

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK BİLİM DALI**

İŞLEMCİ SOĞUTUCU TASARIMI VE ANALİZİ

Ezgi YAPICI ÖZDİLER

**Danışman
Doç. Dr. Ali YURDDAŞ**



MANİSA-2022

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ezgi YAPICI ÖZDİLER



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMA DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	I
TABLO DİZİNİ	III
TEŞEKKÜR.....	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	10
2.1. Nanoakışkanlar.....	10
2.1.1. Nanoakışkanların Hazırlanması.....	10
2.1.2. Nanoakışkan Türleri	11
2.1.3. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri.....	11
2.2. Nümerik Yöntemler	14
2.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) / (CFD).....	15
2.2.2. Sonlu Hacimler Yöntemi	19
3. MATEMATİKSEL MODELLEME	22
3.1. Matematiksel Modeller ve Detayları.....	22
3.1.1. Tek Faz Modelleme	22
3.1.2. Multifaz Modelleme	23
3.1.2.1. Mixture Model.....	23
3.1.2.2. Eulerian Model	25

3.2. Çalışmanın Doğrulanması.....	27
3.2.1. Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Geometri Modeli.....	27
3.2.2. Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Çözüm Ağı.....	27
3.2.3. Çalışmanın Doğrulanması İçin Başlangıç ve Sınır Koşulları.....	28
3.2.4. Çalışmanın Doğrulanması İçin Elde Edilen Sonuçlar	29
4. TASARIM VE MODELLEME	32
4.1. Geometri Modelleme	32
4.2. Çözüm Ağı	34
4.3. Başlangıç ve Sınır Şartları.....	39
4.4. Sonuçlar.....	44
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
5.1. Sonuç Yorumlama.....	68
5.2. İleri Çalışma Önerisi	69

SİMGELER VE KISALTMA DİZİNİ

HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	Re	Reynolds Sayısı
CFD	Computational Fluids Dynamics	Pr	Prandtl Sayısı
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]	Nu	Nusselt Sayısı
v_s	Hız [m/s]	a	İvme [m/s^2]
μ	Viskozite [kg/ms]	g	Yerçekimi İvmesi [m/s^2]
d	Boru Çapı [m]	h	Isı Transfer Katsayısı [$\text{W/m}^2\text{K}$]
C_p	Özgül Isı [J/kgK]	Min	Minimum Değer
k	Termal İletkenlik [W/mK]	Max	Maksimum Değer
P	Basınç [Pa]	$T_{\text{çıkış}}$	Çıkış Bölgesi Sıcaklık
T	Sıcaklık [K]	V_{ort}	Ortalama Hız [m/s]
ϕ	Nanopartikül Hacimsel Oran	ΔP	Basınç Farkı [Pa]
q	Sabit Isı Akısı [W/m^2]	TF	Tek Faz
f	Sürüklenme Katsayısı	MF	Multifaz
P-TF	Paralel Tek Faz	S-TF	Serpantin Tek Faz
P-MF-Mix	Paralel Multifaz Mixture Model	S-MF-Mix	Serpantin Multifaz Mixture Model
P-MF-Eul	Paralel Multifaz Eulerian Model	S-MF-Eul	Serpantin Multifaz Eulerian Model

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : HAD İşlem Basamakları	19
Şekil 3.1 : Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Geometrinin Ölçü Bilgileri. 27	
Şekil 3.2: Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Çözüm Ağı Görselleri	28
Şekil 3.3 : Nu-Re değerlerinin Doğrulananan Makale ile kıyaslanması	31
Şekil 3.4 : f -Re değerlerinin Doğrulananan Makale ile kıyaslanması.....	31
Şekil 4.1 : Tasarımların Ön ve İzometrik Görünüş Görselleri.....	32
Şekil 4.2 : Tasarımların Geometrik Detayları.....	33
Şekil 4.3 : Paralel Soğutucu Çözüm Ağı Detay Görseli.....	35
Şekil 4.4 : Serpantin Soğutucu Çözüm Ağı Detay Görseli.....	35
Şekil 4.5 : Tez Uygulamasında Kullanılan Çözüm Ağı Görselleri	36
Şekil 4.6 : Paralel Soğutucu Çözüm Ağından Bağımsızlık Grafiği	38
Şekil 4.7 : Serpantin Soğutucu Çözüm Ağından Bağımsızlık Grafiği	38
Şekil 4.8 : Paralel, Serpantin Soğutucuları Sınır Koşulları	41
Şekil 4.9 : Tek Faz Analiz Sıcaklık Kontürü, Re=500 ve Re=750	44
Şekil 4.10 : Tek Faz Analiz Sıcaklık Kontürü, Re=1000 ve Re=2500	45
Şekil 4.11 : Tek Faz Analiz Sıcaklık Kontürü, Re=5000 ve Re=7000	46
Şekil 4.12 : Tek Faz Paralel ve Serpantin Soğutucuları için Çıkış Sıcaklık Grafiği .47	
Şekil 4.13 : Multifaz-Mixture Model Paralel ve Serpantin Soğutucuları için Çıkış Sıcaklık Grafiği	48
Şekil 4.14 : Multiaz-Eulerian Model Paralel ve Serpantin Soğutucuları için Çıkış Sıcaklık Grafiği	49
Şekil 4.15 : Tek faz ve Multifaz Analizler için Nu-Re Grafikleri	50
Şekil 4.16 : Tek Faz Analiz Hız Kontürü, Re=500 ve Re=7000	51
Şekil 4.17 : Paralel ve Serpantin Soğutucular için Tek Faz ΔP Grafikleri	52
Şekil 4.18 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=500 ve Re=7000 - % 1 Al ₂ O ₃ Oranı.....	53

Şekil 4.19 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=750 ve Re=5000 - % 1 Al2O3 Oranı.....	54
Şekil 4.20 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=1000 ve Re=2500 - % 1 Al2O3 Oranı.....	55
Şekil 4.21 : Paralel Soğutucu – Multifaz Analiz Basınç Farkı Grafikleri	56
Şekil 4.22 : Serpantin Soğutucu – Multifaz Analiz Basınç Farkı Grafikleri	57
Şekil 4.23 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=500 ve Re=7000 - % 5 Al2O3 Oranı.....	58
Şekil 4.24 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=750 ve Re=5000 - % 5 Al2O3 Oranı.....	59
Şekil 4.25 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=1000 ve Re=2500 - % 5 Al2O3 Oranı.....	60
Şekil 5.1 : Paralel-Serpantin Soğutucu Sistem Çalışma Önerisi	69

TABLO DİZİNİ

Tablo 3.1 : Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Çözüm Ağı Bilgileri.....	28
Tablo 3.2 : Malzeme Özellikleri	29
Tablo 3.3 : Çalışmanın Doğrulanmasında $Re=5000$ İçin Analiz Sonuçları.....	29
Tablo 4.1: Paralel Soğutucu-Çözüm Ağı Kalite Değerleri	34
Tablo 4.2: Serpantin Soğutucu-Çözüm Ağı Kalite Değerleri	34
Tablo 4.3 : Modelleme Bilgileri.....	39
Tablo 4.4 : Malzeme Özellikleri	42
Tablo 4.5 : Çözüm Kontrol Detayları.....	43
Tablo 4.6 : Tek Faz Fark Tablosu	61
Tablo 4.7 : Multifaz Mixture Model % 1 Al_2O_3 Fark Tablosu	62
Tablo 4.8 : Multifaz Mixture Model % 5 Al_2O_3 Fark Tablosu	63
Tablo 4.9 : Multifaz Eulerian Model % 1 Al_2O_3 Fark Tablosu	64
Tablo 4.10 : Multifaz Eulerian Model % 5 Al_2O_3 Fark Tablosu	65
Tablo 4.11 : Tek Faz-Multifaz Mixture Model 20 nm Partikül Boyutu Fark Tablosu	66
Tablo 4.12 : Tek Faz-Multifaz Mixture Model 20 nm Partikül Boyutu Fark Tablosu	67

TEŞEKKÜR

Öncelikle lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca her zaman desteklerini benden esirgemeyen büyük bir sabırla beni her konuda doğru yönlendiren tez danışmanım sayın Doç. Dr. Ali YURDDAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım aşamamda, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak her zaman destek olan Numesys İleri Mühendislik A.Ş. – Akışkanlar ve Termodinamik Takımında yer alan değerli çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni her konuda destekleyen, okumam ve kendimi geliştirmem için tüm olanakları sağlayan ve gösterdikleri müthiş sevgi ile her zaman yanımda olan canım aileme, annem Öznur YAPICI ve babam Mehmet YAPICI'ya gönülden çok teşekkür ederim.

Gerçek anlamda birlikte büyüdüğüm, sevgisi ve yardımları ile beni her zaman olduğu gibi tez çalışmamda da destekleyen meslektaşım ve sevgili eşim Umutcan ÖZDİLER'e yanımda olduğu her an için çok teşekkür ederim.

Ezgi YAPICI ÖZDİLER

Manisa 2022

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İŞLEMCI SOĞUTUCU TASARIMI VE ANALİZİ

Ezgi YAPICI ÖZDİLER

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali YURDDAŞ

Teknolojinin gelişmesi ve kullanım alanlarının hızla artması ile birlikte, elektronik cihazlardaki ısınma problemleri daha da önemli hale gelmiştir. Elektronik cihazlarda fazla ısınma durumunu iyileştirmek için pasif soğuma, aktif soğuma proseslerinin yeterli kalmadığı durumlarda uygun ise sıvı soğutma işlemi ile yüksek sıcaklık oluşumunun önüne geçilmektedir.

Bu tez çalışmasında, sıvı soğutma sistemlerinin termal performansını iyileştirmek için nanoakışkan kullanımının ısı transferine etkisi, nümerik yöntemlerden hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile incelenmiştir. Farklı soğutucu tasarımları için, laminar ve türbülanslı akışta zorlanmış taşınım ile ısı transferi içeren çalışmada, akışkan modellemesinde hem tek faz hem de multifaz modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Kullanılan matematiksel modeller farklı deneysel ve nümerik çalışmalar üzerinde doğrulanmıştır.

Nümerik olarak nanoakışkanların tek faz ve multifaz olarak modellenmesi mümkündür. Tek faz modelleme yaklaşımında nanoakışkan malzeme H_2O ile belirli konsantrasyon oranlarında karıştırılmış olarak modellenmiştir. Al_2O_3 'nın belirli yasalara bağlı kalarak termofiziksel özellikleri hesaplanmıştır. Tek faz modelleme, saf H_2O , %1 Al_2O_3 , %5 Al_2O_3 nanoakışkanları için farklı reynolds sayılarında yapılmıştır. Reynolds 500, 750, 1000, 2500, 5000 ve 7000 değerlerinde analizler gerçekleştirilmiştir ve reynolds değerindeki artış çıkışta okunan maksimum sıcaklık

değerini düşürmektedir. Multifaz modelleme yönteminde ise nanoakışkan Al_2O_3 baz akışkan H_2O içerisine farklı boyutlarda süspanse edilen ayrı bir faz olarak tanımlanmıştır ve iki ayrı model kullanılmıştır. Nanoakışkan kullanımı saf H_2O kullanıma göre her iki yöntemde de ısı iletkenliği arttırmıştır. Aynı zamanda %5 konsantrasyon oranında nanoakışkan kullanımı %1 konsantrasyondan daha iyi sonuçlar vermiştir. Sıcaklık dağılımlarına bakıldığı zaman tek faz ve multifaz modelleme yöntemlerinden Mixture model oldukça benzer dağılımlar vermektedir. Nanoakışkanların termal performansa etkisi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Bunlardan önemli bir tanesi süspanse edilen nanopartikülün boyutudur bu çalışmada da hem Mixture hem de Eulerian modelleme yaklaşımında 20 nm, 30 nm ve 40 nm olmak üzere farklı partikül boyutlarında çalışılmıştır.

Yapılan çalışmalarda iki farklı tasarım soğutucu kullanılmıştır. Bu tasarımlarda akış paralel ve serpantin olarak dağıtılmıştır. Akış dağılımının ve basınç düşüşünün de termal performansa etkisi olmuştur. Daha düzenli bir akış dağılımı sağlayan serpantin bloğunda sıcaklıklar daha düşük okunmuştur. Yapılan tüm çalışmalar bir HAD yazılımı olan ANSYS Fluent kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: HAD, $Al_2O_3 - H_2O$ nanoakışkan, Elektronik soğutma, Tek faz, Multifaz, Mixture, Eulerian

2022, 74 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

PROCESSOR COOLANT DESIGN AND ANALYSIS

Ezgi YAPICI OZDILER

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali YURDDAŞ

With the development of technology and the rapid increase in usage areas, heating problems in electronic devices have become even more important. In cases where passive cooling and active cooling processes are not sufficient to improve overheating in electronic devices, high temperature formation is prevented by liquid cooling if appropriate.

In this thesis, the effect of nanofluid use on heat transfer to improve the thermal performance of liquid cooling systems was investigated with computational fluid dynamics from numerical methods. For different cooler designs, both single-phase and multi-phase modeling methods were used in fluid modeling in the study involving forced convection and heat transfer in laminar and turbulent flow. The mathematical models used were validated on different experimental and numerical studies.

It is possible to numerically model nanofluids as single phase and multiphase. In the single-phase modeling approach, the nanofluid material was modeled as mixed with H_2O at certain concentration ratios. Thermophysical properties of Al_2O_3 were calculated by adhering to certain laws. Single-phase modeling was performed for pure H_2O , %1 Al_2O_3 , %5 Al_2O_3 nanofluids at different Reynolds numbers. Analyzes were performed at Reynolds values of 500, 750, 1000, 2500, 5000 and 7000, and the increase in Reynolds value decreases the maximum temperature read at the outlet. In the multiphase modeling method, the nanofluid Al_2O_3 , was defined as a separate phase suspended in different sizes into the base fluid H_2O , and two different models were used. The use of nanofluids increased the thermal conductivity in both methods

compared to the use of pure H_2O . At the same time, the use of nanofluids at 5% concentration gave better results than 1% concentration. When the temperature distributions are examined, the Mixture model, one of the single-phase and multi-phase modeling methods, gives very similar distributions. The effect of nanofluids on thermal performance varies depending on many parameters. One of the most important of these is the size of the suspended nanoparticle. In this study, different particle sizes, 20 nm, 30 nm and 40 nm, were studied in both Mixture and Eulerian modeling approaches.

Two different design coolers were used in the studies. In these designs, the flow is distributed in parallel and serpentine. Flow distribution and pressure drop also had an effect on thermal performance. Temperatures were read lower in the serpentine block, which provides a more regular flow distribution. All studies were carried out using ANSYS Fluent, a CFD software.

Keywords: CFD, $Al_2O_3 - H_2O$ nanofluid, Electronic cooling, Single phase, Multiphase, Mixture, Eulerian

2022, 74 pages

1. GİRİŞ

Teknolojinin insanların günlük yaşamlarının büyük bir parçası haline gelmesiyle birlikte, teknolojik cihazların kullanımı oldukça yüksek hızda artış göstermiştir. Artan kullanım talepleri ile birlikte cihazlardaki ısınma problemlerinin önüne geçmek için farklı çalışmalar yapılmaktadır. Teknolojik cihazların içerisinde yer alan ufak bir çip ya da elektrik akımını iletmeye yarayan farklı bir komponent üzerindeki ısınmadan, sistem ısınmasına kadar detaylı incelemeler yapılabilmektedir.

Isı transfer mekanizmalarını iyileştirmek, üretilen cihazların hem ömürleri hem de kullanım esnasında termal konfor şartlarını sağlaması için oldukça önemlidir. Elektronik soğutma uygulamalarında pasif, aktif, sıvı ya da jet çarpma soğutma gibi farklı teknikler kullanılmaktadır.

Mikroişlemcilerde özellikle, çipin yüksek güç tüketimi birim alan başına düşen ısı akısının oldukça yüksek olmasından kaynaklanır. Mikroişlemcilerin yanında diğer kompakt bellek aygıtlarında bu problemlerin önüne geçebilmek için çalışmalar yapılmaya devam etmektedir.

Akışkan içerisine farklı yöntemler ile eklenen (süspanse edilen) partiküller akışkanın ısıl iletkenliğini arttıran bir faktör olmuşlardır. Partiküllerin kendi aralarında etkileşimi sonucu akış rejimi değişkenlik gösterir. Türbülansı arttıran bu durum daha çok yüzey alanına teması aktif hale getirir ve böylelikle ısı iletimi daha yüksek oranda gerçekleşmiş olur. Sıvı soğutma sistemlerinde geleneksel olarak kullanılan H_2O , glikoz gibi akışkanların yerini nanoakışkanlar almaya başlamıştır. Bu akışkanların ısı transfer performanslarının düşük olması yeni arayış ihtiyacını doğuran bir etkidir. 1990'lı yıllardan bu yana araştırmacılar nanoakışkan/nano-malzeme kullanımını arttırmaya yönelik birçok çalışma gerçekleştirmişlerdir. Temel akışkan içerisine eklenen nanoakışkanların hem konsantrasyon oranları hem de eklenen parçacıkların çap boyutları ısı transfer mekanizmalarını etkileyen önemli bir unsurdur. Isıl direnci azaltması için eklenen bu parçacıkları 100nm boyutunun üzerine çıktıklarında tam ters

etki yarattıkları gözlemlenmiştir. Metal ve metal oksitleri içeren nanoakışkanlar kullanılarak yapılan bir çok çalışma literatürde yer almaktadır.

Choi ve ark. [1], bazı metalleri, metaloksitleri ve karbürleri nano boyutlarda baz sıvı içerine ekleyerek “nanoakışkan” kavramını ilk olarak ortaya çıkartmışlardır. Chien ve ark. [2] ise düz plakada nanoakışkan uygulaması üzerine deneysel olarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Deneyin sonucuna bakıldığında nanoakışkan kullanımı ile ısıl direncin saf H_2O ’ya göre çok daha az olduğunu göstermiştir, bu değer ortalama %40’tır. Tsai ve ark. [3], altın nanopartikülleri sulu çözeltilere ekleyerek ısıl direnci %20-37 düşürdüklerini göstermişlerdir. Wei ve ark. [4], tıpkı Chien ve arkadaşları gibi nanoakışkan kullanımının saf H_2O kullanımına göre ısıl direnci %28-44 oranlarında düşürdüğünü bulmuştur. Kang ve ark. [5], farklı boyutlarda gümüş nanopartiküller ve baz akışkan olarak H_2O üzerinde deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerin sonucunda nanopartikül konsantrasyonunun ve partikül boyutunun artması ile birlikte ısıl direnç saf H_2O kullanımına göre yine düşüş göstermiştir. Bu oran konsantrasyon ve partikül boyutlarındaki farklılıklara göre %50-80 arasındadır.

Shang ve ark. [6], damıtılmış H_2O ile $Cu - H_2O$ nanoakışkanın ısıl performansını incelemişlerdir ve $Cu - H_2O$ nanoakışkan kullanımının %83 oranında ısıl direnci düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Yang ve ark. [7], baz akışkan olarak H_2O ve nanopartikül olarak CuO kullanmışlardır. Konsantrasyon oranını değiştirerek aynı zamanda boru konumlandırmasını eğimli tasarlayarak maksimum ısıl direnç düşüş değerlerini elde etmişlerdir. Chen ve ark. [8], değişken güç değerlerinde H_2O bazlı akışkana gümüş nanopartiküller ekleyerek ısıl direncin yine saf suya göre düşüş sağladığını gözlemlemişlerdir. Noie ve ark. [9], $Al_2O_3 - H_2O$ nanoakışkanını incelemişlerdir. Saf H_2O kullanımına ve farklı konsantrasyon oranlarına bağlı olarak %3 $Al_2O_3 - H_2O$ nanoakışkanının performansının daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Huminic ve ark. [10], saf su ile birlikte Fe_2O_3 nanoakışkanlarını farklı konsantrasyon değerlerinde kullanarak termal performanslarını incelemişlerdir. Onlarda termal performansın saf su kullanımına göre iyileştirildiğini tespit etmişlerdir. Ziyadanoğulları ve ark. [11], $Al_2O_3 - H_2O$ nanoakışkanının kullanılması ile ısı transferinin iyileştirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Isı transferi uygulamalarında nanoakışkan kullanımının geleneksel soğutucu akışkanlara göre çok

daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan farklı eşitliklere çalışmalarında yer vermişlerdir ve bu eşitlikleri deneysel ve literatürde yer olan birçok çalışma ile kıyaslamışlardır. Partikül hacimsel oranının artışıyla oluşan yeni akışkan malzemenin ısı iletkenlik ve viskozite değerleri artış göstermiştir.

Xue ve ark. [12], kapalı iki fazlı termosifonda *CNT* (karbon nanotüp) kullanımının ısı direnci nasıl düşürdüğü üzerine çalışmalar yapmışlardır. *CNT* ile ısı direnci düşürdüklerini gözlemlemişlerdir. Chauhan ve ark. [13] CPU'lar da karşılaşılan büyük ısı yüklerini dağıtmak için şu an da kullanılan hava soğutma ve su soğutma sistemlerinin verimli bir şekilde çalıştırılabilmesi için bir termosifon döngüsünün kullanılmasına odaklanarak yeni bir sistem geliştirmişlerdir. Çalıştıkları sistemde yüksek verimli ve kararlı iki fazlı bir akış oluşturmak için buharlaştırıcıda simetrik bir çift konik konfigürasyon tanıtılmıştır. Termosifon döngüsü soğutma performansı, hem sunucu hem de masaüstü sistemlerinde ticari hava bazlı ve su bazlı soğutucular ile kıyaslanmıştır. Naphon ve ark. [14], baz olarak su ve etanol nanopartikül olarak da titanyum kullanarak yine iki fazlı termosifondaki termal performansı incelemişlerdir. Nanoakışkan kullanımı burada da termal performansı %10.6 oranında arttırmıştır.

Hezajian ve ark. [15], türbülanslı zorlanmış taşınım ile ısı transferini içeren akışta $H_2O - Al_2O_3$ nanoakışkanını kullanarak düz bir boru üzerinde nanoakışkan kullanımının ısı transferine etkilerini incelemiştir. Nümerik olarak yaptığı bu incelemede akışı multifaz olarak modellemiştir ve kullandığı yöntemler Mixture ve Eulerian yaklaşımıdır. Yaptığı çalışma sonunda Mixture modelin deneysel sonuçlar ile oldukça iyi örtüştüğünü gözlemlemiştir. Hanafizadeh ve ark. [16], tek ve multifaz yaklaşımlarının her ikisinin de kullanarak $Fe_2O_3 - H_2O$ nanoakışkanı üzerinde sabit ısı akısı ile çalışmalarını yapmıştır. Multifaz modelleme kısmında Mixture, Eulerian ve Volume of fluid (VOF) olmak üzere 3 ayrı yöntemidir kullanmışlardır. Multifaz modelleme yaklaşımının tek faz modellemekten çok daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Moghadassi ve ark. [17], nümerik olarak su bazlı Al_2O_3 ve $Al_2O_3 - Cu$ hibrid nanoakışkanını kullanarak %01 konsantrasyon oranında ortalama 15 nm partikül boyutlarında zorlanmış taşınım ile ısı transferi içeren bir uygulama

yapmışlardır. Uygulama sonucunda tek faz ve multifaz yaklaşım olan mixture metodunun deneysel veri ile ne kadar örtüştüğünü incelemişlerdir. Saha ve ark. [18], bir boru için, multifaz modelleme yöntemi ile nanoakışkan kullanımının ısı transferini nasıl iyileştirdiğini araştırmışlardır. $Al_2O_3 - H_2O$ ve $TiO_2 - H_2O$ nanoakışkan malzemelerini kullanarak farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinde nanoakışkan malzemelerinin termal davranışlarını incelemişlerdir. Brownian hareketinin ve nanoparçacıkların boyut çapının akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada %6 konsantrasyon oranında en yüksek ısı transfer hızına ve termal performans faktörüne sahip olduğunu ortaya koymuştur. Kalteh ve ark. [19], multifaz modelleme yöntemlerinden Eulerian modelleme yöntemini kullanarak laminar, zorlanmış konveksiyon akışında bakır-su nanoakışkanının mikrokannallardaki termal performansını incelemişlerdir. Partikül çapındaki, Reynolds sayısındaki artış ile birlikte termal performans daha iyi olduğunu nümerik olarak hesaplamışlardır. Pakravan ve ark. [20], ise hem deneysel hem de nümerik olarak nanoakışlar üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Nümerik hesaplama kısmında akışı multifaz olarak modellemişlerdir ve kullandıkları yöntem mixture'dır. Doğal taşınım ile ısı transferi mekanizmasını kullanarak gerçekleştirdikleri uygulamada tek faz modellemeden daha yüksek doğrulukta sonuçları multifaz modelleme ile elde etmişlerdir

Dang ve ark. [21], bir veri merkezindeki ısı transfer performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Titreşimli ısı borusunun basitleştirilmiş ısıl modeli, sayısal simülasyon ile çözülmüştür. CPU'ların sıcaklığı, raf, elektrik gücü, titreşimli ısı borusunun çalışma durumu, soğutma havasının sıcaklığı ve raf fanlarının rüzgar basıncına göre değerlendirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, güç artışı ile CPU sıcaklığının da arttığı gözükmemektedir, bunun yanında titreşimli ısı borusunun (PHP) kullanılması CPU'ların sıcaklığının eşit olarak dağılmasına neden olmuştur. Cai ve ark. [22], CPU soğutma uygulaması için Termoelektrik ısı eşanjör modülüne dayalı (TEHEM) bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Termoelektrik ısı eşanjörü modülü, çoklu parametreleri birleştirerek, ısı dağılımını çözmek için yeni bir yöntem kullanır. Bu farklı parametreler kullanılarak ideal termoelektrik ısı eşanjörü elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda optimum çalışma koşullarında parametreleri etkilediğini göstermiştir. Bahiraei ve ark. [23], tarafından CPU soğutması için farklı sıvı blok tasarımları ve soğutucu malzeme olarak gümüş nanopartikül içeren

nanoakışkan kullanılarak sistemin soğutma performansını incelemişlerdir. Yapılan bu tez çalışmasına da katkısı olacak olan bu çalışmada üç farklı tip sıvı blok tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Akışın yönlendirilmesi ve dağıtılmasının termal performansa olan etkisi oldukça önemli olmuştur. Paralel, serpantin ve dağıtıcı blok olarak yapılan incelemeler sonucunda dağıtıcı blok akış yönlendirmesi noktasında en efektif blok olarak belirlenmiştir. CPU soğutma proseslerinde, sıvı soğutma teknolojilerinin oldukça etkili olduğu ve bu sistemlerde geleneksel soğutma sıvıları yerine nanoakışkan kullanımının verimi arttığı gözlemlenmiştir. Kotçioğlu ve ark. [24] Bilgisayar soğutulmasında ısı borularının etkin kullanılması adına teorik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sıvı soğutma sisteminin ele alındığı bu çalışma da tasarlanan ısı borulu soğutma sistemi CPU üzerine oturtulan bakır bir blok, blok içinde 6 adet dairesel kanal ve birbirinden bağımsız olarak çalışan ısı borularından oluşmaktadır. Farklı soğutucu akışkan kullanımı ile kullanılan akışkanların soğutma prosesine etkileri incelenmiştir ve en etkin soğutucu olarak R-22 belirlenmiştir. Bahiraei ve ark. [25] yine elektronik işlemcilerin CPU'ların soğutulması için yeni bir spiral sıvı bloğunun diğer tasarımlara göre verimliliğini incelemişlerdir. Soğutma verimliliğini arttırmak için grafen nanoapartiküllü bir nanoakışkan ile çalışmışlardır. Sayısal analizler farklı Re sayıları ve farklı konsantrasyon oranları için yapılmıştır. Ayrıca spiral sıvı bloğu tasarımı, serpantin ve taban plakalı sıvı bloğu ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada sonucunda, spiral sıvı bloğu diğer sıvı blok tasarımlarından çok daha düşük pompalama gücünde daha iyi sonuç vermiştir. Enerji verimliliği açısından tercih edilen soğutucu blok olmuştur. Guawei ve ark. [26] çok darbeli yoğunlaşma uçlarına sahip dikey bir radyatör ve dikey CPU soğutması için bir düzlem buharlaşma ucu geliştirmiştir. Çalışmalarını deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir ve katı malzeme olarak işlenmiş 304 paslanmaz çelik kullanmışlardır. Sıvı dolum hızı, ısıtma gücü ve rüzgar hızının ısı borulu radyatörün performansı üzerine etkisini görmeyi amaçlamışlardır. Mevcut alüminyum kanatçık ile karşılaştırıldığında dikey radyatör üstün ısı dağılımı performansına, homojen bir sıcaklık dağılımına ve kararlılığa sahiptir.

