

**NANO AKIŞKANLI BİR TÜP İÇERİSİNDE ZORLANMIŞ
KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Lokman İLBİLGİ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2010

ANKARA

Lokman İLBİLGİ tarafından hazırlanan NANO AKIŞKANLI BİR TÜP İÇERİSİNDE ZORLANMIŞ KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. Mecit SİVRİOĞLU

Tez Danışmanı, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kahraman ALBAYRAK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Prof. Dr. Mecit SİVRİOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç.Dr. Cemil YAMALI

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Yrd.Doç.Dr. İbrahim ATILGAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih : 01 / 07 / 2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof.Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Lokman İLBİLGİ

**NANO AKIŞKANLI BİR TÜP İÇERİSİNDE ZORLANMIŞ
KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

Lokman İLBİLGİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2010**

ÖZET

Bu çalışmada laminar akış şartlarında bir boru içerisindeki nano akışkanın sabit duvar sıcaklığında ve sabit ısı akılarında zorlanmış konveksiyonla ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada akışkan olarak su içerisinde hacimsel olarak farklı konsantrasyon oranlarında (0,002, 0,01, 0,015, 0,02 ve 0,025) ve 20 nm boyutundaki Al_2O_3 nano partiküllerinin bulunduğu nano akışkan ele alınmıştır. Çalışmada akışkan boru içerisine üniform olarak girmiş olup, boru içerisinde tam gelişmiş hale getirilmiş ve test alanında ise tam gelişmiş şartlara göre incelemeleri yapılmıştır. Test alanında boru duvarına sabit duvar sıcaklığı ve sabit ısı akıları uygulanmıştır. Çalışmada farklı Peclet(Pe) sayılarında hem su için hem de içerisinde farklı konsantrasyon oranlarında Al_2O_3 nano partiküllerinin bulunduğu nano akışkan için sayısal incelemeler yapılmıştır. Sayısal çalışmalar FLUENT paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen sonuçlar, boyutsuz büyüklükler cinsinden sunulmuştur. Boyutsuz hız, boyutsuz sıcaklık, ve Nusselt sayısı değişimlerine ek olarak vektörel hız dağılımları, hız ve sıcaklığa ait kontur grafikleri de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Yapılan sayısal çalışmada nano partikül hacimsel oranının, Reynolds (Re) sayısının ve duvar sınır şartlarının ısı transferine etkileri, boru boyunca ısı transfer katsayısının, Nusselt(Nu) sayısının değişimi ve bu değerlerin ortalamaları cinsinden

sunularak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Akış hızı, duvar sınır şartı ve nano partikül hacimsel oranı gibi parametrelerin etkilerinin daha iyi gözlemlenebilmesi açısından boyutsuz hız ve sıcaklık dağılımları da göz önünde bulundurularak sonuçlar yorumlanmıştır.

Sabit duvar sıcaklığı için gerçekleştirilen sayısal çalışmanın sonuçları literatürdeki deneysel sonuçlarla ve Seider-Tate korelasyonu ile kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamalarda sonuçların deneysel verilerle büyük ölçüde örtüştüğü görülerek, nümerik model doğrulanmış, doğrulanan bu model kullanılarak sabit duvar ısı akısı sınır şartları için analizler tekrarlanmıştır.

Çalışmada genel olarak akışkan içerisinde bulunan Al_2O_3 nano partiküllerinin hacimsel oranı arttıkça Nusselt sayısı (Nu) ve ısı transfer katsayısı (h) değerlerinde belirgin artışların olduğu, partikül oranı ayrıca Pe sayısındaki artışa paralel olarak Nu ve h değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Bunlara ek olarak partikül dağılımının hız profillerine olan etkisi de detaylı olarak sunulmuştur.

Bilim kodu : 914.1.065
Anahtar Kelimeler : Nano akışkan, Laminar akış, Zorlanmış konveksiyon, Isı transferi artırımı, Sabit duvar sıcaklığı, Sabit ısı akısı
Sayfa Adedi : 189
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Mecit SİVRİOĞLU

**NUMERICAL INVESTIGATION OF LAMINAR FORCED CONVECTION
HEAT TRANSFER IN A PIPE WITH NANOFLUID**

(PhD. Thesis)

Lokman İLBİLGİ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2010

ABSTRACT

In this study, laminar forced flow of nanofluid in a pipe is numerically investigated by applying constant wall temperature and constant wall heat flux boundary conditions. The working fluid in the study was a mixture of 20 nm Al_2O_3 nanoparticles and water which has different volume fractions (0,002, 0,01, 0,015, 0,02, 0,025). In the analyses, inlet flow is assumed to be uniform. The flow is developed in the unheated part of the pipe and it becomes fully developed at the test section. The constant wall temperature and constant wall heat flux boundary conditions are applied to the test section. Analyses are performed for various Peclet numbers with different nano particle volume fractions and water only. The numerical modelling and analyses are made by using the commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) code FLUENT. The results of these analyses are represented in terms of non-dimensional quantities such as non-dimensional velocity, non-dimensional temperature and Nusselt numbers. In addition to variation of these non-dimensional quantities, temperature and velocity vectors are also given for the different boundary and flow conditions. Regarding the results obtained and using the dimensionless parameters, effects of nano particle volume fraction, Reynolds number and wall boundary condition on Nusselt number and heat transfer coefficient variation along the pipe are discussed in detail. Moreover the pipe averaged Nusselt and

heat transfer coefficients are also represented and discussed in detail in the scope of this investigation.

The verification of the numerical model and the analysis method is done by comparing the constant wall temperature case CFD results with the available experimental data in the literature. Comparisons showed that the results were in good agreement with the experimental data. The validated CFD model is used for performing different analyses by applying different constant wall heat flux boundary conditions.

When the results are considered, it can be said that by increasing the nano particle concentration of a nano fluid it is possible to increase the heat transfer coefficients(h) and Nusselt numbers(Nu) substantially. Additionally nano particle dispersion in the flow has a considerable effect on the radial velocity variation.

Science Code	: 914.1.065
Key Words	: Nanofluid, Laminar flow, Forced convection, Heat transfer Enhancement, Constant wall temperature, Constant heat flux
Page Number	: 189
Adviser	: Prof. Dr. Mecit SİVRİOĞLU

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum tez çalışması boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Mecit SİVRİOĞLU'na Tez İzleme Komitelerinde yaptıkları yapıcı eleştiri ve tavsiyeleri için Prof. Dr. Ö.Ercan ATAER(Merhum), Prof. Dr. Kahraman ALBYRAK, ve Doç. Dr. Atilla BIYIKOĞLU'na, çalışmalarım esnasında desteklerini esirgemeyen Cem GÖZÜKARA'ya ve çalışmalarım sırasında manevi desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşim Belgin ve akıllı oğlum Emre ile yeni doğan yaramaz oğlum Yiğit'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xxiv
1. GİRİŞ.....	1
2. NANO AKIŞKANLAR.....	4
2.1. Nanoakışkanlar ile Isı Transferinin İyileştirilmesi.....	4
2.2. Nanoakışkanların Endüstriyel uygulamaları.....	4
2.3. Nano Parçacıkların ve Nano Akışkanın Üretimi.....	7
2.4. Nano Akışkanlarda Isı Transferi Değişkenlikleri.....	7
2.4.1. Parçacık topaklanması (yığılması).....	7
2.4.2. Hacim oranı (kesri).....	9
2.4.3. Brownian devinimi.....	9
2.4.4. Termoforez.....	9
2.4.5. Nano parçacık boyutu.....	10
2.4.6. Parçacık şekli / yüzey alanı.....	10

Sayfa

2.4.7. Nano parçacık-sıvı ara yüzünde sıvı tabakalanması.....	10
2.4.8. Sıcaklık.....	11
2.4.9. Termal sınır tabaka kalınlığında azalma.....	12
2.5. Nano Akışkan Özelliklerinin Tespit Edilmesi.....	13
2.5.1. Isıl iletkenlik.....	13
2.5.1.1. Isıl iletkenliğin ölçümü.....	13
2.5.2. Isı kapasitesi.....	14
2.5.3. Viskozite.....	16
3. NANO AKIŞKAN TAŞINIM LİTERATÜRÜNÜN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ.....	20
3.1. Nano Akışkanlarda Taşınım İle Isı Transferinin ve Akış Özelliklerinin İncelenmesi.....	21
3.2. Dairesel Bir Tüpte Al_2O_3 / Su Nano Akışkanının Taşınım İle Isı Transferinin Deneysel İncelemesi.....	28
3.3. İki Faz Yaklaşımı Kullanılarak Düzenli Isı Akışına Sahip Bir Tüpte Bir Nano Akışkanın Türbülanslı Zorlanmış Taşınımının Hesaplanması.....	31
3.4. Metal Oksit Nano parçacıklarının Yayıldığı Akışkanlarda Hidrodinamik ve Isı Transferi Çalışması.....	33
3.5. Nano Akışkanlarda Taşınım İle Isı Transferi.....	34
3.6. Bir Elektronik Sıvı Soğutmalı Sistem İçin Al_2O_3 /Su Nano akışkanı Kullanımıyla Isı Aktarımı İyileşmesi.....	36
4. ÇALIŞMANIN KAPSAMI.....	39
4.1. Fiziksel ve Matematiksel Modelin Tanımlanması.....	40

Sayfa

4.1.1. Problemin tanımı.....	40
4.1.2. Fiziksel model.....	41
4.1.3. Kullanılan varsayımlar ve değerler.....	41
4.1.4. Matematiksel formülasyon.....	42
4.1.5. Boyut analizi.....	46
4.1.6. Hesaplanacak değerler.....	48
4.1.7. Hesaplama bölgesi.....	52
4.1.8. Sınır şartları.....	53
5. SAYISAL ÇÖZÜM (SAYISAL AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ(SAD) YÖNTEMİ.....	55
5.1. Fluent Bilgisayar Programı.....	55
5.1.1. Gambit modülü.....	56
5.1.2. Xserver (Hummingbird Connectivity) modülü.....	56
5.1.3. Tgrid modülü	56
5.1.4. Fluent modülü.....	56
5.2. Çalışma Programı.....	57
5.2.1. Uygun grid (kafes) yapısının oluşturulması ve seçilmesi.....	57
5.2.2. Ayırık çözüm yöntemi.....	57
5.2.3. Denklemlerin lineer hale getirilmesi.....	59
5.2.4. Denklemlerin ayrıklaştırılması.....	59
5.2.5. Denklemlerin linerize edilmiş yapıları.....	62
5.2.6. Relaksasyon.....	62

Sayfa

5.2.7. Ayırıklaştırılmış momentum denklemleri.....	63
5.2.8. Ayırıklaştırılmış süreklilik denklemi.....	64
5.3. Deneysel Çalışmanın Sayısal Olarak Modellenmesi.....	69
5.3.1. GAMBİT aşamaları.....	70
5.3.2. FLUENT aşamaları.....	73
5.3.3. Uygun relaksasyon parametrelerinin seçilmesi.....	78
5.3.4. Yakınsama kriterleri.....	79
5.3.5. Sayısal çözümlerin doğruluğunun kontrolü.....	82
5.3.6. Sayısal çalışma parametreleri.....	84
6. SAYISAL SONUÇLARIN HERİS TARAFINDAN YAPILAN DENEYSEL SONUÇLARLA KIYASLANMASI.....	87
6.1. Sabit Duvar Sıcaklığında Sayısal Çalışma Sonucu Elde Edilen Nu-Re, Nu-Pe, h-Pe Grafikleri.....	87
7. SAYISAL SONUÇLAR.....	100
7.1. Sabit Duvar Sıcaklığında Elde Edilen Sonuçlar.....	100
7.2. Sabit Isı Akısında Elde Edilen Sonuçlar.....	114
7.2.1. $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ısı akısında $\phi=0,002$ için elde edilen sonuçlar..	114
7.2.2. $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ ısı akısında $\phi=0,002$ için elde edilen sonuçlar..	124
7.3. Sabit Duvar Sıcaklığında Sayısal Çalışma Sonucu Elde Edilen h-Pe Grafikleri	133
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	138
KAYNAKLAR.....	141
EKLER.....	146

Sayfa

EK-1 Fluent Program pencerelerinden yapılan değişiklikler.....	147
EK-2 SIMPLE algoritması.....	149
EK-3 Fluent programı modülleri hakkında kısa ve öz bilgi.....	154
EK-4 Bir örneğin Gambit’te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent’de ayrıntılı çözülmesi.....	155
ÖZGEÇMİŞ.....	189

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılacak parametreler.....	42
Çizelge 4.2. $\phi=0,002$ hacimsel oran için nano akışkana ait termal ve fiziksel özellikler.....	52
Çizelge 5.1. Suyun fiziksel özelliklerinin değerleri.....	75
Çizelge 5.2. Relaksasyon parametreleri.....	79
Çizelge 5.3. Sayısal çalışma parametreleri.....	85

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Etilen glikol içerisindeki bakır nano-parçacıkların boyutları.....	6
Şekil 2.2. Bakır oksit içerikli nano akışkanın ısıl iletkenliğinin zaman içerisinde değişimi.....	8
Şekil 2.3. Su içerisindeki %0,1 konsantrasyon oranındaki Bakır oksit içerikli nano parçacıkların zaman içindeki değişimi a)20 dakika b)60 dakika c) 70 dakika.....	8
Şekil 2.4. Nano parçacık yarıçapının tersi üzerinde Isıl iletkenliği artışının etkisi.....	11
Şekil 2.5. Nano akışkanların ısıl iletkenliğinin sıcaklıkla değişiminin deneysel sonuçları.....	12
Şekil 2.6. Isı Kapasitesi Formüllerinin Kıyası (mavi boş yuvarlaklar: Eşitlik (2a), siyah dolu yuvarlaklar: Eşitlik (2b)).....	15
Şekil 2.7. Isı Kapasitesi Formüllerinin Kıyası Eşitlik (2a), Eşitlik (2b), Model I ve Model II.....	15
Şekil 2.8. Nano akışkanın viskozitesinin hacimsel orana bağımlılığı.....	16
Şekil 2.9. Etilen glikol nano akışkanındaki bakırın viskozitesi.....	17
Şekil 2.10. Farklı kayma gerilmelerinde nano parçacığın bağlı viskozitesi.....	18
Şekil 2.11. Aliminyum parçacıklı nano akışkanın viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	19
Şekil 3.1. Nano partiküllerin Mikro partiküllerle karşılaştırılması.....	20
Şekil 3.2. Türbülanslı akışta ısı transfer katsayısının hızla değişimi.....	21
Şekil 3.3. ϕ parametrelerinin akışkanın sıcaklık profili üzerindeki etkileri.....	26
Şekil 3.4. ϕ parametrelerinin akışkanın bulk ve duvar sıcaklığı üzerindeki etkileri.....	26
Şekil 3.5. ϕ parametrelerinin ısı transfer katsayısı üzerindeki etkileri.....	27

Şekil	Sayfa
Şekil 3.6. ϕ parametrelerinin kayma gerilimi üzerindeki etkileri.....	28
Şekil 3.7. Heris ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın deney düzeneği.....	29
Şekil 3.8. Farklı konsantrasyon oranlarındaki nano akışkanın Isı transfer katsayısının Peklet sayısı ile değişimi ve teorik sonuçlarla karşılaştırılması.....	30
Şekil 3.9. Tüpün merkez hattındaki türbülans kinetik enerjisinin su ve nano akışkan için hesaplanması.....	31
Şekil 3.10. Tüp boyunca Nushelt sayısındaki değişim.....	32
Şekil 3.11. Al_2O_3/Su ve TiO_2/Su nano akışkanlarına ait ısı transfer katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimi.....	33
Şekil 3.12. Alimüna/Su akışkanının ısı transferi değişimi a) $\phi = 0$, b) $\phi = 0,01$ c) $\phi = 0,03$	35
Şekil 3.13. $h_{w-block}$ ' un kütle akış hızı ve nano parçacık hacimsel yüzdesiyle değişimi.....	37
Şekil 3.14. %6,8 Nano parçacık boyutunun su bloğunun ısı transferi katsayısı üzerine etkisi.....	37
Şekil 4.1. Kullanılan koordinat sistemi ve fiziksel model.....	41
Şekil 5.1. Ayırık çözüm yönteminin adımları.....	58
Şekil 5.2. Skaler transport denkleminin ayırıklaştırmanın yapıldığı kontrol hacmi..	61
Şekil 5.3. Grid bağımsızlığı testi a) $u^* - r^*$ b) $t^* - r^*$ c) Nusselt sayısı (Nu)-grid sayısı...	71
Şekil 5.4. Gambit ile oluşturulmuş ağ sisteminin yapısı.....	72
Şekil 5.5. GAMBİT ve FLUENT programları için akış şeması.....	73
Şekil 5.6. Suyun sıcaklıkla yoğunluğunun değişimi.....	76
Şekil 5.7. Suyun sıcaklıkla özgül ısısının değişimi.....	76
Şekil 5.8. Suyun sıcaklıkla ısı iletkenlik katsayısının değişimi.....	77
Şekil 5.9. Suyun sıcaklıkla viskozitesinin değişimi.....	77
Şekil 5.10. Kalıntıların iterasyonla değişimi ve yakınsama.....	79

Şekil	Sayfa
Şekil 5.11. Nano akışkana ait hız vektörlerinin boru girişindeki görünümü.....	80
Şekil 5.12. Nano akışkana ait hızın test alanında tam gelişmiş haldeki hız vektörleri.....	81
Şekil.5.13. Akışa ait boru girişindeki hız konturları.....	81
Şekil 5.14. Nano akışkana ait boru çıkışındaki sıcaklık konturları.....	82
Şekil 6.1. Akışa ait boru boyunca 0,002 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması (Sabit duvar sıcaklığında $T_w=sbt$).....	87
Şekil 6.2. Akışa ait boru boyunca 0,002 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	88
Şekil 6.3. Akışa ait boru boyunca 0.01 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	89
Şekil 6.4. Akışa ait boru boyunca 0.01 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	89
Şekil 6.5. Akışa ait boru boyunca 0.015 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	90
Şekil 6.6. Akışa ait boru boyunca 0.015 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	91
Şekil 6.7. Akışa ait boru boyunca 0.02 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	92
Şekil 6.8. Akışa ait boru boyunca 0.02 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	92
Şekil 6.9. Akışa ait boru boyunca 0.025 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması	93

Şekil	Sayfa
Şekil 6.10. Akışa ait boru boyunca 0.025 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	94
Şekil 6.11. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	95
Şekil 6.12. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	95
Şekil 6.13. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal ve deneysel olarak ısı transfer katsayılarının(h) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması.....	96
Şekil 6.14. Akışa ait boru boyunca 0,002 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması.....	97
Şekil 6.15. Akışa ait boru boyunca 0,01 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması.....	97
Şekil 6.16. Akışa ait boru boyunca 0,015 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması.....	98
Şekil 6.17. Akışa ait boru boyunca 0,02 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması.....	98
Şekil 6.18. Akışa ait boru boyunca 0,025 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması.....	99
Şekil 7.1. Hızın radyal yönde değişimi ($Z=L$, $\phi=0,002$, $Pe=2500$).....	100
Şekil 7.2. Sıcaklığın radyal yönde değişimi ($Z=L$, $\phi=0,002$, $Pe=2500$).....	101
Şekil 7.3. Boyutsuz hızın ($z+=Z / D$) farklı kesitlerdeki değişimi [$\phi=0,002$, $Pe=2500$, ($r^* = \frac{r}{D}$, $u^* = \frac{u}{u_0}$)].....	102

Şekil**Sayfa**

- Şekil 7.4. Boyutsuz sıcaklığın ($z+=Z / D$) farklı kesitlerdeki değişimi
 $[\varphi=0,002 \text{ Pe}=2500, (r^* = \frac{r}{D}, t^* = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w})]$103
- Şekil 7.5. Boyutsuz hızın değişimi $[\varphi=0,002 \text{ Pe}=2500, (z=1, r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$104
- Şekil 7.6. Boyutsuz sıcaklığın değişimi $[z=1, \varphi=0,002, \text{Pe}=2500, (r^* = \frac{r}{D}, t^* = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w})]$104
- Şekil 7.7. Boyutsuz hızın farklı Peclet sayıları için değişimi
 $[z=1, \varphi=0,002, \text{Pe}=2500 \text{ Pe}=4000 \text{ Pe}=6000, (r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$105
- Şekil 7.8. Boyutsuz sıcaklığın farklı Peclet sayıları için değişimi
 $[\varphi=0,002, \text{Pe}=2500 \text{ Pe}=4000 \text{ Pe}=6000, (r^* = \frac{r}{D}, t^* = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w})]$106
- Şekil 7.9. Boyutsuz eksenel yönde sıcaklığın değişimi ($\varphi=0,002, \text{Pe}=2500$).....106
- Şekil 7.10. Boyutsuz parametrede eksenel yönde ısı transfer katsayısının(h)
 $(\varphi=0,002, \text{Pe}=2500)$107
- Şekil 7.11. Boyutsuz parametrede eksenel yönde Nusselt(Nu) sayısının değişimi
 $(\varphi=0,002, \text{Pe}=2500)$108
- Şekil 7.12. Boru boyunca sıcaklığın değişimi($\varphi=0,002, \text{Pe}=2500$).....108
- Şekil 7.13. Boru boyunca ısı transfer katsayısının(h) değişimi($\varphi=0,002, \text{Pe}=2500$).....109
- Şekil 7.14. Boru boyunca Nusselt(Nu) sayısının değişimi($\varphi=0,002, \text{Pe}=2500$).....109
- Şekil 7.15. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için hızın $z^*=Z / L =0.8$ kesitindeki değişimi($\varphi=0,002, \varphi=0,01 \varphi=0,015 \varphi=0,02 \varphi=0,025, \text{Pe}=2500$).....110

Şekil	Sayfa
Şekil 7.16. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için sıcaklığın $z^*=Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi ($\phi=0,002$, $\phi=0,01$ $\phi=0,015$ $\phi=0,02$ $\phi=0,025$, $Pe=2500$).....	111
Şekil 7.17. Boyutsuz nano akışkan ve suya ait hız değişimi [$\phi=0,002$ $Pe=2500$, ($r^* = \frac{r}{D}$, $u^* = \frac{u}{u_0}$)].....	111
Şekil 7.18. Boyutsuz nano akışkan ve suya ait sıcaklık değişimi [$\phi=0,002$ $Pe=2500$, ($r^* = \frac{r}{D}$, $t^* = \frac{T-T_w}{T_0-T_w}$)].....	112
Şekil 7.19. $\phi=0,002$, $\phi=0,025$, hacimsel oranı ve su için Isı transfer katsayısının (h) Peclet(Pe)sayısı ile değişimi.....	113
Şekil 7.20. $\phi=0,002$ hacimsel oranı ve su için Nusselt(Nu) ve Peclet(Pe) sayısı ile değişimi.....	113
Şekil 7.21. $\phi=0,002$ hacimsel oranı ve su için Nusselt(Nu) ve Reynolds(Re) sayısı ile değişimi.....	114
Şekil 7.22. Hızın tüm boru boyunca değişimi ($\phi=0,002$ $Pe=2500$).....	115
Şekil 7.23. Hızın radyal yönde değişimi ($z=1$, $\phi=0,002$ $Pe=2500$).....	115
Şekil 7.24. Sıcaklığın boru boyunca değişimi ($\phi=0,002$ $Pe=2500$).....	116
Şekil 7.25. Sıcaklığın radyal yönde değişimi ($z=1$, $\phi=0,002$ $Pe=2500$).....	116
Şekil 7.26. Boyutsuz hızın ($z^*=Z/L$) farklı kesitlerdeki değişimi [$\phi=0,002$ $Pe=2500$, ($r^* = \frac{r}{D}$, $u^* = \frac{u}{u_0}$)].....	117
Şekil 7.27. Boyutsuz sıcaklığın ($z^*=Z/L$) farklı kesitlerdeki değişimi [$\phi=0,002$ $Pe=2500$, ($r^* = \frac{r}{D}$)].....	117
Şekil 7.28. Boyutsuz hızın farklı Peclet sayıları için değişimi [$\phi=0,002$, $Pe=2500$ $Pe=4000$ $Pe=6000$, ($r^* = \frac{r}{D}$, $u^* = \frac{u}{u_0}$)].....	118

Şekil	Sayfa
Şekil 7.29. Boyutsuz sıcaklığın farklı Peclet sayıları için değişimi [$\varphi=0,002$, $Pe=2500$ $Pe=4000$ $Pe=6000$, ($r^* = \frac{r}{D}$)].....	118
Şekil 7.30. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için hızın $Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi($\varphi=0,002$, $\varphi=0,01$ $\varphi=0,015$ $\varphi=0,02$ $\varphi=0,025$, $Pe=2500$).....	119
Şekil 7.31. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için Sıcaklığın $z^*=Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi($\varphi=0,002$, $\varphi=0,01$ $\varphi=0,015$ $\varphi=0,02$ $\varphi=0,025$, $Pe=2500$).....	119
Şekil 7.32. Boru boyunca nano akışkana ve suya ait sıcaklıkların değişimi ($\varphi=0,002$, $Pe=2500$).....	120
Şekil 7.33. Boru boyunca nano akışkan ve suya ait ısı transfer katsayısının (h) değişimi ($\varphi=0,002$, $Pe=2500$).....	120
Şekil 7.34. Boru boyunca nano akışkan ve suya ait Nusselt sayısının(Nu) değişimi($\varphi=0,002$, $Pe=2500$).....	121
Şekil 7.35. $\varphi=0,002$ hacimsel oranı için Isı transfer katsayısının(h) ve Reynolds (Re) sayısı ile değişimi.....	122
Şekil 7.36. $\varphi=0,002$ hacimsel oranı için Isı transfer katsayısının(h) ve Peclet(Pe) sayısı ile değişimi.....	122
Şekil 7.37. $\varphi=0,002$ hacimsel oranı için Nusselt(Nu) ve Peclet(Pe) sayısı ile değişimi.....	123
Şekil 7.38. $\varphi=0,002$ hacimsel oranı için Nusselt(Nu) ve Reynolds(Re) sayısı ile değişimi.....	123
Şekil 7.39. Hızın tüm boru boyunca değişimi ($r=0$, $\varphi=0,002$ $Pe=2500$).....	124
Şekil 7.40. Hızın radyal yönde değişimi ($z=1$, $\varphi=0,002$ $Pe=2500$).....	125
Şekil 7.41. Sıcaklığın boru boyunca değişimi ($r=0$, $\varphi=0,002$ $Pe=2500$).....	125
Şekil 7.42. Sıcaklığın radyal yönde değişimi ($z=1$, $\varphi=0,002$ $Pe=2500$).....	126
Şekil 7.43. Boyutsuz hızın ($z^*=Z/L$) farklı kesitlerdeki değişimi [$\varphi=0,002$ $Pe=2500$, ($r^* = \frac{r}{D}$, $u^* = \frac{u}{u_0}$)].....	126

Şekil	Sayfa
Şekil 7.44. Boyutsuz sıcaklığın ($z^*=Z/L$) farklı kesitlerdeki değişimi [$\varphi=0,002$, $Pe=2500$, ($r^* = \frac{r}{D}$)].....	127
Şekil 7.45. Boyutsuz hızın farklı Peclet sayıları için değişimi [$\varphi=0,002$, $Pe=2500$ $Pe=4000$ $Pe=6000$, ($r^* = \frac{r}{D}$, $u^* = \frac{u}{u_0}$)].....	127
Şekil 7.46. Boyutsuz Sıcaklığın farklı Peclet sayıları için değişimi [$\varphi=0,002$, $Pe=2500$ $Pe=4000$ $Pe=6000$, ($r^* = \frac{r}{D}$, $u^* = \frac{u}{u_0}$)].....	128
Şekil 7.47. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için hızın $Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi($\varphi=0,002$, $\varphi=0,01$ $\varphi=0,015$ $\varphi=0,02$ $\varphi=0,025$, $Pe=2500$).....	129
Şekil 7.48. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için sıcaklığın $z^*=Z/L=0,8$ kesitindeki değişimi($\varphi=0,002$, $\varphi=0,01$ $\varphi=0,015$ $\varphi=0,02$ $\varphi=0,025$, $Pe=2500$).....	129
Şekil 7.49. Boru boyunca nano akışkana ve suya ait sıcaklıkların değişimi ($\varphi=0,002$, $Pe=2500$).....	130
Şekil 7.50. Boru boyunca nano akışkan ve suya ait ısı transfer katsayısının (h) değişimi($\varphi=0,002$, $Pe=2500$).....	130
Şekil 7.51. Farklı kesitlerde boru boyunca nano akışkan ve suya ait Nusselt sayısının(Nu) değişimi($\varphi=0,002$, $Pe=2500$).....	131
Şekil 7.52. $\varphi=0,002$ hacimsel oranı için Isı transfer katsayısının(h) Reynolds (Re) sayısı ile değişimi.....	132
Şekil 7.53. $\varphi=0,002$ hacimsel oranı için Isı transfer katsayısının(h) Peclet(Pe) sayısı ile değişimi.....	132
Şekil 7.54. $\varphi=0,002$ hacimsel oranı için Nusselt(Nu) sayısının Peclet(Pe) sayısı ile değişimi.....	133
Şekil 7.55. $\varphi=0,002$ hacimsel oranı için Nusselt(Nu) sayısının Reynolds(Re) sayısı ile değişimi.....	133
Şekil 7.56. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması($q_w=7500 \text{ w/m}^2$).....	134

Şekil	Sayfa
Şekil 7.57. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Reynolds(Re) sayısı ile karşılaştırılması ($q_w=7500 \text{ w/m}^2$).....	135
Şekil 7.58. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması ($q_w=2500 \text{ w/m}^2$).....	135
Şekil 7.59. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Reynolds(Re) sayısı ile karşılaştırılması ($q_w=2500 \text{ w/m}^2$).....	136
Şekil 7.60. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Peclet(Pe) sayısı ile (sabit duvar akıları $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ve $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ değerleri) karşılaştırılması.....	136
Şekil 7.61. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Peclet(Pe) sayısı ile (sabit duvar akıları $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ve $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ değerleri) ile sabit duvar sıcaklığının karşılaştırılması.....	137

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Isı transfer alan, (m ²)
A_c	Boru kesit alanı, (m ²)
a	Lineer denklem katsayısı
b	Kaynak terimi
c_{pnf}	Nanoakışkanın özgül ısısı (kJ/kg·K)
c_{ps}	Nanopartikülün özgül ısısı (kJ/kg·K)
c_{pw}	Sabit basınçta suyun özgül ısısı, (kJ/kg·K)
C_f	Yüzey sürtünme katsayısı
$\overline{C_f}$	Ortalama yüzey sürtünme katsayısı
d	Tüpün çapı, (m)
D_h	Hidrolik çap, (m)
d_p	Partikül çapı (nm)
F_D	Sürüklenme kuvveti, (N)
F_B	Brownian kuvveti, (N)
F_L	Saffman's kaldırma kuvveti, (N)
$\overline{h}$	Ortalama ısı transferi katsayısı, (W/m ² ·K)
h_{xf (deney)}	Nano akışkanın deneysel ortalama ısı transferi katsayısı, (W/m ² ·K)
h	Taşıyım ısı transferi katsayısı, (W/m ² ·K)
h_{w-block}	Soğutma bloğunun ısı aktarımı katsayısı, (W/m ² ·K)
h_r	Nano akışkanın ısı transfer katsayısının ana akışkan ısı transfer katsayısına oranı

Simgeler**Açıklama**

ρ_{nf}	Nano akışkan yoğunluğu, (kg/m ³)
ρ_s	Nano partikül yoğunluğu, (kg/m ³)
ρ_w	Suyun yoğunluğu, (kg/m ³)
k_B	Boltzmann sabitini
k_{nf}	Nanoakışkanın Isı iletim katsayısı, (W/m·K)
k_s	Nanopartikülün Isı iletim katsayısı, (W/m·K)
k_w	Suyun Isı iletim katsayısı, (W/m·K)
L	Tüp uzunluğu, (m)
L_g	Tüp giriş uzunluğu, (m)
$\dot{m}$	Nano akışkana ait kütleli debi kg/s
μ_{nf}	Nano akışkanın dinamik viskozitesi, (kg/m·s)
μ_w	Suyun dinamik viskozitesi, (kg/m·s)
μ_{wnf}	Tüpün duvar sıcaklığındaki nano akışkanın dinamik viskozitesi, (Pa s)
nb	P'ye komşu hücreler
$Nu_{nf}(\text{deney})$	Nano akışkanın deneysel ortalama Nusselt sayısı
$Nu_{nf}(\text{teorik})$	Seider-Tate korelasyonu ortalama Nusselt sayısı
Nu_{nf}	Sayısal olarak hesaplanan ortalama Nusselt sayısı
P	Basınç, (Pa)
q_w	Isı akısı, (W/m ²)
$\dot{Q}$	Boru yüzeyinden boru içerisindeki akışkana taşınım ile gerçekleşen ısı transferi, (W/m ²)
Pr	Su için Prandtl sayısı, ($Pr = c_p \mu / k$)
r_p	Nano parçacığın yarıçapı (nm)
Re	Su için Reynolds sayısı, ($Re = \rho u D_H / \mu$)
Re_{nf}	Nano akışkanın Reynolds sayısı ($Re_{nf} = \rho_{nf} u D_H / \mu_{nf}$)

Simgeler**Açıklama**

Pr_{nf}	Nano akışkanın Prandtl sayısı ($Pr_{nf} = c_{pnf} \mu_{nf} / k_{nf}$)
Pe_{nf}	Nano akışkanın Peclet sayısı ($Pe = Pr_{nf} \cdot Re_{nf}$)
$q_{electric}$	toplam elektrik giriş gücü w/m^2
Sc	Kaynak katsayısı
S_e	Enerji transferini ifade eden kaynak terimi
S_m	Momentum transferini ifade eden kaynak terimi
T_b	Ortalama akışkan sıcaklığı, (K)
T_c	Nano akışkanın boruya çıkış sıcaklığı (K)
T_o	Akışkanın boruya giriş sıcaklığı (K)
T_w	Boru Duvar sıcaklığı, (K)
$\bar{u}$	Nano akışkana ait ortalama hız (m/sn)
u_o	Akışa ait giriş hızı, (m/s)
u_z	Hızın z - yönündeki bileşeni, (m/s)
V_s	Akışkan içindeki Nanopartikül hacmi (m^3)
V_t	Toplam nanopartikül hacmi (m^3)
c_c	Cunningham correction değeri
ν	Akışkana ait kinematik viskoziteyi
φ	Akışkan içerisindeki nano parçacık hacimsel oranı
λ	Ortalama serbest yol
τ_r	Nano akışkanın kayma geriliminin ana akışkan kayma gerilimine oranı
α	Isıl yayılabilirlik katsayısı

Kısaltma**Açıklama**

sad	Sayısal akışkanlar mekaniği
cfđ	Computational fluid dynamics
se	Sonlu elemanlar

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasının en önemli sorunlarından biri enerji kaynaklarının hızla tükenmesidir. Çeşitli yeni enerji kaynaklarının bulunmaya çalışılması kadar önemli olan bir husus da mevcut enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanılmasını sağlamaktır. Bu nedenle enerji kullanan sistemlerin verimli hale getirilmesi pozitif bilimlerle uğraşan insanların ortak kaygılarından biri olmuştur. Bu kapsamda endüstrinin her alanında kullanılan ısı değiştiricilerde ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalarda enerji ekonomisi açısından dikkate değer bir literatür oluşturmuştur. Isı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar genel olarak “pasif”, “aktif” ve “karma” yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Pasif yöntemler, dış güç kullanılmasını gerektirmeyen yöntemlerdir. Dönmeli akış cihazları, pürüzlü yüzeyler, borunun içine yerleştirilen iyileştirme elemanları vs. pasif yöntemlere örnek olarak verilebilir. Aktif yöntemler, dış güç kaynağının kullanılmasını gerektiren yöntemlerdir ve mekanik karıştırıcılar, akışkan titreşimi, yüzey titreşimi, elektrostatik alanlar vs. bu yöntemler arasında sayılabilir. Karma yöntemlerde ise aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlası birlikte kullanılmaktadır [1].

Pasif yöntemler uygulandığında ısı transferinde önemli miktarda iyileşmeler gözlemlenirken, basınç düşümünde dolayısıyla akışkanı pompalamak için gerekli enerji miktarında büyük bir artış meydana gelmektedir. Bunun yanında, pasif iyileştirme yöntemlerinin kullanılması, sistemde çözülmesi gereken çeşitli problemler oluşturmaktadır. Örneğin, nükleer santrallerde, boru içerisine yerleştirilen türbülötörler nedeniyle ortaya çıkan akış kaynaklı titreşimler boru sistemlerinde yorulmalara, hatta rezonans durumunda sistemde yorulma kaynaklı kırılma ve çatlamalara neden olmaktadır. Kimyasal proseslerde ise akışkanın özelliklerine bağlı olarak çökme, kirlenme gibi problemler meydana gelmekte bu ise belli bir süre sonra ısı transferini olumsuz yönde etkilemektedir.

Akışkan ısıtma ve soğutma, güç santralleri, üretim süreçlerini, taşımacılık ve elektroniği içeren birçok sanayide (endüstride) önemli roller oynar. Literatürde, farklı işlemlerde (süreçlerde) çok sayıda ısı transferi artırma yöntemleri bulunduğu

belirtmektedir. Bu yöntemlerin çoğu yapısal çeşitliliği esas almaktadır ve bunların arasında ısı yüzeyi alanı artırımı (kanatçıklar), ısıtılmış yüzeyin titreşimi, akışkan enjekte etme veya geri çekme (emme) ve elektriksel veya manyetik alanlar uygulaması örnek olarak verilebilir. Bu iyileştirme teknikleri, ısı akışındaki astronomik artışı güçlkle karşılamaktadır. Bu bağlamda, enerji aktarma akışkanlarının ısı özelliklerinin geliştirilmesi ısı transferini artırmanın sırrı olabilmektedir. Su, etilen glikol ve yağ gibi geleneksel ısı iletim akışkanları, nitelik olarak metallere ve metal oksitlere bile göre düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Bu yüzden, katı parçacıklarla suspanse edilmiş akışkanların sıradan ısı transfer akışkanlarına kıyasla daha iyi ısı transferi özelliklerine sahip olması beklenmektedir.

Modern teknoloji, ısı transferi artırma yöntemlerinde bir devrim yapan nanometre boyutlu metalik veya metalik olmayan ultra ince parçacıkların üretimini mümkün kılmaktadır. Çok küçük parçacık boyutları ve küçük hacimsel kesirleri göz önünde tutulduğunda, tıkanma ve basınç düşüşündeki artışlar gibi problemler nano akışkanlar için önemsiz kalmaktadır. Aynı zamanda nano akışkanların göreceli olarak büyük olan yüzey alanları nano parçacıkların dengesini artırmakta ve çökmesini (tortulaşmasını) azaltmaktadır. Isı iletim verimliliğinde daha büyük bir iyileşmenin, süspansiyondaki parçacık boyutunu küçültmenin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Çünkü ısı iletimi parçacıkların yüzeyinde gerçekleşmektedir.

Su, motor yağı ve etilen glikol (antifriz) gibi akışkanlar ısı değıştircilerde kullanılan geleneksel ısı transferi akışkanlarıdır. Isı transferini iyileştirmek amacıyla yukarıda bahsedilen iyileştirme yöntemleri kullanılmasına rağmen, bu geleneksel akışkanların ısı transferi performanslarının düşük olması iyileşme veriminin az olmasına neden olmakta ayrıca ısı değıştircinin küçük boyutlarda ve az yer kaplayan geometride olmasını sınırlamaktadır.

Isı değıştircideki iş yapan temel akışkan içerisine katı partiküllerin süspansiyon şeklinde katılması pasif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem geleneksel akışkanın ısı iletkenliğini artırarak akışkanın ısı transferi karakteristiklerini iyileştirmektedir. Bir katı metalin ısı iletkenliği temel akışkanınkinden yüksek olduğu için temel akışkan

içerisine süspansiyon olarak katılan ince katı metaller, akışkanın ısı iletkenliğini artırmaktadır.

Nano akışkanlar, ana akışkan ve nano parçacıkların homojen dağılımından oluşmaktadır. Nano parçacıklar 1 ile 100 nm çap aralığında parçacıklardır. Nano akışkanlarda, partikül olarak bakır ve alumina gibi metal veya metal oksit nano parçacıkları kullanılır ve baz akışkan ise genellikle su veya etilen glikol gibi iletken bir akışkandır. Etkin bir ısı transfer zenginleşmesi gözleyebilmek için, nano akışkanlar yaygın olarak hacimce %5'e kadar nano parçacık içerirler. Mühendislik çalışmalarında ısı transfer özellikleri nedeniyle nano akışkanlarla çalışılmaktadır. Isıl iletkenliği ve baz akışkanın özellikleri üzerinden taşınım özelliklerini zenginleştirirler. Baz akışkan üzerinde tipik termal iletkenlik zenginleşmesi % 15 ile % 40 aralığında olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmakta olup, ısı transfer katsayısında % 40'a kadar bir zenginleşme sağlandığı gözlemlenmiştir [1]. Isıl iletkenlikte bu büyüklükte bir artış yalnızca akışkana eklenen nano parçacıkların yüksek ısı iletkenliğine bağlanamaz, performans artışında diğer mekanizmalar da etkilidir.

Akışkan içerisine milimetre veya mikrometre boyutlarındaki katı partiküllerin süspanse edilmesi ile akışkanın ısı iletkenliğinin artırılması 100 yıldan fazla zamandan beri bilinen bir yöntemdir [2]. Ancak boru/kanal içerisindeki büyük basınç düşümleri, çökeltme, tortulaşma, aşınma gibi problemlerden dolayı endüstriyel işlemlerde bu uygulamalar cazip bulunmamıştır. Ayrıca bu boyuttaki partiküllerle hazırlanan süspansiyonların daha az kararlı bir yapı göstermeleri nedeniyle mikro kanallarda tıkanmalara neden olduğu bildirilmiştir [3]. Malzeme bilimindeki son yıllardaki gelişmelere paralel olarak nanometre boyutlarında partiküllerin üretilebilmesiyle bu problemlerin giderilme olanağı doğmuştur. Isı iletkenlikleri yüksek bakır, alüminyum, altın, gümüş vb. nanometre boyutlardaki katı partiküller geleneksel ısı transferi akışkanlarına katılarak yeni bir ısı transfer akışkan tipi üretilmiştir.

2. NANO AKIŞKANLAR

2.1. Nano Akışkanlar ile Isı Transferinin İyileştirilmesi

Nano partiküllerin katılması ile iş yapan akışkanın ısı transferi performansının önemli derecede iyileşmesine neden olan temel fiziksel olaylar aşağıdaki gibi sıralanabilir [4]:

1. Akışkan içerisine süspanse edilen partiküller akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini büyütür.
2. Partiküller akışkanın efektif ısı kapasitesini artırır.
3. Partiküller arasındaki etkileşim ve çarpışmalar akışkanın ve akış geçidinin yüzeyinin artmasına neden olur.
4. Akışkanın çalkantıları ve türbülans şiddeti artar.
5. Nano partiküllerin saçılması akışkanın enine sıcaklık eğiminin düzleşmesine neden olur.

Nano akışkan üretebilmek için çoğunlukla kullanılan nano partiküller alüminyum oksit (Al_2O_3), bakır (Cu), bakır oksit (CuO), altın (Au), gümüş (Ag) ve silisyum dioksit (SiO_2)'dir. Nano partiküller gaz yoğunlaştırılması, mekanik aşındırma ve kimyasal çöktürme yöntemlerinden biriyle üretilmektedir [2]. Gaz yoğunlaştırma işlemi diğer yöntemlere göre daha avantajlı bir yöntemdir. Zira partiküller daha temiz bir ortamda üretilmekte ve yüzeyleri istenmeyen maddelerle kaplanmamaktadır. Ancak düşük bir enerji uygulanması durumunda parçacıklar küçük demetçiklere ayrılarak toplanmalar meydana gelmektedir.

2.2. Nano Akışkanların Endüstriyel Uygulamaları

Endüstride kullanılan ısı değiştiricilerde ısı performansını artırmaya yönelik değişik konfigürasyonlar denenmektedir. Bu uygulamalarda malzeme tasarrufu, ısı değiştirici

boyutları, pompalama gücü vb. etkenler verimli sistemler üretebilmek için önemli kısıtlayıcılardır.

Otomobil, kamyon, uçak gibi taşıma endüstrisi, performansları yüksek araçlar üretmeye devam ettikçe, performansa paralel olarak artan efektif soğutma ihtiyaçları gereği malzeme, boyut, hacim, ağırlık ve ekonomiklik kısıtlarını da dikkate alarak ısı atabilecekleri etkili akışkanlara ihtiyaç duymaktadırlar. Bugün soğutma sistemlerinde kullanılan antifriz/su karışımları, motor yağları, sentetik yüksek sıcaklık ısı transferi akışkanları doğaları gereği çok yüksek ısı transferi kapasitelerine sahip değildir ve bu akışkanların ısı kapasiteleri nano akışkanlar kullanılarak daha etkili hale gelebileceği düşünülmektedir. Nano akışkanlar kullanılarak tasarlanmış ısı değiştiricilere sahip motorlar daha uygun sıcaklıklarda çalışabileceklerdir. Böylece, daha küçük pompa, motor, radyatör ve diğer bileşenler üretilebilecek, bunun sonucunda ise aynı miktarda yakıtla daha fazla yol alınabilecektir. Daha az yakıt ise daha az emisyon ve daha temiz çevre anlamına gelmektedir.

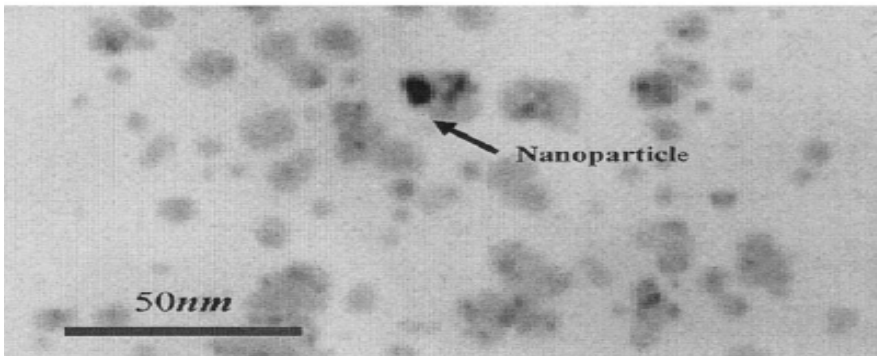
Bilim ve teknolojide 1960'lardan beri minyatürleşme yükselen bir değer olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) çalışırken çok büyük değerlerde ısı akısı ortaya çıkmaktadır. Mevcut soğutucular yeterli soğutma kapasitesine sahip olmadığı için MEMS teknolojisinde kullanılmamaktadır. Geleneksel katı partiküllerin katıldığı soğutucular kullanıldığında ise, kullanılan bu partiküller oldukça dar olan MEMS mikro kanallarında düzgün olarak akamayacağı için sistem çalışmayacaktır. Nano akışkanlar bu kanalları tıkamadan, çökmeden, aşındırmadan akabilecek özellikte olduğu için çok yüksek ısı akısı şartlarında MEMS soğutulması için de oldukça uygun olacaktır.

Her geçen gün hızları, performansları artan elektronik cihazlar ve bu cihazların bileşenleri oldukça yüksek değerlerde ısı üretmekte ve üretilen bu ısı, sistemden uzaklaştırılamadığı durumda sistem ömrü azalmaktadır. Yarı iletkenlerin ömürleri mutlak sıcaklıkla logaritmik olarak değişmektedir. Yarı iletkenin bulunduğu cihazın ömrü sıcaklıktaki her 20 °C artışla yarıya inmektedir [5]. Elektronik cihazlarda bozulmaya etki eden faktörlerin başında %55'lik bir etki ile eklem sıcaklığı gelmektedir [6]. Geleneksel

artırılmış yüzeyler kullanan soğutma sistemleri yeni nesil elektronik cihazlarda limitlerine ulaşmıştır. Nano akışkanların kullanıldığı sıvı tipli soğutma yöntemleri, elektronik cihazların performansını ve ömürlerindeki mevcut limitleri artırmaya neden olacaktır.

Ayrıca nano akışkanların havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde (HVAC) ve soğutma sistemlerinde uygulanması enerjinin daha verimli ve daha ucuz olarak kullanılabilmesi için yeni tasarımların gerçekleştirilmesine imkân verecektir.

Nano boyutlu metal veya metal oksit parçacıkların üretilmesi için üretim yöntemi geliştirmeden önce, akışkan içerisine milimetre ve mikrometre boyutunda nano parçacıklar eklenmesinin etkileri üzerine bazı araştırmalar yapılmıştır. Bu parçacıklar, akışkanın ısıl iletkenliğini geliştirmeye yardımcı olmalarına rağmen, uyum sağlama, şiddetli basınç düşüşlerine meydan verme, kanalı tıkama ve kanallarda veya bileşenlerde zamansız yıpranma (aşınma) gibi diğer problemler meydana getirmişlerdir. Nano-boyutlu parçacıkların, mikron boyutlu parçacıkların üzerinde avantajları vardır. Çünkü onlar akışkanın molekül boyutlarına yakın boyutlardadırlar. Şekil 2.1. de Etilen glikol içerisindeki bakır nano-parçacıkların boyutları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Etilen glikol içerisindeki bakır nano-parçacıkların boyutları [5]

Akışkanın ısı transfer özelliklerini artırmak maksadıyla içerisine küçük metal parçacıklar eklemek fikri 1904'te Maxwell [3] tarafından belgelendiği için, yeni

değildir. Maxwell ve Hamilton ile Crosser [4] tarafından mikro veya daha büyük parçacık boyutlu akışkanların ısı iletkenliklerini hesaplamayı amaçlamışlardır [5]. Fakat ikisi de akışkan ısı iletkenliği üzerinde parçacık boyutunun etkisini tahmin edememişlerdir [6].

2.3. Nano Parçacıkların ve Nano Akışkanın Üretimi

Nano parçacıklar iki yoldan biriyle üretilir: Fiziksel yöntem ve Kimyasal yöntem. Fiziksel teknikler, mekanik öğütme ve inert (tesirsiz) gaz yoğunlaştırma tekniklerini içerir. Kimyasal işlem, kimyasal çökeltme, püskürterek (spray) eritme ve ısı püskürtmeyi içerir. Aynı zamanda, tek-basamaklı işlem ve iki basamaklı işlem olmak üzere nano akışkan üretiminde iki yol daha vardır. İki-basamaklı işlemde nano parçacıklar üretilip daha sonra baz akışkana yayılırken, tek-basamaklı işlemde nano parçacıklar baz akışkanın içerisinde eşzamanlı olarak üretilmekte ve yayılmaktadır. İki-basamaklı işlemin en büyük dezavantajı, nano parçacıkların ana akışkanın içinde yayılmadan önce topaklaşma eğiliminde olmasıdır. Tek basamaklı işlem aynı zamanda, nano parçacıkların oksidasyonunu önlemesi sebebiyle de faydalıdır [1].

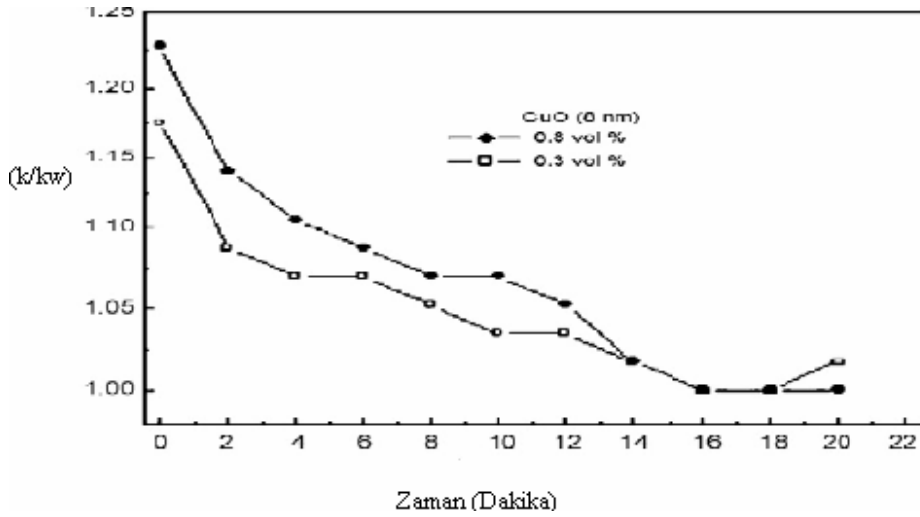
2.4. Nano Akışkanlarda Isı Transferi Değişkenlikleri

Nano akışkanlarda ısı transferinin artırılması birçok mekanizmayla bağlantılıdır ve her biri ayrı ayrı ele alınmalıdır. Isı iletiminin artırılması konusunda sadece ısı iletim katsayısı üzerine değil, değişkenlerin etkin ısı iletkenliğini nasıl etkilediği üzerine birçok araştırma yapılmıştır.

2.4.1. Parçacık topaklanması (yığılması)

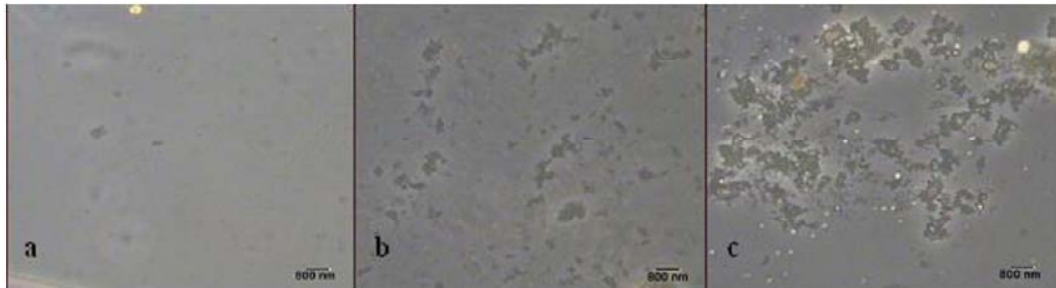
Nano akışkanlarla ilgili dikkat çeken bir durum, nano parçacıkların Van Der Waals kuvveti [7,8] gibi moleküler kuvvetler yüzünden topaklanma eğiliminde olmasıdır. Karthikeyan, Philip, ve Raj [7], bakır oksit / su nano akışkanıyla gerçekleştirdikleri deneylerinde nano parçacık ve topak boyutunun ısı iletkenlik üzerinde önemli bir etkisi olduğunu buldular. Aynı zamanda, topaklanmanın zamana bağımlı olduğunu

da buldular. Deneyleri esnasında zaman ilerledikçe ısı iletkenliğin azalmasına sebep olan topaklanma arttığını tespit ettiler. Şekil 2.2. ısı iletkenliğin zamanla nasıl azaldığını göstermektedir.



Şekil 2.2. Bakır oksit içerikli nano akışkanın ısı iletkenliğinin zaman içerisinde değişimi [7]

Şekil 2.2. de, nano akışkanın ısı iletkenliğinin paręacık topaklanmasına bağlı olduğu gibi, zamanın ilerlemesiyle de ęarpıcı bir şekilde dıştığu görülebilmektedir. Bu teoriyi Şekil 2.3. de grldğu gibi, mikroskop görüntüsüyle de doğrulamışlardır.



Şekil 2.3. Su içerisindeki %0,1 konsantarasyon oranındaki Bakır oksit içerikli nano paręacıkların zaman iğerindeki değişimi a)20 dakika b)60 dakika c) 70 dakika [7]

Şekilde görüleceği gibi, nano paręacıkların yığın oluşturması zaman içerisinde aşırı biçimde artmakta ve 60 dakika sonra dikkat ęekici bir hale gelmektedir. Karthikeyan,

Philip, ve Raj fotoğraf çektikleri esnada çökelme olmadığını gözlemlemişlerdir. Topaklanma, nano parçacıkların etkin yüzey alanından hacim oranına kadar azalmaya, dolayısıyla akışkanın ısı iletkenliğinin düşmesine sebep olmaktadır. Grup aynı zamanda, parçacıklar birbirine daha çok yaklaştığı ve daha fazla Van Der Waals kuvvetine maruz kaldığı için, nano parçacık konsantrasyonundaki artışla, topaklanmanın arttığını yorumladılar. Wang [9] ise, alumina-su nano akışkanının viskozitesini ölçmüş ve viskozitenin nano parçacık topaklanmasıyla arttığını bulmuştur. Bu artış aynı zamanda, topaklanma arttığında daha düşük bir ısı iletkenlik oluşumuna katkıda bulunmaktadır.

2.4.2. Hacim oranı (kesri)

Nano parçacıkların hacimsel oranı arttıkça nano akışkanın etkin ısı iletkenliği artmaktadır [7]. Fakat nano parçacıkların hacimsel oranının artışıyla birlikte nano parçacıkların askıda kalacağı farzı, geçerli olmayacaktır. Nano akışkanlarda çok küçük hacimsel oranda nano parçacık kullanımının daha etkin olmasının sebebinin bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir [2].

2.4.3. Brownian devinimi

Birçok araştırmacı, parçacıkların rastgele hareketi olan Brownian deviniminin, nano akışkanlarda anahtar ısı iletim mekanizmalarından biri olduğunu tespit ettiler [10,11]. Onun, bir mikro taşınım etkisine sebep olduğu düşünülmektedir. Brownian devinimi sadece akışkandaki parçacıklar aşırı küçük olduğunda ortaya çıkar ve parçacıkların boyutunun büyümesiyle Brownian deviniminin etkileri azalır [12].

2.4.4. Termoforez

Sıvının daha sıcak bölgesindeki yüksek enerjili moleküllerin, sıvının soğuk bölgesindeki moleküllerden daha büyük momentumlu moleküller üzerinde etkili olduğu kinetik teori yüzünden “Termoforez” meydana gelmektedir. Bu durum,

sıcaklık değişiminin tersi yönde yani sıcak bölgelerden soğuk bölgelere doğru bir parçacık göçüne öncülük ettiğini göstermektedir.

2.4.5. Nano parçacık boyutu

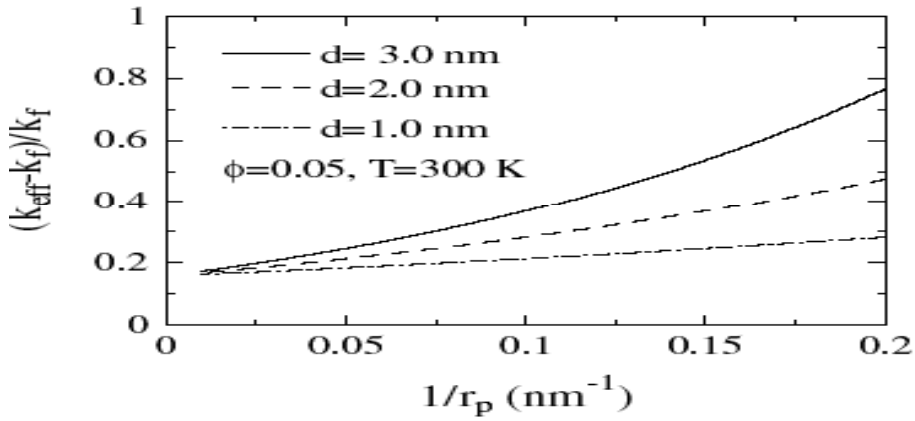
Birçok çalışmalar göstermiştir ki, nano parçacıkların boyutları küçüldükçe nano akışkanın etkin ısıl iletkenliği artmıştır [11]. Bunun iki sebebi vardır. Nano parçacık boyutu küçüldükçe Brownian devinimi tetiklenir. Aynı zamanda nano akışkanlarla deney yapmada en büyük teknik dürtülerden biri, daha hafif ve daha küçük nano parçacıkların çökelmeye direncinin daha iyi olmasıdır [12].

2.4.6. Parçacık şekli / yüzey alanı

Birçok çalışma, karbon nano tüpler gibi çubuk şekilli nano parçacıkların, küresel nano parçacıklardan daha fazla ısı ilettiğini göstermiştir [1,13,14,15]. Bu belki de, çubuk şekilli parçacıkların küresel nano parçacıklara göre daha büyük en-boy oranına (parçacığın yüzey alanı ile hacmi arasındaki oran) sahip olması gerçeğinden kaynaklanmaktadır.

2.4.7. Nano parçacık-sıvı ara yüzünde sıvı tabakalanması

Bazı araştırmacılar, nano parçacıklar üzerinde, nano akışkanın ısı transfer özelliklerini artırmaya yardımcı olan bir sıvı tabakalanma olduğunu öne sürmektedirler. Bu nano tabakanın kalınlığı ve ısıl iletkenliği henüz bilinmemektedir. Fakat katı yüzeye yakın olan sıvı moleküllerin tabakaları şekillendirdiği Yu, Richter, Datta ve arkadaşları tarafından ispatlanmıştır [16]. Ren, Xie ve Cai [5], nano parçacıklara sıvı tabakalanma eklemekle elde edilen ısıl iletkenlik değişimi üzerinde çalışmak için bir teorik model oluşturmuşlardır. Tabakanın ısıl iletkenliğinin, ana akışkanın ve nano parçacıkların ısıl iletkenlikleri arasında bir yerde olacağını farz etmişlerdir. Tabaka kalınlığındaki bir artışın, büyük bir ısıl iletkenlik artışına öncülük ettiğini bulmuşlardır. Sonuçlar Şekil 2.4. de görülmektedir.

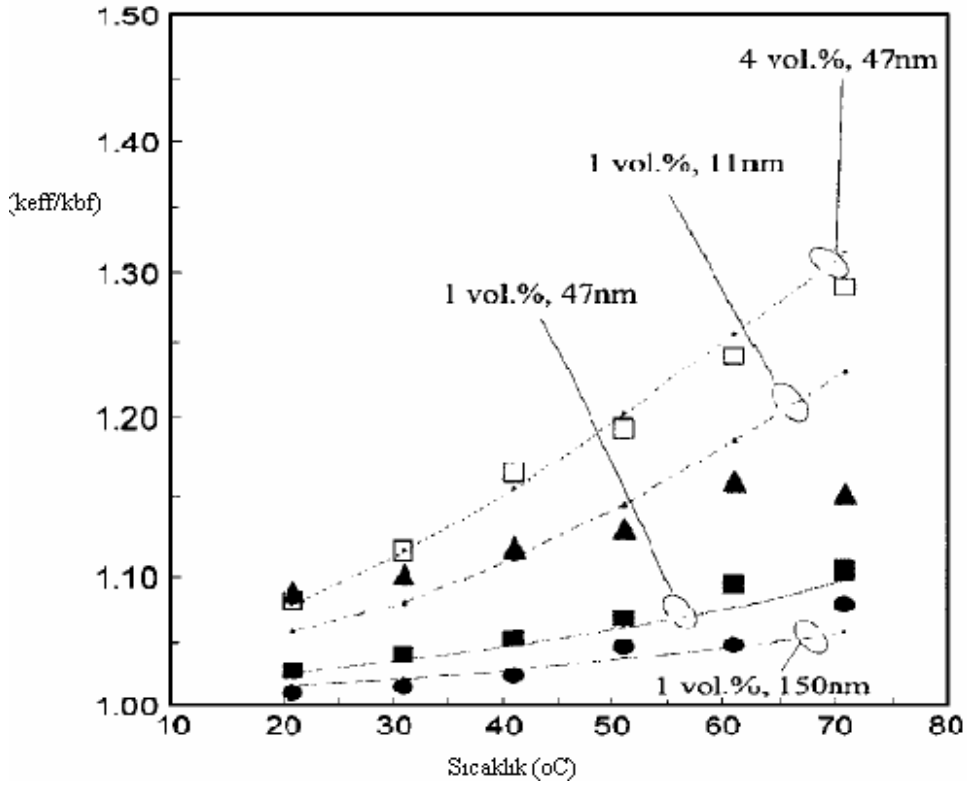


Şekil 2.4. Nano parçacık yarıçapının tersi üzerinde Isıl iletkenliği artışının Etkisi [5]

Şekilde, “d” sıvı tabakalanmanın kalınlığı, r_p ise nano parçacığın yarıçapıdır. Görülebileceği üzere yüzey tabakalanmasının artışıyla, nano akışkanın ısı iletkenliği yükselmektedir. Ren, Xie ve Cai, aynı zamanda nano parçacıkların boyutları arttığında, sıvı tabakalanmanın etkisinin zayıfladığını bulmuşlardır.

2.4.8. Sıcaklık

Nano akışkanların etkin ısı iletkenliği ve Brownian devinimi, sıcaklıkla artmaktadır [2,11,12,17]. Chon, Kihm, Lee ve Choi [11], Alumina nano akışkanlarının ve bunların ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğine dair deneysel bir araştırma yaptılar. Şekil 2.5. de yapılan çalışmanın sonuçları görülmektedir.



Şekil 2.5. Nano akışkanların ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişiminin deneysel sonuçları [11]

Şekil 2.5. de, normalleştirilmiş ısı iletkenliğin, ya da nano akışkanın ısı iletkenliğinin ana akışkanın ısı iletkenliğine oranının, nano parçacıkların hacimsel oranına bağlı olduğu kadar sıcaklıkla da oldukça bağıntılı olduğu aşikârdır. Nano parçacıkların sıcaklıklarının ve hacimsel kesirlerinin artmasıyla ısı iletkenlik de artar.

2.4.9. Termal sınır tabaka kalınlığında azalma

Birçok araştırmacı, termal sınır tabaka kalınlığında bir azalmanın, nano akışkanlarda ısı transferi artışına sebep olabilecek bir mekanizma olabileceğinden bahsetmişlerdir. Fakat bunu kesinleştirmek için bu alanda çok az araştırma bulunmaktadır.

Nano akışkanlarla yapılan araştırmalar halen oldukça yenidir, dolayısıyla nano akışkanlarda ısı taşınımı üzerine etki eden bazı mekanizmaların derinlemesine

araştırılmasına henüz devam edilmektedir. Buna ilaveten, ısı iletkenliğe etki eden mekanizmalar üzerinde birçok araştırma yapılmış, fakat taşınım ısı transfer katsayısına etki eden mekanizmalar üzerine çok fazla araştırma yapılmamıştır. Isı transfer mekanizmalarının iyice anlaşılabilmesi için, Bölüm 1.2. de listelenen tüm alanlarda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

2.5. Nano Akışkan Özelliklerinin Tespit Edilmesi

2.5.1. Isıl iletkenlik

Nano akışkan araştırmalarının büyük çoğunluğu, Bölüm 2.2. de belirtilen nano akışkanların ısı transfer değişkenleri üzerine daha geniş olarak tartışılmış bulunan nano akışkanların ısı iletkenliğini belirleme üzerine olmuştur [15]. Bazı araştırmacılar ısı iletkenlikte orta düzey artışlar bulmuşlar, fakat çoğunluğu büyük artışlar gözlemlemiştir. Örneğin, Garg, Poudel, Chiesa ve arkadaşları [18], bakır/etilen glikol nano akışkanı ile yaptıkları testte, Maxwell'in etkin ortam teorisinde tahmin edilenin iki katı miktarda ısı iletkenlik bulmuşlardır.

2.5.1.1. Isıl iletkenliğin ölçümü

Nano akışkanlarda ısı iletkenliğin ölçümünde en yaygın yöntem, geçici sıcak kablo yöntemidir. İnce bir platin kablo, elektriksel yalıtım katmanıyla kaplanır. Kablo nano akışkana daldırılır ve üzerinden sabit akım geçirilir. Kablodaki sıcaklık artışı zamana bağımlı olarak ölçülür. Isıl iletkenlik, k 'nın nano akışkanın ısı iletkenliği, Q 'nun kabloda yayılan toplam güç, L 'nin kablonun uzunluğu, T 'nin kablonun sıcaklığı ve t 'nin zaman olduğu Eş. 2.1 den hesaplanabilir.

$$k = Q / 4\pi L d T / d \ln t \quad (2.1)$$

Sıcaklık artışını ölçmek için, sıcak kablo Wheatstone köprüsünün bir parçasını oluşturur. Kablo sıcaklığındaki değişim, köprünün dengesinin bozulmasına yol açar, kablo direnci değişikliğine sebep olur. Kablo direncindeki değişim, köprüdeki voltaj

denge-sizliğınden hesaplanır. Kablo direncindeki değışim, kablo direncindeki değışimi kablo sıcaklığındaki değışimle bağıntılayan veri ile karşılaştırılır ve sıcaklık farklılığı elde edilir. Geçici sıcak kablo tekniğı kullanımı sıcaklık düşüşüne bir katsayı bağıntılar ve bu katsayının, iletim olsun, nano taşı-nım olsun veya herhangi bir başka ısı iletim tipinde olsun, meydana gelebilecek tüm ısı transfer şekillerini kapsayacağı belirtilmelidir.

