

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



**KENDİNDEN ISITMALI ÇAKIL YATAKLI NÜKLEER  
REAKTÖR DENEYLERİNİN OPENFOAM KODU İLE DOĞAL  
TAŞINIM ISI TRANSFER ANALİZLERİ**

**SALİH SAİD ÇATALBAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN**  
**DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİ TİFTİKÇİ**

**SİNOP – 2023**

## TEZ KABUL

**SALİH SAİD ÇATALBAŞ** tarafından hazırlanan “**KENDİNDEN ISITMALI ÇAKIL YATAKLI NÜKLEER REAKTÖR DENEYLERİNİN OPENFOAM KODU İLE DOĞAL TAŞINIM 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. CEMİL KOCAR

İmza

**Üye  
(Danışman)**

Dr. Ali TİFTİKÇİ

İmza

**Üye**

Dr. Bahram RASHİDİAN MALEKİ

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.



Salih Said ÇATALBAŞ

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# KENDİNDEN ISITMALI ÇAKIL YATAKLI NÜKLEER REAKTÖR DENEYLERİNİN OPENFOAM KODU İLE DOĞAL TAŞINIM ISI TRANSFER ANALİZLERİ

SALİH SAİD ÇATALBAŞ

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

Bu çalışmada, çakıl yatak geometrisinde doğal taşınım akışı sayısal olarak modellemek için sonlu hacim yöntemi kullanılmıştır. TÜBİTAK ve Güney Kore (NRF) ikili işbirliği projesinde yapılan çakıl yatak geometrisinde doğal taşınım deneylerinin, OpenFOAM v2112 kodu kullanılarak sayısal analizi yapılmıştır. Rastgele yerleştirilmiş kürelerden oluşan karmaşık çakıl yatak geometrisinin örgü yapısı başarıyla oluşturulmuştur. Kürelerin çapları (d) 0,004; 0,006 ve 0,01 m ve ilişkili Rayleigh sayıları sırasıyla  $5,43 \times 10^6$ ;  $1,83 \times 10^7$  ve  $8,48 \times 10^7$ 'dir. Simülasyonlarda  $H/d=5$ , 10 ve 20 çakıl yatak yükseklikleri kullanılmıştır. Çakıl yataktaki küreler için doğal taşınım akışının OpenFOAM simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak, hız dağılımlarının ve Nusselt değerlerinin iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Ek olarak, çakıl yatak geometrisindeki hız ve sıcaklık dağılımlarından, kürelerin yakınındaki düşük hız alanlarında büyük bir sıcaklık artışı ve orta ve üst yüksekliklerde küçük bir hız artışı olduğu gösterilmiştir. Çakıl yatağı geometrisinin yüksekliğinin ve buna bağlı olarak içindeki kürelerin miktarının artmasının akışı karmaşıktırdığı ve ayrıca yerel sıcak noktalar oluşturduğu gösterilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen Nusselt Sayısı korelasyonu, OpenFOAM sonuçları ile doğrulanmıştır. Bu çalışmanın önemi, tüm çakıl yataklardaki doğal taşınım akışını değerlendirmek için sonlu hacim yöntemini kullanması ve önemli sayıda küre kullanarak simüle edilmesidir. Bu iki faktör, bu çalışmanın orijinallğine katkıda bulunmuştur.

**ANAHTAR KELİMELEER:** OpenFOAM; Sonlu hacimler yöntemi; Doğal taşınım; Çakıl yataklı reaktörler; Isı transferi; Küre çapı

Haziran 2023, 70 Sayfa

## ABSTRACT

### MSC THESIS

#### NATURAL CONVECTION HEAT TRANSFER ANALYSIS OF SELF HEATING PEBBLE BED NUCLEAR REACTOR EXPERIMENTS WITH OPENFOAM CODE

SALİH SAİD ÇATALBAŞ

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

In this study, the finite volume method was used to numerically model the natural convection flow in the pebble bed geometry. Numerical analysis of natural convection experiments in pebble bed geometry made in the bilateral cooperation project of TÜBİTAK and South Korea (NRF) was performed using the OpenFOAM v2112 code. The mesh structure of the complex pebble bed geometry consisting of randomly placed spheres was successfully created. The diameters ( $d$ ) of the spheres are 0,004; 0,006 and 0,01 m, and their associated Rayleigh numbers are  $5,43 \times 10^6$ ;  $1,83 \times 10^7$  and  $8,48 \times 10^7$ , respectively. Pebble bed heights of  $H/d=5$ , 10 and 20 were used in the simulations. By comparing the OpenFOAM simulation results of the natural convection flow for the spheres in the pebble bed with the experimental results, it was shown that the velocity distributions and Nusselt values are in good agreement. In addition, it has been shown from the velocity and temperature distributions in the pebble bed geometry that there is a large temperature increase in the low velocity areas near the spheres and a small velocity increase in the middle and upper elevations. It has been shown that increasing the height of the pebble bed geometry and the consequent increase in the amount of spheres in it complicates the flow and also creates local hot spots. The Nusselt number correlation obtained as a result of the experimental study was confirmed by the OpenFOAM results. The significance of this study is that it uses the finite volume method to evaluate the natural convection flow in all pebble beds and simulates it using a significant number of spheres. These two factors contribute to the originality of this work.

**KEYWORDS:** OpenFOAM; Finite volume method; Natural convection; Pebble bed reactors; Heat transfer; Sphere diameter

June 2023, 70 Page

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile bana destek olan, her zaman doğru yönü gösteren değerli danışman hocam sayın Dr. Ali TİFTİKÇİ'ye sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Cemil KOCAR'a ve Dr. Bahram RASHİDİAN MALEKİ'ye teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme de 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 ederiz.

Salih Said ÇATALBAŞ

## İÇİNDEKİLER

|                                                         | Sayfa |
|---------------------------------------------------------|-------|
| TEZ KABUL .....                                         | ii    |
| ETİK BEYANI.....                                        | iii   |
| ÖZET .....                                              | iv    |
| ABSTRACT.....                                           | v     |
| TEŞEKKÜR .....                                          | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                       | vii   |
| TABLolar DİZİNİ .....                                   | ix    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                   | xi    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                    | xiv   |
| 1. GİRİŞ .....                                          | 1     |
| 2. GENEL BİLGİLER.....                                  | 4     |
| 2.1. Çakıl Yatak ile İlgili Yapılan Çalışmalar .....    | 5     |
| 2.2. Akışkanlar Mekaniği.....                           | 5     |
| 2.3. Akışkanların Sınıflandırılması.....                | 6     |
| 2.3.1. Viskoz ve viskoz olmayan akışlar .....           | 6     |
| 2.3.2. İç ve dış akışlar .....                          | 6     |
| 2.3.3. Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar ..... | 7     |
| 2.3.4. Doğal ve zorlanmış akışlar .....                 | 7     |
| 2.3.5. Zamana bağlı ve zamandan bağımsız akışlar .....  | 7     |
| 2.3.6. Laminar ve türbülanslı akışlar .....             | 7     |
| 2.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.....               | 9     |
| 2.5. Matematiksel Arka Plan.....                        | 9     |
| 2.5.1. Navier-Stokes denklemleri .....                  | 10    |
| 2.5.2. Korunum denklemleri .....                        | 11    |
| 2.5.2.1. Kütlenin korunumu .....                        | 11    |
| 2.5.2.2. Momentumun korunumu .....                      | 12    |
| 2.5.2.3. Enerjinin korunum .....                        | 13    |

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5.3. Boussinesq Yaklaşımı.....                                 | 13        |
| 2.6. Sonlu Hacim Metodu .....                                    | 14        |
| 2.7. OpenFOAM .....                                              | 14        |
| 2.7.1. buoyantPimpleFoam çözücüsü .....                          | 17        |
| 2.7.2. Pimple algoritması .....                                  | 17        |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                                | <b>20</b> |
| 3.1. Deney Düzeneği.....                                         | 20        |
| 3.2. HAD Analizleri.....                                         | 23        |
| 3.2.1. Geometri oluşturma .....                                  | 23        |
| 3.2.2. Örgü yapısı oluşturma.....                                | 27        |
| 3.2.3. Ayırıklaştırma şemaları.....                              | 34        |
| 3.2.4. Çözüm yöntemi.....                                        | 36        |
| 3.2.5. Sınır koşulları.....                                      | 37        |
| 3.3. Örgü Bağımlılığı Analizi .....                              | 38        |
| 3.4. Veri Elde Etme ve Verileri İşleme.....                      | 41        |
| <b>4. BULGULAR.....</b>                                          | <b>42</b> |
| 4.1. Nusselt Değerlerinin Karşılaştırılması.....                 | 42        |
| 4.2. Hız ve Sıcaklık Dağılımları .....                           | 44        |
| 4.2.1. Küre çapı $d=0,01$ m için dağılımlar .....                | 44        |
| 4.2.2. Küre çapı $d=0,006$ m için dağılımlar .....               | 53        |
| 4.2.3. Küre çapı $d=0,004$ m için dağılımlar .....               | 57        |
| 4.3. Türbülans Kinetik Enerjisi ve Reynolds Stres Değerleri..... | 63        |
| <b>5. SONUÇ .....</b>                                            | <b>66</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                           | <b>67</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                            | <b>70</b> |