Kılınç M. [27], elektronik elemanların ısı yük problemlerini çözmek amacıyla, yüksek ısı akılı bir yüzeyden olan ısı transferini, nanoakışkanların çarpan akışkan jet tekniği ile iyileştirilmesini sayısal olarak incelemiştir. Farklı hacim oranları, farklı ısı

akıları ve farklı tipte hazırlanan nanoakışkanların ısı transferine etkilerini araştırmıştır. Hacimsel oranının %2'den %8'e artırılması ile birlikte Nusselt sayısı %15.2 oranında artış göstermiştir. Farklı nanoakışkanların kullanılması ile de en iyi malzeme olarak , $Al_2O_3 - H_2O$ malzemesinde yaklaşık olarak %9.6 değerinde bir iyileşme tespit etmiştir. Kumar ve ark. [28], bir elektronik çip için ısıl performansı iyileştirmek adına pasif soğuma (heatsink) ve nanoakışkanlı sıvı soğutma sistemi içeren bir model tasarlamışlardır. Nanoakışkan olarak $Al_2O_3 - H_2O$ kullanımı ile çip yüzeyinde oluşan maksimum sıcaklığın saf su kullanımına göre daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Nusselt sayısının nanoakışkan kullanımı ile arttığını ve soğutma prosesinde nanoakışkan tercihi ile elektronik çipin güvenilirliğinin %70 yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Wang ve ark. [29] , bir 3B ısı alıcısının üç farklı tasarımında zorlanmış konveksiyonu sayısal olarak incelemeyi bu tasarımları karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Nanomalzemenin etkilerini değerlendirmeyi amaçlayan iki gözenekli model tasarladılar. MWCNT- Fe_3O_4 hibrit nanoakışkanı ile çalışmalarını yapmışlardır. Elde edilen sonuçlarda sabit Re sayısında metalik köpükten oluşan soğutucuların daha iyi soğutma performansına sahip olup soğutucu yüzey sıcaklığını daha fazla düşürebildikleri gözlemlenmiştir.

Tüzün, A.H. [30], mikro ve mini kanallı ısı değiştiricilerinde nanoakışkan kullanılmasının ısı transferine ve basınç kaybına etkisini incelemiştir. Dairesel kesit, 0.1 mm ve 1mm boyutlarında modellenen ısı değiştiricilerinde, $Al_2O_3 - H_2O$ nanoakışkanı %1, %2, %5 ve %8 olmak üzere farklı konsantrasyon oranlarında incelemeye alınmıştır. Sonuç olarak, 1mm çapta %8 konsantrasyon oranına sahip , $Al_2O_3 - H_2O$ nanoakışkanı ısıl performansı en iyi olan durum olarak tespit edilmiştir. Sreehari ve ark. [31], farklı boyutlarda dikdörtgen, U ve V kesitli serpantin bir mikrokanal üzerinde çalışmışlardır. Farklı kanal tasarımlarının ısıl performansı nasıl etkileyeceğini araştırmışlardır ve çalışma akışkanı olarak geleneksel akışkanlardan olan su akışkanı ile devam etmişlerdir. U-serpantin modelinin diğer modellere kıyasla en iyi termal performansı sergilediği bulunmuştur. Mohammadpour ve ark. [32], farklı çap boyutlarında, 50, 75 ve 100 nm aynı zamanda farklı hacimsel oranlarda %2, %3 ve %5 $Al_2O_3 - H_2O$ nanoakışkanını kullanarak mikrokanal ve nanoakışkan sentetik jetten oluşan yeni bir soğutma cihazına odaklanmışlardır. Çalışmalarını hem tek faz modellenmişler hem de multifaz model (Eulerian) yaklaşımı ile çözmüşlerdir. En iyi

sonucu %2 hacimsel oran 100 nm partikül boyutu için bulmuşlardır. Tek faz ve multifaz modelleme yöntemleri kıyaslandığında yaklaşık sonuçlar bulmak ile birlikte multifaz modellemenin daha gerçekçi olduğunu savunmuşlardır. Wen ve ark. [33] nanoakışkan ve mini kanal kullanımı ile ısı transfer performansını arttırmayı amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. *Etilen Glikol – ZnO* nanoakışkan malzemesini kullanmışlardır ve farklı konsantrasyon oranlarındaki ısı transfer performansına etkilerini incelemişlerdir. Hem deneysel hem de CFD çalışması gerçekleştirmişlerdir. Nu sayısı ve sürtünme faktörü gibi farklı değişkenlerin deneysel ve CFD sonuçlarını kıyaslamışlardır. Yaptıkları çalışmanın mini kanallarda nanoakışkan kullanımı için rehberlik edecek bir çalışma olduğunu düşünmektedirler. Maalej ve ark. [34], CPU doğutması için kanatlı hava soğutmalı bir ısı borusu sisteminin termal performansına etkisini incelemişlerdir. Üzerinde çalıştıkları soğutma sistemi bir alüminyum tabanı üç yivli ısı borusu ve kanatçıklardan oluşmaktadır. Deneysel olarak gerçekleştirdikleri bu çalışmalarda amaç, farklı ısı yükleri altında farklı konumlardaki soğutma sisteminin genel termal direncini belirlemektir. Isı boruları boyunca okudukları sıcaklıklar kılcal sınırdan daha düşük ısı yükleri için iyi bir tasarım olduğunu göstermiştir. Qui ve ark. [35], $TiO_2 - H_2O$ nanoakışkanını kullanarak çift borulu ısı eşanjörlerinde termal performansı ve basınç düşüşünü incelemiştir. Farklı akış hızları, farklı konsantrasyon oranları, nanoakışkanların farklı konumlandırılması ve iç tüplerin pürüzlülüğü gibi farklı parametrelerin termal performansa etkilerini incelemişlerdir. Nanoakışkan konsantrasyon oranları % 0,1, % 0.3 ve % 0.5 karşılaştırıldığında sırasıyla % 10.8, %13.4 ve %14.8 değerlerinde ısı transfer oranını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Tang J. ve ark. [36] elektronik bileşenlerin termal yönetim sisteminde ejderha bitinin kanat yapısına dayalı biyonomik bir yüzey geliştirmişlerdir ve yaptıkları çalışmada $Fe_3O_4 - H_2O$ nanoakışkanını kullanarak termal performansı arttırmak istemişlerdir. Farklı konsantrasyon oranları, farklı Re sayıları, farklı manyetik alan ve yoğunluk değişkenlerinin ısı transferi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde ise standart kanat yapısına kıyasla yeni tasarım kanat yapısının sürtünmeyi azalttığı ve ısı performansı aynı oranda iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Tang Z. ve ark. [37] elektronik bileşenlerin minyatürleşmesiyle, nanoakışkan ve biyoinspire sistemlerin kullanımının giderek arttığını gözlemleyerek bu alanda

çalışmalarını yürütmüşlerdir. $Fe_3O_4 - H_2O$ nanoakışkanını kullanarak, dalga biyo-ilhamlı bir ısı değiştirici sistemi kurmuşlardır. Nanoakışkan konsantrasyon oranı, dalga biyo-ilhamlı yapının açısı ve derinliği gibi farklı parametreler üzerinde çalışarak en optimum tasarımı bulmayı amaçlamışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda yapının derinliğinin ısı yayılımına önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. En iyi sonuç %0.3 konsantrasyon oranında eğim açısı 65° olduğunda elde edilmiştir.

Nanoakışkan teknolojisi, soğutma sektörü için oldukça önemli olup geçmişten günümüze bu alanda hem deneysel hem de nümerik olarak oldukça fazla çalışma yapılmıştır ve bu çalışmalar halen devam etmektedir. Nanoakışkanların HAD programları kullanarak modellemesi ile birlikte deney ve test maliyetleri azalmıştır ve kullanılabilirliği artış göstermektedir.

Yapılan tüm bu deneysel çalışmaların yanında, teknolojinin gelişmesi ile kullanımı artan nümerik metodlardan, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi de literatürdeki çalışmalarda yerini almıştır. Nanoakışkanların modellemesi öncelikle tek faz modelleme üzerinden olmuştur. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri belirli denklemler yardımıyla hesaplanmış ve bu değerler kullanılarak sürekli ve kararlı durum üzerinden HAD analizleri farklı yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tek faz modellemenin bir ileri basamağı olarak bazı araştırmacılar iki fazlı (multifaz) modelleme yöntemlerini tercih etmişlerdir. Nanoakışkanların multifaz modellemesinde farklı metodlar kullanılmaktadır. Bu metodlardan başlıcaları Mixture, Eulerian ve Volume of Fluids (VOF) metodlarıdır.

Bu tezin amacı, nümerik yöntemlerden hesaplamalı akışkanlar dinamiğini kullanarak, geleneksel soğutucu akışkanlar yerine nanoakışkan kullanılan soğutucu sistemin termal performansının nasıl iyileştiğini incelemektir. Öncelikle akış dağılımının kullanılan akışkan farketmeksizin termal performansı etkileyeceği düşünülerek iki ayrı soğutucu tasarımı ile çalışılmıştır. Çalışmada öncesinde yapılan çalışmalardan farklı olarak termal performansı etkileyen faktörler detaylı olarak incelenmiştir. Bunlar ; farklı konsantrasyon oranlarında nanoakışkan kullanımı, farklı boyutlarda nanopartikül kullanımı, ve farklı Reynolds sayıları olmuştur. Tek faz analizde akışkanın termofiziksel özellikleri %1 ve %5 konsantrasyon değerleri için

hesaplanmıştır. Multifaz analizlerde ise farklı konsantrasyon değerlerinin yanında 20 nm, 30 nm ve 40 nm olmak üzere değişken partikül çapı ile çalışılmıştır. Tek faz ve multifaz inceleme yapılan çalışmada akış dağılımının ve hızının termal performansa etkisini görmek adına da analizler altı farklı Reynolds değerinde çalıştırılmıştır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Nanoakışkanlar

Uzun yıllar boyunca araştırmacılar soğutma için kullanılan geleneksel sıvıların (su, glikol, etanol, motor yağı vb.) içerisine belirli boyutlarda farklı parçacıklar ekleyerek onların ısı transfer performanslarını iyileştirmeyi amaçlamışlardır.

Isı transfer performansının iyileşmesi için farklı metal (*Au, Ag, Cu, Fe*) bunların yanında metal oksitleri ve karbürleride deneysel çalışmalarında kullanan Choi ve ark. [1], yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda “nanoakışkan” kavramını bilim dünyasına kazandırmışlardır .

Devam eden çalışmalar boyut sınırlandırmasını ön plana çıkartmıştır. 100 nm’den küçük partiküllerin kullanımı önerilmektedir 100 nm sonrasında nanoakışkanlar ısıl performansını arttırmayıp aksine düşüren etki göstermektedirler.

2.1.1. Nanoakışkanların Hazırlanması

Nanoakışkanların hazırlanması için tek adım ve iki adım isimleri ile anılan iki ayrı yöntem bulunmaktadır.

Yu ve ark. [38], tek adım yöntemini kullanarak homojen olarak adlandırılabilen bir karışım elde edebilmişlerdir. Bu yöntemde partiküllerin eldesi ve akışkana eklenmesi aynı anda gerçekleştiği için bu yöntem tek adım yöntemi olarak anılmaktadır. Bu yöntemin en büyük avantajı sentezlenen partiküllerin oksidasyonunun engellenmesidir. Metalik partiküller için en çok tercih yöntem olmasının yanı sıra diğer nanoakışkanların eldesine elverişli olmadığı için kullanım alanı sınırlıdır.

İki adım yönteminde de nanopartiküller kuru toz olarak karışım öncesinde üretilir ve bu işlem onlara ulaşım için büyük bir kolaylık sağlar. Üretilen bu kuru toz karışımı baz olarak kullanılacak akışkana ilave edilir ve nanoakışkan iki adım yöntemi ile elde edilmiş olur. Seramik ve karbür nanoakışkanlar için daha sık tercih edilen bir yöntemdir.

2.1.2. Nanoakışkan Türleri

Partikül yaratımı için kullanılan malzeme esas alınarak temelde nanoakışkanlar 4 ayrı grupta sınıflandırılmışlardır.

Seramik nanoakışkanlar ; Kullanımı en eski olan nanoakışkan türleridir. 2000 yılı ve devamında birçok çalışmada Al_2O_3 ve CuO esaslı nanoakışkanlar kullanılmıştır. Saf H_2O kullanımının yanına bu nanoakışkanların kullanımı ısı direnci düşürmüş termal performansı arttırdığı gözlemlenmiştir. Seramik nanoakışkanlara örnek olarak ; Al_2O_3 , CuO, TiO_2 , SiO_2 , Fe_2O_3 verilebilir.

Metalik nanoakışkanlar ; Baz akışkana ilave edilen nanopartiküllerin saf metal olduğu nanoakışkanlardır. Au, Ag, Al, Cu, Fe gibi farklı metaller kullanılabilir.

Alaşımlı nanoakışkanlar ; Metal nanoakışkanlardan farklı olarak bu nanoakışkan türünden baz akışkanın içerisine süspanse edilen nanopartiküller alaşımlı metalleridir. Kullanılan başlıca alaşımlı metalleri ; Ag – Cu, Ag – Al, Al – Cu olarak bahsedilebilir.

Karbon nanotüp-Polimer nanoakışkanlar ; Metal ve alaşımlı nanoakışkanlarına göre daha yüksek ısı iletkenlik sağlayan ve termal performansı çok daha iyi seviyelerde iyileştiren nanoakışkanlardır.

2.1.3. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Farklı mühendislik dallarında olduğu gibi akışkanlar dinamiği ve ısı transferi problemlerini çözmek içinde birçok boyutsuz sayı hesaplama işlemlerinde kullanılmaktadır. Akışkanların termofiziksel özellikleri ile ilgili olarak kullanılan boyutsuz sayıların başlıcaları, Reynolds (Re), Prandtl (Pr) ve Nusselt (Nu) sayılarıdır.

Yaptığı farklı deneyler sonucunda İngiliz Bilim İnsanı Osborne Reynolds (1842-1912) akış rejiminin, temelde atalet kuvvetlerinin akışkandaki viskoz kuvvetlere oranına bağlı olduğunu bulmuştur. Reynolds sayısı olarak adlandırılan bu oran akışın rejiminin laminar, geçiş akışı ya da türbülanslı akış olup olmadığına karar

vermemizi sağlayan oldukça sık kullanılan bir boyutsuz sayıdır. İç ve dış akış problemlerinde Reynolds sayısının incelenen değeri değişkenlik göstermektedir. İç akışta bu değerler [40]. ;

$Re < 2300$ ise akış laminar, $2300 < Re < 4000$ ise geçiş akışı $Re > 4000$ ise türbülanslı olarak kabul edilmektedir.

$$Re = \frac{\rho v_s d}{\mu} = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskozite kuvvetleri}} \quad (2.1)$$

Burada $\rho [kg/m^3]$ akışkanın yoğunluğu, $v_s [m/s]$ akışkanın hızı, $d [m]$ boru çapı, $\mu [kg/ms]$ ise akışkanın viskozitesidir.

Prandtl sayısı ise hız ve ısı tabakaların birbirlerine göre kalınlıklarını en iyi olarak ifade eden bir boyutsuz sayıdır. Bu ismi, 1904 yılında sınır tabaka kavramını ortaya atan ve sınır tabaka teorisine önemli katkılar sağlayan Ludwig Prandtl'dan dolayı almıştır.

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\text{Momentumun moleküler yayını}}{\text{Isının moleküler yayını}} \quad (2.2)$$

Denklemde $\mu [kg/ms]$ akışkanın viskozitesini, $C_p [J/kgK]$ akışkanın öz ısıısını, $k [W/mK]$ ise akışkanın termal iletkenliğini temsil etmektedir.

Nusselt sayısı ise ismini yirminci yüzyılın ilk yarısında taşınım ile ısı transferine önemli katkı sağlayan Wilhelm Nusselt'e izafeten verilmiştir. Kısaca özetlenecek olursa Nusselt sayısı taşınım ile ısı transfer katsayısının, iletim ile olan ısı transfer katsayısına oranı olarak tanımlanabilir.

$$Nu = \frac{h L_c}{k} = \frac{\dot{q}_{\text{taşınım}}}{\dot{q}_{\text{iletim}}} \quad (2.3)$$

Denklemde yer alan , $L_c [m]$ karakteristik uzunluk, $h [W/m^2 K]$ taşınım ile ısı transferi katsayısını, $k [W/mK]$ ise akışkanın termal iletkenliğini belirtmektedir.[39]

Açıklanan bu boyutsuz parametreler akışkan ve nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin bir fonksiyonudur ve yapılan çalışmalarda sık sık kullanılmışlardır.

Nanoakışkanlarda termofiziksel özellikler genellikle süspanse edilen nanopartikülün kimyasal yapısı, büyüklüğü, şekli, temel akışkan içerisinde yer alma miktarı ile birlikte baz akışkanın özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu özellikler akışkanın ve nanoakışkanın çalıştığı sıcaklık ile de ilişkilidir.

Isıl İletkenlik: Nanoakışkanların keşfindeki en önemli termofiziksel özellik ısı iletkenliğidir. Geleneksel akışkanların ısı iletkenliğini arttırmak amacıyla nanopartikül ilavesiyle nanoakışkanlar üzerinde çalışılmıştır. Nanoakışkanların, geleneksel akışkanlardan farklı olarak daha yüksek ısı iletkenliğine sahip olmalarının nedeni olarak “Brownian Hareketi” düşünülmektedir [42]. 1827 yılında bu konu üzerinde çalışan İskoçyalı botanikçi Robert Brown’ın ismiyle anılmaktadır. Brownian hareketi tanımlayacak olursak, sıvı içerisinde yüzen veya asılı halde duran mikro boyutlardaki parçacıkların çevre ortam molekülerinden kaynaklanan rastgele hareketi denilebilir. Bu hareket mekanizması baz akışkan içerisine süspanse edilen nanoparçacıkların hareketi ile oldukça benzerdir. Isıl iletkenliği arttıran bir diğer etken nanopartiküllerin dış yüzeyleri ile ortam arasında oluşan yüzey katmanıdır, bu katmanlar nanokatmanlar olarak ifade edilmektedir. Isıl iletkenliği etkileyen diğer faktörler ise, baz akışkanın malzemesi, partikül malzemesi, çapı, şekli, nanoakışkanın konsantrasyon oranı, malzemelerin çalıştırıldığı sıcaklık değeridir. Nanopartiküller 100 nm altında üretilebilen partiküllerdir, 100 nm üzerinde ise ısı iletkenliği arttırmaktan ziyade kısmen düşürdükleri gözlemlenmiştir. Küçük partikül boyutlarında çalışmak ısı iletkenliği arttıran bir durumdur [43]. Farklı çalışmalarda ise büyük nanopartikül boyutlarında yapılan uygulamalarda ısı iletkenliği daha çok arttığı gözlemlenmiştir. [44] Bu çelişkilerin var olmasının nedeni aslında nanoakışkanları çok yeni bir teknoloji olmasıdır. Nanopartiküllerin davranışları tam olarak çözülmemiştir ve bu alanda çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir.

Viskozite: Akışkanların viskozite değeri ısı transferi uygulamaların önemli rol oynamaktadır. Akışkanlardan kaynaklanan basınç düşüşlerini etkileyen bir faktör olan viskozite onları sistemlerden kullanmak için gerekli ekipman güçlerini de direkt olarak

etkileyen bir termofiziksel özelliktir. Viskozite değeri de ısı iletkenlik gibi baz akışkan malzemesi, nanopartikül malzemesi, nanoakışkanın konsantrasyon oranı, şekli, boyutu gibi farklı özelliklerden etkilenir. Saf akışkandan ziyade, nanoakışkanlardaki karışımın konsantrasyon oranının artması viskoziteyi arttıran bir etkidir. Nanoakışkan malzemenin viskozite değeri saf akışkandan her zaman için yüksek olarak hesaplanmaktadır.

Yoğunluk : Nanoakışkanların yoğunluklarının belirlenmesinde kullanılan ilk denklem Pak ve Choi tarafından 1998 yılında sunulmuştur. Bu denklemde yoğunluk nanopartikül ve baz akışkandaki konsantrasyon oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Genellikle katıların yani nanopartiküllerin yoğunluk değerleri akışkanlardan yüksek olduğu için süspansiyon edildikleri baz akışkanın yoğunluğu arttırdıkları gözlemlenmektedir ve bu durum birçok deneysel çalışma ile kanıtlanmıştır [45].

Özgül Isı ; Diğer termofiziksel özelliklerin yanında hakkında en az araştırma yapılan özellik öz ısı olmuştur. Az ilgi görmesine istinaden nanoakışkanların termal performansına direkt olarak etki eden bir özelliktir öz ısı değeri. Öz ısı da tıpkı diğer termofiziksel özellikler gibi baz malzeme, nanopartikül malzemesi, şekli, çap değeri, konsantrasyon oranı gibi etkenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Konsantrasyon oranındaki artış öz ısı değerini düşürmektedir.

Günümüzde hala nanoakışkanların termofiziksel özellikleri tam olarak anlamak amacıyla birçok çalışma hem deneysel hem de nümerik olarak devam etmektedir. Nanoakışkanlar elektronik soğutma, güneş enerjisi uygulamaları, uzay&havacılık ve savunma sanayi uygulamaları yanı sıra havalandırma sistemleri, tlaşalı imalat soğutma sıvısı gibi aslında çok farklı mühendislik dalında kullanılmaya başlanan ve sürekli olarak geliştirilmeye ihtiyaç duyan yeni bir alandır.

2.2. Nümerik Yöntemler

Nümerik yöntemler, belirli matematik problemlerinin formüle edilip, aritmetik hesaplama işlemleri ile çözüme kavuşturulmasını sağlayan yöntemlerdir. Mühendislik

ve bilim dünyasında geçmişten günümüze nümerik yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir.

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte mühendislik problemlerinin çözümü için hem endüstri hem de akademik uygulamalarda nümerik yöntemlere oldukça sık başvurulmaktadır. El ile hesaplamanın çok mümkün olmadığı veya deney ve test maliyetlerinin çok yüksek olduğu ya da bu imkânın bulunmadığı durumlarda karmaşık mühendislik problemlerinin çözümü için nümerik yöntemler ile çalışılmaktadır. Nümerik yöntemler kullanılarak karmaşık olarak adlandırabileceğimiz mühendislik problemleri daha kısa sürelerde, daha az maliyet ile gerçek sonuca oldukça yakın bir şekilde çözümlenebilmektedir. Aynı zamanda farklı disiplinlerdeki problemlerinin çözümü nümerik yöntemler ile sağlanabilmektedir.

Bu uygulamada nümerik yöntemlerden biri olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılmıştır ve ilerleyen bölümde hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile ilgili detaylı bilgiler bulunmaktadır.

2.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) / (CFD)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği literatürde genellikle, (HAD) veya İngilizcede ki kısaltması (CFD) ile anılmaktadır. HAD, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve termodinamik disiplinlerini içeren mühendislik problemlerinin çözümlenmesinde kullanılan nümerik bir yöntemdir. Çalışmanın devamında hesaplamalı akışkanlar dinamiği için (HAD) kısaltması kullanılacaktır.

HAD, mühendislik (akışkanlar dinamiği), matematik bilimi ve bilgisayar bilimlerinin birleşiminden oluşan bir yöntemdir. Bu nedenle bilgisayar teknolojisindeki tüm gelişmeler HAD 'in gelişmesine katkı sağlayan unsurlardır.

HAD 'in başlangıcı 1910 yılında Richardson'ın Laplace ve Biharmonik Denklemlerini farklı iteratif yöntemleri kullanarak çözmeye çalışmasıdır. Yapmış olduğu çalışma ahşap bir baraj üzerinde gerilme dağılımları incelemek üzerine

olmuştur ve bu çalışmasını Londra da bulunan Royal Society'ye (İngiltere Kraliyet Bilimler Akademisi)'ne sunmuştur.

Modern nümerik analiz basamakları ise yaklaşık olarak 1920'li yıllarda atılmıştır. HAD 'de önemli bir yer tutan CFL koşuluna da adını veren üç büyük isim Courant, Friedrichs ve Lewy tarafından 1928 yılında yazılan makale problemlerin nümerik yöntem ile çözümün kararlılığını ele almıştır. HAD 'de oldukça önemli olan bu konu makaleyi yazan bilim adamlarının baş harflerinden oluşan kısaltma ile anılmaktadır. 1960'lı yıllara gelindiğinde farklı alanlardaki çalışmalar devam ederken bu makalenin tekrar IBM Journal of Research and Development'ta yayınlaması HAD 'de problemlerin hiperbolik tipteki diferansiyel denklemlerin nümerik çözümünde CFL Stabilite koşulunu ortaya çıkarmıştır ve bu HAD 'in geliştirilmesine oldukça önemli bir nokta olmuştur.

Tüm dünya düzenini etkileyen belli başlı olaylardan biri olan 2. Dünya Savaşı akışkanlar mekaniği problemlerinin de daha hızlı ve doğru bir şekilde çözülmesi ihtiyacını doğurmuştur. Savunma sanayi gereksinimleri ile birlikte farklı bilim insanları HAD 'in geliştirilmesi için çalışmalarını yürütmüştür. Ünlü matematikçi Prof. John von Neumann'da yaklaşık olarak bu zamanda explicit (doğrudan dışa yayılımsal) problemlerin çözümünde kullanılacak olan bir stabilite metodu geliştirmiştir, fakat bu çalışmasını bir yayın haline getirmemiştir. İlerleyen zamanlarda onun adını ve çalışmasını duyuran O'brien Hyma ve Kaplan 1950 yılında başarılı bir makale yayınlamışlardır.

HAD 'in 50 yıl içerisindeki gelişimine bakacak olursak, başlangıçta kullanıcılar kendi var olan problemlerini çözmek amacıyla probleme özel yöntemler geliştirmişler ve bunları farklı bilgisayar dillerini kullanarak yazmışlardır. Problem özelinde yapılan bu çalışmalar zaman içerisinde genele doğru evrilmiş ve günümüzde HAD 'e ihtiyaç duyduğumuz zamanlarda sıklıkla kullandığımız farklı ticari yazılımlara dönüşmüşlerdir. Bu dönüşüm ile birlikte HAD 'in kullanım alanı akademik dünya ile sınırlı kalmamış ve endüstrideki kullanımını hızlandırmıştır. Ticari yazılımlar, içerisinde birçok farklı uygulamayı yapmamızı sağlayacak şekilde geliştirilmiş kodlar içermektedir ve bu kodlar sürekli olarak geliştirilmektedir.

HAD, başta uzay&havacılık, savunma, otomotiv, enerji, denizcilik, biyomedikal&sağlık, kimyasalar prosesler, beyaz eşya vb. farklı endüstriyel kollarda oldukça yaygın kullanılmaktadır.

