

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KENDİNDEN ISITMALI ÇAKIL YATAKLI NÜKLEER
REAKTÖR DENEYLERİNİN OPENFOAM KODU İLE CEBRİ
KONVEKSİYON ISI TRANSFER ANALİZLERİ

EYYÜB POLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİ TİFTİKÇİ

SİNOP - 2023

TEZ KABUL

EYYÜB POLAT tarafından hazırlanan “**KENDİNDEN ISITMALI ÇAKIL YATAKLI NÜKLEER REAKTÖR DENEYLERİNİN OPENFOAM KODU İLE CEBRİ KONVEKSİYON ISI TRANSFER ANALİZLERİ** ” başlıklı bu çalışma, 26.07.2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Cemil KOCAR
Hacettepe Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi

İmza

**Üye
(Danışman)**

Dr. Öğr. Üyesi Ali TİFTİKÇİ
Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Bahram Rashidian MALEKİ
Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Fadime DİRİK

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



EYYÜB POLAT

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KENDİNDEN ISITMALI ÇAKIL YATAKLI NÜKLEER REAKTÖR DENEYLERİNİN OPENFOAM KODU İLE CEBRİ KONVEKSİYON ISI TRANSFER ANALİZLERİ

EYYÜB POLAT

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİ TİFTİKÇİ

Yeni nesil nükleer reaktörlerden olan Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörü (VHTR), yakıt elemanı cinsine göre çakıl yatağı düzeninde olabilir. Bu tipteki reaktörün yakıtı eş boyutlu kürelerdir ve reaktör koruna belli bir düzen olmaksızın yerleştirilmektedir. Reaktör, bu küreler arasında ki gözeneklerden geçen soğutucu ile ısı transferi yapabilmektedir. Korda üretilen ısıyı uzaklaştırma olayı, nükleer reaktörlerin önemli bir güvenlik sorunudur. Bu nedenle reaktör ısı transfer parametrelerinin detaylı bir şekilde, deneysel ve sayısal olarak araştırılması gerekmektedir. Literatürde, çakıl yataklı sistemler için çeşitli düzenekler kurulup veya simülasyonlar yapıp ısı transfer verilerinin özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu ısı transfer olaylarını tahmin etmek için teorik modeller ve yarı deneysel formüller geliştirilmiştir. Bu etkileri araştırmak, doğruluğunu saptamak için çakıl yatağı yapısını karakterize edecek verilere ihtiyaç vardır. Bu nedenle bu çalışmanın odak noktası, akışkanlar mekaniği alanında güncel olarak kullanılmakta olan bir açık kaynak kodu, OpenFOAM ile çakıl yataklı nükleer reaktör sistemlerinde ısı akış modellemelerinin cebri konveksiyon benzeşimleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu tez kapsamında, TÜBİTAK - NRF (Güney Kore) İkili İşbirliği Projesi olarak yürütülen deneysel ve sayısal (simülasyon) çalışmalarında $d=0,004$ m, $d=0,010$ m küre çapları ve H/d (5,10 ve 20) oranlarında; sıcaklık, hız, türbülans kinetik enerji dağılımları ve Nusselt sayıları için cebri konveksiyon ile ısı transferi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, G. Kore tarafınca yapılan deneysel cebri konveksiyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Çakıl Yatağı; OpenFOAM; Cebri Konveksiyon; Türbülans; Isı Transferi

Temmuz 2023, 126 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

FORCED CONVECTION HEAT TRANSFER ANALYZES OF SELF-HEATING PEBBLE BED NUCLEAR REACTOR EXPERIMENTS WITH OPENFOAM CODE

EYYÜB POLAT

**SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS
DEPARTMENT OF NUCLEAR ENERGY ENGINEERING
SUPERVISOR:ASST. PROF. DR. ALİ TİFTİKÇİ**

The Very High-Temperature Reactor (VHTR), which is one of the new generation nuclear reactors, can be in a packed bed arrangement depending on the type of fuel elements. The fuel of this type of reactor is spheres of the same size and are placed in the reactor core in no particular order. The reactor can transfer heat with the coolant passing through the pores between these spheres. The phenomenon of removing the heat produced in the core is an important safety issue of nuclear reactors. For this reason, reactor heat transfer parameters should be investigated in detail, experimentally, and numerically. In the literature, various mechanisms have been set up or simulations have been made for packed bed systems and the properties of the heat transfer data have been compared. Theoretical models and quasi-experimental formulas have been developed to predict these heat transfer phenomena. To investigate these effects and to determine their accuracy, data to characterize the packed bed structure are needed. Therefore, the focus of this study is to compare the forced convection simulations of thermal flow modeling pebble bed nuclear reactor systems with experimental data with OpenFOAM, an open-source code currently used in the field of fluid mechanics. Within the scope of this thesis, in experimental and numerical (simulation) studies carried out as a TÜBİTAK - NRF (South Korea) Bilateral Cooperation Project, sphere diameters of $d=0.004$ m, $d=0.010$ m and H/d (5.10 and 20) ratios; heat transfer calculations with forced convection were performed for temperature, velocity, turbulent kinetic energy distributions and Nusselt numbers. The results were compared with the results of experimental forced convection by South Korea.

KEYWORDS: Pebble Bed; OpenFOAM; Forced Convection; Turbulence; Heat Transfer

July 2023, 126 Pages

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli tavsiyeleri ve sonsuz sabrı ile yapılan bu çalışmanın her aşamasında eşsiz bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yol gösterici olan bu süreçte gösterdiği anlayış ve yardımları için tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ali TİFTİKÇİ hocama en derin dileklerimle teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her döneminde daimî desteği ile yanımda olan babam Abdullah POLAT ve annem Naile POLAT’a sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına, 120N935 numaralı “VHTR (Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörü) Çakıl Yatağı Isı Transferi Araştırması” projesi kapsamında vermiş oldukları maddi destekten dolayı, TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Ayrıca, bu proje kapsamında verdikleri destekten dolayı Sinop Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’ne teşekkür ederim.

Bu araştırmada yer alan tüm/kısmi nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi’nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

Eyyüb POLAT

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD).....	6
2.2. Reynolds Sayısı	7
2.3. Prandtl Sayısı	8
2.4. Nusselt Sayısı	9
2.5. Sonlu Hacim Metodu.....	9
2.5.1. Yarı ayrıklaştırılmış denklem.....	10
2.5.2. Sınır şartları.....	10
2.5.2.1. Dirichlet ve Neumann sınır koşulu	11
2.5.3. Kapalı ve açık sayısal yöntemler	11
3. TÜRBÜLANS	13
3.1. Reynolds Ortalama	14
3.2. Türbülans Modelleri	17
3.2.1. Cebirsel model.....	17
3.2.2. Tek denklem türbülans modeli	17
3.2.2.1. Spalart-Allmaras model	17
3.2.3. İki denklem türbülans modeli.....	19
3.2.3.1. $k - \varepsilon$ modeli.....	20
3.2.3.2. $k - \omega$ modeli	20

3.2.3.3. $k - \tau$ modeli	21
3.2.3.3. Diğer türbülans modelleri	22
3.2.4. Büyük girdap simülasyonu (LES)	23
3.2.4.2. Smagorinsky-Lilly türbülans modeli	24
3.2.4.3. Duvara adapte yerel girdap viskozitesi modeli (WALE).....	25
4. OPENFOAM	26
4.1. 0 Klasörü	26
4.2. Constant (Sabit) Klasörü.....	27
4.3. System (Sistem) Klasörü.....	27
4.3.1. controlDict.....	27
4.3.2. fvSchemes	28
4.3.3. fvSolution.....	30
4.4. Çözücüler	30
4.5. Örgü	32
4.5.1. BlockMesh	32
4.5.2. SnappyHexMesh.....	33
4.5.3. checkMesh (örgü kontrolü)	35
4.5.4. Salome.....	36
4.5.4.1. Geometri.....	37
4.5.4.2. Salome’de örgü.....	37
4.5.4.3. Şekillendirici	39
4.6. Modeller ve Fiziksel Özellikler	40
4.6.1. Openfoam’da sınır koşulları.....	40
4.6.2. Termodinamik modeller	41
4.6.3. Openfoam’da türbülans modelleri	44
4.6.3.1. $k - \omega$ SST (kayma gerilimi aktarımı) türbülans modeli	45
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	47
5.1. Çakıl Yatağı Deney Düzenegi.....	47
5.2. Kürelerin Modellenmesi	51
5.3. Geometrinin Modellenmesi.....	53
5.4. Sınır ve Giriş Koşulları	56
5.5. Çözücüler ve Şemalar	60

6. BULGULAR	63
6.1 Simülasyon Sonuçları	63
6.1.1. $d=0,004$ m ile $H/d=5$, $H/d=10$ ve $H/d=20$ paket yatak geometrileri	64
6.1.1.1. $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için laminar akış durumu ($Re_d=45$)	64
6.1.1.2. $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için türbülans akış durumu ($Re_d=1947$)	67
6.1.1.3. $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için Nusselt sayısı	69
6.1.1.4. $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için laminar akış durumu ($Re_d=45$)	70
6.1.1.5. $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için türbülans akış durumu ($Re_d=1947$)	73
6.1.1.6. $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için Nusselt sayısı	76
6.1.1.7. $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için laminar akış durumu ($Re_d=45$)	77
6.1.1.8. $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için türbülans akış durumu ($Re_d=1947$)	80
6.1.1.9. $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için Nusselt sayısı	83
6.1.2. $d=0,010$ m ile $H/d=5$, $H/d=10$ ve $H/d=20$ paket yatak geometrileri	85
6.1.2.1. $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için laminar akış durumu ($Re_d=50$)	85
6.1.2.2. $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için türbülans akış durumu ($Re_d=3094$)	87
6.1.2.3. $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için Nusselt sayısı	89
6.1.2.4. $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için laminar akış durumu ($Re_d=50$)	90
6.1.2.5. $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için türbülans akış durumu ($Re_d=3094$)	93
6.1.2.6. $d=0,010$ m, $H/d=10$ için Nusselt sayısı	96
6.1.2.7. $d=0,010$ m, $H/d=20$ için laminar akış durumu ($Re_d=50$)	97
6.1.2.8. $d=0,010$ m, $H/d=20$ için türbülans akış durumu ($Re_d=3094$)	99
6.1.2.9. $d=0,010$ m, $H/d=20$ için Nusselt sayısı	102
7. SONUÇ	104
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ	105

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1 OpenFOAM'da kullanılan çözücüler	48
Tablo 4.2 BlockMeshDict'te kullanılan anahtar sözcükler	50
Tablo 4.3 Simülasyonda kullanılan termo tipleri.....	60
Tablo 4.4 Simülasyonda kullanılan pureMixture alt sözlüğü	60
Tablo 4.5 OpenFOAM'da yer alan türbülans modelleri	61
Tablo 5.1 Deneysel veriler.....	65
Tablo 5.2 Kürelerin özellikleri.....	49
Tablo 5.3 Simülasyonda kullanılan örgü sayıları.....	73
Tablo 5.4 Simülasyonda kullanılan sınır koşulları.....	74
Tablo 5. 5 Simülasyonda kullanılan giriş hızı verileri	75
Tablo 5.6 Simülasyonda kullanılan fvSolution sözlüğü.....	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 HAD uygulama alanları	24
Şekil 2.2 Reynolds sayısının yükselmesiyle kare şeklindeki bir geometride artan akış çizgileri.....	25
Şekil 2.3 Prandtl sayısının yükselmesiyle kare şeklindeki bir geometirde artan akış çizgileri.....	25
Şekil 3.1 a) $Re = 2 \times 10^4$ ve b) $Re = 2 \times 10^5$ 'te bir küreden geçen akış	31
Şekil 4.1 İç yüzler için dikey olmamanın tanımı	52
Şekil 4.2 Sınır yüzleri için dikey olmamanın tanımı.....	52
Şekil 5.1 Çaplarına göre kürelerin paket yatakları.....	65
Şekil 5.2 Paket yatakların boyutları	65
Şekil 5.3 NRF (Güney Kore) İkili İşbirliği Projesi kapsamında Güney Kore tarafının yapmış olduğu cebri konveksiyon deney düzeneği	67
Şekil 5.4 a) Isıtılmamış küreler b) Isıtılmış küreler	68
Şekil 5.5 Rastgele yığılmış küre geometrisi	69
Şekil 5.6 Küre geometrisinin örgü görüntüleri	70
Şekil 5.7 Silindir geometrisinin örgü yapısı	71
Şekil 5.8 Silindir geometrisinin üstten örgü görünümü	71
Şekil 5.9 Geometrinin z-ekseni içinden görünümü.....	72
Şekil 6.1 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri	81
Şekil 6.2 a) $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için hız alanı şekli	82
Şekil 6.3 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık profilleri.....	83
Şekil 6.4 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri	83
Şekil 6.5 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri	84

Şekil 6.6 a) $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için hız alanı şekli	85
Şekil 6.7 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık profilleri.....	85
Şekil 6.8 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri	86
Şekil 6.9 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri	86
Şekil 6.10 $d=0,04$ m ve $H/d=5$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri	87
Şekil 6.11 a) $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için hız alanı şekli	88
Şekil 6.12 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık profilleri.....	89
Şekil 6.13 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için hız profilleri	89
Şekil 6.14 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	90
Şekil 6.15 a) $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için hız alanı şekli	91
Şekil 6.16 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık profilleri.....	92
Şekil 6.17 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için hız profilleri	92
Şekil 6.18 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	93
Şekil 6.19 $d=0,04$ m ve $H/d=10$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri.....	94
Şekil 6.20 a) $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için hız alanı şekli	95
Şekil 6.21 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık profilleri.....	96
Şekil 6.22 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için hız profilleri	96
Şekil 6.23 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	97
Şekil 6.24 a) $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için hız alanı şekli	98
Şekil 6.25 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık profilleri.....	99

Şekil 6.26 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için hız profilleri	99
Şekil 6.27 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	100
Şekil 6.28 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri	100
Şekil 6.29 $d=0,004$ m ile $H/d=5$, $H/d=10$ ve $H/d=20$ paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için OpenFOAM simülasyonlarından ve mevcut korelasyonlardan elde edilen Nu değerleri	101
Şekil 6.30 a) $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için hız alanı şekli	102
Şekil 6. 31 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık profilleri.....	103
Şekil 6.32 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri	103
Şekil 6.33 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	104
Şekil 6.34 a) $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için hız alanı şekli	104
Şekil 6.35 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık profilleri.....	105
Şekil 6.36 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri	106
Şekil 6.37 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	106
Şekil 6.38 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri	107
Şekil 6.39 a) $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için hız alanı şekli	108
Şekil 6.40 $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık profilleri.....	109
Şekil 6.41 $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için hız profilleri	109
Şekil 6.42 $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	110
Şekil 6.43 a) $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için hız alanı şekli	111
Şekil 6.44 $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık profilleri.....	112

Şekil 6.45 $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için hız profilleri	112
Şekil 6.46 $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	113
Şekil 6.47 $d=0,010$ m ve $H/d=10$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri	113
Şekil 6.48 a) $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için hız alanı şekli	114
Şekil 6.49 $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık profilleri.....	115
Şekil 6.50 $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için hız profilleri	115
Şekil 6.51 $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	116
Şekil 6.52 a) $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için hız alanı şekli	117
Şekil 6.53 $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık profilleri.....	118
Şekil 6.54 $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için hız profilleri	118
Şekil 6.55 $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için kayma dağılımı gerilimi profilleri.....	119
Şekil 6.56 $d=0,010$ m ve $H/d=20$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri	119
Şekil 6.57 $d=0,010$ m ile $H/d=5$, $H/d=10$ ve $H/d=20$ paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için OpenFOAM simülasyonlarından ve mevcut korelasyonlardan elde edilen Nu değerleri	120

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$\int$	: İntegral
$\bar{U}$	: Zaman ortalamalı hız
∂	: Kısmi türev
Δ	: Delta
$\oint$	: Kontür integrali
K	: Kelvin
$\cdot$	: İç çarpım operatörü
A	: Amper
C	: Eşitlik sabiti
c_p	: Sıvının özgül ısısı
e	: İç enerji
f	: Eliptik sönümleme işlevi
ft	: Adım
h	: Konvektif ısı transfer katsayısı
J	: Joule
k	: Sıvının termal iletkenliği
k	: Türbülans kinetik enerjisi
kg	: Kilogram
L	: Karakteristik uzunluk
ℓ	: Türbülans uzunluk ölçeği
lbm	: Libre
m	: Metre
m^2	: Metrekare
N	: Navier-Stokes operatörü
p	: Basınç
S	: Yüzey vektörü
s	: Saniye
U	: Akış hızı
u'	: Hız dalgalanmalarının ortalama karekökü
α	: Termal yayılım
Γ	: Gama
μ	: Sıvının dinamik viskozitesi
ν	: Sıvının kinematik viskozitesi
ρ	: Sıvının yoğunluğu
τ	: Tau
ϕ	: Fi
ψ	: Psi
ω	: Türbülans dağılım oranı
∇	: Del veya nabla
δ	: Delta
ϵ	: Viskoz dağılım oranı
W	: Watt

Kısaltmalar

0D	: Boyutsuz
2-D	: İki boyut
3-D	: 3 boyut
6-DoF	: Altı serbestlik derece
BREP	: Sınır gösterimi
CAD	: Bilgisayar destekli dizayn
CAE	: Bilgisayar destekli mühendislik
CGNS	: HAD Genel Gösterim Sistemi
CuSO₄	: Bakır sülfat
DES	: Ayrılmış girdap simülasyonu
DILU	: Diyagonal-eksik asimetrik sistemler
DNS	: Doğrudan Sayısal Simülasyon
G/Ç	: Girdi/Çıktı
GAMG	: Genelleştirilmiş geometrik cebirsel çok örgülü
GMF	: Oyun modeli formatı
GUI	: Grafiksel kullanıcı arabirimi
H₂SO₄	: Sülfürik asit
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
I-DEAS	: Entegre Tasarım ve Mühendislik Analiz Yazılımı
IEA	: Ulusal Enerji Ajansı
IGES	: Küresel Çevre Stratejileri Enstitüsü
INSAG	: Uluslararası Nükleer Güvenlik Danışma Grubu
LES	: Büyük Girdap Simülasyonu
MED	: Çok ölçekli elektrofizyoloji verileri
NRF	: Kore Ulusal Araştırma Vakfı
Nu	: Nusselt sayısı
OpenFOAM	: Açık Kaynak Alan Operasyonu ve Manipülasyonu
PISO	: Basınç-Hız Hesaplama Prosedürü
Pr	: Prandtl sayısı
Pr_t	: Türbülans Prandtl sayısı
RANS/RAS	: Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri
Re	: Reynolds sayısı
Re_{dh}	: Hidrolik Reynolds sayısı
RG	: Normalleştirme Grubu
RSM	: Reynolds Gerilim Denklemi Modeli
SAS	: Ölçek Uyarlamalı Simülasyon
SGI	: Gerinim ölçer amplifikatörü
SGS	: Örgü Altı Ölçekli Gerilim
SHM	: Sonlu Hacim Metodu
SIMPLE	: Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı Örtük Yöntem
SSG	: Speziale, Sarkar ve Gatski
SST	: Kayma Gerilimi Aktarımı
STEP	: Ürün Verilerinin Değişim Standardı
STL	: Stereolitografi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
UNV	: Evrensel Dosya Biçimi

US DOE	: Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı
US EIA	: Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgisi İdaresi
USPC	: Amerika Birleşik Devletleri Patent Sınıflandırma
v2	: Türbülans gerilimi
VTK	: Görselleştirme Araç Seti
WALE	: Duvara adapte yerel girdap
WNA	: Dünya Nükleer Derneği



1. GİRİŞ

Nükleer santraller şu anda dünya elektriğinin yaklaşık %10'unu karşılamakta (IEA, 2020) ve milyonlarca insan için temiz, güvenilir, uygun fiyatlı elektrik üretmektedir. Yerkabuğundaki radyoaktif minerallerin bolluğu nedeniyle, nükleer enerjiden, radyoaktif maddeler güvenli bir şekilde kontrol altına alındığı sürece, makul fiyatlı sınırsız bir enerji kaynağı elde edilmesi mümkün olacaktır (Krivit ve Lehr, 2011). Nükleer reaktörlerden elektrik üretimi 1950'lerde başlamış ve 1960'lardan 1980'lere kadar hızlı bir büyüme göstermiştir. 1979'daki "Three Mile Island Unit 2" kazası (USPC, 1979; Gochfeld, 2022) ve 1986'daki "Chernobyl Unit 4" kazasından (IAEA ve INSAG, 1992; WNA, 2016) sonra gelişmiş ülkelerde nükleer enerjinin büyümesi yavaşlamıştır; ancak büyüme, Çin ve Hindistan gibi büyük Asya ülkelerinde artmıştır. Nükleer enerji ile dünya elektrik üretiminin gelecekte yavaş yavaş artacağı ve payının 2030'larda gelişmelere bağlı olarak yükseleceği tahmin edilmektedir (Tvehlov, 2002). Bunun ana sebeplerinden biri de birçok ülkenin iklim değişikliğiyle mücadele etmek için sera gazı emisyonlarını azaltmayı taahhüt etmesidir. Bu bağlamda, çevresel avantajları, güvenlik kaydı, yüksek güç yoğunluğu, bağımsız ve istikrarlı enerji güvenliği sunması nedeniyle nükleer enerji kullanımı, birçok ülke için tercih edilen elektrik üretim yöntemlerinden biridir.

Nükleer enerji, dünya çapında uzun vadeli sürdürülebilir enerjinin çok önemli bir parçasıdır. Ancak günümüz şartlarında, hem toplum tarafından kabul edilebilir hem de çekici seçenekler sunan ve devrimsel gelişim niteliği taşıyan yeni nükleer enerji sistemlerinin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmalıdır. Sanayi devriminden bu yana, tüm teknolojik alanlarda böyle bir hedefe ancak inovasyon yoluyla ulaşılabileceği ve teknolojiyi yeni gereksinimlere uyarlamanın gerekli olduğu görülmüştür (Greenspan, 2021). Bu bakımdan, günümüzde 4. Nesil (Gen IV) olarak adlandırılan reaktör tasarımları için araştırma-geliştirme faaliyetleri devam etmektedir. Sürdürülebilirlik, yüksek ekonomi ve verimlilik, gelişmiş güvenlik, güvenilirlik, atık minimizasyonu, çoğalma direnci ve çevre dostu olmak için, 4. Nesil nükleer santrallerin geliştirilmesi faaliyetleri 2000 yılında "Nesil IV Uluslararası Forumu (GIF)" ile başlatılmıştır (US DOE, 2002). GIF'in mevcut on dört üyesi, dünyanın önde gelen nükleer teknoloji uluslarının bu nükleer enerji sistemlerini geliştirmeye yönelik ortak çabalarına rehberlik etmektedir. Uzun vadeli araştırma projeleri için GIF (US EIA, 2011) tarafından üretilen teknoloji yol

haritası, 4. Nesil nükleer reaktörlerden, altı nükleer reaktör teknolojisi için öneriler ile sonuçlanmıştır. En umut verici altı reaktör konsepti, azaltılmış nükleer atık üretimi ve artan ekonomik rekabet gücü ile birlikte güvenilir ve emniyetli bir enerji sistemi sağlama yetenekleri temelinde seçilmiştir. Bu reaktörler şunlardır:

- Gaz soğutmalı hızlı reaktör (GFR),
- Kurşun soğutmalı hızlı reaktör (LFR),
- Sodyum soğutmalı hızlı reaktör (SFR),
- Erimiş tuz reaktörü (MSR),
- Süper kritik su soğutmalı reaktör (SCWR),
- Çok yüksek sıcaklık reaktörü (VHTR)

Dünya çapında faaliyet gösteren neredeyse tüm geleneksel reaktörler, su soğutmalı düşük sıcaklık teknolojisine dayanmaktadır. Isıyı elektriğe dönüştürmede nispeten verimsizdirler ve çoğu endüstriyel işlem için yeterince sıcak buhar üretemezler. Yeni tasarımlardan biri olan çok yüksek sıcaklık reaktörleri (VHTR), termodinamik açıdan çok daha verimlidir. Fosil yakıtların ürettiği buharın yerine kullanılabilen yüksek sıcaklıkta buhar üretir ve termo-kimyasal bir işlemle suyu parçalayarak doğrudan hidrojen üretebilir. Petrol rafinerilerinde, kâğıt fabrikalarında, kimya fabrikalarında ve diğer birçok endüstride fosil yakıt enerjisinin yerini alabilecekleri muhtemeldir. Evsel, sulama ve endüstriyel kullanım için suyu tuzdan arındırmak için de kullanılabilirler. Çin, Güney Afrika ve Amerika Birleşik Devletleri bu teknolojide başı çekmektedir (Krivit ve Lehr, 2011). VHTR, reaktör soğutucu çıkış sıcaklığını yaklaşık 1000 °C veya daha yüksek bir sıcaklığa ulaştırabilmek amacıyla tasarlanmış, mevcut yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör (HTGR) tasarımlarının bir devamı ve optimizasyonudur. VHTR'nin kor konfigürasyonu, yakıt elemanları yerleşim düzenine göre çakıl yatağı tipi veya prizmatik blok tipi olabilir. Çakıl yataklı reaktörün (PBR) koru, hareketli yakıt küreleriyle dolu bir silindirik yapıdan oluşurken, prizmatik blok reaktör için altıgen prizmatik yakıt blokları kor konfigürasyonu kullanılır (Pioro vd., 2022). Yakıtın kürelerden oluşması ve bu kürelerin reaktör koruna rastgele yığılmasıyla; akış ayrımı, durgun akış, devridaim akış, girdap vb. karmaşık cebri konvektif akış durumları meydana gelmektedir. Ayrıca bu çakıl

yataklarında Reynolds sayısının artmasıyla ısı transferi artmakta ve ortalama hız azaldığında, gözenekliliğin artmasıyla, ısı transferinin azaldığı görülmüştür.

Korda üretilen ısıyı uzaklaştırma yeteneği, nükleer reaktörlerin önemli bir güvenlik sorunudur. Bu nedenle reaktör ısı transfer parametrelerinin detaylı bir şekilde, deneysel ve sayısal olarak araştırılması gerekmektedir. Literatürde, çakıl yataklı sistemler için ısı transfer verileri, bileşen ve parçacıkların ayrı ayrı ısıtıldığı, geçici ısıtma ve kütle transfer deneyleri ile elde edilir. Bu ısı transfer özelliklerini tahmin etmek için teorik modeller ve yarı deneysel formüller vardır.

Gnielinski (1978)'ye göre literatür, çeşitli Reynolds ve Prandtl sayılarını kapsayan, farklı düzenlemelere sahip tüp demetlerinden elde edilen çok sayıda ölçüm değeri içermektedir. Öte yandan, literatürde bulunan hesaplama yöntemleri genellikle yalnızca dar bir Reynolds ve Prandtl sayısı aralığında geçerlidir, genellikle diyagram biçimindeki bir gösterimle sınırlıdır. Bu nedenler doğrultusunda Gnielinski (1978), enine akışa sahip boru demetlerinin ölçülen değerlerine uygulanan denklemlerin kontrolü ve ortalama değerlerin hesaplanması için yeni denklemler sunmuştur. Alman Nükleer Güvenlik Standardı Komisyonu (KTA) (1983) tarafından, yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörlerin kor tasarımı için termodinamik ve akışkan mekaniği özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. KTA tarafından önerilen ısı transfer korelasyonlarının günümüzde hala kullanıldığı bilinmektedir (Lee ve Chung, 2019). Achenbach (1995) tarafından, homojen olmayan gözenekli çakıl yataklar için ısı transferi, basınç düşüşü, etkin iletkenlik ve duvar ısı transferi ile ilgili olarak yapılan çalışmalar sonucunda mükemmel sıvı karıştırma koşulları sağlandığında tek bir ısıtılmalı küre kullanılarak çakıl yatak ısı transferi özelliklerinin tanımlanabileceği belirtilmiştir. Nie vd. (2011) tarafından sunulan çalışmada, geçmişte diğer araştırmacılar tarafından elde edilen korelasyonlar arasında büyük farklılıkların görülmesiyle, çakıl yataklardan geçen akış için konvektif ısı ve kütle transfer katsayılarını belirleyebilmek ve verilerdeki belirsizliği minimum seviyeye düşürmek için basit bir test yöntemi geliştirmeye ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada, küresel çakıl yatakları kullanılarak, $5 < Re_{dh} < 280$ aralığında, Nusselt sayısı için yeni bir korelasyon geliştirilmiştir. Meng vd. (2012) tarafından elde edilmiş olan deneysel veriler karşılaştırıp analiz edilerek, parçacık çapı, ısı akısı, giriş sıcaklığı ve çalışma sıvısının Reynolds sayısı ile güç dağılımı ve ısı transfer katsayısı için geçerli kurallar elde edilmiştir. Singhal (2017), çakıl yatak uygulamalarıyla ilgili yüksek

yoğunluklu parçacık paketlerinin PR-DNS (parçacık çözümlü doğrudan sayısal simülasyonlar) üzerinden ısı transferi korelasyonlarını türetmek için yeni bir metodoloji sunmuştur. Reichelt vd. (2017) tarafından, çakıl yataklarda kütle transferi için genelleştirilmiş, tek küre kütle transferi ile ilgili bir korelasyon geliştirilmiştir. Korelasyon, çok çeşitli Reynolds sayıları, Schmidt sayıları ve yatak gözenekleri hesaplamaları dahilinde literatür verileriyle doğrulanmıştır. Bu korelasyon ile farklı yatak özelliklerinin ve eksenel dağılımın, kütle transferine etkisi tartışılmıştır.

Liu vd. (2018) tarafından Florür-tuz Soğutmalı Yüksek Sıcaklık Reaktörleri (FHTR'ler) için, simülasyon sıvısı olarak iç ısı üretimine sahip bir çakıl yataklı deney tesisi kurulmuştur. Giriş sıcaklıklarının, gözenekliliğin ve kütle akış hızının akış ile beraber konvektif ısı transferi özellikleri üzerindeki etkiler araştırılmıştır. $14 < Pr < 19$ aralığında Prandtl sayısı ve $90 < Re < 2500$ aralığında Reynolds sayısı ile akış ve konvektif ısı transferi katsayılarını tahmin etmek için yeni korelasyonlar önerilmiştir. Lee ve Chung (2019) tarafından, ısıtılmış kürelerin dolgu yataklarının cebri konveksiyon ısı transferi araştırılmıştır. Isı ve kütle transferi arasındaki analojiye dayanarak, bakır elektrokaplama sistemi kullanılarak kütle transferi deneyleri yapılmıştır. Isıtılmış kürelerin paket yatağın duvara yakın yere yerleştirildiğinde artan gözeneklilik sayesinde hızın yükselmesiyle ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca ısıtılmış kürelerin yoğunlaşan girdap hareketi ve vorteks akışları nedeniyle paket yatakların tabanına yaklaştıkça ısı transferi artmıştır. Paket yataktaki tüm ısıtılmış kürelerin ısı transferi paket yatağının yükseklik (H) ve çap (d) oranının değeri arttıkça azalmıştır. Sonuçlara dayanarak Reynolds sayısı ve H/d oranına göre ısı transferi korelasyonu geliştirilmiştir. Liu vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise su soğutmalı çakıl yatağı tipi nükleer reaktör korunda ki akışı ve konvektif ısı transferini incelemek için rastgele paketlenmiş bir çakıl yatağı deney düzeneği kurulmuştur. Çakıl yatağı için ısı kaynağının giriş gücü, gözeneklilik, akışkan hızı, giriş sıcaklığının etkileri, akış direnci ve konvektif ısı transfer katsayıları üzerinde inceleme yapılmıştır. Çakıl yatağı konvektif ısı transferi özelliklerini %10'dan fazla olmayan bir belirsizlikle tahmin etmek için “Colburn j” faktörü ile sürtünme faktörü arasındaki benzerliğe dayalı yeni bir korelasyon türetilmiştir. Ayrıca, rastgele paketlenmiş çakıl yatağındaki basınç düşüşünü tahmin etmek için yeni bir korelasyon önerilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan çok sayıda küreleri eş sıcaklıkta tutmak zordur, özellikle, düşük Reynolds sayılarında, deneyisel sonuçlar gözle görülür şekilde farklı

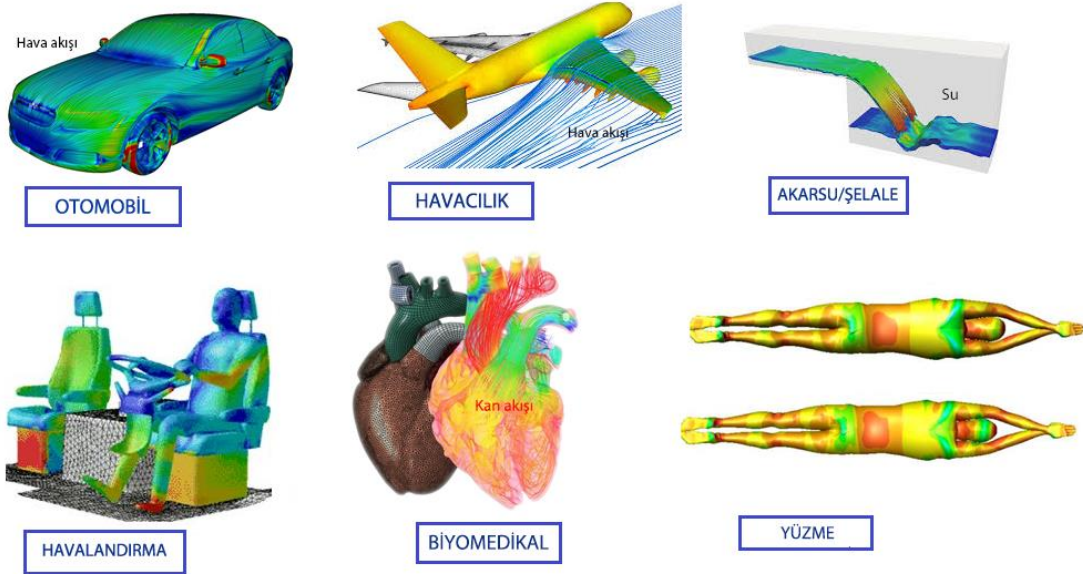
sonuçlar vermektedir (Kehinde vd., 1983). Bu nedenle çeşitli varsayımlar ortaya atılmıştır. Bu bakımdan dışuk Reynolds değerleri için daha güvenilir ısı transferi korelasyonlarına ihtiyaç vardır. Bu deneysel korelasyonlar, yüksek duyarlılık ve sayısal çalışmalar ile karşılaştırılmalıdır. Bu çalışmanın odak noktası, akışkanlar mekaniği alanında hlihazırda kullanılmakta olan bir açık kaynak kodu, OpenFOAM ile çakıl yataklı nükleer reaktör sistemlerinde ısı akış modellemelerinin cebri konveksiyon benzeşimleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu tez kapsamında, TBTAK - NRF (Güney Kore) İkil i şbirliği Projesi olarak yürütülen deneysel ve sayısal (simülasyon) alışmaların sayısal kısmı için cebri konveksiyon ile ısı transferi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, G. Kore tarafınca yapılan deneysel cebri konveksiyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri başlangıçta havacılık ve uzay endüstrisindeki bazı bölümler tarafından kullanılmıştır. Ancak daha sonra, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi otomotiv, enerji üretimi, kimya, nükleer ve denizcilik endüstrilerinde önemli bir araç haline gelmiştir. Son yıllarda, yeni endüstriler yoğun HAD kullanıcıları saflarına katılmıştır; örneğin, elektronik endüstrisinde HAD, enerji sistemlerini ve elektronik cihazların soğutulması için ısı transferini optimize etmek için kullanılmaktadır. Aynı zamanda HAD, biyomedikal endüstrisinde, tıbbi uygulamalarda, inşaat endüstrisinde, HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme), yangın simülasyonu ve hava kalitesi değerlendirmesinde kullanılmaktadır (Tu vd., 2023).

HAD, endüstriyel ekipman veya yenilikçi tesislerin tasarımı ve analizinde mühendislere ve araştırmacılara yardımcı olmak için güvenilir bir araç sağlar ve genellikle deneme yanılma deneyi gerçekleştirme ihtiyacını azaltır veya ortadan kaldırır. Bu nedenle HAD simülasyonu, analiz edilen problemde yer alan fiziksel fenomenler hakkında hızlı bilgi sağladığı gibi, geliştirilen araştırmalarda yatırım maliyetinde de azalma sağlar (Al-Baghdadi, 2014). OpenFOAM (Open-source Field Operation And Manipulation) üzerinden, açık kaynak kod yapısına dayalı, yüksek çözünürlüklü zaman ayrıklaştırma şemalarını benimseyen HAD çözücüler geliştirilmiştir. Bununla birlikte, açık kaynaklı HAD kodları, türbülans simülasyonu için gereken düşük enerji tüketen algoritmaların uygulanması için uygun ortamlar sağlamaktadır (Weller vd., 1998). Merkezlerinde, türbülanslı veya laminar tek fazlı sıkıştırılamaz akışlardan sıkıştırılabilir tüm hızlı akışlara ve çok fazlı akışlara kadar tüm bir akış fenomeni setini yeterli doğrulukla modelleyebilen Navier-Stokes denklemleri bulunur. HAD’ı uygulamak için kullanılan sayısal yöntemler arasında Sonlu Hacim Metodu önemli bir rol oynamaktadır (Darwish ve Moukalled, 2016).



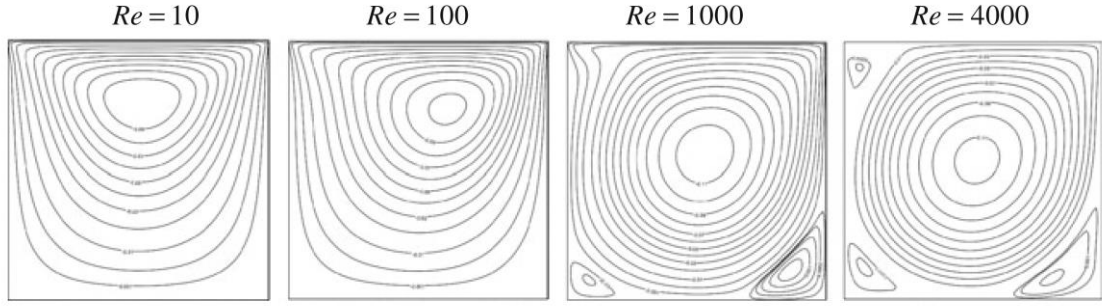
Şekil 2.1 HAD uygulama alanları (CFD Flow Engineering, 2023)

2.2. Reynolds Sayısı

Akışkanlar mekaniğinde boyutsuz sayılar, akışkanların davranışını analiz etmede önemli bir role sahip olan bir dizi boyutsuz niceliktir. Sıvının göreceli büyüklüğü, yoğunluk, viskozite, ses hızı, akış hızı vb. gibi fiziksel sistem özellikleri oranlanır ve Reynolds, Mach, Weber, Darcy vb. gibi sayılar ortaya çıkar (Darwish ve Moukalled, 2016). Reynolds sayısı (Re), Denklem (2.1)'de şu şekilde tanımlanır:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.1)$$

Burada ρ ; sıvının yoğunluğu, U ; akış hızı, L ; karakteristik uzunluk, μ ; sıvının dinamik viskozitesidir. Reynolds sayısı, adveksiyonun (atalet) difüzyon (viskoz) momentum akışlarına göreceli öneminin bir ölçüsü olarak yorumlanabilir (Çengel, 2011). Momentum akıları aynı yönde ise, Reynolds sayısı, akışın sınır tabakası özelliklerini ortaya çıkarır. Bir iç akışın türbülanslı veya laminar olup olmadığını belirlemek için hidrolik çapın hesaplanması gerekir ve buradan hidrolik Reynolds sayısı bulunabilir. Farklı Reynolds sayısı değerleri için akış alanını gösteren bir örnek, Şekil 2.2'de verilmiştir. Kare şeklindeki bir geometride, üst duvara uygulanan U hızı ve hareketsiz diğer duvarların etkisiyle oluşan akış çizgileri görülmektedir. Şekil 2.2'de gösterilen akış çizgileri, $Re = \rho UL/\mu$ arttıkça arttığı görülmektedir (Incropera vd., 2007).



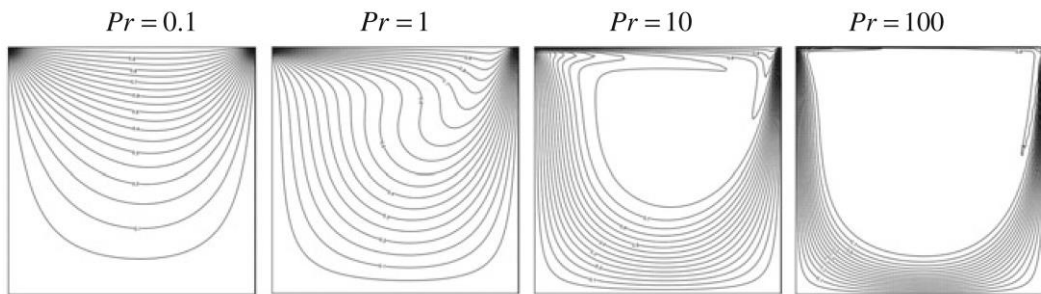
Şekil 2.2 Reynolds sayısının yükselmesiyle kare şeklindeki bir geometride artan akış çizgileri (Darwish ve Moukalled, 2016).

2.3. Prandtl Sayısı

Prandtl sayısı, momentum yayılımının (kinematik viskozite; ν) termal yayılmaya (α) oranıdır ve Denklem (2.2)'deki verildiği gibi hesaplanır. ,

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{\mu/\rho}{k/\rho c_p} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.2)$$

Burada, μ ; sıvının dinamik viskozitesi, c_p ; sıvının özgül ısı, k ; sıvının termal iletkenliği, ρ ; sıvının yoğunluğu, ν ; sıvının kinematik viskozitesi, α ; termal yayılımıdır. Prandtl sayısı, hidrokinematik sınır tabakasının termal sınır tabakasına oranını temsil eder. Yüksek Prandtl sayısı, ısı transferinin sıvı iletimi ile değil sıvı momentumuyla gerçekleşmesinin istenildiğinin bir göstergesidir (Çengel, 2011). Şekil 2.3'te, $Re = 100$ 'de, farklı Pr değerleri için, kare şeklindeki bir akış geometrisinde, etki alanı üzerindeki izotermeler gösterilmiştir. Pr arttıkça iletme göre konveksiyondaki artış, grafiklerden kolayca çıkarılabilmektedir (Bejan, 2013).



Şekil 2.3 Prandtl sayısının yükselmesiyle kare şeklindeki bir geometride artan akış çizgileri (Darwish ve Moukalled, 2016).

2.4. Nusselt Sayısı

Nusselt sayısı şu şekilde ifade edilir:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2.3)$$

Burada k ; sıvının termal iletkenliği, L ; karakteristik uzunluk, h ; konvektif ısı transfer katsayısı (W/m^2K)'dir. Konvektif ısı transfer katsayısı h 'nin boyutsuz şeklidir ve katı bir yüzeyde konvektif ısı transferinin bir ölçüsünü göstermektedir. Nusselt sayısı, korunum denklemlerini boyutsuz formlarda yazarken boyutsuz bir grup olarak ortaya çıkmaz; bunun yerine, konvektif ısı transferi verilerini raporlamak için yaygın olarak kullanılır. (Çengel, 2011; Bejan, 2013).