## TABLÖLAR DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 3.1 20 °C’de $CuSO_4 - H_2SO_4$ sıvısının fiziksel özellikleri .....                                                                 | 21 |
| Tablo 3.2 Deneyde kullanılan geometriler için küre sayıları (Ahn vd., 2022) .....                                                          | 22 |
| Tablo 3.3 Deneyde kullanılan geometrilerin porozite değerleri (Ahn vd., 2022) .....                                                        | 22 |
| Tablo 3.4 Deney sonucunda elde edilen Nusselt sayıları (Ahn vd., 2022) .....                                                               | 22 |
| Tablo 3.5 Geometrilere kullanılan sınır koşulları .....                                                                                    | 38 |
| Tablo 3.6 Geometrilere ait hücre sayıları .....                                                                                            | 39 |
| Tablo 4.1 $d=0,004$ m küre çapındaki geometrilerin Nusselt Sayısı cinsinden<br>karşılaştırmaları (Ahn vd., 2022; Tiftikçi vd., 2023) ..... | 42 |
| Tablo 4.2 $d=0,006$ m küre çapındaki geometrilerin Nusselt Sayısı cinsinden<br>karşılaştırmaları (Ahn vd., 2022; Tiftikçi vd., 2023) ..... | 43 |
| Tablo 4.3 $d=0,01$ m küre çapındaki geometrilerin Nusselt Sayısı cinsinden<br>karşılaştırmaları (Ahn vd., 2022; Tiftikçi vd., 2023) .....  | 43 |
| Tablo 4.4 $d=10$ mm ve $H/d=5$ çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin<br>ortalama ve tepe değerleri .....               | 63 |
| Tablo 4.5 $d=10$ mm ve $H/d=10$ çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin<br>ortalama ve tepe değerleri .....              | 63 |
| Tablo 4.6 $d=10$ mm ve $H/d=20$ çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin<br>ortalama ve tepe değerleri .....              | 64 |
| Tablo 4.7 $d=6$ mm ve $H/d=5$ çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin<br>ortalama ve tepe değerleri .....                | 64 |
| Tablo 4.8 $d=6$ mm ve $H/d=10$ çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin<br>ortalama ve tepe değerleri .....               | 64 |
| Tablo 4.9 $d=6$ mm ve $H/d=20$ çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin<br>ortalama ve tepe değerleri .....               | 64 |
| Tablo 4.10 $d=4$ mm ve $H/d=5$ çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin<br>ortalama ve tepe değerleri .....               | 65 |
| Tablo 4.11 $d=4$ mm ve $H/d=10$ çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin<br>ortalama ve tepe değerleri .....              | 65 |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 4.12 $d=4$ mm ve $H/d=20$ çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin<br>ortalama ve tepe değerleri ..... | 65 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 Dünya genelinde elektrik üretim kaynaklarının yüzdelik grafiği (IEA, 2019)..                          | 1  |
| Şekil 1.2 Çalışır durumdaki nükleer güç reaktörlerinin tipleri (WNA, 2023).....                                 | 2  |
| Şekil 2.1 Laminer akış ve türbülanslı akışın şematik gösterimi .....                                            | 8  |
| Şekil 2.2 Sonlu hacim elemanlarında kontrol hacmi (Versteeg vd., 2007). ....                                    | 11 |
| Şekil 2.3 OpenFOAM yapısına genel bakış.....                                                                    | 15 |
| Şekil 2.4 OpenFOAM dosya ağacı (OpenFOAM, 2022) .....                                                           | 16 |
| Şekil 2.5 OpenFOAM’da kullanılan PIMPLE Algoritmasının akış diyagramı (CFD<br>Direct, 2022).....                | 18 |
| Şekil 3.1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ahn vd., 2022) .....                                             | 20 |
| Şekil 3.2 Deneyde kullanılan d=6 mm yatak geometrileri (sırasıyla H/d=10 ve 20) (Ahn<br>vd., 2022).....         | 21 |
| Şekil 3.3 DEM yöntemiyle elde edilen çakıl yatak geometrisi.....                                                | 23 |
| Şekil 3.4 Temas noktası yaklaşımları a) overlaps, b) gaps, c) necks, d) bridges, e) caps<br>.....               | 24 |
| Şekil 3.5 Monte Carlo Yöntemi ile elde edilen çakıl yatak geometrisi .....                                      | 25 |
| Şekil 3.6 Bridge yöntemi kullanılmış çakıl yatak geometrisi.....                                                | 26 |
| Şekil 3.7 Temas noktasında farklı düzeltme değerleri kullanılan küreler (a) 115K, b)<br>663K hücre sayısı)..... | 27 |
| Şekil 3.8 Tetrahedral hücreler ile üretilen çakıl yatak geometrisinin kesit alanı.....                          | 28 |
| Şekil 3.9 Tetrahedral hücrelerin karmaşık yapısını gösteren kesit alanı .....                                   | 29 |
| Şekil 3.10 Örgü yapısını oluşturmak için kullanılan ilk yöntemin akış şeması.....                               | 30 |
| Şekil 3.11 SALOME ile üretilen 2B örgü yapısı .....                                                             | 31 |
| Şekil 3.12 Örgü yapısını oluşturmak için kullanılan ikinci yöntemin akış şeması.....                            | 32 |
| Şekil 3.13 snappyHexMesh yöntemine ait adımların akış şeması.....                                               | 33 |
| Şekil 3.14 snappyHexMesh yöntemiyle elde edilmiş örgü yapısının son hali .....                                  | 33 |
| Şekil 3.15 snappyHexMesh yöntemiyle elde edilen örgünün kesit alanı .....                                       | 34 |

|                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.16 Analizinde kullanılan örgülerin kesit alanı (a) 23,2M, b) 19,3M, c) 14,7M hücre sayısı).....                                                                                              | 38 |
| Şekil 3.17 Örgü bağımlılığı analizine ait hız profilleri .....                                                                                                                                       | 39 |
| Şekil 3.18 Rastgele konumlandırılmış kürelerden oluşan çakıl yatak geometrileri (a) $d=0,01$ m, b) $d=0,006$ m ve c) $0,004$ m kürelerin sırasıyla $H/d=5$ , 10 ve 20 yatak konfigürasyonları) ..... | 40 |
| Şekil 4.1 Nusselt korelasyonu (Ahn vd., 2022) ve verilerin karşılaştırılması .....                                                                                                                   | 44 |
| Şekil 4.2 $d=0,01$ m ve $H/d=5$ geometrisinin deneysel (Ahn vd., 2022) ve OpenFOAM hız profillerinin $z=0,012$ m’de karşılaştırılması .....                                                          | 45 |
| Şekil 4.3 $d=0,01$ m ve $H/d=20$ geometrisinin deneysel (Ahn vd., 2022) ve OpenFOAM hız profillerinin $z=0,012$ m’de karşılaştırılması .....                                                         | 45 |
| Şekil 4.4 $d=0,01$ m ve $H/d=10$ geometrisi için $z=0,012$ m’de hız profili .....                                                                                                                    | 46 |
| Şekil 4.5 $d=0,01$ m ve $H/d=5$ geometrisi için $z=1d$ , $3d$ ve $4d$ yüksekliğindeki hız profilleri.....                                                                                            | 47 |
| Şekil 4.6 $d=0,01$ m ve $H/d=10$ geometrisi için $z=2d$ , $5d$ ve $8d$ yüksekliğindeki hız profilleri.....                                                                                           | 47 |
| Şekil 4.7 $d=0,01$ m ve $H/d=20$ geometrisi için $z=5d$ , $10d$ ve $15d$ yüksekliğindeki hız profilleri.....                                                                                         | 48 |
| Şekil 4.8 $d=0,01$ m geometrileri için zamana göre ortalaması alınan hız kesitleri.....                                                                                                              | 49 |
| Şekil 4.9 $d=0,01$ m geometrileri için zamana göre ortalaması alınan sıcaklık kesitleri .                                                                                                            | 50 |
| Şekil 4.10 $d=0,01$ m ve $H/d=5$ geometrisi için $z=1d$ , $3d$ ve $4d$ yüksekliğinde sıcaklık profilleri.....                                                                                        | 51 |
| Şekil 4.11 $d=0,01$ m ve $H/d=10$ geometrisi için $z=2d$ , $5d$ ve $8d$ yüksekliğinde sıcaklık profilleri.....                                                                                       | 52 |
| Şekil 4.12 $d=0,01$ m ve $H/d=20$ geometrisi için $z=5d$ , $10d$ ve $15d$ yüksekliğinde sıcaklık profilleri.....                                                                                     | 52 |
| Şekil 4.13 $d=0,006$ m geometrilerinin zamana göre ortalaması alınan hız kesitleri.....                                                                                                              | 53 |
| Şekil 4.14 $d=0,006$ m geometrilerinin zamana göre ortalaması alınan sıcaklık kesitleri                                                                                                              | 54 |
| Şekil 4.15 $d=0,006$ m ve $H/d=5$ geometrisi için $z=1d$ , $3d$ ve $4d$ yüksekliğinde sıcaklık profilleri.....                                                                                       | 54 |