Tüm nümerik yöntemlerde olduğu gibi HAD kullanımı ile birlikte, deney ve test maliyetlerinin azaltılması, tasarım aşamasının hızlanması, alternatif akışkanlar denenmesi, tasarım optimizasyonu ve prototip maliyetlerinde düşüş gibi birçok masraf kaleminin olabildiğince azaltılması amaçlanmaktadır. Gelecekte bilgisayar teknolojilerinin çok daha ilerlemesi sayesinde HAD ile çözülebilen problemlerin sayısı artacağı ve kullanımı çok daha fazla yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

Bu çalışmada güçlü bir HAD yazılımı olan ANSYS Fluent kullanılmış olup, geometri yaratma, çözüm ağı oluşturma işlemleri içinde yine ANSYS yazılımı içerisindeki farklı modüller kullanılmıştır. (Uygulama adımları kısmında bunlardan daha detaylı bahsedilecektir.)

ANSYS Fluent ile temelde ;

- Zamana bağlı (transient)
- Zamandan bağımsız (steady)
- Laminer ve türbülanslı akış
- Isı transferi (iletim & doğal ve zorlanmış taşınım & ışıınım)
- Çoklu türler
- Multifaz
- Hareketli parçalar vb...

Uygulamalar gerçekleştirilebilir. Bu uygulamaların yanında çok daha özel alanlar içinde ANSYS Fluent kullanılabilir. (Örneğin; Batarya Modelleme, Erime&Çözünme vb.)

ANSYS Fluent birçok kişinin katkıları ile geliştirmiş bir ticari yazılımdır. Akademik ve endüstriyel dünyada güçlü bir çözücü olan kabul gören Fluent yazılımının gelişim sürecine kısaca bakacak olursak, kodun geliştirilmesinde oldukça önemli bir Türk bilim insanı ile tanışmış oluyoruz. Bu kişi 1975 yılında Birleşik

Krallıktaki Sheffield Üniversitesi'ne akışkanlar mekaniği alanında yüksek lisans yapmak amacıyla giden Hasan Ferit Boysan'dır. Boysan aynı zamanlarda Londra Imperial Kolejin'de Profesör Brian Spalding ile damperli bir yakıcıda yanmayı modellemek amacıyla Cora3 kodunu kullanarak çalışmalarını yürüten Ali Turan ile tanışmıştır ve onun çalışmalarına yardımcı olmuştur. Yapılan çalışmalarda geometri ve sınır koşulları değişince her işlemi tekrarlamak zorunda kalmaları haricinde bir HAD kodunu çalıştırabilme başarısı ile Boysan 1976 yılında Türkiye'ye geri dönmüştür.

1979 yılında ise Sheffield Üniversitesi'nde Kimya Mühendisliği Profesörü olan Jim Swithenbank, Boysan'ı siklon ayırıcıları içeren belirli bir problem için geometri ve sınır koşullarını etkileşimli olarak tanımlama yetisine sahip yeni bir kod geliştirmek üzere Sheffield'e davet etmiştir. Ortaya çıkan çalışma araştırma projesinin bir parçası olan Bill Ayers ile geliştirilmiştir. Geliştirilen kod Kimya Mühendisleri Enstitüsü İşlemlerinde yayınlanmıştır ve yazarların izniyle kaynak kodun bir kopyasını almak için yazarla iletişime geçileceğine dair bir not iliştilmiştir. Bununla birlikte oldukça fazla geri dönüş alan Boysan ve arkadaşları etkileşimli bir HAD kodunun ticari bir potansiyel içerdiği konusunda ortak bir fikre sahip olmuşlardır.

Boysan ve Ayers kullanıcıların geometri ve sınır koşullarını grafiksel olarak değiştirmelerini ve sonucu gözlemlmelerini sağlayan etkileşimli bir ara yüze sahip olarak o dönemin HAD programlarından çok daha iyi özelliklerdeki bu yazılımın genel amaçlı bir versiyonunu oluşturmuşlardır. 1980'ler de oluşturulan kod üzerinde genel anlamda birçok problemin çözümünde kullanılacak hale getirmek için çalışmalar yapmışlardır ve Fluent Europe adını verdikleri hali ile rakiplerin karşısına daha güçlü olarak çıkarmışlardır. Fluent yaratım aşamasında rakip kodlardan eksik kaldığı yerler olsa da güçlü müşterileri elde etmek için oldukça iyi bir ara yüze ve kullanım kolaylığına sahip bir yazılımdır. Bugün yine en çok tercih edilme sebeplerinden biri olan kullanıcı dostu ara yüzü sayesinde o dönemde de birçok rakibini eleyerek pazarda güçlü bir yer edinebilmiştir.

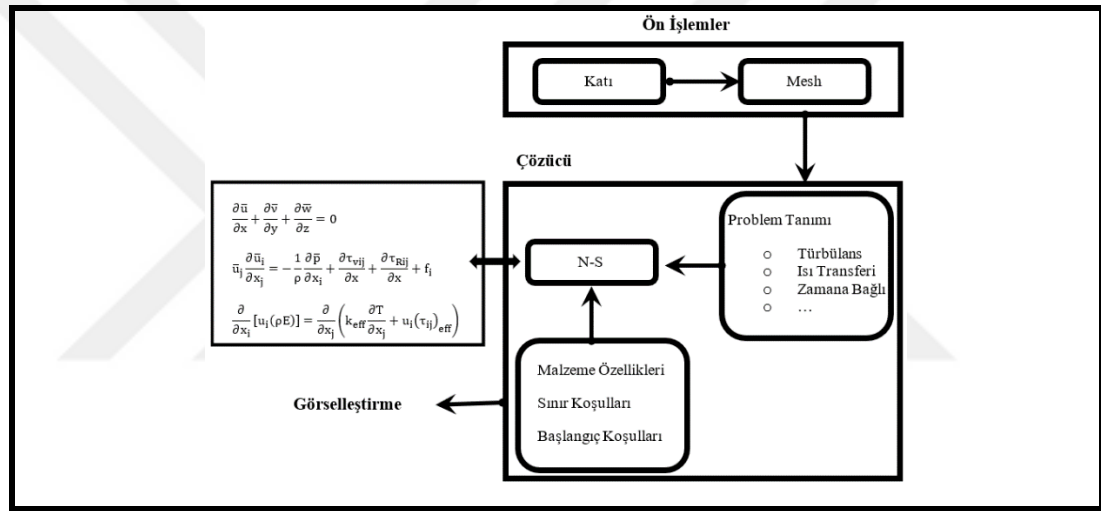
2006 Mayıs ayı itibariyle o zamanlar daha çok mekanik alanda çalışan programlara sahip olan ANSYS 'in Fluent 'i satın almasıyla birlikte pazarda yapısal

ve akışkanlar tarafını bir arada bulunduran bir firma haline gelmiştir ve 2006 yılından bu yana Fluent 'in tüm dünyadaki satışçısını sağlayan ve koordine eden şirket ANSYS 'tir [46].

ANSYS Fluent yazılımı sonlu hacimler metodunu kullanarak çözüm yapmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (2.4)$$

Zamana Bağlı Terim + Taşınım = Difüzyon + Kaynak Terimleri



Şekil 2.1 : HAD İşlem Basamakları

2.2.2. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi, korunum denklemlerinin integral formunu doğrudan fiziksel uzayda ayrıklaştıran bir yöntemdir. İlk kez McDonald (1971), MacCormack ve Paullay (1972) gibi araştırmacılar tarafından zamana bağlı, iki boyutlu Euler denklemlerinin çözümü için önerilmiş ve daha sonra Rizzi ve Inouye (1973) tarafından üç boyutlu akışlar için geliştirilmiştir. Bu yöntemde hesaplama bölgesi, sonlu sayıda ve birbirine komşu kontrol hacimlerine bölünür. Her bir kontrol hacmi için ilgili özelliklerin tam korunumu ifade edilir ve merkez noktasında değişken değerleri hesaplanır. Kontrol hacmi yüzeylerindeki değerleri ifade etmek içinse merkezdeki

değerler kullanılarak interpolasyon yapılır. Yüzey ve hacim, integrallerinin yaklaşık çözümünü bulmak için ikinci dereceden formüller uygulanır. Sonuç olarak her bir kontrol hacmi için komşu düğümlerin değerlerini de içeren bir cebirsel denklem elde edilir [41].

Sonlu hacimler yöntemi, ağ kesişim noktaları yerine kontrol hacimleri ile çalışır ve bu durum sayesinde her türlü çözüm ağına uygulanabilir. Düğüm hesabında düzenli çözüm ağları çok daha yüksek önem taşırken, hacimde çözüm yapan bu yöntemde düzensiz olarak geometriye uygun yerleşim ile çalışılabilir. Çözüm ağı; sadece kontrol hacimlerinin sınırlarına uygun olarak oluşturulduğu için, aynı sınırları ve sınır koşullarını paylaşan kontrol hacimlerine aynı yüzey integralleri uygulandığı müddetçe korunum yasaları sağlanır. Sonlu elemanlar yöntemine nazaran bazı dezavantajları olsa da avantajları daha fazladır ve HAD çözümlemeleri için en çok tercih edilen yöntemdir. HAD çözümlemelerinde kullanılan geometrilerin kompleksliğine bağlı olarak iki boyutta üçgen veya dörtgen, üç boyutta ise dörtyüzlü ya da altı yüzlü eleman tipleri ile çalışılabilir. Sonlu hacimler yöntemi, sonlu farklar yöntemindeki gibi cisme uygun koordinat sistemi dönüşümü gibi denklem dönüşümlerine ihtiyaç duymadığından kullanım açısından çok daha elverişlidir.

Sonlu hacimler yönteminin uygulanabilmesi için denklemin diverjans formuna uygun olması gerekmektedir.

Diverjans teoremi, üç boyutu uzayda kapalı bir A yüzeyi içiden kalan V hacminde tanımlı $\vec{F}(x, y, z)$ vektör alanının her bir bileşeninin kısmi türevleri sürekli ise aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\oint_A \vec{F} \cdot d\vec{A} = \oint_A \vec{F} \cdot \hat{n} dA = \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{F} \cdot dV \quad (2.5)$$

Gauss teoremi olarak da bilinen bu teoreme göre, bir vektörün diverjansının hacim üzerinden integrali, bu hacmi saran kapalı A yüzeyi üzerinden alınan integrale eşittir.

$$\vec{F} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k} \quad (2.6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (2.7)$$

A yüzeyinin birim normali ise ;

$$\hat{n} = n_1 \hat{i} + n_2 \hat{j} + n_3 \hat{k} \quad (2.8)$$

$$n_1 = \hat{n} \cdot \hat{i} = \cos \alpha \quad (2.9)$$

$$n_2 = \hat{n} \cdot \hat{j} = \cos \beta \quad (2.10)$$

$$n_3 = \hat{n} \cdot \hat{k} = \cos \gamma \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \vec{F} \cdot \hat{n} &= (F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k}) \\ &+ (\cos \alpha \hat{i} + \cos \beta \hat{j} + \cos \gamma \hat{k}) \\ &= F_x \cos \alpha + F_y \cos \beta + F_z \cos \gamma \end{aligned} \quad (2.12)$$

Ve diverjans teoremi aşağıdaki biçimde açıklanabilir.

$$\oiint_A \{F_x \cos \alpha + F_y \cos \beta + F_z \cos \gamma\} dA \quad (2.13)$$

$$= \iiint_V \left\{ \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right\} dV$$

3. MATEMATİKSEL MODELLEME

3.1. Matematiksel Modeller ve Detayları

Doğrulan makale ve yapılan tez çalışmasında kullanılan tüm matematiksel modellere bu bölümde yer verilmiştir. Tek faz ve Multifaz modelleme yöntemlerinden Mixture model ve Eulerian model de çalıştırılan denklemler, korunum (süreklilik) , momentum, enerji denklemleri ve türbülans denklemleri olmak üzere tüm denklemler detaylı olarak verilmiştir.

3.1.1. Tek Faz Modelleme

Literatürde var olan birçok çalışma tek faz kurgusu üzerinden geliştirilmiştir. Nanoakışkanların HAD kullanılarak çözümlenmesinde tek faz yaklaşımının test ve deney sonuçları ile oldukça yakın sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu duruma istinaden tez çalışmasında hem tek faz hem de yeni kullanılan multifaz modellemenin ısı transferi hesaplanması üzerine etkileri incelenmiştir.

Tek faz modellemede kullanılan matematiksel denklemler aşağıdaki gibidir,

Korunum Denklemi ;

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = 0 \quad (3.1)$$

Momentum Denklemi;

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) = -\nabla P_m + \nabla \cdot \left[\mu_m (\nabla \vec{V}_m + \nabla \vec{V}_m^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V}_m \right] + \rho_m \vec{g} \quad (3.2)$$

Enerji Denklemi;

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m C_p T) = \nabla \cdot (\lambda_m \Delta T) \quad (3.3)$$

Burada $\vec{V}_m$ akışkanın ortalama hızı, ρ_m akışkanın yoğunluğu, μ_m akışkanın viskozitesi, λ_m akışkanın termal iletkenlik değeri ve son olarak $\vec{g}$ yerçekimi faktörüdür.

Yapılan uygulamada, dönüş bölgelerinde meydana gelebilecek vertex (girdap) oluşumlarını iyi modelleyebilmek adına akış türbülanslı olarak modellenmiştir, kullanılan türbülans modeli SST-k Omegadır. Aşağıda SST- k Omega türbülans modelinin denklemleri yer almaktadır.

Viskoz Model Denklemleri ;

$$\text{div}(\rho_m \kappa \vec{V}_m) = \text{div} \left\{ \left\{ \mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \right\} \text{grad } \kappa \right\} + G_\kappa - \rho_m \kappa \omega \beta_1 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{div}(\rho_m \kappa \vec{V}_m) = \text{div} \left\{ \left\{ \mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \right\} \text{grad } \kappa \right\} + G_\kappa - \rho_m \kappa \omega \beta_1 \\ + 2(1 - F_1) \rho_m \sigma_{\omega,2} \frac{\text{grad } \omega \text{grad } \kappa}{\omega} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Denklemde yer alan κ kinetik enerjiyi, ω kinetik enerjinin özgül yayılma hızını temsil eder. Bunların yanında G_κ türbülans kinetik oluşumunu, G_ω ise ortalama hız gradyanlarından kaynaklanan enerjiyi temsil eder.

3.1.2. Multifaz Modelleme

Nanoakışkanların süre gelen araştırmalarda çoklu faz olarak modellenmesi yakın geleceğe dayanmaktadır. Tek faz yaklaşımlar deney ve test sonuçları ile örtüşmüş olsa da araştırmacılar multifaz modellemenin gerçeğe daha yakın sonuçlar verebileceğini düşündükleri için bu modelleri çalışmalarında kullanmışlardır. Multifaz modelleme aşamasında Fluent içerisinde yer alan Mixture ve Eulerian modelleri kullanılmıştır. Her iki modelde de aynı reynolds sayılarında ve aynı partikül çapında nanoakışkan kullanılmıştır. Mixture model ve Eulerian modelin detayları aşağıda yer almaktadır.

3.1.2.1. Mixture Model

Mixture model, sürekli ve dağınık fazların kombinasyonunu hesaplayan bir modeldir. Mixture modelde kullanılan hesaplama yöntemi tek faz homojen modele

oldukça benzerlik gösterir. Temel akışkanın içerisinde dağınık olarak yer alan ikincil fazın hareketi, yoğunluk farklılığından kaynaklanan sürüklenme ve iç kuvvetlerin dengelenmesi ile hesaplanır. Genelleme yapılacak olur ise mixture modelde ikincil fazın hareketini birincil fazı yönlendirdiğidir. Mixture model, kuvvet dengesi sağlandığı sürece, farklı hız, parçacık boyutu ve yoğunluk oranları için uygulanabilir. Sıvılarda yer alan küçük parçacık ve kabarcık modellemeleri için oldukça uygun bir yöntemdir.

Korunum Denklemi;

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = 0 \quad (3.6)$$

Momentum Denklemi;

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho_m V_m V_m) = & -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_m \nabla V_m) \\ & + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right) - \rho_{m,i} \beta_m g (T - T_i) \end{aligned} \quad (3.7)$$

ρ_m karışımın yoğunluğudur ve ;

$$\rho_m = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_p \quad (3.8)$$

Denklemden yer alan φ hacim kesiri oranıdır, katı partiküllerin akışkan içerisindeki konsantrasyon oranını ifade eder.

Akışkan için Enerji Denklemi ;

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^n \rho_k C_{pk} \varphi_k V_k T = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (3.9)$$

Hacim Kesiri Denklemi ;

$$\nabla \cdot (\varphi_p \rho_p V_m) = -\nabla \cdot (\varphi_p \rho_p V_{dr,p}) \quad (3.10)$$

V_m ortalama hız ise ;

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k V_k}{\rho_m} \quad (3.11)$$

$V_{dr,k}$ ikincil faz için sürüklenme hızıdır, nanopartiküller ile çalışıldığında bağlı hız ise ;

$$V_{dr,p} = V_{pf} - \sum_{k=1}^n \frac{\varphi_k \rho_k}{\rho_m} V_{fk} \quad (3.12)$$

Kayma hızı (bağıl hız), ikincil fazın (*nanopartikül, p*) hızından, birincil fazın (*su, f*) çıkartılması ile elde edilir.

$$V_{pf} = V_p - V_f \quad (3.13)$$

Schiller ve Naumann modellemesi ise sürüklenme katsayısı hesabında kullanılır.

$$V_{pf} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f f_{drag}} \frac{(\rho_m - \rho_p)}{\rho_p} a \quad (3.14)$$

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.687} & Re_p \leq 1000 \\ 0.00183 Re_p & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (3.15)$$

a ivmeyi temsil etmektedir ve denklemde yer alan g yerçekimi ivmesidir.

$$a = g - (V_m \cdot \nabla) V_m V_{pf} = V_p - V_f \quad (3.16)$$

3.1.2.2. Eulerian Model

Eulerian model yaklaşımı, mixture yaklaşımından farklı olarak süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini her faz için ayrı ayrı hesaplar. Hacim oranları her faz için belirlenen denklemin hesaplanmasını sağlar. Mixture modele göre kullanılması ve hesaplatılması daha zor olan bir modeldir. Euler modeli seyreltik ve yoğun karışım modelleri yanı sıra az veya daha çok partikül hesaplanmasında tercih edilen bir yöntemdir. Aşağıda Eulerian modelin hesaplanmasında kullanılan denklemlerden bahsedilmiştir.

Korunum Denklemi;

$$\nabla \cdot (\varphi_q \rho_q \vec{V}_q) = 0 \quad (3.17)$$

Burada yer alan $\vec{V}_q$ ile, ilave edilen (q) faz için hesaplanır.

$$\vec{V}_q = \int_v \varphi_q dV \quad (3.18)$$

$$\sum_{q=1}^n \varphi_q = 1 \quad (3.19)$$

İlave Edilen Faz (q) için Momentum Denklemi;

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\varphi_q \rho_q \vec{V} \vec{V}) = & -\varphi_q \nabla P + \varphi_q \nabla \cdot (\mu_q \nabla \vec{V}) + \varphi_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} \\ & + \vec{F}_{lift,q} \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n S_{pq} (\vec{V}_p - \vec{V}_q) \quad (3.21)$$

$$S_{pq} = (\varphi_q \varphi_p \rho_q f) / \tau_p \quad (3.22)$$

$$\tau_p = (\rho_p d_p^2) / (18 \mu_p) \quad (3.23)$$

f sürüklenme katsayısıdır ve bu hesaplar Schiller ve Naumann modellemesi ile gerçekleştirilir.

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (3.24)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24(1 + 0.15 Re^{0.687})}{Re} & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (3.25)$$

$$Re = \frac{\rho_q |\vec{V}_p - \vec{V}_q| d_p}{\mu_q} \quad (3.26)$$

Drew ve Lahey eşitliğinden yararlanılarak sürüklenme katsayısı hesaplanmıştır;

$$\vec{F}_{lift,q} = -0.5 \rho_q \varphi_q (\vec{V}_p - \vec{V}_q) x (\nabla x \vec{V}_q) \quad (3.27)$$

Enerji Denklemleri;

$$\nabla \cdot (\varphi_q \rho_q H_q) = -\nabla \cdot (K_q \nabla T_q) - \tau_q \nabla \vec{V}_q + \sum_{p=1}^n \vec{Q}_{pq} \quad (3.28)$$

Burada yer alan $\vec{Q}_{pq}$ (3.28) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$\vec{Q}_{pq} = h(\vec{V}_p - \vec{V}_q) \quad (3.29)$$

Ve h ısı transfer katsayısı (3.29) formülü ile hesaplanır.[Ranz and Marshall]

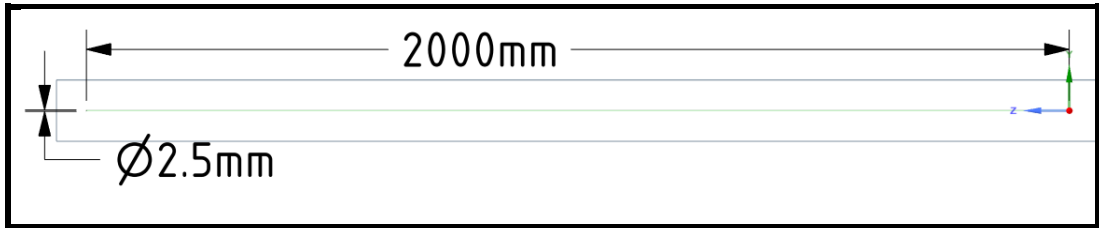
$$h = (6K_q \phi_q \phi_p Nu_p) / d_p^2 \cdot Nu_p \quad (3.30)$$

3.2. Çalışmanın Doğrulanması

Uygulama için daha önceden yapılmış bir çalışma referans alınmıştır [15]. Düz bir boru içerisinde 40 nm partikül çapında farklı konsantrasyon oranlarında süspanse edilmiş nanokışkan Al_2O_3 kullanılmıştır. Yapılan çalışmada multifaz modelleme yöntemi kullanılmıştır ve hem Mixture model hem de Eulerian model deneysel sonuç ile kıyaslanmıştır. Düz boru dış yüzeyinden sıcak buhara maruz kalıyor gibi modellenmiştir.

3.2.1. Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Geometri Modeli

Geometri, referans çalışmada yer alan bilgiler doğrultusunda birebir oluşturulmuştur. Çalışma için 3D geometri Ansys Space Claim Direct Modeler (SCDM) modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 3.1’de geometrinin detayları verilmiştir.

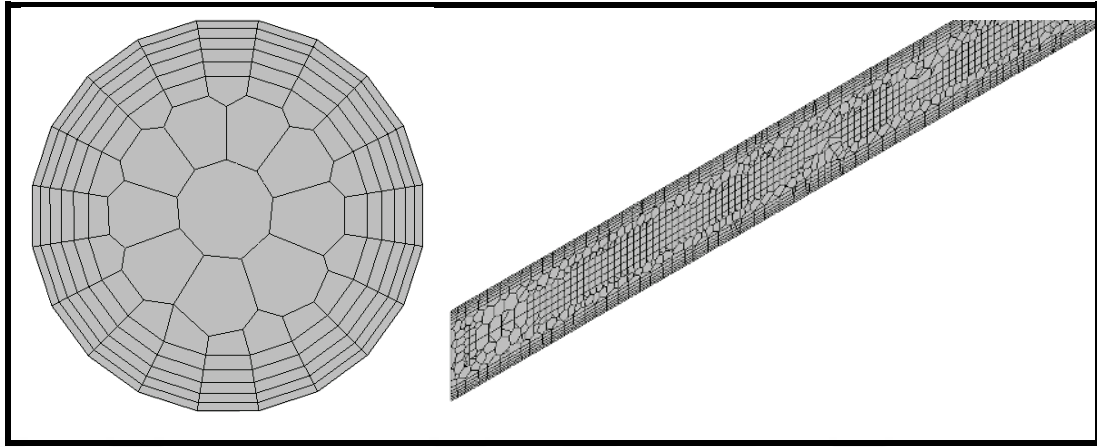


Şekil 3.1 : Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Geometrinin Ölçü Bilgileri

3.2.2. Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Çözüm Ağı

Doğrulan model uygulaması için çözüm ağı, Ansys Fluent Meshing programı kullanılarak oluşturulmuştur. Poly-hexcore (mozaik mesh) olarak

adlandırılan mesh tipi ile devam edilmiştir. Sınır tabaka layer sayısı olarak 5 eleman ile çalışılmıştır. Şekil 3.2’de yaratılan çözüm ağı ile ilgili görseller yer almaktadır.



Şekil 3.2: Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Çözüm Ağı Görselleri

Tablo 3.1’de çalışmanın doğrulanması için oluşturulan 1069608 eleman sayılı çözüm ağının kalite değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3.1 : Çalışmanın Doğrulanması İçin Oluşturulan Çözüm Ağı Bilgileri

Eleman Sayısı	Min. Orthogonal Quality	Max. Skewness	Aspect Ratio
1069608	0.20960769	0.7903923	35.6237

3.2.3. Çalışmanın Doğrulanması İçin Başlangıç ve Sınır Koşulları

Doğrulanmak üzere multifaz modelleme yöntemiyle çalışılmış olsa da tek faz modelleme yöntemi de çözüme dahil edilmiştir. Tek faz modelleme yönteminde saf su ve %1 Al_2O_3 ile çalışılmıştır. Multifaz analiz kurgusunda ise 40 nm partikül çapında baz akışkan suya %1 konsantrasyon oranında eklenen Al_2O_3 malzeme olarak kullanılmıştır. Tek faz modelleme yönteminde nanoakışkanın termofiziksel malzeme özellikleri belirli yasalara bağlı hesaplanmıştır ve malzeme özelliklerine Tablo 3.2’den ulaşılabilir [47].

Tablo 3.2 : Malzeme Özellikleri

Akışkan	$\rho [kg/m^3]$	$C_p [J/kgK]$	$k [W/mK]$	$\mu [kg/ms]$
Su	998.2	4182	0.6	0.001003
% 1 Al_2O_3	1027.5022	3948.45616	0.62226	0.0010021

3.2.4. Çalışmanın Doğrulanması İçin Elde Edilen Sonuçlar

Yapılan çalışma sonucunda, referans alınan çalışma nümerik olarak doğrulanmıştır. Tablo 3.3’de çıkış bölgesi maksimum sıcaklık, ortalama hız ve düz boruda oluşan basınç düşüşü değerleri paylaşılmıştır.

Tablo 3.3 : Çalışmanın Doğrulanmasında Re=5000 İçin Analiz Sonuçları

	Tek Faz Modelleme		Multifaz Modelleme	
	Su	%1 Al_2O_3	Mixture	Eulerian
$T_{çıkış} [K]$	293.581	293.605	293.575	293.620
$V_{ort} [m/s]$	2.00252	1.95036	1.98964	1.97227
$\Delta P [Pa]$	77375.758	74947.5	84247.9	85410.9

Tüm mühendislik hesaplamalarında olduğu gibi çalışmanın doğrulanmasında elde edilen sonuçları kıyaslamak amacıyla bazı boyutsuz sayılar ve hesaplamalardan yardım alınmıştır. Bu değerler Nusselt sayısı ve sürüklenme katsayısıdır.

Nusselt Hesabı için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [15].

Tek faz çözümleme için Nu hesabı ;

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (3.31)$$

Multifaz çözümleme Mixture Model için Nu hesabı ;

$$Nu = 0.02178Re^{0.811}Pr^{0.266}(1 + \varphi)^{1.140} \quad (3.32)$$

Multifaz çözümleme Eulerian Model için Nu hesabı ;

$$Nu_p = 2 + 0.6Re^{0.5}Pr_q^{0.333} \quad (3.33)$$

Sürüklenme Katsayısı Hesabı için ise aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [15].

