılan; (a) nanoparçacık ve (b) hassas terazi



Şekil 4. Manyetik ve Ultrasonik karıştırıcı görüntüleri



Şekil 5. Nanoparçacıkların SEM görüntüleri; (a) 50x ve (b)2x

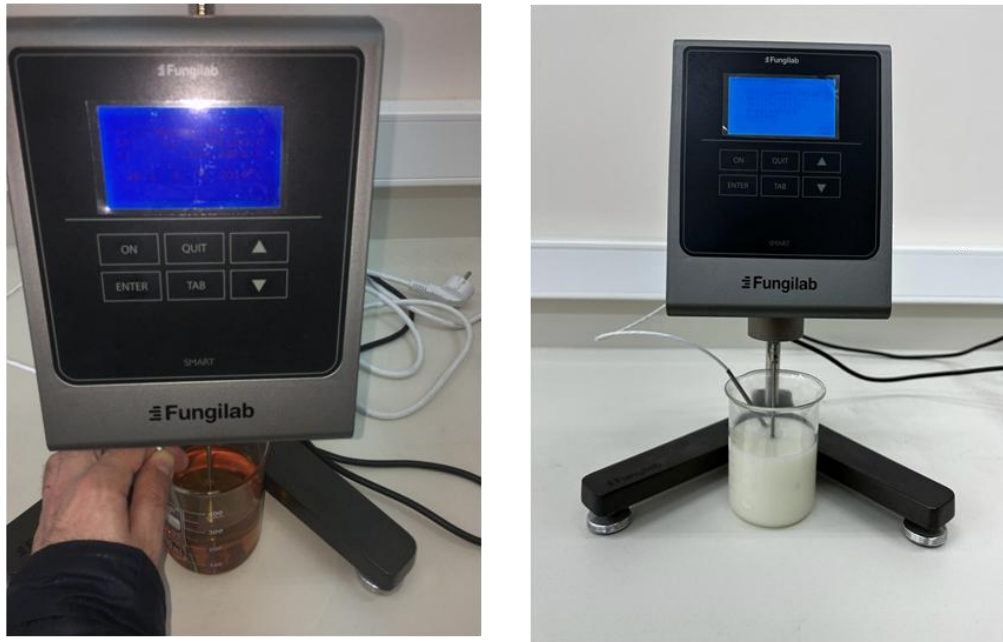
Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi, genellikle termal iletkenlik, viskozite, yoğunluk, özgül ısı ve yüzey gerilimi gibi ana parametrelerin incelenmesini içerir. Bu özellikler, nanoakışkanların endüstriyel ve bilimsel uygulamalarında performanslarını belirlemede kritik öneme sahiptir. Örneğin, termal iletkenlik, nanoakışkanın ısı transfer yeteneklerini etkilerken, viskozite ve yoğunluk, akışkanın akışkanlık özelliklerini belirler. Özgül ısı, nanoakışkanın enerji depolama ve taşıma kapasitesini etkilerken, yüzey gerilimi, nanoakışkanın yüzey etkileşimlerini ve dispersiyon stabilitesini belirler. Bu termofiziksel özelliklerin doğru bir şekilde belirlenmesi, nanoakışkanların tasarımı, sentezi ve optimize edilmesi sürecinde kritik bir rol oynar.

Hazırlanan nanoakışkana ait termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi çalışmaları, farklı sıcaklıklarda tekrarlanarak tamamlanmıştır. İlk olarak nanoakışkanın ısı iletim katsayısı belirlenmiştir. Bu ölçüm için ilgili literatürde de yaygın kullanımı rapor edilmiş olan KD2 Pro cihazı kullanılmıştır. Ölçümler üç farklı sıcaklık değerinde tekrarlanmıştır. Aynı cihaz üzerinde, bir özel sensör yardımı ile akışkanın özgül ısı ölçümü de gerçekleştirilmiştir. Cihaza ve bir ölçüme ait fotoğraflar Şekil 6’da görülmektedir. Bu ölçümlerden elde edilen akışkanın ısı iletim katsayısını ve özgül ısının sıcaklıkla değişimi veren grafikleri sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9 ‘da görülmektedir. Akışkanın kinematik viskozitesi yine literatürde oldukça sık kullanıldığı rapor edilmiş ölçü aletlerinden biri olan Fungilab Smart cihazı ile belirlenmiştir. Shell tarafından üretilen yağa ait katalog değerleri de dikkate alınarak nanoakışkanın baz kısmını oluşturan yağın viskozitesi ölçülmüş ve

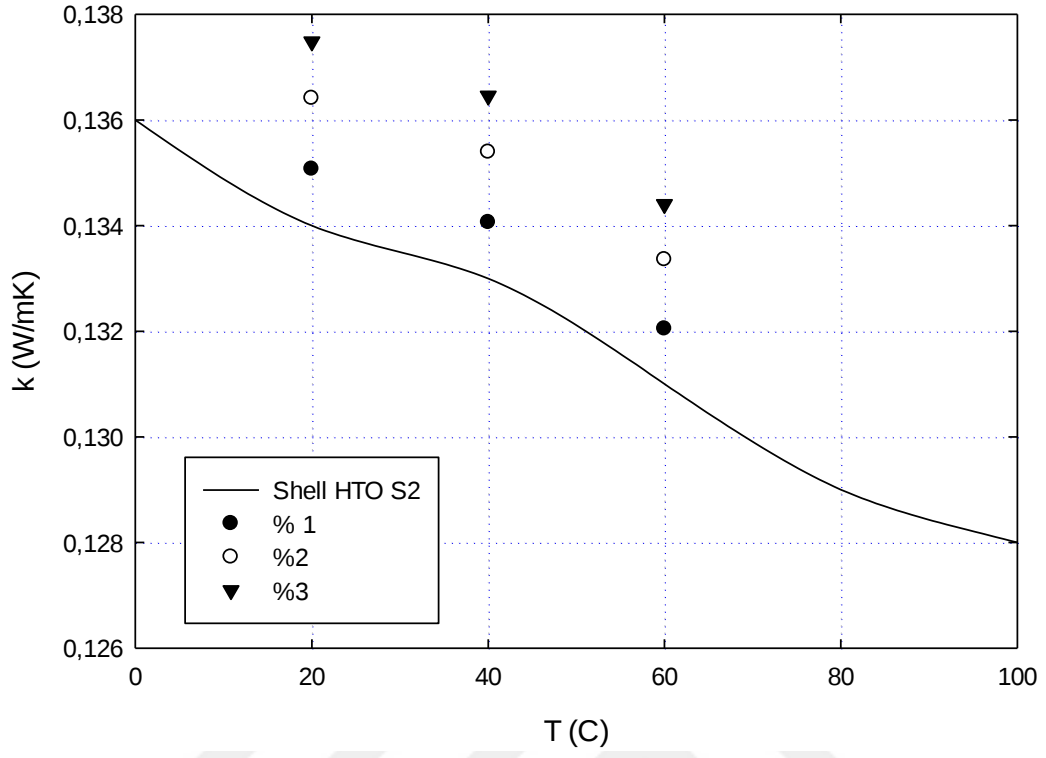
cihazın doğruluğu sağlanmıştır. Ölçümde kullanılan cihazın fotoğrafı ve örnek bir ölçüm ekranı Şekil 7’de ve Şekil 10’da nanoakışkanın kinematik viskozitesinin sıcaklıkla değişimi görülmektedir.



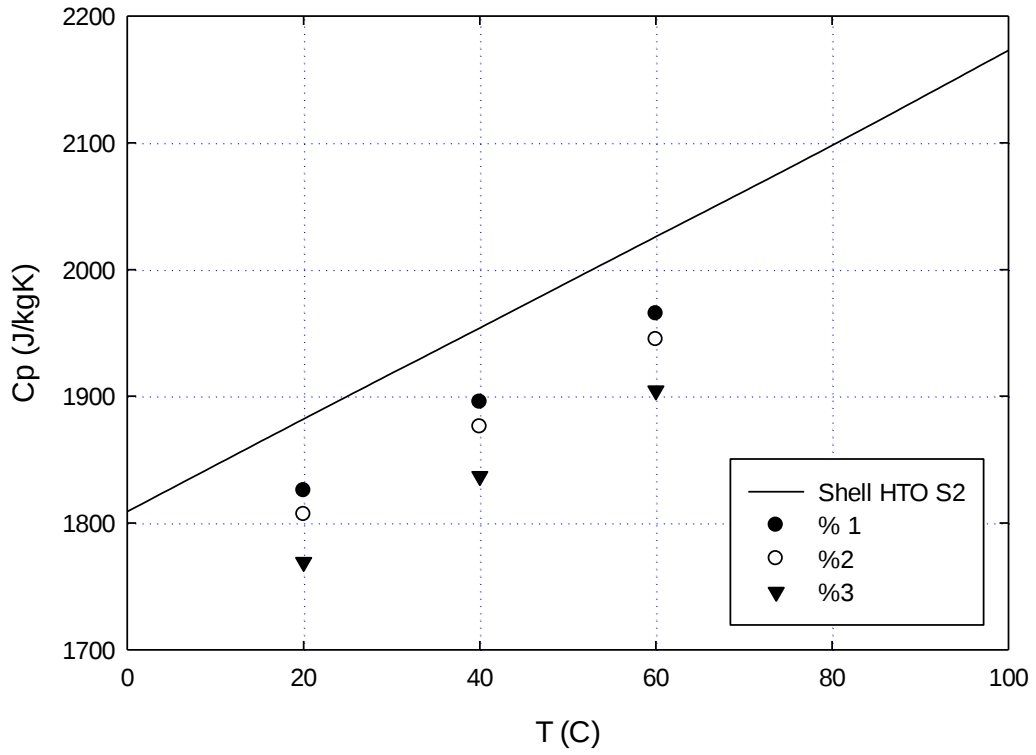
Şekil 6. Isı iletim katsayısı ve özgül ısı ölçüm cihazları



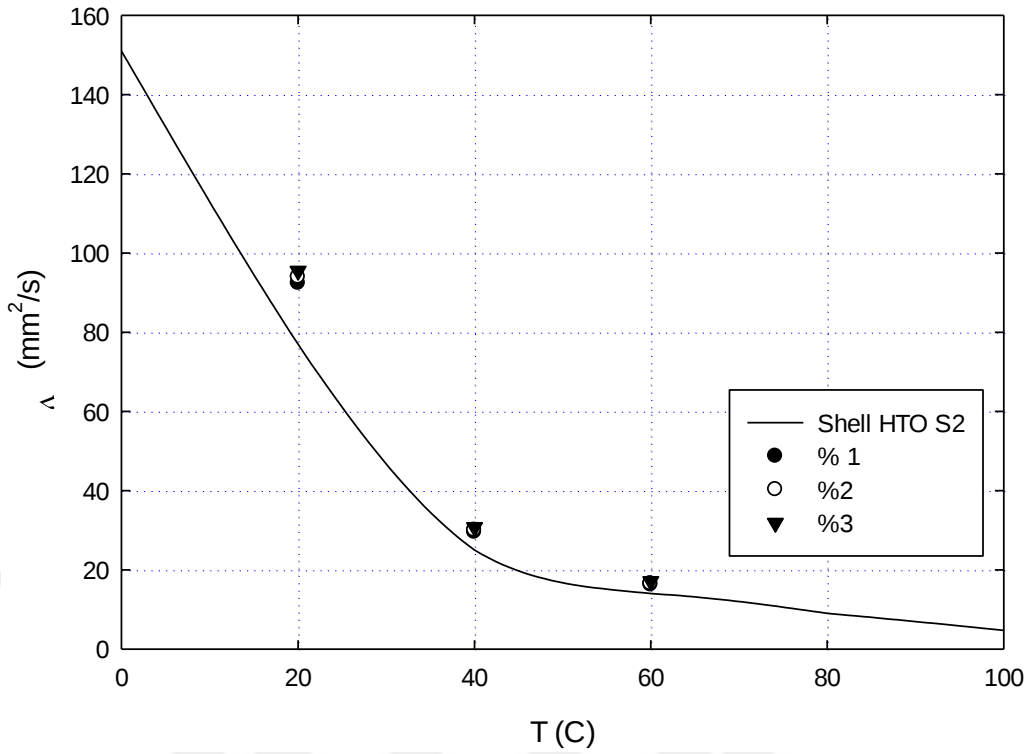
Şekil 7. Kinematik viskozitenin belirlenmesi ölçüm aleti



Şekil 8. Isı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi



Şekil 9. Özgül Isının sıcaklıkla değişimi



Şekil 10. Kinematik Viskozitenin sıcaklıkla değişimi

2.1.2. Deney Düzeneği ve Parametreler

Deneyleerin gerçekleştirildiği düzeneğin şematik resim Şekil 11’de fotoğrafı ise Şekil 12’de görülmektedir. Düzenekteki deney borusu girişinde yer alan akış yönlendirici eleman 3 boyutlu yazıcıda ABS filament malzemeden üretilmiştir. Deneyde kullanılan akışkan kapalı devre olarak bir pompa yardımı ile sistemde dolaşmaktadır. Deneysel incelemeye esas olacak ölçümleri gerçekleştirmek için deney borusu dış yüzeyi boyunca eşit aralıklarda olacak şekilde 10 ayrı noktada boru yüzey sıcaklığı, akışkanın boruya giriş sıcaklığı, borudan çıkış sıcaklığı ve ortam sıcaklığı ısıl-çiftler (termo-eleman) yardımı ile ölçülmüştür. Akışkanın çıkış sıcaklığı, boru çıkışında amacına uygun olarak tasarlanmış bir karışım odasında karıştırıldıktan hemen sonra ölçülmüştür. Akış debisi için hidrodinamik tam gelişmiş bölgede belirlenen iki nokta arasındaki fark basıncından yararlanılarak bu bölgede laminer akış için geçerli olan $fRe = 64$ ifadesi kullanılmıştır. Boru akışında iki nokta arasındaki basınç kaybı için,

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (8)$$

ifadesinde $f = 64/Re$ ve Re sayısı yerine de $Re = \rho V D / \mu$ yazılarak,

$$\Delta P = \frac{64\mu}{\rho V D} \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (9)$$

elde edilir ve buradan ortalama hız ifadesi,

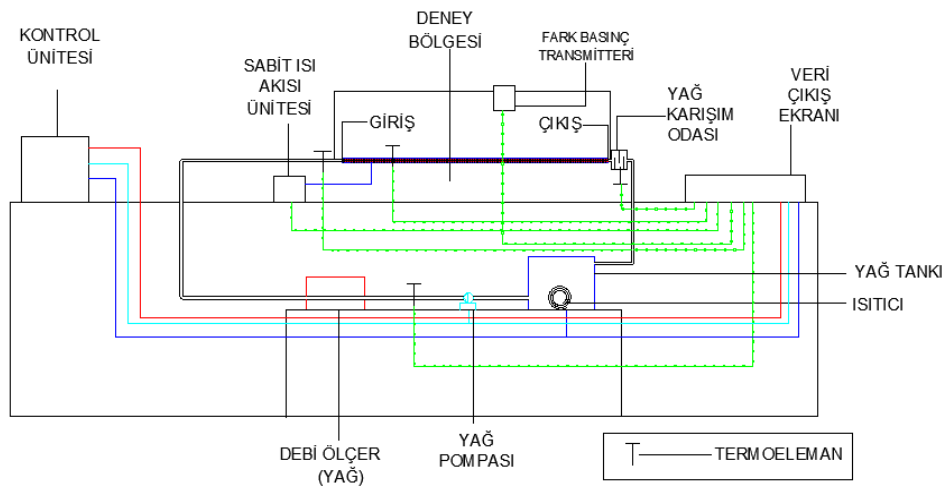
$$V = \frac{\Delta P D^2}{32\mu L} \quad (10)$$

ve debi,

$$\dot{m} = \rho V A \quad (11)$$

olarak yazılır.

Deney borusu boyunca gerçekleşen basınç düşüşü, giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilen basınç prizleri yardımı ile fark basınç sensörü kullanılarak ölçülmüştür. Debi ölçümünü doğrulamak amacıyla ayrıca ölçekli kap ile de debi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sıcaklıklar, basınç farkı ve debi dijital kayıt cihazları yardımı ile otomatik olarak belirlenen referans zaman aralıklarında kayıt altına alınmıştır.



Şekil 11. Deney düzeneğinin şematik resmi



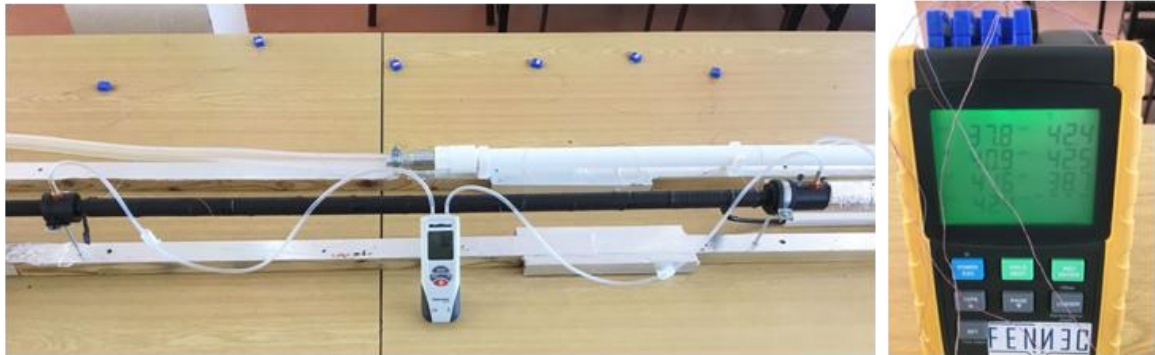
Şekil 12. Deney düzeneği

Deney düzeneği, çalışma bölgesi ve ön ısıtmanın gerçekleştiği hazırlık bölgesi olarak iki bölgeden oluşmaktadır. Hazırlık bölgesinde ısı transfer yağı belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılarak pompa ile test bölgesine basılmaktadır. Test bölgesi, iç çapı 20 mm ve uzunluğu 1 m olan bakır bir borundan oluşmakta olup sabit ısı akısını sağlamak için bu borunun dış yüzeyine ısıtıcı kablolar sarılmaktadır. (Şekil 13)



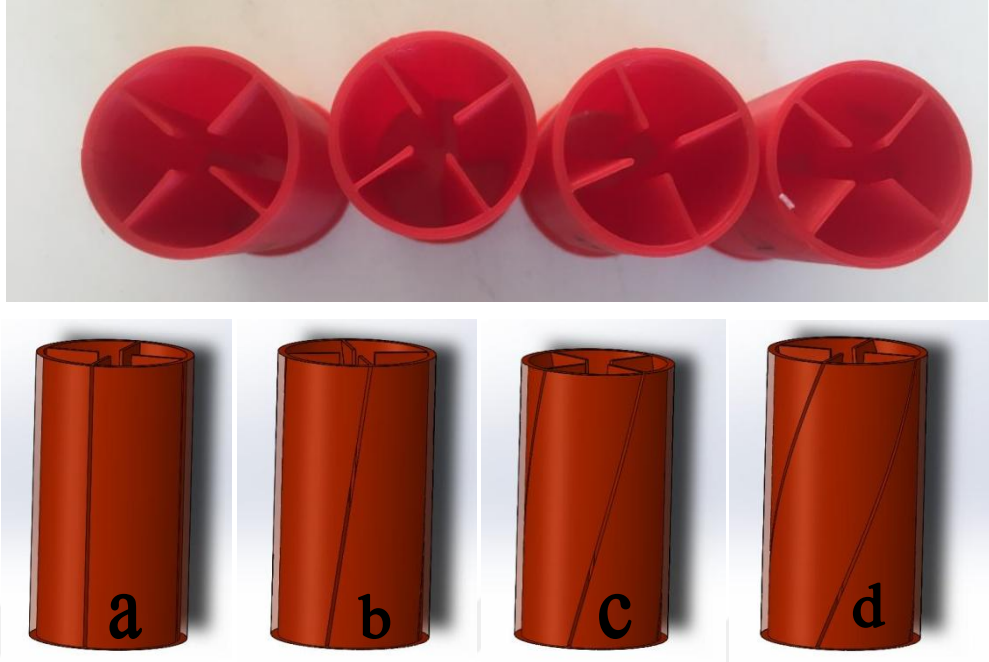
Şekil 13. Test bölgesi ısıtıcı kabloları

Test bölgesini oluşturan bakır borunun dış yüzeyinde giriş ve çıkıştan 20 mm boşluk (montaj ağızları) bırakılarak eşit aralıklar ile belirlenmiş 6 noktadaki yüzey sıcaklıkları T tipi termo-elemanlara bağlı 10 kanallı bir veri kaydedici (datalogger) kullanılarak, test bölgesinin giriş ve çıkışı arasındaki basınç elektronik manometre ile ölçülmüştür. Sıcaklık ve basınç ölçüm noktaları Şekil 14’te görülmektedir. Test bölgesi girişinde hidrodinamik olarak tam gelişmişlik koşullarının sağlanması için test borusu ile aynı çapta ve 2 metre uzunluğunda bir giriş borusu mevcuttur. Bu bölgenin test bölgesi ile bağlantısı özel olarak tasarlanan rakorlar ile çap değişimi olmadan sağlanmaktadır. Akış döndürücü eleman test borusu girişindeki rakorun içine yerleştirilmiş durumdadır. Döndürücü eleman değişimi, sistemin durdurulup yağın belirli bir noktaya transferi sonrasında sağlanmaktadır.



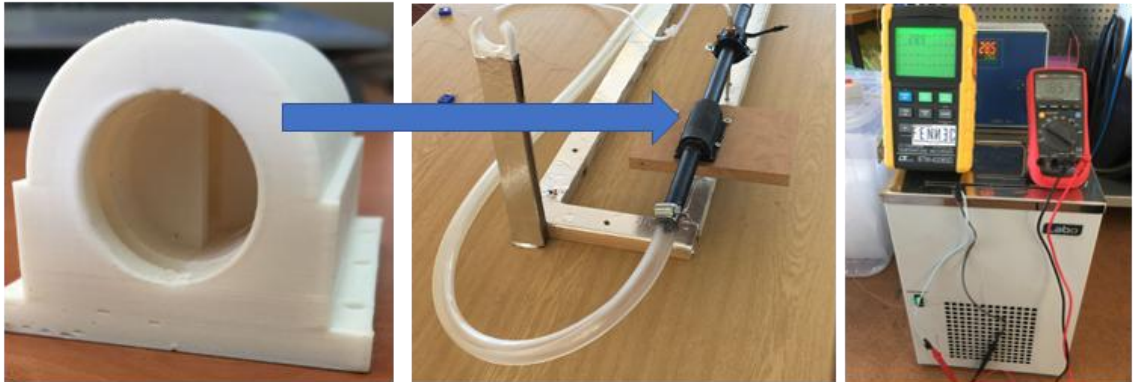
Şekil 14. Sıcaklık ve basınç ölçüm sistemi ve ölçüm noktaları

Şekil 15’te üç boyutlu yazıcıda ABS malzemeden üretilen akış döndürücü elemanın dört farklı durumu için tasarım modellemeleri ve üretilen ürünlerin fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 15. Akış döndürücü elemanlar, 4 kanat $l^* = 0,75r_0$, a) 0° b) 30° c) 60° d) 90° burulma açısı

Literatürdeki benzer çalışmalarda çıkışta ortalama akışkan sıcaklığının (bulk temperature) belirlenmesi için mevcut olan bir uygulama burada da kullanılmaktadır. Buna göre, akışı karıştırarak ortalama sıcaklık ölçümü yapılabilecek bir oda tasarlanarak üç boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Söz konusu karışım odası ve sistemdeki konumunun fotoğrafı Şekil 16'da görülmektedir.



Şekil 16. a) Karışım odası, b) düzenekteki yeri

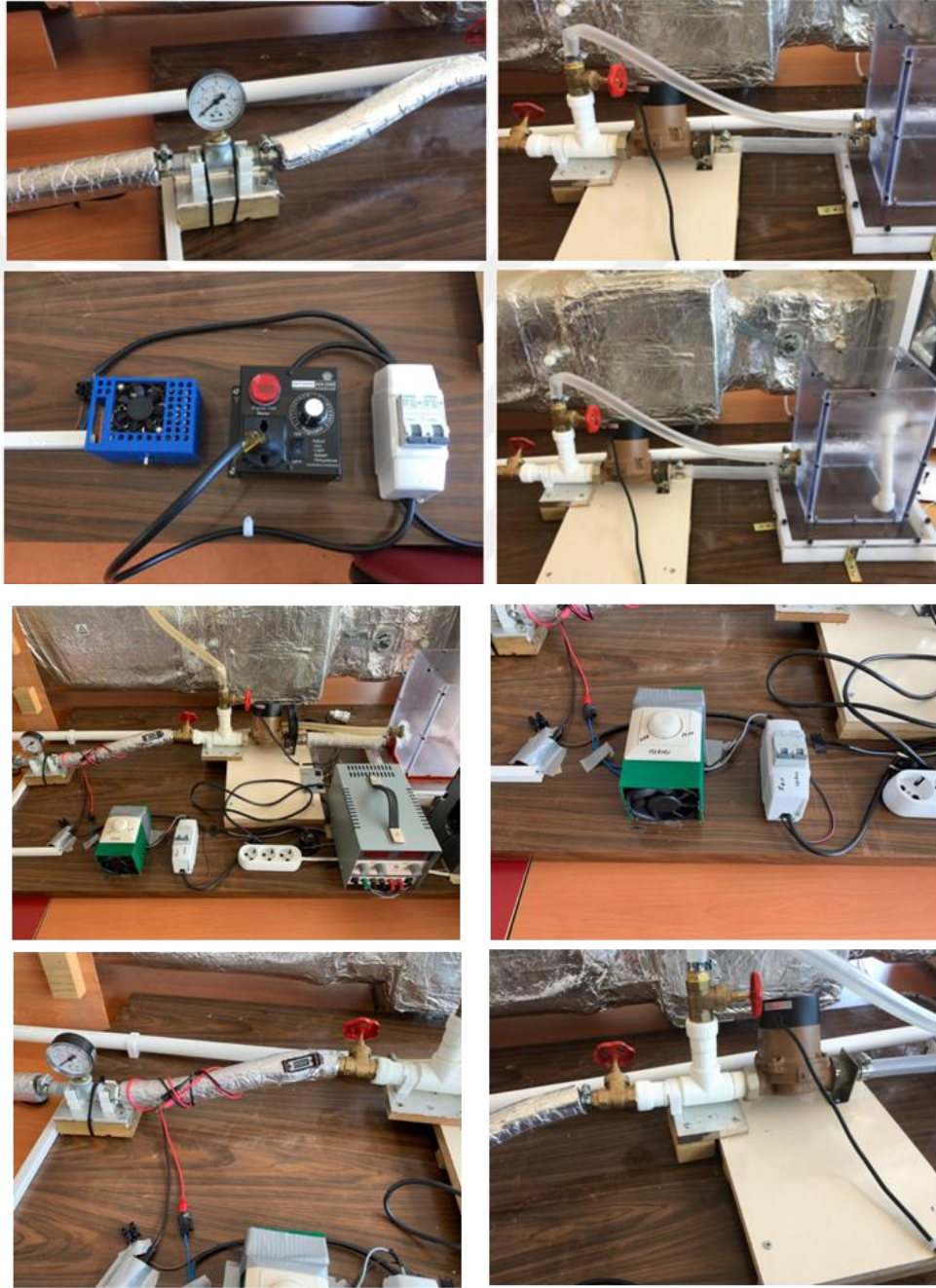
Test borusundan çıkan ısı transferi yağı kapalı devre sistemde tekrar tanka dönmekte ve işlem deney süresince tekrarlanmaktadır. Akışın termal olarak kararlı duruma gelişi ve deney ölçümlerine başlanması işleminin takibi tank çıkışındaki ölçüm sistemlerince kontrol edilmekte ve deney ölçümleri bu şekilde tamamlanmaktadır. Tanka ve dönüş hattına ait fotoğraflar Şekil 17’de görülmektedir.



Şekil 17. Tank bölgesi ve dönüş hattı

Yağ sirkülasyonunun istenilen debi ile sağlanması için pompa üzerindeki kontrol kademesi ve sisteme eklenmiş olan iki vanadan yararlanılmaktadır. Vanalardan biri ile baypas yapılarak ana hat üzerindeki basınç artışının önlenmesi ve tankta meydana gelmesi muhtemel soğutucu devre üst seviyesinin altına yağ düşmesi sorunları ile karşılaşılmaması sağlanmaktadır. Benzeri sistemlerde yağa hava karışması (boru çapı kadar akışın olmaması) durumunda pompadaki basınç ile akışkan hava ile birleşmekte ve yağ içine haps olunmuş hava kabarcıkları akışkanın içerisine dağılmaktadır. Böyle durumlarda belirli bir süre beklenerek havanın çıkışı gözlemlenmesi gerekmektedir. Bu ve benzeri durumlara düzenek ilk kurulma aşamasında yapılan ön deneyler esnasında rastlanmış ve sistem üzerinde gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. Ana hat üzerindeki toplam basınç sistem girişime yerleştirilen kadranlı manometre ile ölçülmüştür. Bu sayede sistemde montaj amacıyla kullanılan ekipmanlarda meydana gelecek olası sorunların önüne geçilmesi

sağlanmıştır. Ayrıca boru giriş bölgesinde okunan fark basınç manometresinin maksimum giriş basıncı değerine ulaşmaması da bu ölçüm ile sürekli olarak kontrol edilmiştir. Düzenek girişinde yer alan kontrol elemanları (manometre, baypas hattı, güç kontrol üniteleri ve iki farklı güç kaynağı) ve ölçüm sistemlerine ait görseller Şekil 18’de sunulmaktadır.



Şekil 18. Düzenek giriş bölgesindeki kontrol elemanları

2.1.3. Baz Akışkanlı Deneyler

Yapılan çalışmaların ilk kısmında nanoparçacık ilavesi olmayan deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda yapılan çalışmalar, öncelikle kendi içinde akışkana uygulanan dönme etkisinin incelenmesi amacına yöneliktir ve bu deneyler nanoakışkanlı deneylere referans olarak sonuçların analizi için kullanılmaktadır. Yapılan çalışmaların özeti Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Baz akışkan deney parametreleri

Kanatçık sayısı	Kanatçık burulma açısı	Kanatçık yüksekliği [$l^* = (r_0 - r)$]	Pe sayısı
	Boş boru	$l^* = 0$	74936, 139494, 192373
2	0°	$l^* = 0,25r_0$	65550, 122880, 170000
		$l^* = 0,75r_0$	33201, 103290, 157677
	30°	$l^* = 0,25r_0$	40172, 128592, 164920
		$l^* = 0,75r_0$	33728, 66805, 142879
	60°	$l^* = 0,25r_0$	54990, 94966, 155472
		$l^* = 0,75r_0$	55926, 146300, 159984
	90°	$l^* = 0,25r_0$	53186, 122305, 152628
		$l^* = 0,75r_0$	26500, 91196, 128734
4	0°	$l^* = 0,25r_0$	66960, 123264, 168441
		$l^* = 0,75r_0$	43830, 109275, 134055
	30°	$l^* = 0,25r_0$	35904, 113016, 144228
		$l^* = 0,75r_0$	48719, 62103, 132264
	60°	$l^* = 0,25r_0$	64678, 99404, 136175
		$l^* = 0,75r_0$	58905, 113750, 115168
	90°	$l^* = 0,25r_0$	45790, 85540, 141168
		$l^* = 0,75r_0$	80813, 135828, 175296

2.1.4. Nanoakışkan Deneyleri

Daha önce sentezleme aşamaları anlatılarak elde edilen akışkan aynı deney düzeneğinde aynı geometrik parametreler ve nanoparçacığın farklı kütle oranları için tekrarlanmıştır. Burada akışkanın çökelme ve topaklanma sorunları ile karşılaşmamak için her deney günü sonunda akışkan tanka geri toplanıp yeni deney gününde tekrar mekanik karıştırmaya tabi tutulmuştur. Akışkan sisteme gönderilmeden önce sistemde bulunan akış döndürücü eleman sökülerek parçacık birikimi ve akış döndürücü kanatlarında deformasyon kontrolü yapılmıştır. Tablo 3'te nanoakışkanlı olarak gerçekleştirilen deney durumlarının özeti sunulmaktadır.

Tablo 3. Nanoakışkanlı çalışma durumlarının özeti

Kanatçık sayısı	Kanatçık burulma açısı	Kanatçık yüksekliği $[l^* = (r_0 - r)]$	Pe sayısı	Kütle oranı (Φ), [%]
2	0°	$l^* = 0,25r_0$	59729, 72146	1
			44492, 42254	2
			28287, 60699	3
		$l^* = 0,75r_0$	78532, 100634	1
			52936, 71964	2
			52590, 55935	3
	30°	$l^* = 0,25r_0$	51456, 82877	1
			40020, 63391	2
			25719, 61765	3
		$l^* = 0,75r_0$	70300, 76102	1
			34131, 62010	2
			39377, 44383	3
	60°	$l^* = 0,25r_0$	68400, 76261	1
			49133, 50524	2
			36540, 65322	3

Tablo 3'ün devamı

		$l^* = 0,75r_o$	26408, 61000	1
			34080, 48648	2
			48263, 51613	3
	90°	$l^* = 0,25r_o$	55121, 89694	1
			28897, 43963	2
			30590, 59574	3
	90°	$l^* = 0,75r_o$	72311, 97481	1
			40910, 42073	2
			44199, 60614	3
4	0°	$l^* = 0,25r_o$	63589, 73746	1
			61750, 66377	2
			51050, 62471	3
	0°	$l^* = 0,75r_o$	44616, 78161	1
			54243, 66206	2
			49108, 54114	3
	30°	$l^* = 0,25r_o$	69358, 82366	1
			54243, 66206	2
			48063, 64521	3
	30°	$l^* = 0,75r_o$	28795, 72115	1
			56103, 64312	2
			40494, 55375	3
	60°	$l^* = 0,25r_o$	70098, 83248	1
			47184, 76063	2
			47782, 63520	3
	60°	$l^* = 0,75r_o$	48314, 56979	1
			61404, 70740	2
			60056, 64316	3
	90°	$l^* = 0,25r_o$	58010, 75748	1
			59537, 67093	2
			55767, 57416	3

Tablo 3'ün devamı

			60227, 77810	1
		$l^* = 0,75r_o$	46730, 61640	2
			40924, 47984	3

2.1.5. Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışmalarda, ölçüm cihazları ve sistemlerin kullanılmasıyla elde edilen verilerdeki belirsizliklerin dikkate alınması önemlidir. Bu belirsizlikler genellikle iki türde olabilir.

Birincisi, sistematik belirsizliklerdir. Bu belirsizlikler, tekrarlanan ölçümlerde aynı miktarlarda ortaya çıkar ve uygun bir kalibrasyon işlemi ile düzeltilebilirler. İkinci belirsizlikler ise rastgele oluşan düzensiz belirsizliklerdir ve bu belirsizlikler her ölçümde farklılık gösterir ve düzeltilemezler.

Deneyisel çalışmalar sırasında, ölçülen ve hesaplanan parametreler için belirsizlik değerlerinin belirlenmesinde literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan hesaplama yöntemlerinden biri olan ve McDonald (1994) tarafından, önerilen bir hesaplama yöntemi, bu belirsizlik değerlerini hesaplamak için kullanılmıştır. Denklem (16)' da verilen bu yöntem, deneyde ölçülen x_i bağımsız değişkenlerine bağlı olarak hesaplanan herhangi bir R sonuç değerini matematiksel olarak belirtir.

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (12)$$

Deneyisel ölçüm sonuçlarının hesaplanmasında kullanılan ölçüm aletleri ile okunan değerlere ait belirsizlikler Denklem (16) ile hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler, Re sayısı için $\Delta R = \%3,25$, Nu sayısı için $\Delta R = \%4,3$ ve Pr sayısı için $\Delta R = \%3,5$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler hesaplanırken kullanılan ölçüm parametrelerine ait belirsizlikler Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4. Ölçüm cihazlarının belirsizlikleri

Cihaz	Ölçüm Aralığı	Ölçülen Büyüklük	Belirsizlik (%)
Termoeleman	20-80 °C	Sıcaklık	0,1
Multimetre 1	0-2000 mA	Akım	0,2
Multimetre 2	0-150 ohm	Direnç	0,2
Manometre	0-10 mbar	Basınç	0,1
NTC Sıcaklık Sensörü	20-80 °C	Sıcaklık	0,05
KD2 Pro	0-0,15 W/mK	Isı İletim Katsayısı	10
KD2 Pro	1600-2200 kJ/kgK	Özgül Isı	10
Viskozimetre	10-170 mm ² /s	Viskozite	5

2.2. Sayısal Çalışma

Problemin sayısal analizi için ANSYS FLUENT paket programı kullanılmıştır. Akış ve ısı transferi problemi için momentum ve enerji denklemleri üç boyutlu olarak kararlı durum için sıkıştırılamaz akışta ve duvarda sabit ısı akısı sınır koşulu altında laminar akış rejiminde SIMPLE algoritması kullanılarak çözülmüştür. Çözüm hem baz akışkanlı hem de nanoakışkanlı durumlar için gerçekleştirilmiştir. Baz akışkanla yapılan çözümde akışkanın termofiziksel özellikleri kullanılmıştır. Nanoakışkanlı durum için yapılan çözümde ise literatürde kabul görmüş tek fazlı model yaklaşımıyla elde edilmiş termofiziksel özellikler kullanılmıştır. Yakınsama kriteri olarak her bir değişken için R değeri olarak ifade edilen kalana (Residual) bakıldı ve bu değer 10^{-6} alınmıştır. Sayısal sonuçlar arasından belirlenen parametrik değerler (Örneğin Tablo 1'deki Re sayıları, hacim oranları, Pr sayıları arasından) için deneyler gerçekleştirilmiştir.

Nanoakışkanların ısı iletkenliği için çoğu probleme özel olan ve yakın tarihlerde önerilmiş çok sayıda teorik model vardır ve bu modellerin birbiri ile çeliştiği de rapor edilmektedir. Bu nedenle teorik modellerdeki fiziksel özellikler ile elde edilen sonuçlar daha sonra deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak güncelleneceği için ilk olarak elektrik iletkenliği için geliştirilmiş ve daha sonraları ısı iletkenlik için kullanılmış olup bilinen bir denklem olan Maxwell denklemi kullanılmıştır. (Maxwell, 1873). Daha sonra nanoparçacığın geometrik şekli için bir faktörü de içeren denklemin küresel faktör için Maxwell denklemi ile aynı sonucu verdiği gösterilmiştir (Hamilton & Crosser, 1962). Bunları izleyen çalışmalarda, Brownien hareketi ve mini taşınım gibi ilave faktörleri de

içeren modeller geliştirilmiştir. Ancak söz konusu modellere ilişkin kısıtlar, tez kapsamındaki planlanan çalışmalar ile bire bir eşleşemeyeceği için daha genel olan Maxwell'in (1892) Denklem (13) deki ısı iletkenlik ifadesi kullanılmıştır.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\Phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\Phi} \quad (13)$$

Viskozite için Denklem (14) de verilen ve Galanis & Roy (2004) tarafından Al_2O_3 /etilen glikol nanoakışkanı için önerilen ifade kullanıldı.

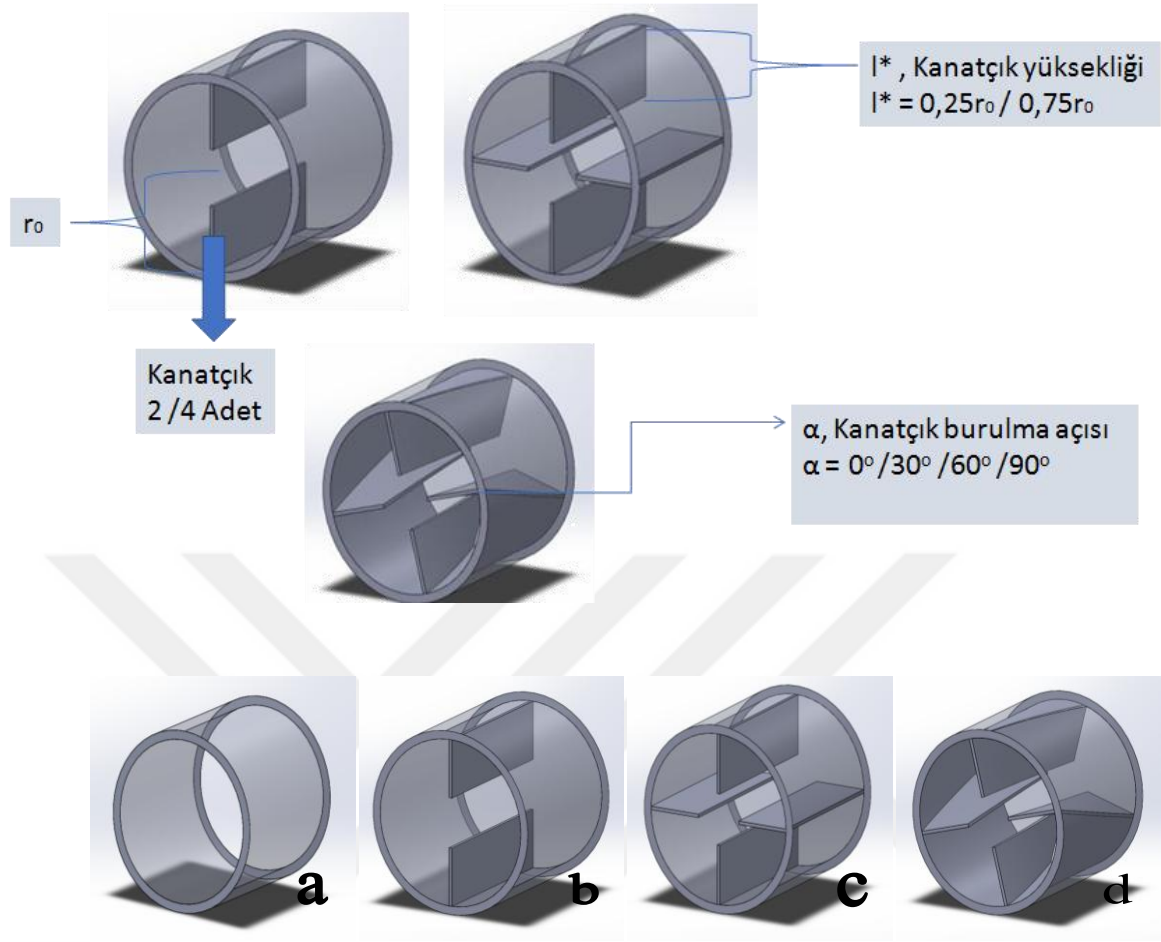
$$\mu_{nf} = (1 - 0.19\Phi + 306\Phi^2) \mu_f, \quad (14)$$

Yoğunluk için Pak vd. (1998) tarafından ve özgül ısı için Xuan & Roetzel (2000) tarafından verilen sırasıyla Denklem (15) ve Denklem (16) kullanıldı.

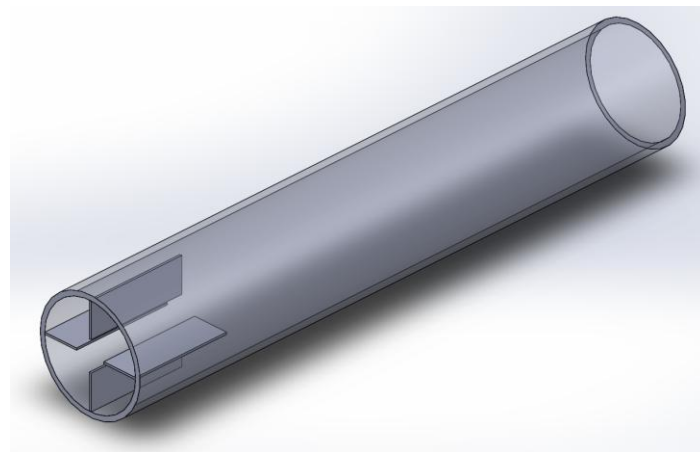
$$\rho_{nf} = \rho_p \Phi + \rho_f (1 - \Phi) \quad (15)$$

$$c_{p,nf} = \left(\frac{(1-\Phi)\rho_f c_{p,f} + \Phi\rho_p c_{p,p}}{\rho_{nf}} \right) \quad (16)$$

Sayısal çalışmanın ilk aşamasında deney geometrisinin katı modelleme programları kullanılarak modellenmesi yapılmıştır. Daha sonra elde edilen modelin çözücüye uygun hale getirilerek geometrik tanımlamaların yapılması tamamlanmıştır. Deney borusunun uzunluğu $L = 1$ m iç çapı $D = 20$ mm olarak belirlenmiştir. Çözüm bölgesinde akışı yönlendirmek için kullanılan elemanın kanatçıkları ve bu kanatçıkların farklı burulma açıları sayısal olarak farklı geometriler için tasarlanmıştır. Tasarlanan kanatçık, burulma açısı ve kanatçık yüksekliği farklı parametreler için Şekil 20' de verilmektedir. Nanoakışkanlı durumlar da dâhil olmak üzere toplam 48 farklı durum için ayrı çözücüler hazırlanarak program koşturulmuştur. Her bir çözücü içerisinde farklı Re ve Pr sayıları akış ve akışkan parametresi olarak kullanılmıştır. Şekil 21 deki katı model görselinde borunun yönlendirici elemanla birleştirilmiş durumu görülmektedir.



Şekil 19. Akış döndürücü, a) $l = 0$ b) $l = 0,75 / 2$ kanat c) $l = 0,75 / 4$ kanat d) $l = 0,75 / 4$ kanat 30° burulma açısı



Şekil 20. Sayısal çözümleme için boru-döndürücü eleman birleşik görüntüsü

Sayısal çalışma kapsamında, silindirik boruda (r, θ ve z ekseninde) akış ve ısı transferini temsil eden momentum ve enerji denklemleri (Denklemler (17-21)) çözülmüştür.

$$\begin{aligned}
 r: & \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + u \frac{\partial v_r}{\partial x} - \frac{v_\theta^2}{r} \right) \\
 = & -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right] \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \theta: & \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + u \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right) \\
 = & -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial x^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] \quad (18)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z: & \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v_r \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\
 = & -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Enerji, } & \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \\
 = & k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \Phi \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi = & 2\mu \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r \right) \right]^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \right)^2 \right] \quad (21)
 \end{aligned}$$

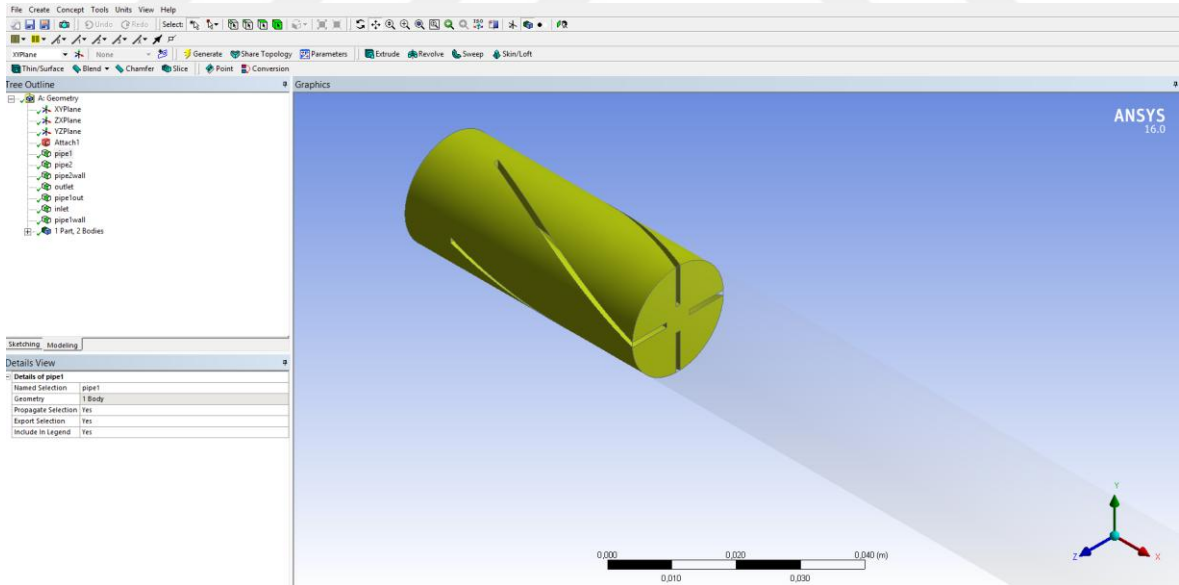
Baz akışkanlı çözüm için gerçekleştirilen sayısal çalışmada (21) numaralı denklemdaki viskoz yayılım ifadesi çözüme dâhil edilmiştir. Viskoz yayılım içeren çözüm bulguları ısı transferi sonuçları üzerinde ortalama Nu sayısı cinsinden, viskoz yayılımın içerilmediği durumuna göre görünür bir fark oluşturmaması nedeniyle sayısal çalışmaya viskoz yayılım terimi dâhil edilmeden devam edilmiştir.

Problemın sınır koşulları; girişte hidrodinamik olarak tam gelişmiş hız profili, duvarlarda kaymama sınır koşulu ve çıkışta çıkış sınır koşulu (“outflow”), ısı olarak ise girişte sabit sıcaklık duvarda ise sabit ısı akısı koşulu kullanılmıştır. Tanımlanan sınır koşulları Denklem (22,23) de verilmektedir.

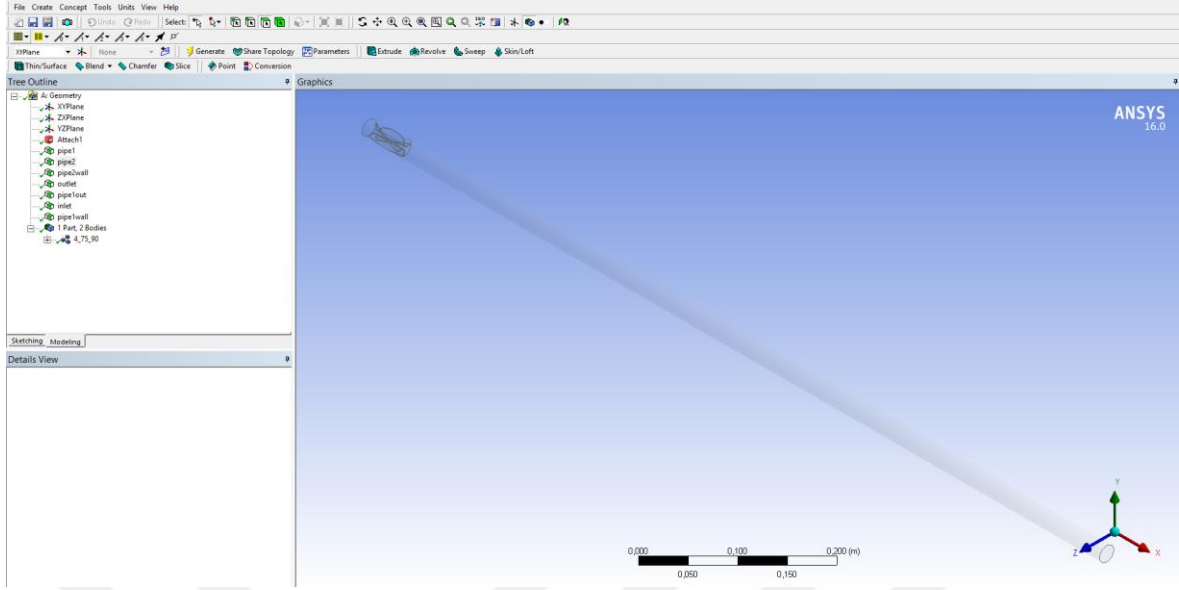
$$x = 0'da, \quad U(r) = 2U_m \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \text{ ve } T(r) = T_0 = \text{sabit} \quad (22)$$

$$r = r_0'da, \quad q''(r_0) = q_0'' = \text{sabit} \quad (23)$$

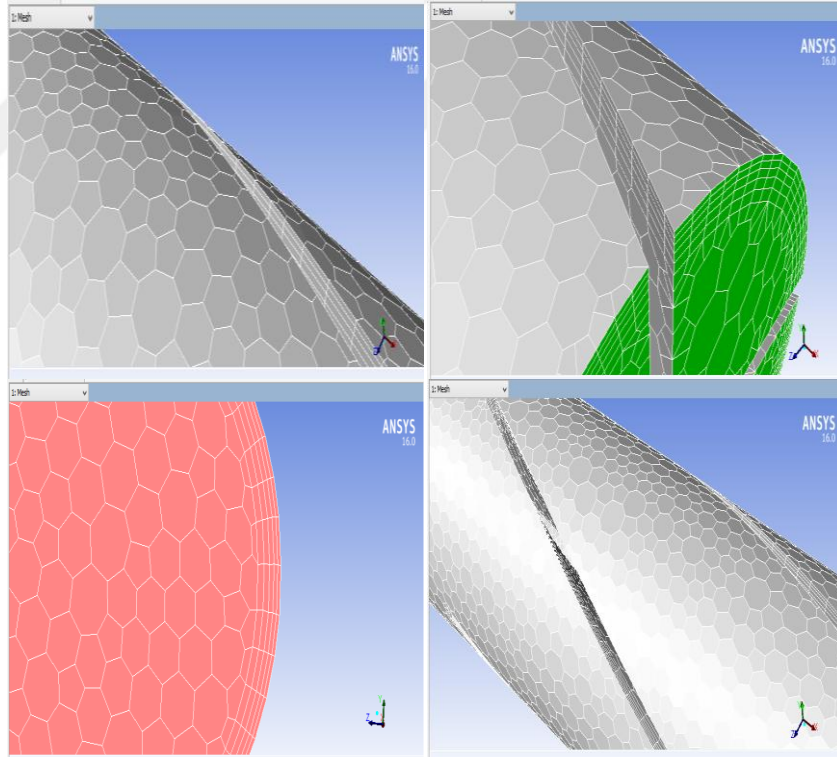
özüm bölgesi içinde döndürücü elemanın kanatçıklar içermesi nedeniyle akış ve hız gradyanlarının görece yüksek olacağının beklenmesi nedeniyle diğer bölgelere göre daha sık ağ kullanılmıştır. Analizlerin gerçekleştirildiği ANSYS Fluent özücü ekranında modellenen kanatçık durumları şekil 21’de, çözüm bölgesindeki modellenen borunun tamamı ise şekil 22’de görölmektedir. Söz konusu sık ağ yapısının yönlendirici eleman bölgesindeki görüntüleri şekil 23’te görölmektedir.



şekil 21. ANSYS Fluent’te modellenen kanatçıklı durum görseli



Şekil 22. ANSYS Fluent'te modellenen kanatçıklı durum görseli



Şekil 23. Yönlendirici elemanın ağ yapısının farklı açılardan görüntüleri

Gerçekleştirilen sayısal çalışmaların özeti Tablo 5'te görülmektedir. Nanoakışkanlı durumda tek fazlı model kullanılması nedeniyle programa parçacık kütle oranı ile ilgili herhangi bir değer girilmemiştir. Sayısal çalışmadan çözüm bölgesi için hız ve sıcaklık dağılımları, yerel ve ortalama Nu sayıları ile sürtünme faktörleri elde edilmiştir.