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.16 $d=0,006$ m ve $H/d=10$ geometrisi için $z=2d$ , $5d$ ve $8d$ yüksekliğinde sıcaklık profilleri.....                               | 55 |
| Şekil 4.17 $d=0,006$ m ve $H/d=20$ geometrisi için $z=5d$ , $10d$ ve $15d$ yüksekliğinde sıcaklık profilleri .....                            | 55 |
| Şekil 4.18 $d=0,006$ m ve $H/d=5$ geometrisi için $z=1d$ , $3d$ ve $4d$ yüksekliğinde hız profilleri.....                                     | 56 |
| Şekil 4.19 $d=0,006$ m ve $H/d=10$ geometrisi için $z=2d$ , $5d$ ve $8d$ yüksekliğinde hız profilleri.....                                    | 56 |
| Şekil 4.20 $d=0,006$ m ve $H/d=20$ geometrisi için $z=5d$ , $10d$ ve $15d$ yüksekliğinde hız profilleri.....                                  | 57 |
| Şekil 4.21 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ geometrisinin deneysel (Ahn vd., 2022) ve OpenFOAM hız profillerinin $z=0,012$ m’de karşılaştırılması ..... | 58 |
| Şekil 4.22 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ geometrisinin deneysel (Ahn vd., 2022) ve OpenFOAM hız profillerinin $z=0,012$ m’de karşılaştırılması..... | 58 |
| Şekil 4.23 $d=0,004$ m geometrileri için zamana göre ortalaması alınan hız kesitleri.....                                                     | 59 |
| Şekil 4.24 $d=0,004$ m geometrileri için zamana göre ortalaması alınan sıcaklık kesitleri .....                                               | 59 |
| Şekil 4.25 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ geometrisi için $z=1d$ , $3d$ ve $4d$ yüksekliğinde sıcaklık profilleri.....                                | 60 |
| Şekil 4.26 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ geometrisi için $z=2d$ , $5d$ ve $8d$ yüksekliğinde sıcaklık profilleri.....                               | 60 |
| Şekil 4.27 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ geometrisi için $z=5d$ , $10d$ ve $15d$ yüksekliğinde sıcaklık profilleri .....                            | 61 |
| Şekil 4.28 $d=0,004$ m ve $H/d=5$ geometrisi için $z=1d$ , $3d$ ve $4d$ yüksekliğinde hız profilleri.....                                     | 61 |
| Şekil 4.29 $d=0,004$ m ve $H/d=10$ geometrisi için $z=2d$ , $5d$ ve $8d$ yüksekliğinde hız profilleri.....                                    | 62 |
| Şekil 4.30 $d=0,004$ m ve $H/d=20$ geometrisi için $z=5d$ , $10d$ ve $15d$ yüksekliğinde hız profilleri.....                                  | 62 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| <b>Re</b>                  | : Reynolds Sayısı             |
| <b>Pr</b>                  | : Prandtl Sayısı              |
| <b>Sc</b>                  | : Schmidt Sayısı              |
| <b>Nu</b>                  | : Nusselt Sayısı              |
| <b>Ra</b>                  | : Rayleigh Sayısı             |
| <b><math>\rho</math></b>   | : Yoğunluk                    |
| <b>v</b>                   | : Hız                         |
| <b><math>\nu</math></b>    | : Kinematik viskozite         |
| <b><math>\mu</math></b>    | : Dinamik viskozite           |
| <b><math>A_c</math></b>    | : Akışkan kesit alanı         |
| <b><math>\beta</math></b>  | : Termal genleşme katsayısı   |
| <b>g</b>                   | : Yer çekimi ivmesi           |
| <b>K</b>                   | : Kinetik enerji              |
| <b><math>\alpha</math></b> | : Termal difüzyivite          |
| <b>h</b>                   | : Entalpi                     |
| <b>k</b>                   | : Termal iletkenlik katsayısı |

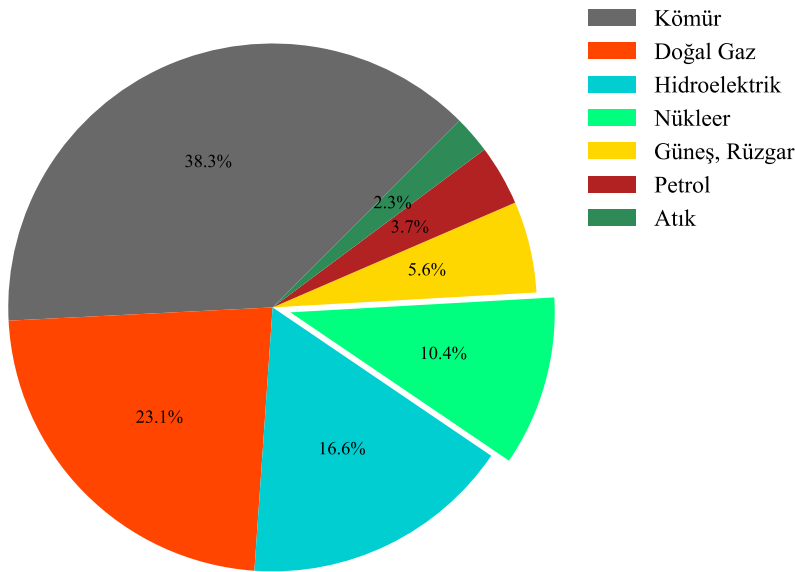
### Kısaltmalar

|               |                                                      |
|---------------|------------------------------------------------------|
| <b>IAEA</b>   | : International Atomic Energy Agency                 |
| <b>PWR</b>    | : Pressurized Water Reactor                          |
| <b>VHTR</b>   | : Very High Temperature Reactor                      |
| <b>CFD</b>    | : Computational Fluid Dynamics                       |
| <b>HAD</b>    | : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği                    |
| <b>PDE</b>    | : Partial Differential Equation                      |
| <b>FVM</b>    | : Finite Volume Method                               |
| <b>PISO</b>   | : Pressure Implicit with Splitting of Operator       |
| <b>SIMPLE</b> | : Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations |
| <b>DEM</b>    | : Discrete Element Method                            |
| <b>LBM</b>    | : Lattice Boltzmann Methods                          |

## 1. GİRİŞ

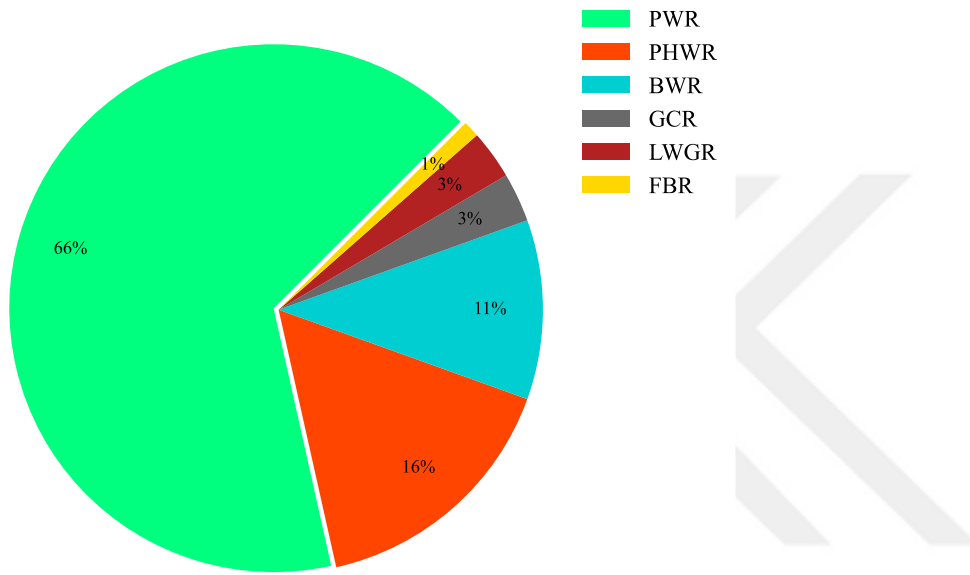
Enerji tüketimi, modern dünyada giderek artmaktadır. Ancak, artan enerji talebi, iklim değişikliği ile bağlantılı olan sera gazı emisyonlarında önemli bir artışa neden olmaktadır. Bu nedenle, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru bir yönelim olmuştur. Yenilenebilir kaynaklar ile beraber nükleer enerji de, neredeyse sıfır sera gazı emisyonları nedeniyle temiz enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bu bağlamda nükleer enerji, dünyanın enerji sorununu çözmeye ve kullanımının potansiyel faydalarını keşfetmeye yönelik enerji türlerinden biri olarak düşünülebilir (IPCC, 2018; WNA, 2022).

Dünyadaki enerjinin çoğu kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtlardan üretilmektedir. Ancak bu yakıtların kullanımı hava kirliliği ve iklim değişikliği gibi çevre sorunlarıyla ilişkilendirilmiştir. Bu nedenle, rüzgar, güneş ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması uzun süredir gündemdedir. Yenilenebilir enerjideki büyüme ile beraber, nükleer enerji dünyanın enerji ihtiyacının önemli bir parçası olmaya devam etmektedir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'na (IAEA) göre, 2023 yılında dünya çapında faaliyette olan ve Şekil 1.1'de görüldüğü gibi dünya elektriğinin yaklaşık %10'unu üreten 410 nükleer güç reaktörü bulunmaktadır. Bu reaktörlerin çoğu ABD, Fransa ve Çin'de bulunmaktadır (IEA, 2019; WNA, 2023).



Şekil 1.1 Dünya genelinde elektrik üretim kaynaklarının yüzdelik grafiği (IEA, 2019)

Konvansiyonel nükleer güç santralleri Şekil 1.2’de gösterildiği gibi genel olarak iki türdür: Basınçlı Su Reaktörleri (PWR’ler) ve Kaynar Su Reaktörleri (BWR’ler). PWR’ler, dünyadaki nükleer reaktörlerin yaklaşık %66’sını oluşturan en yaygın nükleer reaktör türüdür. Nükleer enerji temiz bir enerji kaynağı olarak nitelendirilirken, güvenlik ve radyoaktif atıkların bertarafı konusundaki endişeler nedeniyle kullanımı tartışmalı bir konu olmuştur. Bunun genel sebebi Çernobil ve Fukuşima-Daichii kazalarıdır (WNA, 2023; UNSCEAR, 2013).