Tek faz Çözümleme ;

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{\rho V^2}{2}\right)} \quad (3.34)$$

Multifaz çözümleme ve Mixture Model ;

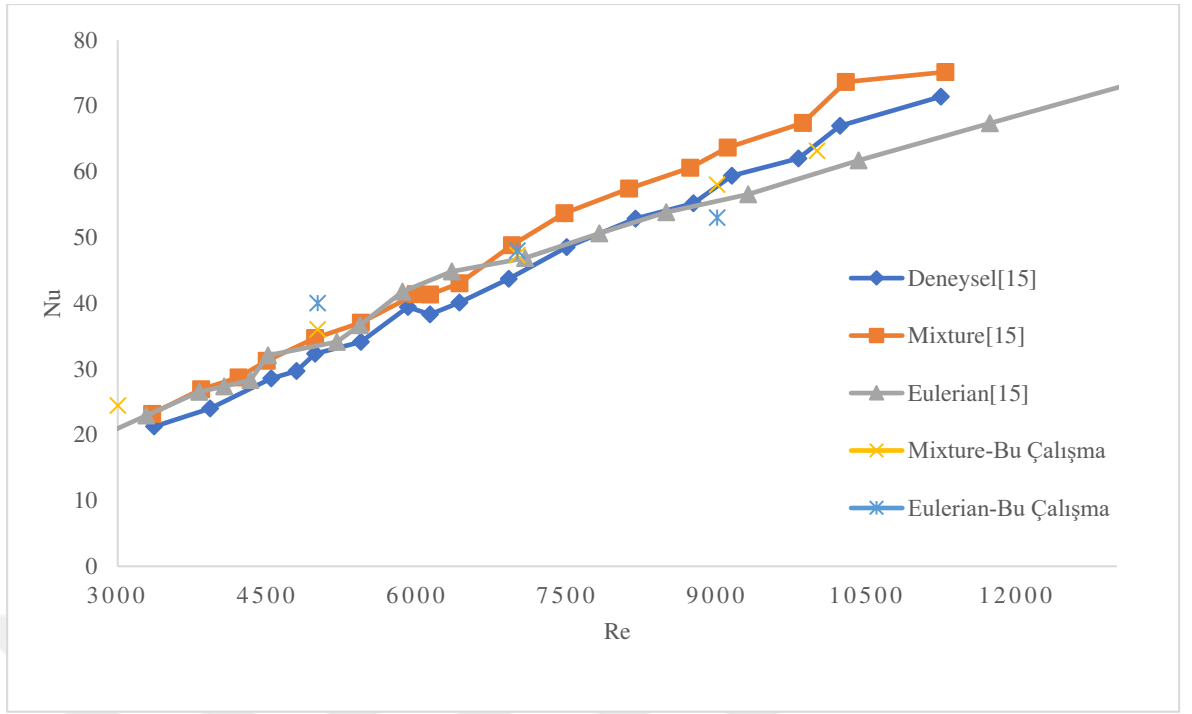
$$f = 0.14332Re^{-0.1615}(1 + \varphi)^{0.1709} \quad (3.35)$$

Multifaz çözümleme ve Eulerian Model ;

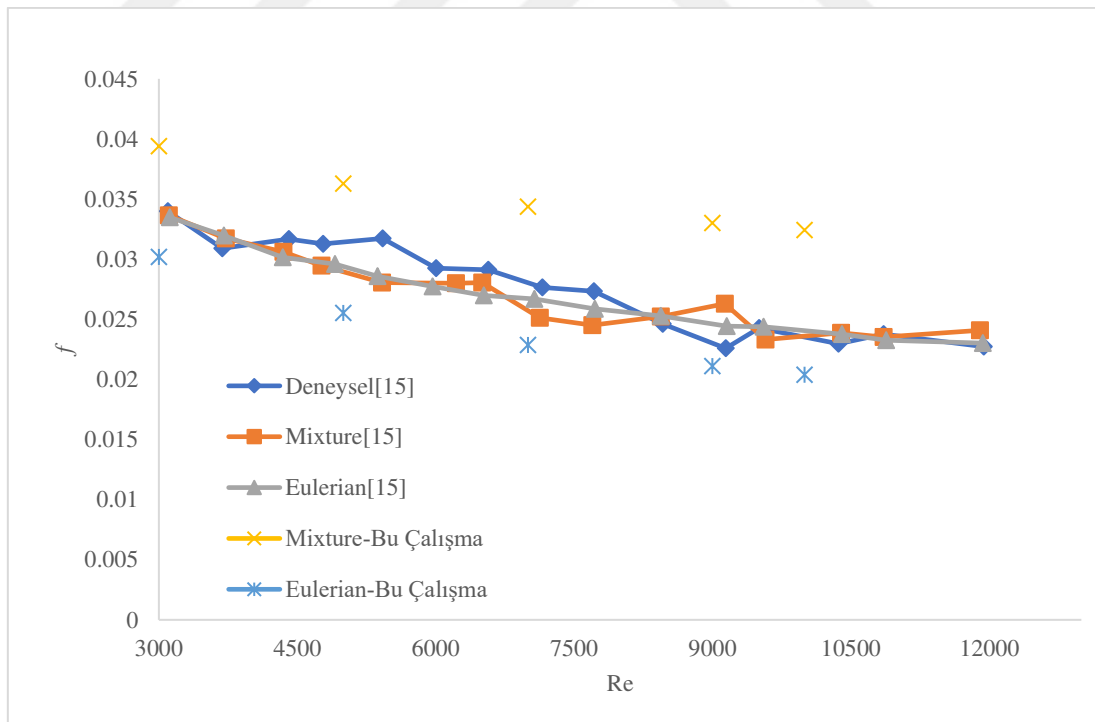
$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (3.36)$$

Referans alınan çalışmada kullanılan matematiksel modeller hem deneysel hem de daha önceden yapılmış nümerik çalışma ile örtüşmüştür. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te yer alan grafikler incelediğinde, nümerik olarak daha önceden yapılmış çalışma ile bu çalışmada elde edilen sonuçlara ulaşılabilir.

Çalışmanın doğrulanması için yapılan bu adımda, nanoakışkanların hem tek faz hem de multifaz yöntemleri kullanılarak nümerik olarak incelenebilecekleri görülmüştür. Bu sebeple tez çalışması için öncelikle nanoakışkanların termofiziksel özellikleri belirli yasalara bağlı kalarak hesaplanmış ve tek faz modelleme ve su-nanoakışkan karışımının multifaz olarak modelleme yöntemlerinden Mixture ve Eulerian modellerinin kullanımı uygun bulunmuştur.



Şekil 3.3 : Nu-Re değerlerinin Doğrulanan Makale ile kıyaslanması



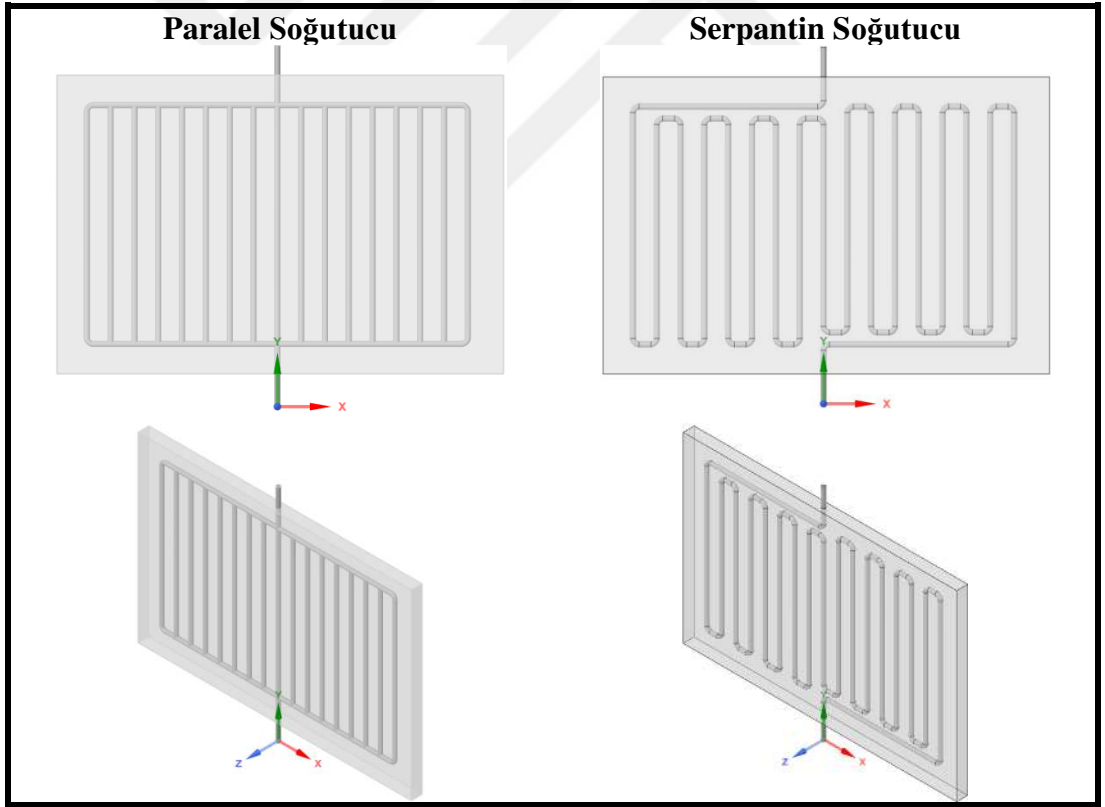
Şekil 3.4 : f -Re değerlerinin Doğrulanan Makale ile kıyaslanması

4. TASARIM VE MODELLEME

Doğrulan çalışmada kullanılan matematiksel model [15] ve referans alınan makalede [23] yer alan benzer geometriler ile tez çalışması gerçekleştirilmiştir. Doğrulan makalede kullanılan tek faz ve multifaz modelleme yöntemlerinden Mixture ve Eulerian modeller ile de nanoakışkan modellemesi gerçekleştirilmiştir.

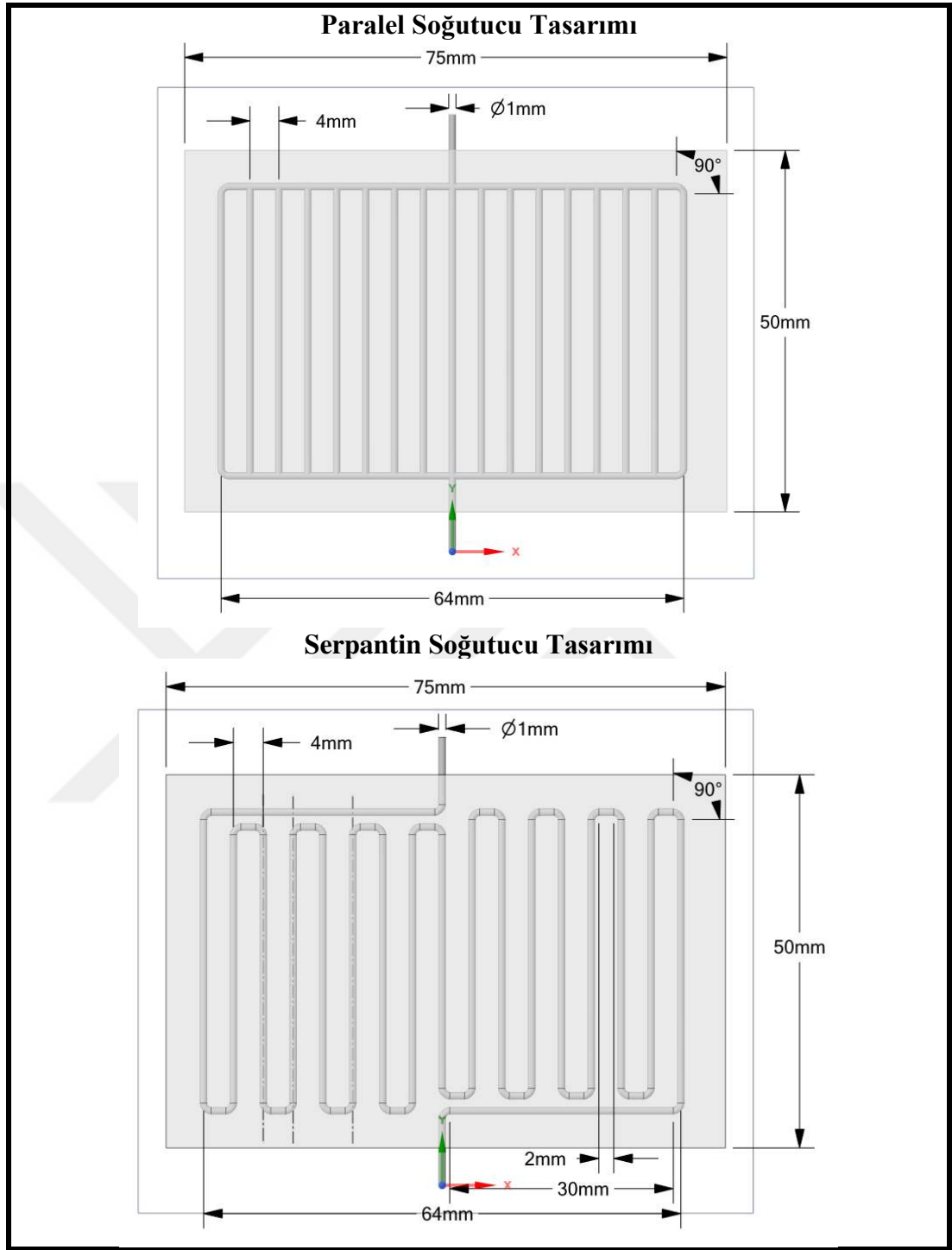
4.1. Geometri Modelleme

Uygulamada iki farklı geometri üzerinde çalışılmıştır. Tüm geometriler ANSYS Space Claim Direct Modeler (SCDM) modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Paralel ve serpantin soğutucu isimleri ile anılacak bu tasarımların ısı transferine etkileri incelenmiştir. Akışın yönlendirilmesi ile ısı transferinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.1’de geometrik detaylar gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Tasarımların Ön ve İzometrik Görünüş Görselleri

Şekil 4.2’de paralel ve serpantin soğutucu tasarımlarının geometrik ölçülendirmesine dair bilgiler yer almaktadır.



Şekil 4.2 : Tasarımların Geometrik Detayları

4.2. Çözüm Ağı

Çözüm ağı oluşturmak için ANSYS Fluent Meshing programı kullanılmıştır. Fluent mesh kullanılarak, poly-hexcore (mosaic) mesh teknolojisi ile çalışılmıştır. Paralel ve serpantin soğutucu tasarımları için aynı eleman boyutu girilerek benzer eleman sayısında çözüm ağı oluşturulmuştur. Uygulama için çözüm ağından bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Sonuçlar kısmında bu durum detaylandırılacaktır.

Oluşturulan çözüm ağlarının kalite değerlerinin, belirli sınırlar içerisinde olmasına dikkat edilmiştir. Nümerik olarak yapılmış bir çalışmada hata oranını azaltmak ve yapılan çalışmanın doğruluğu hususunda emin olabilmek için mesh kalite değerlerine dikkat edilmelidir. HAD analizlerinde sıklıkla bakılan bu değerler ; *Minimum Orthogonal Quality* ≥ 0.1 , *Maximum Skewness* ≤ 0.95 ve $10 < \textit{Aspect Ratio} < 100$ olarak adlandırılabilir. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'den detaylı incelenebileceği üzere oluşturulan tüm çözüm ağları belirlenen kalite değerleri içerisinde yer almaktadır.

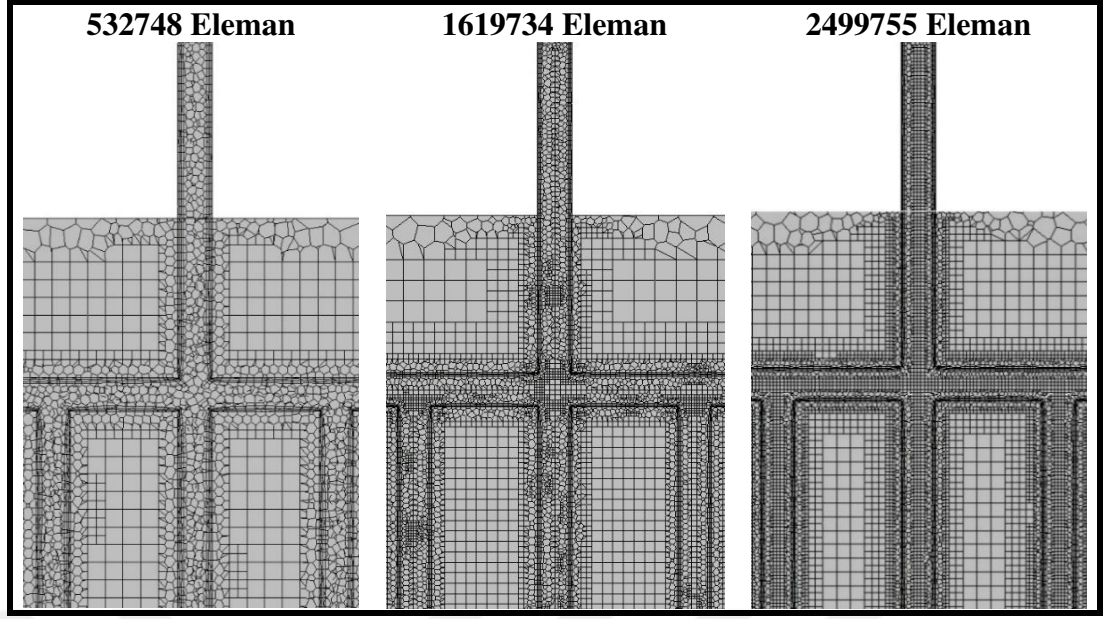
Tablo 4.1: Paralel Soğutucu-Çözüm Ağı Kalite Değerleri

Eleman Sayısı	Min Orthogonal	Max Skewness	Aspect Ratio
532748	0.2000	0.7999	28.5102
1619734	0.2001	0.7998	13.1764
2499755	0.2035	0.7964	11.8930

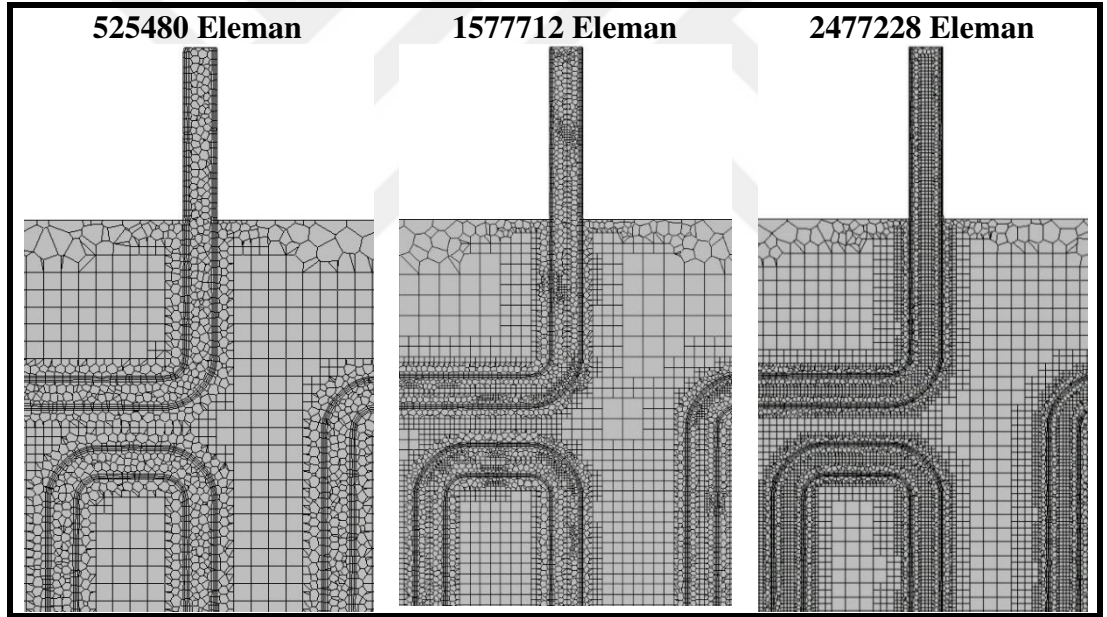
Tablo 4.2: Serpantin Soğutucu-Çözüm Ağı Kalite Değerleri

Eleman Sayısı	Min Orthogonal	Max Skewness	Aspect Ratio
525480	0.2001	0.7998	27.4121
1577712	0.2526	0.7473	11.8636
2477228	0.2044	0.7955	10.2999

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te farklı eleman boyutları ile oluşturulan çözüm ağına ilişkin görseller yer almaktadır.

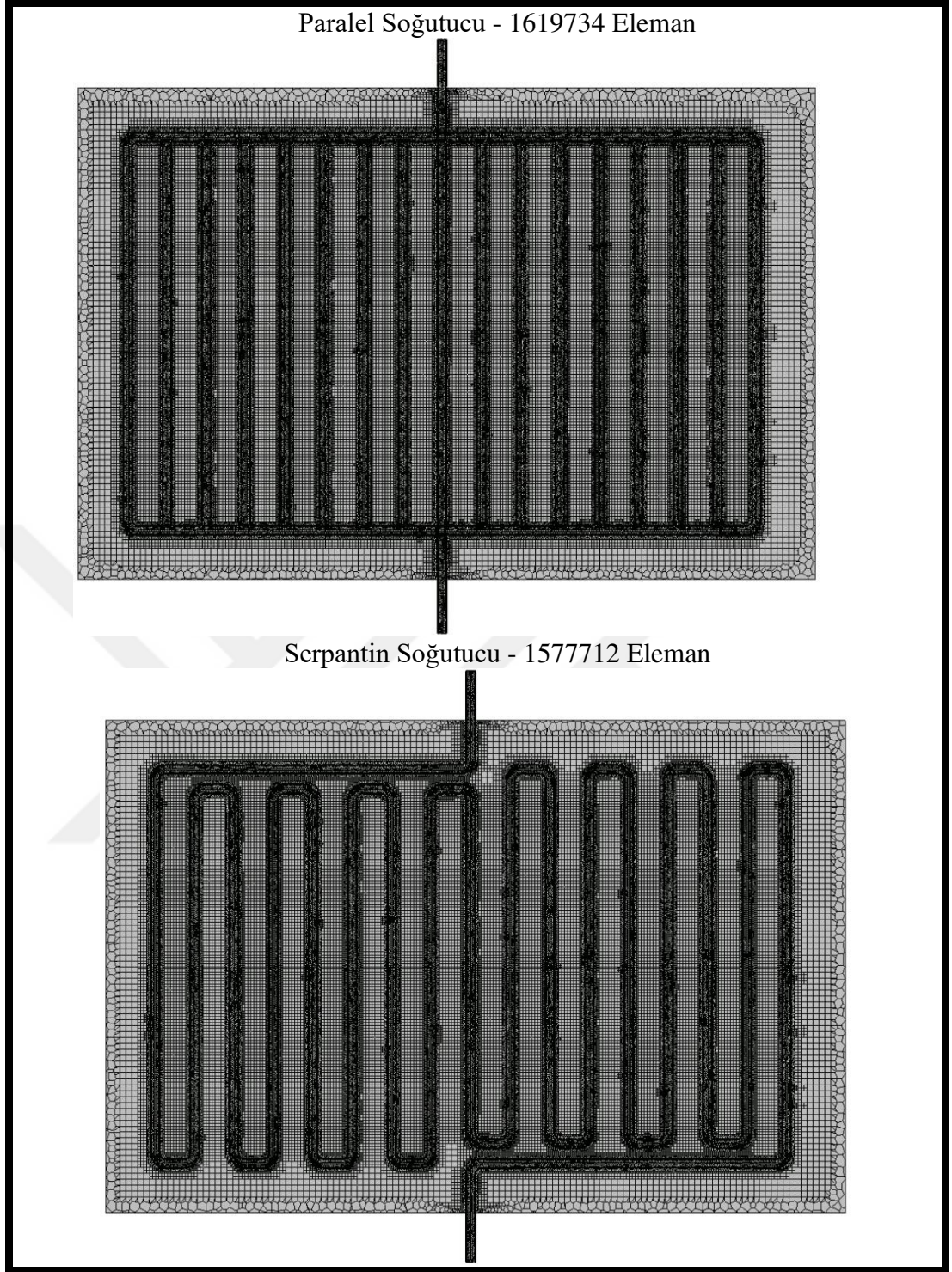


Şekil 4.3 : Paralel Soğutucu Çözüm Ağı Detay Görseli



Şekil 4.4 : Serpantin Soğutucu Çözüm Ağı Detay Görseli

Şekil 4.5’te ise eleman sayısından bağımsızlık sonrası devam edilen eleman sayısı olarak kabul edilen, paralel ve serpantin soğutucu tasarımı için eleman çözüm ağı detayı yer almaktadır.



Şekil 4.5 : Tez Uygulamasında Kullanılan Çözüm Ağı Görselleri

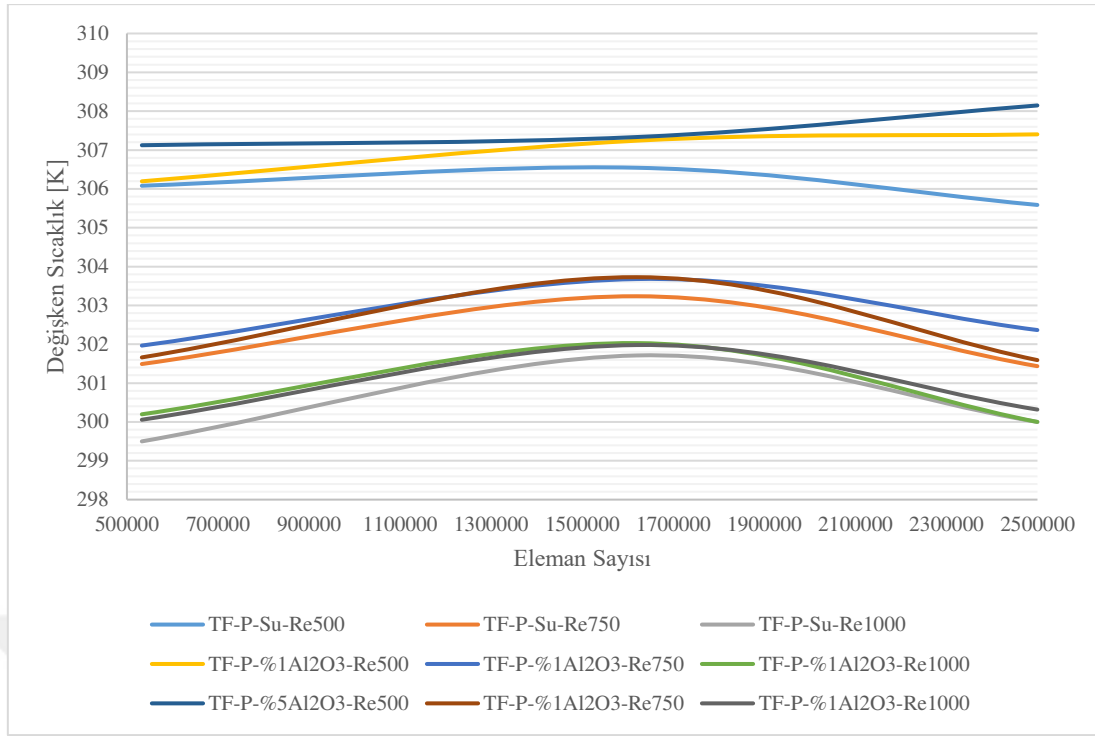
Nümerik yöntemlerde, çözüm ağından kaynaklanan hata oranını en aza indirmek için, farklı eleman sayılarında çözümleme işlemleri gerçekleştirilir. Bir veya birden fazla sonuç için bu eleman sayıları kendi aralarında kıyaslanır. Simülasyon sonucunda okunan değer veya değerlerin değişim göstermediği ya da küçük oranlarda

değişim gösterdiği minimum eleman sayısı bu sayede belirlenebilir. Böylelikle nümerik olarak, çözüm ağından bağımsızlık sağlanan eleman sayısı bulunabilir.