2.5. Sonlu Hacim Metodu

Sonlu hacim metodu (SHM), diferansiyel hacimler üzerindeki korunum yasalarını temsil eden kısmi diferansiyel denklemleri sonlu hacimler (veya elemanlar veya hücreler) üzerinden ayrık cebirsel denklemlere dönüştüren sayısal bir tekniktir. Sonlu farklar veya sonlu elemanlar yöntemine benzer bir şekilde, çözüm sürecindeki ilk adım, SHM'de örtüşmeyen elemanlara veya sonlu hacimlere ayrıklaştırılan geometrik alanın ayrıklaştırılmasıdır. Kısmi diferansiyel denklemler daha sonra ayrıklaştırılır/her bir ayrık eleman üzerinden integrali alınarak cebirsel denklemlere dönüştürülür. Cebirsel denklemler sistemi daha sonra her bir öge için bağımlı değişkenin değerlerini hesaplamak için çözülür. Sonlu hacim yönteminde, korunum denklemindeki bazı terimler yüzey akılarına dönüştürülür ve sonlu hacim yüzlerinde değerlendirilir. Belirli bir hacme giren akı, bitişik hacimden çıkan akı ile aynı olduğundan, SHM kesinlikle korunumludur. SHM'nin bu doğal koruma özelliği, onu HAD'da tercih edilen yöntem haline getirir. SHM'nin bir diğer önemli özelliği, fiziksel uzayda yapılandırılmamış çokgen örgüler üzerinde formüle edilebilmesidir. Son olarak, bilinmeyen değişkenler hacim elemanlarının sınır yüzlerinde değil, ağırlık merkezlerinde değerlendirildiğinden, SHM'de çeşitli sınır koşullarını bozulma olmayacak bir şekilde uygulamak oldukça kolaydır. Bu özellikler, sonlu hacim yöntemini sıvı akışı ile ısı ve kütle transferini içeren çeşitli uygulamaların sayısal simülasyonu için oldukça uygun hale getirmiştir ve yöntemdeki gelişmeler, HAD'daki ilerlemelerle iç içe geçmiştir. Yapılandırılmış örgüler

üzerinden basit fizik ve geometriyi çözmekle sınırlıyken, SHM artık her türlü karmaşık fizik ve uygulama ile başa çıkma yeteneğine sahiptir (Darwish ve Moukalled, 2016).

2.5.1. Yarı ayrıklaştırılmış denklem

Sonlu hacim ayrıklaştırma işleminin birinci adımında, yönetim denklemleri, alanın alt bölümlere ayrıldığı elemanlar (veya sonlu hacimler) üzerinden integrali alınır, daha sonra konveksiyon ve difüzyon terimlerinin hacim integrallerini yüzey integrallerine dönüştürmek için Gauss teoremi uygulanır. Bu adımın ardından, yüzey ve hacim integralleri ayrık hale dönüştürülür ve integrasyon noktaları kullanılarak sayısal olarak integre edilir. Genel bir skaler değişken için koruma denklemi ϕ olarak Denklem (2.4)'teki gibi ifade edilebilir;

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{(zamana bağlı terim)}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \phi)}_{\text{(konvektif terim)}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{\text{(difüzyon terimi)}} + \underbrace{Q\phi}_{\text{(kaynak terimi)}} \quad (2.4)$$

(zamana bağlı terim) (konvektif terim) (difüzyon terimi) (kaynak terimi)

Yukarıdaki denklemin kararlı durum formu (2.5), geçici terim düşürülerek elde edilir ve şu şekilde verilir:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + Q\phi \quad (2.5)$$

Yukarıdaki denklemi sabit bir C elemanı üzerinden integre ederek; Denklem (2.6)'ya dönüştürülür:

$$\int_{V_c} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \phi) dV = \int_{V_c} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV + \int_{V_c} Q\phi dV \quad (2.6)$$

Diverjans teoremi kullanılarak konveksiyon ve difüzyon terimlerinin hacim integrallerini yüzey integralleriyle değiştirerek, yukarıdaki denklem Denklem (2.7) haline gelir:

$$\oint_{\partial V_c} (\rho \mathbf{v} \phi) \cdot d\mathbf{S} = \oint_{\partial V_c} (\Gamma \nabla \phi) \cdot d\mathbf{S} + \int_{V_c} Q\phi dV \quad (2.7)$$

Burada, $(\cdot)$ iç çarpım operatörüdür, $Q\phi$ kaynak terimi temsil eder, $\mathbf{S}$ yüzey vektörünü, $\mathbf{v}$ hız vektörünü, ϕ korunan miktarı ve $\oint_{\partial V_c}$, V_c hacmi üzerinden yüzey integralidir.

2.5.2. Sınır şartları

Bir etki alanı sınırının yüzlerindeki akıların değerlendirilmesi, genel olarak bir profil varsayımı gerektirmez. Aksine, genellikle doğrudan bir ikame gerçekleştirilir. Sınır

koşullarının türü çoktur. Bununla birlikte, genel skalerler için en yaygın kullanılanlardan ikisi Dirichlet ve Neumann sınır koşullarıdır. Matematiksel terimlerle, bunlar sırasıyla belirtilen bir değer (veya birinci tip) ve akı tarafından belirtilen (veya ikinci tip) sınır koşuludur.

2.5.2.1. Dirichlet ve Neumann sınır koşulu

Matematikte, adi veya kısmi bir diferansiyel denkleme uygulandığında, koşul, bir çözümün türevinin etki alanının sınırları içinde uygulandığı değerleri belirtir. Termodinamikte, Dirichlet sınır koşulları, 3 boyutlu problemlerde sabit sıcaklıklarda tutulan yüzeylerden, oluşur. Denklem (2.8)'de, OpenFOAM'da kullanılan eşitlik verilmiştir.

$$\phi_f = \phi_{ref} \quad (2.8)$$

ϕ_f : Yüzey değeri

ϕ_{ref} : Referans değeri

Neumann sınır koşulu ise sınır boyunca ısı akısını temsil eder. Mükemmel yalıtkan, homojen bir koşulu yansıtırken, tüm ısıtılmış ve soğutulmuş sınırların sınır koşulunu açıkça atanması gerekmektedir (OpenCFD, 2009). Denklem (2.9)'da, OpenFOAM'da kullanılan eşitlik verilmiştir.

$$\phi_f = \phi_c + \Delta \nabla_{\phi_{ref}} \quad (2.9)$$

$\nabla_{\phi_{ref}}$: Referans gradyan

Δ : Yüzey hücre mesafesi

2.5.3. Explicit ve implicit sayısal yöntemler

Sayısal çözüm şemalarına genellikle explicit veya implicit olarak atıfta bulunulur. Explicit bir sayısal yöntem, bağımlı değişkenlerin önceden bilinen değerler aracılığıyla doğrudan hesaplandığı yöntemdir. Bu durumda, herhangi bir ayrıklaştırma operatörü (Örn. OpenFOAM'da kullanılan fvm (sonlu hacim yöntemi – finite volume method) ve fvc (sonlu hacim hesabı – finite volume calculus) operatörleri), gerçek değişken değerlerine dayalı olarak doğrudan değerlendirilebilir. Öte yandan, bağımlı değişkenler bilinmeyenler olarak ele alındığında ve daha sonra doğrudan veya yinelemeli bir çözüm

algoritması kullanılarak özel sayısal araçlarla çözülen birleştirilmiş bir denklem seti oluşturmak üzere bir araya getirildiğinde, sayısal bir yöntemin implicit olduğu söylenir. Hesaplama akışkanlar dinamiğinde ele alınan korunum denklemleri doğrusal değildir ve bunları çözmek için genellikle explicit yöntem yerine implicit yaklaşım tercih edilir. Uygun ayrıklaştırma ve doğrusallaştırma gerçekleştirildikten sonra, son adım, çözümü elde etmek için cebirsel denklemler kümesini veya sistemini çözmektir. Yinelemeli yaklaşım daha ekonomiktir ve tek olmasa da en yaygın kullanılan yöntemdir. Doğrudan yaklaşımdan farklı olarak, bir ilk tahminden başlayarak bir yinelemenin sonunda elde edilen sonuçları bir sonraki yineleme için ilk tahmin olarak kullanarak çözüme doğru ilerler. Ara hesaplanan çözüm nihai çözüme yaklaşıyorsa olaylar dizisinin yakınsak olduğu, aksi takdirde ıraksadığı söylenir. Süreç geneldir ve zamana bağlı (transient) bir problemde bir zaman adımını çözerken veya kararlı durum probleminde nihai bir çözüm için kullanılır. Aslında, kararlı durum çözümü elde etmek için yinelemeli bir yaklaşımı benimsemek, kararlı duruma ulaşılan kadar zamanda ilerlemekten hesaplama açısından daha ucuzdur (Tu vd., 2023).

3. TÜRBÜLANS

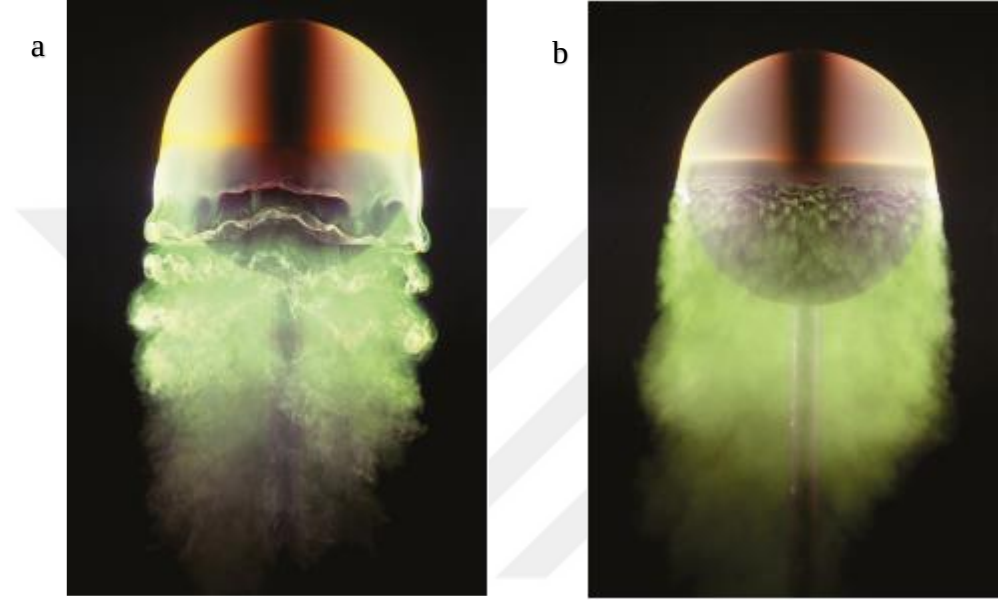
Günlük hayatta karşılaştığımız sıvı akışının neredeyse tamamı türbülanslıdır. Tipik örnekler arabaların, uçakların ve binaların etrafında (ve içinde) akmaktadır. Sınır tabakaları, arabalar, uçaklar ve binalar gibi “bluff” gövdelerinin etrafındaki ve sonrasındaki izler türbülanslıdır. Ayrıca, hem pistonlu motorlarda hem de gaz türbinlerinde ve yanıcılarda motorlardaki akış ve yanma oldukça türbülanslıdır. Odalardaki hava hareketleri de, en azından duvar jetlerinin olduğu duvarlar boyunca türbülanslıdır. Bu nedenle, sıvı akışını hesapladığımızda büyük olasılıkla türbülanslı olacaktır. Türbülanslı akışta değişkenleri genellikle zamandan bağımsız olan (ortalama akış sabit olduğunda) bir zaman ortalamalı kısım $\bar{U}$ 'ya ve bir dalgalı kısım (u') ya böleriz, öyle ki Denklem (3.1)'de verildiği gibi;

$$u = \bar{U} + u' \quad (3.1)$$

olur (Davidson, 1997).

Türbülanslı akışın bir tanımı yoktur, ancak bir takım karakteristik özelliklere sahiptir: *Düzensizlik*; türbülanslı akış düzensiz, rastgele ve kaotiktir. Akış, en büyük girdapların akış geometrisi düzeninde olduğu (yani, sınır tabakası kalınlığı, jet genişliği, vb.) farklı ölçeklerden (girdap boyutları) oluşan bir spektrumdan oluşur. Spektrumun diğer ucunda, viskoz kuvvetler (gerilmeler) tarafından iç enerjiye dağıtılan en küçük girdaplar vardır. Türbülans kaotik olmasına rağmen deterministiktir ve Navier-Stokes denklemleri ile tanımlanır (Tennekes ve Lumley, 1972). *Yayılma*; türbülanslı akışta difüzivite artar. Bu, akış türbülanslı hale geldikçe sınır tabakalarının, jetlerin vb. yayılma hızının arttığı anlamına gelir. Türbülans, örneğin sınır tabakalarındaki momentum değişimini artırır ve böylece silindirler, kanatçıklar ve arabalar gibi “bluff” cisimlerinin ayrılmasını azaltır veya geciktirir. Artan yayılma, kanallar ve borular gibi iç akışlardaki direnci (duvar sürtünmesi) de artırır. *Büyük Reynolds sayıları*; yüksek Reynolds sayısında türbülanslı akış oluşur. Örneğin, borularda türbülanslı akışa geçiş $Re_d \approx 2300$ ve sınır tabakalarda $Re_x \approx 100\,000$ 'de gerçekleşir. *Üç boyutlu olması*; türbülanslı akış her zaman üç boyutludur. Bununla birlikte, denklemler zaman ortalamalı olduğunda, akış iki boyutlu olarak ele alınabilir. *Dağılma*; türbülanslı akış enerji tüketir, yani küçük (dağıtıcı) girdaplardaki kinetik enerji iç enerjiye dönüşür. Küçük girdaplar kinetik enerjiyi biraz

daha büyük girdaplardan alır. Biraz daha büyük girdaplar, enerjilerini daha da büyük girdaplardan alır ve bu böyle devam eder. En büyük girdaplar enerjilerini ortalama akıştan alırlar. Enerjiyi en büyük türbülanslı ölçeklerden (girdaplar) en küçüğüne aktarma işlemine kademeli işlem denir. *Süreklilik*; akışta küçük türbülanslı ölçeklere sahip olmamıza rağmen bunlar moleküler ölçekten çok daha büyüktür ve akışı bir süreklilik olarak ele alabiliriz (Davidson, 2016). Aşağıda Şekil 3.1’de küresel bir cisimden geçen akışın gösterimi mevcuttur.



Şekil 3.1 a) $Re = 2 \times 10^4$ ve b) $Re = 2 \times 10^5$ 'te bir küreden geçen akış (Davidson, 2016)

3.1. Reynolds Ortalama

Ortalama alma kavramları Osborn Reynolds tarafından 1895'te öne sürülmüştür. Genel olarak, Reynolds ortalaması, bir integral veya toplam içeren çeşitli biçimler almaktadır. Türbülans modeli araştırmasında en uygun üç biçim; zaman ortalaması, uzamsal ortalama ve topluluk ortalamasıdır. Bu ortalama alma süreçlerini tanımlamak için kullanılan genel terim "ortalama"dır.

Zaman ortalaması, durağan türbülans, yani sabit hızlı bir üfleyici tarafından tahrik edilen bir borudaki akış gibi, ortalama olarak zamanla değişmeyen türbülanslı bir akış için uygundur. Böyle bir akış için anlık bir akış değişkenini $f(x, t)$ olarak ifade edilir. Zaman ortalaması, $F_t(x)$ şu şekilde (3.2) tanımlanır:

$$F_t(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x, t) dt \quad (3.2)$$

Reynolds ortalamasının (herhangi bir türden) uygulanabilirliği dolaylı olarak ortalama değerlerin bu sabitliğine bağlıdır. Zaman ortalaması, Reynolds ortalamasının en sık kullanılan şeklidir, çünkü mühendislikteki türbülanslı akışların çoğu durağandır. Elbette atmosferin hareketi gibi önemli istisnalar vardır.

Uzamsal ortalama, ortalama olarak tüm yönlerde tekdüze olan türbülanslı bir akış olan homojen türbülans için kullanılabilir. Bir hacim integrali alarak tüm uzamsal koordinatların ortalamasını alıyoruz. Ortalama F_v olarak adlandırdığımızda şu Denklem (3.3) ortaya çıkmaktadır:

$$F_v(t) = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V} \iiint_V f(x, t) dV \quad (3.3)$$

Topluluk ortalaması, örneğin zamanla azalan akışlar için uygun, en genel Reynolds ortalama türüdür. İdealleştirilmiş bir örnek olarak, n'inci deneyde $f(x, t) = f_n(x, t)$ olduğu N özdeş deneyden (başlangıç ve sınır koşulları rastgele sonsuz küçük pertürbasyonlarla farklılık gösteren) alınan ölçümler açısından, ortalama F_E , tarafından Denklem (3.4)'de tanımlanmıştır:

$$F_E(x, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n(x, t) \quad (3.4)$$

Denklem (3.1)'in geçerli olması için durağan bir türbülanslı akış ele alınırsa, böyle bir akış için, anlık hızı, $u_i(x, t)$, bir ortalama $U_i(x)$ ve dalgalanan bir parçanın, $u'_i(x, t)$ toplamı olarak ifade ederiz, böylece şu denklem (3.5) tanımlanır;

$$u_i(x, t) = U_i(x) + u'_i(x, t) \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'te olduğu gibi, $U_i(x)$ miktarı, Denklem (3.6)'da tanımlanan zaman ortalamalı veya ortalama hızdır:

$$U_i(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i(x) dt \quad (3.6)$$

Ortalama hızın zaman ortalaması yine aynı zaman ortalamalı değerdir (3.7), yani,

$$\overline{U_i(x)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} U_i(x) dt = U_i(x) \quad (3.7)$$

Burada üst çizgi, zaman ortalamasını temsil etmektedir. Ek denklem olarak, Navier-Stokes denkleminin momentleri alınabilir. Yani, Navier-Stokes denklemi değişken bir özellik ve zaman ortalamalı ürünle çarpılmalıdır. Bu prosedürü kullanarak, Reynolds-

gerilme tensörü için bir diferansiyel denklem türetilebilir. $N(u_i)$ 'nin "Navier-Stokes operatörünü" (3.8), yani;

$$N(u_i) = \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} \quad (3.8)$$

Kullanarak terimlerin uygun biçimde ve yeniden düzenlenmesiyle, Reynolds-gerilme denklemini (3.9) bulabiliriz;

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{ik} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \epsilon_{ij} - \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right] \quad (3.9)$$

Burada, Π_{ij} , (3.10) şeklinde gösterilir:

$$\Pi_{ij} = \frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \epsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \rho C_{ijk} = \rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_i} \delta_{jk} + \overline{p' u'_j} \delta_{ik} \quad (3.10)$$

Bu, türbülansın kapanma problemini göstermektedir. Navier-Stokes denkleminin doğrusal olmaması nedeniyle, daha yüksek momentler aldıkça, her seviyede ek bilinmeyenler üretilir. Bu prosedür ile hiçbir noktada bilinmeyenler/denklemler dengelenemez. Fiziksel gerekçelerle, bu özellikle şaşırtıcı bir durum değil. Ne de olsa, bu tür işlemler doğası gereği kesinlikle matematikselidir ve hiçbir ek fiziksel ilke getirmez. Özüde, Reynolds ortalaması, Navier-Stokes denkleminde yer alan bilgilerin çoğunu kaybeden bir basitleştirmedir. Türbülans modellemenin işlevi, yeterli sayıda denklemin var olması için bilinen akış özellikleri açısından bilinmeyen korelasyonlar için yaklaşımlar tasarlamaktır. Reynolds gerilim tensörünün doğrudan modellenmesi, Newton akışlarına benzer şekilde Reynolds geriliminin ortalama hız gradyanlarının doğrusal bir fonksiyonu olduğunu varsayan Boussinesq hipotezine dayanmaktadır ve μ_t türbülanslı girdap viskozitesi (moleküler viskoziteye benzer şekilde) akışa bağlıdır. Bu yaklaşımla, Reynolds gerilim bileşenlerini hesaplama problemi, türbülanslı kinetik enerjiyi ve türbülanslı viskoziteyi hesaplamaya Denklem (3.11)'deki gibi dönüştürülür.

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = -\mu_t (D_{i,j} + U_{j,i}) + \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (3.11)$$

Böylece bilinmeyenleri tek başına μ_t 'ye indirger, bu da çeşitli türbülans modelleri kullanılarak değerlendirilir.

3.2. Türbülans Modelleri

3.2.1. Cebirsel model

Girdap viskozite modellerinde türbülans viskozitesi $\mu_t = \rho \nu_t$ için bir ifade oluşturulması gerekmektedir. ν_t 'nin boyutu [m^2/s]'dir (ν ile aynı). Türbülanslı hız girdap viskozite model ölçeği, türbülanslı uzunluk ölçeği ile çarpıldığında doğru boyutu (3.12) verir;

$$\nu_t \propto U \ell \quad (3.12)$$

Yukarıda, büyük türbülanslı ölçeklerin karakteristiği olan U ve ℓ kullanılmıştır. Bu makuldür çünkü türbülanslı difüzyonla taşınımın çoğundan sorumlu olanlar bu ölçeklerdir. Cebirsel bir türbülans modelinde, hız gradyanı hız ölçeği olarak kullanılır ve bazı fiziksel uzunluklar uzunluk ölçeği olarak kullanılır. Sınır tabakası tipi akışta şu denklem (3.13) elde edilir:

$$\nu_t = l_{mix}^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \quad (3.13)$$

Burada y , duvara normal olan koordinattır ve ℓ_{mix} , karışım uzunluğudur ve model, karışım uzunluğu modeli olarak adlandırılır. Eski bir modeldir ve artık pek kullanılmamaktadır. Modelle ilgili bir sorun, ℓ_{mix} 'in bilinmemesi ve belirlenmesi gerekmesidir (Davidson, 1997).

3.2.2. Tek denklem türbülans modeli

3.2.2.1. Spalart-Allmaras model

Spalart-Allmaras tek denklemlili türbülans modeli, girdap viskozitesi değişkeni $\bar{\nu}$ için bir taşıma denklemi kullanır. Ampirizm, boyutsal analiz ve Galile değişmezliğine dayalı olarak geliştirilmiştir. 2-D karıştırma katmanları, kalıntılar ve düz plaka sınır katmanları için sonuçlar kullanılarak kalibre edilmiştir. Spalart-Allmaras modeli, aynı zamanda, ters basınç gradyanlarına sahip türbülanslı akışların oldukça doğru tahminlerine izin verir. Ayrıca, kullanıcı tanımlı konumlarda laminlerden türbülanslı akışa yumuşak bir geçiş yapabilir. Spalart-Allmaras modelinin birçok olumlu sayısal özelliği vardır. "Yerel"dir, yani bir noktadaki denklem diğer noktadaki çözüme bağlı değildir. Bu nedenle, yapılandırılmış çoklu blok veya yapılandırılmamış örgüler üzerinde kolayca uygulanabilir. Aynı zamanda sağlamdır, sabit duruma hızla yakınsar ve duvara yakın

bölgede yalnızca orta düzeyde örgü çözünürlüğü gerektirir. Spalart-Allmaras türbülans modeli, tensör notasyonunda aşağıdaki gibi (3.14) yazılabilir.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (p \bar{v}_j) \\ &= C_{b1} (1 - f_{c2}) \vec{S} \bar{v} + \frac{1}{\partial} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v_L + v^-) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right] + C_{t2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right\} \\ & - \left[C_{w1} f_\infty - \frac{C_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right] \left(\frac{\vec{v}}{d} \right)^2 + f_{t1} |\Delta \vec{v}|_2^2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Eşitliğin sağ tarafındaki terimler girdap viskozite üretimini, koruyucu difüzyonu, koruyucu olmayan difüzyonu, duvara yakın türbülans yıkımını, üretimin geçiş sönümlemesini ve türbülansın geçiş kaynağını temsil eder. Ayrıca, $v_L = \mu_L / \rho$ laminar kinematik viskoziteyi ifade eder ve en yakın duvara olan mesafedir. Denklem (3.15)'deki çalkantılı girdap viskozitesi,

$$\mu_T = f_{v1} \rho \bar{v} \quad (3.15)$$

Üretim terimi aşağıdaki formüller (3.16), (3.17), (3.18) ve (3.19) ile değerlendirilir.

$$\bar{S} = f_{v3} S + \frac{\bar{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, \quad (3.16)$$

$$f_{v1} = \frac{x^3}{x^3 + C_{v1}^3}, \quad f_{v2} = \left(1 + \frac{x}{C_{v2}} \right)^{-3} \quad (3.17)$$

$$f_{v3} = \frac{(1+x f_{v1})(1-f_{v2})}{\max(\chi_1 0.001)} \quad (3.18)$$

$$x = \frac{\bar{v}}{v_L} \quad (3.19)$$

Laminer-türbülanslı geçişi modellemek için kullanılan fonksiyonlar Denklem (3.20)'deki gibi verilir:

$$\begin{aligned} f_{t1} &= g_t C_{t1} \exp \left(-C_{t2} \frac{\omega_1^2}{\Delta U^2} (d^2 + g_t^2 d_t^2) \right) + f_{t2} = C_{ts} \exp(-C_{t4} x^2), a_t \\ &= \min[0, 1, \|\Delta v\|_2 / (\omega_t \Delta x_t)] \end{aligned} \quad (3.20)$$

Burada; ω , açma noktasında duvardaki girdapları temsil eder. $\|\Delta v\|_2$, açma noktasındaki hız ile mevcut alan noktası arasındaki farkın 2-normunu gösterir, d_t en yakın gezi

noktasına olan mesafedir ve Δx_t , gezi noktasında duvar boyunca olan mesafeyi temsil eder. Son olarak, denklemlerdeki çeşitli sabitler şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} C_{b1} &= 0.1355, C_{b2} = 0.622, \\ C_{v1} &= 7.1, C_{v2} = 5, \sigma = 2/3, \kappa = 0.41, \\ C_{w1} &= C_{b1}/\kappa^2 + (1 + C_{b2})/\sigma, C_{w2} = 0.3, c_{w3} = 2, \\ C_{t1} &= 1, C_{t2} = 2, C_{t3} = 1.3, C_{t4} = 0.5 \end{aligned}$$

Denklem 3.14'teki korunumlu olmayan difüzyon terimi Denklem (3.21)'de yerine koyulur, yani,

$$\frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v_L + \bar{v}) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right\} \quad (3.21)$$

Aşağıdaki (3.22) ifade ile

$$\frac{1+C_{b2}}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v_L + \bar{v}) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right] - \frac{C_{b2}}{\sigma} (v_L + \bar{v}) \nabla^2 \bar{v} \quad (3.22)$$

Bu şekilde, terimin ayrıklaştırılmasıyla ilgili güçlüklerin $(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j})^2$ ile üstesinden gelinir (Spalart ve Allmaras, 1992).

3.2.3. İki denklem türbülans modeli

İki denklemlili türbülans modelleri, 1980-81 yıllarında AFOR-HTTM-Stanford Kompleks Türbülans Akışlar Konferansı'nda yapılan hesaplamaların neredeyse tamamında kullanılmıştır. O yıllardan günümüze türbülans modeli araştırmalarının çoğunun temeli oluşturulmuştur. Bu modeller sadece k 'nin hesaplanmasını değil, aynı zamanda türbülans uzunluk ölçeğini veya eşdeğerini de sağlamıştır. Sonuç olarak, iki denklemlili modeller tamamlanmıştır, yani önceden türbülans yapısı bilgisi olmadan belirli bir türbülanslı akışın özelliklerini tahmin etmek için kullanılabilir.

Hemen hemen tüm iki denklemlili modelleri için başlangıç noktası Boussinesq yaklaşımı, Denklem (3.23) ve Denklem (3.24) biçimindeki türbülans kinetik enerji denklemdir (Versteeg ve Malalasekera, 2007).

$$\tau_{ij} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_T / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.24)$$

3.2.3.1. $k - \epsilon$ modeli

Viskoz dağılıma oranı ϵ dahil olmak üzere diğer tüm türbülans nicelikleri için benzer taşıma denklemleri geliştirmek mümkündür. Bununla birlikte, kesin ϵ -denklemleri birçok bilinmeyen ve ölçülemeyen terim içerir. Standart $k - \epsilon$ modeli (Launder ve Spalding, 1974), bu değişkenlerde bunlara neden olan ilgili süreçleri en iyi şekilde anlamamıza dayanan, biri k için ve diğeri ϵ için olmak üzere iki model denklemine sahiptir. Hız ölçeğini “ ν ” ve büyük ölçekli türbülansı temsil eden uzunluk ölçeğini “ l ”aşağıdaki gibi tanımlamak (3.25) için k ve ϵ kullanıyoruz (Versteeg ve Malalasekera, 2007):

$$\nu = k^{1/2} \quad l = \frac{k^{1/2}}{\epsilon} \quad (3.25)$$

Standart $k - \epsilon$ modeli, k ve ϵ için aşağıdaki taşıma denklemlerini (3.26), (3.27) kullanır:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \epsilon \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.27)$$

Denklemler beş ayarlanabilir sabit içerir: C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ ve $C_{2\epsilon}$. Standart $k - \epsilon$ modeli, çok çeşitli türbülanslı akışlar için kapsamlı veri ayarlama yoluyla ulaşılan sabitler için değerler kullanır:

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\epsilon = 1.30 \quad C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

3.2.3.2. $k - \omega$ modeli

$k - \epsilon$ modelinde kinematik girdap viskozitesi ν_t , hız ölçeği $\nu = k$ ve uzunluk ölçeği $= k^{3/2}/\epsilon$ 'nin ürünü olarak ifade edilir. Türbülans kinetik enerjisinin (ϵ) dağılıma oranı, değişkeni belirleyen tek olası uzunluk ölçeği değildir. Aslında, diğer birçok iki denklem modeli öne sürülmüştür. En belirgin alternatif, Wilcox tarafından önerilen ve ikinci değişken olarak $\omega = \epsilon/k$ (boyutlar s^{-1}) türbülans frekansını kullanan $k - \omega$ modelidir. Bu değişkeni kullanırsak uzunluk ölçeği $l = \sqrt{k}/\omega$ olur. Girdap viskozitesi şu şekilde (3.27) verilir (Versteeg ve Malalasekera, 2007):

$$\mu_t = \rho k / \omega \quad (3.27)$$

Yüksek Reynolds'ta türbülanslı akışlar için k ve ω için taşıma denklemi (3.28) aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (3.28)$$

Burada P_k (3.29),

$$P_k = \left(2\mu_\mu S_{ij}, S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \quad (3.29)$$

türbülanslı kinetik enerjinin üretim hızıdır ve son olarak şu şekilde Denklem (3.30) elde edilir:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \text{grad}(\omega) \right] + \gamma_1 \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (3.30)$$

Model sabitleri aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_k = 2.0 \quad \sigma_\omega = 2.0 \quad \gamma_1 = 0.553 \quad \beta_1 = 0.075 \quad \beta^* = 0.09$$

3.2.3.3. $k - \tau$ modeli

En son önerilerden biri, türbülanslı zaman ölçeği τ için taşıma denkleminin türetildiği $k - \tau$ modelidir. $\tau = k/\varepsilon$, k ve ε denklemlerinden elde edilir. Modellenen k ve τ denklemleri (3.31), (3.32), (3.31) şöyledir (Speziale vd., 1992):

$$(\rho U_j k)_{,j} = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) k_{,j} \right]_{,j} + P_k - \rho \frac{k}{\tau} \quad (3.31)$$

$$(\rho U_j \tau)_{,j} = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\tau 2}} \right) \tau_{,j} \right]_{,j} + \frac{\tau}{k} \left[(1 - c_{\varepsilon 1}) P_k + (c_{\varepsilon 2} - 1) \frac{k}{\tau} \right] + \frac{2}{k} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\tau 1}} \right) k_{,j} \tau_{,j} - \frac{2}{\tau} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\tau 2}} \right) \tau_{,j} \tau_{,j} \quad (3.32)$$

$$\mu_t \& = c_\mu \rho k \tau, \varepsilon = k/\tau \quad (3.33)$$

Sabitler şunlardır:

c_μ , $c_{\varepsilon 1}$ ve $c_{\varepsilon 2}$; $k - \varepsilon$ modelinden alınmıştır ve $\sigma_k^\tau = \sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2} = 1,36$ 'dır.

3.2.3.3. Diğer türbülans modelleri

k- ϵ modeline yönelik Lam-Bremhorst türbülans modeli, düşük Reynolds sayısı uzantısı, modelin ek kaynak terimleri gerektirmemesi avantajıyla birlikte, toplam dağılma oranı için bir taşıma denklemi kullanır. Bununla birlikte, modelin bir dezavantajı, sönümleme fonksiyonlarından birinin en yakın duvara yerel mesafenin hesaplanmasını gerektirmesidir (Lam ve Bremhorst, 1981). 1974’ te ortaya atılan Launder–Sharma türbülans modeli eski bir klasik model olup bir yüzey üzerindeki sıvı akışındaki laminar-türbülanslı geçişi tahmin etme yeteneği nedeniyle biraz dikkat çekmiştir (Launder ve Sharma, 1974). İki denklemlilik bir türbülans modeli olan Lien modeli, sadece ikinci ve üçüncü dereceden terimlerin türbülanslı viskozite tanımına dahil edilip edilmediğini konu edinir. Lien modeli hem ikinci dereceden hem de kübik terimler içerir, ancak örneğin düz tam gelişmiş borular veya kanallar gibi basit geometrileri çözmek için gerçekten ihtiyacınız olmadıkça katsayıları sıfıra ayarlayarak bunları kolayca ihmal edebilirsiniz (Lien, F. S. vd., 1996). Lien ve Leschziner türbülans modeli ise sıkıştırılabilir akış için bir basınç-hız çözüm stratejisi ve bunun ikinci moment türbülans kapanması kullanılarak şok/sınır katmanını etkileşimine uygulanması sağlanır (Lien ve Leschziner, 1993). Wilson (1974), normalleştirme grubu (RG), dalgalanmaların ortalamasını sistematik bir şekilde gerçekleştirerek temel denklemlerden etkili teoriler sağlanmasını için tasarlanmıştır. Shih T. H. (1990), duvara yakın düşük Reynolds sayıları için sıkıştırılamaz akışlar için k- ϵ türbülans modelini sunmuştur. Gerçekleştirilebilir k- ϵ modeli ise, hem düzlemsel hem de yuvarlak jetlerin yayılma oranı için gelişmiş tahminler sağlar. Ayrıca dönme, güçlü ters basınç gradyanları altındaki sınır katmanları, ayırma ve devirdaim içeren akışlar için üstün performans sergiler. Gerçekleştirilebilir k- ϵ modeli, hemen hemen her karşılaştırma ölçüsünde, karmaşık yapıların ortalama akışını yakalamada üstün bir yetenek gösterir (Shih vd., 1995).

Yakın zamanda geliştirilen yerel korelasyon geçiş modeli olan k- ω -SST RANS modeline dayalı Langtry-Menter 4-denklemlilik zamana bağlı bir SST modelidir. Geleneksel RANS türbülans modelleri ve türbülans modelindeki değişiklik, geçiş etkilerini hesaba katmaz. (Langtry ve Menter, 2009). Ölçek uyarlamalı k – ω SST türbülans modelinde ise delta, LES'e eşit olarak kullanılır. SAS (Ölçek Uyarlamalı Simülasyon), LES'in yaptığı gibi, hücre boyutuyla ilgili uzamsal ortalamayı kullanır (Davidson, 2006). kklOmega nispeten yeni bir geçiş türbülanslı modelidir. Model, sınır tabakasında geçişi tetikleyen

düşük frekanslı hız dalgalanmalarını tahmin etmek için dahil edilen ek bir taşıma denklemi ile k - ω 'ya dayanmaktadır (Abdol-Hamid vd., 2016). Launder, Reece ve Rodi türbülans modeli, Reynolds gerilim denklemi modeli (RSM) ve ikinci moment kapanışları olarak da adlandırılır, en eksiksiz klasik türbülans modelidir. Bu modellerde, girdap-viskozite hipotezinden kaçınılır ve Reynolds stres tensörünün bireysel bileşenleri doğrudan hesaplanır. Bu model, formülasyonları için tam Reynolds gerilim taşıma denklemini kullanır. Reynolds gerilmelerinin yönlü etkilerini ve çalkantılı akışlardaki karmaşık etkileşimleri açıklarlar (Launder vd., 1975). Speziale, Sarkar ve Gatski türbülans modeli (SSG), türbülansın basınç-gerinim korelasyonunun modellenmesi, gelişmiş ikinci dereceden kapatma modellerinin geliştirilmesine yönelik bir bakış açısıyla temel bir teorik bakış açısından incelenir. Temel dinamik sistemler teorisi ile birlikte değişmezlik hususları, standart kapatma modellerinin hiyerarşisinin analizinde kullanılır. Basınç-gerinim korelasyonunun, anizotropi tensörüne cebirsel olarak bağlı olan katsayılarla ortalama hız gradyanlarının doğrusal bir fonksiyonu olduğu varsayılır (Speziale, 1991). Gibson ve Dafa'Alla (1996)'nın sıkıştırılamaz akışlar için q -zeta türbülans modeli, iki denklemlili düşük Reynolds sayılı türbülans modeli olup epsilonun ayrıca hesaplanması gerekmektedir. Lien ve Kalitzin (2001)'in sıkıştırılamaz akışlar için v_2 - f türbülans modeli, türbülans kinetik enerjisi k ve türbülans dağılım oranı epsilon'u, akım çizgilerine normal türbülans gerilimi v_2 ve eliptik sönümleme işlevi f için ek denklemlerle çözer.

3.2.4. Büyük girdap simülasyonu (LES)

Büyük Girdap Simülasyonu (LES) metodolojisi, 1963'te Smagorinsky tarafından meteorolojide (atmosferin dolaşımı) kullanılmıştır. LES'in (türbülanslı kanal akışı) ilk mühendislik uygulaması 1970 yılında Deardorff tarafından sunulmuştur. Yöntemi daha sonra Schumann tarafından genişletilmiş ve geliştirilmiştir. 1980'lerde, türbülans simülasyonundaki araştırma odağı LES'ten Doğrudan Sayısal Simülasyona (DNS) kaymıştır. Günümüzde LES, örneğin yanma odalarında, mühendislikle ilgili fiziksel ve geometrik olarak karmaşık akışlar için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Kuşkusuz, bu eğilim, düşük maliyetli, oldukça güçlü bilgisayarların mevcudiyeti ile desteklenmektedir. Ek olarak, günümüz mühendisleri, standart türbülans modellerinin başarısız olduğu akış problemleriyle de sıklıkla karşılaşmaktadır. Ayrıca bazı durumlarda ortalama akış

frekansları türbülanslı dalgalanmalarla aynı sıradadır. Bu nedenle, zaman ortalaması alma anlamını yitirir ve LES veya DNS kullanmamız gerekmektedir.

LES, zaman ortalaması almak yerine, daha büyük ve daha küçük girdapları ayırmak için bir uzamsal filtreleme işlemi kullanır. Yöntem, kesik genişlikten daha büyük bir uzunluk ölçeğine sahip tüm bu girdapları kararsız bir akış hesaplamasında çözmek amacıyla bir filtreleme fonksiyonunun ve belirli bir kayma genişliğinin seçilmesiyle başlar. Bir sonraki adımda, zamana bağlı akış denklemleri üzerinde mekânsal filtreleme işlemi gerçekleştirilir. Uzamsal filtreleme sırasında, daha küçük, filtrelenmiş türbülanslı girdaplarla ilgili bilgiler yok edilir. Bu ve daha büyük, çözülmüş girdaplar ile daha küçük çözülmemiş girdaplar arasındaki etkileşim etkileri, örgü altı ölçekli gerilimlere veya SGS gerilimlerine yol açar. Çözülmüş akış üzerindeki etkileri bir SGS modeli aracılığıyla açıklanmalıdır. Sonlu hacim yöntemi kullanılırsa, zamana bağlı, boşluk filtreli akış denklemleri, çözülmemiş gerilimlerin SGS modeliyle birlikte bir kontrol hacimleri ızgarasında çözülür. Bu, kayma genişliğinden daha büyük ölçeklerde ortalama akışı ve tüm türbülanslı girdapları verir (Blazek, 2015).

3.2.4.2. Smagorinsky-Lilly türbülans modeli

Smagorinsky modeli, küçük ölçeklerin büyük ölçeklerden aldıkları tüm enerjiyi tamamen ve anında dağıttığını ima eden denge hipotezine dayanmaktadır. Cebirsel model formu (3.33) şudur:

$$\nu_T = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (3.33)$$

Burada

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (3.34)$$

Denklem (3.34), gerinim oranı tensörünün büyüklüğüdür ve C_s , Smagorinsky sabitini belirtir. Lilly tarafından bulunan teorik değer $C_s = 0.18$ 'dir. Bununla birlikte, Smagorinsky sabiti akışın türüne bağlıdır. Örneğin, kayma akışlarında, C_s 'nin yaklaşık olarak 0.1'e düşürülmesi gerekir. Denklemdaki filtre genişliği “ Δ ” genellikle ortalama örgü boyutunun iki katı olacak şekilde (3.35) seçilir, yani

$$\Delta = 2(\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{1/3} \quad (3.35)$$

Duvarların yakınında küçük ölçeklerin azaltılmış büyümesini hesaba katmak için girdap viskozitesinin değeri ν_T azaltılmalıdır, bu nedenle, Smagorinsky modeli, Van Driest sönümüne göre şu şekilde (3.36) değiştirilir:

$$\nu_T = [C_s \Delta (1 - e^{-y^+/25})]^2 |\bar{S}| \quad (3.36)$$

Burada y^+ boyutsuz duvar mesafesini temsil eder (duvar mesafelerinin hesaplanması için) (Blazek, 2015).

3.2.4.3. Duvara adapte yerel girdap viskozitesi modeli (WALE)

WALE modelinde, girdap viskozitesi şu şekilde (3.37) modellenmiştir:

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(s_{ij}^d s_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{s}_{ij} \bar{s}_{ij})^{5/2} + (s_{ij}^d s_{ij}^d)^{5/4}} \quad (3.37)$$

WALE modelinde L_s ve S_{ij}^d sırasıyla şu şekilde (3.38), (3.39) tanımlanır:

$$L_s = \min(\kappa d, C_w V^{1/3}) \quad (3.38)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (g_{ij}^{-2} + g_{ji}^{-2}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} g_{kk}^{-2}, \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.39)$$

WALE sabiti, C_w 'nin varsayılan değeri 0,325'tir. Denklemin geri kalanı Smagorinsky-Lilly modeli ile aynıdır. Bu uzamsal operatörle, WALE modeli, duvara bağlı akışlar için doğru duvar asimptotik (y^3) davranışını döndürmek üzere tasarlanmıştır (ANSYS Fluent Inc., 2006).

4. OPENFOAM

OpenFOAM, orijinal olarak Imperial College'da geliştirilen ücretsiz ve açık kaynaklı sonlu hacimli bir HAD kodudur. Yapılandırılmamış çokyüzlü örgüleri destekleyen hesaplamalı akışkan dinamiği için hücre merkezli sonlu hacim çerçevesidir. OpenFOAM, türbülans, sıvı akışları, elektromanyetik, kimyasal reaksiyonlar ve yanma gibi karmaşık problemleri çözmek için bir dizi kitaplık ve koddan oluşur. Ayrıca, örgü oluşturma araçları (örneğin blockMesh, snappyHexMesh), alan değerlerinin ayarlanması ve değiştirilmesi, örgü ayrıştırma ve örnekleme verileri dâhil olmak üzere işlem öncesi ve sonrası uygulamalar içerir. Servis taleplerini paralel olarak çalıştırmak için hazırlanmış olup kolay bir kurulum ve basit bir hesaplama yöntemi sağlar.

Kod C++ programlama dili ile yazılmıştır ve nesne yönelimlidir. Ticari kodlardan farklı olarak Open-FOAM bir kara kutu değildir, kullanıcı kaynak kodunu değiştirerek çözüme sürecinin her adımını kontrol edebilir ve değiştirebilir. Bu büyük bir avantajdır, çünkü birkaç modül ticari CFD kodlarından (Ansys, Fluent, CFX) veya formatlardan (VTK) veri dönüştürmeyi içerir ve çapraz doğrulamalara izin verir. Diğer genişletilmiş yetenekler, üçüncü taraf programları tarafından eklenir..