Tablo 5. Sayısal çalışma durumlarının özeti

Geometrik Parametreler			Hidrodinamik Parametre	Termo-fiziksel Parametre
Kanatçık sayısı	Kanatçık açısı	Kanatçık yüksekliği [$l^* = (r_0 - r)$]	Re sayısı	Pr sayısı
	Boş boru	$l^* = 0$	100, 200, 400, 800	50; 100; 200; 400
2	0°	$l^* = 0,25r_0$		
		$l^* = 0,75r_0$		
	30°	$l^* = 0,25r_0$		
		$l^* = 0,75r_0$		
	60°	$l^* = 0,25r_0$		
		$l^* = 0,75r_0$		
	90°	$l^* = 0,25r_0$		
		$l^* = 0,75r_0$		
4	0°	$l^* = 0,25r_0$		
		$l^* = 0,75r_0$		
	30°	$l^* = 0,25r_0$		
		$l^* = 0,75r_0$		
	60°	$l^* = 0,25r_0$		
		$l^* = 0,75r_0$		
	90°	$l^* = 0,25r_0$		
		$l^* = 0,75r_0$		

Sayısal çalışma paralel olarak yürütülen nanoakışkan sentezleme işlemleri sonuçları ile karşılaştırma yapılması için tekrarlanmıştır. Bu kapsamda teorik modeller ile elde edilmiş olan termofiziksel özellikler yerine ölçümlerden elde edilen sonuçlar modellemede kullanılarak sayısal çalışma tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bazı termofiziksel özelliklerin sentezleme adımları ve ölçüm hataları etkisini de içerecek şekilde farklılıklar ortaya koyduğunu göstermektedir. Revize sayısal çalışma olarak adlandırılan durum için gerçekleştirilen çalışmaların özeti Tablo 6’da sunulmaktadır. Burada gerçekleşen çalışma, daha önce karşılaştırması yapılarak doğruluğu sağlanmış olan sayısal modellemenin daha geniş aralıklarda çalışılabilmesi açısından Pe sayısının farklı değerleri içinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6. Revize sayısal çalışma durumlarının özeti

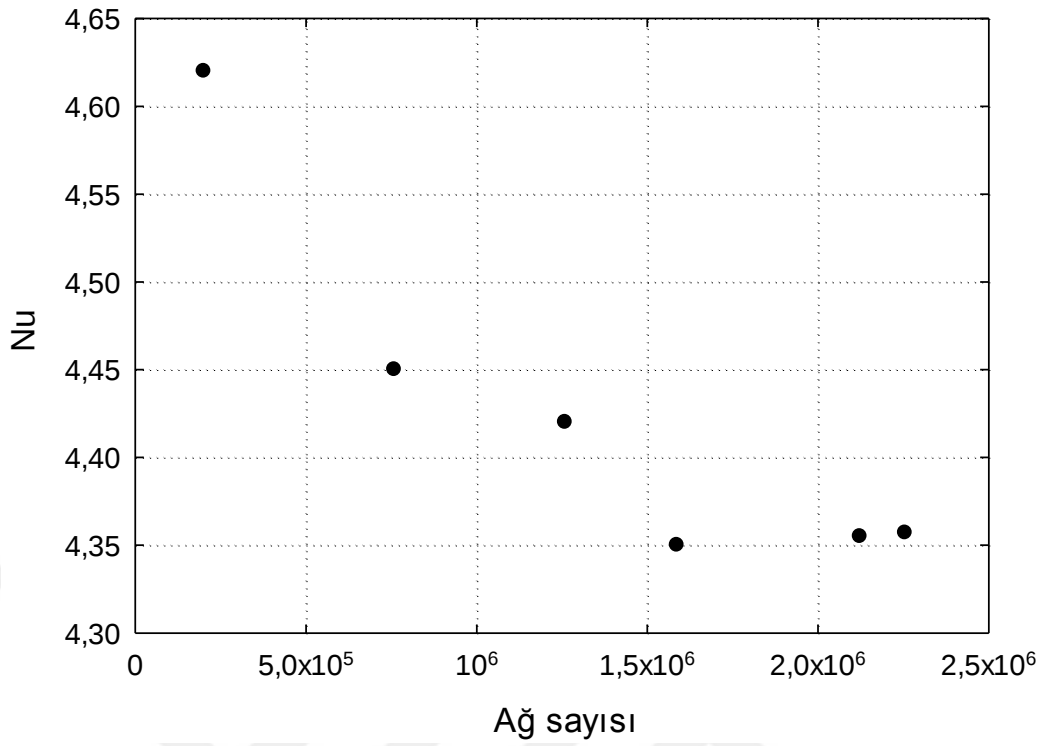
Kanatçık sayısı	Kanatçık burulma açısı	Kanatçık yüksekliği $[l^* = (r_0 - r)]$	Pe sayısı	Kütle oranı (Φ) , [%]
2, 4	0°	$l^* = 0,25r_0$	1000	0; 1; 2; 3
		$l^* = 0,75r_0$	2000	
	30°	$l^* = 0,25r_0$	4000	
		$l^* = 0,75r_0$	8000	
		$l^* = 0,25r_0$	10000	
		$l^* = 0,75r_0$	20000	
	60°	$l^* = 0,25r_0$	40000	
		$l^* = 0,75r_0$	80000	
		$l^* = 0,25r_0$	160000	
		$l^* = 0,75r_0$	320000	

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

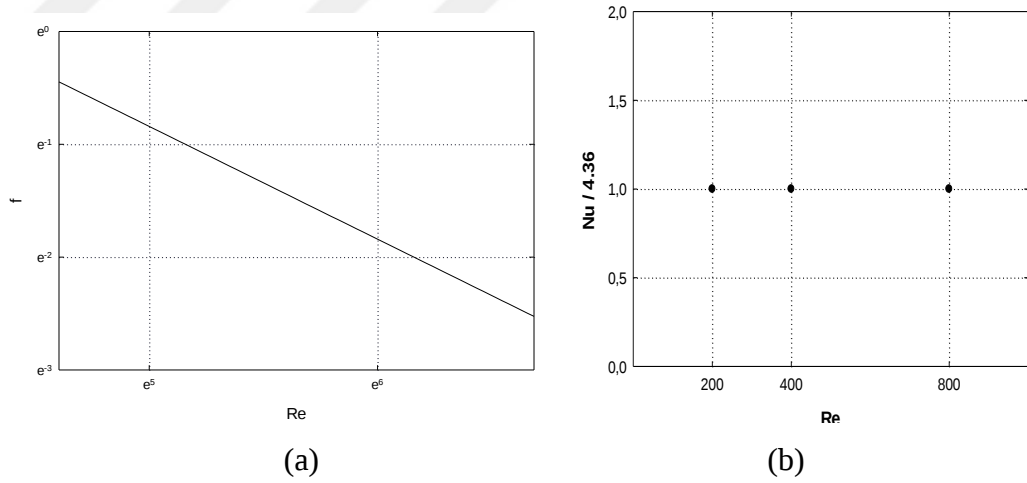
Yapılan çalışmalar, sayısal bulgular ve deneysel bulgular şeklinde iki başlık altında hem ayrı ayrı hem de birbirleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Deneysel çalışmada, ölçülen basınçlar kullanılarak Denklem (8) ile sürtünme faktörleri ve ölçülen sıcaklıklar kullanılarak Denklem (6) ile yerel Nu sayıları hesaplandı ve hesaplanan değerler Kakaç vd. (2014) tarafından verilen Denklem (7) ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

3.1. Baz Akışkanlı Sayısal Çalışma Bulguları

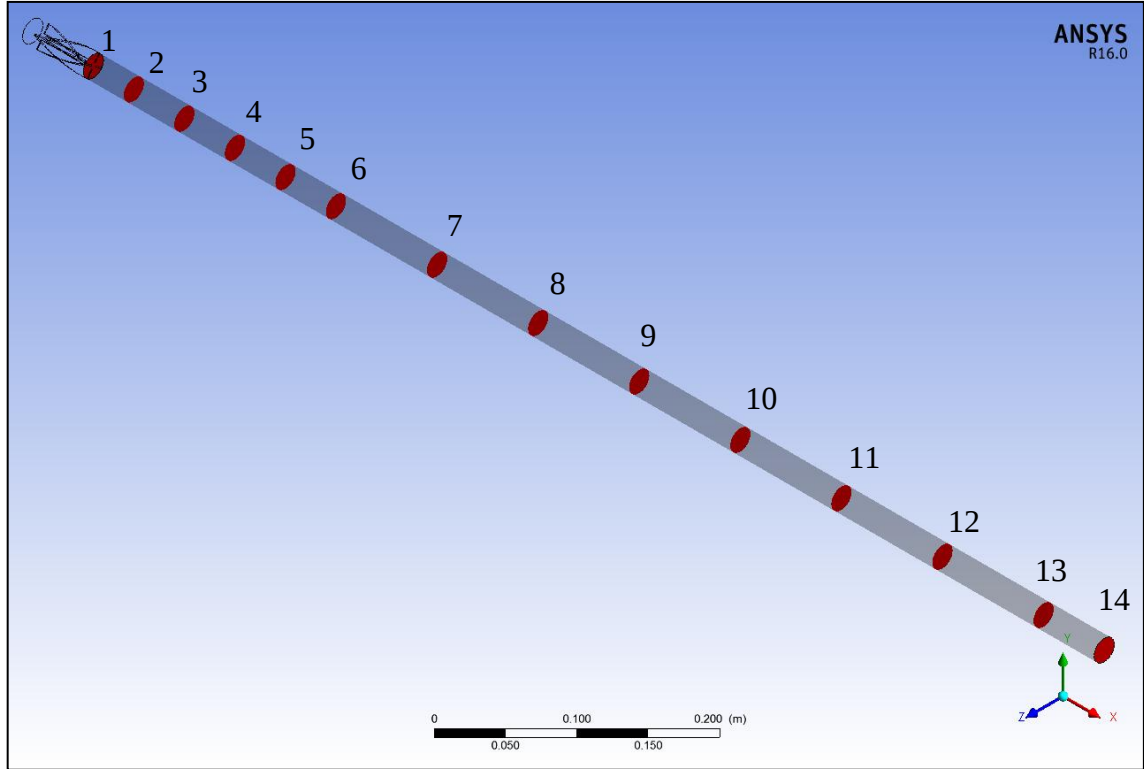
Ayrıntılı sayısal çalışmaya geçmeden önce boş boruda duvarda sabit ısı akısı sınır koşulu altında tam gelişmiş akış durumu için ağ bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda altı farklı ağ sayısında ortalama Nu sayısı değerleri elde edilmiştir. Ağ bağımsız çalışma sonuçları Şekil 24'te görülmektedir ve burada ağ sayısının değerinin 2×10^6 'dan sonra ortalama Nu sayısının değişmemesi nedeniyle sayısal çalışmaya bu ağ sayısı ile devam edilmiştir. Sayısal çalışmalara, sürtünme faktörü için laminar akışta geçerli olan $f = 64/Re$ ve tam gelişmiş laminar boru akışında duvarda sabit ısı akısı için geçerli olan $Nu = 4,36$ değerleri esas alınarak devam edilmiştir. Şekil 25'te, sürtünme faktörü ve ortalama Nu sayısı için sayısal sonuçlarının bu sabit değerlerle örtüştüğü görülmektedir. Ayrıca deneysel çalışmada sıcaklık ölçümlerinin alınacağı konumların gösterimi Şekil 26'da, sayısal çalışmada sıcaklık ve hız ölçümlerinin alınacağı konumların gösterimi ise Şekil 27'de verilmektedir. Örnek bir durum için ($4 \text{ kanat} / l^* = 0,75r_o / 30^\circ, 90^\circ / Re = 200, 800 / Pr = 100$), akış döndürücü çıkışında meydana gelen dönüş etkisi ile oluşan sıcaklık dağılımları ve boru boyunca oluşan etkiler Şekil 28-32'de görülmektedir. Şekil 28'de boru girişinde meydana gelen akış döndürücü etkilerinin belirgin bir şekilde sıcaklık dağılımlarına yansıdığı görülmektedir. Şekil 29-32 incelendiğinde akış döndürücü etkilerinin deney bölgesinin ortasına yakın bölgede azalmaya başladığı ve boru çıkışında tamamen kaybolduğu görülmektedir.



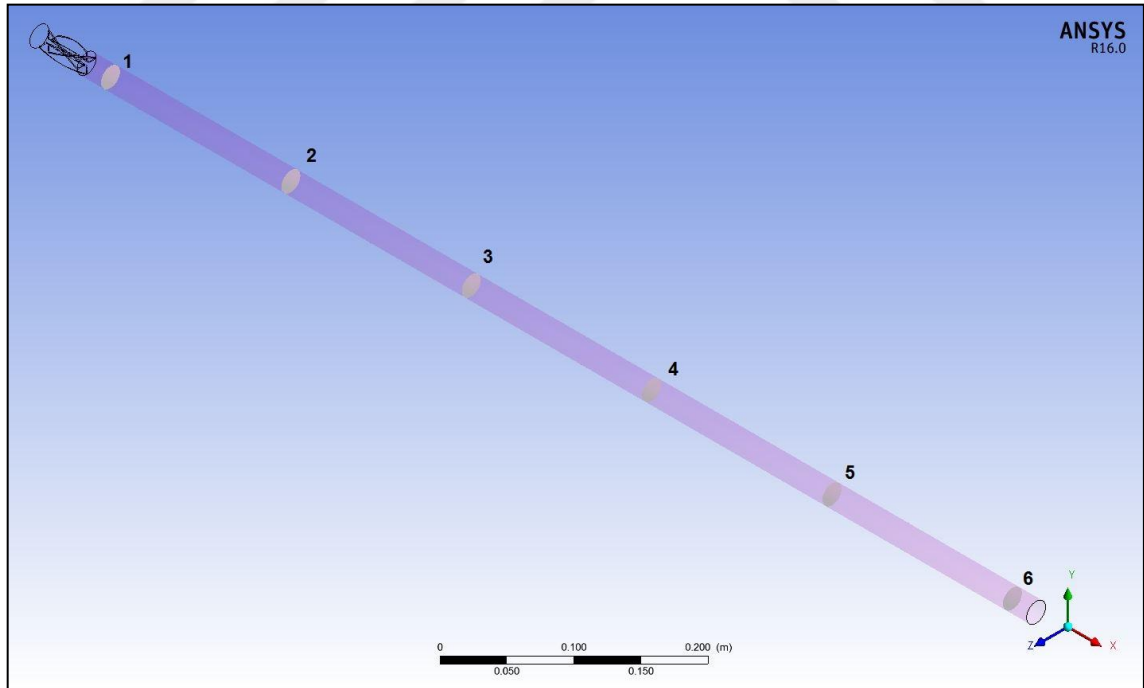
Şekil 24. Sayısal programın ağ bağımsız çalışma sonuçları



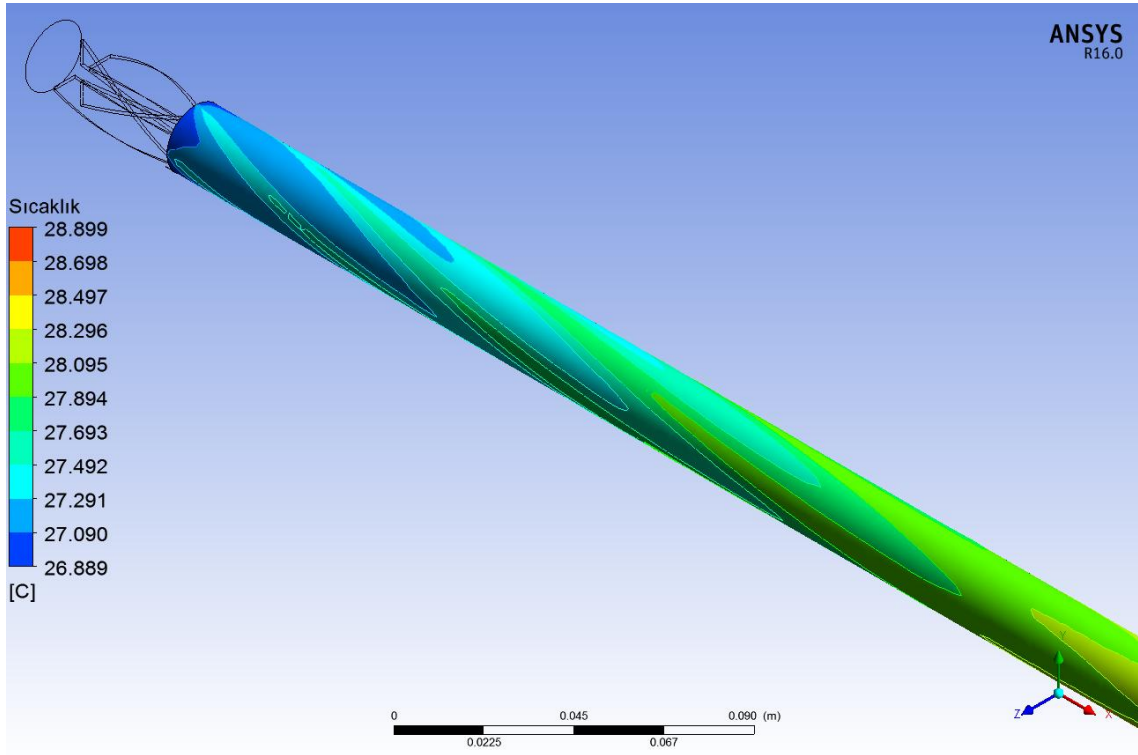
Şekil 25. Sayısal programın (a) Sürtünme katsayısını ve (b) $\overline{Nu}$ sayısını sağlama çalışması



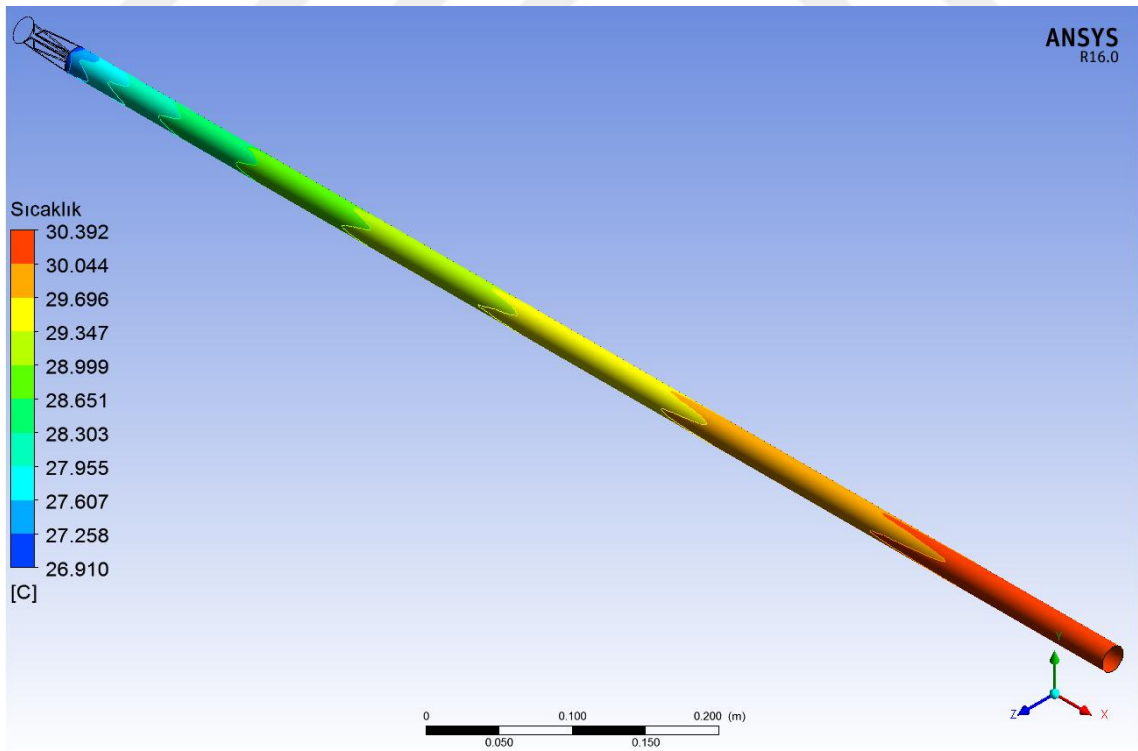
Şekil 26. Sayısal çalışma için sıcaklık ve hız konumlarının gösterimi



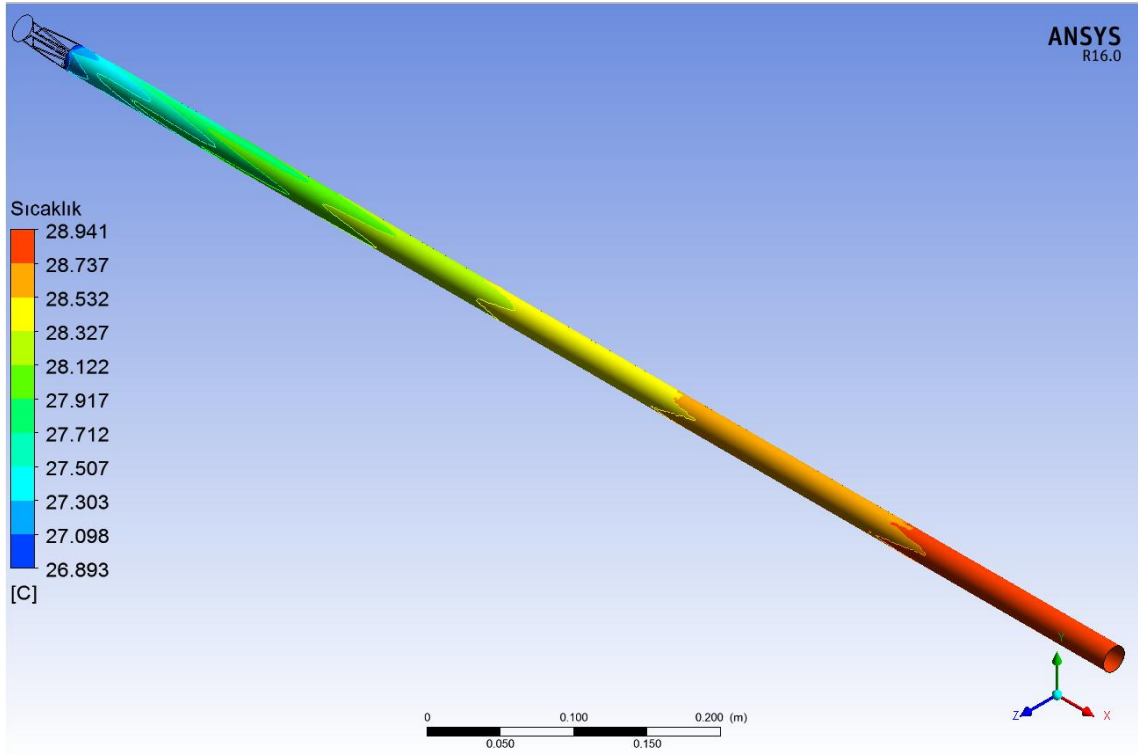
Şekil 27. Deneysel çalışmada sıcaklık ölçüm konumlarının gösterimi



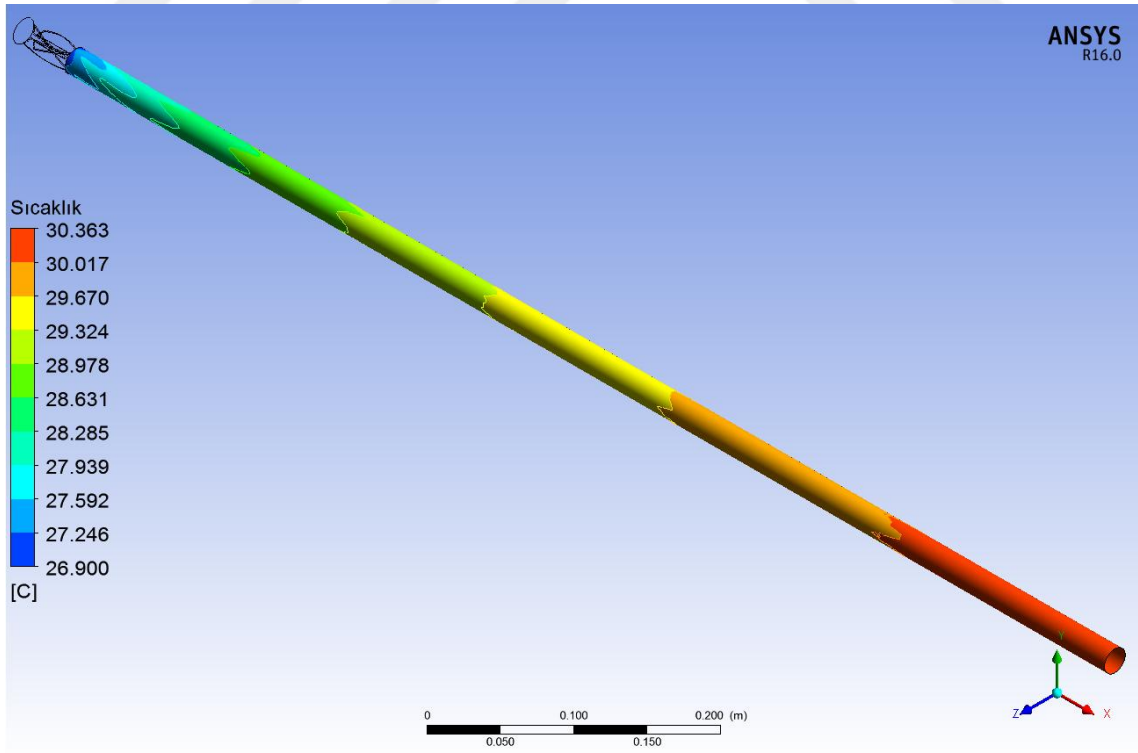
Şekil 28. Boru giriş bölgesi için sıcaklık dağılımı (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_o$ / $\alpha = 90^\circ$ / $Re = 800$ / $Pr = 100$)



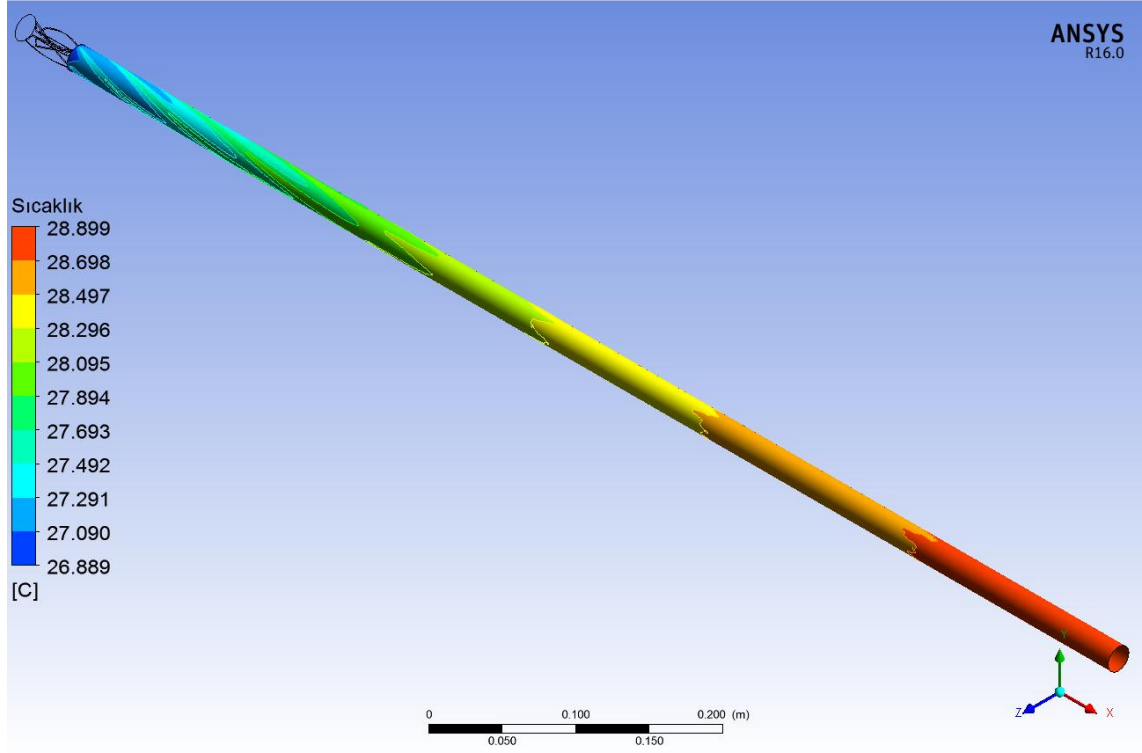
Şekil 29. Boru boyunca sıcaklık dağılımı (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_o$ / $\alpha = 30^\circ$ / $Re = 200$ / $Pr = 100$)



Şekil 30. Boru boyunca sıcaklık dağılımı (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_o$ / $\alpha = 30^\circ$ / $Re = 800$ / $Pr = 100$)

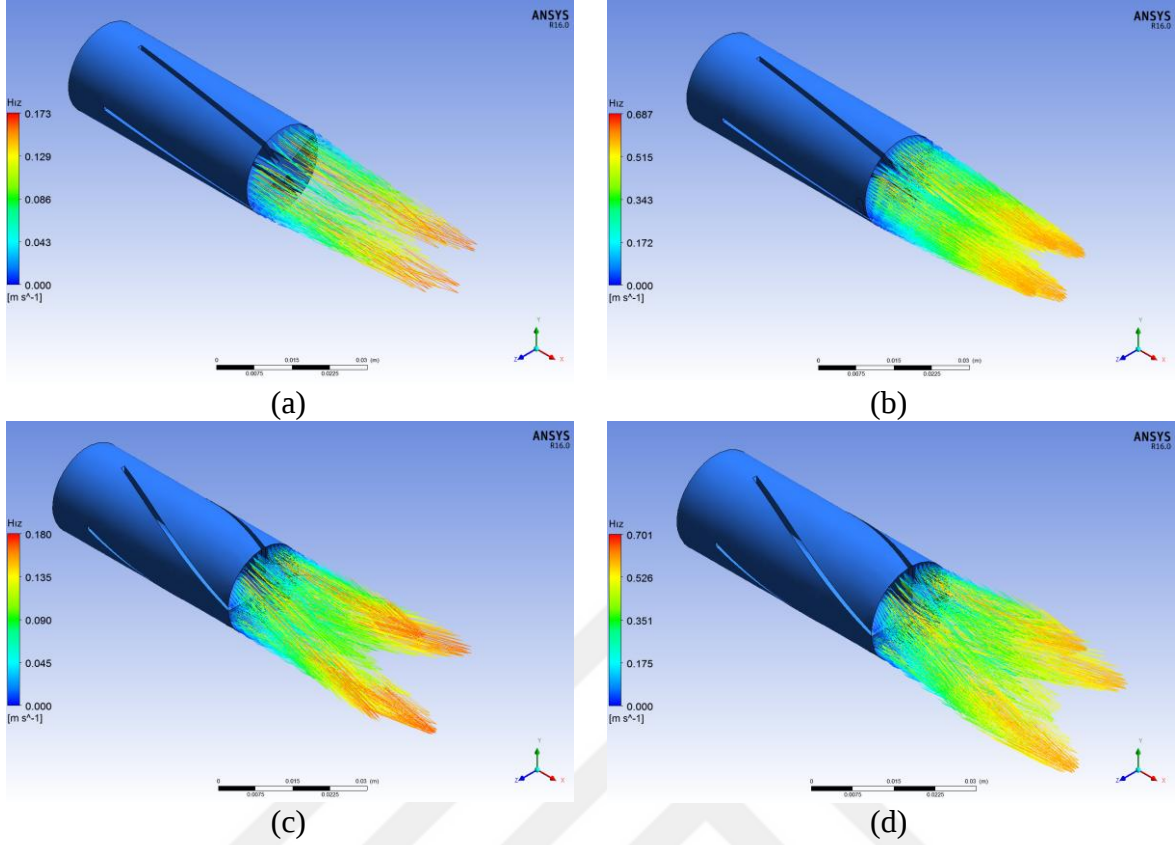


Şekil 31. Boru boyunca sıcaklık dağılımı (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_o$ / $\alpha = 90^\circ$ / $Re = 200$ / $Pr = 100$)



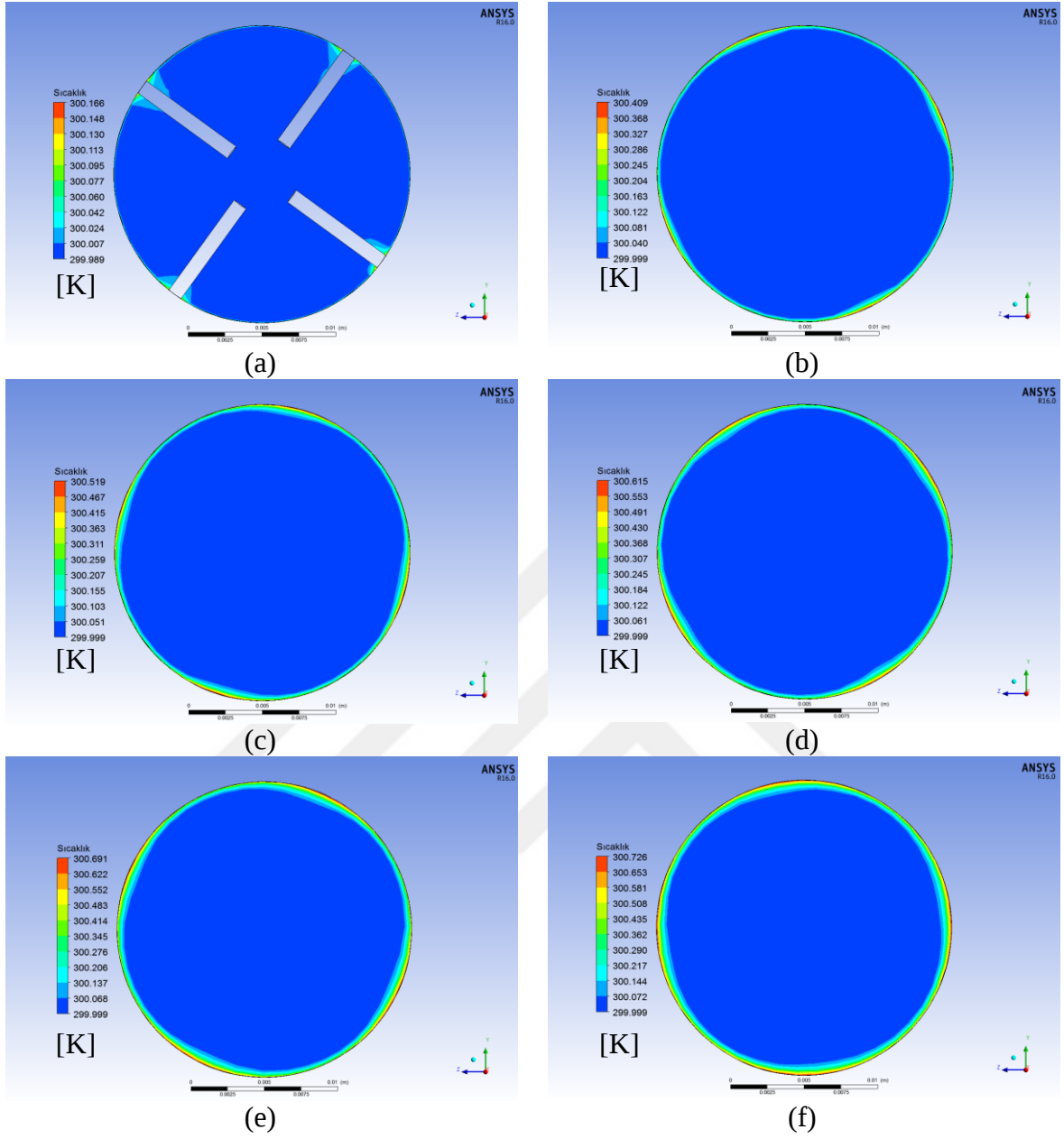
Şekil 32. Boru boyunca sıcaklık dağılımı ($4 \text{ kanatçık} / l^* = 0,75r_o / \alpha = 90^\circ / Re = 800 / Pr = 100$)

Test bölgesi girişindeki akış döndürücü eleman burulma açısının hız vektörleri üzerindeki etkisi Şekil 33'te gösterilmektedir. Burada Şekil 33 incelendiğinde aynı Re sayısında artan kanatçık burulma açısı ile hız vektörlerinin boru duvarına yaklaştığı ve bunun sonucu olarak da ısı taşınım katsayısında artışların olacağı görülmektedir.

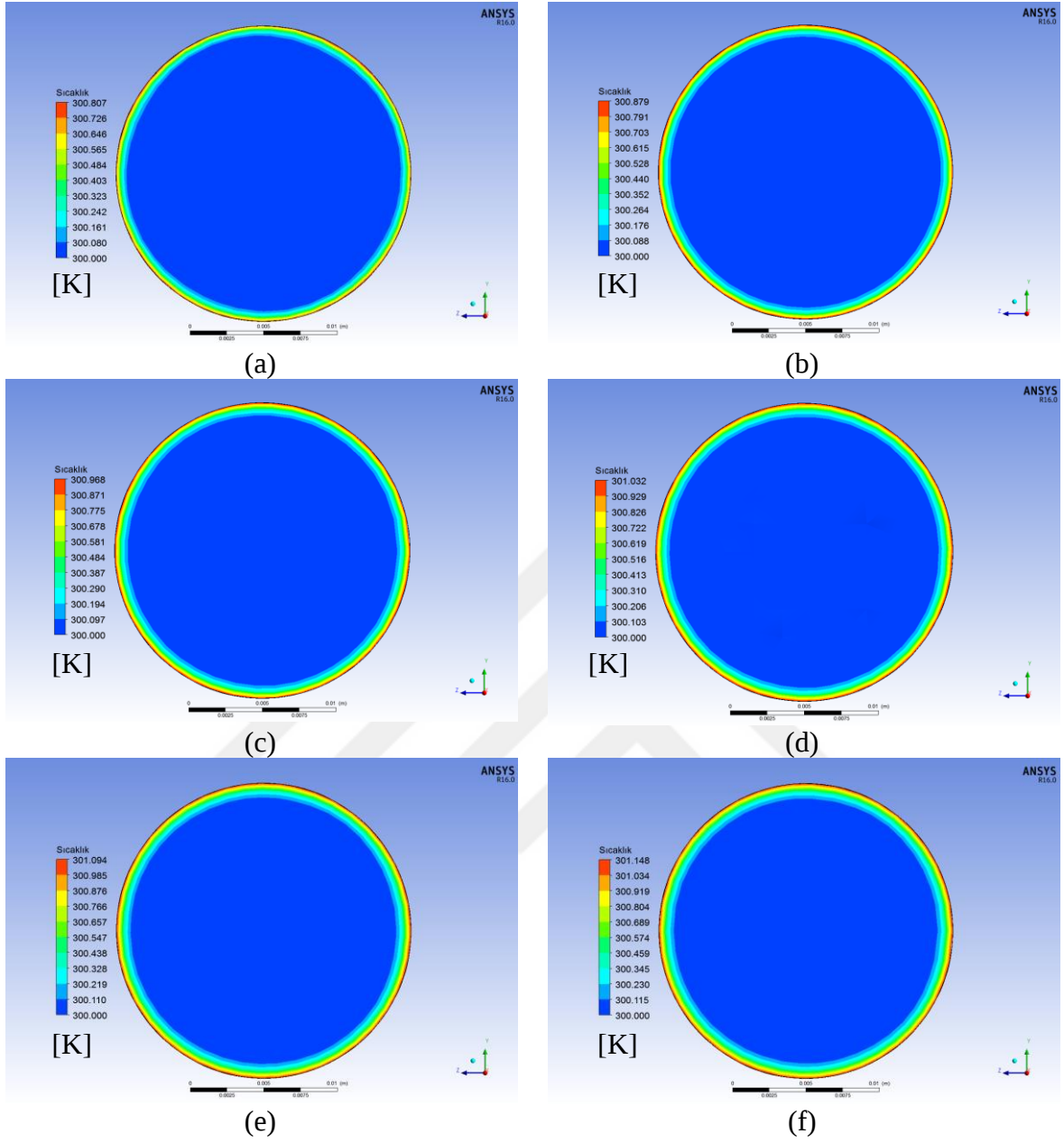


Şekil 33. Boru giriş gölgesindeki hız vektörleri 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_o$ (a) $\alpha = 30^\circ$ / $Re = 200$ / $Pr = 100$ (b) $\alpha = 30^\circ$ / $Re = 800$ / $Pr = 100$ (c) $\alpha = 90^\circ$ / $Re = 200$ / $Pr = 100$ (d) $\alpha = 90^\circ$ / $Re = 800$ / $Pr = 100$

Akışı döndürmenin ısı transferi üzerinde etkisi giriş bölgesinde daha fazladır. Dönme ile gerçekleşen ısı transferindeki artışın yanında basınç kaybında atışın olacağı kaçınılmazdır. Bu etkiyle beraber basınç kaybında da artış olacağı bilinen bir gerçektir. Şekil 26' da verilen 14 konum arasından ilk 12 konum seçilerek akış döndürücü etkilerinin boru boyunca değişimi incelenmiştir. İncelenen sonuçlar sıcaklık dağılımları bakımından Şekil 34 ve Şekil 35' de, hız dağılımları bakımından ise Şekil 36 ve Şekil 37' de verilmektedir. Şekil 34 incelendiğinde, akış döndürücü kanatçıklarını takip eden iz bölgesinde sıcaklık gradyanlarında farklılaşmalar olduğu görülmektedir. Bu farklılaşmanın Şekil 34 e ve f durumlarında giderek azaldığı, Şekil 35 a' dan itibaren ise tamamen kaybolduğu görülmektedir. Şekil 35 in tamamı birlikte incelendiğinde boru çıkış bölgesini takiple akışın borularda termal olarak tam gelişmiş sıcaklık gradyanına doğru bir gidişat izlediği görülmektedir.

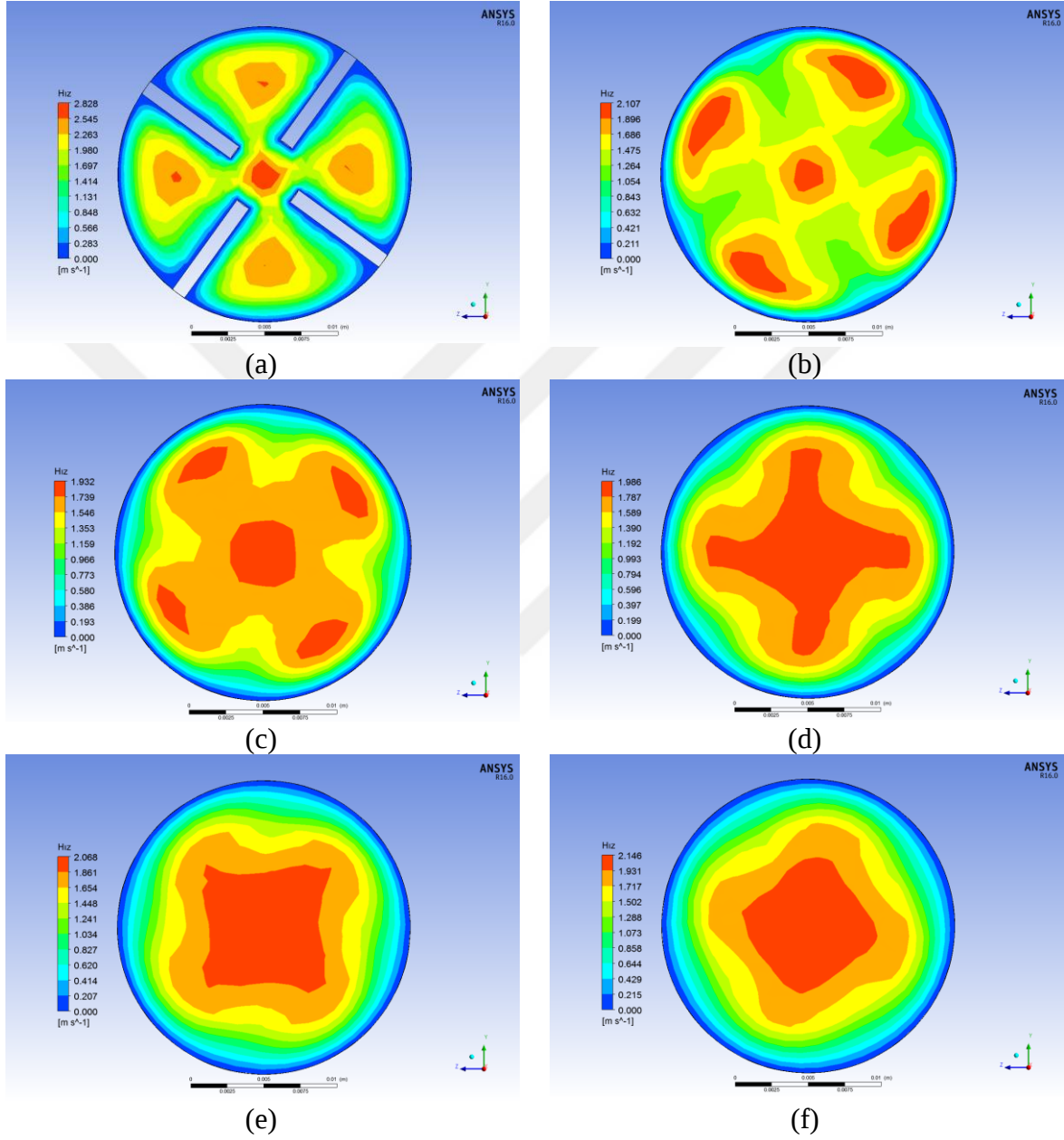


Şekil 34. Sıcaklık dağılımları 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_o$ / $\alpha = 90^\circ$ / $Re = 800$ / $Pr = 400$ (a) 1. konum (b) 2. konum (c) 3. konum (d) 4. Konum (e) 5. konum (f) 6. konum



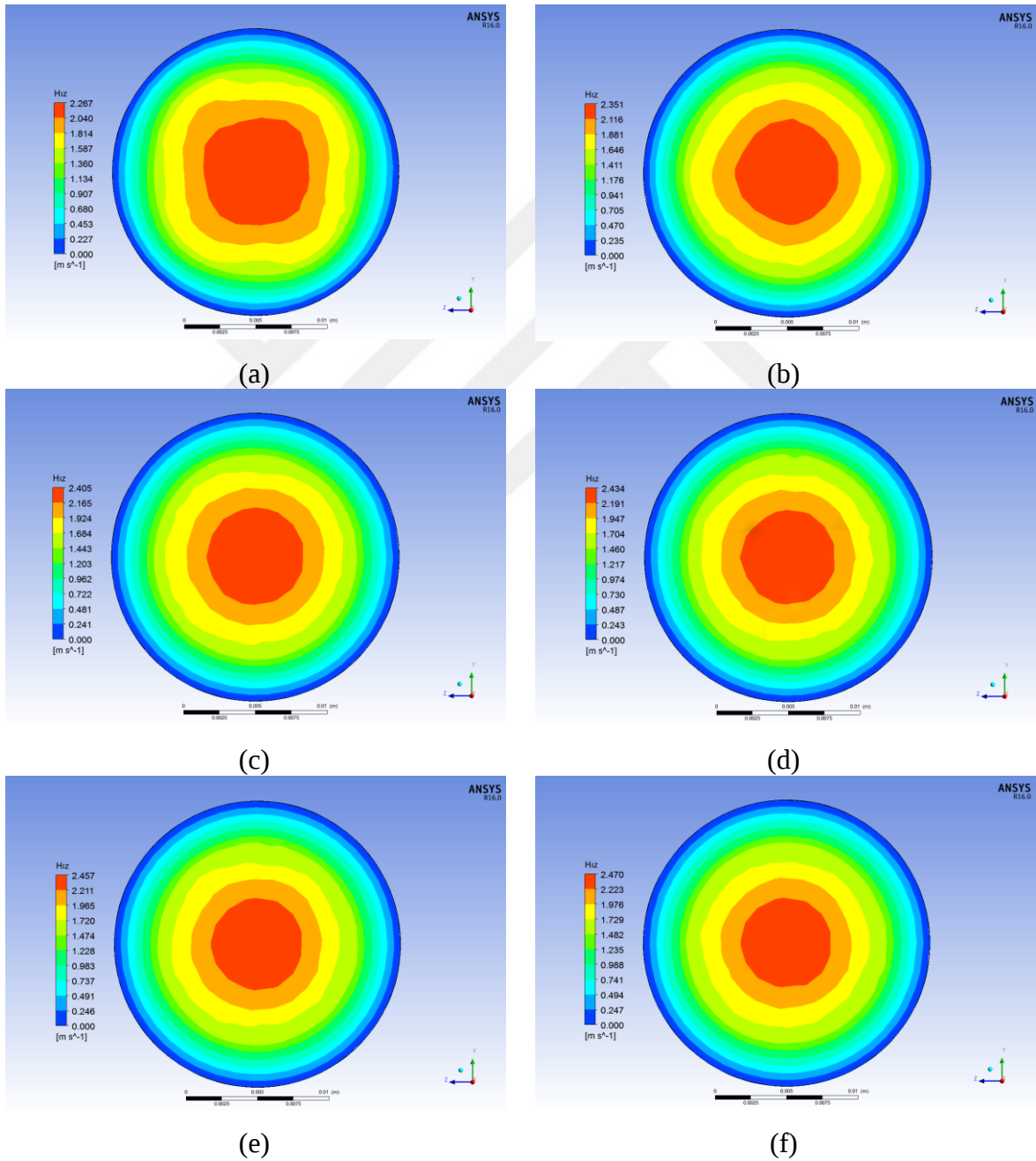
Şekil 35. Sıcaklık dağılımları 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_o$ / $\alpha = 90^\circ$ / $Re = 800$ / $Pr = 400$ (a) 7. konum (b) 8. konum (c) 9. konum (d) 10. Konum (e) 11. konum (f) 12. konum

Sıcaklık dağılımlarının verildiği konumlardaki hız dağılımları Şekil 36 ve Şekil 37'de verilmiştir. Şekil 36 ve Şekil 37 incelendiğinde, sıcaklık dağılımı sonuçlarına benzer şekilde akış döndürücü iz bölgesinden değerlerde yükselme olduğu görülmektedir.



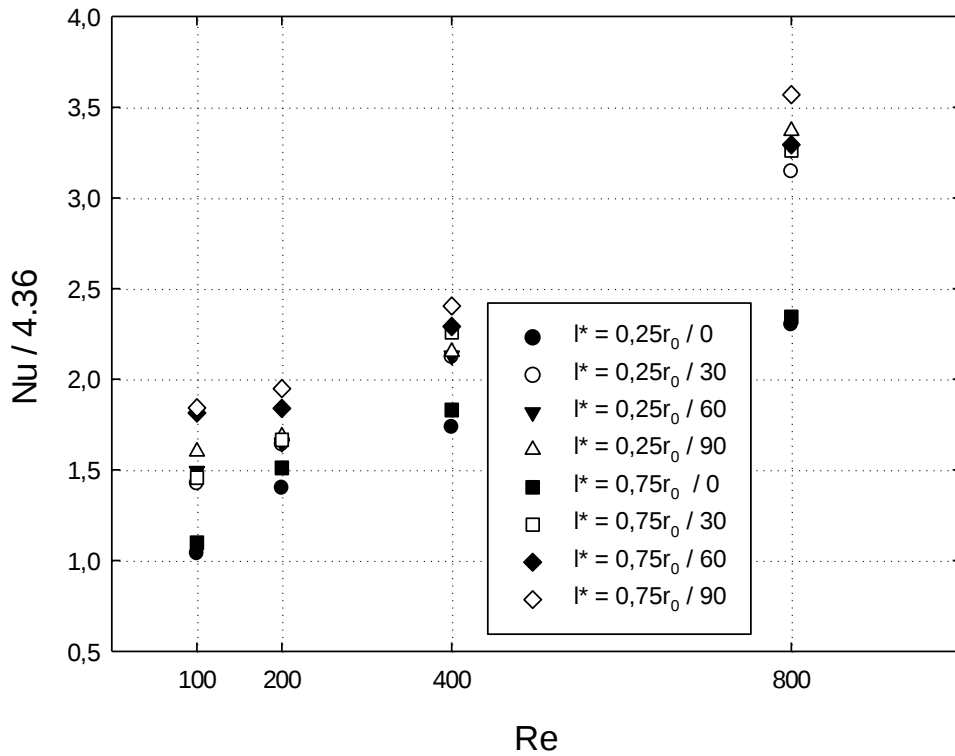
Şekil 36. Hız dağılımları 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_o$ / $\alpha = 90^\circ$ / $Re = 800$ / $Pr = 400$ (a) 1. konum (b) 2. konum (c) 3. konum (d) 4. Konum (e) 5. konum (f) 6. konum

Şekil 36 a, b ve c' de, akış döndürücü etkilerine maruz kalmayan bir merkez akışının etkili olduğu görülmektedir. Bu akışın Şekil 36 d durumu ile başlayarak dönüş etkilerine baskın olduğu ve birleşerek merkezde daha yüksek bir gradyan oluşturmaktadır. Bu yüksek gradyanın da duvarın etkisi ile birlikte giderek azaldığı ve Şekil 37 d durumundan sonra merkeze yaklaştığı ve boru çıkışına doğru tam gelişmiş profil görüntüsü aldığı görülmektedir.

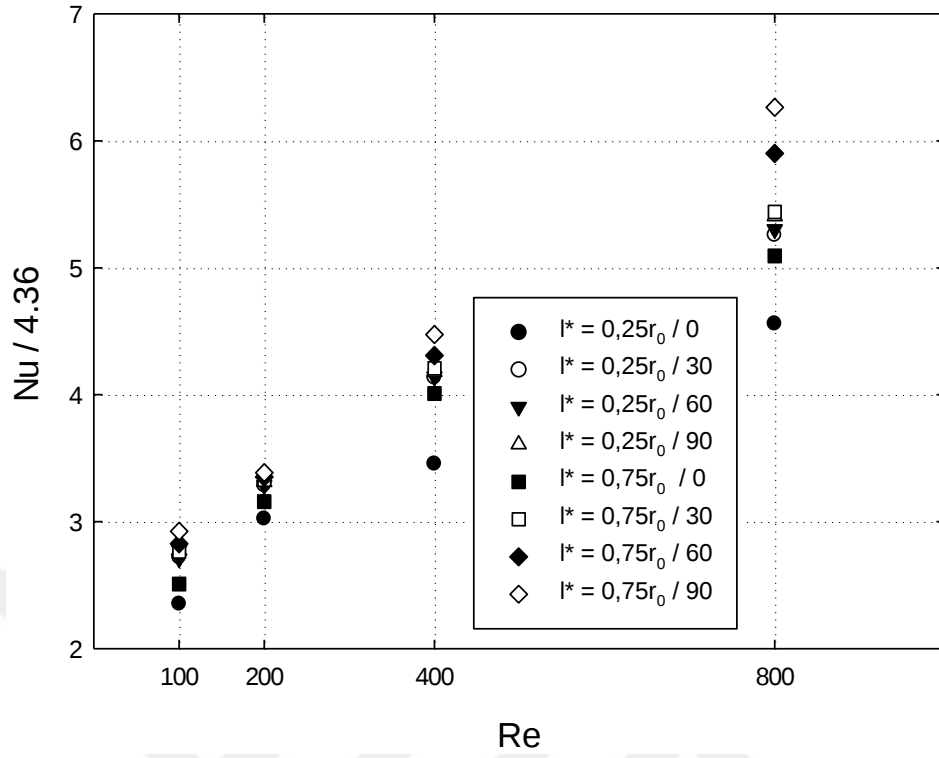


Şekil 37. Hız dağılımları 4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $Re = 800$ / $Pr = 400$ (a) 7. konum (b) 8. konum (c) 9. konum (d) 10. Konum (e) 11. konum (f) 12. konum

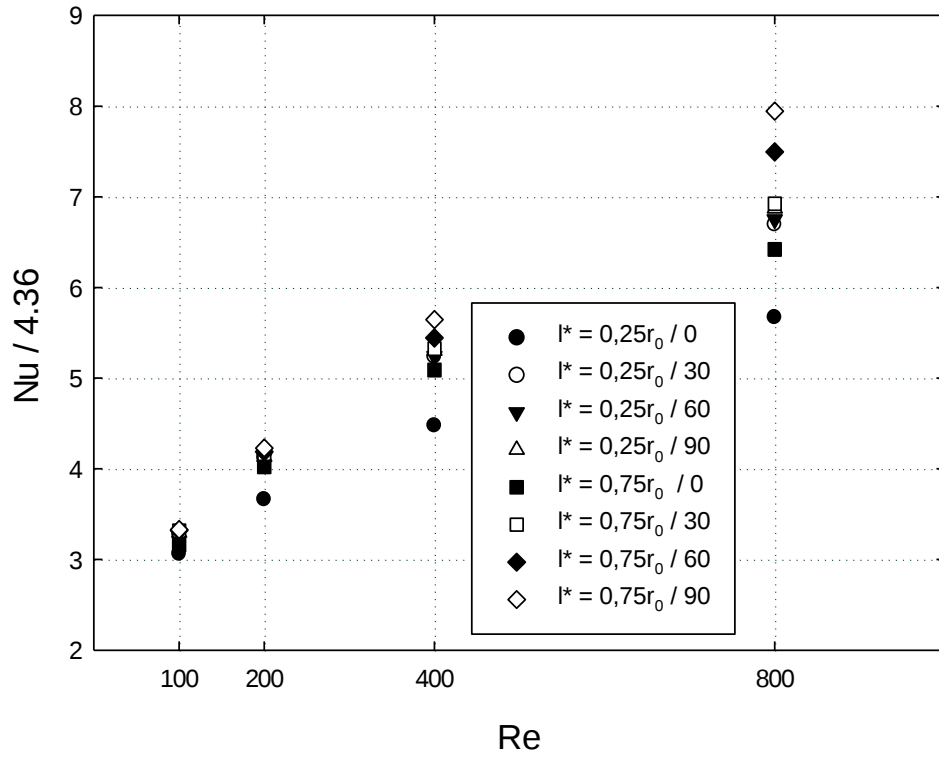
Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişiminin sayısal olarak incelendiği çalışma bulguları Şekil 38-45'te sunulmaktadır. Elde edilen bulgular iki farklı kanatçık yüksekliği ve dört farklı burulma açısı durumu için verilmektedir. Verilen grafiklerde ortalama Nu sayısının değişimleri incelendiğinde, Re sayısı ile ortalama Nu sayısında artış olduğu, bu artışın kanatçık yüksekliği ile görece arttığı görülmektedir. Pr sayısının ortalama Nu sayısı üzerindeki etkisi beklenildiği gibi ortalama Nu sayısının artması yönündedir. Burulma açısının artmasının akışın dönüş etkileri ve bunun sonucu olarak sınır tabaka bozulması nedeni ile ısı transferinde artışa sebep olduğu bilinmektedir. Söz konusu bu etkiler yapılan çalışma kapsamındaki sonuçlarda da görülmekte, özellikle artan kanatçık yüksekliği ile burulma açısı etkisinin daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 38 ve Şekil 39 birlikte incelendiğinde Pr sayısında meydana gelen 10 katlık artışın Nu sayısında kısa kanatçık boyunda % 58 lik artış sağladığı görülmektedir. Kanatçık boyunun artması ile Nu sayısındaki bu artış % 70 oranına kadar ulaşabilmektedir. Şekil 41 ve Şekil 45 birlikte incelendiğinde artan kanatçık sayısı ile aynı Pr sayısında Nu sayısının kısa kanatçıklı durumda % 4, uzun kanatçıklı durumda ise % 9 oranında iyileşme olduğu görülmektedir. Re sayısının Nu sayısı üzerindeki etkisi Şekil 45 üzerinden incelendiğinde iki kat artan Re sayısının Nu sayısını kısa kanatçıklı durumda % 30, yüksek kanatçıklı durumda ise % 35 oranında arttırdığı görülmektedir.