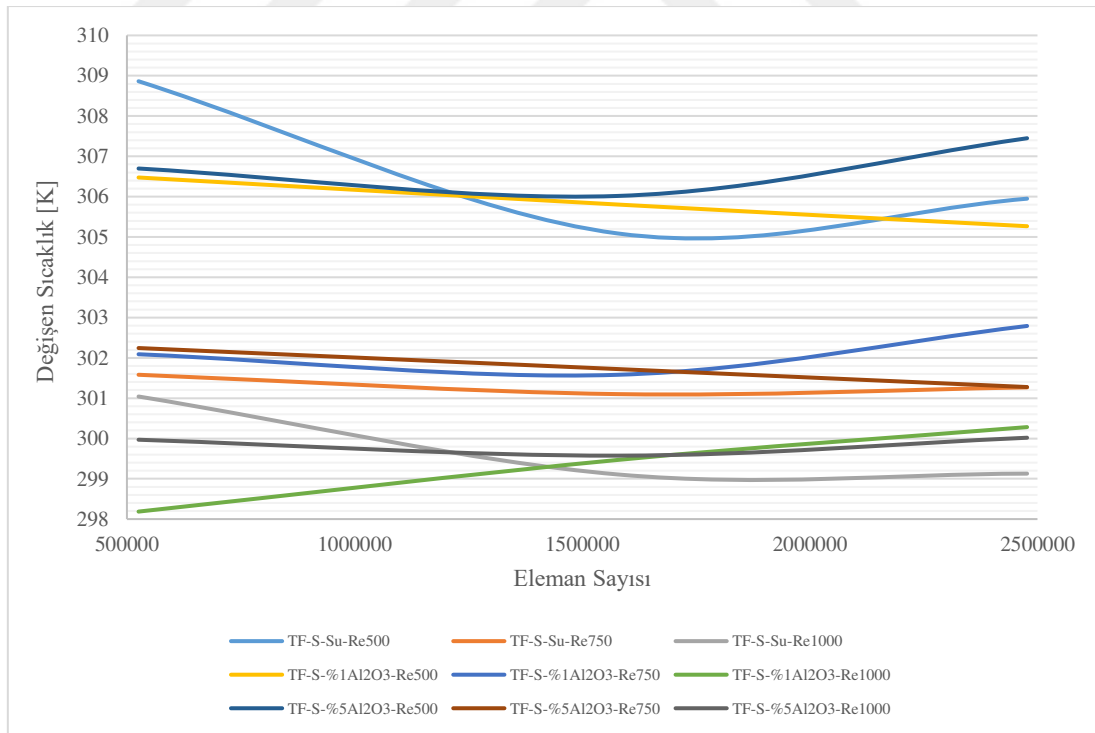
Yapılan çalışmalarda nümerik bağımsızlığı kanıtlamak için önemli bir adımdır. Bulunan bu eleman sayısı referans alınarak diğer çalışmalar devam ettirilebilir. Okunan değerler, analitik olarak hesaplanan değerler ya da referans alınan literatür çalışmaları ile kıyaslanarak bağımsızlığın elde edildiği gösterilebilir. Çözüm ağından bağımsızlık, eleman sayısı kıyaslaması ile olduğu gibi farklı çözüm ağı kriterleri ile de gerçekleştirilebilir. Node (düğüm noktası sayısı), sınır tabaka kalınlığı, sınır tabaka eleman sayısı gibi farklı kriterlerde göz önünde bulundurularak çözüm ağından bağımsızlık işlemi gerçekleştirilebilir.

Yapılan tez çalışmasında da her iki soğutucu tasarım için üç ayrı eleman sayısında analizler koşturulmuştur. Çözüm ağından bağımsızlık grafikleri, paralel soğutucu tasarımı için Şekil 4.6'da, serpantin soğutucu tasarım için de 4.7'de gösterilmiştir.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de bulunan grafikler incelendiğinde, farklı eleman sayılarında yapılan analizler sonuçların çok fazla değişmediği gözlemlenmektedir. Bu fark oranlarından sonuçlar kısmında detaylı olarak bahsedilmektedir.



Şekil 4.6 : Paralel Soğutucu Çözüm Ağından Bağımsızlık Grafiği



Şekil 4.7 : Serpantin Soğutucu Çözüm Ağından Bağımsızlık Grafiği

4.3. Başlangıç ve Sınır Şartları

Nanoakışkanların termal performansını etkileyen faktörler göz önünde bulundurularak, analiz kurgusunda birçok parametre karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Öncelikle analizler iki ayrı soğutucu tasarımı üzerinde çalıştırılmıştır. Paralel ve serpantin soğutucularında akış dağılımı farklı şekillerde sağlanarak termal performansı nasıl etkileyeceği incelenmiştir.

Farklı Reynolds sayılarında iki soğutucu geometrisi üzerinde tek faz ve multifaz yaklaşımları kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Multifaz yaklaşımda nanoakışkanın konsantrasyonunun yanında farklı çap boyutlarında modellenmesinin ısı transferine nasıl bir etki yapacağı da araştırmanın bir konusu olmuştur. Farklı tasarım soğutucular ile çalışarak akış dağılımı, maksimum sıcaklık bölgeleri gibi değişkenler incelenmiştir. Yapılan çalışmanın içeriği Tablo 4.3'te özetlenmiştir.

Tablo 4.3 : Modelleme Bilgileri

Tek Faz Modelleme						
Paralel				Serpantin		
H_2O	%1 Al_2O_3	%5 Al_2O_3	Reynolds 500, 750, 1000, 2500, 5000, 7000	H_2O	%1 Al_2O_3	%5 Al_2O_3
Multifaz Modelleme						
Mixture Model						
Paralel		Serpantin		Paralel		Serpantin
H_2O – %1 Al_2O_3		H_2O – %1 Al_2O_3		H_2O – %5 Al_2O_3		H_2O – %5 Al_2O_3
20 nm	30 nm	40 nm	Reynolds 500, 750, 1000, 2500, 5000, 7000	20 nm	30 nm	40 nm
Eulerian Model						
Paralel		Serpantin		Paralel		Serpantin
H_2O – %1 Al_2O_3		H_2O – %1 Al_2O_3		H_2O – %5 Al_2O_3		H_2O – %5 Al_2O_3
20 nm	30 nm	40 nm	Reynolds 500, 750, 1000, 2500, 5000, 7000	20 nm	30 nm	40 nm

Tek faz ve multifaz modelleme yöntemlerinde kullanılan tüm denklemler matematiksel model kısmında detaylı olarak verilmiştir.

Giriş sıcaklığı, tek faz ve multifaz modellemelerde $T_{giriş} = 293.15 \text{ K}$ olarak belirlenmiştir. Giriş bölgesinde hız sınır koşulu kullanılmış olup, malzeme özellikleri dikkate alınarak her akışkan için belirlenen Reynolds değerlerini sağlayacak hız girdileri kullanılmıştır. $V_x = 0$ ve $V_z = 0$ olmak üzere V_y (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu denklemler yer alan Re_m uygulama yapılan Reynolds değerini, μ_m uygulamada kullanılan akışkanın viskozite değerini, ρ_m uygulamada kullanılan akışkanın yoğunluğunu ve D değeri giriş çap ölçüsünü belirtmektedir.

$$V_y = \frac{Re_m \mu_m}{\rho_m D} \quad (4.1)$$

Multifaz analiz modellemesinde, iki farklı konsantrasyon oranında çalışılmıştır ve bunlar giriş bölgesinden programa tanıtılmıştır. Denklemden yer alan ϕ_0 değeri %1 ve %5 konsantrasyon değerini ifade etmektedir.

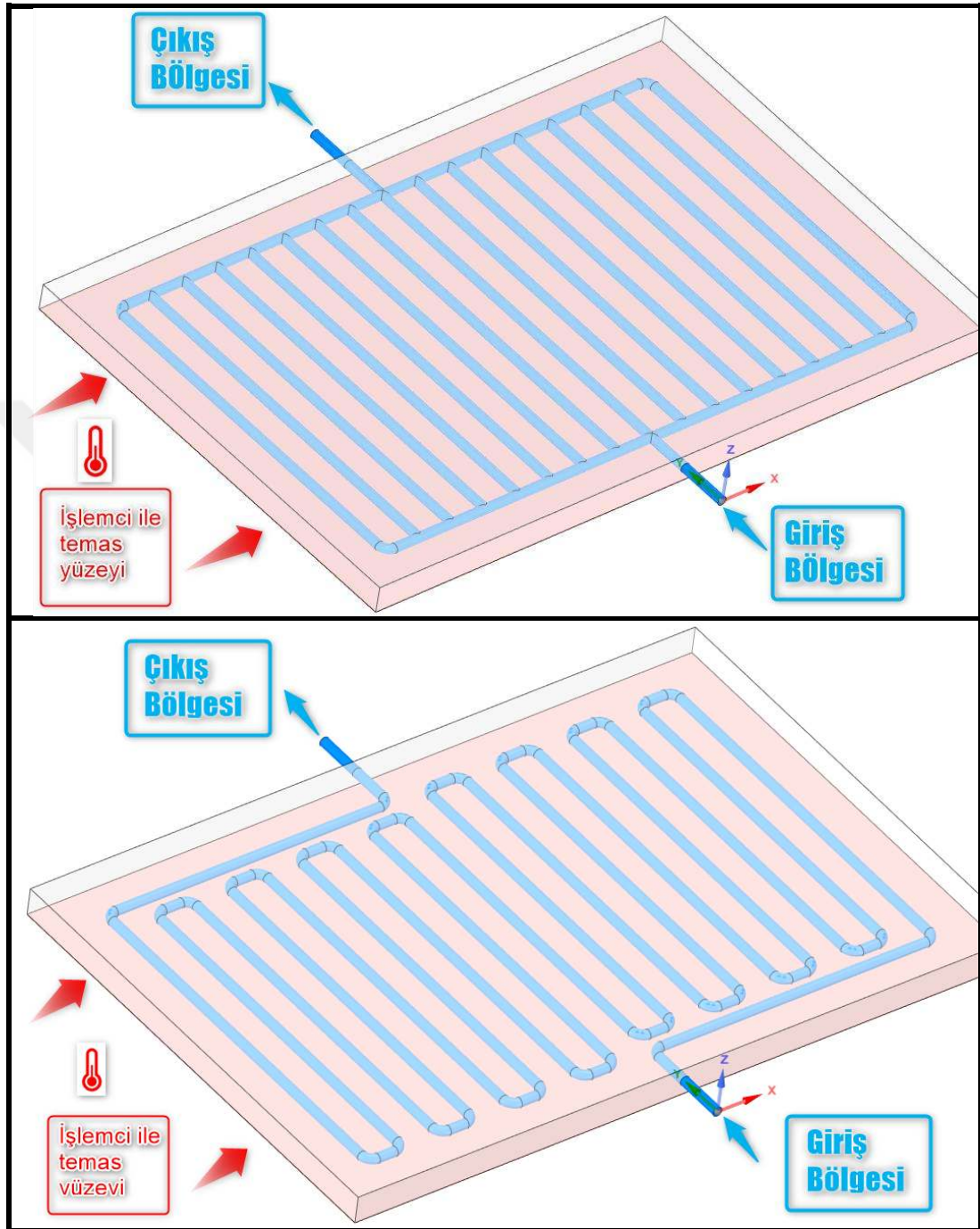
$$\phi = \phi_0 \quad (4.2)$$

Akış türbülanslı olarak modellenmiştir ve türbülans modeli SST-k omega olarak seçilmiştir. Kullanılan türbülans modelinin detayları matematiksel model kısmında belirtilmiştir. *Türbülans yoğunluğu* = 5 [%] ve *Hidrolik Çap* = 0.001 [m] olarak girilmiştir.

Çıkış bölgesi atmosfere açık olarak modellenmiştir ve $P = P_{çıkış} = 0 \text{ Pa}$ olarak tanımlanmıştır. *Türbülans yoğunluğu* = 5 [%] ve *Hidrolik Çap* = 0.001 [m] olarak girilmiştir.

Analiz kurgusu için oluşturulan soğutucu tasarımları bir işlemci üzerine yerleştirilmiş olarak modellenmiştir. Sıvı soğutma işlemi olarak kullanılacak olan bu geometrilere işlemci ile temas ettikleri yüzeyden $q = 5000 \text{ W/mK}$ ısı akısı tanımlanmıştır. Geri kalan duvarlar adyabatik $q = 0 \text{ W/mK}$ olarak modellenmiştir. Şekil 4.8'de akışkan giriş, çıkış yönlerini gösteren görsel paylaşılmıştır. Şekil 4.8'de

paralel ve serpantin soğutucu tasarıma ait modelin sınır koşulları verilmiştir. Soğutucu tasarımı bir işlemci üzerinde konumlandırılmıştır.



Şekil 4.8 : Paralel, Serpantin Soğutucuları Sınır Koşulları

Tek faz modelleme yönteminde malzeme olarak H_2O , %1 ve %5 olmak üzere farklı konsantrasyon oranlarında nanoakışkan Al_2O_3 kullanılmıştır. Multifaz

modelleme de ise H_2O ve farklı konsantrasyon oranlarında ve farklı boyutlarda Al_2O_3 nanoakışkanı kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin termal özellikleri Tablo 4.4'te belirtilmiştir [47].

Tablo 4.4 : Malzeme Özellikleri

Akışkan	ρ [kg/m^3]	C_p [J/kgK]	k [W/mK]	μ [kg/ms]
H_2O	998.2	4182	0.6	0.0010030
% 1 Al_2O_3	1027.5022	3948.45616	0.62226	0.0010021
% 5 Al_2O_3	1146.3910	3503.02416	0.69582	0.0111090
Al_2O_3	3970	765	40	1.72e-05

Tez uygulamasında, 1979 yılında Prof. Brian Spalding'in öğrencisi Suhas Patankar tarafından tanıtılan, Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için oldukça yaygın kullanılan SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) çözüm metodu kullanılmıştır. SIMPLE çözüm metodu basınç ve momentum denklemlerini ayrı matrisler içerisinde çözüme alır ve birçok HAD uygulaması için uygun bir çözüm metodudur. Yapılan denemeler sonucunda tek faz ve multifaz analizlerinde yakınsama SIMPLE algoritmasında daha az iterasyon sayısında gerçekleşmiştir ve analiz koşma aşamasında bilgisayarda tuttuğu yer Coupled şemasına göre daha az olmuştur. Bu sebeple yapılan tüm uygulamaları çözümlemek için, uygunluk ve performans açısından SIMPLE çözüm metodu tercih edilmiştir. [48] Basınç ayrıklaştırılması için PRESTO! ve diğer ayrıklaştırma şemaları için Birinci Dereceden Ayrıklaştırma seçimi yapılmıştır.

Bir analizin yakınsamasını etkileyen en önemli faktörlerden biri başlangıç sınır şartı atamasıdır. Fluent içerisinde temelde 3 adet başlangıç sınır atama yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; Standart, Hibrit ve FMG olarak adlandırılır. Yapılan çalışmalarda tek faz uygulamalarında Hibrit, multifaz uygulamalarında ise Standart başlangıç sınır şartı seçilmiştir. Bu seçimin sebebi Standart başlangıç sınır şartı ile bir bölgede bulunan ayrı bir fazı başlangıç şartı için direkt girişte kullanılan değerden atamasını gerçekleştirebilmektedir. Multifaz uygulamalarda Standart başlangıç sınır şartı ataması bu sebeple tercih edilmiştir. Tek faz uygulamalar için ise akış için ortalama bir değer ataması ile başlamak analiz gidişatı için yeterli görülmüştür.

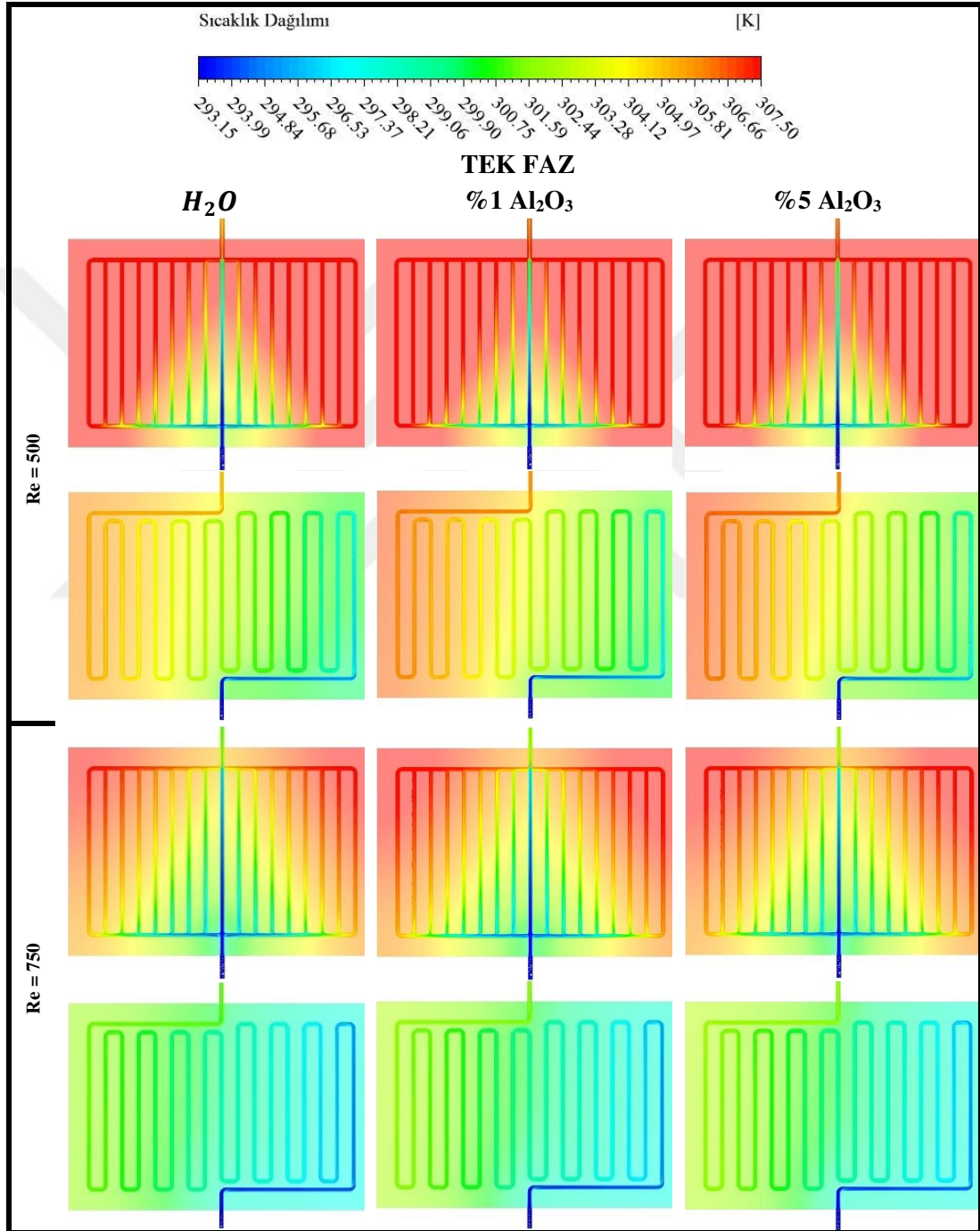
Gerçekleştirilen uygulamalarda çözüm kontrol ayarları ; Under-Relaxtion Factor (URF) kısmen Türkçeleştirilmiş hali ile analizi rahatlatma faktörleri olarak Tablo 4.5’te detaylandırılmıştır.

Tablo 4.5 : Çözüm Kontrol Detayları

URF	Tek Faz	Multifaz	
		Mixture	Eulerian
Basınç	0.3	0.3	0.3
Yoğunluk	1	1	1
Cisim Kuvveti	1	1	1
Momentum	0.7	0.7	0.7
Kayma Hızı	-	0.1	-
Hacimsel Kesir	-	0.5	0.5
Granül Sıcaklığı	-	0.2	0.2
Türbülans K.E	0.8	0.8	0.8
Spesific D.O	0.8	0.8	0.8
Türbülans Viskozitesi	1	1	1
Enerji	1	1	1

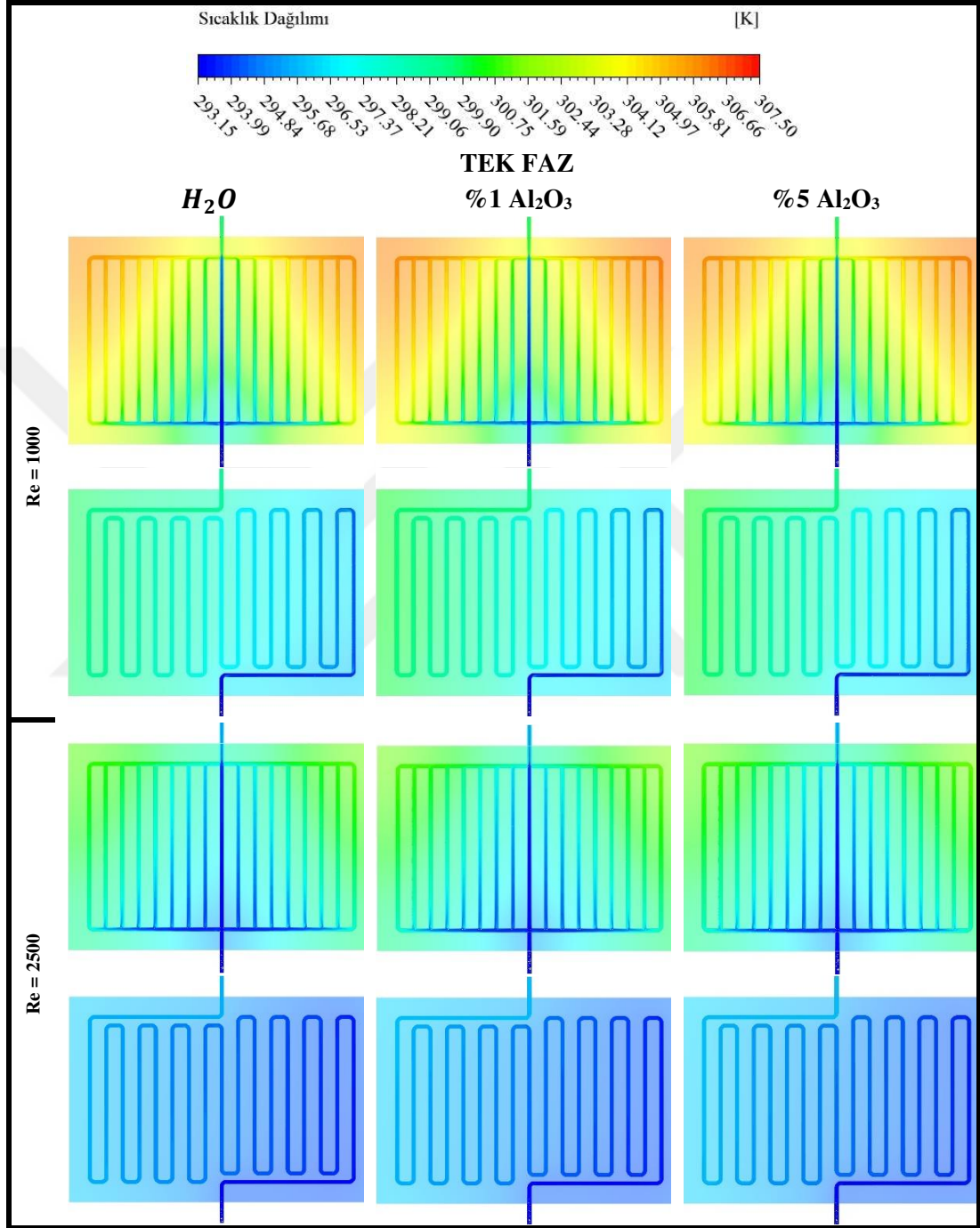
4.4. Sonuçlar

Şekil 4.9 ‘da verilen kontürde, tek faz analiz için, serpantin soğutucu tasarımında sıcaklık dağılımının daha düzenli olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi serpantin soğutucunun akışkanı daha iyi şekilde yönlendirebilen tasarıma sahip olmasıdır.



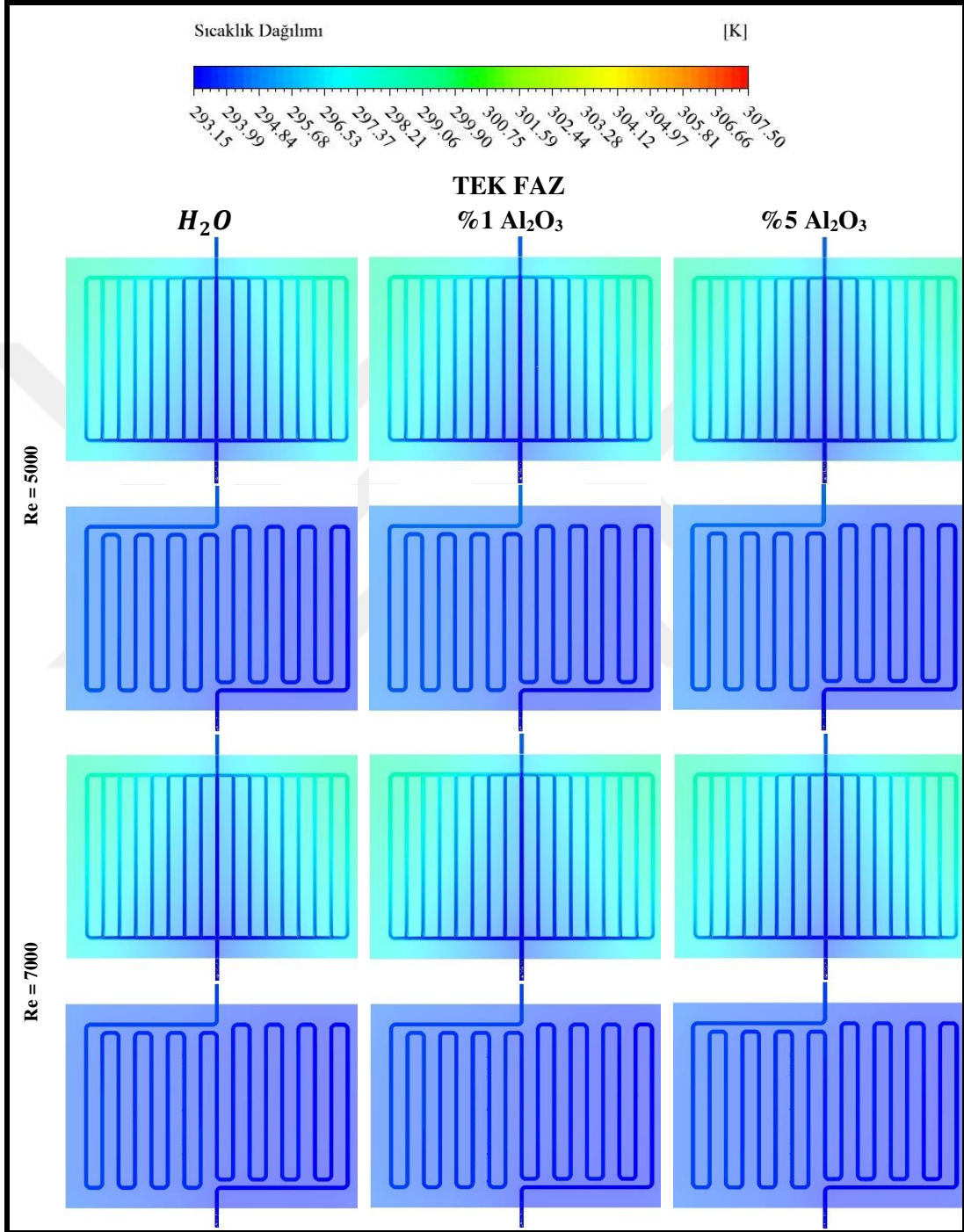
Şekil 4.9 : Tek Faz Analiz Sıcaklık Kontürü, Re=500 ve Re=750

Şekil 4.10 incelendiğinde ise, tek faz analiz kurgusu için paralel ve serpantin geometrilerinin akış karakteristiklerindeki farklılığın sıcaklık dağılımına etkisi gözlemlenmektedir. Serpantin soğutucuda sıcaklıklar daha düşüktür.