OpenFOAM, altı serbestlik dereceli (6-DoF) cisim hareketini değiştiren örgüleri destekler. 6-DoF katı cisim, katı cismin sınırını belirten bir yama üzerindeki sınır koşuluyla belirtilebilir. Dinamik örgü yöntemiyle, rastgeledönüş açılarını simüle ederken bile zahmetli yeniden örgü oluşturma işlemi gerçekleştirmeden gövde etrafındaki örgü kalitesi korunur. OpenFOAM'da, girdi dosyalarının belirli bir yapısının olması gerekir. En az üç temel dizin içeren ve verileri belirtmek için anahtar kelimeler aracılığıyla istenilen değişkenlerin uygun parametreler ile önceden belirlenmiş bir şekilde bir vaka kurulmalıdır. Bir sabit klasör ve bir sistem klasörü gereklidir. Ayrıca, bir zaman klasörü gereklidir, bu genellikle 0 olarak adlandırılır. Bahsedilen klasörlerin içinde yer alan alt klasörler ve dosyalar da vardır.

4.1. 0 Klasörü

Bu klasör, kullanılan değişkenlerin başlangıç koşullarına sahip dosyaları içerir. Laminer sıkıştırılamaz Navier Stokes denklemi için sadece p ve U'nun başlangıç koşullarını içeren dosyalar gereklidir. Türbülans modelleri veya sıkıştırılabilir akış için başka değişkenlerin

de eklenmesi gerekecektir. Her değişken dosyası için üç giriş yapılmalıdır. Değişkenin boyutu, dosyadaki boyutlar aracılığıyla atanır (örneğin, hız için m/s). Dâhili alan, “internalField” aracılığıyla atanır ve sınır alanı, “borderField” aracılığıyla verilir.

4.2. Constant (Sabit) Klasörü

Bu klasör, türbülans ve sıvı özellikleri için spesifikasyonlar içerir. Seçilen çözücüye bağlı olarak, farklı dosyaların belirtilmesi gerekir. RANS denklemlerini hesaplayan tüm çözücüler için, RASProperties dosyası kullanılan türbülans modelini belirler. Uygulanan türbülans modelinin türü, LES, RAS veya laminar modelin seçilebileceği "turbulenceProperties" bölümünde belirlenir. Sıkıştırılmaz çözücüler için, “transportProperties” dosyası kinematik viskozitenin davranışını belirler.

Ayrıca, örgüyü tanımlayan dosyaların bulunduğu “PolyMesh” adlı başka bir klasöre de sahiptir. Bu dosyalar, örgü yüzlerinin noktalarını ve hücrenin yüzlerini içeren, bir hücreye hangi yüzlerin ait olduğunu içeren noktaları ve hücreler arasındaki bağlantı hakkındaki bilgileri içeren komşuyu içerir. Ayrıca, sınırlar dosya sınırında verilir, burada sınırlara isimler atanır ve ayrıca örneğin “empty (boş)”, “wall (duvar)” veya “patch (yama)” gibi ne tür oldukları da belirtilir.

4.3. System (Sistem) Klasörü

Bu klasör, simülasyon çözümünde çeşitli parametreleri ayarlamak için birkaç dosya içerir. Bunlardan bazıları; başlangıç/bitiş zamanı, zaman adımı ve veri çıktısı için parametreler dâhil çalışma kontrol parametrelerinin ayarlandığı "controlDict"; çözümde kullanılan ayrıklaştırma şemalarının çalışma zamanında seçilebildiğı "fvSchemes"; çalıştırma için denklem çözücülerin, toleransların ve diğer algoritma kontrollerinin ayarlandığı "fvSolution"; ve örgüsü paralel simülasyonlar için atanmış sayıda parçaya ayıştırmak için “decomposeParDict” kullanılır.

4.3.1. controlDict

OpenFOAM çözücülerini, tüm çalışmalara bir veritabanı kurarak başlar. Veritabanı G/Ç (Girdi/Çıktı)'yi kontrol eder ve verilerin çıktısı genellikle çalıştırma sırasında zaman aralıklarında talep edildiğinden, zaman veritabanının ayrılmaz bir parçasıdır. “controlDict” sözlüğü, zamanı ve çıktı davranışını kontrol etme seçenekleri, sayısal

şemalar, çözücüler ve çözüm ilerlemesinin nasıl izleneceği dâhil olmak üzere OpenFOAM vakalarının nasıl çözüleceğini ve yönetileceğini içerir.

4.3.2. fvSchemes

fvSchemes dosyasında, modellenen denklemlerdeki farklı bileşenler için sayısal ayrıklaştırma şemaları atanır.

Zaman ayrıklaştırma şemaları şunlardır:

- Euler: Birinci dereceden, sınırlı, örtülü
- localEuler: Yerel zaman adımı, birinci dereceden, sınırlı, örtülü
- CrankNicholson (ψ): İkinci dereceden, sınırlı, örtülü
- backward: İkinci dereceden, örtülü
- steadyState: Zaman türevlerinin çözümü yok

Bu şemalar fvSchemes dosyasında “ddtSchemes” altında atanırlar. CrankNicholson durumunda, bir karıştırma fonksiyonu parametresi $\psi_0 [0, 1]$ seçilebilir. $\psi = 1$ için normal Crank-Nicholson şeması kullanılır.

Mevcut interpolasyon şemaları aşağıda verilmiştir. Bunlar “interpolationSchemes” altında atanır.

- linear: Doğrusal interpolasyon
- cubicCorrection: Kübik şema
- midPoint: Simetrik ağırlıklı doğrusal interpolasyon

İnterpolasyon için kullanılabilecek upwind şemalar da vardır, ancak bunlar konvektif terimler dışında nadiren kullanılır.

“gradSchemes” alt sözlüğü gradyan terimlerini içerir. Öncelikle gradyan terimleri için kullanılan varsayılan ayrıklaştırma şeması, Gauss doğrusaldır; Gauss girişi, değerlerin hücre merkezlerinden yüz merkezlerine interpolasyonunu gerektiren Gauss integrasyonunun standart sonlu hacim ayrıklaştırmasını belirtir. Bu, hem adveksiyon terimlerini (U hızının advektif akıyı sağladığı yerde) hem de genellikle doğası gereği difüzyona neden olan diğer terimleri içerir. Gradyan şemaları şunlardır:

- Gauss (interpolationScheme): İkinci dereceden, Gauss integrasyonu
- leastSquares: İkinci dereceden, en küçük kareler
- fourth: Dördüncü sıra, en küçük kareler
- cellLimited (gradScheme): Yukarıdaki şemalardan birinin hücre sınırlı versiyonu
- faceLimited (gradScheme): Yukarıdaki şemalardan birinin yüz sınırlı versiyonu

“snGradSchemes” alt sözlüğü, yüzey normal gradyan terimlerini içerir. Bir yüzey normal gradyanı, bir hücre yüzünde değerlendirilir; yüzün birleştiği 2 hücrenin merkezindeki değer gradyanının, yüze normal bileşenidir. Bir yüzey normal gradyanı kendi başına belirtilebilir ve ayrıca Gauss integrasyonunu kullanarak bir Laplace terimini değerlendirmek için gereklidir.

- corrected: Açık dikey olmayan düzeltme
- uncorrected: Dikey olmayan düzeltme yok
- limited: Dikey olmayan düzeltme örtülü
- bounded: Sınırlandırılmış düzeltme
- fourth: Dördüncü sıra, en küçük kareler

Laplace terimleri için, difüzyon katsayılarının interpolasyonu için bir interpolasyon şeması ve ayrıca yüzey gradyanı için bir yüzey normal gradyan şeması gereklidir. Laplace terimleri, “laplacianSchemes” altında atanır. Sınırlı düzeltmeye, ne kadar dik olmayan düzeltme yapıldığını belirleyen $\phi \in [0,1]$ değerine atanmalıdır. Aşağıda yüzey normal şemaları sunulmaktadır:

- corrected: Sınırsız, ikinci dereceden, korunumlu
- uncorrected: Sınırlı, birinci dereceden, korunumsuz
- limited: Düzeltilmiş ve düzeltilmemiş karışımı
- bounded: Sınırlı skalerler için birinci dereceden
- fourth: Sınırsız, dördüncü dereceden, korunumlu

“divSchemes” alt sözlüğü sapma terimlerini, yani $\nabla \cdot$ biçimindeki terimleri, Laplacian terimleri ($\nabla \cdot (\Gamma \nabla \dots)$) biçimindeki hariç) içerir ve “divSchemes” altında atanmaktadır.

"upwind" dayalı şemalardan başka interpolasyon şemaları kullanılabilir fakat nadirdir. Diverjans terimlerinin ayrıklaştırılması için, kullanılan şemalar şunlardır:

- linear: İkinci dereceden, sınırsız
- skewLinear: İkinci dereceden, (daha fazla) sınırsız, çarpıklık düzeltmesi
- cubicCorrected: Dördüncü sıra, sınırsız
- upwind: Birinci dereceden sınırlandırılmış
- linearUpwind: Birinci/ikinci dereceden doğrusal upwind, sınırlı
- QUICK: Birinci/ikinci dereceden sınırlandırılmış
- TVD şemaları: Birinci/ikinci dereceden sınırlandırılmış
- SFCD: İkinci dereceden sınırlı
- NVD şemaları: Birinci/ikinci dereceden sınırlandırılmış

4.3.3. fvSolution

Bu dosyada sıralı denklemler için doğrusal çözücüler atanır. Ayrıca, doğrusal çözücü toleransı ve maksimum yineleme sayısı burada atanır. OpenFOAM'da mevcut lineer çözücüler; önceden koşullandırılmış eşlenik veya iki eşlenik gradyan çözücüler, düz çözücüler, genelleştirilmiş geometrik cebirsel çok örgülü (GAMG) çözücüler ve ayrıca köşegen çözücülerdir (açık sistemler için). Eşlenik gradyan çözücüler, diyagonal-eksik LU (asimetrik sistemler için DILU), diyagonal-eksik Cholesky (simetrik sistemler için DIC), diyagonal önkoşullama ve GAMG önkoşullama önkoşullayıcılarını kullanabilir. Mevcut yumuşatıcılar Gauss-Seidel ve Diagonal tamamlanmamış Cholesky'dir (simetrik matrisler için). Sıralı denklemlerin gevşetilmesi bu dosyada ayarlanabilir ve SIMPLE veya PISO algoritmaları kullanılıyorsa bunlar için ayarlar da belirtilebilir (OpenCFD, 2009).

4.4. Çözücüler

OpenFOAM dağıtımına sahip çözücüler "Solvers" dizininde bulunur. Bu dizin ayrıca süreklilik mekaniği kategorisine göre birkaç dizine bölünmüştür, örn. sıkıştırılamaz akış, yanma ve katı cisim gerilme analizi gibi. Her çözücüye makul ölçüde açıklayıcı bir ad

verilir, örneğin “icoFoam” sıkıştırılamaz, laminar akışı çözer. Aşağıda, kullanılan çözücüler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 OpenFOAM'da kullanılan çözücüler (OpenCFD, 2009)

Temel CFD Kodları	▪ laplacianFoam ▪ potentialFoam ▪ scalarTransportFoam
Sıkıştırılamaz Akış	▪ adjointShapeOptimisationFoam ▪ boundaryFoam ▪ icoFoam ▪ pimple/simpleFoam ▪ pisoFoam ▪ porousSimpleFoam ▪ shallowWaterFoam ▪ SRFPimple/SimpleFoam
Sıkıştırılabilir Akış	▪ rhoCentralFoam ▪ rhoPimple/SimpleFoam ▪ rhoPorousSimpleFoam
Çok Fazlı Akış	▪ cavitatingFoam ▪ compressibleInterFoam ▪ compressibleMultiphaseInterFoam ▪ driftFluxFoam ▪ inter(Mixing)Foam ▪ multiphaseEuler/InterFoam ▪ potentialFreeSurfaceFoam ▪ twoLiquidMixingFoam
Doğrudan Sayısal Simülasyon (DNS)	▪ dnsFoam
Yanma	▪ buoyantReactingFoam ▪ chemFoam ▪ PDRFoam ▪ reactingFoam ▪ Xi(Engine)Foam
Isı Transferi Ve Yüzdürme Güdümlü Akışlar	▪ buoyantFoam ▪ chtMultiRegionFoam ▪ thermoFoam
Parçacık İzleme Akışları	▪ denseParticleFoam ▪ particleFoam ▪ rhoParticleFoam
Ayrık Yöntemler	▪ dsmcFoam ▪ mdEquilibrationFoam ▪ mdFoam
Elektromanyetik	▪ electrostaticFoam ▪ magneticFoam ▪ mhdFoam
Katıların Gerilme Analizi	▪ solidDisplacementFoam ▪ solidEquilibriumDisplacementFoam

4.5. Örgü

Örgü, sayısal çözümün ayrılmaz bir parçasıdır ve geçerli ve dolayısıyla doğru bir çözüm sağlamak için belirli kriterleri karşılamalıdır. Herhangi bir çalışma sırasında OpenFOAM, örgünün oldukça sıkı bir dizi geçerlilik kısıtlamasını karşılayıp karşılamadığını kontrol eder ve kısıtlamalar karşılanmazsa çalışmayı durdurur. Bu durum OpenFOAM'un sadece örgünün geçerli olmasını sağlamak için iyi uygulamaları benimsemesinden dolayıdır; aksi takdirde, daha çalışma başlamadan önce çözüm kusurlu olabilir.

Varsayılan olarak OpenFOAM, keyfi çokgen yüzlerle sınırlanmış 3-D'de keyfi polihedral hücrelerin bir örgüsünü tanımlar, yani hücreler, her yüz için kenar sayısında herhangi bir sınırlama veya hizalamasında herhangi bir kısıtlama olmadığı sınırsız sayıda yüze sahip olabilir. Bu genel yapıya sahip bir örgü, OpenFOAM'da bir polyMesh olarak bilinir. Bu örgü türü, özellikle alanın geometrisi karmaşık olduğunda veya zamanla değiştiğinde örgü oluşturma ve işlemede büyük özgürlük sunar. Bununla birlikte, mutlak örgü genelliğinin bedeli, geleneksel araçlar kullanılarak oluşturulan örgüleri dönüştürmenin zor olabilmesidir. OpenFOAM kitaplığı, bu nedenle, önceden tanımlanmış hücre şekilleri kümelerine dayalı olarak geleneksel örgü biçimlerini yönetmek için “cellShape” araçları sağlar.

Genel anlamda, bir örgü oluşturucunun ana görevi, daha önce açıklandığı gibi “polyMesh” dosyalarını oluşturmaktır. OpenFOAM için özel olarak tasarlanmış ve iki ana geliştirme dalına yayılmış çeşitli örgü oluşturucu türleri vardır.

1. BlockMesh, snappyHexMesh, foamHexMesh, foamyQuadMesh
2. cfMesh

Kalan bazı araçlar vardır, extrudeMesh ve extrud2DMesh, ancak yaygın olarak kullanılmamaktadır. Ayrıca bu başlık altında OpenFOAM'ın kendisinin içinde bulunmayan fakat “.stl” dosyası için kullanılan Salome programı da yer almaktadır.

4.5.1. BlockMesh

“blockMesh” kodunu çalıştırırken, “blockMeshDict” adında bulunması gereken, sabit/polyMesh dizininden (otomatik olarak) okunur. Örgülerin oluşturulması çok zor ve bazen imkânsız çünkü “blockMesh” blok yapılı altı yüzlü kafesler üretiyor ve bunlar daha

sonra isteğe bağlı yapılandırılmamış OpenFOAM formatına dönüştürülüyor. Bu nedenle, bu kullanılarak yalnızca basit kafesler oluşturulur ve gerçek geometrinin daha fazla ayrıklaştırılması, “blockMesh”i harika bir araç yapan “snappyHexMesh” kullanılarak kaydırılır. “BlockMeshDict”i açıklamak için, aşağıda anahtar kelimelerin açıklandığı basit bir Tablo 4.2’de görülebilir:

Tablo 4.2 BlockMeshDict'te kullanılan anahtar sözcükler (OpenCFD, 2009)

Anahtar Kelime	Açıklama
convertToMeters (Metreye Dönüştür)	Köşe koordinatları için ölçeklendirme faktörü (Genellikle 1'e ayarlanır)
Köşeler	1 - Bloklar için girdap konumlarını tanımlayın 2- Kartezyen koordinatlar (x, y, z) 3 - Listedeki her köşe = 1 dizin
Kenarlar	1 - Blok topolojisi ve örgü ayarlarını tanımlayın 2 - Kenar, listelenmemişse düzdür 3 - Yay ve Eğri mevcut
Blok	Köşe etiketlerinin ve örgü boyutunun sıralı listesi
Yamalar	Sınır koşulu için yüzey yamaları tanımlayın
mergePatchPairs (Yama Çiftlerini Birleştirme)	1 - Birden çok (ayrılmış) bloğu tek bir örgüde birleştirin 2 - Bloklar listelenmemişse bire bir yazışma

4.5.2. SnappyHexMesh

BlockMesh ile karşılaştırıldığında, snappyHexMesh çok fazla çalışma gerektirmeyebilir, bu nedenle kullanıcının üzerinde daha az kontrolü vardır. SnappyHexMesh, genellikle blockMesh ile oluşturulan, zaten var olan bir örgüyü alan ve onu istediğimiz örgüye dönüştüren bir örgü oluşturucudur. Bunu yapmak için şunları gerektirir:

1. İyi tanımlanmış bir sözlük, yani system/snappyHexMeshDict
2. İyi tanımlanmış yüzeylere sahip STL/OBJ dosyaları gibi iyi geometrik tanımlar
3. eMesh özelliği kenar dosyaları

4. Paralel yürütme, bir uçbirim penceresinde mpirun kullanmak

SnappyHexMesh'in yürütme akışı 5 adıma bölünebilir. Çalışma akışının basit bir açıklaması aşağıda görülebilir.

1. BlokMesh:

- Taban örgüsünün oluşturulması;
- BlockMesh kullanılarak özel olarak yapmak

2. refineMesh:

- Taban örgüsünün iyileştirilmesi;
- Yüzey iyileştirme, yani özellik çizgileri ve eğrilik
- Her biçimde (kapalı, yüzeyler, geometrik şekiller) hacmin inceltilmesi

3. CastellatedMesh:

- Kullanılmayan hücrelerin çıkarılması;
- Kullanıcı spesifikasyonu geliştirme;
- Ortaya çıkan örgü sadece altı yüzlülerden oluşur.

4. SnapControls:

- Örgünün yüzeye tutturulması
- Topoloji, altı yüzlüden çok yüzlüye değişir
- Yüzeylere yakın hücreler silinebilir veya birleştirilebilir

5. Katman eklenmesi

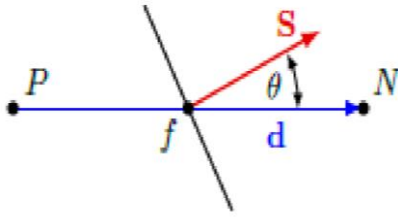
- Geometri yüzeyindeki ek hücreler;

- Önceden var olan hücreler geometriden uzaklaştırılır.

4.5.3. checkMesh (örgü kontrolü)

“checkMesh”, mevcut bir örgü üzerinde testler yapmak için bir araçtır. Diğer araçlar gibi, checkMesh de vaka dizininden çağrıldığını varsayar. “checkMesh”, vaka dizini dışında başka bir yerden çağrılacaksa, “-case” seçeneği ile vaka dizinine giden yol belirtilmelidir. “checkMesh”in çıktısını anlamak için “checkMesh” tarafından hesaplanan bazı nicelikleri tanımlamak gerekir. Bunlardan biri, dik olmama, örgünün yüzlerinin bir özelliğidir. İç yüzler ve sınır yüzler arasında ayırım yapılması gerekir.

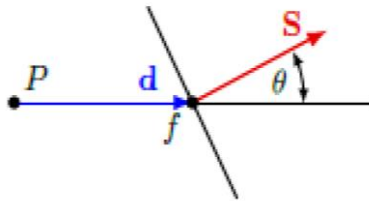
Her iç yüz iki hücreyi birbirine bağlar. Dik olmama, hücre merkezlerini birleştiren vektör ile yüzey normal vektörü arasındaki açıdır. Şekil 4.1’de hücre merkezlerini birleştiren vektör d ve normal yüz vektörü S ile gösterilir.



Şekil 4.1 İç yüzler için dikey olmamanın tanımı (OpenCFD, 2009)

Tamamen dik bir örgüde, d ve S vektörleri paraleldir. Bir örgü dik değilse, bu vektörler Şekil 18’deki gibi bir açı çizer. “checkMesh” tarafından bildirilen dik olmama, Şekil 18’deki θ açısıdır. Bu nedenle, bildirilen dik olmama, 0° ile 90° aralığında yer alır. 0° ’lik bir dik olmama, örgünün dik olduğu ve altı yüzlü (kuboidler) veya düzenli dört yüzlüden oluştuğu anlamına gelir.

Dik olmama, sınır yüzleri için de tanımlanır. Şekil 4.2’de, f yüz merkezi ile şematik bir sınır yüzünü göstermektedir.



Şekil 4.2 Sınır yüzleri için dikey olmamanın tanımı (OpenCFD, 2009)

Sınır yüzlerinin dik olmaması, hücre merkezi P ile yüz merkezi f yi birleştiren yüz alanı vektörü S ile d vektörü arasındaki derece cinsinden açı olarak tanımlanır.

OpenFOAM, bir örgüdeki eğriliği (çarpıklık) diğer araçlardan farklı tanımlar. OpenFOAM'a özgü bu tanımın nedeni, bir eğrilik hatasının örgü kaynaklı ayırıklaştırma hatalarının bir parçası olarak tanımlanmasıyla ilişkili olmasıdır. Çarpıklık, örgünün yüzlerinin bir özelliğidir ve iç yüzler ile sınır yüzlerin ayrımı gerekir. Örgünün kontrolünde ayrıca; yüz içbükeyliği, yüz çarpıklığı ve hücre içbükeyliği konuları da önem taşır (OpenCFD, 2009).

4.5.4. Salome

Salome, sayısal simülasyon için ön ve son İşleme için genel bir platform sağlayan ücretsiz ve açık kaynak olan bir yazılımdır. Ücretsiz yazılım olarak sunulan yeniden kullanılabilir bileşenlerden oluşan açık ve esnek bir mimariye dayanmaktadır (SALOME Platform, 2012). Salome bir CAD/CAE entegrasyon platformudur. Aşağıdakiler için yeniden kullanılabilir bileşenler sağlar:

- 3D modelleme (aşağıdan yukarıya inşa, içe aktarma, iyileştirme)
- Görselleştirme
- Hesaplamalı şema yönetimi
- Rötüş

Salome, özel bileşenlerin integrasyonu için tasarlanmıştır:

- CAD arayüzleri
- Örgü üreteçleri
- Belirli ön işlemcilere sahip sonlu eleman çözücüler.

Salome platformu;

- CAD modelleme ve hesaplama yazılımı (CAD-CAE bağlantısı) arasında birlikte çalışabilirliği destekler.
- Sayısal hesaplama için yeni bileşenlerin heterojen sistemlere integrasyonunu kolaylaştırır.
- Hesaplama yazılımı arasındaki çoklu fizik bağlantısına ayarlar.
- Çalışmaları gerçekleştirmenin maliyetlerini ve gecikmelerini azaltmaya yardımcı olan, kullanıcı dostu ve verimli, genel bir kullanıcı arabirimi sağlar.
- Tüm işlemlere programatik entegre Python konsolu aracılığıyla erişilebilir.

4.5.4.1. Geometri

Bu modül, karmaşık bir CAD modeli oluşturmak, düzenlemek, içe aktarmak veya değiştirmek için zengin bir komut seti sağlar. Modül, modelin sınır temsilini (BRep) sağlayan ve sonraki örgü oluşturma işlemlerinin gerektirdiği topolojik yapıyı koruyan Açık Cascade Teknolojisi'ne dayalı bir geometri çekirdeği tarafından desteklenmektedir. Salome, BREP(r) ve ACIS(r) formatında IGES, STEP'ten geometri alabilir. Ayrıca, modeli basitleştirmek veya yetersiz tanımlanmış içe aktarılan modelleri onarmak için kullanılabilecek güçlü bir şekil iyileştirme işlevleri seti sağlar. Geometri modülü işlevlerine grafiksel kullanıcı arabirimi (GUI) aracılığıyla erişilebilir. Bunlara ayrıca, karmaşık otomatik betikler oluşturmaya izin veren Salome, Python yürütme motorundan programlı olarak da erişilebilir. Birçok sayıda formatı destekleyip içe ve dışa aktarabilir. Örn. ACIS, BREP, STEP, IGES, CATIA V4 / ProEngineer (c) / SolidWorks / SolidEdge / Parasolid / Nx.

4.5.4.2. Salome'de örgü

Örgü, temel geometrik öğelerle üç boyutlu uzayın bir alt kümesinin ayrık bir yaklaşımını temsil eder. Bir Salome çalışması birden fazla örgü içerebilir, ancak örtülü olarak bir süper örgü oluşturmazlar ve son olarak bunların her biri yalnızca ayrı ayrı kullanılabilir (örneğin dışa aktarılabilir). Bir örgünün yapısı, düğümler ve bu düğümlere dayalı elemanlar tarafından tanımlanır. Bir elemanın geometrisi, onu oluşturan düğümlerin sırası

ve bağlantı kuralları ile tanımlanır. Daha düşük bir boyutun öğelerini temel alan öğe tanımı desteklenmez.

Örgü yapısı aşağıdaki özellikleri içerir:

- Düğüm: 3D uzayda koordinatlarla (x, y, z) bir konum tanımlayan bir örgü ögesi.
- Kenar: İki düğümü birbirine bağlayan 1 boyutlu örgü elemanı.
- Yüz: Yüz düğümleri arasındaki bağlantılarla sınırlanan yüzeyin bir bölümünü temsil eden 2D örgü ögesidir. Bir yüz üçgen, dörtgen veya çokgen olabilir.
- Hacim: Hacim yönleriyle sınırlanan 3B alanın bir bölümünü temsil eden 3D örgü ögesidir. Her yönü tanımlayan bir birimin düğümleri, bağlantı kuralı tarafından tanımlanır. Bir hacim dörtyüzlü, altıyüzlü, beşyüzlü, piramit, altıgen veya çokyüzlü olabilir.
- 0D ögesi: Bir düğüm tarafından tanımlanan örgü ögesidir.
- Top elemanı: Bir düğüm ve bir çap ile tanımlanan ayrı örgü elemanıdır.

Geometri üzerinde bir örgü oluşturmak için, bir örgü nesnesi oluşturmak gerekir. Bunun için:

1. Geometri modülünde üretilen bir geometrik şekil seçilir (ana şekil);
2. Meshleme parametreleri dâhil olmak üzere örgü algoritmaları ve seçilen örgü oluşturma algoritmaları tarafından dikkate alınacak kısıtlamaları belirten sınır koşulları dikkate alınmalıdır.
 - a. Örgü tipi (Herhangi bir örgü tipi, Altıyüzlü, Dörtyüzlü, Üçgen veya Dörtgen)
 - b. Örgü oluşturma algoritmaları (1D: Kenarların örgülenmesi için, 2D: Yüzlerin örgülenmesi için 3D: Katı nesneler örgülenmesi için)
3. Ardından “Compute” komutu ile örgü oluşturmaya başlatılabilir.

Geometride örgü oluşturma, aşağıdan yukarıya bir akışta gerçekleştirilir; önce köşelerdeki düğümler oluşturulur, ardından kenarlar ve köşelerdeki düğümler kullanılarak parçalara bölünür. Segmentlerin düğümleri daha sonra yüzleri birbirine bağlamak için kullanılır, daha sonra yüz düğümlerinin katıları birbirine geçirmek için

kullanılır. Bu, örgünün uygunluğunu otomatik olarak sağlar. Örgü nesnesi oluşturulduktan ve tüm sınır koşulları atandıktan sonra ve hesaplama işleminden önce, nihai örgü boyutunu hesaplamak mümkündür. Bunun yanında örgü önizlemesi de yapmak mümkündür. Boyut hesaplamaya veya istenilmeyen bir durumun kaldırılması sağlanabilir. Örgü hesaplaması tamamlandığında “örgü hesaplama bilgi kutusu” örgü hesabı hakkında bilgi sağlar. Tekrardan örgüyü düzenlemek ve hesaplamak mümkündür. Salome’de, örgünün içe veya dışa aktarılmasına izin veren bir işlevsellik vardır. Aşağıda bu formatlar verilmiştir:

- MED,
- UNV (I-DEAS 10),
- STL,
- CGNS,
- GMF (MeshGems paketindeki “distene” ürünlerinin dâhili formatı),
- DAT (basit ascii formatı).

4.5.4.3. Şekillendirici

Salome'nin şekillendirici modülü aşağıdakiler için tasarlanmıştır:

- Geometrik modellerin IGES, BREP, STEP ve XAO formatlarında içe ve dışa aktarılması
- Çok çeşitli işlevleri kullanarak geometrik nesnelerin parametrik yapısı
 - Sonuç olarak ekstrüzyon veya dönüş ile eskiz eklentisini kullanarak karmaşık 2D bölümlerin oluşturulması
 - İlkeller eklentisinde tanımlanan ilkelleri kullanarak model oluşturma
 - Boole işlemlerinin kullanımı
- OCC görüntüleyicide geometrik nesneleri görüntüleme
- Çeşitli algoritmalar kullanarak geometrik nesnelerin dönüşümü

Nesneler oluşturulduğunda bağımsız değişken olarak kullanılmak üzere önceden tanımlanmış parametreleri kolayca ayarlamak mümkündür. Neredeyse tüm şekillendirici modül işlevlerine “Python Arayüzü” aracılığıyla erişilebilir. Şekillendirici modülü, birkaç belge içeren bir çalışma ile çalışır:

- Parça seti
- Bir veya birkaç parça

Yalnızca bir belge etkin olabilir. Karmaşık modellerde parça seti birkaç parçadan oluşur. Parça setindeki parçalar kopyalanabilir, birbirine göre konumlandırılabilir veya basitçe tercüme edilebilir. Yeni bir çalışma, yalnızca silinemeyen 7 varsayılan yapıya sahip bir parça seti içerir:

- Koordinat sisteminin orijini ile çakışan bir nokta başlangıç noktası
- Koordinat eksenleriyle çakışan üç eksen OX, OY, OZ
- Koordinat düzlemleriyle çakışan üç düzlem YOZ, XOZ ve XOY

Sadece noktalar, eksenler, düzlemler ve çizimler daha sonra herhangi bir parçada kullanılmak üzere “Partset”e eklenebilir. Parametreler hem parça kümesinde hem de herhangi bir parçada kullanılabilir. Parça eklentisinde açıklandığı gibi yeni bir parça oluşturulabilir. Mevcut belgeyi etkinleştirmek için çift tıklama veya açılır menü kullanılabilir (SALOME Platform, 2012).

4.6. Modeller ve Fiziksel Özellikler

OpenFOAM, her biri belirli bir problem sınıfı için tasarlanmış çok çeşitli çözücüler içerir. Denklemler ve algoritmalar bir çözücünden diğerine farklılık gösterir, bu nedenle bir çözücünün seçimi, kullanıcının kendi özel durumu için modellemede bazı ilk seçimleri yapmasını içerir. Nihai olarak vakayı tanımlamak için gereken birçok parametreyi ve fiziksel özelliği belirler, ancak kullanıcıya sabit dizinindeki sözlük dosyalarındaki girişler yoluyla çalışma zamanında belirtilebilecek bazı modelleme seçenekleri bırakır. Çalışma zamanında belirtilebilecek daha yaygın modellerin ve ilişkili özelliklerin çoğunu ele almaktadır.

4.6.1. Openfoam’da sınır koşulları

Başarılı bir simülasyon için uygun sınır koşullarının ayarlanması çok önemlidir. Kötü konumlanmış sınır koşulları, fiziksel olarak yanlış tahminlere ve çoğu durumda çözücünün başarısız olmasına yol açacaktır. Kullanıcılar, çözülen her alan için sınır koşullarını belirtmelidir. OpenFOAM ile sağlanan öğreticiler, çeşitli durumlar için seçim

ve uygulama açısından iyi uygulama örneklerini göstermektedir. Bazı sınır koşulları aşağıda verilmiştir:

Temel: Temel tipler

- fixedValue (sabit değer)
- fixedGradient (sabit gradyan)
- mixed (karışım)

Kısıtlama: Geometrik kısıtlamalar

- Simetri
- Kama
- Boş
- Döngüsel

Türetilmiş: Özel koşullar

- fixedProfile: Bir değişkenin profilini belirtmek için
- swirlFlowRateInletVelocity: Dönen bir akış için hız girişini belirtmek için sağlayan akış hızı
- inletOutlet: Ters akışın işlenmesiyle çıkış durumu
- codedFixedValue: Kullanıcı kodlaması tarafından ayarlanan sabit değer

4.6.2. Termofiziksel modeller

Termofiziksel modeller, termal enerjinin, sıkıştırılabilirliğin veya kütle transferinin önemli olduğu durumları tanımlamak için kullanılır. OpenFOAM, termofiziksel özelliklerin veya sıcaklık, basınç ve bileşim fonksiyonlarının sabit olmasına izin verir. Termal enerji, entalpi veya iç enerji şeklinde tanımlanabilir. “ $p - v - T$ ” ilişkisi, çeşitli durum denklemleriyle veya izobarik bir sistem olarak tanımlanabilir. OpenFOAM'da, diğer özelliklerin hesaplandığı bir basınç-sıcaklık “ $p - T$ ” sistemi olarak bir termofiziksel model oluşturulur. Simülasyonda kullanılan tam termofiziksel modeli belirten “termoType” adlı bir zorunlu sözlük girişi vardır. Termofiziksel modelleme, temel hal

denklemini tanımlayan bir katmanla başlar ve ardından aşağıda kısmen listelendiği gibi termodinamik, taşıma ve karışım modellemesi için başka katmanlar ekler.

equationOfState: Durum Denklemi

- icoPolynomial: Sıkıştırılamaz bir polinom durum denklemi, ör. sıvılar için
- perfectGas: Mükemmel gaz hal denklemi

thermo: Temel termodinamik özellikler

- eConstThermo: İç enerji e ve entropi s değerlendirilmesiyle birlikte sabit özgül ısı c_p modeli
- hConstThermo: Entalpi h ve entropi s değerlendirilmesi ile sabit özgül ısı c_p modeli

specieThermo: Türetilmiş termodinamik özellikler

- specieThermo: Türlerin c_p , h ve/veya s 'den türetilen termodinamik özellikleri

transport: Taşıma özellikleri

- constTransport: Sabit taşıma özellikleri
- polynomialTransport: Polinom tabanlı sıcaklığa bağlı taşıma özellikleri

mixture: Karışım özellikleri

- pureMixture: Pasif gaz karışımları için genel termodinamik model hesaplaması
- homogeneousMixture: Normalleştirilmiş yakıt kütle fraksiyonuna dayalı yanma karışımı b

thermoModel: Termodinamik model

- hePsiThermo: Entalpi h veya iç enerji e ve sıkıştırılabilirlik ψ 'ye dayalı genel termodinamik model hesaplaması
- heRhoThermo: Entalpi h veya iç enerji e ve yoğunluk ρ 'ya dayalı genel termodinamik model hesaplaması

Bu tezde kullanılan termo tipleri aşağıdaki Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 Simülasyonda kullanılan termo tipleri (OpenCFD, 2009)

type	heRhoThermo
mixture	pureMixture
transport	const
thermo	hConst;
equationOfState	Boussinesq
specie	specie
energy	sensibleEnthalpy

Bu tezde reaksiyon içermeyen, sabit bileşenlere sahip bir karışım olarak “pureMixture” kullanıldığından dolayı alt bir sözlük belirlemek gerekir. Aşağıda ki tabloda bu sözlük verilmiştir.

Tablo 4.4 Simülasyonda kullanılan pureMixture alt sözlüğü

specie		equationOfState		thermodynamics		transport	
molWeight	257.688 (CuSO ₄ - H ₂ SO ₄)	rho0	1097	Cp	1000.5754608	mu	0.001253
		beta	0.000005613				
		T0	293.15	Hf	0	Pr	2014

Cp: Sülfürik asidin özgül ısısı (J/kg.K)

Hf: Doymuş sıvının entalpisi (J/kg)

mu: dinamik viskozite (kg/m.s)

Pr: Laminer Prandtl sayısı

4.6.3. Openfoam’da türbülans modelleri

“turbulenceProperties” sözlüğü, türbülans modellemesi içeren herhangi bir çözücü tarafından okunur. Bu dosyanın içinde, kullanılacak türbülans modelleme türünü kontrol eden "simulationType" anahtar sözcüğü bulunur:

- laminar, türbülans modeli kullanmaz;
- RAS, Reynolds ortalama stres (RAS) modellemesini kullanır;
- LES, büyük girdap simülasyonu (LES) veya ayrılmış girdap simülasyonu (DES) modellemesi kullanır.

RAS seçilirse, RAS modelleme seçimi bir RAS alt sözlüğünde belirtilir. Benzer şekilde LES seçilirse, LES modelleme seçimi bir LES alt sözlüğünde belirtilir ve LES türbülans modeli “LESModel” girişi tarafından seçilir. DES modellerinin, mevcut LES modellerinin bir alt kümesi olarak tanımlandığını da unutulmamalıdır. Aşağıda OpenFOAM’da kullanılabilen türbülans modelleri Tablo 4.5’te verilmiştir (Greenshields, 2015):

Tablo 4.5 OpenFOAM’da yer alan türbülans modelleri (OpenCFD, 2009)

Sıkıştırılamaz RANS Türbülans Modelleri	Sıkıştırılabilir RANS Türbülans Modelleri	Sıkıştırılamaz/Sıkıştırılabilir LES Türbülans Modelleri
LRR	LRR	DeardorffDiffStress
LamBremhorstKE	LauderSharmaKE	Smagorinsky
LauderSharmaKE	RNGkEpsilon	SpalartAllmarasDDES
LienCubicKE	SpalartAllmaras	SpalartAllmarasDES
LienLeschziner	buoyantKEpsilon	SpalartAllmarasIDDES
RNGkEpsilon	kEpsilon	WALE
SSG	kOmega	dynamicKEqn
ShihQuadraticKE	kOmega2006	dynamicLagrangian
SpalartAllmaras	kOmegaSST	kEqn
kEpsilon	kOmegaSSTLM	kOmegaSSTDES

Tablo 4.5'in devamı

kOmega	kOmegaSSTSAS	
kOmega2006	realizableKE	
kOmegaSST	v2f	
kOmegaSSTLM		
kOmegaSSTSAS		
kkLOmega		
qZeta		
realizableKE		
v2f		

4.6.3.1. k – ω SST (kayma gerilimi aktarımı) türbülans modeli

1994 yılında Menter tarafından geliştirilmiştir. Bu model, daha önce açıklanan türbülans modellerinin güçlü yanlarını birleştiren hibrit bir modeldir ve bu tezde bu model kullanılmıştır. Yakın duvar bölgesinde “k-Omega” ve serbest kayma akışında “k-Epsilon” olarak çalışır. Amaç, k-omega ile karşılaştırıldığında serbest akış koşullarına (sınır katmanı dışındaki akış) duyarlılığı azaltmaktır. Diğer girdap viskozite modelleriyle karşılaştırıldığında gelişmiş bir ters basınç gradyan performansına sahip olan kayma gerilimi aktarımı (SST) modelini verir. “k” için denklem, daha önce verilen “k-Epsilon” modelindeki ile aynıdır, “ ω ” denklemi şu şekilde (4.1) yazılır:

$$U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \gamma \frac{1}{v_T} P_k - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4.1)$$

Türbülans girdap viskozitesi şu şekilde (4.2) hesaplanır:

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (4.2)$$

F_1 , bir modelden diğetine geçiş yapan bir karıştırma işlevidir. kOmegaSST modeli, yüksek doğruluklu sınır katmanı simülasyonları için önerilir (Gallego Marcos, 2013). OpenFOAM'da, bireysel yamalar üzerinde sınır koşulları olarak uygulanan bir dizi duvar fonksiyon modeli de mevcuttur. Bu, farklı duvar bölgelerine, farklı duvar fonksiyon modellerinin uygulanmasını sağlar. Duvar fonksiyon modelinin seçimi, 0/nut dosyasında ν_t ile belirtilir. Kullanıcı, her duvar işlevi sınır koşulunda isteğe bağlı E , κ ve C_μ anahtar kelime girişleri aracılığıyla E , κ ve C_μ için varsayılan ayarları geçersiz kılabilir. Kullanıcı, nut/mut dosyasındaki çeşitli yamalardaki belirli duvar fonksiyonlarını seçtikten sonra, örneğin, “epsilon” alanındaki ilgili yamalardaki “epsilonWallFunction”ı ve türbülanslı k , q ve R alanlarındaki karşılık gelen yamalardaki “kqRwallFunction”ı seçmelidir (Greenshields, 2015).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Nükleer reaktör ısı akış sistemlerini birebir modellemek istenildiğinde çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Günümüze kadar yapılan hesaplamalarda bu sistemlerde karmaşıklığa neden olan elemanları birebir modellemek zor olduğundan çözümde istenen veriye bağlı olarak ihmal edilir ya da korelasyonlar kullanılarak bu elemanların etkileri çözüme dâhil edilmiş olur. Ancak her gün gelişmekte olan bilgisayar alanı göz önüne alınarak ve ayrıca reaktör güvenliği düşünüldüğünde, bu sistemleri birebir geometriler kullanarak modellemek gerektiği düşünülmektedir.

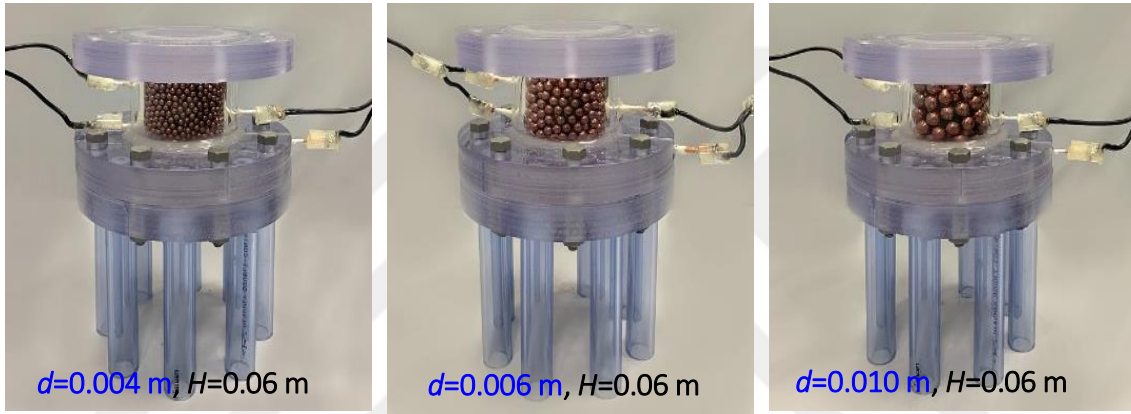
Bu aşamada hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri, sadece karmaşıklık indirgeyici olmakla beraber, aynı zamanda finansal ve performans açısından da ilginç hale geldikleri bir aşamaya gelmiştir. OpenFOAM kodu sonlu hacim yöntemi ile ısı-akış problemlerini çözümlemektedir. Farklı interpolasyon, ayırıklaştırma ve matris çözüm şemaları seçimine olanak sağlamaktadır. Akademik ve endüstriyel alanlarda kullanımı yaygındır. Çok çeşitli uygulamalar, hazır modeller, sorunlara göre kod özelleştirmesi ve diğer yazılım araçları ile kolaylıkla bağlantı kurmasından dolayı avantajlıdır. Bu nedenlerle, bu çalışmada ücretsiz ve açık kaynak kodlardan biri olan OpenFOAM kodu HAD analizlerini gerçekleştirmek üzere seçilmiştir. Bu bakımdan çeşitli kodlar barındıran, ücretsiz ve açık kaynaklardan biri olan OpenFOAM tasarım sürecine kolaylık sağlayan modern bir HAD programı ele alındı.