Şekil 1.2 Çalışır durumdaki nükleer güç reaktörlerinin tipleri (WNA, 2023)

Çernobil ve Fukushima nükleer kazaları, nükleer enerjinin güvenliği konusunda dünya genelinde endişeye sebep olmaktadır. Bu kazalar, nükleer santrallerin tasarımında, işletmesinde ve atık yönetiminde daha fazla dikkat ve güvenlik tedbirlerinin alınması gerekliliğini vurgulamıştır. Bu kazaların ardından nükleer güç santrallerinde pasif güvenlik sistemleri Gen III ve Gen III+ ile gündeme gelmiştir. Pasif güvenlik sistemleriyle beraber nükleer güç santralleri daha güvenli hale gelmiştir (WNA, 2021). Temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları aranmaya devam edilirken, nükleer endüstri de güvenlik, ekonomi, atık yönetimi ve nükleer silahsızlanma ile ilgili endişeler ile beraber, artan enerji talebini karşılayabilecek yeni ve gelişmiş reaktör tasarımları araştırılmıştır. Yeni nesil nükleer reaktör tasarımlarının seçimi, güvenlik, maliyet, atık yönetimi ve sürdürülebilirlik dahil olmak üzere çeşitli kriterlere dayanmaktadır. IAEA, yeni reaktör tasarımlarının bu kriterleri karşılamasını sağlamak için pasif güvenlik özelliklerinin, basitleştirilmiş tasarımların ve gelişmiş güvenlik önlemlerinin kullanımı dahil olmak

üzere bir dizi kılavuz geliştirmiştir. Yeni nesil nükleer reaktörler, mevcut reaktörlerden daha verimli ve daha güvenli olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu reaktörlerin en önemli özelliklerinden biri, nükleer yakıtı daha verimli kullanarak atık miktarının azalması ve enerji veriminin artmasıdır. Ek olarak, bu reaktörlerin çoğu, doğası gereği daha güvenli olacak şekilde tasarlanmış olan pasif güvenlik özellikleriyle, kazaları önlemek için aktif sistemlere veya operatör müdahalesi gerektirmeyen özelliklere sahiptir (IAEA, 2020). Yeni nesil nükleer reaktörlerin bir başka özelliği de daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmeleri, daha verimli elektrik üretimine olanak sağlamaları ve hidrojen üretimi gibi diğer uygulamalarda kullanım potansiyelleridir. Ek olarak, bazı tasarımlar geri dönüştürülmüş nükleer yakıt kullanımına olanak tanıyan, atıkları daha da azaltan ve verimliliği artıran gelişmiş yakıt döngülerini içerir (WNA, 2021; GEN IV, 2022)

VHTR tipi yeni nesil reaktörler gelişmiş pasif güvenlik sistemlerine sahiptir. Saha kararması durumunda doğal taşınım ile yakıt erimesini önleyecek şekilde kendini uzun süre soğutabilmesi önemli bir özelliğidir. Doğal taşınımda Nusselt Sayısı önemli bir parametredir. Bu çalışmada yüksek Prandtl Sayısına ve düşük Rayleigh Sayısına sahip bir akışkan için Nusselt korelasyonu üretilmiş ve sonlu hacim elemanı yöntemiyle elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörleri (Very High Temperature Reactors - VHTR), moderatör olarak grafit ve soğutucu olarak helyum kullanan yüksek sıcaklıklarda çalışan bir tür gelişmiş nükleer reaktördür. Bu reaktörler, güvenilir ve uygun maliyetli bir şekilde elektrik üretmek için kullanılır. Aynı zamanda hidrojen üretimi gibi endüstriyel işlemler için yüksek sıcaklıkta ısı üretebilmek üzere tasarlanmıştır. VHTR'ler, yüksek sıcaklık kapasiteleri, doğal güvenlik özellikleri ve artan verimlilik potansiyelleri ile karakterize edilir ve bu da onları nükleer enerjinin geleceği için çekici bir seçenek haline getirir (Yan, 2016).

Çakıl (pebble) yataklı reaktörler, çakıl adı verilen küçük, küresel yakıt elemanları kullanan bir VHTR tipidir. Bu küresel yakıtlar, uranyum ve grafit katmanlarından oluşmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklara ve basınca dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Küresel yakıt elemanları, nükleer reaksiyonlarla ısı enerjisi açığa çıkarır ve daha sonra helyum soğutucusu tarafından soğutulur. Çakıl yatağı tasarımı, diğer nükleer reaktör tasarımlarına kıyasla güvenlik ve verimlilik açısından avantajlar sunar (Yan, 2016).

VHTR'lerin ve çakıl yataklı reaktörlerin gelişimi, araştırmacıların bir moderatör olarak grafit ve bir soğutucu olarak helyum kullanımını keşfetmeye başladıkları 1950'lere kadar uzanır. Peach Bottom reaktörü olarak bilinen ilk deneysel VHTR, 1966'da Pennsylvania'da inşa edilmiştir. Bu reaktör hem elektrik hem de yüksek sıcaklıkta ısı üretmek için tasarlanmıştır, ancak ekonomik ve düzenleyici faktörler nedeniyle 1974'te hizmet dışı bırakılmıştır. VHTR'ler için çakıl yatağı tasarımı ilk olarak 1960'larda önerilmiştir ve 1980'lerde ve 1990'larda Almanya'da daha da geliştirilmiştir. THTR-300 olarak bilinen Alman prototipi, teknik ve ekonomik sorunlar nedeniyle 1989'da hizmet dışı bırakılmadan önce birkaç yıl başarıyla çalışmıştır. O zamandan beri, VHTR'lerin ve çakıl yataklı reaktörlerin araştırma ve geliştirmeleri Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve Güney Afrika da dahil olmak üzere birçok ülkede devam etmiştir. Son yıllarda, endüstriyel prosesler için hem elektrik hem de yüksek sıcaklıkta ısı üretme potansiyeli ve doğal güvenlik özellikleri nedeniyle VHTR teknolojisine ilgi yeniden artmıştır (Pioro, 2016; Yan, 2016).

VHTR'ler ve çakıl yataklı reaktörlerle ilgili çeşitli zorluklar da vardır. Bu reaktörlerin yüksek sıcaklık ve yüksek basınç ortamı, malzeme bilimi ve mühendisliği açısından teknik zorluklar sunar. VHTR'leri ve çakıl yataklı reaktörleri geliştirme ve dağıtma

maliyeti de önemli bir faktördür çünkü bu reaktörler şu anda geleneksel su soğutmalı reaktörlerden daha pahalıdır (WNA, 2021).

## **2.1. Çakıl Yatak ile İlgili Yapılan Çalışmalar**

Çakıl yataklı nükleer reaktörlerde kaza durumunda sistemde bulunan akışkanın göstereceği ısı transferi kabiliyeti oldukça önemlidir. Bu sebeple birçok çalışma da çakıl yataklı nükleer reaktörlerin kaza durumu davranışlarını incelenmiştir (Chen vd., 2020). Ancak bu çalışmalar genel olarak cebri taşınımı konu almaktadır ve doğal taşınım durumu yeterince incelenmemiştir (Lee vd., 2016; Liu vd., 2020).

Ancak doğal taşınımı araştıran, yalnızca bir kürenin ve sistemdeki bütün kürelerin önceden ısıtıldığı durumlar için ısı transferi deneylerinin yapıldığı ve korelasyon önerilen çalışmalar mevcuttur (Kim vd., 2010). Literatürde yüksek Prandtl Sayısı ve düşük Rayleigh Sayısına sahip akışlar için kapsayıcı bir korelasyon bulunmamaktadır. Bu çalışmada bu korelasyon deneysel olarak üretilmiş ve hem Sonlu Hacim Yöntemi (Finite Volume Method - FVM) ile hem de Lattice-Boltzmann Yöntemi (Lattice-Boltzmann Method - LBM) ile desteklenmiştir.

## **2.2. Akışkanlar Mekaniği**

Akışkan dinamiği, akışkan hareketini ve özelliklerini inceleyen fizik dalıdır. Akışkanlar gazlar, sıvılar veya plazmalar olabilir ve uygulanan kuvvetler altında akma ve deforme olma yetenekleri ile karakterize edilirler. Akışkanlar dinamiği çalışması, hava durumu modellerinden ve okyanus akıntılarından uçak ve gemilerin tasarımına kadar birçok doğal ve beşeri fenomeni anlamak için kullanılmaktadır. Akışkanların hareketi, korunum denklemleri tarafından yönetilir. Bu denklemler, hareket halindeki bir sıvının kütesinin, momentumunun ve enerjisinin korunumunu tanımlar. Ancak, belirli bir akış problemi için Navier-Stokes denklemlerini çözmek, genellikle karmaşıktır ve hesaplama açısından zordur. Bu nedenle, sayısal yöntemlerin kullanıldığı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılması gerekmektedir (Munson vd., 2013; Çengel vd., 2018).

Akışkanlar dinamiği, akışkan statikliği ve akışkan kinematikliği olmak üzere iki ana kola ayrılabilir. Akışkan statikliği, durgun akışkanların incelenmesiyle ilgilenirken, akışkan kinematikliği, harekete neden olan kuvvetleri dikkate almadan akışkanların hareketini inceler (Çengel vd., 2018).

Akışkanlar dinamiğinin çeşitli alanlarda birçok pratik uygulaması vardır. Havacılık ve uzay mühendisliğinde, uçakların ve roketlerin şekil ve tahrik sistemlerini tasarlamak ve optimize etmek için kullanılır. İnşaat mühendisliğinde, barajlar, köprüler ve su temin sistemleri gibi hidrolik yapıları tasarlamak ve analiz etmek için kullanılır. Makine mühendisliğinde, motorları, türbinleri ve pompaları tasarlamak ve optimize etmek için akışkanlar dinamiği kullanılır. Okyanus akıntılarını, bunların iklim ve deniz ekosistemleri üzerindeki etkilerini incelemek için akışkanlar dinamiği kullanılır (Munson vd., 2013).

### **2.3. Akışkanların Sınıflandırılması**

Akışların durgun haldeki ve hareketli durumdaki davranışlarıyla ve sınırlarındaki diğer akışkanlar ve katılarla etkileşimleri ile ilgilenen bir bilim dalıdır. Çoğu akış problemi birbirinden farklı özelliklere sahip olduğundan dolayı akışkanlar belirli gruplar halinde incelenmek için özelliklerine göre kategorize edilmiştir (Pritchard vd., 2011; Çengel vd., 2018).