2.5.2. Isı Kapasitesi

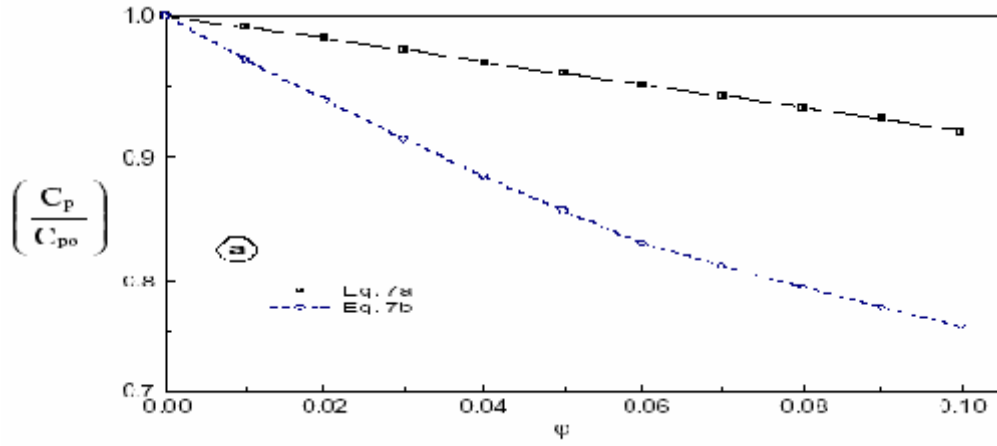
Kesin olarak hesaplanabilmesi önemli olduğı için, enerji denklemine nano akışkanın ısı kapasitesi dâhil edilmiştir. Birçok araştırmacı, Eş.2.2 de yer alan 2 bağıntıdan birini kullanır.

$$c_{nf}=(1-\varphi)c_{bf}+\varphi c_p \quad (2.2a)$$

$$c_{nf}=[(1-\varphi)(\rho c)_{bf}+\varphi(\rho c)_p]/\rho \quad (2.2b)$$

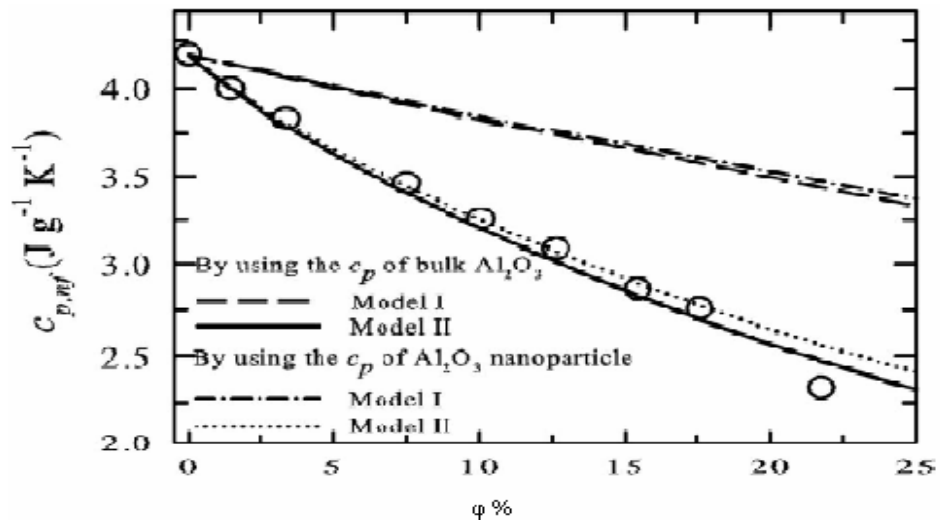
Burada, “c” ısı kapasitesini, “ φ ” nano parçacıkların hacimsel oranını, “p” ise yoğunluğu belirtmektedir. “b_f” indisi baz akışkanın özelliklerine, “p” indisi ise nano parçacıkların özelliklerine atıfta bulunmaktadır. Eş.2.2a basitçe ısı kapasitesiyle ilgili olan karışımlar eşitliğı iken, Eş. 2.2b eşitliğı ise bunun değıştirilmiş şeklidir. Mansour, Galanis, ve Nguyen [19], her iki fonksiyonu da nano akışkandaki nano parçacık konsantrasyonuna bağılı olarak ana akışkanın belirli ısısının oranı olarak çizdiler.

Alumina nano parçacıklar ve su için buldukları sonuçlar, Şekil 2.6. da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Isı kapasitesi formüllerinin kıyası (mavi boş yuvarlaklar: Eş. 2.2a, siyah dolu yuvarlaklar: Eş.2.2b [19])

Şekil 2.6. da Eş. 2.2a'nın, Eş.2.2b'den daha düşük olduğu görülebilir. Mansour, Galanis, ve Nguyen, hangi bağıntının doğru olduğundan emin değillerdi, dolayısıyla her ikisini de geçerli kabul ettiler. Fakat Zhou ve Ni [20] her iki bağıntıyı daha derinlemesine incelediler ve Eş. 2.2b'nin geçerli olduğunu buldular. Mansour, Galanis, ve Nguyen'inkilerin benzeri olan su ana akışkanındaki alumina nano parçacıkları için Zhou ve Ni'nin sonuçları Şekil 2.7. de gösterilmiştir.



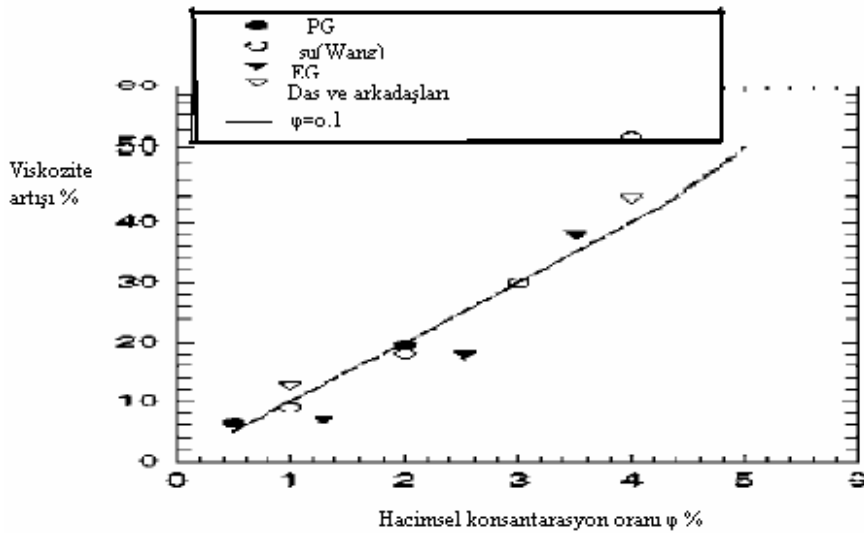
Şekil 2.7. Isı kapasitesi formüllerinin kıyası Eş. 2a, Eş. 2b Model I ve Model II [20]

Şekil 2.7. de Model I Eş. 2.2a'yı ve Model II ise Eş. 2.2b'yi göstermektedir. Yuvarlaklar, Zhou ve Ni'nin elde ettiği deneysel verilerdir ve onlar nano akışkanların

davranışını tahmin etmede kullanmak için Eş. 2.2b nin en iyi belirli ısı bağıntısı olduğunu ispatlayarak Eş. 2.2b nin üzerine çalışmışlardır.

2.5.3. Viskozite

Prasher, Song, Wang ve arkadaşları [21], propilen glikol'deki alumina parçacıklarının viskozitesi ve bunun parçacık çapına, nano parçacık hacimsel oranına ve sıcaklığa bağımlılığının sadece deneysel sonuçları üzerine bir makale yayımladılar. Nano akışkanların viskozitesinin, nano parçacık hacimsel oranına had safhada bağımlı, fakat kesme oranından, nano parçacık çapından ve sıcaklıktan bağımsız olduğunu buldular. Nano akışkanın viskozitesinin, kesme oranından ve nano parçacık çapından bağımsız olması gerçeği, nano akışkanın Newtonian davranışına uyduğunu (bağlı kaldığını) göstermektedir. Şekil 2.8. viskozitenin nano parçacık hacimsel oranına bağımlılığını göstermektedir.



Şekil 2.8. Nano akışkanın viskozitesinin hacimsel orana bağımlılığı [21]

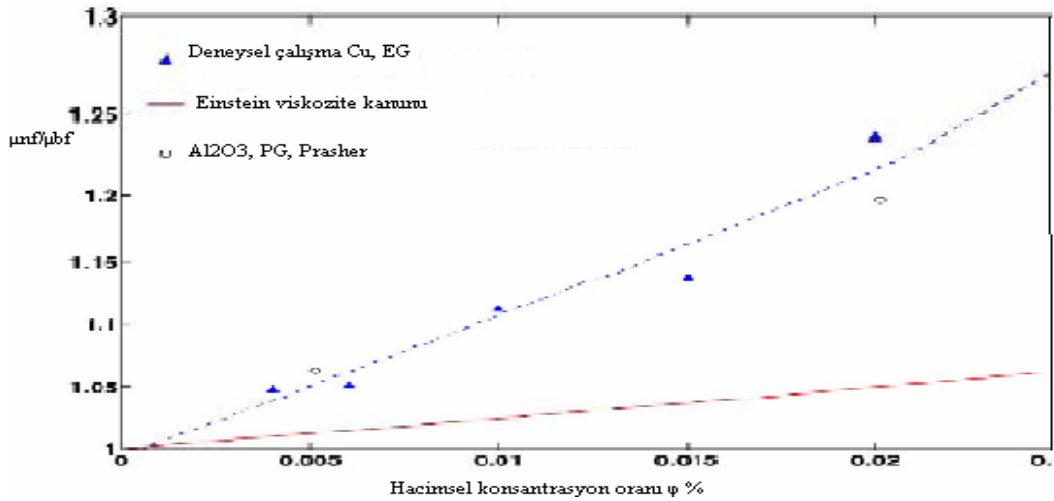
Şekil 2.8. de, y-ekseni üzerinde viskozitedeki yüzde artış, nano akışkanın viskozitesini ana akışkanın viskozitesiyle kıyaslamaktadır. Görülebileceği gibi, viskozite nano parçacıkların hacimsel oranına oldukça bağımlıdır ve Prasher, Song, Wang ve arkadaşları nano akışkanların, düşük nano parçacık hacimsel oranları için

Einstein'ın Viskozite Kanununa uyduklarını fakat nano parçacıkların nano akışkan içerisinde yığılması yüzünden, yüksek hacimsel oranlarda bu kanuna uymadığını öne sürmüşlerdir. Şekil 2.8. aynı zamanda diğer araştırmacılardan da veriler içermektedir. Bu verilerden, viskozitedeki artışın, ısı iletkenlikteki artıştan daha büyük olabileceğinin mümkün olduğu ortaya çıkmaktadır.

Garg, Poudel, Chiesa ve arkadaşları[18], etilen glikol içerisinde bakır nano parçacıkların viskozitesini test etmek için bir deney yürüttüler ve viskozitedeki artışın, Eş. 2.3 de verilen Einstein'ın Viskozite Kanunuyla tahmin edilenin yaklaşık 4 katı viskozite artışı tespit ettiler.

$$\mu / \mu_{bf} = 1 + 2,5\varphi \quad (2.3)$$

Eş. 2.3 de, μ nano akışkanın viskozitesi, μ_{bf} temel akışkanın viskozitesi, φ nano parçacık hacimsel oranıdır. Şekil 2.9. çalışmanın sonuçlarını göstermektedir.

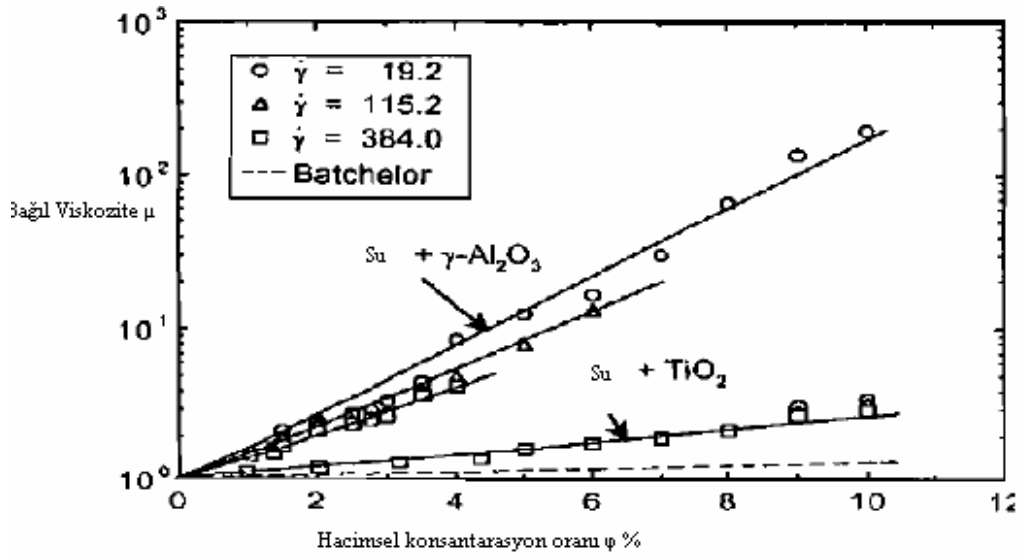


Şekil 2.9. Etilen glikol nano akışkanındaki bakırın viskozitesi [18]

Şekil 2.9. dan görülebileceği gibi, Einstein'ın Viskozite Kanunu, deneysel sonuçları şiddetle küçümsemektedir. Garg, Poudel, Chiesa ve arkadaşları, Eş. 2.3. deki 2,5 değerinin, kendi verileriyle bağdaştırdıklarında 11 civarında olması gerektiğini

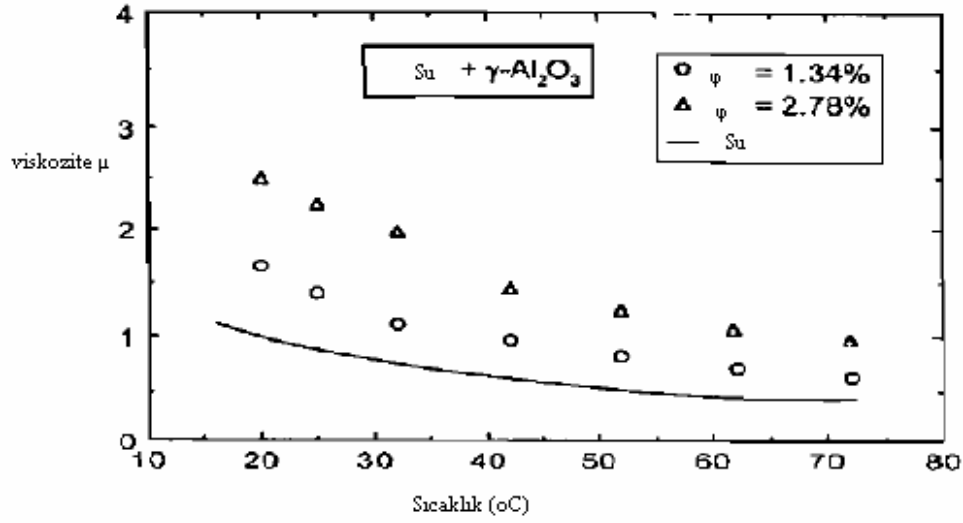
buldular. Onlar aynı zamanda böylesine yüksek bir viskoziteyle, çok küçük borularda (tüplerde) akışın ısı transferinde etkili olmayacağını, daha büyük boruların (tüplerin) daha etkili olacağını belgelediler.

Pak ve Cho'nun [22], yuvarlak bir boruda alümina/su ve titanyum oksit/su nano akışkanlarının türbülansı üzerine yaptıkları deneysel çalışmada, %10'luk alumina/su nano akışkanının viskozitesinin 200 kat, hacimce %10'luk titanyum oksit/su nano akışkanın viskozitesinin ise 3 kat arttığını tespit ettiler. Sonuçlar Şekil 2.10. da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Farklı kayma gerilmelerinde nano parçacığın bağıl viskozitesi [22]

Bağıl viskozite, nano akışkanın viskozitesinin ana akışkanın viskozitesine oranıdır. Pak ve Cho, Şekil 2.11. de görüleceği gibi, sıcaklık arttıkça viskozitenin azaldığını bulmuşlardır.

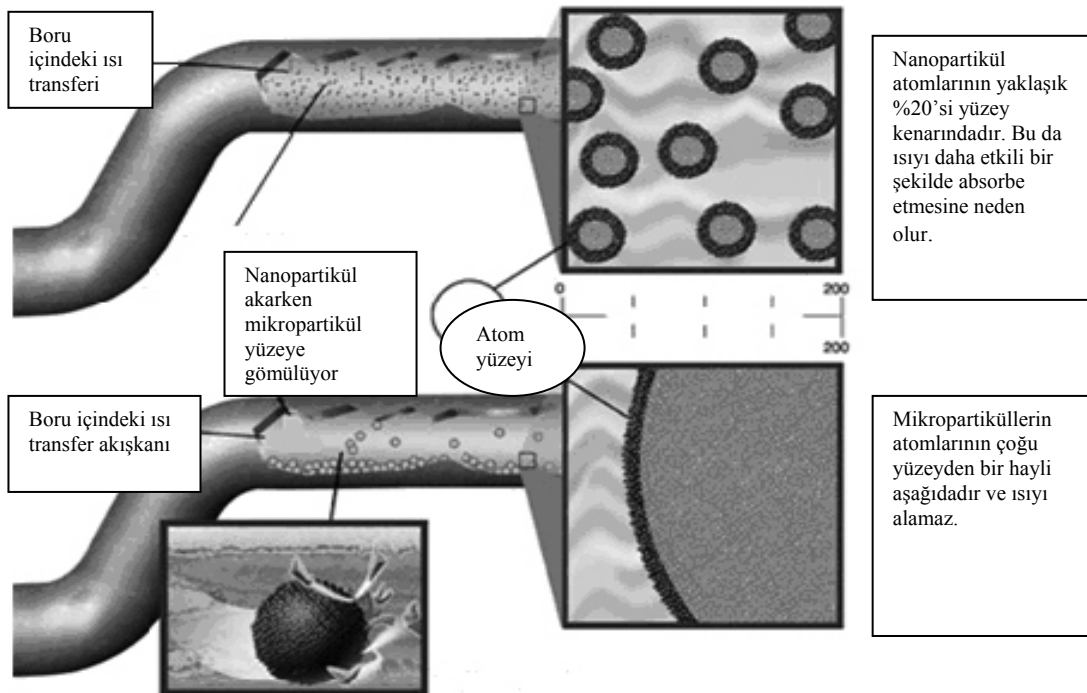


Şekil 2.11. Alüminyum parçacıklı nano akışkanın viskozitesinin sıcaklıkla değişimi [22]

Pak ve Cho, nano parçacıkların hacimsel oranı arttıkça viskozitenin azalma hızının daha büyüdüğünü gözlemlediler. Pak ve Cho, etkin parçacık boyutunun parçacığın yarıçapından büyük ve Debye uzunluğuna (elektronların, elektriksel alan oluşturma ölçeği) eşit olması gerçeğinden kaynaklanan, viskoelektrik etki yüzünden viskozitede artış olabileceğini öne sürdüler. Pak ve Cho, aynı zamanda küre boyutunun ve şeklinin viskozite üzerinde etkiye sahip olduğunu buldular. Küre çapı azaldıkça ve küre şekli düzensizleştikçe viskozite artmaktadır. Yüzey alanının, hacmine oranı arttığı için, düzensiz şekilli nano parçacıkların viskoziteyi artırdığı düşünülmektedir.

3.NANO AKIŞKAN TAŞINIM LİTERATÜRÜNÜN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ

Geleneksel akışkanların ısı transferi performanslarını iyileştirmek amacıyla nano partiküllerin akışkan içerisine katılması, başka deyişle nano akışkanların hazırlanması özen gösterilmesi gereken önemli bir işlemdir. Zira nano akışkan kavramı basit bir şekilde sıvı-katı karışımı anlamına gelmemektedir. Hazırlanan akışkanın tam, kararlı ve uzun ömürlü bir süspansiyon olması, partiküllerin çok küçük miktarda topaklanması ve akışkanın kimyasal özelliklerinin değişmemesi gerekmektedir. Nanometre boyutlardaki katı partiküllerin katıldığı bu yeni ısı transferi akışkanlarına “nano akışkan (nanofluid)” denmektedir. Nano akışkanlar üzerine ilk kez Argonne Milli Laboratuvarında 1995 yılında çalışılmaya başlanmıştır [3]. Nano akışkan olarak çözelti içerisinde dağılmış nanometre boyutlu parçacıkları ilk olarak Choi tarafından kullanılmış ve nano akışkanın ısı iletkenliğinde oldukça artış olduğunu gözlemlemiştir. Şekil 3.1. de Nanopartiküllerin Mikropartiküllerle karşılaştırılması verilmiştir.



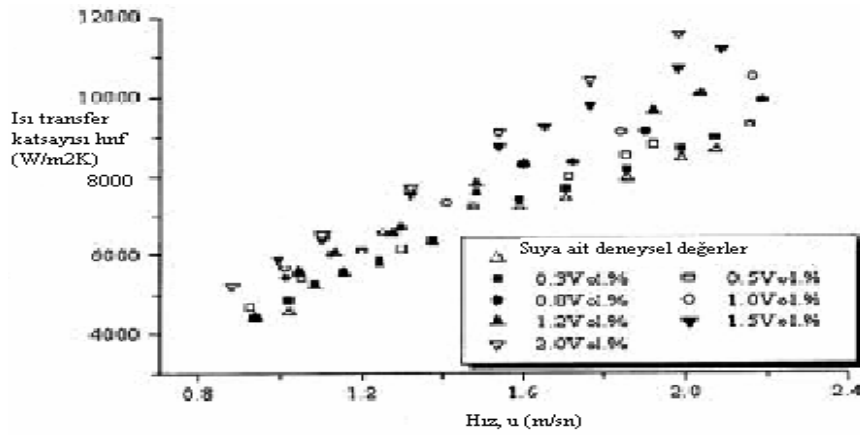
Şekil 3.1. Nano partiküllerin Mikro partiküllerle karşılaştırılması [5]

Bugüne kadar taşınımı, özellikle de zorlanmış taşınımı kapsayan çok az araştırma yapılmıştır [23]. Çoğu araştırma nano akışkanların ısı iletkenliğini belirlemeye odaklanmıştı ve taşınımın ısı iletim katsayısının bulunmasına çok fazla önem verilmiyordu. Zorlanmış taşınım için mevcut araştırmalarda pek çok araştırmacı nano akışkanların zorlanmış taşınımını, bu araştırmada da olduğu gibi bir tüpte incelemişlerdir. Aşağıda taşınım, özellikle de zorlanmış taşınım ile yapılmış olan araştırmaları kapsamaktadır.

3.1. Nano Akışkanlarda Taşınımın Isı Transferinin ve Akış Özelliklerinin İncelenmesi

Literatürde nano akışkan hazırlanmasına yönelik en kapsamlı çalışma Xuan and Li [4] tarafından verilmiştir. Nano akışkanları hazırlama yönteminin uygulamaya göre belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Xuan ve Li, bir tüp içerisinde nano akışkanların türbülanslı taşınım ısı transferi üzerine deneysel bir araştırma yürüttüler ve hacim yüzdesi ile Reynolds sayısını dikkate aldılar. Çalışmalarında 100 nm’den küçük çaplardaki bakır nano parçacıklar, deiyonize su ile karıştırıldı ve nano parçacık yoğunluğu %0,3 ile %2,0 arasında değişti. Yaptıkları deneyde hesaplanan ısı transfer katsayıları Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Türbülanslı akışta ısı transfer katsayısının hızla değişimi[4]

Şekil 3.2. den görülebileceği gibi, taşınım ısı transfer katsayısı nano parçacık hacimsel yüzdesiyle olduğu kadar, akışkan hızıyla da artmaktadır. Gösterilen tüm nano akışkanlar, suyunkinin üzerinde bir ısı taşınım katsayısı artışına sahiptir. Xuan ve Li, daha yüksek nano parçacık hacimsel yüzdelerinde viskozitenin, nano akışkanın ısı transfer artırımın baskılayacak şekilde sert bir şekilde yükseldiğini belirttiler. Bu yüzden, ısı transferinde iyileşme sağlamak için, uygun nano parçacık hacimsel yüzdesini dikkatle seçmek önemlidir.

Lee ve arkadaşları hacimce %4 'lük etilen glikol çözeltisi içindeki 35 nm boyutlu CuO parçacıklarının, ısı iletkenlikte %20 artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Choi ve arkadaşları (2001), hacimce %1 carbon nano tüpte, motor yağının ısı iletkenliğinde %160'lık bir zenginleşme olduğunu gözlemlemişlerdir. Das ve arkadaşları (2003), nano akışkanlarda ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağımlılığını, deneysel olarak incelemişler ve 21-51 C 'lik sıcaklık aralığının üzerinde nano akışkanın ısı iletkenliğinde 2-4 kat artış olabileceği gözlemlemişlerdir. Maxusell ve Hamilton-Crosser gibi teorik modellerde ise, nano akışkanların tahmin edilen ısı iletkenliklerinin altında kaldığı için nano akışkanlarda ısı iletkenliği artırma mekanizmaları üzerine çalışmalara çok büyük ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır.

Li ve Xuan (2000) , sabit duvar ısı akışlı bir tüpte akan 35 nm boyutlu Cu/Deiyonize su nano akışkanını deneysel olarak incelediler ve aynı akış hızında nano akışkan için Nusselt sayısının oranının, nano parçacıkların hacimsel kesrini(oranını) sırasıyla %0,5 'ten %1,2'ye artırarak, 1,05'ten 1,14'e kadar değiştiğini göstermişlerdir. Xuan ile Li (2000) ve Xuan ile Roetzel (2000), nano akışkan kaynaklı ısı artışını göstermek için iki yaklaşım düşündüler. İlk yaklaşım, hem akışkan fazının hem de parçacıkların ısı iletkenlik durumunda olduğu ve aynı hızda aktığı tek fazlı modeldi. İkinci analizde, nano akışkanın ısı transfer artışının, ana akıştaki nano parçacıkların düzensiz (karmaşık) hareketinden kaynaklandığını yorumlamak için, yayılma (dağılma) modelini seçtiler. Xuan ve Li (2003), türbülanslı akış rejiminde sabit duvar ısı akış şartlarında Bakır/Su nano akışkanlarının ısı iletimini incelediler ve taşınım ısı transfer artışının, ısı iletim artışına veya nano akışkandaki nano parçacıkların rastgele hareketine ve yayılmasına bağlı olabileceğini yorumladılar. Yayılma

modelini baz alan ve artışı açıklamak için hacimsel oranın ve nano parçacıkların boyutunun etkisini göz önüne alan yeni bağıntı önerdiler. Wan ve Ding(2004), sabit duvar ısı akısı altında laminar akışta Al_2O_3/Su nano akışkanının ısı iletimini araştırdılar ve özellikle giriş bölgesinde Reynolds sayısı ve nano parçacık yoğunluğuyla, nano akışkanın ısı transfer katsayısında bir artış raporladılar. Nano akışkanın ısı gelişme uzunluğunun, saf suyunkinden daha büyük olduğunu ifade ettiler. Nano akışkanlar için ısı iletimi artışının sebebi, ısıl iletkenliğin düzgün olmayan dağılımı ve nano parçacıkların Brownian hareketi sonucu oluşan yoğunluk nedeniyle oluşan ısıl sınır tabaka kalınlığının azalmasıdır. Palm ve arkadaşları(2004) ile Roy ve arkadaşları(2004), radyal akışlı bir sistem içerisinde Al_2O_3 /etilen glikol ve Al_2O_3/su nano akışkanlarının laminar akış ısı transferlerinin sayısal incelemeleri sonucunda ısı transfer hızında epeyce iyileşme bildirdiler. Aynı zamanda, duvar kesme gerilmesinin nano parçacık yoğunluğu ve Reynolds sayısı ile arttığını gösterdiler. Yang ve arkadaşları(2005), laminar akışta grafit/ATF ve grafit/baz oil nano akışkanı için taşınım ısı transfer katsayısında iyileşme bildirdiler. Fakat, iyileşme faktörlerini, geleneksel denklemlerden elde edilen tahmini değerlerden daha az olduğunu gösterdiler.

Bu inceleme sonucunda nano akışkanın faz değişimi Das ve arkadaşları (2003) tarafından incelenmiş ve nano akışkanlar için kaynama performansında kötüleşme gözlemlenmiştir.

Tsai ve arkadaşları(2004), ısı borusu(hattı) termal(ısı) performansında nano parçacıkların yapısal karakterinin etkisi üzerine çalıştılar ve nano parçacıklı ısı borularının ısı direncinin, aynı durumdaki damıtılmış suyunkinden daha düşük olduğunu yorumladılar. Ding ve Wen(2005) , Brownian harekette olduğu gibi, kesme hızında ve yoğunluktaki şekilsel eğimden kaynaklanan nano parçacık yer değiştirmesinin, ısı transferi için çok önemli bir anlamı olduğunu gösterdiler.

Nano akışkanların mühendislik sistemlerinde kullanımıyla ilgili literatür çok zengin değildir. Son yıllarda özellikle ısı transferi akışkanı olarak kullanılan yeni süspansiyonların

taşıyım karakteristiklerini belirlemeye ve süspansiyonların ısı iletkenliklerinin belirlenmesi üzerine modeller geliştirmeye yönelik çalışmaların yoğunluk kazandığı görülmektedir. Wen and Ding [3] alümina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ve deiyonize edilmiş su kullanarak nano akışkanların taşıyım ile ısı transferini belirlemek amacıyla bir çalışma yapmışlar, ısı transferinde dikkate değer bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Isı transferi davranışını karakterize etmede literatürde bilinen klasik Shah denkleminin başarısız olduğunu, bunun nedeninin ise partiküllerin taşıyımını nedeniyle sınır tabakanın bozulması olduğunu iddia etmişlerdir.

Choi ve arkadaşları [15] katı/sıvı süspansiyonları için efektif termal iletkenliği veren konvansiyonel modelleri bir tablo halinde vermişlerdir. k_p partikülün termal iletkenliği, k esas akışkanın termal iletkenliği, k_e partikül/sıvı süspansiyonunun efektif termal iletkenliği, ϕ (phi) süspansiyonun partikül hacim oranı, a (alfa) termal iletkenlikler oranı, $(a=k_p/k_f)$, β (beta) = $(a-1)/(a+2)$ ve n partikül şekil faktörü olarak tanımlanmıştır.

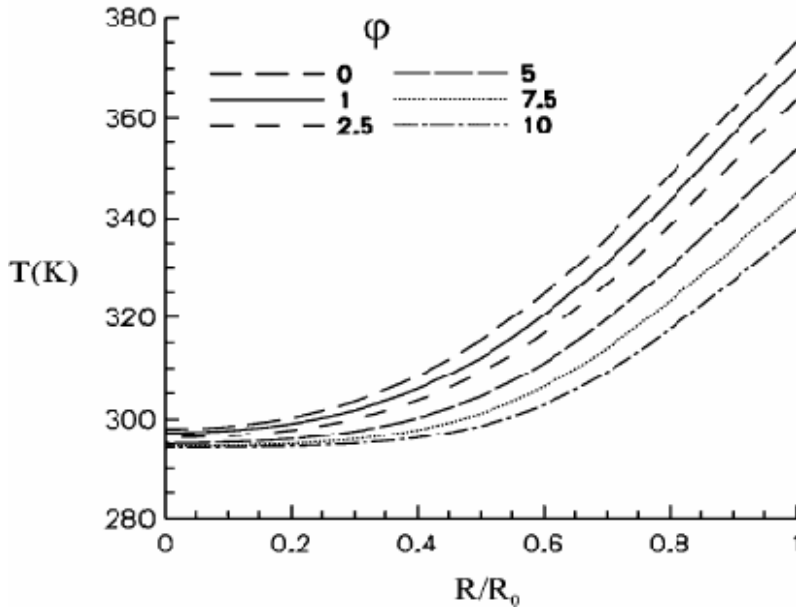
Putra ve arkadaşları [8] farklı iki ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}$) nanopartikül-su bazlı süspansiyonun bir ucundan ısıtılan diğer ucundan soğutulan yatay bir boru içindeki doğal taşıyım karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Partikül konsantrasyonu, partikülün malzemesi ve akışkanın aktığı silindirin geometrik özellikleri gibi parametrelerin değişimlerini ve birbirleri ile ilişkisini kararlı halde araştırmışlardır. Partikül konsantrasyonunun artması ile ısı transferi miktarının azaldığını belirtmişlerdir.

Özellikle nano akışkanların doğal taşıyım ile ilgili deneysel verilerinin az olması nedeniyle Khanafer ve arkadaşları [9] analitik bir model geliştirmiştir. Modelde nano akışkanın tek fazda olduğu, yani akışkan ve partiküllerin termal olarak dengede olduğu ve aynı hızda aktığı kabul edilmiştir. Yine Kim ve arkadaşları [10] nano akışkanın ısı iletkenliğinin temel akışkanın ısı iletkenliğine oranı, nano akışkanın yoğunluğunun temel akışkanın yoğunluğuna oranı, nano akışkanın ısı kapasitesinin temel akışkanın ısı kapasitesine oranı, şekil faktörü ve hacimsel oran gibi etkenleri içeren yeni bir faktör (f) tanımlamış ve analitik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İki çalışmada da partiküllerin hacimsel oranı arttıkça ısı transferi miktarının arttığı görülmüştür. Putra ve

arkadaşları [8] tarafından yapılan deneysel çalışma ile bu iki analitik çalışmanın sonuçları arasında bir uyumsuzluk söz konusudur. Trisaksri ve Wongwises 2005 tarihli araştırma çalışmasında [11] bu uyumsuzluğa dikkat çekmiş ve konunun bundan sonraki çalışmalarda netleşeceğini ifade etmişlerdir.

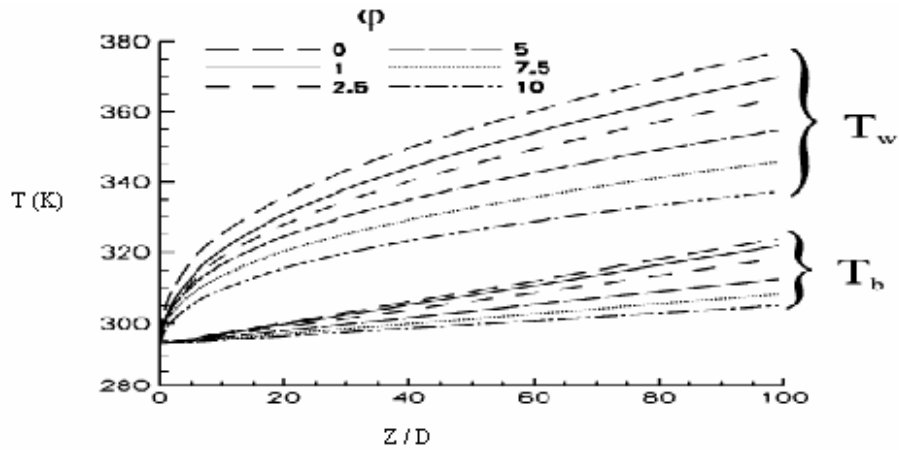
Maiga, Palm, Nguyen ve arkadaşları uniform olarak ısıtılmış bir tüp içerisinde akan H_2O - γAl_2O_3 ve glikol- γAl_2O_3 nano akışkanlarının, zorlanmış konveksiyonla ısı transferini laminar ve türbülanslı bölge için incelemek üzere matematiksel denklemler ve nümerik çözüm yöntemi geliştirirken sıvı katı karışımını tek fazlı olarak ele almışlardır. Türbülanslı akış bölgesi için akışkanın ısı akısını tanımlarken, Navier-Stokes denklemini ve κ - ϵ türbülans modelini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler akışkan içerisinde partikül konsantrasyonunun artışı ile akışkanın ısı transferinin arttığını, glikol- γAl_2O_3 nano akışkanında bu artışın H_2O - γAl_2O_3 nano akışkanından daha fazla olduğunu göstermişlerdir[17].

Maiga, Palm, Nguyen ve arkadaşları[24], Hesaplamalı Akışkan Dinamiği Prensibini kullanarak düzgün ısıtılmış bir tüpte laminar zorlanmış taşınım üzerine çalıştılar. Hem suda ve hem de etilen glikol içerisinde, yayılmış Alümina parçacıklar kullandılar. Nano parçacık hacimsel oranı ve Reynolds sayısı arttıkça ısı transfer katsayısının ve kayma geriliminin arttığını buldular. Maiga, Palm, Nguyen ve arkadaşları aynı zamanda etilen glikol karışımındaki ısı transferi artışının sudakinden daha dikkate değer olduğunu bulmuşlardır. Fakat Etilen glikol, kayma gerilimi üzerinde daha fazla yan etki (istenmeyen etki) meydana getirmiştir. Çalışmalarında ϕ nano parçacıkların hacimsel yoğunluğu, R tüp içerisindeki radyal konum, D tüpün çapı, R_0 tüpün yarıçapı, Z tüpün boy uzunluğu, T nano akışkanın sıcaklığı, h_r nano akışkanın ısı transfer katsayısının ana akışkan ısı transfer katsayısına oranı ve τ_r nano akışkanın kayma geriliminin ana akışkan kayma gerilimine oranıdır. Sunulan tüm sonuçlar, Reynolds sayısı (Re) 500 ve sabit ısı akısı(q) 10.000 W/m^2 olan su/alumina karışımı içindir. Aynı sonuçlar etilen glikol/su karışımı için de bulunmuştur. Şekil 3.3. parçacık hacimsel oranının radyal sıcaklık profili üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 3.3. φ parametrelerinin akışkanın sıcaklık profili üzerindeki etkileri

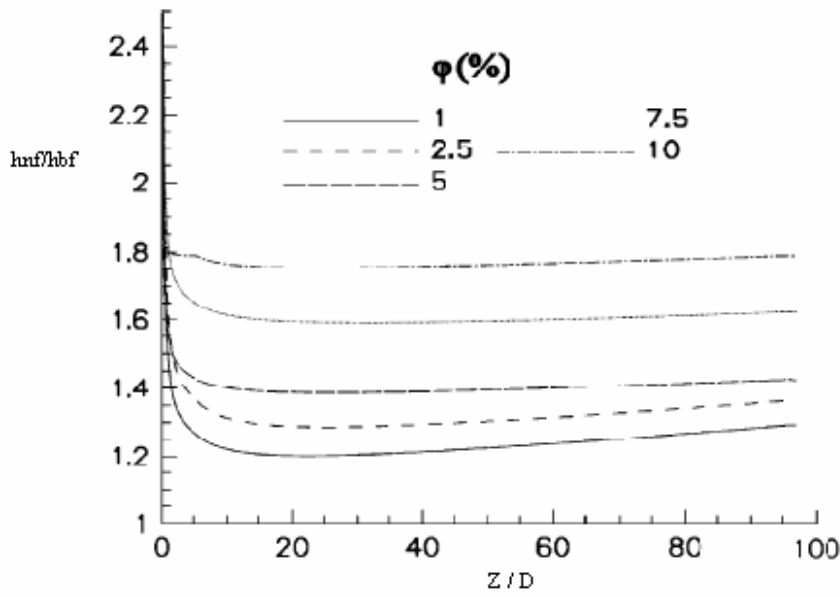
Şekil 3.4. den görülebileceği gibi, özellikle $R/R_0=1$ olduğu tüp duvarı civarında φ ’deki bir artışla akışkan sıcaklıkları düşer ki bu da nano parçacıklarla daha yüksek bir ısı transfer oranına ulaşıldığını gösterir [24].



Şekil 3.4. φ parametrelerinin akışkanın bulk ve duvar sıcaklığı üzerindeki etkileri [24]

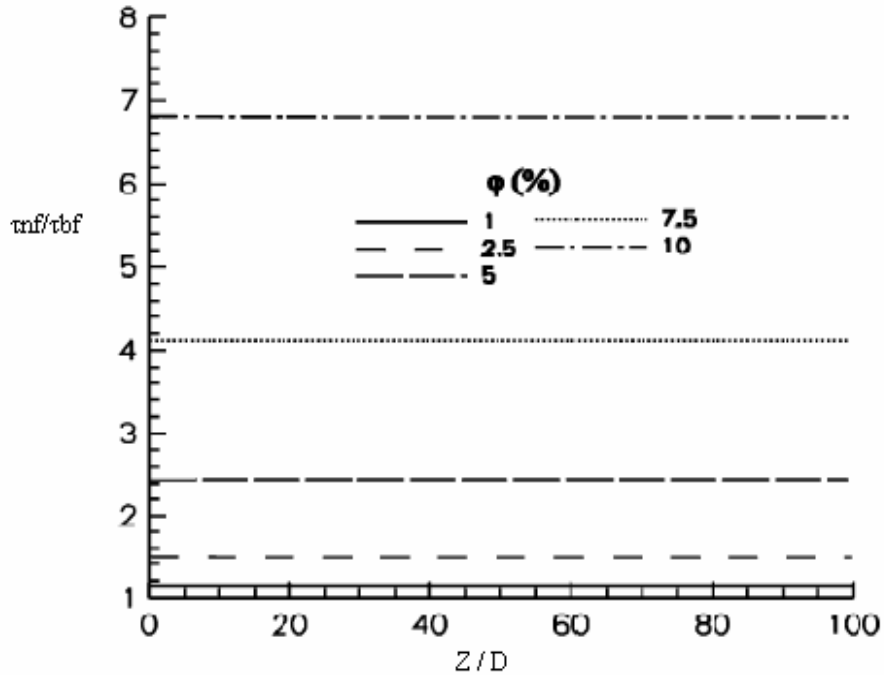
Maiga, Palm, Nguyen ve arkadaşları Şekil 3.4. de, borunun duvar sıcaklığının ana akışkanın sıcaklığından ziyade, nano parçacık hacimsel oranıyla daha çok değiştiğini

bulmuşlardır ve bu da tüp duvarının yakınında daha çok ısı açığa çıktığını ispatlamaktadır. Aynı zamanda akışkan sıcaklığının tüm tüp boyunca düşmediği ve en büyük düşüşün tüp çıkışında gerçekleştiği gözlemlenebilir. Şekil 3.3. ve 3.4. de, akışkana nano parçacıklar eklenmesi sebebiyle belirgin bir ısı iletkenliği artışı görülmektedir. Şekil 3.5. tüp boyuna karşılık ısı iletkenlik katsayısını göstermektedir.



Şekil 3.5. ϕ parametrelerinin ısı transfer katsayısı üzerindeki etkileri

Şekil 3.5. den görüleceği gibi, ısı transfer katsayısındaki artışlar, ana akışkanın ısı transfer katsayısından %63 kadar fazla oluşuyla önemlidir. Isı transfer artışı oranının, nano parçacık hacimsel oranının artışıyla açık bir biçimde artmaktadır. Tüp boyunun sonuna doğru, tüpün ucuna doğru çok az artan daha düşük nano parçacık hacimsel oranları hariç, ısı transfer artışı oranının duracak görünmektedir. Şekil 3.6. nano parçacık hacimsel oranının duvar kayma gerilimi üzerindeki etkisini göstermektedir.



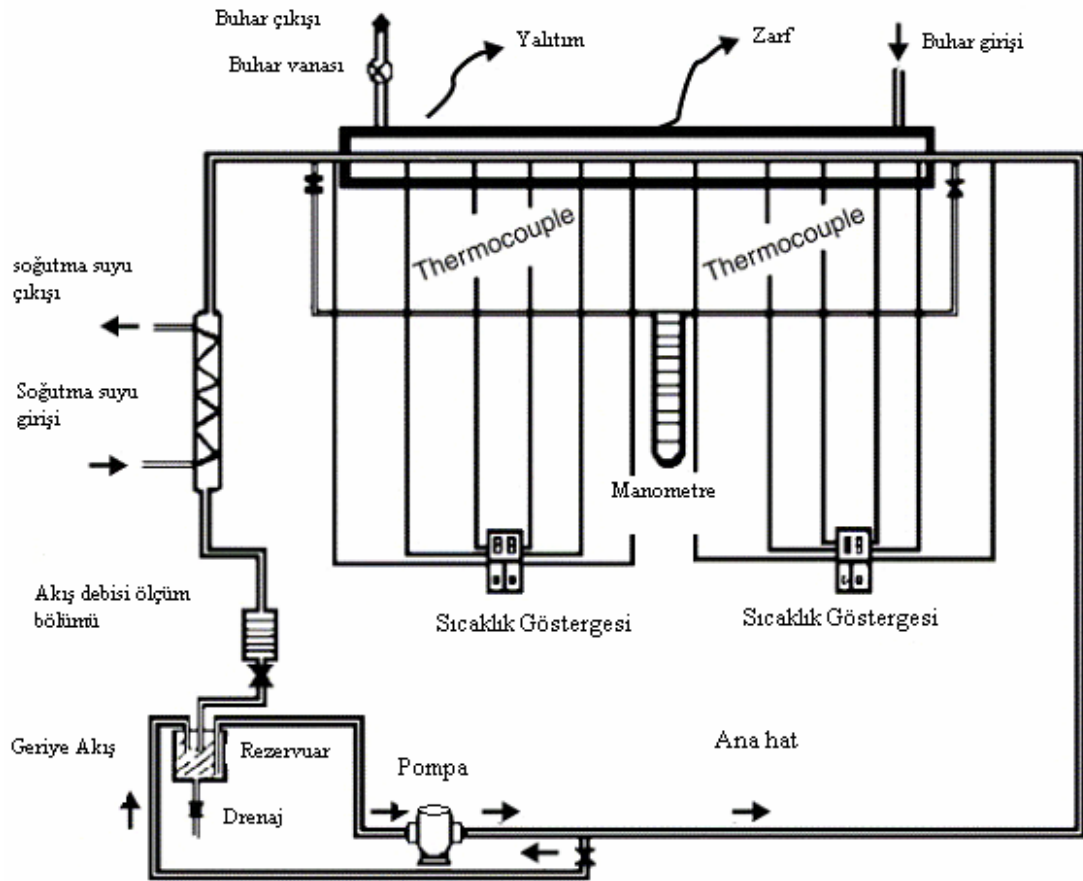
Şekil 3.6. ϕ parametrelerinin kayma gerilimi üzerindeki etkileri

Duvar kayma gerilimi oranının tüp uzunluğu boyunca sabit kaldığı ve $\phi=7,5\%$ durumunda 4 kattan daha fazla kesme gerilimiyle, nano parçacık hacimsel oranıyla büyük oranda artar. Maiga, Palm, Nguyen ve arkadaşları, bir tüp içerisinde laminar zorlanmış taşınım için ısı transfer katsayısının ve duvar kayma geriliminin, nano parçacık hacimsel oranındaki artışla yükseldiğini buldular. Etilen glikolün, ısının çoğunu çektiği, fakat aynı zamanda duvar kayma geriliminde en yüksek artışa sahip olduğu bulunmuştur. Ancak, bu çalışmalar ısı transferi için bir optimum nano parçacık hacimsel oranını içermiyordu. Muhtemelen, nano akışkana daha fazla nano parçacık eklendiğinde, nano akışkanın ısı uzaklaştırmada topaklanma yüzünden avantajsız hale gelmesi dikkat çekicidir.

3.2. Dairesel Bir Tüpte Al_2O_3 / Su Nano Akışkanının Taşınım ile Isı Transferinin Deneysel İncelemesi

Heris ve arkadaşları, Laminar akış koşullarında $CuO-H_2O$ ve $Al_2O_3-H_2O$ nano akışkanlarının farklı partikül karışım oranlarında silindirik tüp içerisinde konvektif

ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Şekil 3.7. de Heris ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmanın deneysel düzeneği görülmektedir. Bu çalışmada farklı hacimsel olarak farklı konsantrasyon oranlarındaki nano partiküllerin su içerisindeki dağılımı neticesinde, ısı transferi artırımının etkileri incelenmiştir. $\text{CuO-H}_2\text{O}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında düşük partikül karışım oranlarında ısı transfer katsayıları birbirine yakınken, partikül hacim oranı artırıldığında $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nano akışkanının ısı transfer katsayısının arttığı gözlemlenmiştir [16].



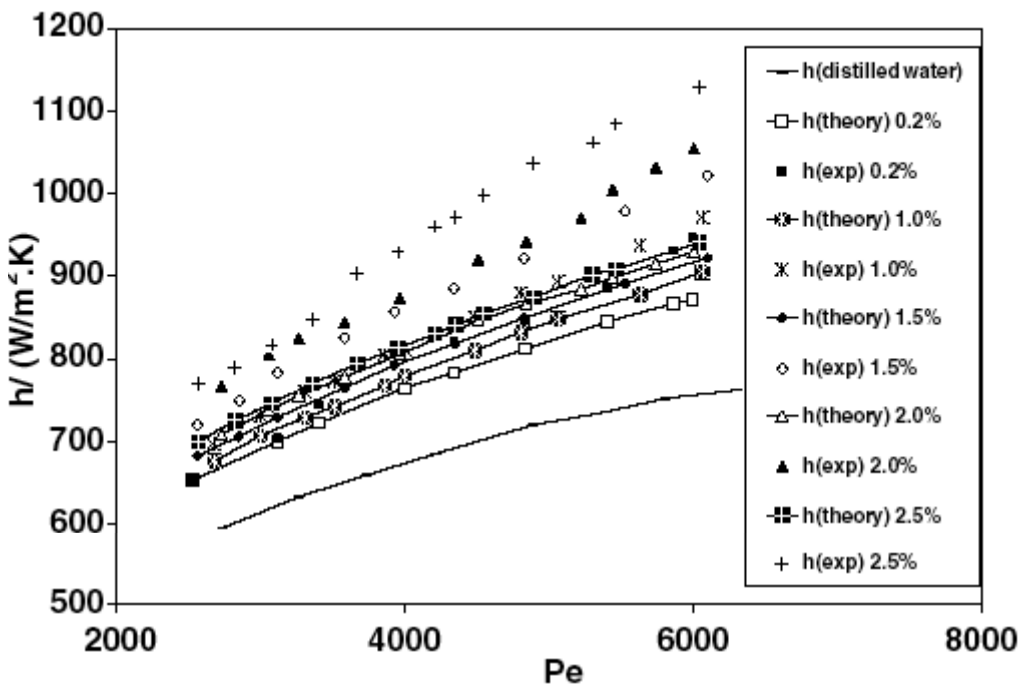
Şekil 3.7. Heris ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın deney düzeneği

Heris, Esfahany, ve Etemad [25]; Maiga, Palm, Nguyen ve arkadaşlarınıninkinden farklı olarak, sabit duvar sıcaklıklı dairesel bir tüp içerisinde laminar zorlanmış taşınımını incelediler. Onlar aynı zamanda, nano akışkan içerisindeki nano parçacık

yoğunluğunun artışıyla, ısı transfer katsayısının da arttığını buldular. Heris, Esfahany, ve Etemad, Eş. 3.1 de verilen ve yatay akış hızını yayılım hızına bağıntılayan Peclet sayısına karşılık kendi sonuçlarını çizelgeleştirdiler.

$$Pe = Re \cdot Pr = UD / \alpha \quad (3.1)$$

Burada “Pe” Peclet sayısını, “Re” Reynolds sayısını, “Pr” Prandtl sayısını, “U” serbest akış hızını, “D” tüpün çapını, “ α ” ise ısıl yayınılabilir katsayısını belirtmektedir. Şekil 3.8. Peclet sayısına karşılık nano akışkanın ısı transfer katsayısını göstermekte ve aynı zamanda onu teorik sonuçlarla karşılaştırmaktadır.



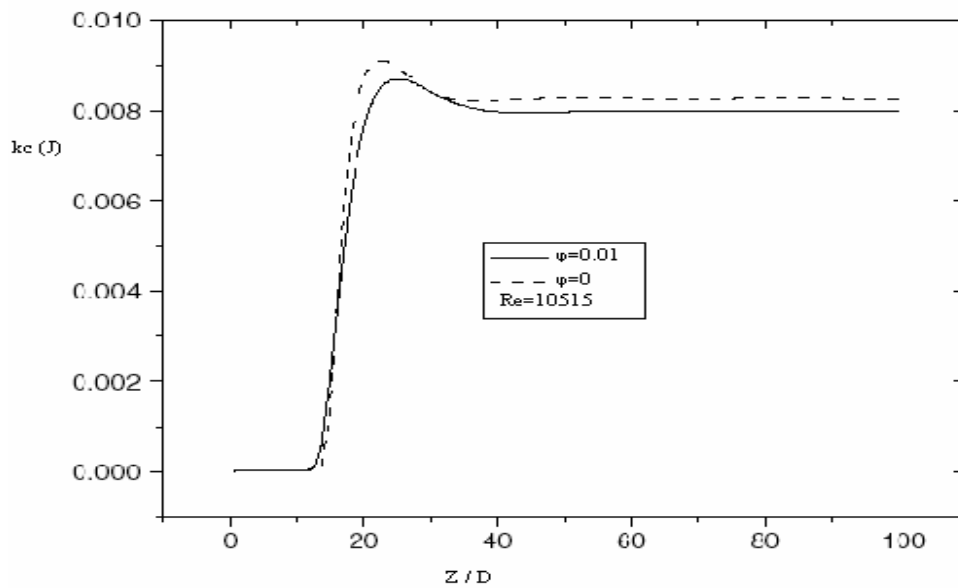
Şekil 3.8. Farklı konsantrasyon oranlarındaki nano akışkanın ısı transfer katsayısının Peclet sayısı ile değişimi ve teorik sonuçlarla karşılaştırılması [25]

Şekil 3.8. de sadece ısı transfer artışının bir modu olarak ısıl iletkenlikteki bir artışı hesaba katan Seider-Tate bağıntısından gelen teorik sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Şekil 3.8. den görülebileceği gibi, nano akışkanların deneysel sonuçlarından elde edilen tüm ısı transfer katsayıları, teorik sonuçlardan yüksek olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, deneysel sonuçların tamamı nano parçacıksız

suyun ısı transfer katsayısından çok daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Seider-Tate denklemi sadece, deneysel ısı transfer katsayısından düzenli olarak daha düşük ısı transfer katsayısına sahip bir ısıl iletkenlik artışından sorumludur. Şekil 3.8. den de anlaşıldığı üzere, ısı transferindeki artış meydana getiren nano parçacık topaklanması, nano taşınım ve diğer dinamik durumlar gibi daha birçok mekanizmalar vardır.

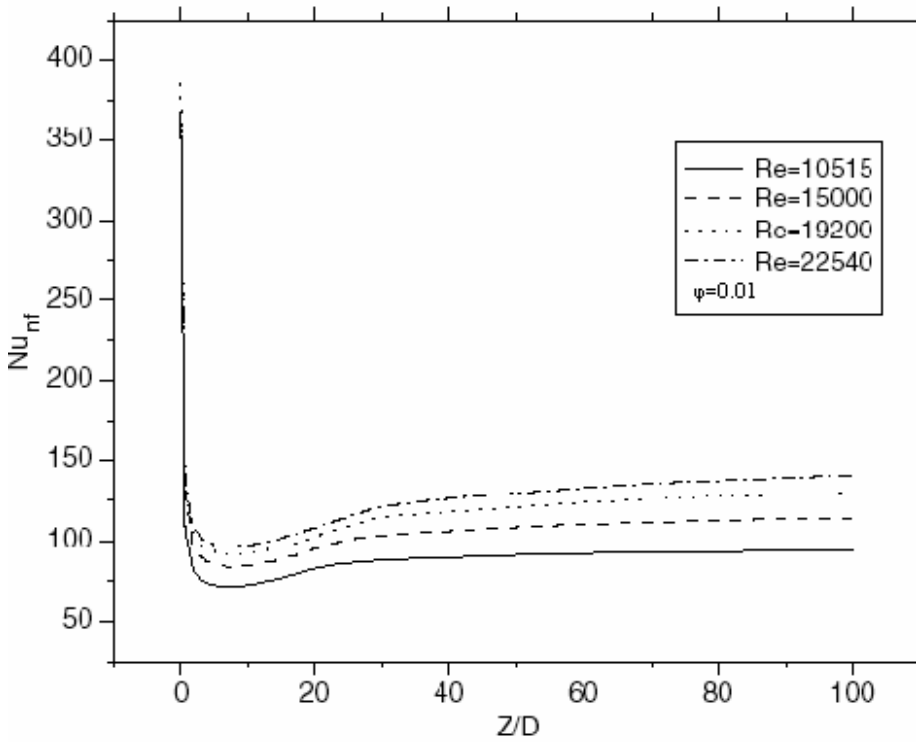
3.3. İki Faz Yaklaşımı Kullanılarak Düzenli Isı Akışına Sahip Bir Tüpte Bir Nano Akışkanın Türbülanslı Zorlanmış Taşınımının Hesaplanması

Behzadmehr, Saffar-Avval, ve Galanis, %1'lik bakır nano parçacıklı su ile dairesel bir tüpte türbülanslı zorlanmış taşınım ısı transferini incelediler. Burada, nano parçacıkların akışkanla aynı hıza sahip olmadığının farz edildiği anlamına gelen, iki fazlı yaklaşımın sayısal bir modelini kullanarak yapmışlardır. Bu çalışmada, “Z” tüpün boyu, “D” tüpün çapı, “ k_c ” türbülans kinetik enerjisi, “Nu” ise Nusselt sayısıdır. Şekil 3.9, tüp boyuna nazaran tüpün merkez hattındaki türbülans kinetik enerjisini göstermektedir.



Şekil 3.9. Tüpün merkez hattındaki türbülans kinetik enerjisinin su ve nano akışkan için hesaplanması [23]

Şekil 3.9. dan elde edilen sonuçlar, $Z/D=50$ olduğunda türbülansın tamamen geliştiğini göstermektedir. Şekil 3.9. da, Nano akışkan suya göre daha düşük türbülans kinetik enerjisi sergilemekte ve bu durum nano parçacıkların, hız ve dalgalanma enerjisinin bir kısmını sönmlediği anlamına gelmektedir. Bu eğilim daha yüksek parçacık yoğunlukları için geçerlidir ve parçacık yoğunluğu arttıkça türbülans kinetik enerjisi azalmaktadır. Behzadmehr, Saffar-Avval, ve Galanis, aynı zamanda Şekil 3.10. da görülen, tüp uzunluğuna karşı Nusselt sayısını grafiklemiştir.

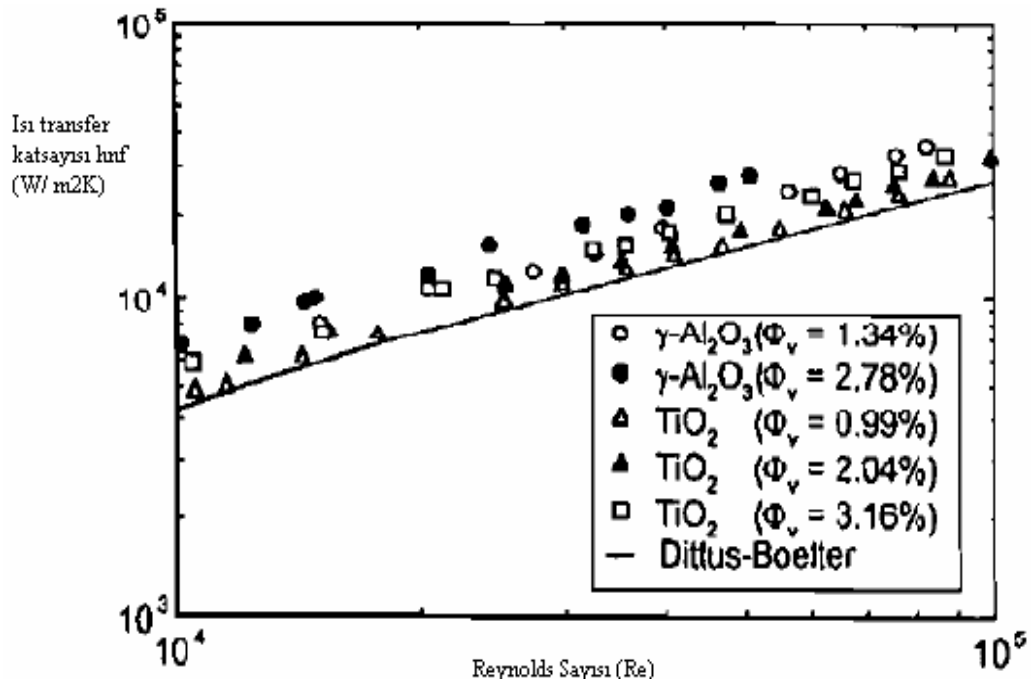


Şekil 3.10. Tüp boyunca Nusselt sayısındaki değişim [23]

Şekil 3.10 dan, artan Reynolds sayısının, Nusselt sayısında ve ısı transfer katsayısında artışa sebep olduğu gözlemlenebilir. Behzadmehr, Saffar-Avval, ve Galanis, zorlanmış türbülanslı taşınımında nano parçacık eklemenin, ana akışkanın ısı aktarım kapasitesinin iyileşmesinde etkili olduğunu bulmuşlardır. Nano parçacıklar, türbülans kinetik enerjisini azaltmak maksadıyla hız dalgalanma enerjisini sönmleyebilmektedir.

3.4. Metal Oksit Nano parçacıklarının Yayıldığı Akışkanlarda Hidrodinamik ve Isı Transferi Çalışması

Pak ve Cho, dairesel bir boruda, nano akışkanların türbülans sürtünmesi ve ısı transferi üzerine deneysel bir araştırma yürüttüler. Su içerisinde, sırasıyla 13 ve 27 nm ortalama çapa sahip alumina ve titanyum oksit nano parçacıkları test ettiler. Suyu % 10 Alumina eklemenin, akışkanın viskozitesini 200 kat artırdığını, aynı miktar titanyum oksit eklemenin ise sudakinin 3 katı kadar viskozite meydana getirdiğini buldular. Aynı zamanda, diğer araştırmacıların da bulduğu gibi, nano akışkanların sürtünme katsayılarının, türbülanslı akıştaki Kays bağıntısıyla da oldukça paralel olduğunu buldular. Reynolds sayısı ile ısı transfer katsayısını kıyasladılar ve yapılan çalışmaların sonuçları Şekil 3.11. de görülmektedir.



Şekil 3.11. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Su}$ ve TiO_2/Su nano akışkanlarına ait ısı transfer katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimi [22]

Şekil 3.11. den ısı transfer katsayısının, hacimce %1.34'lük Alümina'da %45'ten, hacimce %2,78'lik Alümina'da %75'e arttığı görülebilir. Alümina nano akışkanı, titanyum oksit nano akışkanından düzenli olarak daha yüksektir. Pak ve Cho bu

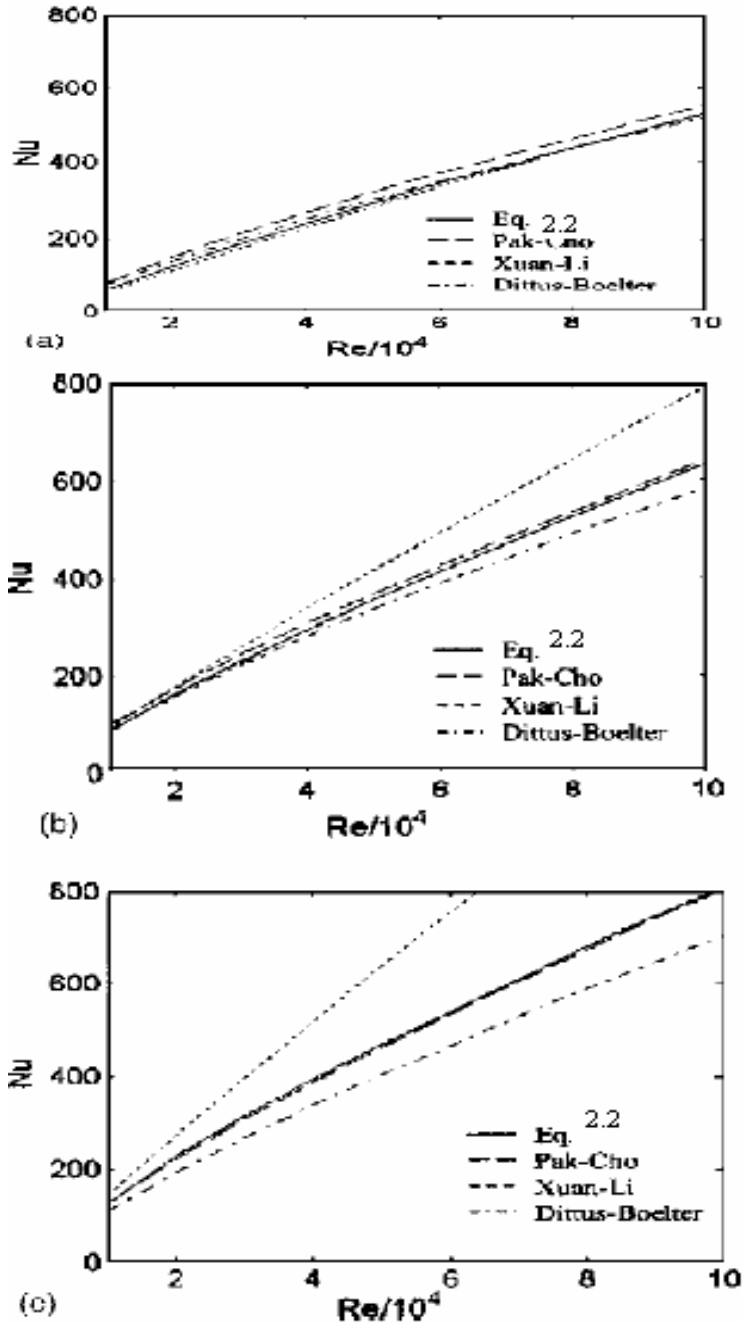
etkiyi, “duvar civarındaki mikron altı parçacıklardan kaynaklanan zenginleşmiş karışım”a dayandırmışlardır. Reynolds sayılarına karşılık Nusselt sayılarını grafiklemişler ve Şekil 3.11. de Nusselt sayısının, ısı transfer katsayısı ile aynı eğilimde olduğunu tespit etmişlerdir.

3.5. Nano Akışkanlarda Taşınım İle Isı Transferi

Buongiorno, nano parçacıklarla ana akışkan arasında bağıl hız oluşturabilecek yedi tane kayma mekanizmasını dikkate almıştır. Bunlar; eylemsizlik, Brownian difüzyonu, Termoforez, Difüzyoforez, Magnus etkisi, akışkan boşaltımı (drenajı) ve çekim (gravite)’ dir. Bütün bu mekanizmalardan sadece Brownian difüzyonu ve Termoforez anlamlı bulunmuştur. Buongiorno’nun analizi, nano akışkanlarda kütle, momentum ve ısı taşınımı için iki-bileşenli denge modelinden meydana gelmiştir. Denklemlerin boyutsuz analizinin, nanoparçacık ayrışmasından kaynaklanan enerji aktarımının ihmal edilebilir olduğunu ve ısı aktarımı katsayısındaki anormal artışı açıklayamadığını buldu. Buongiorno, sıcaklığın ve termoforezin etkileri yüzünden sınır tabakanın farklı özelliklere sahip olduğunu öne sürmektedir. Viskozite, ısı transferi artırımına önderlik edecek şekilde sınır tabakada azalabilir. Brownian devinimini ve Termoforezi dikkate alarak, Buongiorno makalesinde 50 olarak numaralandırdığı, “Nu”nun Nusselt sayısı, “f”nin sürtünme katsayısı, “Pr”nin Prandtl sayısı, “Re”nin Reynolds sayısı, “ δv^+ ”nın boyutsuz laminar alt tabaka kalınlığı olduğu, Eş. 3.2 yi geliştirmiştir.

$$Nu_{bf} = (f/8(Re_{bf} - 1000)Pr_{bf}) / (1 + \delta v^+ (f/8(Pr_v^{2/3} - 1))^{1/2} \quad (3.2)$$

Burada “v” indisi laminar alt tabakayı, “bf” indisi ise ana akışkana karşılık gelmektedir. Buongiorno sınır tabakayı, duvara en yakın laminar alt tabaka ve laminar alt tabakanın üzerinde bir türbülanslı alt tabaka olarak ikiye böldü. Eş. 3.2 daha önce bu makalede tartışılmış olan, Pak ile Cho’nun ve Xuan ile Li’nin çalışmalarından elde edilen verilerle karşılaştırıldı. Sonuçlar Şekil 3.12. de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Alimüna/Su akışkanının ısı transferi değişimi a) $\phi=0$ b) $\phi=0.01$
c) $\phi=0.03$ [17]

Şekil 3.12. den görülebileceği gibi, Reynolds Sayısı arttıkça Nusselt Sayısı da artmaktadır. Eş. 3.2 en iyi Pak ve Cho'nun verileriyle ilişkilidir. Nano parçacık hacimsel oranı arttıkça, tüm araştırmacılardan elde edilen veriler kademeli olarak

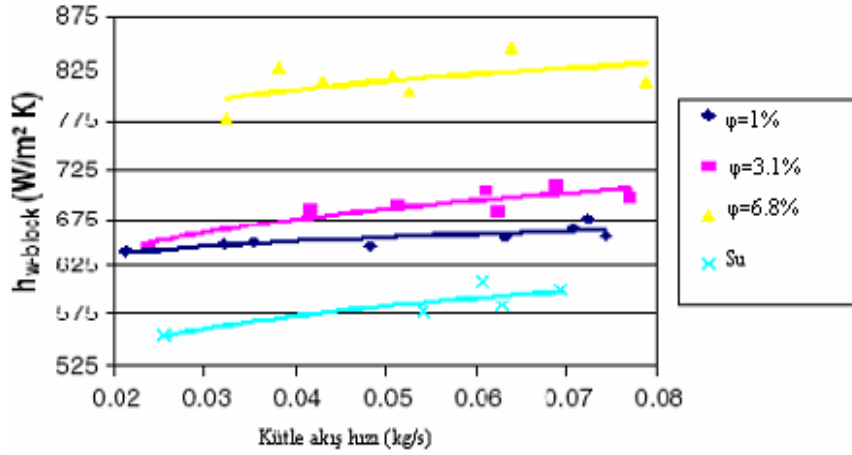
ıraksamaya başlamaktadır. Nusselt sayısı için olan bağıntıların, ısı transfer katsayısı bağıntılarıyla eşleştirilmesi gerekli değildir [17].