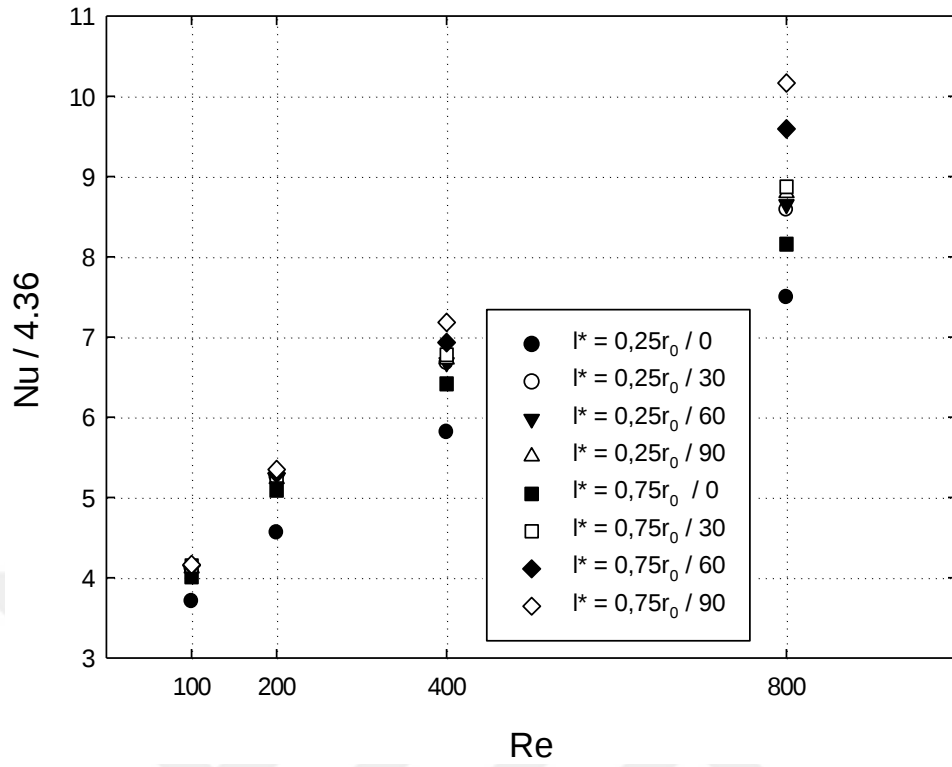
Şekil 38. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $Pr = 10$)



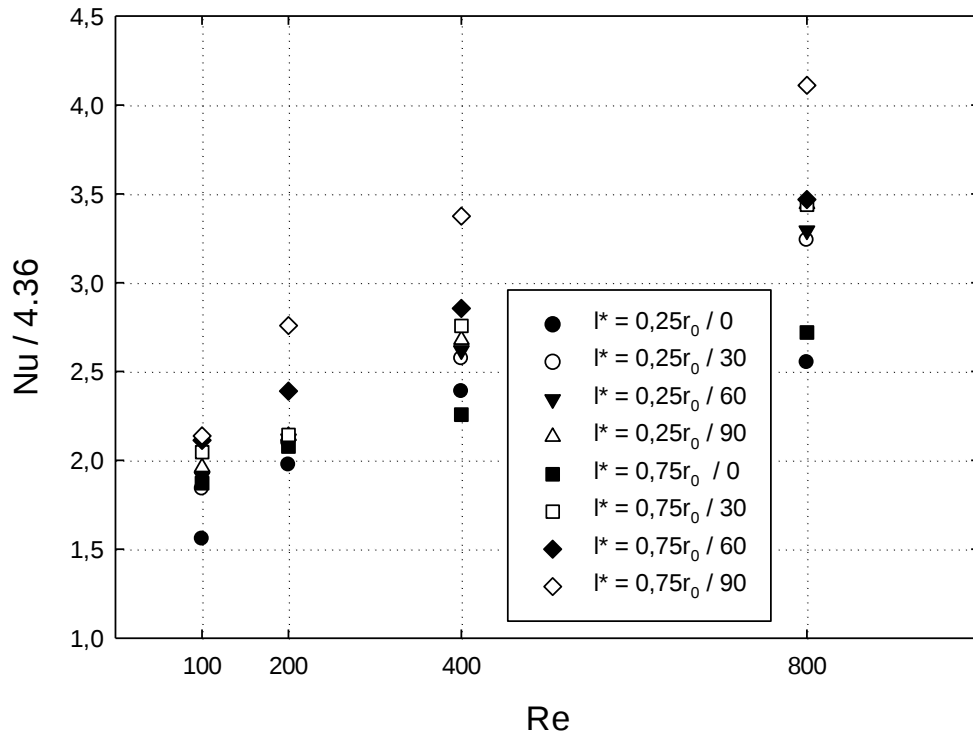
Şekil 39. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $Pr = 100$)



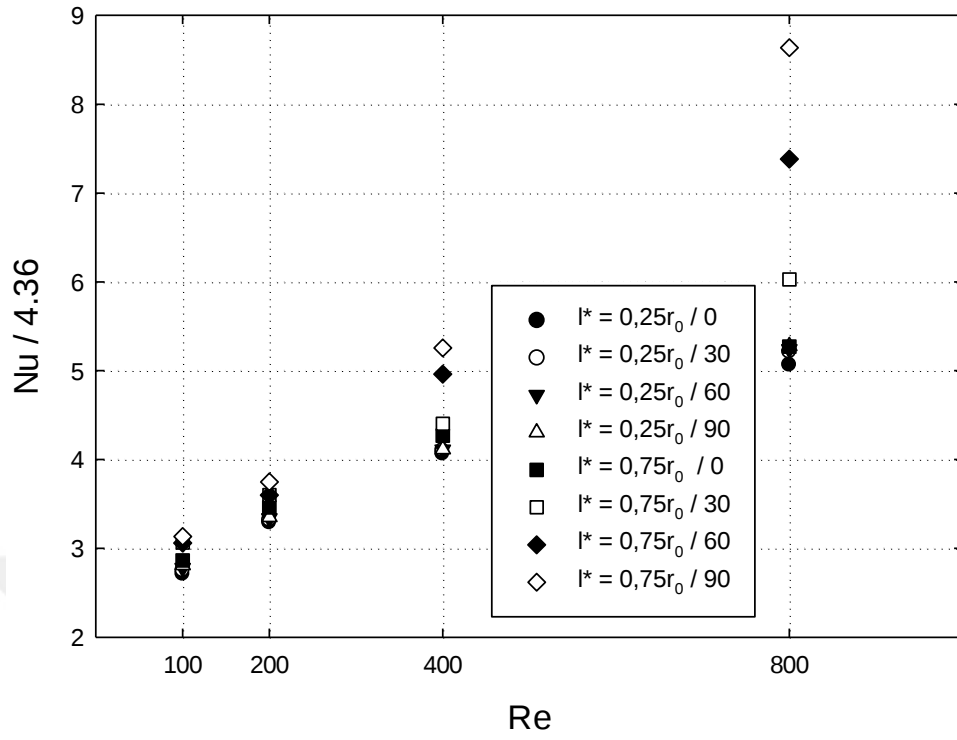
Şekil 40. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $Pr = 200$)



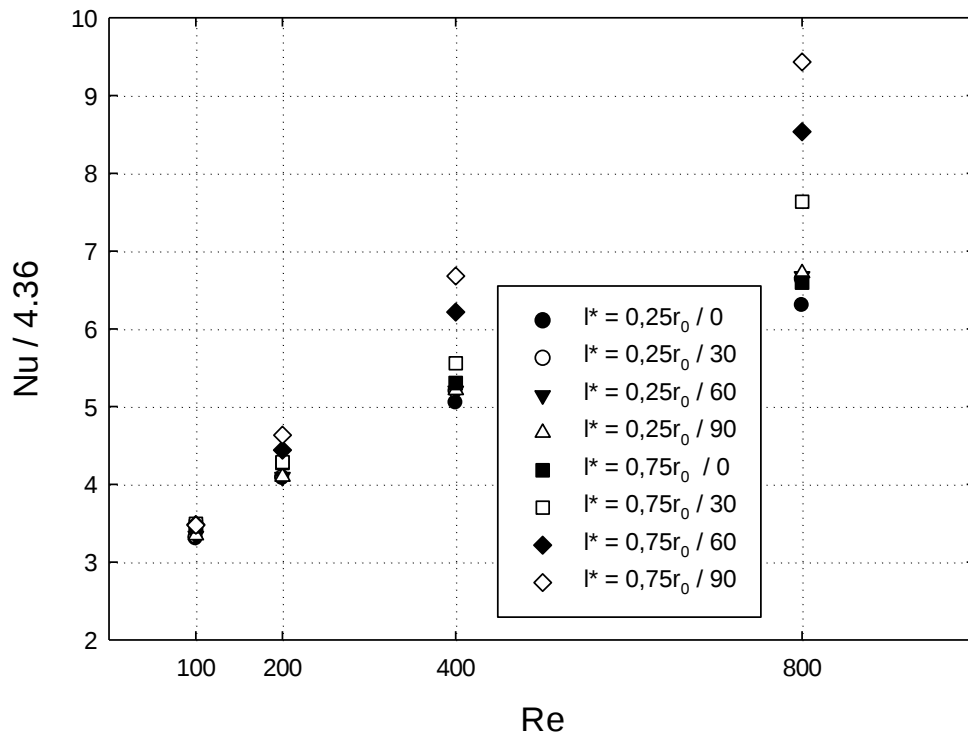
Şekil 41. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $Pr = 400$)



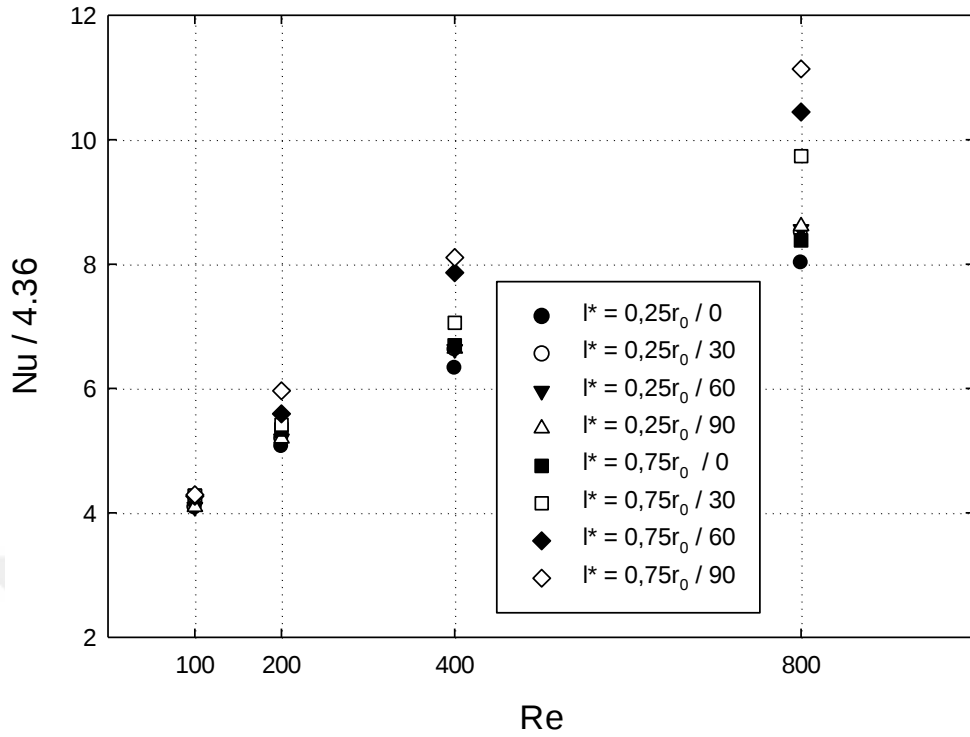
Şekil 42. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $Pr = 10$)



Şekil 43. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $Pr = 100$)

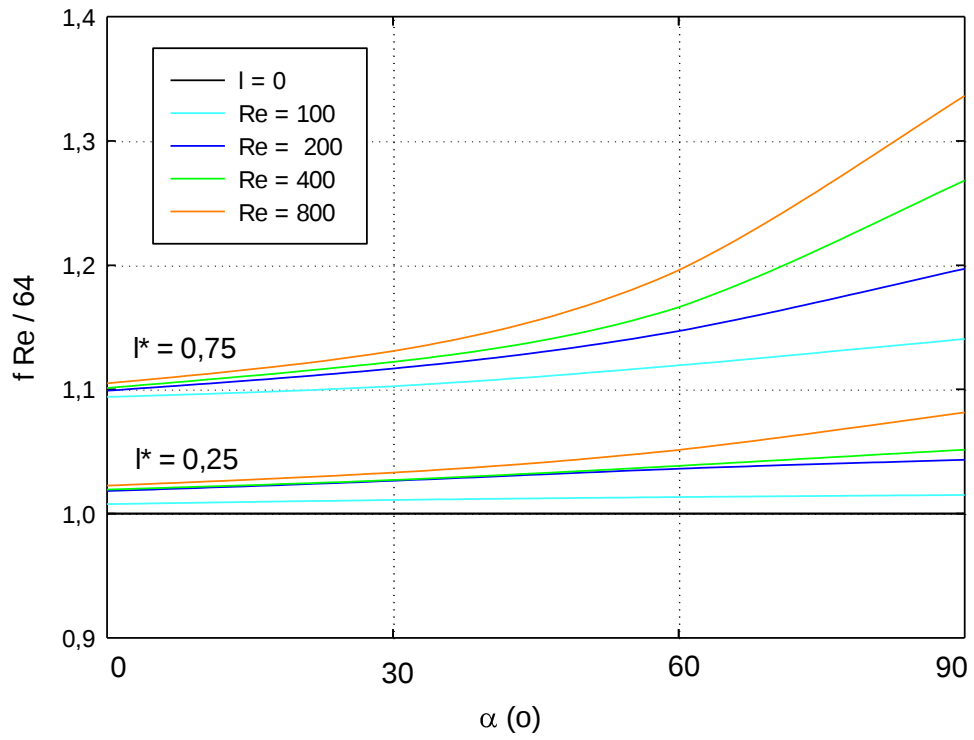


Şekil 44. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $Pr = 200$)

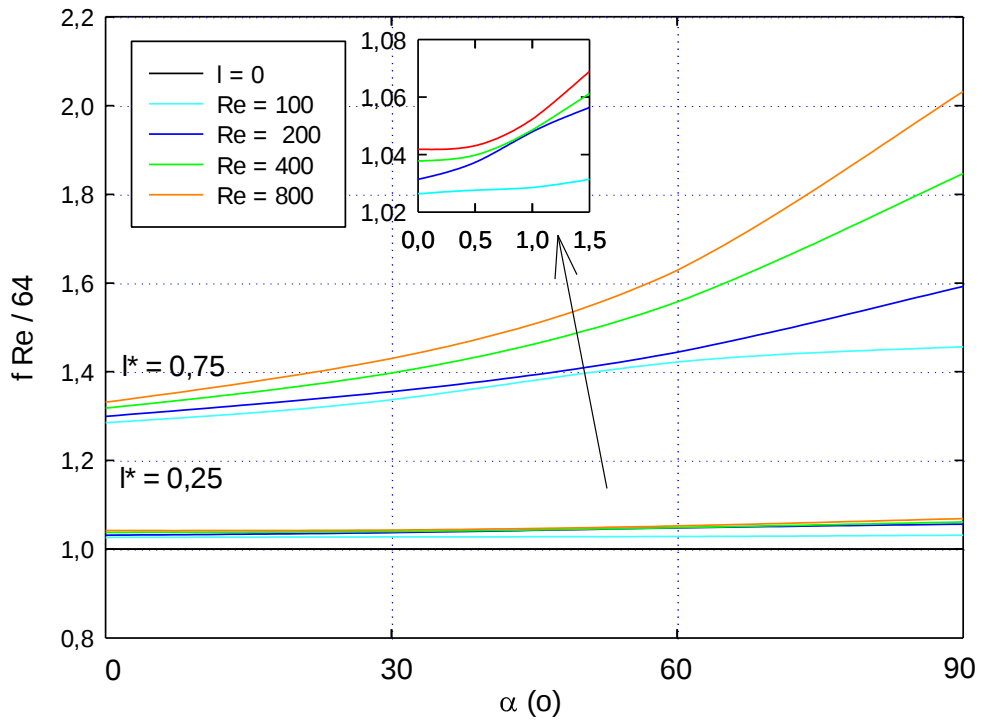


Şekil 45. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $Pr = 400$)

Şekil 46, 47’de ise aynı geometrik ve hidrodinamik parametrelerin sürtünme faktörü f üzerindeki etkisi görülmektedir. Burada, 2 kanatçıklı durumun 4 kanatçıklı duruma göre, beklenildiği gibi daha düşük sürtünme etkisi gösterdiği görülmektedir. Ancak, burulma açısının etkisi incelendiğinde, 2 kanatçıklı durumda sürtünme etkilerinin daha belirgin olduğu, değişen burulma açısı ile sürtünme katsayısındaki artışın 4 kanatçıklı duruma göre görece yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 46 ve 47 için gerçekleştirilen analizler $Pr = 100$ değeri için yapılmıştır. İki kanatçıklı durumda, aynı Re sayısında kanatçık boyunun üç kat artması f değerini en düşük burulma açısında % 10 oranında, en yüksek burulma açısında ise % 28 oranında arttırdığı görülmektedir. Bu etkiler dört kanatçıklı düzenlemede sırasıyla % 40, % 85 oranlarında gerçekleşmektedir. Aynı burulma açısı ve kanatçık yüksekliğinin olduğu fakat Re sayısının değiştiği durumda ise iki kanatçıklı düzenlemede Re sayısında meydana gelen sekiz kat artış f değerinde % 17 oranında artışa sebep olduğu görülmektedir. Benzer durum dört kanatçıklı durumda da incelendiğinde f değerindeki artışın % 48 oranlarına ulaştığı görülmektedir.



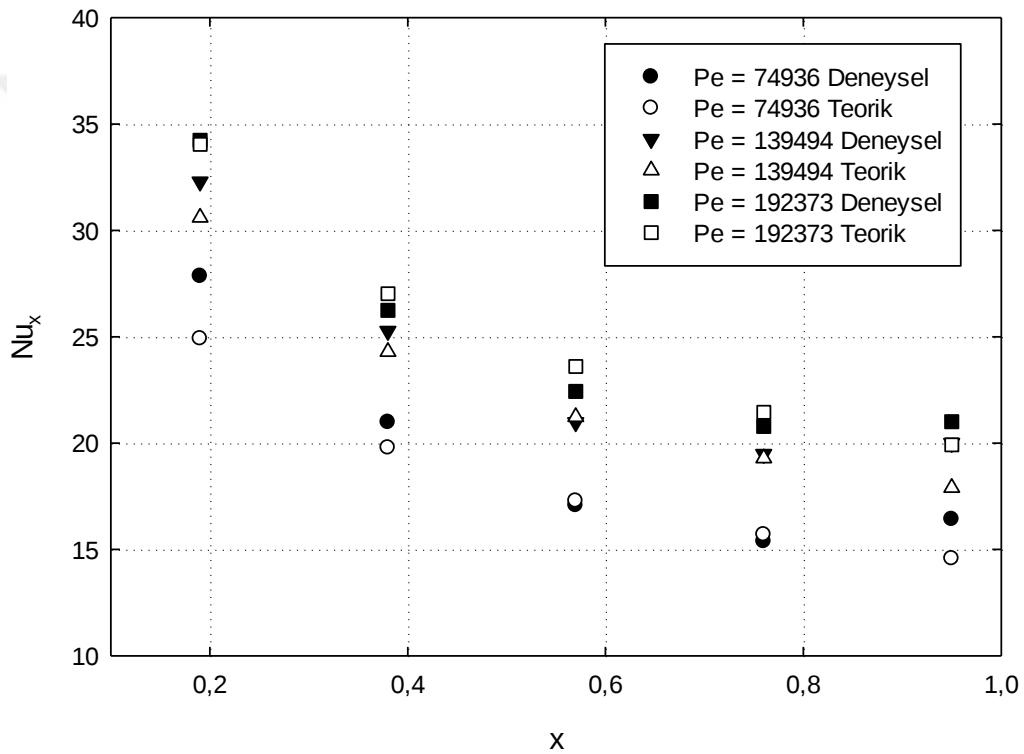
Şekil 46. Sürtünme faktörünün kanatçık burulma açısı ile değişimi (2 kanatçık)



Şekil 47. Sürtünme faktörünün kanatçık burulma açısı ile değişimi (4 kanatçık)

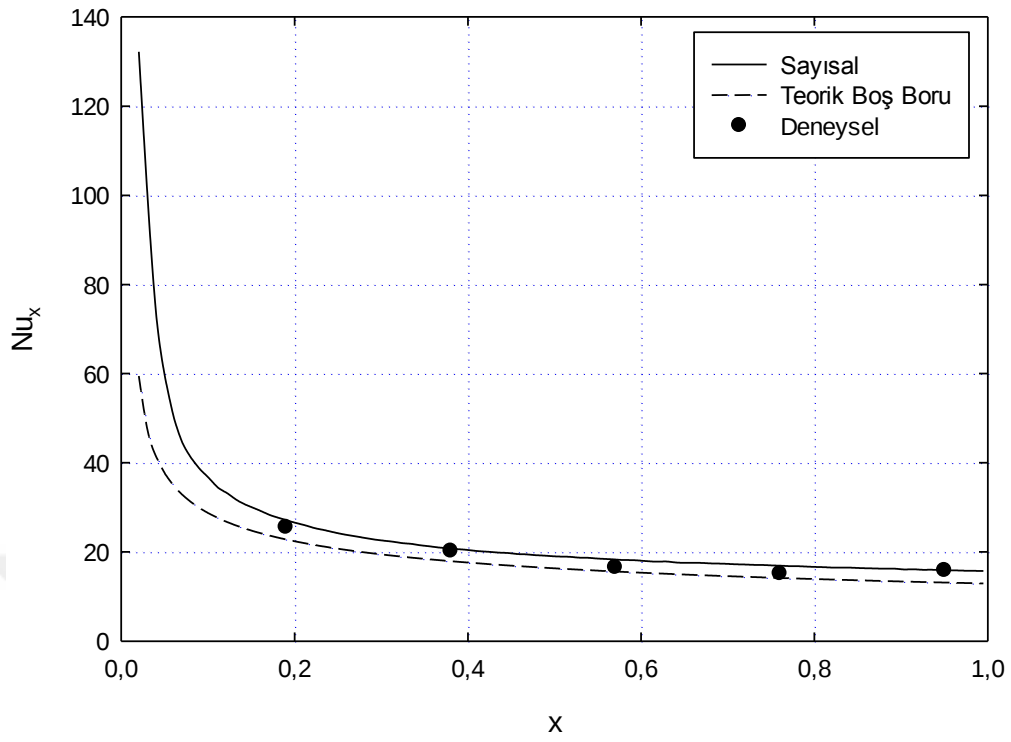
3.2. Baz Akışkanlı Deneysel Çalışma Bulguları

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, boru duvarında sabit ısı akısı sınır koşulu altında termal olarak gelişmekte olan akışta yerel Nu sayısının farklı Pe sayılarında değişimi literatürden gelen değerler ile birlikte sunulmuştur. Çalışma ilk olarak kanatçıksız yani boş boru için gerçekleştirilmiştir. Şekil 48’de görüldüğü üzere yerel Nu sayısı akış yönünde giderek azalmakta ve teorik sonuçlarla (Denklem (7)) örtüşmektedir.

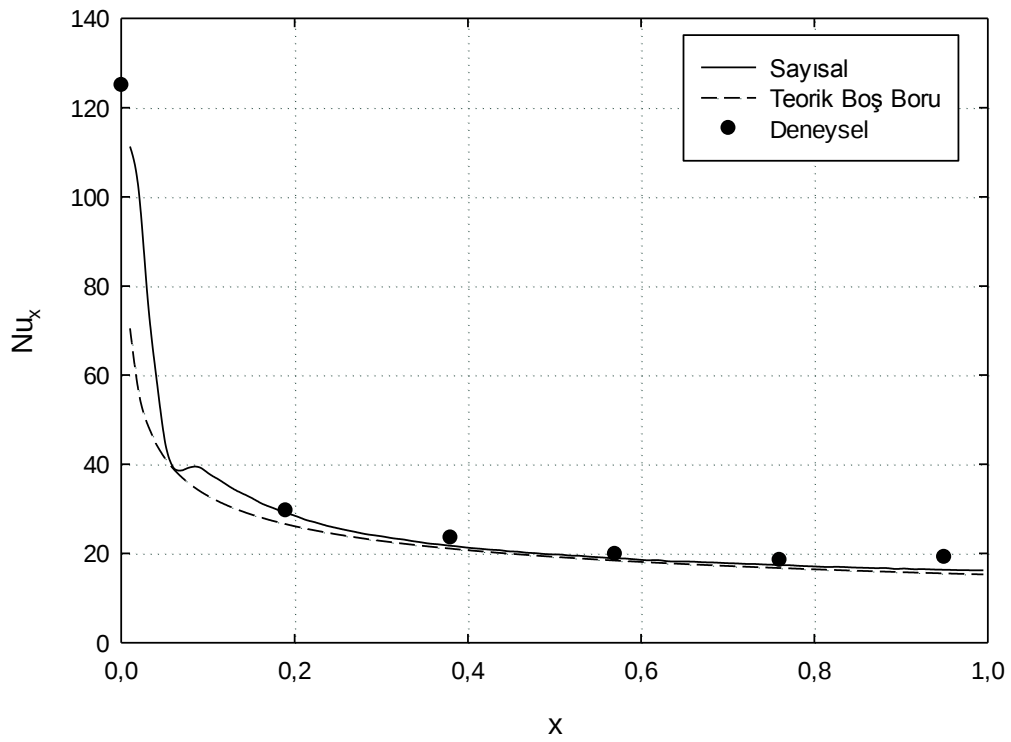


Şekil 48. Yerel Nu sayısının ilave elemansız durumdaki sonuçları

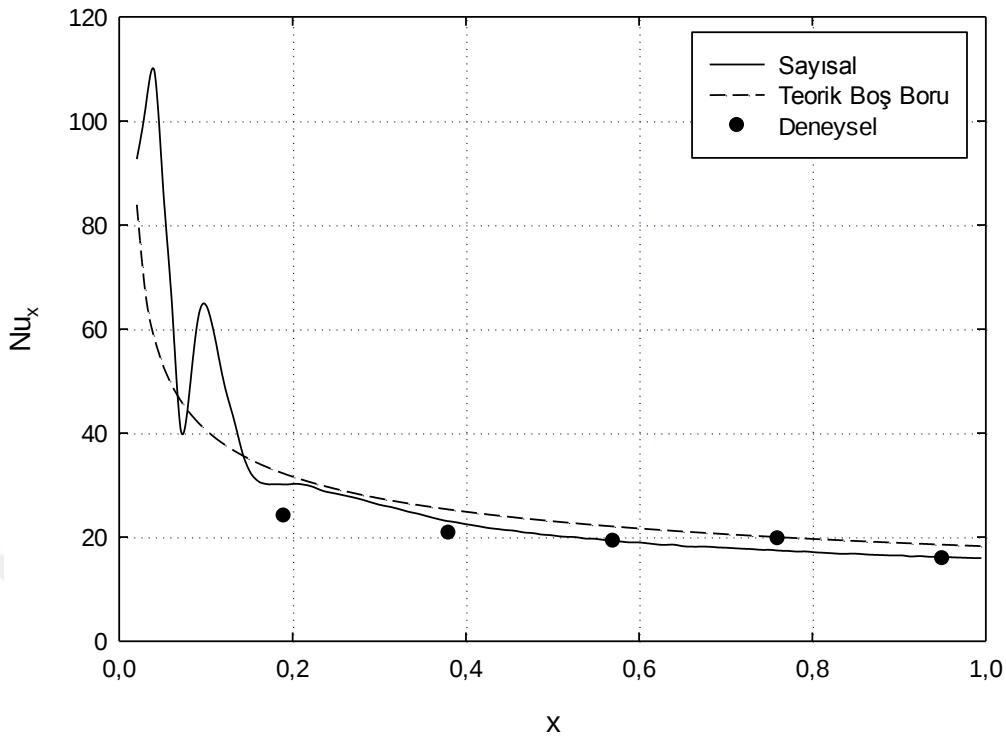
Aynı deney borusu üzerinde akış döndürücü kullanılarak deneysel sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar sayısal sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Karşılaştırma, 4 kanatçıklı / $l^* = 0,75r_0 / 90^\circ$ elemanı için 3 farklı Pe sayısında yapılmıştır. Bu çalışmaların sonuçları Şekil 49-51’de sunulmuştur.



Şekil 49. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Pe = 48446$)



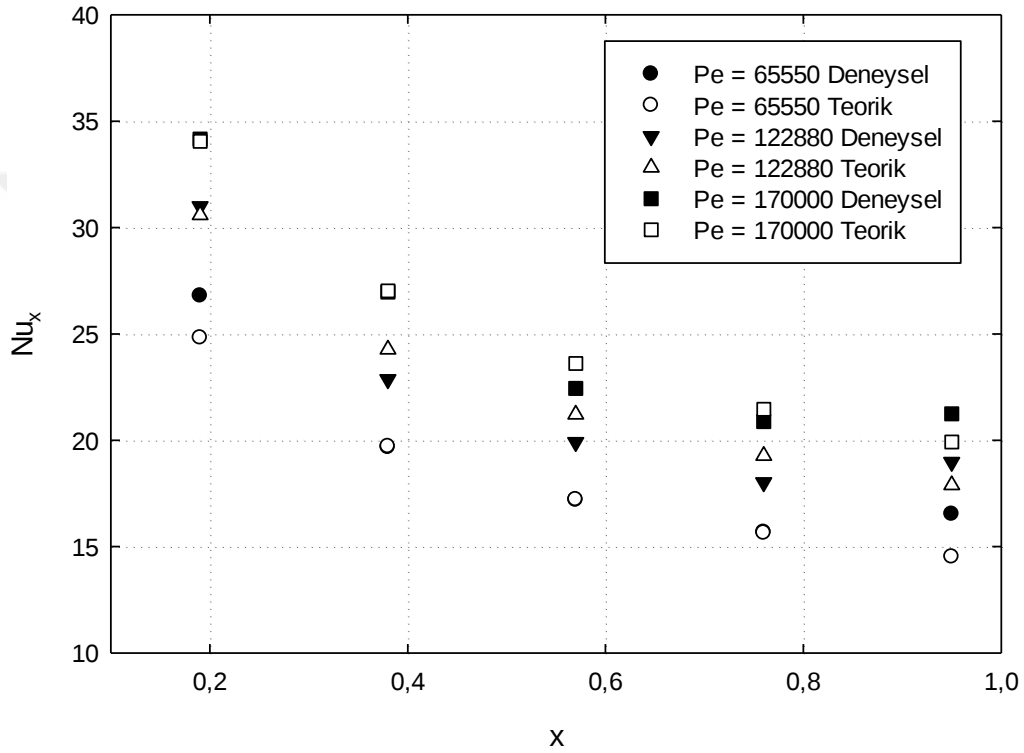
Şekil 50. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Pe = 80138$)



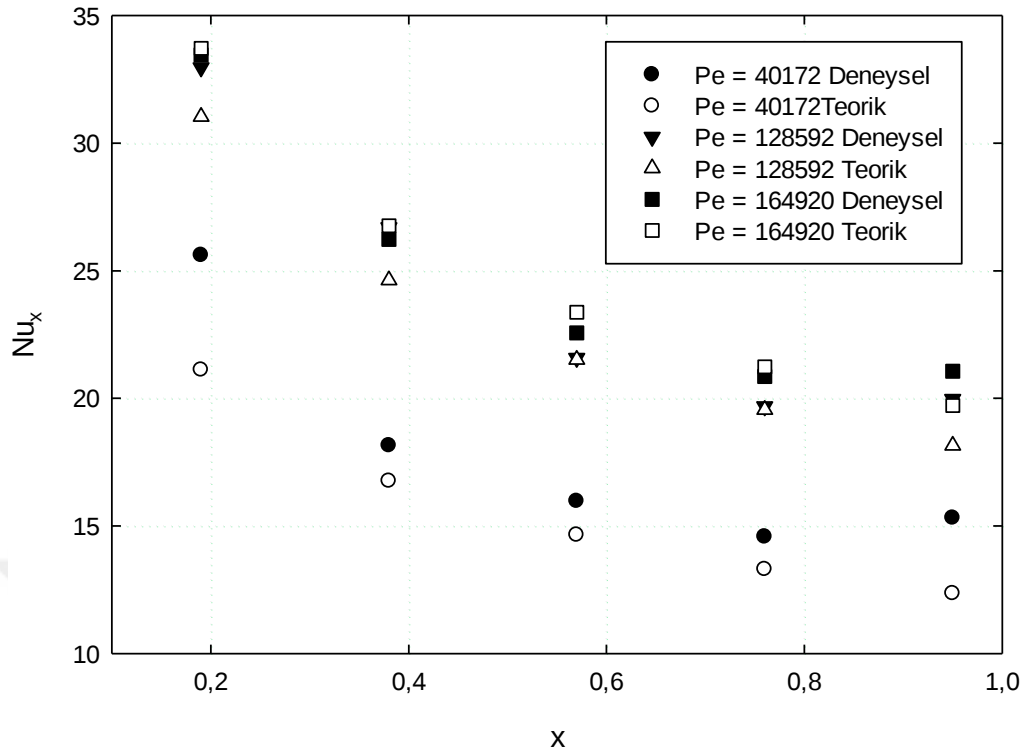
Şekil 51. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi ($4 \text{ kanatçık} / l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / Pe = 136153$)

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde boru giriş bölgesi dışındaki tüm bölgelerde sayısal, deneysel ve teorik sonuçların birbiri ile örtüştüğü görülmektedir. Boru giriş bölgesi içinde kalan alanda gerçekleşen etkilerin yüksek gradyan oluşturduğu daha önce sunulan sayısal çalışma sonuçlarında da belirgin olarak görülmektedir. Burada oluşan etkilerin deneysel olarak ölçümler ile belirlenmesi oldukça yüksek hassasiyet gerektiren ölçü aletleri kullanımını gerektirmektedir. Sıcaklık ölçümü boru duvarından değişen eksenel konumlarda (z doğrultusunda değişken, radyal ve açısıl konumlarda sabit) gerçekleştirilmiştir. Döndürücü eleman çıkışından itibaren duvar sıcaklığının akış doğrultusundaki değişiminin dalgalı olduğu ve bu dalgalı durumun akış doğrultusunda giderek azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan bu dalgalanmanın aynı bölgede yüksek Pe sayısı ile daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu dalgalı sıcaklık değişimi sayısal sonuçlarda görülmektedir. Deneysel sonuçlarda, eleman çıkışına yakın bölgelerde sıcaklık ölçümü alınmadığı için bu dalgalanma görülmemekte, ancak ilerleyen x konumlarında deneysel sıcaklık ölçümleri ile sayısal bulguların örtüştüğü ve böylece sistemin doğrulandığı görülmektedir.

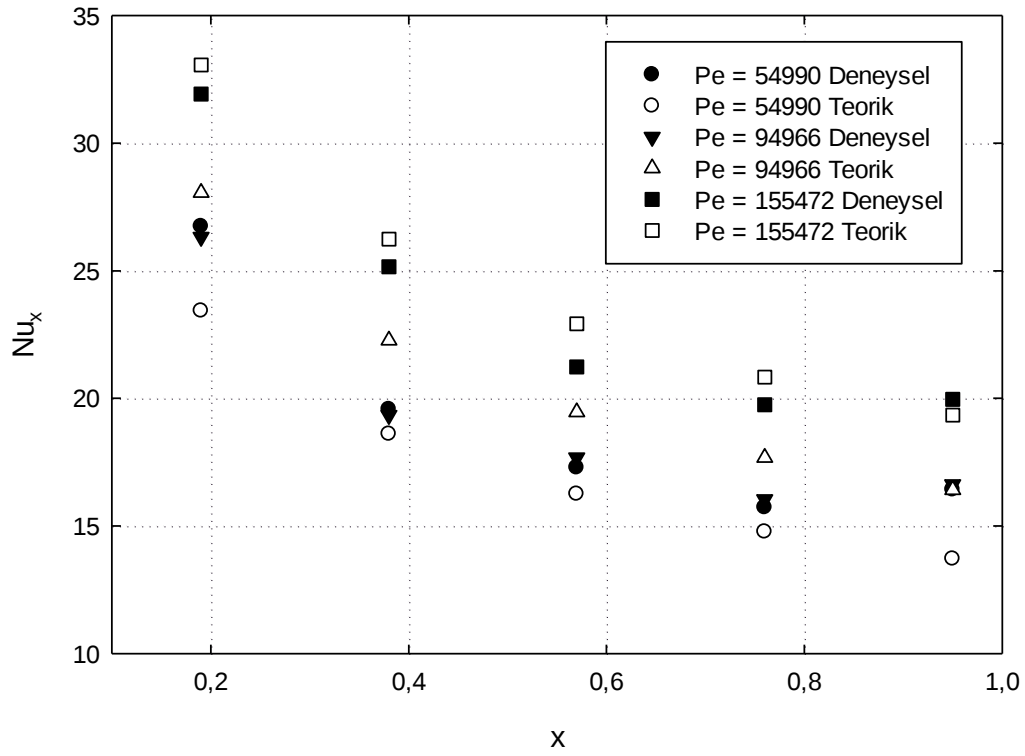
Sistem doğrulama deneylerinden sonra geometrik ve hidrodinamik parametre çalışmalarına geçilmiştir. Deneysel çalışmada sayısal çalışmada kullanılan geometrik parametrelerin aynısı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada hidrodinamik parametre, Denklem (7)'nin analitik sonuçları ile doğrudan karşılaştırma yapabilmek için Re sayısı yerine Pe sayısı olarak seçilmiştir. Bu karşılaştırma ile ilgili sonuçlar yerel Nu sayısı cinsinden Şekil 52-67'de görülmektedir.



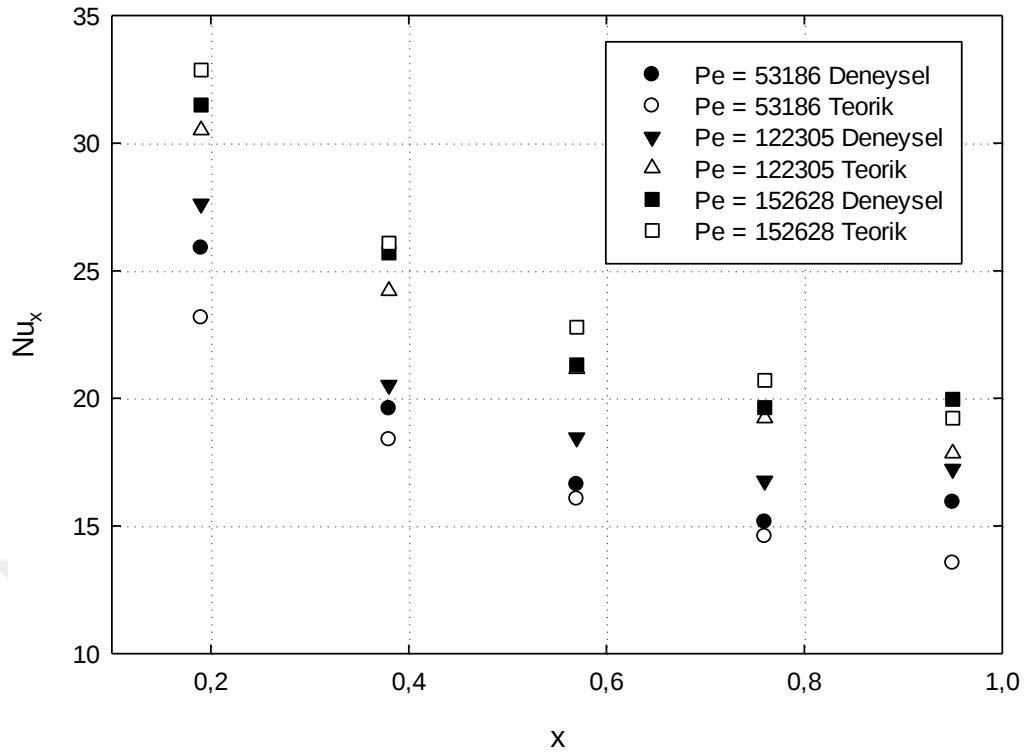
Şekil 52. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi ($2 \text{ kanatçık} / l^* = 0,25r_0 / \alpha = 0^\circ$)



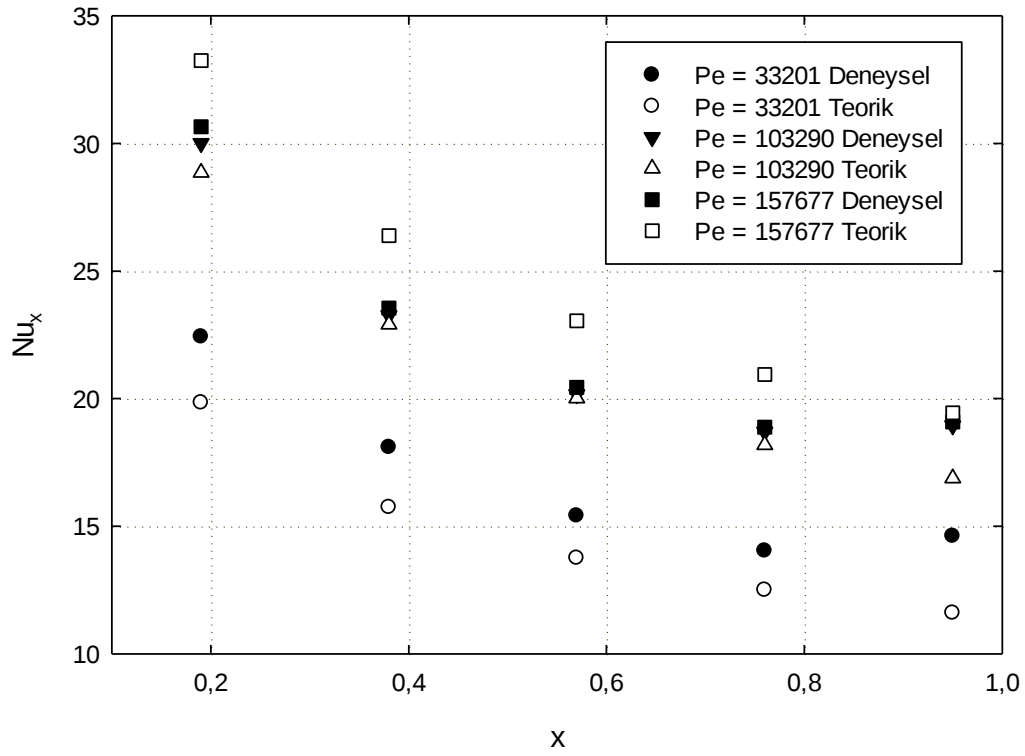
Şekil 53. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 30^\circ$)



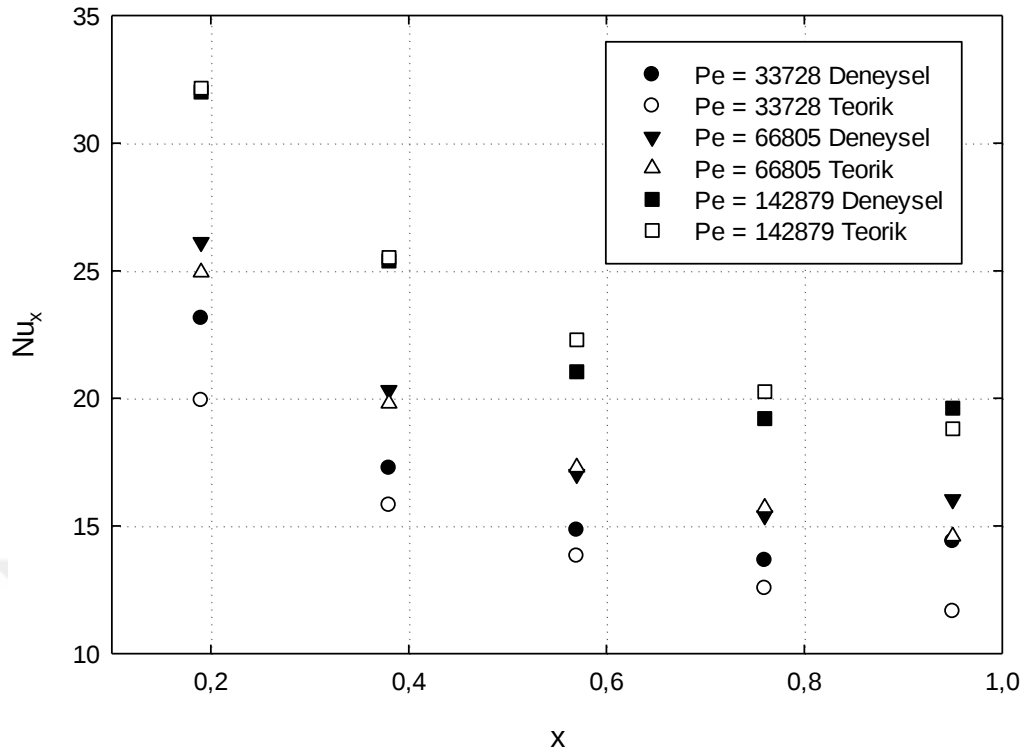
Şekil 54. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 60^\circ$)



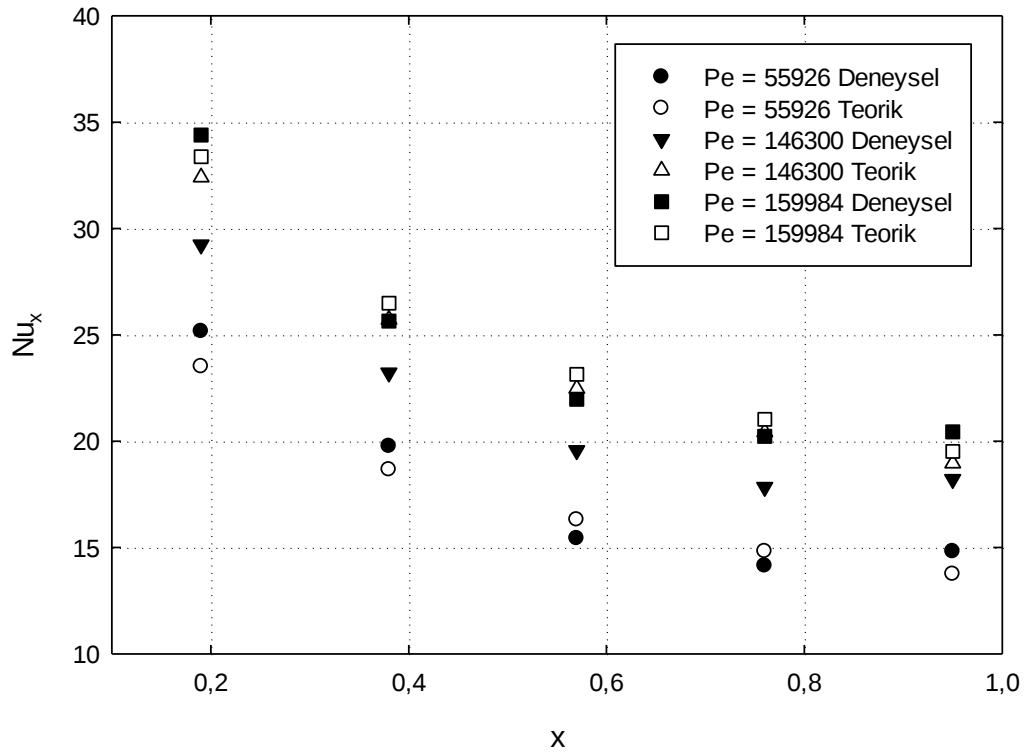
Şekil 55. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ$)



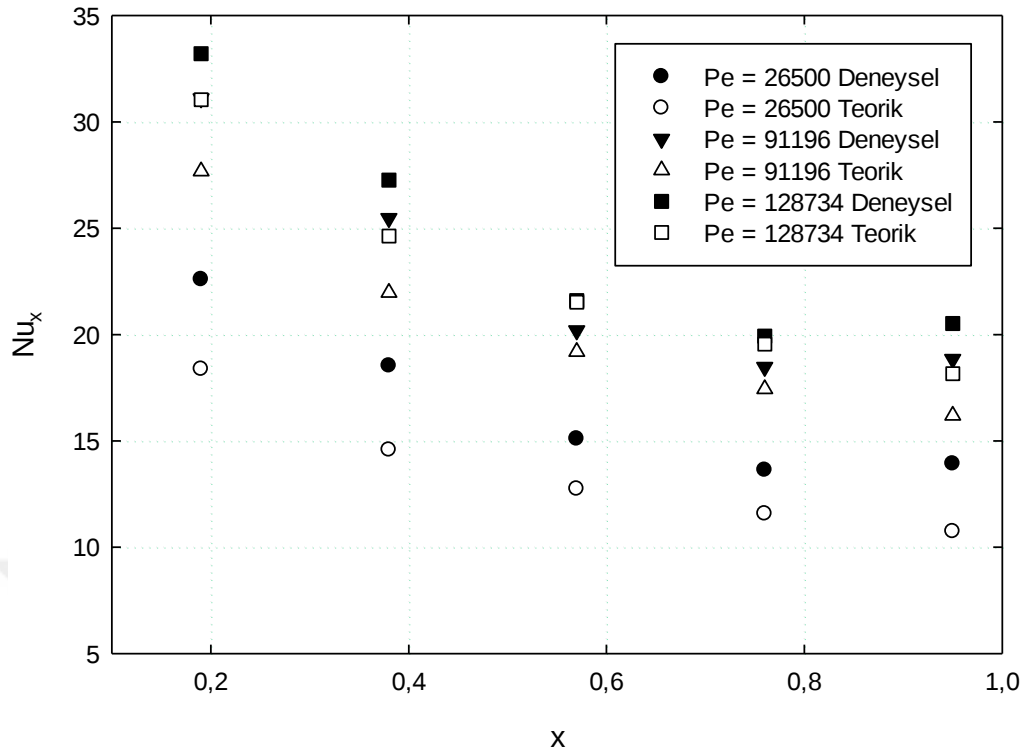
Şekil 56. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 0^\circ$)



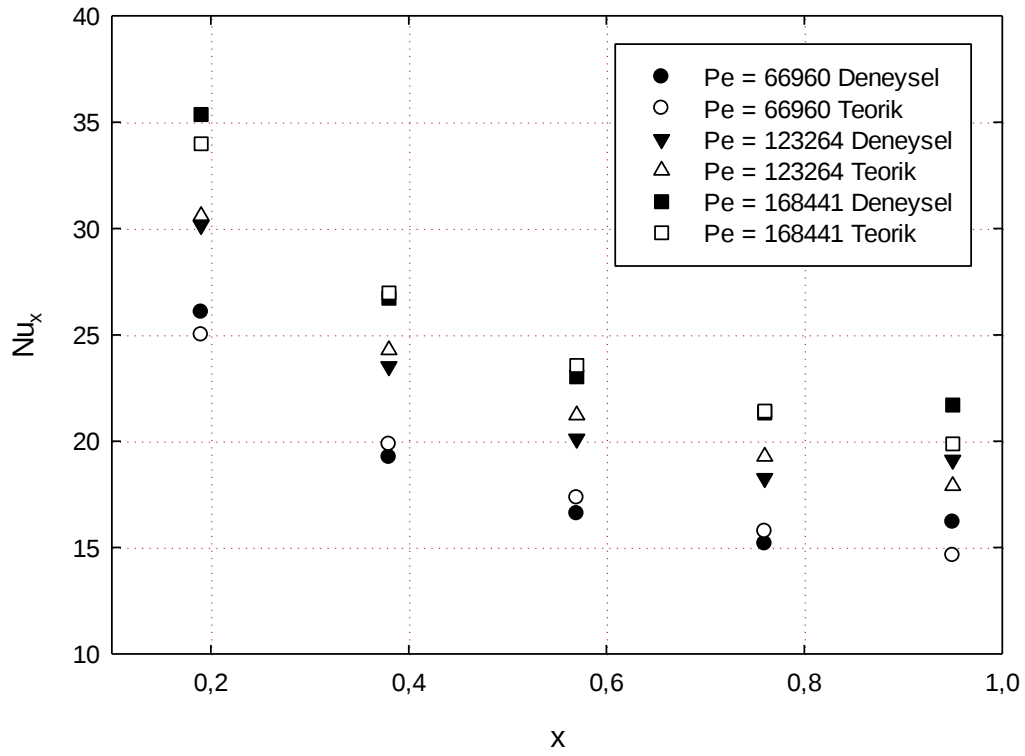
Şekil 57. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 30^\circ$)



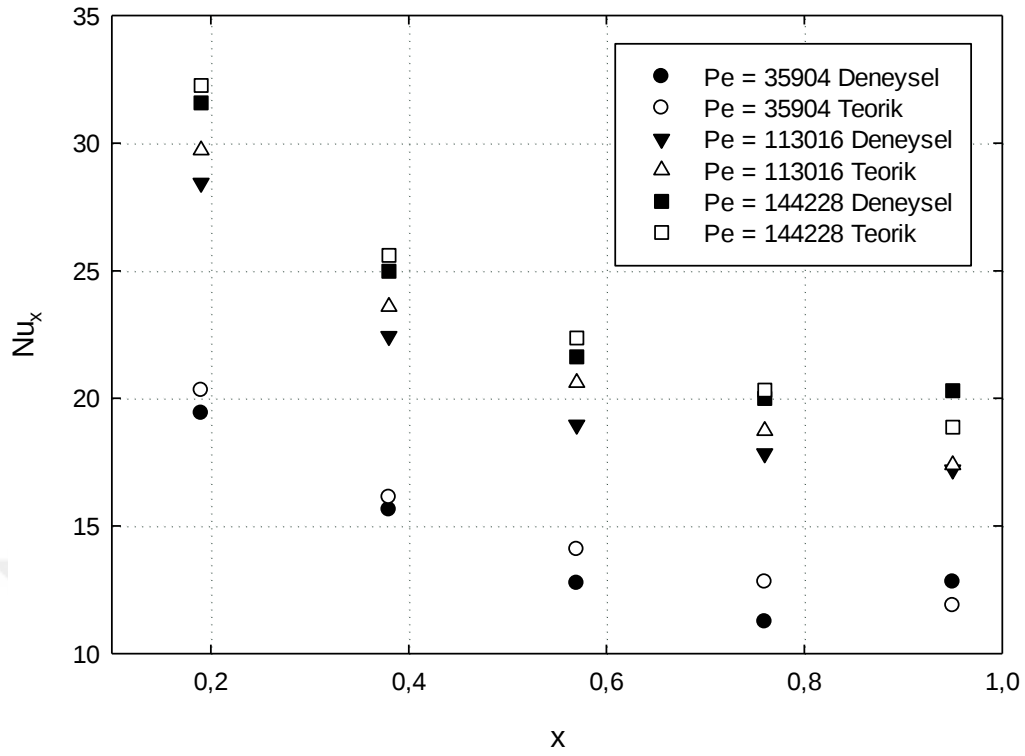
Şekil 58. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 60^\circ$)



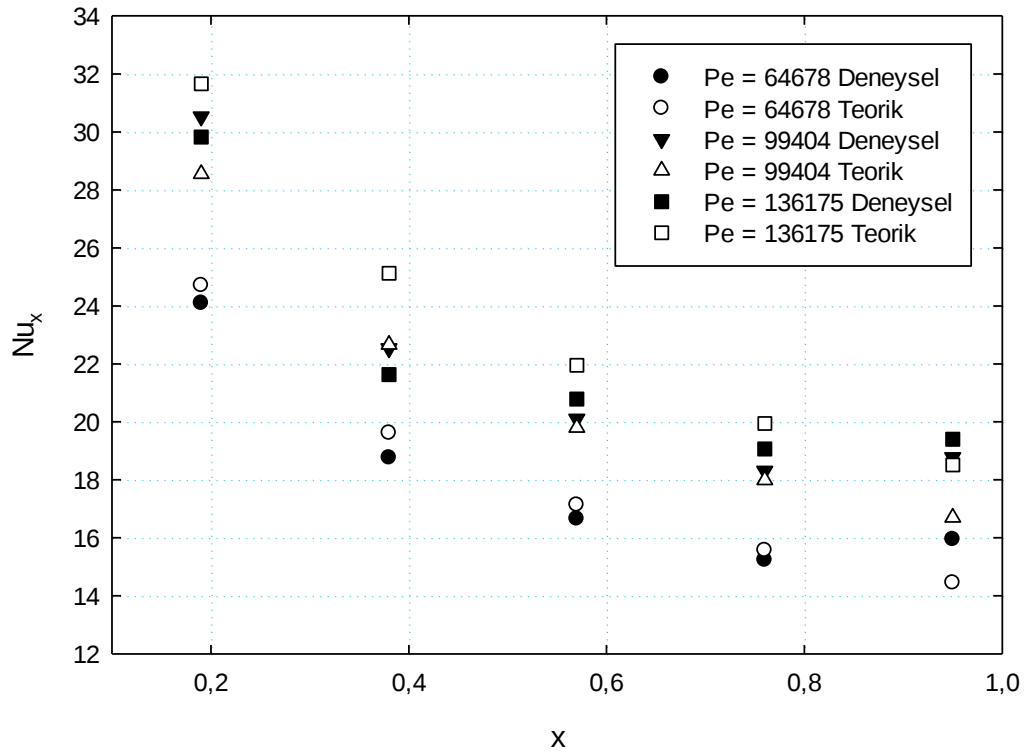
Şekil 59. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ$)