#### **2.3.1. Viskoz ve viskoz olmayan akışlar**

İki akışkan tabakasının birbirine bağlı hareketi sırasında aralarında bir sürtünme kuvveti oluşur ve diğerine göre daha yavaş hareket eden tabaka, hızlı olan tabakayı yavaşlatma eğilimindedir. Akışa karşı gerçekleşen bu iç direnç, akışkanın iç yapışkanlığının bir ifadesi olan viskozite ile tanımlanmaktadır. Sıvılarda moleküller arasındaki çekim kuvvetleri, gazlarda ise moleküllerin çarpışmaları viskoziteyi oluşturur. Her akışkan bir viskoziteye sahiptir. Bu sebeple bütün akışlarda bir seviyeye kadar viskoz etkilerden bahsedilebilir. Viskoz akışlar sürtünmenin önemli olduğu akışlardır. Uygulamada incelenen birçok akışta viskoz kuvvetlerin, atalet ve basınç kuvvetlerine göre ihmal edilecek kadar küçük kaldığı bölgeler vardır. Bu gibi akış bölgelerinde, viskoz terimlerin ihmali sonuçların doğruluğunu önemli bir kayba uğratmadan analizini bir hayli kolaylaştırır (Çengel vd., 2018).

#### **2.3.2. İç ve dış akışlar**

Akışkanın sınırları belirli bir kanalın içinden veya yüzeyinden akmaya zorlanmasına göre iç ya da dış akışlar olarak adlandırılmaktadır. Akışkanların plaka, tel veya boru gibi bir yüzeyin üzerinden bir sınır olmaksızın akması dış akış olarak adlandırılırken, akışkan katı yüzeyler ile sınırlandırılmış ise yani akış bir kanal veya boru içerisinde gerçekleşiyorsa

bu bir iç akıştır. İç akışlar bütün akış alanı boyunca viskozitenin etkisi altındayken, dış akışlarda viskoz etkiler, yalnızca katı yüzeylere komşu sınır tabakalar ile ve akışa göre cisimlerin arka tarafındaki art izi ile sınırlıdır (Çengel vd., 2018).

### **2.3.3. Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar**

Akış gerçekleştiği sürece yoğunluğun değişimine göre sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz olarak adlandırılır. Sıkıştırılamazlık bir yaklaşımdır. Yoğunluk akış boyunca her konumda sabit kalıyorsa, sıkıştırılamaz bir akış olduğu söylenebilmektedir. Bu sebeple akış sıkıştırılamaz olarak nitelendiriliyorsa, hacmi akış boyunca değişmemektedir. Sıvıların yoğunluğu genel olarak sabittir ve sıvı akışları bu sebeple sıkıştırılamazdır. Bu nedenle sıvıların sıkıştırılamaz olarak değerlendirilmesi normaldir ancak gazların sıkıştırılabilirliği çok yüksektir. Sıvılarda büyük basınç değişimlerine karşılık gelen küçük yoğunluk farkları önemli ölçüde sonuçlara sebep olabilir (Pritchard vd., 2011).

### **2.3.4. Doğal ve zorlanmış akışlar**

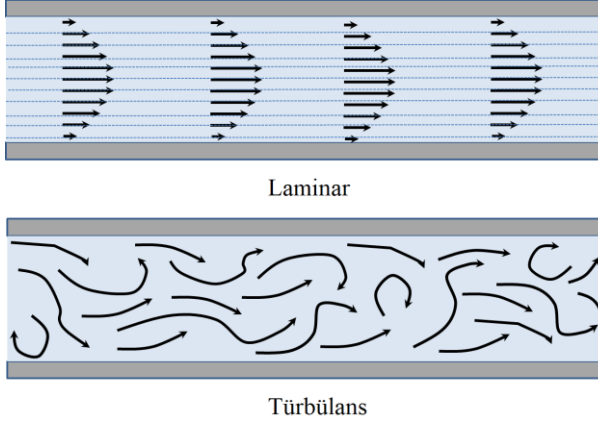
Akışkanın hareketini başlatan olaya bağlı olarak akış, doğal veya zorlanmış olarak adlandırılır. Zorlanmış akışta, akışkan bir pompa veya fan gibi dış etkenler ile borunun içinden ya da bir yüzeyin üzerinden akmaya zorlanırken, doğal akışlarda herhangi bir akışkan hareketi, az yoğun akışkanın yükselerek çok yoğun akışkanın alçalması gibi kendiliğinden oluşan doğal etkenler ile gerçekleşir (Pritchard vd., 2011).

### **2.3.5. Zamana bağlı ve zamandan bağımsız akışlar**

Zamandan bağımsız (steady-state), bir noktada zaman içerisinde hiçbir değişim olmadığını ifade etmektedir. Akışın özellikleri zaman içerisinde değişiyorsa bu akış zamana bağlı (transient) akıştır (Çengel vd., 2018).

### **2.3.6. Laminar ve türbülanslı akışlar**

Bazı akışlar düzenli ve çalkantısız, bazıları ise oldukça düzensizdir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi çalkantısız akışkan tabakaları ile karakterize edilen çok düzenli akışkan hareketi laminar olarak isimlendirilir. Yağlar gibi yüksek viskoziteli akışkanların düşük hızlı akışları genel olarak laminardır.



**Şekil 2.1** Laminer akış ve türbülanslı akışın şematik gösterimi

Genellikle yüksek hızlarda görülen ve hız çalkantıları ile nitelendirilen çok düzensiz akışkan hareketleri ise türbülanslı akış olarak isimlendirilir. Hava gibi düşük viskoziteli akışkanların yüksek hızlardaki akışı genelde türbülanslıdır. Akışın karakteri gerekli olan pompalama gücünü doğrudan etkilemektedir. Laminer ve türbülanslı akış arasında sürekli değişim gösteren akışa ise geçiş akışı denilir (Pritchard vd., 2011; Çengel vd., 2018).

Reynolds Sayısı, akışkanlar mekaniğinde, akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine olan oranıdır ve bu değer bu iki kuvvetin belirli akış şartları altında birbirlerine olan göreceli önemini vermektedir. Bu sebeple Reynolds Sayısı akışın laminer veya türbülanslı olduğu hakkında bilgi verir.

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} = \frac{v_s D}{\nu} = \frac{\text{atalet kuvvetleri}}{\text{viskozite kuvvetleri}} \quad (2.1)$$

Burada  $v_s$  akışkanın hızı,  $D$  karakteristik uzunluk,  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesi,  $\nu$  akışkanın kinematik viskozitesi ve  $\rho$  akışkanın yoğunluğudur. Büyük Reynolds sayılarında akışkanın yoğunluğu ve akışkan hızının karesi ile orantılı olan atalet kuvvetleri, viskoz kuvvetlerden daha büyüktür. Bu sebeple viskoz kuvvetler akışkanın rasgele ve hızlı değişimlerini engelleyemezler. Küçük ya da orta Reynolds sayılarında ise viskoz kuvvetler oluşan değişimleri bastırabilecek ve akışkanı çizgi üzerinde tutabilecek kadar büyüktür. Bundan dolayı birinci durumda akış türbülanslıyken ikinci durumda laminer durumdadır. Türbülanslı akışın oluşmaya başladığı Reynolds Sayısı, kritik Reynolds Sayısıdır. Farklı geometriler ve farklı akış koşulları için kritik Reynolds sayısının değeri de farklıdır. Dairesel boruda gerçekleşen iç akış için kritik Reynolds sayısının kabul edilen değeri  $Re_{cr} = 2300$ 'dür. Dairesel olmayan borularda ise akışlar için Reynolds Sayısı hidrolik çapa göre tanımlanır ve hidrolik çap ise şu şekildedir:

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (2.2)$$

Burada  $A_c$  borunun kesit alanı ve  $p$  ise ıslak çevrenin uzunluğudur. Dairesel borular için hidrolik çap, boru çapı  $D$ 'ye eşit olacak şekilde ifade edilir:

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4(\pi D^2/4)}{\pi D} = D \quad (2.3)$$

Laminer, geçiş ve türbülans akışlar için Reynolds Sayısının tam değerlerini bilmek önemlidir. Bu o kadar kolay olmasa da, çoğu pratik uygulamada dairesel borulardaki akış için  $Re \leq 2300$  için laminer,  $2300 \leq Re \leq 4000$  için geçişli ve  $Re \geq 4000$  için türbülanslı akış olarak kabul edilir (Pritchard vd., 2011; Çengel vd., 2018).

## 2.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics - CFD), akışkanların davranışıyla ilgili sorunları çözmek ve analiz etmek için sayısal analiz yöntemleri ve algoritmalar kullanan bir akışkanlar dinamiği dalıdır. Deneysel olarak incelenmesi zor veya imkansız olan karmaşık sıvı akışı olaylarını simüle etmek ve analiz etmek için güçlü bir araçtır. CFD, çeşitli alanlarda akışkan sistemlerini tasarlamak ve optimize etmek için mühendisler ve bilim adamları için temel bir araç haline gelmiştir. CFD, havacılık, otomotiv, kimya, inşaat, çevre, denizcilik, tıp ve enerji mühendisliği gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay mühendisliğinde, uçak kanatlarını, motorlarını ve yakıt sistemlerini tasarlamak ve optimize etmek için, otomotiv mühendisliğinde, araç aerodinamiklerini ve motor performansını optimize etmek için kullanılır. Kimya mühendisliğinde, kimyasal reaksiyonları ve karıştırma işlemlerini optimize etmek için, inşaat mühendisliğinde nehirlerdeki su akışını analiz etmek ve barajlar gibi hidrolik yapıları tasarlamak için kullanılır. Enerji mühendisliğinde CFD, petrol ve gaz üretimi, termik ve nükleer reaktörlerdeki akış ve ısı analizleri süreçleri için kullanılır (Versteeg vd., 2007).