3.6. Bir Elektronik Sıvı Soğutmalı Sistem İçin Al_2O_3 /Su Nano akışkanı Kullanımıyla Isı Aktarımı İyileşmesi [27]

Nguyen, Roy, Gauthier ve arkadaşları, mikroişlemcileri ve diğer elektrik sistemlerini soğutmak maksadıyla Alumina/Su nano akışkanını deneysel olarak incelediler. Isınmış bir blok üzerine sıvı soğutmalı bir blok sistemi koydular ve soğuk bloğun ısı transfer katsayısını ölçtüler. Isı transfer katsayısında, nano akışkan kullanımıyla ana akışkanının ötesinde anlamlı bir iyileşme (artış) buldular. Damıtılmış suda hacimce %6,8'lik alumina kullanımıyla ısı aktarımı katsayısı %40 kadar arttığını gözlemlediler. Aynı zamanda nano parçacık hacimsel oranını artırmanın, ısıtılmış bileşenin sıcaklığını düşürdüğünü tespit ettiler. Nguyen, Roy, Gauthier ve arkadaşları, 36 nm ve 47 nm çapında nano parçacıklar kullandılar ve 36 nm çaplı parçacıkların, su bloğunda daha yüksek ısı transfer katsayısı ürettiğini buldular. Eş. 3.3 su bloğunun ısı aktarımı katsayısının nasıl hesaplandığını göstermektedir.

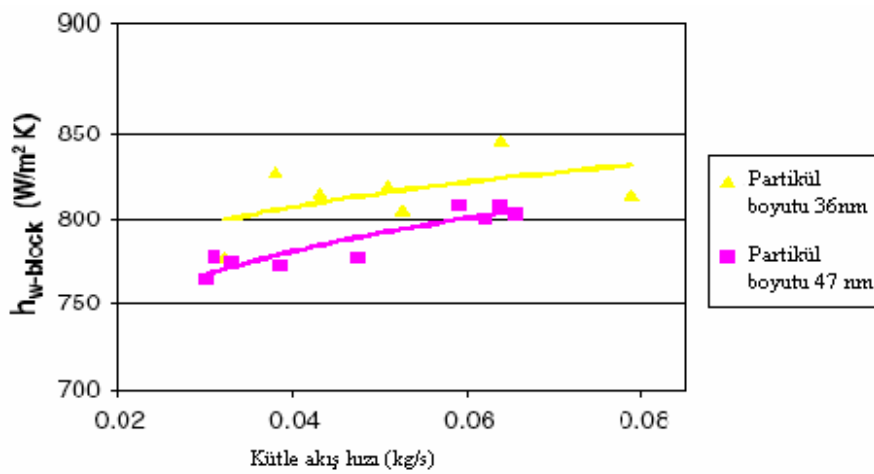
$$q_{electric} = h_{w-block} A (T_{m,base} - T_{m,f}) \quad (3.3)$$

Burada “ $q_{electric}$ ” toplam elektrik giriş gücü, “ $h_{w-block}$ ” soğutma bloğunun ısı aktarımı katsayısı, “ A ” ana levhanın artırılmış toplam yüzey alanı, “ $T_{m,base}$ ” ana levhanın ortalama sıcaklığı, “ $T_{m,f}$ ” blok boyunca geçen akışkanın ortalama sıcaklığıdır. Şekil 3.13. $h_{w-block}$ ’ un kütle akış hızı ve nano parçacık hacimsel yüzdesiyle nasıl değiştiğini göstermektedir.



Şekil 3.13. $h_{w\text{-block}}$ ' un kütle akış hızı ve nano parçacık hacimsel yüzdesiyle değişimi

Şekil 3.13. den görülebileceği gibi, nano parçacık eklenmesi su bloğunun ısı transfer katsayısını büyük oranda artırmaktadır. 0.07 kg/s'lik kütle akış hızında %1, %3.1, %6.8 nano parçacık hacimsel oranlı nano akışkanlar için, suyun ısı transferi katsayısına kıyasla ısı transfer katsayısı sırasıyla %12, %18 ve %38'lik artış sağlanmıştır. Isı transfer katsayısı artışı, daha düşük kütle akış hızındakilere benzerdir. Türbülanslı akış güçlendikçe ısı transfer katsayısı artmaktadır. Şekil 3.14, nano parçacık boyutunun, su bloğunun ısı transferi katsayısı üzerine etkisini göstermektedir.



Şekil 3.14. %6,8 Nano parçacık boyutunun su bloğunun ısı transferi katsayısı üzerine etkisi[27]

Şekil 3.14. den, daha küçük çaplı (36 nm) nano parçacıkların, büyük çaplı (47 nm) nano parçacıklı nano akışkandan daha büyük bir su bloğu ısı transferi katsayısı oluşturduğu görülebilmektedir.

4. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Nano akışkanlar, ana sıvıdaki metalik veya metalik olmayan nano tozların süspansiyonlarıdır ve çeşitli uygulamalarda ısı transfer hızını artırmak için kullanılabilirler. Nano akışkan kaynaklı ısı transfer iyileşmesi, büyük oranda parçacık tipine, parçacık boyutuna, ana akışkana, akış rejimine ve özellikle sınır şartına bağlıdır. Bu çalışmada öncelikle farklı Peclet sayıları için boru içindeki suya ait ısı transferi incelemesi sabit ısı akısında ve sabit duvar sıcaklığında incelenmiştir. Daha sonra ise yine sabit duvar sıcaklığına ve sabit ısı akısına sahip dairesel tüp içerisinde Al_2O_3/Su nano akışkanının farklı Peclet sayılarında laminar akışta zorlanmış ısı transferi sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Şimdiye kadar yapılan sayısal çalışmalarda akışkana ait fiziksel özelliklerin genellikle sabit alınmış olduğu yapılan literatür incelemelerinden görülmüştür. Bu çalışmada ise su ve içindeki partiküllerin bulunduğu nano akışkanın fiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimleri dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın amacı zorlanmış konveksiyonla bir boru içerisindeki nano akışkanın laminar şartlarda boru cidarının soğutulmasının incelenmesi ve uygun tasarım şartlarının belirlenmesidir. Çalışmada Ortalama 20 nm çapında nano parçacıkları su içinde topaklanma olmadan homojen olarak dağıldığı kabul edilmiştir. Çalışmanın sonucunda farklı Al_2O_3/su konsantrasyonları için (0,002, 0,01, 0,015, 0,02 ve 0,025) farklı Peclet ve Reynolds sayıları kullanılarak sayısal çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak, probleme etki eden, problemin fiziğiyle ilgili boyutsuz sayılar hesaplanmış ve ortalama Nusselt (Nu) sayıları ile ortalama ısı transfer katsayıları(h) elde edilmiştir.

Yapılan sayısal çalışmanın sonuçları ile Heris tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Sayısal çalışma ile bulunan vektörel hız dağılımları ve kontur grafikleri şeklindeki sıcaklık dağılımları, ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Sayısal sonuçları değerlendirirken; nano akışkanların ısı transfer katsayılarının, nano parçacıkların konsantrasyonuyla olduğu kadar Peclet ve Re sayısı da artırıp artmadığının incelenmesi yapılmıştır. Performansları artan elektronik cihazlar ve bu

cihazların bileşenleri oldukça yüksek değerlerde ısı üretmekte ve üretilen bu ısı, sistemden uzaklaştırılamadığı durumda sistem ömrü azalmaktadır. Deneysel çalışmaların çok zaman alması ve maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle sayısal çalışmalar yapılarak sonuçlarının olumlu çıkması durumunda deneysel çalışmalara ağırlık verilmesi sayesinde sistemlerin daha hızlı, uzun ömürlü olması ve daha dar alanda sistemden ısının kısa sürede uzaklaştırılması gibi endüstriyel çalışmalar yapılabilecektir.

4.1. Fiziksel ve Matematiksel Modelin Tanımlanması

Bu bölümde problemin tanımı, problemin şekli, kullanılan varsayımlar, matematiksel model ve formülasyonlar, kullanılan hesaplama bölgesi ve kullanılan sınır şartları açıklanmıştır.

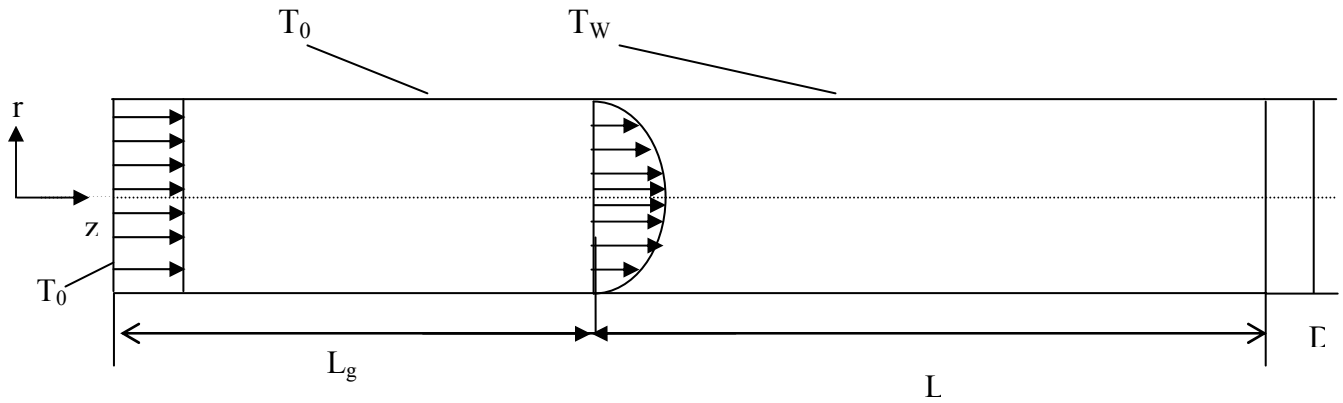
4.1.1. Problemin tanımı

Nano akışkan, temel akışkan ile katı partiküllerin süspansiyon halidir. Nano akışkan ile diğer katı-sıvı karışımları arasındaki fark ise nano akışkanda partiküllerin boyutunun oldukça küçük olmasıdır. Bilinen katı-sıvı karışımlarında partikül büyüklükleri μm boyutunda iken nano akışkanlarda partikül büyüklükleri nm boyutlarındadır.

Bu çalışmada, Şekil 4.1. de görülen içerisinde nano partiküllerin bulunduğu bir tüp içerisindeki nano akışkanın zorlanmış konveksiyonu ile ısı transferi incelenmiştir. Yapılan çalışmada tüp içerisindeki nano akışkanın hareketi, tüp içerisinde açısız yönde değişim olmadığından, çözümü daha kolay hale getirebilmek ve grid sayısını azaltmak amacıyla iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Tüp boyunca ilk 1 metrelik kısmında duvar sıcaklığı ile giriş sıcaklıkları aynı alınmış olup, sonraki 1 metrelik kısımda ise sabit duvar sıcaklığında ve sabit ısı akısında incelemeler yapılmıştır.

4.1.2. Fiziksel model

Şekil 4.1. de verilen fiziksel modelde boru uzunluğu 2 metre olarak seçilmiştir.



Şekil 4.1. Kullanılan koordinat sistemi ve fiziksel model

Şekil 4.1. de, literatürde Heris ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçları ile bu sayısal çalışmayla elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için mevcut boruya 1 metrelik ilave (L_g) yapılarak akışın boruya üniform olarak girmesi ve boru içinde tam gelişmiş hale gelmesi planlanmıştır. Kullanılan koordinat sistemi 2 boyutlu olarak gösterilmiştir. Şekil 3.1. den görüleceği gibi z- yönündeki boru uzunlukları (L_g ve L), r- yönünde boru çapı ise (D) seçilmiş ve bu yönler göre modellenen problem üzerinde sayısal çalışma yapılmıştır. Şekil 4.1. den görüldüğü gibi ele alınan geometride simetri söz konusudur. Bundan dolayı he saplamalarda simetri özelliğinden yararlanılmıştır. Hesaplama bölgesi ile ilgili bilgiler ve kullanılan sınır şartları bölüm 4.1.6. ve bölüm 4.1.7. de ayrıntılı şekilde verilmiştir.

4.1.3. Kullanılan varsayımlar ve değerler

Modellenen ısı transferi problemi üzerinde sadece zorlanmış konveksiyon olayı incelendiğinden radyasyon ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Borunun ikinci kısmında sabit duvar sıcaklığı veya sabit ısı akısının olduğu kabul edilmiştir. Kullanılan akışkanın özellikleri borunun ikinci kısmında boru duvarı sıcaklığı $T_w = s_{bt}$ ve boru duvarı sabit ısı akısı $q_w = s_{bt}$ de hesaplanmış ve boru giriş sıcaklığı ise T_0 olarak

alınmış olup, borunun ilk kısmında sabit kaldığı kabul edilmiştir. Yoğunluğun, özgül ısının, ısı iletkenlik katsayısının ve viskozitenin sıcaklığın etkisinde bir değişken olduğu kabul edilmiştir. Akışkan için tek fazlı korunum eşitlikleri kullanılmasına rağmen DPM modelinde akışkan ve nano partiküle ait termo fiziksel özellikler ile akışkan ile partikül arasında oluşan etkileşim dikkate alınmıştır. Ayrıca nano parçacıkların akışkan içerisinde üniform olarak dağıldığı kabul edilmiştir.

Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin analitik çözümü çok zor olduğundan gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayar hızlarının artması ile matematiksel modeli tanımlanan problemlerin sayısal çözüm metodları ile çözülmesi mümkün hale gelmiştir. Problemi tanımlayan temel denklemlerin çözümünde, sürekli şartlar ve akışkanın sıkıştırılmaz olduğu dikkate alınmıştır. Böylece zamana bağlı terimler atılarak bağımsız değişken sayısı azaltılmıştır. Bu çalışmada akışın simetrik olduğu kabul edilerek tüm tüpün yarısı dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.1 Çalışmada kullanılacak parametreler

	Değeri	Birimi
Tüpün giriş uzunluğu, L_g	1	m
Tüpün test alanının uzunluğu, L	1	m
Tüpün Çapı, D	6	mm
Nano partikülün konsantrasyon oranları, ϕ	0,2/1/1,5/2/2,5	% Hacimsel oran
Nano partikülün ısı iletkenlik katsayısı, k_p	46	W/mK
Nano partikülün çapı, d_p	20	nm
Nano partikülün yoğunluğu, ρ_p	3700	kg/m ³
Nano partikülün özgül ısısı, C_{p_p}	880	J/kg-K

4.1.4. Matematiksel formülasyon

Akışın ve zorlanmış konveksiyonla ısı transferinin analizi için gerekli olan kütle, momentum, momentumu ve enerji denklemleri iki boyutlu olarak ifade

edilmişlerdir. Discrete Phase Model(DPM) modeli [49] ile yapılan çalışmada akışkan ve partikül ayrı ayrı tanımlanarak problem ele alınmıştır.

Sürekli akış için kütle korunumu eşitliği,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

şeklindedir. Burada u_r (m/s) olarak r yönündeki hızı, u_z (m/s) ise z yönündeki hızı ifade etmektedir.

Momentumun korunumu eşitlikleri,

Laminer sıkıştırılamaz akış için r yönündeki momentum eşitliği [52,53];

$$\left(\rho(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} \right) \right) + S_m \quad (4.2)$$

Laminer sıkıştırılamaz akış için z yönündeki momentum eşitliği [52,53];

$$\left(\rho(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \right) + S_m \quad (4.3)$$

şeklindedir. Burada ρ (kg/m³) akışa bağlı yoğunluğu ve μ (kg/ms) ise dinamik viskoziteyi simgelemektedir. S_m ise nano akış için partikül ile akışkan arasındaki momentum transferini ifade eden kaynak terimi olarak alınmıştır. Burada kaynak terimi(S_m) partikülün etkisi olmadığı için su için dikkate alınmamıştır [52]. Partiküle ait kontrol hacmi boyunca momentum değişimine ait kaynak terimi ifadesi aşağıda verilmiştir [52,53].

$$S_m = \sum F m_p \cdot \Delta t \quad (4.4)$$

Burada F partiküle etki eden toplam kuvvetleri ifade etmektedir. m_p ise partikül kütlelerini göstermektedir.

Enerjinin korunumu eşitliği ise şu şekilde yazılabilir.

$$\left(\rho \left(u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right) + S_e \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. S_e ise nano akışa ait partikül ile akışkan arasındaki enerji transferini ifade eden kaynak terimi olarak alınmıştır. Burada kaynak terimi (S_e) partikülün etkisi olmadığı için su için sıfır olarak alınmıştır [52]. Enerji denkleminde sıkıştırma işi ve viskoz dissipasyon terimi ihmal edilmiştir. Bu denklemde k (W/mK), ısı iletim katsayısı ve $T(K)$, sıcaklığı simgelemektedir.

Partiküle ait kontrol hacmi boyunca enerji değişimine ait program tarafından hesaplanan kaynak terimi ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$S_e = \sum m_p C_{p_p} \frac{dT_p}{dt} \quad (4.6)$$

Burada T_p partiküle ait sıcaklığı, C_{p_p} partikül özgül ısısını ve m_p ise partikül kütlelerini göstermektedir.

Literatürde DPM modeli ile yapılan çalışmalarda partiküllerin hareketinden dolayı oluşan ilave kuvvetlerden dolayı ısı transfer katsayısında küçük oranlarda artışların olduğu görülmektedir [53]. Bu nedenle bu çalışmada bu kuvvetler dikkate alınmıştır. DPM modelinde akışkan için eularian ve partiküllerin hareketleri için ise lagrangian formu ayrı ayrı tanımlanmıştır. Akışkan içinde bulunan Mikron altı nano boyutundaki partiküller için Program içinde Lagrangian formunda kuvvetlerin dengesi şu şekilde tanımlanmıştır [49,51,52,53].

$$\frac{du_p}{dt} = F \quad (4.7)$$

Burada u_p partikül hızını, F partikülün hareketinden dolayı oluşan toplam kuvvetleri ifade etmektedir. Bu kuvvetler aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [53].

$$F = F_D + F_B + F_L \quad (4.8)$$

Burada F_D sürüklenme kuvvetini, F_B Brownian kuvvetini ve F_L Saffman's kaldırma kuvvetini tanımlamaktadır. Nano partikül ile akışkan arasındaki hareketten dolayı oluşan kuvvetlere ait formüller aşağıda sıralanmıştır [53]:

$$F_D = \frac{18\mu_{bf}}{d_p \rho_p c_c} \quad (4.9)$$

Burada F_D sürüklenme kuvvetini, d_p partikül çapını, ρ_p partikül yoğunluğunu, μ_{bf} partikül dinamik viskozitesini ve c_c ise cunningham correction ifadesini tanımlamaktadır.

F_B Brownian kuvveti ise aşağıdaki formda verilmiştir [49,51,52,53]:

$$F_B = \zeta \sqrt{\pi \cdot S_0} \quad (4.10)$$

Burada ζ bağımsız gauss random sayısını tanımlamaktadır. Brownian kuvveti komponentlerinden $S_{n,ij}$ şeklinde verilen spektral yoğunluk gauss prosesine göre modellenmiştir [53]. Buna göre;

$$S_{n,ij} = S_0 \delta_{ij} \quad (4.11)$$

Şeklinde verilmiştir. Burada δ_{ij} Kronecker delta, S_0 ise [53];

$$S_0 = \frac{216\nu k_B T}{\pi^2 \rho d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^2 c_c} \quad (4.12)$$

Şeklinde verilmiştir. Burada ν akışkana ait kinematik viskoziteyi, k_B Boltzmann sabitini ve T ise mutlak sıcaklığı ifade etmektedir.

F_L Saffman's kaldırma kuvveti ise aşağıdaki şekilde verilmiştir [53]:

$$F_L = \frac{2K\nu^{\frac{1}{2}}\rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{\frac{1}{4}}} (u - u_p) \quad (4.13)$$

Burada $K=2,594$ olarak verilmiş bir sabittir. d_{ij} deformasyon tensörü olarak tanımlanmıştır. Bu kaldırma kuvveti formu ufak parçacıkların Reynolds sayısını hesaplayabilmek için oluşturulmuştur [49,51].

Problemde kullanılan matematiksel denklemler belirtilen sınır şartlarında sonlu hacimler metodunu kullanan FLUENT (CFD) paket programı ile sayısal olarak çözülmüştür.

4.1.5. Boyut analizi

Problemi tanımlayan temel denklemler boyutsuz hale getirilerek parametrik çalışma sonuçları, birçok boyutlu değer yerine, birkaç boyutsuz karakteristik parametre değerine göre değerlendirilebilir ve diğer çalışmalarla karşılaştırılabilir. Bu çalışmada laminar akış şartları için elde edilen boyutsuz parametreler gösterilmiştir. Akış özelliklerinin kolaylıkla belirlenebilmesi için boyutsuzlaştırmada karakteristik büyüklük olan boru çapı kullanılmıştır.

$$r^* = \frac{r}{D}, \quad z^* = \frac{z}{D}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{k}, \quad \text{Re} = \frac{u_0 \cdot D \cdot \rho}{\mu}, \quad S_e^* = \frac{S_e D}{(T_0 - T_w) u_0 \cdot c_p \cdot \rho} \quad (4.14)$$

$$u_r^* = \frac{u_r}{u_0}, \quad u_z^* = \frac{u_z}{u_0}, \quad T^* = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w}, \quad p^* = \frac{p - p_0}{\rho \cdot u_0^2}, \quad S_m^* = \frac{S_m}{u_0^2 \cdot \rho / D}, \quad (4.15)$$

Boyutsuzlaştırma sonucu elde edilen “Boyutsuz Korunum eşitlikleri” aşağıda gösterilmiştir.

Boyutsuz kütle korunumu

Laminer akış şartlarında iki boyutlu silindirik koordinatlarda boyutsuz kütle korunumu eşitliği:

$$\left(\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* u_r^*) + \frac{\partial u_z^*}{\partial z^*} = 0 \right) \quad (4.16)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Boyutsuz momentum korunumu

r ve z yönlerindeki boyutsuz momentumun korunumu eşitlik 4.17 ve 4.18 de verilmiştir.

Boyutsuz r yönündeki momentumun korunumu

$$\left(u_r^* \frac{\partial u_r^*}{\partial r^*} + u_z^* \frac{\partial u_r^*}{\partial z^*} = - \frac{\partial p^*}{\partial r^*} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial u_r^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 u_r^*}{\partial z^{*2}} - \frac{u_r^{*2}}{r^{*2}} \right) \right) + S_m^* \quad (4.17)$$

Boyutsuz r yönündeki momentumun korunumu

$$\left((u_r^* \frac{\partial \dot{u}_z^*}{\partial \dot{r}^*} + u_z^* \frac{\partial \dot{u}_r^*}{\partial \dot{z}^*}) = - \frac{\partial \dot{H}^*}{\partial \dot{z}^*} + \frac{1}{Re} \left\langle \frac{1}{r^*} \frac{\partial \dot{I}}{\partial \dot{r}^*} (r^* \frac{\partial \dot{I}u_r^*}{\partial \dot{r}^*}) + \frac{\partial^2 \dot{I}u_r^*}{\partial \dot{z}^{*2}} \right\rangle \right) + S_m^* \quad (4.18)$$

Boyutsuz enerjinin korunumu

Laminer akış şartlarında iki boyutlu silindirik koordinatlarda boyutsuz enerjinin korunumu:

$$\left((u_r^* \frac{\partial \dot{I}T^*}{\partial \dot{r}^*} + u_z^* \frac{\partial \dot{I}T^*}{\partial \dot{z}^*}) = \frac{1}{Re.Pr} \left\langle \frac{1}{r^*} \frac{\partial \dot{I}}{\partial \dot{r}^*} (r^* \frac{\partial \dot{I}T^*}{\partial \dot{r}^*}) + \frac{\partial^2 \dot{I}T^*}{\partial \dot{z}^{*2}} \right\rangle \right) + S_e^* \quad (4.19)$$

Laminer akış şartlarında elde edilen boyutsuz parametreler Reynolds Sayısı(Re), Prandl sayısı(Pr) ve Peclet Sayısı(Pe) dir. Dolayısı ile bu çalışmada bu parametrelerin değişimlerinin Nusselt sayısı(Nu) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4.1.6. Hesaplanacak değerler

Şekil 4.1. den görülebileceği gibi tüpün ilk kısmındaki duvar sıcaklığı ile giriş sıcaklığı(T_o) aynı alınmış olup sabit kabul edilmiştir. İkinci kısımda ise duvar sıcaklığı(T_w) giriş sıcaklığından farklı alınmış ve sabit kabul edilmiştir. Şekil 4.1. de tüpün toplam uzunluğu ($L_g + L$) 2 m, çapı ise 6 mm alınmıştır. Literatürde Heris tarafından yapılan deneysel çalışmada zorlanmış konveksiyonla ısı transferinin boyutsuz ifadesi olan Nusselt sayısı bir tüp için,

$$Nu_{nf}(Deneyssel) = \frac{\bar{h}_{nf}(Deneyssel).D}{k_{nf}} \quad (4.20)$$

olarak alınmıştır [25]. Burada $h_{nf}(Deneyssel)$ ise şu şekilde verilmiştir [25].

$$\bar{h}_{nf}(\text{deneysel}) = \frac{c_{pnf} \rho_{nf} \bar{u} . A (T_{\phi} - T_g)}{\pi . D . L . (T_w - T_b)} \quad (4.21)$$

Burada

c_{pnf} = Nano akışkana ait özgül ısı (kJ/kgK)

ρ_{nf} = Nano akışkana ait yoğunluk (kg/m³)

$\bar{u}$ = Nano akışkana ait ortalama hız (m/sn)

T_{ϕ} = Nano akışkanın borudan çıkış sıcaklığı (K)

T_g = Nano akışkanın boruya giriş sıcaklığı (K)

T_w = Boruya ait duvar sıcaklığı (K)

T_b = Nano akışkanın boru içindeki ortalama sıcaklığı giriş sıcaklığı (K) $T_b = (T_{\phi} - T_g)/2$

Nu_{nf} = Nusselt Sayısı [-],

$\bar{h}_{nf}$ = Isı Taşınım katsayısı [W/m².K],

D = Boru çapı [m],

k_{nf} = iletim katsayısı [W/m.K].

şeklinde ifade edilmiştir.

Seider-Tate korelasyonuna göre ise Nu sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.[25]

$$Nu = (\text{teorik}) = 1.86 (\text{Re}_{nf} . \text{Pr}_{nf} . \frac{D}{L})^{\frac{1}{3}} . (\frac{\mu_{nf}}{\mu_{wnf}})^{0.14} \quad (4.22)$$

Burada μ_{nf} (Ns/m²) nano akışkana ait dinamik viskoziteyi, μ_{wnf} (Ns/m²) ise akışkana ait dinamik viskoziteyi tanımlamaktadır.

CFD ile yapılan hesaplamada Nu sayısı için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} \cdot D}{k_{nf}} \quad (4.23)$$

Buradaki ısı transfer katsayısı olan h_{nf} ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$h_{nf} = k_{nf} \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \frac{1}{T_w - T_b} \quad h_{av} = \frac{1}{L} \int_0^L h_{nf} \cdot dz \quad (4.24)$$

Reynolds sayısı aşağıda verilmiştir [25].

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} \cdot \bar{U} \cdot D}{\mu_{nf}} \quad (4.25)$$

Burada ρ_{nf} ve μ_{nf} için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [25].

$$\rho_{nf} = \varphi \cdot \rho_s + (1 - \varphi) \cdot \rho_w \quad (4.26)$$

$$\mu_{nf} = \mu_w \cdot (1 + 2.5 \varphi) \quad (4.27)$$

Burada φ akışkan içindeki nano partiküle ait hacimsel oranı, ρ_s (kg/m³) partiküle ait yoğunluğu, ρ_w , (kg/m³) ise akışkana ait yoğunluğu belirtmektedir.

φ değeri için 0,002, 0,01, 0,015, 0,02 ve 0,025 değerleri sırasıyla alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Prandl sayısı ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır [25].

$$Pr_{nf} = \frac{C_{p,nf} \cdot \mu_{nf}}{k_{nf}} \quad (4.28)$$

Burada C_{pnf} ve k_{nf} aşağıdaki denklemler vasıtasıyla hesaplanmıştır [25].

$$C_{pnf} = \frac{\varphi(\rho_s c_{ps}) + (1 - \varphi) \cdot (\rho_w c_{pw})}{\rho_{nf}} \quad (4.29)$$

Akışkana(su) ait termal ve fiziksel özelliklerin sıcaklıkla değişimi incelendiğinde yoğunluğun, viskozitenin, özgül ısının ve ısı iletim katsayısının değiştiği görülmektedir. Bu değişim sonucunda nano akışkana ait termal ve fiziksel özelliklerde değişmektedir. Akışkan ve partikülün ısı iletim katsayıları bilindiğinden nano akışkana ait ısı iletim katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$k_{nf} = \left[\frac{k_s + 2k_w + 2(k_s - k_w)(1 + \beta)^3 \cdot \varphi}{k_s + 2k_w - (k_s - k_w)(1 + \beta)^3 \cdot \varphi} \right] \cdot k_w \quad (4.30)$$

Ayrıca partikül ile akışkan arasındaki momentumdan dolayı partikülün sürüklenme kuvvetinden dolayı bir direnç oluşmaktadır. Bunu hesaplamak içinde stokes kanunu kullanılarak sabit bir sürüklenme kuvveti hesaplanmıştır [53].

Stokes Cunningham Correction factor

$$Cc = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)}) \quad (4.31)$$

d_p partikül çapı

λ ortalama serbest yol (partikül çapı/3 alınmıştır.) [50].

Burada hesaplamalarda nano parçacıkların etrafını çevreleyen sınır tabaka kalınlığı $\beta=0.1$ olarak alınmıştır (Yu and Choi 2003). k_{nf} nano akışkanın ısı iletkenliğini C_{pnf} ise nano akışkanın özgül ısısını göstermektedir. Nusselt sayısı boru çapına (D), nano akışkanın ısı iletim özelliğine (k_{nf}), duvar sıcaklığına (T_w) ve ortalama nano akışkan sıcaklığına (T_b), nano akışkanın özgül ısısına (C_{pnf}), bağlı olduğu görülmektedir.

Nano akışkana ait termal ve fiziksel özellikler hesaplanarak Çizelge 4.2. de verilmiştir.

Çizelge 4.2. 0,002 hacimsel oran için nano akışkana ait termal ve fiziksel değişimleri

ρ_{nf}	c_{pnf}	k_{nf}	μ_{nf}	Pr_{nf}	Re_{nf}	ϕ	Tav
992,2095538	4156,241	0,846842	0,000519	2,546926	988,5643	0,002	326,1702
993,7126547	4155,018	0,848002	0,000546	2,677212	1237,855	0,002	323,5901
994,0706857	4154,74	0,83878	0,000554	2,741822	1314,819	0,002	322,7489
994,3028288	4154,563	0,824599	0,000558	2,812892	1353,411	0,002	322,1971
994,6869427	4154,276	0,850779	0,000566	2,765984	1507,456	0,002	321,2725
995,2835024	4153,849	0,839733	0,00058	2,868309	1683,849	0,002	319,8065
995,7004334	4153,568	0,855733	0,00059	2,862707	1887,899	0,002	318,7589
995,9680413	4153,395	0,843472	0,000596	2,936959	1996,214	0,002	318,0759
996,062168	4153,335	0,842555	0,000599	2,95192	2050,124	0,002	317,8336

Yukarıdaki çizelgede 0,002 hacimsel oranı için yoğunluk, viskozite, özgül ısılardan Prandl sayısı hesaplanmıştır. Ayrıca Deneysel verilerden alınan Peclet sayıları ile birlikte Reynolds Sayısı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar neticesinde ise Reynolds sayısı kullanılarak nano akışkana ait giriş hızı hesaplanmıştır. Diğer hacimsel oranlar içinde yine aynı hesaplamalar yapılarak hızlar elde edilmiş ve giriş hızları sisteme tanıtılmıştır. Matematiksel modelin tanımlanması için tüm değişkenlere ait giriş, çıkış ve sınır şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada tüpün merkezinden geçen $r=0$ düzlemine göre simetri olduğu kabul edilerek hesaplarda simetri düzleminin bir tarafı için bulunan sonuçlar diğer taraf için de aynı alınmıştır.

4.1.7. Hesaplama Bölgesi

Problem fiziksel olarak simetrik olduğundan hesaplama bölgesi olarak borunun yarısı ele alınmış ve tüm hesaplamalar bu bölgede gerçekleştirilmiştir.

4.1.8. Sınır şartları

Matematiksel formulasyon bölümünde gösterilen kütlenin korunumu, momentum ve enerji denklemlerinin çözümünün sayısal olarak yapılabilmesi için bağımlı değişkenlerin sınırdaki değerlerinin tanımlanması gerekir.

a) $0 \leq z < 1m$ olan kısımda

$z=0$ ve $0 \leq r < d/2$ ise

$$u_z = u_0, \quad u_r = 0 \quad T = T_0 \quad (4.32)$$

$$r = D/2 \text{ de duvarda ise } T = T_0 \quad u_z = u_r = 0 \quad (4.33)$$

b) $1 \leq z \leq 2m$ olan kısımda

$z=1$ ve $0 \leq r < d/2$ ise

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad u_r = 0 \quad T = T_0 \quad (4.34)$$

$$r = D/2 \text{ de duvar sabit duvar sıcaklığında } T = T_w \quad u_z = u_r = 0 \quad (4.35)$$

veya

$$r = D/2 \text{ de duvar sabit ısı akısında } k \frac{\partial T}{\partial r} = q_w \quad u_z = u_r = 0 \quad (4.36)$$

c) Simetri şartı

$$r=0 \text{ da } \frac{\partial u_r}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4.37a)$$

d) Çıkış şartı

$$z = 2 \quad \text{de} \quad P = P_{\text{atm}} \quad (4.37b)$$

olarak alınmıştır. Temel korunum denklemleri bu sınır şartlarına göre düzenlenerek elde edilen denklemler bir bilgisayar programı yardımıyla ayrıştırılarak çözülmüş olup, elde edilen sonuçlar, heris tarafından yapılmış olan deneysel sonuçlarla ve Seider-Tate korelasyonu ile karşılaştırmıştır.

5. SAYISAL ÇÖZÜM (SAYISAL AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ(SAD) YÖNTEMİ

Bu bölümde çalışmada kullanılan sayısal akışkanlar dinamiği paket programı Fluent 6.3. e ilişkin bilgiler ve sayısal çözümleme kriterleri hakkında bilgiler verilmiştir.

5.1. Fluent Bilgisayar Programı

Fluent, ısı transferi, kütle transferi, akışkanlar dinamiği, kimyasal reaksiyon ve bunun gibi olayların simülasyonunu yapan, kütle korunumu, momentum korunumu, enerji korunumu, türbülans transport ve karışım denklemlerini kontrol hacmi tekniği kullanarak ayırık veya birleşik çözüm yöntemi ile sayısal olarak çözebilen mühendislik uygulamalarında kullanılan genel amaçlı bir bilgisayar programıdır. Denklemleri çözerken normal olarak Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı İmplicit Yöntem (SIMPLE), kullanıcı seçimine bağlı olarak Basınç Bağlantılı Denklemler için Tutarlı Yarı İmplicit Yöntem (SIMPLEC) veya Ayırma Operatörlü İmplicit Basınç Çözüm Yöntemi (PISO) algoritmasını kullanır. Bu tezdeki çözümlerde ayırık çözüm yöntemi kullanılmış olup Fluent'e ilişkin bilgi verilirken sadece ayırık çözüm yöntemi ile bağlantılı olarak bilgi verilmektedir.

FLUENT sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. Matematiksel denklemleri nümerik bir proses'e dönüştürerek, yani matematik modelde tanımlanan kısmi diferansiyel denklemleri diskritize ederek lineer cebirsel denklemlere dönüştürür. Problemin çözümü için önce problemin geometrisi gambit programında oluşturulup, oluşturulan geometri istenilen sayıda hücrelere (grid) ayrılarak ve Fluent ile sayısal olarak çözüme hazır hale getirilecektir.

Fluent programı; Gambit, Xserver, Tgrid, Fluent vb. modüllerden oluşmaktadır. Bütçeye ihtiyaca ve isteğe bağlı olarak modüller tedarik edilir. En temel konfigürasyonda fluent, xserver (hummingbird connectivity) ve gambit modüllerinin yeterlidir.

5.1.1. Gambit modülü

Problem alanının, cismin veya geometrinin oluşturulacağı, bu modelin hücrelere (mesh) bölüneceği ve sınır şartlarını Fluent programında detaylandırmadan önce bu sınırların tanımlanacağı yüzeylerin belirleneceği modüldür. Gambit'te model hazırlanabileceği gibi, programa cad programlarında hazırlanmış model de aktarılabilir. İki veya üç boyutlu modelleme yapılabilen programda, uzantısı “dbf” olan bir katı model dosyası oluşturulur, daha sonra bu “dbf” uzantılı dosyadan “msh” uzantılı bir dosya export edilerek oluşturulur. “msh” uzantılı dosya Fluent modülünün okuyacağı formattaki dosyadır.

5.1.2. Xserver (Hummingbird Connectivity) modülü

Gambit' in Windows ortamında çalışmasını sağlayan arayüz modülüdür. Bu modül olmadan Gambit Windows ortamında çalışmaz.

5.1.3. Tgrid modülü

Katı modele mesh atılabilen ve mesh yapısının tadil edildiği programdır. Mesh yapısı tadil edilerek daha kolay ve hassas sonuç elde edilebilecek meshler oluşturularak problemler çözülür.

5.1.4. Fluent modülü

Gambit modülünde oluşturulan “msh” uzantılı dosya fluent modülünde okutulur. Fluent modülünde sınır şartlarının düzenlenmesi, girilmesi, malzemenin termofiziksel özelliklerinin girilmesi, çözümlemeye ilgili kriterlerin girilerek problemin çözümlemeye hazır hale getirilmesi sağlanır. Fluent modülü “msh” uzantılı dosyanın “cas” uzantılı dosyasının elde edildiği ve bu “cas” uzantılı dosya kullanılarak iterasyonlar yapıp yakınsama sağlanarak sayısal çözümün elde edildiği modüldür. Çözüm “dat” uzantılı dosya olarak saklanır. Fluent modülünde çözüme ilişkin grafikler ve kesitler alınabilir.

5.2. Çalışma Programı

5.2.1. Uygun grid (kafes) yapısının oluşturulması ve seçilmesi

Sayısal hesaplama sonucunun doğru elde edilmesi için uygun grid yapısının oluşturulması çok önemlidir. Uygun oluşturulmayan grid yapısı, sonucun ıraksamasına veya hatalı sonuç elde edilmesine neden olur. Dolayısıyla kullanılan grid yapısının doğru sonuç verip vermediğinin incelenmesi gerekmektedir.

5.2.2. Ayrık çözüm yöntemi

Ayrık çözüm yöntemi kullanılırken denklemler ayrı ayrı çözülür, bir denklem çözüldükten sonra elde edilen sonuç sırasıyla diğer denklemlerde kullanılır. Denklemler non-lineerdir ve set halindedir, yakınsamış sonucu elde edene kadar çok sayıda çözüm döngüsü yapan iterasyon işlemi uygulanır.

Her bir iterasyon

Şekil 5.1 de yer alan adımlardan oluşur ve bu iterasyon adımlarını açıklayıcı bilgi aşağıda yer almaktadır:

1. Elde edilen sonuca bağlı olarak akışkan özellikleri güncellenir (eğer hesaplama yeni başlatıldı ise başlangıç değerlerinin kullanılmasıyla elde edilen çözümler bir sonraki hesaplamada kullanılır (güncellenir));
2. Hız bilgilerini güncellemek için basınç ve yüzeydeki kütle akısı değerleri kullanılarak u ve w momentum denklemleri çözülür;
3. Adım 2’de elde edilen hızlar yerel olarak süreklilik denklemini sağlamamaktadır, bu nedenle süreklilik denkleminin ve lineerize edilmiş momentum denklemlerinden poisson tipi denklem (basınç düzeltme için) türetilir. Basınç alanına, hız alanına ve

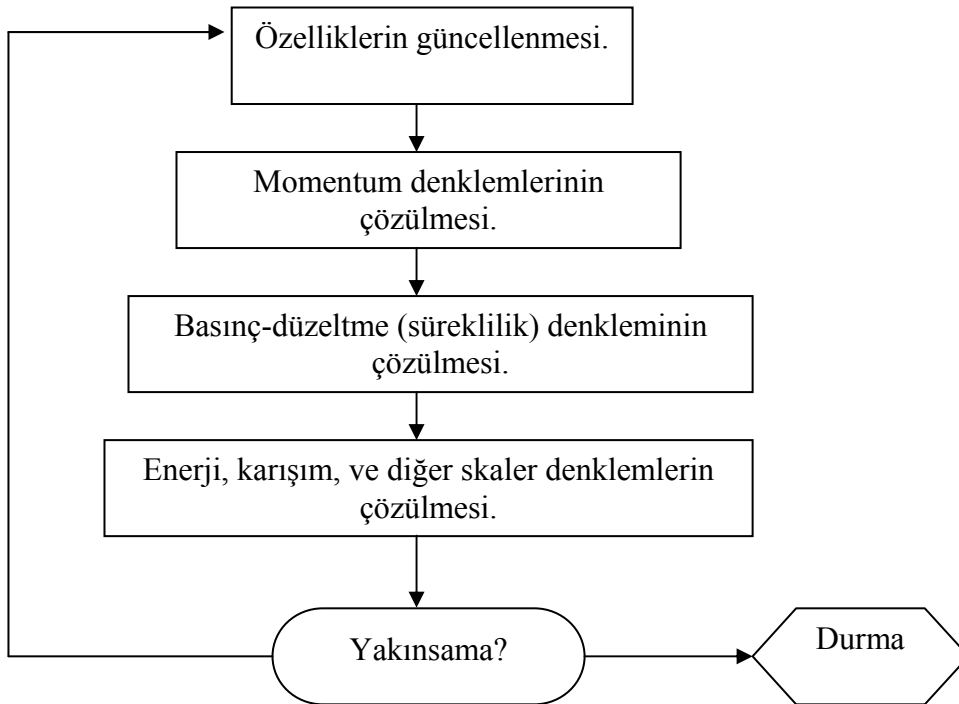
yüzey kütle akısına gerekli düzeltmeler sürekliliği sağlamak için yapılarak basınç düzeltme denklemi çözülür;

4. Enerji, karışım ve ısımaya ilişkin skaler denklemler önceki adımlarda güncellenerek elde edilen sonuçlar (değişken değerleri) kullanılarak çözülür;

5. Fazlar arası ilişkilendirmeyi sağlayan birleştirme yapılırken ayrı faz hesaplaması ile süreklilik faz denklemlerindeki kaynak terimleri güncellenebilir;

6. Denklem setinin yakınsayıp yakınsamadığı kontrol edilir;

7. Yakınsama elde edilinceye kadar 1’den 6’ya kadar olan adımlar tekrar uygulanır.



Şekil 5.1. Ayrık çözüm yönteminin adımları

5.2.3. Denklemlerin lineer hale getirilmesi

Çözülecek denklemler her bir hücrede bağımlı değişkene bağlı denklem sistemi oluşturmak için linerize edilir. Elde edilen lineer sistem, akış alanını belirlemek için çözülür.

Bağımlı değişkenlere veya değişken setlerine bağlı olarak linerizasyon implisit veya eksplisit formda yapılır. İmplicit ve eksplisit şu anlamlardadır:

İmplicit: Her bir hücredeki değişkenler komşu hücrelerdeki bilinen ve bilinmeyen değerlerin kullanılmasıyla hesaplanır. Bir bilinmeyen sistemdeki denklemlerden birkaçında aynı anda olabilir, ve bu denklemlerin aynı anda çözülmesi ile bilinmeyen hesaplanır.

Eksplisit: Her bir hücredeki değişkenler komşu hücrelerdeki bilinen değerlerin kullanılmasıyla hesaplanır. Bir bilinmeyen, denklem setindeki sadece bir denklemde bulunur ve bilinen değerlerin denklemlerde yerine konulması ile bilinmeyenler çözülür.

Ayrık çözüm yönteminde denklemler implisit olarak linerize edilir. Her bir hücre için çözülmesi gereken bir denklem seti elde edilir. İmplicit (Gauss-Siedel) lineer denklem çözücü kullanılarak her bir hücre için çözüm elde edilir. Ayrık çözüm yöntemi her bir hücreyi dikkate alarak aynı anda sadece bir değişkeni çözer. Bir sonraki değişkeni her bir hücreyi dikkate alarak çözer ve bu diğer değişkenler içinde devam eder. Ayrık çözüm yöntemi için eksplisit çözüm uygulanabilir olmadığından mevcut değildir.

5.2.4. Denklemlerin ayrıklaştırılması

Fluent, kontrol hacmi tekniği ile denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürür ve sayısal olarak çözer. Kontrol hacmi tekniğinde denklemlerin her birinin kontrol

hacminde integralleri alınarak her bir bilinmeyen büyüklük için ayrı denklemler elde edilir.

Denklemlerin integrallerinin alınması skaler ϕ büyüklüğü için sürekli şartlarda aşağıdaki korunum denklemi ile gösterilir:

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (5.1)$$

Burada;

ϕ : Skaler değişken

ρ : Yoğunluk

$\vec{v}$: Hız vektörü

$\vec{A}$: Yüzey alan vektörü

Γ_{ϕ} : Difüzyon katsayısı (ϕ için)

$\nabla \phi$: ϕ 'nin gradyanı

S_{ϕ} : Birim hacim başına ϕ kaynağıdır.

Yukarıda verilen Eş. 5.1 hesaplama alanındaki her bir kontrol hacmine (veya hücreye) uygulanır. Şekil 5.2.'de iki boyutta örnek kontrol hacminin şekli verilmektedir. Eş. 5.1 in ayrıklaştırılması ile aşağıda yer alan Eş. 5.2 elde edilir.

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_{\phi} (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V \quad (5.2)$$

Burada;

f: yüzey

N_{faces} : Hücreyi çevreleyen yüzeylerin sayısı

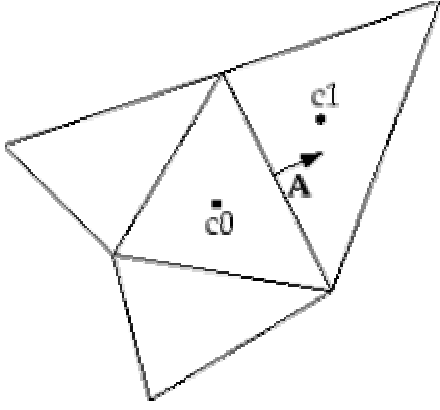
ϕ_f : ϕ 'nin f yüzeyinde değiştirilmiş değeri

$\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$: Yüzeydeki kütle akısı

$\vec{A}_f$: Yüzey f'nin alanı

$(\nabla\phi)_n$: $\nabla\phi$ 'nin f yüzeyindeki büyüklüğü

V: Hücre hacmidir.



Şekil 5.2. Skaler transport denkleminin ayrıklaştırmanın yapıldığı kontrol hacmi

Fluent tarafından çözülen denklemler yukarıda genel formülasyonu verilen yapıda olup, çok boyutlu, yapılandırılmış gridlere (polyhedral) uygulanır.

Fluent otomatik olarak hücre merkezinde (Şekil 5.2. de c0 ve c1) skaler ϕ değerlerini yerleştirir. Buna karşın ϕ_f 'nin yüzeydeki değeri Eş. 5.2 deki taşınım terimi için gereklidir ve hücre merkezindeki değerlerden interpolate edilir. Upwind metodu kullanılarak bu interpolasyon gerçekleştirilir.

Upwind şu anlama gelir: ϕ_f 'nin yüzeydeki değeri hücredeki akım büyüklüğünden elde edilir. Birinci mertebe upwind, ikinci mertebe upwind, power law ve QUICK gibi upwind modelleri Fluent'de seçilebilir.

Eş. 5.2 deki difüzyon terimi merkezi fark ve daima ikinci mertebe doğruluktur.

5.2.5. Denklemlerin linerize edilmiş yapıları

Ayrıklaştırılmış skaler transport denklemi Eş. 5.2 hücre merkezinde bilinmeyen skaler ϕ değişkeni ve çevreleyen komşu hücrelerde bilinmeyen değerleri içerir. Eş. 5.2 linerize edilirse aşağıdaki hali alır:

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (5.3)$$

Burada nb komşu hücreleri temsil eder, a_p ve a_{nb} sırasıyla ϕ ve ϕ_{nb} için linerize katsayılarıdır. Her bir hücreye komşu olan hücre sayısı grid yapısına bağlıdır, fakat bu bir hücrenin yüzey sayısına eşittir (sınır hücreler hariç).

Benzer denklemler gridlerdeki her bir hücre için yazılabilir ve seyrek katsayılar matrisinden oluşan cebirsel denklem seti halini alır. Skaler denklemler için Fluent İmplicit (Gause-Siedel) lineer denklem çözüm yöntemi ile birlikte Cebirsel Çoklu Grid Metodunu (AMG) kullanarak bu lineer sistemi çözer.

5.2.6. Relaksasyon

Fluent tarafından çözülen denklemlerin Lineer olmaması ϕ değişkenindeki değişimin kontrol edilmesini gerektirir. Bu gereksinim relaksasyon ile giderilir, relaksasyon ile ϕ 'deki değişim her bir iterasyonla azaltılır. Her bir hücredeki ϕ 'nin yeni değeri eski değeri kullanılarak elde edilmiştir, ϕ_{old} . Relaksasyon faktörü (α_r) ile ϕ 'deki hesaplanan değişim ($\Delta\phi$) aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$\phi = \phi_{old} + \alpha_r \Delta\phi \quad (5.4)$$

Hesaplamaların yakınsama davranışları üzerinde çalışmak ve tatmin edici yeterlilikteki yakınsama elde etmek amacıyla relaksasyon faktörlerinin belirlemek ve hesaplamayı başlatma prosedürünü oluşturmak için pek çok örnek durum üzerinde

çalışılmıştır. Tüm değişkenler için iyi bir sonuç elde edebilmek amacıyla bu tezde yapılan hesaplamalarda Bölüm 5.3.3 de tespit edilen relaksasyon parametreleri kullanılmıştır.

Ayrık çözüm yönteminin uygulanması

Bu başlık altında Fluent'in kullandığı yöntemi anlamak için momentum ve süreklilik denklemlerinin ayrıklaştırılmış hallerinin çözümü üzerinde durulacaktır.

5.2.7. Ayrıklaştırılmış momentum denklemleri

Kısım 5.2.4. de tarif edilen skaler transport denklemi için ayrıklaştırma momentum denklemlerinin ayrıklaştırılmasında da kullanılır. Örnek olarak x-momentum denklemi $\phi = u$ alınarak elde edilir.

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum_f p_f A_f \cdot \dot{i} + S \quad (5.4)$$

Burada p_f f yüzeyine etkiyen basınç, A alan, S kaynak terimi ve f yüzeyi ifade etmektedir.

Basınç alanı ve yüzey kütle akısı biliniyorsa yukarıda yer alan denklem bölüm 5.2 de anlatıldığı şekilde çözülür ve hız alanı elde edilir. Başlangıçta basınç alanı ve yüzey kütle akısı bilinmediği durumda ise basınç ve yüzey kütle akısı çözümün bir parçası olarak elde edilir. Basınç ve basınç gradyan terimlerinin ayrıştırılmasının saklanması çok önemli olup aşağıda bu hususta bilgi verilmektedir.

Fluent eş yerleştirme yöntemini kullanmaktadır, bu yöntemde basınç ve hızın hücre merkezlerindeki değerleri saklanmaktadır. Yukarıda yer alan denklemde Şekil 5.2. de gösterilen c0 ve c1 hücreleri arasındaki yüzeydeki basınç değerine gereksinim duyulmaktadır. İnterpolasyon yöntemi yapılırken hücredeki değerlerden yüzeydeki basınç değerlerinin hesaplanmasına ihtiyaç duyulur.

Basınç interpolasyon yöntemi

Fluent aksi belirtilmedikçe momentum denklem katsayılarını kullanarak, yüzeylerdeki basınç değerlerinin interpolasyonunu yapar. Bu prosedür çok iyi çalışır ve hücre merkezlerindeki basınç dağılımı çok düzgündür. Kontrol hacimlerindeki momentum kaynak terimleri arasında yüksek gradyan değişimi varsa, basınç profili hücre yüzeyinde yüksek gradyana sahiptir ve bu yöntem kullanılarak interpolasyon gerçekleştirilemez. Bu yöntem kullanılırsa, hücre hızını düşük veya yüksek gösteren bir hata verir.

Yüksek gövde kuvvetleri varsa, standart basınç interpolasyon yönteminin kullanıldığı akışta yüksek girdap, yüksek Rayleigh Sayısında doğal taşınım gibi durumlarda sorun vardır. Bu sorunlarda basınç dağılımını yeterince doğru çözmek için yüksek gradyanın olduğu bölgedeki kafes sisteminin sıkılaştırılması gerekir.

Hatanın bir nedeni de Fluent'in duvarda basınç normal gradyanını sıfır olarak almasıdır. Bu sınır tabaka için geçerlidir, fakat bu durumda gövde kuvvetleri ve eğim olmaması gerekir. Bu basınç gradyanındaki hata, hız vektörünün duvardan dışa doğru olması ile kendisini gösterir.

Standart interpolasyon yönteminin geçerli olmadığı durumlar için birçok alternatif yöntem vardır. Bu yöntemler lineer yöntem, ikinci mertebe yöntem, gövde kuvvetlerini ağırlıklandırma yöntemi ve basınç durdurma yöntemidir. Bu yöntemlerin kullanımı tercihe bağlı olup detaylı bilgi Fluent dokümanlarında yer almaktadır.

5.2.8.Ayrıklaştırılmış süreklilik denklemi

Süreklilik denkleminde yer alan kontrol hacminde integre edilmesi aşağıdaki ayrıklaştırılmış denklemi verir.

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f A_f = 0 \quad (5.5)$$

J_f , f yüzeyindeki ρv_n kütle akısını, A_f f yüzey alanını göstermektedir.

Momentum, süreklilik ve enerji denklemleri ayrık çözüm yöntemi ile biri diğerini takip ederek çözülür. Bu biri diğerini takip eden prosedürde, süreklilik denklemi basınç için bir denklem olarak kullanılır. Basınç sıkıştırılamaz akış için olan yukarıdaki denklemde açık olarak görünmemektedir. Bu nedenle yoğunluk doğrudan basınç ile ilişkili değildir. Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı İmplicit Yöntemi (SIMPLE) algoritmaları basıncı süreklilik denklemine dahil etmek için kullanılır.

Çözümde ilerleyebilmek için yüzeydeki hız ($\vec{v}_n$) değerlerinin hücre merkezlerinde saklanan hız değerleri ile ilişkilendirilmesi gereklidir. Hücre merkezindeki hızların yüzeylere lineer interpolasyonu fiziksel olmayan basınç kontrolü ile sonuçlanır. Fluent Rhie ve Chow'un bilgi verdiği benzer bir prosedürle basınç kontrolünü gerçekleştirir. Hızın yüzeydeki değeri lineer olarak ortalama değildir. Bunun yerine Eş. 5.4 de yer alan a_p katsayısını esas alan ağırlıklandırma faktörü kullanılarak momentum ağırlıklı ortalama gerçekleştirilir. Bu prosedür kullanılarak yüzeydeki akı (J_f) şu şekilde yazılabilir:

$$J_f = \bar{J}_f + d_f (p_{c0} - p_{c1}) \quad (5.6)$$

Burada;

p_{c0} ve p_{c1} : bir yüzeyin iki tarafındaki hücrelerdeki basınç değerleri,

$\bar{J}_f$: bir yüzeyin iki tarafındaki hücrelerdeki hız değerini içeren kütle akısı,

d_f : $\bar{a}_p$ 'nin bir fonksiyonu,

$\bar{a}_p$: f yüzeyinin iki tarafındaki hücrelerin momentum denklemindeki a_p katsayısının ortalama değerini,

göstermektedir.

Basınç ve hız eşleşmesi

Basınç ve hız eşleşmesi Eş. 5.6 kullanılarak ayrıklaştırılmış süreklilik denklemlerinden (bkz Eş. 4.5) basınç denklemlerinin elde edilmesiyle sağlanır. Fluent üç farklı basınç ve hız eşleşme algoritmasının seçilebilmesini sağlar. Bunlar Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı İmplicit Yöntem (SIMPLE), Basınç Bağlantılı Denklemler için Tutarlı Yarı İmplicit Yöntem (SIMPLEC) ve Ayırma Operatörlü İmplicit Basınç Çözüm Yöntemi (PISO)'dur. Fluent normal olarak SIMPLE algoritmasını kullanmaktadır, bu tezdeki sayısal hesaplamalarda da SIMPLE algoritması kullanılmıştır. SIMPLEC ve PISO algoritmalarına ilişkin bilgi Fluent dokümanlarında mevcuttur.

SIMPLE algoritması

SIMPLE algoritması kütle korunumunu sağlamak ve basınç alanı elde etmek için hız ve basınç düzeltmesi arasındaki ilişkiyi kullanır.

Kabul edilen basınç alanı (p^*) kullanılırsa, bu değere bağlı yüzey akısı J_f^* Eş. 5.7. den hesaplanır ise süreklilik denklemini sağlamaz.

$$J_f^* = \bar{J}_f + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (5.7)$$

J_f^l düzeltme akısı, J_f^* yüzey akısına eklenir ve düzeltilmiş yüzey akısı J_f süreklilik denklemini sağlar. SIMPLE algoritmasında J_f^l Eş 5.7. de yer alan formülle ifade edilir.

$$J_f^l = d_f(p_{c0}^l - p_{c1}^l) \quad (5.8)$$

p^l : hücre basınç düzeltmesidir.

SIMPLE algoritması akı düzeltme denklemlerini (Eş. 5.7, ve Eş. 5.8) ayrıklaştırılmış süreklilik denkleminde (bkz Eş.4.4 de) yerine koyarak hücredeki basınç düzeltmesi (p^l) için ayrıklaştırılmış denklemleri elde eder:

$$a_p p^l = d \sum_{nb} a_{nb} p_{nb}^l + b \quad (5.9)$$

Burada,

b kaynak terimi olarak hücreye olan net akış debisini (sabit terim)

göstermektedir.

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (5.10)$$

Basınç düzeltme denklemi (Eş. 5.10) Cebirsel Çoklu Grid Metodu (FAS) kullanılarak çözülebilir. Bir kere çözüm elde edildiğinde, hücre basıncı ve yüzey akısı aşağıda yer alan denklemler kullanılarak düzeltilir.

$$p = p^* + \alpha_p p^l \quad (5.11)$$

$$J_f = J_f^* + d_f (p_{c0}^l - p_{c1}^l) \quad (5.12)$$

Burada,

α_p : Relaksasyon faktörünü

J_f : Düzeltilmiş yüzey akısını

göstermektedir.

Düzeltilmiş yüzey akısı (J_f) her bir iterasyonda ayrıklaştırılmış süreklilik denklemini sağlar.

Ayrık çözüm yöntemi için kalıntıların tanımlanması

Ayrıklaştırmadan sonra ϕ genel değişkeni için P hücrelerindeki korunum denklemleri şu şekilde yazılır.

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (5.13)$$

Burada a_p merkez katsayısını, a_{nb} komşu hücreler için etkilenen katsayıları göstermektedir b ise sınır şartlarından gelen terimler $S=S_c+S_p\phi$ ifadesiyle verilen lineerleştirilmiş kaynak terimindeki S_c (sabit) terimini ihtiva etmektedir.

Eş. 5.13 deki a_p katsayısı,

$$a_p = \sum_{nb} a_{nb} - S_p \quad (5.14)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada S_c kaynak terimi sabiti ve S_p kaynak terimi katsayısıdır.

P hücrelerindeki kalıntılar formülü şu şekildedir.

$$R^\phi = \sum_{\text{cells}P} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right| \quad (5.15)$$

Boyutsuz kalıntılar (R^ϕ) şu şekildedir:

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{cellsP}} \left| \sum_{\text{nb}} a_{\text{nb}} \phi_{\text{nb}} + b - a_p \phi_p \right|}{\sum_{\text{cellsP}} |a_p \phi_p|} \quad (5.16)$$

Süreklilik denklemi için boyutsuz kalıntılar ayrık çözüm yöntemi için aşağıdadır.

$$R^\phi = \sum_{\text{cellP}} \left| P \text{ hücresinde kütle üretim miktarı} \right| \quad (5.17)$$

Ayrık çözüm yöntemi süreklilik için boyutsuz kalıntılar ise şu şekildedir.

$$\frac{R_{\text{iterasyonN}}^\phi}{R_{\text{iterasyonG}}^\phi} \quad (5.18)$$

Burada N iterasyon sayısını ve G normalize işleminde kullanılan iterasyon sayısını göstermektedir

G sayıda iterasyon sonrasındaki normalize edilmiş kalıntı ($\overline{R}^\phi$) şu şekildedir.

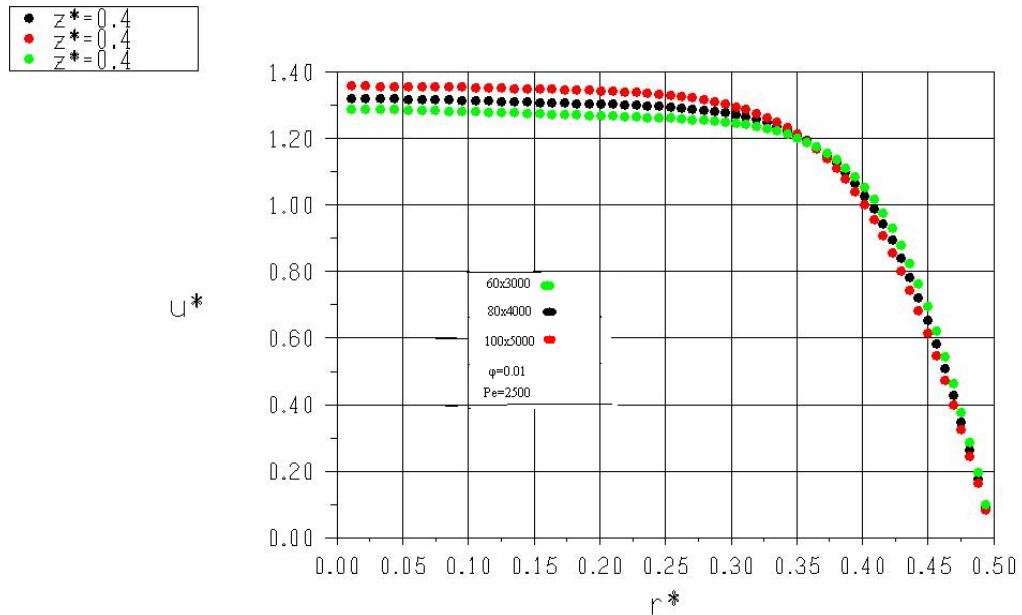
$$\overline{R}^\phi = \frac{R_{\text{iterasyonN}}^\phi}{R_{\text{iterasyonG}}^\phi} \quad (5.19)$$

5.3. Deneysel Çalışmanın Sayısal Olarak Modellenmesi

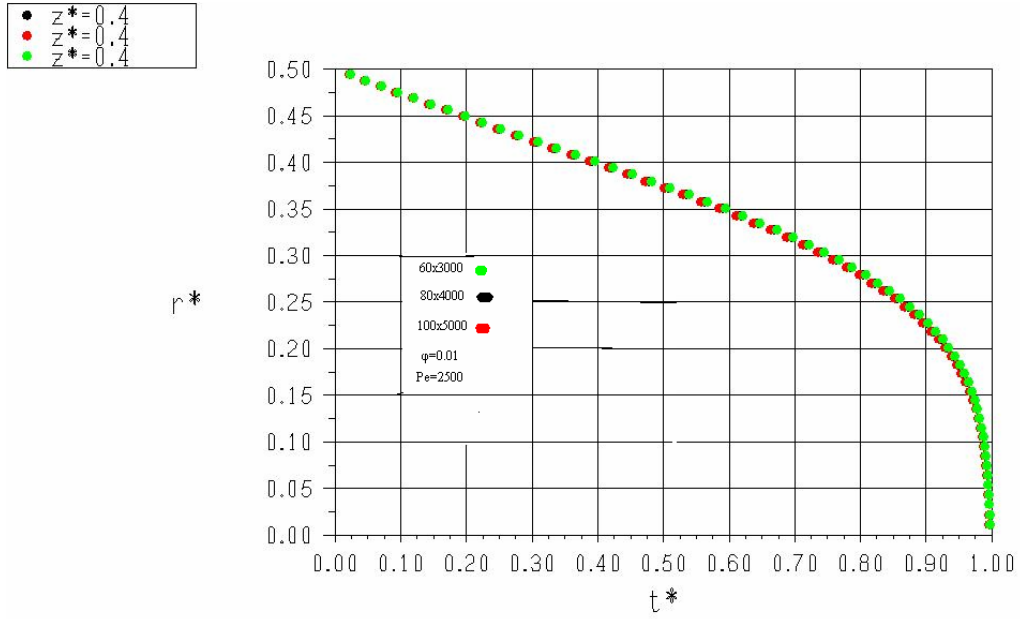
Haris ve arkadaşları tarafından yapılmış olan deneysel çalışmanın sayısal olarak çözülebilmesi için iki farklı program (GAMBİT ve FLUENT) kullanılarak bir modelleme gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada fiziksel modelleme GAMBİT ile tasarlanmış ve ikinci aşamada ise FLUENT ile sayısal olarak çözülmüştür.