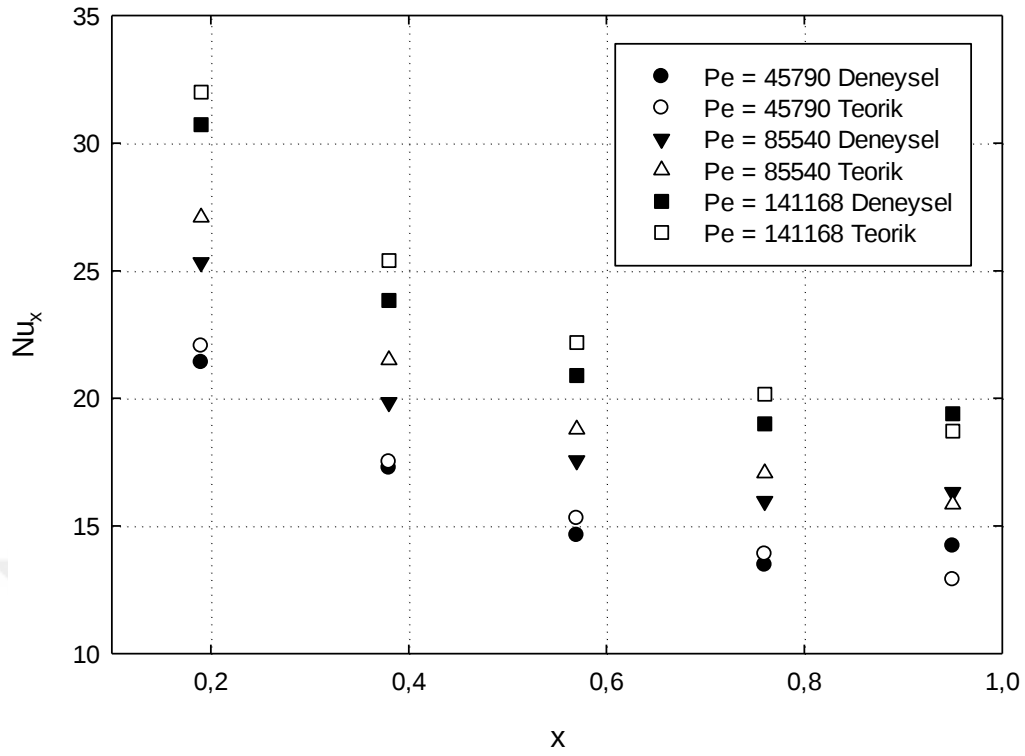
Şekil 60. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 0^\circ$)



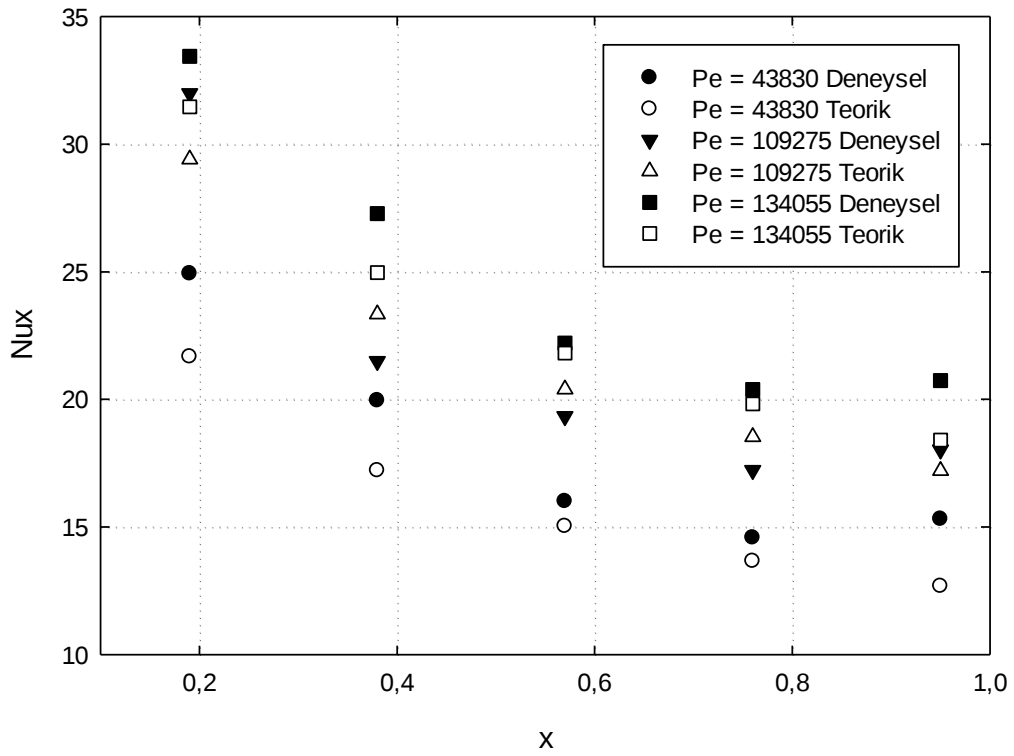
Şekil 61. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 30^\circ$)



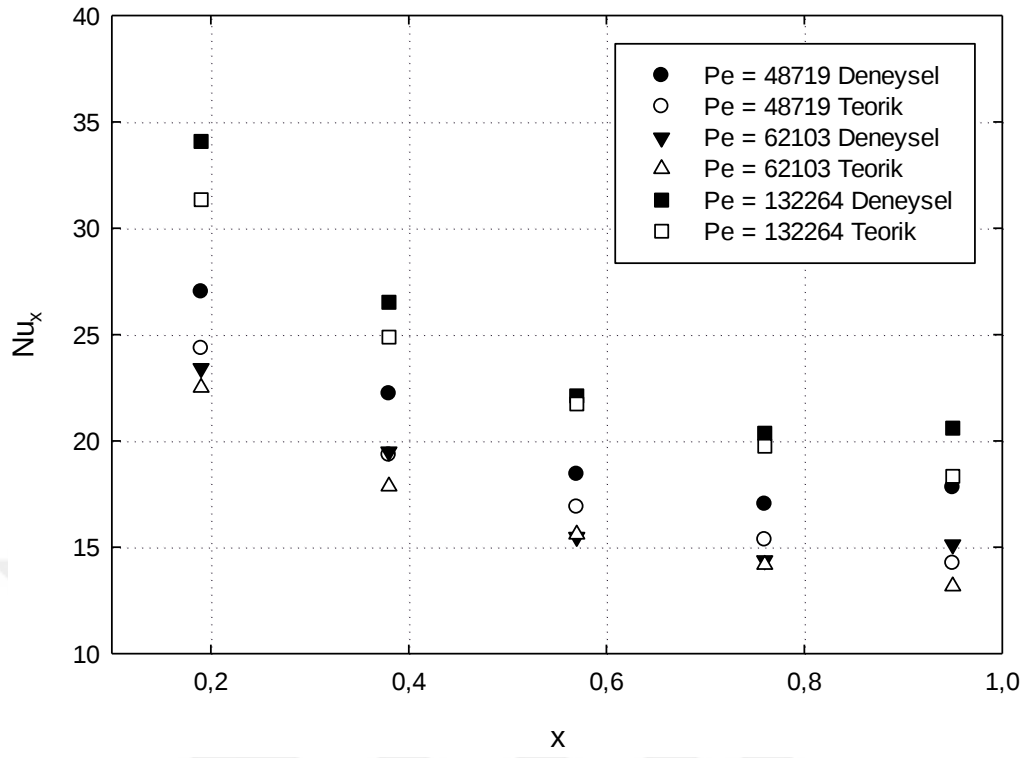
Şekil 62. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 60^\circ$)



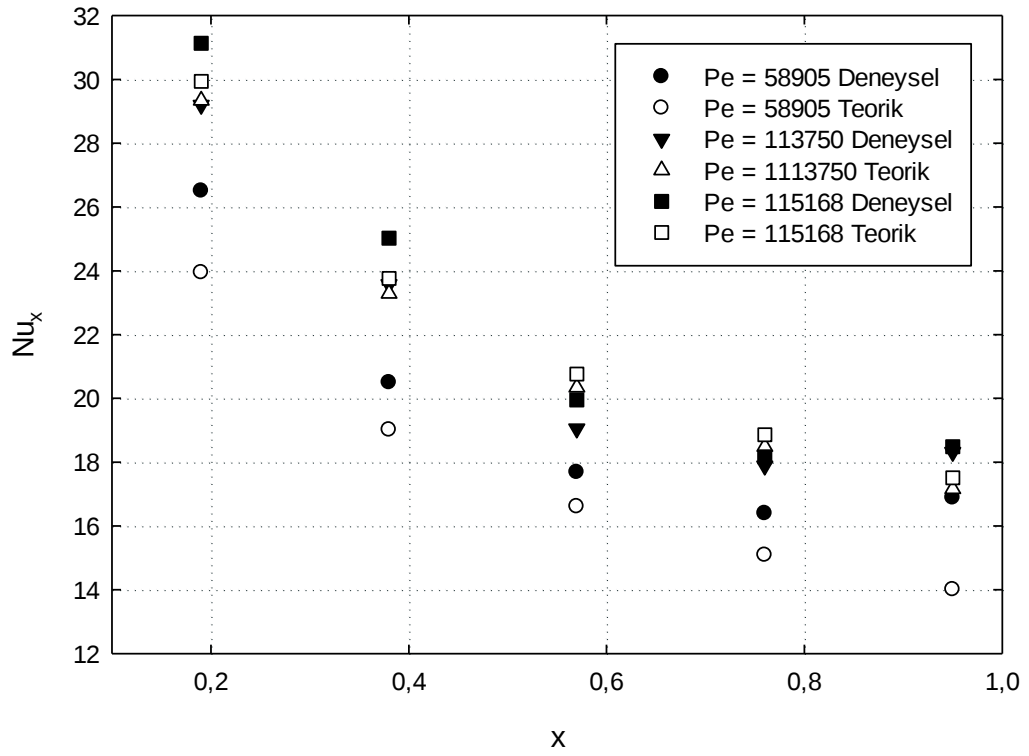
Şekil 63. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$)



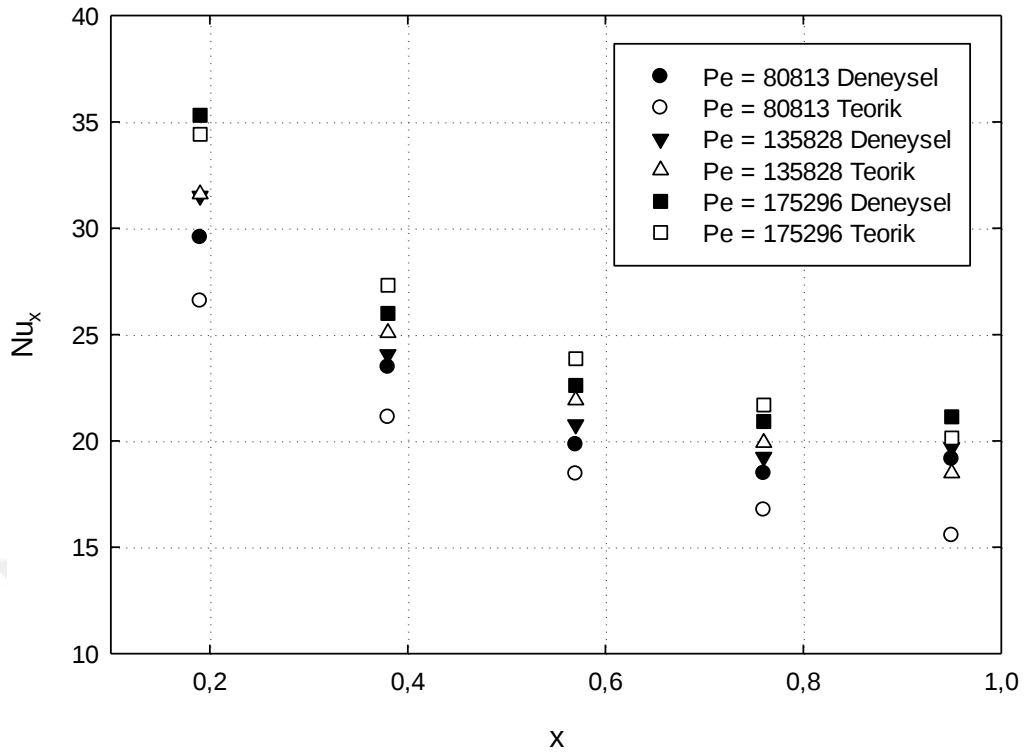
Şekil 64. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 0^\circ$)



Şekil 65. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 30^\circ$)



Şekil 66. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 60^\circ$)



Şekil 67. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi ($4 \text{ kanatçık} / l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ$)

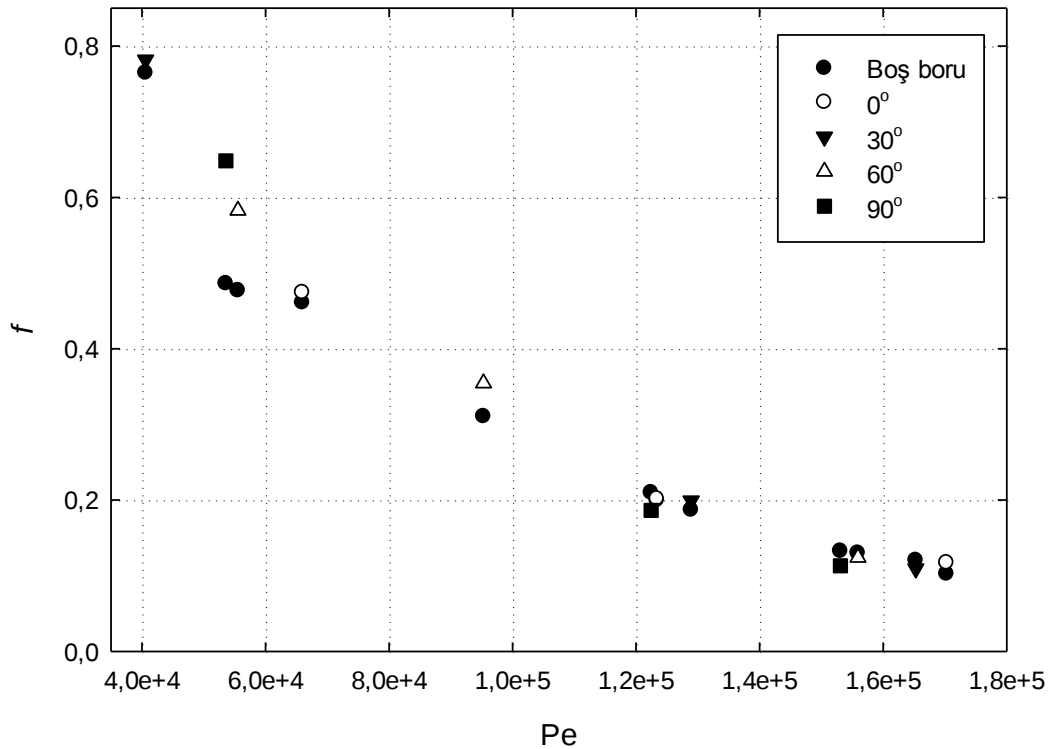
Sunulan grafiklerde genel olarak artan Pe sayısı ile Nu sayısının beklenildiği gibi arttığı görülmektedir. Artan kanatçık burulma açısının yerel Nu sayısı üzerindeki etkisi giriş bölgesinde borunun akış doğrultusunda ilerleyen konumlarına göre görece yüksek olmaktadır. Görece kısa kanatçık durumunda burulma açısının ısı transferine etkisi uzun kanatçığa göre daha düşük olmaktadır. Yüksek Pe sayılarında kanatçığın açısal etkileri sözs konusu belirginliğini kaybetmektedir. Bu durum, döndürücü eleman kanatçıklarının boru eksenine yakın bölgelere doğru sonlanması ve bu bölgedeki ana akışın dönme etkisini baskılamasından kaynaklanması şeklinde açıklanabileceğine imkân vermektedir. Sürtünme faktöründe ise sayısal bulgularla deneysel bulguların uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Şekil 52 incelendiğinde, kanatçık burulma açısı etkilerinin olmadığı durumda artan Pe sayısına bağlı olarak boru girişinde ısı transferinde %24 lük bir iyileşme elde edildiği bu iyileşmenin boru boyunca % 10 oranlarına kadar azaldığı görülür. Şekil 53 incelendiğinde ise kısa kanatçıklı düzenlemede üç kat artan Pe sayısının Nu sayısı üzerindeki etkisi, boru giriş bölgesinde % 47 oranında olur iken bu artışın boru çıkışına doğru % 28 lere kadar düştüğü görülmektedir. Benzer sonuçlar Şekil 54,55 içinde geçerli olmaktadır. Şekil 52 ile 55 birlikte incelendiğinde ise artan kanatçık burulma açısının aynı

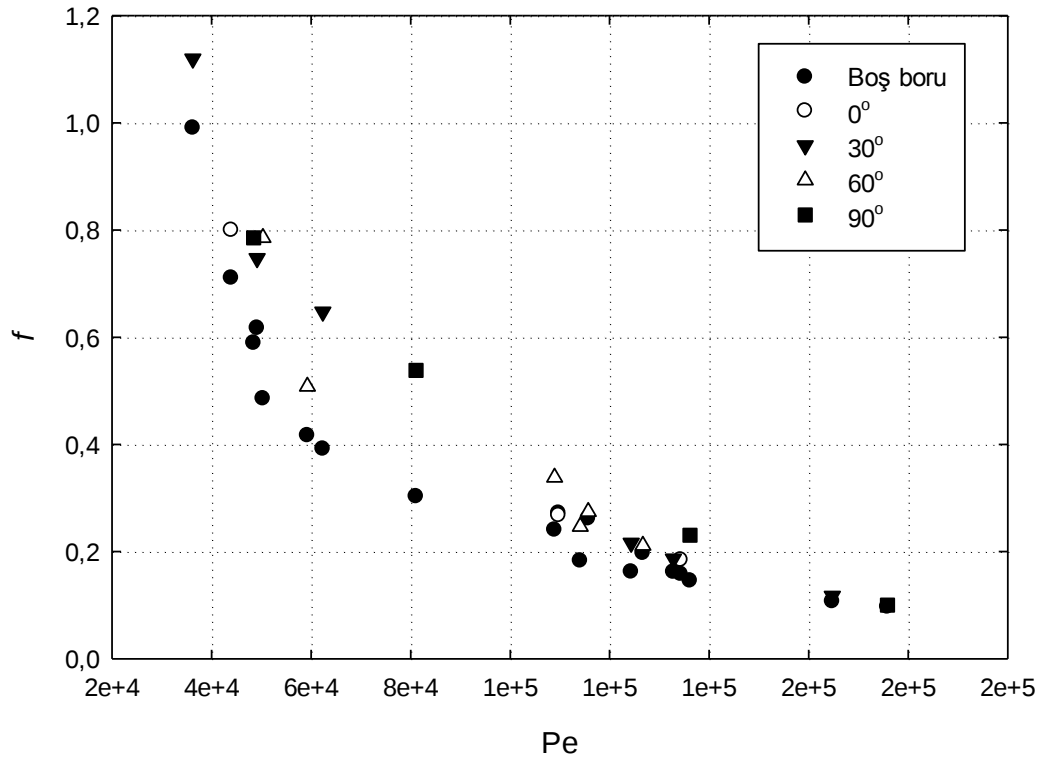
kanatçık adeti ve yüksekliği değerlerinde % 18 oranında iyileşme sağladığı görülmektedir. Bu etkinin diğer sonuçlara benzer şekilde boru boyunca azalarak devam ettiği ve en kötü kıyaslamada bile % 6 lık iyileşme olduğu görülmektedir. Şekil 56 - 59 arasındaki grafikler karşılaştırmalı olarak Şekil 52 - 55 ile birlikte incelendiğinde, üç katına çıkan kanatçık yüksekliğinin tüm durumlar için Nu sayısının arttırdığı görülmektedir. Bu artış % 29 oranlarına kadar ulaşmaktadır. Görece düşük Pe sayılarında bile % 4'varan artışlar belirlenmiştir.

Kanatçık sayısının iki katına çıkması ile elde edilen sonuçlar Şekil 60 - 67 arasında sunulmaktadır. Bu grafikler kendi içerisinde irdelendiğinde Nu sayısının iki kanatçıklı tüm durumlara göre daha yüksek çıktığı görülmektedir. Birbirine yakın Pe sayılarında yapılan kıyaslamalarda ise % 2 ile 15 oranlarında daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Dört kanatçıklı düzenlemede kanatçık burulma açısı ile oluşan iyileşme artış oranı iki kanatçıklı duruma göre daha düşük yüzde oranlarında gerçekleşmektedir.

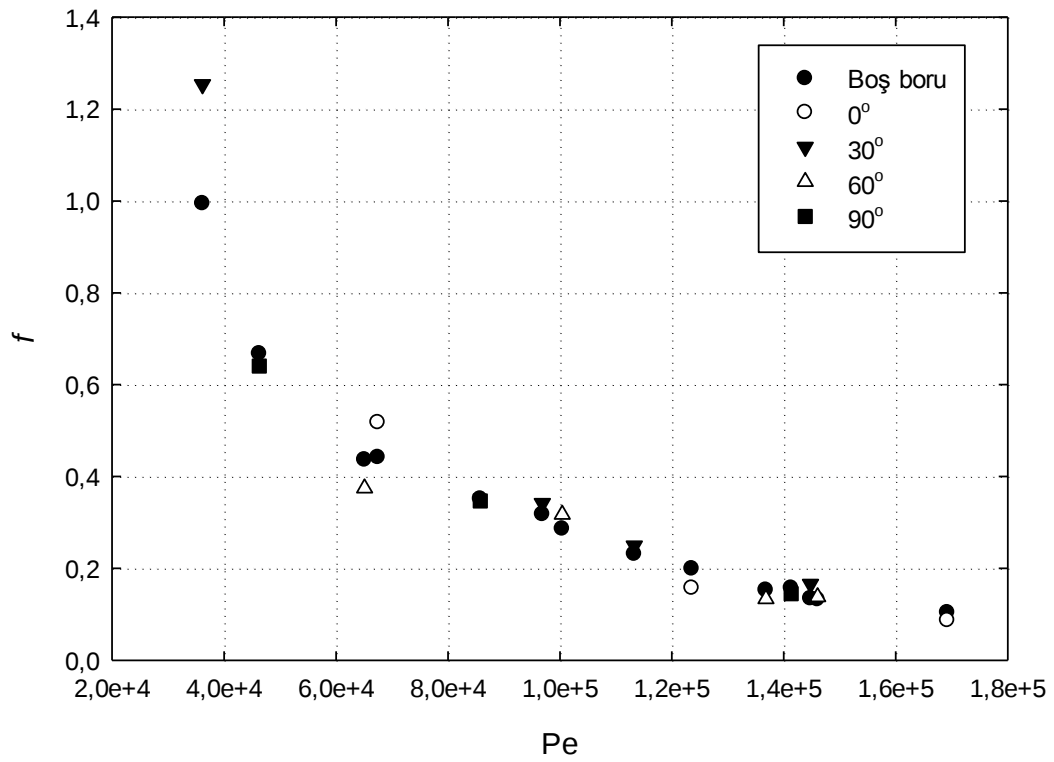
Geometrik ve hidrodinamik olarak yerel Nu sayıları cinsinden analiz edilen tüm durum sonuçları aynı zamanda f sürtünme faktörü değerleri için de incelenmiş ve sonuçları Şekil 68 - 71 arsında sunulmuştur.



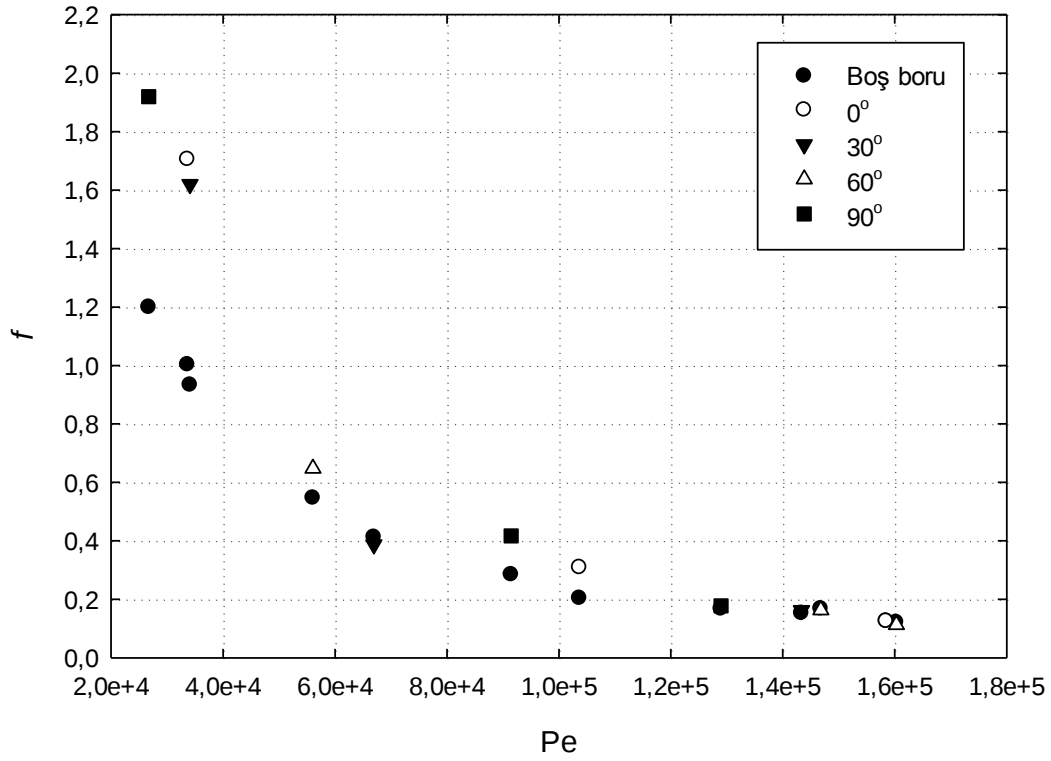
Şekil 68. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$)



Şekil 69. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$)



Şekil 70. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$)



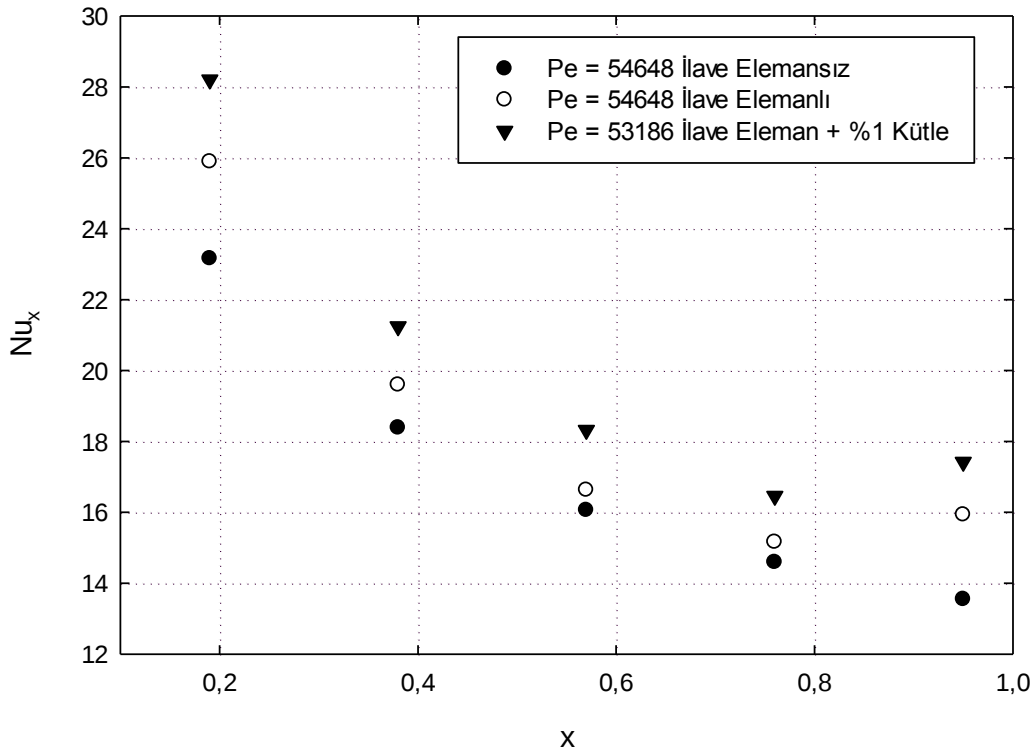
Şekil 71. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$)

Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde artan kanatçık burulma açısının iki kanatçıklı durumda kısa kanatçıklı düzenlemeye göre yüksek kanatçıklı durumda % 38 oranında artışa sebep olduğu görülmektedir. Bu artış dört kanatçıklı durumda, % 45 oranına ulaştığı görülmektedir. Boş boru olarak nitelendirilen durumun ise tüm durumlarda daha düşük sürtünme katsayıları değerinde olduğu görülmektedir. Kanatçık ilavesinin sistem üzerinde ısı transferi açısından olumlu etkisi olmasına rağmen basın kaybına etkileyen etkileri açısından da olumsuz durumların olduğu bilinen bir gerçektir. Bu ve benzeri çalışmalarda sisteme etki eden toplam iyileşmeyi temsil etmek için her iki etkiyi içerecek şekilde analizlerin yapılması gerekmektedir.

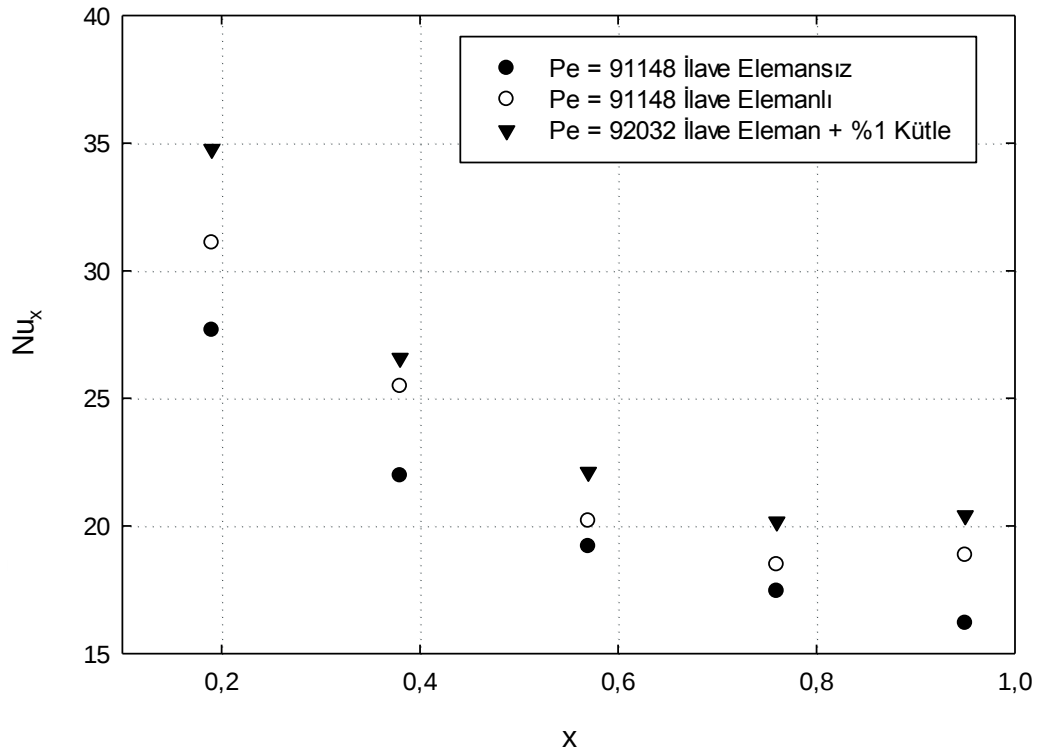
3.3. Nanoakışkanlı Deneysel Çalışma Bulguları

Baz akışkanlı çalışmaların tamamlanmasından sonra nanoakışkanlı deneysel çalışmalara geçilmiştir. Nanoakışkanlarda çalışmanın bilinen zorluklarından biri olan parçacık çökmesi olması nedeni ile gerçekleştirilen çalışma durumları baz akışkanlı durumlara göre daha az sayıda, üç farklı Pe sayısı yerine iki farklı Pe sayısı için gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanlı deneylere, çalışma parametrelerine yeni bir parametre olarak parçacık kütle oranı eklenerek devam edilmiştir.

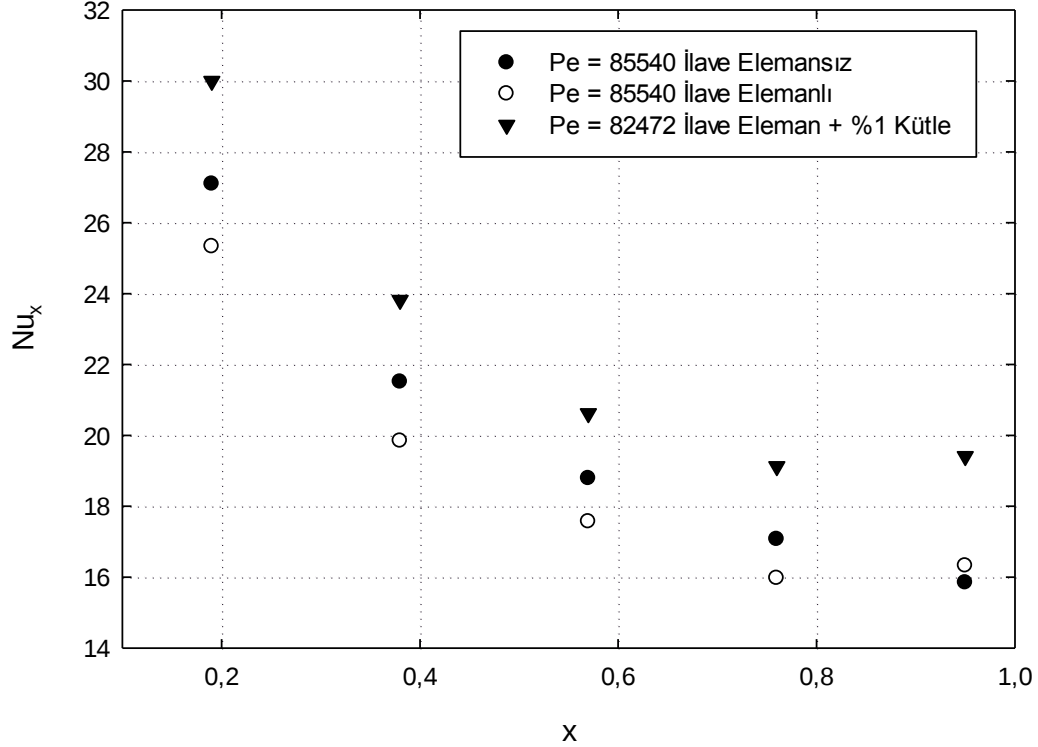
Baz akışkanla yapılan sayısal ve deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde, en etkin performansın 90° burulma açısında meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak nanoakışkanla yapılan deneylerde geometrik parametre olarak yalnızca 90° burulma açılı olan sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu kapsamdaki yerel Nu sayılarına ait sonuçlar Şekil 72-83 arasında, sürtünme faktörü sonuçları ise Şekil 84-95 arasında sunulmaktadır.



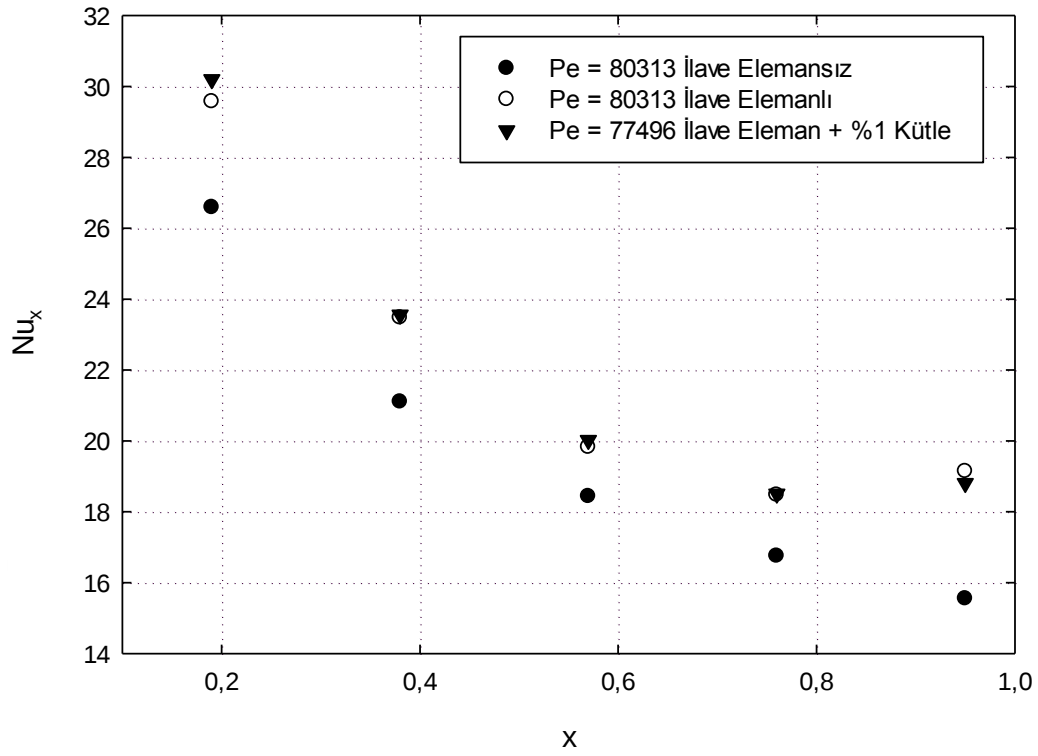
Şekil 72. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0 / \alpha = 90^\circ / \Phi = \% 1$)



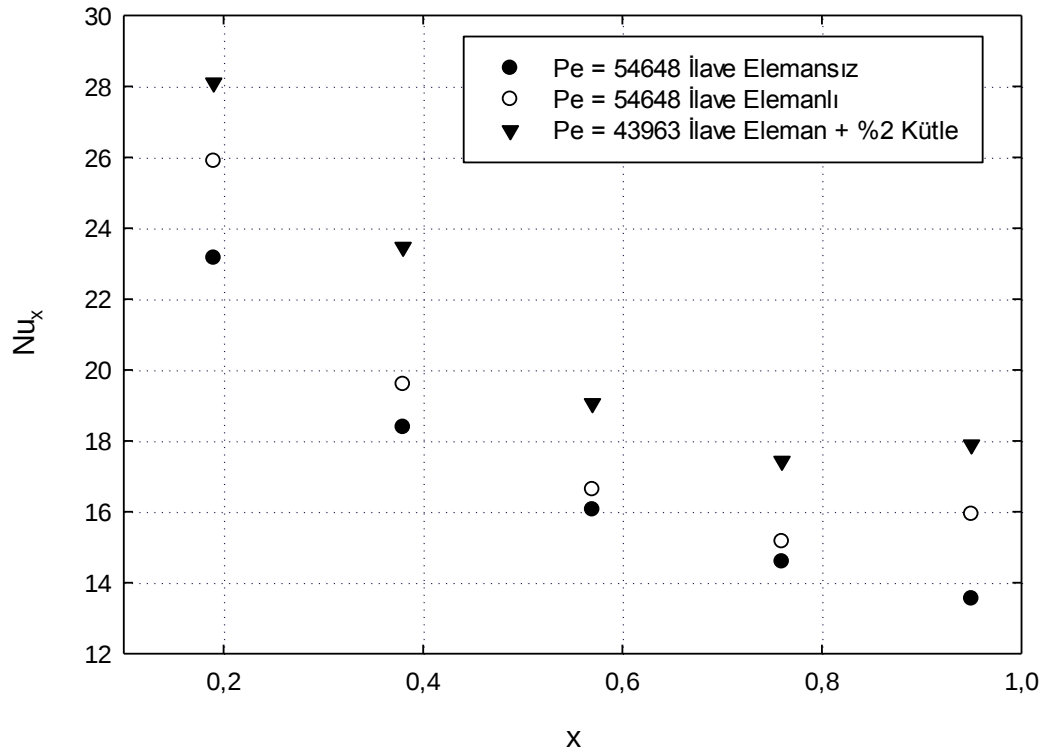
Şekil 73. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\Phi = \% 1$)



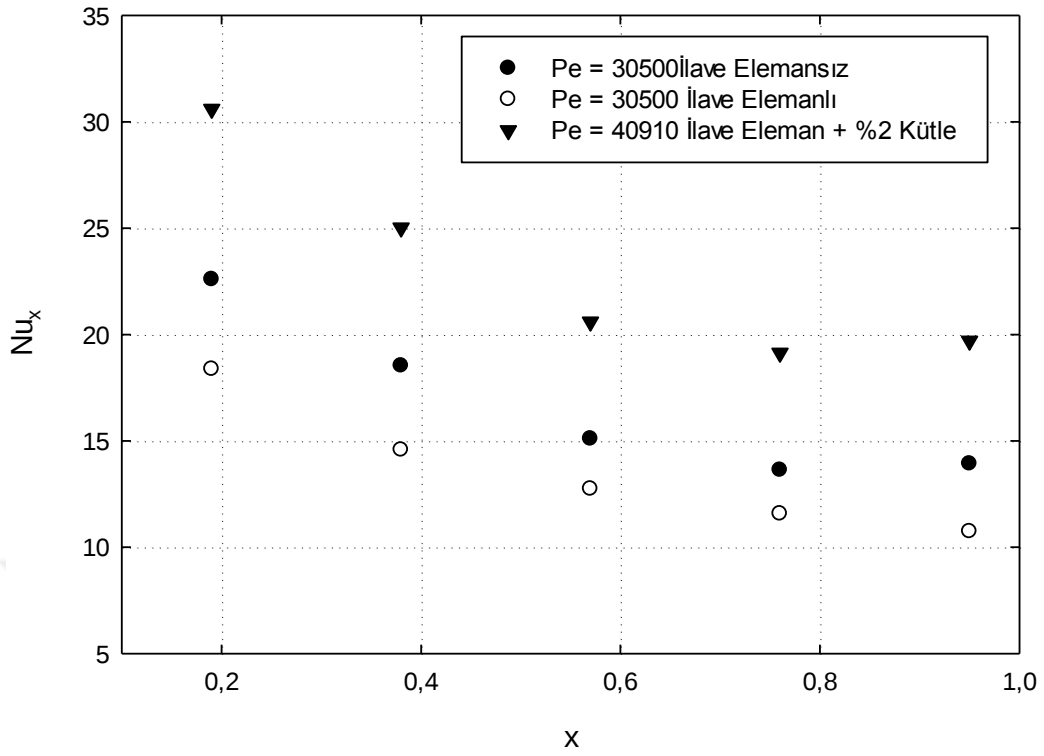
Şekil 74. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\Phi = \% 1$)



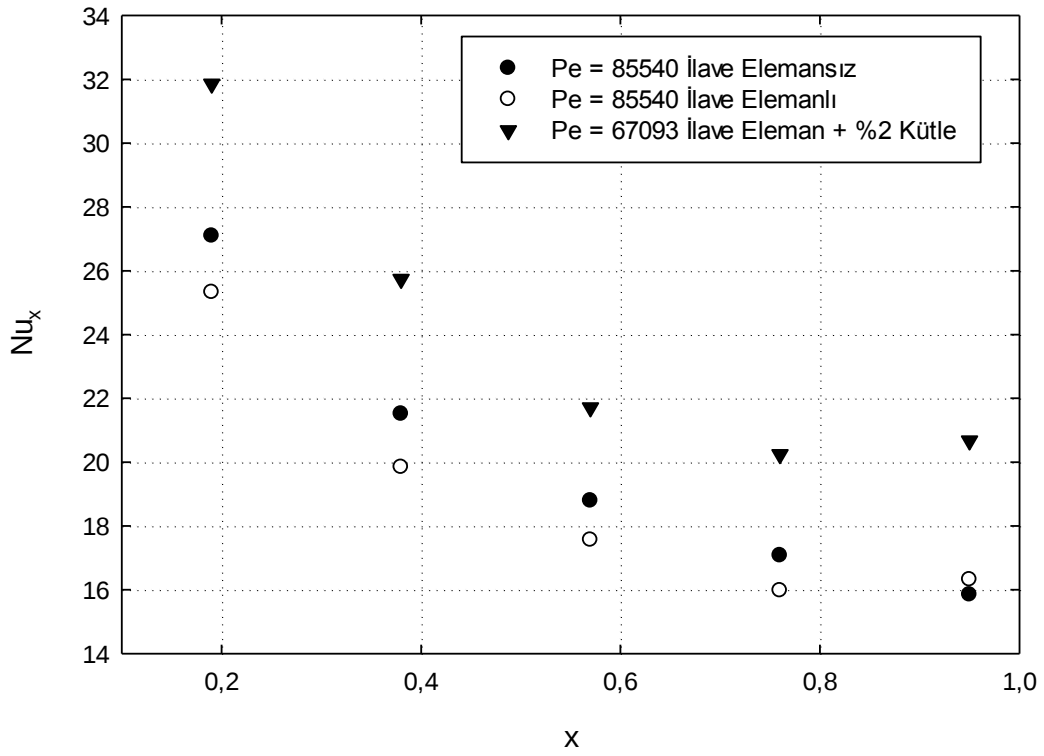
Şekil 75. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\Phi = \% 1$)



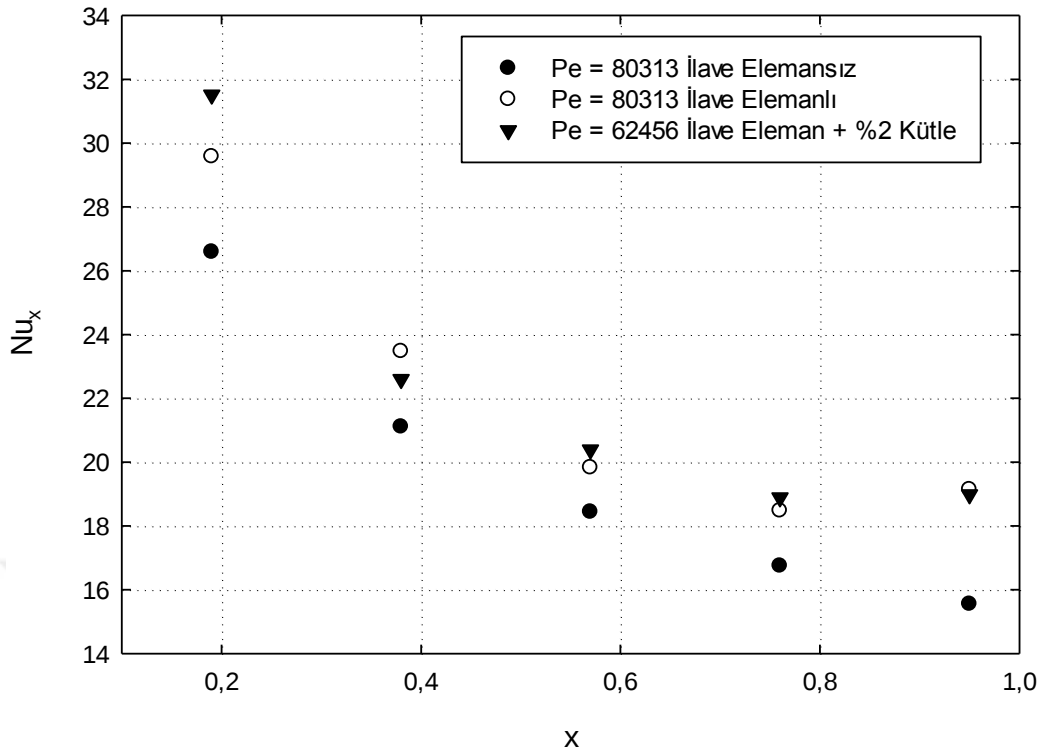
Şekil 76. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\Phi = \% 2$)



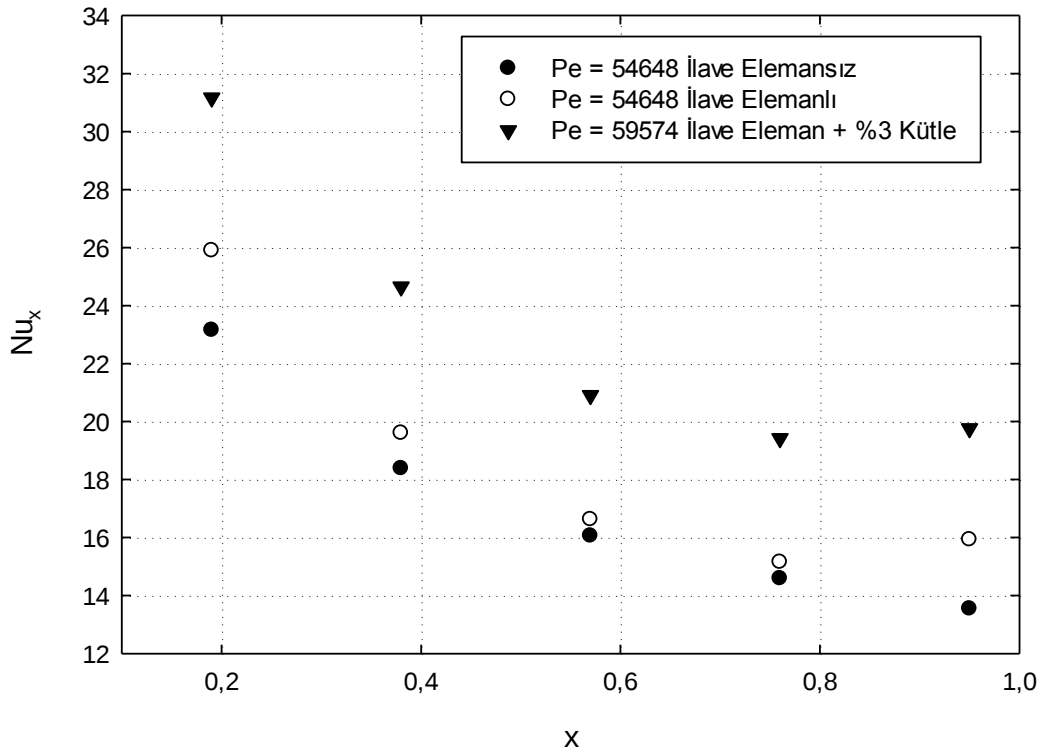
Şekil 77. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\Phi = \% 2$)



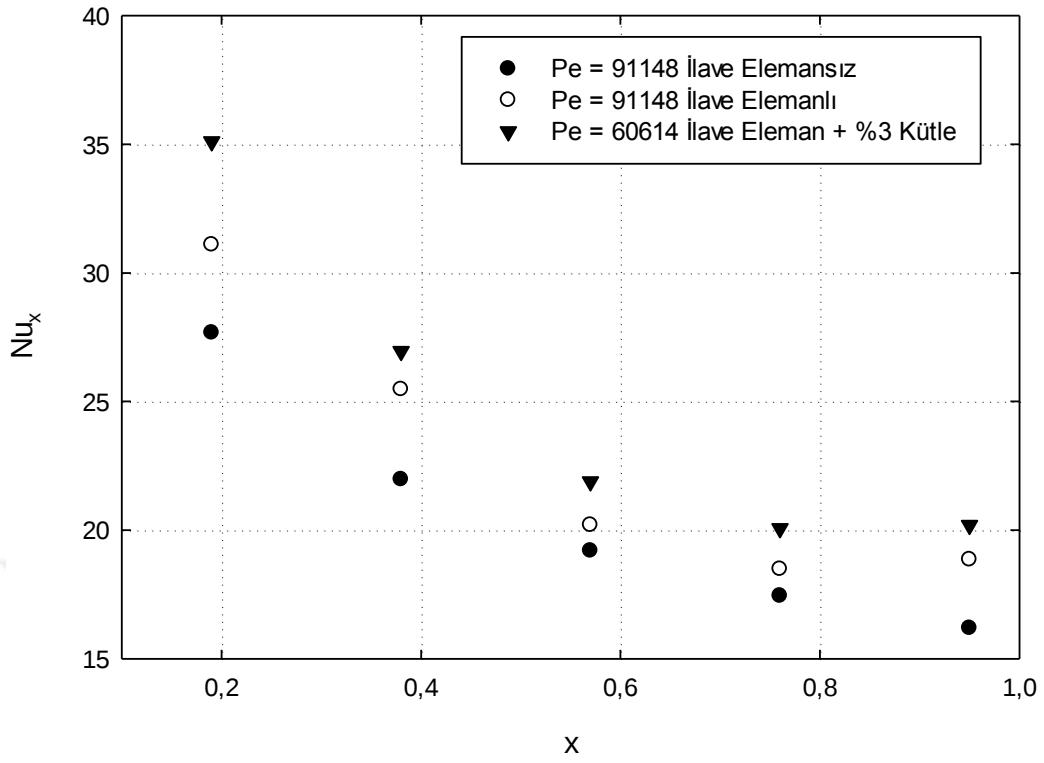
Şekil 78. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\Phi = \% 2$)



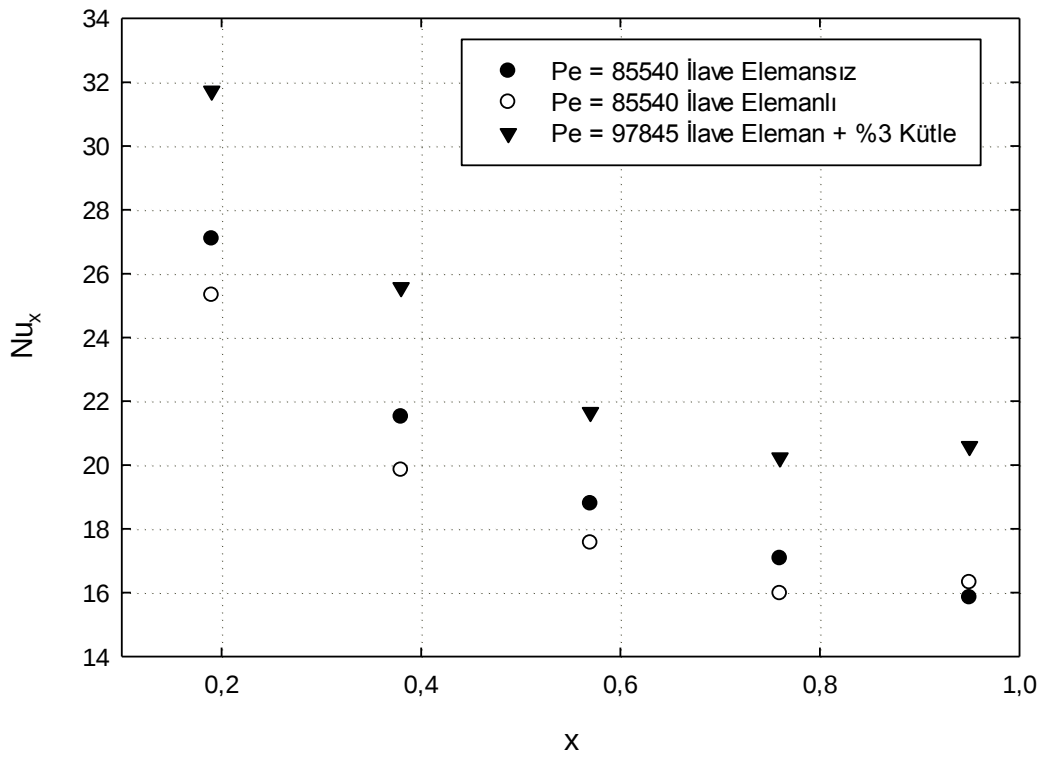
Şekil 79. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0.75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\phi = 2\%$)



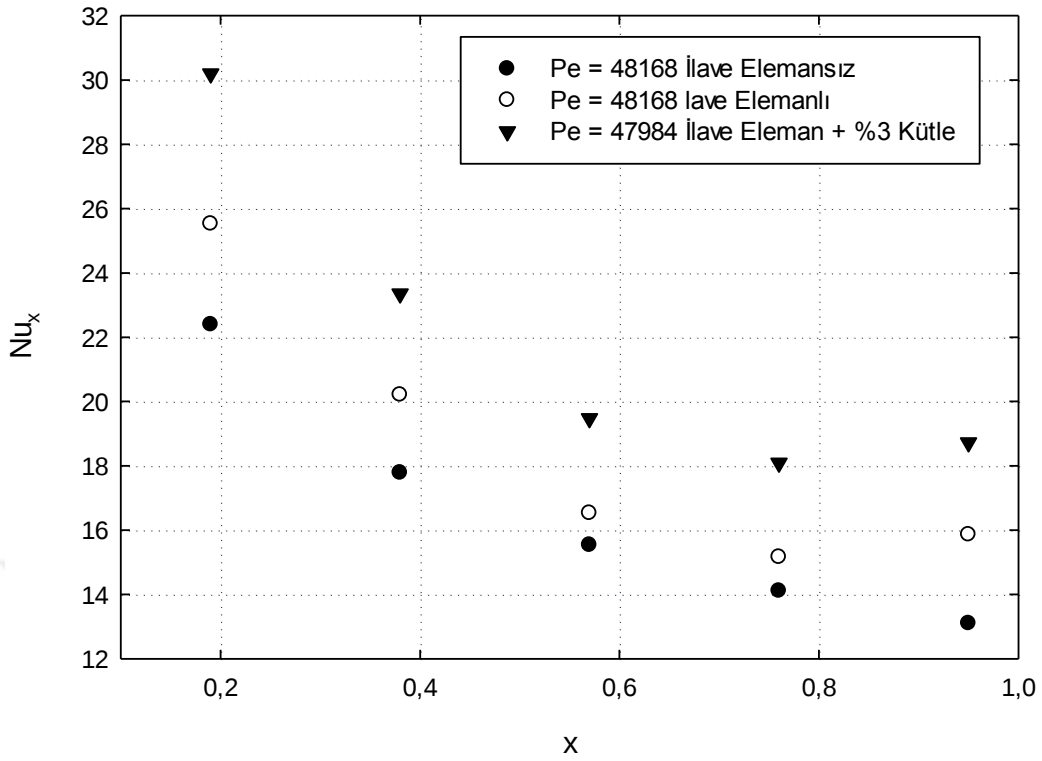
Şekil 80. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0.25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\phi = 3\%$)



Şekil 81. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\phi = \% 3$)



Şekil 82. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$ / $\phi = \% 3$)



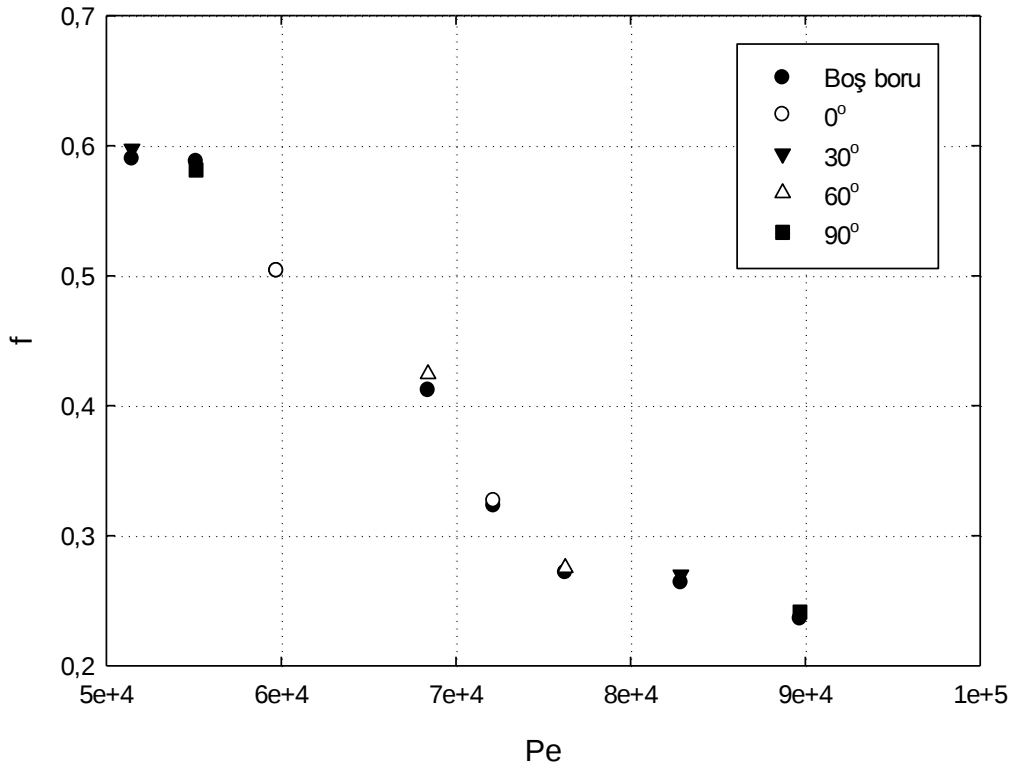
Şekil 83. Yerel Nu sayısının boru boyunca değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0 / \alpha = 90^\circ / \phi = \% 3$)

Söz konusu şekillerdeki grafikler incelendiğinde, artan kütle oranına bağlı olarak ısı transferinde bir artışın olduğu, artış hızının belirli bir kütle oranından sonra yavaşladığı görülmektedir. Pe sayısının etkisi ise baz akışkan deneylerine benzer şekilde olmaktadır. Burada artan Pe sayısı ile Nu sayısındaki iyileşme etkisi görece yüksek kütle oranlarında daha fazla olmaktadır.