## 2.5. Matematiksel Arka Plan

CFD'nin matematiksel altyapısı, akışkanın davranışını tanımlamak için kısmi diferansiyel denklemlerin (Partial Differential Equation - PDE) kullanımını içerir. Bu PDE'ler kütle, momentum ve enerjinin temel korunumu yasalarından türetilir ve bir sıvının zaman ve mekandaki hız, basınç ve sıcaklığındaki değişiklikleri tanımlar. Visköz sıvıların hareketini tanımlayan Navier-Stokes denklemleri, CFD'deki en önemli

denklemlerdir ve CFD simülasyonlarında kullanılan çoğu sayısal modelin temelini oluşturur. CFD modelleri iki ana kategoriye ayrılabilir, bunlar Euler ve Lagrangian modellerdir. Euler modelleri, zamana bağlı olarak uzayda sabit noktalarda sıvı özelliklerinin analiz edilmesini içeren, sıvı hareketinin Eulerian tanımına dayanır. Bu modelde, akışkan sürekli bir ortam olarak ele alınır ve PDE'ler uzayda her noktada akışkan özellikleri için çözülür. Bu yaklaşım, binalar üzerindeki hava akışları veya okyanus akıntıları gibi büyük ölçekli sıvı sistemlerini analiz etmek için kullanışlıdır. Öte yandan Lagrange modeli, tek tek sıvı parçacıklarının izlediği yol boyunca sıvı özelliklerinin analiz edilmesini içeren Lagrangian sıvı hareketi tanımından türetilmiştir. Lagrangian modellerinde, sıvı, ayrı ayrı parçacıkların bir koleksiyonu olarak ele alınır ve PDE'ler, her bir parçacığın zaman içindeki davranışı için çözülür. Bu yaklaşım, sıvı damlacıklarındaki kimyasal reaksiyonlar veya bir sıvıdaki bireysel kabarcıkların davranışı gibi küçük ölçekli sıvı sistemlerini analiz etmek için kullanışlıdır (Versteeg vd., 2007).

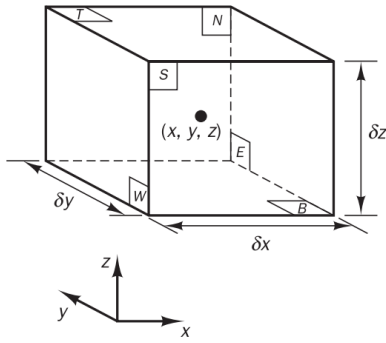
CFD modelleri, analiz edilen sıvı akışının türüne göre de sınıflandırılabilir. Zamandan bağımsız modeller, sıvı akışının zaman içinde sabit olduğunu ve sıvı özelliklerinin zamanla değişmediğini varsayar. Öte yandan zamana bağlı modeller, zaman içinde sıvı özelliklerindeki değişiklikleri hesaba katar ve türbinlerdeki veya pompalardaki sıvı akışları gibi kararsız sıvı akışlarını analiz etmek için kullanışlıdır. Bu modellere ek olarak, CFD ayrıca sıvı akışını tanımlayan PDE'leri çözmek için sayısal yöntemlerin kullanımını içerir. Bu sayısal yöntemler, PDE'leri bilgisayar kullanılarak çözülebilen bir dizi cebirsel denklem halinde ayrıklaştıran sonlu fark, sonlu hacim ve sonlu eleman yöntemlerini içerir. CFD'de kullanılan diğer sayısal yöntemler arasında spektral yöntemler, Lattice-Boltzmann yöntemleri de bulunur (Ferziger vd., 2002).

### **2.5.1. Navier-Stokes denklemleri**

Navier-Stokes denklemleri, viskozite, basınç ve dış kuvvetlerin etkilerini hesaba katarak akışkan hareketini tanımlayan bir dizi kısmi diferansiyel denklemdir. Bu denklemler, sırasıyla 1820'lerde ve 1840'larda bağımsız olarak türetilen Fransız matematikçi Claude-Louis Navier ve İrlandalı matematikçi George Gabriel Stokes'un adını almıştır. Navier-Stokes denklemleri, akışkanlar mekaniği alanında temeldir (Ferziger vd., 2002).

### 2.5.2. Korunum denklemleri

Korunum yasaları, kütle, enerji, momentum ve elektrik yükü gibi belirli fiziksel niceliklerin kapalı bir sistemde zamanla korunduğunu veya sabit kaldığını belirten temel fizik ilkeleridir. Bilgisayar ortamında CFD analizleri yapılırken, ayrık denklemler Şekil 2.2’de gösterildiği gibi birim hücre için çözülmemektedir.



Şekil 2.2 Sonlu hacim elemanlarında kontrol hacmi (Versteeg vd., 2007).

Bu yasalar, kapalı bir sistemdeki belirli bir niceliğin toplam miktarının, sistem içindeki nesneler arasında biçim değiştirse veya aktarılsa bile her zaman sabit olduğunu belirten korunum ilkesine dayanmaktadır. Korunum yasaları, atom altı parçacıklardan tüm evrene kadar fiziksel sistemlerin davranışını anlamak ve tahmin etmek için güçlü bir çerçeve sağlayarak modern fizikte kritik bir rol oynar. Kimya, biyoloji ve çevre bilimi dahil olmak üzere bilim ve mühendisliğin diğer birçok alanında da önemlidirler (Ferziger vd., 2002).

#### 2.5.2.1. Kütlenin korunumu

Kütlenin korunumu, kapalı bir sistemin kütlesinin zaman içinde sabit kaldığını belirten fizik ve mühendislikte temel bir ilkedir. Bu ilke, bir sistemin toplam kütlesinin korunduğunu, yani sistemin yaratılamayacağını veya yok edilemeyeceğini, yalnızca dönüştürülebileceğini veya bir biçimden diğerine aktarılabileceğini belirten temel kütlenin korunumu yasasına dayanır. Kütlenin korunumu, fiziksel sistemlerin davranışını tahmin etmek ve içlerindeki kütle transferinin dinamiklerini anlamak için güçlü bir araç sağladıkları için kimya, biyoloji, çevre bilimi ve akışkanlar mekaniği dahil bilim ve mühendisliğin birçok alanında kritik bir rol oynar. Kimyasal süreçlerin tasarımı ve işletilmesi, çevresel izleme ve atık yönetimi gibi pratik uygulamalarda da önemlidir. Bir kontrol hacmindeki kütle ne yaratılabilir ne de yok edilebilir. Kütlenin korunumu, sistem boyunca giriş ve çıkış arasındaki kütle akış farkının sıfır olduğunu belirtir:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) = 0 \quad (2.4)$$

burada  $\rho$  yoğunluk,  $\vec{V}$  hız vektörü ve  $\vec{\nabla}$  gradyan operatörü olmak üzere:

$$\vec{V} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.5)$$

şeklinde yazılır. Yoğunluk sabitken, sıvının sıkıştırılamaz olduğu varsayılır. Böylece süreklilik, kararlı durum sürecini gösteren denklem aşağıdaki gibi basitleştirilir:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (2.6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

burada u, v ve w hız vektörünün bileşenleridir (Ferziger vd., 2002).

### 2.5.2.2. Momentumun korunumu

Momentumun korunumu, fizikte, kapalı bir sistemin toplam momentumunun, üzerine bir dış kuvvet etki etmedikçe, zaman içinde sabit kaldığını belirten temel bir ilkedir. Bu ilke, bir sistemin kütle ve hızın ürünü olan toplam momentumunun dış kuvvetlerin yokluğunda korunduğunu belirten momentumun korunumu temel yasasına dayanmaktadır. Momentum, hareket halindeki bir kütleyi tanımlar ve bir nesnenin kütlesi ile hızının çarpımı olarak ölçülür. Bir kontrol hacmindeki momentum sabit kaldığından, momentumun korunumu, momentumun ne yaratıldığını ne de yok edildiğini ima eder. Sadece Newton yasalarına dayanan kuvvetlerin etkisiyle değişebilir (Ferziger vd., 2002; Versteeg vd., 2007).

Newton'un İkinci Hareket Yasası'nın ifadesi:

$$F = m \times a \quad (2.8)$$

burada  $F$  herhangi bir parçacığa uygulanan net kuvveti,  $a$  ivmeyi ve  $m$  kütleyi ifade eder. Bir sıvı söz konusu olduğunda, bu denklem parçacığın hacmi cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla} p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.9)$$

Denklemin sol taraftaki birinci terimi momentum konveksiyonudur ve şu şekilde açılır:

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right] \quad (2.10)$$

$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}$  konveksiyonu,  $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$  zamana göre hızdaki değişimi ifade eder.

Denklemin sağ tarafındaki ilk terim basınç gradyanı, ikinci terim yerçekimi kuvveti (body force) ve son terim ise difüzyon terimidir. Bu denklemde viskoz kuvvetler sabit ve akışkanın sıkıştırılmaz olduğu varsayımı yapılmıştır. Burada,  $p$  ve hız bileşenleri ( $u, v, w$ ) süreklilik denkleminin (denklem 2.4) ve problemin sınır koşullarının uygulanmasıyla bir çözüm arandığında bilinmeyenlerdir. Ayrıca, problemde herhangi bir termal etkileşim varsa, enerji denkleminden etkileneceği aşıkardır (Versteeg vd., 2007).

### 2.5.2.3. Enerjinin korunumu

Enerjinin korunumu, sisteme eklenen iş ve ısı toplamının sistemin toplam enerjisinde bir artışa neden olacağını belirten termodinamiğin birinci yasasıdır:

$$dE_t = dQ + dW \quad (2.11)$$

burada  $dW$  sistem üzerinde yapılan iş,  $dQ$  sisteme eklenen ısı ve  $dE_t$  sistemin toplam enerjisindeki artıştır. Bu denklem şu şekilde açılabilir:

$$\rho \left[ \frac{\partial h}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (h\vec{V}) \right] = -\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (k\vec{\nabla}T) + \Phi \quad (2.12)$$

Denklemin sol tarafındaki ilk terim entalpideki zamana göre değişimi ve ikinci terim enerji konveksiyonunu ifade eder. Sağ taraftaki ilk terim basınç işini, ikinci terim ısı akısını ve son terim ise ısı dağılımını ifade etmektedir (Ferziger vd., 2002).