5.3.1. GAMBİT Aşamaları

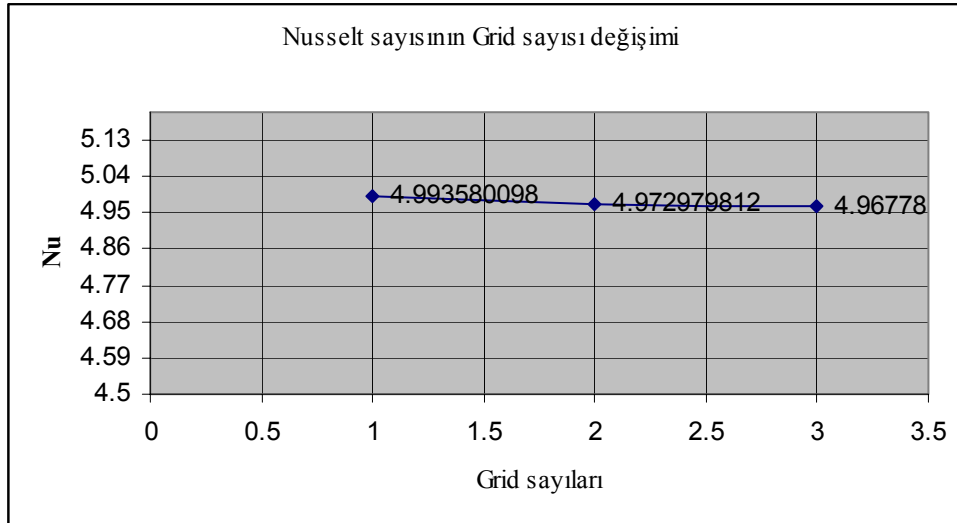
Deneysel düzeneğin ve ilave edilen 1 metrelik borunun fiziksel şeklinin oluşturulmasında bu program kullanılmıştır. Gambit ile ilk olarak 2 metre uzunluğunda ve 3 mm yarıçapında olan bir borunun koordinat sistemi belirlenmiştir. Daha sonra iki boyutlu olarak modellemesi yapıldıktan sonra oluşturulan bu şeklin sayısal ağ oluşturma (mesh) işlemleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modelde üç farklı grid sayısı için ön çalışmalar yapılmış olup, her noktasında hız ve sıcaklık dağılımını görebilmek amacıyla 60*3000, 80*4000 ve 100*5000, grid yapıları üzerinde çalışma yapılmıştır. 60*3000 grid yapısı, 80*4000 grid yapısı ve 100*5000, grid yapısı ile elde edilen sonuçlarda boyutsuz hız ve sıcaklığın değişimi deneysel sonuçlarla karşılaştırmaları yapılmıştır. 60*3000 grid yapısı ile elde edilen çözümlerin literatürdeki deneysel sonuçlarla uyum sağladığı belirlenmiştir. Sayısal çözümler bu hücre yapısı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 5.3. de 60*3000, 80*4000 ve 100*5000, grid yapıları ilgili olarak boyutsuz hız ve yarıçap, boyutsuz sıcaklık ve yarıçap ile Nusselt sayısının grid sayısı ile değişimleri verilmiştir.



a)



b)

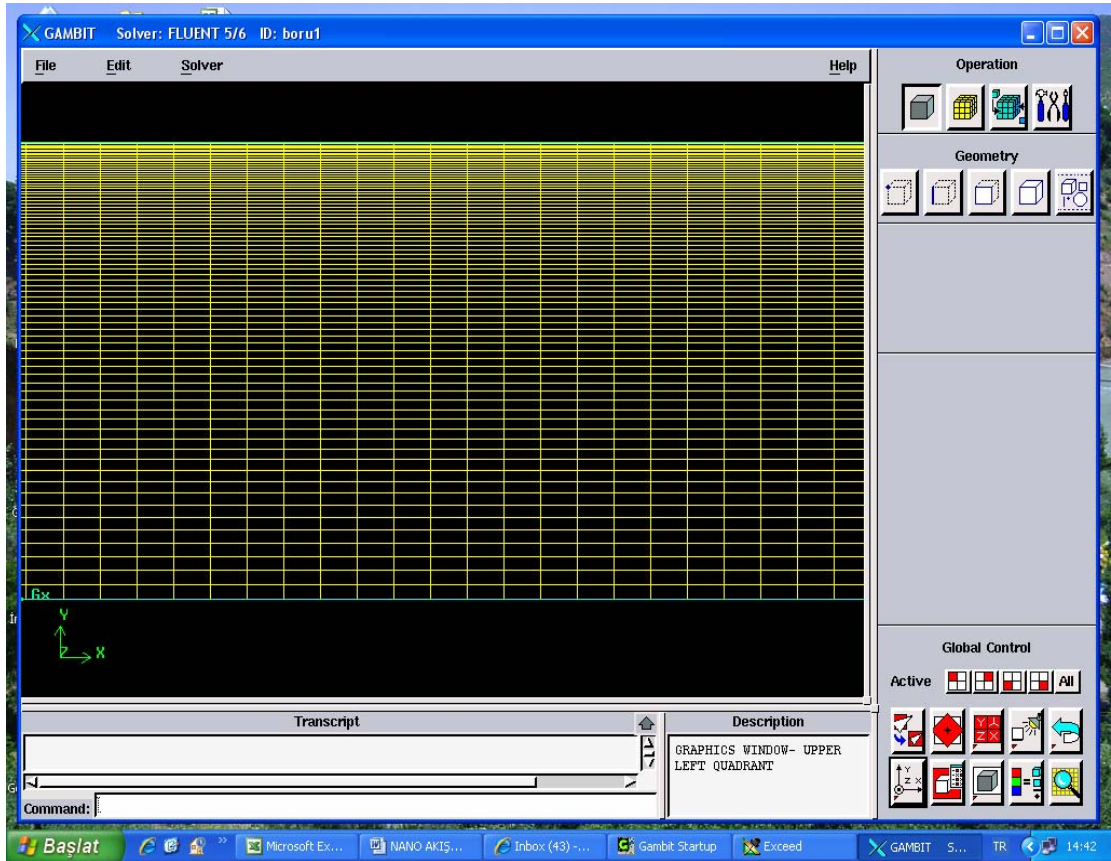


c)

Şekil 5.3. Grid bağımsızlığı testi a) u^*-r^* b) t^*-r^* c) Nusselt sayısı(Nu)- grid sayısı

GAMBİT ile belirlenen grid sayıları için hücreler oluşturulurken fiziksel şekle uygun bir hücre dağılımı yapılmıştır. Bunun için borunun duvarına doğru artan hücre sayıları bulunan bir ağ sistemi oluşturulmuştur. Dolayısı ile Şekil 5.4. de z- yönünde eşit aralıklarla dağıtılmış grid kullanılırken r yönüne doğru Sayısal hesaplama sonucunun boru duvarına doğru yoğunlaştırılmış (ratio 1.1) bir grid seçimi

yapılmıştır. Hazırlanan bu model ile bir mesh dosyası(*.msh) oluşturulmuş ve model sayısal çözümü yapacak FLUENT programın modeli tanıyabileceği bir forma sokulmuştur. Aşağıda GAMBIT ile oluşturulmuş ağ sisteminin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.4. Gambit ile oluşturulmuş ağ sisteminin yapısı

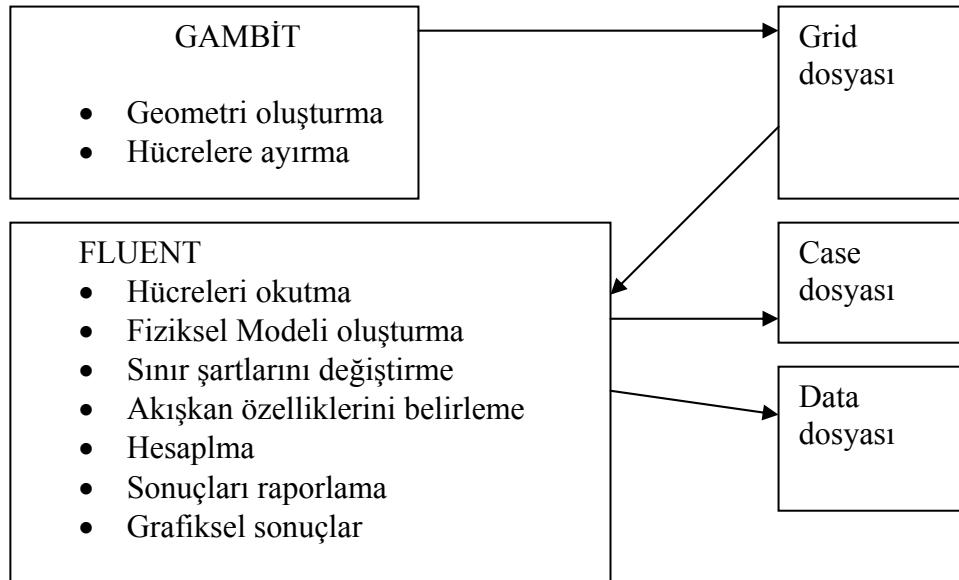
Şekil 5.4. de görüldüğü gibi boru cidarına yakın bölgede çok küçük hücre yapıları seçilmiştir. Z yönünde oluşturulan hücrelerde eşit hücre boyutları kullanılırken r yönündeki hücreler boru orta eksenine doğru bir miktar büyütülmüştür.

Çalışmada geometriye uygun olarak duvar giriş, çıkış ve simetri şartları kullanılmıştır. Burada borunun ikinci bölümünde boru duvarı ilk çalışmada sabit duvar(wall) sıcaklığı ($T_w=sbt$) alınmış, ikinci çalışmada ise boru duvarına sabit ısı akısı ($q_w=sbt$) sınır şartı olarak seçilmiştir.

Nano akışkanın boruya sabit hız ile üniform olarak girdiği kabul edilerek bu bölgede giriş şartı (velocity inlet) kullanılmıştır.

5.3.2. FLUENT Aşamaları

FLUENT ile yapılan işlemler Şekil 5.5. de kısaca gösterilmiştir. Şekilde belirtilen işlemler detaylı olarak bu bölümde aşama aşama anlatılacaktır. İlk aşamada GAMBİT ile oluşturulan mesh (ağ) dosyası iki boyutlu olarak programa tanıtılarak okutma işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.5. GAMBIT ve FLUENT programları için akış şeması

Sayısal çalışmadaki ikinci aşama korunum denklemlerinin belirlenen hücre yapısı ve sınır şartlarında çözülmesidir. Bu amaçla ilk olarak GAMBIT ile oluşturulan *.msh dosyası FLUENT tarafından okunur. Bu sayede hücre yapısı, sınır şartları ve bölge isimleri FLUENT programına aktarılmış olur.

Hücre yapısı kontrol edildikten sonra sırasıyla korunum denklemlerinin çözüm metotları ile ilgili özellikler, akışkanın ve diğer malzemelerin özellikleri, çalışma şartları ve sınır şartları FLUENT menüleri kullanılarak tanımlanır.

Bu çalışmada kütle ve momentumun korunumu denklemlerinin (Fluent menüsü: Define / Models / Solver) yanı sıra enerjinin korunumu denklemi (Fluent menüsü: Define / Models / Energy) çözülmüştür. Laminer akış şartları sisteme tanıtılmıştır (Fluent menüsü: Define / Models / Viscous). Bu denklemlere ilave olarak nano akışkan içindeki partikülleri tanımlamak için Discrete Phase Source (DPM) modeli seçilmiştir. DPM modeli nano boyutundaki partiküllerin akışkan içindeki hareketlerini ve partiküllerin akışkana etkilerini incelemektedir. Çalışmada akışkan olarak su partikül olarak ise Alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanılmıştır(Define / materials). Bu modelin içinde öncelikle akışkan ve partiküllere ait termal ve fiziksel özellikler girilmiştir. Nano akışkanın boru içine ilk giriş hızı sıcaklığı ve kütleli debisi girilmiştir (Define injection). Ayrıca akışkan içindeki nano boyutundaki partiküllerin akışkan üzerindeki ilave kuvvetlerini ifade eden brownian kuvveti ile Saffman kaldırma kuvveti dikkate alınmıştır(Define / Discrete Phase). İlave olarak nano partiküllerin sürüklenme direncini dikkate alan stokes cunningham sabiti hesaplanarak sisteme girilmiştir (Define / Discrete Phase).

Tanımlanan sınır şartları değerleri Define /Models / Boundary Conditions Fluent menüsü kullanılarak girilmiştir. Boru duvar yüzeyleri kayma duvar olmayan sabit duvar ($u_z = u_r = 0$) olarak tanımlanmıştır. Boru yüzeyine sabit suvar sıcaklığı($T_w = s_{bt}$) ve sabit ısı akısı($q_w = s_{bt}$) uygulanarak sayısal çalışmalar yapılmıştır. Simetri ekseninde ise “Symmetry” sınır şartı seçilmiştir.

Çözüm başlangıcında korunum denklemlerinin hangi algoritmalar kullanılarak çözüleceği ve rahatlatma parametrelerinin neler olacağı (Fluent /Solve /Solution) ve yakınsama parametreleri (Fluent /Monitors /Residuals) ile ilgili tanımlamalar yapılmıştır.

Bütün tanımlamalar yapıldıktan sonra program (Fluent /Solve / İtaret) çalıştırılarak çözümler elde edilmiştir.

Bu çalışmada öncelikle su için boru içindeki akışın çözümü yapılmıştır. Daha sonra su içine karıştırılmış nano partiküllerin suya karışımından oluşan ve nano akışkanın çözümünde Discrete Phase Source (DPM) modeli kullanılarak çözümler elde

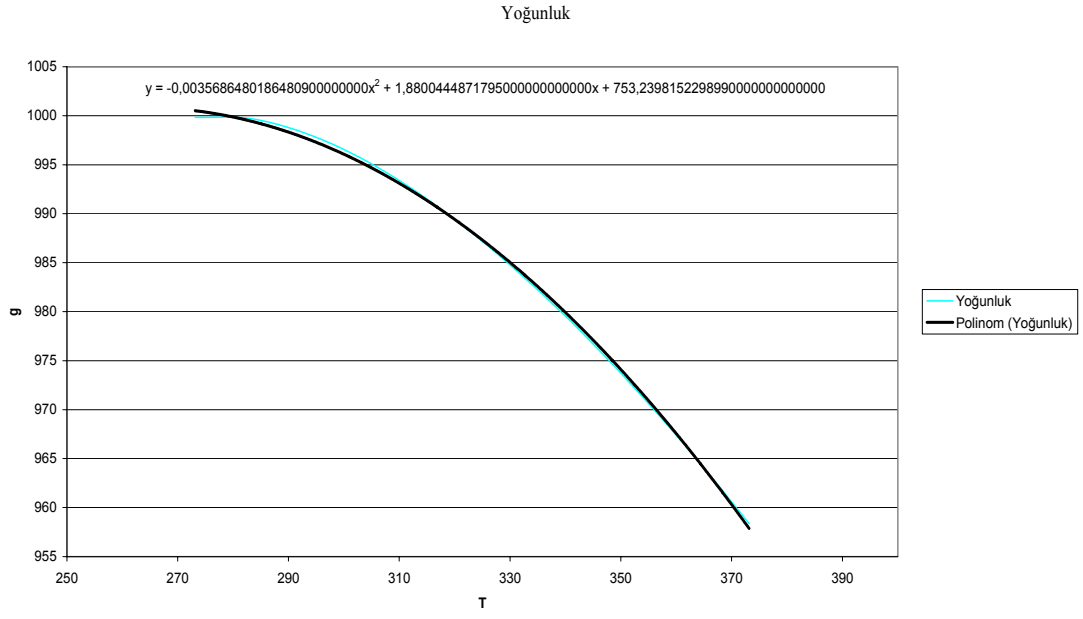
edilmiştir. Çözüm yönteminde formülasyon biçimi “implicit” seçilerek zamandan bağımsız bir çözüm yapılacağı tanımlanmıştır.

Sayısal çalışmada zorlanmış konveksiyon incelendiğinden programda öncelikle akışın türü, enerji denklemlerinin çözümünün yapılacağı kısmın aktif hale getirilmesi ile programa tanıtılmıştır. Bunun için kullanılan boru içindeki akışkanlara ait fiziksel özelliklerin tanımları ayrı ayrı yapılmıştır. Bu kısımda suyun sıcaklık ile değişen özellikleri(yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı, viskozitesi) ayrı girilmiştir.

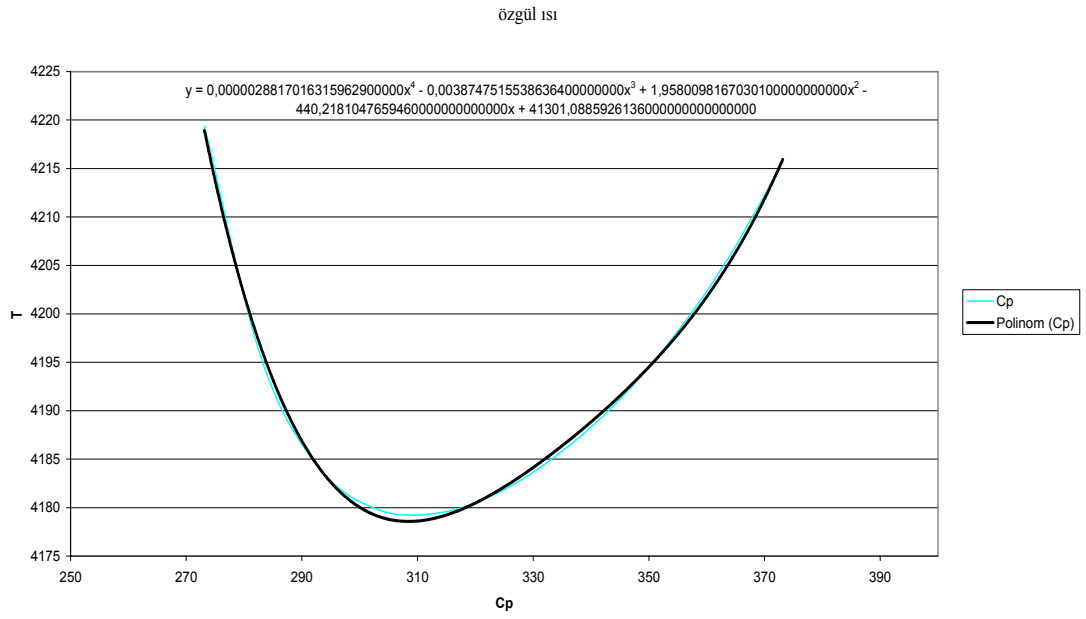
Suyun sıcaklığı ile değişen fiziksel ve termal özellikleri ile ilgili grafikleri Çizelge 5.1. ile Şekil 5.6 ile Şekil 5.9 arasında verilmiştir.

Çizelge 5.1. suyun fiziksel özelliklerinin değerleri[48]

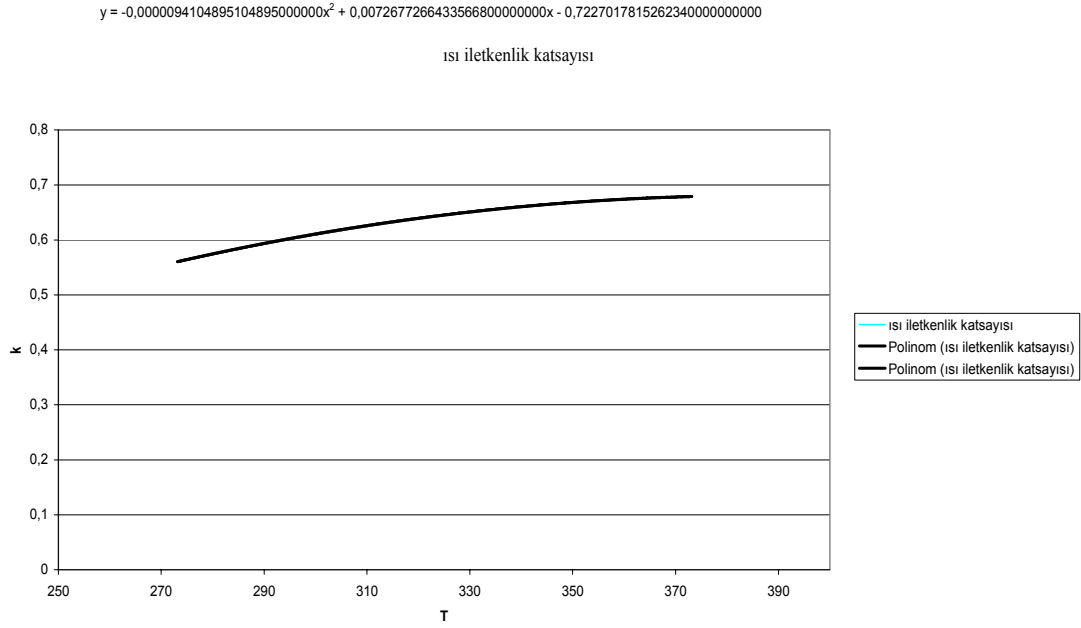
<u>Sıcaklık(T)</u>	<u>Viskozite(μ)</u>	<u>Isıl iletkenlik</u>		<u>Yoğunluk</u>
		<u>katsayısı (k)</u>	<u>Cp(özgül ısı)</u>	
273,15	0,0017909	0,56109	4219,4	999,84
283,15	0,0013055	0,58007	4195,1	999,7
293,15	0,0010014	0,59848	4184	998,2
303,15	0,00079718	0,61552	4179,8	995,65
313,15	0,00065286	0,63064	4179,4	992,21
323,15	0,00054676	0,64361	4181,3	988,03
333,15	0,00046633	0,6544	4185	983,19
343,15	0,00040384	0,66313	4190,1	977,76
353,15	0,0003543	0,67002	4196,8	971,78
363,15	0,00031437	0,67527	4205,2	965,3
373,15	0,00028182	0,67907	4215,6	958,37



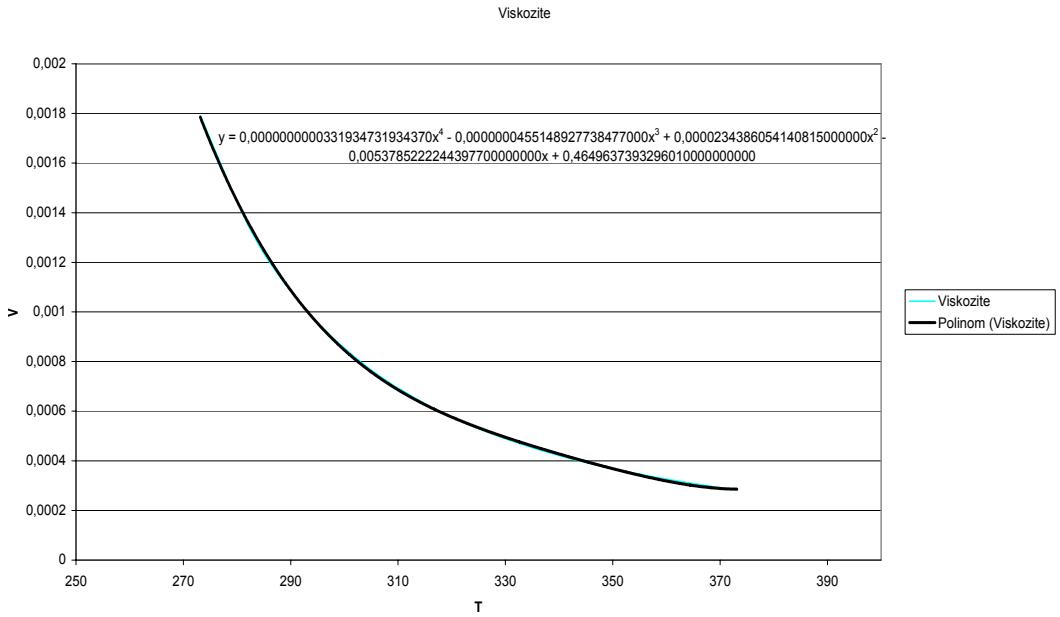
Şekil 5.6. Suyun sıcaklıkla yoğunluğunun değişimi[48]



Şekil 5.7. Suyun sıcaklıkla ölgül ısısının değişimi [48]



Şekil 5.8. Suyun sıcaklıkla ısı iletkenlik katsayısının değişimi[48]



Şekil 5.9. Suyun sıcaklıkla viskozitesinin değişimi[48]

Literatürde yapılan çalışmalarda sıcaklığın değişimine göre seçilen modellerde ısı transfer katsayısının ve Nusselt sayısının sabit sıcaklığa göre daha fazla olduğu görülmüştür [52]. Bunun sebebi incelendiğinde duvar sıcaklığı ile bulk sıcaklık arasındaki farktan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan ise sıcaklık ile

viskozitenin düşmesi nedeniyle kayma gerilmelerinin de azaldığı anlaşılmaktadır [52]. Bu nedenle bu çalışmada sıcaklığın değişimine göre çalışma yapılmıştır.

Deneysel verilerden su için alınan Pe ve Re sayıları bulunarak suyun giriş hızlarının hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmanın en önemli kısımlarından olan sınır şartlarının seçilme ve özelliklerinin belirlenmesidir. Burada çalışmanın ilk kısmında borunun ilk bölümdeki duvar sıcaklığı giriş sıcaklığına eşit ($T_o=300$ K), ikinci bölümde ise duvar sıcaklığı $T_w=373$ K olarak alınmıştır. Borunun orta kısımları simetri1 ve simetri2 olarak tanımlanmıştır. Çıkış ise exit olarak atmosfer basıncına eşit olarak tanımlanmıştır. Sınır şartlarının tanımı yapıldıktan sonra DPM modeli için nano akışkanı tanımlamak için fluent içinde injection bölümünden Al_2O_3 için yoğunluk özgül ısı ve ısı iletkenlik katsayısı ile nano akışkanın hızı girilir. İnititalize kısmında ise hangi sınır şartlarının ilk şart olarak kullanılarak başlanacağı programa tanıtılmıştır.

5.3.3. Uygun relaksasyon parametrelerinin seçilmesi

Sayısal hesaplama sonucunu bulabilmek için uygun relaksasyon parametrelerinin seçilmesi de önemlidir. Relaksasyon parametrelerinin seçimi iterasyon sayısının az ya da çok olması veya çözüm elde edilip edilememesi ile neticelenir. Burada momentum ve enerji denklemlerinin ayrıştırılması için ikinci dereceden UPWIND metodu kullanılmıştır.

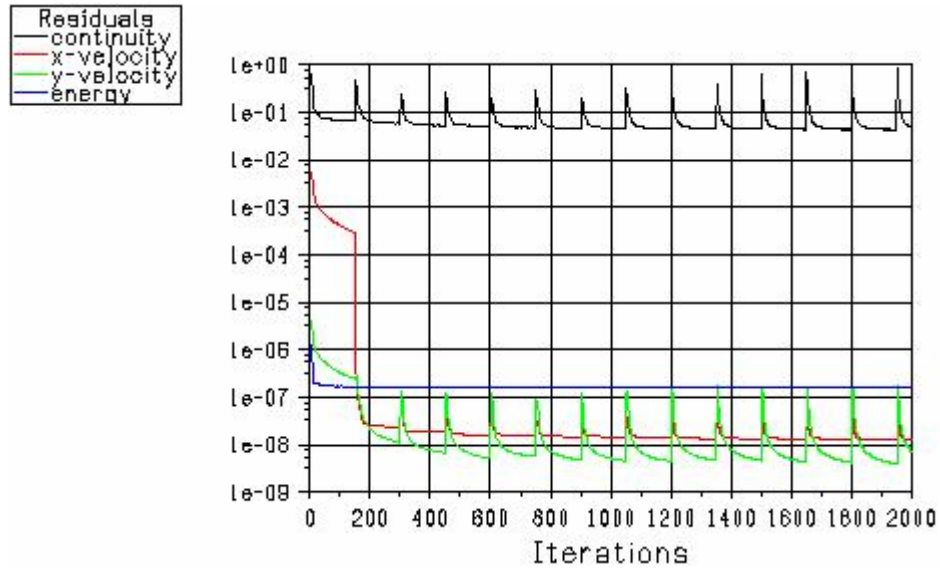
Relaksasyon parametreleri olarak, Fluent'in çeşitli durumlar için uygulanması sonucunda, problemin sağlıklı yakınsamasını sağlayacak olan değerler seçilmiştir. Fluent programında uygun bulunan relaksasyon parametreleri Çizelge 5.2.'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Relaksasyon parametreleri

Relaksasyon parametreleri	Relaksasyon Değeri
Basınç için	0,3
Yoğunluk için	1
Gövde kuvvetleri için	1
Momentum için	0,7
Enerji	1
Discerte Phase Source	0,5

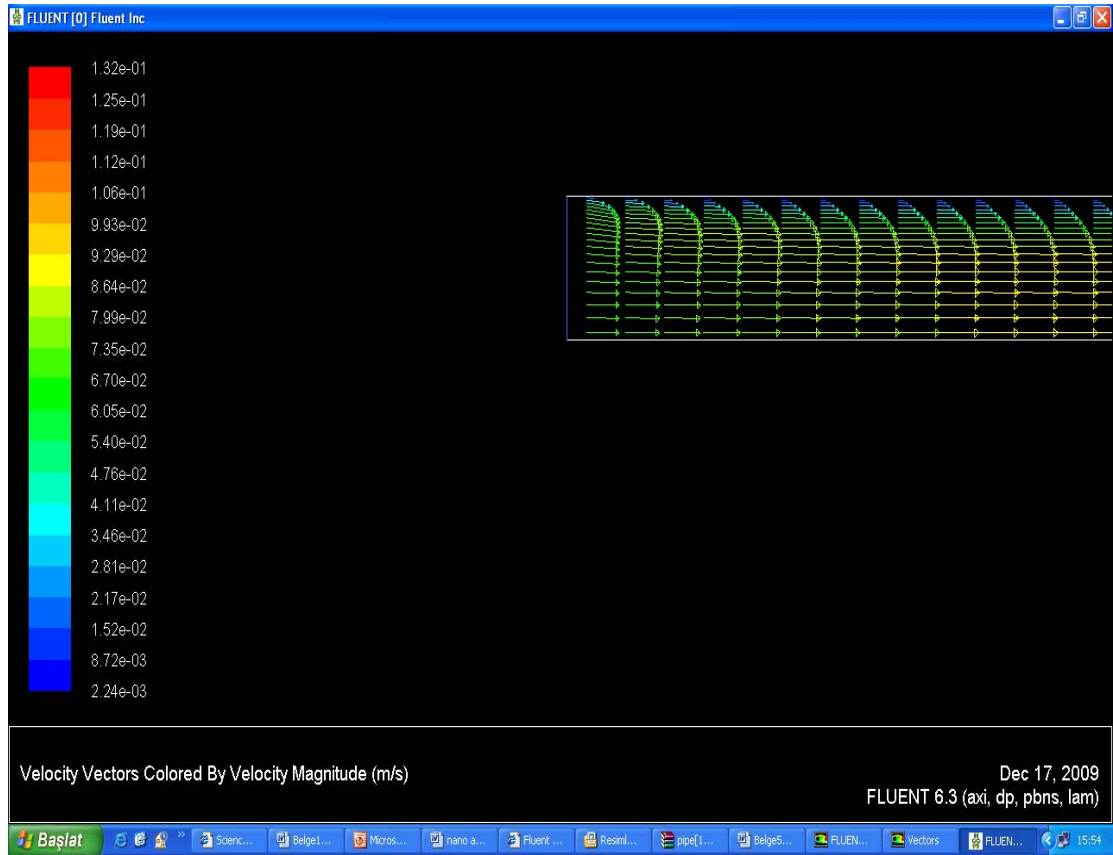
5.3.4.Yakınsama kriterleri

Normalize edilmiş kalıntılar yakınsamayı elde etmek için takip edilmektedir. Kalıntılar 10^{-6} değerinde olduğu zaman hesaplamamanın yakınsadığı kabul edilmiştir. Şekil 5.10.'da r hızı, z hızı ve enerji değerlerindeki kalıntıların iterasyon sayısı ile değişimi görülmektedir.

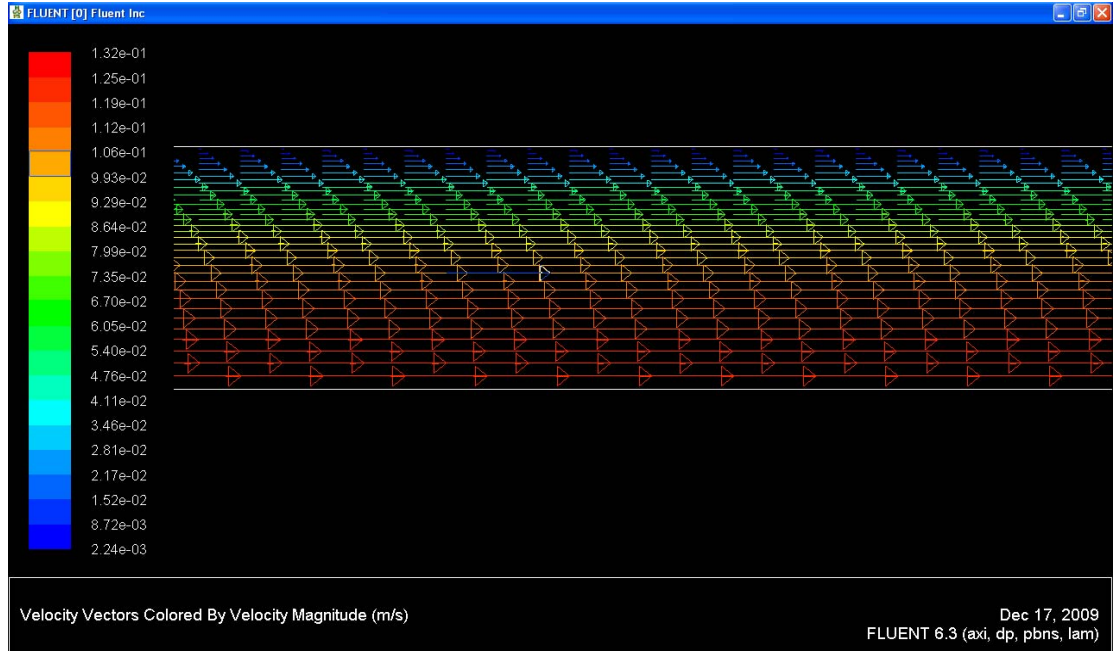


Şekil 5.10. Kalıntıların iterasyonla değişimi ve yakınsama

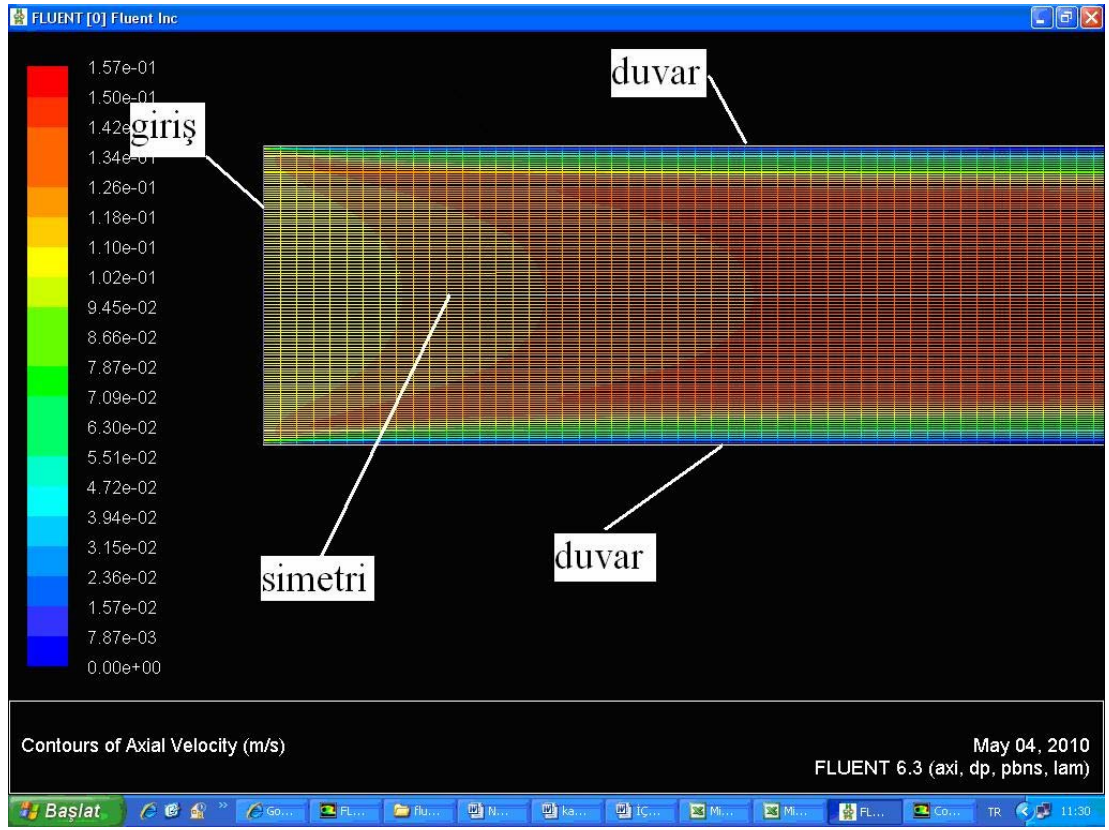
Son aşama olarak ise istenilen sonuçların elde edilmesinde kullanılacak referans değerleri “Reference Values” kısmından girilmiştir. Burada Nusselt sayısının hesaplanması için ortalama akışkan sıcaklığı ve viskozite değerleri girilir. Böylece çözüm öncesi modelleme aşaması bitmiş ve iterasyonlar kısmından yapılacak iterasyon sayısı belirlenerek çözümlerin yapılmasına geçilmiş ve çözümler kalıntı grafiği yardımıyla grafiksel olarak gözlemlenmiş ve çözümün yakınsaması ve kalıntıların istenilen değere ulaşması ile çözüm sonlandırılmıştır. Burada su için yapılan çalışmaların yanında su içinde bulunan nano partiküllerin hacim oranları (0,002, 0,01, 0,015, 0,02, 0,025) ve her bir hacim oranı için farklı Reynolds sayıları kullanılarak birçok çözüm elde edilmiştir. Şekil 5.11 ile Şekil 5.14 arasında nano akışkana ait hız vektörleri, hız konturları ve sıcaklık konturlarının boru girişinde ve boru çıkışındaki görüntüleri verilmiştir.



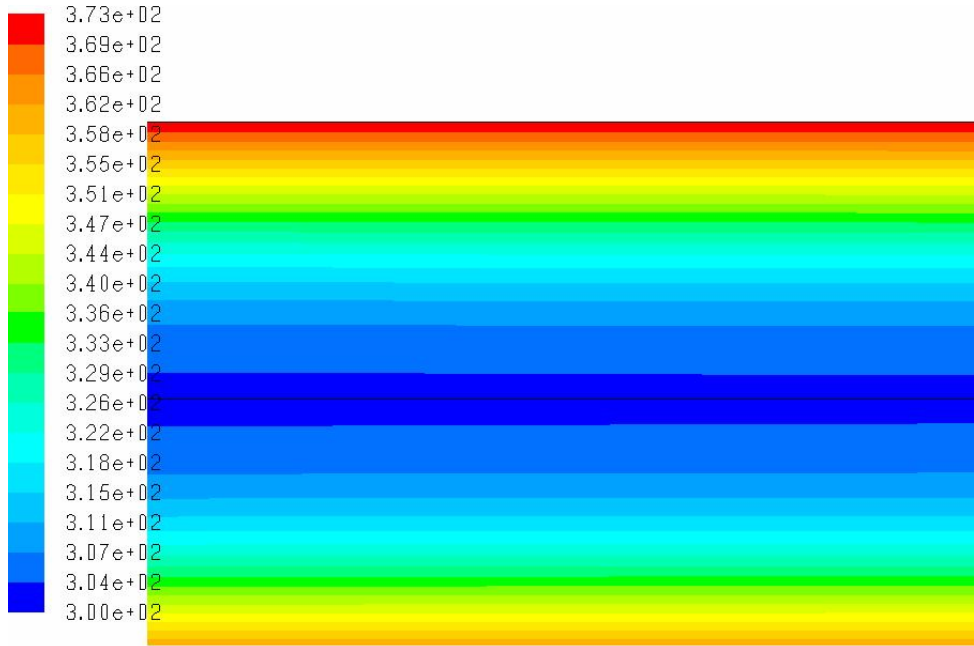
Şekil 5.11. Nano akışkana ait hız vektörlerinin boru girişindeki görünümü



Şekil 5.12. Nano akışkana ait hızın test alanında tam gelişmiş haldeki hız vektörleri



Şekil.5.13 Akışa ait boru girişindeki hız konturları



Şekil 5.14 Nano akışkana ait boru çıkışındaki sıcaklık konturları

Yukarıda verilen şekillerde akışkana ait hız vektörlerinin ve sıcaklık konturlarının FLUENT programında elde edilen çıktıları görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi akışkanın borunun içinde tam gelişmiş hale geldiği görülmektedir. Sıcaklık konturları incelendiğinde ise sabit ısı akısı ve sabit duvar sıcaklığı boruya uygulandığı için duvar yakınlarında sıcaklığın daha yüksek merkezde ise daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir.

4.3.5. Sayısal çözümlerin doğruluğunun kontrolü

Sayısal çözüm yöntemlerini kullanarak birçok problem için çözüm elde etmek mümkündür. Fakat çözümlerin ve sonuçların gerçek fiziksel olay ve fizik kanunlarına uygun olması gerekmektedir. Bu nedenle yapılan birçok çözüm işe yaramaz. Sayısal çözüm yöntemlerinde problem defalarca yeniden programlanarak ve tanımlanarak, kullanılan sayısal akışkanlar dinamiği kodunun içerdiği çözüm teknikleri ve değişkenleri tekrar tekrar gözden geçirilerek, problemin gerçek çözümlerinin elde edilmesi sağlanır. Sayısal metotlarda elde edilen sonuçların geçerliliğinin kontrolü için beş ana kriter vardır.

1- Çözüm yakınsaklığı sağlandı mı?

Sayısal çözüm yöntemlerinde iterasyon sayısına bağlı olan kalıntıların değişiminin incelenmesi gerekmektedir. FLUENT programında bu kalıntılar kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri için grafik ve / veya yazılı şekilde verilir. Çözümün yakınsaması için bütün değişkenlerin kalıntıları monoton veya değişken bir azalma göstermek zorundadır. Yakınsamanın kontrolü yapıldıktan sonra, her değişken için toplam kalıntı değerlerine bakmak gerekir. Bu değerlerinde mümkün olduğunca sıfıra yakın çok küçük değerler olması istenir.

2- Çözüm iterasyon sayısından bağımsız mı?

Çözüm iterasyon sayısı ile yakından ilgilidir. Problemin basit ve karmaşık olmasına göre iterasyon sayısı değişir. Bundan dolayı iterasyon sayısı değiştirilerek 1. şart sağlanır. Yani iterasyon sayısı ile yakınsamanın nasıl değiştiği sürekli olarak gözlenir. Burada amaç iterasyon sayısının artmasıyla yakınsamış bir problemin yakınsamasının devam ettiğini gözlemlemektir.

3- Korunum denklemleri sağlandı mı?

İlk iki şartın sağlanmasından sonra, çözümünü elde etmeye çalıştığımız fiziksel problemi tanımlayan kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir.

4- Çözüm hücre yapısından bağımsız mı?

İlk üç şartın sağlanmasına rağmen elde edilen sonuçlar gerçek değerlerden uzak olabilir. Buna sebep nedenlerden biri de çözüm alanı içerisindeki hücre sayısı ve dağılımıdır. Uygun hücre sayısının belirlenememesi, farklı sonuçlar doğurabilir. Ayrıca, problemin fiziğine bağlı olarak, hücre dağılımı da çok önemlidir. Akışın

yapısına göre giriş ve çıkış bölgesinde ya da herhangi bir bölgede akışın değişimi farklı olabilir ve hücre dağılımı homojen olmayabilir. Hücre yapısından bağımsız bir çözüm elde etmek sonuçların doğruluğu açısından şarttır. Hücre yapısında ve dağılımında yapılan değişikliklerle, elde edilen sonuçlardaki değişim minimuma indirgenmelidir ve en uygun hücre sayısı belirlenmelidir. Böylece hesaplama zamanında önemli ölçüde kazanç sağlanmış olur.

5- Sonuçlar deneysel sonuçlarla uyumlu mu?

Sayısal akışkanlar dinamiği çözüm ve sonuçlarının gerçek fiziksel değerlerle doğruluğu ve uyumluluğu sayısal çalışmanın doğruluğunun belirlenmesi için önemlidir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar (ilk dört şartı sağlayan) literatürde yapılmış olan deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar ileriki bölümlerde verilmiştir.

Bu kriterlerin FLUENT programı kullanılarak yapılan sayısal çalışmada kullanım şekli Ek 2’de açıklanmıştır.

5.3.6. Sayısal çalışma parametreleri

Bu çalışmada sabit duvar sıcaklığındaki ve sabit ısı akısındaki bir boru içerisinde laminar koşullarda farklı konsantrasyon oranlarındaki tam gelişmiş nano akışkanın ısı transferi artırılması üzerindeki etkileri incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla akışkan içinde farklı konsantrasyon olarak karıştırıldığı oranlarındaki nano partiküllerin akışkan içinde homojen olarak dağıldığı kabul edilerek, farklı Peclet sayılarındaki ısı transferinin incelenmesi sabit duvar sıcaklığında ve sabit ısı akısında sayısal çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada ele alınan sayısal şartlar parametre değerlerine göre Çizelge 5.3. de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Sayısal çalışma parametreleri

$\dot{m}(kg / s)$	$\phi(hacimselpartiküloranı)$	Pe	Re	U (m/s)	Tinlet (K)
2,99687E-06	0,002	2517,8	984,5331	0.086172	300
3,93976E-06	0,002	3314	1231,12	0.113439	300
4,28445E-06	0,002	3605	1322,043	0.122023	300
4,52365E-06	0,002	3807	1384,25	0.126657	300
4,95294E-06	0,002	4169,6	1494,361	0.14308	300
5,73432E-06	0,002	4829,8	1691,179	0.163501	300
6,4144E-06	0,002	5404,5	1860,664	0.186377	300
6,95676E-06	0,002	5862,8	1996,016	0.19924	300
7,18045E-06	0,002	6051,8	2052,151	0.205423	300
1,56433E-05	0,01	2634,3	1022,922	0.090472	300
1,78647E-05	0,01	3009,7	1147,089	0.102564	300
2,03149E-05	0,01	3424	1280,124	0.115254	300
2,23041E-05	0,01	3760,5	1385,605	0.128228	300
2,31073E-05	0,01	3896,4	1427,655	0.131131	300
2,58998E-05	0,01	4369	1571,902	0.148258	300
2,7737E-05	0,01	4680	1665,549	0.159234	300
2,94914E-05	0,01	4977	1754,383	0.168826	300
3,09444E-05	0,01	5223	1827,725	0.177841	300
3,53805E-05	0,01	5974	2052,045	0.202201	300
2,34771E-05	0,015	2556,6	1035,698	0.089452	300
2,6131E-05	0,015	2846,6	1136,344	0.100972	300
2,85707E-05	0,015	3113,3	1226,861	0.108589	300
3,28315E-05	0,015	3579,3	1380,987	0.125287	300
3,70902E-05	0,015	4045,3	1530,96	0.140212	300
3,981E-05	0,015	4343	1625,118	0.150988	300
4,41854E-05	0,015	4822	1774,774	0.169376	300
5,05695E-05	0,015	5521	1991,35	0.194381	300
5,51092E-05	0,015	6018	2145,892	0.210686	300
3,26187E-05	0,02	2595,5	1085,58	0.09341	300
3,84543E-05	0,02	3061,5	1251,176	0.107046	300
4,49342E-05	0,02	3579,3	1428,649	0.123313	300
4,96298E-05	0,02	3954,7	1553,906	0.136631	300
5,46479E-05	0,02	4356	1685,414	0.149348	300

Çizelge 5.3 devam

$\dot{m}(kg / s)$	$\phi(hacimselpartiküloranı)$	Pe	Re	U (m/s)	Tinlet (K)
6,06362E-05	0,02	4835	1840,171	0.164313	300
6,54238E-05	0,02	5218	1962,983	0.179283	300
7,17991E-05	0,02	5728	2126,444	0.19902	300
7,5037E-05	0,02	5987	2209,869	0.206322	300
4,08744E-05	0,025	2556,6	1098,81	0.09402	300
4,91233E-05	0,025	3074,4	1287,707	0.113941	300
5,35591E-05	0,025	3353	1386,311	0.124676	300
6,31346E-05	0,025	3954,7	1593,521	0.145081	300
6,71705E-05	0,025	4208,4	1679,021	0.153867	300
6,95182E-05	0,025	4356	1728,372	0.159938	300
7,2397E-05	0,025	4537	1788,564	0.165519	300
7,79631E-05	0,025	4887	1904,191	0.177621	300
8,43398E-05	0,025	5288	2035,978	0.191859	300
8,70113E-05	0,025	5456	2091,146	0.198404	300
9,62829E-05	0,025	6039	2283,392	0.216061	300

Çalışma programına göre uygun olarak ele alınan sayısal çalışma parametreleri hem nano akışkan hem de su için sabit duvar sıcaklığında ($T_w=sbt=373$) ve sabit ısı akılarında $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ve $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ sisteme uygulanmış olup, sayısal çalışma sonuçları ise bu tezin 7. bölümünde sunulmuştur.

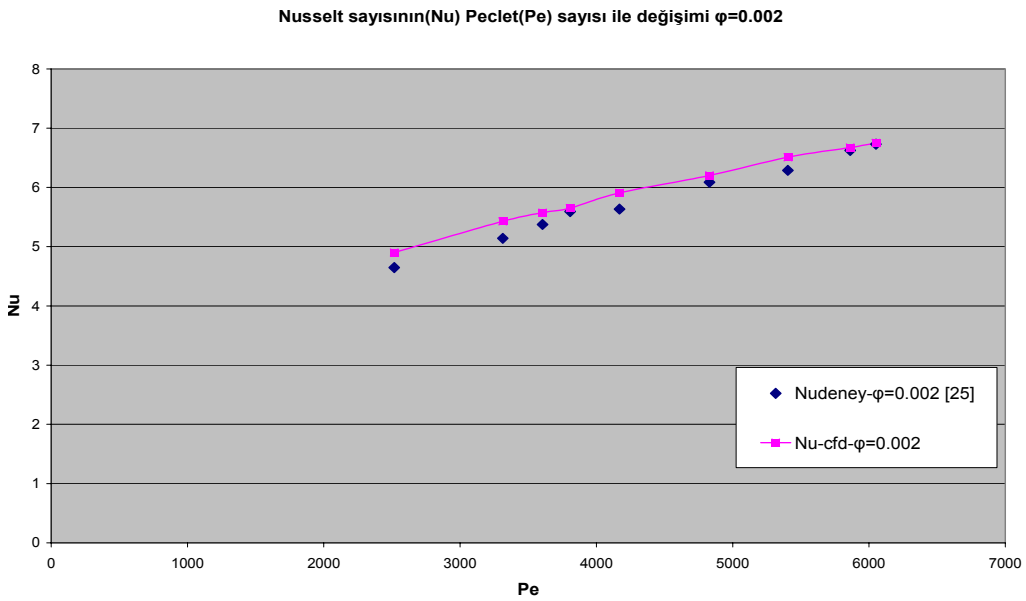
Çizelgede bulunan u hızları ile $\dot{m}$ partikül giriş hızları hesaplandıktan sonra FLUENT programına girilmiştir. Ayrıca ρ_{nf} , μ_{nf} , C_{pnf} ve k_{nf} değerleri verilen denklemler vasıtasıyla hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalar sonucunda bulunan Re, Pe, ve Pr sayıları hesaplanmış çıkan sonuçlardan nano akışkana ait giriş hızları bulunmuştur. Bulunan bu değerler FLUENT programında tanıtılarak nano akışkana ait hızlar girilmiştir.

6. SAYISAL SONUÇLARIN HERİS[25] TARAFINDAN YAPILAN DENEYSEL VE TEORİK SONUÇLARLA KIYASLANMASI

Bu bölümde sabit duvar sıcaklığında Nusselt sayısının ve konveksiyon ısı transfer katsayısının farklı konsantrasyon oranları için sonuçları değerlendirilip, deneysel ve teorik yapılan çalışmalar ile kıyaslanmıştır.

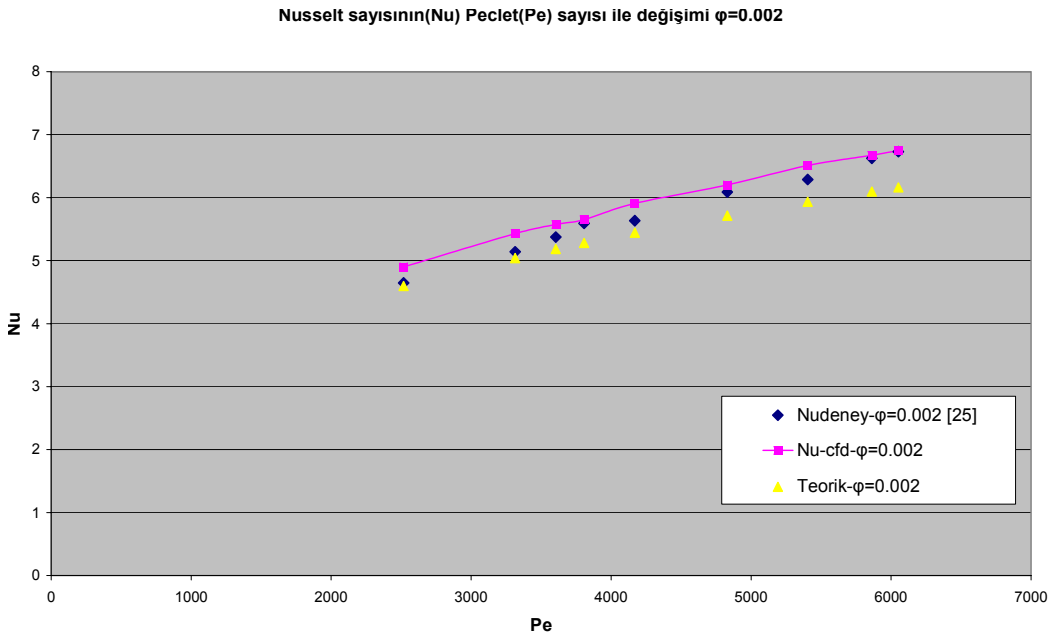
6.1. Sabit Duvar Sıcaklığında Sayısal Çalışma Sonucu Elde Edilen Nu-Re, Nu-Pe, h-Pe Grafikleri

Boru içindeki nano akışkan için sabit duvar sıcaklığında CFD ile bulunan Nu ve h değerlerinin farklı konsantrasyon oranları ve farklı Pe ve Re sayıları için Seider-tate korelasyonu ve deneysel sonuçlarla kıyaslamaları yapılmıştır. Şekil 6.1 de görülen veri noktaları Heris ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deney ile CFD yöntemiyle hesaplanan verileri içermektedir. Şekil 6.1 0,002 hacimsel partikül oranı için verilmiş olup deneysel olarak elde edilen Nusselt sayıları ile CFD ile hesaplananların uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



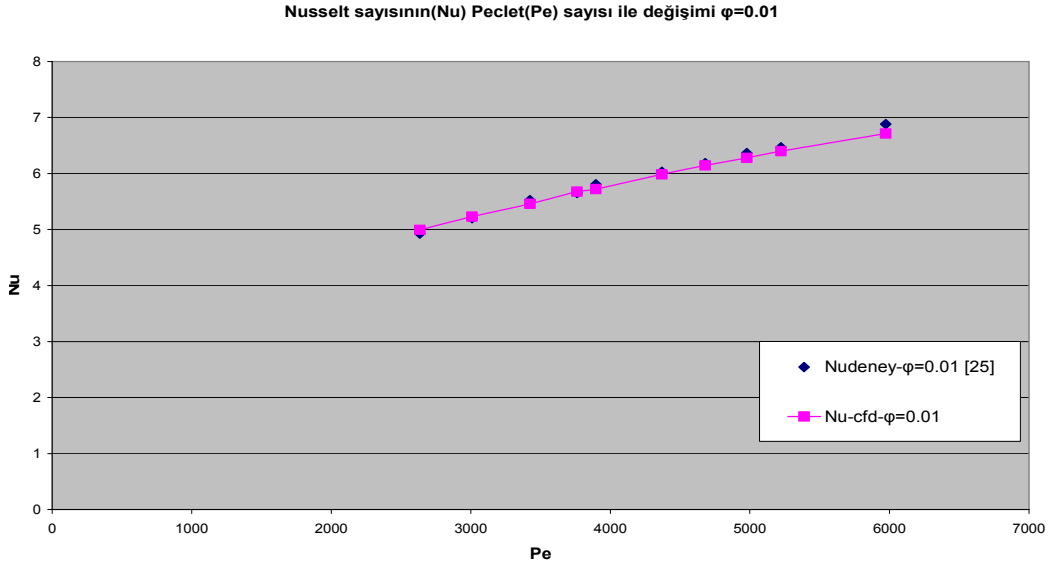
Şekil 6.1. Akışa ait boru boyunca 0,002 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması (Sabit duvar sıcaklığında $T_w=sbt$)

Şekil 6.2 yi değerlendirecek olursak Şekil 6.1 den farklı olarak bu grafiğe Sieder-Tate korelasyonu kullanılarak elde edilen veriler de eklenmiştir. Sieder-Tate korelasyonu duvar yakınlığındaki viskozite ile ortalama sıcaklıkta hesaplanan viskozite değerlerini kullanarak akışkanın niteliklerinin sıcaklıkla değişimini Nusselt sayısı hesabına katmaktadır. Bu korelasyon kullanılarak elde edilen değerler 0,002 hacimsel partikül oranı için deneysel ve CFD yöntemiyle elde edilen Nusselt değerleri ile örtüşmektedir.



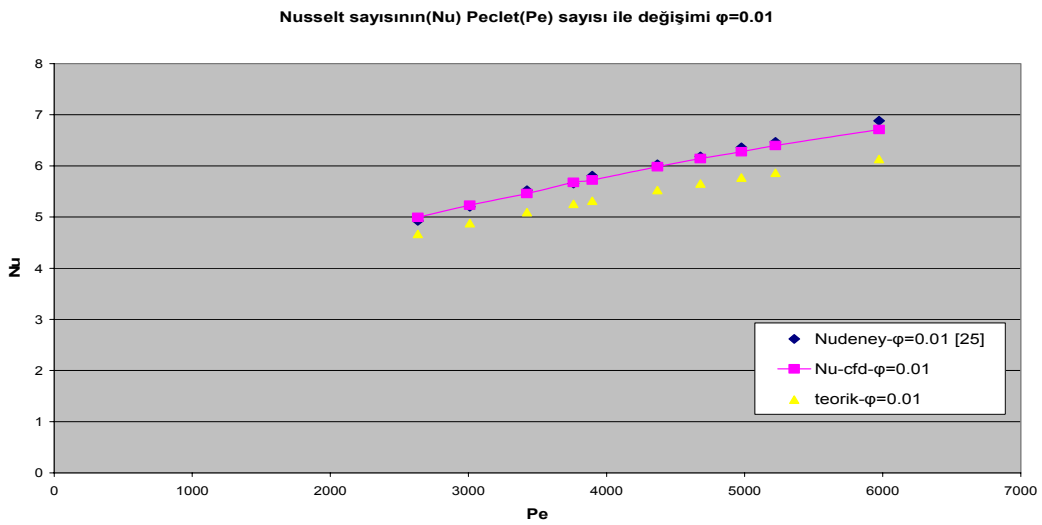
Şekil 6.2. Akışa ait boru boyunca 0,002 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

Şekil 6.3 benzer şekilde 0,01 hacimsel partikül oranı için deneysel yöntemle ve CFD ile elde edilen Nusselt sayılarının Peclet sayısı ile değişimini göstermektedir. İki yöntemle elde edilen verilerin birbirine oldukça yakın oldukları gözlenmektedir.



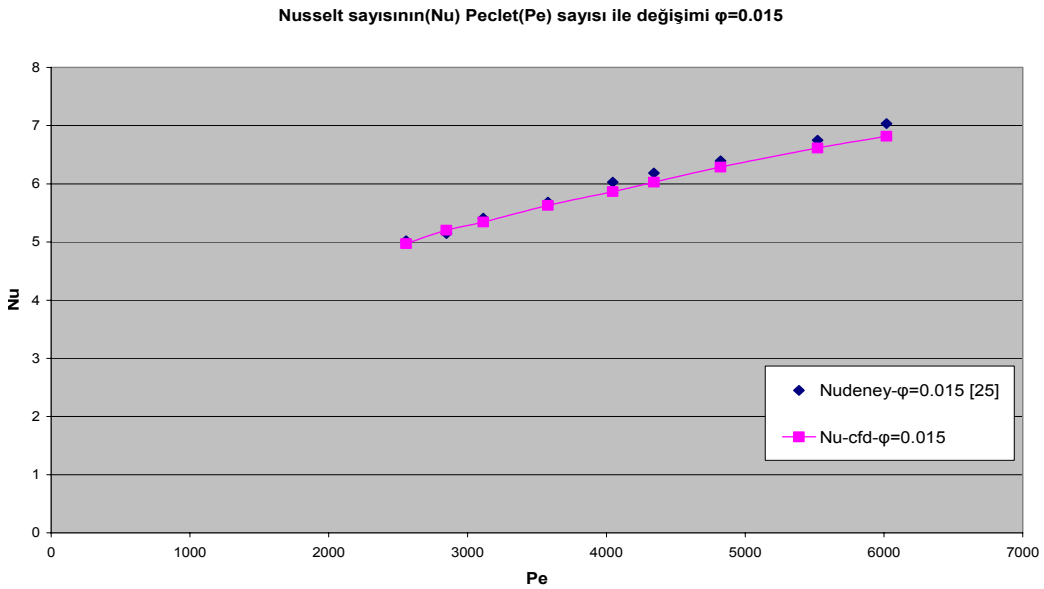
Şekil 6.3. Akışa ait boru boyunca 0,01 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

Şekil 6.4 de ise 0,01 hacimsel partikül oranı için deneysel yöntem, CFD ve Sieder-Tate korelasyonu kullanılarak elde edilen Nusselt sayıları farklı Peclet sayıları için verilmiştir. Burada yukarı da da görüldüğü gibi deneysel veriler ile CFD yöntemiyle elde edilen verilerin uyum içerisinde olduğu görülürken, Sieder-Tate korelasyonunun Nusselt sayısının değişimini tahmin etmekte yetersiz kaldığı görülmektedir.

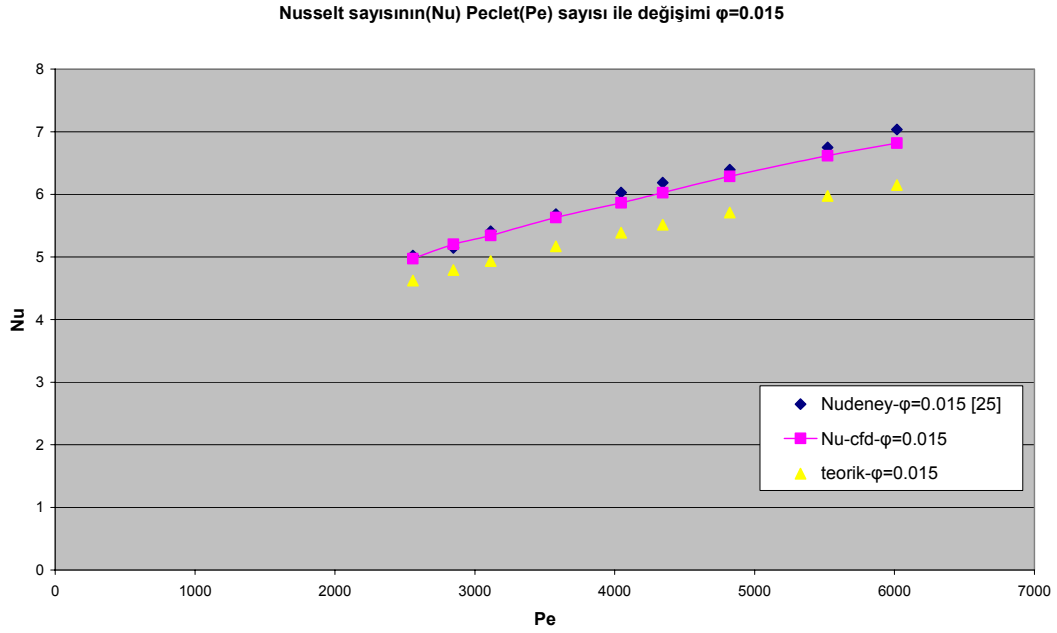


Şekil 6.4. Akışa ait boru boyunca 0,01 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 değerlendirildiğinde de benzer şekilde CFD ve deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçların farklı Peclet sayılarında birbirine oldukça yakın olduğu görülürken, Sieder-Tate korelasyonundan elde edilen Nusselt sayılarının daha düşük olduğu görülmektedir. Bu farkın sebebi, viskozitenin sıcaklık ile değişiminin Nusselt sayısının artışından çok daha yavaş gerçekleşmesi. Viskozite değişimini kullanarak akışkan niteliklerindeki değişimi hesaba katan Sieder-Tate korelasyonu nano-akışkanın ısı transferi artışını tahmin etmekte yetersiz kalmaktadır.

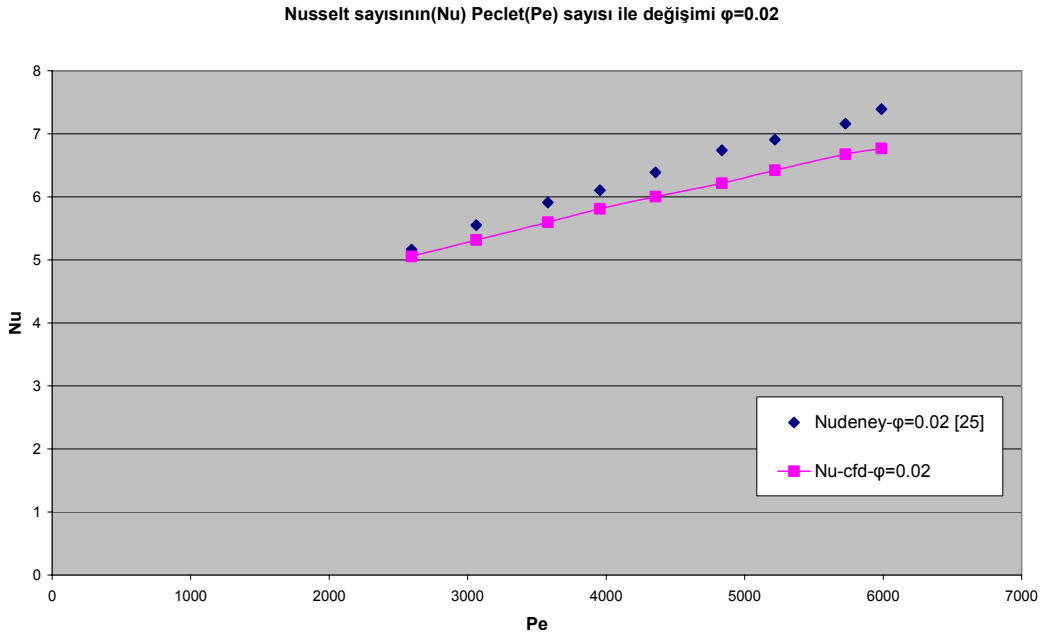


Şekil 6.5. Akışa ait boru boyunca 0,015 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

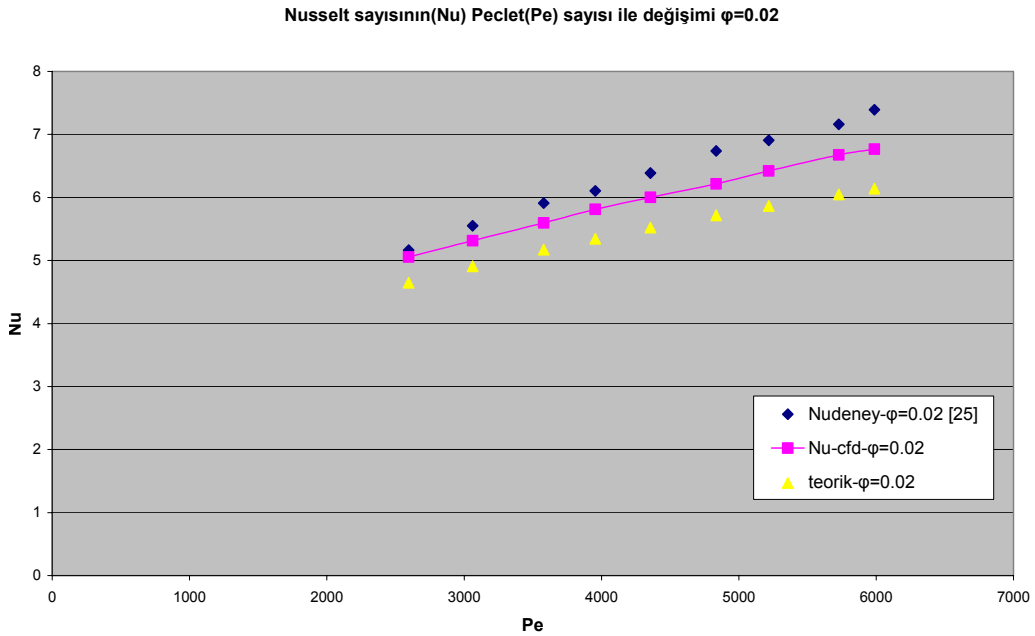


Şekil 6.6. Akışa ait boru boyunca 0,015 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 değerlendirildiğinde ise 0,02 hacimsel partikül oranı için hem CFD yöntemiyle hem de Sieder-Tate korelasyonundan elde edilen Nusselt sayılarının deneysel verilerden farklı olduğu görülebilir. Şekil 6.8 de, CFD yöntemiyle elde edilen Nusselt sayılarının Peclet sayısı ile değişimine bakıldığında, bu değişimin eğiminin Sieder-Tate korelasyonu ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Her iki yöntemde de partikül oranının artması ile akışkan niteliklerindeki değişimin ısı transferine etkisi benzer bir artışa sebep olmaktadır. Oysa ki deneysel verilere bakıldığında durum farklılık göstermektedir. Buna göre nano-akışkanın ısı transfer karakteristiğindeki değişim sadece akışkan niteliklerinin değişimi ile açıklanması güç bir durumdur. Burada Nusselt sayılarının Peclet sayısı ile değişim eğrisinin eğimi hem CFD hem de Sieder-Tate korelasyonu ile elde edilen eğrinin eğiminden farklıdır.