5.1. Çakıl Yatağı Deney Düzenegi

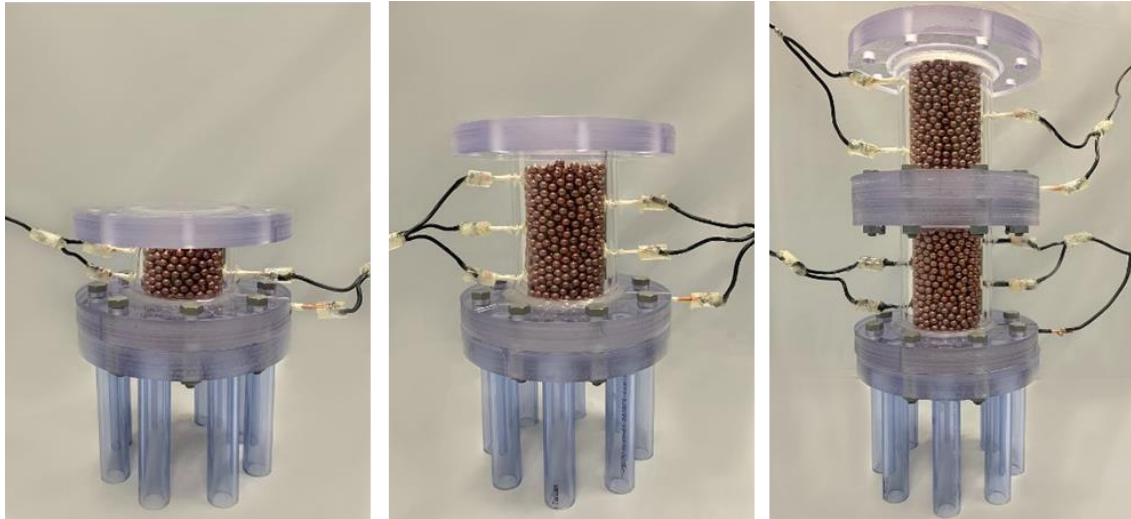
Bu bölümde, NRF (Güney Kore) İkili İşbirliği Projesi kapsamında Güney Kore tarafının yapmış olduğu rastgele konumlandırılmış çakıl yatağının cebri konveksiyonla ısı transferinin deneysel olarak araştırılması mevcuttur. Bu çalışmada, konumları değiştirilebilen paketli yataklardaki küreler için aşağıdaki Tablo 5.1’de verilen verilere göre ve Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’deki düzenek ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bakır sülfat ve sülfürik asit ($\text{CuSO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$) elektrokaplama sistemi kullanılarak, ısı ve kütle transferi arasındaki analogjiye dayanarak, ısı transferi deneyleri yerine kütle transferi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Prandtl sayısı sabit olarak 2014 kullanılmıştır.

Tablo 5.1 Deneysel veriler

Silindir Çapı (D) (m)	Küre Çapı (d) (m)	Silindir Uzunluğu (H) (m)	H/d Oranı	Re _d	Re _{dh}
0,06	0,004	0,02 – 0,04 – 0,08	5 - 10 - 20	8 – 1,947	13 – 3,288
	0,006	0,03 – 0,06 – 0,12		8 – 2,937	20 – 5,004
	0,010	0,05 – 0,10 – 0,20		20 – 3,094	36 – 5,409



Şekil 5.1 Çaplarına göre kürelerin paket yatakları



Şekil 5.2 Paket yatakların boyutları

Bakır iyonlarının anottan katoda transferi, elektrik akımı ölçülerek kolayca ve doğru bir şekilde ölçülen ısı transferine karşılık gelir. Bu teknik, ısı transfer sistemlerini araştırmak

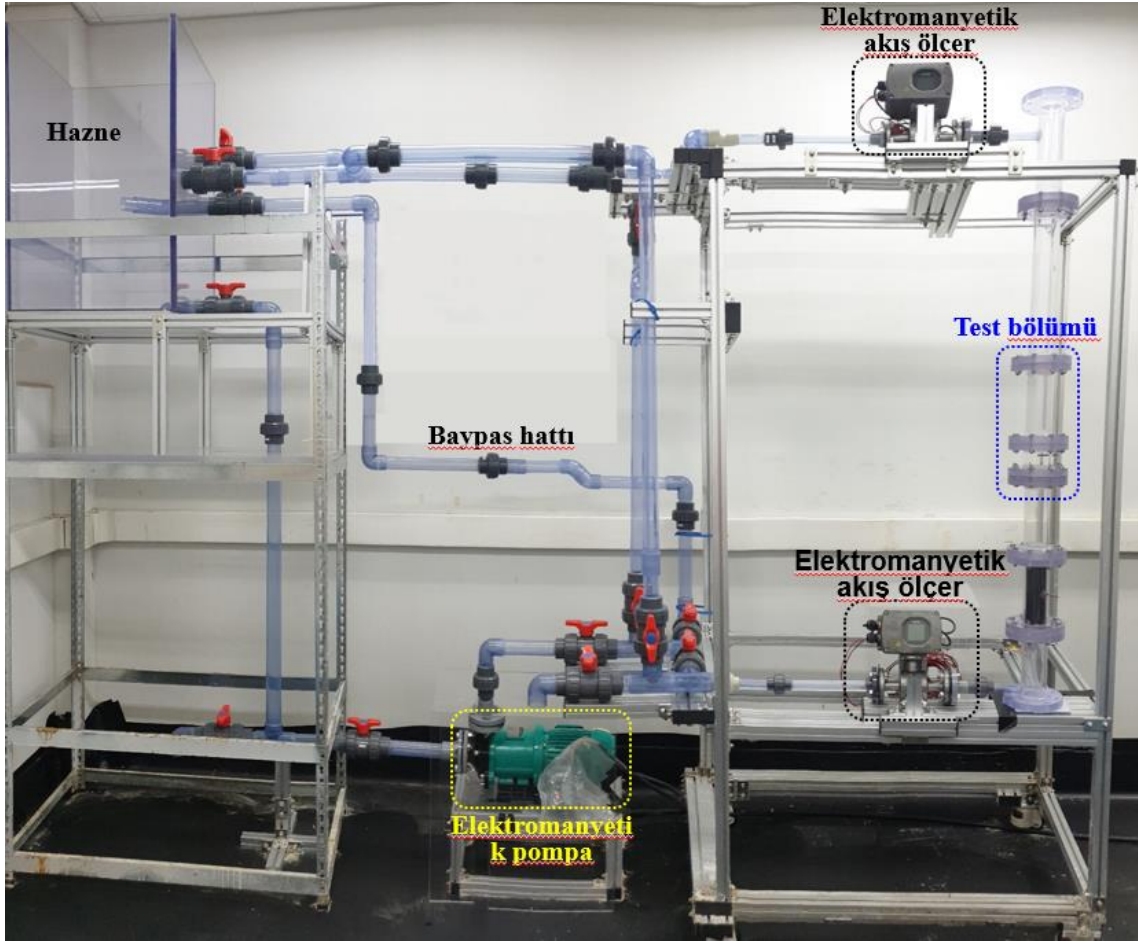
için basit ve nispeten ucuz bir yol sağlar. En önemlisi, izotermal ısıtma koşulu, elektrotlar arasına elektrik potansiyeli uygulanarak deneysel olarak kolayca oluşturulabilir. Sıvının fiziksel özellikleri, Fenech ve Tobias (1960) tarafından önerilen korelasyonlar kullanılarak hesaplanmıştır. Anottan katoda kütle aktarımı miktarı, elektrik akımının tam olarak ölçülmesiyle bulunmuştur. Kütle transfer katsayısı, elektrik akımı ve katot yüzeyi ile yığın arasındaki bakır iyon konsantrasyonu farkından hesaplanabilmektedir. Katot yüzeyindeki bakır iyon konsantrasyonunu belirlemek zor olduğundan, sınırlayıcı akım tekniği kullanılmıştır. Uygulanan potansiyel arttıkça, iki elektrot arasındaki akım bir süre artmış ve ardından katot yakınındaki bakır iyonlarının tükenmesi nedeniyle bir platoya ulaşmıştır. Bunun nedeni, bakır iyonlarının transfer sürecinden daha hızlı bir indirgeme sürecidir. Bu sabit akıma sınırlayıcı akım denir. Sınırlayıcı akım koşulunda, katot yüzeyindeki bakır iyon konsantrasyonu sıfır olarak kabul edilebilir. Bu nedenle, kütle aktarım katsayısı yalnızca sınırlayıcı akım ve yığın konsantrasyonu kullanılarak hesaplanabilmektedir. Deneyler, silindir küre oranı hesabıyla, küre çapı ve küre sayısı dikkate alınarak yapılmıştır. Deneyde kullanılan kürelerin hangi çaplarda olduğu ve sayıları aşağıdaki Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2 Kürelerin özellikleri

$\frac{H}{d}$ $d \text{ (m)}$	Küre Sayıları		
	5	10	20
0.004	1 000	1 930	3 800
0.006	477	865	1 709
0.010	140	275	540

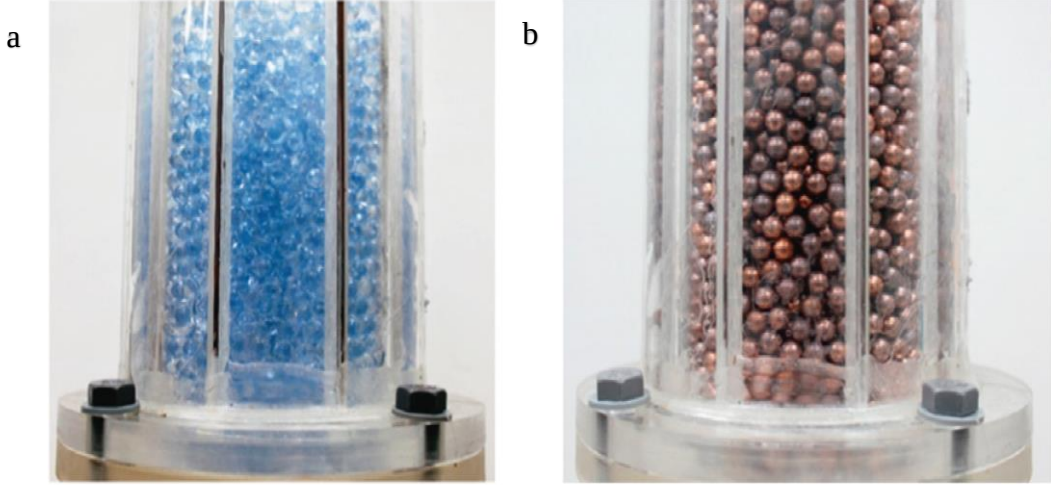
Şekil 5.3 cebri konvektif deney düzeneğini göstermektedir. Pompa ve hazne, hava karışmasını önlemek için test bölümünden daha yükseğe yerleştirilmiştir. Rezervuardan gelen sıvı, elektromanyetik pompa (PM – 250PMH) tarafından kanala pompalanır, test bölümünden geçer ve ardından rezervuara geri döner. Akış, kontrol ve baypas vanaları tarafından kontrol edilir. Test bölümünün yüksekliği 0,4 m ve test bölümü kanalın ortasına yerleştirilmiştir. 0,003 m çapındaki anot bakır çubuklar, bakır kürelerle doğrudan elektrik temasını önlemek için akrilik kanalda 0,015 m derinliğindeki oluklara

gömülüdür. Bu bölümündeki bakır çubuk ve bakır küre, test bölümünün dışında bulunan elektrik tellerine bağlanmıştır.



Şekil 5.3 NRF (Güney Kore) İkili İşbirliği Projesi kapsamında Güney Kore tarafının yapmış olduğu cebri konveksiyon deney düzeneği

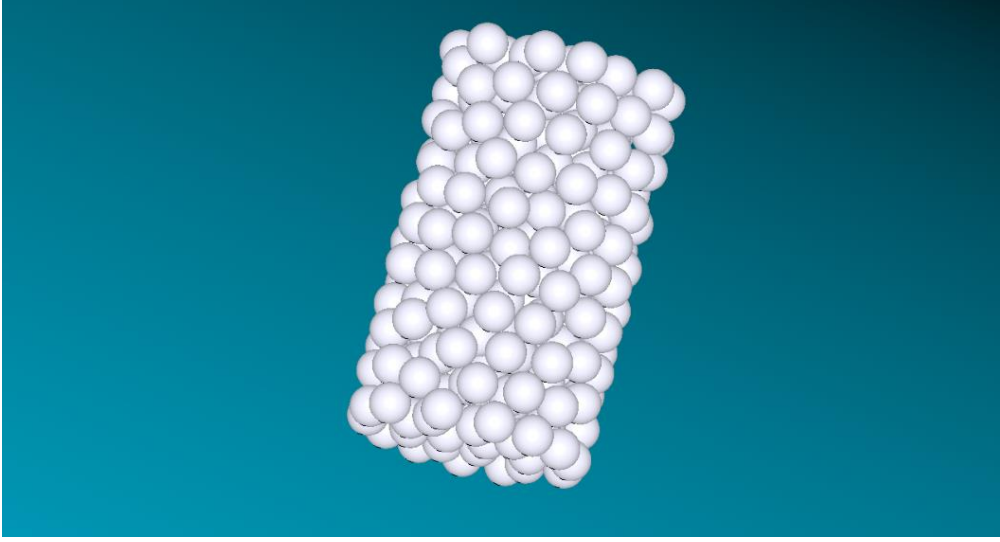
Elektrik potansiyeli güç kaynağı (SGI 100A / 150V, SGI) tarafından uygulanmıştır ve elektrik akımı multi-metre (FLUKE-45B +) ile ölçülmüştür. Şekil 5.4 (a), ısıtılmamış paket yataklarda ki ısıtılmamış kürelerin, Şekil 5.4 (b) tüm ısıtılmış kürelerin bir görüntüsünü sunmaktadır. Tüm küreler bakırdır. Bakır küreler arasındaki elektrik kontaklarını sağlamlaştırmak için, 2'ye 5 düzenlemelerde 10 bakır küre noktasal kuyucuk haline getirilmiş, böylece elektrik kontak direnci sıfırı sağlamışlardır.



Şekil 5.4 a) Isıtılmamış küreler b) Isıtılmış küreler

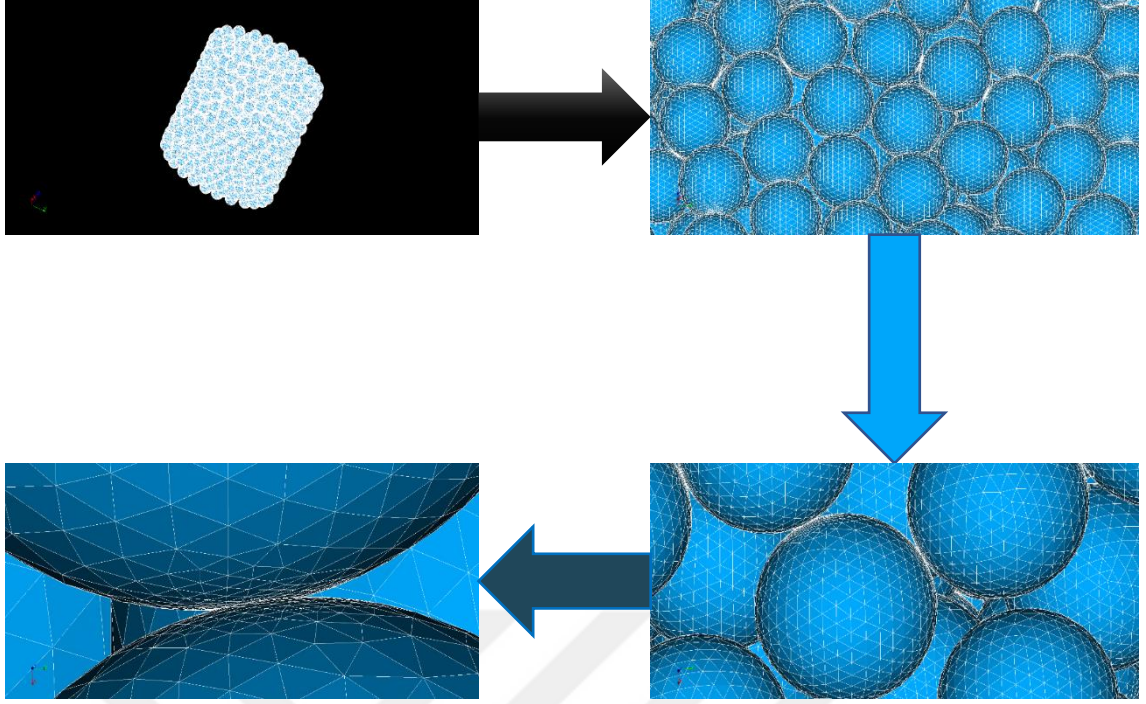
5.2. Kürelerin Modellenmesi

NRF (Güney Kore) İkili İşbirliği Projesi kapsamında Güney Kore tarafının yapmış olduğu deneysel çalışmalardan alınan veriler doğrultusunda HAD analizleri yapılmıştır. Burada, bir önceki bölümde yer alan bilgiler kapsamında aynı geometrik ve fiziksel şartlarda silindirik bir bölge içine girecek bir grup küreyi içermektedir. Çakıl yataklı bir reaktörün korundaki çakıl taşları herhangi bir sıralı düzen yapısında değildir; bu nedenle, HAD modeli için geometri oluşturmanın ilk adımı, her bir çakıl taşı için konumları belirlemektir. Kürelerin merkezlerinin konumları, kürenin; çapları, içinde bulunacağı silindirin boyu ve rastgele olması koşulları kullanılarak konumları OpenMC kodu ile belirlenmiştir. Bu konumlar vasıtasıyla Salome programında geometri hazırlanmıştır. Şekil 5.5'te, H/d oranı 10, yarıçapı 10 mm olan kürelerin tümü görülmektedir.



Şekil 5.5 Rastgele yığılmış küre geometrisi

Deneysel verilere göre oluşturulmuş olan küre geometrilerin, silindir çapı, küre çapı ile silindir uzunluğu ve küre çapının oranı dikkate alınmıştır. Değişen küre çaplarından dolayı farklı boyutlarda küre sayıları ve diğer geometri verileri Tablo 5.1 ve 5.2’de verilmiştir. Bütün çaptaki küreler boyutlandırılması hazırlanıp bittiğinde, Salome programının daha önce ki örgü bölümünde anlatıldığı gibi örgülendirilmiştir. Şekilde verilen rastgele yerleştirilmiş kürelerin örgü tipi, dört yüzlü ve 2 boyutludur. Örgü boyutu, maksimum 0,05 ve minimum 0,005 arasındadır. Örgü durumu ise orta olarak yapılmıştır. Hesaplama süresi, geometrinin boyutuna ve küre sayısına bağlı olarak değişiklik göstermiştir.



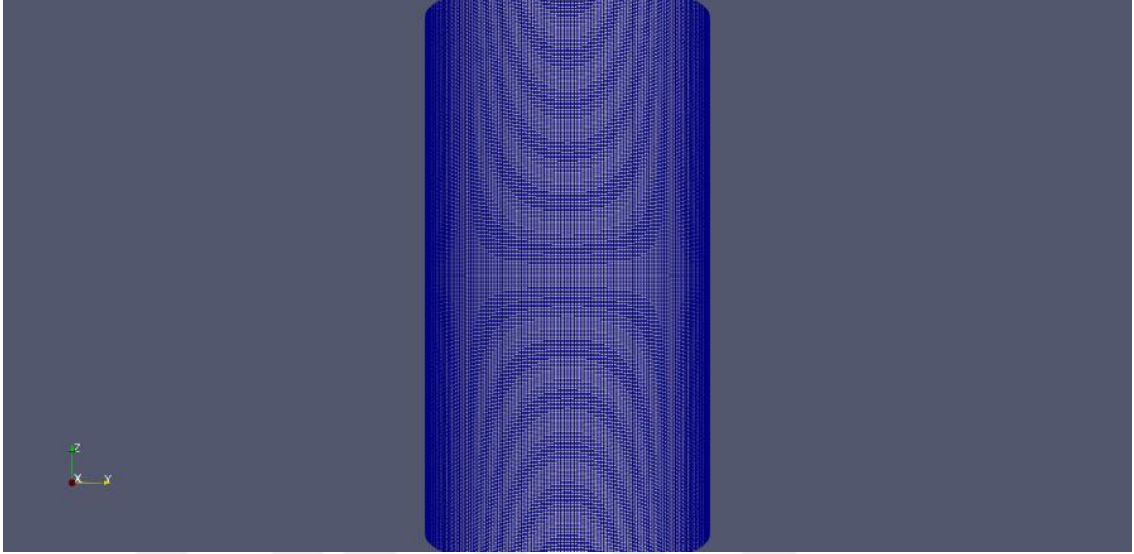
Şekil 5.6 Küre geometrisinin örgü görüntüleri

Her küre birbiri ile temas halindedir fakat her kürenin görünürde temas şekli farklıdır. Şekil 5.6’da küreler arası örgü biçimi görülmektedir. Gözenekli ortama sahip bir alan söz konusu olduğundan, katı bir sınıra yakın bir ince örgü durumu görülmektedir. Her bir çap ve H/d oranı için hazırlanan bu örgüler, OpenFOAM programı için bir “.stl” dosyası olarak dışa aktarılmıştır ve ardından “triSurface” vaka dizinine yerleştirilmiştir. Örgüler daha sonra “ideasUnvToFoam” yardımcı programı ile çalıştırılmak üzere OpenFOAM formatına dönüştürülmüştür.

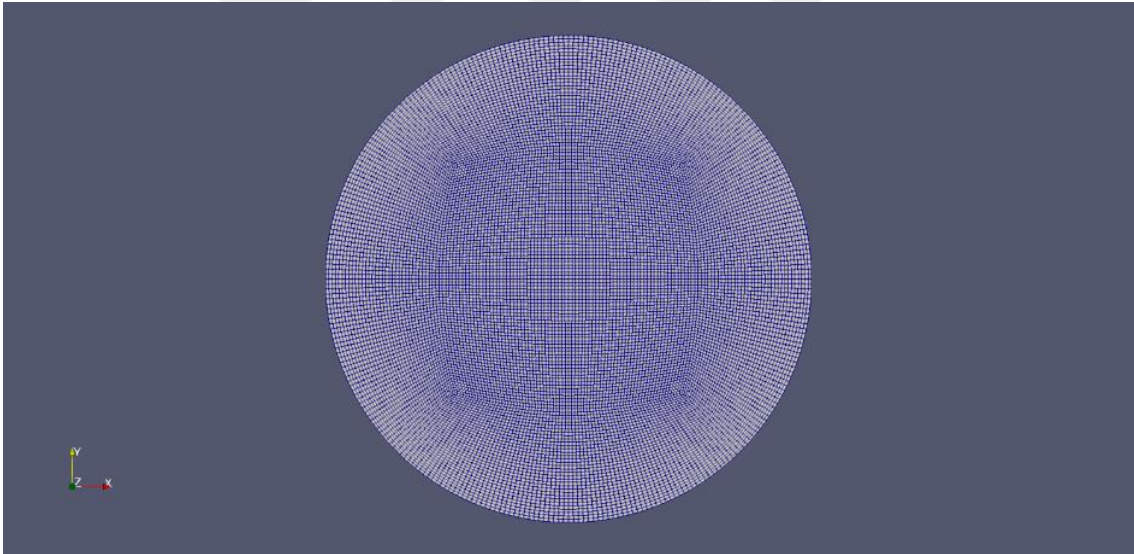
5.3. Geometrinin Modellenmesi

OpenFOAM her zaman 3 boyutlu kartezyen koordinat sisteminde çalışır ve tüm geometriler 3 boyutta üretilir (özel koşullar belirtilerek 2 boyutta da çözüm sağlanabilir). En temel örgü oluşturucularından biri blockMesh modülüdür. Bu örgü oluşturucusu, blockMeshDict adında constant veya system klasöründe bulunan tek bir sözlük dosyasına dayanır. Diğer bölümde bahsedildiği gibi örgünün çeşitli tanımlamalar vasıtasıyla uygulanmasını sağlar. Bu dosya üzerinden çeşitli dosya uzantıları oluşturmak mümkündür. Blockmeshdict sürecinin veya modelin durumunun niceliklerini ortaya koyulabilmesi için “.m4” uzantılı betik kullanıldı. Konumları tekrardan her geometri için yazmadan; farklı ölçülerde ki silindirler için doğru veriler girilerek ve örgü sayısını

arttırmak için silindir hücre sayısında değişiklik yapılarak kolayca optimum örgü sayısına ulaşıldı. Aşağıda Şekil 5.7 ve 5.8’de silindir geometrisinin örgü yapısının görünümüleri verilmiştir.

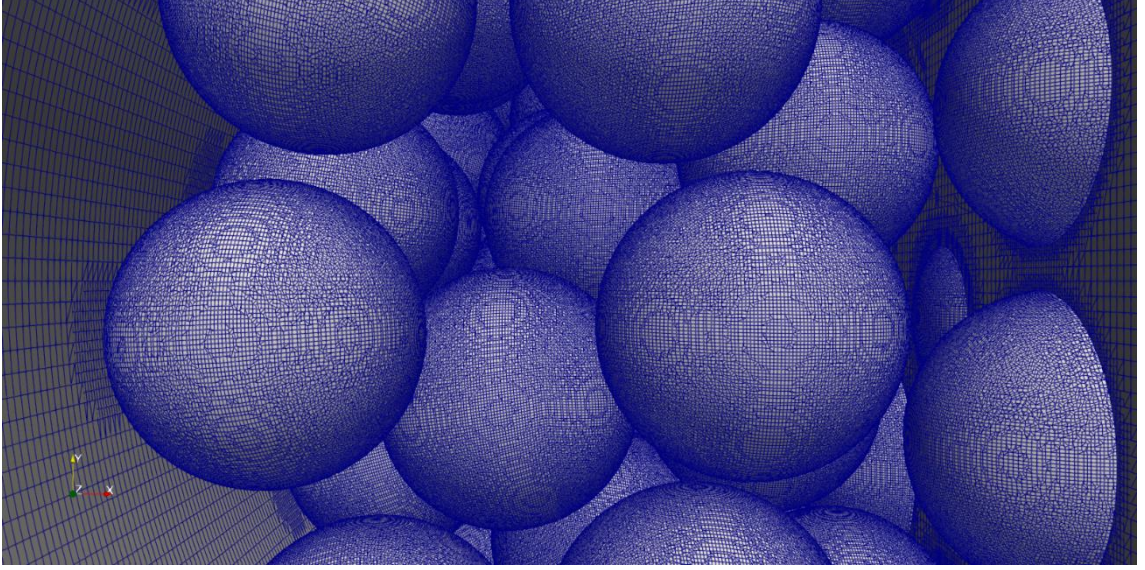


Şekil 5.7 Silindir geometrisinin örgü yapısı



Şekil 5.8 Silindir geometrisinin üstten örgü görünümü

BlockMesh ile oluşturduğumuz “background” örgüsüyle birlikte “.stl” uzantılı küre geometrilerin “snappyHexMesh” aracı ile bütün olarak geometri hazırlanmıştır. snappyHexMesh ile ilgili diğer bölümde de belirtildiği gibi örgüyü yinelemeli olarak iyileştirerek, 3 boyutlu altı yüzlü örgüler oluşturulmuştur. Geometrinin temiz ve düzgün olabilmesi için “snappyHexMeshDict” sözlüğü kullanılmıştır. Aşağıda silindir ile küre geometrilerinin birleştirilmiş halinin bir örneği verilmektedir.



Şekil 5.9 Geometrinin z-ekseni içinden görünümü

Bu sözlüğün belli başlı bölümlerinden ne şekilde yararlanıldığından bahsederek: Aktivasyon satırlarında, çalıştırılacak adımlardan hangisinin aktive edilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Geometri bölümünde “triSurface” klasöründe bulunan “.stl” geometrinin snappy işlemi için referans olacak bazı iyileştirmeler yapılmıştır. “castellatedMeshControls” de örgüde; maksimum yerel hücreler, genel hücre sayıları, yüzey iyileştirmeleri için en az düzeyde yineleme harcanması, “blockMesh” ile gelen geometrinin iç içe geçmemesi için örgü seçimi gibi parametreler düzenlenmiştir. Örgünün ne kadar düzgün olacağına, örgü boyutunun ve toleransın nasıl olması gibi kararları ise “snappyHexMesh” kontrollerinde gözden geçirilmiştir. Bu ayarlar dışında örgü ile ilgili birçok seçim tez çalışmamızda modellenen akış geometrisinin gerekliliklerine uygun olarak yapılmıştır.

Örgü oluşturma, örgü kalitesinin hangi seçimler ile daha düzgün hale geldiğinden ve bu tezde kullanılan örgü kalite aralıklarının önemli olduğunu vurgulamak gerekir. Bunu sağlamak için “meshQualityDict” dosyasından yararlanılmıştır. Bu dosya, örgü kalitesinin sağlanması için çeşitli noktalardan ve örgünün bozulmaması için sınırlayıcı bölgelerden uygulamaya koyduğumuz tanımlamalar içerir. Örgünün, kabul edilebilir en yüksek dikey olmama derecesi 60, gevşeme seviyesi 65’tir. Optimum seviyesindeki iç hücre boyutu ile mevcut iç hücre boyutumuz arasındaki çarpıklık (eğrilik) 4, sınırlardaki çarpıklık 20’dir. En düşük yüzey bükülmesi 0,02 ve bir hücrenin dış alanının ne kadarının diğer hücreye ait olduğu yani en düşük normalleştirilmiş hücre determinantı ise 0,05 ‘tir.

Geri kalan diğer bütün girilmesi gereken örgü değerleri makul seviyededir. Kullanılan bütün bu özelliklerin, kuralların ve değerlerin “polymesh” klasöründe birbirleri ile tanımlanır. Daha önce bahsedilen bu klasörün içinde hücre köşelerinin tanımını yapan vektörlerin listesi, her bir hücre yüzeyinin köşelere yönelik dizinleri, hücre etiketleri, komşu hücreler ve yama listesi bulunur.

Geometri, örgüsü ile tamamlandığında çıkan sonucu kontrol etmemizi sağlayan “checkMesh” komutunun işlenmesinin ardından bir çıktı dosyası oluşur. Bu çıktı dosyasında; örgü istatistikleri, farklı türlerde ki hücre sayısı, topoloji kontrolü, geometrinin kontrol verileri alınmıştır. Aşağıda oluşan örgü sayıları ile ilgili Tablo 5.3 verilmiştir:

Tablo 5.3 Simülasyonda kullanılan örgü sayıları

Geometri (d=4 mm)	Örgü Sayısı (milyon)	Geometri (d=6 mm)	Örgü Sayısı (milyon)	Geometri (d=10 mm)	Örgü Sayısı (milyon)
H/d=5	12,72	H/d=5	13,08	H/d=5	18,78
H/d=10	30,65	H/d=10	20,52	H/d=10	23,81
H/d=20	39,01	H/d=20	29,81	H/d=20	34,72

Örgü sınırlarının neler olduğunu ayrıca belirtmemiz gerekir, çünkü modellemedeki rolleri yalnızca geometrik bir rol değil, sınır koşulları veya sınırlar arası bağlantılar yoluyla çözümün ve sayısalın ayrılmaz bir parçasıdır. Burada; basit ve temel tip olarak giriş ve çıkış için “patch”, duvar sınırlarında farklı modellemelerin olduğu, duvar üzerinde tanımlanması gereken modeller için “wall” ve paralel çalışmada ayrıştırılan örgüler için işlemciler arası sınırları tanımlamak amacıyla “processor” kullanılmıştır.

5.4. Sınır ve Giriş Koşulları

Çakıl taşlarının olduğu yapı türbülanslı olacağından bu akışı tanımlayabilmemiz için türbülans çeşidine bağlı olarak bazı denklemler çözülmelidir. Bu tezde, RANS denklemleri kullanıldığından bu denklemlerin çözümüne yönelik uygun sınır koşulları gereklidir. Simülasyon sonucu elde ettiğimiz veriler doğrudan seçilen sınır koşulları ile ilgili olduğundan kullanılan sınır koşulları çok önem taşımaktadır. Kullanılan bütün sınır şartları Tablo 5.4’te verilmiştir.

Tablo 5.4 Simülasyonda kullanılan sınır koşulları

Alan	Giriş	Çıkış	Silindir Duvarları	Küre Duvarları
Hız	fixedValue	inletOutlet	noSlip	noSlip
Sıcaklık	fixedValue	inletOutlet	zeroGradient	fixedValue
Basınç	fixedFluxPressure	fixedValue	fixedFluxPressure	fixedFluxPressure
Türbülans Viskozitesi	fixedValue	calculated	nutLowReWallFunction	nutLowReWallFunction
Türbülans Kinetik Enerjisi	fixedValue	inletOutlet	compressible::alphiJaya tullekeWallFunction	compressible::alphiJaya tullekeWallFunction
Türbülans Dağılım Oranı	fixedValue	inletOutlet	kLowReWallFunction	kLowReWallFunction
Özgül Türbülans Yayılma Oranı	fixedValue	inletOutlet	omegaWallFunction	omegaWallFunction
Türbülanslı Termal Yayılım	fixedValue	inletOutlet	epsilonLowReWallFunction	epsilonLowReWallFunction

Tüm simülasyonlarda bir silindir içindeki sıkıştırılamaz akışa uygun sabit değerler için Dirichlet ve Neumann sınır koşulları kullanılmıştır. Girişte ve çıkışta bir hız sınır koşulu uygulandı. Giriş için “fixedValue”, çıkış için “inletOutlet”, (hız değeri, sınırdaki akışın yönüne bağlı olarak sabit bir değer (fixedValue) veya sıfır gradyan (eğim) (zeroGradient) arasında değişir) sınır koşulu kullanılmıştır. Hız için silindir ve küre duvarlarına kaymama sınır koşulu uygulandı; bu, sıvının sınıra göre bağıl hızının sıfıra eşit olduğunu göstermektedir. Simülasyonlarda kullanılan giriş hızı değeri, Reynolds sayısına göre değişkenlik göstermiştir. Hız için kullanılan Denklem (5.2) Reynolds sayısının genel formülünden (5.1) alınmış olup aşağıda bazı giriş hızı verileri Tablo 5.4’te verilmiştir.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (5.1)$$

$$u = \frac{Re\mu}{\rho D} \quad (5.2)$$

Re = Reynolds sayısı

ρ = yoğunluk (kg/m³, lbm/ft³)

u = hız (m/s, ft/s)

μ = dinamik viskozite (Ns/m², lbm/s ft)

D = Karakteristik uzunluk (m, ft)

Tablo 5. 5 Simülasyonda kullanılan giriş hızı verileri

Hız (m/s)	Karakteristik Uzunluk (m)	Yoğunluk (kg/m ³)	Dinamik Viskozite (kg/(m.s))	Reynolds Sayısı
0,00228441	0,004	1097,0	0,001253	8
0,00247478	0,006	1097,0	0,001253	13
0,00228441	0,01	1097,0	0,001253	20
0,00656768	0,004	1097,0	0,001253	23
0,00666287	0,006	1097,0	0,001253	35
0,00571103	0,01	1097,0	0,001253	50

Herhangi bir akış hızında görüldüğü gibi referans yoğunluk sabittir. Yukarıdaki Tablo 5.5'te 3 farklı çaptaki kürelerin ikişerli Reynolds sayı değerinden gelen hız değerleri verilmiştir. Sıcaklık için silindir duvarları “zeroGradient” (gradyan sınıra normal yönde sıfır olur), küre duvarları ise 393,15 K dir. Çıkış sıcaklık değeri, çoğu çıkış sınır koşulunda da kullanılan, “inletOutlet” (çıkış sıcaklığının duvar ile aynı durumda olmaması için yani adyabatik durumla karşılaşmamak için), giriş sıcaklık değeri ise 293,15 K olarak girilmiştir. Sıcaklık değerleri her geometride sabit bir şekildedir. Basınç alanı için silindir duvarları, küre duvarları ve girişte atmosferik basınç sınır koşulu uygulanmıştır; . Türbülans model sınır şartlarından biri de olan türbülans viskozitesidir Bu model, teğet gerilimlere yol açan hareketli girdapların bir sonucu olarak enerjinin türbülanslı transferini açıklayan orantılılık faktörüdür. Bu faktör için düşük Reynolds sayıları için duvarlarda “nutLowReWallFunction”, yüksekler için “nutWallFunction”

duvar kısıtlaması kullanıldı. Giriş değeri ise her simülasyon için aşağıdaki formüllerden (5.3), (5.4), (5.5) elde edilerek bulunmuştur:

$$Re_{DH} = Re(1/1 - \varphi) \quad (5.3)$$

$$I \equiv \frac{u'}{U_{avg}} = 0.16(Re_{DH})^{-1/8} \quad (5.4)$$

$$\ell = 0.07L \quad (5.5)$$

$$\vec{v} = \sqrt{\frac{3}{2}} u_{avg} I \ell \quad (5.6)$$

Re_{DH} = Hidrolik Reynolds sayısı

φ = Gözeneklilik

I = Türbülans yoğunluğu (kg/m³, lbm/ft³)

u' = Hız dalgalanmalarının ortalama karekökü

ℓ = Türbülans uzunluk ölçeği

L = Küre çapı

U_{avg} = Hız dalgalanmalarının ortalama karekökü

ν = Türbülans viskozitesi

Türbülans kinetik enerjisi, türbülans davranışını karakterize edilmesinde başlıca rol oynar. “k” sınır koşulu türbülans modeline göre hesaplanabilir. Duvar bölgelerinde “klowReWallFunction” kullanılmıştır. Denklem (5.7)’den hareketle “k” değeri bulunmuştur:

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2 \quad (5.7)$$

Türbülans kinetik enerjisinin, birim hacim ve zaman başına termal iç enerjiye dönüşme hızı olan özgül türbülans dağılım oranı için, “ ω ”, duvar bölgelerinde “omegaWallFunction” kullanılmıştır. Özgül dağılım oranı aşağıdaki formül (5.8) ile bulunmuştur:

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4} l} \quad (5.8)$$

C_μ , ampirik sabit olup $\cong 0,09$ ’dur.

Türbülans dağılma oranı, “ ε ”, ise türbülans kinetik enerjisinin, termal iç enerjiye dönüşme hızıdır. Bu sınır koşulu duvar bölgelerinde “epsilonLowReWallFunction” kullanılmıştır. Türbülans dağılma oranı aşağıda ki formül (5.9) ile bulunmuştur:

$$\varepsilon = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\mu} \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (5.9)$$

Türbülanslı termal yayılım, α , türbülanslı ısı akışı yönünde yayılmayan türbülanslı parçacık akışının ortaya çıkmasına sağlar. Bu sınır koşulu için, yüksek Prandtl sayısı, duvara yakın türbülans modeli, Prandtl sayısı değişiminin düzgün hesaba katılamamasından dolayı ve çoğunluğu düşük Reynolds sayısı kullanıldığından dolayı “compressible::alphatJayatillekeWallFunction” modeli tercih edilip, uygulanmıştır (Saric, S. vd., 2017). Aşağıdaki formül (5.10) ile α değeri bulunmuştur:

$$\alpha = \frac{v_t}{Pr_t} \quad (5.10)$$

$$Pr_t \cong 0,9$$

5.5. Çözücüler ve Şemalar

Tüm çalışmalara başlamak için girdi ve çıktıların olduğu, bunları kontrol etmemizi sağlayan çalışma öncesi veya çalışma sırasında değiştirilebilen “controlDict” sözlüğü simülasyonun başlangıç düğmesidir. Bu tezde, ısı transferi çözücüsü olan “buoyantSimpleFoam” kullanılmıştır. Simülasyonun bitiş adımı 10 000, zaman aralığı ise 1’dir. Bu sözlükte simülasyon sonrası ihtiyaç olunacak bazı fonksiyonlar eklenmiştir. Bunlar;

- Silindir içinde yer alan kürelerin başlangıç ve bitiş noktası arasında ki ortalama sıcaklık veri kaydı için ortalama sıcaklık kodu,
- Çözücü performans bilgilerinin listelenmesini sağlayan “solverInfo”,
- Geometri yüzeyindeki çeşitli noktalardan, o noktalardaki değerlerin depolanmasını sağlayan “surfaces”,
- Grafiklendirme ve görsellendirme için alan genelinde verileri görüntülemek için “sets”,
- Duvar ısı akısı verileri için “wallHeatFlux” ,
- Isı transfer katsayısı verileri için “heatTransferCoeff”

kullanılmıştır.

Denklem çözücüler, toleranslar ve algoritmalar “fvSolution” sözlüğünde verilir. Örnek olması adına aşağıda sözlükte kullanılan çözücüler kısmı Tablo 5.6’da halinde verilmiştir:

Tablo 5.6 Simülasyonda kullanılan fvSolution sözlüğü

Sınırlar	Çözücü	Tolerans	relTol	Pürüzsüzleştirici	Ön Koşullandırma
p_rgh	GAMG	1e-06	0.0	GaussSeidel	
U,h,k,epsilon,omega	PBiCGStab	1e-08	0.0		DILU

Bu çözücüler OpenFOAM tarafından sınırlar için hangisi uygunsa o çözücü eklenmiş şekilde örnek dosyalarında mevcuttur. GAMG için örgülere karşılık gelen doğrusal sistemlerin ve örgüler arası transfer operatörü oluşturması, çözüm esnasında matris vektör işlemleri ile çok yönlü döngü gerçekleştirmesiyle bilinir. Az sayıda hücre içeren bir örgü üzerinde hızlı bir çözüm üretmek, bu işlemi daha ince bir örgüye eşlemek ve bu ince örgü üzerinde doğru bir çözüm elde etmek için ilk tahmin olarak kullanır. Kısacası örgüyü iyileştirir. Diğer yandan PBiCGStab, hem simetrik hem de asimetrik matrisler stabilize edilmiş, ön şartlandırıcıya sahip gradyandır. Doğrusal denklem sistemini çözmek için GaussSeidel yinelemeli pürüzsüzleştirici yöntemi kullanılmıştır. Matrislerin ön koşullanması sağlamak için DILU, simetrik (tamamlanmamış-Cholesky) ve asimetrik (tamamlanmamış-LU) kullanılmıştır. relTol, olması lineer cebirsel denklemlerin çözümünü kontrol etmek için alternatif bir yöntemdir. Belli bir alan için bir denklem çözülmeden önce başlangıçtaki değerinde farklı bir değere ulaşır, bu değer yinelenmesinde toleransta ki değer ile çelişmesi durumunda çözücü durdurulur.

“buoyantSimpleFoam” ısı transfer çözücüsü kullanıldığından fvSolution sözlüğünde SIMPLE adında genel çözücüye özgü bir bölüm vardır. Burada, düşük Reynolds sayıları için momentum tahmininin çözülmesini kontrol eden anahtar “hayır”, büyük Reynolds sayıları için “evet” konumundadır. Dik olmayan düzeltmeleri güncellemek için “nNonOrthogonalCorrectors” sabit olması istenildiğinden “0” dır. Basınç için kullanılan tüm algoritmalar sabit ve atmosferik basınç durumundadır. Hesaplama kararlılığını geliştirmek için kullanılan ve gevşeme faktörünü kontrol eden “relaxationFactors”, $0 < \alpha \leq 1$ aralığında kullanıldı. Burada;

$\alpha = 1$: Yeni çözüm üretimi baskınlık kazanır.

$\alpha = 0$: Çözüm değişmez.