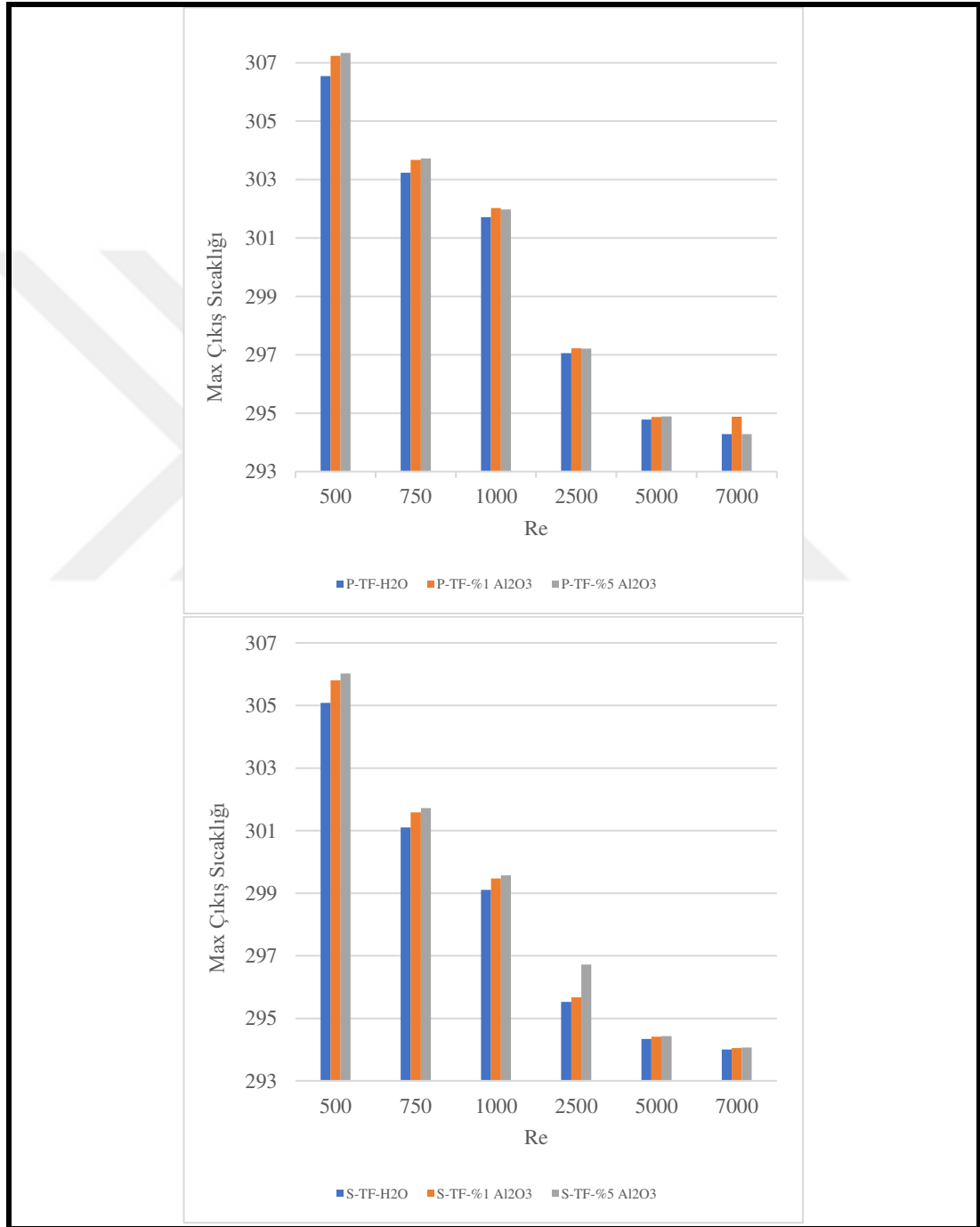
Şekil 4.10 : Tek Faz Analiz Sıcaklık Kontürü, Re=1000 ve Re=2500

Reynolds sayısındaki artış, akış dağılımlarını etkilediği gibi sıcaklık dağılımlarını da etkilenmiştir. Reynolds sayısı arttıkça sıcaklık değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11’de bu durum gösterilmiştir.



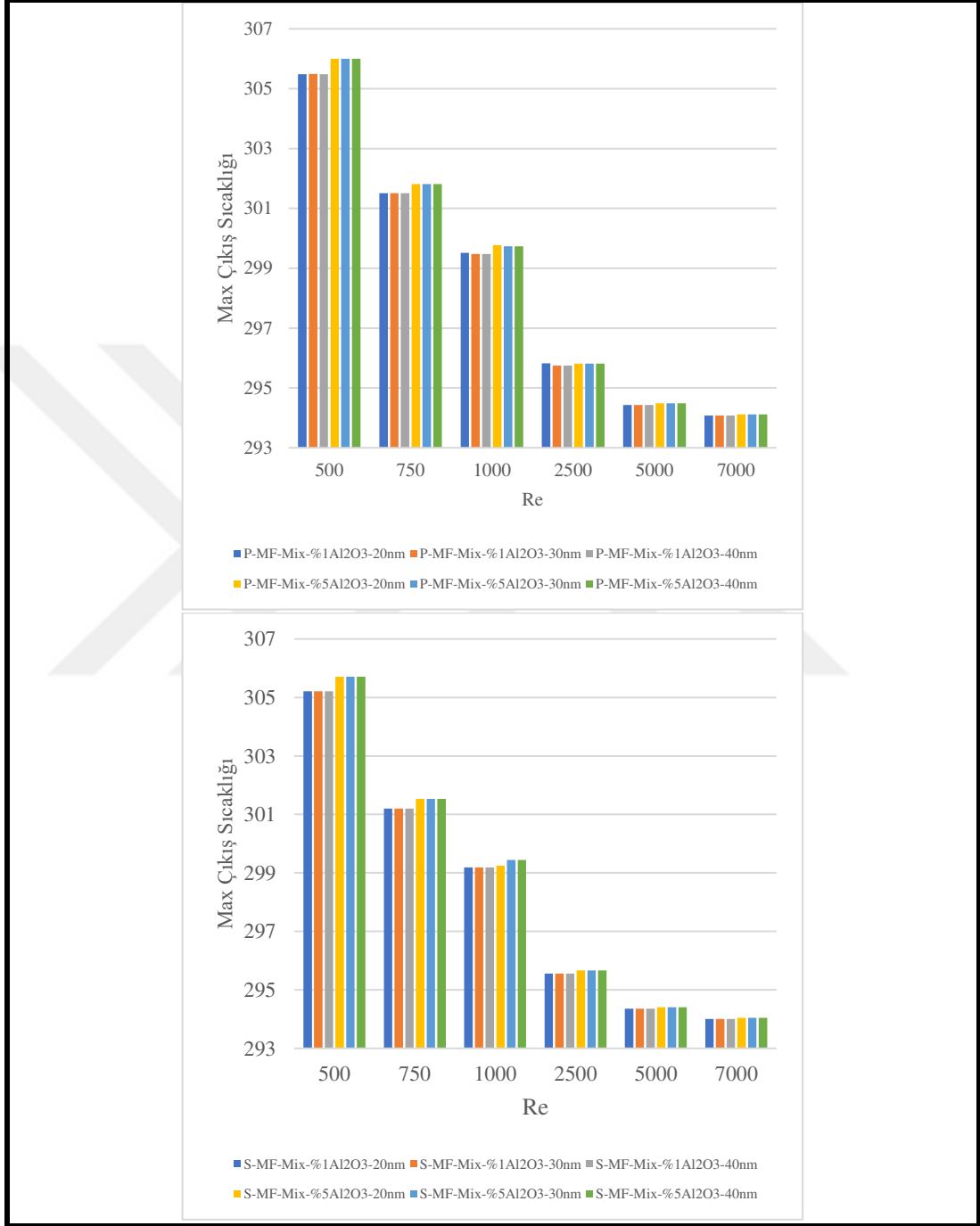
Şekil 4.11 : Tek Faz Analiz Sıcaklık Kontürü, Re=5000 ve Re=7000

Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14’de paralel ve serpantin geometrileri için yapılan analiz sonuçlarından çıkış yüzeyindeki maksimum sıcaklık değeri kıyaslanmıştır. Reynolds sayısının artışı tasarımların her ikisinde de okunan sıcaklık değerinin daha düşük okunmasını sağlamıştır. Ayrıca akışı doğru bir şekilde yönlendirilmesi sayesinde serpantin soğutucuda okunan sıcaklık değerleri daha düşük olmuştur.

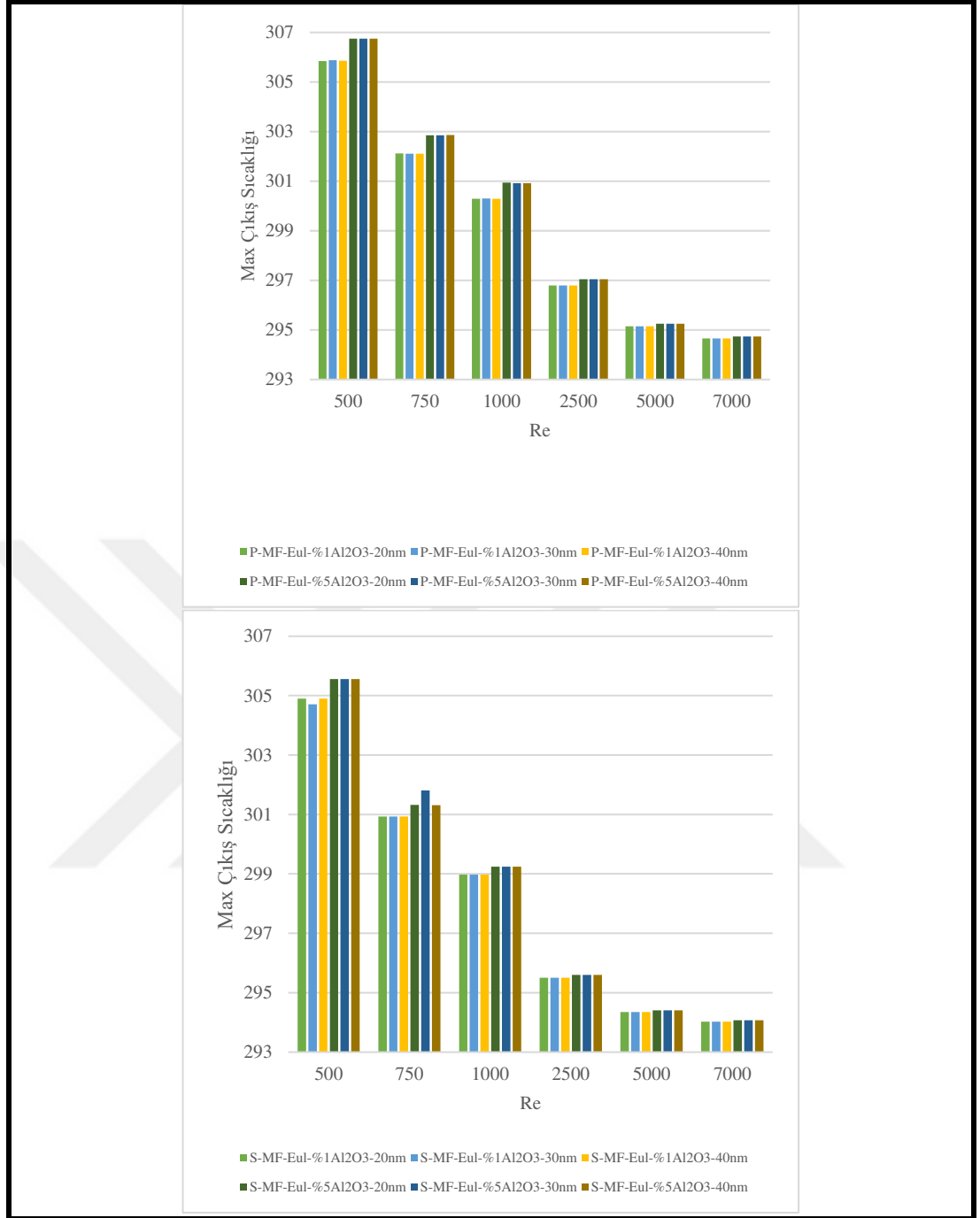


Şekil 4.12 : Tek Faz Paralel ve Serpantin Soğutucuları için Çıkış Sıcaklık Grafiği

Multifaz olarak gerçekleştirilen çalışmalarda partikül boyutunun sıcaklık artışına etkisi çok fazla gözlemlenememiştir. Bu durumun yakın partikül boyutu seçimi ile ilgili olabileceği düşünülmektedir.

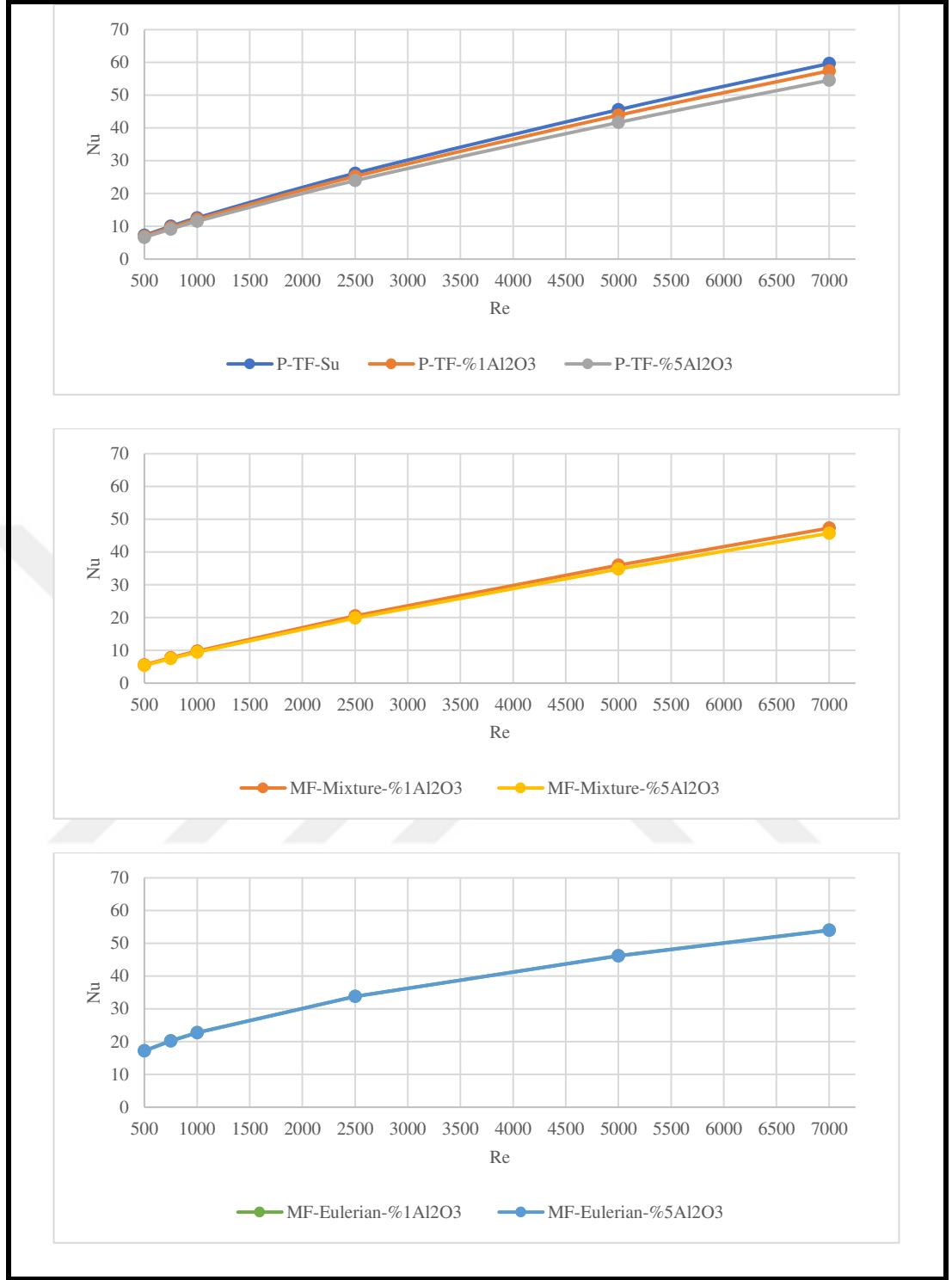


Şekil 4.13 : Multifaz-Mixture Model Paralel ve Serpantin Soğutucuları için Çıkış Sıcaklık Grafiği



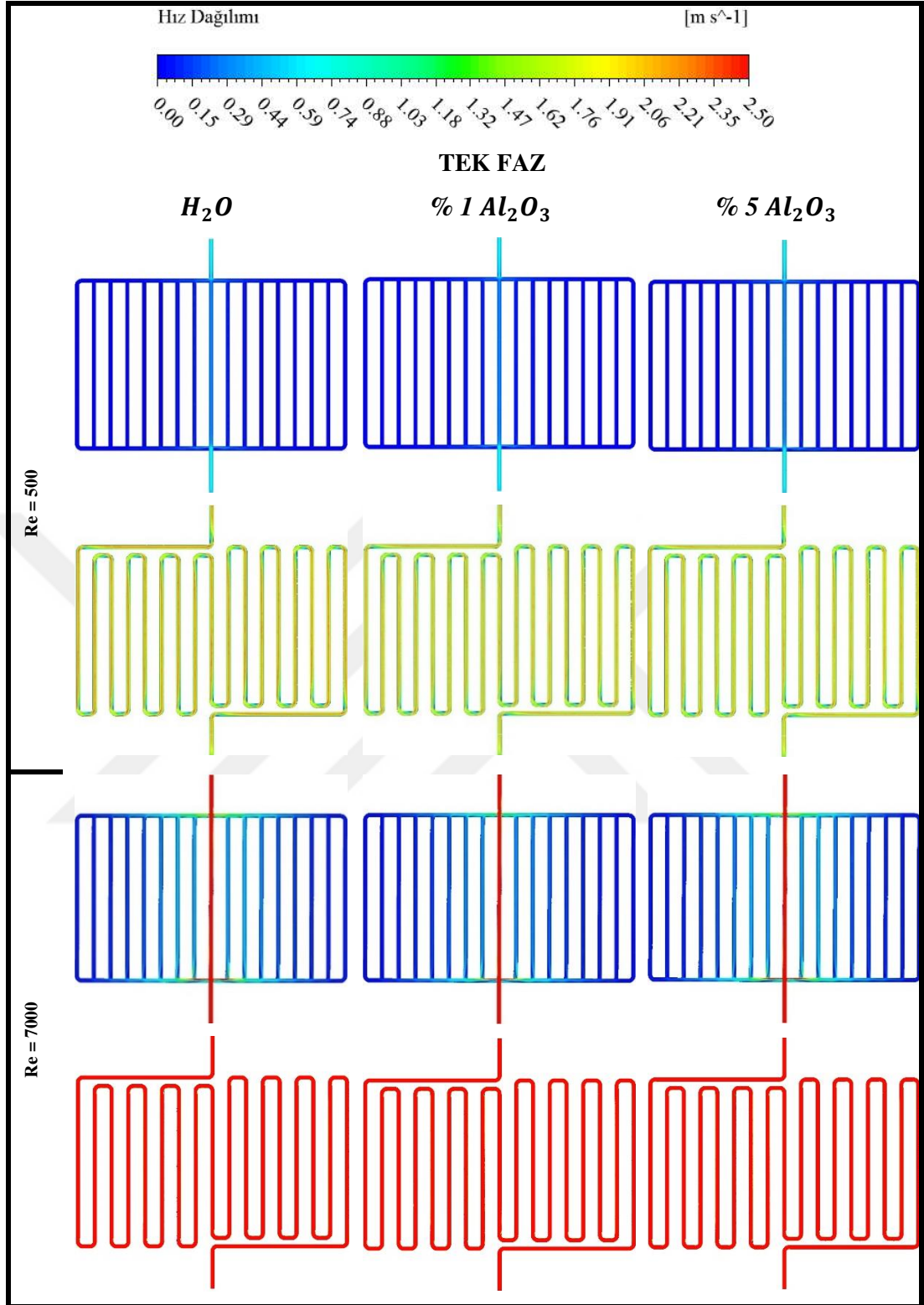
Şekil 4.14 : Multiaz-Eulerian Model Paralel ve Serpantin Soğutucuları için Çıkış Sıcaklık Grafiği

Şekil 4.15’te tek faz ve multifaz (Mixture – Eulerian Model) analizler için Nusselt değerlerini içeren grafikler paylaşılmıştır. Tek faz ve multifaz analiz sonuçlarında okunan Nu değerinin oldukça yakın olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 4.15 : Tek faz ve Multifaz Analizler için Nu-Re Grafikleri

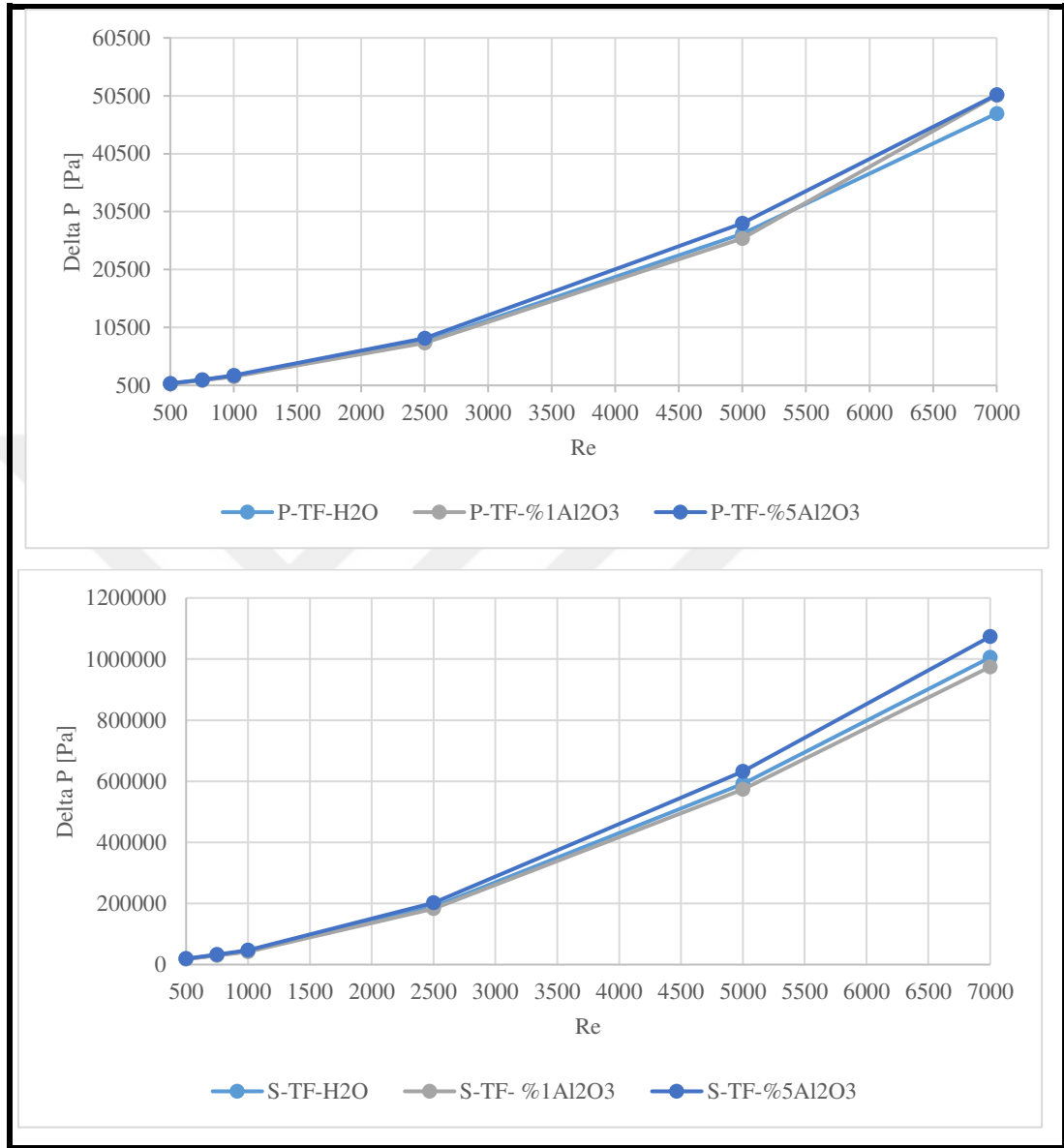
Şekil 4.16’te serpantin soğutucu tasarımıındaki akış dağılımı paralel tasarıma göre çok daha efektif olduğu gözlemlenmektedir. Geometrik tasarımdan dolayı, tüm sistemde akışkanı gezdirerek, sıcaklık düşüşünü sağlamıştır.



Şekil 4.16 : Tek Faz Analiz Hız Kontürü, Re=500 ve Re=7000

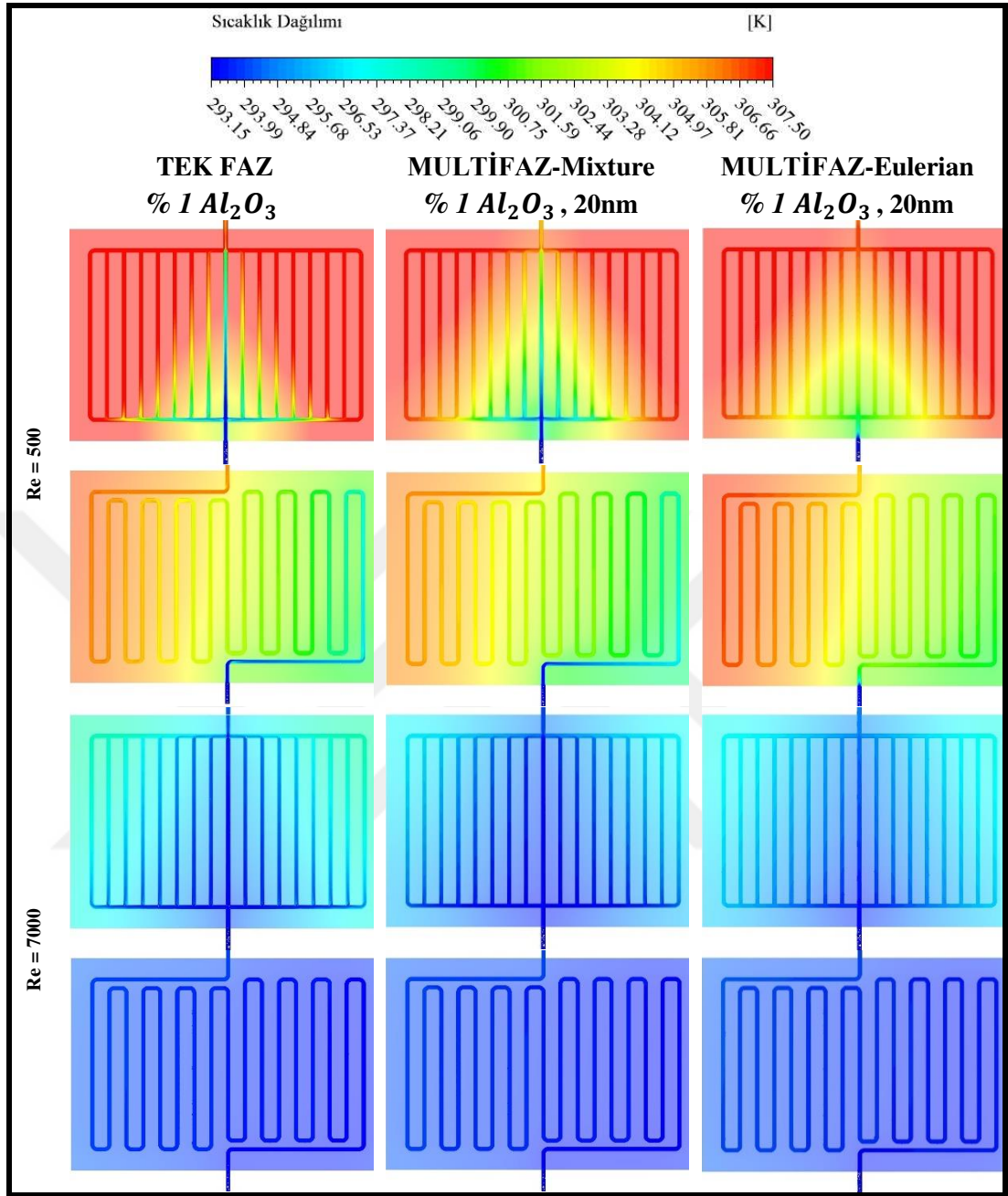
Şekil 4.17’de farklı tasarımlar olan paralel ve serpantin soğutucular için basınç düşüş grafiği paylaşılmıştır. Tasarımdan kaynaklı olarak serpantin soğutucuda basınç farkı paralel soğutucuya göre çok daha yüksektir. Bu durum sıcaklık dağılımını da

etkilemiştir ve tasarımlara bakıldığında akış serpantin soğutucuda çok daha verimli yönlendirilebilmiştir.