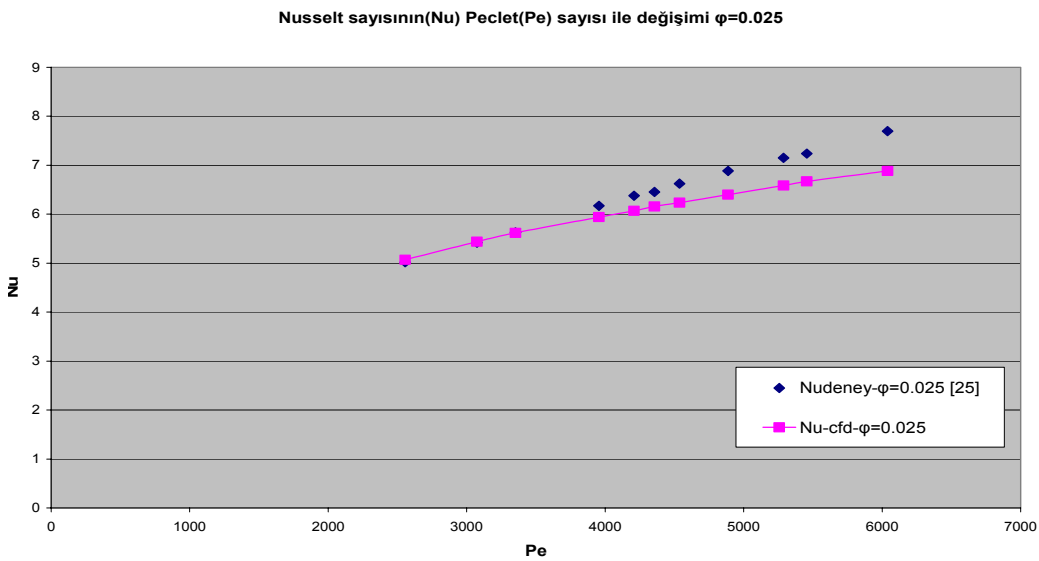
Şekil 6.7. Akışa ait boru boyunca 0,02 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması



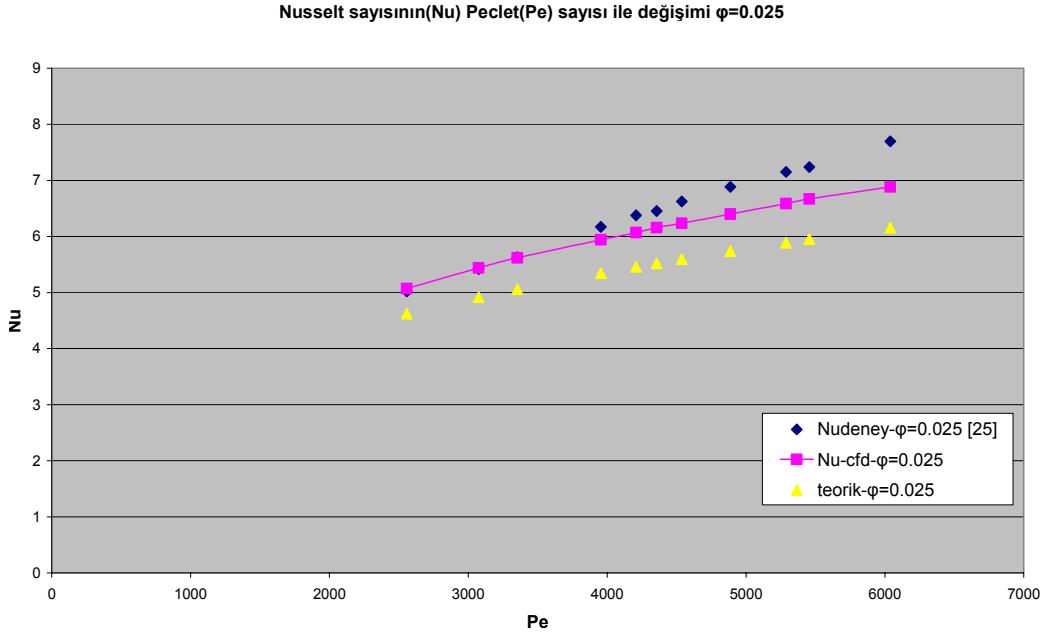
Şekil 6.8. Akışa ait boru boyunca 0,02 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 değerlendirildiğinde ise yine CFD yöntemi ve Sieder-Tate korelasyonundan elde edilen veriler ile deneysel veriler arasında farklılıklar gözlenmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere, hem CFD yöntemiyle elde edilen hem de Sieder-Tate korelasyonundan elde edilen Nusselt sayılarının farklı Peclet sayıları için değişimine bakıldığında bu iki eğrinin eğimlerinin birbirine yakın olduğu görülmekte. Fakat az önce de bahsedildiği gibi deneysel olarak elde edilen Nusselt sayılarının Peclet sayısı ile değişim eğrisi bu iki eğriden daha yüksek bir eğime sahip olduğu görülmektedir. Yine belirtildiği üzere bu farkın temel sebebi nano-akışkanlardaki ısı transferi iyileşmesinin sadece akışkan özelliklerinin değişimi ile açıklanamamasıdır. Yine de genel bir değerlendirme yapacak olursak, CFD ile elde edilen verilerin deney sonuçları ile uyum içerisinde olduğu ve CFD yönteminin deneysel verilere yaklaşmakta, Sieder-Tate korelasyonundan daha başarılı olduğu değerlendirilebilir.

Yapılan sayısal çalışmada sabit duvar sıcaklığında farklı konsantrasyon oranlarında Nusselt sayısının Peclet sayısı ile değişimleri incelendiğinde Heris ve arkadaşları tarafından yapılmış olan deneysel sonuçlarla ve Seider-Tate korelasyonu ile uyumlu olduğu görülmektedir.

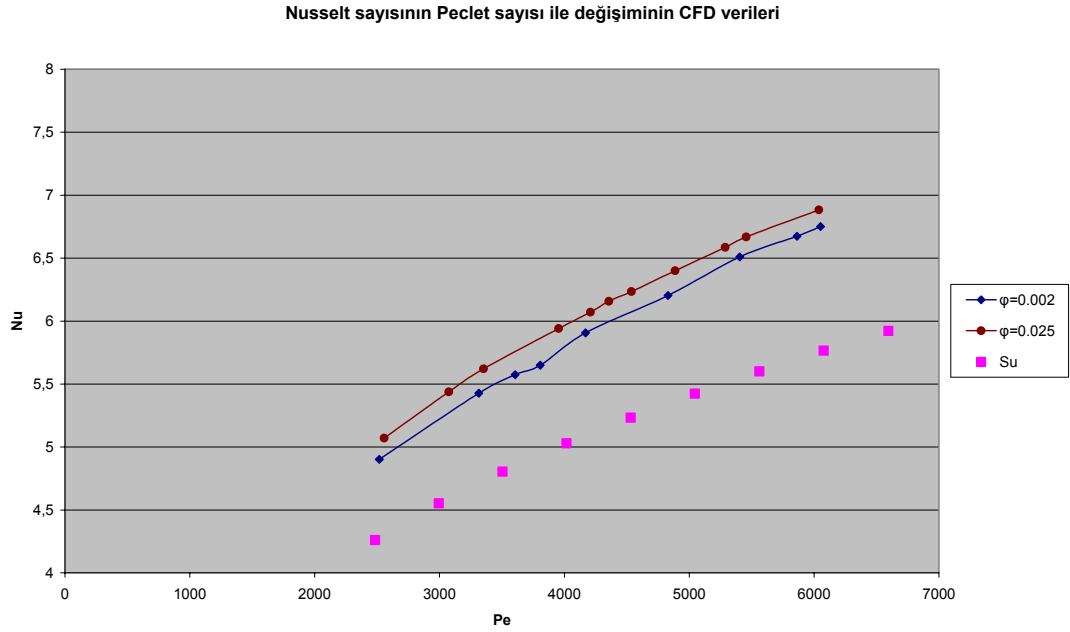


Şekil 6.9. Akışa ait boru boyunca 0,025 hacimsel partikül oranı için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

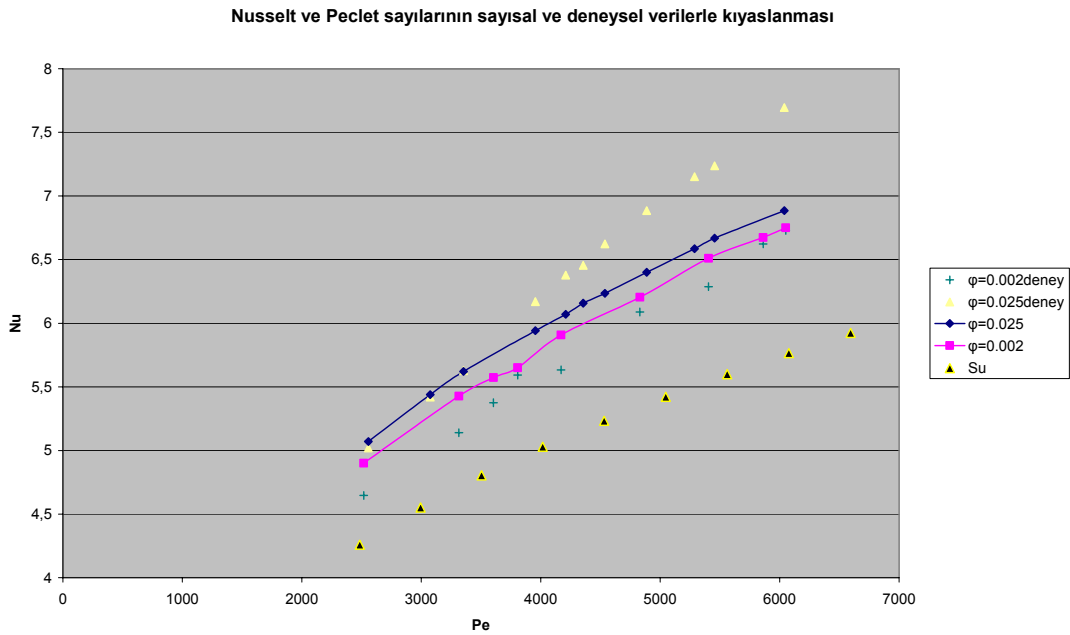


Şekil 6.10. Akışa ait boru boyunca 0,025 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

Şekil 6.11-6.12 değerlendirildiğinde, nano akışkanın ısı transferi açısından suya göre ne kadar üstün olduğu açıkça görülebilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi sadece akışkanın nitelik değişimi sebebiyle böyle bir artışın olduğu değerlendirildiğinde, Şekil 6.11 deki gibi Nusselt sayılarının Peclet veya Reynolds sayısı ile değişimi her bir hacimsel oran için aynı eğime sahip eğriler olacaktır. Fakat nano akışkanın ısı transfer karakteristiğini belirleyen tek etkenin akışkanın niteliklerindeki değişim olmadığı deneysel verilere bakılarak söylenebilir. Şekil 6.12 de de görüldüğü üzere, hacimsel oran arttıkça Nusselt sayılarının Peclet veya Reynolds sayısı ile değişim eğrileri hem daha yukarıya çıkmakta hem de eğrilerin eğimi artmaktadır. Bu da sadece akışkanın niteliklerindeki değişim hesaba katılarak elde edilemeyecek sonuçtur.

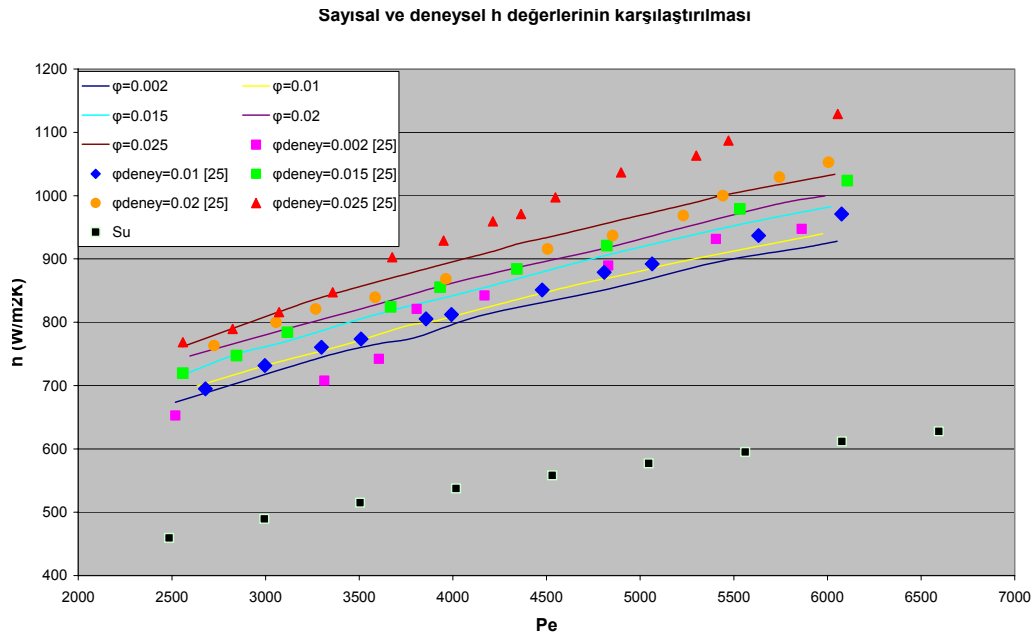


Şekil 6.11. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması



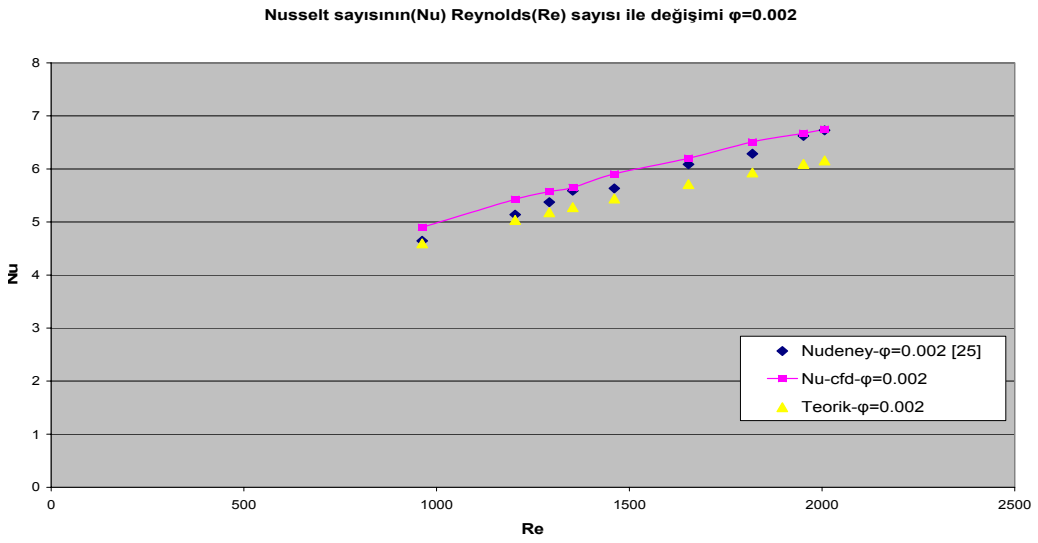
Şekil 6.12. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için deneysel ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

Şekil 6.1 ile 6.12 arasında sayısal çalışma sonuçları ile Heris ve arkadaşları tarafından yapılmış deneysel sonuçlara ait grafikler sunulmaktadır. Şekil 6.1-6.12 arasında verilen Nusselt sayısının farklı hacim oranları için Peclet sayısı ile değişim grafiklerine benzer şekilde burada da Nusselt sayılarının değişimleri farklı Reynold sayıları ve farklı hacimsel oranlar için tekrar verilmiştir. Burada akışkan içindeki partikülün hacimsel oranı arttıkça Nusselt sayılarında belirgin artışların olduğu görülmektedir. Su ile yapılan kıyaslamalarda ise %11-23 arasında Nusselt sayısında değişimlerin olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca akışkan içindeki partikülün hacimsel oranı arttıkça Nusselt sayılarında belirgin artışların olduğu görülmektedir. Heris ve arkadaşları tarafından yapılmış deneysel çalışmanın ve sayısal olarak bulunmuş olan ısı transfer katsayılarının akışkan içindeki partikülün hacimsel oranlarına göre Peclet sayısı ile değişimleri Şekil 6.13 de görülmektedir. Burada sayısal çalışmanın sonuçları incelendiğinde akışkan içindeki partikül oranı arttıkça ısı transfer katsayısında da belirgin artışların olduğu anlaşılmaktadır. Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi incelendiğinde ise yine deneysel ve teorik yapılan çalışmalarla uyumlu sonuçların alındığı görülmektedir.

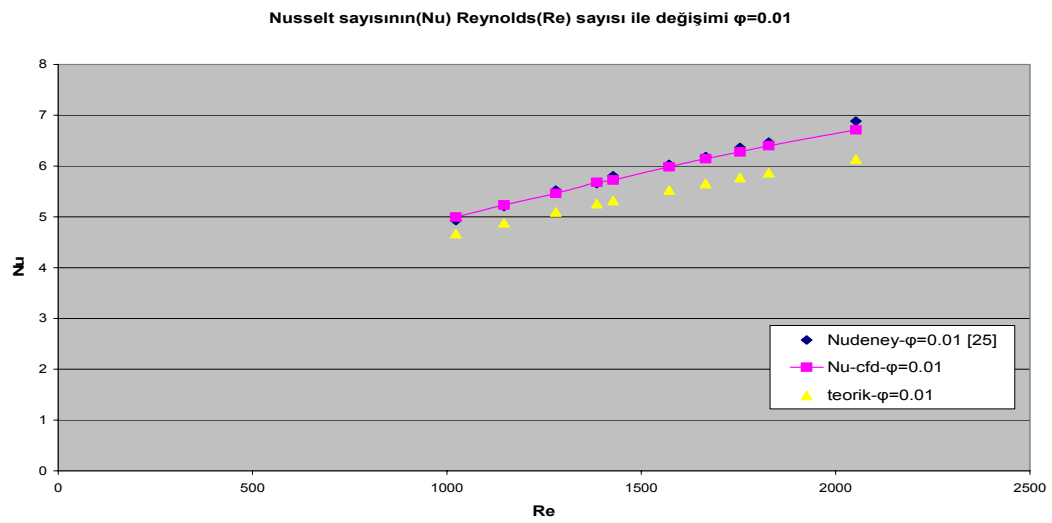


Şekil 6.13. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal ve deneysel olarak ısı transfer katsayılarının(h) sayılarının Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması

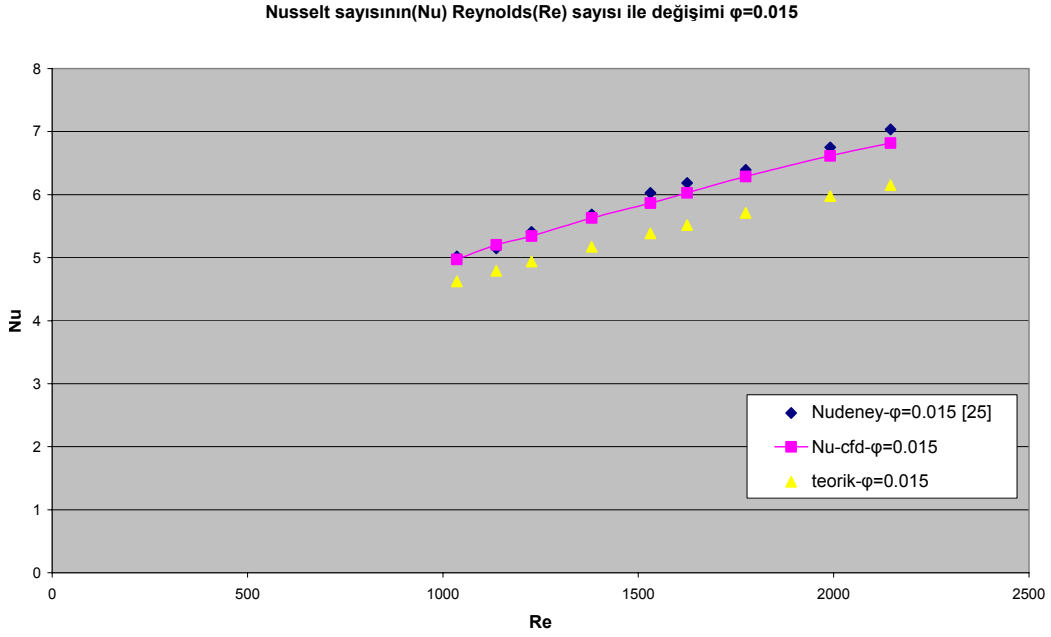
Şekil. 6.14 ile Şekil 6.18 arasındaki grafikler incelendiğinde deneysel sayısal ve seider-Tate korelasyonu ile yapılmış olan sonuçlarda akışkan içindeki partikül oranları arttıkça Nusselt sayılarının arttığı, ayrıca artan partikül oranlarına göre Reynolds sayıları arttıkça Nusselt sayılarında önemli oranda artışların olduğu anlaşılmaktadır.



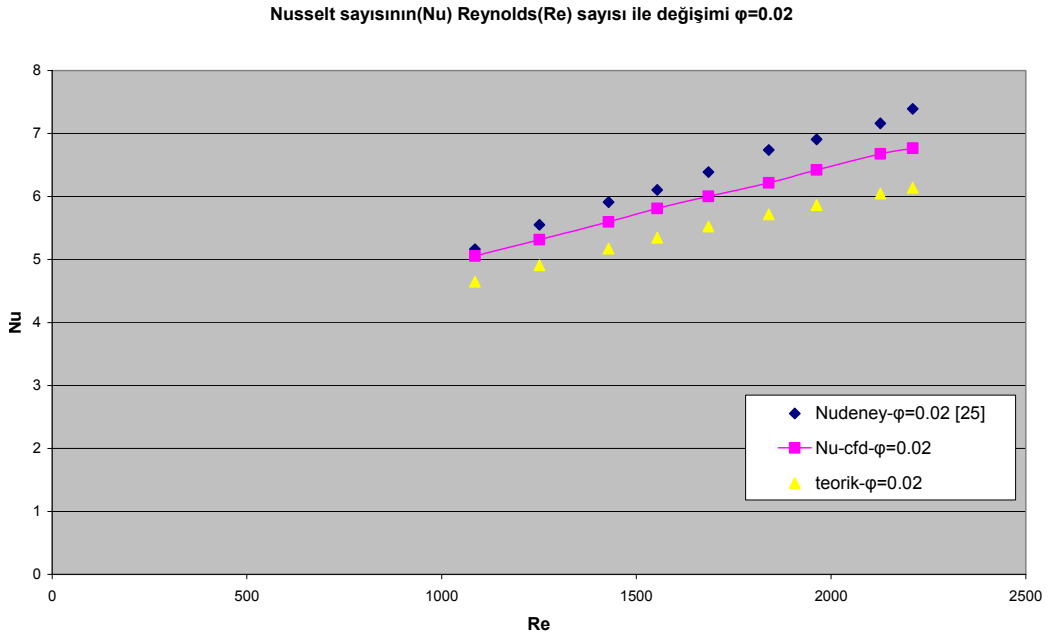
Şekil 6.14. Akışa ait boru boyunca 0,002 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması



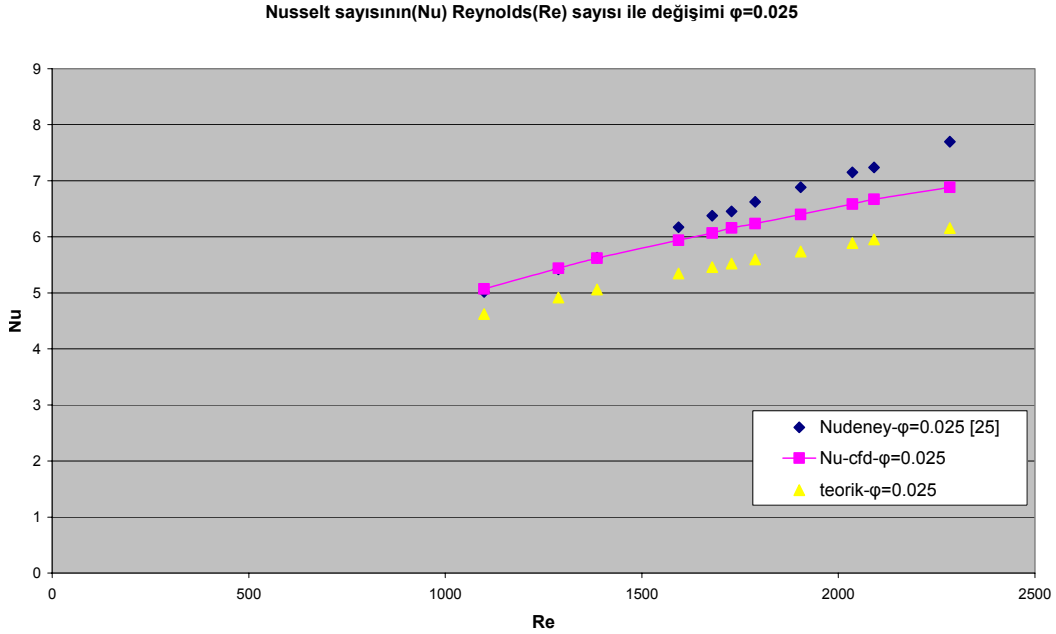
Şekil 6.15. Akışa ait boru boyunca 0,01 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması



Şekil 6.16. Akışa ait boru boyunca 0,015 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması



Şekil 6.17. Akışa ait boru boyunca 0,02 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması



Şekil 6.18. Akışa ait boru boyunca 0,025 hacimsel partikül oranı için deneysel Seider-Tate ve sayısal olarak Nusselt(Nu) sayılarının Reynolds (Re) sayısı ile karşılaştırılması

Yukarıdaki grafiklerde deneysel sayısal ve Seider-Tate korelasyonu ile yapılmış olan sonuçların birbirleriyle uyumlu oldukları ve akışkan içindeki partikül oranları arttıkça Nusselt sayılarının arttığı, ayrıca artan partikül oranlarına göre Reynolds sayıları arttıkça Nusselt sayılarında önemli oranda artışların olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada 20nm boyutundaki nano partiküllerin(Al_2O_3) su içine homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen nano akışkanın sabit suvar sıcaklığında ve sabit ısı akımlarındaki ısı transferleri üzerine incelemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar bize akışkan içine ilave edilen nano partiküllerin hacimsel oranların arttıkça ısı transfer katsayılarında ve Nusselt sayılarında önemli oranda artışlar olduğunu göstermektedir. Sabit duvar sıcaklığında literatürdeki deneysel çalışmalarla kıyaslamalar yapıldığında yapılan sayısal çalışmanın oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

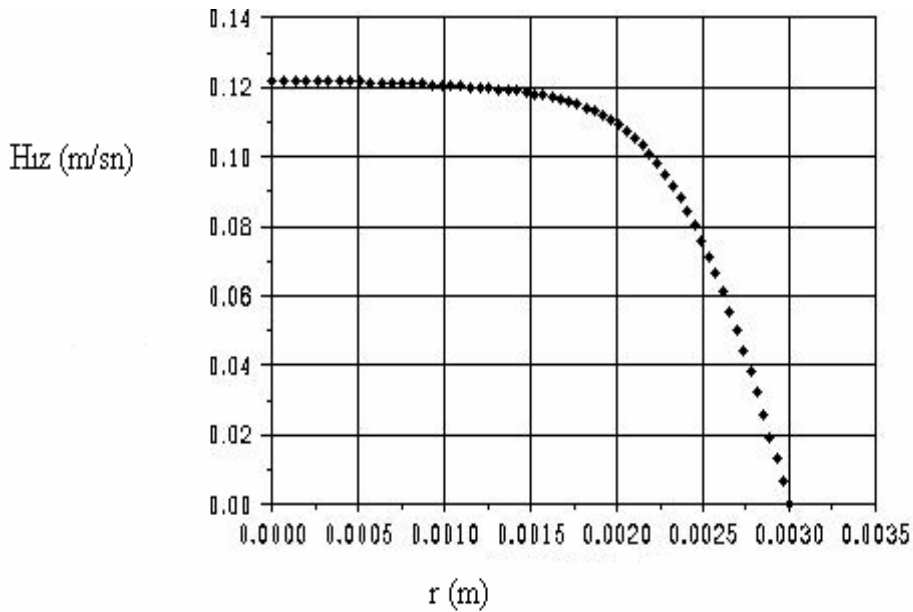
7. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde elde edilen sonuçların incelemesi yapılmıştır. Ayrıca $q_w=2500 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $q_w=7500 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri için ısı transfer katsayılarının Peclet ve Reynolds(Re) sayıları ile değişimi farklı konsantrasyon oranlarında incelenmiştir.

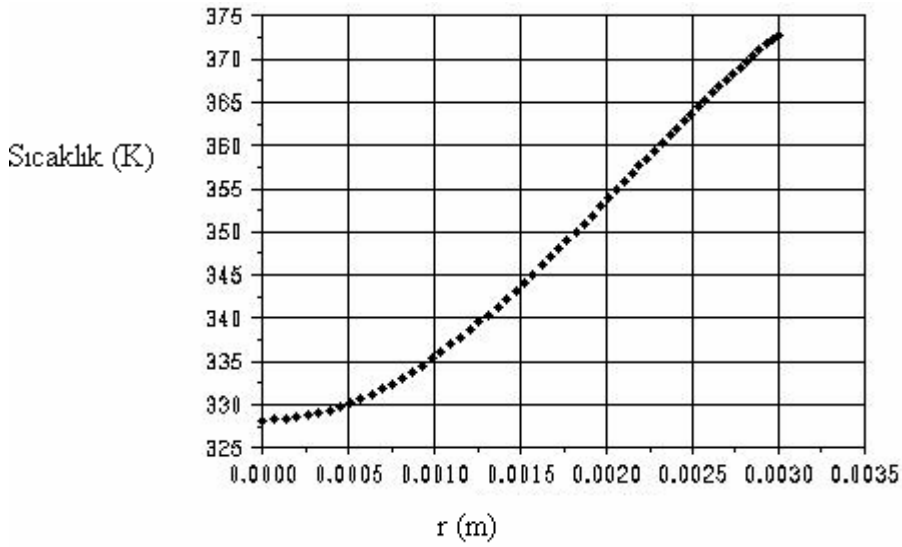
7.1. Sabit Duvar Sıcaklığında Elde Edilen Sonuçlar

Sabit duvar sıcaklığında($T_w=373 \text{ K}$), $\phi=0,002$ hacimsel oranı için nano akışkana ait elde edilen sonuçlara ait grafikler aşağıda sunulmuştur. Şekil 7.1 ve Şekil 7.2 de boru çıkışında hızın simetri ekseninden boru duvarına doğru hızın ve sıcaklığın değişim grafikleri verilmiştir. Yapılan çalışmada test alanı olarak borunun ikinci kısmı ele alınmıştır ($z=1-2 \text{ m}$).

$\phi=0,002$ için elde edilen sonuçlar

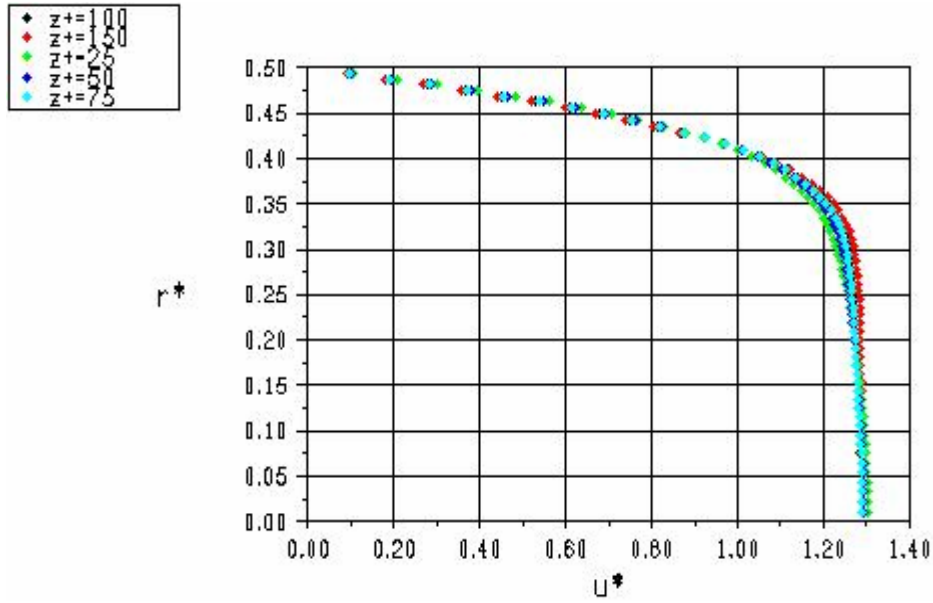


Şekil 7.1. Hızın radyal yönde değişimi ($Z=L$, $\phi=0,002$, $Pe=2500$)



Şekil 7.2. Sıcaklığın radyal yönde değişimi ($Z=L$, $\phi=0,002$, $Pe=2500$)

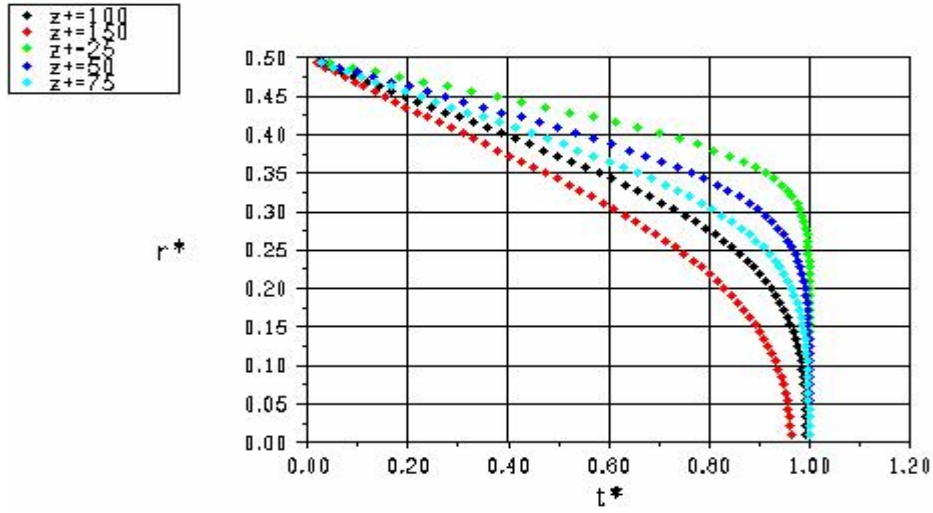
Şekil 7.3 deki nano akışkana ait boyutsuz hızın radyal yönde değişimine bakıldığında boru içinde parçacıksız akışa ait analitik çözümlerden farklı bir sonuç elde edildiği görülmektedir. Boyutsuz hız değişimleri herhangi bir akışkan için boru içinde analitik olarak hesaplanabilmektedir. Bu hesaplardan elde edilecek merkez çizgisi boyutsuz hız değerinin parçacıksız akış (su) için yaklaşık 2 olduğu bilinmektedir. Buna rağmen akışkandan partiküllere transfer edilen momentum sebebiyle Şekil 7.3 de verilen nano akışkana ait merkez çizgisi boyutsuz hızı yaklaşık 1.3 e ulaşmaktadır. Aradaki farkın akışkan tarafından sürüklenen parçacıklar için harcanan momentumdan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.3. Boyutsuz hızın ($z^+=Z/D$) farklı kesitlerdeki değişimi [$\phi=0,002$, $Pe=2500$,

$$(r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$$

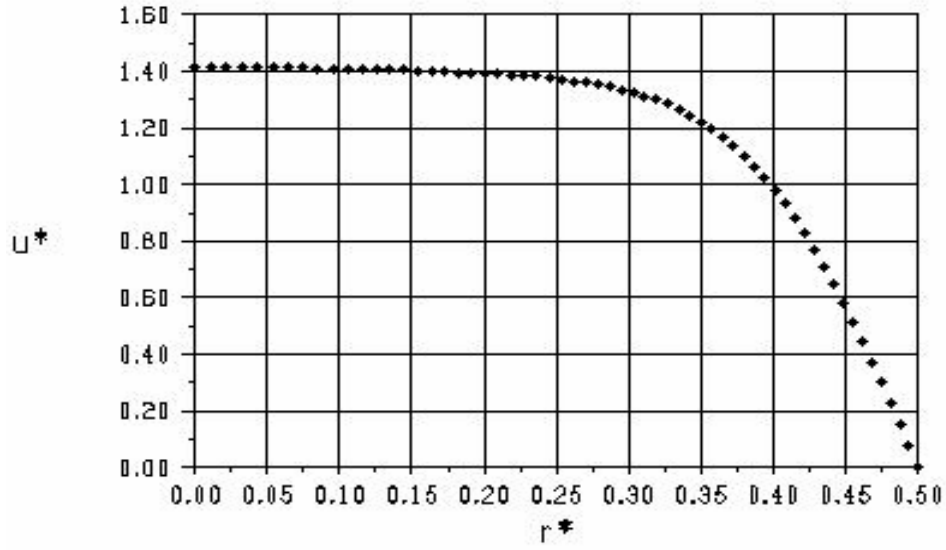
Şekil 7.4 e bakıldığında boyutsuz sıcaklık değerinin farklı z^+ kesitlerinde radyal yöndeki değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere z^+ yönünde ilerledikçe sıcaklık profili gelişmektedir. Nano partiküllerin etkisiyle Boru kesitinin orta bölümünde giriş sıcaklığı değeri $z^+=100$ değerine kadar korunmaktadır. Boru merkez çizgisi etrafındaki akışkan ancak $z^+=150$ de giriş sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa erişmektedir. Nano partiküller hızın daha yüksek olduğu merkez çizgisi etrafında taşınımın artmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple merkez çizgisi etrafında sıcaklık değerleri giriş değerine oldukça yakın çıkmaktadır. Öte yandan nano partiküllerin hızlarının daha düşük olduğu duvar yakınlıklarında ısıl iletimin artmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bu bölgelerde ise duvar sıcaklığından merkez bölgesi sıcaklığına hızlı bir geçiş gerçekleşmektedir.



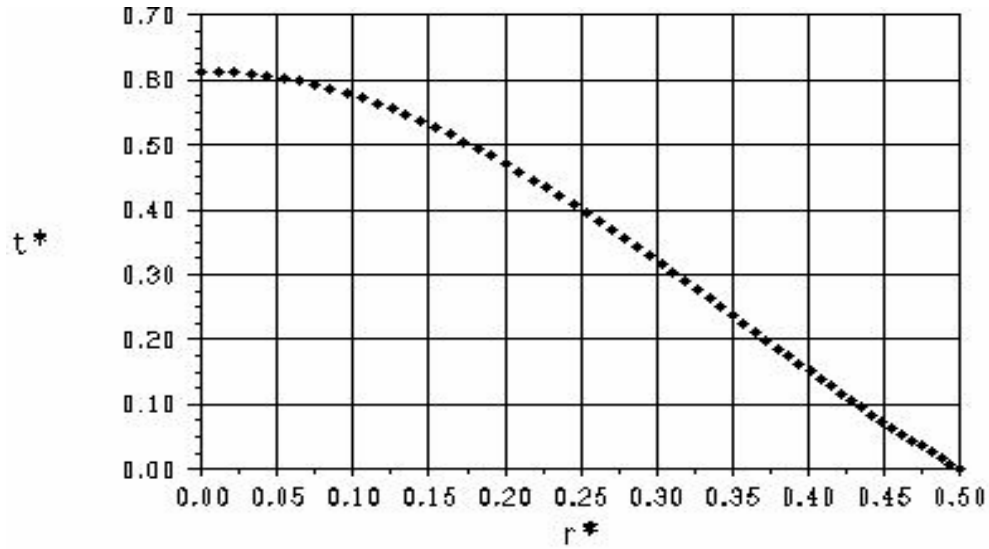
Şekil 7.4. Boyutsuz sıcaklığın ($z+=Z / D$) farklı kesitlerdeki değişimi

$$[\varphi=0,002 \text{ Pe}=2500, (r^* = \frac{r}{D}, t^* = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w})]$$

Şekil 7.5 ve Şekil 7.6 da boru çıkışında boyutsuz hızın ve sıcaklığın ve radyal yöndeki değişimi verilmektedir. Nano partiküllerin maruz kaldığı sürüklenme kuvvetleri ve hareket ettiği hızlara ek olarak boyutsuz sıcaklık ve hız grafiklerini etkileyen diğer bir etmen de suyun sıcaklık ile değişen özellikleridir. Bunlar viskozite, yoğunluk ve özgül ısı değerleridir. Viskozitenin sıcaklık ile azalması sonucu hız profili sıcaklıkların yüksek olduğu duvar kenarında daha dik bir değişim eğrisine sahipken, sıcaklığın düşük olduğu iç kısımlarda daha düşük bir eğimle değişmektedir.



Şekil 7.5. Boyutsuz hızın değişimi [$\varphi=0,002$ $Pe=2500$, ($z=1$, $r^* = \frac{r}{D}$, $u^* = \frac{u}{u_0}$)]

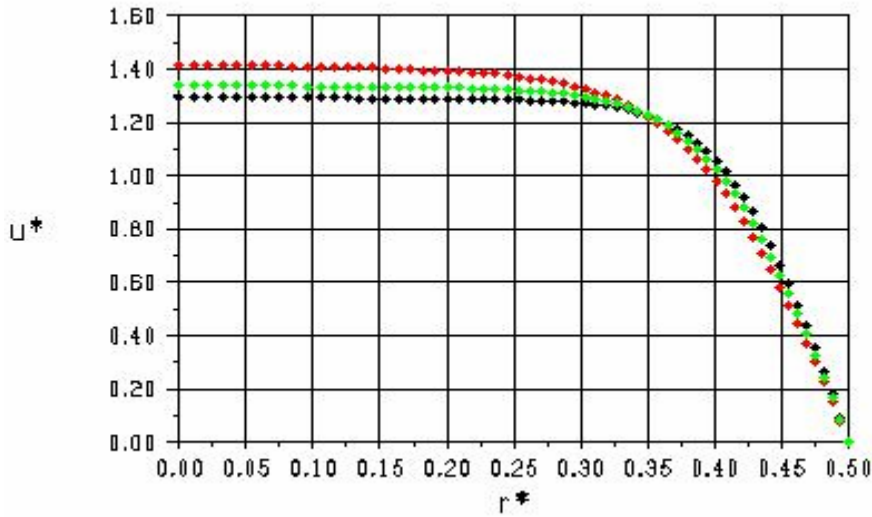


Şekil 7.6. Boyutsuz sıcaklığın değişimi [$z=1$, $\varphi=0,002$, $Pe=2500$,

$$(r^* = \frac{r}{D}, t^* = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w})]$$

Şekil 7.7 de verildiği üzere, sıcaklıkların farklı Peclet yani farklı Reynolds değerleri için çıkış kesitindeki radyal değişimleri görülmektedir. Bu grafiğe bakıldığında, farklı Peclet sayılarında boyutsuz hız değerlerinin dağılımının az da olsa birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. Sabit viskozite, yoğunluk ve öz ısı değerleri kullanılarak

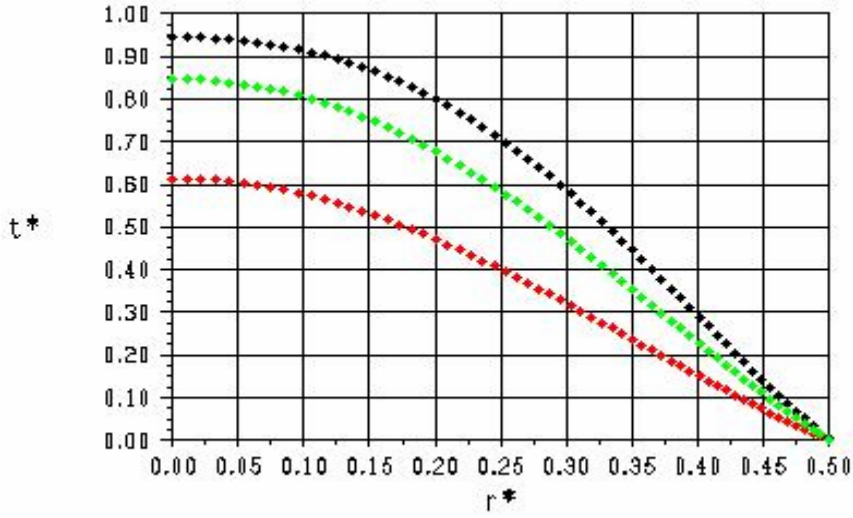
laminer rejimde yapılan çözümlerde boyutsuz hız dağılımının Reynolds sayısından bağımsız olması gerekmektedir. Ancak burada artan Peclet sayısı ile daha az ısınan nano akışkan içerisinde yoğunluk ve viskozite değeri daha az değişecektir. Bu durum ise boyutsuz hız dağılımının sabit özellikler için yapılan çözümden daha az sapmasına neden olacaktır. Öte yandan düşük Peclet sayısında nano akışkan daha çok ısınacak ve sonuçta boyutsuz hız dağılımı bu değişikliklerden etkilenecektir. Buna ek olarak yüksek Peclet ve Reynolds sayılarında duvar kenarındaki akışkan ısınırken merkez etrafında sıcaklıklar giriş sıcaklığına daha yakın değerlerde kalmaktadır.



Şekil 7.7. Boyutsuz hızın farklı Peclet sayıları için değişimi

$$[z=1, \varphi=0,002, \text{Pe}=2500 \text{ Pe}=4000 \text{ Pe}=6000, (r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$$

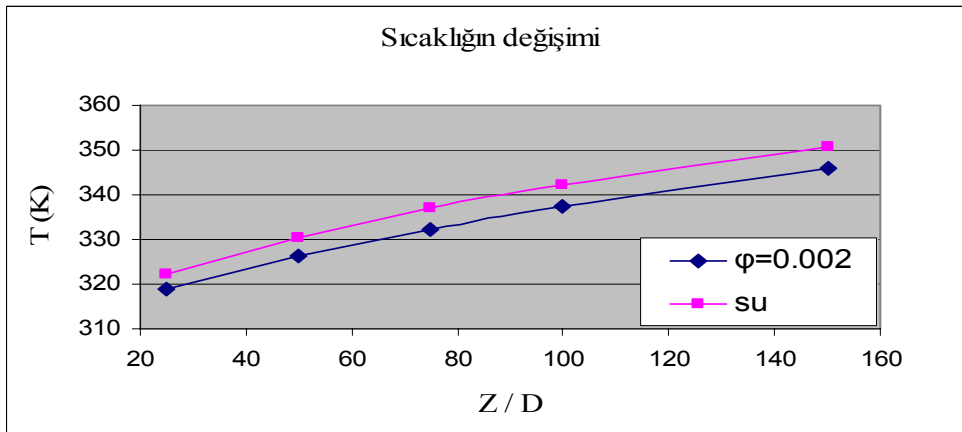
Şekil 7.8 de verilen sıcaklıklar, yukarıda da belirtildiği üzere Reynolds ve Peclet sayıları ile değişmektedir. Düşük Reynolds ve Peclet değerlerinde boru içerisinde daha yavaş hareket eden akışkan, akış esnasında daha yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadır. Taşınım(konveksiyon) daha düşük olacağından ısı iletimin etkisi daha da önem kazanmakta ve merkez bölgesinde de giriş sıcaklıklarından daha farklı değerler gözlenmektedir.



Şekil 7.8. Boyutsuz sıcaklığın farklı Peclet sayıları için değişimi

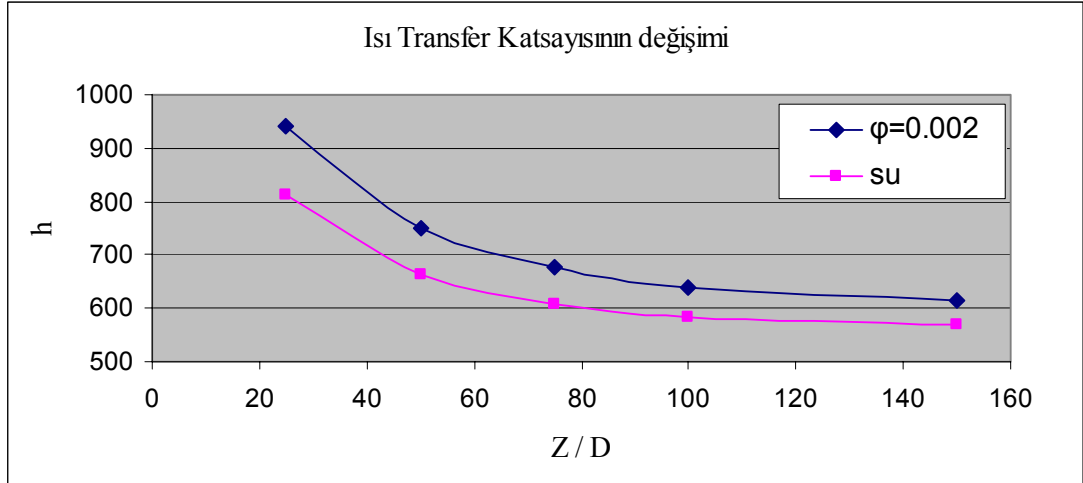
$$[\varphi=0,002, \text{Pe}=2500 \text{ Pe}=4000 \text{ Pe}=6000, (r^* = \frac{r}{D}, t^* = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w})]$$

Şekil 7.9 da su ve %0.2 hacim oranında nano akışkana ait sıcaklığın boru merkezindeki değişimi grafik olarak verilmiştir. Yukarıda da belirtildiği üzere partiküllerin merkezdeki hareketleri sonucu etkisi artan taşınım sonucunda merkez sıcaklığı sudan daha az değişmekte. Aynı zamanda Şekil 7.10. da verildiği üzere nano partiküllerin hızlarının düşük olduğu duvar kesiminde ise ısı iletimi artırmaları sonucunda nano akışkana ait ısı transfer katsayısının kanal boyunca değişimi sudan her bir nokta için daha yüksek çıkmaktadır.



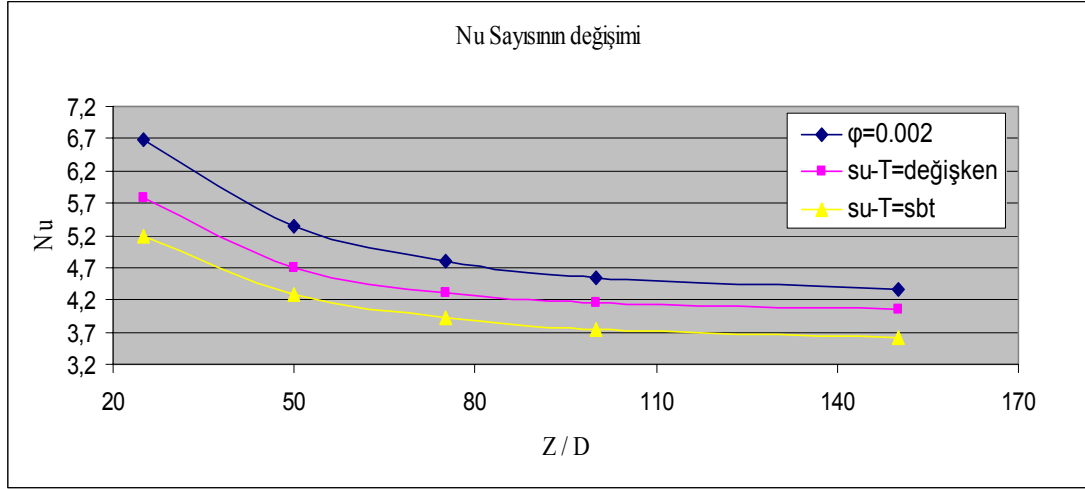
Şekil 7.9. Boyutsuz eksenel yönde sıcaklığın değişimi ($\varphi=0,002$, $\text{Pe}=2500$)

Şekil 7.10 da boru boyunca ısı transfer katsayılarının $\varphi=0,002$ hacimsel oranı ve su için değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi nano akışkana ait ısı transfer katsayılarının suya göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



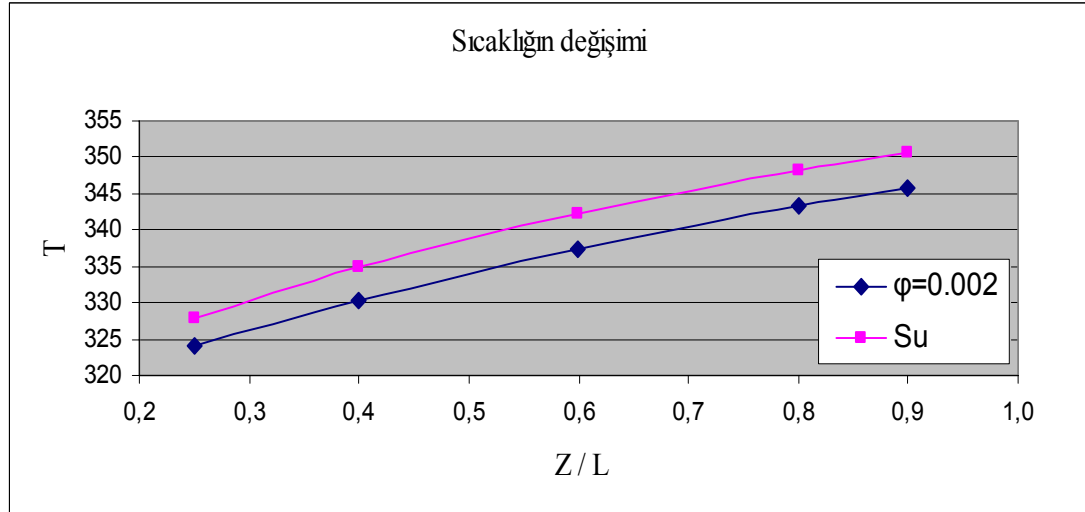
Şekil 7.10. Boyutsuz parametrede eksenel yönde ısı transfer katsayısının(h)
($\varphi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.11 de ise boru boyunca Nusselt sayılarının $\varphi=0,002$ hacimsel oranı, suyun sıcaklığa bağlı değişken özellikleri ve suya ait sabit sıcaklık özellikleri için değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi nano akışkana ait ısı transfer katsayılarının suya göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca suyun sıcaklığa bağlı olarak değişen termofiziksel özelliklerinden dolayı da Nusselt sayısının sabit su sıcaklığındaki termofiziksel özelliklere göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 7.9 ile Şekil 7.11 arasındaki grafiklerde sıcaklığın, ısı transfer katsayısının ve Nusselt sayısının kanal boyunca (Z / D yönünde) değişimleri sabit duvar sıcaklığı sınır koşulu için verilmiştir.



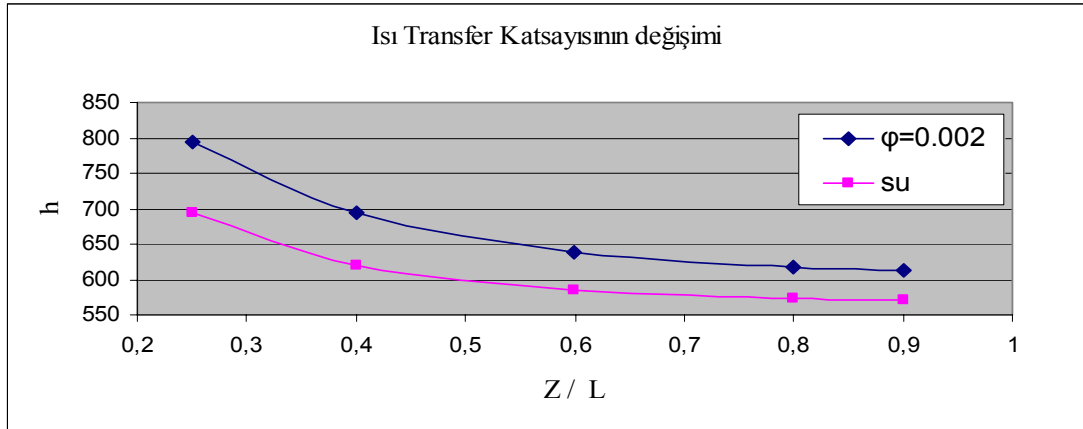
Şekil 7.11. Boyutsuz parametrede aksenal yönde Nusselt(Nu) sayısının değişimi($\phi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.12 ile Şekil 7.14 arasındaki grafiklerde yine sıcaklığın, ısı transfer katsayısının ve Nusselt sayısının kanal boyunca (Z / L yönünde) değişimleri sabit duvar sıcaklığı sınır koşulu için verilmiştir.



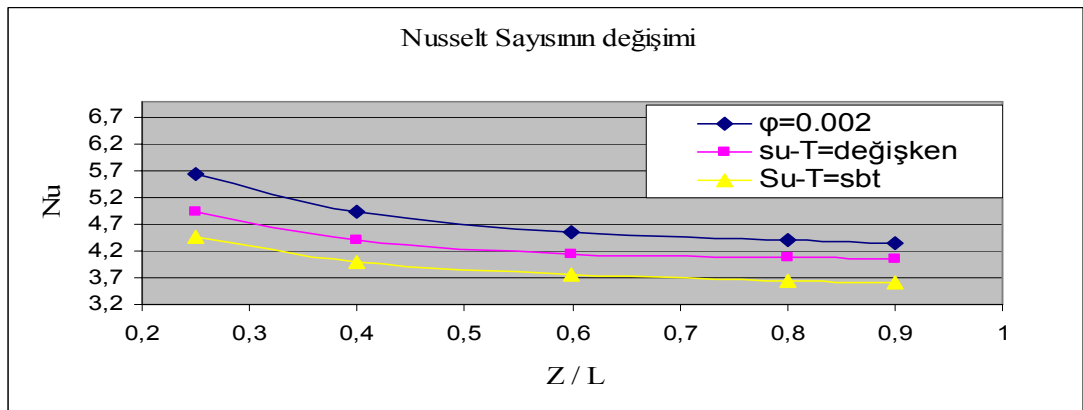
Şekil 7.12. Boru boyunca sıcaklığın değişimi($\phi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.13 de boru boyunca ısı transfer katsayılarının $\varphi=0,002$ hacimsel oranı ve su için değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi nano akışkana ait ısı transfer katsayılarının suya göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



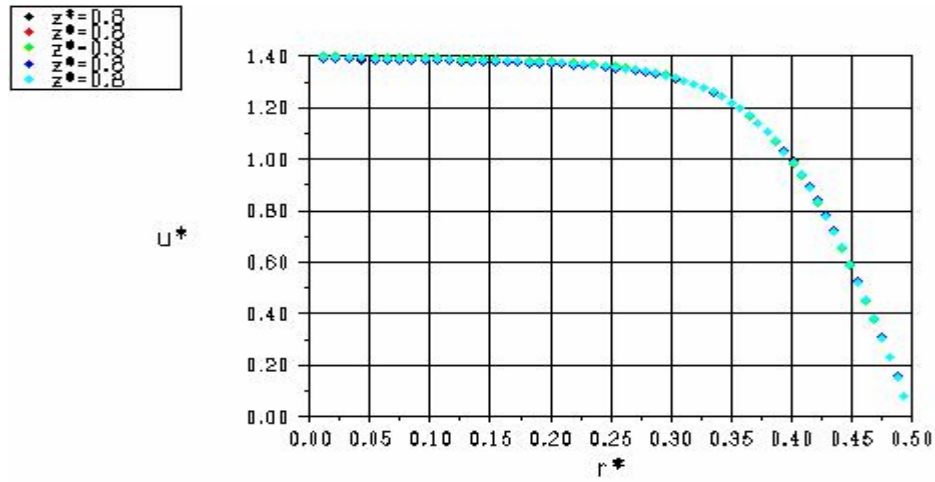
Şekil 7.13. Boru boyunca ısı transfer katsayısının(h) değişimi($\varphi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.14 de ise boru boyunca Nusselt sayılarının $\varphi=0,002$ hacimsel oranı, suyun sıcaklığa bağlı değişken özellikleri ve suya ait sabit sıcaklık özellikleri için değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi nano akışkana ait ısı transfer katsayılarının suya göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca suyun sıcaklığa bağlı olarak değişen termofiziksel özelliklerinden dolayı da Nusselt sayısının sabit su sıcaklığındaki termofiziksel özelliklere göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



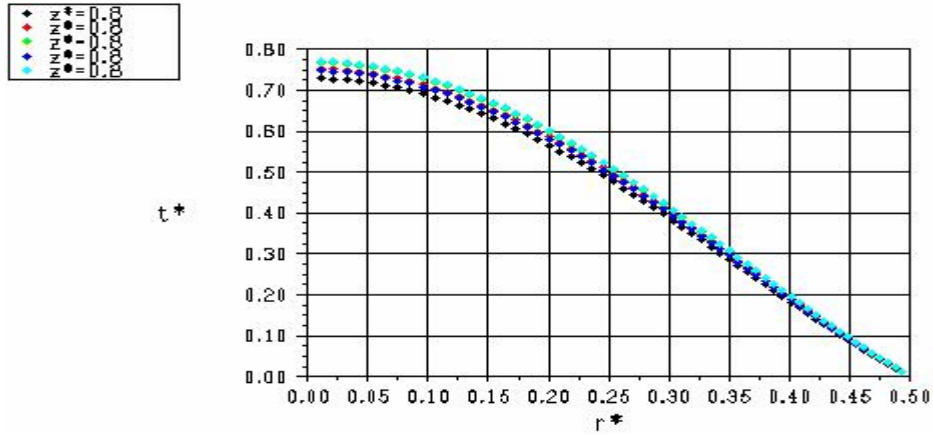
Şekil 7.14. Boru boyunca Nusselt(Nu) sayısının değişimi($\varphi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.15 de ise boyutsuz hız değerlerinin aynı Peclet sayısı ve farklı hacim konsantrasyonları için bir z^* kesitinde değişimi görülmektedir. Buna göre yukarıda da belirtildiği üzere partiküller üzerindeki sürüklenme kuvvetinden doğan momentum kaybı partikül miktarı artmasına rağmen boyutsuz hız profilinde çok az değişme olduğu görülmektedir.



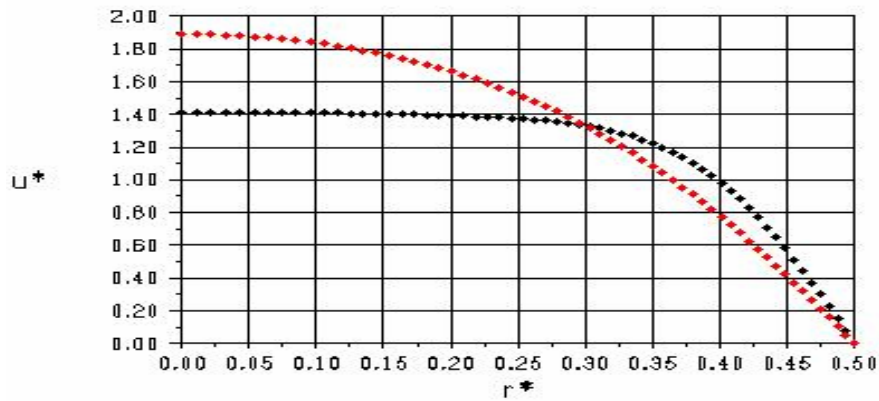
Şekil 7.15. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için hızın $z^*=Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi ($\phi=0.002$, $\phi=0.01$, $\phi=0.015$, $\phi=0.02$, $\phi=0.025$, $Pe=2500$)

Şekil 7.16 sabit duvar sıcaklığı sınır şartı için verilmiş olup, benzer sonuçlar sabit duvar ısı akısı sınır koşullarında da gözlenmektedir. Sıcaklıkların herhangi bir z^* kesiti için aynı Peclet sayısı ve farklı hacim konsantrasyonlarındaki değişimine bakacak olursak, partikül miktarı arttıkça sıcaklıklarında aynı noktada çok az miktarda yüksek olduğunu görmekteyiz. Bunun sebebi de artan partikül miktarının duvar kenarında ısı iletimi artırarak, ısının daha yüksek hızla hareket eden orta kısma iletimini arttırmasıdır.



Şekil 7.16. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için sıcaklığın $z^*=Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi ($\phi=0,002$, $\phi=0,01$, $\phi=0,015$, $\phi=0,02$, $\phi=0,025$, $Pe=2500$)

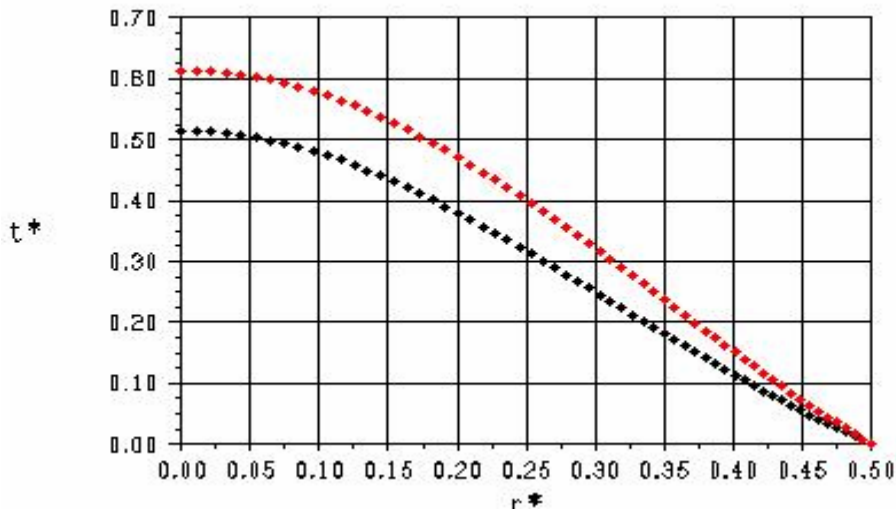
Şekil 7.17 de su ve nano akışkana ait hız profilleri birlikte verilmiştir. Çıkış kesitinden alınan bu hızlar arasındaki farkın temel sebebi, nano partiküllerin hareketini sağlayan sürüklemenin, akışın momentumunu azaltmasıdır. Bu sebeple boyutsuz hız su merkez çizgisinde 2,0 değerine yaklaşıırken aynı noktada nano akışkan için boyutsuz hız değeri 1.30 civarında bir değere sahiptir. Boyutsuz hız değerinin 2.0 değerinden bir miktar daha düşük olmasının sebebi ise yukarıda açıklandığı üzere sıcaklığa bağlı yoğunluk ve viskozitenin değişmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.17. Boyutsuz nano akışkan ve suya ait hız değişimi [$\phi=0,002$

$$Pe=2500, (r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$$

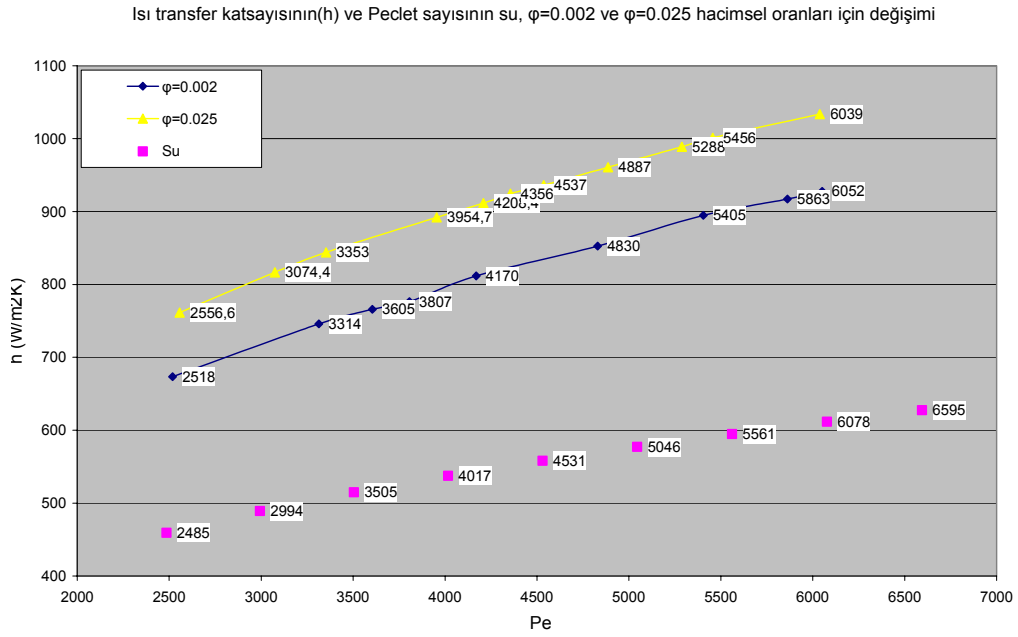
Şekil 7.18 de ise su ve nano akışkana ait boyutsuz sıcaklıkların çıkış kesitindeki değişimleri görülmekte. Bu grafikte de görüldüğü üzere, nano akışkan daha yüksek ısı transferi kapasitesi sayesinde duvar sıcaklığına daha çok yaklaşıırken, su daha az ısınmıştır.