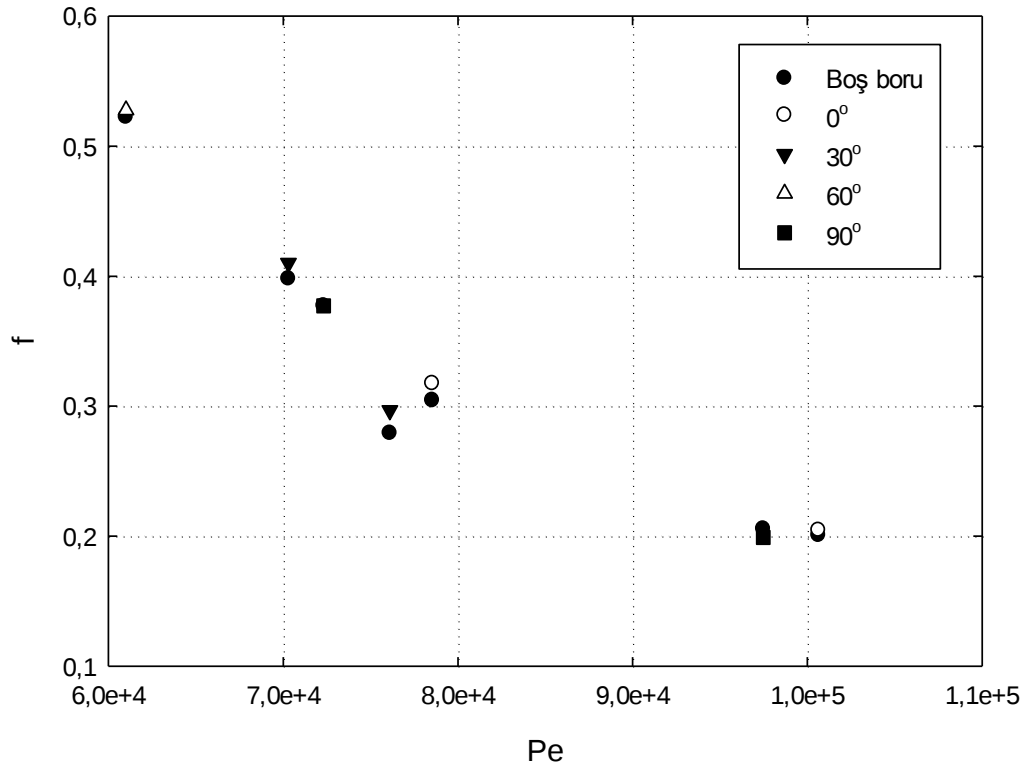
Şekil 72 incelendiğinde % 1 kütle oranı ilavesi ile elde edilen akışkanın baz akışkan durumuna göre boru girişinde %11 oranında yerel Nu sayısı artışı sağladığı görülmektedir. Bu artış boru çıkışında % 6 oranına düşmektedir. Artan kanatçık yüksekliği etkilerinde görüldüğü Şekil 73 de ise boru girişinde %10 olan iyileşmenin boru çıkışında %8 oranında gerçekleştiği görülmektedir. Bu durumda baz akışkan deneylerinde de olduğu gibi nanoakışkanlı durumlarda da akış döndürücü elemanın kanatçık yüksekliğinin iyileşmenin boru içerisinde aksel ilerlemesine katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Şekil 74 ve 75 birlikte incelendiğinde kanatçık sayısının iki katına çıkmasının ısı transferine % 2-10 (geometriye bağlı olarak) oranında artış sağladığı görülmektedir. Nanoakışkan kütle oranının iki katına çıktığı aynı geometrik düzenlemeler için elde edilen sonuçları içeren Şekil 76-79

incelendiğinde ise kanatçık yüksekliğinin yerel Nu sayısı üzerindeki etkileri % 2 – 5 oranında (% 1 kütle oranındaki akışkana kıyasla) artışa sebep olduğu görülmektedir. Bu etkiler sentezlenen kütle oranının % 3 olduğu ve Şekil 80-83 arasında sonuçları verilen durumlar için ise % 4 – 7 oranlarında olduğu görülmektedir.

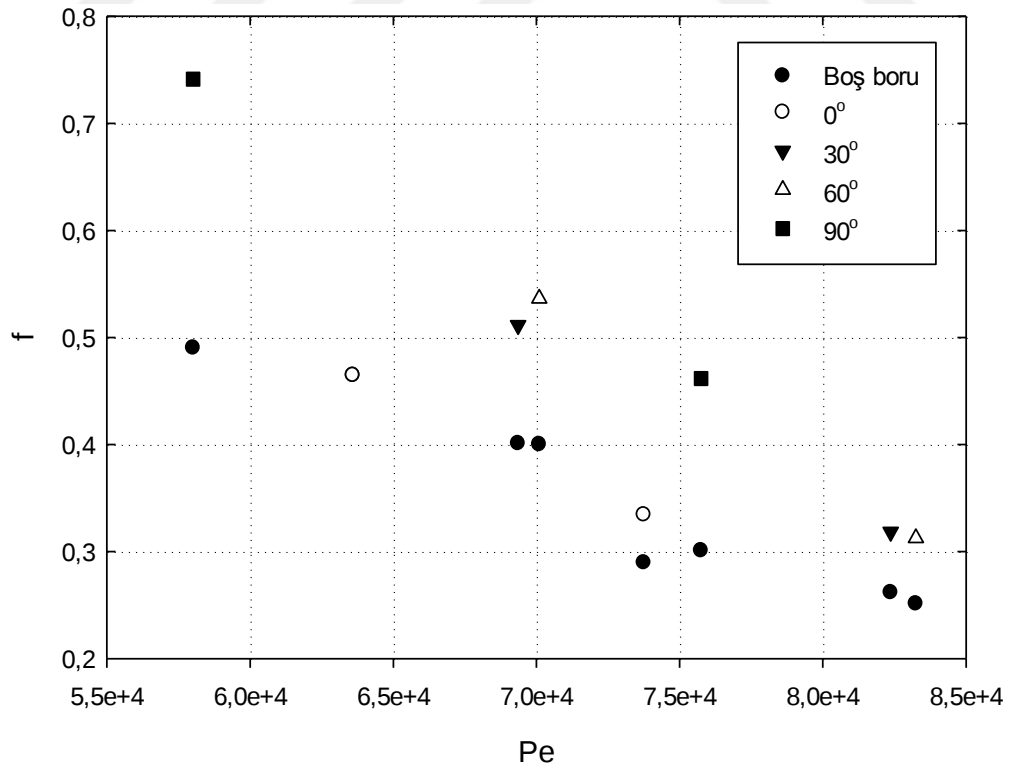
Yerel Nu sayılarındaki etkilerin incelenmesi sonrasında elde edilen sürtünme faktörleri değerleri de incelenmiştir. Aynı eksenel konumda sonuçlar incelendiğinde % kütle oranının sürtünme faktörü üzerindeki artış oranının Nu sayısı üzerindeki artış oranına göre görece düşük olduğu görülmektedir. Nanoakışkanın sentezlenme oranındaki artışın sürtünme faktörü üzerindeki artışa etkisi en yüksek % 8 oranlarında olur iken, açı değişimi etkileri (geometrik duruma bağlı olarak değişken) % 4 – 15 oranlarında artışlara neden olmaktadır. Boru içerisinde gerek nanoakışkan kaynaklı gerek geometrik düzenleme kaynaklı Nu ve f değerlerinde artışların olduğu görülmektedir. Daha önce de açıklandığı gibi bu durumların birlikte incelenmesinin sistemin toplam performansı açısından daha doğru bir sonuç ortaya koyacağı literatürde de oldukça yaygın kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımla elde edilen sonuçlar tanımlı bir Performans Değerlendirme Katsayısı (PDK) (Performance Evaluation Criteria; PEC) 3.5 başlığında ayrıntılı olarak verilemektedir.



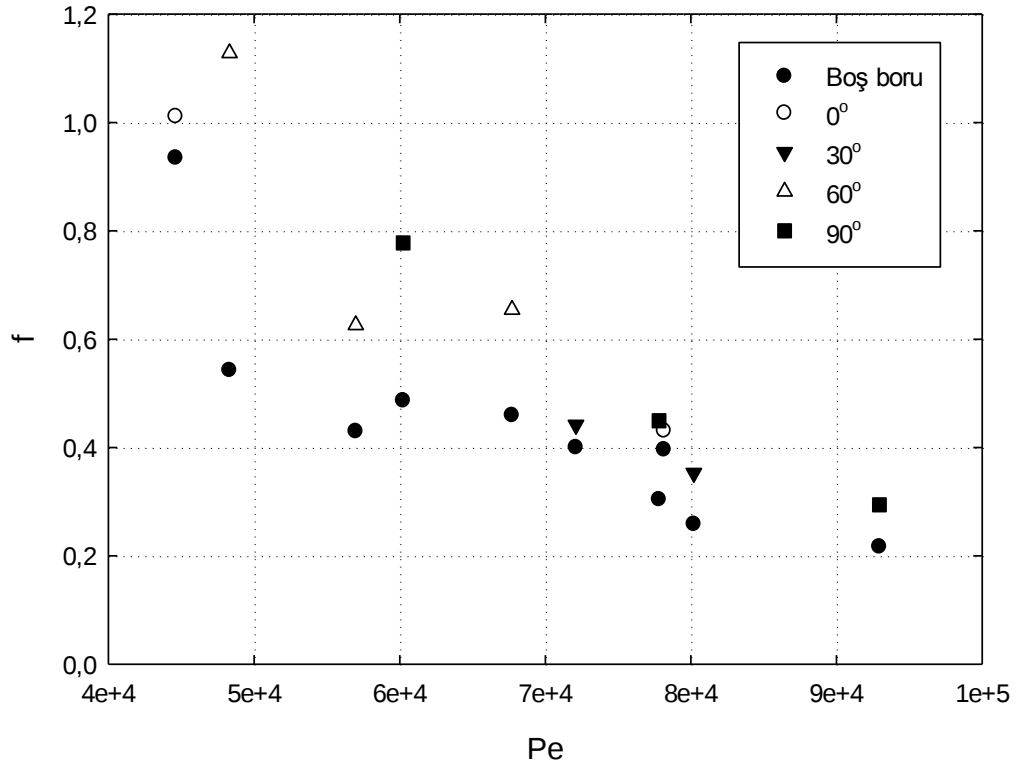
Şekil 84. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 1$ / $l^* = 0,25r_0$)



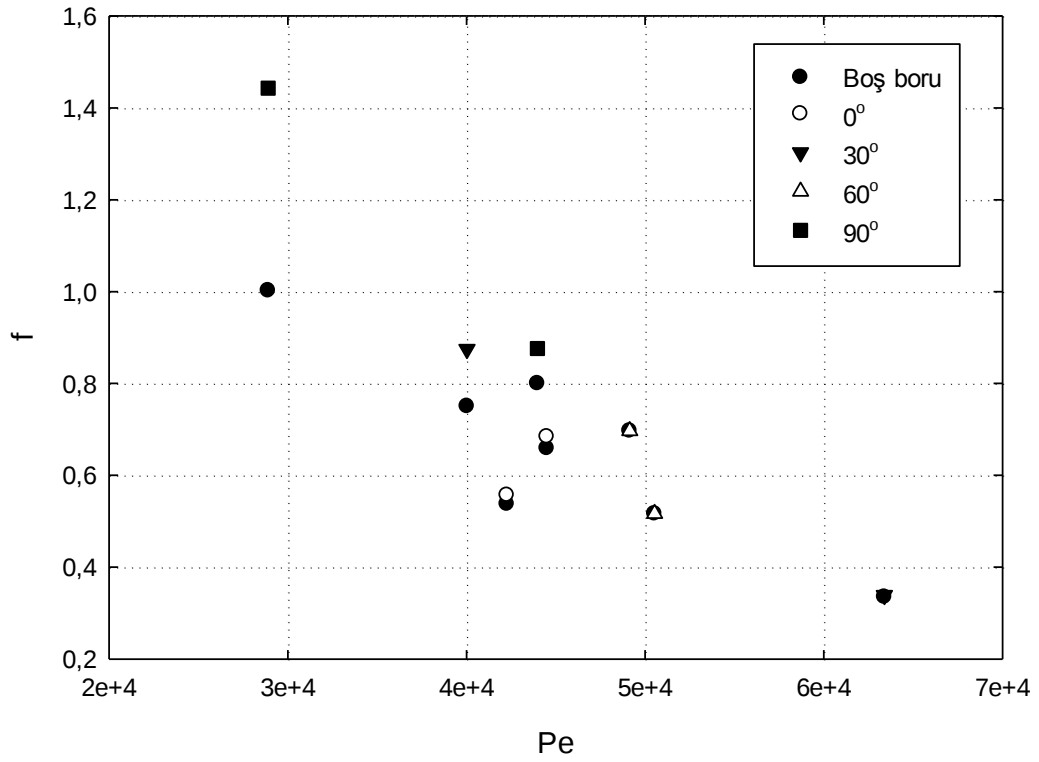
Şekil 85. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 1 / l^* = 0,75r_0$)



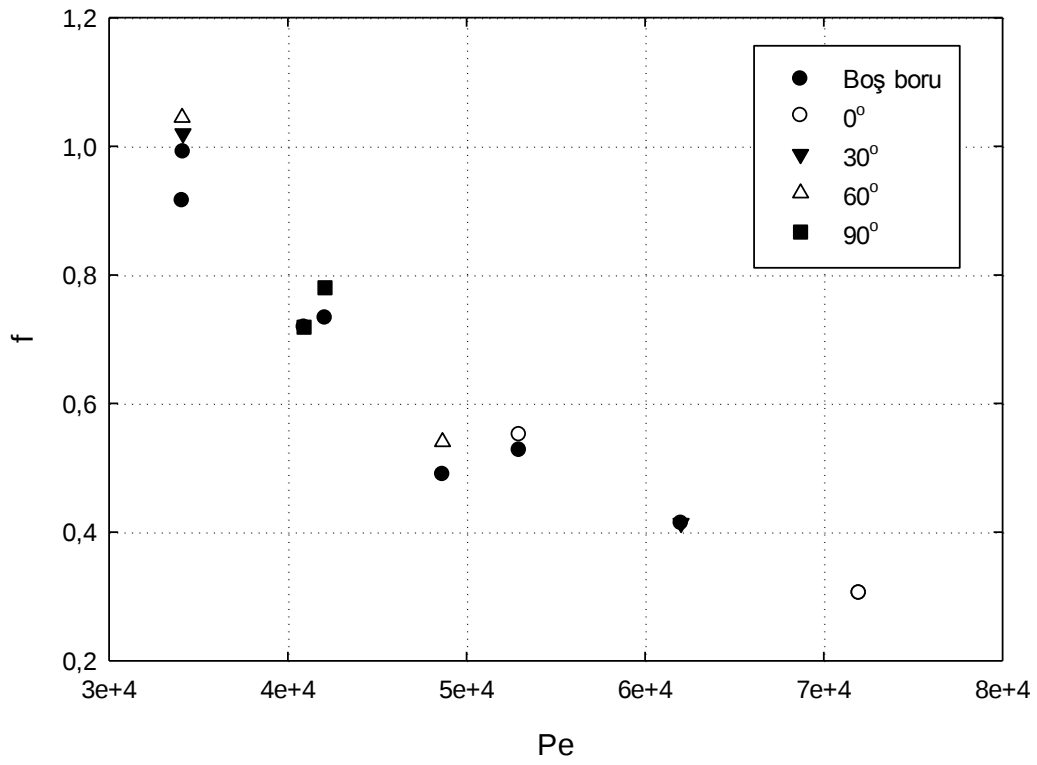
Şekil 86. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 1 / l^* = 0,25r_0$)



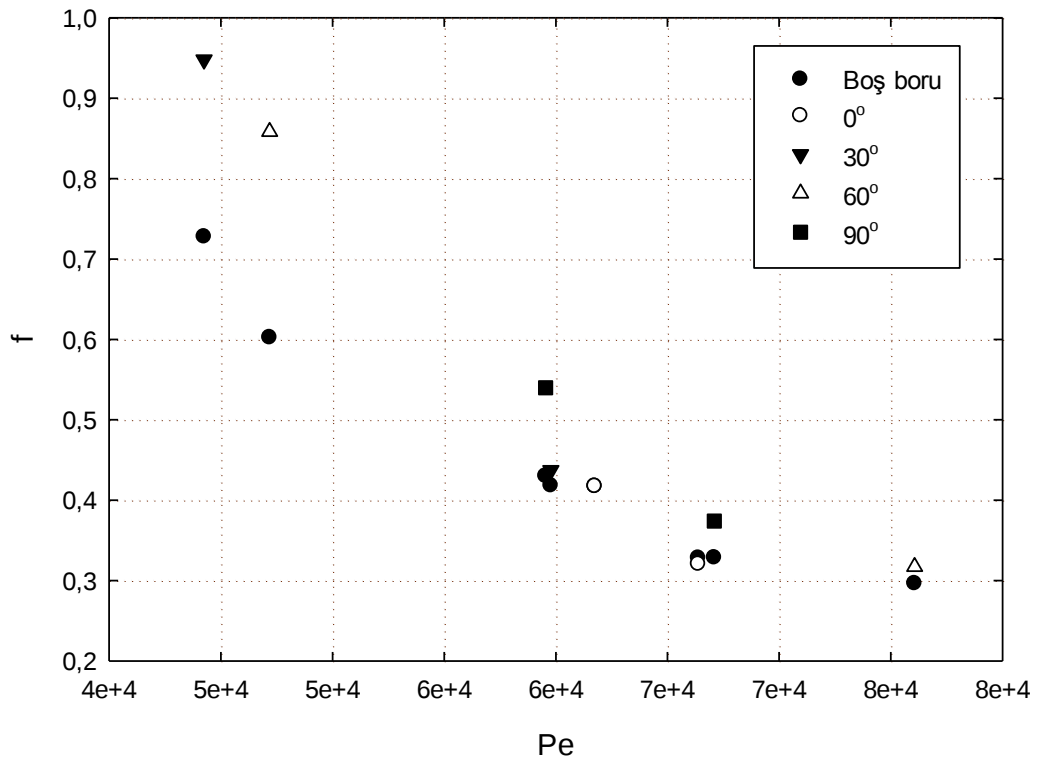
Şekil 87. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 1 / l^* = 0,75r_0$)



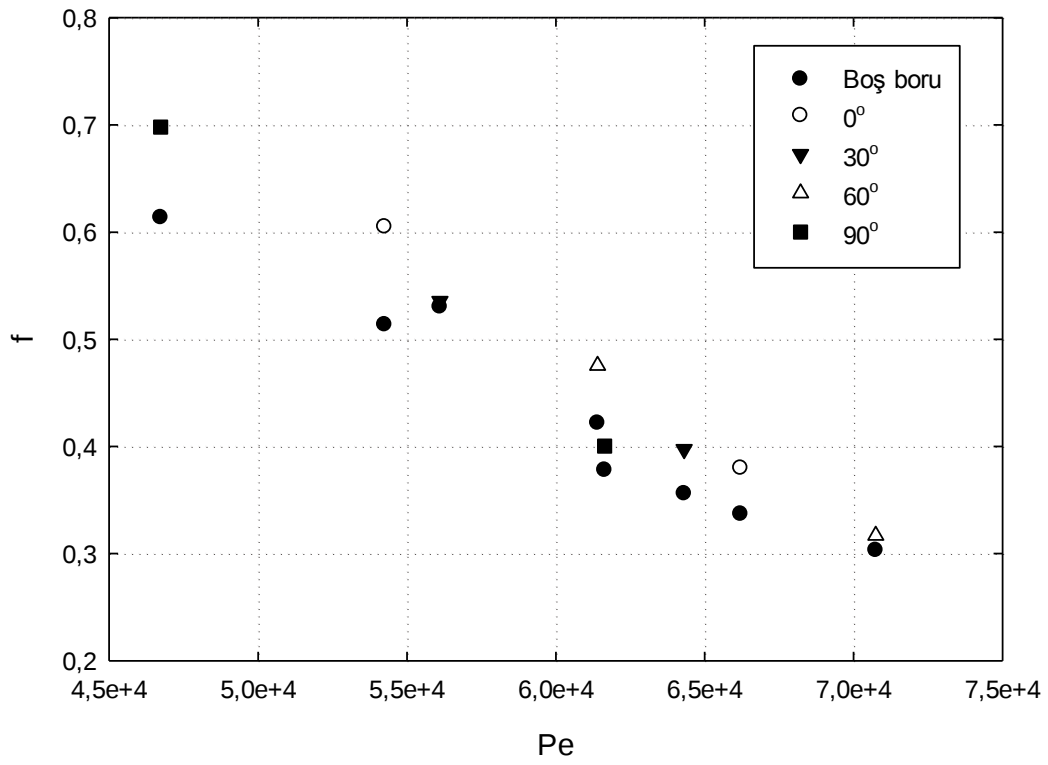
Şekil 88. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 2 / l^* = 0,25r_0$)



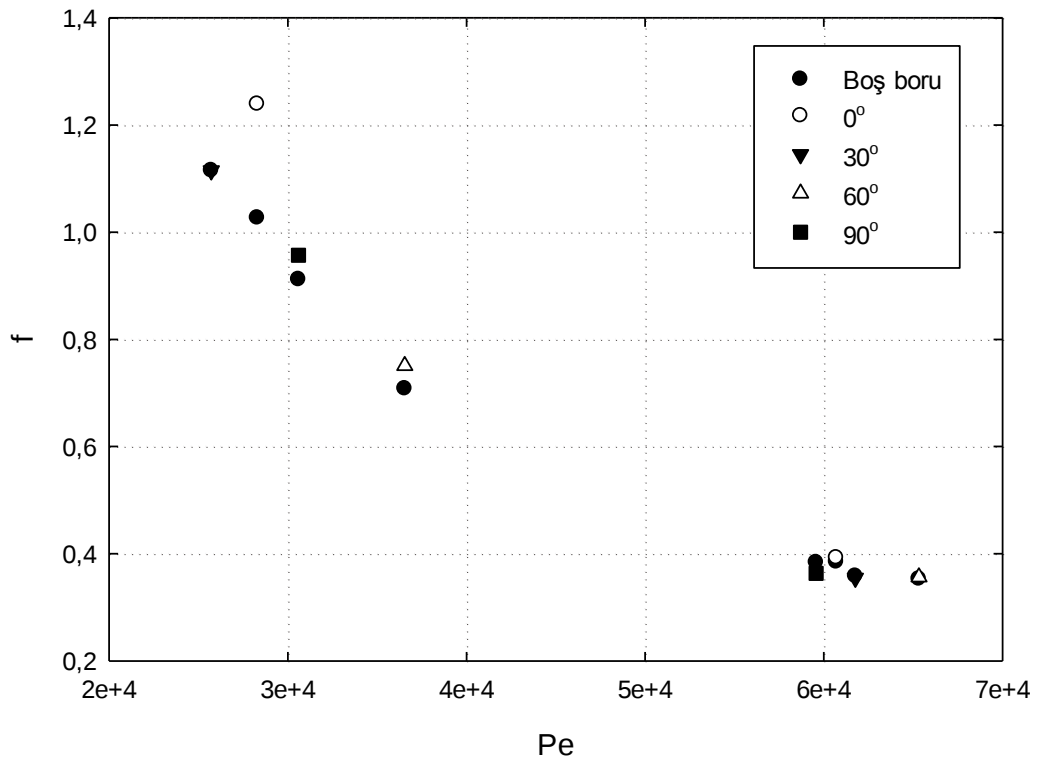
Şekil 89. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 2 / l^* = 0,75r_0$)



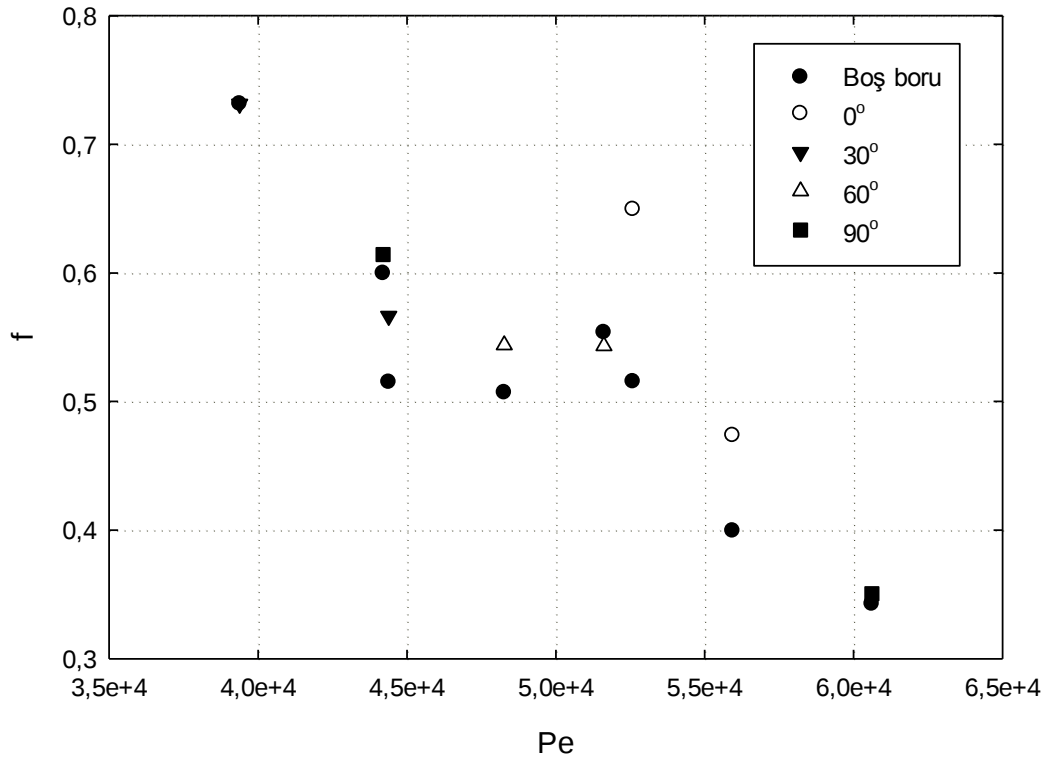
Şekil 90. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 2 / l^* = 0,25r_0$)



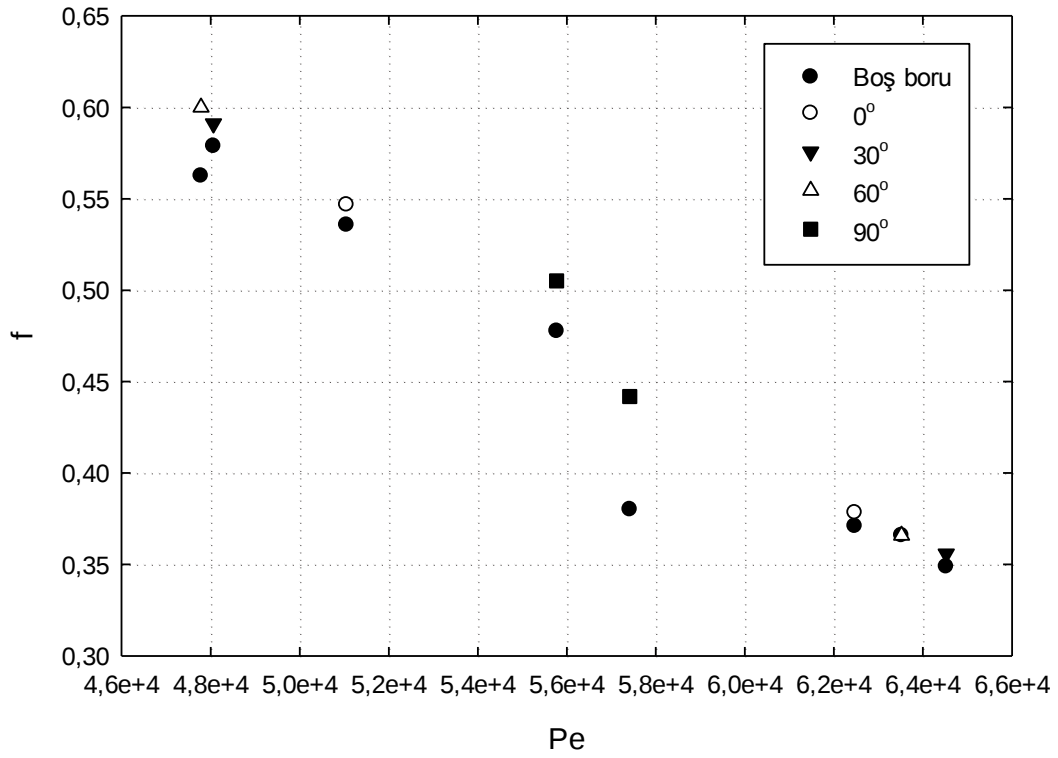
Şekil 91. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 2 / l^* = 0,75r_0$)



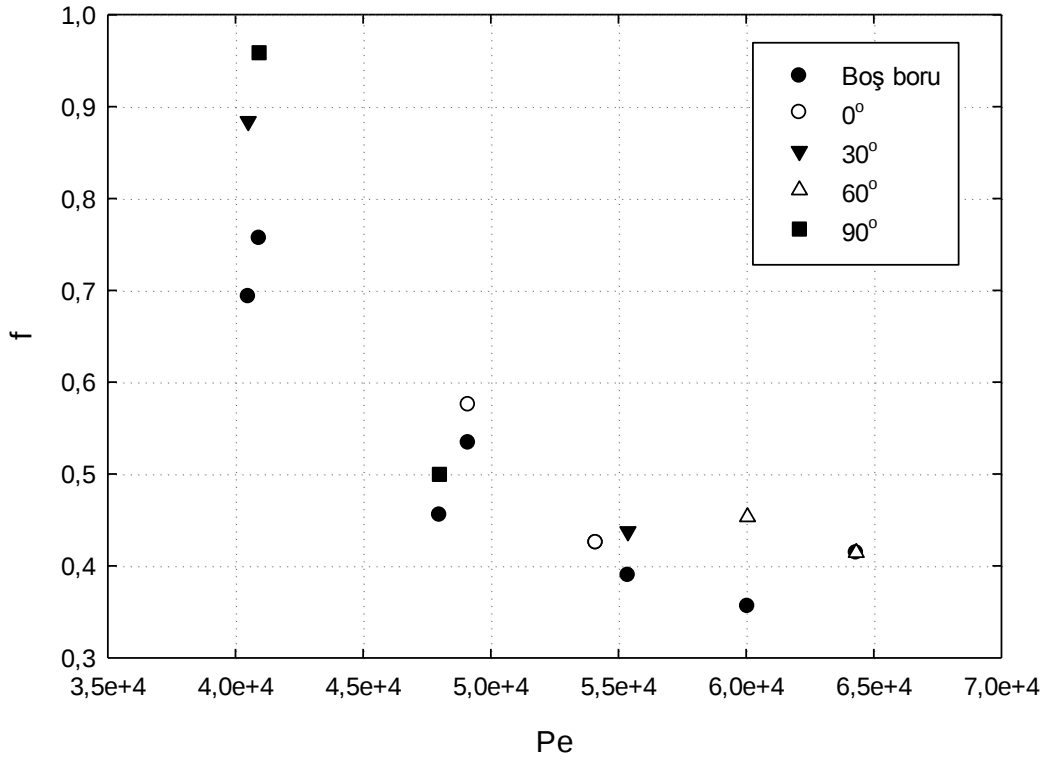
Şekil 92. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 3 / l^* = 0,25r_0$)



Şekil 93. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \% 3 / l^* = 0.75r_0$)



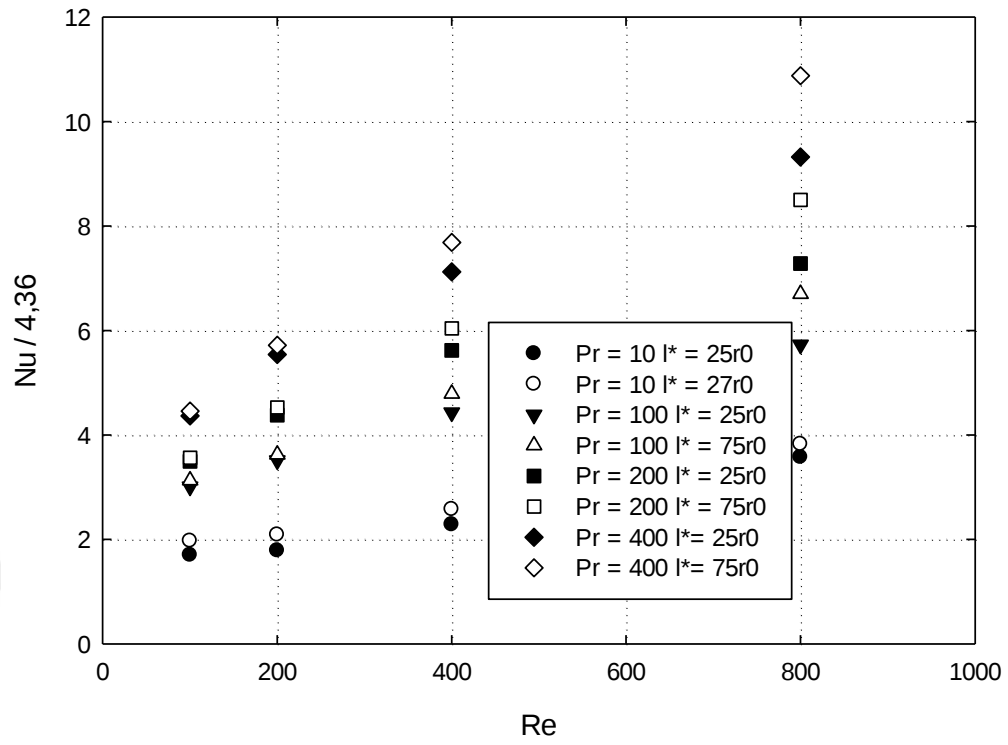
Şekil 94. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 3 / l^* = 0.25r_0$)



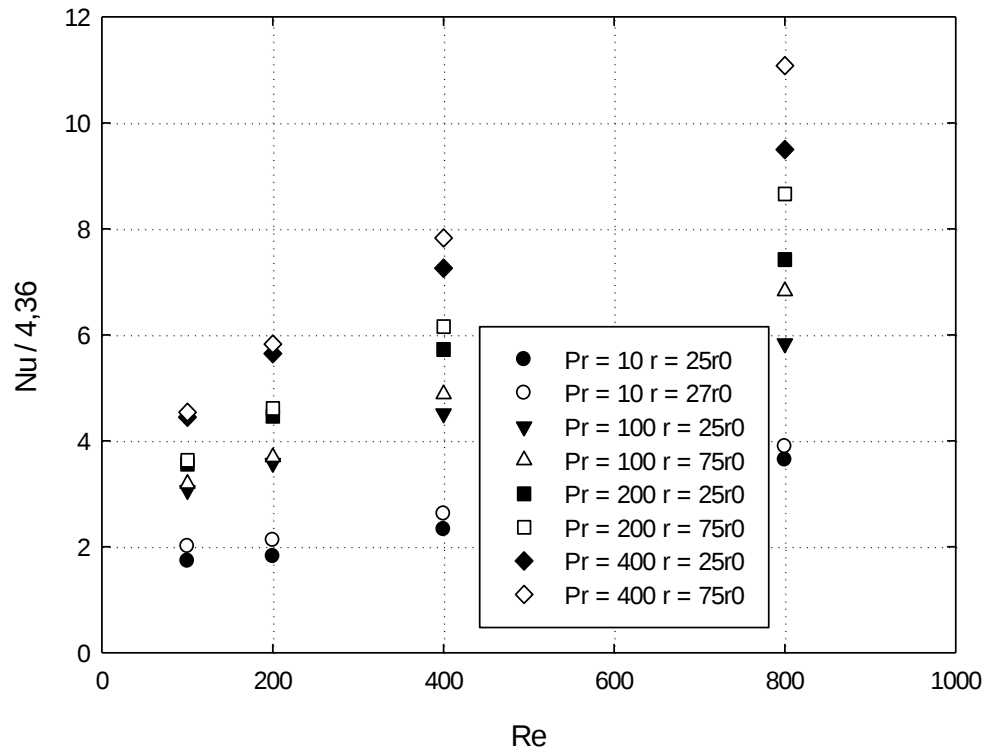
Şekil 95. Sürtünme faktörünün Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \% 3 / l^* = 0,75r_0$)

3.4. Nanoakışkanlı Sayısal Çalışma Bulguları

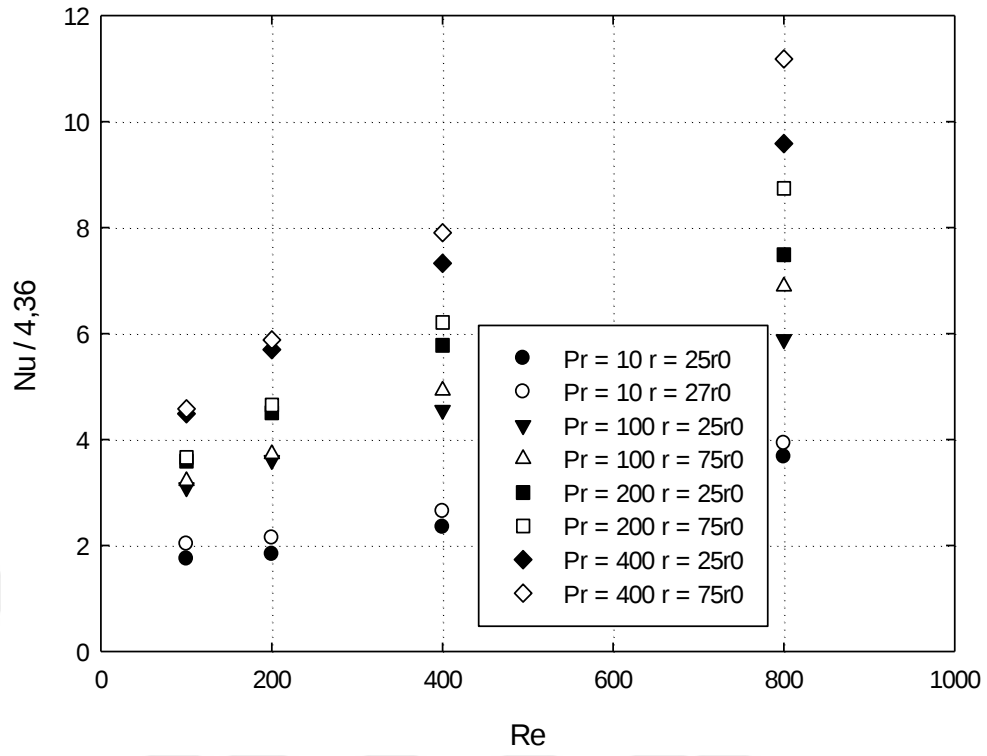
Baz akışkanlı deneysel çalışma sonuçlarının literatürdeki analitik sonuçlar ve bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Böylece, sayısal çalışmaya başlangıçta belirlenen geometrik ve hidrodynamic parametreler ile kütle oranını da kapsayacak şekilde devam edilmiştir. Bu kapsamda nanoakışkanlı akışın çözümü için tek fazlı model kullanılmıştır. Burada da, baz akışkanlı deneylere benzer şekilde çalışma sonuçları yerel Nu sayıları ve sürtünme faktörleri cinsinden incelenmiştir. Hem deneysel çalışma sonuçları hemde baz akışkanlı sayısal çalışma sonuçları en etkili geometrik düzenlemenin 90° burulma açısında elde edildiğini göstermektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak sayısal olarak elde edilen nanoakışkanlı çalışma sadece 90° burulma açısı sonuçları cinsinden irdelenmiştir. Elde edilen bulgular yerel Nu sayıları cinsinden Şekil 96-101, sürtünme faktörü sonuçları ise Şekil 102 - 107’de sunulmaktadır.



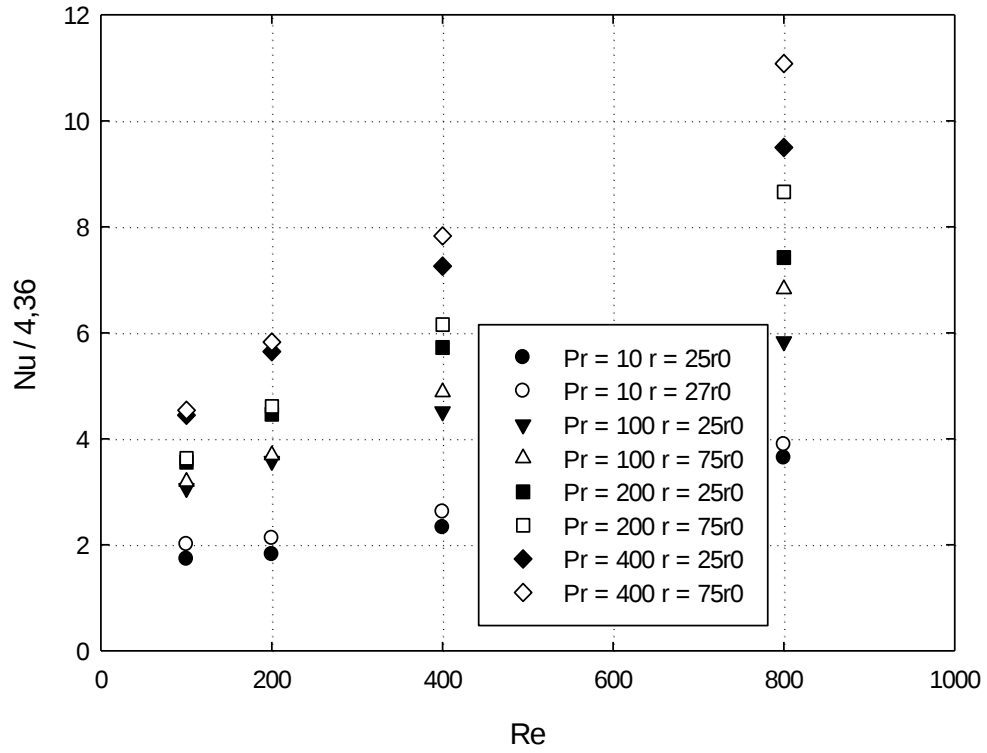
Şekil 96. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \%1$)



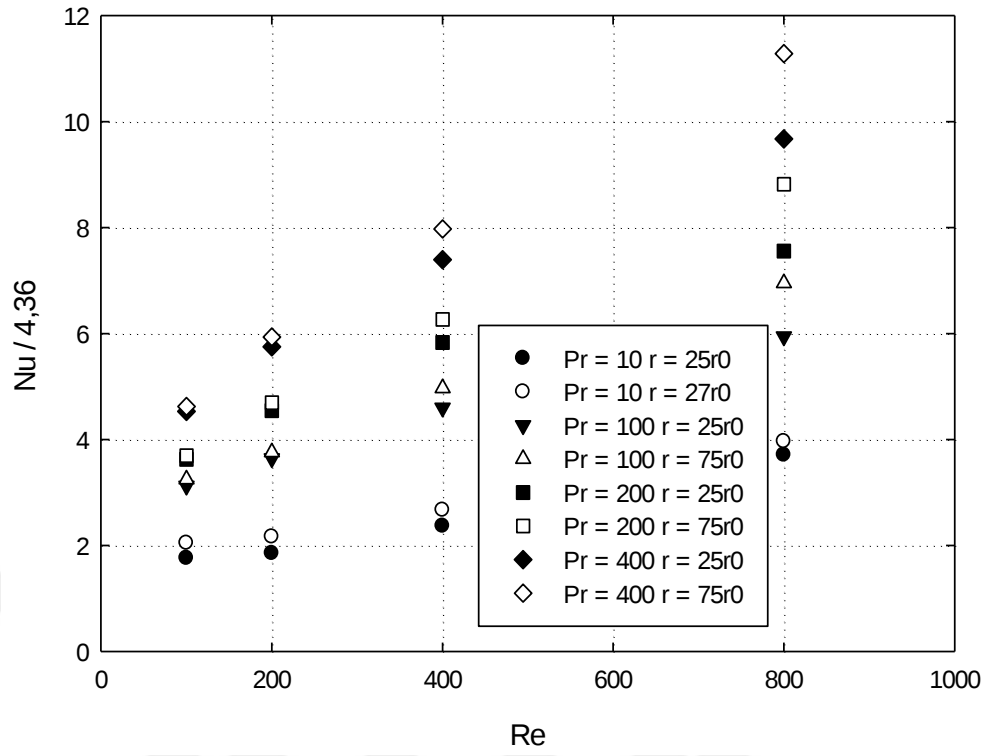
Şekil 97. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \%2$)



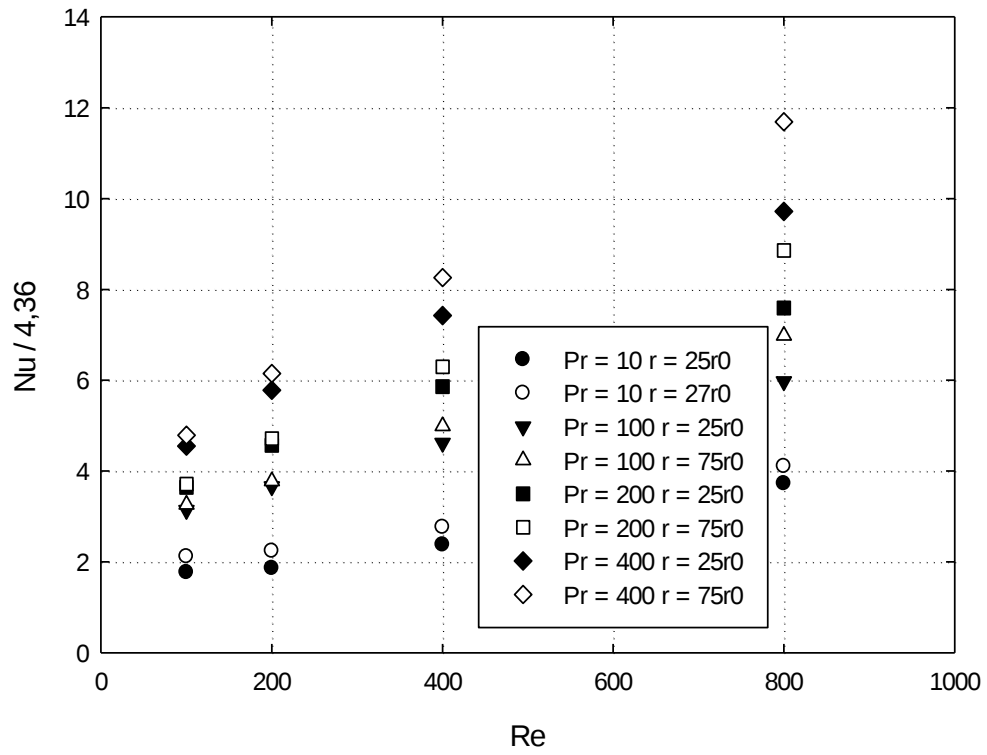
Şekil 98. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \%3$)



Şekil 99. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%1$)



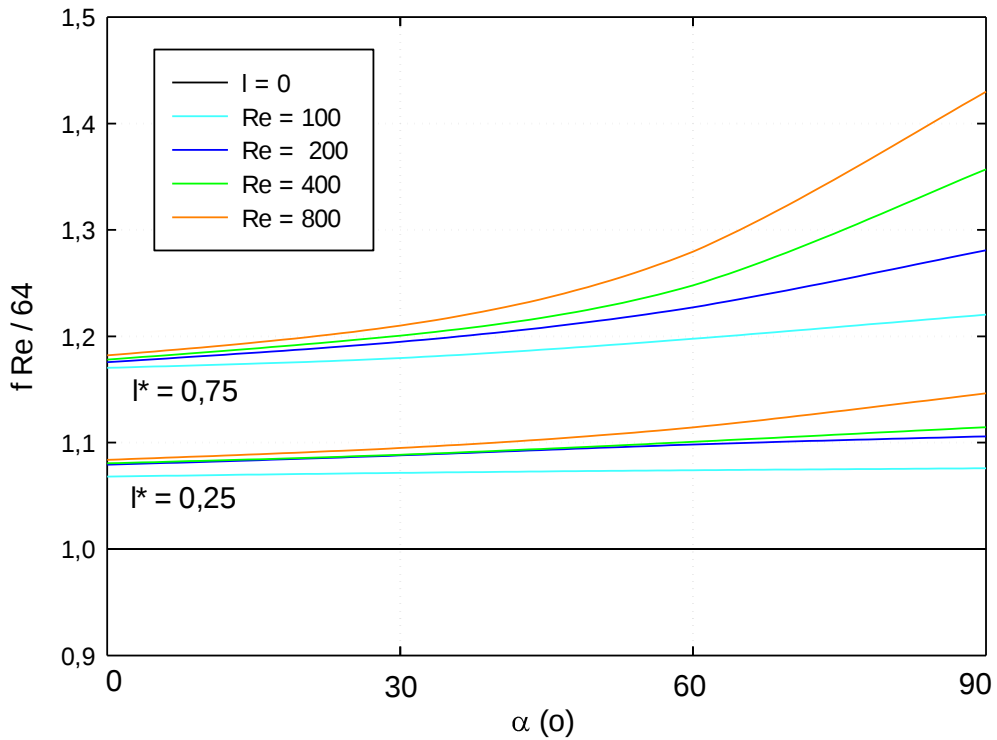
Şekil 100. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%2$)



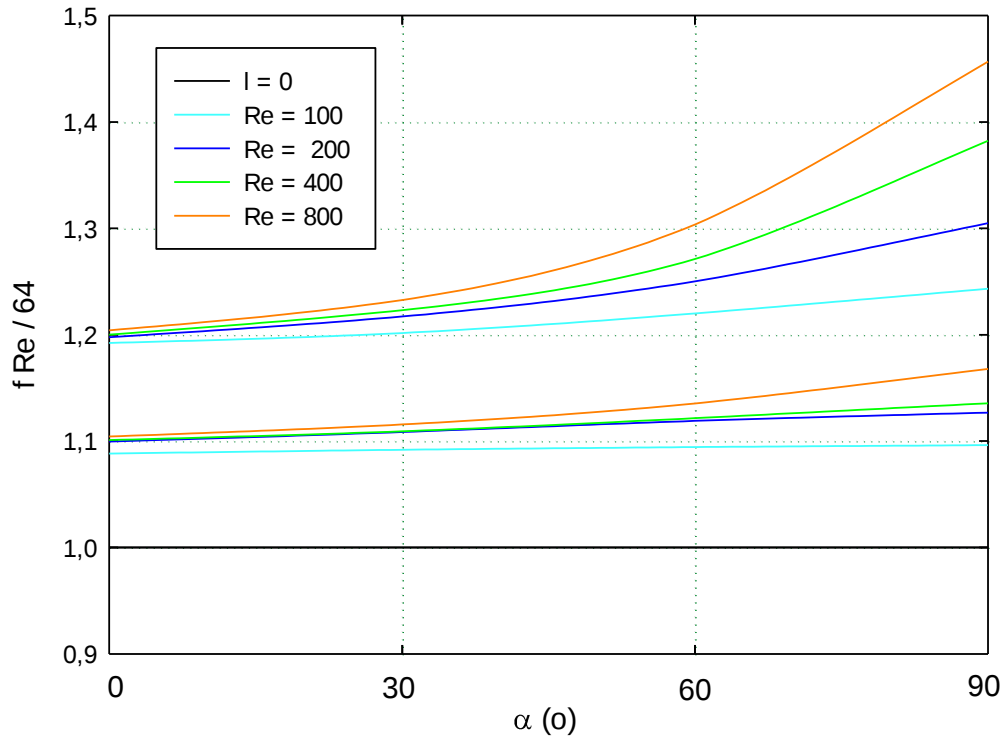
Şekil 101. Ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%3$)

Şekil 96, 97 ve 98 birlikte incelendiğinde artan nanoparçacık kütle oranı ile birlikte Nu sayısında genel bir iyileşme olduğu görülmektedir. Bu iyileşme, artan kanatçık yüksekliği ile artmaktadır. Önceki çalışma sonuçlarında sunulan sonuçlara benzer olarak artan Pr ve Re sayısı ile birlikte de Nu sayısında artış olduğu bu kısımda elde edilen sonuçlar da görülmektedir. Şekil 99,100 ve 101 incelendiğinde, iki kanatçıklı düzenleme sonuçlarına benzer fakat nicel olarak daha yüksek seviyede iyileşmelerin olduğu görülmektedir. Nanoakışkan kütle oranının iki katına çıkması durumunda Re sayısının 800 değerinde Pr sayısının artmasına bağlı olarak % 5 – 11 oranında iyileşme olduğu görülmektedir. Bu oranlar Re sayısının 100 olduğu durumda % 1 -3 kadar olmaktadır.