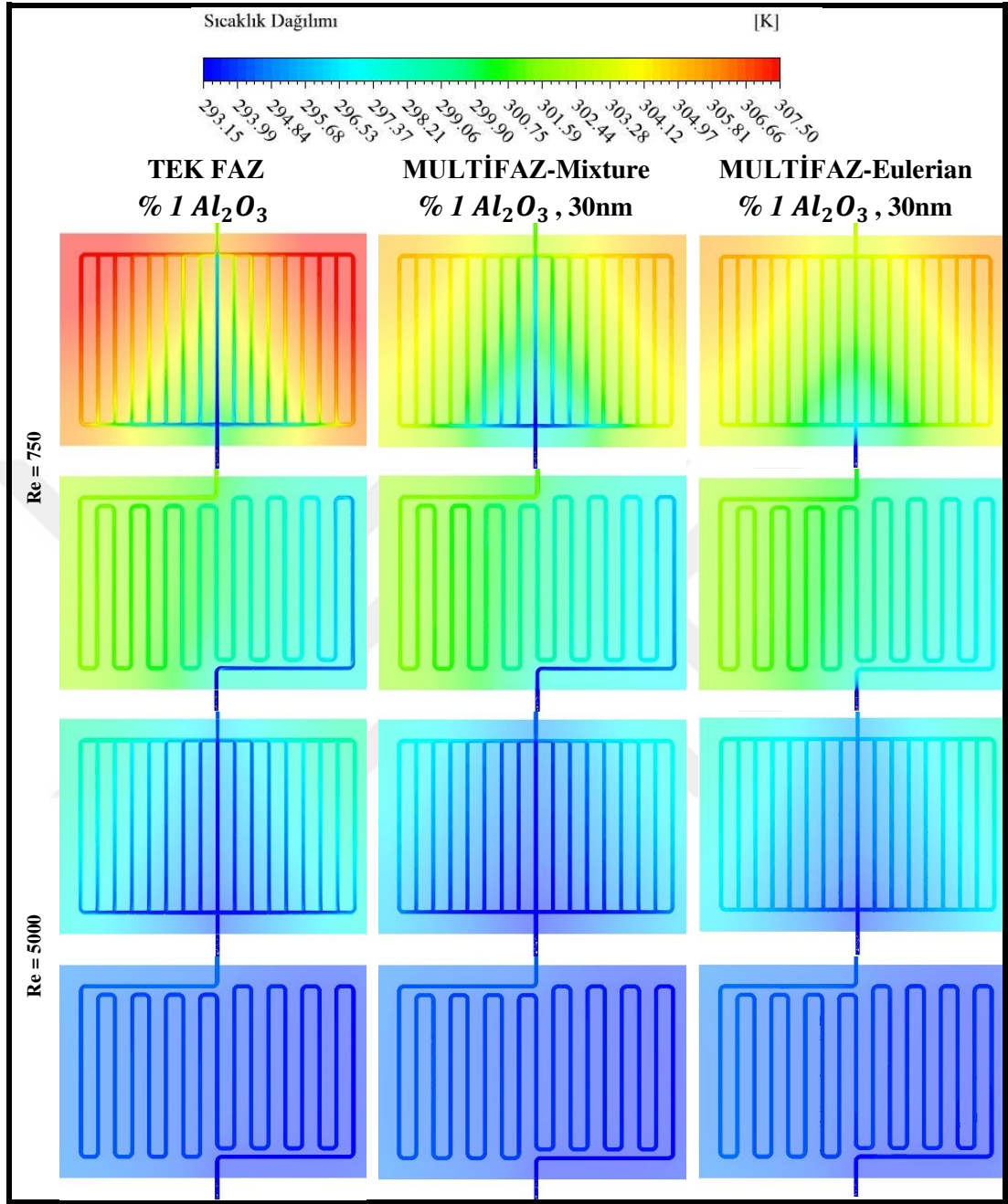


Şekil 4.17 : Paralel ve Serpantin Soğutucular için Tek Faz ΔP Grafikleri

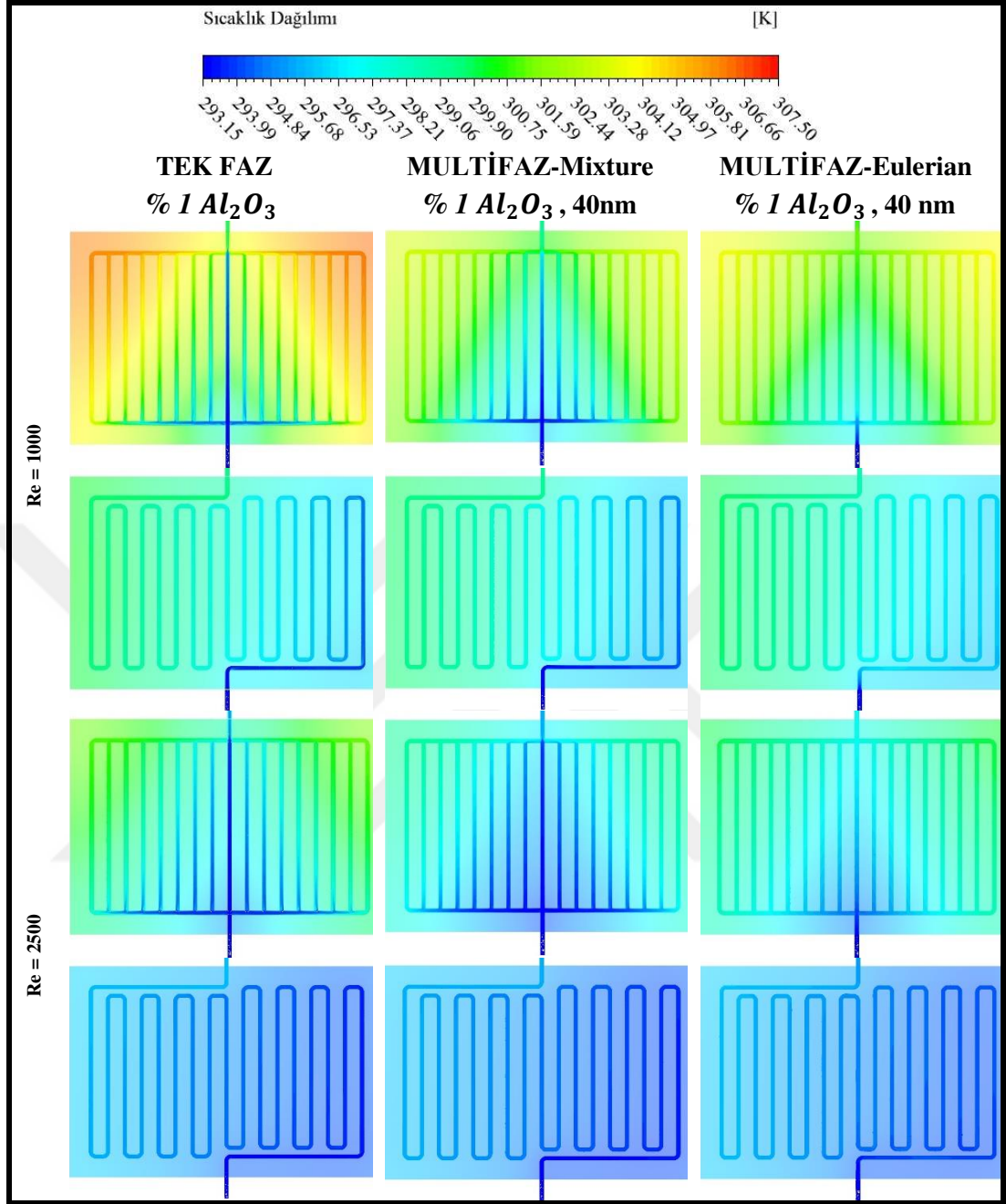
Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de, tek faz ve multifaz modelleme yöntemleri % 1 Al_2O_3 konsantrasyon değerinde kıyaslandığında, sıcaklık dağılımlarının oldukça benzer olduğu gözlemlenmektedir. Farklı boyutlarda nanopartikül kullanımının sıcaklık dağılımına etkisi incelenmek istemiştir fakat yakın değerler ile çalıştığı için çok net bir fark gözlemlenememiştir.



Şekil 4.18 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=500 ve Re=7000 - % 1 Al_2O_3 Oranı

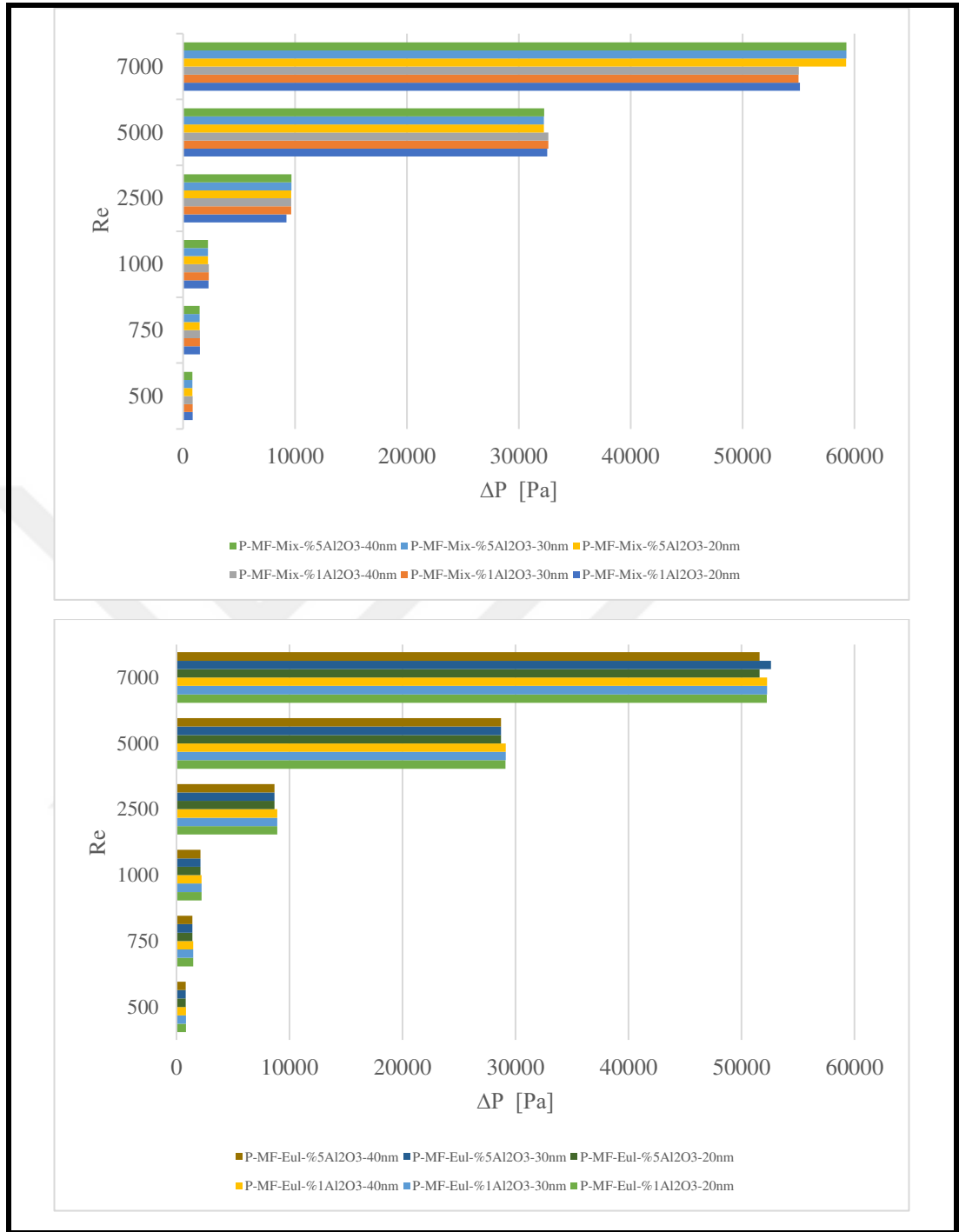


Şekil 4.19 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=750 ve Re=5000 - % 1 Al_2O_3 Oranı

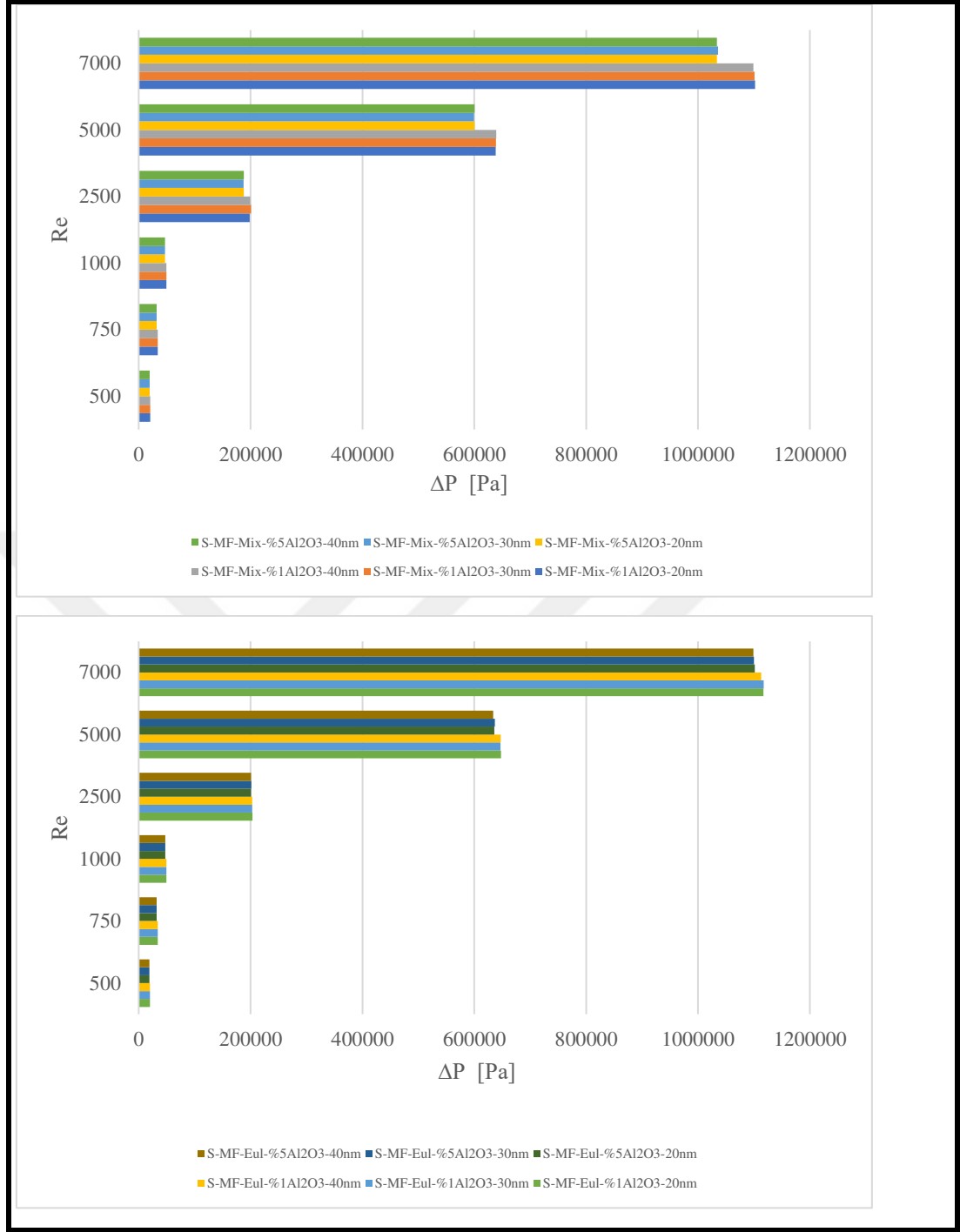


Şekil 4.20 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=1000 ve Re=2500 - % 1 Al_2O_3 Oranı

Tek faz modellemede olduğu gibi multifaz modellemede de paralel geometride basınç düşüş değerleri serpantin geometriye göre daha düşük olmuştur. Bunun sebebi akış dağılımını etkileyen tasarımıdır. Serpantin soğutucu tasarımı akışı daha iyi yönlendirebilmiştir ve Reynolds sayısındaki artışın buna katkısı olmuştur. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de bu durum detaylı olarak gösterilmiştir.



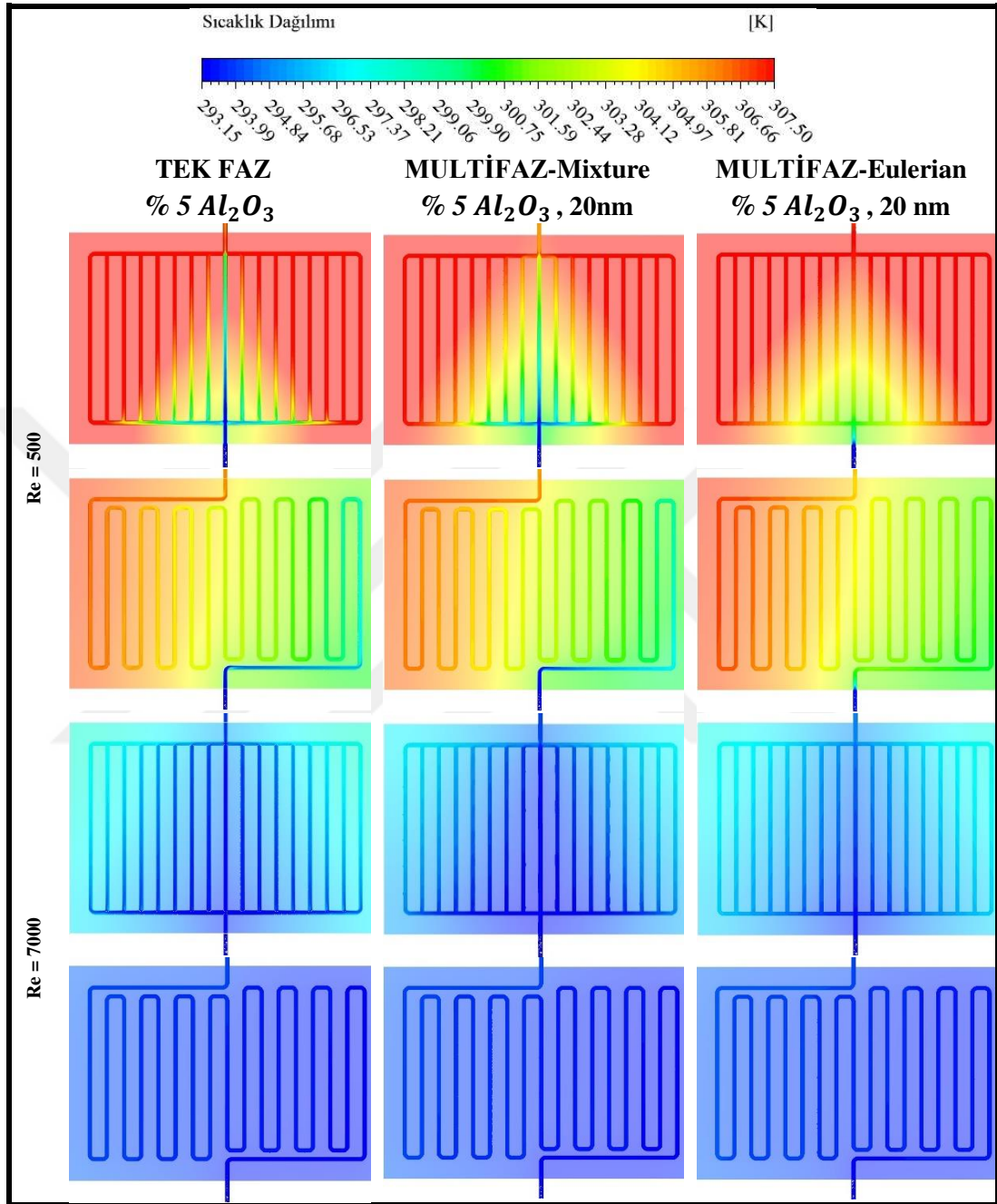
Şekil 4.21 : Paralel Soğutucu – Multifaz Analiz Basınç Farkı Grafikleri



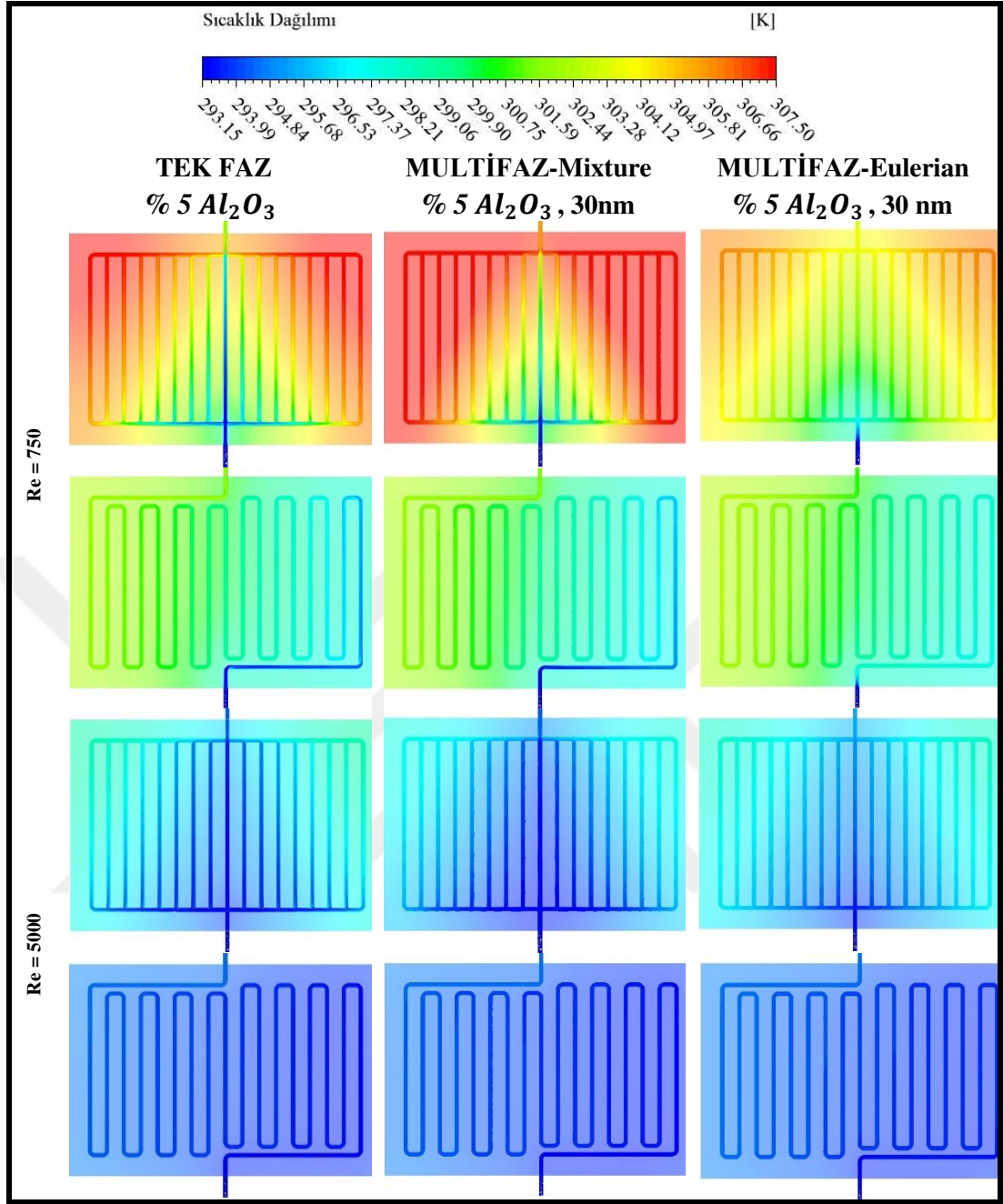
Şekil 4.22 : Serpantin Soğutucu – Multifaz Analiz Basınç Farkı Grafikleri

Yine, tek faz ve multifaz modelleme yöntemleri % 5 Al_2O_3 konsantrasyon değerinde kıyaslandığında, tek ve multifaz modellemede sıcaklık dağılımlarının oldukça benzer olduğu gözlemlenmektedir. (Şekil 4.23-Şekil 4.24 ve Şekil 4.25). Partikül boyutlarındaki değişimin etkisinin gözlemlenebilmesi için daha yüksek

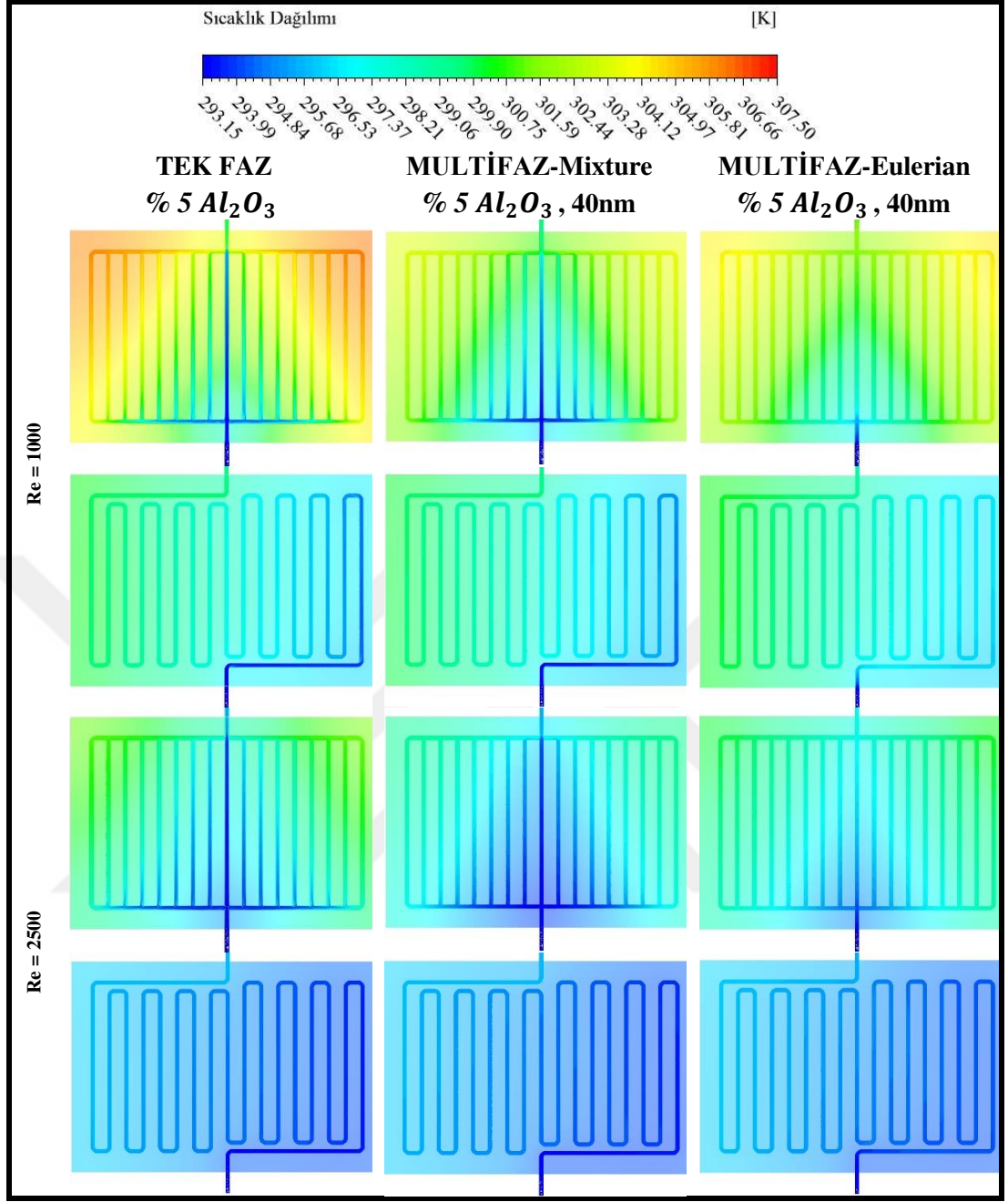
partikül boyutunda çalışmalar yapılabilir fakat belirli oranın üzeri gerçek hayatta çökme gibi durumları meydana getirdiği için tercih edilmemiştir.