Simülasyon sırasında hesaplanan denklemlerdeki türevler gibi terimler için sayısal şemaların ayalandığı “fvSchemes” sözlüğünde, zaman şeması olarak zaman türevlerini sifra ayarlayan “steadyState” şeması kullanılmıştır. Özellikle düşük kaliteli ağları içeren, belirli gradyan terimlerinin ayrıklaştırılması, sınırlılığı ve kararlılığı iyileştirmek için geçersiz kılınır. Bu durumlarda geçersiz kılınan terimler hız gradyanıdır ve bu çalışmada hücrelerin baktığı normal yönde kırıldığı bir multi boyutlayıcı sınırlayıcısı olan “cellMDLimited” kullanılmıştır. Sabit yoğunluklu bir akış olduğundan hücre yüzlerindeki hız akışını ve kütle akışını göstermek için “div (phi,..)” kullanılır. Hızın, komşu hücreler arasındaki akışı ikinci dereceden doğruluğa genişletmek için ve hız gradyanının belirtilmesi için “linearUpwind”, diğer şemalar için ise “linear” kullanılmıştır. İkinci dereceden, 0,5 (dik olmayan düzeltme $\leq$ dik kısım) ile sınırlanan Gauss laplace şeması kullanılmıştır. Değerlerin bir noktadan diğer noktaya interpolasyonu için “linear” kullanılmıştır. Yüzey normal gradyanlarını içeren “snGradSchemes” için 0,5 (dik olmayan düzeltme $\leq$ dik kısım) uygulandı ve son olarak türbülanslı modellerde ihtiyaç duyulan hücre merkezleri ve sınır uzaklığının hesaplanması için bir yöntem bölümünde ise hücreler ve sınır için en yakın mesafeyi hesaplamayan “meshWave” kullanılmıştır.

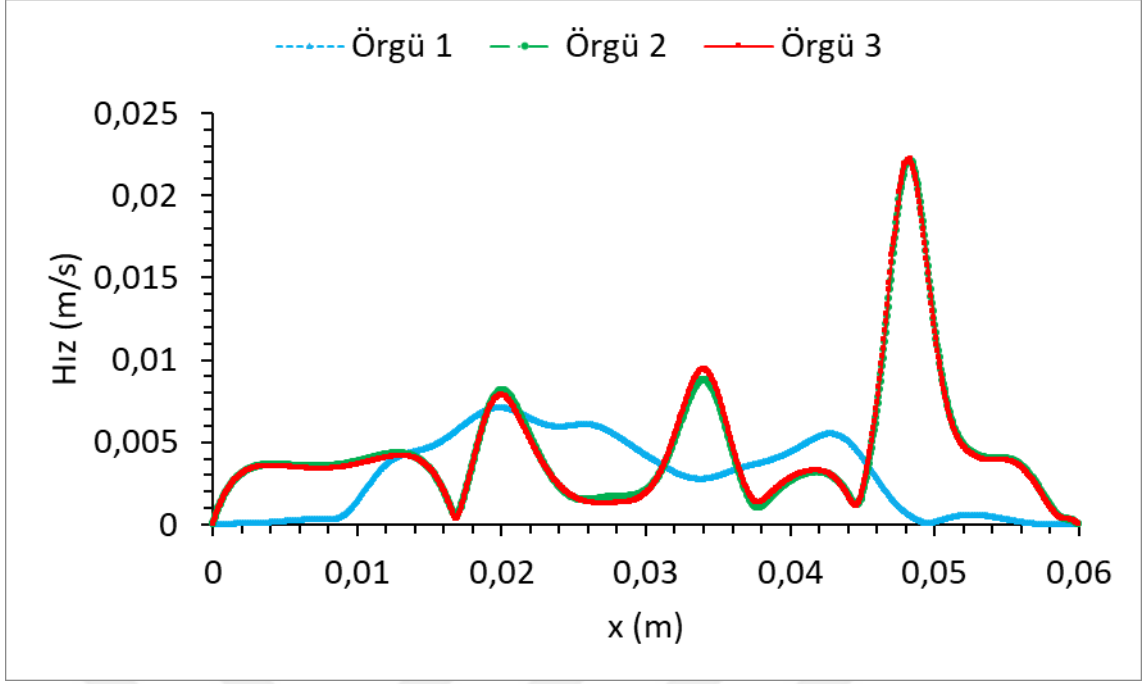
6. BULGULAR

Çakıl yataklı kor sistemini kullanan nükleer reaktörler için deneysel korelasyonların güncellenmesi gerekmektedir. Kendinden ısıtılmalı ve tüm kürelerin eş sıcaklıkta tutulduğu deneysel çalışmalar literatürde sınırlıdır. Daha önce de belirtildiği üzere yapılan çalışmalar aşılması güç koşullar altında tek küre üzerinden yapılmış ve buradan yola çıkılarak sayısal yöntemlerle çoklu küre için ısı transferi ilişkileri kurulmaya çalışılmıştır (Achenbach, 1995; Gnielinski, 1978).Yapılan çalışmalar neticesinde, belli bir aralıkta, farklı Reynolds sayısı ve Prandtl sayısı ile çeşitli korelasyonlar ortaya çıkmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılması gereken farklı materyaller, ölçüm teknikleri ve göz ardı edilemeyecek deneysel parametreler, elde edilmesi gereken en doğru sonuçlara bir zorluk getirmektedir. Teknoloji geliştikçe yapılan çalışmalar da göz önüne alınarak farklı teknikler kullanılarak deneysel çalışmalara, simülasyonlar da dâhil olmuştur. Tez çalışması kapsamında elde edilen OpenFOAM sonuçları ile deneysel çalışmalardan alınan verilerin karşılaştırılması ve güvenilir sonuçlar elde edilmesiyle deneysel çalışmanın devamı ve tezin amacına uygun olarak yapılan cebri konveksiyon benzeşimleri ile yeni ısı transfer korelasyonlarının türetilmesi sağlanabilir.

6.1 Simülasyon Sonuçları

Cebri konveksiyon için, doğruluk ve hesaplama maliyeti olarak en uygun örgüye ulaşmak için $d=0,010$ m için 3 örgü boyutu (Örgü 1: 15,24 Örgü 2: 18,77 ve Örgü 3: 21,84) kullanılarak örgüleme duyarlılık analizleri yapılmıştır. Daha sonra, küre sayısı ve boyutu açısından; $d = 0.004$ m, $d = 0.01$ m ve H/d oranları (5, 10 ve 20) için laminar ve türbülanslı akışlarda ($d=0,004$ m için $Re_d=45$ ve $Re_d=1947$, $d=0,010$ m için $Re_d=50$ ve $Re_d=3094$) uygun akış kurgulamaları yapılarak; sıcaklık, hız, türbülans kinetik enerjisi ve Nusselt değerleri verilmiştir.

Şekil 6.1’de çakıl yatak geometrisinin kürelerin yerleştirilmiş olduğu kısımdan 0,04 m yukarıdan, z ekseninden alınan hız dağılımları verilmiştir. Şekil 6.1’i incelediğimizde örgü 1 boyutunun örgü 2 ve örgü 3’ten farklı sonuçlar verdiği fakat örgü 2 ve örgü 3 boyutunun çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu bakımdan daha yüksek örgü kullanmanın, sonuçlar açısından bir şeyi değiştirmeyeceği gibi örgü maliyetini sebepsiz arttıracaktır.



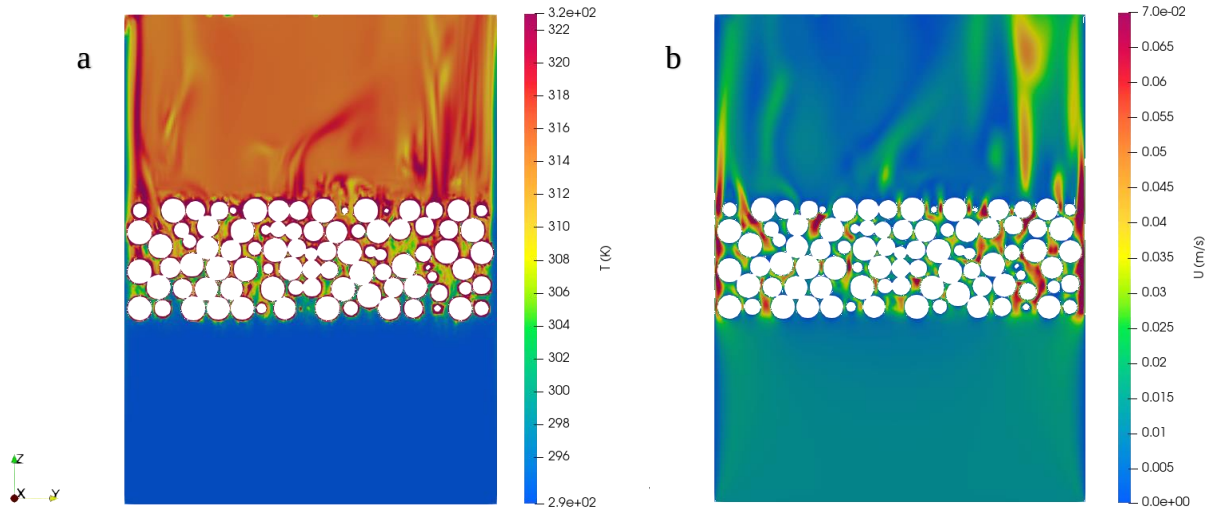
Şekil 6.1 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri

6.1.1. $d=0,004$ m ile $H/d=5$, $H/d=10$ ve $H/d=20$ paket yatak geometrileri

6.1.1.1. $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için laminar akış durumu ($Re_d=45$)

Sıcaklık ve hız konturları

$Re_d=45$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, $H/d=5$ geometrisi için Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekil 6.2a’da, sıcaklığın beklenildiği gibi küreler etrafında ve kürelerin çıkışında belirgin olarak arttığı görülmektedir. Hız konturları, paket yatak geometrisi için Şekil 6.2b’de verilmiştir. Hız konturlarından hareketle, akış alanının küreler ile duvar arasında kalan kısımda, akış hızının arttığı görülmektedir.

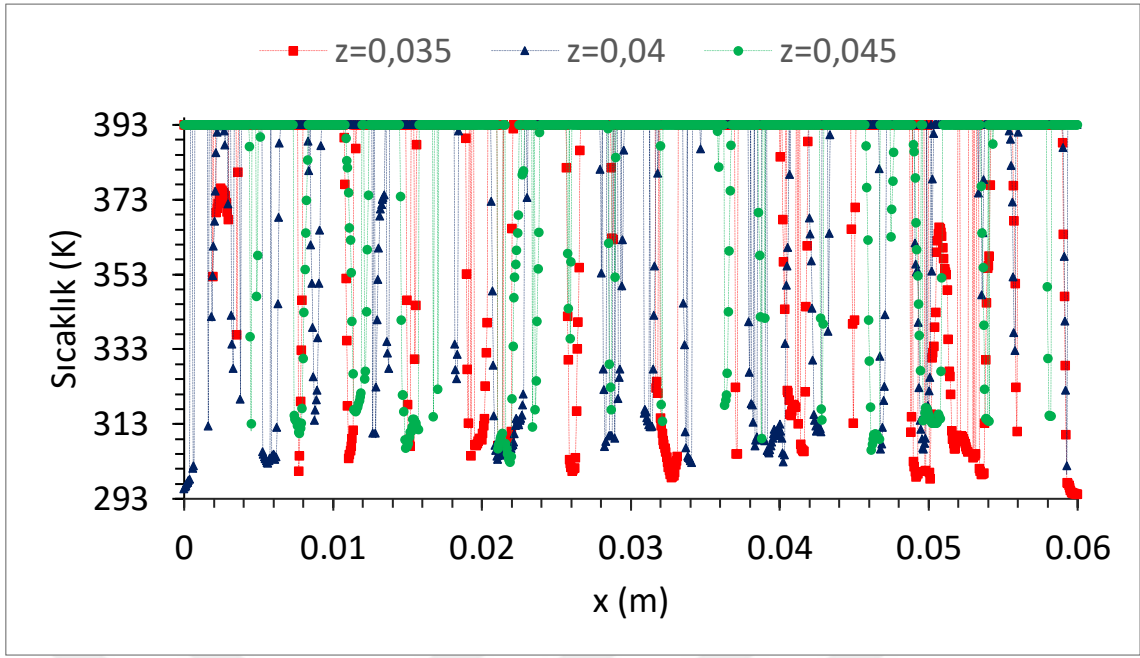


Şekil 6.2 a) $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için hız alanı şekli

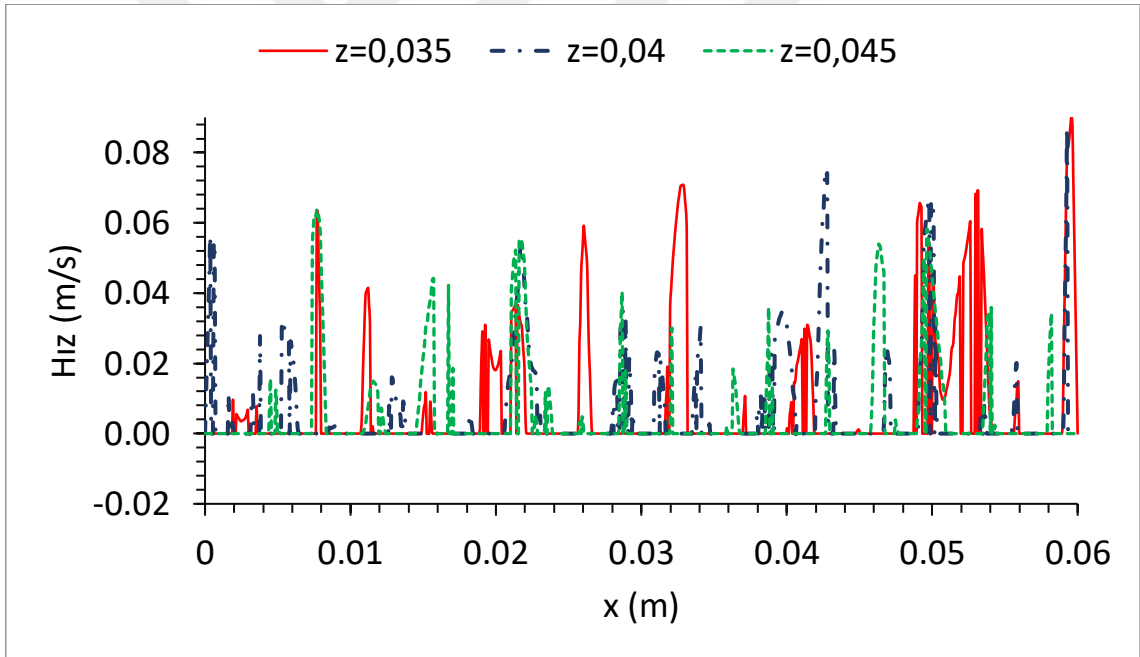
Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri

$d=0,004$ m çaplı küreler için $Re_d=8-1947$ aralığında cebri konveksiyon simülasyonları yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, $Re_d \cong 240$ ve altındaki değerler zamana bağlı akış rejimi, üzeri ise türbülanslı akış rejimi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, küreler etrafında her iki akış rejiminden birer örnek alınarak $H/d=5, 10$ ve 20 için sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları verilmiştir.

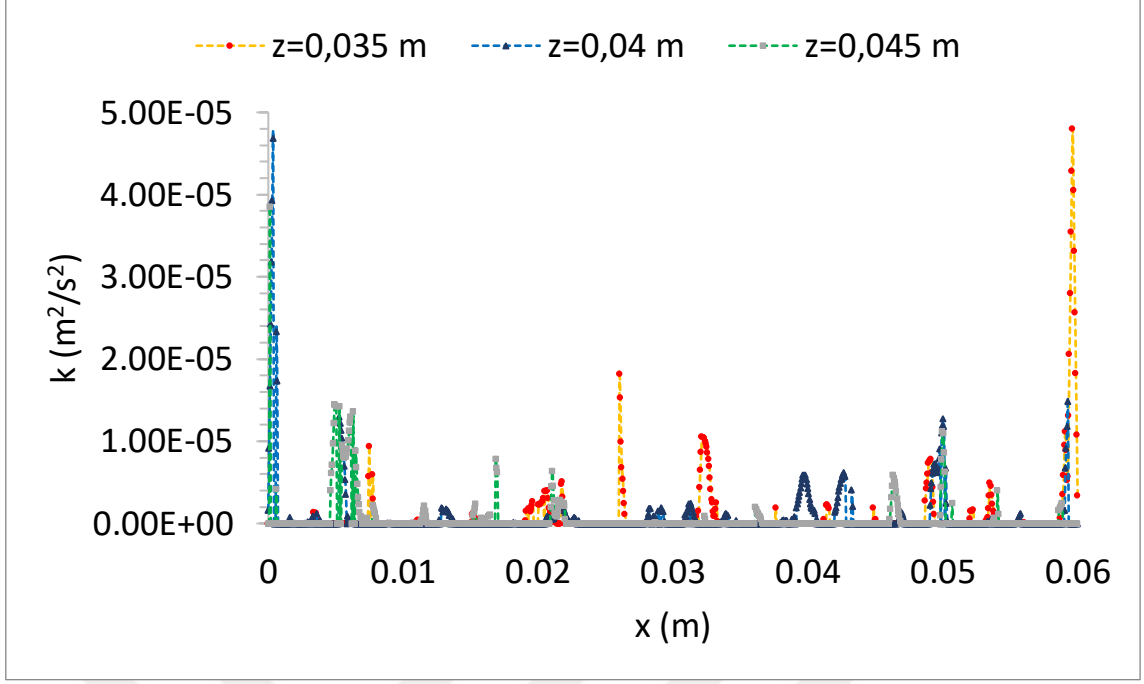
$Re_d=45$ zamana bağlı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerjileri Şekil 6.3-6.5'te gösterilmektedir. Şekillerde, $z = 0,035$ m (kürelerin giriş bölgesi), $z = 0,04$ m (kürelerin orta bölgesi) ve $z = 0,045$ m (kürelerin üst bölgesi) yükseklikleri ve yatay ekseninde geometrinin merkezinden alınan çizgiyi temsil etmektedir. Şekil 6.3'te akış geometrisi karmaşık olmasına bağlı olarak sıcaklık; giriş, orta ve üst bölge olmak üzere artmış olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.4'te duvar kenarlarında üst bölge hariç hızın yüksek olduğu, $z5$ ve $z10$ bölgelerinde hızın artış gösterdiği görülmektedir. Hız profillerinde, kürelerin diziliminde dolayı akış alanının farklılıklarından hızda değişimler görülmektedir. Akış hızı, giriş ve çıkış bölgelerinde bir miktar artmaktadır. Şekil 6.5'te paket yatak geometrisinin içinde türbülans kinetik enerjisinin duvar kenarlarında, laminar akıştan dolayı, artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.3 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık profilleri



Şekil 6.4 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri

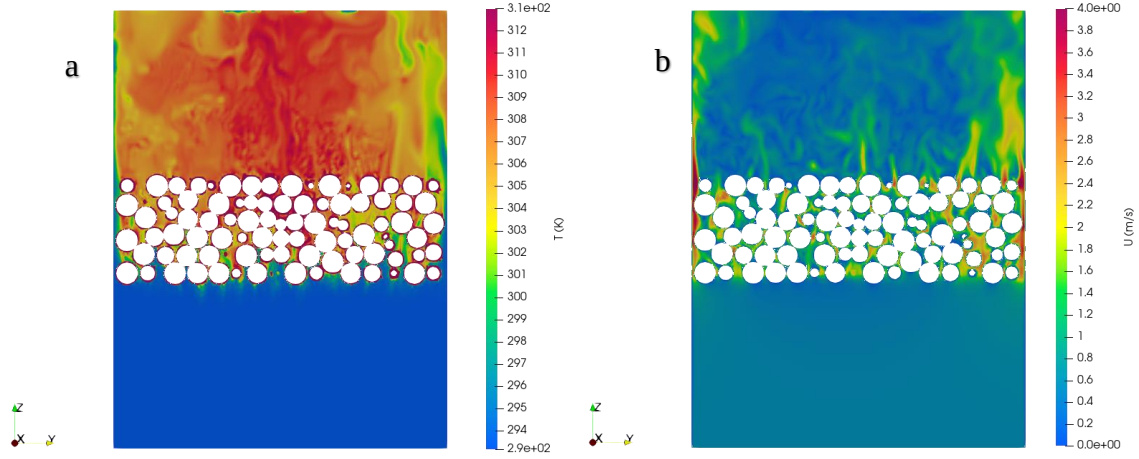


Şekil 6.5 d=0,004 m ve H/d=5 için türbülans kinetik enerji profilleri

6.1.1.2. d=0,004 m ve H/d=5 için türbülans akış durumu ($Re_d=1947$)

Sıcaklık ve hız konturları

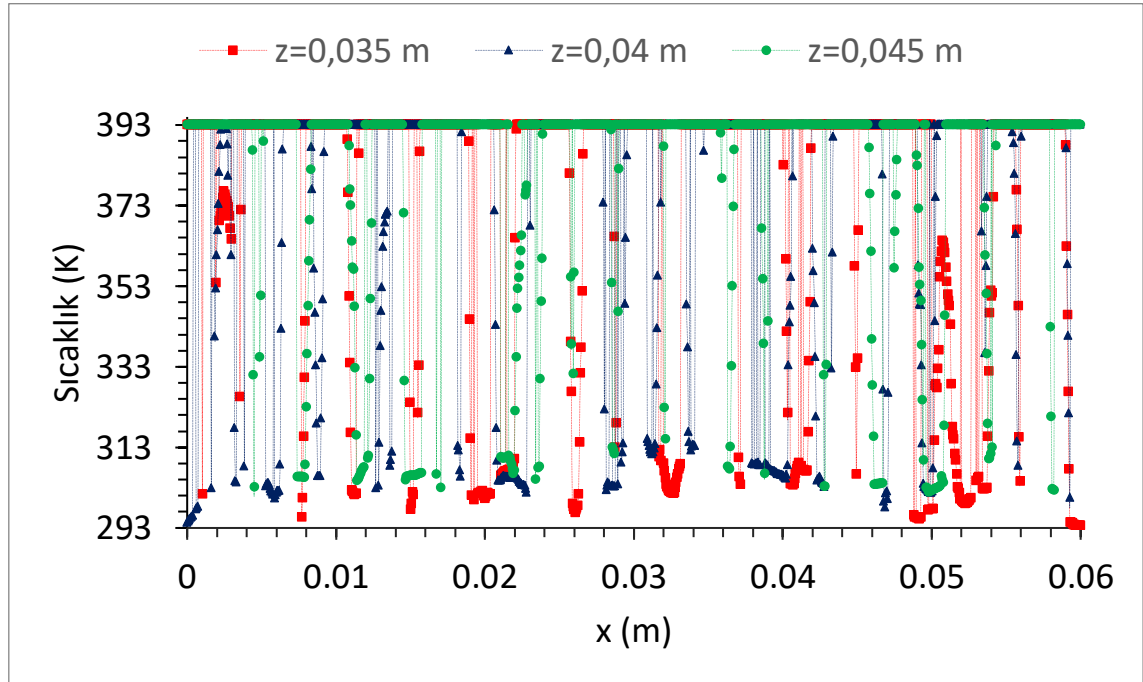
$Re_d=1947$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, H/d=5 geometrisi için Şekil 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.6a'da sıcaklığın, türbülansın artmasıyla kürelerin çıkışında sıcaklık duvar kenarlarından orta kısma doğru arttığı görülmektedir. Hız dağılımı konturları, H/d=5 geometrisi için Şekil 6.6b'de verilmiştir. Hız konturları incelendiğinde, akış alanının küreler ile duvar arasında kalan kısımda, akış hızının arttığı ve küreler arasında bazı lokal bölgelerde kısmi hız artışlarının olduğu görülmektedir.



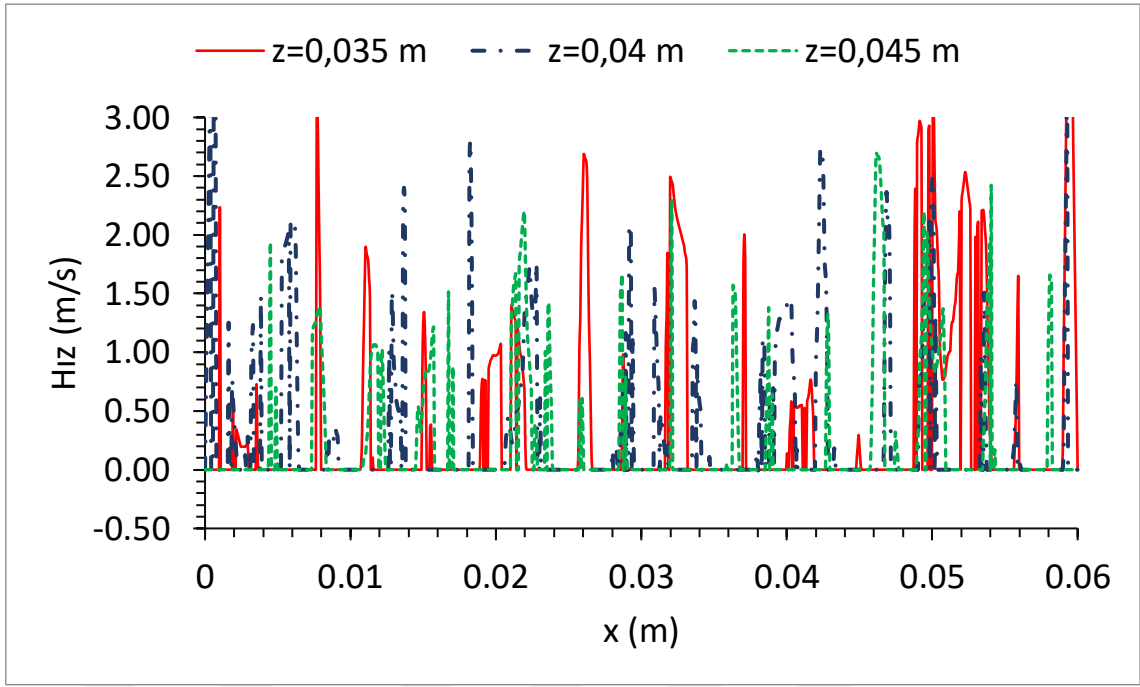
Şekil 6.6 a) $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için hız alanı şekli

Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri

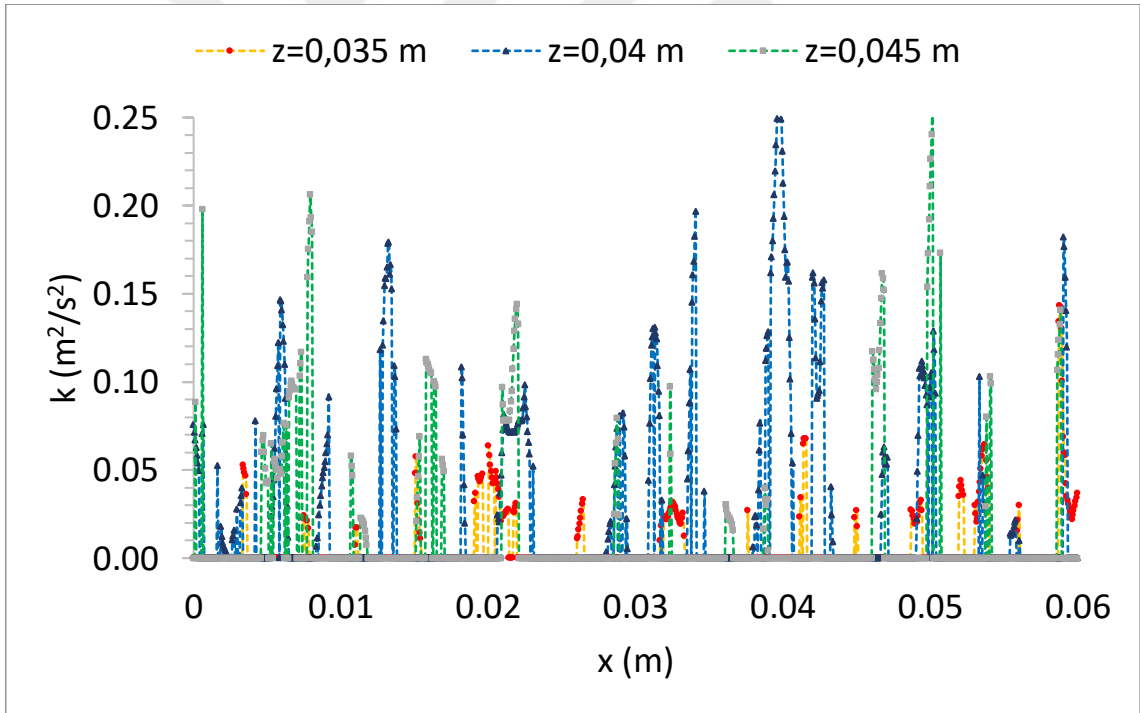
$Re_d=1947$ türbülanslı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları Şekil 6.7-6.9'da gösterilmektedir. Şekil 6.7'de sıcaklık zamana bağlı akışa kıyasla sıcaklık azalma göstermiştir. Şekil 6.8'de hız zamana bağlı akışın aksine bütün bölgelerde türbülansın etkisiyle büyük bir artış kazanmıştır. Şekil 6.9'da paket yatak geometrisinin içinde türbülans kinetik enerjisinin, arttığı ve türbülansın yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 6.7 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık profilleri



Şekil 6.8 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri

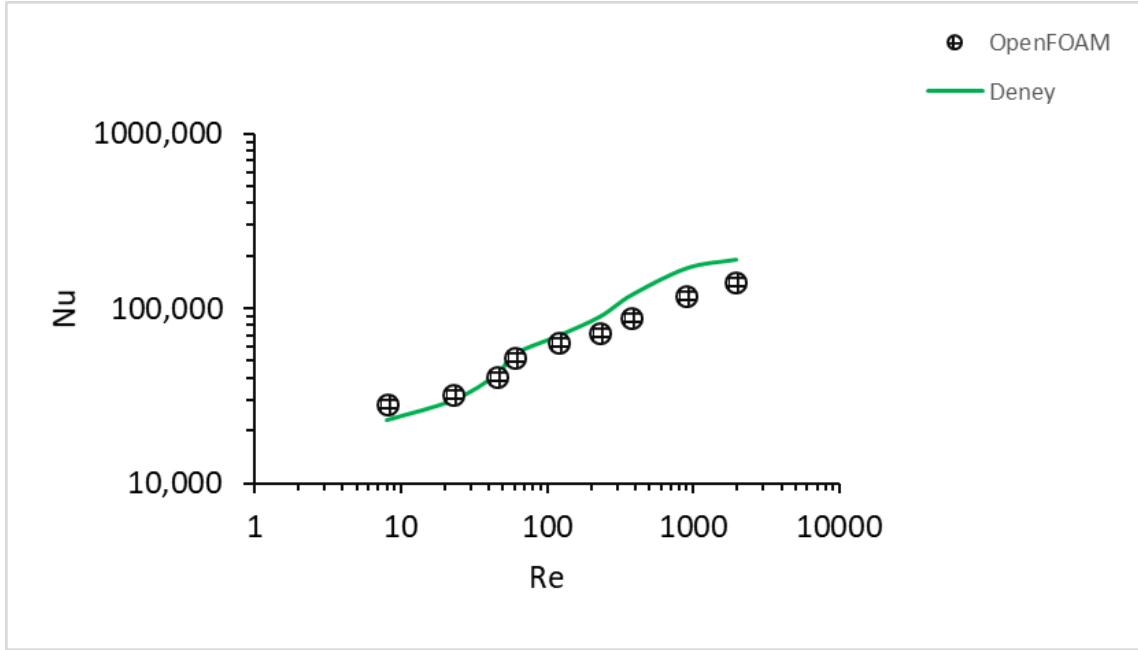


Şekil 6.9 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için türbülans kinetik enerji profilleri

6.1.1.3. $d=0,004$ m ve $H/d=5$ için Nusselt sayısı

Çakıl yataklı sistemlerde cebri konvektif ısı transferi üzerine birçok bilimsel çalışma yapılmış ve Reynolds sayısına bağlı Nu sayıları için çeşitli korelasyonların önerildiğinden bahsedilmiştir. Şekil 6.10, $d=0.004$ m küreler ile $H/d=5$ paket yatak geometrisi için elde

edilen deneysel ile OpenFOAM sonuçlarını göstermektedir. Genel olarak büyük sapmaların olmadığı, sayısal hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmektedir.

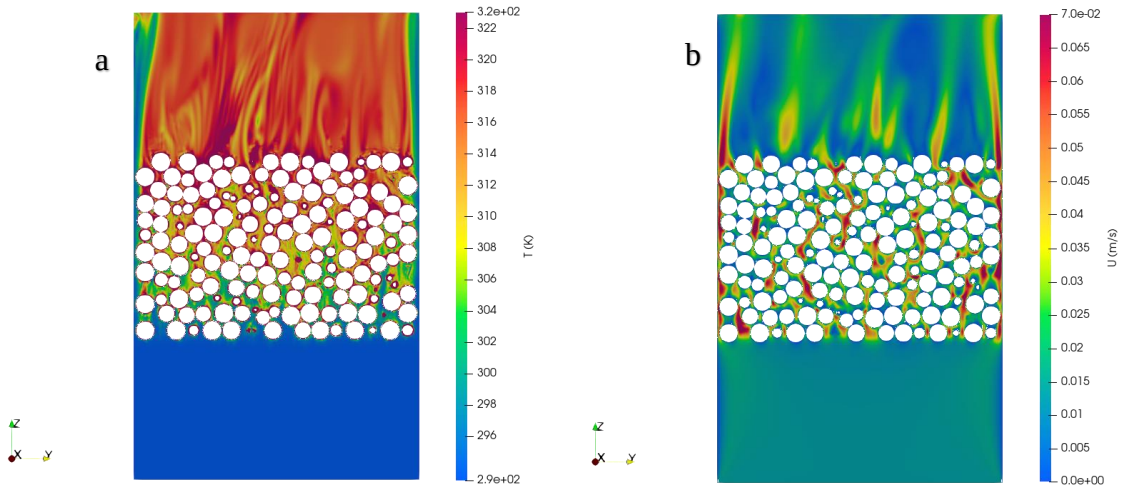


Şekil 6.10 $d=0,04$ m ve $H/d=5$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri

6.1.1.4. $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için laminar akış durumu ($Re_d=45$)

Sıcaklık ve hız konturları

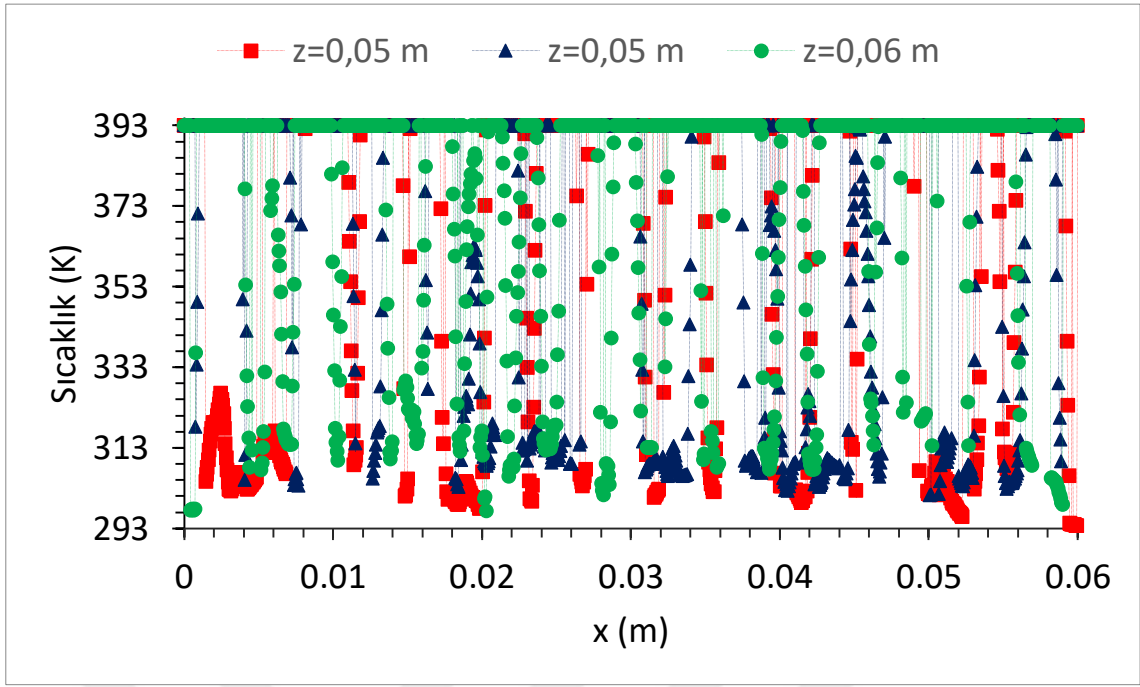
$Re_d=45$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, $H/d=10$ geometrisi için Şekil 6.11’de verilmiştir. Şekil 6.11a’da sıcaklık üzerinde duvar etkisi kalkmış ve sıcaklıktaki artış paket yatağın üst noktalarında gözlemlenmiştir. Hız dağılımı konturu, paket yatak geometrisi için Şekil 6.11b’de verilmiştir. Şekil 6.11b’deki hız konturundan hareketle, hızın bazı lokal bölgelerde arttığı görülmektedir.



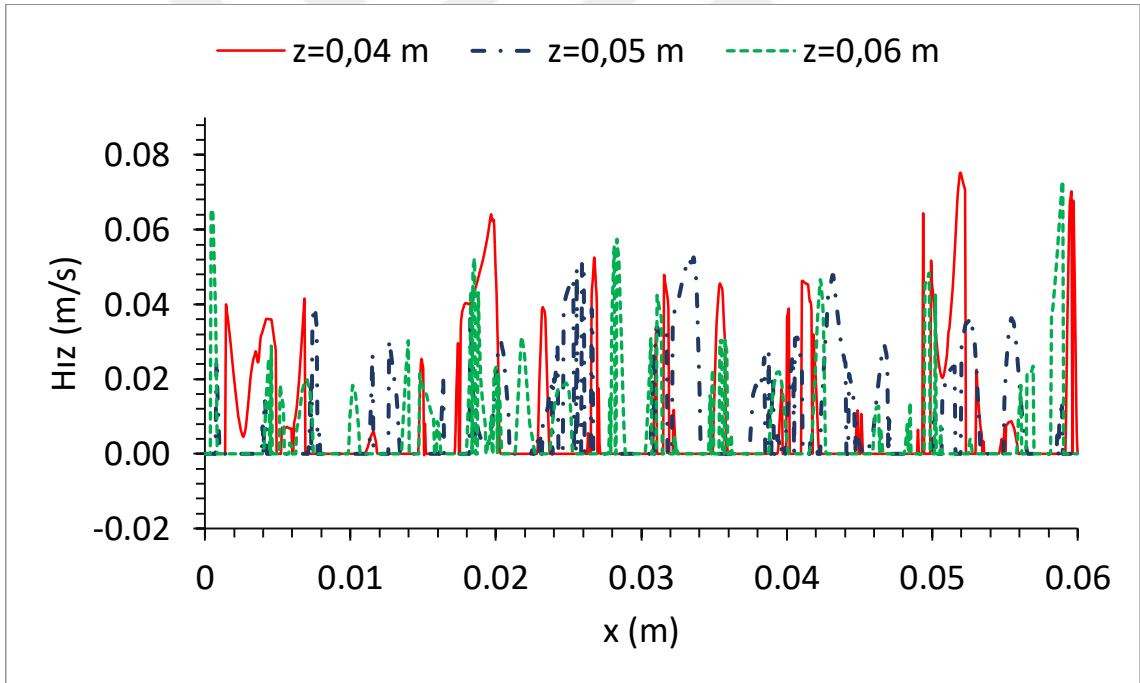
Şekil 6.11 a) $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için hız alanı şekli

Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji

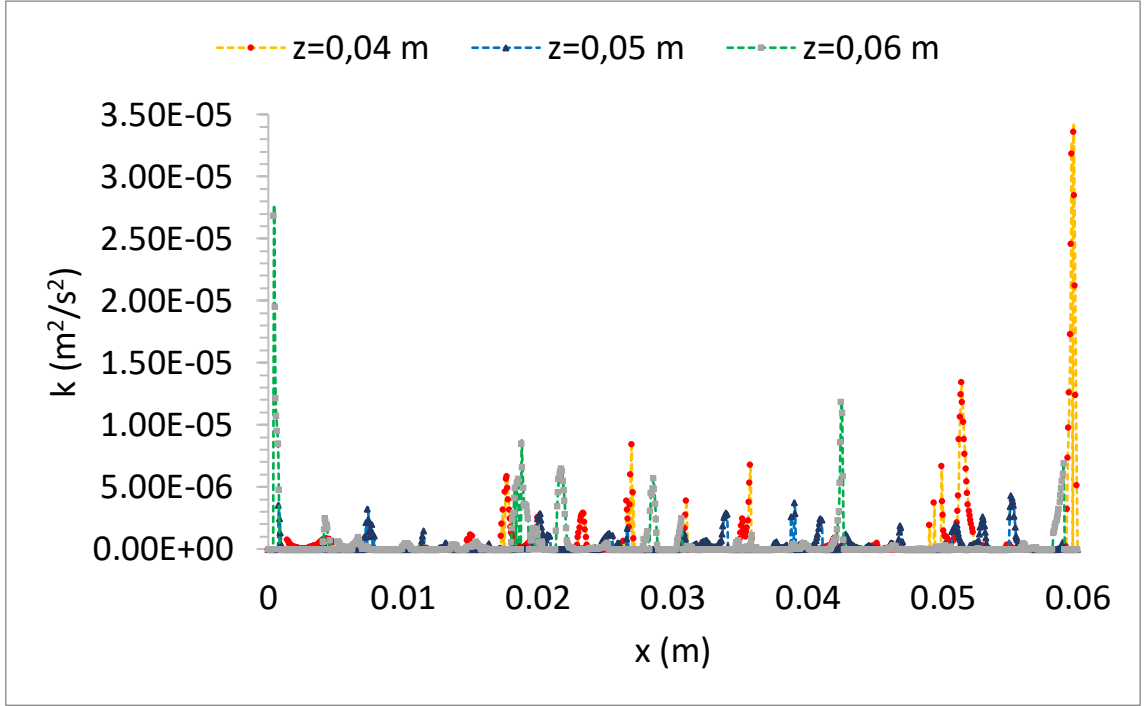
$Re_d=45$ zamana bağlı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve kayma gerilimi dağılımları Şekil 6.12-6.14'te gösterilmektedir. Şekillerde, $z = 0,04$ m (kürelerin girişi bölgesi), $z = 0,05$ m (kürelerin orta bölgesi) ve $z = 0,06$ m (kürelerin üst bölgesi) yükseklikleri ve yatay ekseninde geometrinin merkezinden alınan çizgiyi temsil etmektedir. Şekil 6.12'de sıcaklık bütün bölgelerde genellikle ortalama ~ 313 K civarında yoğunlaşmış, giriş ve çıkış arasında bir miktar artış yaşanmıştır. Şekil 6.13'te paket yatak içinde hızın arttığı görülmektedir. Hız profilleri, kesit alanın etkisiyle değişmiştir. Şekil 6.14'te, paket yatak geometrisinin içinde türbülans kinetik enerjisinin duvar kenarlarında ve $H/d=5$ 'e oranla bir artışın olduğu fakat genel ifadeyle bir yoğunluğun olmadığı görülmektedir.