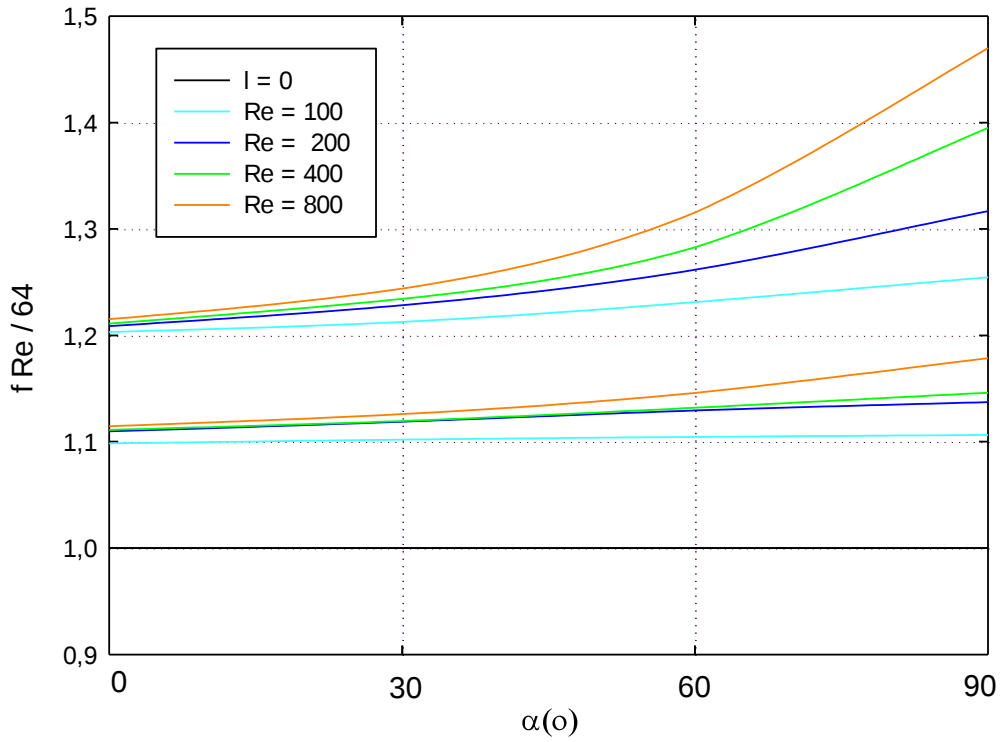
Nanoakışkanın ısı transferine (Nu sayısı cinsinden) etkisinin anlaşılabilmesi için bu kapsamda gerçekleşen bazı çalışma sonuçlarının birlikte incelenmesi gerekmektedir. Her biri için farklı grafiklerde çizilmiş olan durumlardan örnek bir durum olarak 4 kanatçık, $l^* = 0,75r_o$ ve 90° burulma açısı ve kütle oranı % 3 için Şekil 42-45 ve Şekil 101 in birlikte incelenmesi gerekmektedir. Söz konusu grafikler incelendiğinde nanoakışkan ilavesinin Nu sayısı üzerinde % 4 – 10 oranında iyileşme sağladığı görülmektedir.



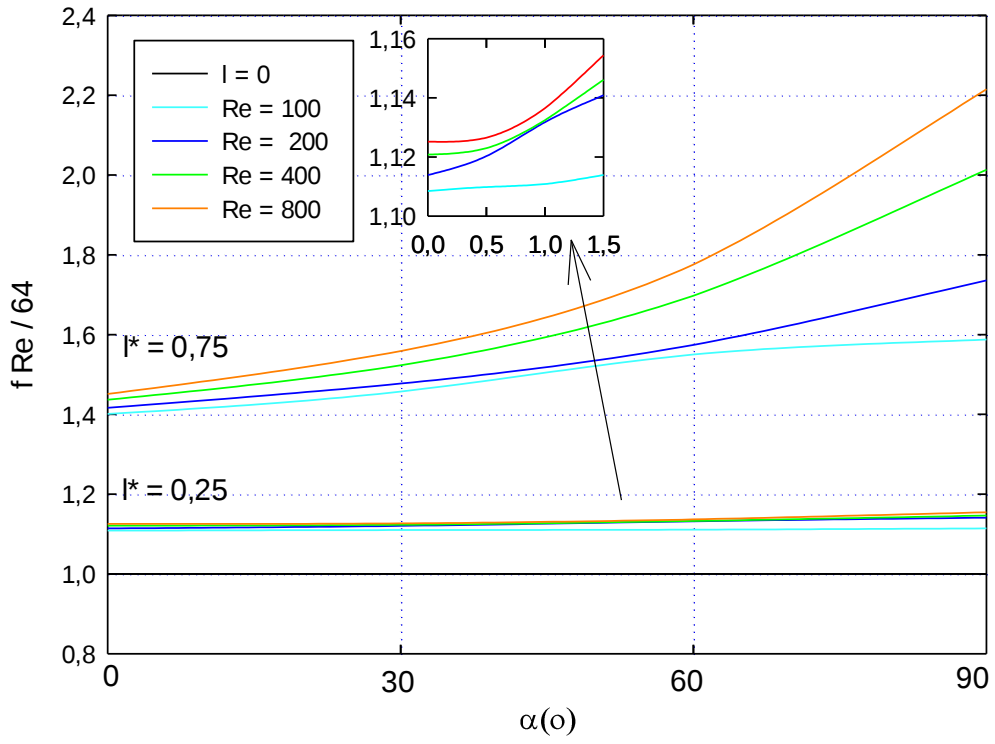
Şekil 102. Sürtünme faktörünün kanatçık burulma açısıyla değişimi (2 kanatçık / $\Phi = \%1$)



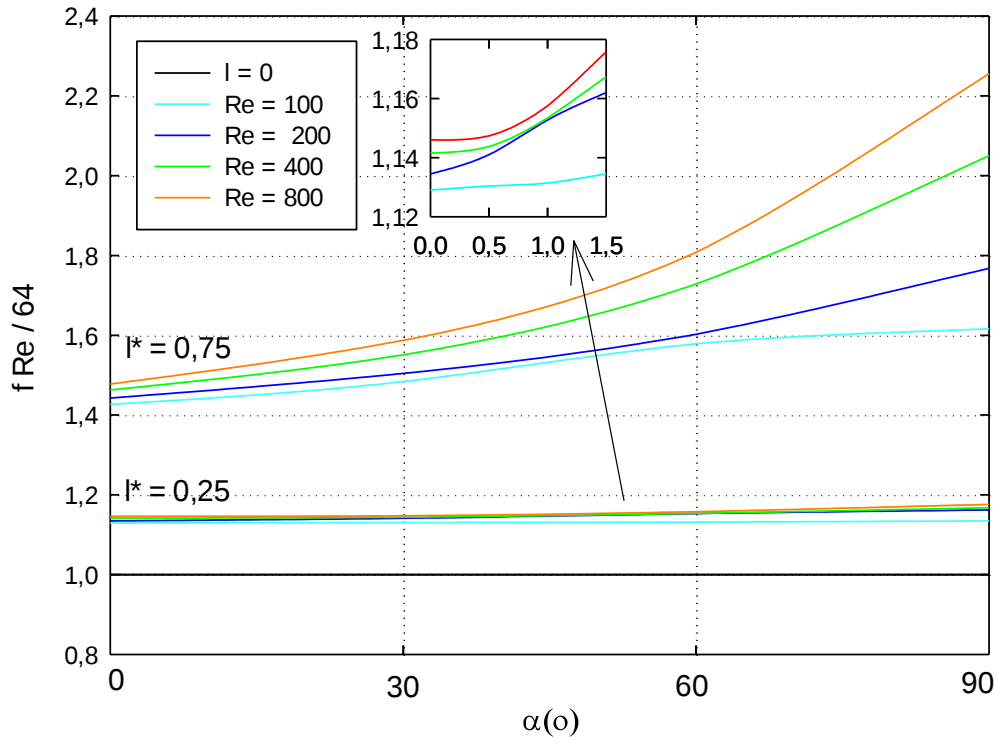
Şekil 103. Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = 2^\circ$)



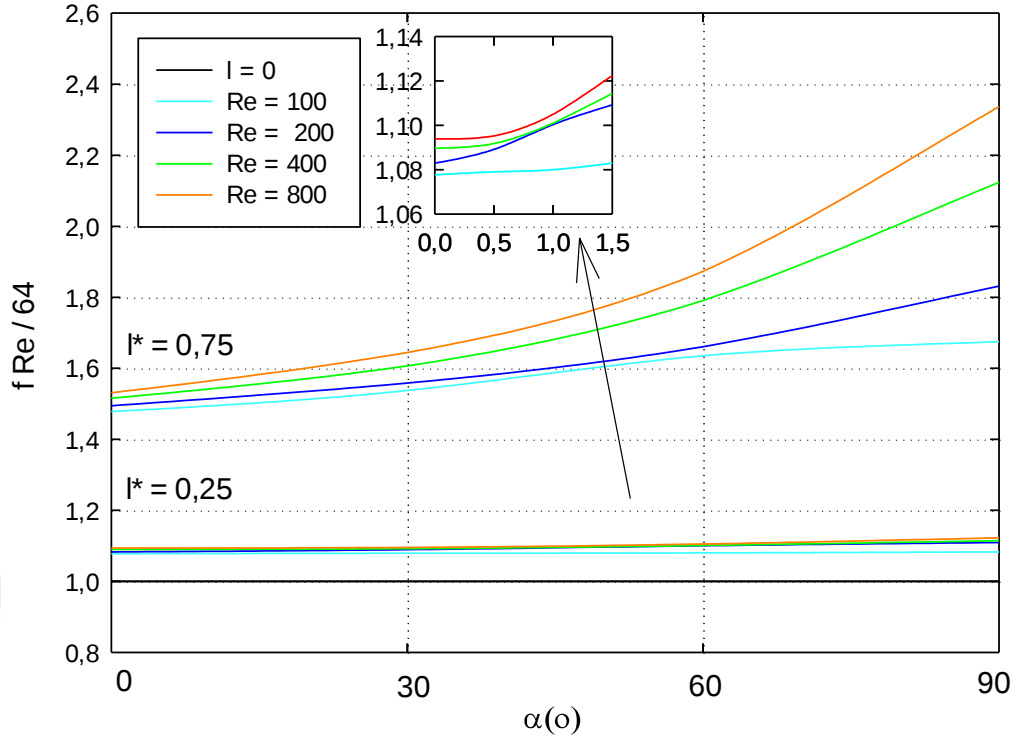
Şekil 104. Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (2 kanatçık / $\Phi = 3^\circ$)



Şekil 105. Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = 1\%$)



Şekil 106. Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = 2\%$)



Şekil 107. Sürtünme faktörünün burulma açısı ile değişimi (4 kanatçık / $\Phi = \%3$)

3.1 başlığı altında incelenen çalışma bulgularında olduğu gibi nanoakışkanlı sayısal çalışmada da f değerleri incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışma sonuçları Pr sayısının 100 değeri için gerçekleştirilmiştir.

Burada, iki kanatçıklı durumun dört kanatçıklı duruma göre, beklenildiği gibi daha düşük sürtünme etkisi gösterdiği görülmektedir. burulma açısının etkisi incelendiğinde, 2 kanatçıklı durumda sürtünme etkilerinin daha belirgin olduğu, değişen burulma açısı ile sürtünme katsayısındaki artışın 4 kanatçıklı duruma göre görece yüksek olduğu görülmektedir. Bu kısma kadar irdelenen çalışma sonuçları baz akışkan ile gerçekleştirilen sonuçlar ile örtüşmekte ve karşılaştırmalı analizler ile sonuçlar daha net irdelenebilmektedir.

Şekil 102,103 ve 104 birlikte incelendiğinde artan kütle oranı ile birlikte f değerinin de attığı görülmektedir. Bu artış % 1 kütle oranı için (baz akışkana göre) %6 oranında olduğu görülmektedir. Kütle oranının %2 ye çıktığı düzenlemede bu fark % 8 e ulaşır iken kütle oranının % 3 değeri için artış %12 seviyelerine ulaşmaktadır. Benzer analizlerin dört kanatçıklı durum için incelendiği Şekil 105,106 ve 107 irdelendiğinde bu artış oranlarının sırasıyla % 8, 10, 15 oranlarında gerçekleştiği görülmektedir.

3.5. Performans Değerlendirme Bulguları

Çalışma sonuçlarının, daha önce literatürde geniş yer alan bir *PDK*' ya göre değerlendirileceği ifade edilmiştir. Dairesel kesitli borularla ilgili *PDK* değerleri literatürde farklı şekillerde tanımlanmaktadır. Bu tanımların bazılarında farklı akış koşullarında pompalama gücü sabit tutularak karşılaştırma yapılmaktadır. R.L. Webb (1981), aynı pompalama gücü için *PDK* ifadesi için,

$$(\dot{V}\Delta P)_0 = (\dot{V}\Delta P) \quad (24)$$

olduğunu ve bu ifadenin açık şekli ile

$$f_0 Re_0^3 = f Re^3 \quad (25)$$

$$Re_0 = Re (f/f_0)^{1/3} \quad (26)$$

formunu alacağını belirtmektedirler. Buradan, ilgili kaynakta *PDK*;

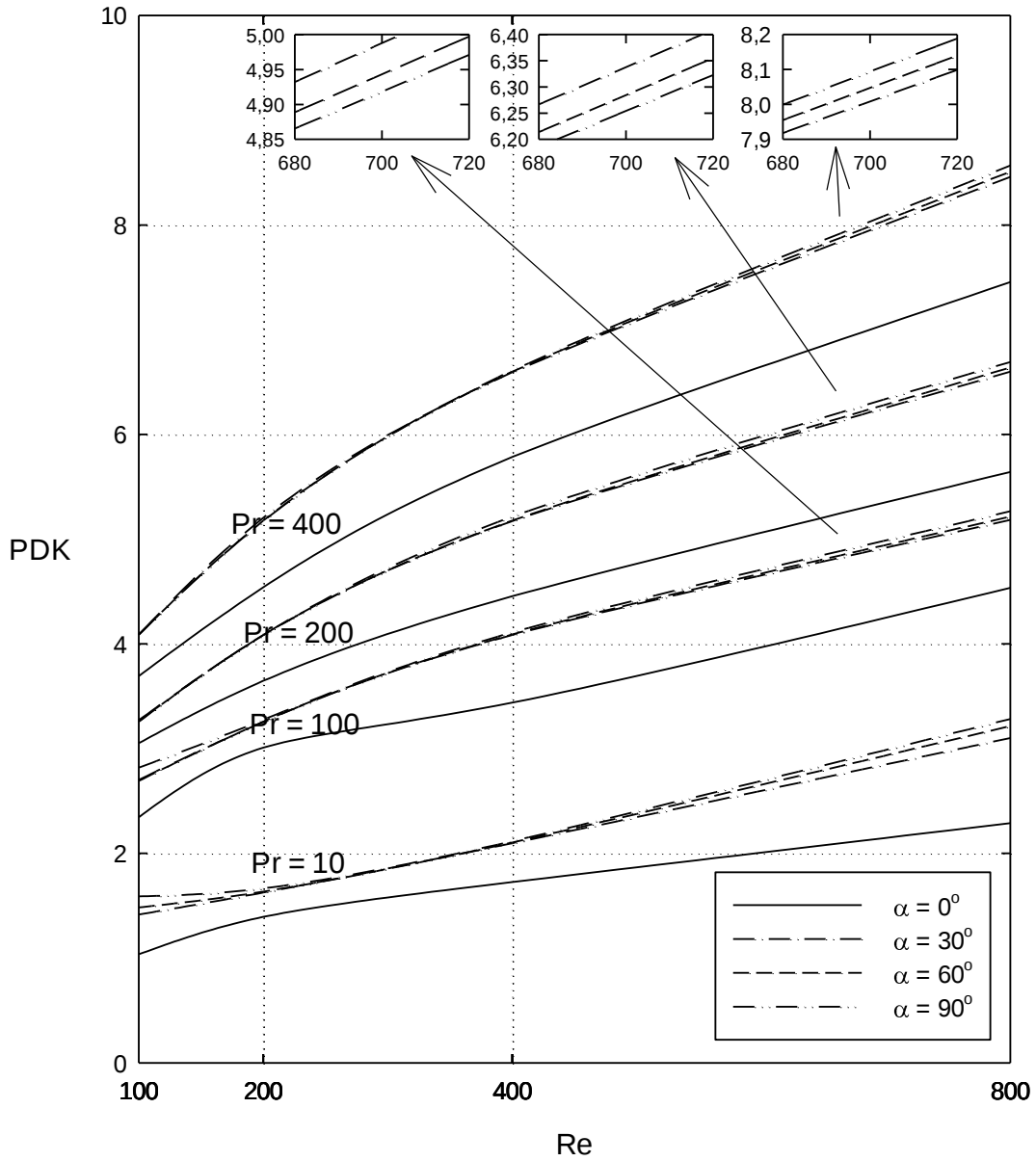
$$PDK = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (27)$$

şeklinde verilmektedir. Buradaki “0” indisi boş boru durumunu göstermektedir. İlgili kaynakta farklı *PDK* tanımlarına da yer verilmektedir.

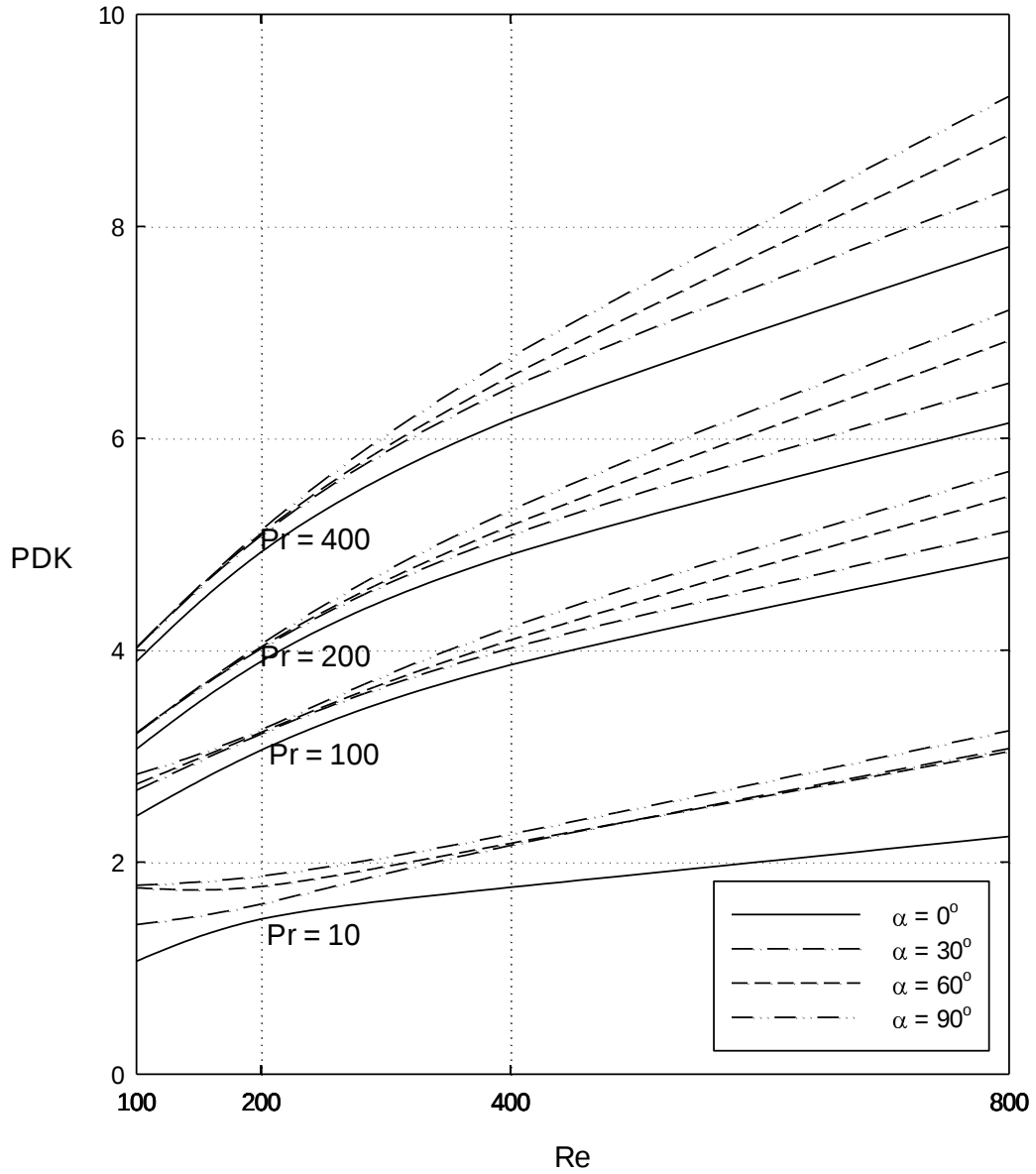
Genel anlamda boru içi akışlarda ısı transferindeki artış, ısı taşınım katsayısındaki artış ile tanımlanmaktadır. Bu yaklaşımı dikkate alarak elde edilmiş olan Denklem (27) de verilen *PDK* tanımı çalışma sonuçlarının performans değerlendirme kriteri cinsinden hesaplanması için kullanılmıştır. Sayısal çalışmadaki *Pe* sayısı aralığı deneysel çalışmadakinden daha geniş olması nedeniyle *PDK*' lar ile ilgili grafikler toplu olarak değil her çalışma için (deneysel-sayısal) kendi içerisinde karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

3.5.1. Baz Akışkanlı Sayısal Çalışma İçin *PDK* Bulguları

Denklem (27)'den baz akışkanlı elde edilen sonuçlar, kanatçık açısının etkisini içerecek şekilde Şekil 108-111, kanatçık yüksekliğinin etkisini içerecek şekilde ise Şekil 112 ve Şekil 113'teki grafiklerde görülmektedir.

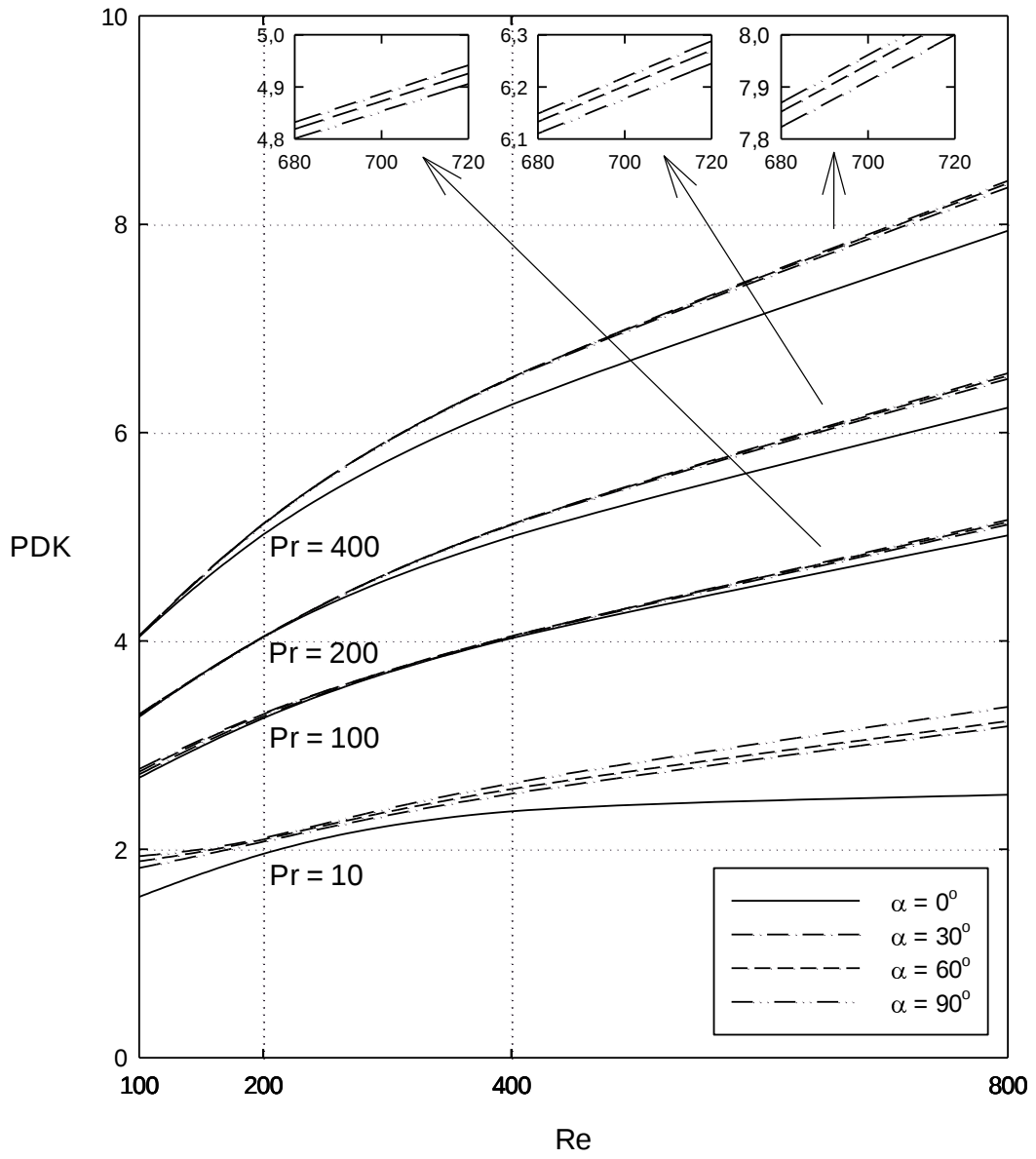


Şekil 108. *PDK*'nın *Re* sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$)

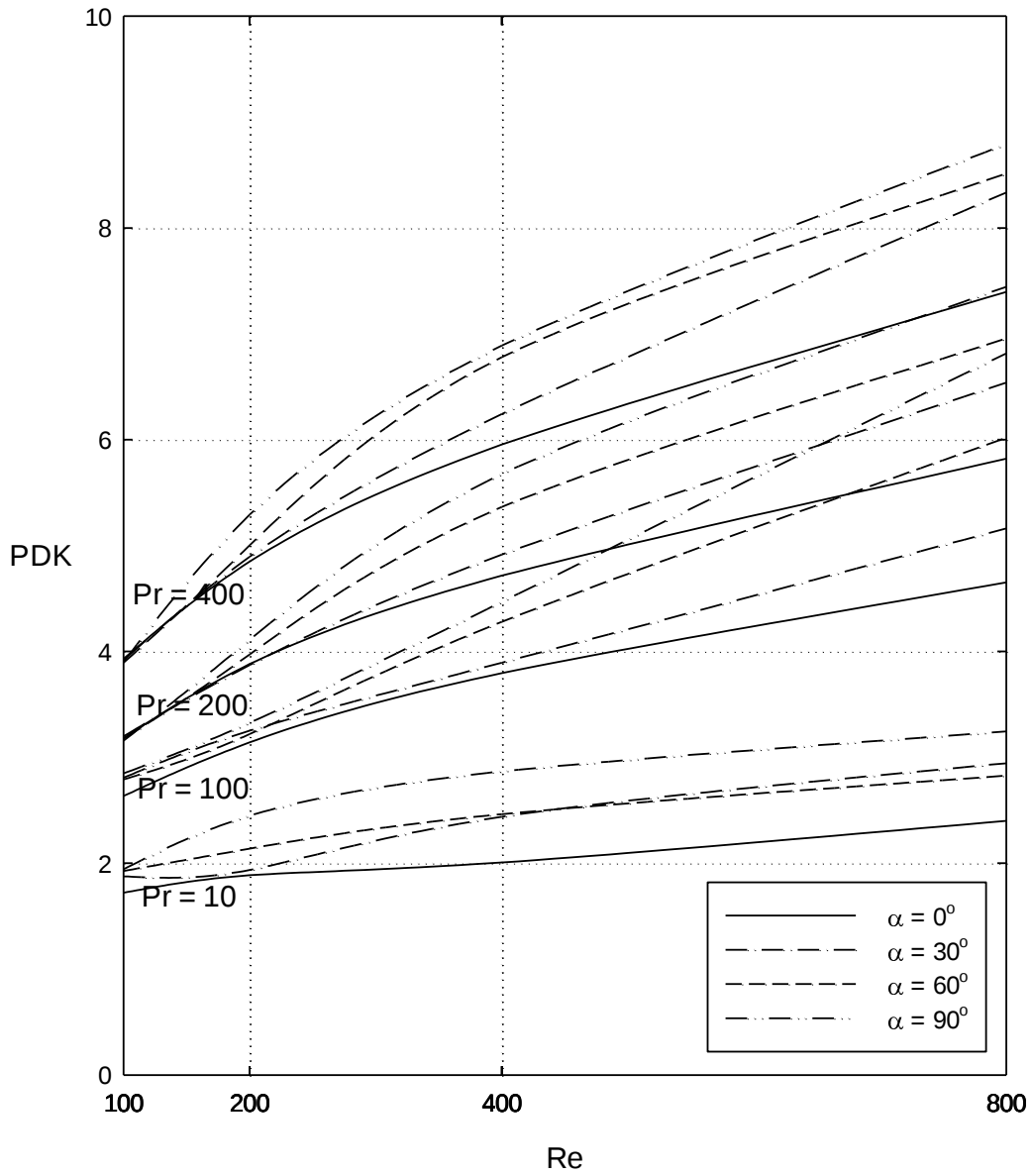


Şekil 109. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$)

Şekil 108 ve 109 incelendiğinde artan Pr sayısı ile ve artan kanatçık yüksekliği ile PDK değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Bu durum Nu sayısında meydana gelen iyileşmenin iki kanatçıklı düzenleme durumunda f değerindeki artışa göre daha yüksek olduğunu ve performans açısından kullanılabilir bir düzenleme olduğunu göstermektedir. Şekil 109' da kanatçık yüksekliği artmasına bağlı olarak açı etkilerinin daha belirgin olduğu açık olarak görülmektedir. Kısa kanatçıklı düzenlemede açığa bağlı olarak gerçekleşen % 2-4 oranlarındaki PDK artışı yüksek kanatçıklı düzenlemede % 15 oranlarına kadar ulaşmaktadır.

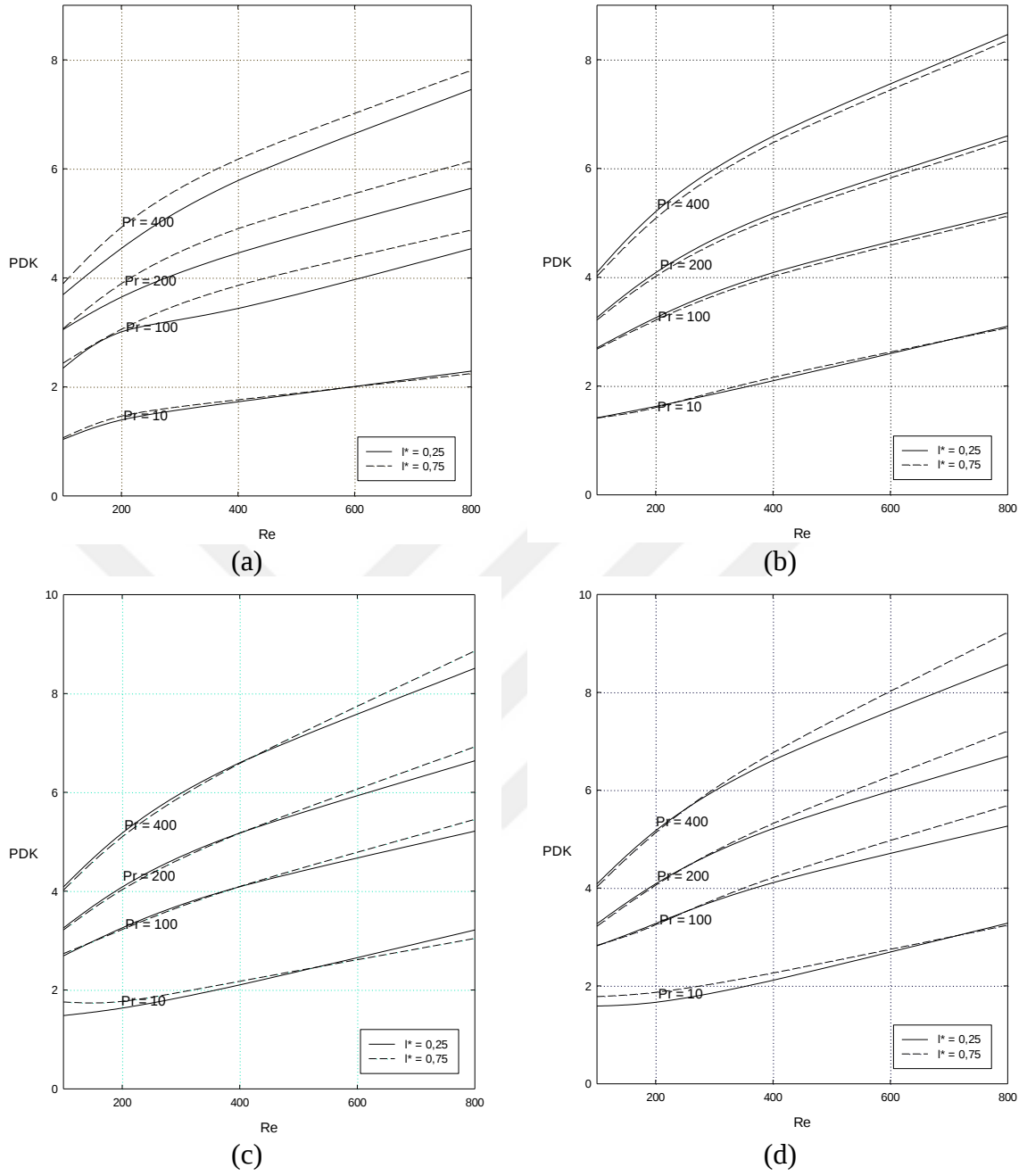


Şekil 110. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$)

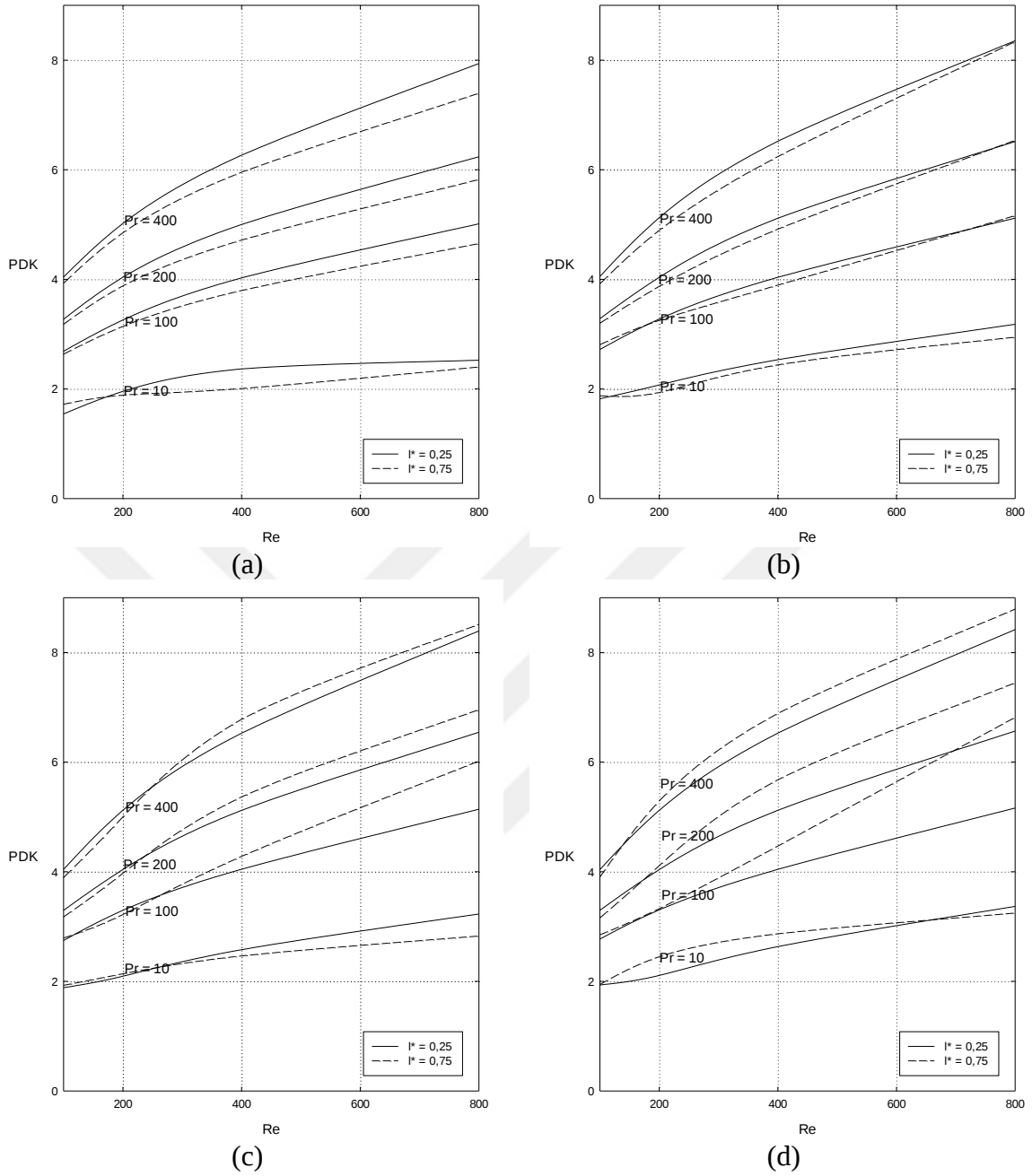


Şekil 111. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$)

Şekil 110 ve 111 birlikte incelendiği Nu ve f değerleri sonuçların iki kanatçıklı düzenleme ile benzer olduğu fakat yüksek kanatçıklı düzenlemede durumların biraz daha farklılaştığı görülmektedir. Şekil 111 de görülen en belirgin sonuç burulma açısının değişimine bağlı olarak Pr sayısının daha küçük değerlerinde daha yüksek PDK değerleri elde edilmesidir. Örnek bir durum olarak Pr sayısı 100, Re sayısının 800 değerinde 90° burulma açısında gerçekleşen PDK değeri 7 civarlarında iken, aynı koşulların Pr sayısı 200 ve 0° burulma açısında gerçekleşen değer de gerçekleşen ise 5,8 civarındadır. Bu sonuç, kanatçık burulma açısının görece fazla sayıda kanat olması durumunda performansın iyileştiğini göstermektedir.



Şekil 112. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$

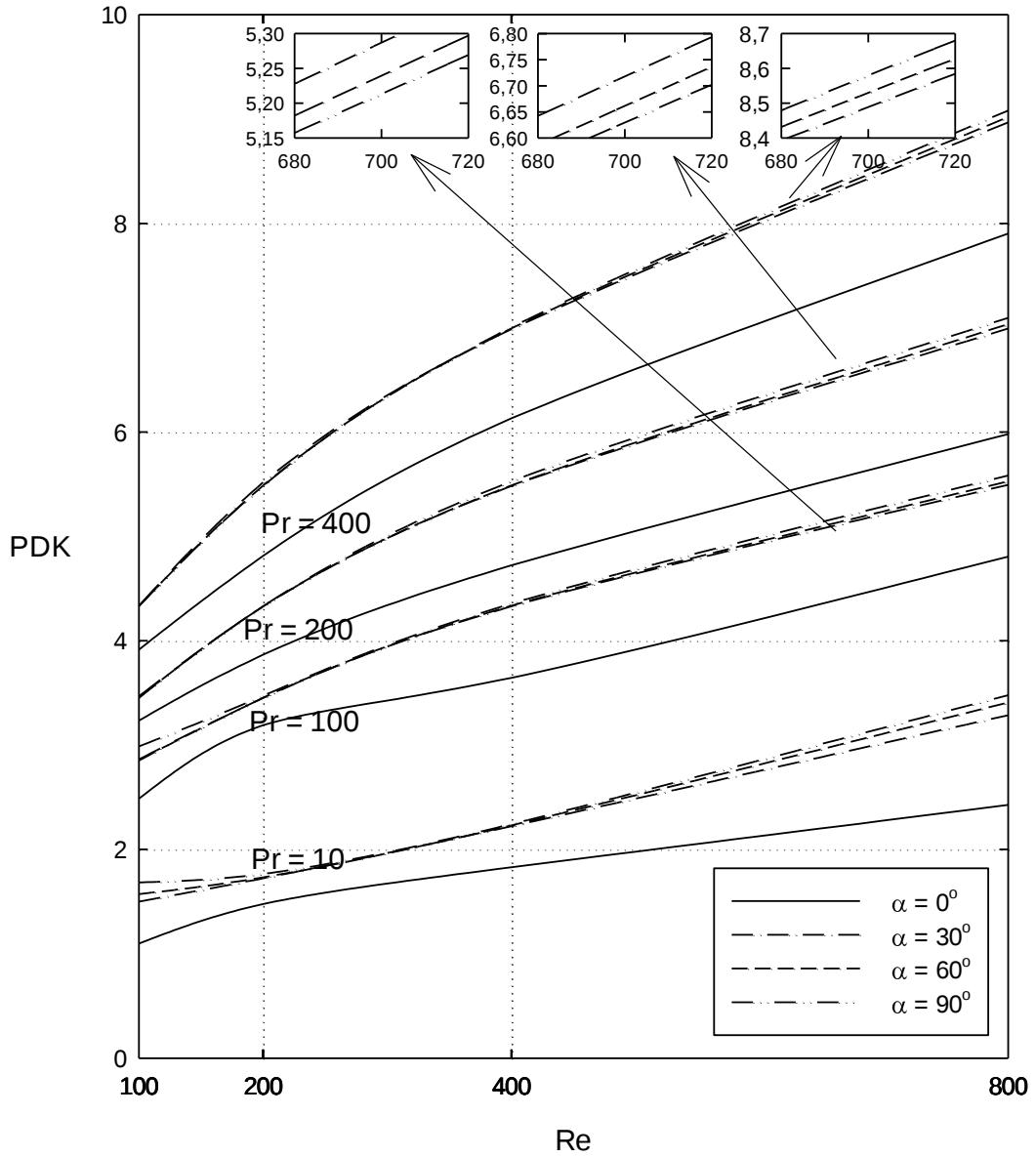


Şekil 113. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$

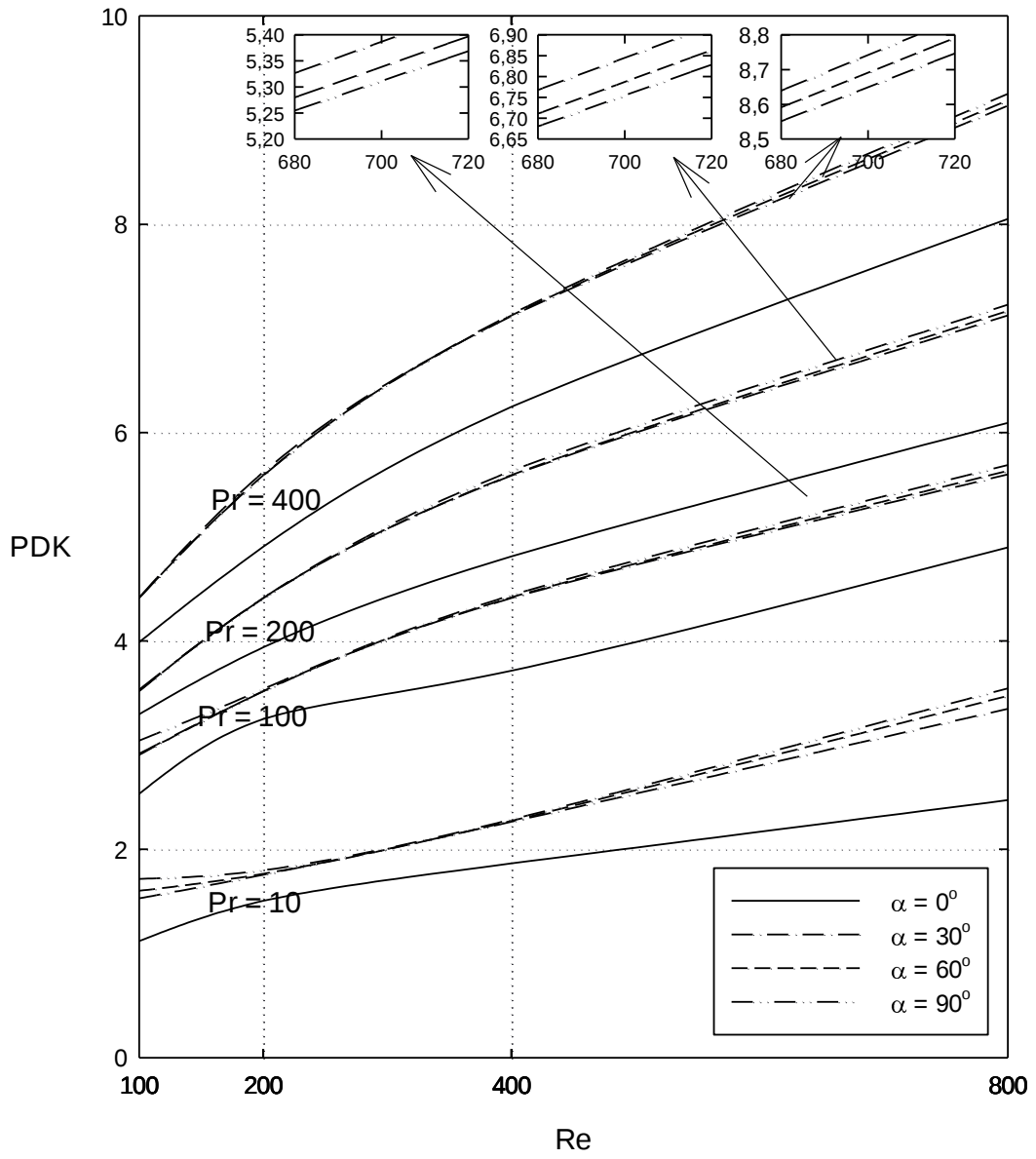
Şekil 112 ve 113 bir önceki paragrafta bahsi geçen durumların yalın olarak anlaşılabilmesine olanak tanımaktadır. Buradan da görüldüğü gibi kanatçık açısı dört kanatçıklı durumda, iki kanatçıklı duruma göre daha belirgin iyileşme sağlamaktadır.

3.5.2. Nanoakışkanlı Sayısal Çalışma İçin *PDK* Bulguları

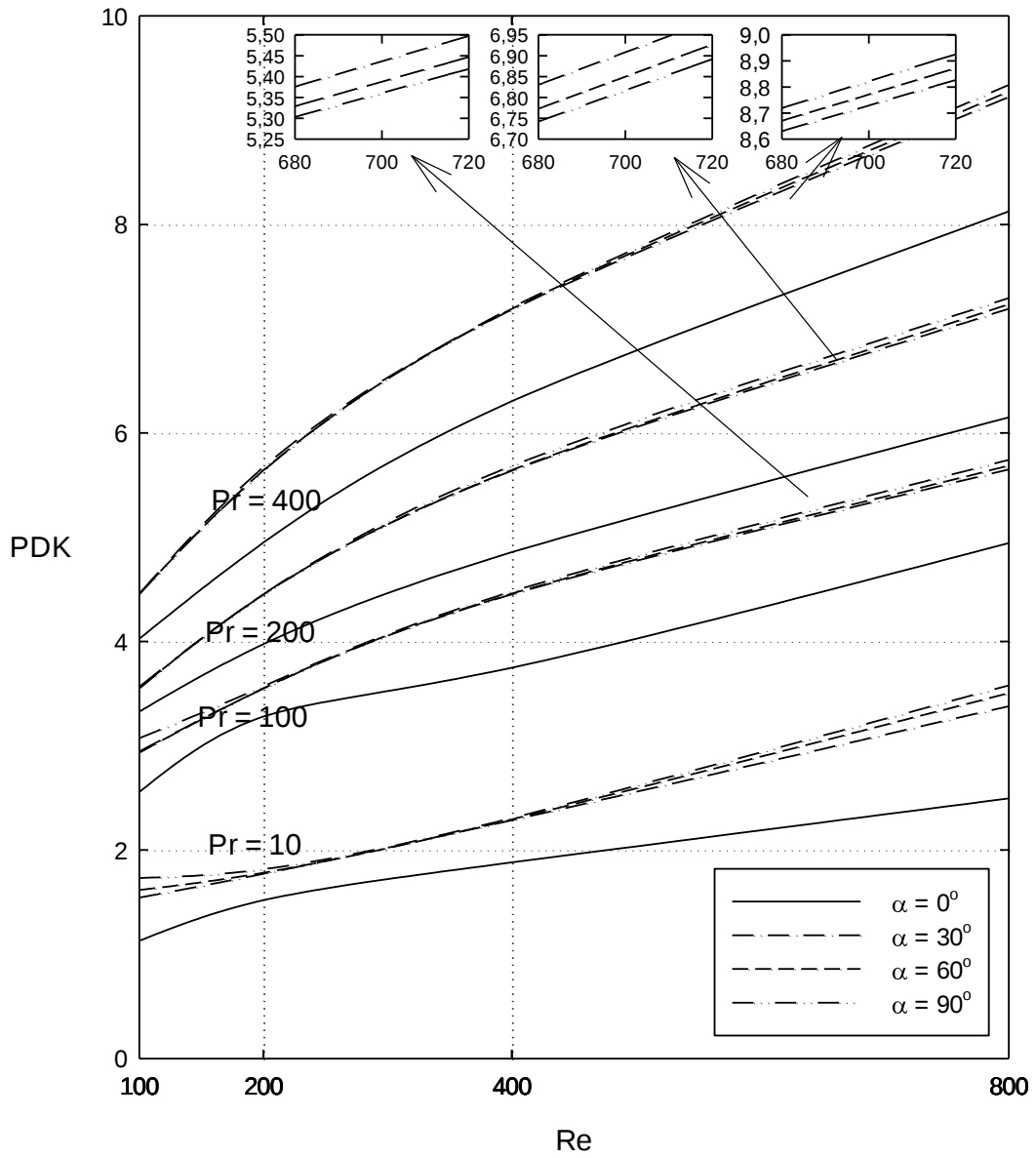
Nanoakışkanlı *PDK* sonuçları baz akışkanlı sonuçlara benzer şekilde kanatçık açısı ve kütle oranına bağlı olarak Şekil 114-125'te, kanatçık yüksekliği ve kütle oranına bağlı olarak Şekil 126-131'deki grafiklerde görülmektedir.



Şekil 114. *PDK*'nın *Re* sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\Phi = \% 1$)

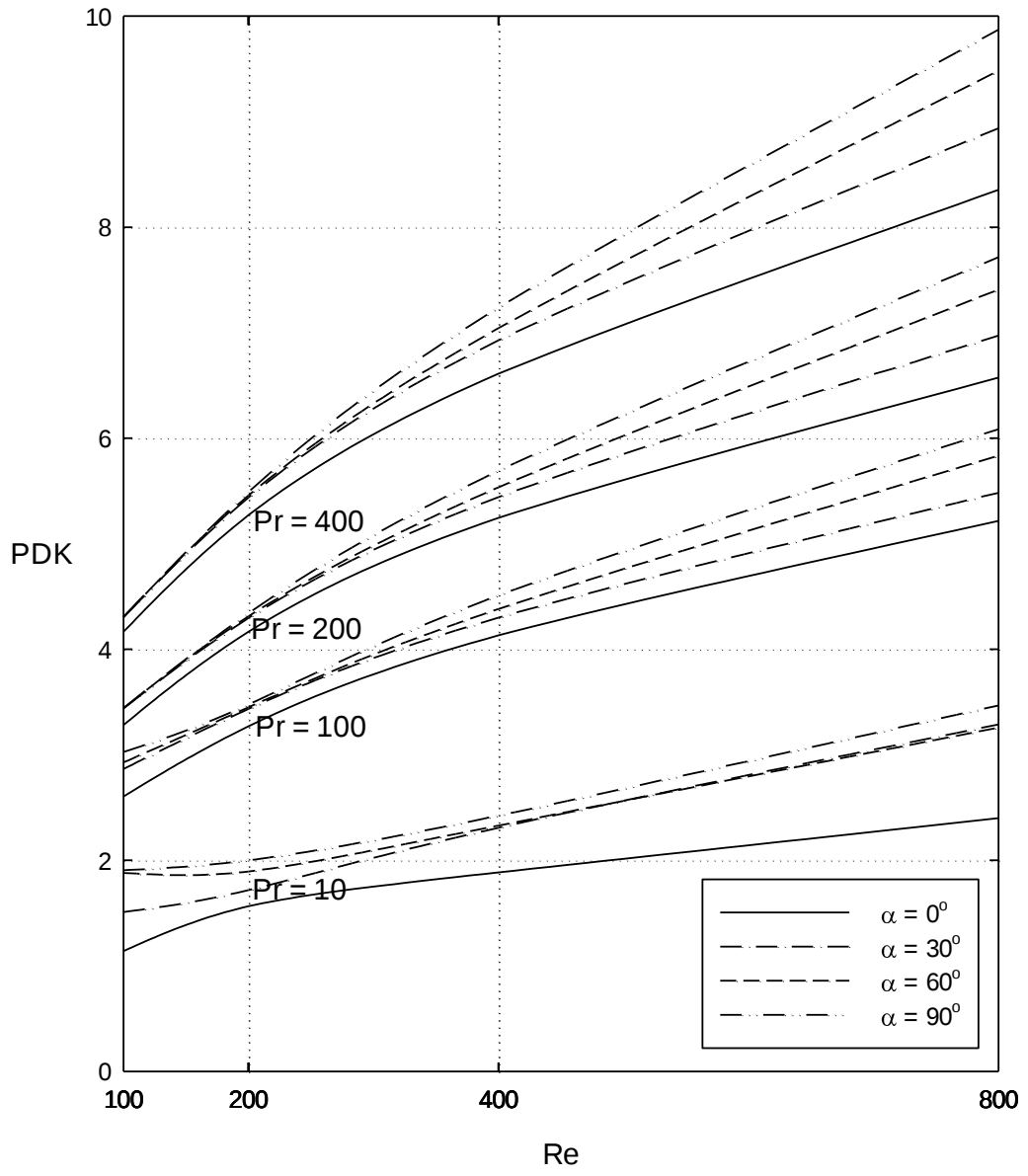


Şekil 115. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\phi = \% 2$)

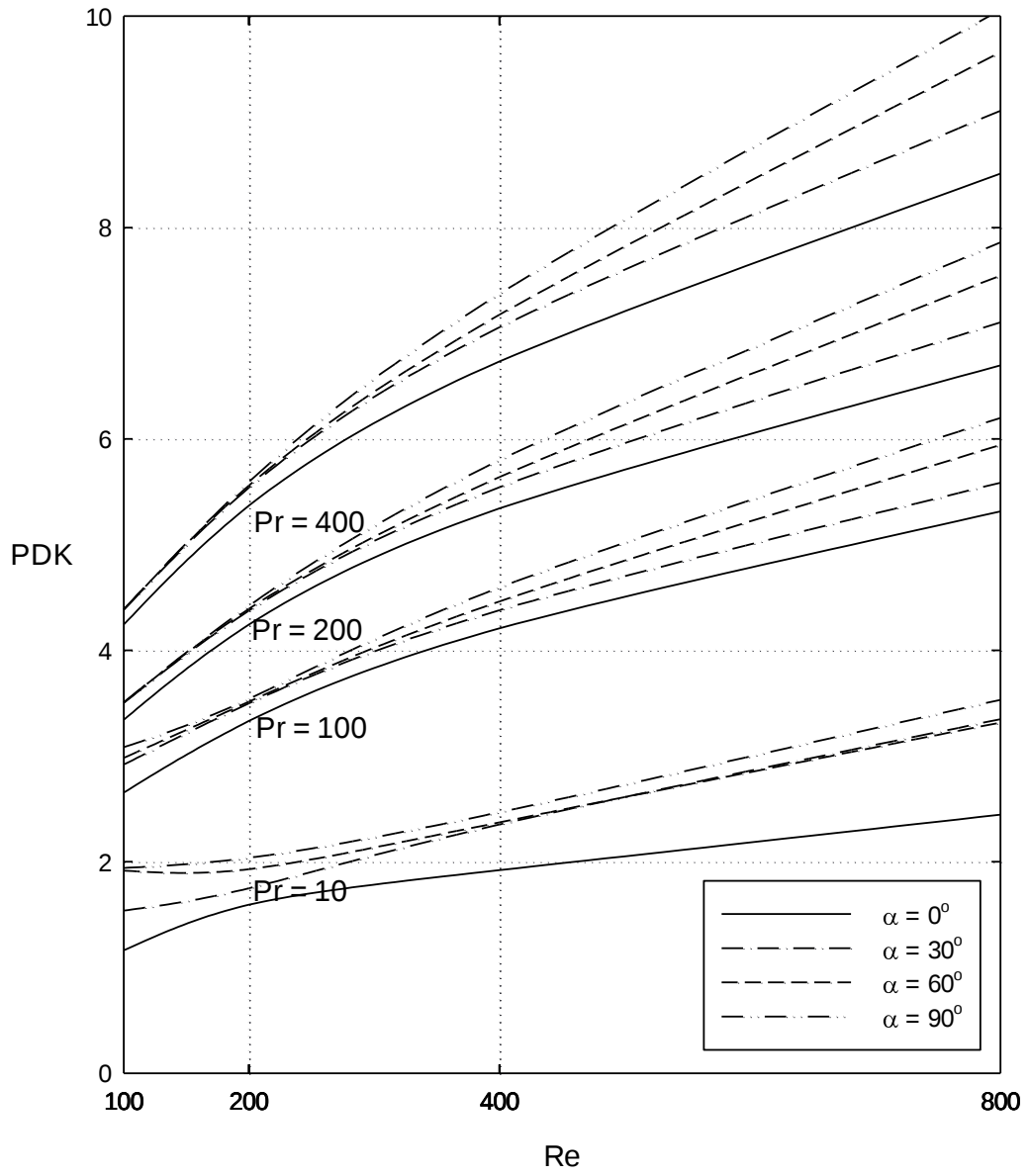


Şekil 116. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\Phi = \% 3$)

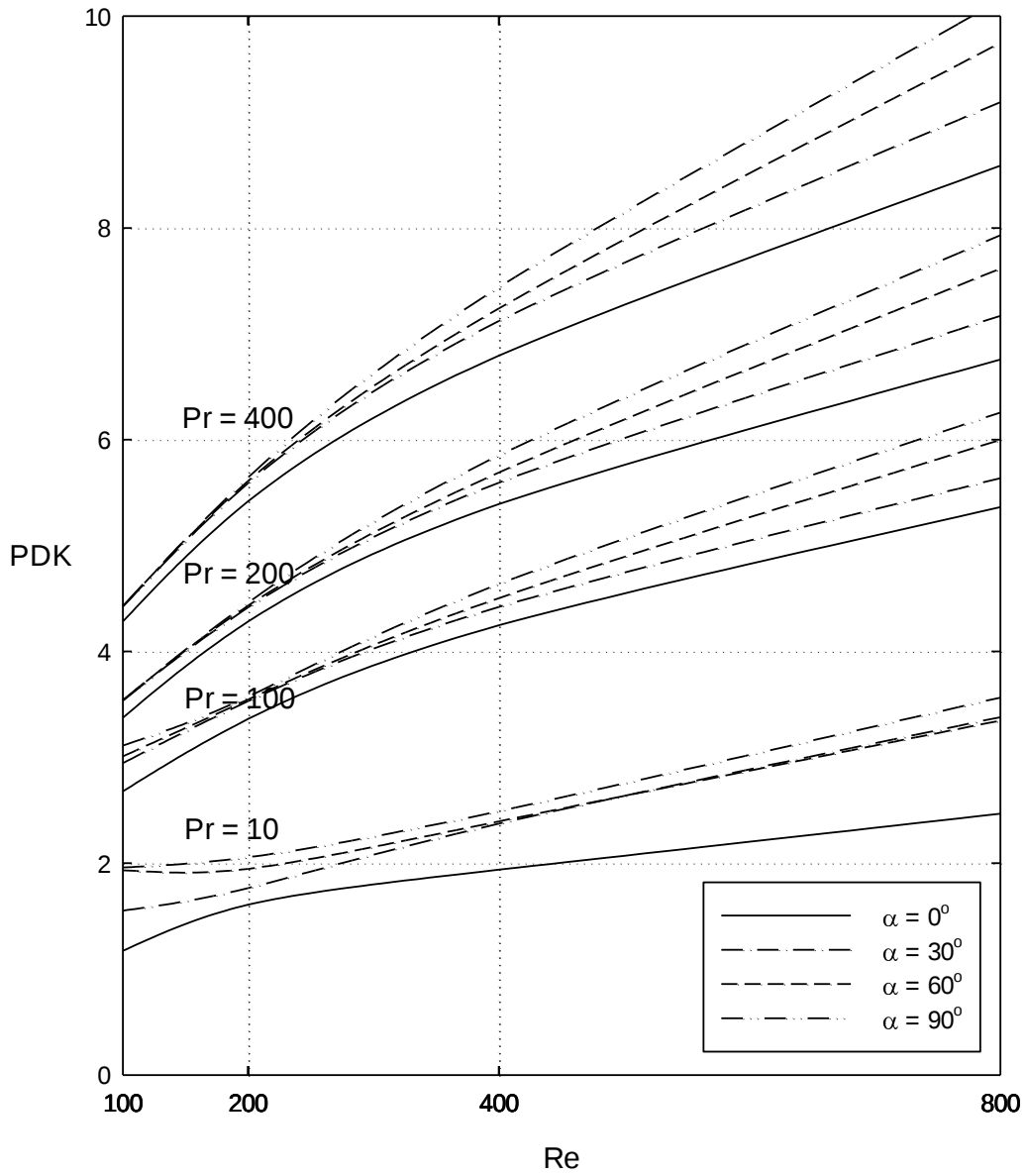
Şekil 114-116 irdelendiğinde artan kütle oranı ile PDK 'nın da arttığı görülmektedir. Bu artış kütle oranının $\% 1$ değeri için (baz akışkana göre) $\% 7$ oranında olmaktadır. Kütle oranının $\% 2$ ye çıktığı düzenlemede bu fark $\% 9,5$ e ulaşır iken kütle oranının $\% 3$ değeri için artış $\% 11$ seviyelerine ulaşmaktadır. Buradan elde edilen sonuçlar kısa kanatçıklı düzenleme durumunda kanatçık açısı ve kütle oranı etkilerinin benzer şekillerde artış gösterdiği ve bu artışlara bağlı olarak da PDK sonuçlarında kayda değer değişimlerin olmadığı görülmektedir.