Şekil 4.23 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=500 ve Re=7000 - % 5 Al_2O_3 Oranı



Şekil 4.24 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=750 ve Re=5000 - % 5 Al_2O_3 Oranı



Şekil 4.25 : Tek faz ve Multifaz (Mixture-Eulerian) Model Sıcaklık Kontürü, Re=1000 ve Re=2500 - % 5 Al_2O_3 Oranı

Tablo 4.6’da tek faz modelleme de H_2O ve %1 Al_2O_3 ve %5 Al_2O_3 kullanımı ve Tablo 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10’da ise multifaz modelleme yöntemlerinden Mixture ve Eulerian model için farklı partikül çaplarında elde edilen çıkış maksimum sıcaklık değerleri arasındaki farklar verilmiştir. Son olarak Tablo 4.11 ve 4.12’de tek faz ve multifaz modelleme yöntemlerinden Mixture ve Eulerian model 20 nm partikül boyutu için elde edilen çıkış maksimum sıcaklık değerleri arasındaki fark değerleri verilmiştir.

Tablo 4.6 : Tek Faz Fark Tablosu

		Max. Sıcaklık	% Fark
Paralel Soğutucu Tasarımı	Re = 500	H ₂ O	306.54312
		% 1 Al ₂ O ₃	307.24057
		% 5 Al ₂ O ₃	307.33377
	Re = 750	H ₂ O	303.23544
		% 1 Al ₂ O ₃	303.67816
		% 5 Al ₂ O ₃	303.72601
	Re = 1000	H ₂ O	297.05300
		% 1 Al ₂ O ₃	302.02902
		% 5 Al ₂ O ₃	301.97934
	Re = 2500	H ₂ O	297.05300
		% 1 Al ₂ O ₃	297.22000
		% 5 Al ₂ O ₃	297.20900
	Re = 5000	H ₂ O	294.78700
		% 1 Al ₂ O ₃	294.87100
		% 5 Al ₂ O ₃	294.88500
	Re = 7000	H ₂ O	294.28600
		% 1 Al ₂ O ₃	294.88300
		% 5 Al ₂ O ₃	294.28600
Serpantin Soğutucu Tasarımı	Re = 500	H ₂ O	305.08740
		% 1 Al ₂ O ₃	305.80414
		% 5 Al ₂ O ₃	306.01750
	Re = 750	H ₂ O	301.10110
		% 1 Al ₂ O ₃	301.57986
		% 5 Al ₂ O ₃	301.72240
	Re = 1000	H ₂ O	299.10822
		% 1 Al ₂ O ₃	299.46732
		% 5 Al ₂ O ₃	299.57430
	Re = 2500	H ₂ O	295.52900
		% 1 Al ₂ O ₃	295.67200
		% 5 Al ₂ O ₃	296.71600
	Re = 5000	H ₂ O	294.33700
		% 1 Al ₂ O ₃	294.40900
		% 5 Al ₂ O ₃	294.43000
	Re = 7000	H ₂ O	293.99900
		% 1 Al ₂ O ₃	294.05000
		% 5 Al ₂ O ₃	294.06500

Tablo 4.7 : Multifaz Mixture Model % 1 Al_2O_3 Fark Tablosu

		Max. Sıcaklık	% Fark
Paralel Soğutucu Tasarımı	Re = 500	20 nm	305.48200
		30 nm	305.49700
		40 nm	305.48200
	Re = 750	20 nm	301.50540
		30 nm	301.50490
		40 nm	301.50485
	Re = 1000	20 nm	299.51868
		30 nm	299.47668
		40 nm	299.47772
	Re = 2500	20 nm	295.81900
		30 nm	295.74900
		40 nm	295.74700
	Re = 5000	20 nm	294.43300
		30 nm	294.43200
		40 nm	294.43200
	Re = 7000	20 nm	294.07900
		30 nm	294.07900
		40 nm	294.07900
Serpantin Soğutucu Tasarımı	Re = 500	20 nm	305.20764
		30 nm	305.20764
		40 nm	305.2076
	Re = 750	20 nm	301.19919
		30 nm	301.19913
		40 nm	301.19913
	Re = 1000	20 nm	299.18958
		30 nm	299.18942
		40 nm	299.18942
	Re = 2500	20 nm	295.56100
		30 nm	295.56200
		40 nm	295.56100
	Re = 5000	20 nm	294.35300
		30 nm	294.35300
		40 nm	294.35300
	Re = 7000	20 nm	294.00900
		30 nm	294.00900
		40 nm	294.00900

Tablo 4.8 : Multifaz Mixture Model % 5 Al_2O_3 Fark Tablosu

		Max. Sıcaklık	% Fark
Paralel Soğutucu Tasarımı	Re = 500	20 nm	305.99753
		30 nm	305.99747
		40 nm	305.99731
	Re = 750	20 nm	301.81152
		30 nm	301.81152
		40 nm	301.81152
	Re = 1000	20 nm	299.77124
		30 nm	299.73273
		40 nm	299.73273
	Re = 2500	20 nm	295.81200
		30 nm	295.81200
		40 nm	295.81200
	Re = 5000	20 nm	294.49200
		30 nm	294.49200
		40 nm	294.49200
	Re = 7000	20 nm	294.11100
		30 nm	294.11100
		40 nm	294.11100
Serpantin Soğutucu Tasarımı	Re = 500	20 nm	305.71222
		30 nm	305.71234
		40 nm	305.71213
	Re = 750	20 nm	301.53500
		30 nm	301.53497
		40 nm	301.53500
	Re = 1000	20 nm	299.24530
		30 nm	299.44230
		40 nm	299.44226
	Re = 2500	20 nm	295.66300
		30 nm	295.66300
		40 nm	295.66300
	Re = 5000	20 nm	294.40400
		30 nm	294.40400
		40 nm	294.40400
	Re = 7000	20 nm	294.04500
		30 nm	294.04500
		40 nm	294.04500

Tablo 4.9 : Multifaz Eulerian Model % 1 Al_2O_3 Fark Tablosu

		Max. Sıcaklık	% Fark
Paralel Soğutucu Tasarımı	Re = 500	20 nm	305.85022
		30 nm	305.87418
		40 nm	305.86197
	Re = 750	20 nm	302.11377
		30 nm	302.11099
		40 nm	302.11160
	Re = 1000	20 nm	300.29089
		30 nm	300.29650
		40 nm	300.29610
	Re = 2500	20 nm	296.79000
		30 nm	296.78900
		40 nm	296.79000
	Re = 5000	20 nm	295.14600
		30 nm	295.14600
		40 nm	295.14500
	Re = 7000	20 nm	294.65100
		30 nm	294.65200
		40 nm	294.65100
Serpantin Soğutucu Tasarımı	Re = 500	20 nm	304.89539
		30 nm	304.71280
		40 nm	304.89536
	Re = 750	20 nm	300.93360
		30 nm	300.93362
		40 nm	300.93362
	Re = 1000	20 nm	298.97366
		30 nm	298.97367
		40 nm	298.97370
	Re = 2500	20 nm	295.50400
		30 nm	295.50300
		40 nm	295.50300
	Re = 5000	20 nm	294.34600
		30 nm	294.34600
		40 nm	294.34600
	Re = 7000	20 nm	294.02500
		30 nm	294.02500
		40 nm	294.02500

Tablo 4.10 : Multifaz Eulerian Model % 5 Al_2O_3 Fark Tablosu

		Max. Sıcaklık	% Fark
Paralel Soğutucu Tasarımı	Re = 500	20 nm	306.74860
		30 nm	306.75305
		40 nm	306.74622
	Re = 750	20 nm	302.85266
		30 nm	302.85620
		40 nm	302.85870
	Re = 1000	20 nm	300.94748
		30 nm	300.91574
		40 nm	300.92056
	Re = 2500	20 nm	297.04600
		30 nm	297.04300
		40 nm	297.04300
	Re = 5000	20 nm	295.25300
		30 nm	295.25200
		40 nm	295.25200
	Re = 7000	20 nm	294.73300
		30 nm	294.73200
		40 nm	294.73300
Serpantin Soğutucu Tasarımı	Re = 500	20 nm	305.55948
		30 nm	305.55948
		40 nm	305.55948
	Re = 750	20 nm	301.32022
		30 nm	301.81310
		40 nm	301.31022
	Re = 1000	20 nm	299.23930
		30 nm	299.23940
		40 nm	299.23940
	Re = 2500	20 nm	295.59800
		30 nm	295.59800
		40 nm	295.59800
	Re = 5000	20 nm	294.40700
		30 nm	294.40700
		40 nm	294.40700
	Re = 7000	20 nm	294.07200
		30 nm	294.07200
		40 nm	294.07200

Tablo 4.11 : Tek Faz-Multifaz Mixture Model 20 nm Partikül Boyutu Fark Tablosu

		Max. Sıcaklık	% Fark
Paralel Soğutucu Tasarımı	Re = 500	TF-H ₂ O	306.54312
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	305.48200
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	305.99753
	Re = 750	TF-H ₂ O	303.23544
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	301.5054
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	301.81152
	Re = 1000	TF-H ₂ O	297.05300
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	299.51868
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	299.77124
	Re = 2500	TF-H ₂ O	297.05300
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	295.81900
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	295.81200
	Re = 5000	TF-H ₂ O	294.78700
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	294.43300
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	294.49200
	Re = 7000	TF-H ₂ O	294.28600
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	294.07900
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	294.11100
Serpantin Soğutucu Tasarımı	Re = 500	TF-H ₂ O	305.08740
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	305.20764
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	305.71222
	Re = 750	TF-H ₂ O	301.10110
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	301.19919
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	301.53500
	Re = 1000	TF-H ₂ O	299.10822
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	299.18958
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	299.24530
	Re = 2500	TF-H ₂ O	295.52900
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	295.56100
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	295.66300
	Re = 5000	TF-H ₂ O	294.33700
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	294.35300
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	294.40400
	Re = 7000	TF-H ₂ O	293.99900
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	294.00900
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	294.04500

Tablo 4.12 : Tek Faz-Multifaz Mixture Model 20 nm Partikül Boyutu Fark Tablosu

		Max. Sıcaklık	% Fark
Paralel Soğutucu Tasarımı	Re = 500	TF-H ₂ O	306.54312
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	305.85022
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	306.7486
	Re = 750	TF-H ₂ O	303.23544
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	302.11377
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	302.85266
	Re = 1000	TF-H ₂ O	297.05300
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	300.29089
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	300.94748
	Re = 2500	TF-H ₂ O	297.05300
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	296.7900
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	297.04600
	Re = 5000	TF-H ₂ O	294.78700
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	295.14600
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	295.25300
	Re = 7000	TF-H ₂ O	294.28600
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	294.65100
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	294.73300
Serpantin Soğutucu Tasarımı	Re = 500	TF-H ₂ O	305.08740
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	304.89539
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	305.55948
	Re = 750	TF-H ₂ O	301.10110
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	300.93360
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	301.32022
	Re = 1000	TF-H ₂ O	299.10822
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	298.97366
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	299.23930
	Re = 2500	TF-H ₂ O	295.52900
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	295.50400
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	295.59800
	Re = 5000	TF-H ₂ O	294.33700
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	294.34600
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	294.40700
	Re = 7000	TF-H ₂ O	293.99900
		MF-% 1 Al ₂ O ₃	294.02500
		MF-% 5 Al ₂ O ₃	294.07200

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç Yorumlama

Yapılan tez çalışmasında öncelikli amaç, sıvı soğutma sisteminin performansını arttıracak tasarımı belirlemektir. Tasarım iyileştirmesi için iki ayrı geometri üzerinde çalışılmıştır. Akış dağılımını ve dolayısıyla okunan sıcaklık değerlerini direkt olarak etkileyen bu tasarımlar, paralel ve serpantin soğutucular olarak adlandırılmışlardır. Tasarımlar arası performans kıyaslaması yapılırken farklı Reynolds sayılarında, farklı akışkan kullanımı incelenmiştir. Farklı akışkan kullanımı ise kendi içerisinde tek faz ve multifaz modelleme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanların ısı transferi performansına etkisi, modelleme yöntemi (tek faz ve multifaz), türbülans etkisi (farklı Reynolds sayısı) kullanımı ile incelenmiştir. Multifaz modelleme yöntemi ise kendi içerisinde farklı model kullanımının yanı sıra farklı partikül çap kullanımı ile de gerçekleştirilmiştir.

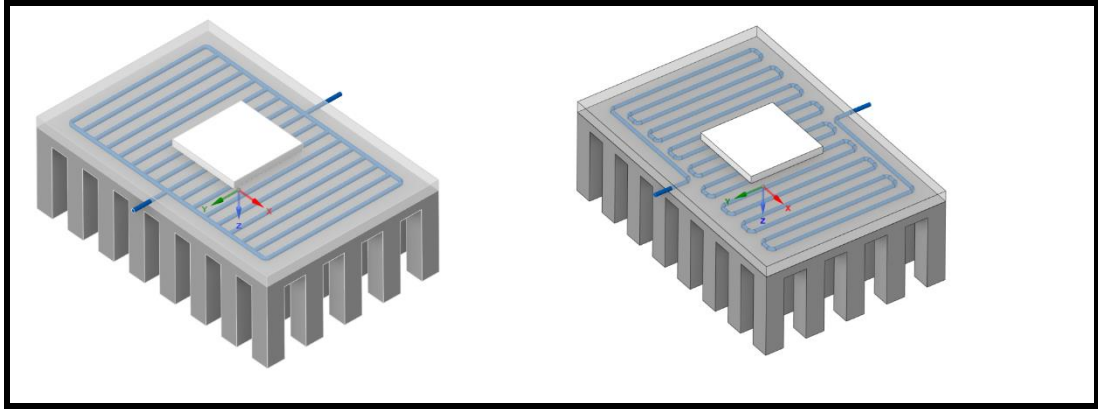
Tasarımlar kıyaslandığında serpantin soğutucu, paralel soğutucuya göre daha etkili bir şekilde soğuma işlemini gerçekleştirmiştir. Tek faz ve multifaz yaklaşımlarında da tasarım farkından dolayı okunan sıcaklık değişimleri benzer olmuştur. Tasarımlardaki akış dağılımının incelenmesi, çalışılan Reynolds değeri ile ilgili olduğu için tez çalışmasında laminar ve türbülanslı akış incelemesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler, $Re=500,750,1000,2500,5000,7000$ olmak üzere altı farklı değerde yapılmıştır.

Tasarım sonrasında, tez çalışmasında üzerinde çalışılan bir diğer konu geleneksel soğutucu akışkan yerine nanoakışkan kullanımı olmuştur. Termofiziksel özellikleri iyileştirilen nanoakışkanlar geçmiş çalışmalarda olduğu gibi bu tez çalışmasında da performansı iyileştirmişlerdir. Nanoakışkanlar geleneksel sıvı H_2O ile kıyaslandığı gibi kendi aralarında da kıyaslanmıştır. Bu kıyas farklı konsantrasyon oranlarında ve farklı partikül çapı modellemesi ile gerçekleşmiştir. %1 ve %5 Al_2O_3 olmak üzere iki farklı konsantrasyon oranında 20 nm, 30 nm ve 40 nm partikül çapı için analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı konsantrasyon oranları kıyaslandığında %5

oran termal performansı daha da iyileştirmiştir. Bunun yanında yapılan tez çalışmasında farklı partikül boyutunun etkisi çok efektif bir şekilde gözlemlenememiştir, yapılan çalışmalar sonucu okunan değerler arasındaki fark oldukça küçüktür. Nitekim bu değerler düşük Reynolds sayılarında daha farklı iken yüksek Reynolds sayılarında oldukça yakın olarak tespit edilmiştir. Tablo 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12’de farklar detaylı olarak paylaşılmıştır.

Yapılan tüm uygulamalar sonrasında nanoakışkan modellemesi için hem tek faz hem de multifaz yöntemlerin HAD uygulamaları için uygun olduğu tespit edilmiştir. Doğrulanmış çalışma ile birlikte tek faz modellemenin de multifaz kadar deneysel veriler ile örtüştüğü gözlemlenmiştir. Daha büyük partikül çapı üzerinde çalışıldığı takdirde partiküller arası kuvvetleri ısı transferine etkisinin gözlemlenmek istediği durumlar için multifaz yöntemler önerilebilir. Bunun haricinde çözüm süresinin kısalığı ve modelleme kolaylığı ile tek faz yöntemlerin tercih edilmesinin süre ve maliyet açısından daha uygun olacağı düşünülmektedir.

5.2. İleri Çalışma Önerisi



Şekil 5.1 : Paralel-Serpantin Soğutucu Sistem Çalışma Önerisi

Paralel ve serpantin soğutucu tasarımları, daha kompleks bir sistem içerisinde dahil edilip nümerik olarak çalışma gerçek koşullar için tekrarlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Choi, J.A., Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: D.A. Siginer, H.P. Wang (Eds.), Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, ASME. 1995, 99–105.
- [2] Chien, H.T., Tsai, C.Y., Chen, P.H., Chen, P.Y., Improvement on thermal performance of a disk-shaped miniature heat pipe with nanofluid, Proceedings of the Fifth International Conference on Electronic Packaging. 2004, DOI: 10.1109/EPTC.2003.1298767.
- [3] Tsai, C.Y., Chien, H.T., Ding, P.P., Chan, B., Luh, T.Y., Chen, P.H., Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, Mater. Lett. 2004, 58, 1461-1465.
- [4] Wei, W.C., Tsai, S.H., Yang, S.Y., Kang, S.W., Effect of nano-fluid concentration on heat pipe thermal performance, IASME Trans. 2005, 2 1432–1439.
- [5] Kang, S.W., Wei, W.C., Tsai, S.H., Yang, S.Y., Experimental investigation of silver nano-fluid on heat pipe thermal performance, Applied Thermal Engineering. 2006, 26, 2377-2382.
- [6] Shang, F.M., Liu, D.Y., Xian, H.Z., Yang, Y.P., Du, X.Z., Flow and heat transfer characteristics of different forms of nanometer particles in oscillating heat pipe, Journal Chemical Industry Engineering. 2007, 58, 2200-2204.
- [7] Yang, X.F., Liu, Z.H., Zhao, J., Heat transfer performance of a horizontal micro grooved heat pipe using CuO nanofluid, Journal of Micromechanics and Microengineering. 2008, 18.
- [8] Chen, Y.T., Wei, W.C., Kang, S.W., Yu, C.S., Effect of nanofluids on flat heat pipe thermal performance, Proceedings of the 24th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, IEEE. 2008, 16-20.
- [9] Noie, S.H., Heris, S.Z., Kahani, M., Nowee, S.M., Heat transfer enhancement using Al₂O₃/water nanofluid in a two-phase closed thermosyphon, International Journal Heat Fluid Flow. 2009, 30, 700-709.
- [10] Huminic, G., Huminic, A., Morjan, I., Dumitrache, F., Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles, International Journal Of Heat And Mass Transfer. 2011, 54, No 1, 656-661.
- [11] Ziyadanogulları N., Yücel H.L., Al₂O₃ – Su Nanoakışkanı ile ısı transferinin iyileştirilmesi., Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi. 2017, 7, Sayı 2/2.
- [12] Xue, H., Fan, J., Hu, Y., Hong, R., Cen, K., The interface effect of carbon nanotube suspension on the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon, Journal of Applied. Physics. 2006, 100.

- [13] Chauhan A., Kandlikar S.G., Characterization of a dual taper thermosiphon loop for CPU cooling in data centers. *Applied Thermal Engineering*. 2019, 146, 450-458.
- [14] Naphon, P., Assadamongkol, P., Borirak, T. Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency. *International Communications Heat and Mass Transfer*. 2008, 35, 1316-1319.
- [15] Hejazian, M., Moraveji, M.K., Behesti, A., Comparative study of Euler and mixture models for turbulent flow of Al_2O_3 nanofluid inside a horizontal tube. *International Communications Heat and Mass Transfer*. 2014, 52, 153-158.
- [16] Hanafizadeh, P., Ashjaee, M., Goharkah, M., Montazeri, K., Akram, M., The comparative study of single and two-phase models for magnetite nanofluid forced convection in a tube. *International Communications Heat and Mass Transfer*. 2015, 65, 58-70
- [17] Moghadassi, A., Ghomi, E., Parvizian, F., A numerical study of water based Al_2O_3 and $Al_2O_3 - Cu$ hybrid nanofluid effect on forced convective heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015, 92, 50-57.
- [18] Saha, G., Paul M.C., Heat transfer and entropy generation of turbulent forced convection flow of nanofluids in a heated pipe., *International Communications Heat and Mass Transfer*. 2015, 61, 26-36.
- [19] Kalteh, M., Abbassi, A., Saffar-Avval, M., Harting, J., Eulerian-Eulerian two-phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel. *International Journal Heat Fluid Flow*. 2011, 32, 107-116.
- [20] Pakravan, H.A., Yaghoubi, M., Analysis of nanoparticles migration on natural convective heat transfer of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*. 2013, 68, 79-93.
- [21] Dang C., Jia L., Lu Q., Investigation on thermal design of a rack with the pulsating heat pipe for cooling CPUs., *Applied Thermal Engineering*. 2017, 110, 390-398.
- [22] Cai Y., Liu D., Yang J-J., Wang Y., Zhao F-Y., Optimization of thermoelectric cooling system for application in CPU cooler., *Energy Procedia*. 2017, 105, 1644-1650.
- [23] Bahirei M., Heshmation S., Efficacy of a novel liquid block working with a nanofluid containing graphene nanoplatelets decorated with silver nanoparticles compared with conventional CPU coolers., *Applied Thermal Engineering*. 2017, 127, 1233-1245
- [24] Kotcioglu İ., Çalışkan S., Many E., Farklı soğutucular kullanarak CPU'nun ısı boruları ile soğutulması., *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*. 2009, 29, 109-116.
- [25] Bahiraei M., Mazaheri N., Application of an ecofriendly nanofluid containing graphene nanoplatelets inside a novel spiral liquid block for cooling of electronic processors., *Energy*, 2021, 218, 119395

- [26] Guowei X., Junjie Z., Rui M., Yepeng L., Novel heat pipe radiator for vertical CPU cooling and its experimental study., *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 130, 912-922.
- [27] Kılıç M., Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin incelenmesi., *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. Eylül 2018, 33(3), ss. 121-132.
- [28] Kumar P.C., Kumar C.M., Numerical study on heat transfer performance using Al_2O_3 /water nanofluids in six circular channel heat sink for electronic chip. 2019, DOI:10.1016/j.matpr.2019.04.220.
- [29] Wang J., Xu Y-P., Qahiti R., Jafaryar M., Alazwari M.A., Abu-Hamdeh N.H., Issakhov A., Selim M.M., Simulation of hybrid nanofluid flow within microchannel heat sink considering porous media analysing CPU stability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022, 208, 109734.
- [30] Tüzün A.H., Mikro ve mini kanallı ısı değiştiricilerde nanoakışkan kullanılmasının ısı transferi ve basınç kaybına etkisinin incelenmesi., Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Denizli, Türkiye, 2019, 56s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [31] Sreehari D., Sharma A.K., On thermal performance of serpentine silicon microchannels., *International Journal of Thermal Sciences*. 2017, Cilt: 146, 106067.
- [32] Mohammadpour J., Lee, A., Mozafari, M., Zargarabadi M.R., Evaluation of Al_2O_3 /water nanofluid in a microchannel equipped with a synthetic jet using single-phase and Eulerian–Lagrangian models., *International Journal of Thermal Sciences*, 2021.
- [33] Wen T., Lu L., Zhang S., Zhong H., Experimental study and CFD modelling on the thermal and flow behavior of EG/water ZnO nanofluid in multiport mini channels. *Applied Thermal Engineering*. 2021, 182, 116089.
- [34] Maalej S., Zayoud A., Abdelaziz I., Saad I., Zaghdoudi M.C., Thermal performance of finned heat pipe system for Central Processing Unit cooling. *Energy Conversion and Management*. 2020, 218, 112977.
- [35] Qi C., Luo T., Liu M., Fan F., Yan Y., Experimental study on the flow and heat transfer characteristics of nanofluids in double-tube heat exchangers based on thermal efficiency assessment. *Energy Conversion and Management*. 2019, 197, 111877.
- [36] Tang J., Qi C., Ding Z., Afrand M., Yan Y., Thermo-dyraulic performance of nanofluids in a bionic heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021, 127, 105492
- [37] Tang Z., Qi C., Tian Z., Chen L., Thermal management of electronics components based on new wave bio-inspired structures and nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2022, 131, 105840.

- [38] Yu, W., France, D. M., Choi, S. U. S., Routbort, J. L., Review and Assesment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications., Argonne National Laboratory. 2007, 1-78.
- [39] Çengel Y.A., Isı ve Kütle Transferi, Ed : Vedat Tanyıldızı, İzmir Güven Bilimsel Kitabevi/Güven Bilimsel, İzmir, Türkiye, 2008, 879 s.
- [40] Çengel Y.A., CIMBALA J.M, Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Ed: Vedat Tanyıldızı, İzmir Güven Bilimsel Kitabevi/Güven Bilimsel, İzmir, Türkiye, 2008, 938.
- [41] Tu J., Yeoh G-H., Liu C., (Engin, T.), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Temelleri ve Uygulamaları Palme Yayınevi, Ankara, Türkiye, 2020, 477 s.
- [42] Jang, S. P. and Choi, S. U. S. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. 2004, 84(21), 4316–4318.
- [43] Gupta, M., Singh, V., Kumar, R. and Said, Z.A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications., Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017, Cilt: 74, 638–670.
- [44] Bigdeli, M. B., Fasano, M., Cardellini, A., Chiavazzo, E. and Asinari, P. A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, 60, 1615–1633.
- [45] Vajjha, R. S., Das, D. K. and Mahagaonkar, B. M. Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory., Petroleum Science and Technology. 2009, 27(6), 612– 624.
- [46] K. Hanna. Brian Spalding: The Founding Father of Commercial CFD Passes Away_ Mentor, 2016.
- [47] Yurddaş A. Optimization and thermal performance of evacuated tube solar collector with various nanofluids. Int J. Heat Mass Transfer 2020, 152: 119496.
- [48] Patankar S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (Computational Methods in Mechanics & Thermal Sciences), CRC Yayınevi, 1. Basım, 1980.