Şekil 6.12 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık profilleri



Şekil 6.13 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için hız profilleri

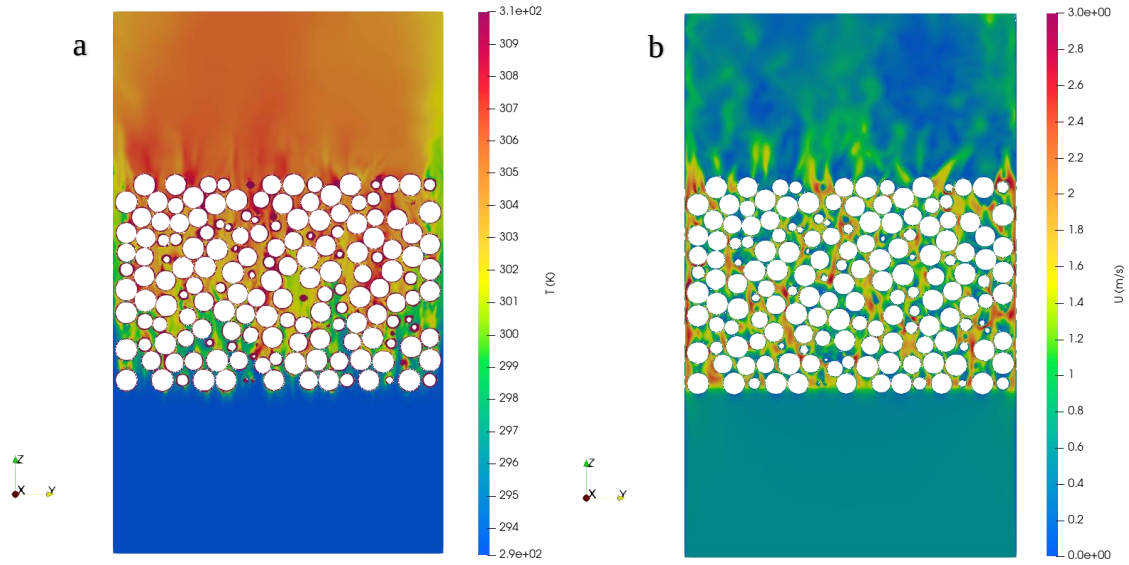


Şekil 6.14 d=0,004 m ve H/d=10 için türbülans kinetik enerji profilleri

6.1.1.5. d=0,004 m ve H/d=10 için türbülans akış durumu ($Re_d=1947$)

Sıcaklık ve hız konturları

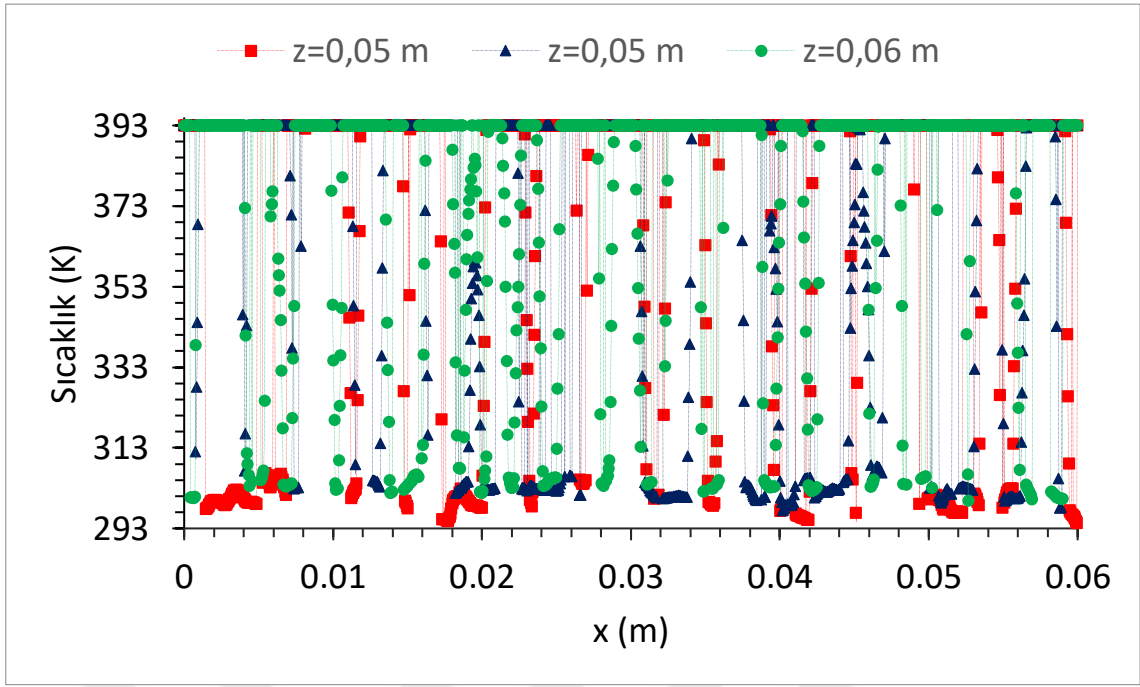
$Re_d=1947$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, H/d=10 geometrisi için Şekil 6.15'te verilmiştir. Şekil 6.15a'da akış bir miktar homojenleşmiştir ve toplam ısı transferi değişmemekle beraber sıcaklık azalmıştır. Hız dağılımı konturu, paket yatak geometrisi için Şekil 6.15b'de verilmiştir. Hız konturundan hareketle, akış içerisinde girdapların oluştuğu gözlemlenmiştir.



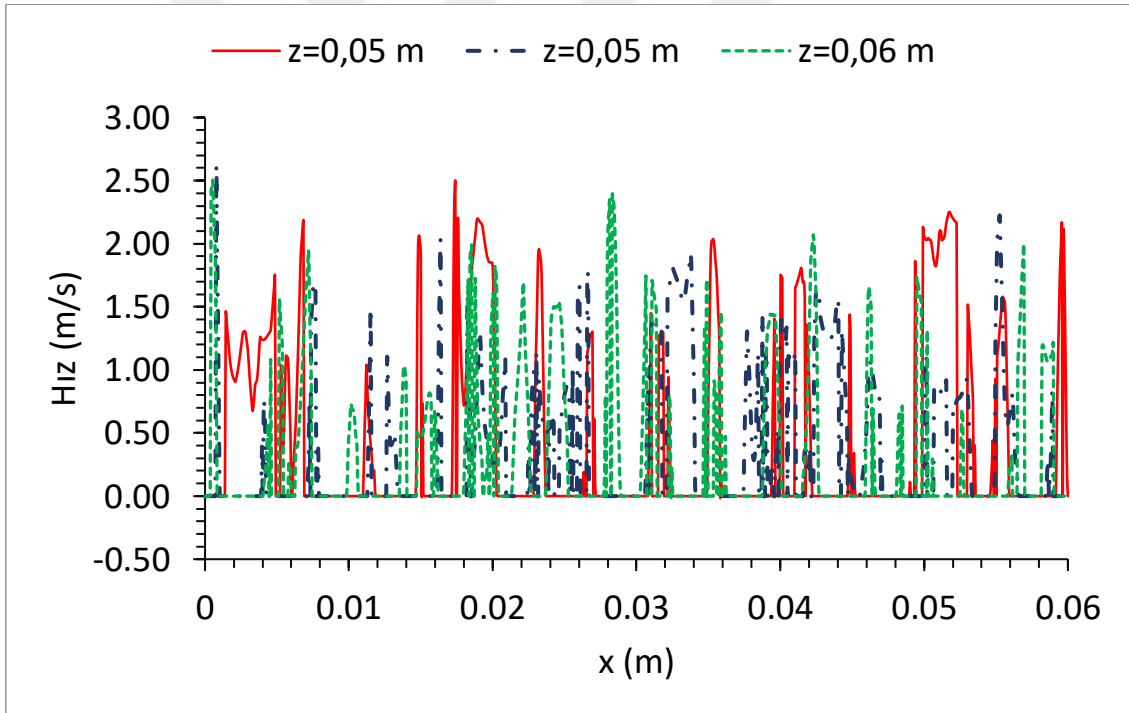
Şekil 6.15 a) $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için hız alanı şekli

Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri

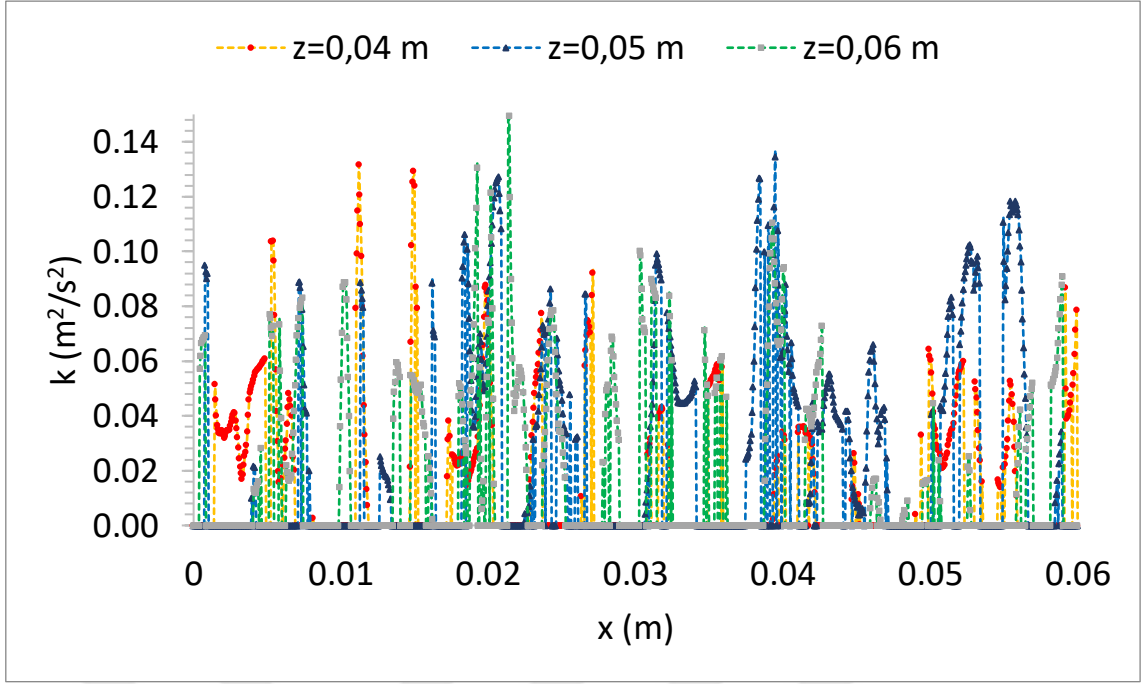
$Re_d=1947$ türbülanslı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları Şekil 6.16-6.18’de gösterilmektedir. Şekil 6.16’da, zamana bağlı akışa nazaran sıcaklık farkı azalmıştır. Şekil 6.17’de hız düzensiz bir yapıda olup türbülansın etkisiyle büyük bir artış kazanmıştır. Şekil 6.18’de, paket yatak geometrisinin içinde duvar etkisinin olmadığı ama yukarı doğru türbülans artışı görülmektedir.



Şekil 6.16 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık profilleri



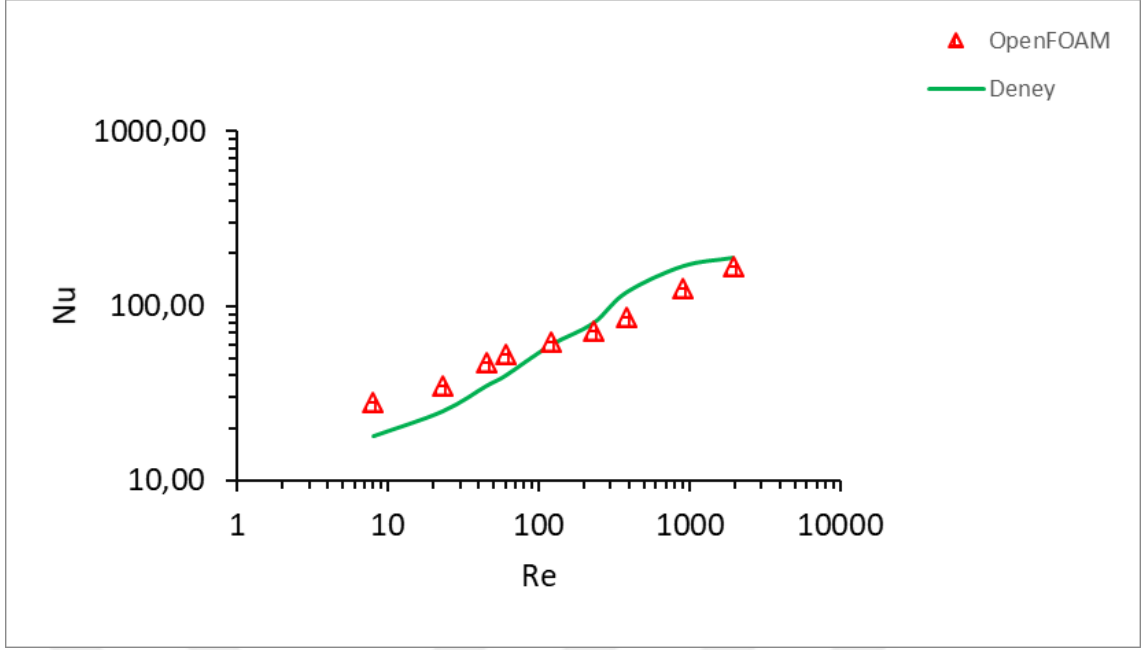
Şekil 6.17 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için hız profilleri



Şekil 6.18 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için türbülans kinetik enerji profilleri

6.1.1.6. $d=0,004$ m ve $H/d=10$ için Nusselt sayısı

Şekil 6.19, $d=0,004$ m küreler ile $H/d=10$ paket yatak geometrisi için elde edilen deneysel ile OpenFOAM sonuçlarını göstermektedir. Burada, laminar bölgede deneysel veriler ile farklılaşmaların olduğu ve türbülanslı bölgeye geçişin benzerlik içinde olduğu görülmektedir.

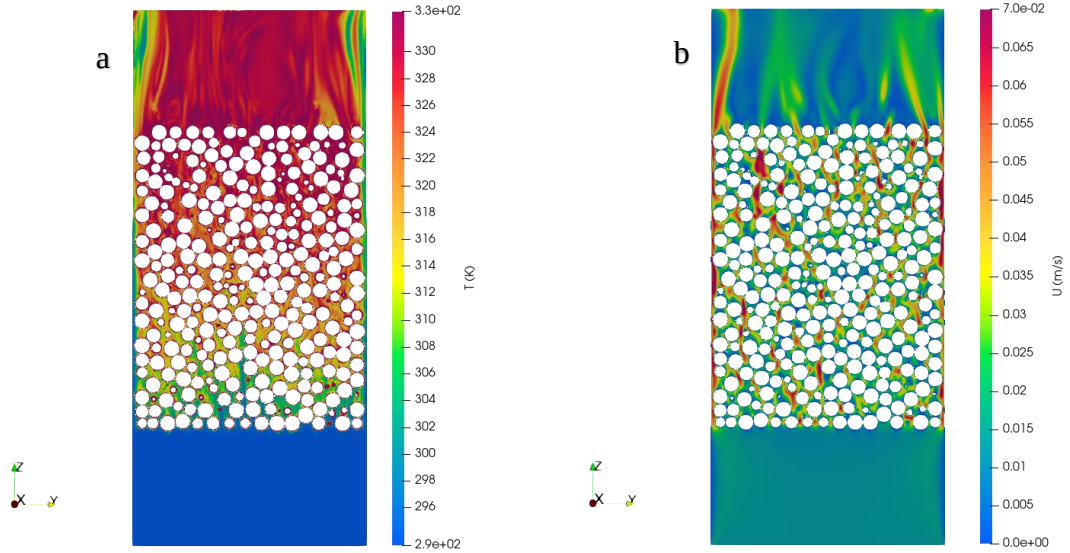


Şekil 6.19 $d=0,04$ m ve $H/d=10$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri

6.1.1.7. $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için laminar akış durumu ($Re_d=45$)

Sıcaklık ve hız konturları

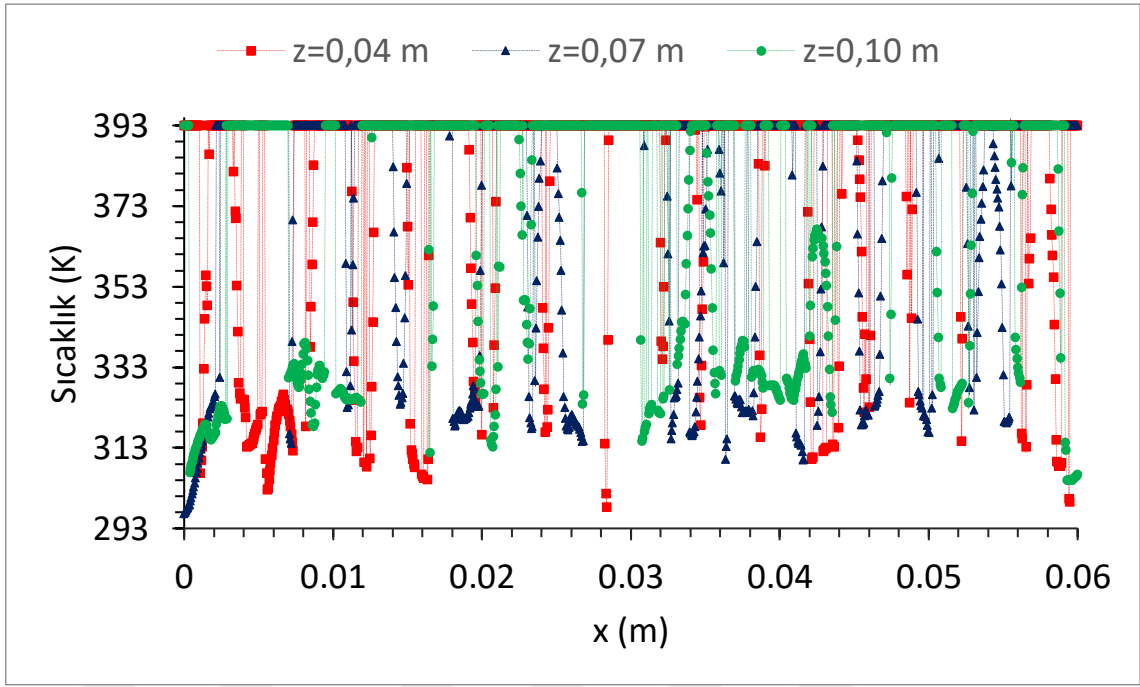
$Re_d=45$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız ölçeği, $H/d=20$ geometrisi için Şekil 6.20’de verilmiştir. Şekil 6.20a’da sıcaklık belli aksenal bölgelerde arttığı görülmektedir. Hız dağılımı konturu, paket yatak geometrisi için Şekil 6.20b’de verilmiştir. Şekil 6.20b’deki hız konturundan hareketle, akış alanının küreler ile duvar arasında kalan kısımlarda ve kürelerin arasında ki boşluklarda akış hızının arttığı görülmektedir.



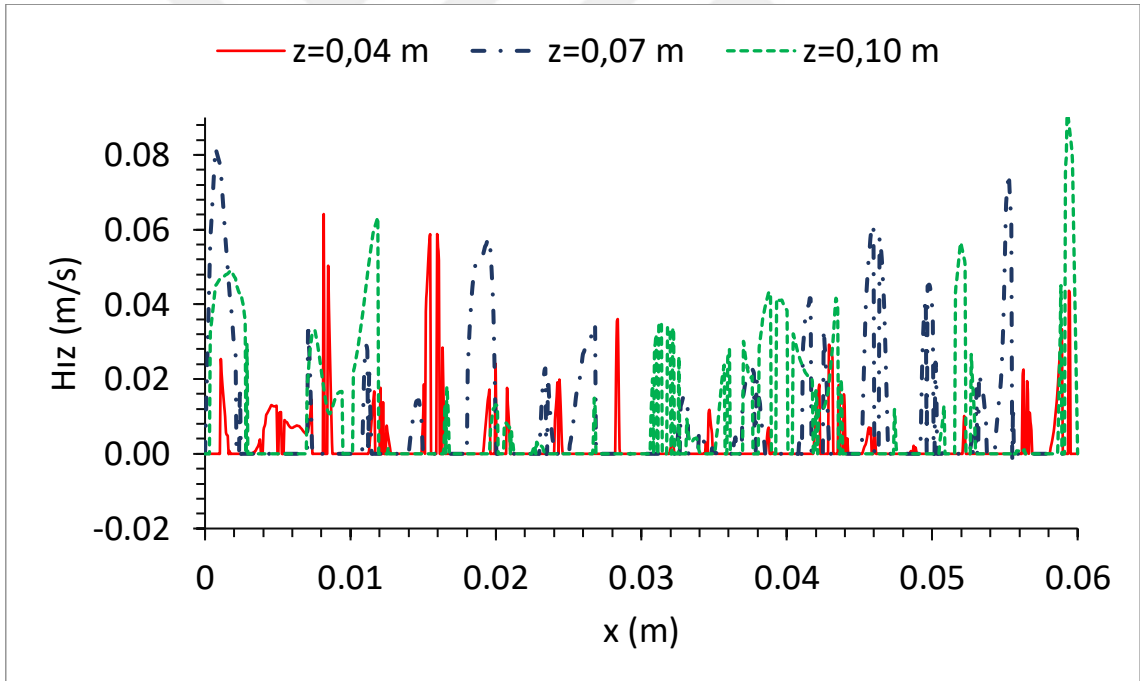
Şekil 6.20 a) $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için hız alanı şekli

Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri

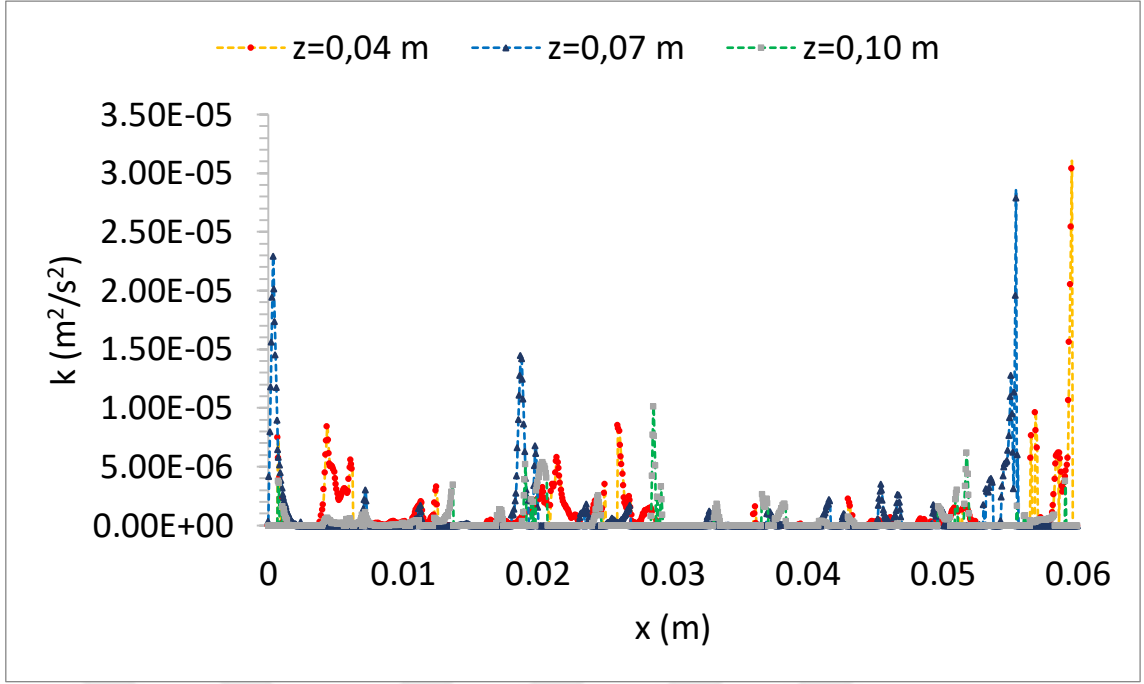
$Re_d=45$ zamana bağlı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları Şekil 6.21-6.23'te gösterilmektedir. Şekillerde $z = 0,040$ m (kürelerin giriş bölgesi), $z = 0,070$ m (kürelerin orta bölgesi) ve $z = 0,10$ m (kürelerin üst bölgesi) yükseklikleri ve yatay ekseninde geometrinin merkezinden alınan çizgiyi temsil etmektedir. Şekil 6.21'de sıcaklık bütün bölgelerde genellikle ortalama 333 K ile 313 K civarında yoğunlaşmış olup çok fazla değişmiştir. Şekil 6.22'de paket yatak içinde hızın arttığı görülmektedir. Akış hızının, duvar kenarlarında, kürelerin olduğu bölgeye kıyasla daha fazla hızı olduğu ve kürelerin olduğu kısımda da hızın aksenal olarak 0 m ile 0,03 m arasında $z5$; 0,03 m ile 0,06 arasında $z15$ bölgesinde akış hızının yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 6.23'te, paket yatak geometrisinin içinde türbülans kinetik enerjisinin duvar kenarlarında kısmi artışın olduğu, homojen yayılma gösterdiği ve giriş ve çıkış bölgelerinde hafif artışların olduğu görülmektedir.



Şekil 6.21 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık profilleri



Şekil 6.22 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için hız profilleri

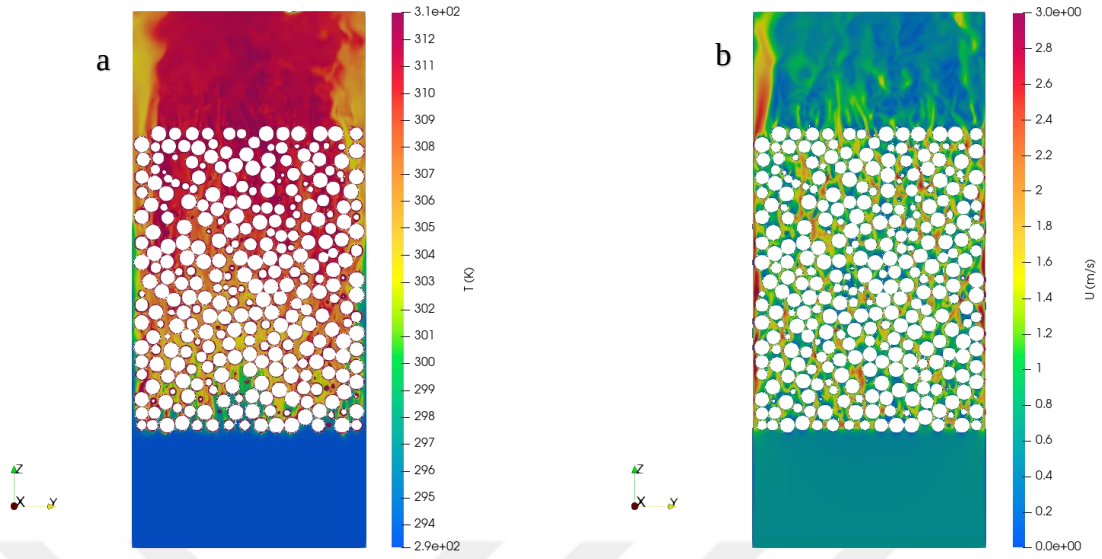


Şekil 6.23 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için türbülans kinetik enerji profilleri

6.1.1.8. $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için türbülans akış durumu ($Re_d=1947$)

Sıcaklık ve hız konturları

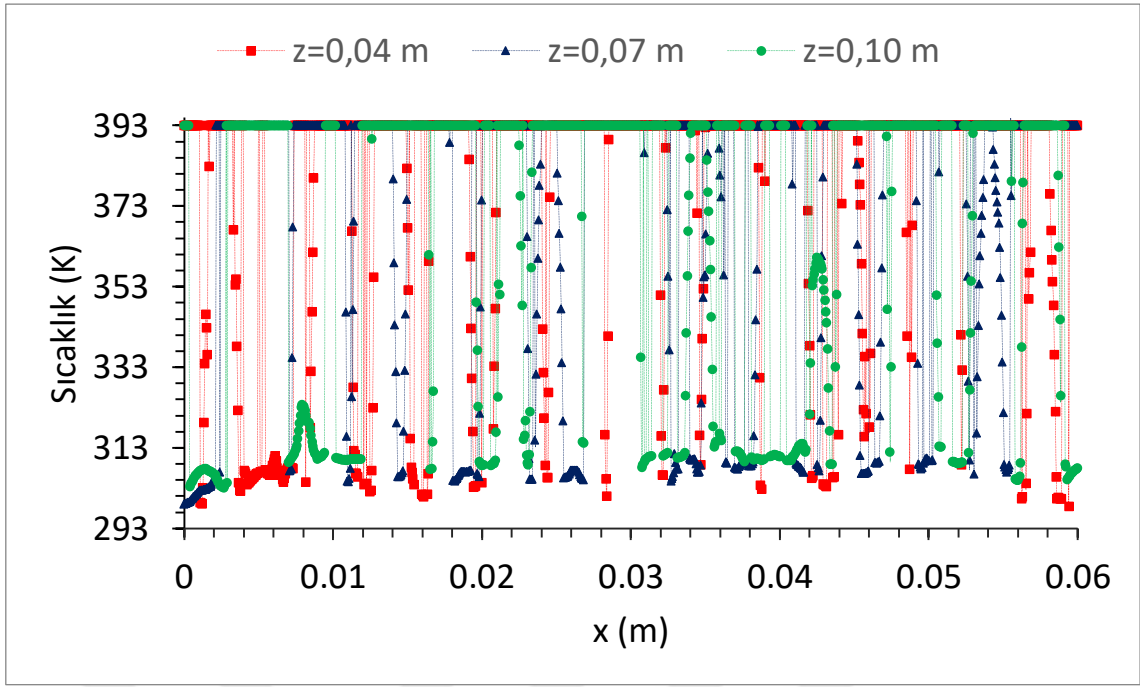
$Re_d=1947$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, $H/d=20$ geometrisi için Şekil 6.24'te verilmiştir. Şekil 6.43a'da sıcaklığın duvar kenarlarından ortalara doğru yayıldığı ve katmanlı bir şekilde geometride yer aldığı görülmektedir. Hız dağılımı konturları, paket yatak geometrisi için Şekil 6.24b'de verilmiştir. Hız konturlarından hareketle, akış alanının küreler ile duvar arasından kalan kısımda, akış hızının arttığı ve türbülansın dolaylı girdapların oluştuğu görülmektedir.



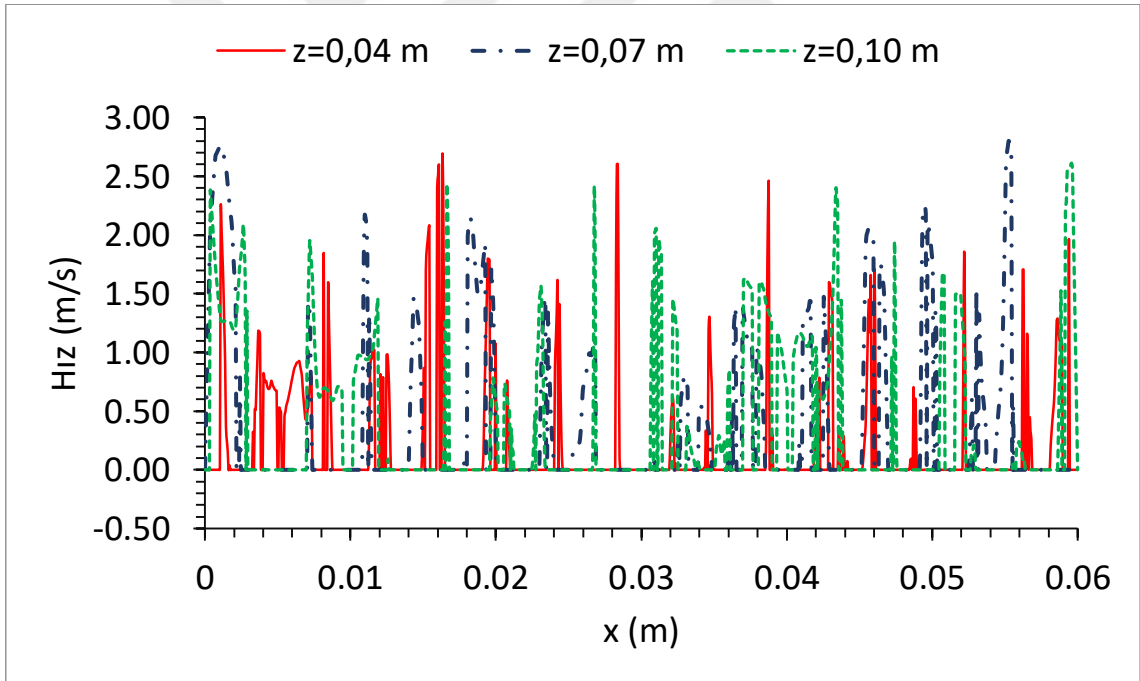
Şekil 6.24 a) $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için hız alanı şekli

Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri

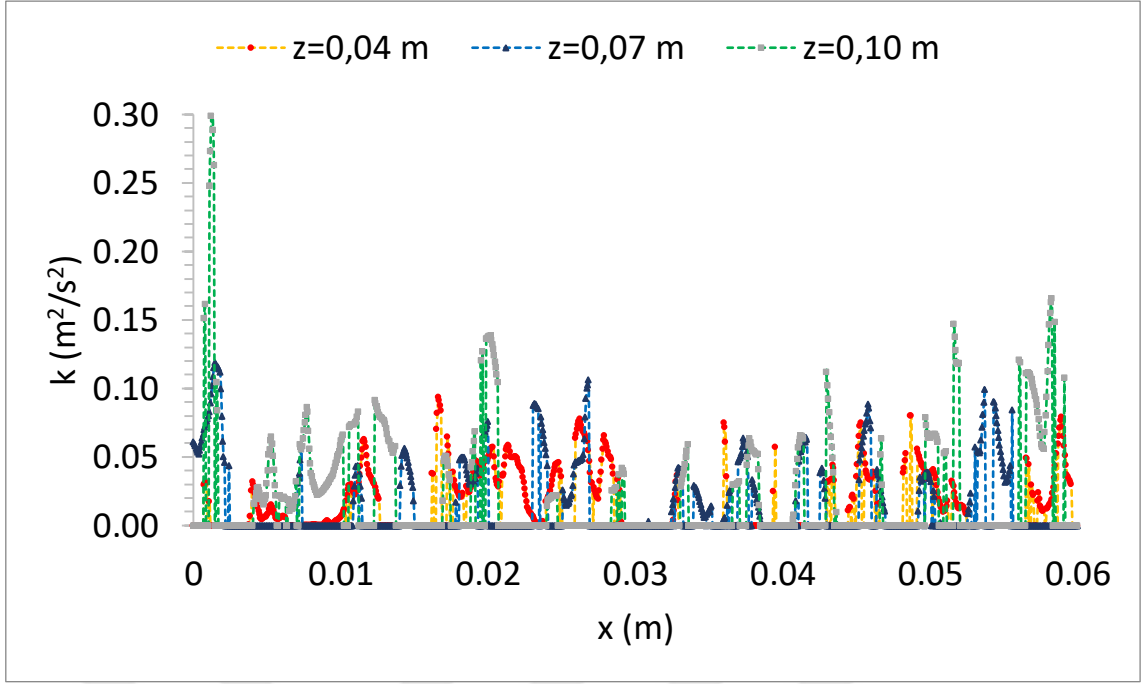
$Re_d=1947$ türbülanslı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları Şekil 6.25-6.27’de gösterilmektedir. Şekil 6.25’te sıcaklık, laminar akışa göre azalma göstermiştir. Şekil 6.26’da hız bütün bölgelerde türbülansın etkisiyle büyük bir artış kazanmıştır. Şekil 6.27’de, paket yatak geometrisinin içinde türbülansın girişten çıkışa doğru arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.25 $d=0.004$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık profilleri



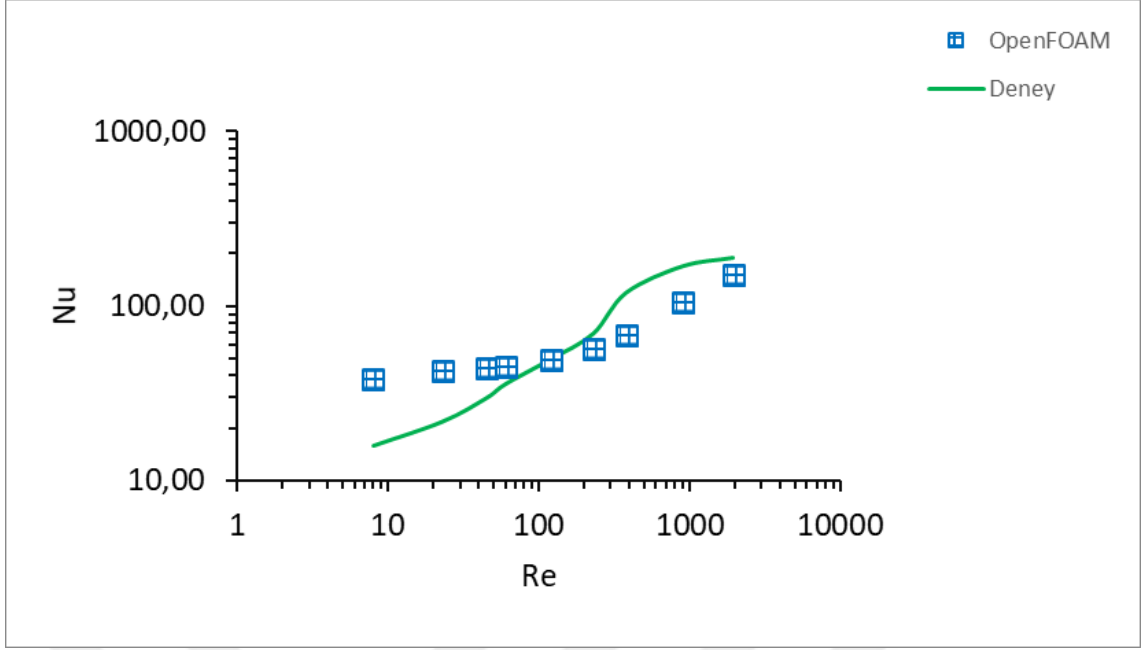
Şekil 6.26 $d=0.004$ m ve $H/d=20$ için hız profilleri



Şekil 6.27 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için türbülans kinetik enerji profilleri

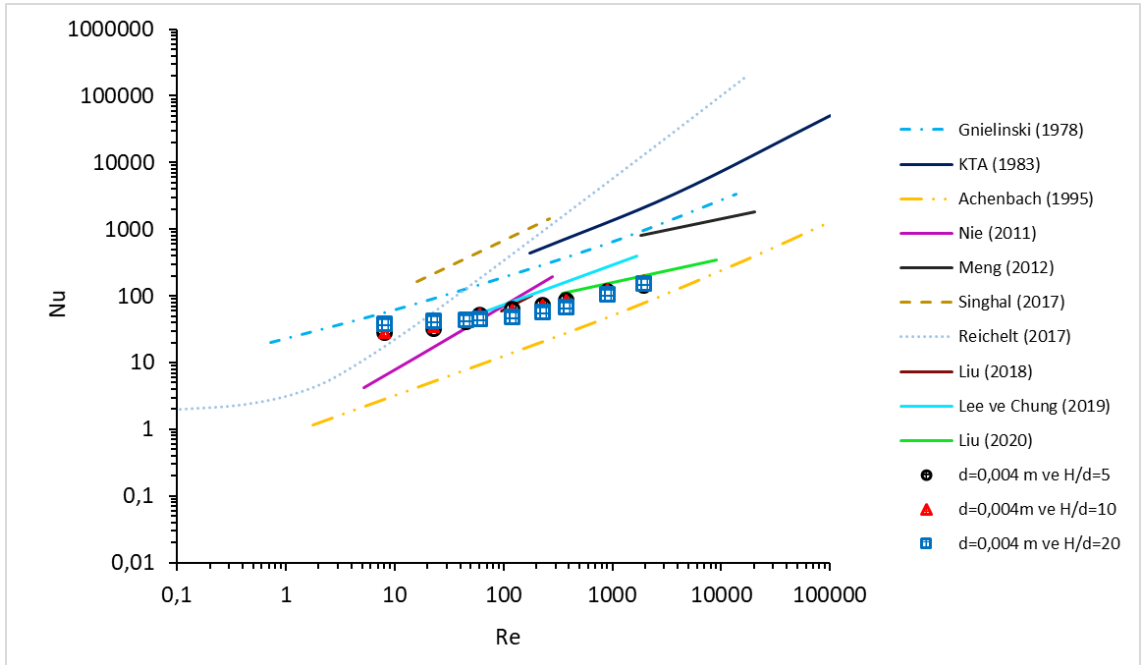
6.1.1.9. $d=0,004$ m ve $H/d=20$ için Nusselt sayısı

Şekil 6.28, $d=0,004$ m küreler ile $H/d=20$ paket yatak geometrisi için elde edilen deneysel ile OpenFOAM sonuçlarını göstermektedir. Burada, laminar ve türbülanslı bölgede deney ile arasında farkın fazla olduğu görülmektedir. Bu farkın artışı deneysel verilerden ötürü olabilmektedir.



Şekil 6.28 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri

OpenFOAM sayısal sonuçları, Şekil 6.28’de gösterildiği gibi literatürdeki mevcut korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçların, mevcut korelasyonlar ile belli bir aralığın içinde olduğu ve bu sonuçların referans alınan deneysel sonuçlar ile yakın bir benzerlik içinde olduğu da görülmektedir.



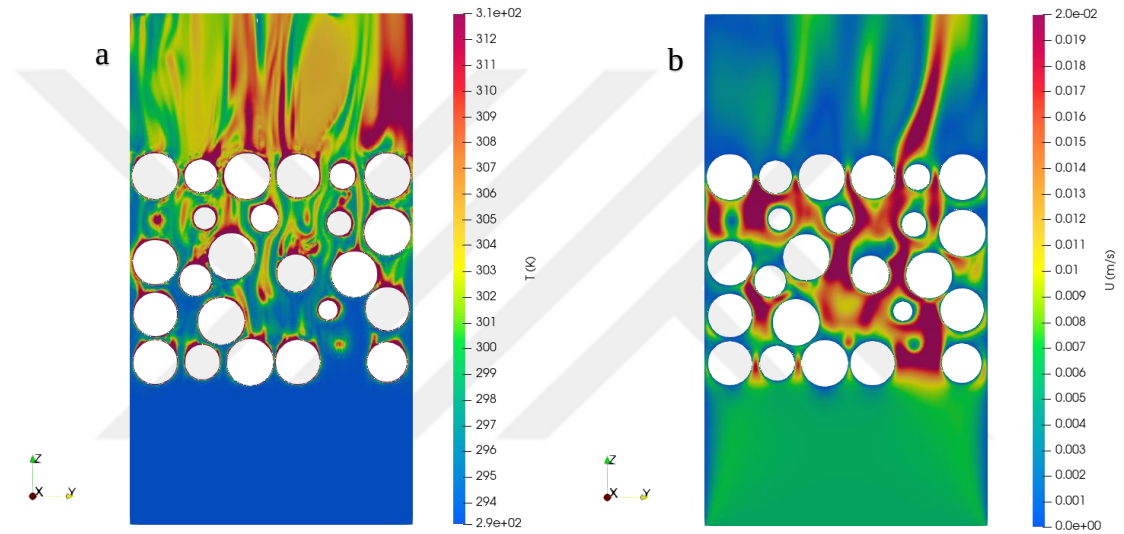
Şekil 6.29 $d=0,004$ m ile $H/d=5$, $H/d=10$ ve $H/d=20$ paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için OpenFOAM simülasyonlarından ve mevcut korelasyonlardan elde edilen Nu değerleri

6.1.2. $d=0.010$ m ile $H/d=5$, $H/d=10$ ve $H/d=20$ paket yatak geometrileri

6.1.2.1. $d=0.010$ m ve $H/d=5$ için laminar akış durumu ($Re_d=50$)

Sıcaklık ve hız konturları

$Re_d=50$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, $H/d=5$ geometrisi için Şekil 6.30'da verilmiştir. Şekil 6.30a'da sıcaklık $d=0.004$ m çaplı kürelerdeki laminar akışa göre duvar kenarlarında daha azdır. Hız dağılımı konturu, paket yatak geometrisi için Şekil 6.30b'de verilmiştir. Hız konturundan hareketle, akış alanının daraldığı bölgelerde akış hızının arttığı görülmektedir.