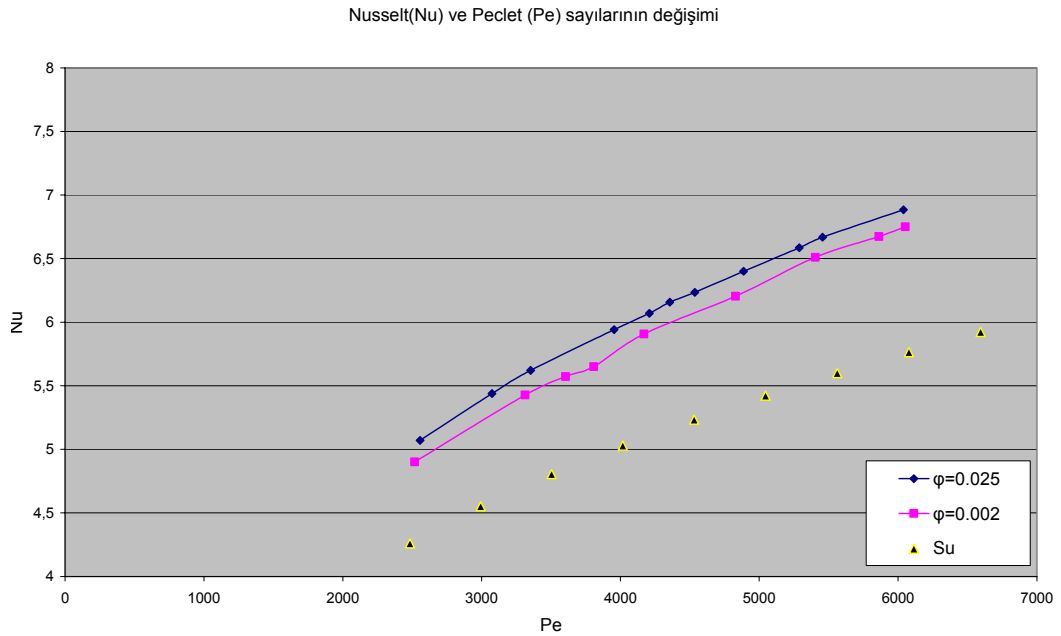
Şekil 7.18. Boyutsuz nano akışkan ve suya ait sıcaklık değişimi

$$[\varphi=0,002 \text{ Pe}=2500, (r^* = \frac{r}{D}, t^* = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w})]$$

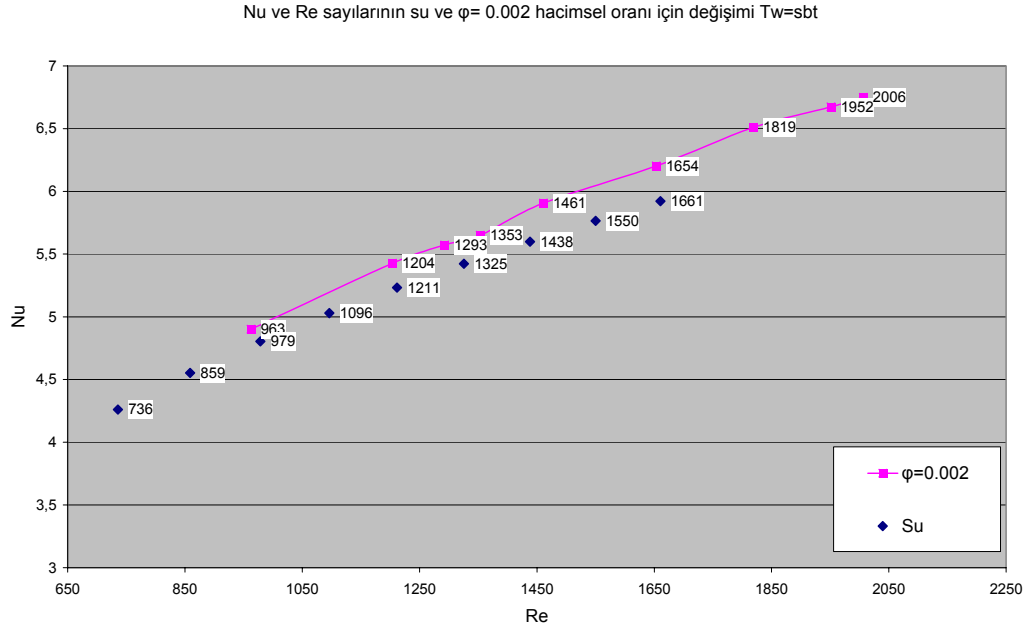
Şekil 7.19 da farklı hacimsel oranlarda nano partiküllerin bulunduğu nano akışkanın ısı transfer katsayısındaki değişimleri su ile kıyaslanmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi hacimsel oranlarındaki artışla ısı transfer katsayısında arttığı görülmektedir. Şekil 7.20 ve Şekil 7.21 de ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayılarının Peclet ve Reynolds sayıları ile değişimi görülmektedir. Beklendiği gibi artan Reynolds sayısı ve dolayısıyla artan Peclet sayısı için ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayıları doğrusal olarak artmaktadır. Nano akışkana ait Nusselt-Peclet sayısı grafiğinin eğimi su için belirlenen eğime göre daha fazladır. Bu sonuca göre nano partiküllerin tek etkisi ısı iletim katsayısının artması değil aynı zamanda, akışı etkileyerek ısı transfer karakteristiğini değiştirmesidir.



Şekil 7.19. $\phi=0,002$, $\phi=0,025$, hacimsel oranı ve su için Isı transfer katsayısının(h) Peclet(Pe)sayısı ile değişimi



Şekil 7.20. $\phi=0,002$ hacimsel oranı ve su için Nusselt(Nu) ve Peclet(Pe) sayısı ile değişimi



Şekil 7.21. $\phi=0,002$ hacimsel oranı ve su için Nusselt(Nu) ve Reynolds(Re) sayısı ile değişimi

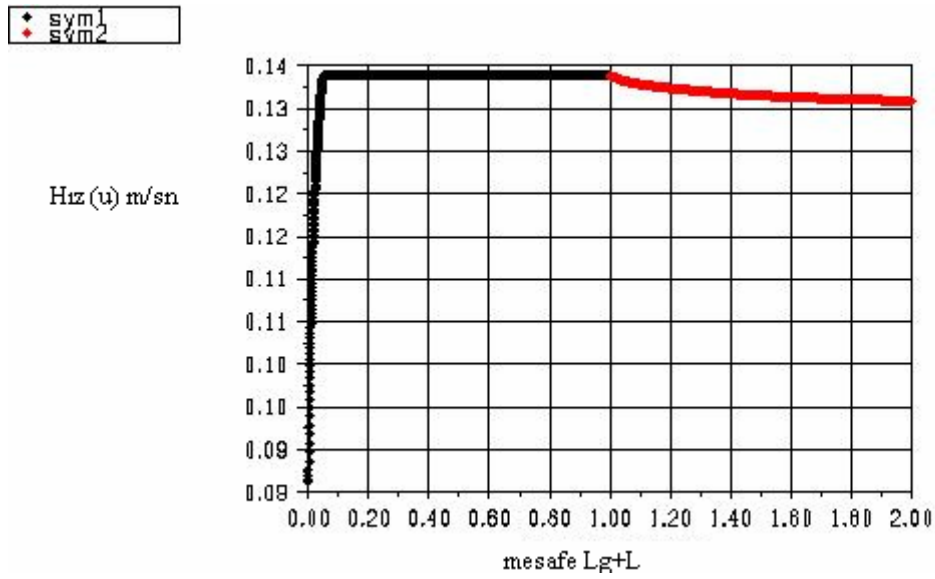
Şekil. 7.19 ile Şekil 7.21 arasındaki grafikler incelendiğinde akışkan içindeki partikül oranları arttıkça ısı transfer katsayılarının ve Nusselt sayılarının arttığı, ayrıca artan partikül oranlarına göre Reynolds sayıları arttıkça Nusselt sayılarında önemli oranda artışların olduğu anlaşılmaktadır.

7.2. Sabit Isı Akısında Elde Edilen Sonuçlar

Sabit ısı akısında ($q_w=2500 \text{ w/m}^2$, $\phi=0,002$ hacimsel oranı için nano akışkana ait elde edilen sonuçlara ait grafikler aşağıda sunulmuştur.

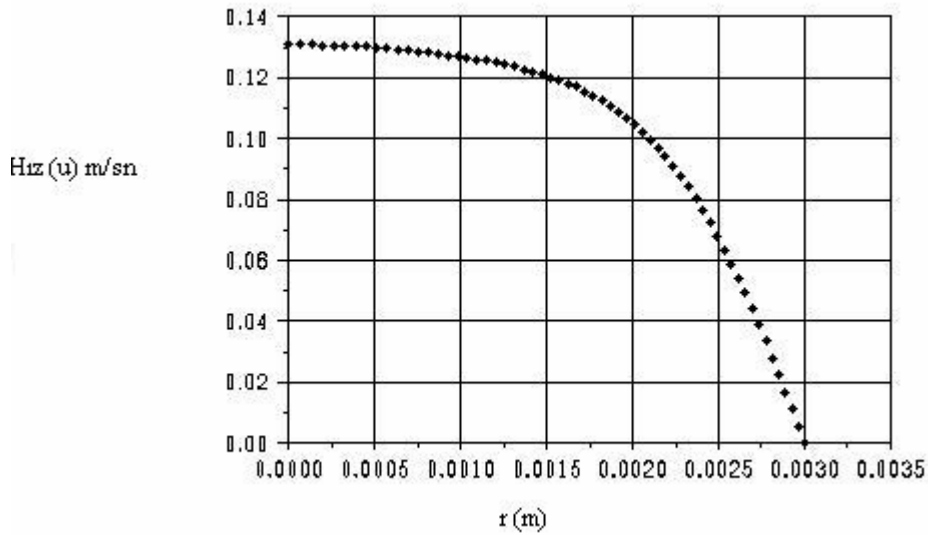
7.2.1. $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ısı akısında $\phi=0,002$ için elde edilen sonuçlar

Şekil 6.22 ve Şekil 6.24 de nano akışkana ait merkez çizgisi hızının ve sıcaklığın boru boyunca değişimi görülmektedir. Buna göre sıcaklıkla değişen yoğunluk ve vizkozitenin etkileri ihmal edilemeyecek düzeydedir. Fakat, sabit duvar sıcaklığı sınır koşulu ile karşılaştırıldığında farklar daha da düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, sabit duvar sıcaklığı sınır koşulundaki ısı akısı değerlerinin yüksek olmasıdır.

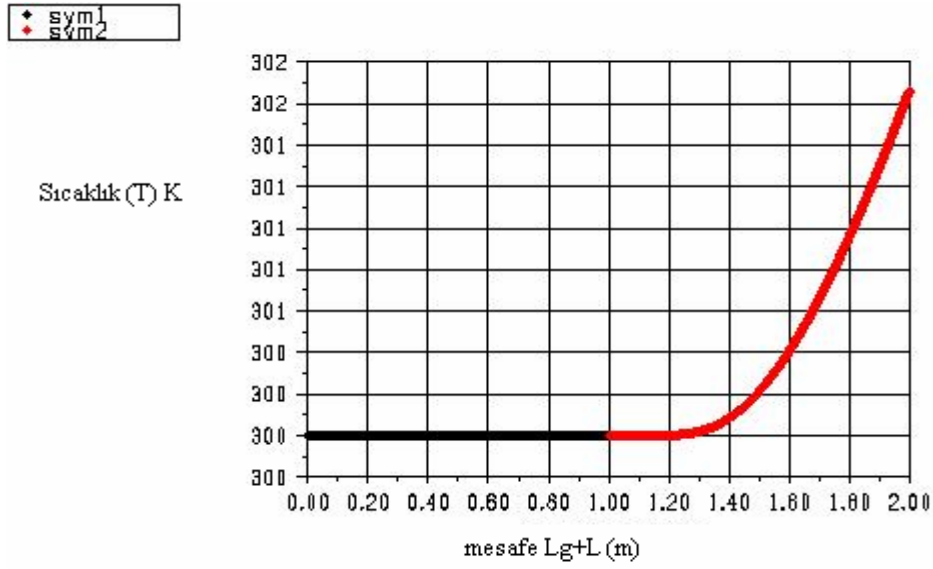


Şekil 7.22. Hızın tüm boru boyunca değişimi ($\phi=0,002$ $Pe=2500$)

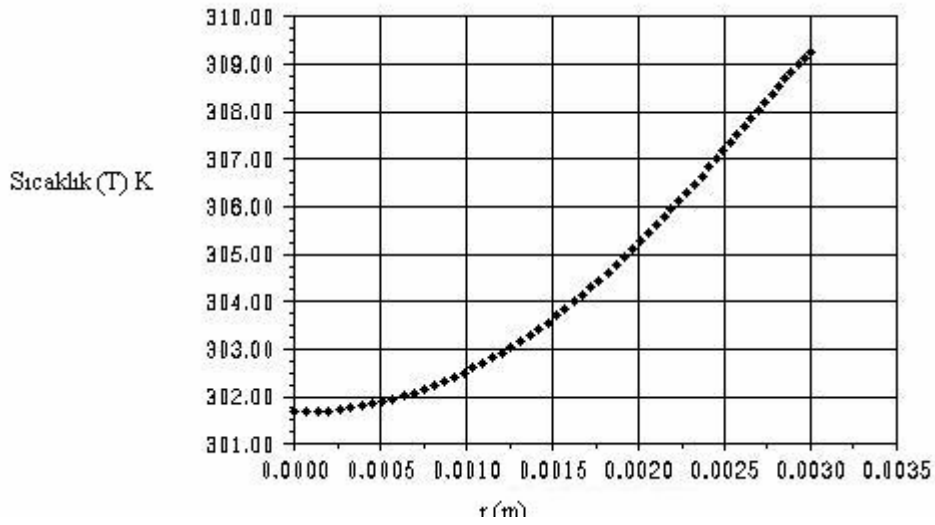
Şekil 7.23 ve Şekil 7.25 de nano akışkana ait radyal yöndeki hızın ve sıcaklığın çıkış noktasındaki grafiği verilmiştir.



Şekil 7.23. Hızın radyal yönde değişimi ($z=1$, $\phi=0,002$ $Pe=2500$)

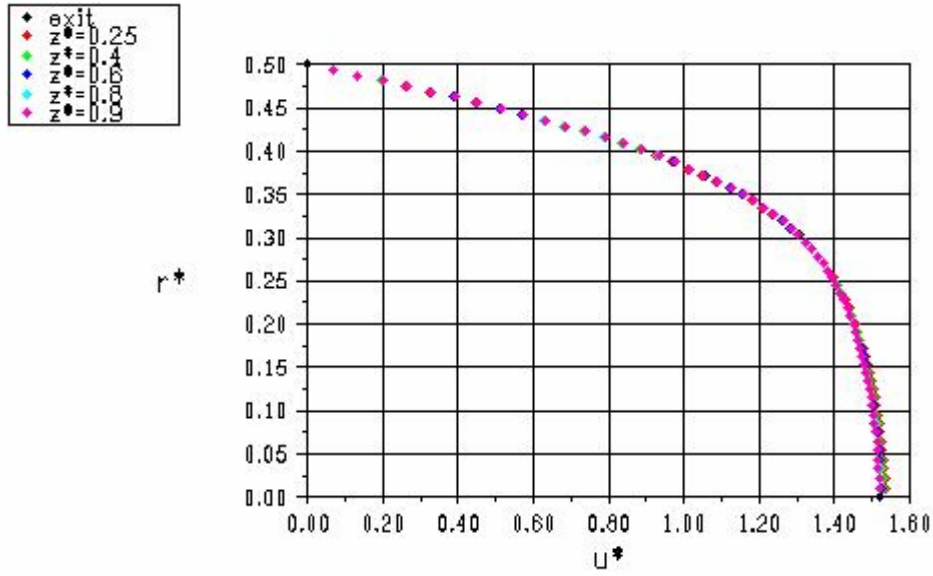


Şekil 7.24. Sıcaklığın boru boyunca değişimi ($\phi=0,002$ $Pe=2500$)



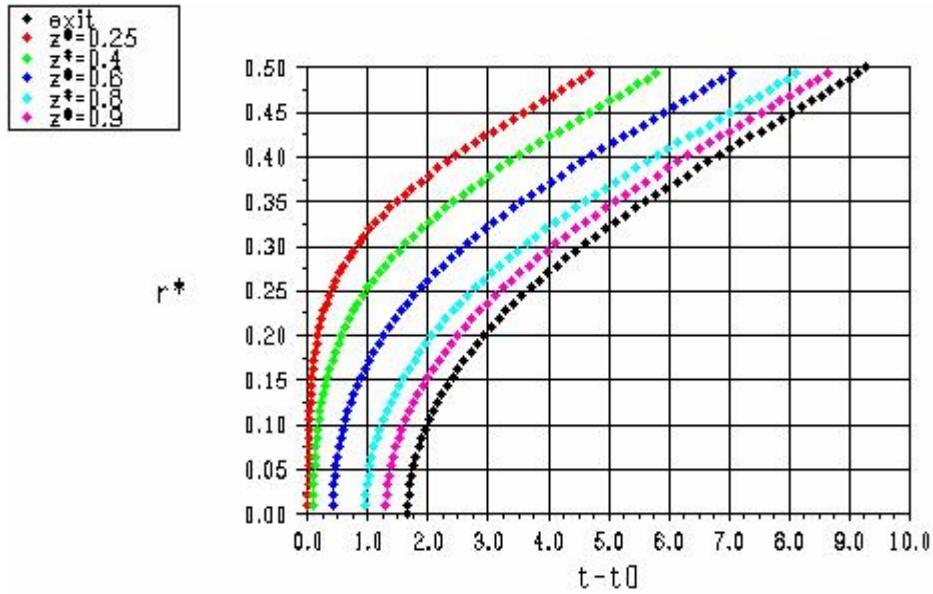
Şekil 7.25. Sıcaklığın radyal yönde değişimi ($z=1$, $\phi=0,002$ $Pe=2500$)

Yukarıda da belirtildiği üzere ısı akısı değerlerinin düşük olması sebebiyle, gelişmiş boyutsuz hız profili özellik değişimlerinden (yoğunluk, viskozite) az etkilenmekte ve bu da boru boyunca hız profilinin daha az değişmesine sebep olmaktadır. Boru boyunca boyutsuz hız ve sıcaklık profilinin değişimleri Şekil 7.26 ve Şekil 7.27 de görülmektedir.



Şekil 7.26. Boyutsuz hızın ($z^*=Z/L$) farklı kesitlerdeki değişimi

$$[\varphi=0,002 \text{ Pe}=2500, (r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$$

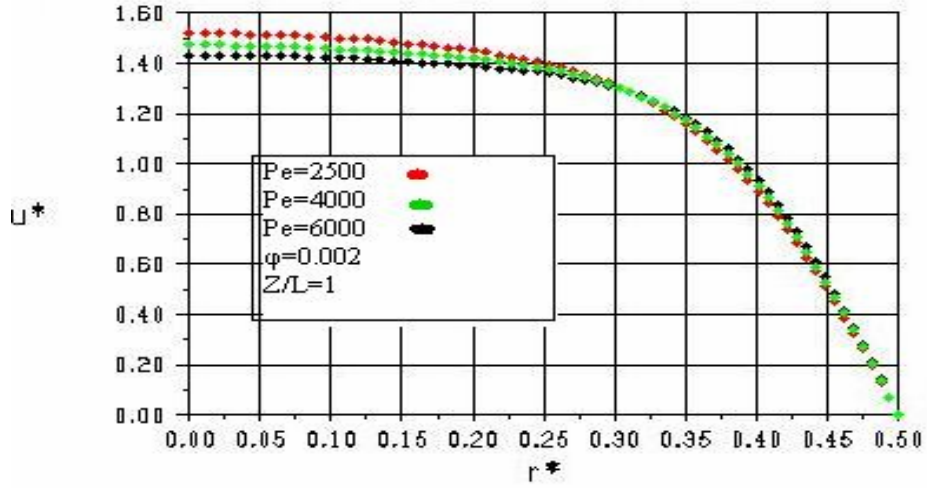


Şekil 7.27. Boyutsuz sıcaklığın ($z^*=Z/L$) farklı kesitlerdeki değişimi

$$[\varphi=0,002 \text{ Pe}=2500, (r^* = \frac{r}{D})]$$

Boyutsuz hızların değişken viskozite ve yoğunluktan etkilenmesi Şekil 7.28 de görülmektedir. Artan Peclet sayısı ile daha az sıcaklık değişimine maruz kalan akışta

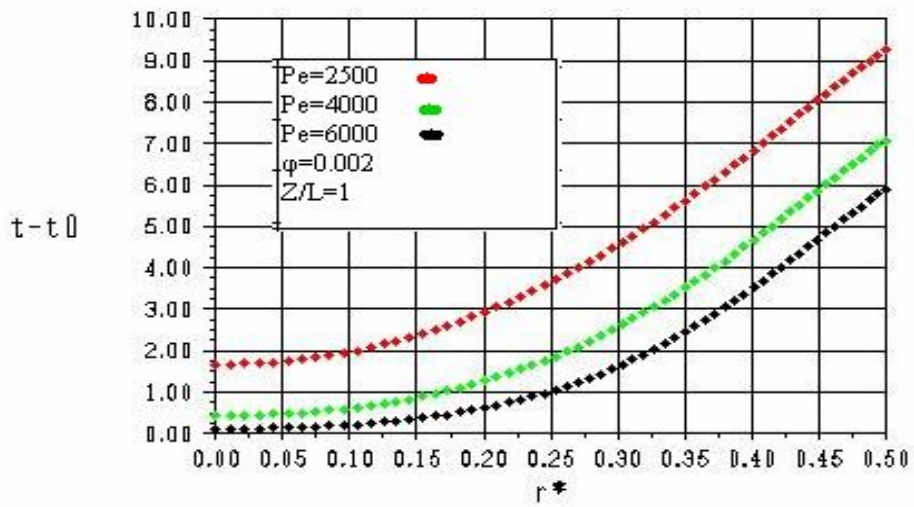
değişken yoğunluğun ve viskozitenin etkileri daha düşük seviyede gözlenirken bu etki düşük Peclet sayısı için daha yüksektir.



Şekil 7.28. Boyutsuz hızın farklı Peclet sayıları için değişimi

$$[\varphi=0,002, \text{Pe}=2500 \text{ Pe}=4000 \text{ Pe}=6000, (r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$$

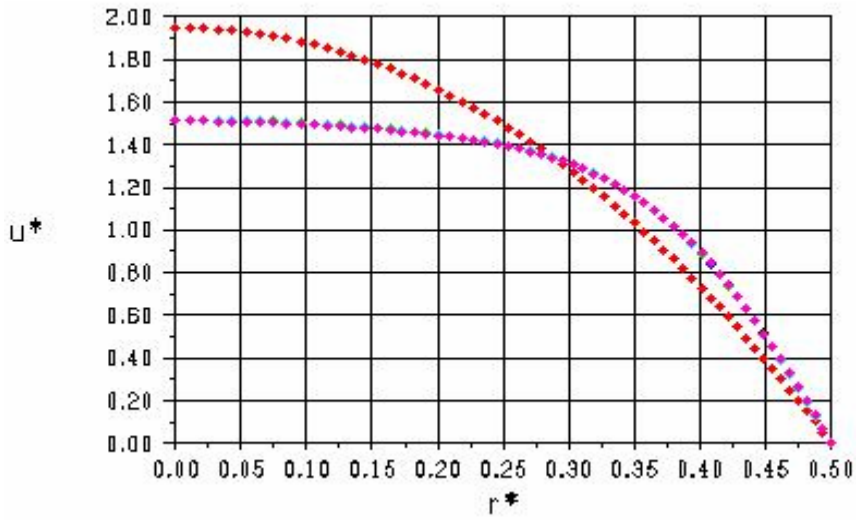
Düşük Peclet sayısında akışkan boru içerisinde daha az ısınmaktadır. Bunu Şekil 7.29 da görmek mümkündür.



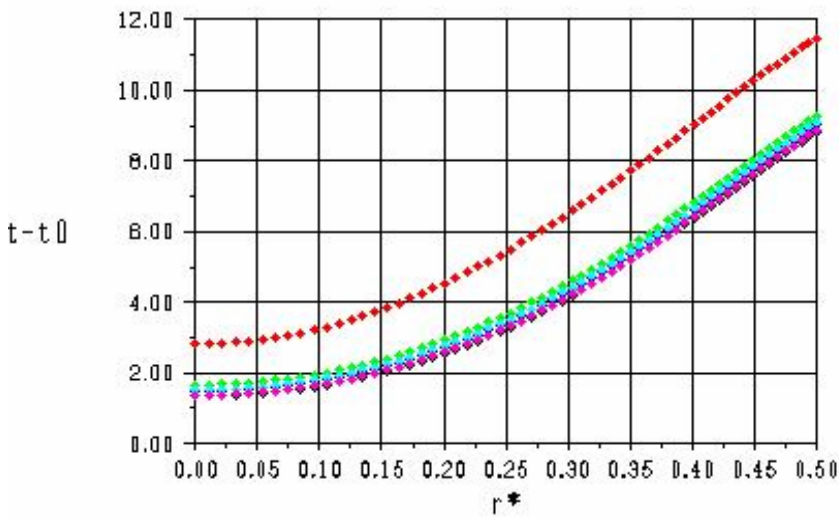
Şekil 7.29. Boyutsuz sıcaklığın farklı Peclet sayıları için değişimi

$$[\varphi=0,002, \text{Pe}=2500 \text{ Pe}=4000 \text{ Pe}=6000, (r^* = \frac{r}{D})]$$

Nano akışkanın farklı hacim konsantrasyonu için boyutsuz hızın ve sıcaklığın değişimi su ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.30 ve Şekil 7.31 de verilmiştir. Burada ilk olarak görülen nano partiküllerden kaynaklanan momentum kaybının etkisidir. Buna ek olarak sıcaklığa bağlı olarak değişen özelliklerin etkisinin düşük olduğu da yine bu grafikte görülebilmektedir.

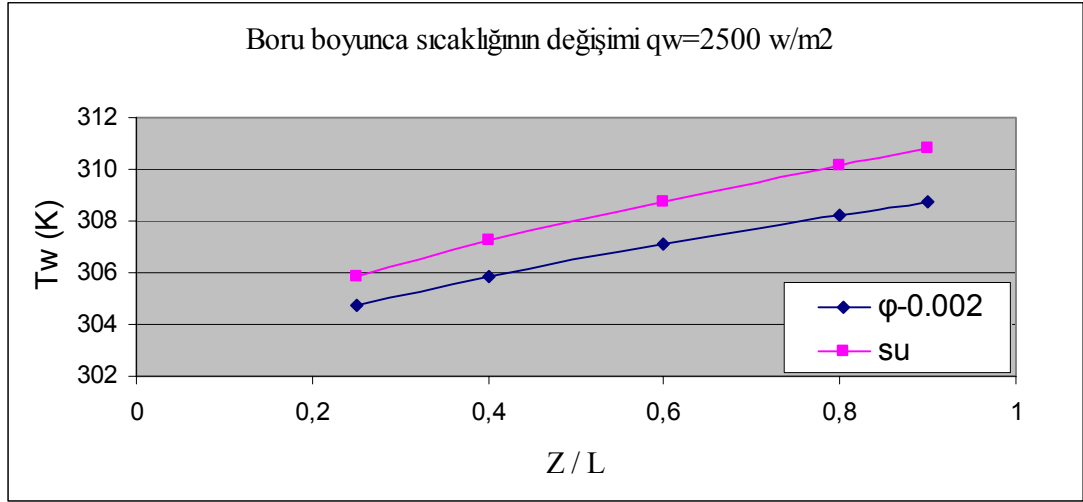


Şekil 7.30. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için hızın $Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi ($\phi=0,002$, $\phi=0,01$ $\phi=0,015$ $\phi=0,02$ $\phi=0,025$, $Pe=2500$)



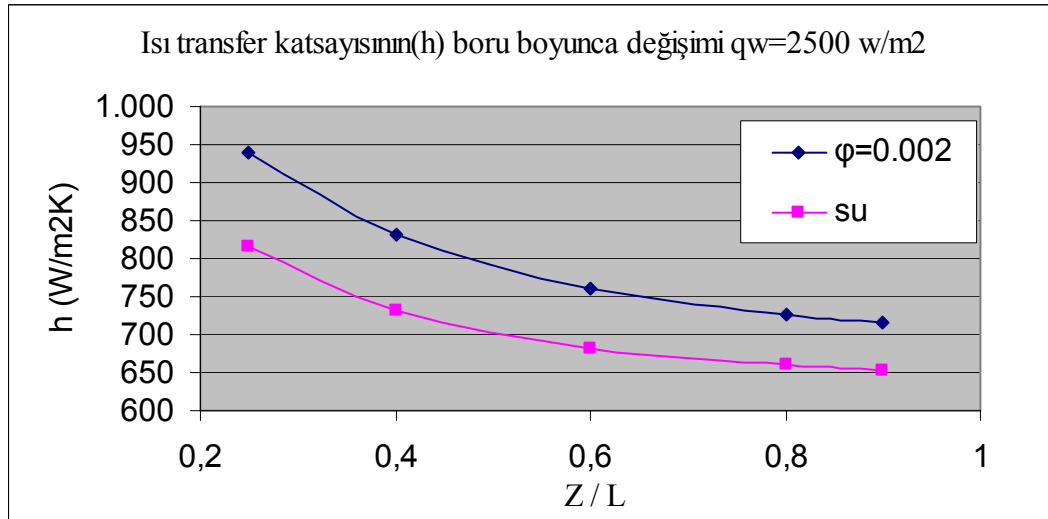
Şekil 7.31. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için Sıcaklığın $z^*=Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi ($\phi=0,002$, $\phi=0,01$ $\phi=0,015$ $\phi=0,02$ $\phi=0,025$, $Pe=2500$)

Boru boyunca merkez çizgisi sıcaklık değeri değişimi su ve nano akışkan için Şekil 7.32 de verilmiştir. Buna göre su boru içerisinde daha hızlı ısınmaktadır.



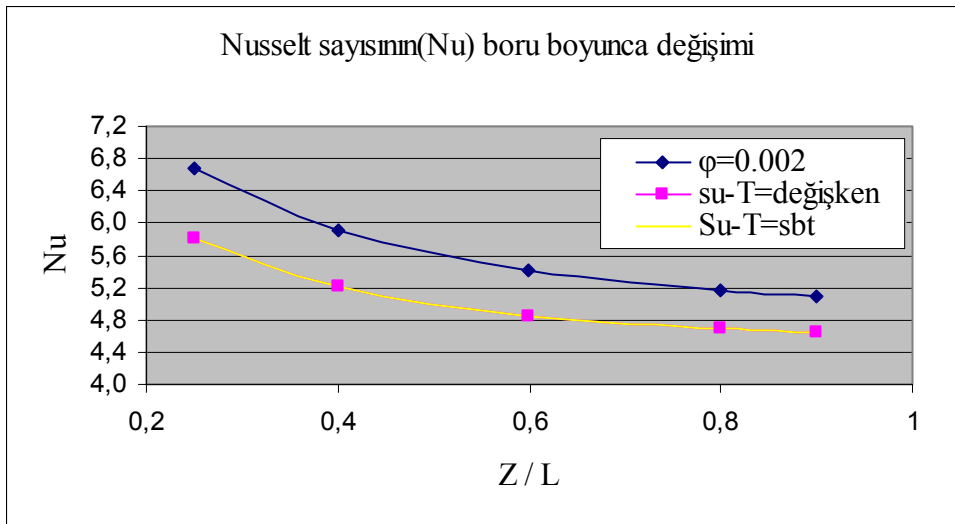
Şekil 7.32. Boru boyunca nano akışkana ve suya ait sıcaklıkların değişimi ($\phi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.33 e bakıldığında ise ısı transfer katsayısının nano akışkan için daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.



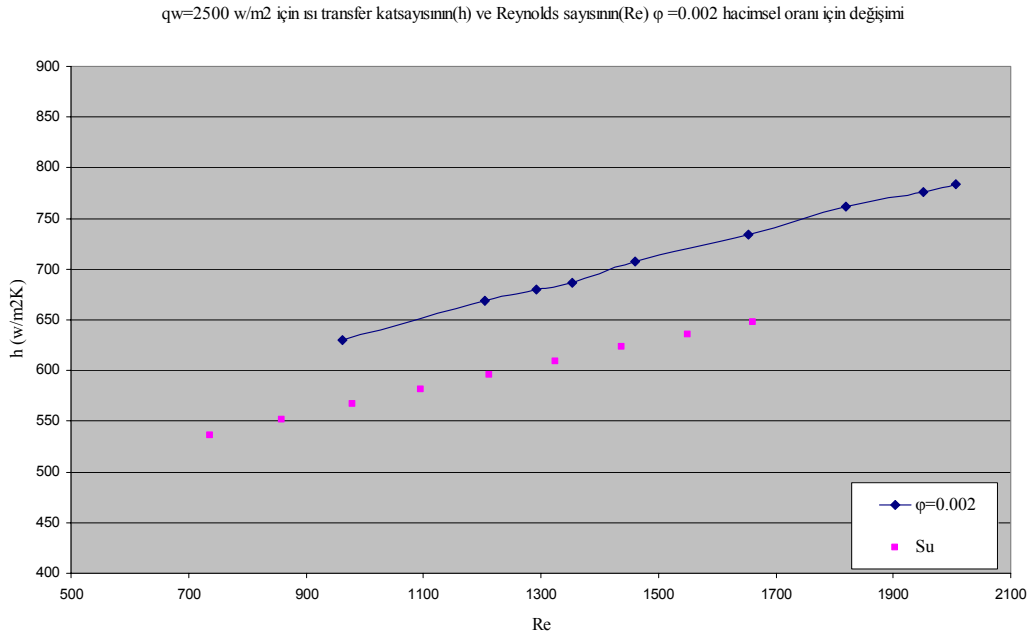
Şekil 7.33. Boru boyunca nano akışkan ve suya ait ısı transfer katsayısının (h) değişimi ($\phi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.34 de ise boru boyunca Nusselt sayılarının $\phi=0,002$ hacimsel oranı, suyun sıcaklığa bağlı değişken özellikleri ve suya ait sabit sıcaklık özellikleri için değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi nano akışkana ait ısı transfer katsayılarının suya göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca Nusselt sayısının suyun sıcaklığa bağlı olarak değişen termofiziksel özellikleri ile sabit su sıcaklığındaki termofiziksel özellikleri bulk ve duvar sıcaklıkları arasında çok önemli farklılıklar olmadığı ve düşük ısı akılarından dolayı hemen hemen aynı olduğu anlaşılmaktadır.

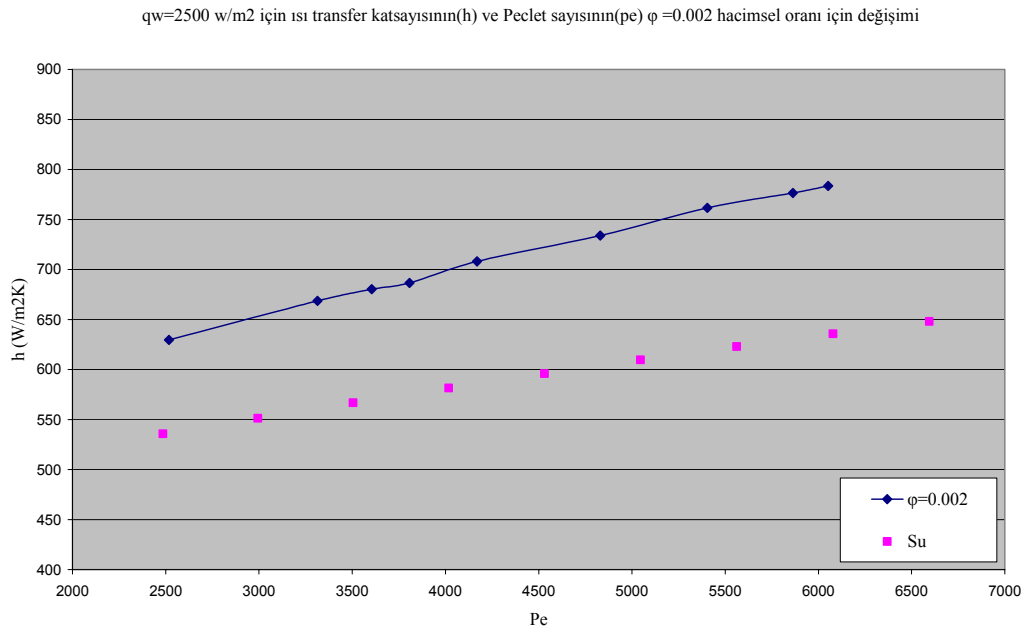


Şekil 7.34. Boru boyunca Nano akışkan ve suya ait Nusselt sayısının(Nu) değişimi($\phi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.35 ve Şekil 7.36 da $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ için ısı transfer katsayısının Reynolds ve Peclet sayıları ile değişimleri gösterilmiştir. Şekillerden Nano akışkanın ısı transfer katsayısının suya göre daha fazla olduğu görülmektedir.

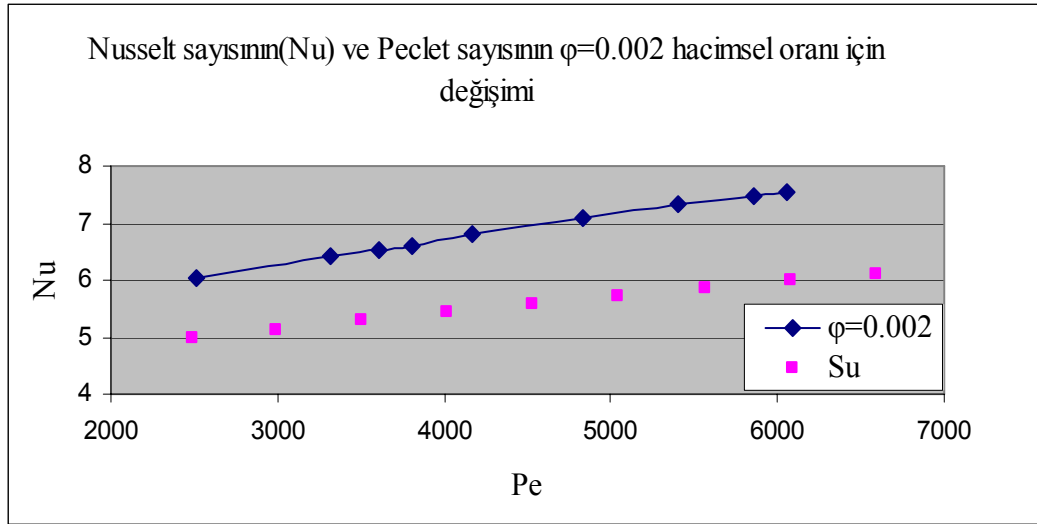


Şekil 7.35. $\phi=0,002$ hacimsel oranı için Isı transfer katsayısının(h) ve Reynolds(Re) sayısı ile değişimi

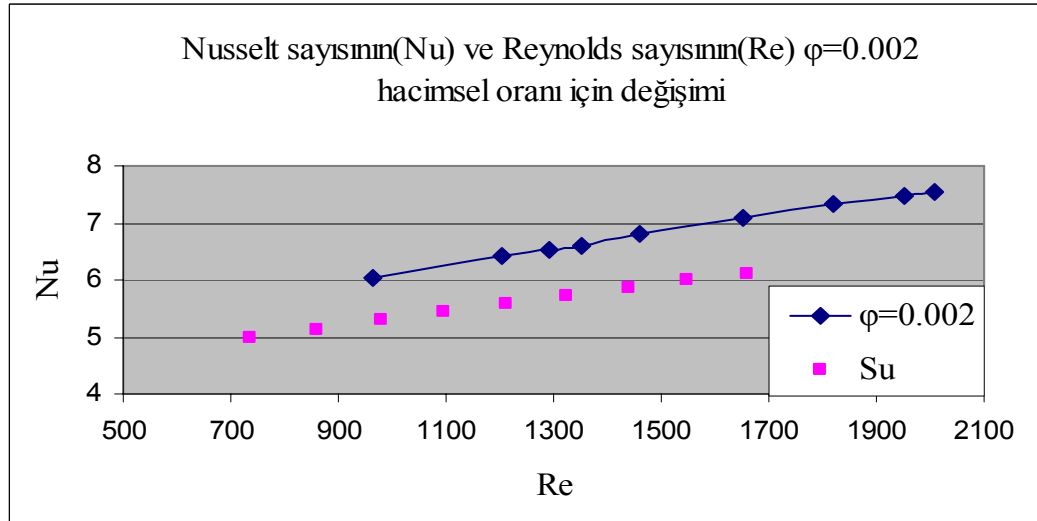


Şekil 7.36. $\phi=0,002$ hacimsel oranı için Isı transfer katsayısının(h) ve Peclet(Pe) sayısı ile değişimi

Şekil 7.37 ve Şekil 7.38 de $q_w=2500 \text{ W/m}^2$ için Nusselt sayısının Reynolds ve Peclet sayıları ile değişimleri gösterilmiştir. Şekillerden Nano akışkanın Nusselt sayısının suya göre daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 7.37. $\phi=0,002$ hacimsel oranı için Nusselt(Nu) ve Peclet(Pe) sayısı ile değişimi

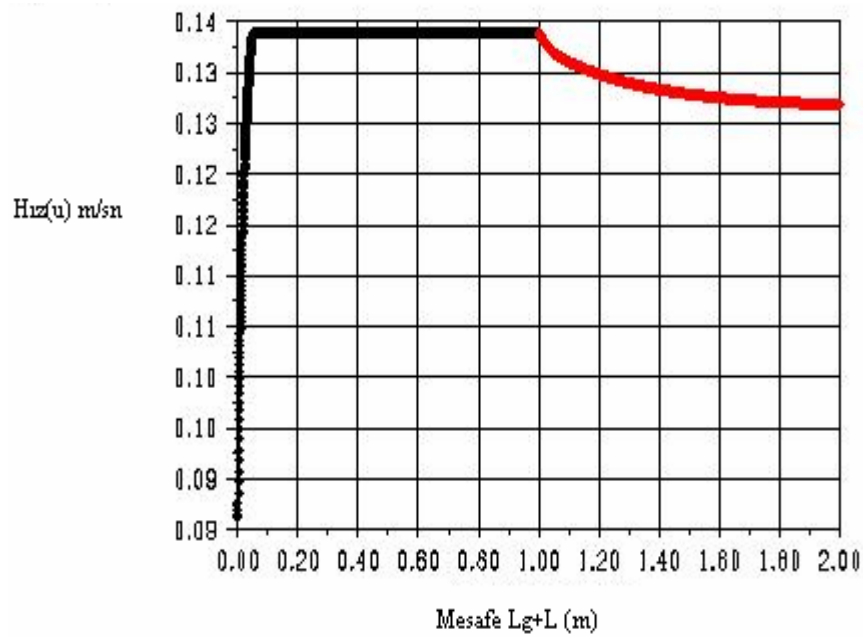


Şekil 7.38. $\phi= 0,002$ hacimsel oranı için Nusselt(Nu) ve Reynolds(Re) sayısı ile değişimi

7.2.2. $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ ısı akısında $\phi=0,002$ için elde edilen sonuçlar

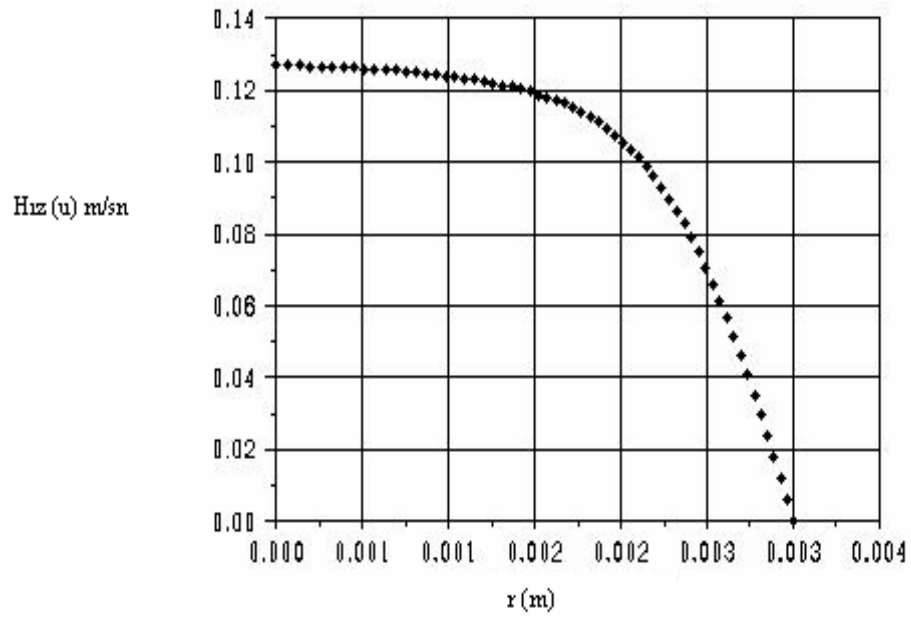
Sabit ısı akısında ($q_w=7500 \text{ w/m}^2$, $\phi=0,002$ hacimsel oranı için nano akışkana ait elde edilen sonuçlara ait grafikler aşağıda sunulmuştur.

Şekil 7.39 ve Şekil 7.41 de nano akışkana ait merkez çizgisi hızın ve sıcaklığın boru boyunca değişimi görülmektedir. Buna göre sıcaklıkla değişen yoğunluk ve viskozitenin etkileri ihmal edilemeyecek düzeydedir. Fakat, sabit duvar sıcaklığı sınır koşulu ile karşılaştırıldığında farkların daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi, sabit duvar sıcaklığı sınır koşulundaki ısı akısı değerlerinin yüksek olmasıdır.

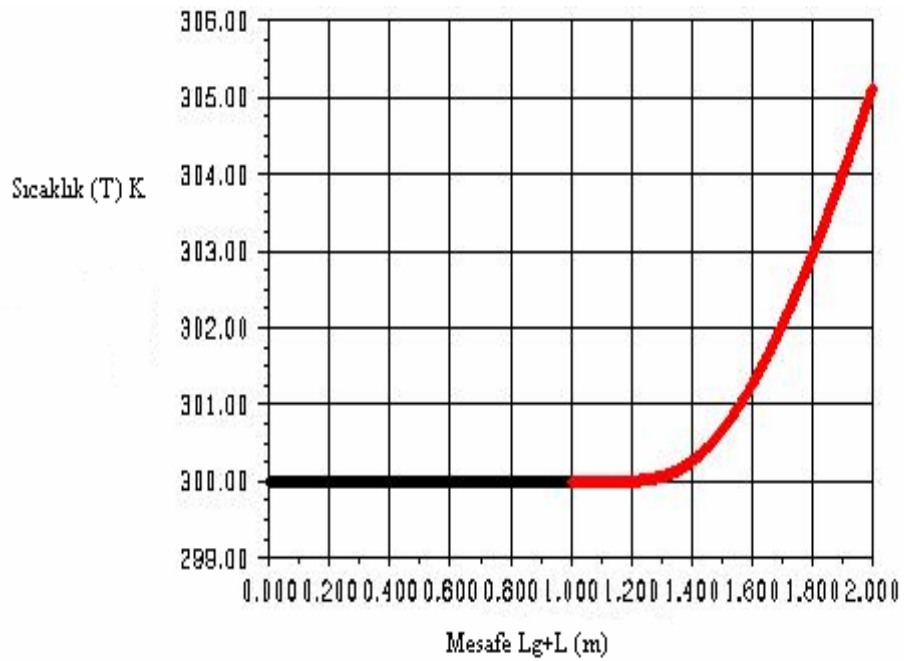


Şekil 7.39. Hızın tüm boru boyunca değişimi ($r=0$, $\phi=0,002$ $Pe=2500$)

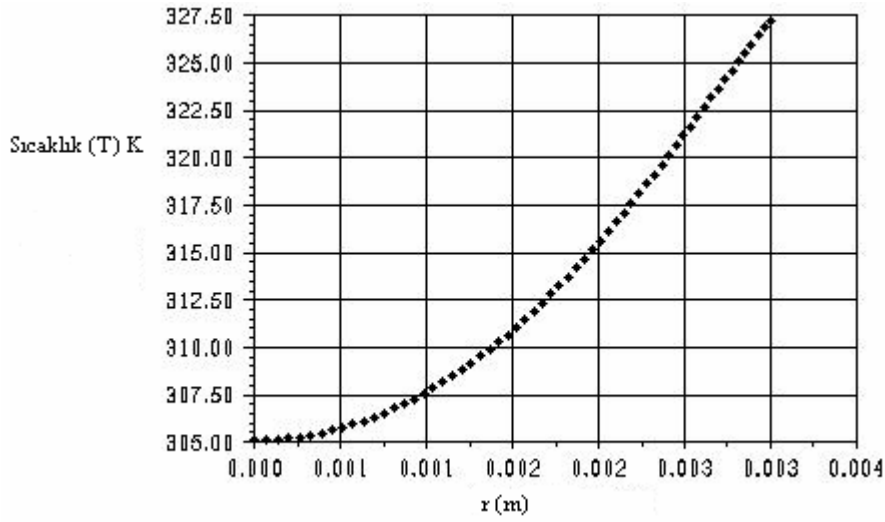
Şekil 7.40 ve Şekil 7.42 de nano akışkana ait radyal yöndeki hızın ve sıcaklığın çıkış noktasındaki grafiği verilmiştir.



Şekil 7.40. Hızın radyal yönde değişimi ($z=1$, $\phi=0,002$ $Pe=2500$)

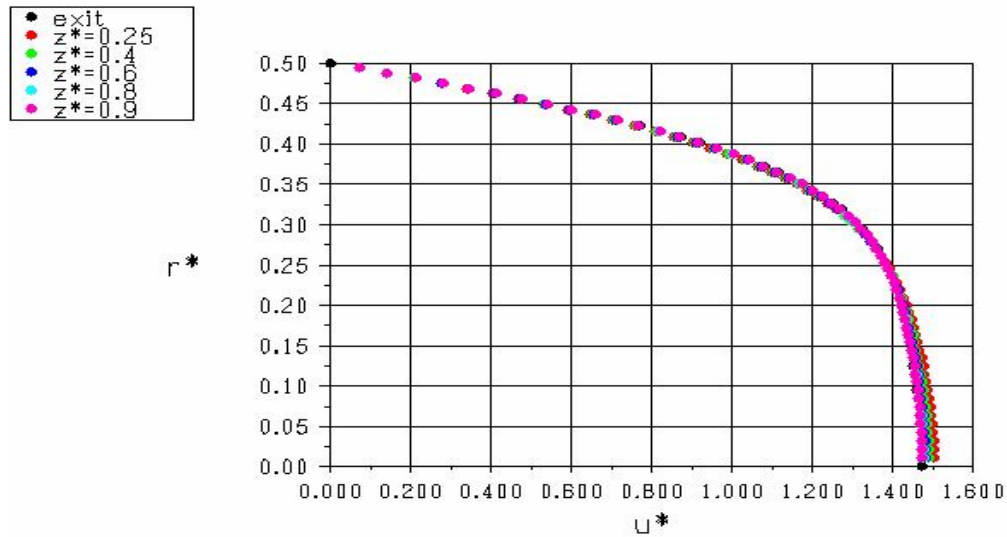


Şekil 7.41. Sıcaklığın boru boyunca değişimi ($r=0$, $\phi=0,002$ $Pe=2500$)



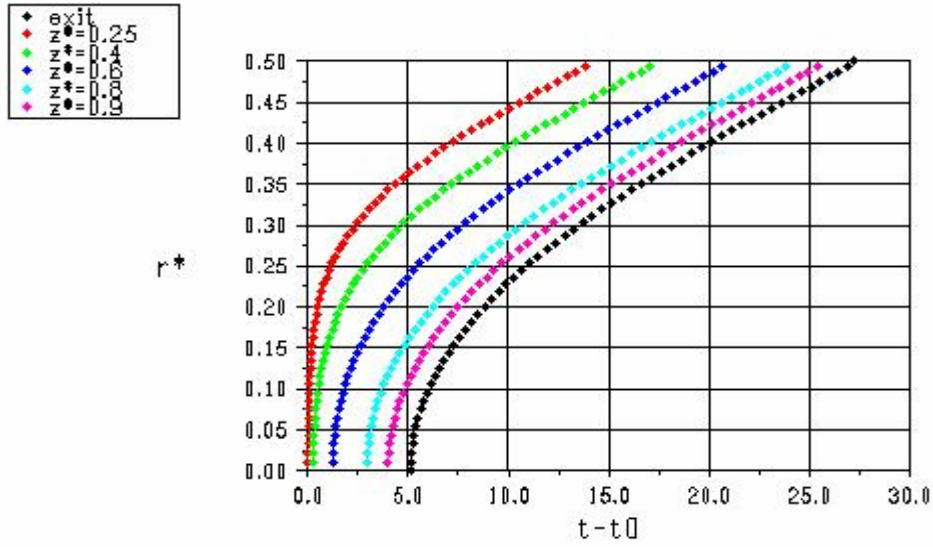
Şekil 7.42. Sıcaklığın radyal yönde değişimi ($z=1$, $\phi=0,002$ $Pe=2500$)

Yukarıda da belirtildiği üzere ısı akısı değerlerinin düşük olması sebebiyle, gelişmiş boyutsuz hız profili özellik değişimlerinden (yoğunluk, viskozite) az etkilenmekte ve bu da boru boyunca hız profilinin daha az değişmesine sebep olmaktadır. Boru boyunca boyutsuz hız ve sıcaklık profilinin değişimleri Şekil 7.43 ve Şekil 7.44 de görülmektedir.



Şekil 7.43. Boyutsuz hızın ($z^*=Z / L$) farklı kesitlerdeki değişimi

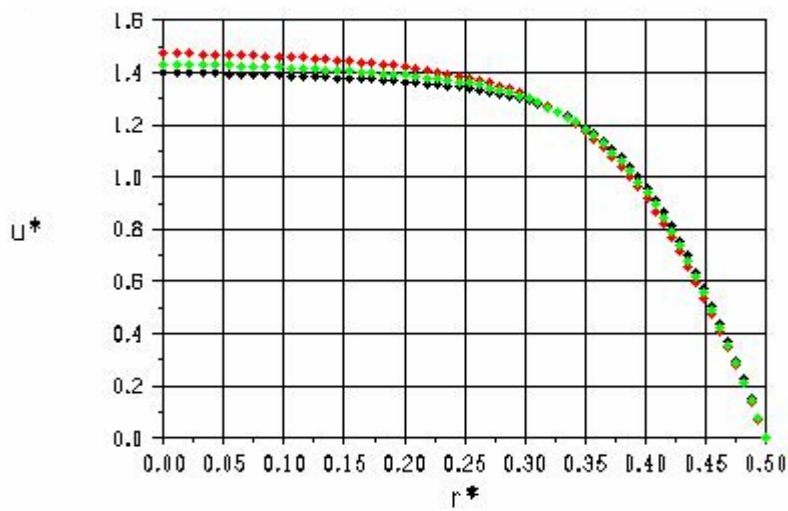
$$[\phi=0,002 \text{ } Pe=2500, (r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$$



Şekil 7.44. Boyutsuz sıcaklığın ($z^*=Z/L$) farklı kesitlerdeki değişimi

$$[\varphi=0,002, \text{Pe}=2500, (r^* = \frac{r}{D})]$$

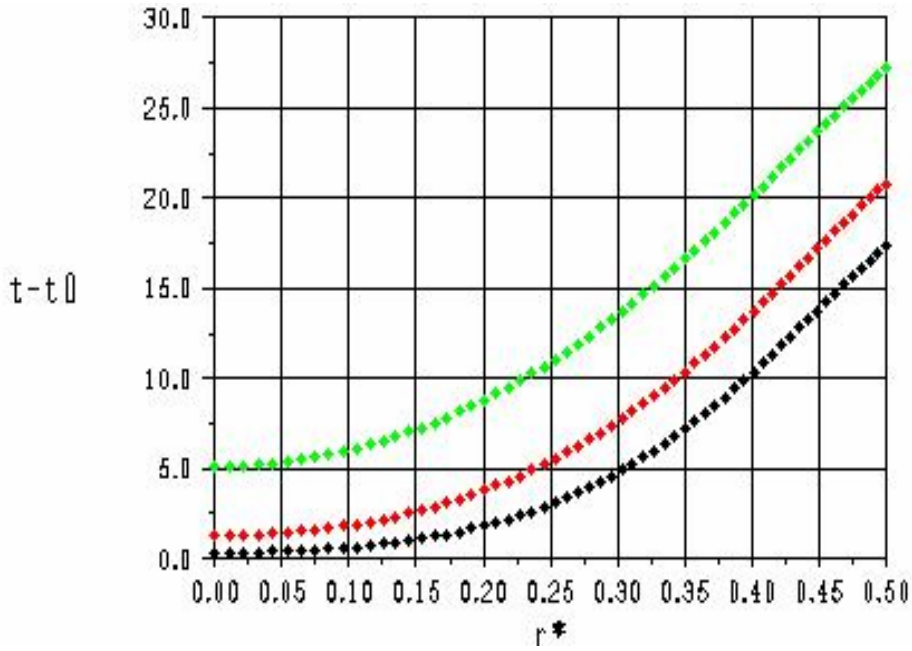
Boyutsuz hızların değişken viskozite ve yoğunluktan etkilenmesi Şekil 6.45 de görülmektedir. Artan Peclet sayısı ile daha az sıcaklık değişimine maruz kalan akışta değişken yoğunluğun ve viskozitenin etkileri daha düşük seviyede gözlenirken bu etki düşük Peclet sayısı için daha yüksektir.



Şekil 7.45. Boyutsuz hızın farklı Peclet sayıları için değişimi

$$[\varphi=0,002, \text{Pe}=2500 \text{ Pe}=4000 \text{ Pe}=6000, (r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$$

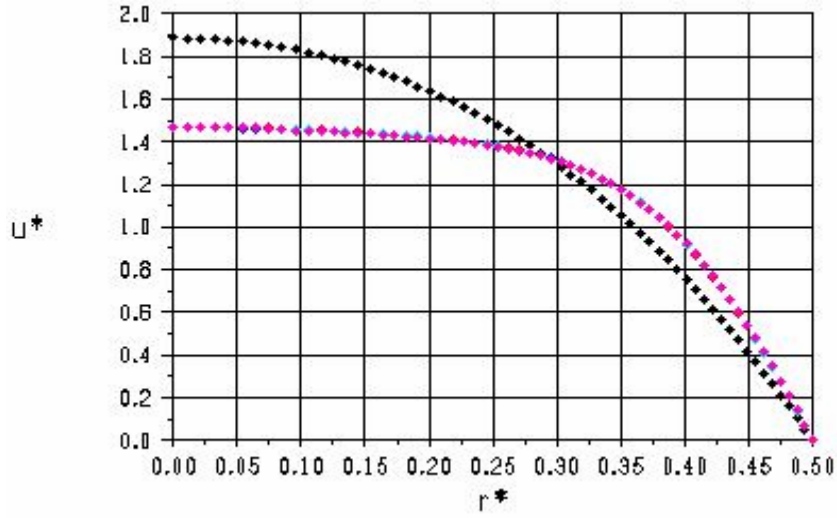
Düşük Peclet sayısında akışkan boru içerisinde daha az ısınmaktadır. Bunu Şekil 7.46 da görmek mümkündür.



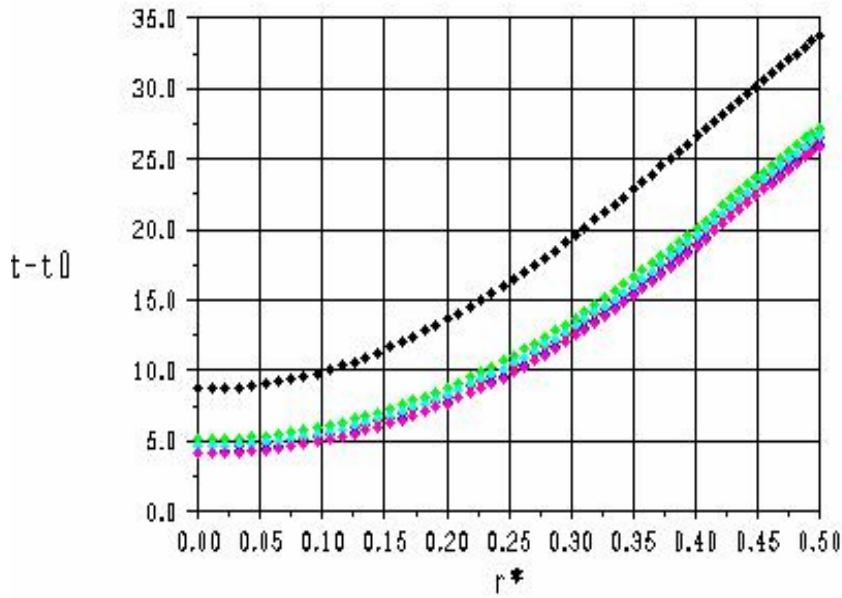
Şekil 7.46. Boyutsuz sıcaklığın farklı Peclet sayıları için değişimi

$$[\phi=0,002, \text{Pe}=2500 \text{ Pe}=4000 \text{ Pe}=6000, (r^* = \frac{r}{D}, u^* = \frac{u}{u_0})]$$

Nano akışkanın farklı hacim konsantrasyonu için boyutsuz hızın ve sıcaklığın değişimi su ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.47 ve Şekil 7.48 de verilmiştir. Burada ilk olarak görülen nano partiküllerden kaynaklanan momentum kaybının etkisidir. Buna ek olarak sıcaklığa bağlı olarak değişen özelliklerin etkisinin düşük olduğu da yine bu grafikte görülebilmektedir.

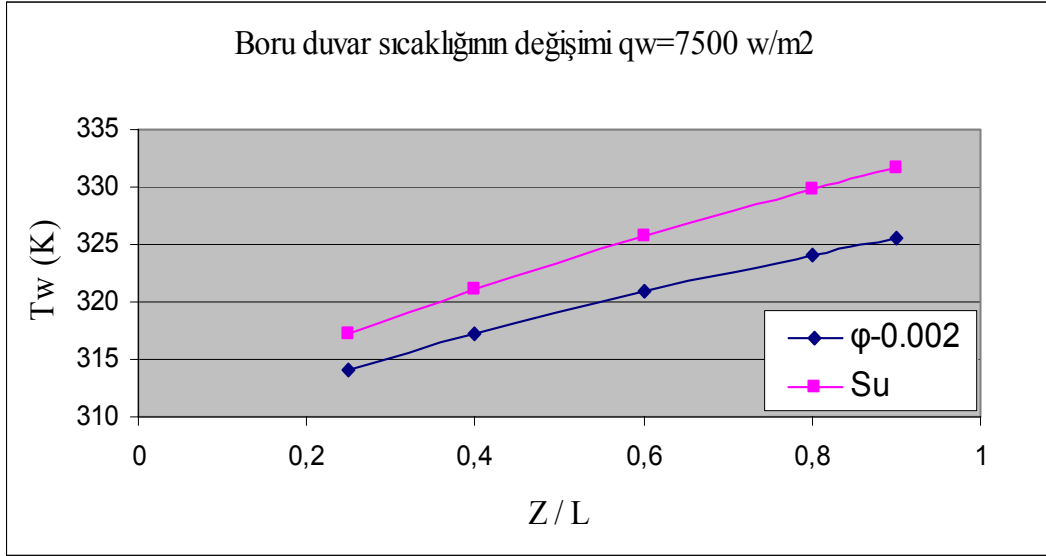


Şekil 7.47. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için hızın $Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi ($\phi=0,002$, $\phi=0,01$ $\phi=0,015$ $\phi=0,02$ $\phi=0,025$, $Pe=2500$)



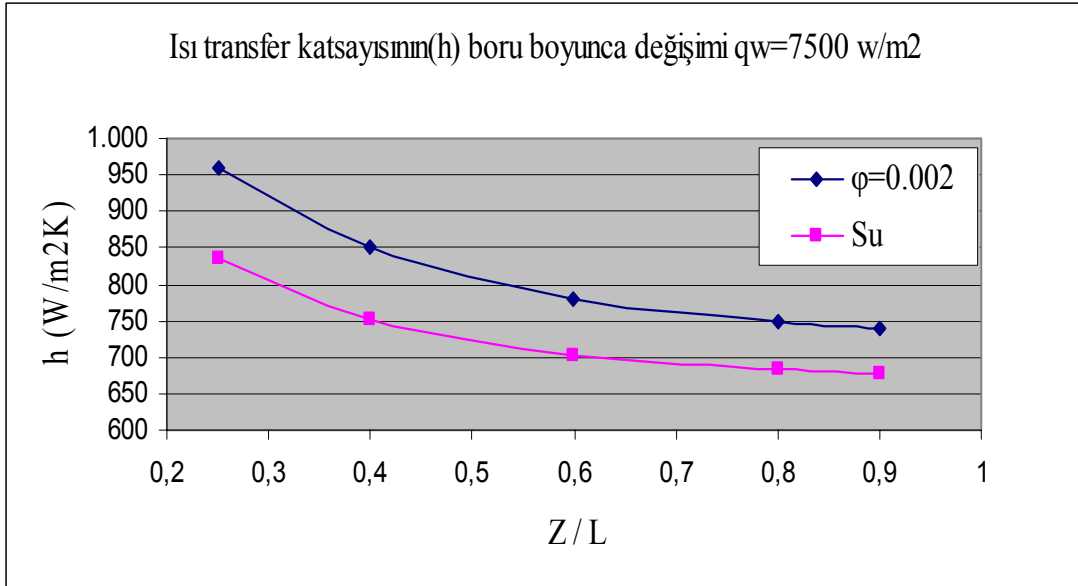
Şekil 7.48. Boyutsuz farklı konsantrasyon oranları için sıcaklığın $z^*=Z/L=0.8$ kesitindeki değişimi ($\phi=0,002$, $\phi=0,01$ $\phi=0,015$ $\phi=0,02$ $\phi=0,025$, $Pe=2500$)

Boru boyunca merkez çizgisi sıcaklık değerinin değişimi su ve nano akışkan için Şekil 7.49 da verilmiştir. Buna göre su kanal içerisinde daha hızlı ısınmaktadır.



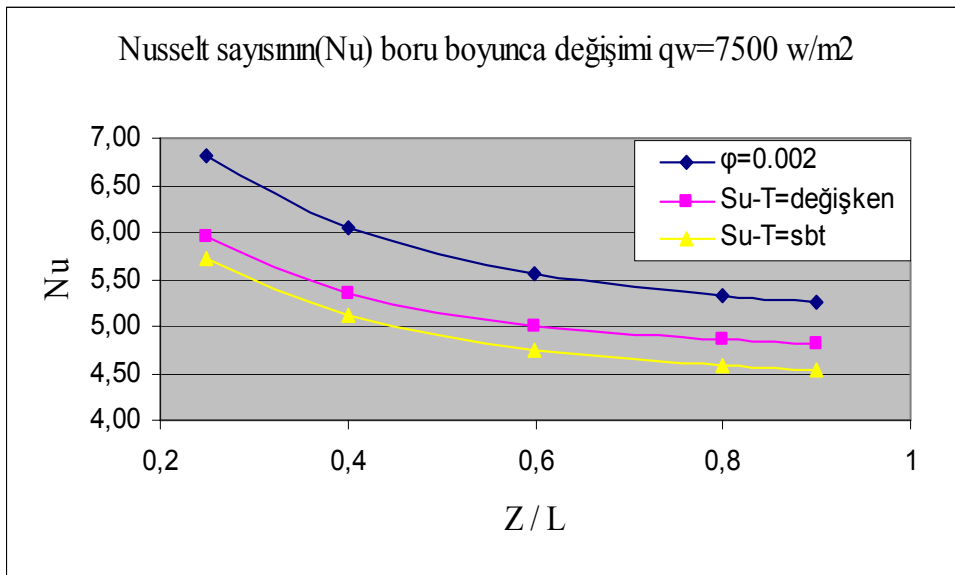
Şekil 7.49. Boru boyunca nano akışkana ve suya ait sıcaklıkların değişimi ($\phi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.50 ye bakıldığında ise ısı transfer katsayısının nano akışkan için daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.



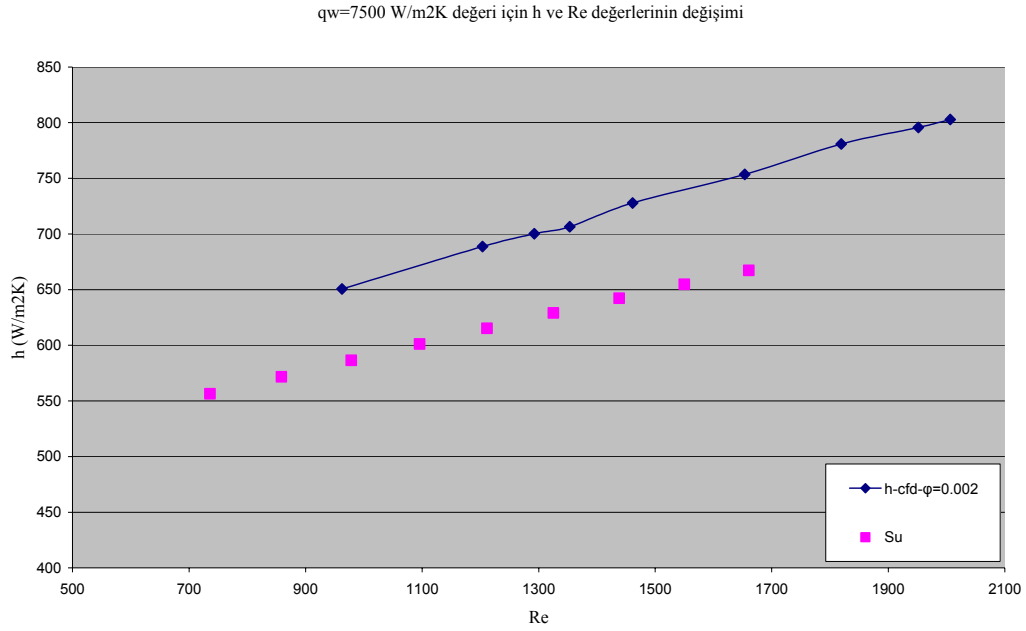
Şekil 7.50. Boru boyunca nano akışkan ve suya ait ısı transfer katsayısının (h) değişimi($\phi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.51 de ise boru boyunca Nusselt sayılarının $\phi=0,002$ hacimsel oranı, suyun sıcaklığa bağlı değişken özellikleri ve suya ait sabit sıcaklık özellikleri için değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi nano akışkana ait ısı transfer katsayılarının suya göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca suyun sıcaklığa bağlı olarak değişen termofiziksel özelliklerinden dolayı da Nusselt sayısının sabit su sıcaklığındaki termofiziksel özelliklere göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

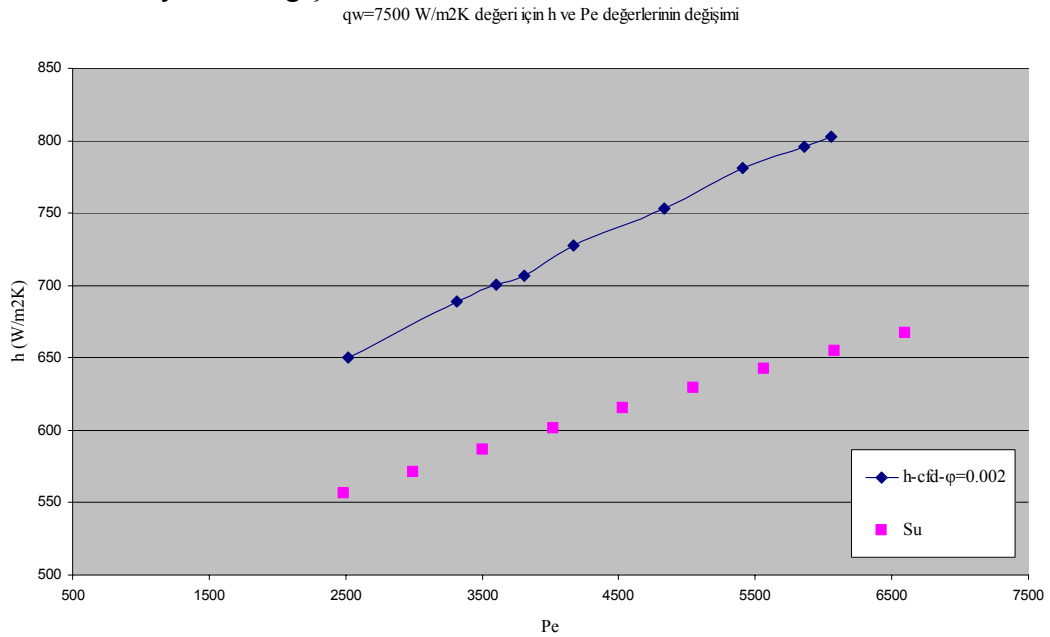


Şekil 7.51. Farklı kesitlerde boru boyunca nano akışkan ve suya ait Nusselt sayısının (Nu) değişimi($\phi=0,002$, $Pe=2500$)

Şekil 7.52 ve Şekil 7.53 de $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ için ısı transfer katsayısının Reynolds ve Peclet sayıları ile değişimleri gösterilmiştir. Şekillerden Nano akışkanın ısı transfer katsayısının suya göre daha fazla olduğu görülmektedir.