### 2.5.3. Boussinesq Yaklaşımı

Isı transferinin gerçekleştiği akışlarda, akışkan özellikleri sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklıktaki değişimin akışkan hareketine etkisi az ya da çok olabilir. Akışkan yoğunluğundaki değişim büyük değilse, yoğunluk sabit olarak ya da sadece yerçekimi teriminde değişken olarak ele alınabilir. Yoğunluğun yalnızca yerçekimi ifadesinde bir değişken olmasına Boussinesq yaklaşımı denir. Burada yoğunluğun sıcaklıkla lineer olarak değiştiği varsayılır. Bu şu şekilde ifade edilebilir:

$$(\rho - \rho_0)g_i = -\rho_0 g_i \beta (T - T_0) \quad (2.13)$$

burada  $\beta$  termal genleşme katsayısıdır. Boussinesq yaklaşımı, yoğunluğun sadece yerçekimi etkisiyle değiştiği ve diğer faktörlerin etkisini yok saydığı bir ısı transferi yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, birçok pratik uygulamada kullanılır çünkü yoğunluk değişimleri genellikle ısı transferi hesaplamaları için önemli bir faktördür, ancak bu değişimler çoğu zaman diğer faktörlere göre daha küçük bir etkiye sahiptir (Incropera vd., 2007).

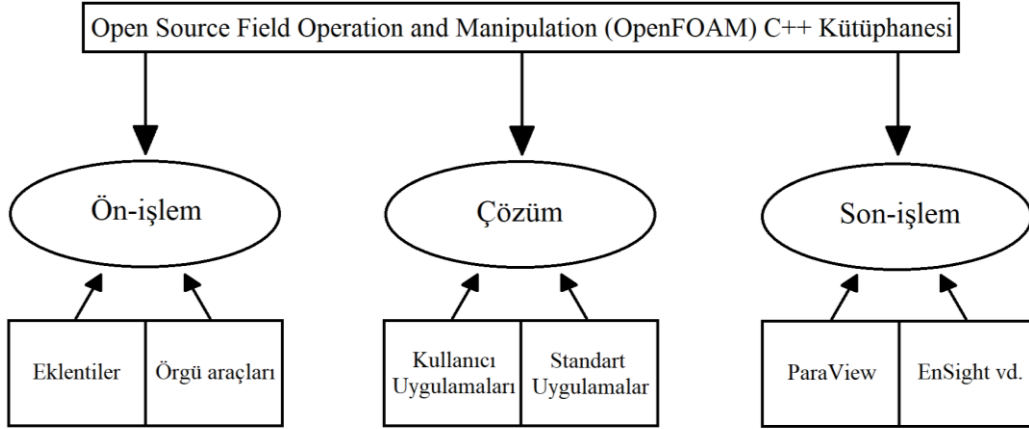
Boussinesq yaklaşımı, atmosfer ve okyanus dinamikleri gibi doğal süreçlerin modellenmesinde de kullanılır. Örneğin, sıcaklık değişimleri okyanus suyu yoğunluğunu etkiler ve bu da okyanus akıntılarını yönlendirir. Boussinesq yaklaşımı, bu süreçleri daha kolay modellenebilir hale getirir. Ancak, Boussinesq yaklaşımı bazı durumlarda doğru sonuçlar vermeyebilir. Özellikle, sıcaklık değişimleri çok büyükse veya yoğunluk değişimleri başka faktörlerden kaynaklanıyorsa, bu yaklaşımın kullanılması uygun olmayabilir (Incropera vd., 2007).

## **2.6. Sonlu Hacim Metodu**

FVM, sıvı akışı, ısı transferi ve elektromanyetik alanlar gibi fiziksel olayları yöneten kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve mühendislik ve uygulamalı matematikte en popüler sayısal yöntemlerden biri haline gelmiştir. FVM, bir alanı küçük kontrol hacimlerine veya hücrelere bölen bir ayrıklaştırma tekniğidir ve bu hücrelerin sınırları boyunca korunan miktarların akışlarını değerlendirir. FVM'nin arkasındaki temel ilke korunum yasalarıdır. Korunum yasaları fizik ve mühendislikte temeldir ve bir sistemdeki bir niceliğin (örneğin kütle, enerji veya momentum) toplam miktarının zaman içinde sabit kaldığını belirtirler. FVM, bu korunum yasaları için tasarlanmıştır. Karmaşık geometriler ve düzgün olmayan örgü yapısı içeren problemler için çok uygundur (Mazumder, 2016).

## **2.7. OpenFOAM**

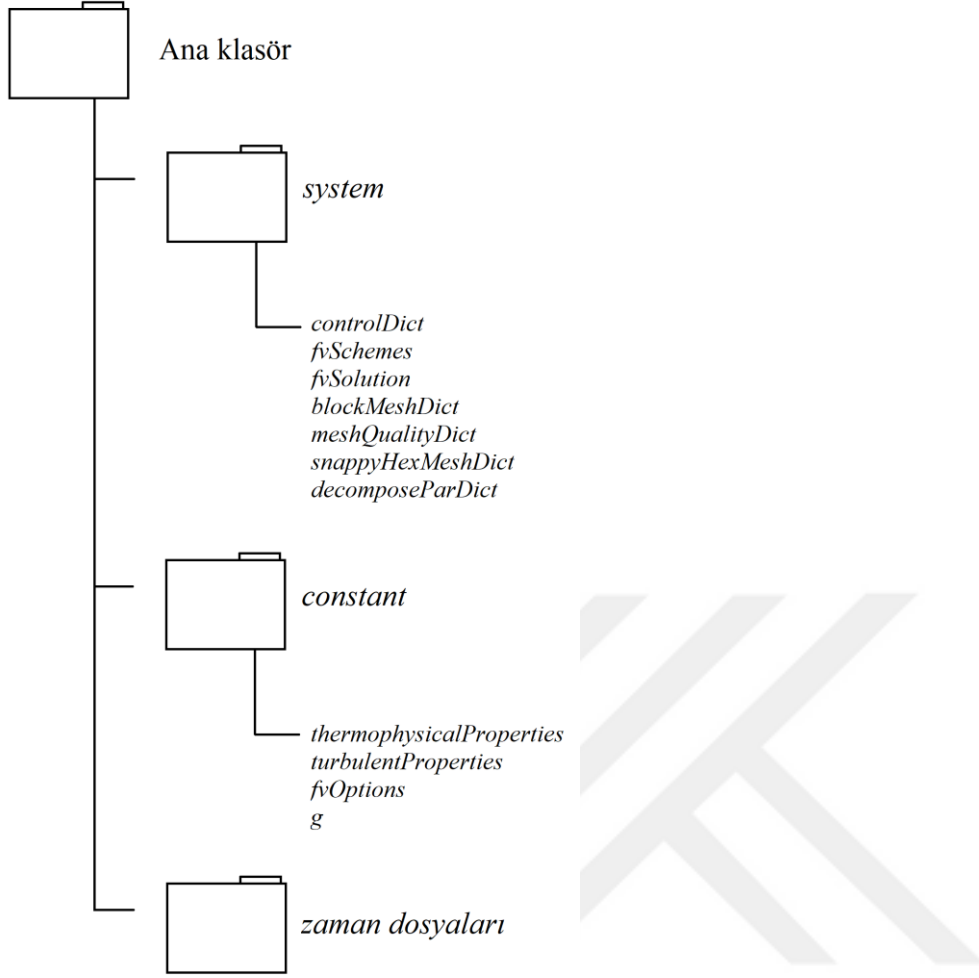
OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation), yaygın olarak kullanılan C++ ile yazılmış bir açık kaynaklı CFD yazılımıdır. 1980'lerin sonunda Henry Weller tarafından geliştirilmiştir ve o zamandan beri dünya çapında bir kullanıcı ve geliştirici topluluğu tarafından sürekli olarak geliştirilmiştir ve sürdürülmüştür. OpenFOAM, sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akışlar, türbülanslı akışlar, çok fazlı akışlar, ısı transferi ve diğer birçok ilgili fenomen gibi akışkanlar mekaniğindeki çok çeşitli sorunları çözmek için tasarlanmıştır (OpenFOAM, 2022).



Şekil 2.3 OpenFOAM yapısına genel bakış

Akışkanlar mekaniğinin yönetici denklemlerini ayrıklaştırmak için sonlu bir hacim yöntemi kullanır. OpenFOAM, kullanıcıların yazılımı kendi özel ihtiyaçlarına uyacak şekilde özelleştirmesine ve genişletmesine olanak tanıyan esnekliği ve modülerliği ile bilinir. Bu, yazılımın geliştirilmesine katkıda bulunan ve başkalarına destek sağlayan geniş ve aktif bir kullanıcı ve geliştirici topluluğunun oluşmasına yol açmıştır. Ayrıca simülasyon sonuçlarının ön işleme, son işleme ve görselleştirilmesi için geniş bir araç yelpazesi içerir ve bu da onu CFD simülasyonları için eksiksiz bir çözücü haline getirir. OpenFOAM, havacılık mühendisliğinden biyomedikal mühendisliğine kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Örneğin, uçakların aerodinamiğini, gemilerin ve açık deniz yapılarının hidrodinamiğini ve insan arterlerindeki kan akışını simüle etmek için kullanılmıştır. (OpenFOAM, 2022).