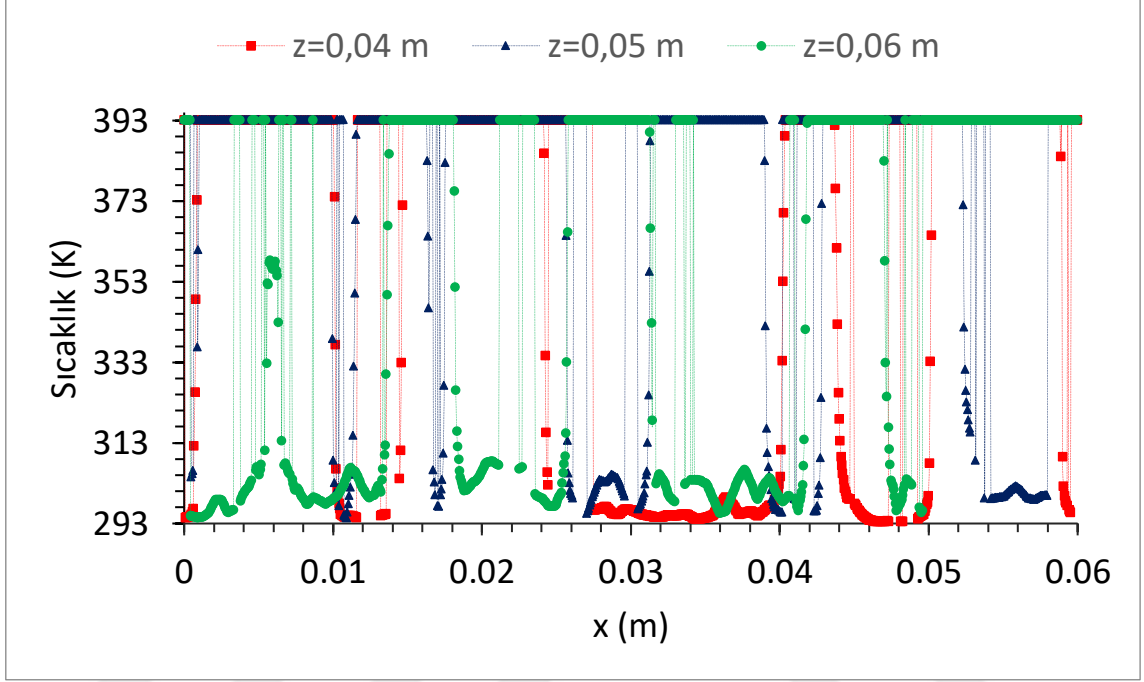


Şekil 6.30 a) $d=0.010$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0.010$ m ve $H/d=5$ için hız alanı şekli

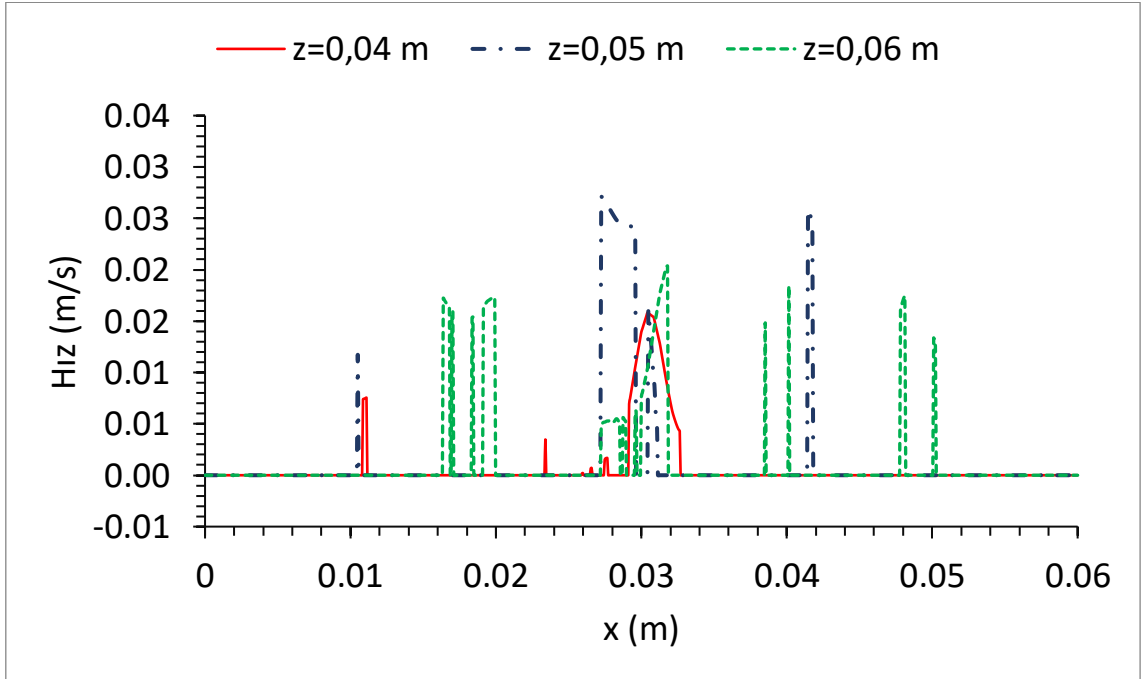
Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri

$d=0.010$ m çaplı küreler için $Re_d=50-3094$ aralığında cebri konveksiyon simülasyonları yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, $Re_d \approx 150$ ve altındaki değerler zamana bağlı akış rejimi, üzeri türbülanslı akış rejimi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, küreler etrafında her iki akış rejiminden birer örnek alınarak $H/d=5$, 10 ve 20 için sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri çalışmaları yapılmıştır. $Re_d=50$ zamana bağlı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları Şekil 6.31-6.33'te gösterilmektedir. Şekillerde $z = 0.04$ m (kürelerin giriş bölgesi), $z = 0.05$ m (kürelerin orta bölgesi) ve $z = 0.06$ m (kürelerin üst bölgesi) yükseklikleri ve yatay ekseninde geometrinin merkezinden alınan çizgiyi temsil etmektedir.

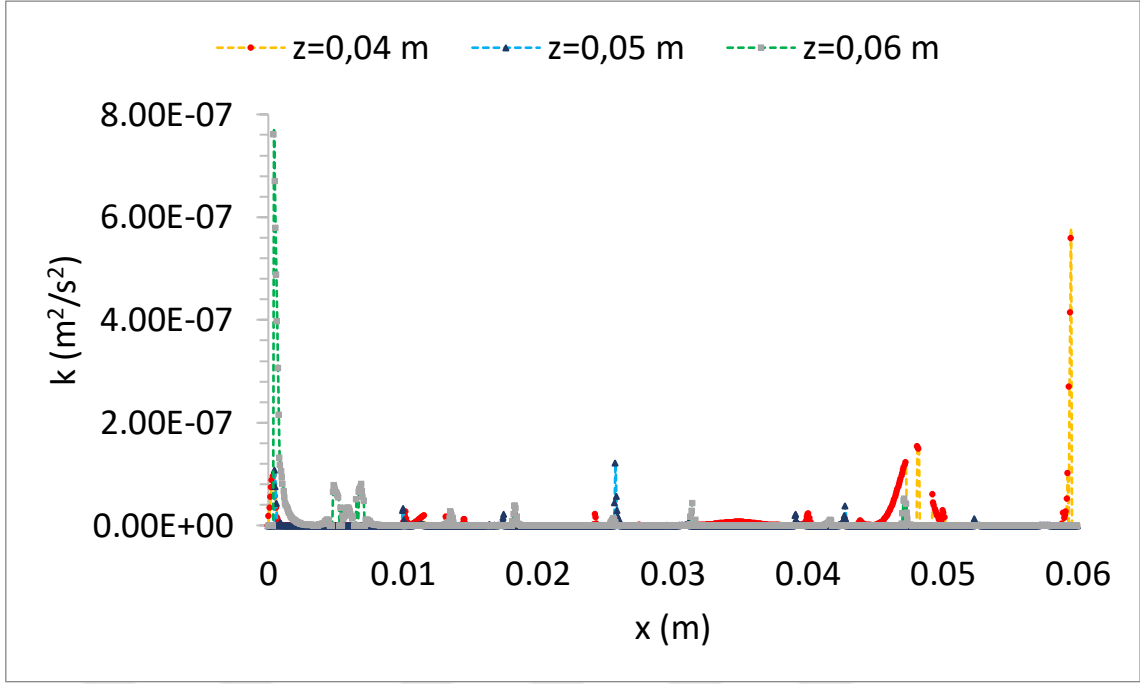
Şekil 6.31’de sıcaklık çıkışa doğru arttığı görülmektedir. Şekil 6.32’de hızın giriş bölgesinde neredeyse sıfır iken üst bölümde belli bölgelerde artış yaşanmıştır. Şekil 6.33’te, paket yatak geometrisinin içinde türbülans kinetik enerjisinin laminar akış olduğundan dolayı duvar kenarlarında bir artışın olduğu görülmektedir fakat genel ifadeyle bir yoğunluktan söz etmek mümkün değildir.



Şekil 6. 31 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık profilleri



Şekil 6.32 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri

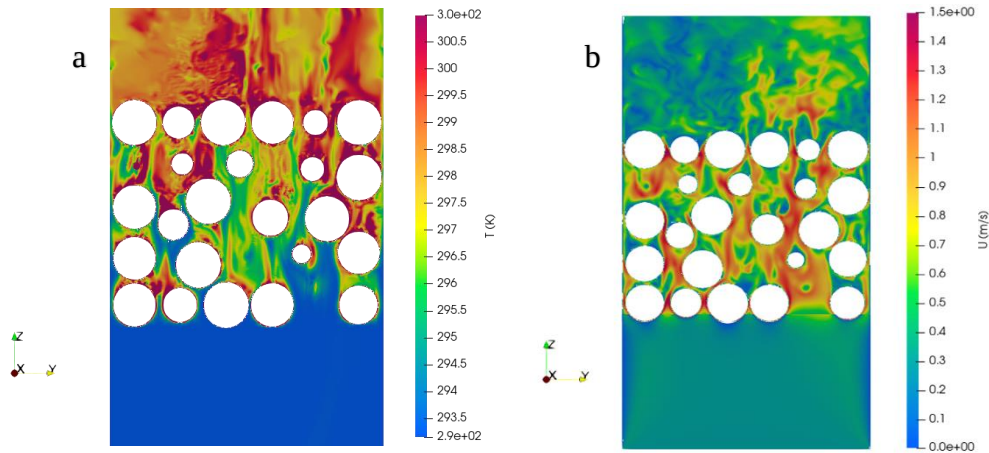


Şekil 6.33 d=0,010 m ve H/d=5 için türbülans kinetik enerji profilleri

6.1.2.2. d=0,010 m ve H/d=5 için türbülans akış durumu ($Re_d=3094$)

Sıcaklık ve hız konturları

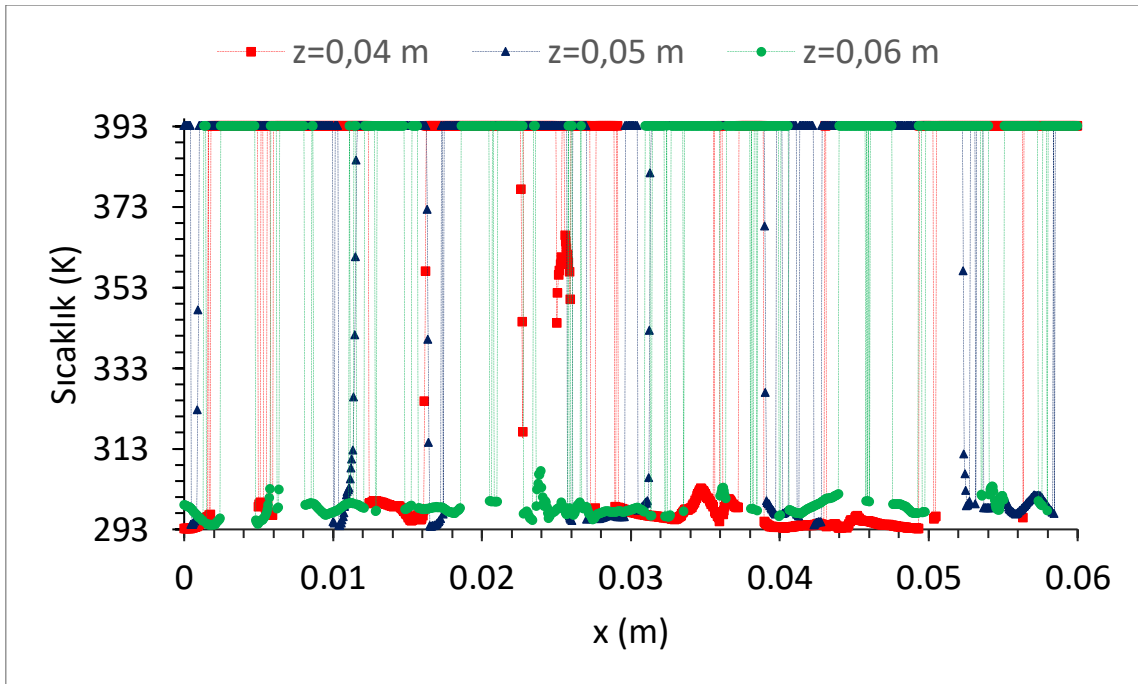
$Re_d=3094$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, H/d=5 geometrisi için Şekil 6.34'te verilmiştir. Şekil 6.34a'da sıcaklık türbülans dolayısıyla ortalara doğru sıcaklığın arttığı görülmektedir. Hız dağılımı konturu, paket yatak geometrisi için Şekil 6.34b'de verilmiştir. Buradan hareketle, akış alanının küreler ile duvar arasında kalan kısımda ve üst bölümlerde girdapların oluştuğu görülmektedir.



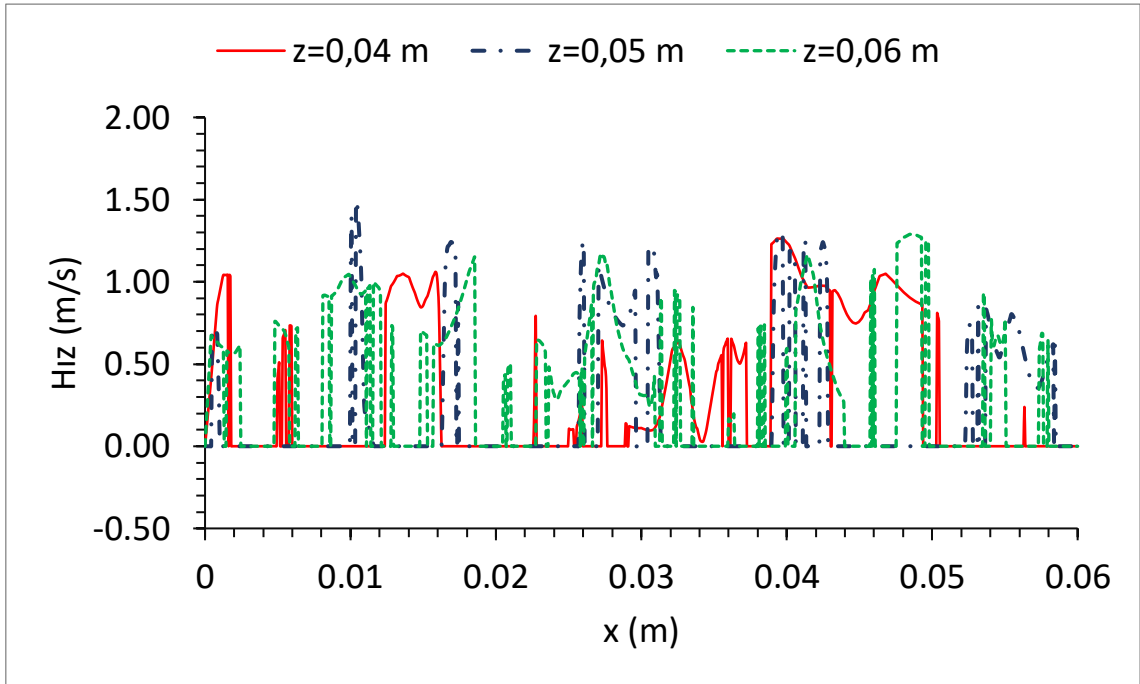
Şekil 6.34 a) d=0,010 m ve H/d=5 için sıcaklık alanı şekli b) d=0,010 m ve H/d=5 için hız alanı şekli

Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri

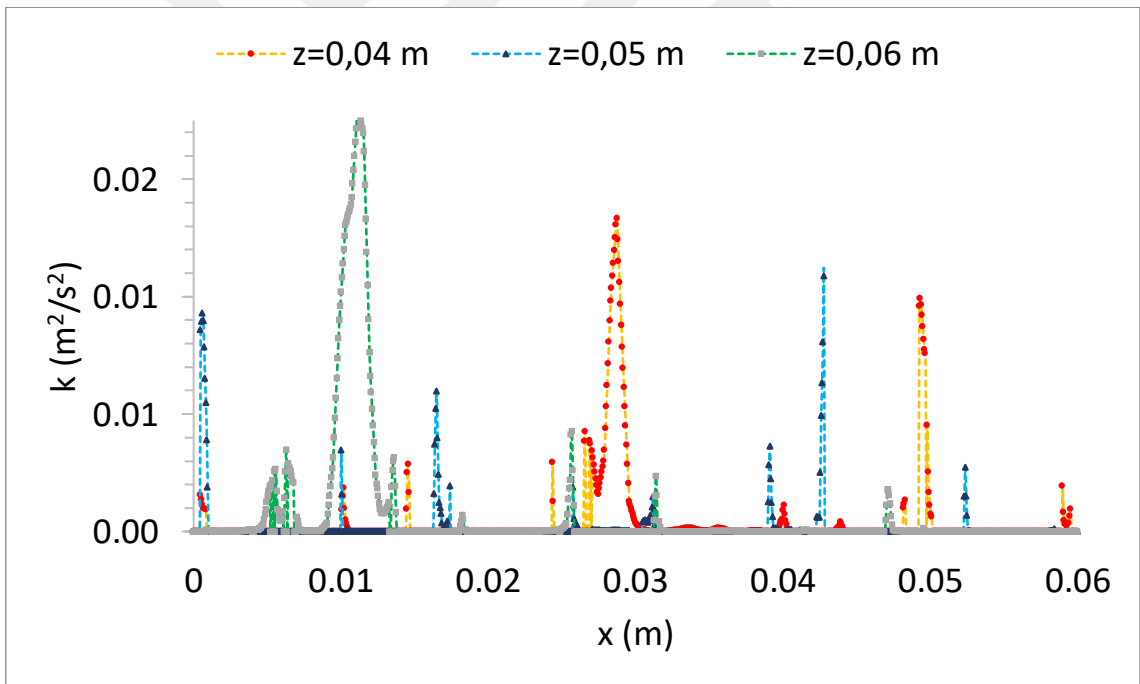
$Re_d=3094$ türbülanslı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları Şekil 6.35-6.37’de gösterilmektedir. Şekil 6.35’te sıcaklık zamana bağlı akışa göre eksen boyunca dar bir yayılma göstermiş ve azalan bir grafik izlenmiştir. Şekil 6.36’da hızda, zamana bağlı akışın aksine bütün bölgelerde türbülansın etkisiyle büyük bir artma olduğu görülmektedir. Şekil 6.37’de, paket yatak geometrisinin içinde belli bölgelerde türbülans kinetik enerjisinin yükselmenin olduğu fakat türbülansın yayılma durumunun az olduğu görülmektedir.



Şekil 6.35 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için sıcaklık profilleri



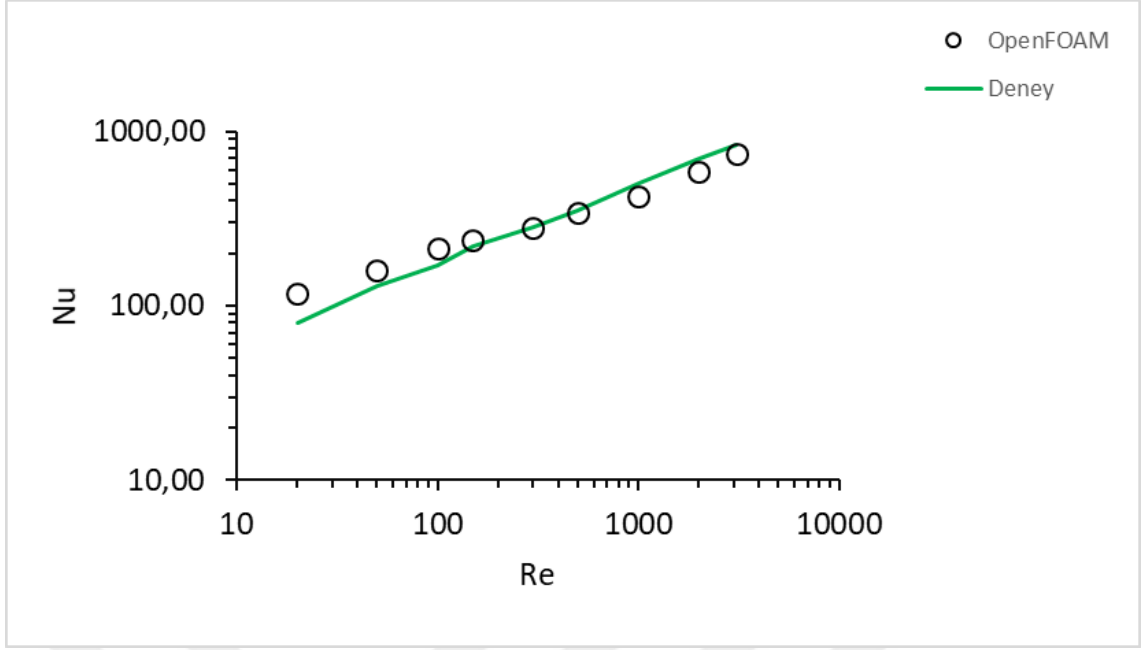
Şekil 6.36 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için hız profilleri



Şekil 6.37 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için türbülans kinetik enerji profilleri

6.1.2.3. $d=0,010$ m ve $H/d=5$ için Nusselt sayısı

Şekil 6.37, $d=0.010$ m küreler ile $H/d=5$ paket yatak geometrisi için elde edilen deneysel ile OpenFOAM sonuçlarını göstermektedir. Genel olarak küçük sapmaların olduğu, sayısal hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmektedir.

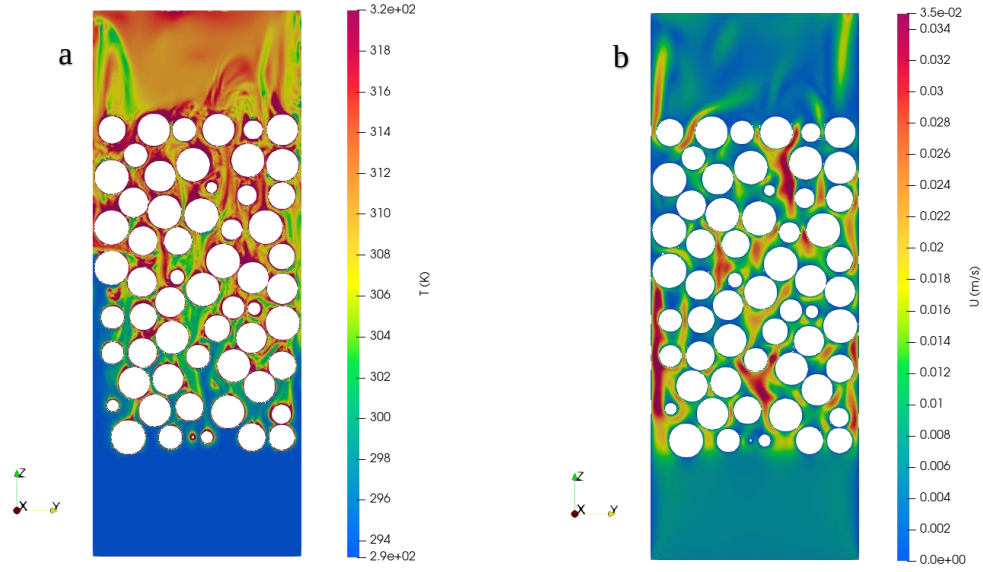


Şekil 6.38 $d=0,010$ m ve $H/d=5$ m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri

6.1.2.4. $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için laminar akış durumu ($Re_d=50$)

Sıcaklık ve hız konturları

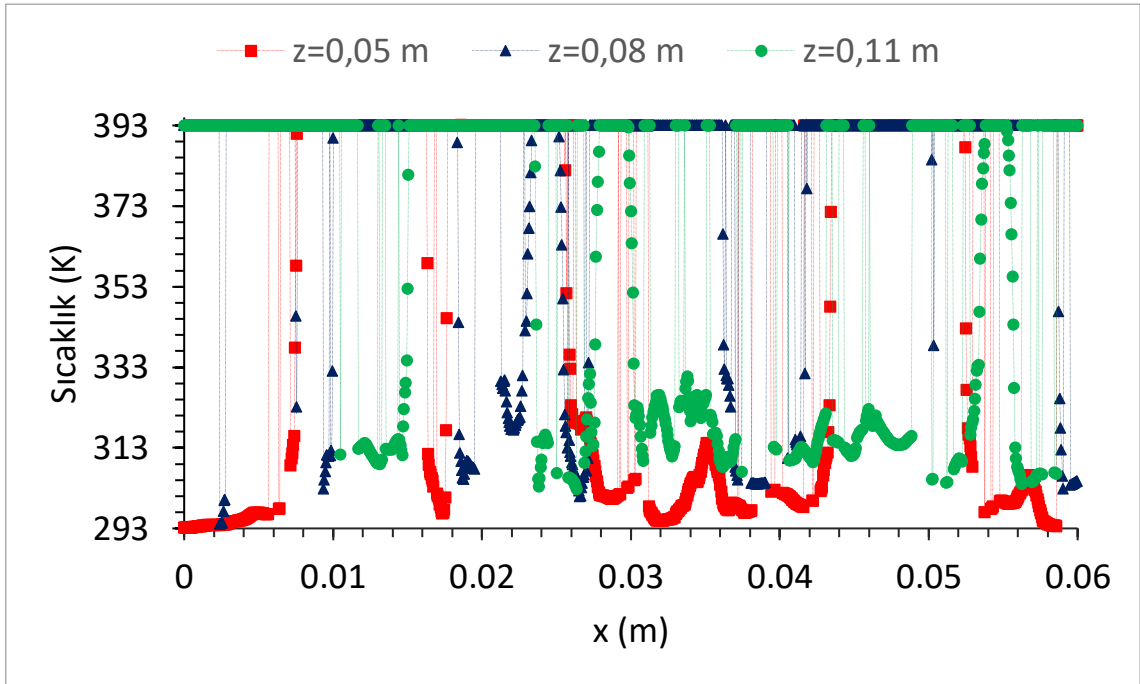
$Re_d=50$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, $H/d=10$ geometrisi için Şekil 6.39’da verilmiştir. Şekil 6.39a’da sıcaklığın duvar kenarlarından arttığı çıktığı görülmektedir. Hız dağılımı konturu, paket yatak geometrisi için Şekil 6.39b’de verilmiştir. Buradan hareketle, belli noktalarında akış hızının arttığı görülmektedir.



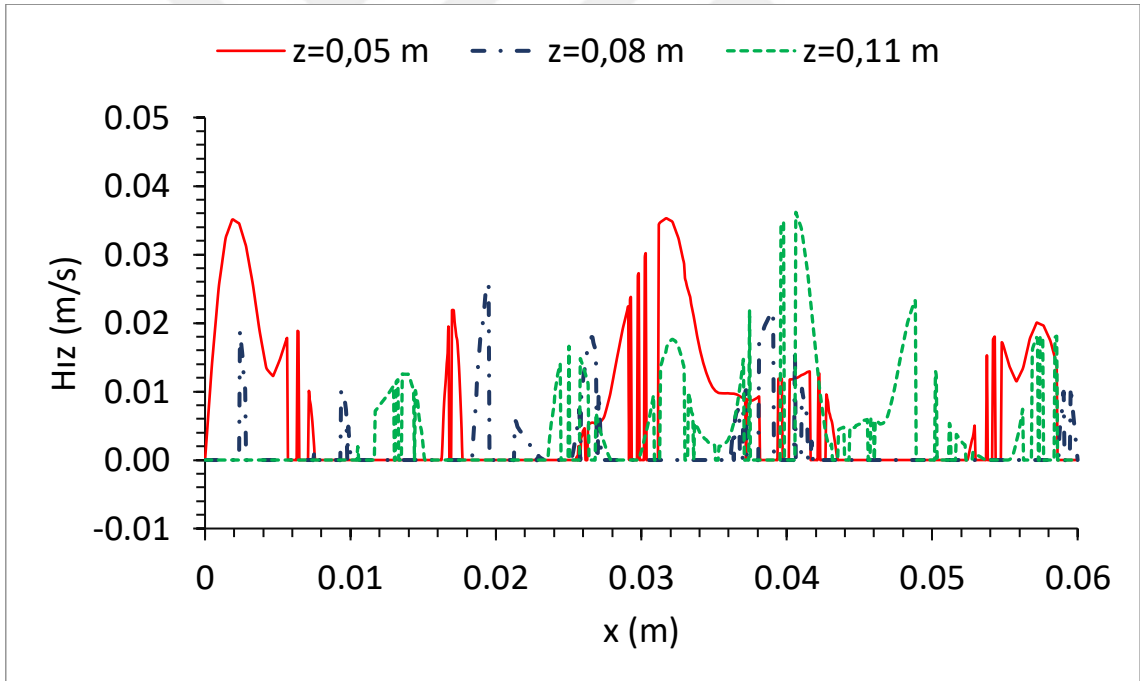
Şekil 6.39 a) $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için hız alanı şekli

Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri

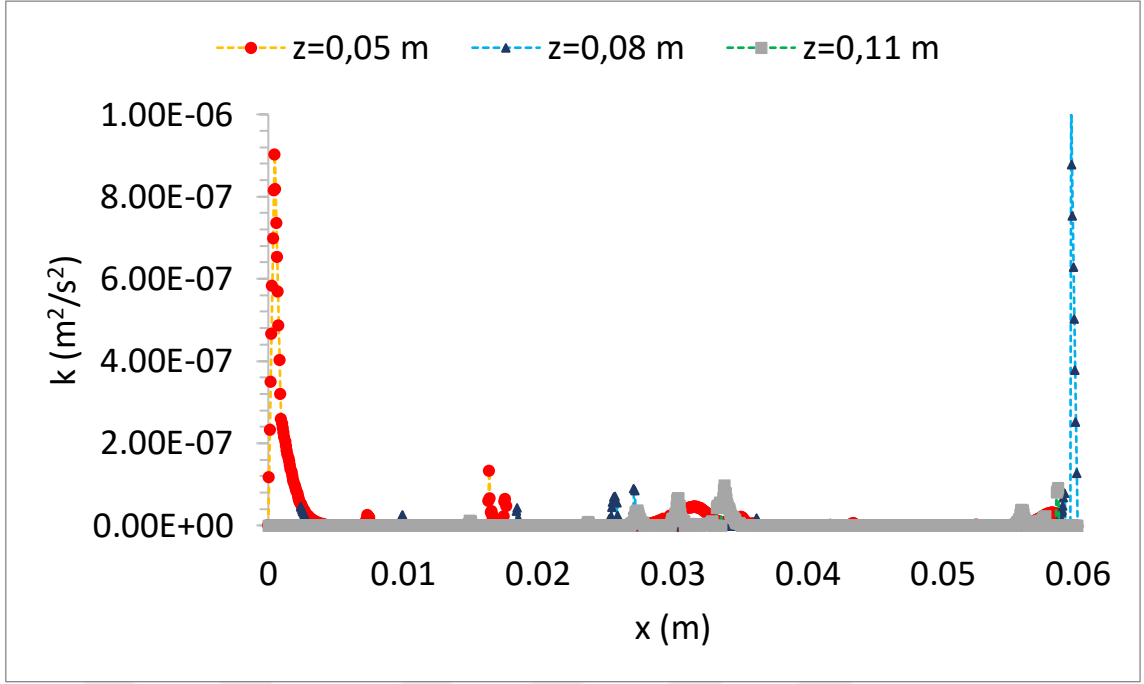
$Re_d=50$ zamana bağlı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri Şekil 6.40-6.42’de gösterilmektedir. Şekillerde $z = 0,05$ m (kürelerin giriş bölgesi), $z = 0,08$ m (kürelerin orta bölgesi) ve $z = 0,11$ m (kürelerin üst bölgesi) yükseklikleri ve yatay ekseninde geometrinin merkezinden alınan çizgiyi temsil etmektedir. Şekil 6.40’da sıcaklık, $z5$ bölgesinde aksel olarak bölüm bölüm belirgin olarak 293 K ile 313 K arasında, $z15$ bölümünde ise ~ 313 K civarında yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 6.41’de hız, belirli $z5$ bölgesinde ve $z15$ bölgesine hızlandığı görülmektedir. Şekil 6.42’de, paket yatak geometrisinin içinde türbülans kinetik enerjisinin $z10$ bölgesi duvar kenarında yüksek bir artışın olduğu fakat geri kalan kısımlarda yoğunluğun olmadığı görülmektedir.



Şekil 6.40 d=0,010 m ve H/d=10 için sıcaklık profilleri



Şekil 6.41 d=0,010 m ve H/d=10 için hız profilleri

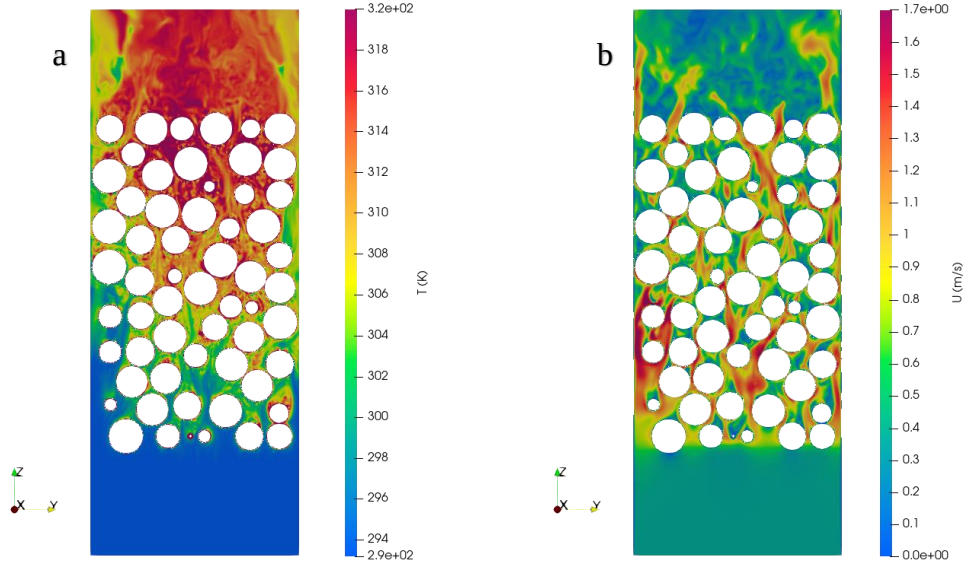


Şekil 6.42 d=0,010 m ve H/d=10 için türbülans kinetik enerji profilleri

6.1.2.5. d=0,010 m ve H/d=10 için türbülans akış durumu ($Re_d=3094$)

Sıcaklık ve hız konturları

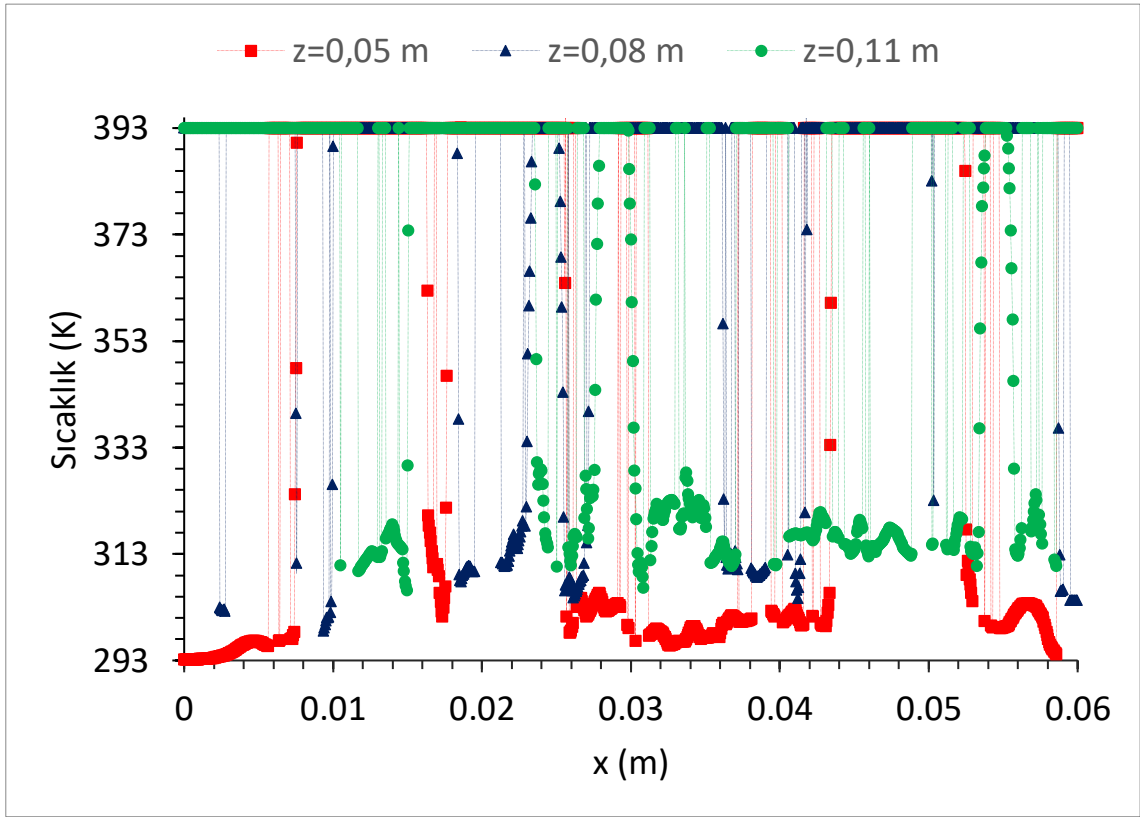
$Re_d=3094$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, H/d=10 geometrisi için Şekil 6.43'te verilmiştir. Şekil 6.43a'da H/d oranının artışıyla türbülansın hareket alanının artarak sıcaklığı duvar kenarlarından orta bölümlere doğru götürdüğü görülmektedir. Hız dağılımı konturu, paket yatak geometrisi için Şekil 6.43b'de verilmiştir. Buradan hareketle hız, küre sayılarının ve oluşan alanın daralmasının artmasıyla belirli kısımlarda yükseldiği görülmektedir.



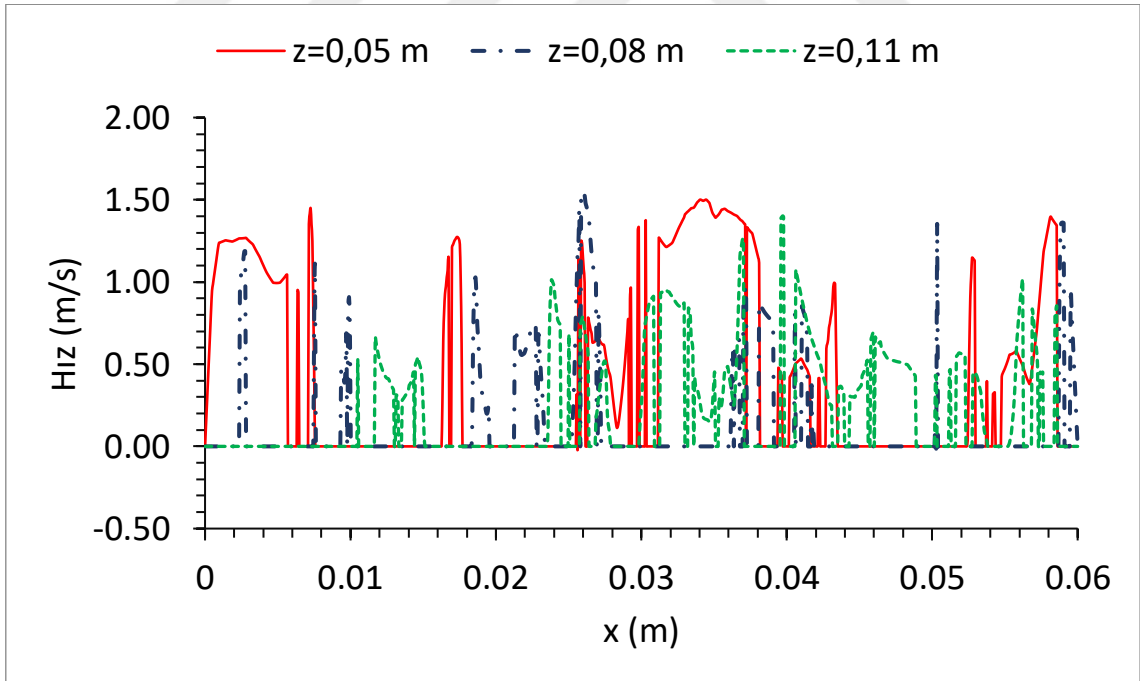
Şekil 6.43 a) $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için hız alanı şekli

Sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji profilleri

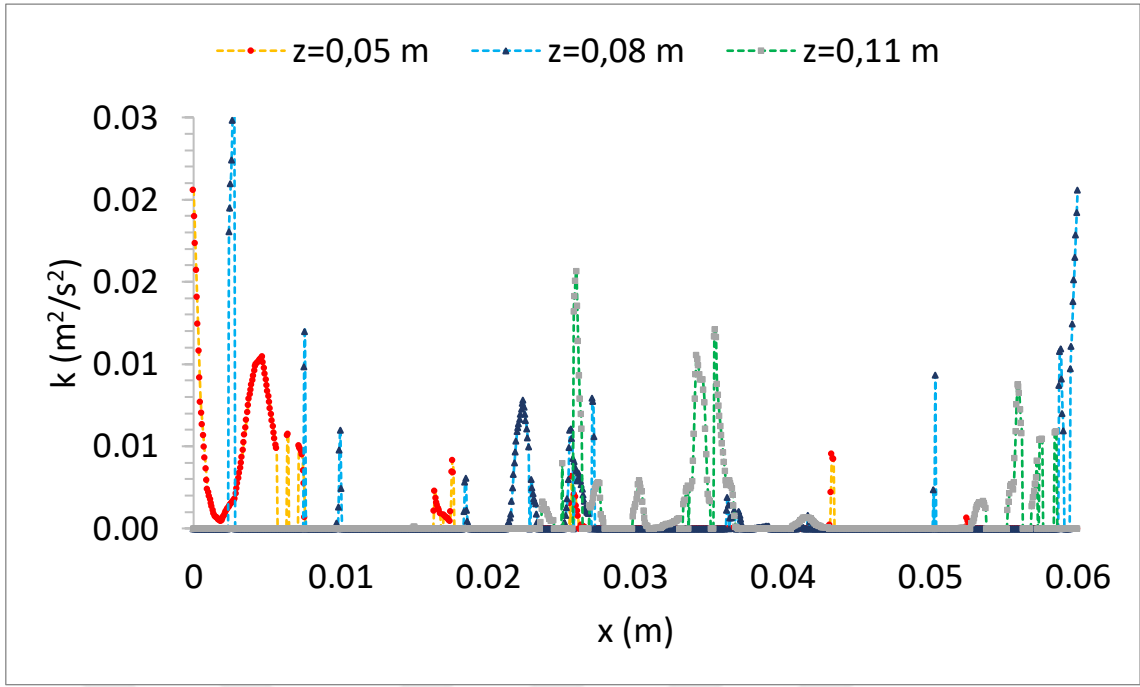
$Re_d=3094$ türbülanslı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji Şekil 6.44-6.46’da gösterilmektedir. Şekil 6.44’te sıcaklık laminar akışa göre eksen boyunca bir azalma söz konusudur. Şekil 6.45’te hızda, zamana bağlı akışın aksine bütün bölgelerde türbülansın etkisiyle başlangıç kürelerinde bitime doğru bir artma olduğu görülmektedir. Şekil 6.46’da, paket yatak geometrisinin içinde eksen boyunca duvar kenarlarında ve ortalara doğru belirli aralıklarda türbülans kinetik enerjisinin yükseldiği görülmektedir.