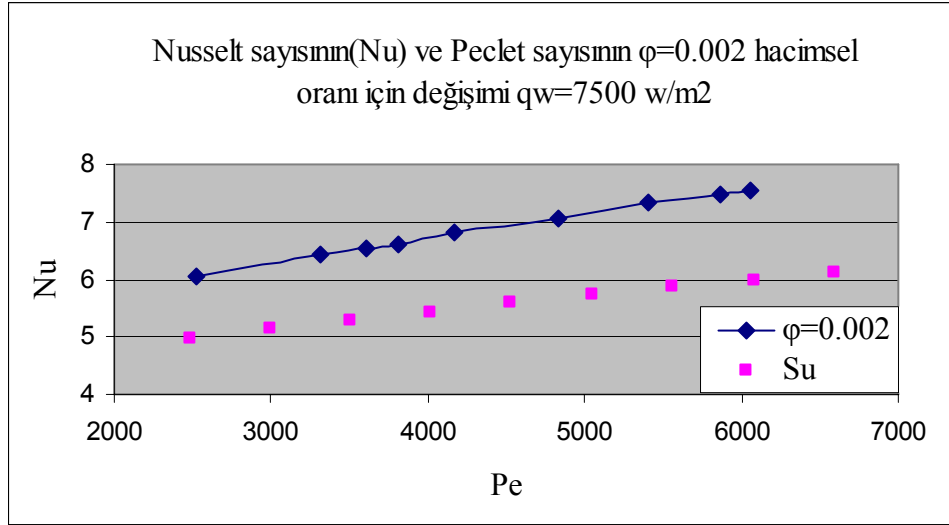


Şekil 7.52. $\phi=0,002$ hacimsel oranı için Isı transfer katsayısının(h) Reynolds(Re) sayısı ile değişimi

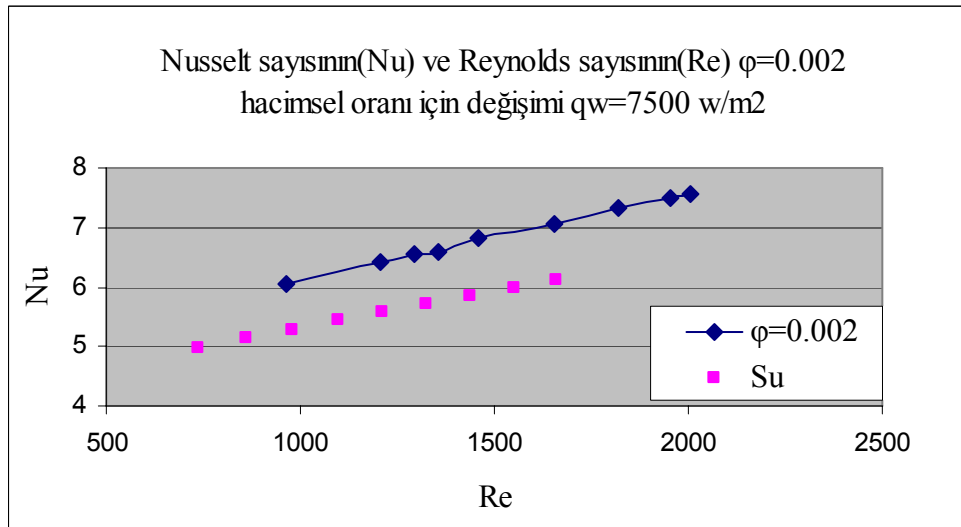


Şekil 7.53. $\phi=0,002$ hacimsel oranı için Isı transfer katsayısının(h) Peclet(Pe) sayısı ile değişimi

Şekil 7.54 ve Şekil 7.55 de $q_w=7500 \text{ W/m}^2$ için Nusselt sayısının Reynolds ve Peclet sayıları ile değişimleri gösterilmiştir. Şekillerden Nano akışkanın Nusselt sayısının suya göre daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 7.54. $\phi=0,002$ hacimsel oranı için Nusselt(Nu) sayısının Peclet(Pe) Sayısı ile değişimi



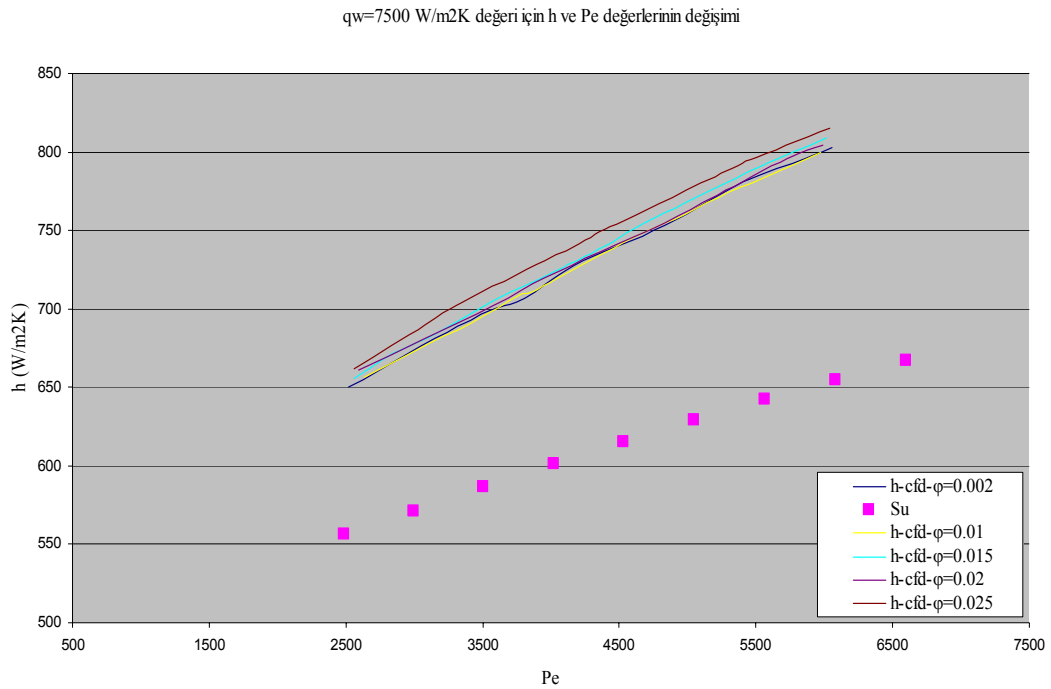
Şekil 7.55. $\phi= 0,002$ hacimsel oranı için Nusselt(Nu) sayısının Reynolds(Re) sayısı ile değişimi

7.3. Sabit Isı Akılarında Sayısal Çalışma Sonucu Elde Edilen h-Pe Grafikleri

Boru içindeki nano akışkan için sabit ısı akılarında ($q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ve $q_w=7500 \text{ w/m}^2$) CFD ile bulunan h değerlerinin farklı konsantrasyon oranları ve farklı Pe ve

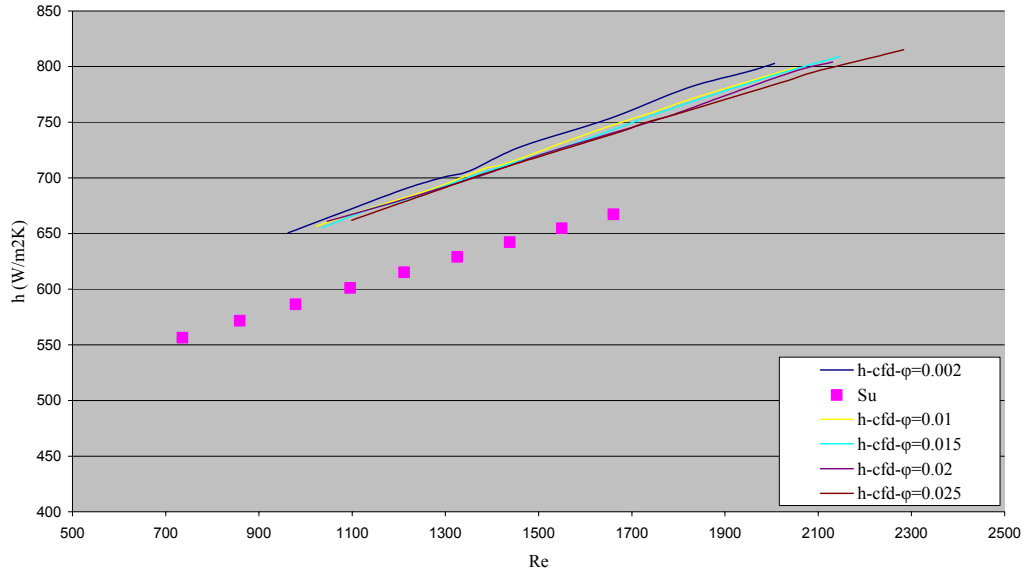
Re sayıları için konveksiyon ısı transfer katsayıları bulunarak su ile kıyaslamalar yapılmıştır. Ayrıca $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ve $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ ısı akılarının birbirleriyle ve su ile kıyaslamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara ait grafikler aşağıda Şekil 7.56. ile Şekil 7.59 arasında verilmiştir.

Bu grafiklerde farklı konsantrasyon(hacimsel oran) oranlarında nano partiküllerin bulunduğu akışa ait sabit ısı akısında ısı transfer katsayılarının Peclet ve Reynolds sayıları ile değişimleri incelenmiştir. Ayrıca Şekil 7.60 da ise boru cidarına farklı ısı akıları uygulandığında nano akışkanın ve suyun ve h değerlerinin Pe sayısına göre değişimleri incelenmiştir.



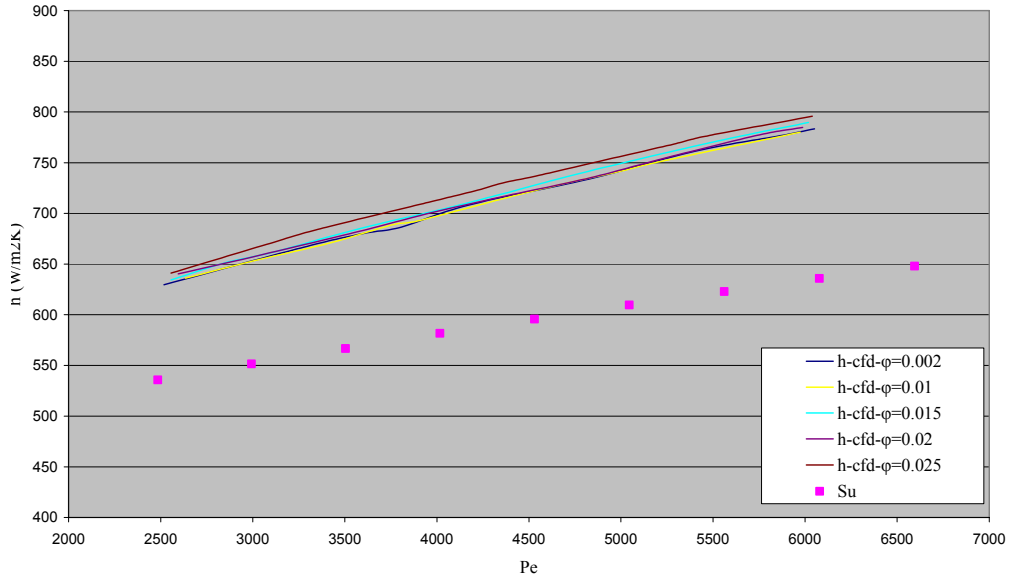
Şekil 7.56. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması ($q_w=7500 \text{ w/m}^2$)

$q_w=7500 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri için h ve Re değerlerinin değişimi

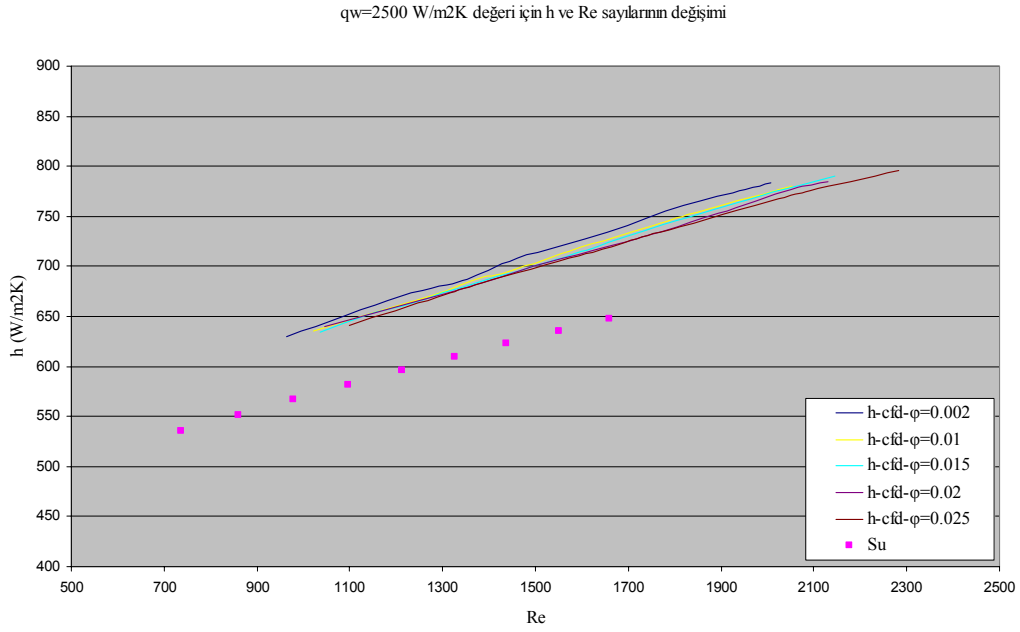


Şekil 7.57. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Reynolds(Re) sayısı ile karşılaştırılması ($q_w=7500 \text{ w/m}^2$)

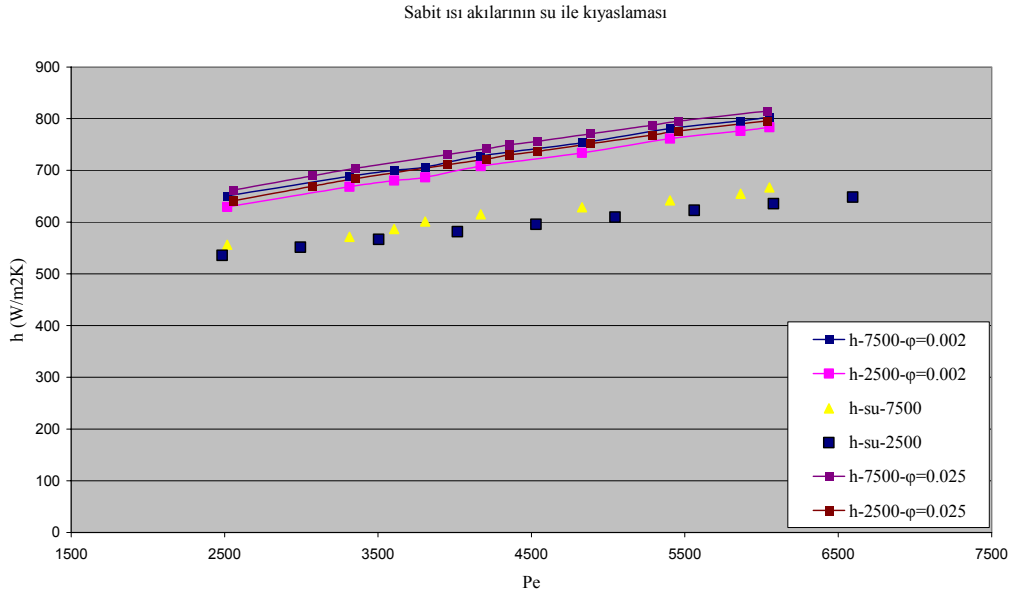
$q_w=2500 \text{ W/m}^2$ değeri için h ve Pe değerlerinin değişimi



Şekil 7.58. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Peclet (Pe) sayısı ile karşılaştırılması ($q_w=2500 \text{ w/m}^2$)



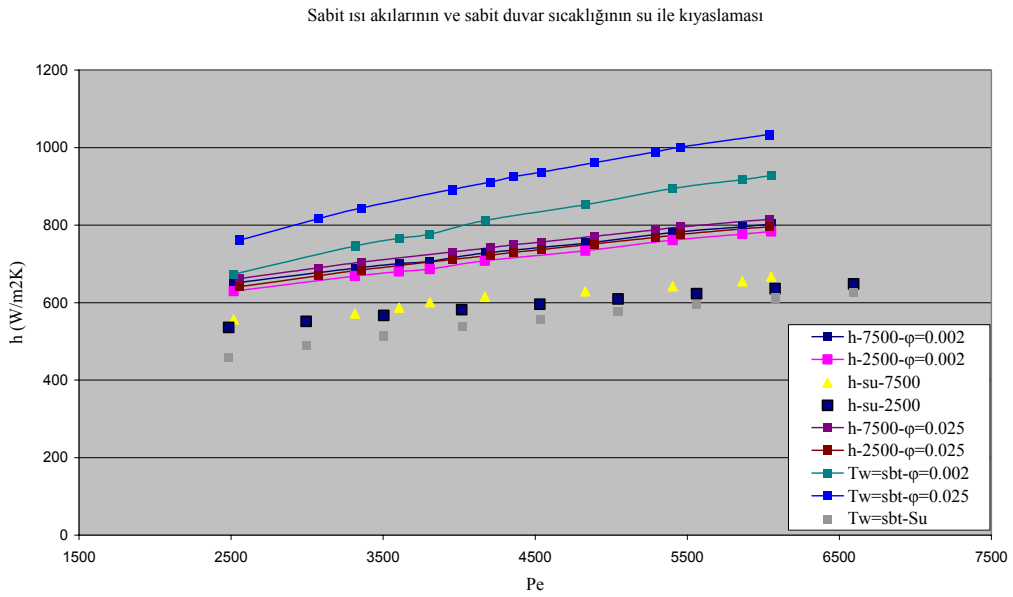
Şekil 7.59. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Reynolds(Re) sayısı ile karşılaştırılması ($q_w=2500 \text{ w/m}^2$)



Şekil 7.60. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) Peclet(Pe) sayısı ile (sabit duvar akıları $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ve $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ değerleri) karşılaştırılması

Sabit ısı akılarında yapılan sayısal çalışmalarda akışkan içine ilave edilen nano partiküllerin hacimsel oranların arttıkça ısı transfer katsayılarında önemli oranda artışlar olduğunu göstermektedir.

Şekil 7.61 de Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) sayılarının Peclet(Pe) sayısı ile sabit duvar akıları $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ve $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ değerleri ile sabit duvar sıcaklığının karşılaştırılması yapılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi sabit duvar sıcaklığındaki ısı akısının yüksek olması nedeniyle ısı transfer katsayılarında sabit ısı akılarına ve suya göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 7.61. Akışa ait boru boyunca farklı hacimsel partikül oranları ve su için sayısal olarak ısı transfer katsayılarının(h) sayılarının Peclet(Pe) sayısı ile sabit duvar akıları $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ve $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ değerleri ile sabit duvar sıcaklığının karşılaştırılması

Yapılan sayısal çalışmalarda akışkan içine ilave edilen nano partiküllerin konsantrasyon oranları arttıkça ısı transfer katsayılarının ve Nusselt sayılarının da arttığı görülmektedir. Ayrıca boru duvarındaki sıcaklık artışına paralel olarak yine nusselt ve ısı transfer katsayılarının artış gösterdiği tespit edilmiştir. Su ile yapılan kıyaslamalarda ise yine önemli artışlar sağlandığı anlaşılmaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada laminar akış şartlarında bir boru içerisindeki nano akışkanın sabit duvar sıcaklığında ve sabit ısı akılarında zorlanmış konveksiyonla ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada akışkan olarak su içerisinde hacimsel olarak farklı konsantrasyon oranlarında (0,002, 0,01, 0,015, 0,02 ve 0,025) ve 20 nm boyutundaki Al_2O_3 nano partiküllerinin bulunduğu nano akışkan ele alınmıştır. Çalışmada akışkan boru içerisine üniform olarak girmiş olup, boru içerisinde tam gelişmiş hale getirilmiş ve test alanında ise tam gelişmiş şartlara göre incelemeleri yapılmıştır. Test alanında boru duvarına sabit duvar sıcaklığı ve sabit ısı akıları uygulanmıştır.

Çalışmada farklı Peclet(Pe) sayılarında hem su için hem de içerisinde farklı konsantrasyon oranlarında Al_2O_3 nano partiküllerinin bulunduğu nano akışkan için sayısal incelemeler yapılmıştır. Nano partikül çapının 20 nm olmasındaki en büyük sebep, literatürdeki çalışmalarda partikül boyutu küçüldükçe kayma gerilmelerinin azaldığı ve ısı transfer katsayıları ile birlikte Nusselt sayılarında artışlar olduğunun görülmesidir. Yapılan sayısal çalışmada FLUENT 6.3. paket programı kullanılmıştır.

Sayısal çalışmada Eulerian ve Lagrangian modelini içeren Discrete phase Modeli(DPM) kullanılmıştır. Burada nano partikül konsantrasyon oranlarının ve Peclet ve Reynolds sayılarının ısı transferi üzerindeki etkileri incelenmiştir. DPM modeli kullanılarak akışkan ve nano partiküllerin hareketleri ve nano partiküllerin etkisiyle oluşan kuvvetlerin dikkate alınmasıyla yapılan sayısal çalışmalar literatürdeki deneysel çalışmalarla daha iyi bir uyum göstermiştir. Bu nedenle bu çalışmada DPM modelinin kullanılması tercih edilmiştir.

Literatürde yapılan sayısal çalışmalarda [52,53] Brownian kuvveti ve Saffman kaldırma kuvveti, nano parçacıkların dağılması, parçacık yer değiştirmesi ve ısı transferi artışları ile ısı transfer katsayısı artışında ilave etkilerinin olduğu görülmesi nedeniyle dikkate alınmıştır. Yine literatürde yapılan sayısal çalışmalarda akışkanın sıcaklığa bağlı değişen özellikleri dikkate alındığında [52, 53] duvar sıcaklığı ile bulk sıcaklık arasındaki farkın azalması, sıcaklığın viskozite ile düşmesi ve daha düşük

kayma gerilmeleri nedeniyle daha yüksek ısı transfer katsayıları ve Nusselt sayıları elde edilmiştir. Bu nedenle ele alınan çalışmada akışkanın sıcaklığa bağlı değişimi dikkate alınarak çözümler elde edilmiştir.

Sabit duvar sıcaklığı($T_w=373$ K) için gerçekleştirilen sayısal çalışmanın sonuçları literatürde Heris ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel sonuçlarla ve Seider-Tate korelasyonu ile kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamalarda sonuçların deneysel verilerle büyük ölçüde örtüştüğü görülerek, nümerik model doğrulanmış, doğrulanan bu model kullanılarak sabit duvar ısı akısı sınır şartları için analizler tekrarlanmıştır.

Çalışmada genel olarak akışkan içerisinde bulunan Al_2O_3 nano partiküllerinin hacimsel oranı arttıkça Nusselt sayısı (Nu) ve ısı transfer katsayısı (h) değerlerinde belirgin artışların olduğu, partikül oranı ayrıca Pe sayısındaki artışa paralel olarak Nu ve h değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Bunlara ek olarak partikül dağılımının hız profillerine olan etkisi de detaylı olarak sunulmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen sonuçlar, boyutsuz büyüklükler cinsinden sunulmuştur. Boyutsuz hız, boyutsuz sıcaklık ve Nusselt sayısı değişimlerine ek olarak vektörel hız dağılımları, hız ve sıcaklığa ait kontur grafikleri de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Yapılan sayısal çalışmada nano partikül hacimsel oranının, Peclet (Pe) sayısının ve duvar sınır şartlarının ısı transferine etkileri, boru boyunca ısı transfer katsayısının, Nusselt(Nu) sayısının değişimi ve bu değerlerin ortalamaları cinsinden sunularak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Akış hızı, duvar sınır şartı ve nano partikül hacimsel oranı gibi parametrelerin etkilerinin daha iyi gözlenebilmesi açısından boyutsuz hız ve sıcaklık dağılımları da göz önünde bulundurularak sonuçlar yorumlanmıştır. Boyutsuz hız profilleri incelendiğinde; nano akışkan içerisindeki nano partiküllerin konsantrasyon oranlarında artış olmasına rağmen, boyutsuz hız profillerinde konsantrasyona bağlı önemli bir değişim olmadığı görülmüştür.

Sabit duvar sıcaklığında yapılan çalışmalarda akışkan içindeki nano partikül hacimsel konsantrasyon oranlarının saf suya göre artışları incelendiğinde; 0,002-

0,025 oranları için Nusselt sayılarında %13-18 arasında, ısı transfer katsayılarında ise %47-74 arasında artışların olduğu görülmektedir. Isı iletim katsayılarının hacimsel konsantrasyon oranına göre artış göstermesi sebebiyle Nusselt sayılarındaki artış oranlarının ısı transfer katsayısının artış oranına göre daha az olduğu görülmektedir. Sabit ısı akılarında yapılan çalışmalarda; $q_w=2500 \text{ w/m}^2$ ısı akısı için akışkan içindeki nano partikül hacimsel konsantrasyon oranlarının saf suya göre artışları incelendiğinde; 0,002-0,025 oranları için Nusselt sayılarında %0,4-7 arasında, ısı transfer katsayılarında ise %18-21 arasında, $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ ısı akısı için ise 0,002-0,025 oranları için Nusselt sayılarında %1-9 arasında, ısı transfer katsayılarında ise %19-22 arasında artışların olduğu görülmektedir. Yine burada da ısı iletim katsayılarının hacimsel konsantrasyon oranına göre artış göstermesi sebebiyle Nusselt sayılarındaki artış oranlarının ısı transfer katsayısının artış oranına göre daha az olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada sabit duvar sıcaklığındaki ısı akısının yüksek olması nedeniyle ısı transfer katsayılarında ve Nusselt sayılarında artışların sabit ısı akılarının durumlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Sonuçlar bize nano partiküllerin akışkan içerisine ilave edilmesiyle birlikte ısı transferinde, nano parçacıkların bulunmadığı duruma (saf su) göre belirgin iyileşmelerin olduğunu göstermektedir. Ayrıca Isı transferindeki artışın akışkan içerisindeki nano partiküllerin hacimsel oranlarındaki artışla paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Hacimsel konsantrasyon oranları arttıkça ısı transfer katsayılarında ve Nusselt sayılarında da artış olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan Peclet ve Reynolds sayılarındaki artışla birlikte Nusselt sayılarının da artış gösterdiği yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır. Özellikle yüksek orandaki Peclet sayılarında parçacık giriş-çıkışları ve etkileşimleri akış yapısında değişime ve nano parçacıkların varlığı sebebiyle ısı transferi artışına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca partikül konsantrasyon oranlarındaki artışla birlikte akışkan içinde oluşan dalgalanmalar nedeniyle akışın değişikliğe uğramamaktadır. Bu nedenle en iyi konsantrasyon oranlarının belirlenmesi amacıyla yeni çalışmalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

1. Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., Choi, S. U. S., "Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements", *Heat Transfer Engineering*, 29(5): 432-460 (2008).
2. Jang, S. P., Choi, S. U. S., "Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity", *Journal of Heat Transfer*, 129: 617-623 (2007).
3. Maxwell, J. C., "A Treatise on Electricity and Magnetism, third ed.", *Oxford University Press*, London, (1892).
4. Hamilton, R. L., Crosser, O. K., Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems, *I & EC Fundamentals*, 1: 187-191 (1962).
5. Ren, Y., Xie, H., Cai, A., "Effective Thermal Conductivity of Nanofluids Containing Spherical Nanoparticles", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38: 3958-3961 (2005).
6. Beck, M. P., Sun, T., Teja, A. S., "The Thermal Conductivity of Alumina Nanoparticles Dispersed in Ethylene Glycol", *Fluid Phase Equilibria*, 260: 275-278 (2007).
7. Karthikeyan, N. R., Philip, J., Raj, B., "Effect of Clustering on the Thermal Conductivity of Nanofluids.", *Materials Chemistry and Physics*, 109: 50-55 (2008).
8. Prakash, M., Giannelis, E.P., "Mechanism of Heat Transport in Nanofluids", *Journal of Computer-Aided Material Design*, 14: 109-117 (2007).
9. Wang, X., Xu, X., Choi, S. U. S., "Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 13(4): 474-480 (1999).
10. Jang, S. P., Choi, S. U. S., "Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal conductivity of Nanofluids", *Applied Physics Letters*, 84: 4316-4318 (2004).
11. Chon, C. H., Kihm, K. D., Lee, S. P., Choi, S. U. S., "Empirical Correlation Finding the role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al_2O_3) Thermal Conductivity Enhancement", *Applied Physics Letters*, 87: 153-167 (2005).
12. Prasher, R., Bhattacharya, P., Phelan, P.E., "Brownian-Motion-Based Convective-Conductive Model for the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids", *Journal of Heat Transfer*, 128: 588-595 (2006).

13. Ki, J., Kang, Y. T., Choi, C.K., “Analysis of Convective Instability and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids”, *Physics of Fluids*, 16 (7): 2395-2401 (2004).
14. Evans, W., Fish, J., Keblinski, P., “Role of Brownian Motion Hydrodynamics on Nonfluid Thermal Conductivity”, *Applied Physics Letters*, 88: 93-116 (2006).
15. Keblinski, P., Eastman, J. A., Cahill, D. G., “Nanofluids for Thermal Transport”, *Materials Today*, June: 36-44 (2005).
16. Yu, C. J., Richter, A. G., Datta, A., Durbin, M. K., Dutta, P., “Observation of Molecular Layering in Thin Liquid Films Using X-Ray Reflectivity”, *Physical Review Letters*, 82: 2326-2329 (1999).
17. Buongiorno, J., “Convective Transport in Nanofluids”, *Journal of Heat Transfer*, 128: 240-250 (2006).
18. Garg, J., Poudel, B., Chiesa, M. et. Al, “Enhanced Thermal Conductivity and Viscosity of Copper Nanoparticles in Ethylene Glycol Nanofluid”, *Journal of Applied Physics*, 103: 074-101 (2008).
19. Mansour, R. B., Galanis, N., Nguyen, C.T., “Effect of Uncertainties in Physical Properties on Forced Convection Heat Transfer with Nanofluids”, *Applied Thermal Engineering*, 27: 240-249 (2007).
20. Zhou, S. Q., Rui, N., “Measurement of the Specific Heat Capacity of Water-based Al_2O_3 Nanofluid”, *Applied Physics Letters*, 92: 093-123 (2008).
21. Prasher, R., Song, D., Wang, J., Phelan, P., “Measurements of Nanofluid Viscosity and its Implications for Thermal Applications”, *Applied Physics Letters*, 89: 108-133 (2006).
22. Pak, B. C., Cho, Y.I., “Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles”, *Experimental Heat Transfer*, 11(2): 151-170 (1998).
23. Behzadmehr, A., Saffar-Avval, M., Galanis, N., “Prediction of Turbulent Forced Convection of a Nanofluid in a Tube with Uniform Heat Flux Using a Two Phase Approach”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28: 211-219 (2007).
24. Maiga, S. E. B., Palm, S. J., Nguyen, C. T., “Heat Transfer Enhancement by Using Nanofluids in Forced Convection Flows”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26: 530-546 (2005).

25. Heris, S. Z., Esfahany, M. N., Etemad, S. G., "Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Al_2O_3 /water Nanofluid in Circular Tube", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28: 203-210 (2007).
26. Xuan, Y., Li, Q., "Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids", *Journal of Heat Transfer*, 125(1): 151-155 (2003).
27. Nguyen, C. T., Roy, G., Gauthier, C., "Heat Transfer Enhancement Using Al_2O_3 -water Nanofluid for an Electronic Liquid Cooling System", *Applied Thermal Engineering*, 27: 1501-1506 (2007).
28. McNab, G. S., Meisen, A., "Thermophoresis in Liquids", *Journal of Colloid Interface Science*, 44(2): 339-341 (1973).
29. Tzou, D. Y., "Nanofluids", *Class notes from MAE 8300*, University of Missouri-Columbia, (2008).
30. Tzou, D. Y., W. J., Sparrow, E. M., and Murphy (Eds.), "Computational Techniques for Microscale Heat Transfer, In Minkowyc", *Handbook of Numerical Heat Transfer*, 2nd edition (Chap. 20). New York Wiley (2006).
31. Bergles A., E., "The Imperative to Enhance Heat Transfer", *Proceeding of the NATO Advanced Study on Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers*, Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands, 13-29 (1999).
32. Lee S., Choi S. U., Li S., "Eastman, Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles", *ASME J Heat Transfer*, 121: 280-289 (1999).
33. Wen D., Ding Y., "Experimental Investigation Into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region Under Laminar Flow Conditions", *Int J Heat Mass Transfer*, 47: 5181-5188 (2004).
34. Xuan Y., Li Q., "Heat Transfer Enhancement of Nanofluids", *Int J Heat Fluid Flow*, 21: 58-64 (2000).
35. Internet : Anlova "Media center"
<http://anl.gov/MediaCenter/Frontiers/2003/b3> (2006)
36. Yakut K., Sahin B., "Flow-induced Vibration Analysis of Conical-rings Used for Heat-transfer Enhancement in Heat Exchangers", *Appl Energy*, 78/3: 273-288 (2004).
37. Yakut K., Sahin B., "The Effects of Vortex Characteristics on Performance of Coiled Wire Turbulators Used for Heat Transfer Augmentation", *Appl Thermal Eng.*, 24: 2427-2438 (2004).

38. Putra N., W., Roetzel Das S.K., “Natural Convection of Nano-fluids”, *Heat Mass Transfer*, 39: 775-784 (2003).
39. Khanafer K., Vafai K., Lightstone M., “Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids”, *Int J Heat Mass Transfer*, 46: 3639-3653 (2003).
40. Kim J., Kang Y.T., Choi C.K., “Analysis of Convective Instability and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids”, *Phys Fluids*, 16: 2395-2401 (2004).
41. Trisaksri V., Wongwises S., “Critical Review of Heat Transfer Characteristics of Nanofluids”, *Renew Sust Energ Rev*, Article In press., (2005).
42. Blackwell G.R., “Thermal Management” *The Electronic Packaging Handbook Boca Raton: CRC Press LLC*, (2000).
43. İnternet : Isı yönetimi “Thermal Management in Electronics”
<http://www.ppd.chalmers.se/edu.mnt.pdf> (2001).
44. Eastman J.A., Choi S.U., Li S., Yu W., “Thompson, Anomalous Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles”, *Appl. Phys. Lett*, 78 (6): 718-720 (2001).
45. Choi S. U. S., Zhang Z. G, Yu W., Lockwood F. E., Grulke E. A, “Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions”, *Appl. Phys. Lett*, 79 (14): 2252-2254 (2004).
46. Heris, S.Z., Etemad, S.G., Esfahany M.N., “Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33: 529–535 (2006).
47. Maiga, S. E. B., Nguyen, C.T., Galanis, N. And Roy,G., “Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a uniformly heated Tube.” *Superlattices and Microstructures*., 35: 543-557 (2004).
48. Co hen H., Yunus Çengel A., “Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer” *McGraw-Hill*, (1997).
49. Fluent 6.3 User Manuel, *Fluent incorporated*, (2007).
50. Das S.K., Choi S.U.S., Yu W., Pradeep T., “Nanofluids Science and Technology, *John Wiley&Sons, Hoboken*, NJ., (2008).
51. Ounis H., Ahmedi G., Mclaughlin J.B., “Brownian diffusion of submicrometer particles in the viscous sublayer”, *Journal of Colloid Interface Science*, 143 (1): 266-277 (1991).

52. Bianco V., Chiacchio F., Manca O., Nardini S., “Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes”, *Applied Thermal Engineering*, 29: 3632-3642 (2009).
53. Yurong H., Yubin M., Yunhua Z., Huilin L., Y. Ding, “Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions”, *Applied Thermal Engineering*, 29: 1965-1972 (2009).

EKLER

EK-1 Fluent program pencerelerinden yapılan değişiklikler

Fluent’de çözüme ilişkin olarak program pencerelerinde yapılan değişiklikler aşığıda yer almaktadır.

- Gambit te hazırlanmış olan msh yapısı Fluente tanıtılmıştır;
- Scale kısmından metrik düzeltme yapılmıştır;
- İnjection kısmında nano partiküle ait giriş sıcaklığı giriş hızı giriş debisi ve nano partikül çapı girilmiştir;
- Problemin sınır şartlarına ilişkin değerler girilmiştir;
- Enerji hesaplamasının yapılması için enerji hesaplaması aktif hale getirilmiştir;
- Laminer akış modeli kullanılmıştır;
- Materials kısmından suya ve nano partiküle ait değerler girilmiştir. Su için sıcaklığa bağlı olarak değişimler sisteme girilmiştir;
- Discrete phase kısmından akışkan içindeki nano partikül nedeniyle oluşan ilave kuvvetler(brownian ve saffman lift kuvvetleri) sisteme tanıtılmış olup, ayrıca cunningham değeri hesaplanarak sisteme girilmiştir;
- Kalıntılar 0,001 değerinde sabitlenmiş ve tüm kalıntılar azalarak bu maksimum değere ulaştığında hesaplamanın yakınsadığı kabul edilmektedir.
- Relaksasyon parametresi olarak sırasıyla basınç için 0,3; yoğunluk için 1; gövde kuvvetleri için 1; momentum için 0,7; enerji için 1, dpm modeli için ise 0,5 değeri ilgili Fluent penceresinden girilerek sabitlenmiştir.

Fluent 6.3 paket programının hesaplama algoritması ve kaynak kodlarına ilişkin herhangi bir düzenleme yapılmamış olup, programın mevcut hali kullanılmıştır. Navier-Stokes Denklemlerinin ayrıklaştırılması bölüm 5.2.4. de anlatılmakta olup,

EK-1 (Devam) Fluent program pencerelerinden yapılan değişiklikler

daha ayrıntılı bilgi Fluent 6.3 dokümantasyonunda yer aldığı İnternet sitesinde mevcuttur (49).

EK-2 SIMPLE algoritması

Basınç için önce kabul yapılarak hızlar çözülür ve iterasyonla basınç ve hız düzeltilir.

Basınç dağılımının P^* olduğunu kabul edelim ve bu basınç dağılımı ile elde edilecek olan hız bileşenleri de u^* , v^* ve w^* olsun.

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (P_P^* - P_E^*) A_e \quad (2.1)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (P_P^* - P_N^*) A_n \quad (2.2)$$

$$a_i w_i^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + b + (P_P^* - P_I^*) A_i \quad (2.3)$$

Basınç ve hızın düzeltilmesi

$$\text{Doğru basınç dağılımı: } P = P^* + P^l \quad (2.4)$$

P^l = Basıncıdaki düzeltme veya iyileştirme

Basıncıdaki P^l düzeltmesine karşın hız bileşenlerinin de düzeltilmesi gerekir. Bunlar şu şekilde ifade edilir;

$$\begin{aligned} u_e &= u_e^* + u_e^l \\ v_n &= v_n^* + v_n^l \\ w_i &= w_i^* + w_i^l \end{aligned} \quad (2.5)$$

Eş. 2.4 ve Eş. 2.5, Eş. 2.1, Eş. 2.2 ve Eş. 2.3 de yerine konulur ise aşağıda yer alan Eş. 2.6 daki üç ifade elde edilir;

$$a_e u_e^l = \sum a_{nb} u_{nb}^l + (P_P^l - P_E^l) A_e$$

EK-2 (Devam) SIMPLE algoritması

$$a_n v_n^l = \sum a_{nb} v_{nb}^l + (P_P^l - P_N^l) A_n \quad (2.6)$$

$$a_i w_i^l = \sum a_{nb} w_{nb}^l + (P_P^l - P_I^l) A_i$$

$$\begin{aligned} & \sum a_{nb} u_{nb}^l \\ & \sum a_{nb} v_{nb}^l \\ & \sum a_{nb} w_{nb}^l \end{aligned} \quad (2.7)$$

SIMPLE Eş. 2.6 daki ifadelerde Eş. 2.7 de verilen terimleri ihmal eder.

SIMPLE algoritması kullanıldığında Eş. 2.6 da yer alan ifadeler aşağıda yer alan Eş. 2.8 deki hali alır;

$$\begin{aligned} u_e^l &= (P_P^l - P_E^l) \frac{A_e}{a_e} \\ v_n^l &= (P_P^l - P_N^l) \frac{A_n}{a_n} \\ w_i^l &= (P_P^l - P_I^l) \frac{A_i}{a_i} \end{aligned} \quad (2.8)$$

SIMPLE algoritması kullanıldığında Eş. 2.5 deki ifadede yerine Eş. 2.8 deki ifade yazılırsa aşağıda yer alan Eş. 2.9 elde edilir.

$$\begin{aligned} u &= u^* + u^l \\ u_e &= u_e^* + (P_P^l - P_E^l) \frac{A_e}{a_e} \\ v_n &= v_n^* + (P_P^l - P_N^l) \frac{A_n}{a_n} \\ w_i &= w_i^* + (P_P^l - P_I^l) \frac{A_i}{a_i} \end{aligned} \quad (2.9)$$

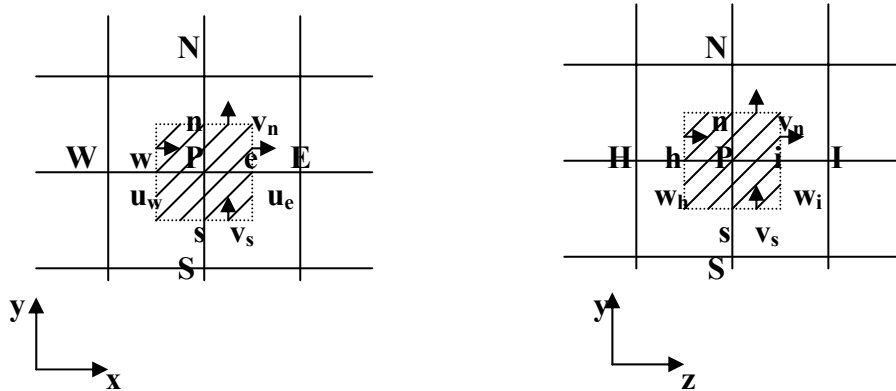
EK-2 (Devam) SIMPLE algoritması

SIMPLE algoritması kullanılarak Eş. 2.9 deki ifadeler ile hız bileşenleri düzeltilebilir (iyileştirilebilir), eğer basınç düzeltmeleri P^l bilinmiyor ise P^l için bir ifade geliştirilmelidir.

Basınç düzeltme denkleminin elde edilmesi

Basınç düzeltme denklemi süreklilik denkleminde elde edilir.

Basınç skaler bir büyüklüktür ve ana grid noktalarında ele alınır.



Şekil 2.1. Süreklilik denklemi için kontrol hacmi

$$\frac{\rho_P - \rho_P^0}{\Delta_T} \Delta_x \Delta_y \Delta_z + ((\rho u)_e - (\rho u)_w) \Delta_y \Delta_z + ((\rho v)_n - (\rho v)_s) \Delta_x \Delta_z + ((\rho w)_i - (\rho w)_h) \Delta_x \Delta_y = 0 \quad (2.10)$$

SIMPLE algoritması kullanılarak Eş. 2.9 daki ifadeler Eş. 2.10 de yerine konulur ve P^l için düzenlenirse aşağıda yer alan Eş. 2.11 elde edilir;

$$a_P P_P^l = a_E P_E^l + a_W P_W^l + a_N P_N^l + a_S P_S^l + a_I P_I^l + a_H P_H^l + b$$

EK-2 (Devam) SIMPLE algoritması

$$\begin{aligned}
a_E &= \rho_e \frac{A_e}{a_e} \Delta_y \Delta_z \\
a_W &= \rho_w \frac{A_w}{a_w} \Delta_y \Delta_z \\
a_N &= \rho_n \frac{A_n}{a_n} \Delta_x \Delta_z \\
a_S &= \rho_s \frac{A_s}{a_s} \Delta_x \Delta_z \\
a_I &= \rho_i \frac{A_i}{a_i} \Delta_x \Delta_y \\
a_H &= \rho_h \frac{A_h}{a_h} \Delta_x \Delta_y \\
a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S + a_I + a_H \\
b &= \frac{(\rho_P^0 - \rho_P)}{\Delta_t} \Delta_x \Delta_y \Delta_z + ((\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e) \Delta_y \Delta_z + ((\rho v^*)_s \\
&\quad - (\rho v^*)_n) \Delta_x \Delta_z + ((\rho w^*)_h - (\rho w^*)_i) \Delta_x \Delta_y
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Simple algoritmasında işlem sırası

Basınç dağılımı P^* tahmin edilir (Genellikle sıfır alınır).

P^* kullanılarak Eş. 2.1, Eş. 2.2 ve Eş. 2.3 den u^* , v^* ve w^* çözülür.

Eş. 2.11 deki basınç düzeltme denkleminde P^l çözülür

$P = P^* + P^l$ ifadesinden basınç düzeltilir

Eş. 2.9 deki hız düzeltme denklemlerinden hızlar hesaplanır.

EK-2 (Devam) SIMPLE algoritması

$$u_e = u_e^* + (P_p^l - P_E^l) \frac{A_e}{a_e}$$

$$v_n = v_n^* + (P_p^l - P_N^l) \frac{A_n}{a_n}$$

$$w_i = w_i^* + (P_p^l - P_l^l) \frac{A_i}{a_i}$$

Düzeltilmiş basınç P^* gibi değerlendirilerek 2 nci adımdan sonraki işlemler, süreklilik denklemi sağlanıncaya kadar tekrarlanır.

EK-3 Fluent programı modülleri hakkında kısa ve öz bilgi

Fluent Programı; Gambit, XServer, Tgrid, Fluent vb. modüllerden oluşmaktadır. Fluent tedarik edilirken modüllerin tedarik edilmesi seçenektir, bütçeye, ihtiyaca ve isteğe bağlı olarak modüller tedarik edilir. Fakat en basit konfigürasyonda Fluent, XServer (HummingBird Connectivity) ve Gambit Modüllerinin tedarik edilmesi gerekmektedir.

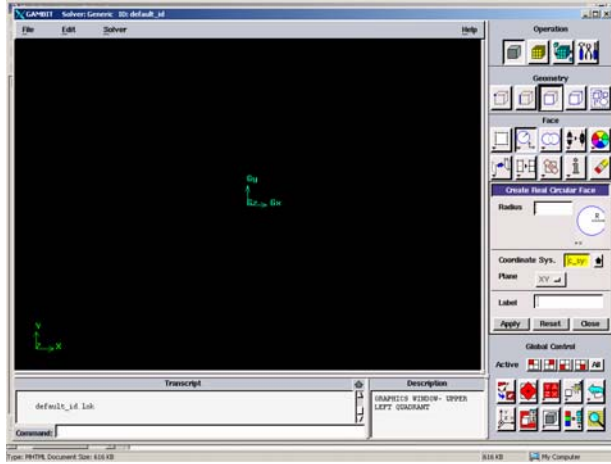
Gambit Modülü: Katı modelin oluşturulacağı, bu katı modele mesh atan ve sınır şartlarını Fluent'te detaylandırmadan önce bu sınırları tanımlanacağı yüzeylerin belirleneceği modüldür. Gambit'te uzantısı dbf olan bir katı model dosyası oluşturulur, daha sonra bu dbf uzantılı dosyadan msh uzantılı bir dosya export edilerek oluşturulur, msh uzantılı dosya Fluent modülünün okuyacağı formattaki dosyadır.

XServer (HummingBird Connectivity) Modülü: Gambit'in Windows ortamında çalışmasını sağlayan arayüz modülüdür. Bu modül olmadan Gambit Windows ortamında çalışmaz.

Fluent Modülü: Gambit'te oluşturulan msh uzantılı dosyayı okuyan ve bu dosyaya sınır şartlarının ayrıntılarının girilmesi, madde özelliklerinin girilmesi, çözüme ilişkin ayrıntıların girilmesi ile msh uzantılı dosyanın cas uzantılı dosyasının elde edildiği ve bu cas uzantılı dosya kullanılarak sayısal çözümün elde edildiği modüldür. Çözüm dat uzantılı dosya ile saklanır.

EK-4 Bir örneğin Gambit’te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent’de ayrıntılı çözülmesi

Windows XP kurulu bilgisayarda “Gambit 2.3.16 programına tıklanarak Gambit programını çalıştırılır. Ekran aşağıdaki Şekil 4.1’deki hali alır.



Şekil 4.1. Gambit’in açılması

Gambit çalıştığında default_id.dbs isiminde bir dosya açar. Bu dosya ilk açılışta boştur, ikinci açılışta daha önce modelleme yapıldı ve save edildi ise, Gambit bu save işleminde default_id.dbs isimli dosyayı save eder, bu nedenle ikinci açılan bu default_id.dbs isimli dosyadır.

Not: Herhangi bir modelleme yapıldığında default_id.dbs isimli dosya üzerinde çalışırken save as yapılarak farklı bir isimle de save yapılabilir. Bu durumda ikinci açılan default_id.dbs save edilen son halinde ekrana gelir, open komutunu kullanarak farklı kaydedilen dosya açılabilir.

Not: Gambit normal yollardan kapatıldığında ikinci defa açılmayabilir. Bu durumda uzantısı lok olan dosyaların aratılıp bulunması ve bu lok uzantılı dosyaların silinmesi gerekmektedir. Silme işlemini müteakip Gambit açılabilir.

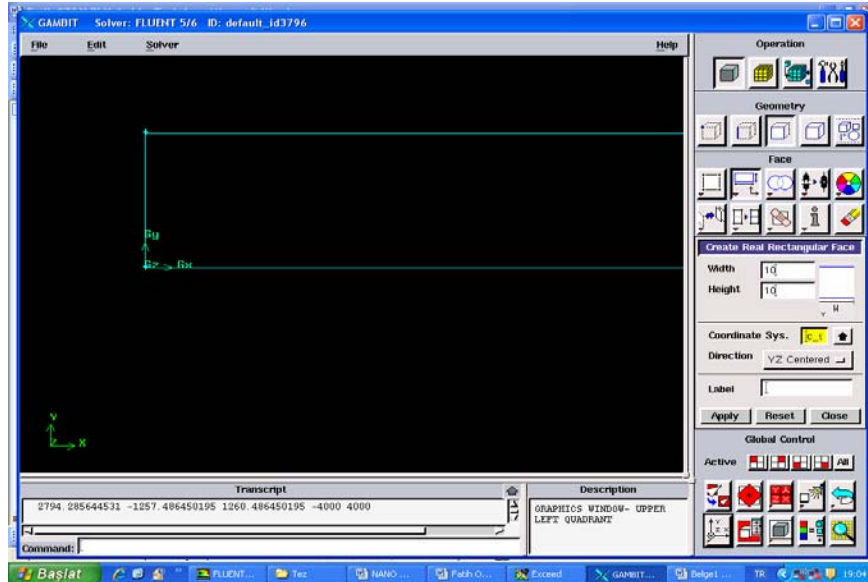
EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

1. CFD hesaplamada kullanılacak CFD Modülü aşağıdaki ana menü komutlarını kullanarak seçilir.

Solver —> FLUENT 5/6

2. Dikdörtgenler prizması aşağıdaki işlemler yapılarak oluşturulur. Bu işlemleri müteakip ekranda Şekil 4.2.'deki görüntü oluşur.

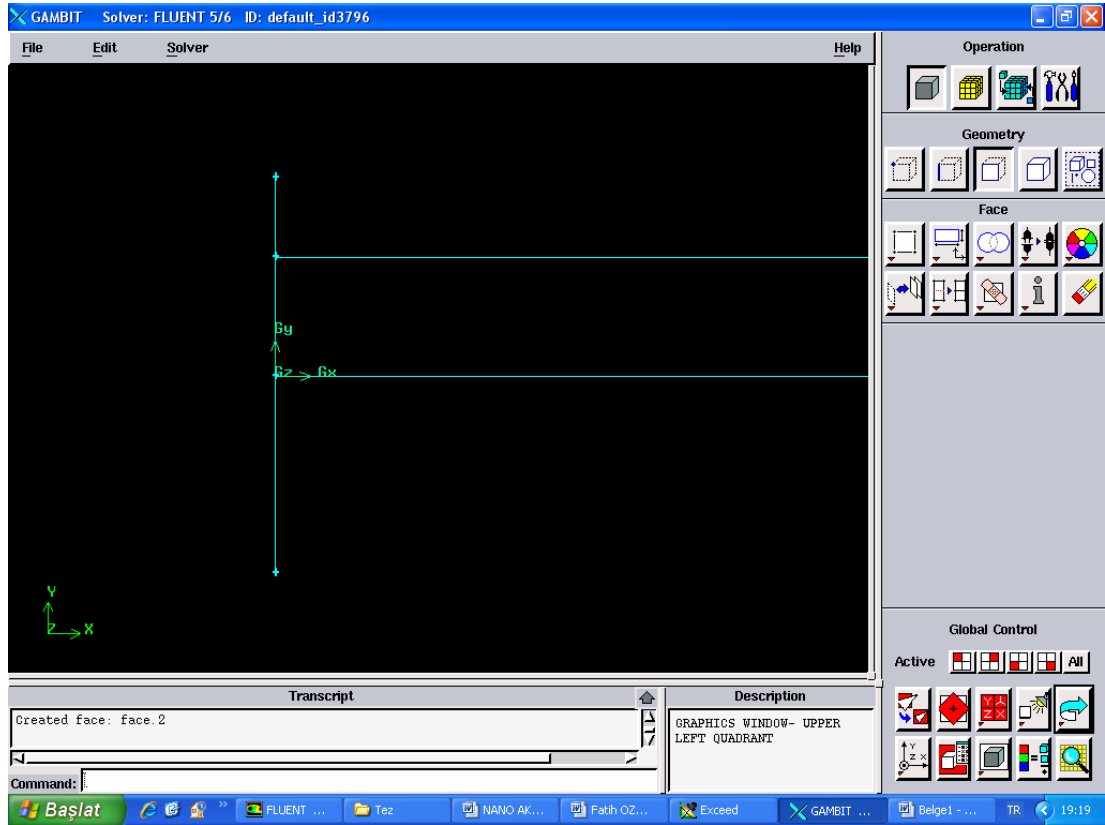
- GEOMETRY  —> FACE  —> CREATE FACE 
- Create Face penceresi açılır.
- Direction +X+Y seçilir.
- Width=2000 Height=3, değerleri girilir.
- Apply yapılır.



Şekil 4.2. İki boyutlu olarak bir boru oluşturulması

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

- GEOMETRY  → FACE  → CREATE FACE 
- Create Face penceresi açılır.
- Direction YZ Centered seçilir.
- Width=10 Height=10, değerleri girilir.
- Apply yapılır.

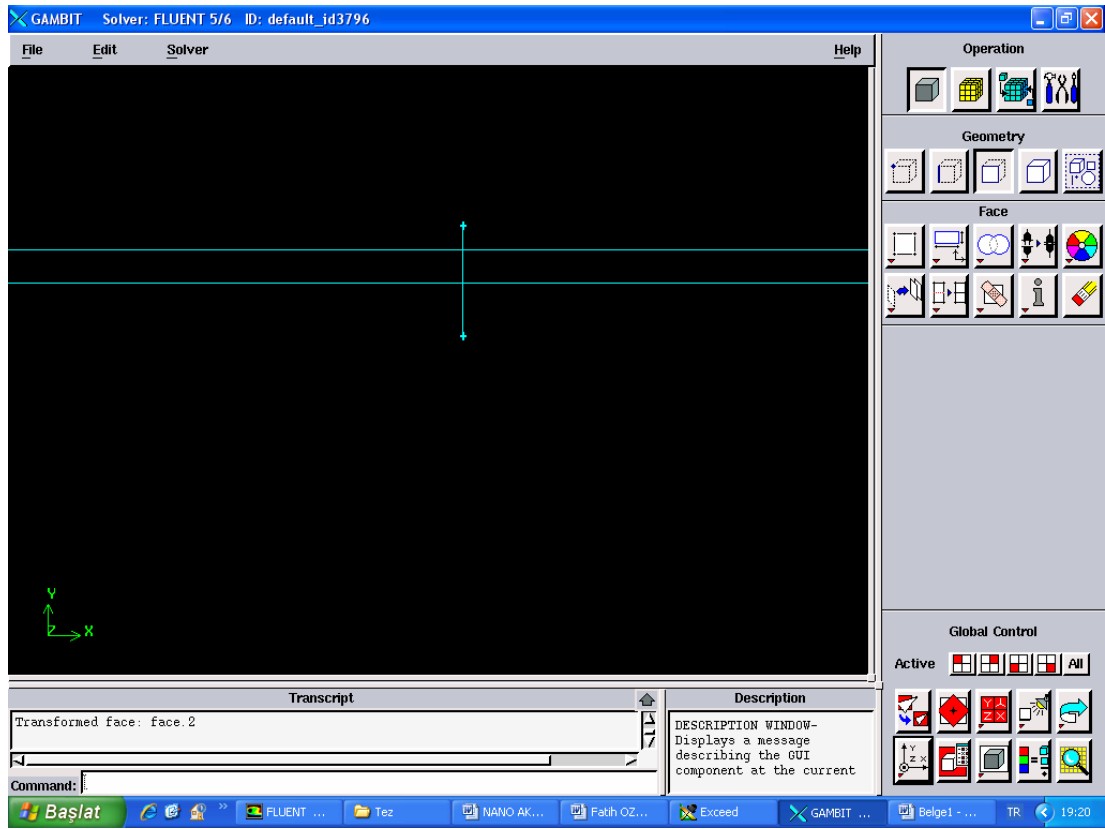


Şekil 4.3. İki boyutlu kare yüzeyi oluşturulması

- GEOMETRY  → FACE  → MOVE/COPY/ALIGN FACE
- Move Faces penceresi açılır.
- Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Face 2 seçilir.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

- $X=1000$ değeri girilir.
- Translate aktif hale getirilir.
- Apply yapılır

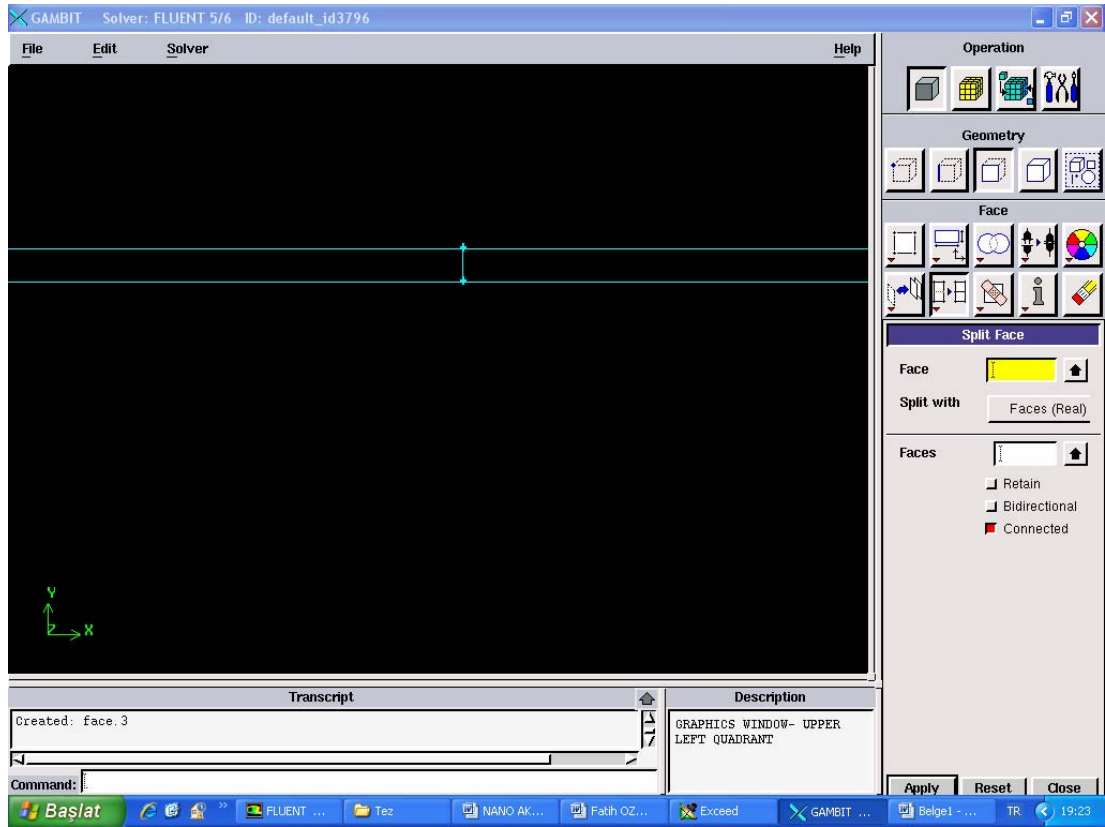


Şekil 4.3. Karenin ötelenmesi

- GEOMETRY  → FACE  → SPLIT MERGE
- Split Face penceresi açılır.
- Önce Mouse ile sol tıklanır burası sarı rengi aldığıında Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Face kısmının karşısına Face 1 seçilir.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

- Sonra alttaki kısımda Mouse ile sol tıklanır burası sarı rengi aldığıında, Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Face kısmının karşısına Face 2 seçilir, connected aktif hale getirilir.
- Apply yapılır (karenin boru dışındaki kısımları yok olur). Böylece boruya ait iki kısım oluşturulmuş olur.



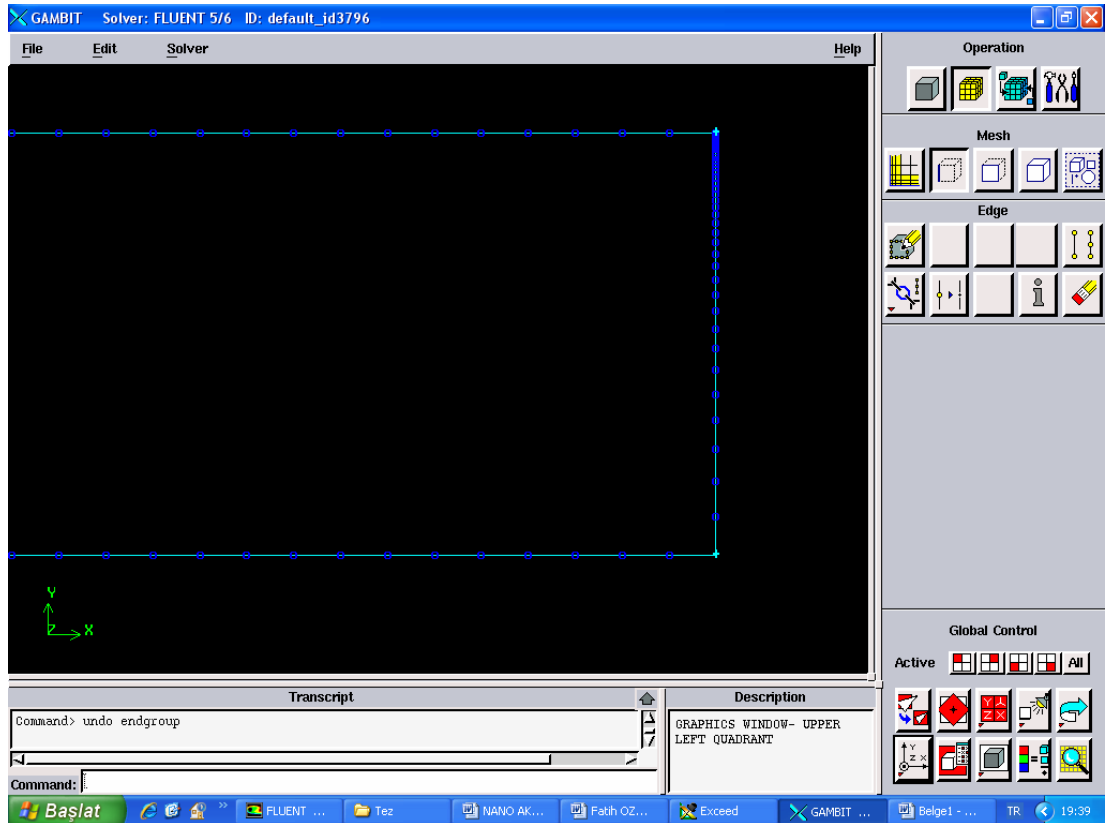
Şekil 4.4. Karenin boru dışındaki kısımlarının yok edilmesi

- MESH  → EDGE  → MESH EDGES 
- Mesh Edges penceresi açılır.
- Önce Üst kısımdaki Edges Mouse ile sol tıklanır burası sarı rengi aldığıında Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek edge kısmının

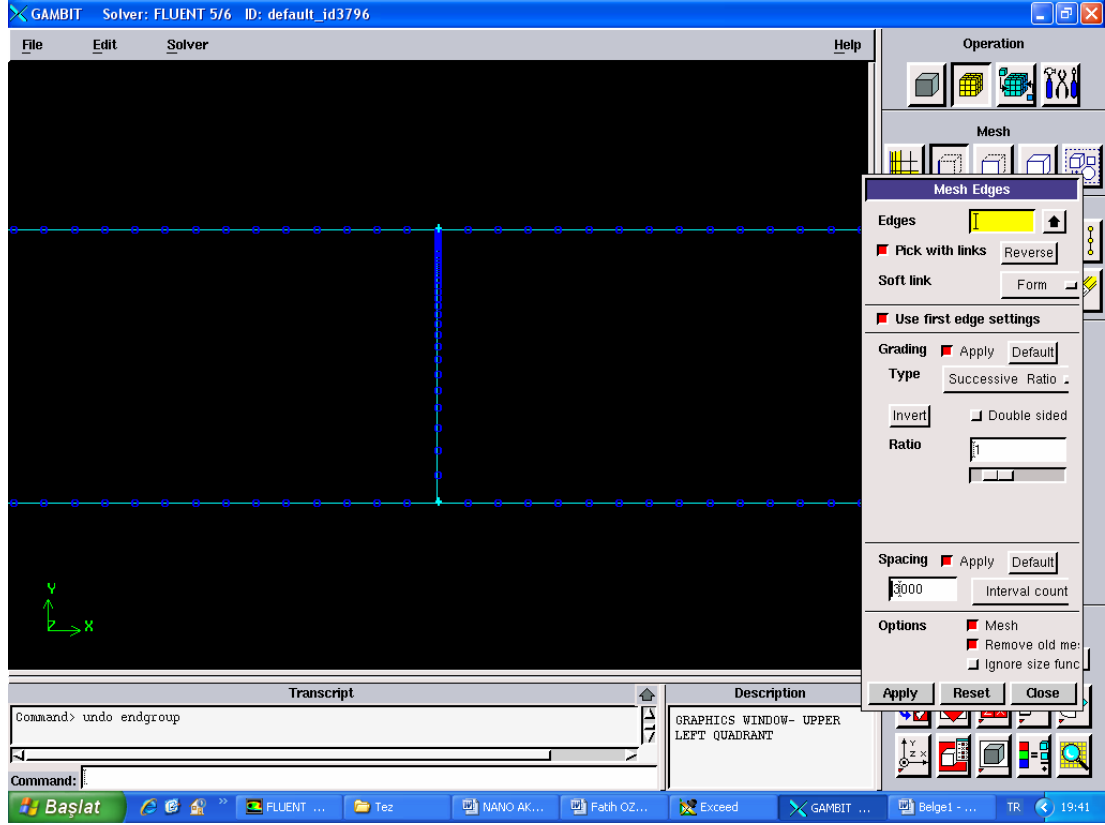
EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

karşısına edge.2 seçilir (ratio 1,1 ve spacing 60 alınır).Interval count aktif hale getirilir. Aynı işlem edge 4 ve edge 10 içinde tekrarlanır.