Şekil 117. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\phi = \% 1$)

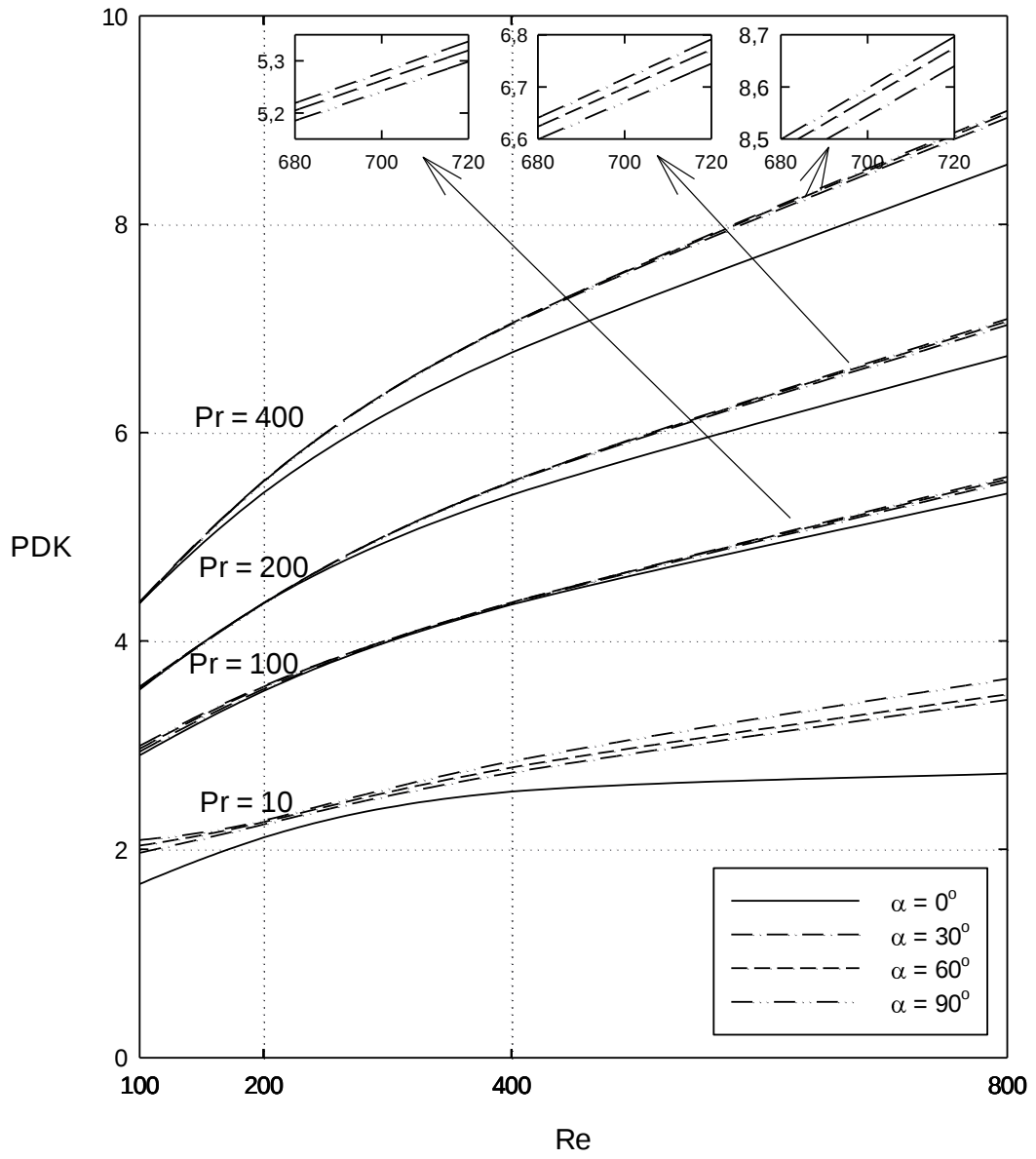


Şekil 118. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\phi = \% 2$)

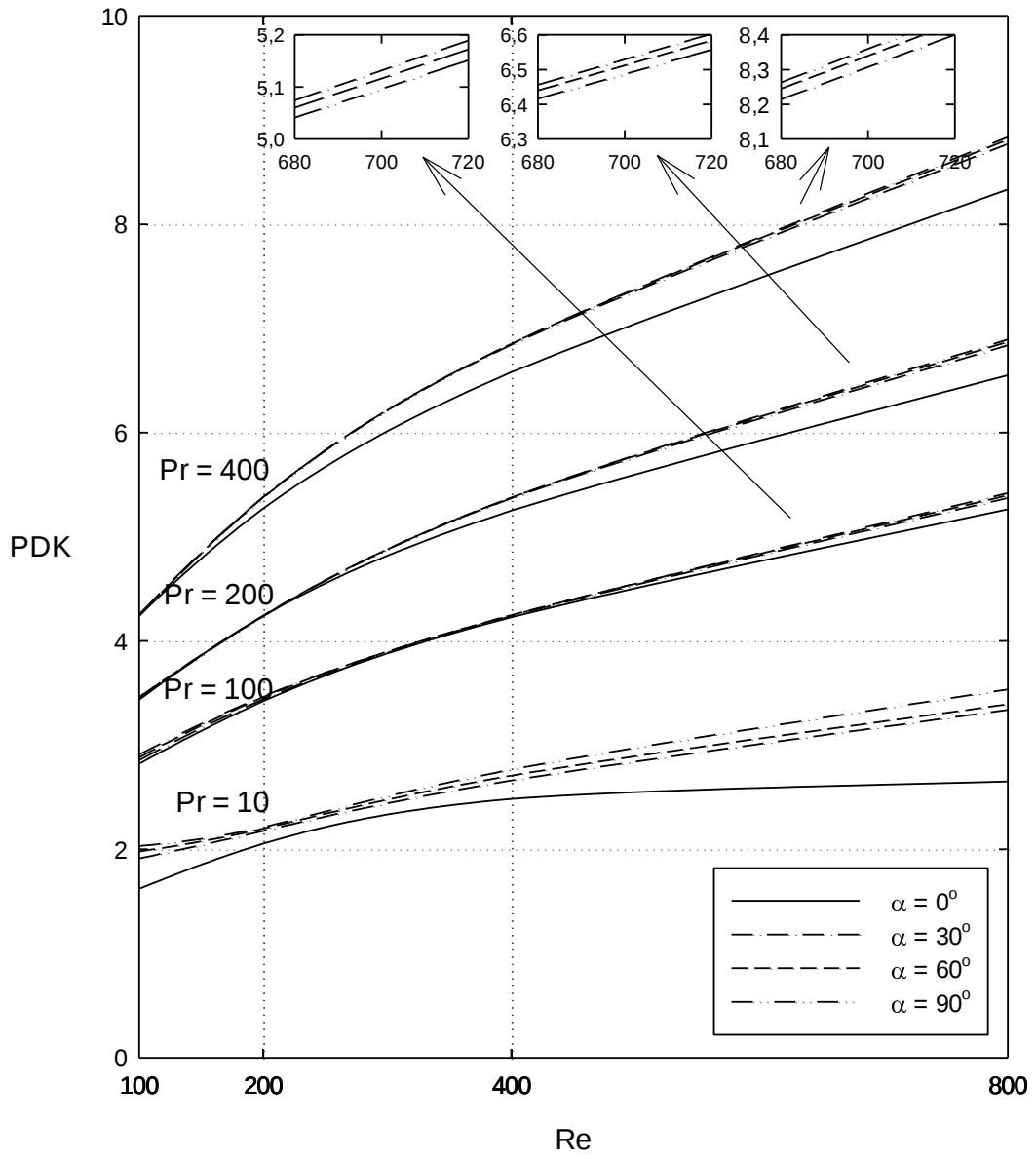


Şekil 119. PDK' 'nın Re sayısı ile değişimi ($2 \text{ kanatçık} / l^* = 0,75r_0 / \Phi = \% 3$)

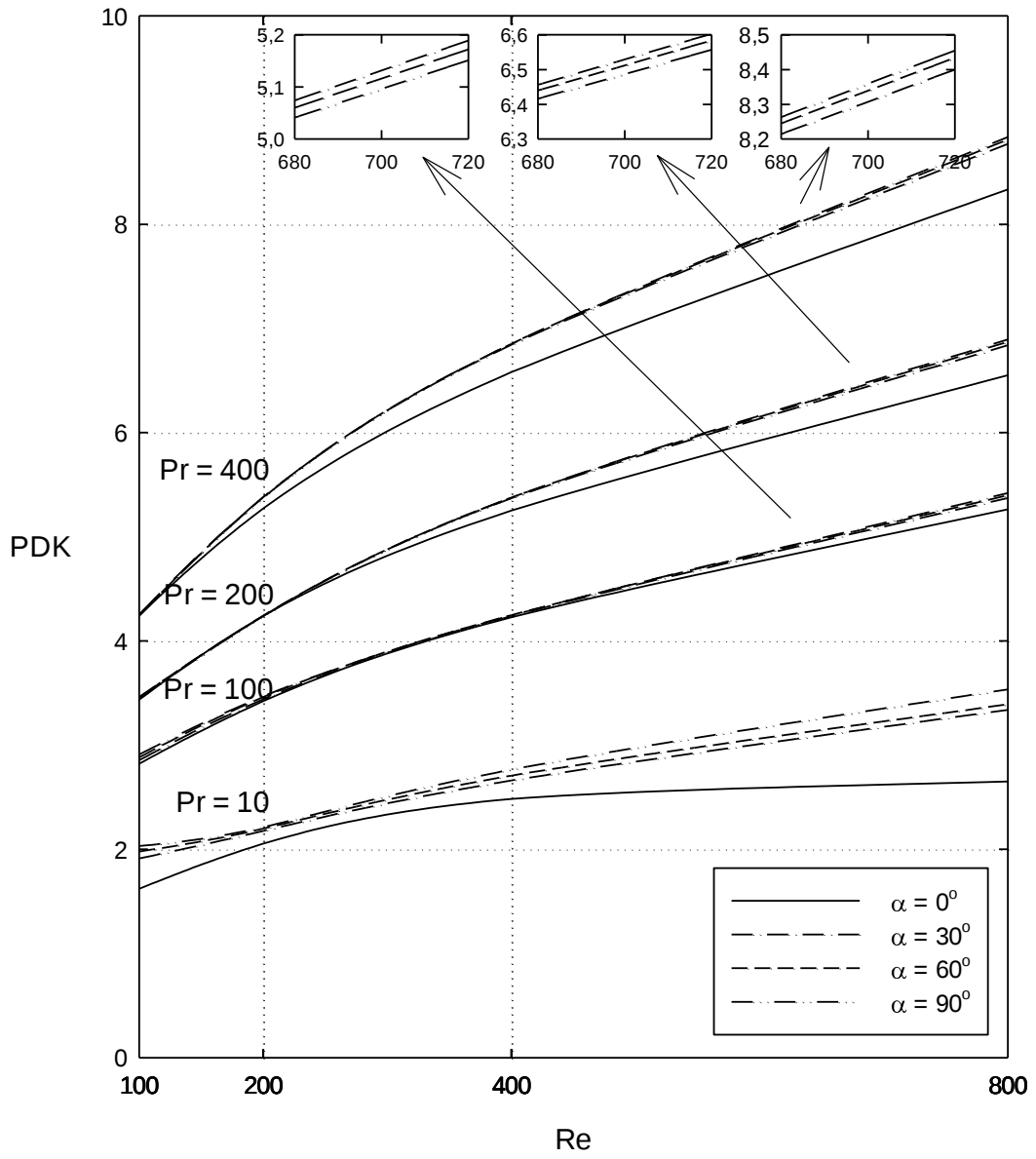
Şekil 117-119 irdelendiğinde benzer şekilde artan kütle oranı ile PDK' nın da arttığı görülmektedir. Bu artış kütle oranının $\% 1$ değeri için (baz akışkana göre) $\% 8$ oranında olduğu görülmektedir. Kütle oranının $\%2$ ye çıktığı düzenlemede bu fark $\% 10$ a ulaşır iken kütle oranının $\% 3$ değeri için artış $\%12$ seviyelerine ulaşmaktadır. Buradan elde edilen sonuçlar yüksek kanatçıklı düzenleme durumunda kanatçık açısı ve kütle oranı etkilerinin f ve Nu için farklı oranlarda artış gösterdiği görünmektedir. Nu değerindeki iyileşmenin $\%$ kütle oranına bağlı olarak daha yüksek mertebeden gerçekleşmektedir. Bu sonuçlar, nanoakışkan kullanımının benzeri iyileştirme yöntemlerinde kullanılabileceği sonucunu ortaya çıkartmaktadır.



Şekil 120. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\Phi = \% 1$)

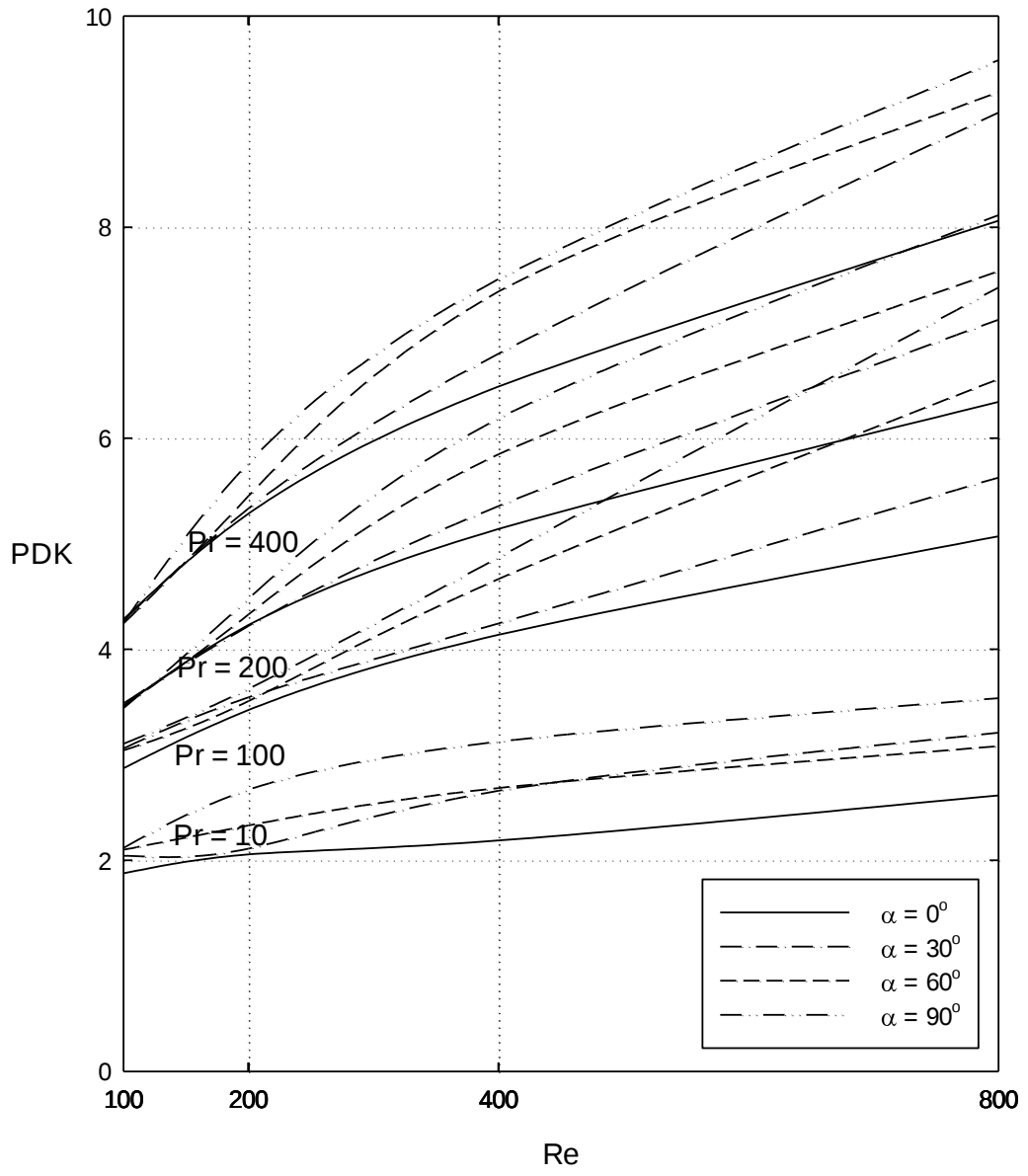


Şekil 121. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\Phi = \% 2$)

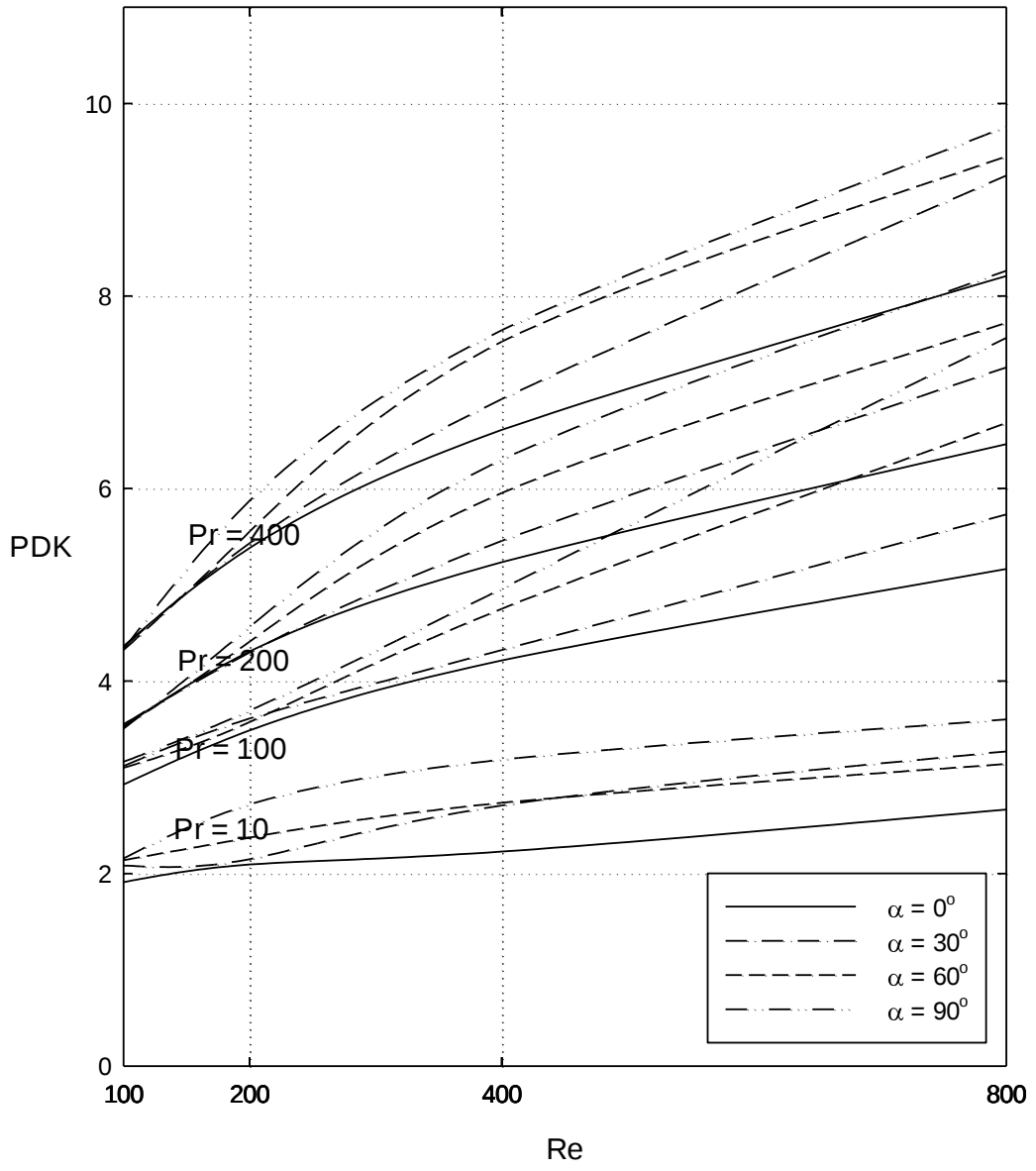


Şekil 122. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\Phi = \% 3$)

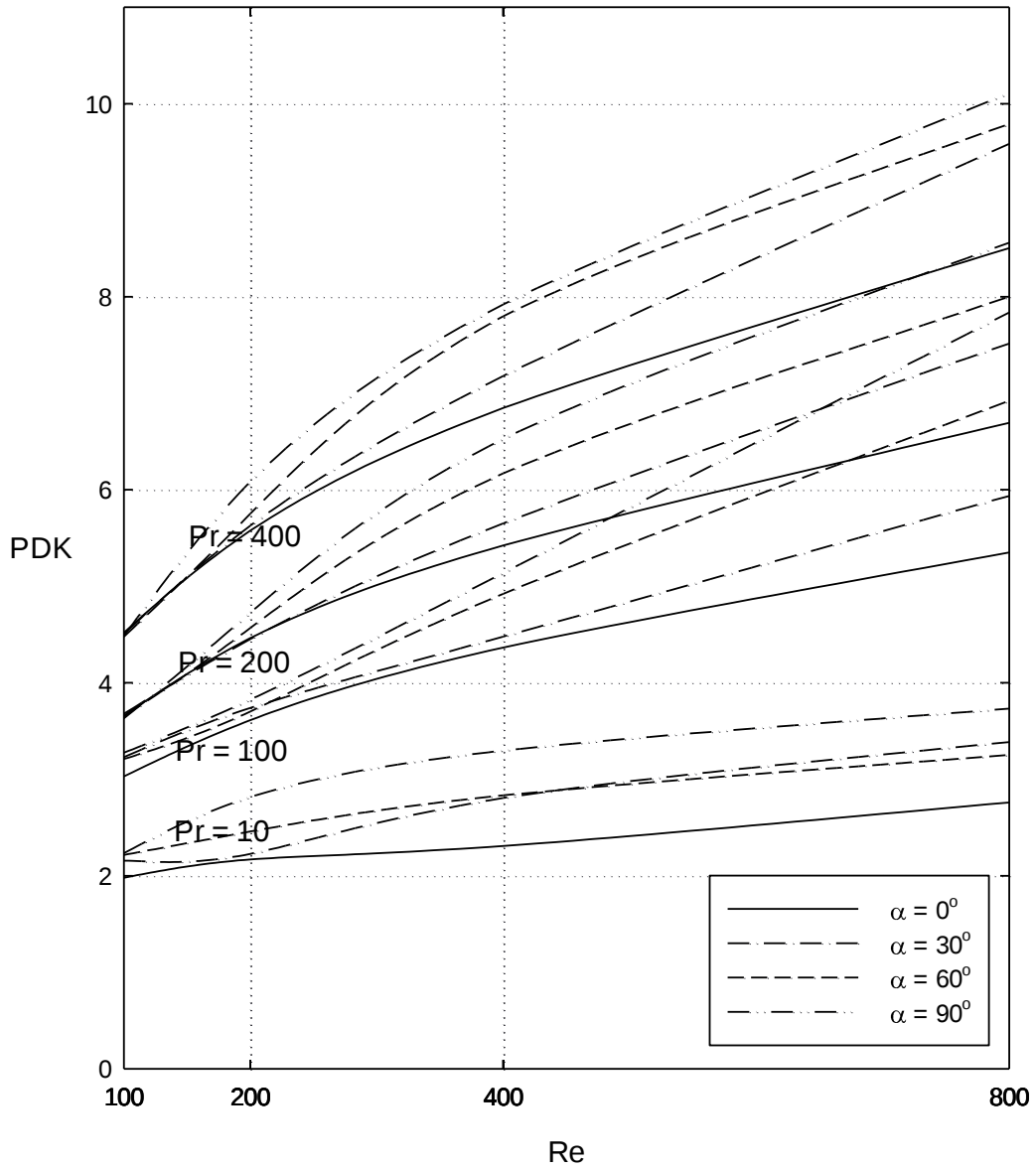
Şekil 120-122 irdelendiğinde artan kütle oranı ve kanatçık sayısı ile PDK 'nın da arttığı görülmektedir. Bu artış kütle oranının $\% 1$ değeri için (baz akışkana göre) $\% 8$ oranında olduğu görülmektedir. Kütle oranının $\% 2$ ye çıktığı düzenlemede bu fark $\% 11$ e ulaşırken kütle oranının $\% 3$ değeri için artış $\% 13$ seviyelerine ulaşmaktadır.



Şekil 123. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\phi = \% 1$)

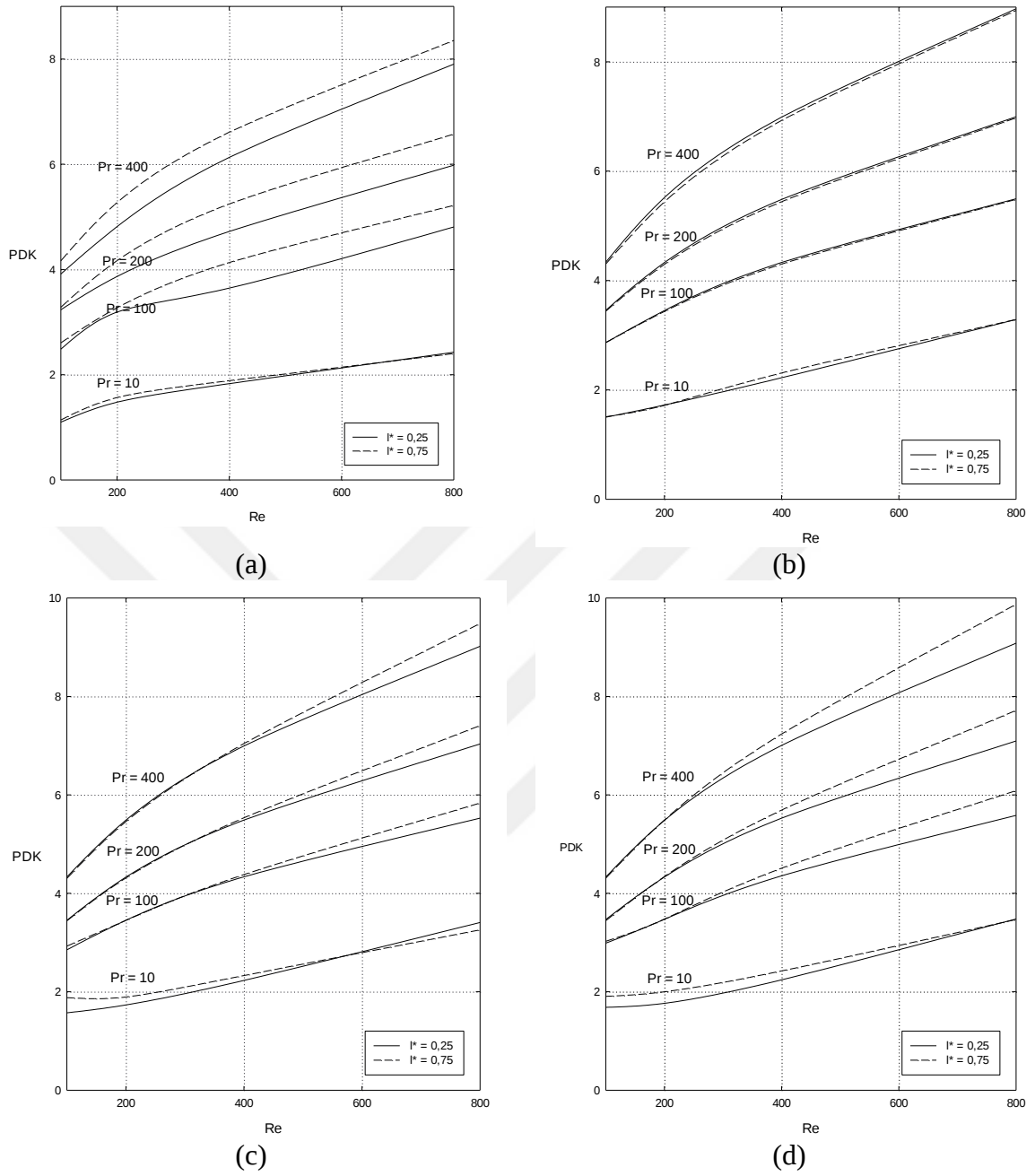


Şekil 124. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\Phi = \% 2$)

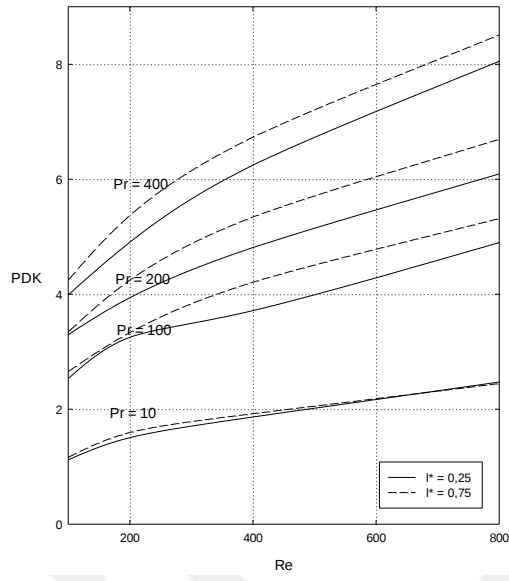


Şekil 125. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\Phi = \% 3$)

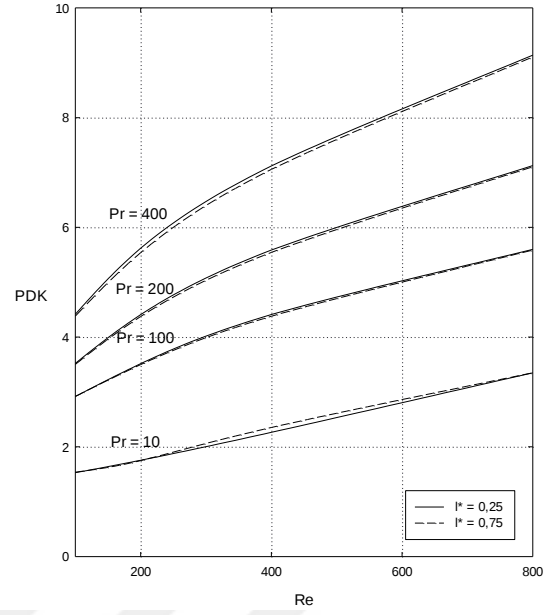
Şekil 123-125 irdelendiğinde benzer şekilde artan kütle oranı ve kanatçık yüksekliği ile PDK 'nın da arttığı görülmektedir. Bu artış kütle oranının $\% 1$ değeri için (baz akışkana göre) $\% 7$ oranında olduğu görülmektedir. Kütle oranının $\% 2$ ye çıktığı düzenlemelerde bu fark $\% 11$ e ulaşır iken kütle oranının $\% 3$ değeri için artış $\% 14$ seviyelerine ulaşmaktadır. Baz akışkanlı çalışma sonuçlarına benzer şekilde burada da Pr sayısının görece düşük değerlerinde geometrik düzenlemeler ile daha yüksek PDK değerleri elde edilebilmektedir. Bu etkilere nanoakışkan kütle oranının da eklenmesi ile $\% 2 - 6$ oranında PDK değerlerinde ilave iyileşmeler oluşmaktadır.



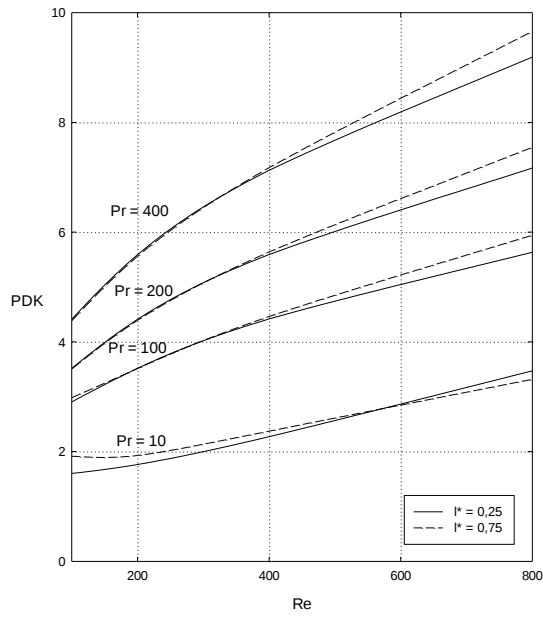
Şekil 126. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık / $\Phi = \% 1$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$



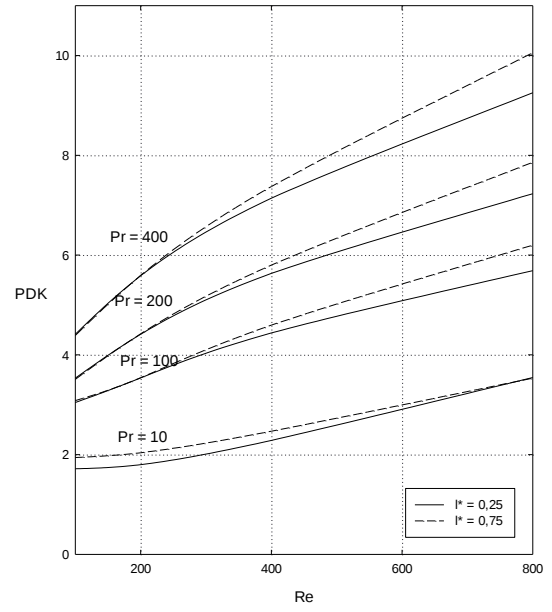
(a)



(b)

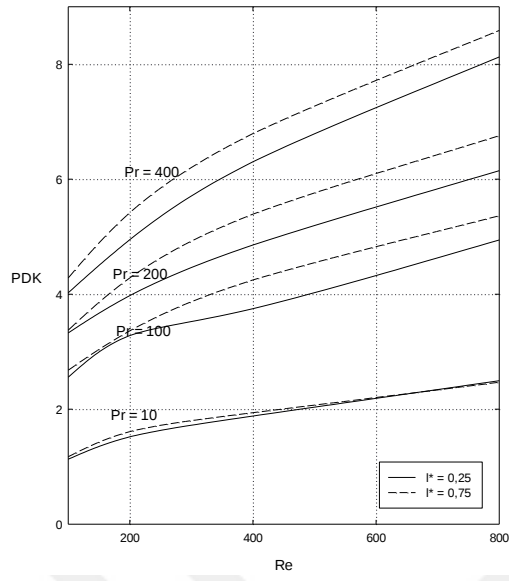


(c)

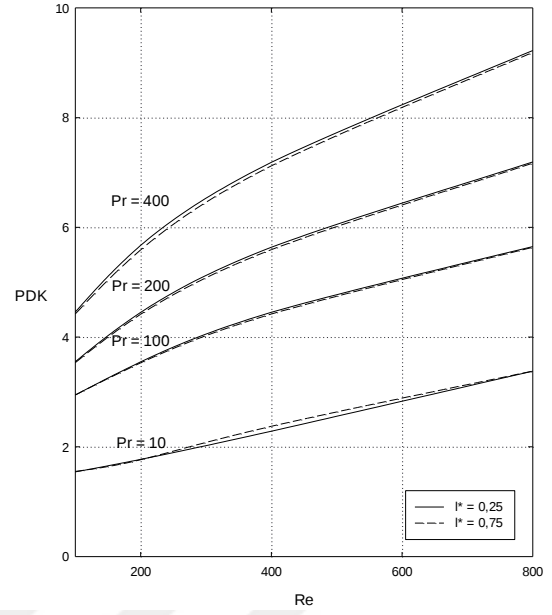


(d)

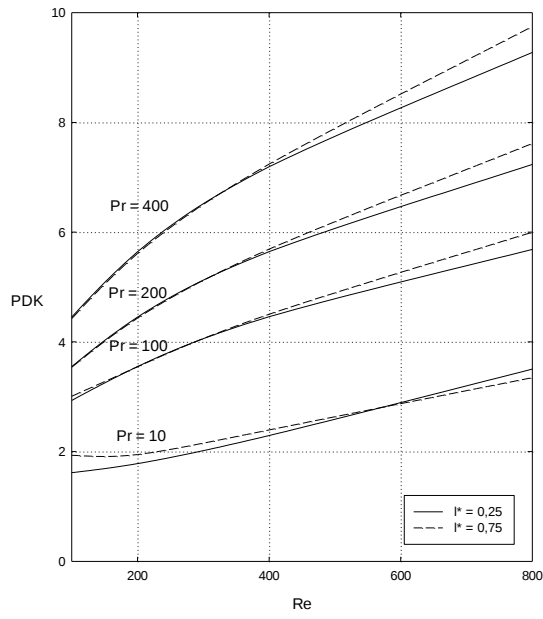
Şekil 127. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık / $\Phi = \% 2$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$



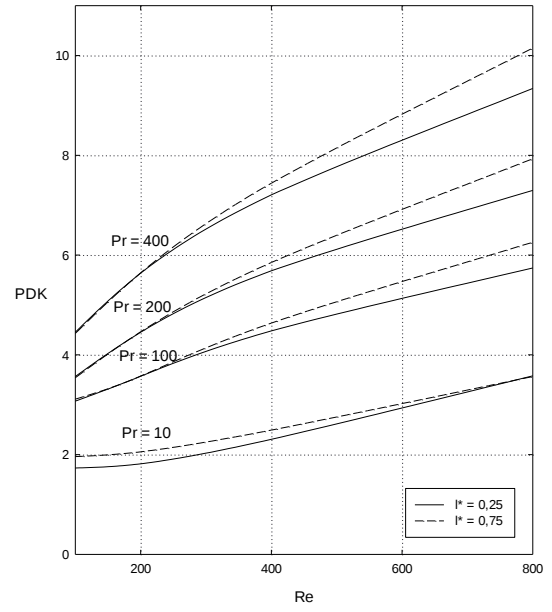
(a)



(b)

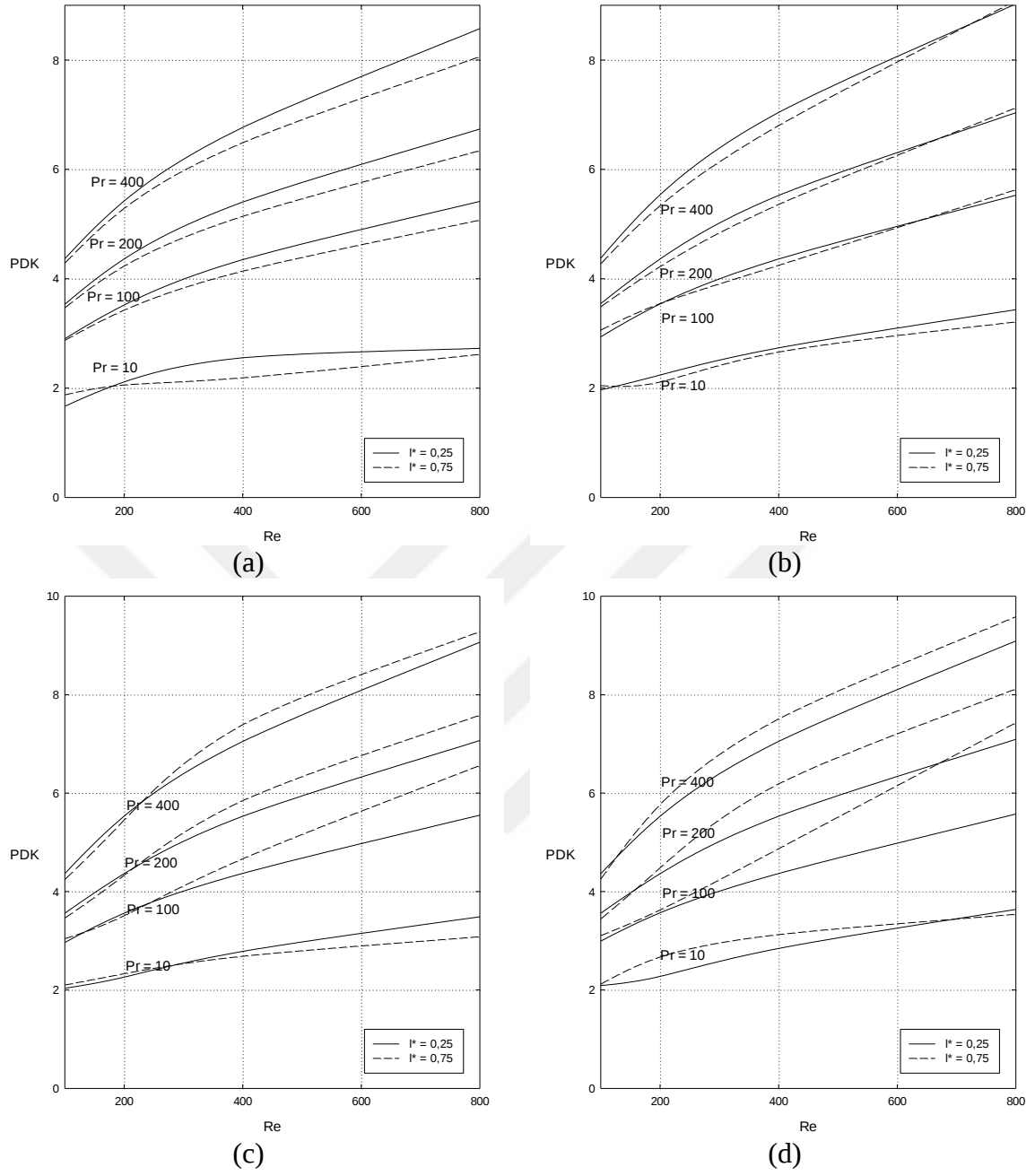


(c)

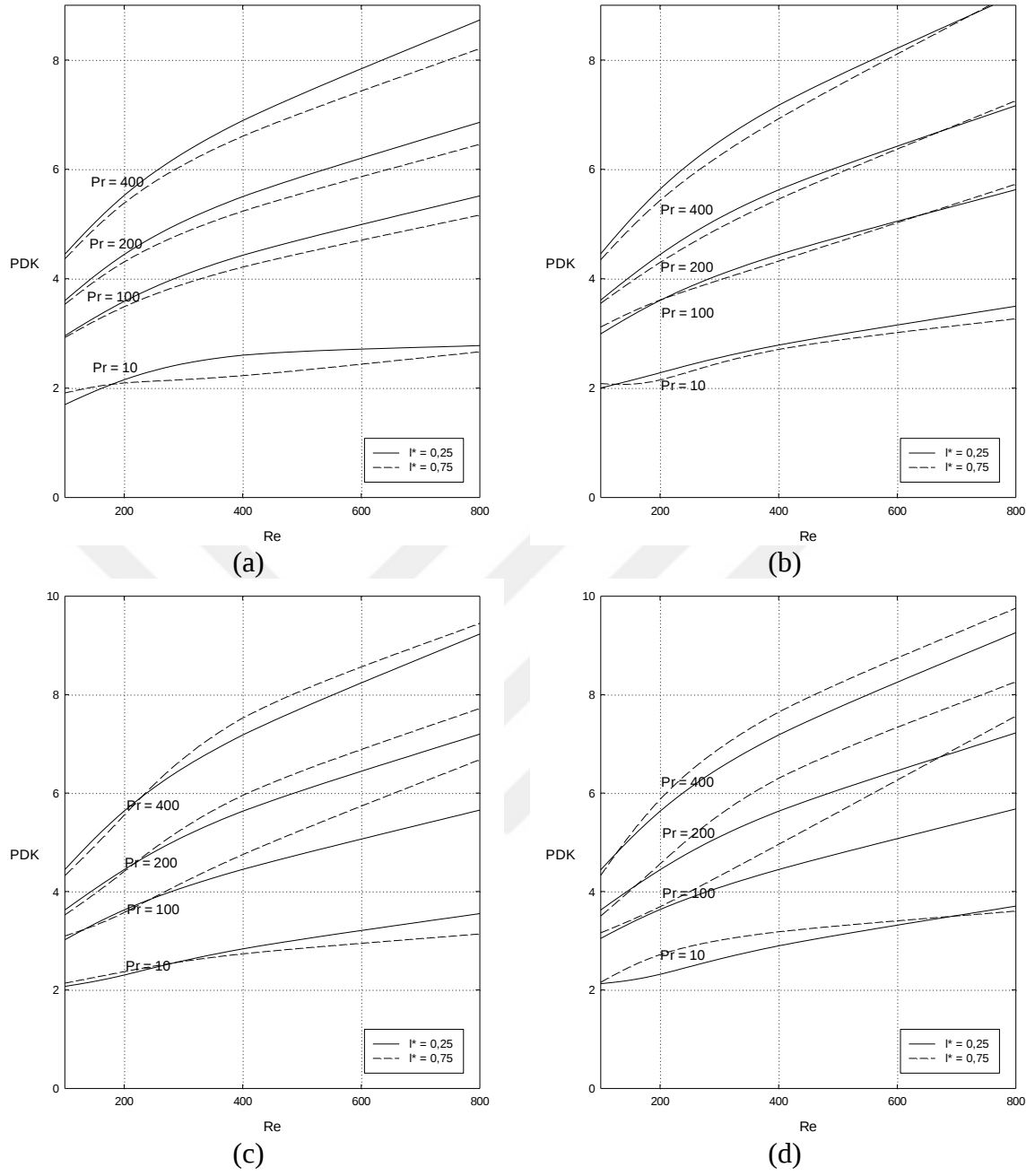


(d)

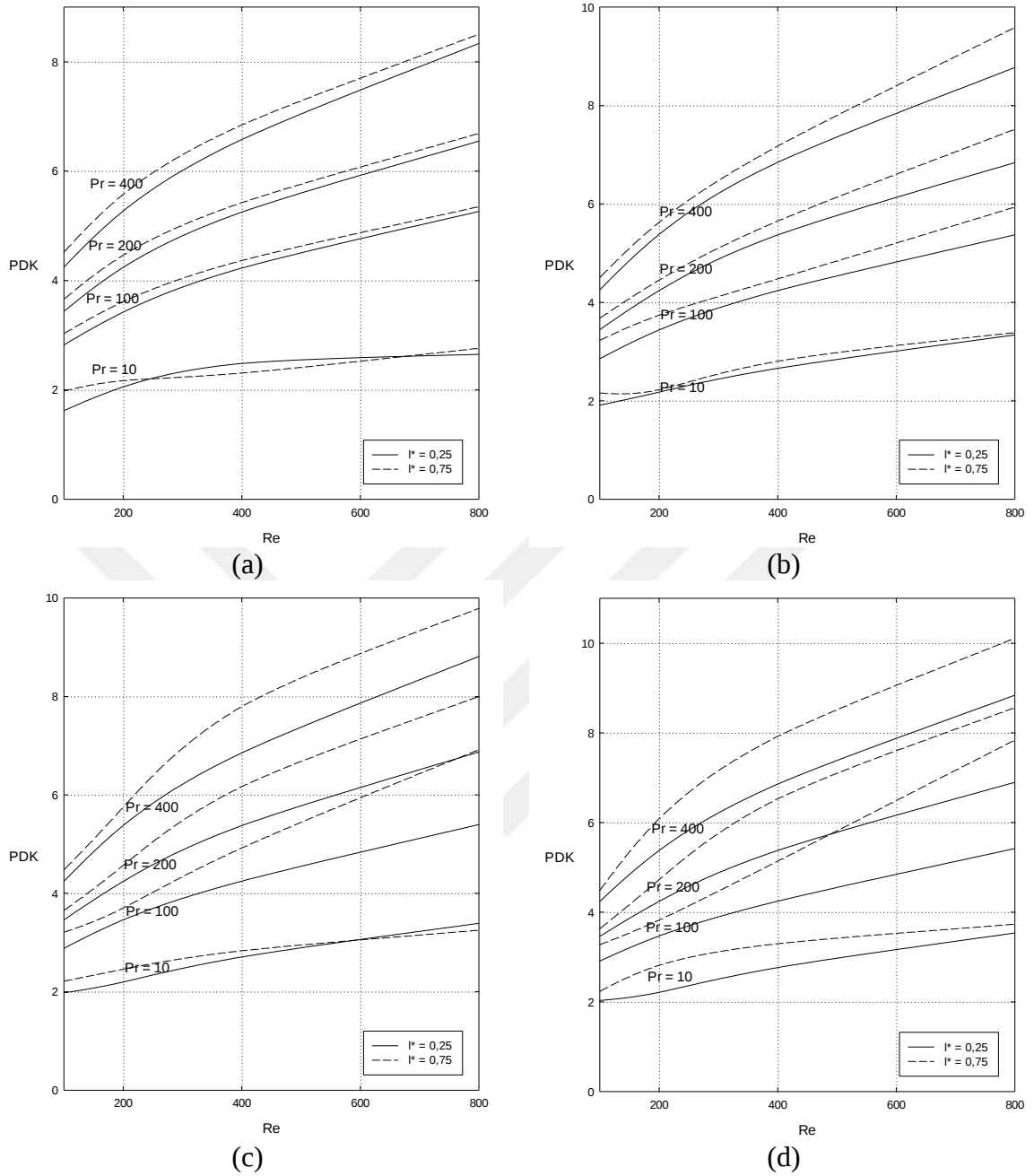
Şekil 128. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi 2 kanatçık / $\Phi = \% 3$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$



Şekil 129. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi 4 kanatçık / $\Phi = \% 1$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$



Şekil 130. PDK' nın Re sayısı ile değişimi 4 kanatçık / $\Phi = \% 2$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$



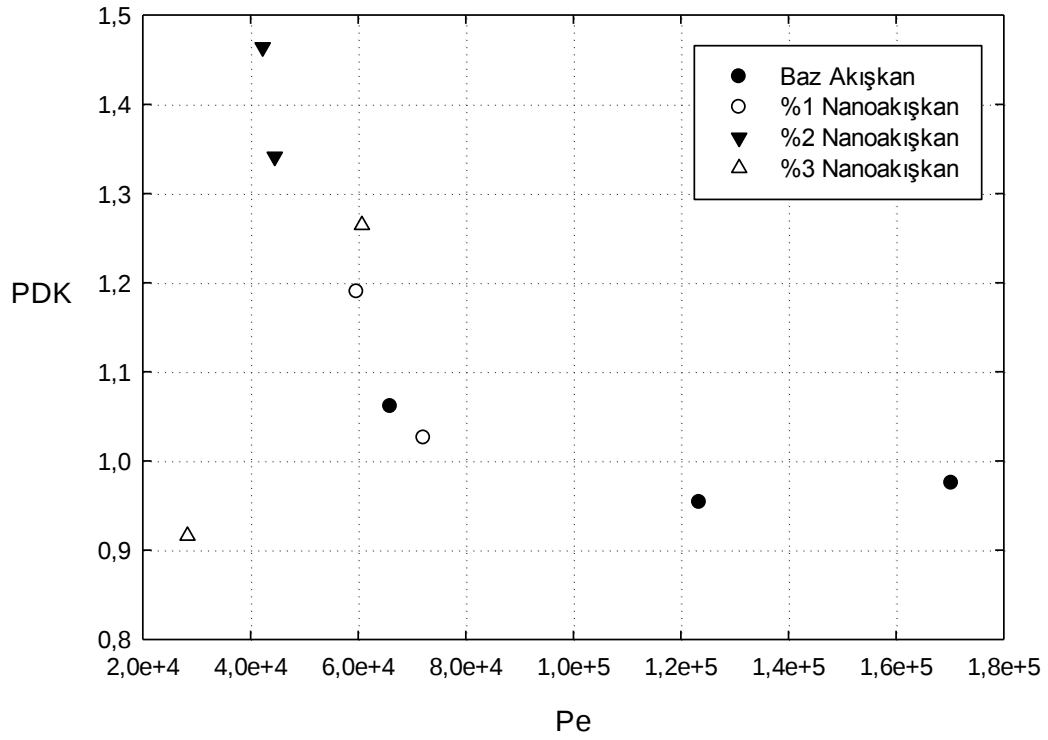
Şekil 131. PDK 'nın Re sayısı ile değişimi 4 kanatçık / $\Phi = \% 3$ (a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 30^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$ (d) $\alpha = 90^\circ$

Şekil 126 – 131 incelendiğinde artan kanatçık burulma açısının PDK üzerindeki etkisinin yüksek kanatçıklı durumda çok daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durumun nanoakışkan kütle oranı ile birlikte analiz edilmesinde ise nanoakışkan kullanımı ile daha düşük açılarda da PDK da iyileşme (daha yüksek Pr sayısına göre) görülebilmektedir. Genel durumlarda 90° burulma açısında daha düşük Pr sayılarında daha yüksek Pr

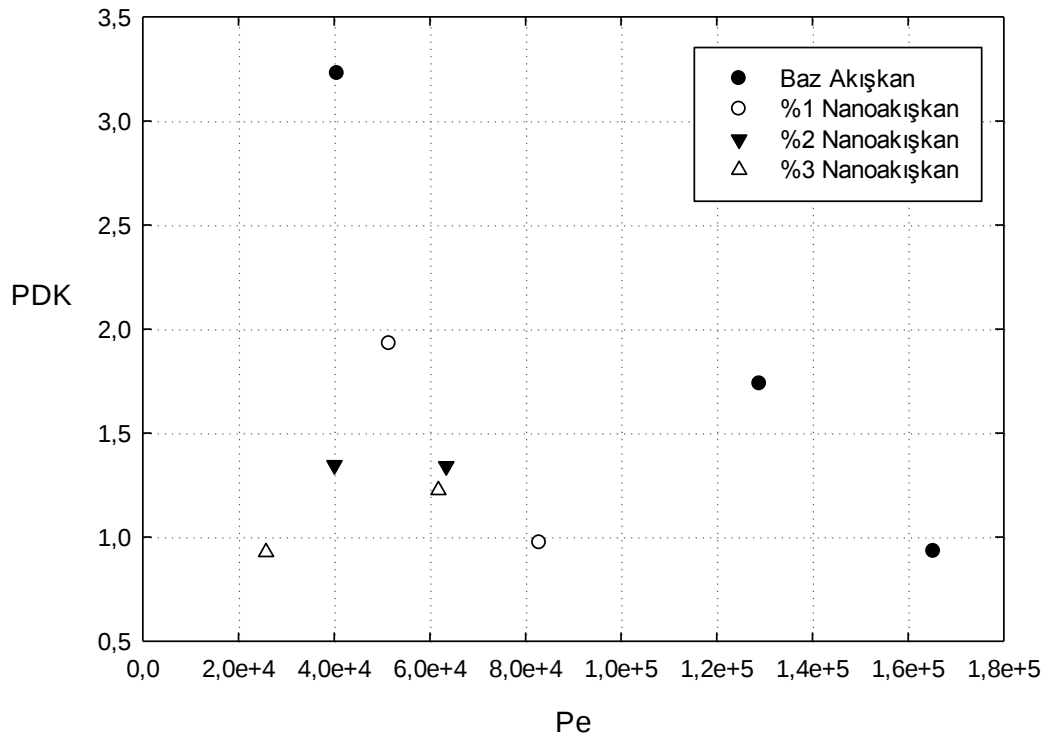
sayılarına göre iyileşmeler tespit edilmiş olsa da nanoakışkan kütle oranı ile bu açı 60° de de görülmektedir. Bu irdellemeler nanoakışkan kullanımının sistem üzerinde olumlu sonuçlar verdiğini bizlere göstermektedir.