Şekil 6.44 $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için sıcaklık profilleri



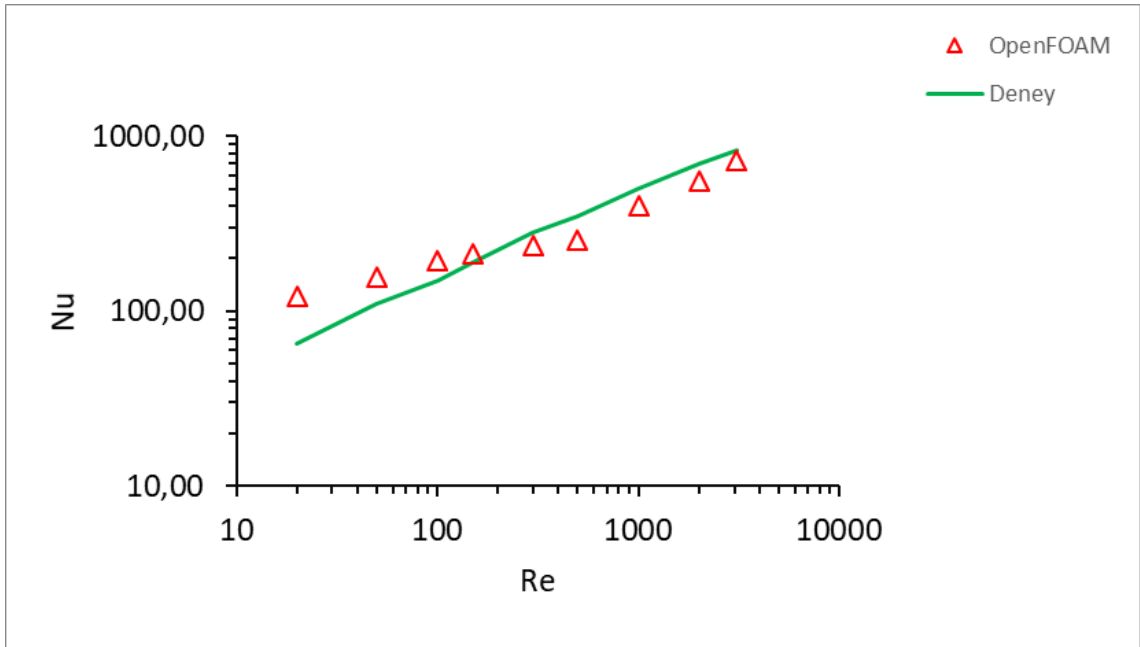
Şekil 6.45 $d=0,010$ m ve $H/d=10$ için hız profilleri



Şekil 6.46 d=0,010 m ve H/d=10 için türbülans kinetik enejisi profilleri

6.1.2.6. d=0,010 m, H/d=10 için Nusselt sayısı

Şekil 6.46, d=0.010 m küreler ile H/d=10 paket yatak geometrisi için elde edilen deneysel ile OpenFOAM sonuçlarını göstermektedir. Genel olarak büyük farklılıkların olmadığı görülmektedir.

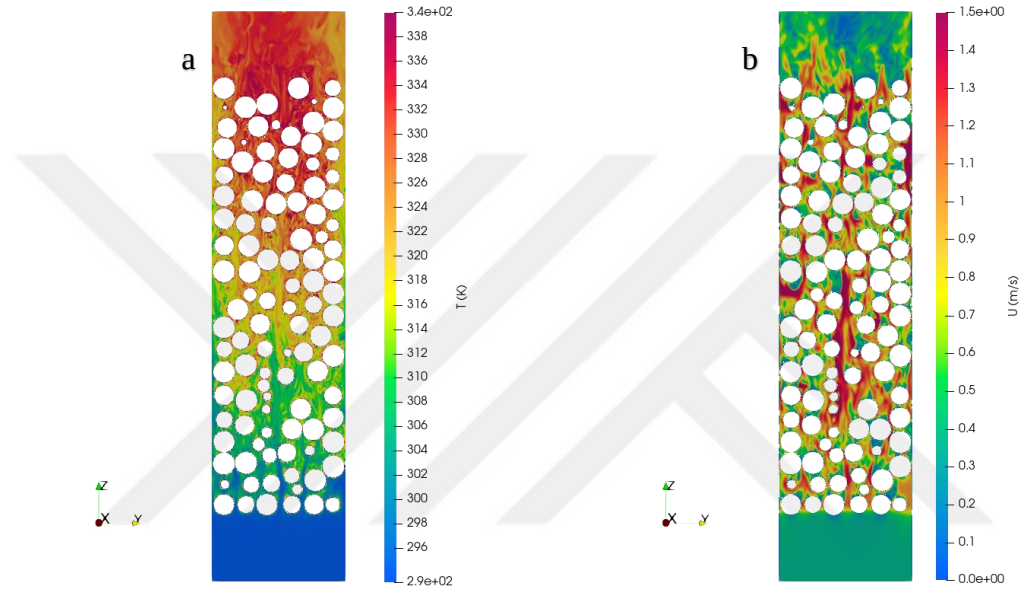


Şekil 6.47 d=0,010 m ve H/d=10 m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akışı için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri

6.1.2.7. $d=0,010$ m, $H/d=20$ için laminar akış durumu ($Re_d=50$)

Sıcaklık ve hız konturları

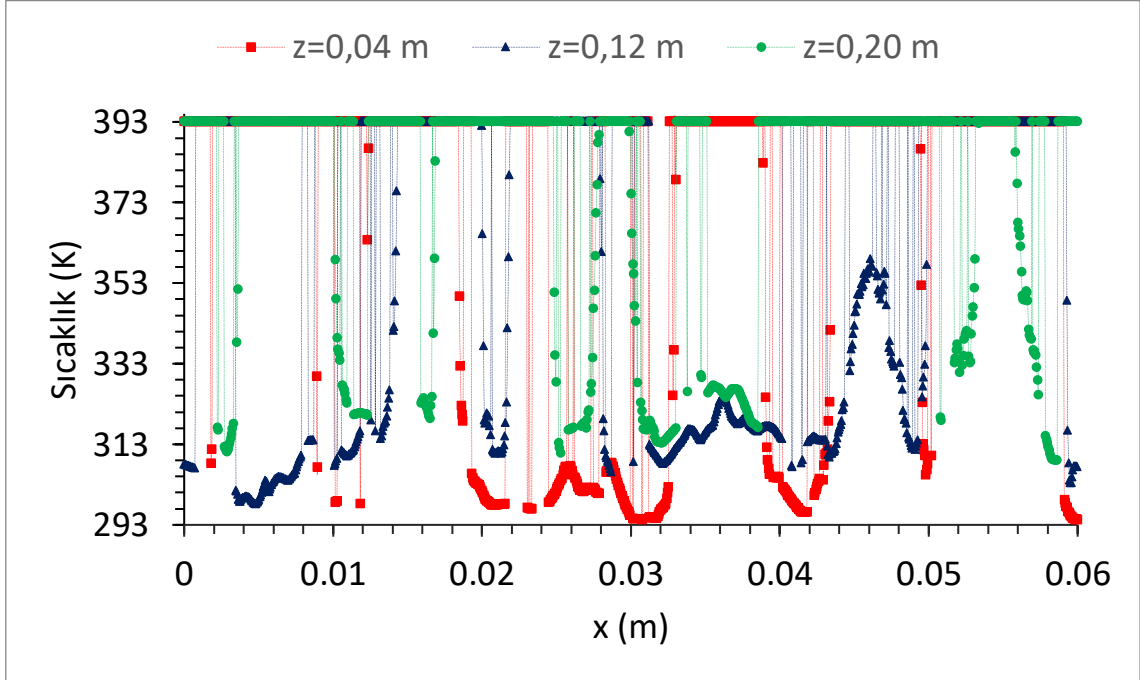
$Re_d=50$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, $H/d=20$ geometrisi için Şekil 6.48’de verilmiştir. Şekil 6.48a’da akış alanının artmasıyla sıcaklığın duvarlardan iç bölgelere doğru arttığı görülmektedir. Hız dağılımı konturu, paket yatak geometrisi için Şekil 6.48b’de verilmiştir. Hız, geometrinin düzensiz yapısından dolayı artarak yukarı bölgelere doğru ilerlediği görülmektedir.



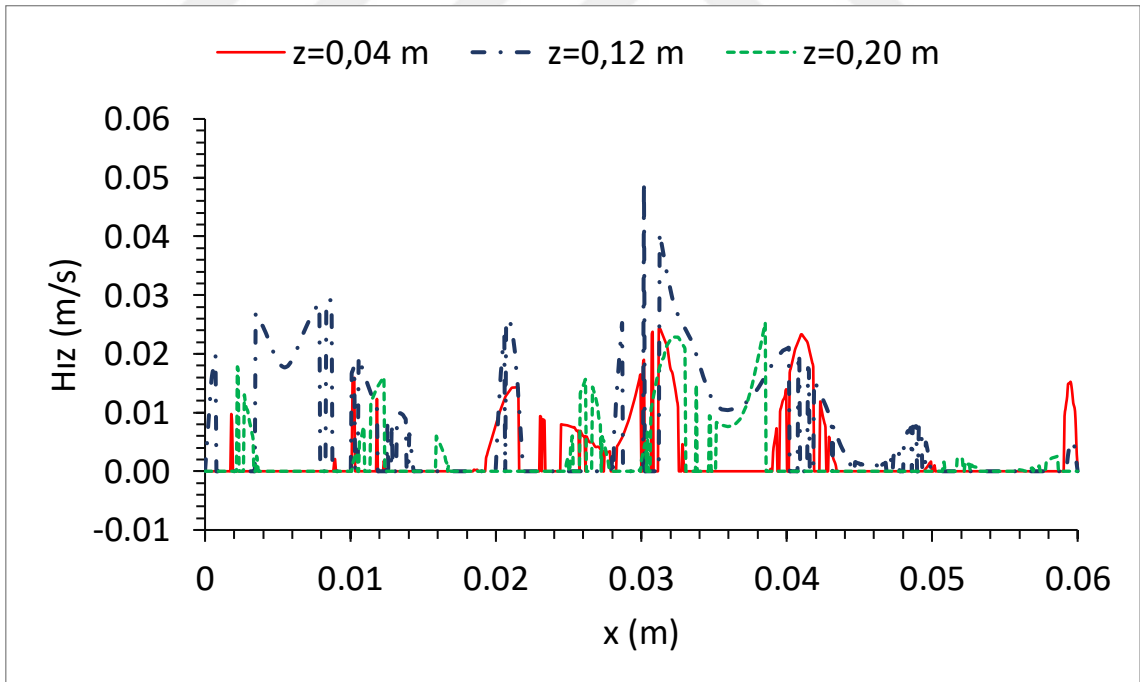
Şekil 6.48 a) $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için hız alanı şekli

$Re_d=50$ zamana bağlı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları Şekil 6.49-6.51’de gösterilmektedir. Şekillerde $z = 0,04$ m (kürelerin giriş bölgesi), $z = 0,12$ m (kürelerin orta bölgesi) ve $z = 0,20$ m (kürelerin üst bölgesi) yükseklikleri ve yatay ekseninde geometrinin merkezinden alınan çizgiyi temsil etmektedir. Şekil 6.49’da sıcaklık, $z5$ bölgesinde geometrinin orta kısımları sayılabilecek bölgelerde ortaya çıkmakta, $z10$ bölgesinde sıcaklık 353 K’ye kadar çıktığı görülmekte ve kürelerin üst bölgesi olan $z15$ ’te noktasal olarak 353 K’nin üstüne çıktığı görülmektedir. Şekil 6.50’de hız, $z10$ bölgesinde yoğunlaştığı, diğer bölgelere göre hızın yükseldiği görülmektedir. Şekil 6.51’de, paket yatak geometrisinin içinde türbülans kinetik enerjisinin kürelerin orta bölgesinin duvar

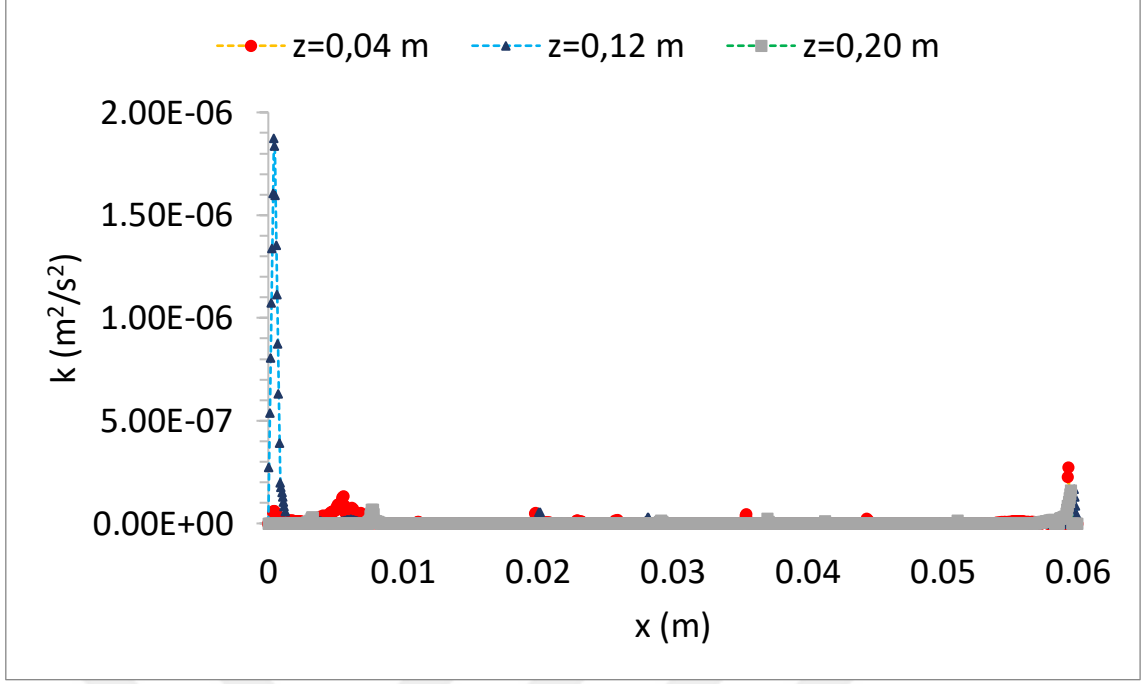
kenarında bir artışın olduğu fakat geri kalan kısımlarda yoğunluğun olmadığı görülmektedir.



Şekil 6.49 d=0,010 m ve H/d=20 için sıcaklık profilleri



Şekil 6.50 d=0,010 m ve H/d=20 için hız profilleri

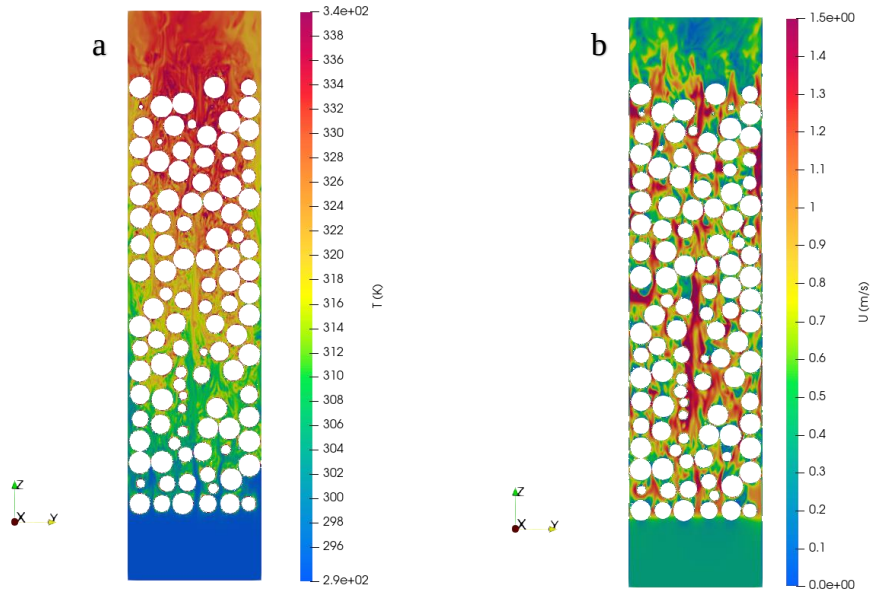


Şekil 6.51 $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için türbülans kinetik enerjisinin profilleri

6.1.2.8. $d=0,010$ m, $H/d=20$ için türbülans akış durumu ($Re_d=3094$)

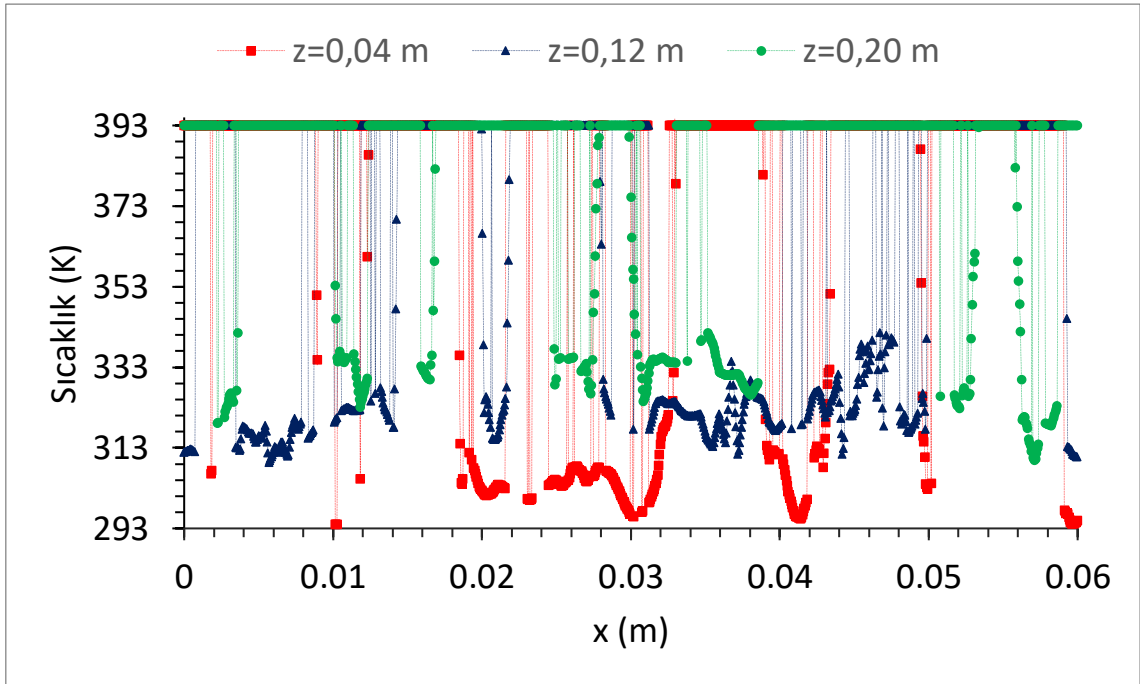
Sıcaklık ve hız konturları

$Re_d=3094$ durumundaki cebri konveksiyon akışı için, sıcaklık ve hız konturları, $H/d=20$ geometrisi için Şekil 6.52’de verilmiştir. Şekil 6.52a’da türbülansın oluşmasıyla duvar etkisi ortadan kalkmış ve sıcaklık türbülansın yoğun olduğu yerlerde artış göstermiştir. Hız dağılımı konturu, paket yatak geometrisi için Şekil 6.52b’de verilmiştir. Buradan hareketle, laminar akışta olduğu gibi akış alanının, gözenekliliğin, artmasıyla geometrinin üst bölümlerine doğru küreler ile duvar arasında kalan kısımda ve duvar kenarlarının belli bölümlerinde akış hızının arttığı görülmektedir.

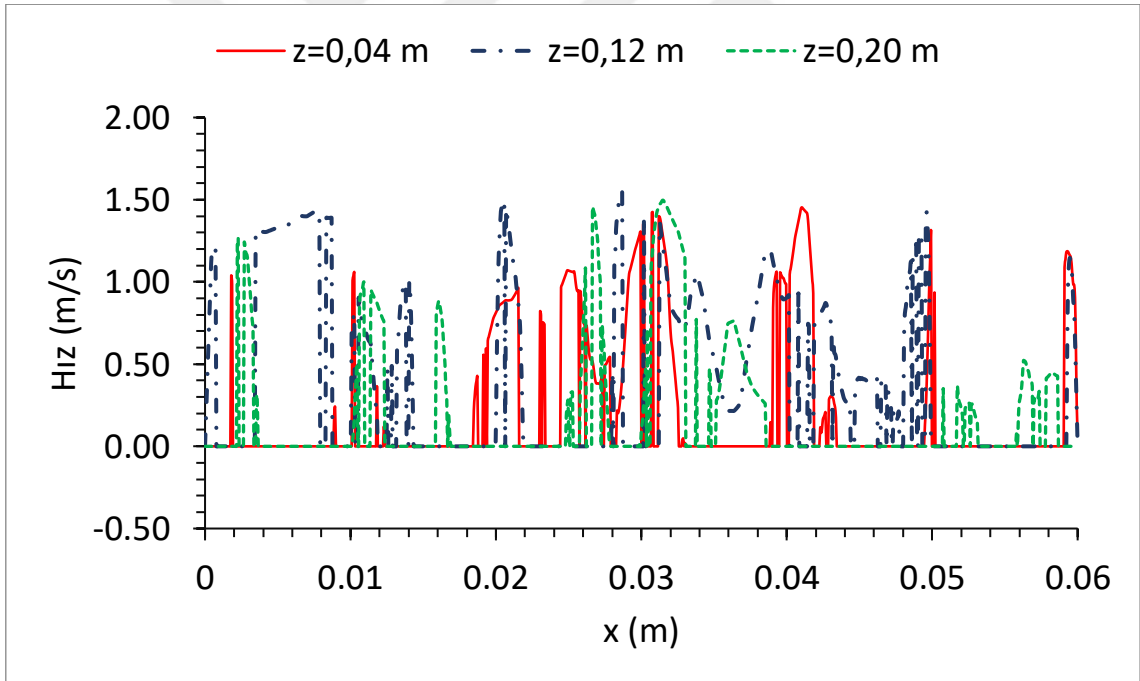


Şekil 6.52 a) $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için sıcaklık alanı şekli b) $d=0,010$ m ve $H/d=20$ için hız alanı şekli

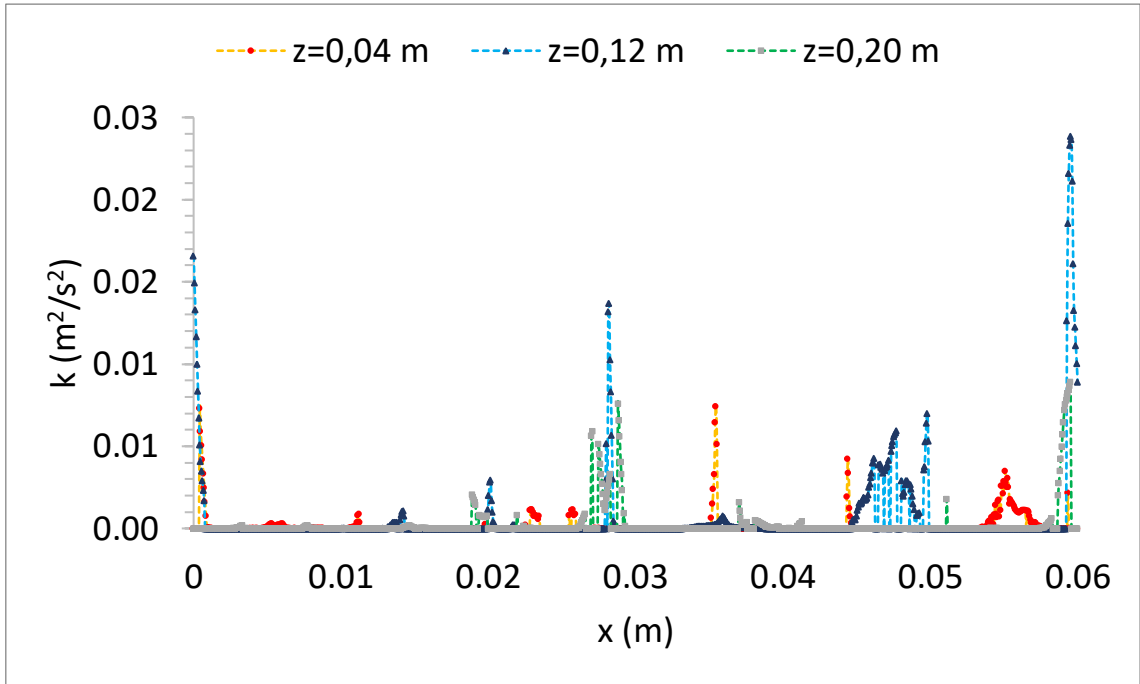
$Re_d=3094$ türbülanslı akış için, paket yatak geometrisinin küreler ekseninde, zaman ortalamalı sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları Şekil 6.53-6.55'te gösterilmektedir. Şekil 6.53'te Reynolds sayısının artmasıyla girişten çıkışa doğru sıcaklık farkı laminar akışa göre azalmıştır. Şekil 6.54'te hız, türbülansın etkisiyle arttığı, alt ve orta kısımların üst bölüme göre daha fazla yükseldiği görülmektedir. Şekil 6.55'te, türbülans kinetik enerjinin, duvar kenarları da dahil olmak üzere artışın olduğu görülmektedir.



Şekil 6.53 d=0,010 m ve H/d=20 için sıcaklık profilleri



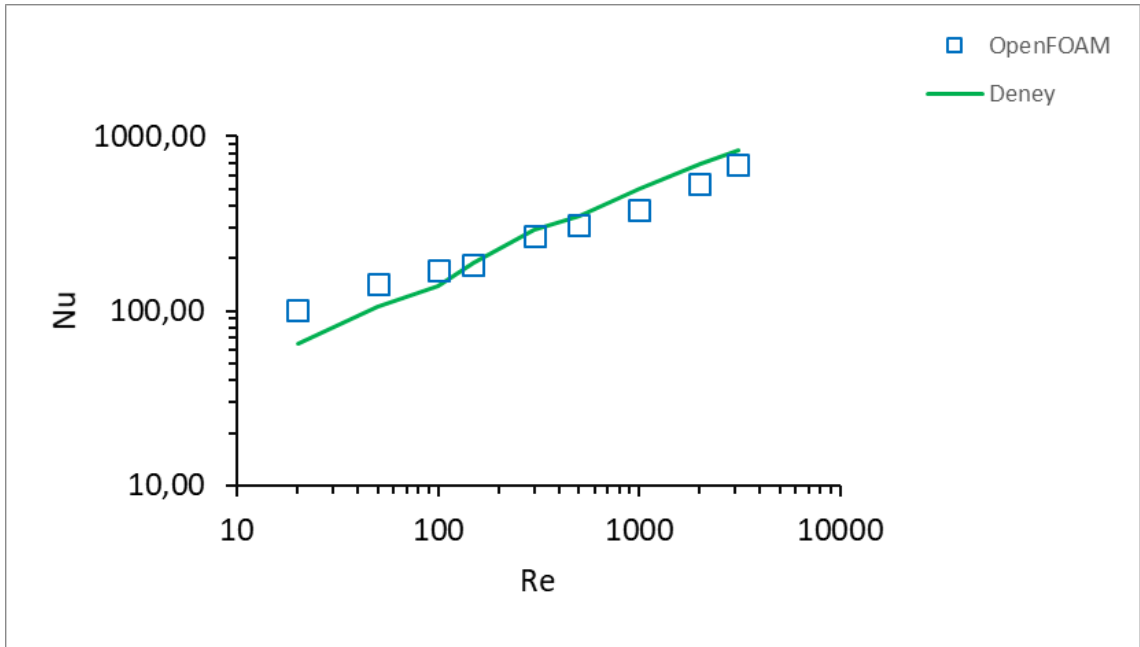
Şekil 6.54 d=0,010 m ve H/d=20 için hız profilleri



Şekil 6.55 d=0,010 m ve H/d=20 için türbülans kinetik enerji profilleri

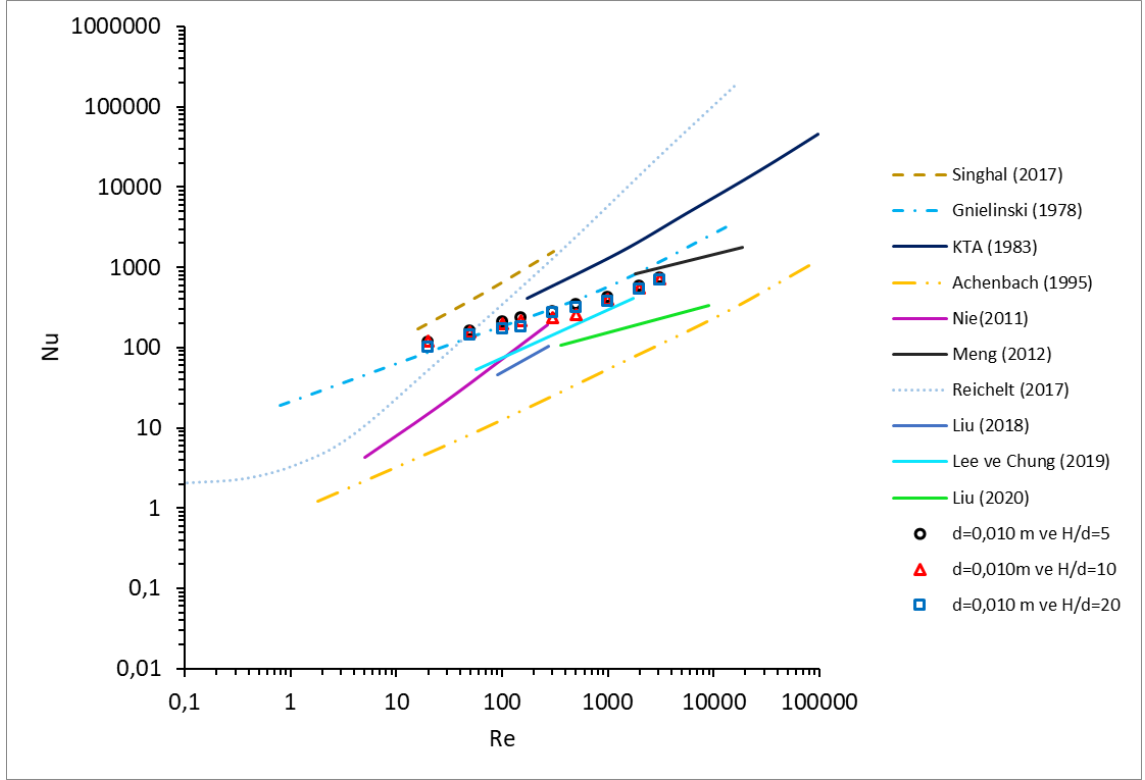
6.1.2.9. d=0,010 m, H/d=20 için Nusselt sayısı

Şekil 6.56, d=0.010 m küreler ile H/d=20 paket yatak geometrisi için elde edilen deneysel ile OpenFOAM sonuçlarını göstermektedir. H/d=10 geometrisinin sonuçları ile benzer oranda sapmaların olduğu fakat deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.56 d=0,010 m ve H/d=20 m paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için simülasyon ve deneysel sonuçlardan elde edilen Nu değerleri

OpenFAOM sayısal sonuçları, Şekil 6.57’de gösterildiği $d=0,010$ m için literatürdeki mevcut korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçların, mevcut korelasyonlar ile belli bir aralığın içinde olduğu ve bu sonuçların referans alınan deneysel sonuçlar ile yakın bir benzerlik içinde olduğu da görülmektedir.



Şekil 6.57 $d=0,010$ m ile $H/d=5$, $H/d=10$ ve $H/d=20$ paket yatak üzerinde cebri konveksiyon akış için OpenFOAM simülasyonlarından ve mevcut korelasyonlardan elde edilen Nu değerleri

7. SONUÇ

Paket çakıl yatağında, çapları 0,004 m, 0,010 m ve her küre çapı için aynı olan H/d (5,10,20) oranı ile cebri konvektif akışın OpenFOAM açık kaynak kodu ile yapılan simülasyon ve deneysel test sonuçları karşılaştırılması yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarında, her geometri için belirli eksenel konumlarda; sıcaklık, hız, türbülans kinetik enerji profilleri ve ayrıca Nusselt sayısı sonuçları verilmiştir. Sıcaklık dağılımı profillerinde görüldüğü üzere türbülansın devreye girmesiyle laminar akışta görülen duvar kenarlarında artan sıcaklık dağılımı girdapların etkisiyle geometrinin ortalarına doğru artış göstermiştir. Toplam ısı transferinin değişmediği göz önüne alınarak, türbülans akışlı simülasyonlarda beklenildiği gibi sıcaklık farkında (giriş-çıkış arası) azalma olduğu görülmüştür, bunun nedeni akışın daha hızlı olmasıdır. Sıcaklığın artmasında rol oynayan bir diğer sebep H/d oranının artmasıyla akışın daha çok küreden geçmesidir. Bu aynı zamanda akış alanı değişimleri nedeniyle hızın yükselmesine neden olmaktadır. Türbülans kinetik enerji sonuçlarına bakıldığında, Reynolds sayısına bağlı olarak türbülans kinetik enerji değerinin arttığı görülmektedir.

Simülasyon sonuçları ile beraber Reynolds sayısı verilerine göre Nusselt sayısı değerleri verilmiştir. Bu sonuçlar ışığında referans alınan deney sonuçları arasında yapılan karşılaştırmalarda büyük farklılıkların olmadığı ayrıca literatürde yapılan diğer çalışmalar ile ortak noktalar taşıdığını söyleyebiliriz. Mevcut simülasyon sonuçları, paket bir çakıl yatağında, yüksek Prandtl sayısına sahip cebri konvektif akış durumunda ısı transfer özellikleri araştırılırken kullanılacak uygun bir yaklaşımın belirlenmesine ve yapılacak olan benzer çalışmalara katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdol-Hamid, K. S., Carlson, J., & Rumsey, C. L. (2016). Verification and validation of the k-KL turbulence model in FUN3D and CFL3D codes. *46th AIAA Fluid Dynamics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3941>
- Achenbach, E. (1995). Heat and flow characteristics of packed beds. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10(1), 17-27. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(94\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0894-1777(94)00077-1)
- ANSYS Fluent Inc. (2006). *Fluent 6.3 User's Manual*.
- Bejan, A. (2013). Convection heat transfer. <https://doi.org/10.1002/9781118671627>
- Blazek, J. (2015). *Computational fluid dynamics: Principles and applications*. Butterworth-Heinemann.
- CFD Flow Engineering. (2023). <https://cfdflowengineering.com/scope-of-cfd-modeling-career-and-job-opportunities/>
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications*.
- Dafa'Alla, A., Juntasaro, E., & Gibson, M. (1996). Calculation of oscillating boundary layers with the q- ζ turbulence model. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, 141-150. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-82463-9.50020-4>
- Davidson, P. A. (2016). *Turbulence - An Introduction for Scientists and Engineers* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Davidson, L. (1997). *An introduction to turbulence models*.
- Davidson, L. (2006). *Evaluation of the SST-SAS model: channel flow, asymmetric diffuser and axi-symmetric hill*. In *European Conference on Computational Fluid Dynamics* (p. 20).
- Fenech, E., & Tobias, C. (1960). Mass transfer by free convection at horizontal electrodes. *Electrochimica Acta*, 2(4), 311-325. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(60\)80027-8](https://doi.org/10.1016/0013-4686(60)80027-8)
- Gallego Marcos, I. (2013). *Thermal Mixing CHT Simulations with OpenFOAM: URANS and LES*.
- Gnielinski, V. (1978). Gleichungen zur Berechnung des Wärmeübergangs in querdurchströmten einzelnen Rohrreihen und Rohrbündeln. *Forschung im Ingenieurwesen*, 44(1), 15-25. <https://doi.org/10.1007/bf02560750>
- Gochfeld, M. (2022). Information needs, approaches, and case studies in human health risk communication. *Risk Analysis*, 42(11), 2376-2399. <https://doi.org/10.1111/risa.14006>
- Greenshields, C. J. (2015). *OpenFOAM User Guide*. OpenFOAM Foundation Ltd. <https://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf>
- Greenspan, E. (2021). Introduction to The Encyclopedia of nuclear energy. *Encyclopedia of Nuclear Energy*, ix-xv. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819725-7.02001-8>
- IEA. (2020). *OECD share of total energy supply by source*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/oecd-share-of-total-energy-supply-by-source-2020>, IEA. Licence: CC BY 4.0.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). Wiley.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) & International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG). (1992). *The Chernobyl accident: Updating of INSAG-1: INSAG-7: a report*.

- Krivit, S. B., & Lehr, J. H. (2011). *Nuclear energy encyclopedia: science, technology, and applications*. John Wiley & Sons.
- Lam, C. K., & Bremhorst, K. (1981). *A modified form of the k- ϵ model for predicting wall turbulence*.
- Langtry, R. B., & Menter, F. R. (2009). Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes. *AIAA Journal*, 47(12), 2894-2906. <https://doi.org/10.2514/1.42362>
- Launder, B. E., Reece, G. J., & Rodi, W. (1975). Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of Fluid Mechanics*, 68(3), 537-566. <https://doi.org/10.1017/s0022112075001814>
- Launder, B., & Sharma, B. (1974). Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1(2), 131-137. [https://doi.org/10.1016/0094-4548\(74\)90150-7](https://doi.org/10.1016/0094-4548(74)90150-7)
- Lee, D., & Chung, B. (2019). Variations of forced convection heat transfer of packed beds according to the heated sphere position and bed height. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 103, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.02.004>
- Lien, F., Chen, W., & Leschziner, M. (1996). Low-Reynolds-Number eddy-viscosity modelling based on non-linear stress-strain/Vorticity relations. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, 91-100. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-82463-9.50015-0>
- Lien, F., & Kalitzin, G. (2001). Computations of transonic flow with the v2-F turbulence model. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 22(1), 53-61. [https://doi.org/10.1016/s0142-727x\(00\)00073-4](https://doi.org/10.1016/s0142-727x(00)00073-4)
- Lien, F., & Leschziner, M. A. (1993). A pressure-velocity solution strategy for compressible flow and its application to shock/boundary-layer interaction using second-moment turbulence closure. *Journal of Fluids Engineering*, 115(4), 717-725. <https://doi.org/10.1115/1.2910204>
- Liu, L., Deng, J., Zhang, D., Wang, C., Qiu, S., & Su, G. (2020). Experimental analysis of flow and convective heat transfer in the water-cooled packed pebble bed nuclear reactor core. *Progress in Nuclear Energy*, 122, 103298. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103298>
- Liu, L., Zhang, D., Li, L., Yang, Y., Wang, C., Qiu, S., & Su, G. (2018). Experimental investigation of flow and convective heat transfer on a high-prandtl-number fluid through the nuclear reactor pebble bed core. *Applied Thermal Engineering*, 145, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.017>
- Meng, X., Sun, Z., & Xu, G. (2012). Single-phase convection heat transfer characteristics of pebble-bed channels with internal heat generation. *Nuclear Engineering and Design*, 252, 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.05.041>
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). The finite volume method in computational fluid dynamics. *Fluid Mechanics and Its Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>
- Nie, X., Evitts, R., Besant, R., & Bolster, J. (2011). A New Technique to determine convection coefficients with flow through ParticleBeds. *Journal of Heat Transfer*, 133(4). <https://doi.org/10.1115/1.4002945>

- Nuclear Safety Standard Commission (KTA). (1983). KTA 3102.2 Reactor Core Design of High-Temperature Gas-Cooled Reactors. *Part 2: Heat Transfer in Spherical Fuel Elements*.
- OpenCFD, O. (2009). *The open source CFD toolbox. User Guide*. OpenCFD Ltd.
- Pioro, I. (2022). *Handbook of generation IV nuclear reactors: A guidebook*. Woodhead Publishing.
- Reichelt, E., Jahn, M., & Lange, R. (2017). Derivation and application of a generalized correlation for mass transfer in packed beds. *Chemie Ingenieur Technik*, 89(4), 390-400. <https://doi.org/10.1002/cite.201600045>
- SALOME Platform. (2012). *Salome Platformu Belgeleri*. Erişim: 11 Haziran 2023. <https://docs.salome-platform.org>.
- Saric, S., Ennemoser, A., Basara, B., Petutschnig, H., Irrenfried, C., Steiner, H., & Brenn, G. (2017). Improved modeling of near-wall heat transport for cooling of electric and hybrid powertrain components by high Prandtl number flow. *SAE International Journal of Engines*, 10(3), 778-784. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0621>
- Shih, T. H. (1990). *An improved [K-epsilon] model for near-wall turbulence and comparison with direct numerical simulation*.
- Shih, T., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new K- ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227-238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-t](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-t)
- Singhal, A., Cloete, S., Radl, S., Quinta-Ferreira, R., & Amini, S. (2017). Heat transfer to a gas from densely packed beds of monodisperse spherical particles. *Chemical Engineering Journal*, 314, 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.124>
- Spalart, P., & Allmaras, S. (1992). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. <https://doi.org/10.2514/6.1992-439>
- Speziale, C. G., Abid, R., & Anderson, E. C. (1992). Critical evaluation of two-equation models for near-wall turbulence. *AIAA Journal*, 30(2), 324-331. <https://doi.org/10.2514/3.10922>
- Speziale, C. G., Sarkar, S., & Gatski, T. B. (1991). Modelling the pressure-strain correlation of turbulence: An invariant dynamical systems approach. *Journal of Fluid Mechanics*, 227, 245-272. <https://doi.org/10.1017/s0022112091000101>
- Tennekes, H., & Lumley, J. L. (2018). *A first course in turbulence*. MIT Press.
- Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C., & Tao, Y. (2023). *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Elsevier.
- Tvehlov, y. (2002). *Energy, electricity, and nuclear power estimates for the period up to 2020; Nuclear power reactors in the world*. Atomnaya Ehnergiya.
- U.S. President's Commission on the Accident at Three Mile Island. (1979). Report of the President's Commission on the accident at three mile island. The need for change: The legacy of TMI. <https://doi.org/10.2172/6986994>
- US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee. (2002). A technology roadmap for generation IV nuclear energy systems. <https://doi.org/10.2172/859029>
- US Energy Information Administration. (2011). Annual energy outlook 2011 with projections to 2035. <https://doi.org/10.2172/1019039>

- Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H., & Fureby, C. (1998). A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics*, 12(6), 620-631. <https://doi.org/10.1063/1.168744>
- Wilcox, D. C. (1994). *Turbulence modeling for CFD*.
- Wilson, K. G. (1974). Confinement of quarks. *Physical Review D*, 10(8), 2445-2459. <https://doi.org/10.1103/physrevd.10.2445>
- World Nuclear Association. (2016). *Chernobyl Accident-1986*.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Eyyüb POLAT

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Kolukısa Anadolu Lisesi, 2014

Lisans : Sinop Üniversitesi, 2019

Yüksek Lisans : Sinop Üniversitesi, 2022

Mesleki Deneyim

İş Yeri : İnönü Üniversitesi Turgut Özal Tıp Merkezi Eğitim ve
Araştırma Hastanesi Nükleer Tıp Birimi - Stajyer, 2017

İş Yeri : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu- Stajyer, 2018