- Apply yapılır
- Mesh Edges penceresi halen açıktır.
- Önce Üst kısımdaki Edges Mouse ile sol tıklanır burası sarı rengi aldığıında Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek edge kısmının karşısına edge.1 seçilir (ratio 1 ve spacing 3000 alınır). Interval count aktif hale getirilir. Aynı işlem edge 3,5, 9 ve edge 11 içinde tekrarlanır
- Apply yapılır.



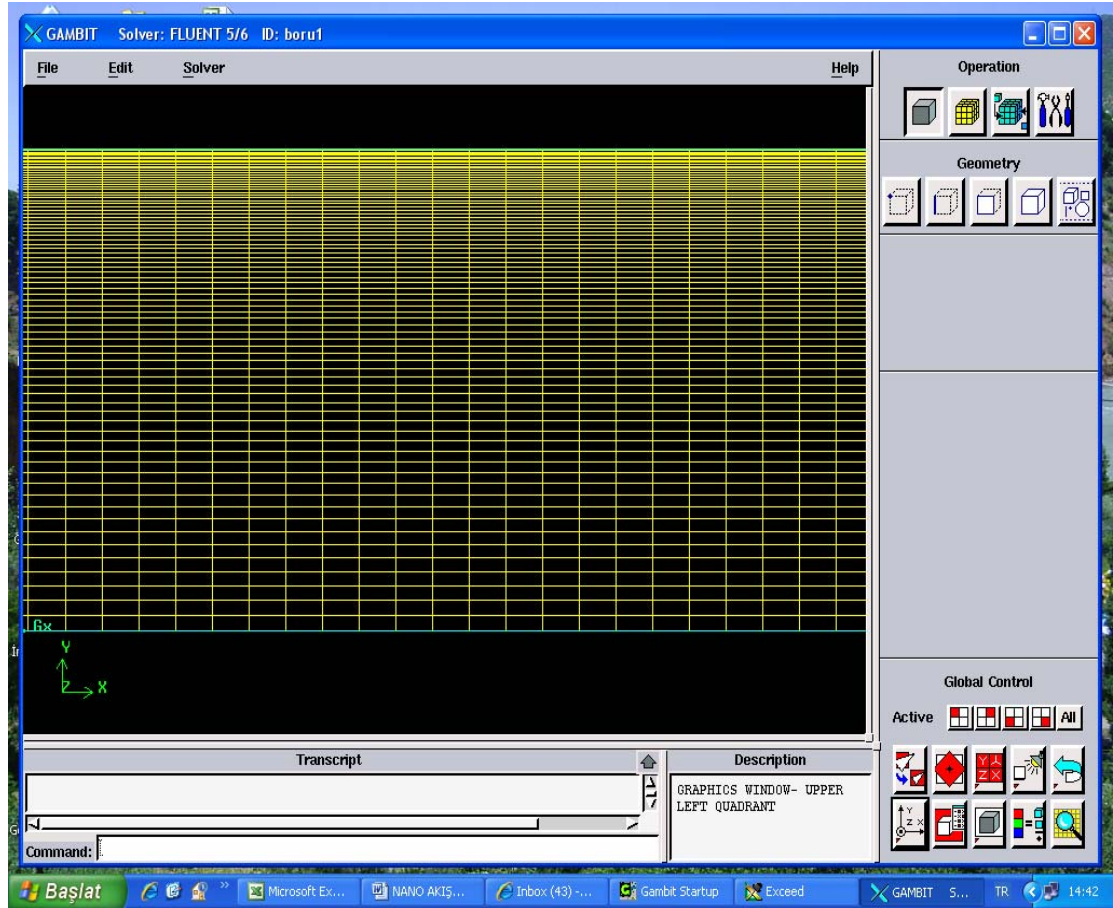
EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.5. İki boyutlu boruya mesh atılması

- MESH  → FACE  → MESH FACES 
- Mesh Faces penceresi açılır.
- Önce Üst kısımdaki Volumes Mouse ile sol tıklanır burası sarı rengi aldığıında Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Faces kısmının karşısına Faces 1 ve 3 seçilir (spacing: 5 alınır, Element: Quad ve Type: Map'dir).
- Apply yapılır. (Boruya 360000 hücre mesh atılır).

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.6. Hacme mesh atılması

3. Sınır şartı tipinin belirlenmesi.

- ZONES  → SPECIFY BOUNDARY TYPES 
- Specify Boundary Types penceresi açılır.
- Type kısmından VELOCITY_INLET seçilir.
- Önce alttaki Entity Mouse ile sol tıklanır burası aktif olduğunda Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Entity kısmının karşısına Edge.1
- Apply yapılır (inlet olarak giriş yapılır).
- Specify Boundary Types penceresi halen açıktır.
- Type kısmından INTERIOR seçilir.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

- Önce alttaki Entity Mouse ile sol tıklanır burası aktif olduğunda Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Entity kısmının karşısına Edge.11 Apply yapılır (default interior olarak otomatikmen isimlenir).
- Specify Boundary Types penceresi halen açıktır.
- Type kısmından SYMMETRY seçilir.
- Önce alttaki Entity Mouse ile sol tıklanır burası aktif olduğunda Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Entity kısmının karşısına Edge.4 Apply yapılır (symmetry1 olarak girilir).
- Specify Boundary Types penceresi halen açıktır.
- Type kısmından SYMMETRY seçilir.
- Önce alttaki Entity Mouse ile sol tıklanır burası aktif olduğunda Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Entity kısmının karşısına Edge.2 Apply yapılır (symmetry2 olarak girilir)
- Specify Boundary Types penceresi halen açıktır.
- Type kısmından OUTFLOW seçilir.
- Önce alttaki Entity Mouse ile sol tıklanır burası aktif olduğunda Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Entity kısmının karşısına Edge.3 Apply yapılır (exit olarak isimlenir).
- Specify Boundary Types penceresi halen açıktır.
- Type kısmından WALL seçilir.
- Önce alttaki Entity Mouse ile sol tıklanır burası aktif olduğunda Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Entity kısmının karşısına Edge.5 Apply yapılır (wall1 olarak isimlenir).

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

- Specify Boundary Types penceresi halen açıktır.
- Type kısmından WALL seçilir.

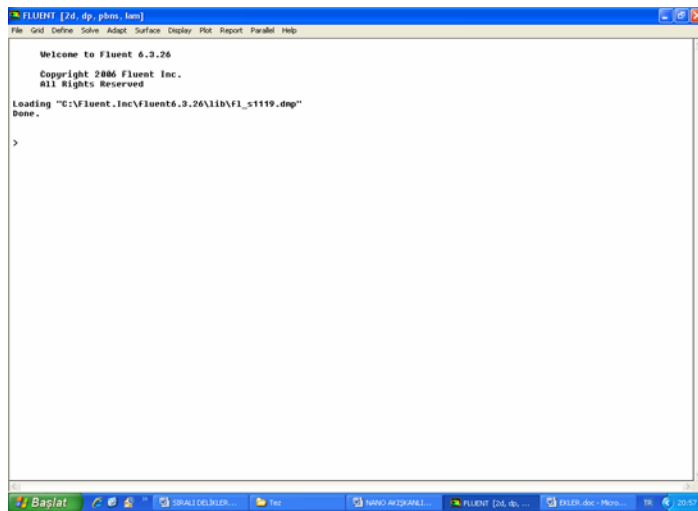
Önce alttaki Entity Mouse ile sol tıklanır burası aktif olduğunda Shift'e basılı tutulurken Mouse'un sol tuşu ile birleştirilecek Entity kısmının karşısına face.21 Apply yapılır (wall2 olarak isimlenir),

File, Save ile kayıt gerçekleştirilir default_id.dbf, default_id.jou, default_id.trn isimli dosyalar oluşturulur.

File, Export, Mesh ile default_id.msh isimli dosya oluşturulur.

Fluent'de yapılan işlemler:

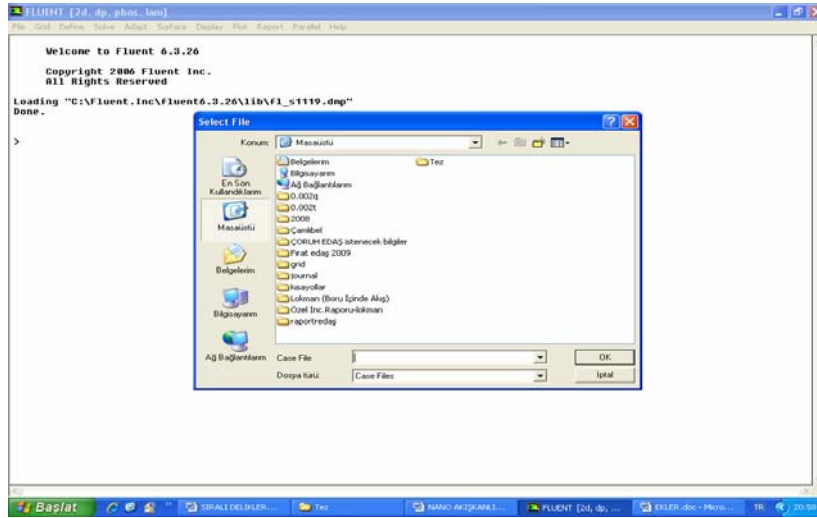
1. Fluent Inc, Fluent 6.3 yolu izlenerek açılan Fluent Versions penceresinde 2ddp seçilerek Run ikonuna basılarak Fluent paket programı çalıştırılır. Açılan pencere aşağıdaki Şekil 4.7 'dedir.



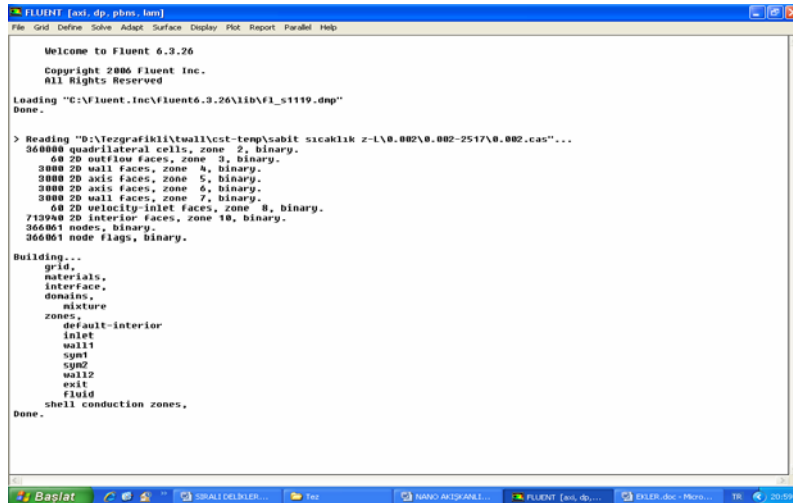
Şekil 4.7. Fluent'in çalıştırılması

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

2. File → Read → Case... kullanılarak default_id.msh. dosya bulunarak Select File penceresinde ok ikonuna basılarak okutulur. Okuma işlemi aşağıda Şekil 4.8 de, okumadan sonraki ekranın son hali Şekil 4.9 da görülmektedir.



Şekil 4.8. Case dosyasının okunması 1



Şekil 4.9. Case dosyasının okunması 2

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

3. Grid → Check... kullanılarak grid yapısı kontrol edilir. Ekranda yazan ifadelerden minimum hacim değerlerine bakılır ve tüm hacimlerin pozitif olması şartının sağlanıp sağlanmadığına bakılır. Çözüm yapabilmek için tüm hacimlerin pozitif olması gerekmektedir. Kontrol işleminden sonra ekranda Şekil 4.9., Şekil 4.10. daki görüntü oluşur.

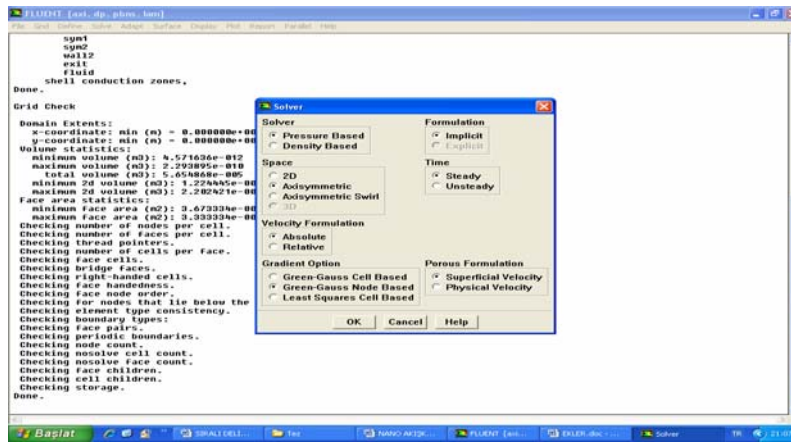


Şekil 4.10. Gridlerin kontrol edilmesi

4. Grid → Scale... kullanılarak açılan Scale Grid penceresinde Grid Was Created In karşısında m seçilerek Scale Grid penceresi kapatılır. Kapatmadan önce Scale Grid Penceresinde yer alan ölçülerin doğru olup olmadığı kontrol edilir, eğer hata varsa scale veya unscale kullanılarak doğru olmaları sağlanır. Scale işlemini esnasında ekran Şekil 4.11. deki hali alır.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

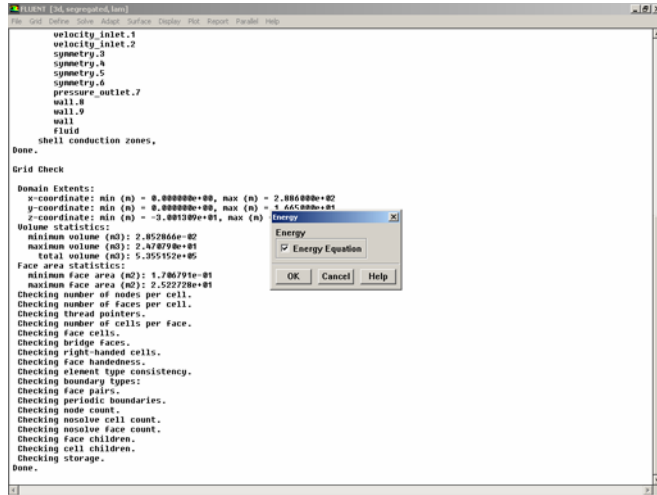
6. Define → Models → Solver... kullanılarak açılan Solver penceresinde hiçbir değişiklik yapılmaz. Çünkü default olarak segregated çözüm seçili durumdadır. Solver penceresi açıkken ekran Şekil 4.13 'deki gibidir. Solver penceresindeki Ok iconu tıklanır.



Şekil 4.13. Çözüm yönteminin seçilmesi

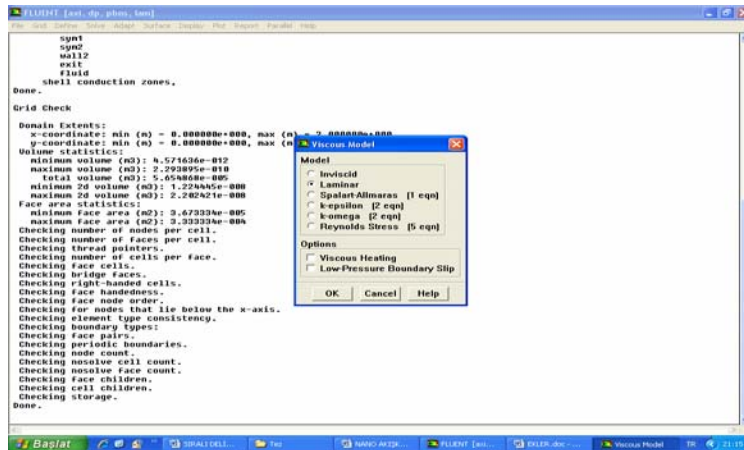
7. Define → Models → Energy... kullanılarak açılan Energy penceresinde Energy Equation aktif hale getirilir. Energy penceresi açıkken ekran Şekil 4.15 deki gibidir. Energy penceresindeki Ok iconu tıklanır.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.15. Enerjinin aktif hale getirilmesi

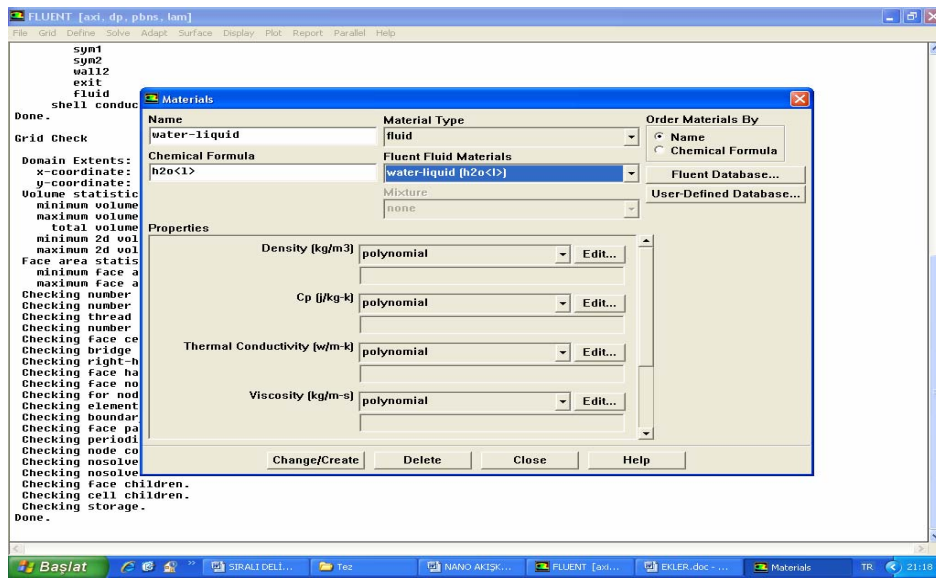
8. Define → Models → Viscous... kullanılarak açılan Viscous Model penceresinde Laminar aktif hale getirilir. Viscous Model penceresi açılken ekran Şekil 4.16 daki gibidir. Viscous Model penceresindeki Ok ikonu tıklanır.



Şekil 4.16. Laminer modelin seçilmesi

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

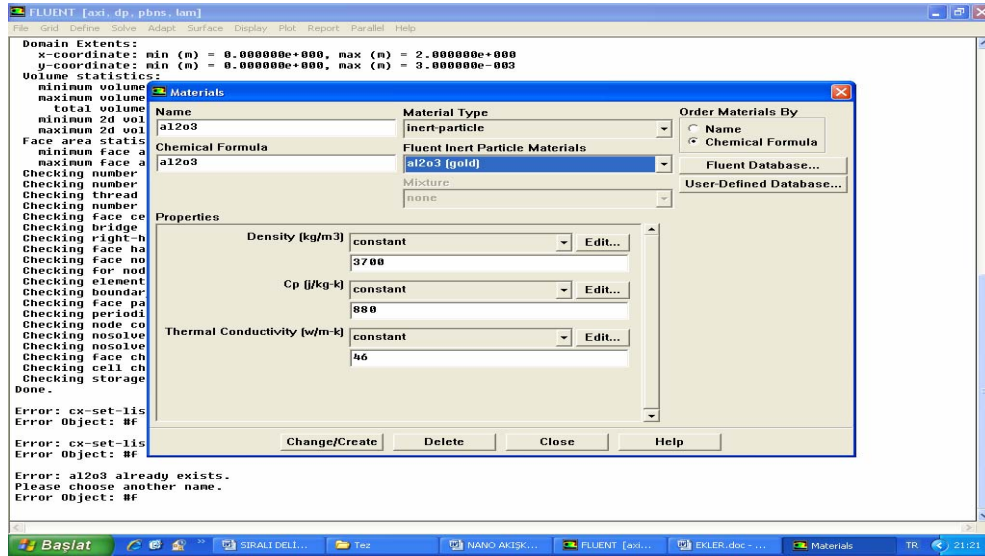
9. Define → Materials... kullanılarak açılan Materials penceresinde fluid aktif hale getirilir, water liquid seçilir ve suyun sıcaklığa bağlı olarak değişen termofiziksel özellikleri girilir ve change/create ikonu tıklanır. Materials Model penceresi açırken ekran Şekil 4.17 deki gibidir.



Şekil 4.17. Suyu ait özelliklerinin seçilmesi

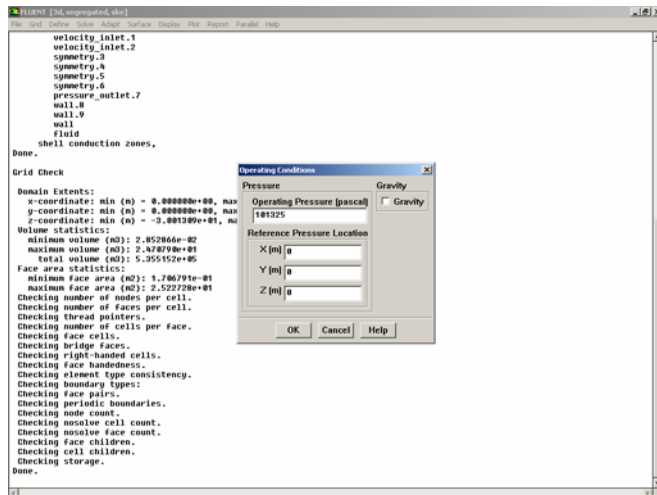
Materials penceresinde nano partiküle ait termofiziksel özellikler girilir ve yine change/create ikonu tıklanır. Close ikonu tıklanır.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.18. Nano partiküle ait özelliklerinin seçilmesi

- Define → Operating Conditions... kullanılarak açılan Operating Conditions penceresinde hiçbir şey değiştirilmez. Operating Conditions penceresindeki Ok ikonu tıklanır.

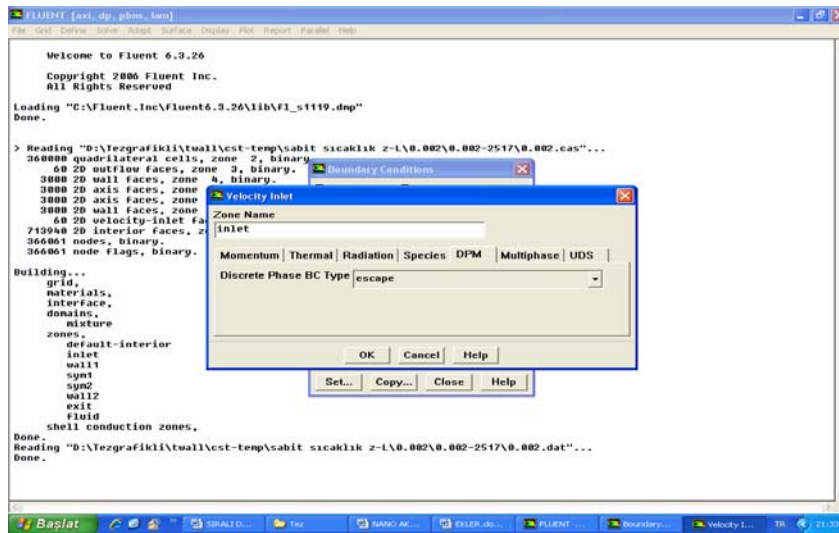


Şekil 4.19. Akışkan özelliklerinin verilmesi

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

11. Define → Boundary Conditions... kullanılarak açılan Boundary Conditions penceresinde sınır şartlarına sırasıyla değerler girilir.

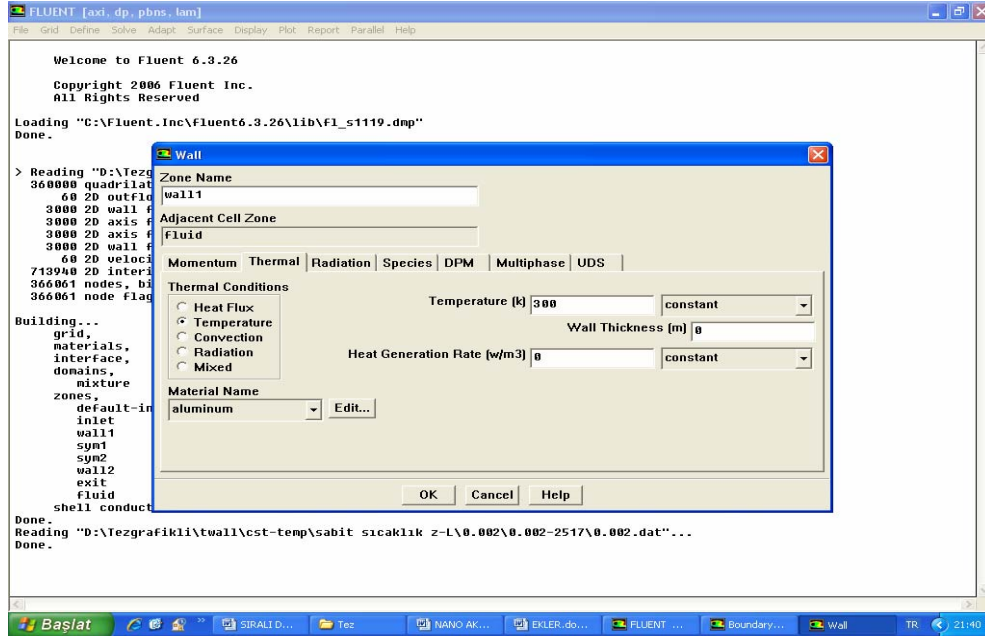
11.1 Boundary Conditions penceresinde velocity_inlet.1 sınır şartı seçilir ve set ikonuna tıklanır, açılan Inlet penceresinde Velocity Magnitude (m/s) değeri girilir, Temperature (k) 300 girilir, ayrıca dpm modeli seçildiği için dpm kısmında escape seçilir. Velocity Inlet penceresi açıkken ekran Şekil 4.20 deki gibidir. Velocity Inlet penceresindeki Ok iconu tıklanır.



Şekil 4.20. akışkan özelliklerinin sınır şartı olarak girilmesi

11.2 Boundary Conditions penceresinde wall1 sınır şartı seçilir ve set ikonuna tıklanır, açılan wall penceresinde Temperature (k) 300 girilir, ayrıca dpm modeli seçildiği için dpm kısmında polynominal seçilir. Boundary cond. type reflect seçilir. wall penceresi açıkken ekran Şekil 4.20 deki gibidir. wall penceresindeki Ok iconu tıklanır.

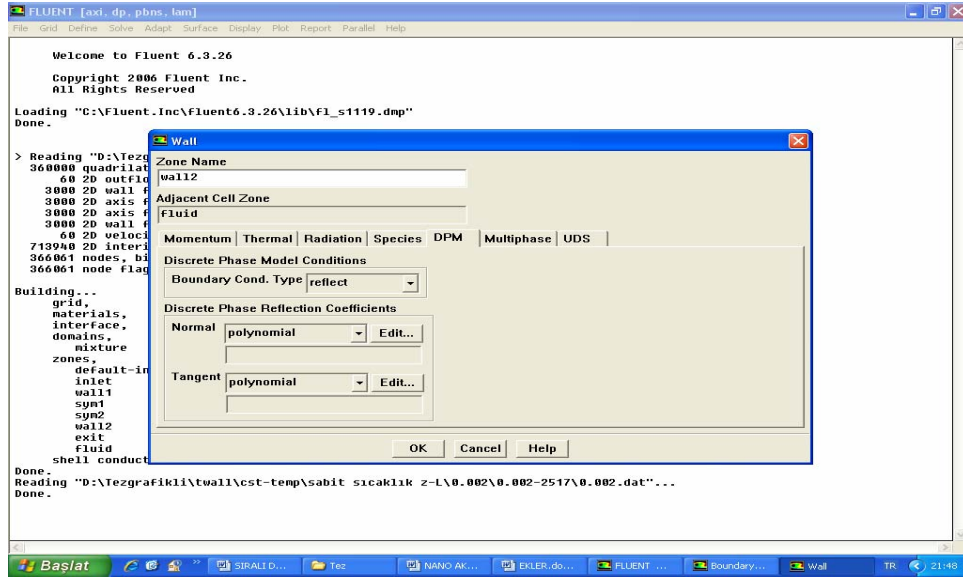
EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.21. Akışkan özelliklerinin sınır şartı olarak girilmesi

- 11.3 Boundary Conditions penceresinde wall2 sınır şartı seçilir ve set ikonuna tıklanır, açılan wall penceresinde sabit duvar sıcaklığında Temperature (k) 373 girilir, sabit ısı akılarında ise $q_w=2500 \text{ w/m}^2$, ve $q_w=7500 \text{ w/m}^2$ girilir, ayrıca dpm modeli seçildiği için dpm kısmında polynominal seçilir. Boundary cond. type reflect seçilir. wall penceresi açıkken ekran Şekil 4.20 deki gibidir. wall penceresindeki Ok iconu tıklanır.

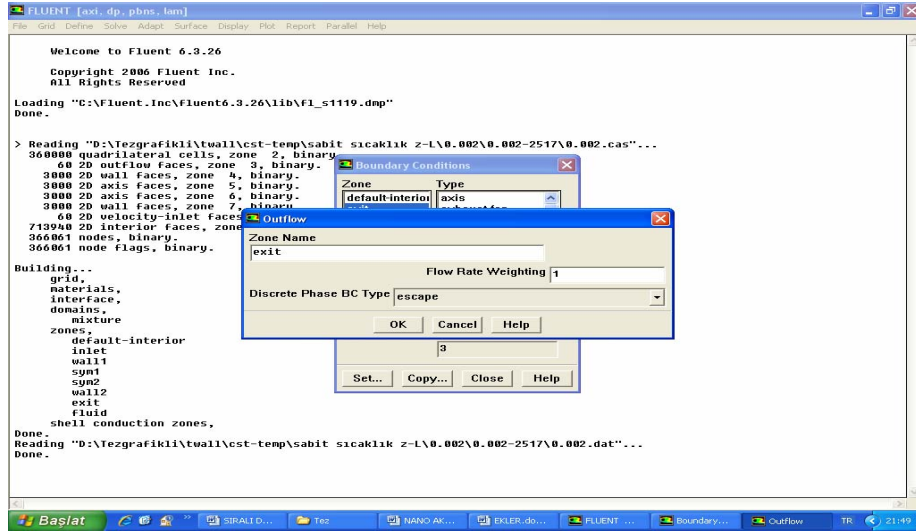
EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.22. Akışkan özelliklerinin sınır şartı olarak girilmesi

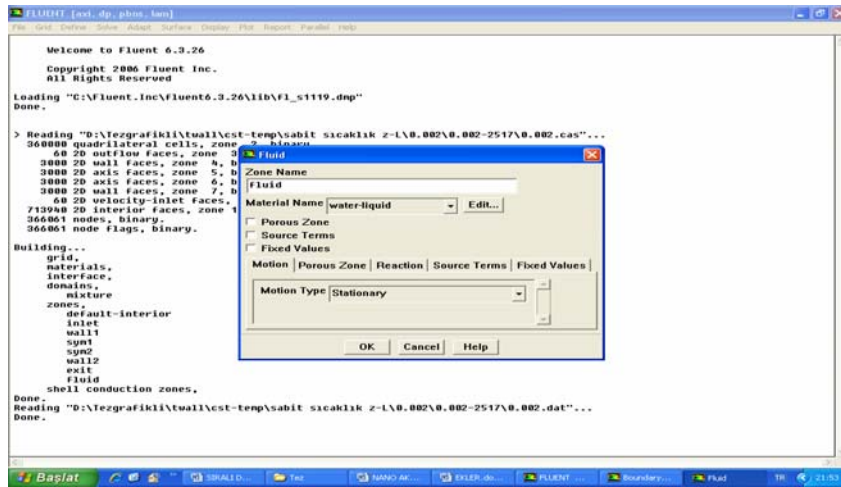
- 11.4 Boundary Conditions penceresinde exit sınır şartı seçilir ve set ikonuna tıklanır, açılan outflow penceresinde zona name kısmına exit girilir. Flow rate kısmına 1 ve dpm kısmına escape girilir. Exit penceresi açıkken ekran Şekil 4.23 deki gibidir. exit penceresindeki Ok iconu tıklanır.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.23. Çıkış yüzeyi özelliklerini sınır şartı olarak girilmesi

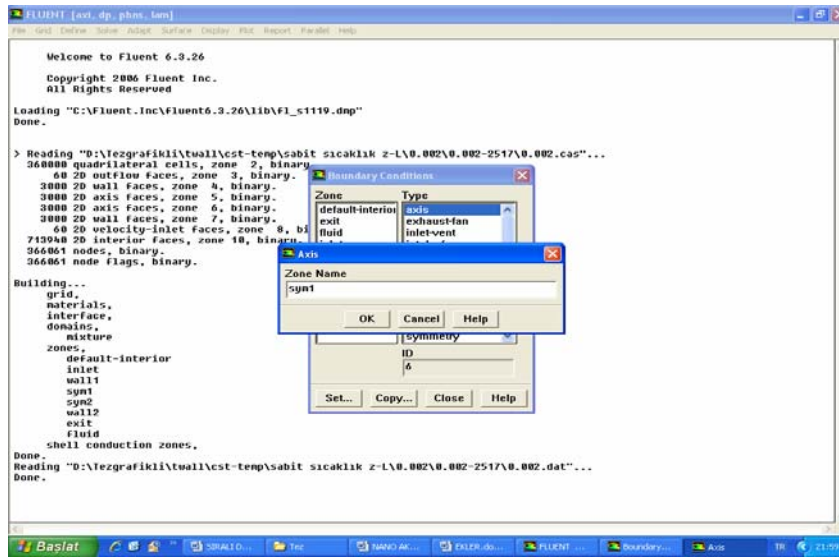
11.5 Boundary Conditions penceresinde fluid sınır şartı seçilir ve Fluid kısmında Zona name seçilir, açılan bölüme fluid girilir ayrıca material kısmına ise water-liquid girilir. liquid penceresi açıkken ekran Şekil 4.23 deki gibidir. liquid penceresindeki Ok iconu tıklanır.



Şekil 4.24. Akışkan özelliklerinin girilmesi

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

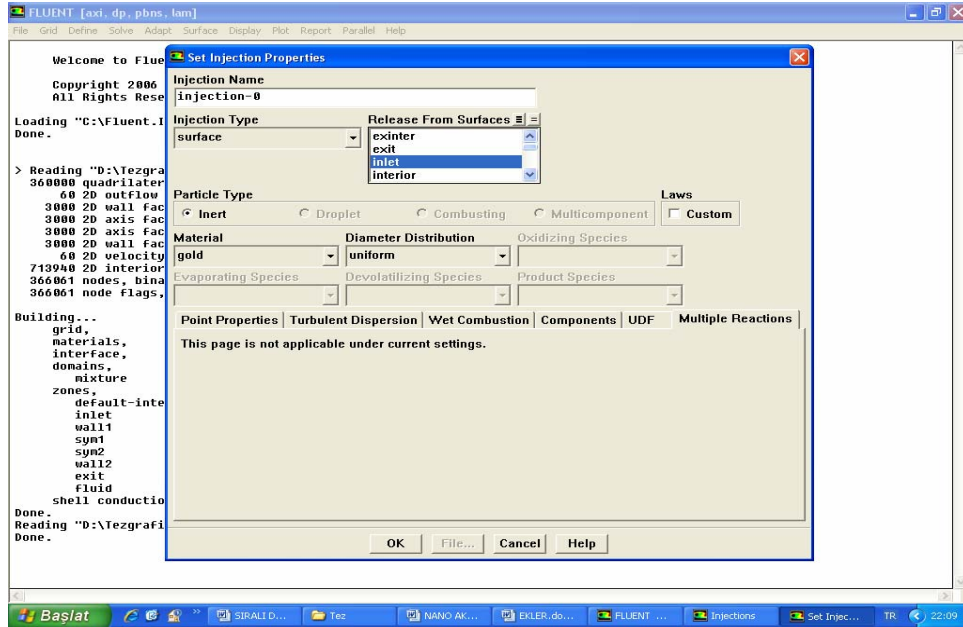
11.6 Boundary Conditions penceresinde sym1 ve sym2 kısımlarına axis sınır şartı seçilir. sym penceresi açıkken ekran Şekil 4.23 deki gibidir. sym penceresindeki Ok iconu tıklanır.



Şekil 4.25. Akışkan özelliklerinin girilmesi

12. Define → Injection... kullanılarak dpm modelinde açılan injection penceresinde injection type kısmında surface seçilir. inlet kısmında Nano partiküle ait sıcaklık, boruya giriş hızı ve debisi ayrıca nano partikül çapı girilir. injection penceresi açıkken ekran Şekil 4.23 daki gibidir. injection penceresindeki Ok iconu tıklanır.

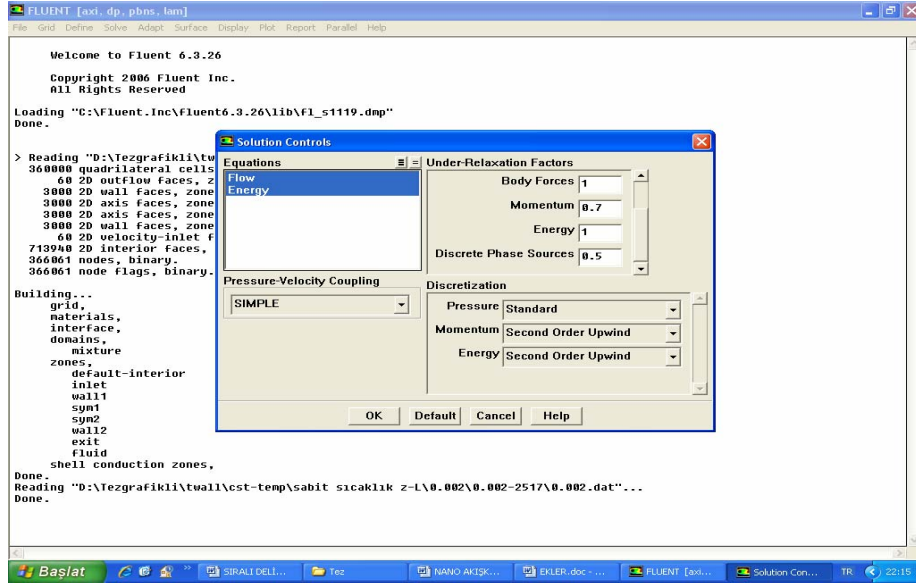
EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.26 Injection kısmında nano partiküle ait verilerin girilmesi

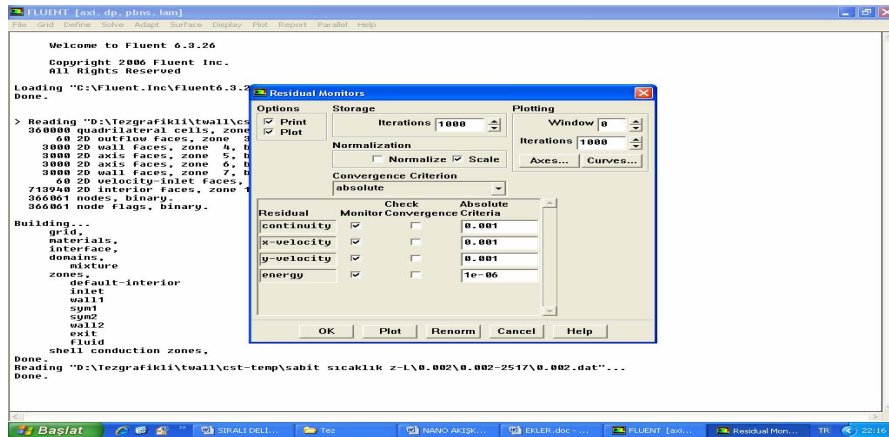
13. Solve → Controls → Solution.... kullanılarak açılan Solution Controls penceresinde Relaxation Factors'ler değiştirilebilir, Discretization'lar değiştirilebilir. Burada flow ve enerji seçilir ayrıca second order upwind seçilir. Solution Controls penceresindeki Ok ikonuna tıklanır. Solution Controls penceresi açıkken ekran Şekil 4.27 deki haldedir.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.27. Relaksasyon parametrelerinin belirlenmesi

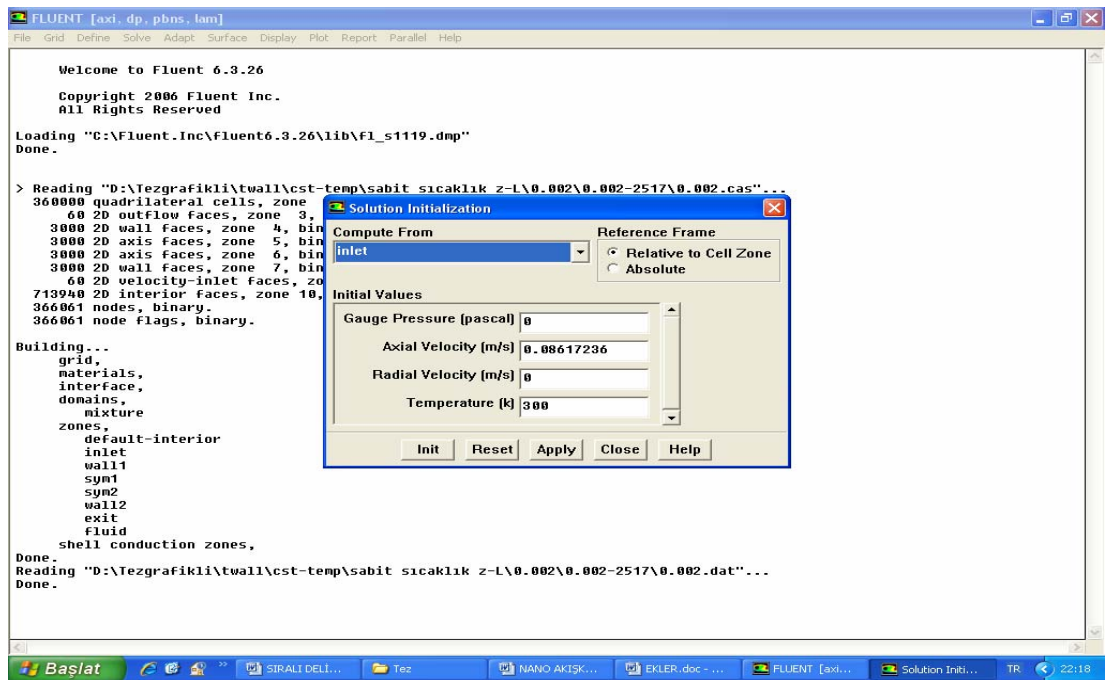
14. Solve → Monitors → Residuals... kullanılarak açılan Residual Monitors penceresinde Convergence Criterion'lar değiştirilebilir, Options kısmında plot aktif hale getirilebilir, aktif hale getiriyoruz. Residual Monitors penceresindeki Ok ikonuna tıklanır. Residual Monitors penceresi açıkken ekran Şekil 4.28 deki haldedir.



Şekil 4.28. Residuallerin belirlenmesi

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

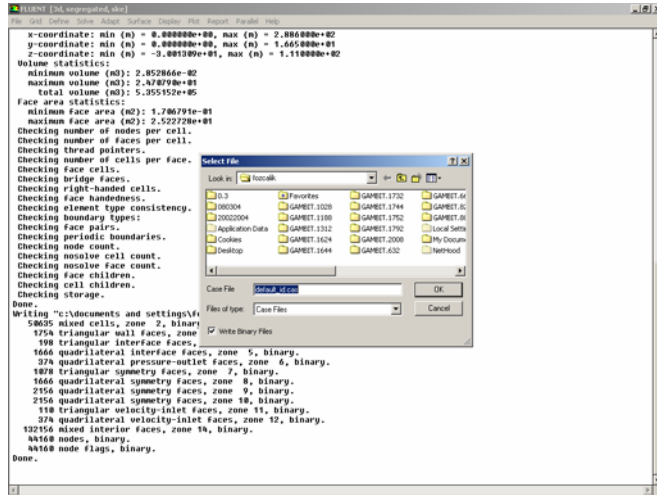
15. Solve → Initialize → Initialize.... kullanılarak açılan Solution Initialization penceresinde Compute From kısmında inlet seçilir ve Init ikonuna tıklanır, sonra Close ikonuna tıklanarak Solution Initialization penceresi kapatılır. Solution Initialization penceresi açıkken ekran Şekil 4.28 daki haldedir.



Şekil 4.29. Solution Initialization kısmının belirlenmesi

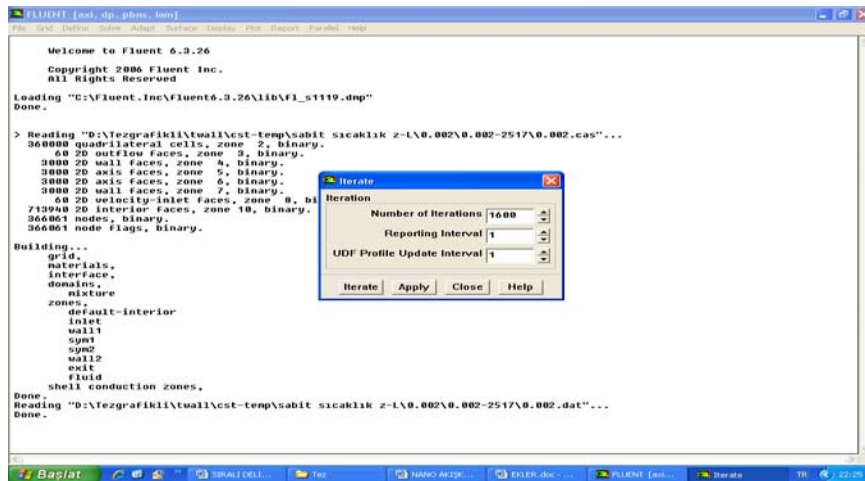
16. File → Write → Case ile son hal kaydedilir, açılan Select File penceresinde (ekran görüntüsü Şekil 4.30 daki şekil) Ok iconu tıklandığında default_id.cas isimli bir dosya kayıt edilir. Ok ikonuna basarak kaydı gerçekleştiririz.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.30. Kayıt alınması

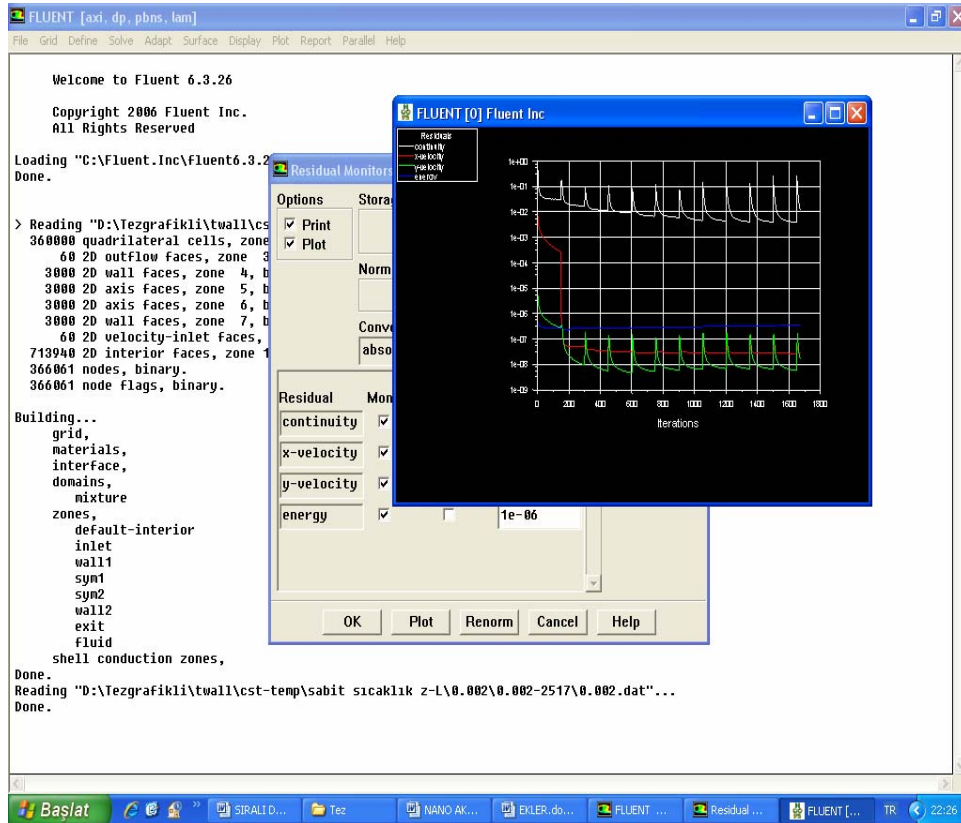
17. Solve $\Rightarrow$ Iterate... kullanılarak açılan Iterate penceresinde Number of Iteration kısmına 1600 değeri girilerek (ekran görüntüsü Şekil 4.31 dedir) Iterate ikonuna tıklanır.



Şekil 4.31. Iterasyon

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

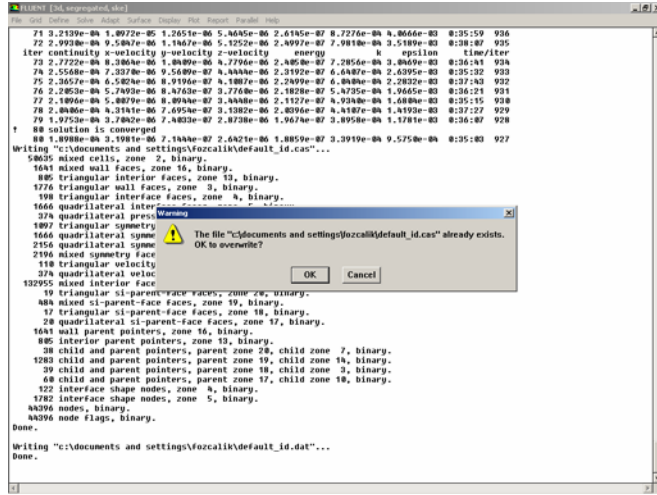
18. 1600 iterasyonda yakınsama sağlandığı için program durdurulur. Yakınsama gerçekleştiğinde ekran Şekil 4.32 deki gibidir.



Şekil 4.32. İterasyonların tamamlanması

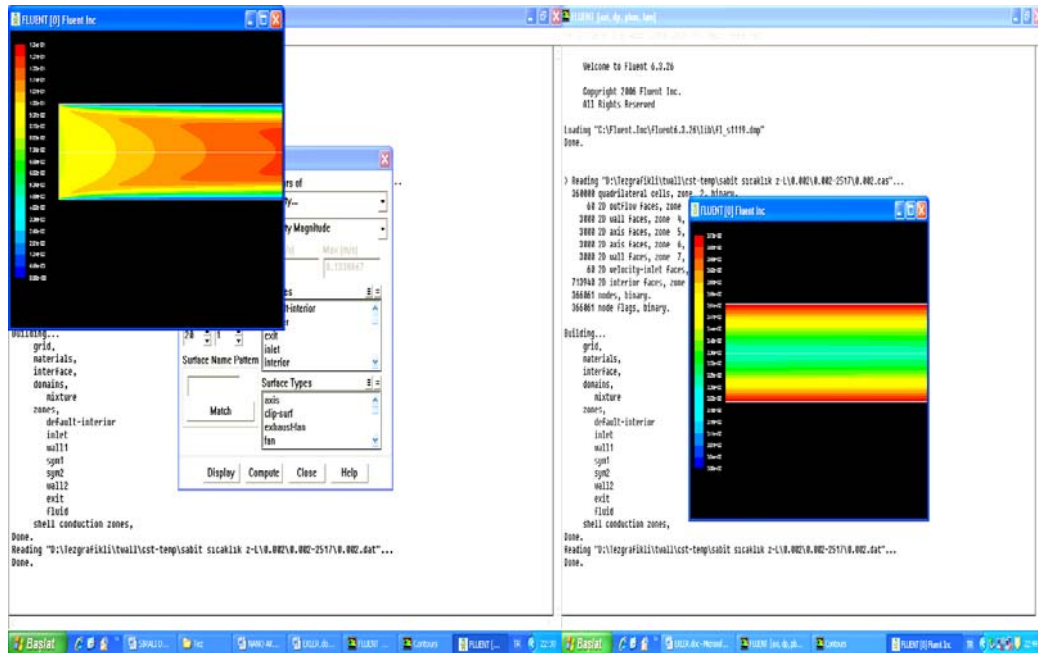
19. File → Write → Case & Data kullanılarak açılan Select File penceresinde (ekranın hali Şekil 4.33 de yer almaktadır) herhangi bir değişiklik yapılmadan Ok ikonuna tıklanarak default_id.cas ve default_id.dat isimli dosyaların kaydedilmeleri sağlanır, fakat default_id.cas mevcut olduğundan bir Warning penceresi (ekranın bu hali aşağıdadır) açılacak mevcudun üzerine kayıt yapmak istediğimizden emin olup olmadığımızın teyidi istenecektir, Warning penceresinde Ok ikonuna tıklarız.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.33. Case ve veri dosyalarının kaydedilmesi

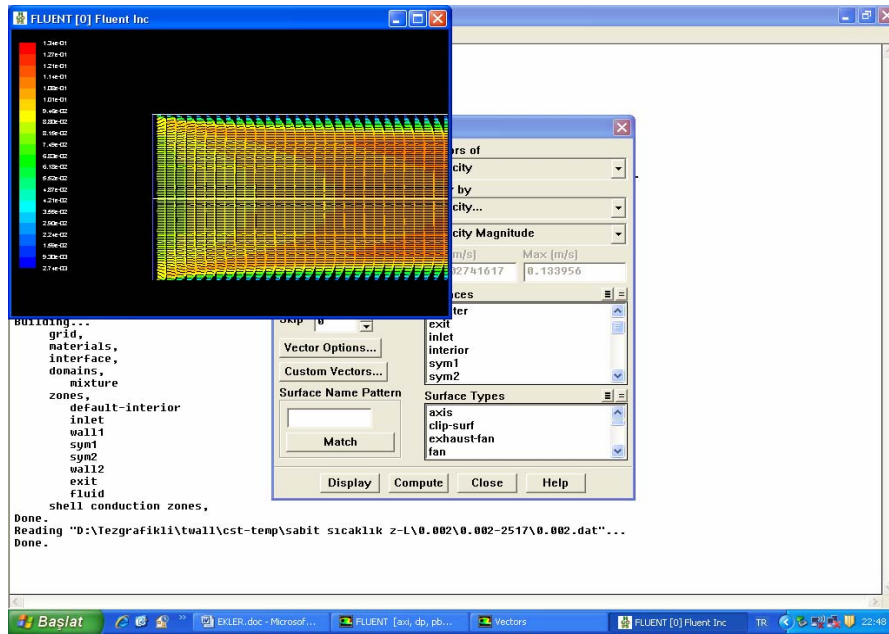
20. Display → Contours → kullanılarak açılan Contours penceresinde Contours Of kısmında velocity ve temperature seçilir, ve Display ikonuna tıklanarak görüntü alınır. Contours penceresi Close ikonuna tıklanarak kapatılır.



Şekil 4.34. Çözümün görüntülenmesi

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

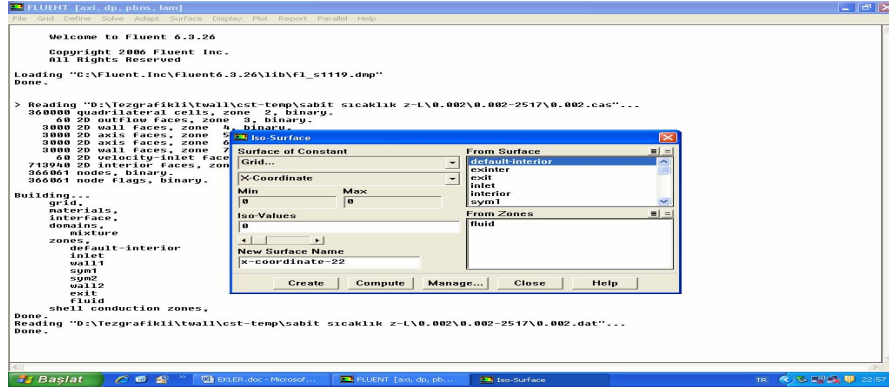
21. Display → Vectors → kullanılarak açılan Vectors penceresinde Vectors Of kısmında Velocity seçilir, Vectors penceresi Close ikonuna tıklanarak kapatılır.



Şekil 4.35. Çözümün görüntülenmesi

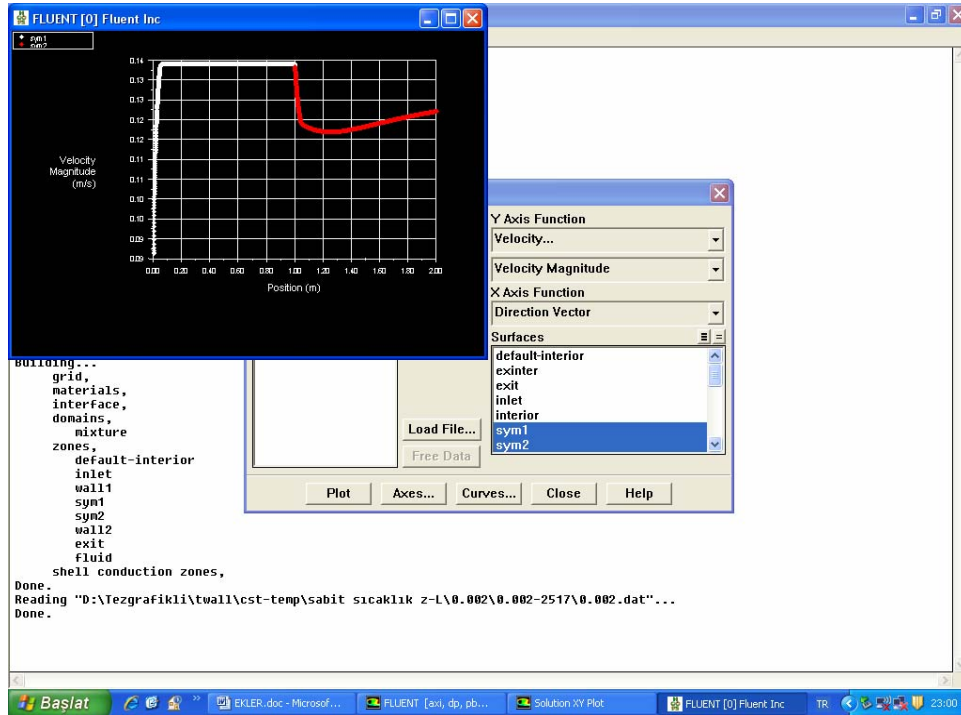
22. Surface → Iso-surface... kullanılarak açılan Iso-Surface penceresinde Grid kısmında $z(0,25): z(0,4): z(0,6): z(0,8): Z(0,9)$: değerleri ile $w(0,25): w(0,4): w(0,6): w(0,8): w(0,9)$: değerleri ayrı ayrı girilerek kesitler oluşturulur. (ekran Şekil 4.36 daki haldedir) Create ikonuna tıklanır, Iso-Surface penceresi Close ikonuna tıklanarak kapatılır.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.36. Kesitlere ait çözümün görüntülenmesi

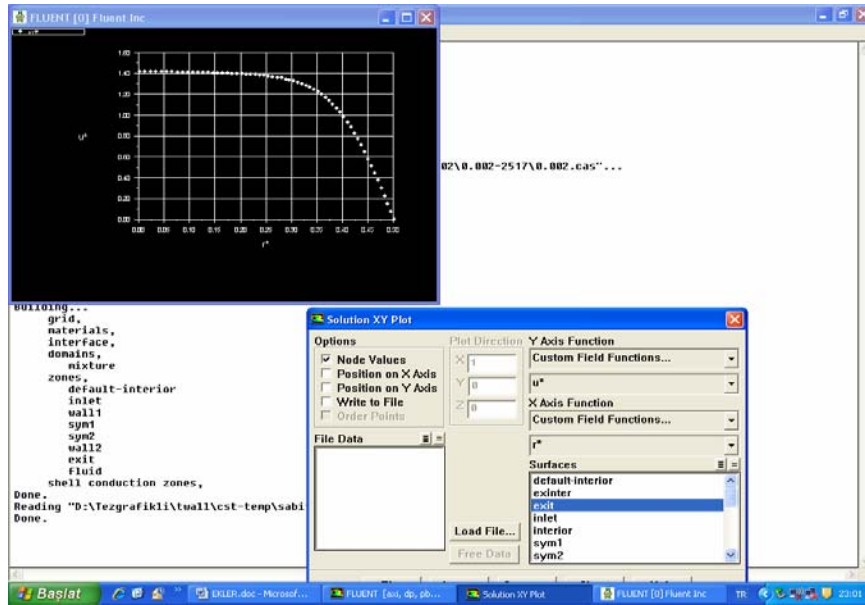
23. Plot → XY Plot... kullanılarak açılan Solution XY Plot penceresinde Y Axis Fonksiyon kısmında velocity seçilir, Sym1 ve sym2 (ekran Şekil 4.37 deki halledir) XY Plot penceresi Close ikonuna tıklanarak kapatılır.



Şekil 4.37. Çözümün görüntülenmesi

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi

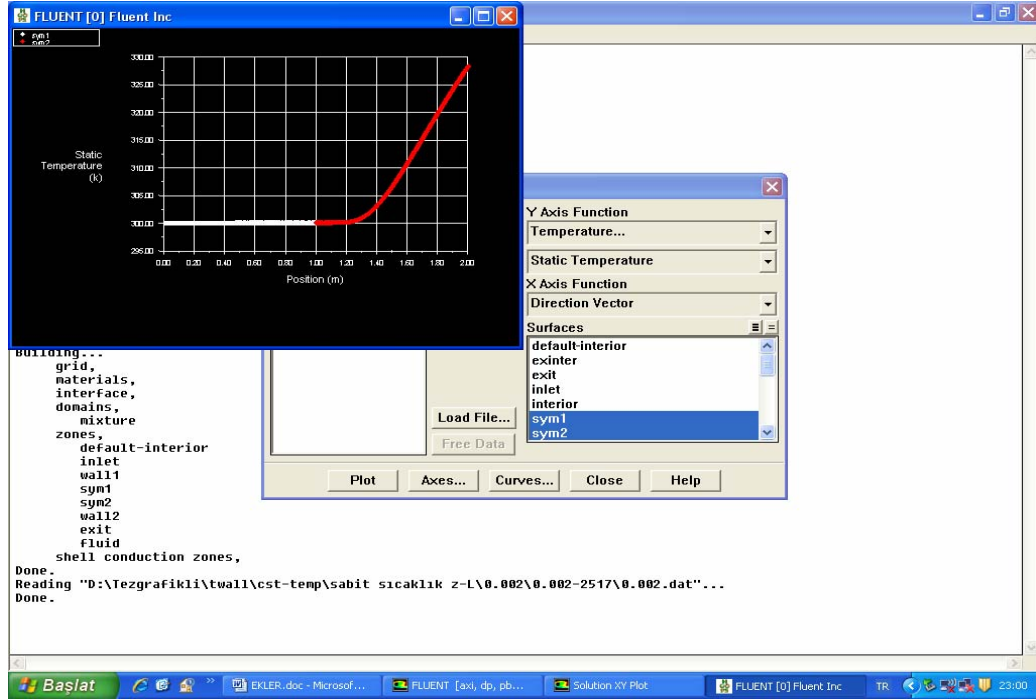
Solution XY Plot penceresinde Plot ikonuna tıklanır ekrana aşağıdaki boyutsuz hız dağılımını gösteren grafiğin yer aldığı pencere açılır (Şekil 4.40), Solution XY Plot penceresi Close ikonuna tıklanarak kapatılır.



Şekil 4.38. Çözümün görüntülenmesi

Solution XY Plot penceresinde Y Axis Fonksion kısmında Temperature seçilir, Sym1 ve sym2 XY Plot penceresi Close ikonuna tıklanarak kapatılır.

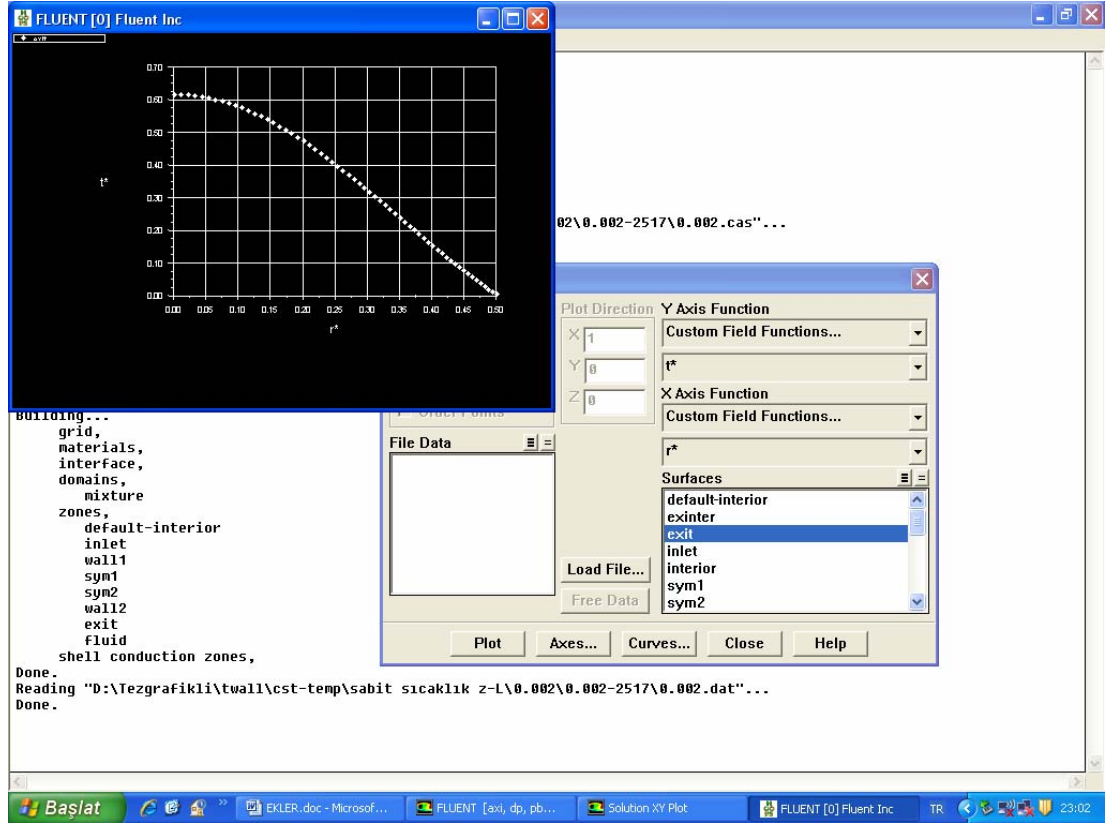
EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.39. Çözümün görüntülenmesi

Solution XY Plot penceresinde Plot ikonuna tıklanır ekrana aşağıdaki boyutsuz sıcaklık dağılımını gösteren grafiğin yer aldığı pencere açılır (Şekil 4.40), Solution XY Plot penceresi Close ikonuna tıklanarak kapatılır.

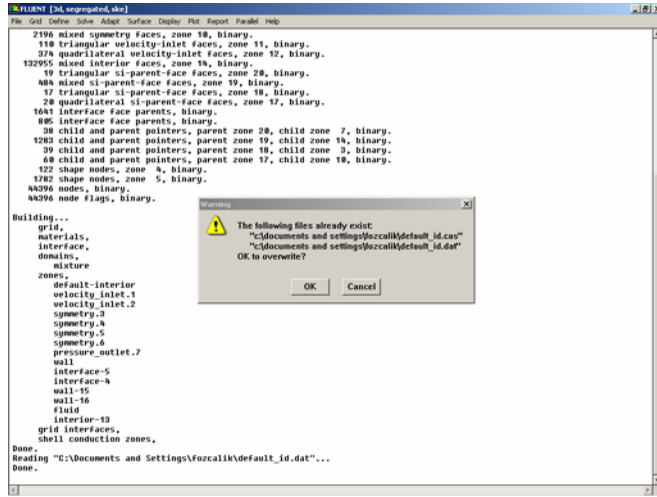
EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.40. Çözümün görüntülenmesi

24. File → Write → Case & Data kullanılarak açılan Select File penceresinde (ekranın hali Şekil 4.41 de yer almaktadır) herhangi bir değişiklik yapılmadan Ok ikonuna tıklanarak default_id.cas ve default_id.dat isimli dosyaların kaydedilmeleri sağlanır, fakat default_id.cas mevcut olduğundan bir Warning penceresi (ekranın bu hali aşağıdadır) açılacak mevcudun üzerine kayıt yapmak istediğimizden emin olup olmadığımızın teyidi istenecektir, Warning penceresinde Ok ikonuna tıklarız.

EK-4 (Devam) Bir örneğin Gambit'te ayrıntılı modellenmesi ve Fluent'de ayrıntılı çözülmesi



Şekil 4.41. Case ve veri dosyalarının tekrar kaydedilmesi

25. File → Exit kullanılarak Fluent programından çıkılır.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : İLBİLGİ, Lokman
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi, ve yeri : 06.01.1970 Bolu
 Medeni hali : Evli
 İş Tel : 0(312) 419 21 45
 Fax : 0(312) 419 16 99
 E-Mail : lokmanilbilgi@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/Makina Mühendisliği	2010
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Makina Mühendisliği	2002
Lisans	Anadolu Üniversitesi/Makina Mühendisliği	1990
Lise	Aydınlıkevler Lisesi	1985

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görevi
2006-.....	Başbakanlık Yüksek Denetleme Kurulu	Başdenetçi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Araştırmaya yönelik makaleler, Doğa ve Doğa Sporları, Bağlama, Yüzme, Tarihi ve Siyasi Kitaplar