3.5.3. Deneysel PDK Bulguları

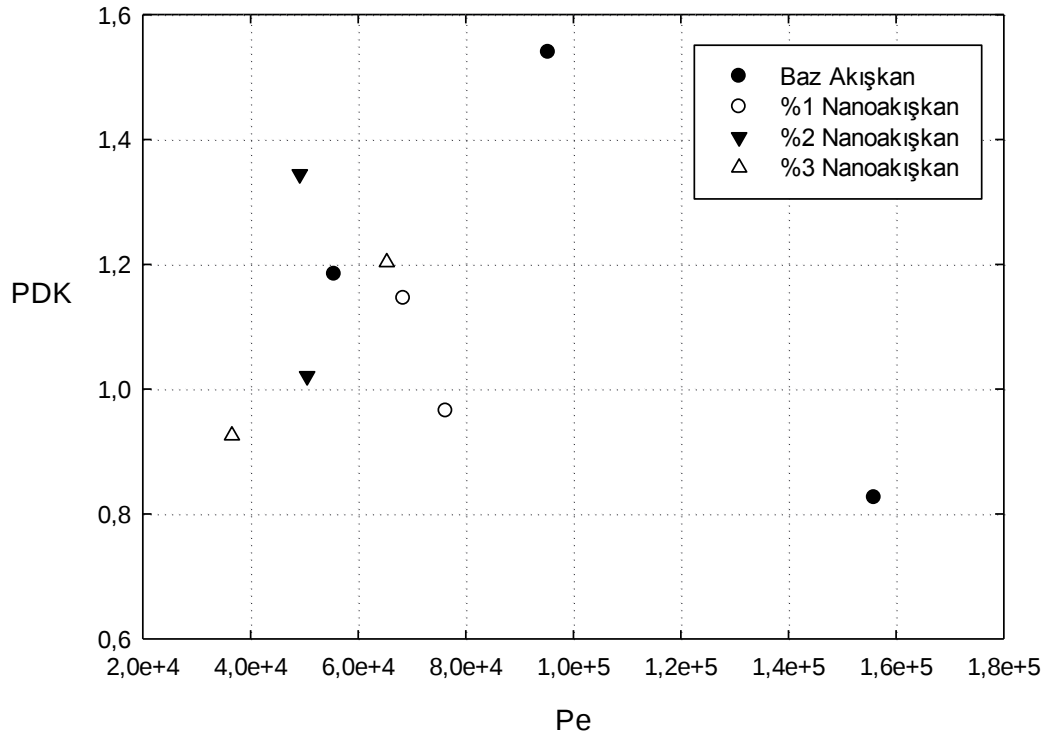
Gerçekleştirilen baz akışkanlı sonuçlar ile nanoakışkanlı sonuçlar birlikte incelenmiştir. Kanatçık sayısı, kanatçık açısı ve kanatçık yüksekliği etkilerinin incelendiği bulgular Şekil 132 – 147 arasındaki grafiklerde sunulmaktadır.



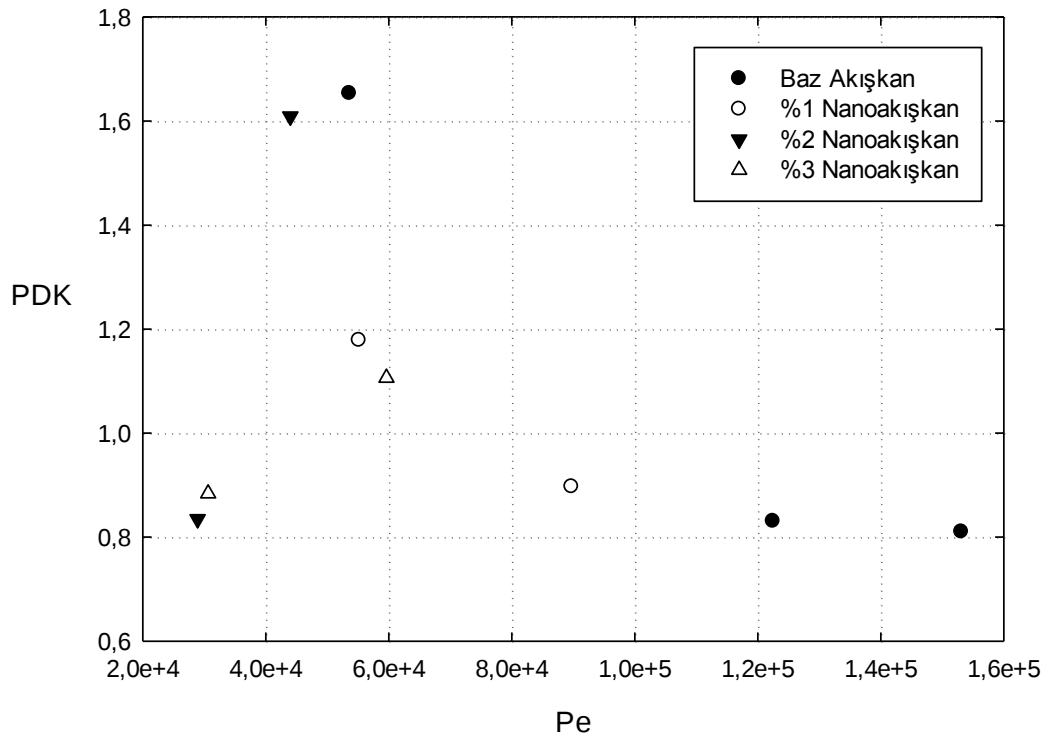
Şekil 132. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 0^\circ$)



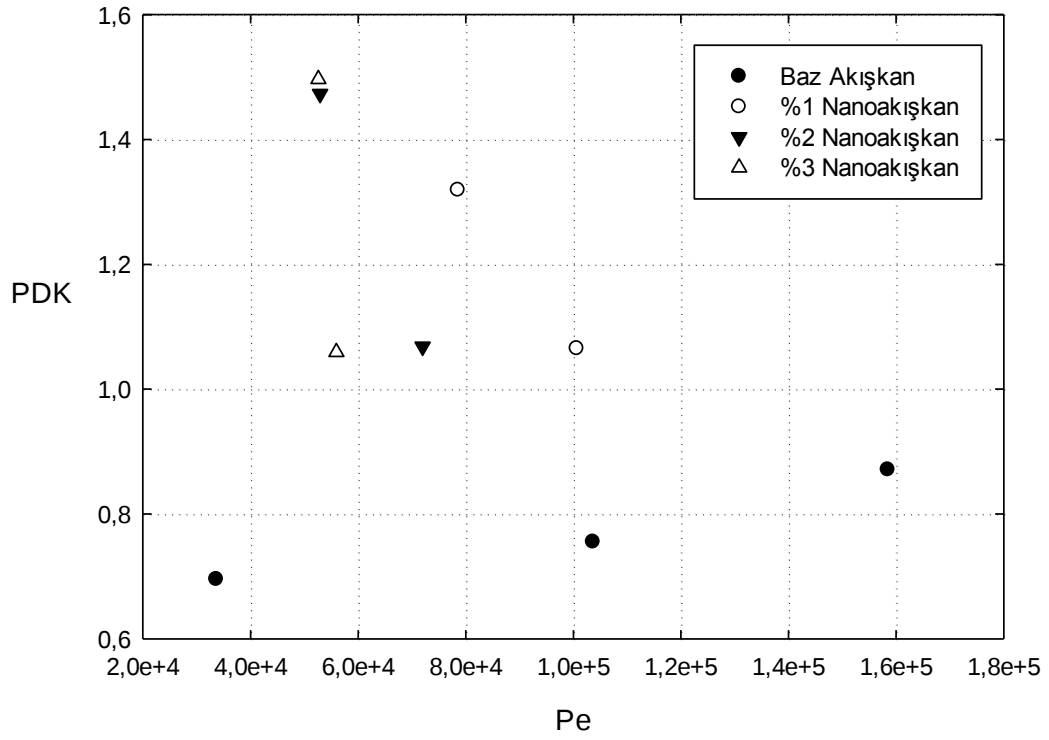
Şekil 133. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 30^\circ$)



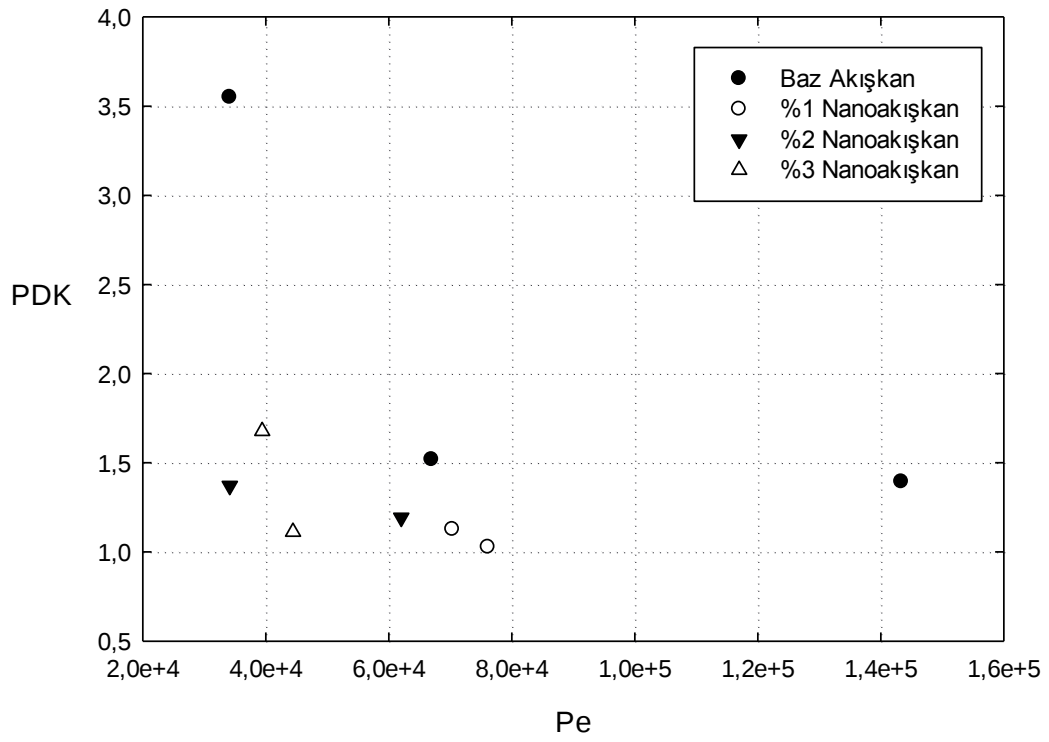
Şekil 134. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 60^\circ$)



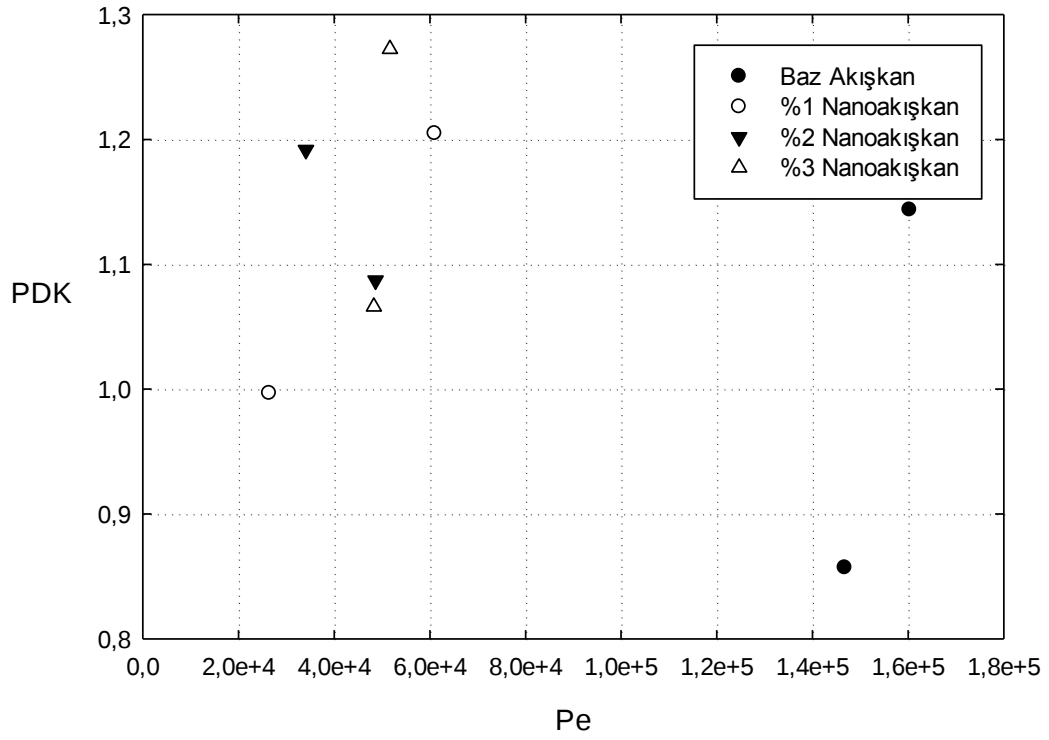
Şekil 135. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$)



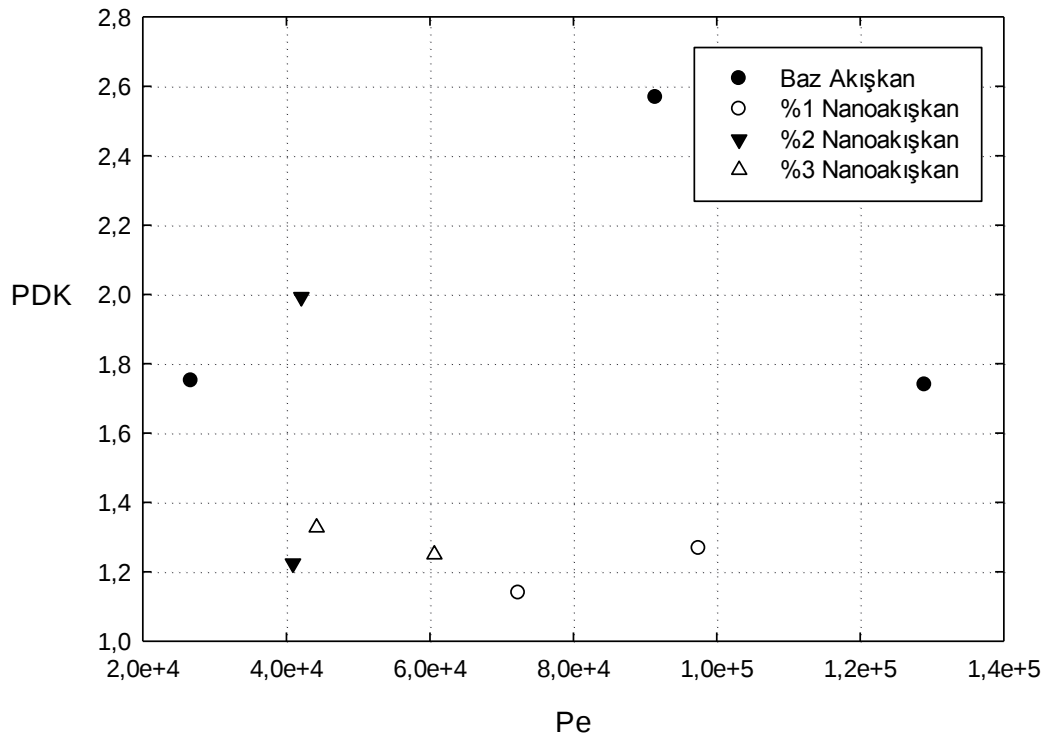
Şekil 136. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75 r_0$ / $\alpha = 0^\circ$)



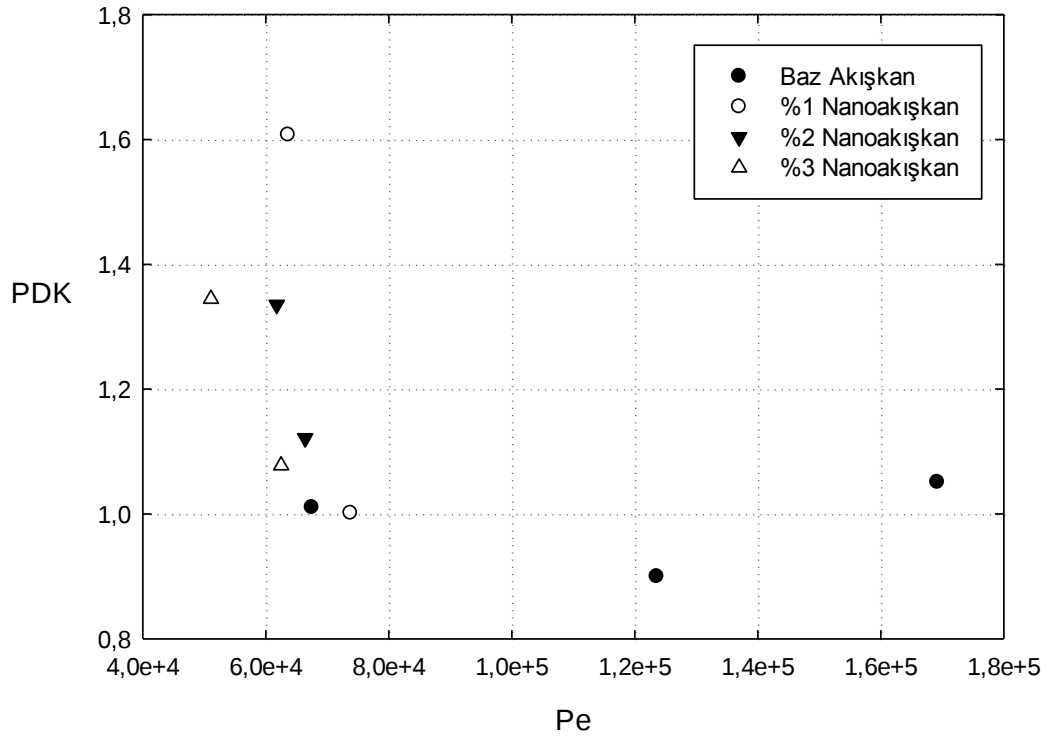
Şekil 137. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75 r_0$ / $\alpha = 30^\circ$)



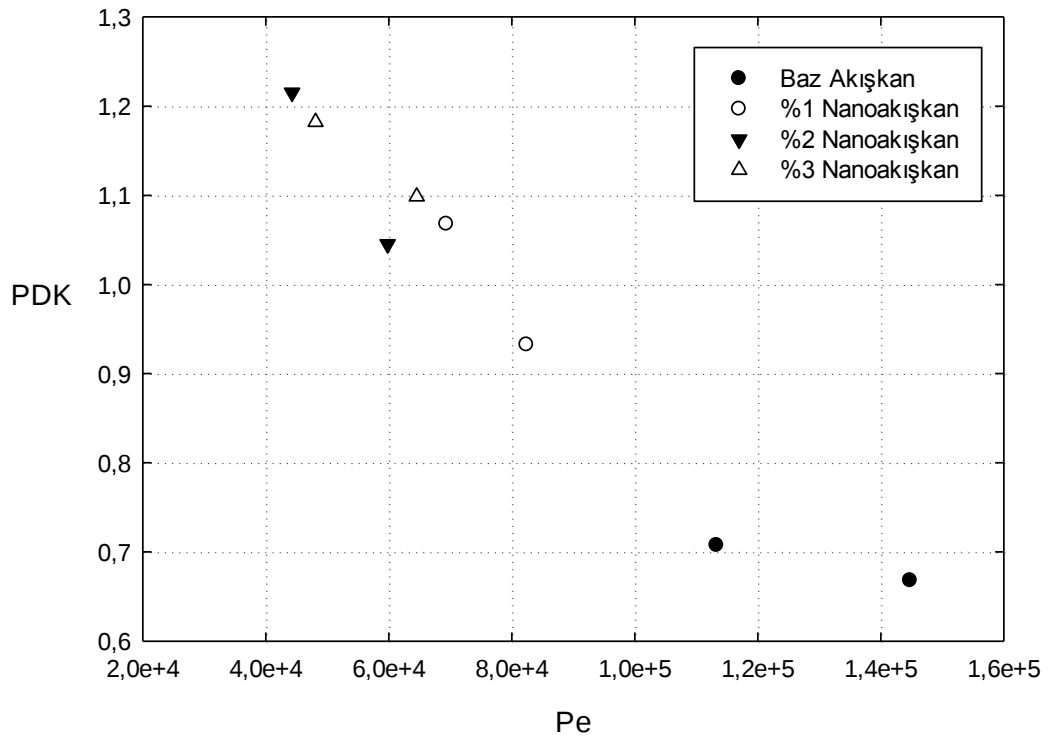
Şekil 138. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75 r_0$ / $\alpha = 60^\circ$)



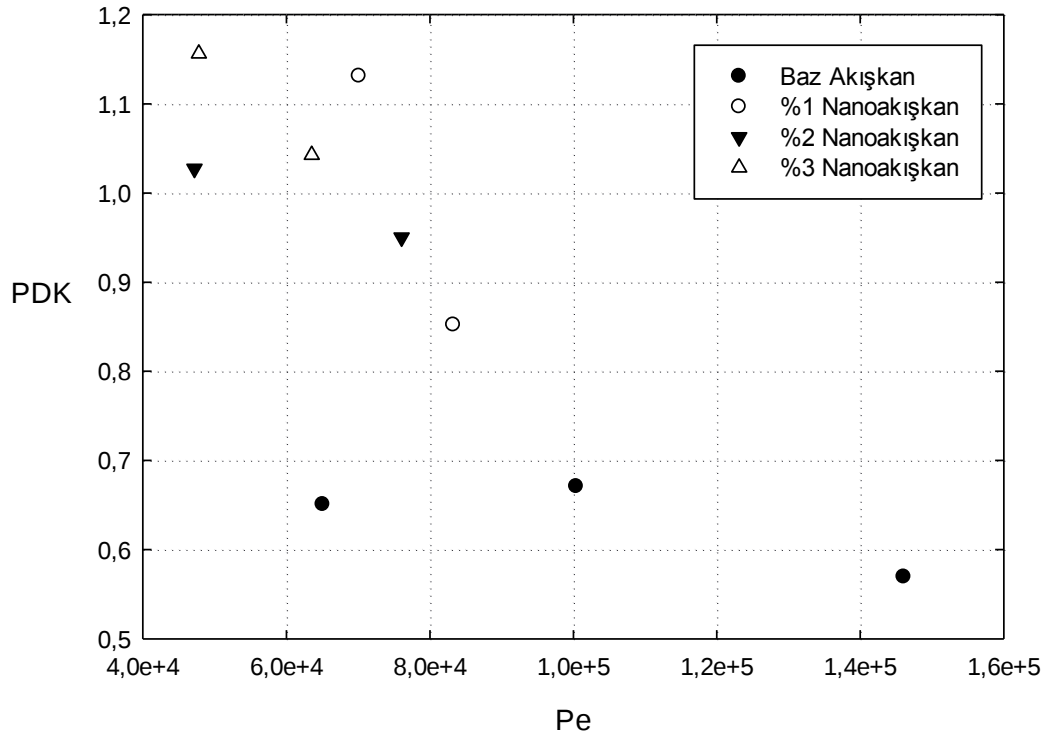
Şekil 139. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (2 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$)



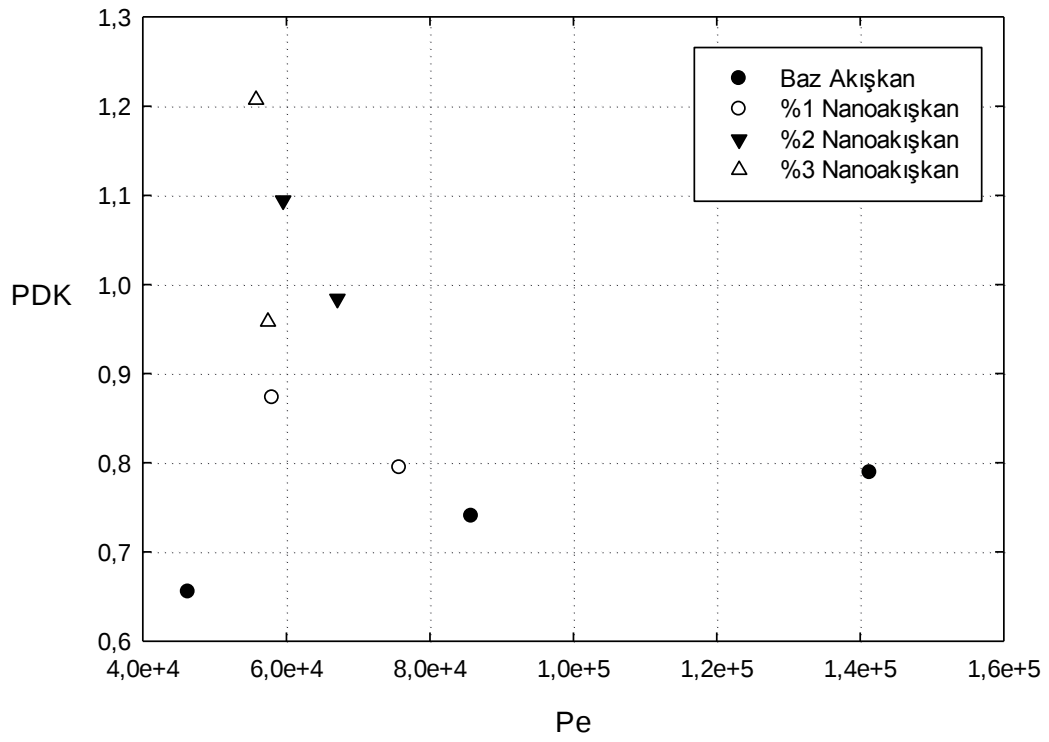
Şekil 140. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 0^\circ$)



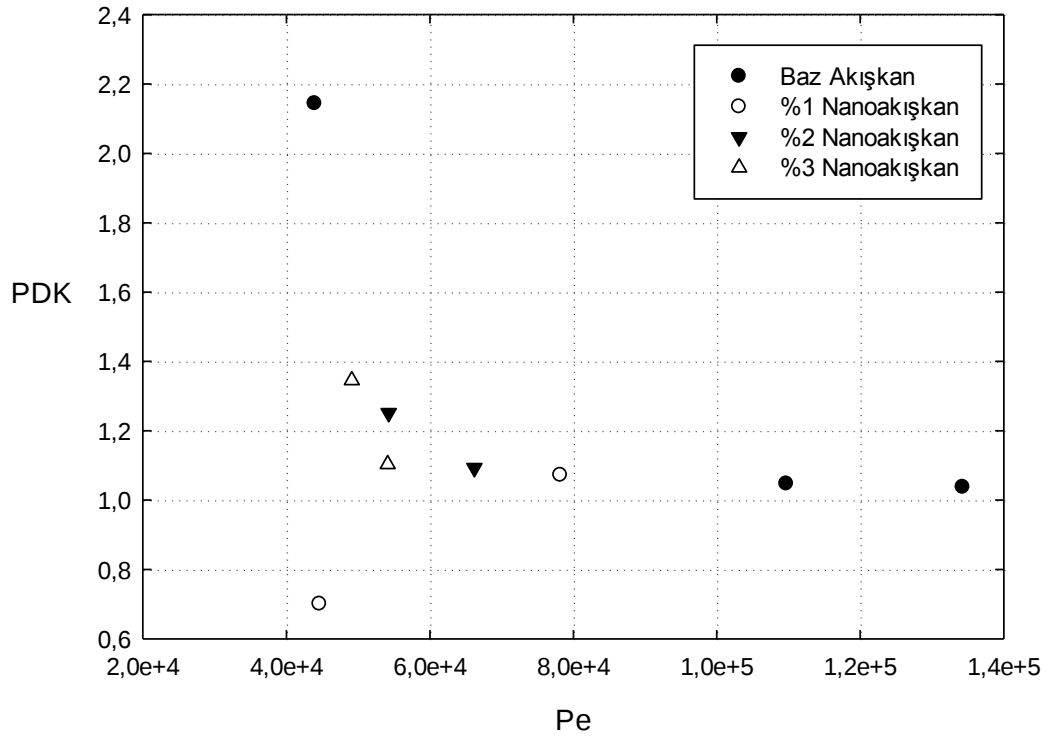
Şekil 141. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 30^\circ$)



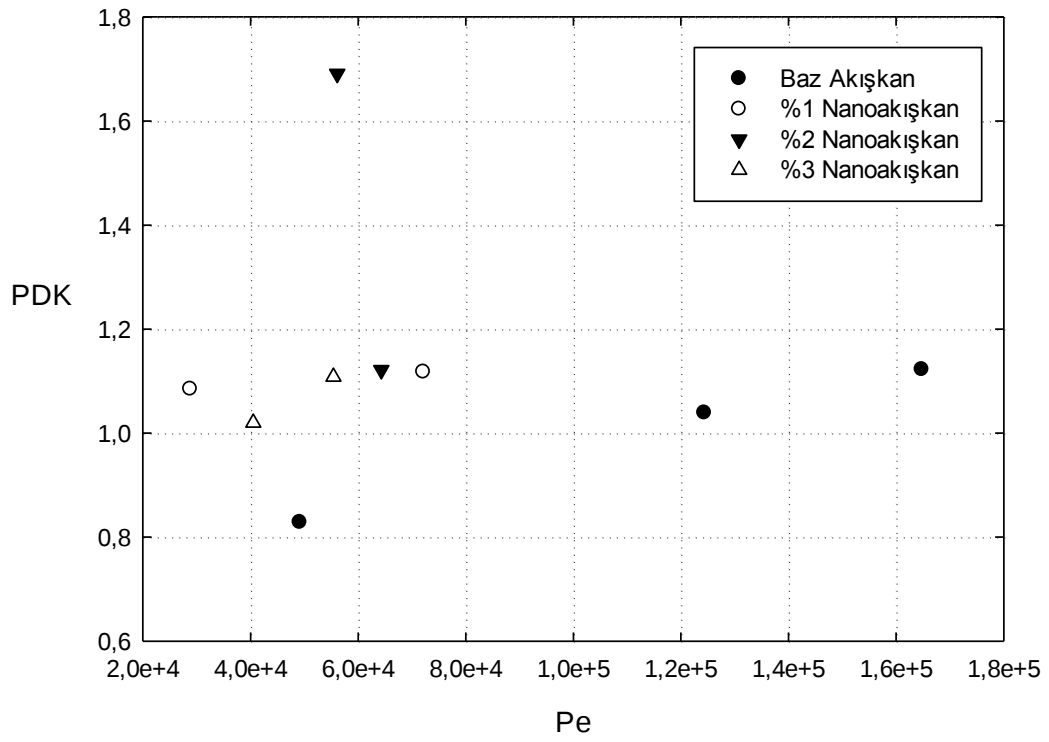
Şekil 142. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 60^\circ$)



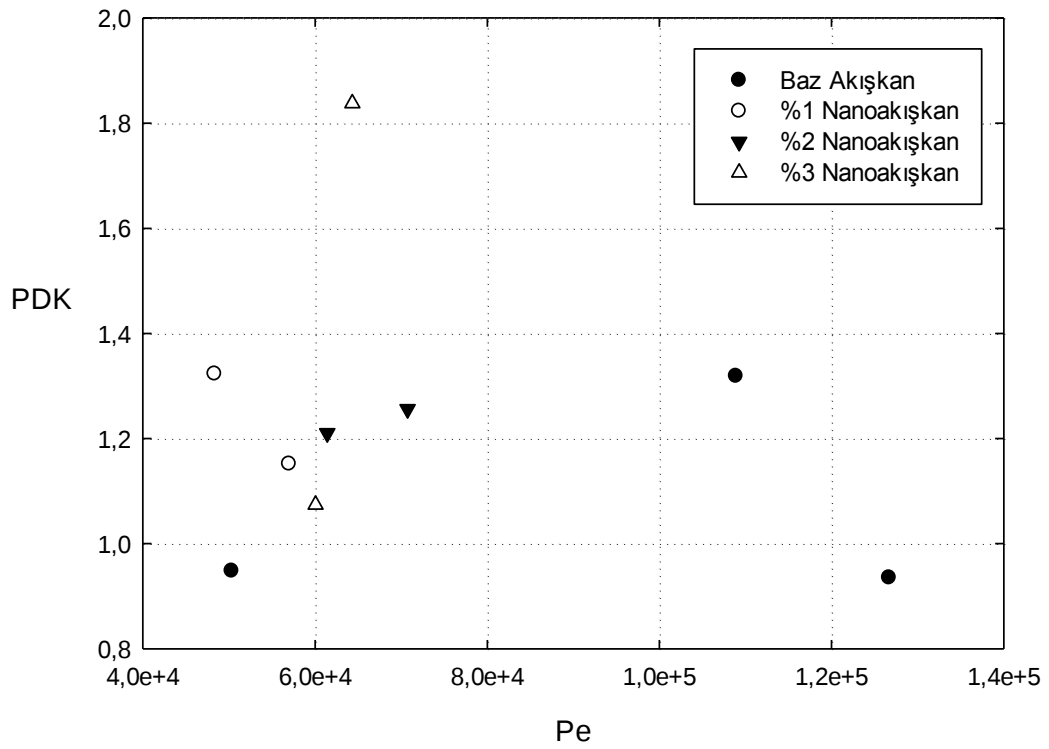
Şekil 143. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,25r_0$ / $\alpha = 90^\circ$)



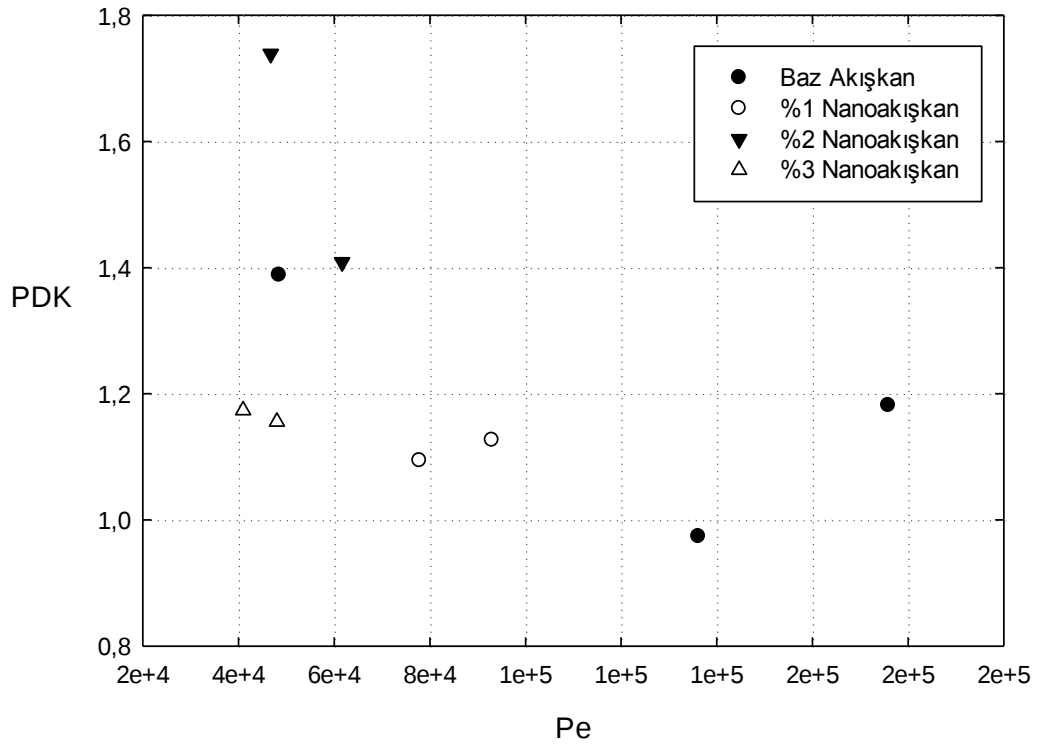
Şekil 144. PDK 'nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 0^\circ$)



Şekil 145. PDK' nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 30^\circ$)



Şekil 146. PDK' nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 60^\circ$)



Şekil 147. PDK' nın Pe sayısı ile değişimi (4 kanatçık / $l^* = 0,75r_0$ / $\alpha = 90^\circ$)

Bu grafikler incelendiğinde, Pe sayısına bağlı olarak PDK' nın genel olarak artış gösterdiği, az sayıda durum için ise artan Pe sayısı ile düşük değerler çıktığı görülmektedir. Kütle oranının belirli bir değerinden sonra PDK' da artışın gerçekleşmediğini ve bazı durumlarda kötüleşme olduğu görülmektedir. Özellikle düşük burulma açılı durumlarda nanoakışkan kütle oranı etkileri sürtünme faktörü değerine daha yüksek mertebeden etki etmektedir. Bu durum, Denklem (27)' ye göre sistem performansının düşük kütle oranlarında görece yüksek olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

Bu analizlerin her biri kendi geometrik parametrelerine göre analitik, sayısal ve deneysel sonuçların birlikte incelenmesi ile daha net sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ısı transferinin karma teknikle iyileştirilmesi Nu sayısındaki artış, basınç kaybındaki artış ise sürtünme faktörü cinsinden değerlendirilmektedir. Genel olarak Nu sayısındaki artışa, akışın döndürülmesi ve nanoakışkanlı durumlarda ise bu etkiye ilave olarak Brown hareketinin ve termofiziksel özelliklerin değişiminin birlikte neden olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, genel olarak sürtünme faktörlerindeki artış oranlarının Nu sayısındaki artış oranlarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçların özeti aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- En iyi iyileştirme performansı, 4 kanat / $l^* = 0,75r_0$ kanatçık yüksekliği ve 90° burulma açısında görülmektedir.
- Kanatçık geometrisinin performans üzerindeki etkisi düşük Re sayılarında daha belirgin olup artan Re sayısı ile geometrinin performans üzerindeki etkisinin azaldığı görülmektedir.
- Kanatçık geometrisinin performans üzerindeki etkisi görece yüksek Pr sayılarında daha belirgin olurken, düşük Pr sayılarında bu etkinin azaldığı görülmektedir.
- Sürtünme faktörü değerleri boş boru için bilinen analitik sonuçla örtüşmektedir ve kanatçık burulma açısı ve kanatçık yüksekliğinin sürtünme faktörü üzerinde etkili olduğu görülmektedir.
- Nanoakışkan termofiziksel özelliklerinin baz akışkanınkinden farklı olduğu, bu farkın kütle oranına bağlı olarak değiştiği, ancak yüksek kütle oranlarında viskozitedeki değişim oranının görece düşük olduğu görülmektedir.
- Nanoakışkan ile yapılan çökeltme deneyleri sonuçlarına göre, hidrokarbon temelli yağ ve türevi akışkanlarda asidik yüzey aktif madde ilavesi çökeltme süresini kısalttığı görülmektedir.
- Baz akışkanlı deneylerde belirli bir kullanım süresinden sonra ısı transfer yağının termofiziksel özelliklerinde değiştiği, özellikle kullanılmış yağ viskozitesinin görece düşük olduğu görülmektedir.
- Kanatçık yüksekliğinin 0° burulma açısı durumu için aynı Pe sayısında Nu sayısı üzerindeki etkisinin görece düşük, artan burulma açısı ile bu etkinin belirginleştiği görülmektedir.

- Isı transferi ve basınç kaybı cinsinden (*PDK* sonuçları) değerlendirme yapıldığında, *Pr* sayısının *Nu* sayısı üzerindeki etkisinin burulma açısı etkisine göre görece düşük olduğu görülmektedir.
- Isı transferinde en yüksek artışın %3 kütle oranı ile 4 kanatçık, $l^* = 0,75r_0$ kanatçık uzunluğu ve 90° burulma açısı durumunda olduğu görülmektedir.
- *Nu* sayısının beklenildiği gibi her durumda *Pe* sayısı ile arttığı, nanoakışkanlı durumda ise kütle oranı ile de arttığı görülmektedir.
- Sayısal çalışma bulgularından, baz akışkan için kanatçık burulma açısının *Nu* sayısı üzerinde maksimum % 14 oranında iyileştirme sağladığı görülmektedir.
- Farklı kanatçık burulma açılarının *Nu* sayısında % 16-18 arasında artışa neden olduğu görülmektedir.
- Nanoakışkan ile yapılan çalışma bulgularında kanatçık burulma açısı ve kanatçık yüksekliğinin ayrı ayrı % 8- 10 birleşik olarak ise % 10 civarında iyileşme sağladığı görülmektedir.
- Kanatçık etkilerine nanoakışkan kütle oranlarının eklenmesi ile iyileşmenin % 11-18 değerlerine çıktığı görülmektedir.
- *PDK* değerlerine göre nanoakışkan kullanımı ile % 7 – 9 kadar iyileşme sağlandığı, bu iyileşmenin düşük kütle oranı ve kısa kanatçıklı durumlarda daha az olduğu görülmektedir.

Çalışma sonuçlarından; kanatçık burulma açısının ısı transferi ve basınç düşümü üzerinde etkili olduğu, bu etkinin nanoakışkan kütle oranı ile özellikle uzun kanatçıklı durumlarda performansı iyileştirme yönünde olduğu ve böylece nanoakışkan kullanımı ve akışı döndürmenin birleşik etkisinin bunların ayrı uygulanmasından daha fazla olduğu görülmektedir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında yürütülen yüksek viskoziteli nanoakışkanlarda ısı transferinin iyileştirilmesi ile ilgili önerilen çalışmalar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Mevcut çalışmanın sonuçlarından biri de bazı durumlar için kütle oranının % 3 değerinde ısı transferinde iyileşme oranının % 1 ve % 2 kütle oranlarına göre daha düşük çıkmasıdır. Bu nedenle, % 3'ten yüksek sentezli kütle oranlarında mevcut deneysel çalışmanın yürütülmesi önerilmektedir.
- Literatürde nanoparçacıkla ısı transferinin iyileştirilmesi kapsamında nanoparçacık boyutu etkisinin incelendiği çalışmalar da mevcuttur. Mevcut geometrik parametreler için yüksek viskoziteli akışkanın farklı nanoparçacık boyutlarında sentezlenmesi durumunda iyileştirme çalışmalarının yürütülmesi önerilmektedir.
- Mevcut çalışma kapsamında gerçekleştirilen nanoakışkan sentezleme deneylerinde yüzey aktif madde ilavesi bulguları parçacık çökmesini hızlandırdığı görülmektedir. Farklı yüzey aktif maddeleri ve farklı baz akışkanlar ile sentezleme çalışmaları gerçekleştirilerek en uygun aktif madde - baz akışkan eşleştirmesinin belirlenmesi çalışılmasının yürütülmesi önerilmektedir.
- Farklı parçacık – baz akışkan eşleşmesi çalışmalarının literatürde mevcut olduğu bilinmektedir. Yalnızca parçacık boyutunun parametre olduğu ve daha geniş aralıktaki parçacık boyutlarında sentezlenen nanoakışkanlar ile ilgili ısı transferini iyileştirme çalışmalarının yürütülmesi önerilmektedir.
- Mevcut çalışmada akışkanın dönme etkisinin boru çıkışına doğru zayıflamakta ve bunun sonucu olarak da bu bölgedeki yerel Nu sayısının azalmakta olduğu görülmektedir. Boru girişindeki döndürücü elemana ilave olarak dönmenin yenilenmesi için belli bölgelere döndürücü eleman yerleştirilerek işlem performansının (PDK) inceleneceği çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir.
- Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde yağ akışkanda kullanıma bağlı olarak termal kraking veya oksidasyon olaylarının akışkanın termofiziksel özelliklerini değiştirdiği görülmektedir. Bu olaylardan kaynaklanan termofiziksel özellik değişimlerinin de kapsama alınacağı bir çalışmanın yürütülmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Adrian Bejan. (2003). *Heat Transfer Handbook*. 1496. <https://www.wiley.com/en-us/Heat+Transfer+Handbook-p-9780471390152>
- Akdag, U., Akcay, S., & Demiral, D. (2014). Heat transfer enhancement with laminar pulsating nanofluid flow in a wavy channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 59, 17–23.
- Akhavan-Behabadi, M. A., Hekmatipour, F., Mirhabibi, S. M., & Sajadi, B. (2014). An empirical study on heat transfer and pressure drop properties of heat transfer oil-copper oxide nanofluid in microfin tubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 150–156.
- Akhavan-Behabadi, M. A., Hekmatipour, F., Mirhabibi, S. M., & Sajadi, B. (2015). Experimental investigation of thermal-rheological properties and heat transfer behavior of the heat transfer oil-copper oxide (HTO-CuO) nanofluid in smooth tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 681–688.
- Akhavan-Behabadi, M. A., Hekmatipour, F., & Sajadi, B. (2016). An empirical study on the mixed convection transfer and pressure drop of HTO/CuO nanofluid in inclined tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 78, 10–17.
- Al-Dawoody, A. F., & Al-Amiri, A. M. (2017). Heat transfer enhancement in laminar swirling pipe flow with embedded discrete porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 240–254.
- Alirezaie, A., Hajmohammad, M. H., Alipour, A., & salari, M. (2018). Do nanofluids affect the future of heat transfer? “A benchmark study on the efficiency of nanofluids.” *Energy*, 157, 979–989.
- Arslan, K., & Aksoy, H. A. (2015). Experimental investigation of the heat transfer and flow characteristics of swirling flow through a circular tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 59–71.
- Azmi, W. H., Sharma, K. V., Mamat, R., Najafi, G., & Mohamad, M. S. (2016). The enhancement of effective thermal conductivity and effective dynamic viscosity of nanofluids – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1046–1058.
- Bashirnezhad, K., Bazri, S., Safaei, M. R., Goodarzi, M., Dahari, M., Mahian, O., Dalkılıç, A. S., & Wongwises, S. (2016). Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 73, 114–123.
- Bergles, A. E. (1997). Heat Transfer Enhancement—The Encouragement and Accommodation of High Heat Fluxes. *Journal of Heat Transfer*, 119(1), 8–19.

- Chen, H., Li, X., & Gao, W. (2019). Experimental study on heat transfer characteristics of twisted tape inserts in laminar swirling flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 103, 290-298.
- Çuhadaroğlu, B., & Hacisalihoğlu, M. S. (2022). An experimental study on the performance of water-based CuO nanofluids in a plate heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 137, 106255.
- Das, P. K. (2017). A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 420–446.
- Derakhshan, M. M., & Akhavan-Behabadi, M. A. (2015). An empirical study on fluid properties and pressure drop of nanofluid flow inside inclined smooth and microfin tubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 65, 111–116.
- Dinesh, R., Giri Prasad, M. J., Rishi Kumar, R., Jerome Santharaj, N., Santhip, J., & Abhishek Raaj, A. S. (2016). Investigation of Tribological and Thermophysical Properties of Engine Oil Containing Nano additives. *Materials Today: Proceedings*, 3(1), 45–53.
- Duangthongsuk, W., Wongwises, S. (2013) An experimental investigation of the heat transfer and pressure drop characteristics of a circular tube fitted with rotating turbine-type swirl generators, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 45, 8-15,
- Farajollahi, B., Etemad, S. G., & Hojjat, M. (2010). Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1–3), 12–17.
- Ghazanfari, V., Taheri, A., Amini, Y., & Mansourzade, F. (2024). Enhancing heat transfer in a heat exchanger: CFD study of twisted tube and nanofluid (Al₂O₃, Cu, CuO, and TiO₂) effects. *Case Studies in Thermal Engineering*, 53, 103864.
- Hamid, K. A., Azmi, W. H., Nabil, M. F., Mamat, R., & Sharma, K. V. (2018). Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO₂-SiO₂ nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 1143–1152.
- Hekmatipour, F., Akhavan-Behabadi, M. A., & Sajadi, B. (2016). Combined free and forced convection heat transfer of the copper oxide-heat transfer oil (CuO-HTO) nanofluid inside horizontal tubes under constant wall temperature. *Applied Thermal Engineering*, 100, 621–627.
- Hekmatipour, F., Akhavan-Behabadi, M. A., Sajadi, B., & Fakoor-Pakdaman, M. (2017). Mixed convection heat transfer and pressure drop characteristics of the copper oxide-heat transfer oil (CuO-HTO) nanofluid in vertical tube. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 532–
- Hosseini, R., Shafii, M. B., & Maddah, H. A. (2012). Numerical study of turbulent heat transfer enhancement in a circular tube utilizing helical turbulators with combined feed. *International Journal of Thermal Sciences*, 51, 78-86.

- Ji, W. T., Fan, J. F., Zhao, C. Y., & Tao, W. Q. (2019). A revised performance evaluation method for energy saving effectiveness of heat transfer enhancement techniques. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 138, 1142–1153.
- Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A. (2009). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(13–14), 3187–3196.
- Kakaç, S., Bergles, A. E., Mayinger, F., Yüncü, H. (1998) *Heat transfer enhancement of heat exchangers*, Dordrecht/Boston/London
- Karatas, M., & Bicen, Y. (2022). Nanoparticles for next-generation transformer insulating fluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112645.
- Kavitha, R., Methkal Abd Algani, Y., Kulkarni, K., & Gupta, M. K. (2022). Heat transfer enhancement in a double pipe heat exchanger with copper oxide nanofluid: An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 56, 3446–3449.
- Khatoon, B., Kumar Choudhary, V., Kumar, R., Siraj Alam, M., Pandey, S. K., Singh, R., & Naresh, R. (2022). Enhancement of heat transfer rate in shell & tube heat exchanger using CuO/Al₂O₃-water based nanofluids. *Materials Today: Proceedings*.
- Kim, S., Tserengombo, B., Choi, S. H., Noh, J., Huh, S., Choi, B., Chung, H., Kim, J., & Jeong, H. (2019). Experimental investigation of heat transfer coefficient with Al₂O₃ nanofluid in small diameter tubes. *Applied Thermal Engineering*, 146, 346–355.
- Ko, S., & Huh, C. (2019). Use of nanoparticles for oil production applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172, 97–114.
- Kuldeep, B. A., & Vijayan, P. K. (2018). Experimental investigation on heat transfer augmentation in a circular tube using various geometrical shaped twisted tapes under laminar and turbulent flow conditions. *International Journal of Heat and Technology*, 36(1), 97-106.
- Kumar, N., & Sonawane, S. S. (2016). Experimental study of thermal conductivity and convective heat transfer enhancement using CuO and TiO₂ nanoparticles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 98–107.
- Kumar, N., Sonawane, S. S., & Sonawane, S. H. (2018). Experimental study of thermal conductivity, heat transfer and friction factor of Al₂O₃ based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 90, 1–10.
- Kuznetsov, G. V., & Nalivaiko, O. N. (2015). Heat transfer in swirling flow in tubes. *Heat Transfer Research*, 46(8), 727-747.
- Leong, K. Y., Saidur, R., Mahlia, T. M. I., & Yau, Y. H. (2012). Modeling of shell and tube heat recovery exchanger operated with nanofluid based coolants. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(4), 808–816.

- Loni, R., Askari Asli-Ardeh, E., Ghobadian, B., Kasaeian, A. B., & Bellos, E. (2018). Thermal performance comparison between Al₂O₃/oil and SiO₂/oil nanofluids in cylindrical cavity receiver based on experimental study. *Renewable Energy*, 129, 652–665.
- Maxwell, J. C. (1881). A Treatise on electricity and magnetism, second ed., Clarendon Press, Oxford, UK.
- Mertkan Arslan, F., & Günerhan, H. *Enerji uygulamalarında kullanılan nanoakışkanların ısı özellikleri*.
- Moldoveanu, G. M., Huminic, G., Minea, A. A., & Huminic, A. (2018). Experimental study on thermal conductivity of stabilized Al₂O₃ and SiO₂ nanofluids and their hybrid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 450–457.
- Nasiri, M., Etemad, S. G., & Bagheri, R. (2011). Experimental heat transfer of nanofluid through an annular duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(7), 958–963.
- Nguyen, C. T., Maïga, S. E. B., Landry, M., Galanis, N., & Gilles Roy, G. (2004). Numerical investigation of flow reversal and instability in mixed laminar vertical tube flow, *International Journal of Thermal Sciences*, 43 (8), 797-808,
- Nuntadusit, C., & Eiamsa-ard, S. (2011). Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-ring and twisted-tape inserts under swirl flow conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(5), 589-595.
- Öztürk, A., Arslan, K., & Gül, H. (2016). Experimental and numerical investigation of heat transfer and pressure drop characteristics for turbulent swirling flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 73, 70-80.
- Patel, H., Shah, S., Ahmed, R., & Ucan, S. (2018). Effects of nanoparticles and temperature on heavy oil viscosity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 167, 819–828.
- Phanindra, Y., Kumar, S. D., & Pugazhendhi, S. (2018). Experimental Investigation on Al₂O₃ & Cu/Oil Hybrid Nano fluid using Concentric Tube Heat Exchanger. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12142–12150.
- Promvonge, P., & Eiamsa-ard, S. (2013). Heat transfer enhancement in a circular tube fitted with combined conical ring inserts under laminar and turbulent swirl flow conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 50-58
- Raei, B., Peyghambarzadeh, S. M., & Salehi Asl, R. (2018). Experimental investigation on heat transfer and flow resistance of drag-reducing alumina nanofluid in a fin-and-tube heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 144, 926–936.
- Rahimi, A., Amiri, A., Kasaeipoor, A., & Malekshah, E. H. (2018). Heat transfer enhancement using Al₂O₃-EG/W(60/40 vol%) in multiple-pipe heat exchanger. *Journal of Molecular Liquids*, 261, 319–336.

- Razi, P., Akhavan-Behabadi, M. A., & Saeedinia, M. (2011). Pressure drop and thermal characteristics of CuO–base oil nanofluid laminar flow in flattened tubes under constant heat flux. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(7), 964–971.
- Şahin, F., & Namlı, L. (2018). Nanoakışkanlarda kararlılığın ısı transferini iyileştirme açısından önemi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 880–898.
- Sahin, F., & Namli, L. (2021). Thermal performances and stabilities of nanofluids in an electrical oil heater. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(6), 3195–3206.
- Sajid, M. U., & Ali, H. M. (2018). Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 211–234.
- Sarviya, R. M., & Fuskele, V. (2017). Review on Thermal Conductivity of Nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 4022–4031.
- Singh, R. K., Sharma, A. K., Dixit, A. R., Mandal, A., & Tiwari, A. K. (2017). Experimental investigation of thermal conductivity and specific heat of nanoparticles mixed cutting fluids. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8587–8596.
- Sundar, L. S., & Sharma, K. V. (2010). Turbulent heat transfer and friction factor of Al₂O₃ Nanofluid in circular tube with twisted tape inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(7–8), 1409–1416.
- Tao, Q., Fu, S., Yuan, Y., Liu, X., He, D., & Chen, Y. (2024). Experimental study on enhanced nanofluid heat transfer limit and wetting predicted model in the microgroove under electric field. *International Journal of Thermal Sciences*, 197, 108829.
- Timofeeva, E. V., Moravek, M. R., & Singh, D. (2011). Improving the heat transfer efficiency of synthetic oil with silica nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 364(1), 71–79.
- Valden, M., Pak, S., Lai, X. (1998) Structure sensitivity of CO oxidation over model Au/TiO₂ catalysts. *Catalysis Letters* 56, 7–10
- Wang, X. Q., & Mujumdar, A. S. (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1), 1–19.
- Wei, B., Zou, C., & Li, X. (2017). Experimental investigation on stability and thermal conductivity of diathermic oil based TiO₂ nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 537–543.
- Wen, D., & Ding, Y. (2004). Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(24), 5181–5188.

- Webb, R.L. (1981). Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 24, 715–726
- Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58–64.
- Xuan, Y. and Roetzel, W. (2000) Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 3701-3707.
- Yao, S., Ding, Y., & Zhao, M. (2019). Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of swirling flow in a rib-roughened tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 736-748.
- Zhang, H., Guo, W., Li, G., Zheng, Y., Bao, H., & Chen, H. (2024). Preparation and application of rice husk-based SiO₂/water nanofluids in heat transfer enhancement under pulsation. *Journal of Molecular Liquids*, 394, 123751.

ÖZGEÇMİŞ

Furkan Erman KAN, İlköğrenimini İskenderpaşa İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2006 yılında Affan Kitapçioğlu (YDA) Lisesi'nde tamamladı. 2007-2008 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2008-2009 Öğretim yılında bölümler arası yatay geçiş ile birlikte Makine Mühendisliği bölümüne geçiş sağladı. 2011 yılında bu bölümden mezun oldu. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2016 yılında "Yüksek Viskoziteli Akışkan Akışında Taşınım İle Isı Transferinin İyileştirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitimine başladı. 2015 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derece İngilizce bilmektedir.