Genellikle CFD çalışmalarında çözülen problem *case* olarak adlandırılır ve probleme ait klasörler ve dosyalar *case dosyaları* olarak adlandırılır. OpenFOAM’da case dosyaları genel anlamda üç tanedir. Bunlar, *0*, *system* ve *constant* klasörleridir. Constant klasörü, akışkanın termo-fiziksel özelliklerini (*thermophysicalProperties*) barındıran dosyaları içerir. Bu özellikler, sıcaklık, basınç, yoğunluk, viskozite, difüzyon katsayısı ve benzeri gibi parametreleri içerebilir. Bu sabitler, çoğunlukla yüzey ve sınır koşullarının tanımlanmasında kullanılır. Ayrıca, türbülans modelleri ve ayarları (*turbulenceProperties*), sınırlayıcılar, radyasyon modelleri (*radiationProperties*), güç üretim modelleri (*fvOptions*) gibi birçok dosya bu klasör altındadır. Constant klasörü aynı zamanda *polyMesh* adında mesh dosyalarını barındıran klasörü de içerir.



Şekil 2.4 OpenFOAM dosya ağacı (OpenFOAM, 2022)

System klasörü, simülasyon ayarlarını ve parametrelerini içerir. Bu dosyalar arasında simülasyonun çalışmasına dair bütün komutların ve elde edilen verilerin çekilmesini sağlayan fonksiyonların bulunduğu kontrol dosyası (*controlDict*), diverjans ve konveksiyon gibi terimlerin ayrıklaştırılmasını belirlediği (*fvSchemes*), çözücü (*solver*) toleransları gibi simülasyon ayarlarının belirlendiği (*fvSolution*), geometri ve örgü yapısı oluşturmaya yarayan (*blockMesh*, *snappyHexMesh*) dosyalar bulunur. Bunların haricinde birçok eklenti mevcuttur. Probleme göre değişiklik gösterebilir. *0* klasörü, tüm simülasyon niceliklerinin (hız, basınç, sıcaklık vb.) başlangıç ve sınır değerlerini içerir. Bahsedilen bütün dosyalar ve ayarlar çözüm sırasında değiştirilebilir ve güncellenebilir (OpenFOAM, 2022).

### 2.7.1. buoyantPimpleFoam çözücüsü

OpenFOAM’da her durum ve farklı fiziksel problemler için *solver* adı verilen çözücüler vardır. Her biri spesifik bir matematik model içerir. Genel anlamda NS denklemlerinde ufak değişiklikler ile gerçekleştirilir. Örneğin faz değişimi ya da fazların etkileşimi söz konusu olduğunda *multiphaseEulerFoam*, *interFoam*, *cavitatingFoam* vb. çözücüler kullanılırken, yanma gerçekleşen problemlerde *chemFoam*, *fireFoam*, *XiFoam* gibi çözücüler kullanılmaktadır. Ventilasyon ve ısı transferi (doğal ve zorlanmış taşınım) problemleri, sıkıştırılabilir sıvıların kaldırma kuvvetlerine dayalı problemleri, türbülanslı akışı ve zamana bağlı durumu için *buoyantPimpleFoam* çözücüsü kullanılmaktadır (OpenFOAM, 2022).

Bu çözücü için kullanılan denklemler kontrol hacmi korunum denklemlerinden genel anlamda farksızdır. Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.14)$$

burada  $\rho$  yoğunluk ve  $u$  hız alanıdır. Yoğunluğun ve viskozitenin sabit olduğu durum için momentum denklemi ise şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot (2\mu_{eff} D(u)) - \nabla \cdot \left( \frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot u) \right) \quad (2.15)$$

burada  $p$  statik basıncı,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $\mu_{eff}$  efektif viskoziteyi (moleküler ve türbülanslı viskozitenin toplamı) ve  $D(u)$  gerinim (strain) tensörünü ifade eder. Enerjinin korunumu denklemi yapılan seçime göre iki farklı şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h) + \frac{\partial (\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u K) - \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla h) + \rho u \cdot g \quad (2.16)$$

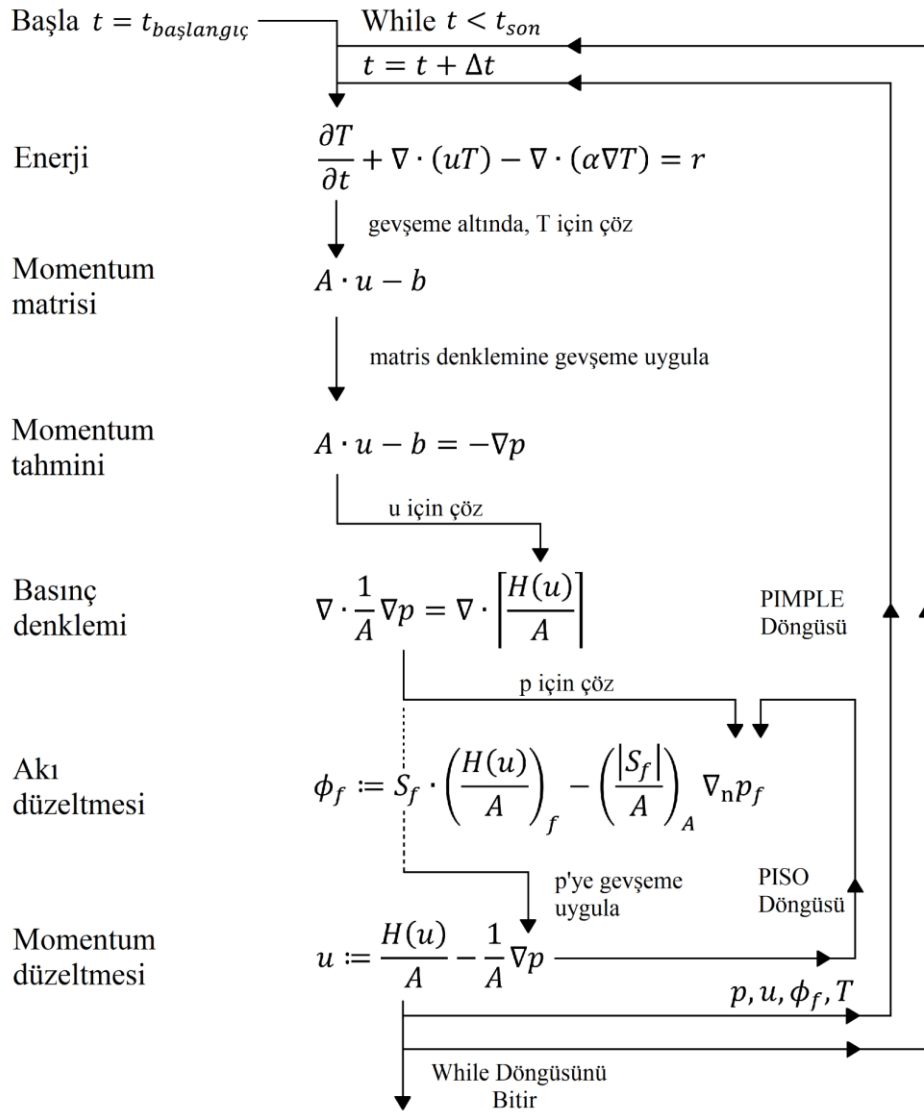
$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u e) + \frac{\partial (\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u K) + \nabla \cdot (p u) = \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla e) + \rho u \cdot g \quad (2.17)$$

Bu denklemlerde  $K \equiv \frac{|u|^2}{2}$  ile ifade edilir ve kinetik enerjidir.  $\alpha_{eff}$  efektif termal difüzivitedir. Enerji çözüm değişkeni olarak iç enerji ( $e$ ) veya entalpi ( $h$ ) seçebiliriz. Bu seçim *thermophysicalProperties* dosyasındaki enerji anahtar kelimesine göre yapılır (CFD Direct, 2022).

### 2.7.2. Pimple algoritması

PIMPLE algoritması (PISO/SIMPLE), zamana bağlı akış problemlerini çözmek için kullanılan bir algoritmadır. PIMPLE algoritması, zamana bağlı akışları yönetme yeteneği

ve kararlılığı, doğruluğu ve hesaplama verimliliği ile bilinir. PIMPLE, zamana bağlı problemler için PISO ve SIMPLE algoritmasının birleştirildiği, basınç-hız birleşik (couple) algoritmasıdır. Avantajı, daha yüksek CFL koşulu kullanabilmemiz ve bu nedenle zaman adımının büyük ölçüde artırılabilmesidir. Algoritmanın temel mantığı şu şekildedir: Bir zaman adımında, under-relaxation altında zamandan bağımsız çözümü aranır. Çözüm elde edildikten sonra bir sonraki zaman adımına geçilir. Bunun için, denklemlerin explicit kısımlarının yakınsadığından emin olmak için outer-correction döngülerine ihtiyaç vardır. Kararlı durum hesaplamasında tanımlanmış bir tolerans kriterine ulaşıldıktan sonra, outer-correction döngüsünden çıkılır ve bir sonraki zaman adımına geçilir. Bu, belirlenen zaman boyunca yapılır (Greenshields vd., 2022).



Şekil 2.5 OpenFOAM'da kullanılan PIMPLE Algoritmasının akış diyagramı (CFD Direct, 2022)

OpenFOAM’da PIMPLE akış şeması (nOuterCorrectors=2) (OpenFOAM Wiki, 2017):

1. Momentum matrisi oluştur
2. Momentum matrisini kullanarak basınç matrisini oluştur
3. Basınç alanını hesapla
4. Hız alanını yeni basınç alanıyla düzelt
5. Momentum matrisini düzeltilmiş hız alanıyla yeniden oluştur
6. Güncellenmiş momentum matrisini kullanarak basınç matrisini oluştur
7. Basınç alanını hesapla
8. Hız alanını yeni basınç alanıyla düzelt

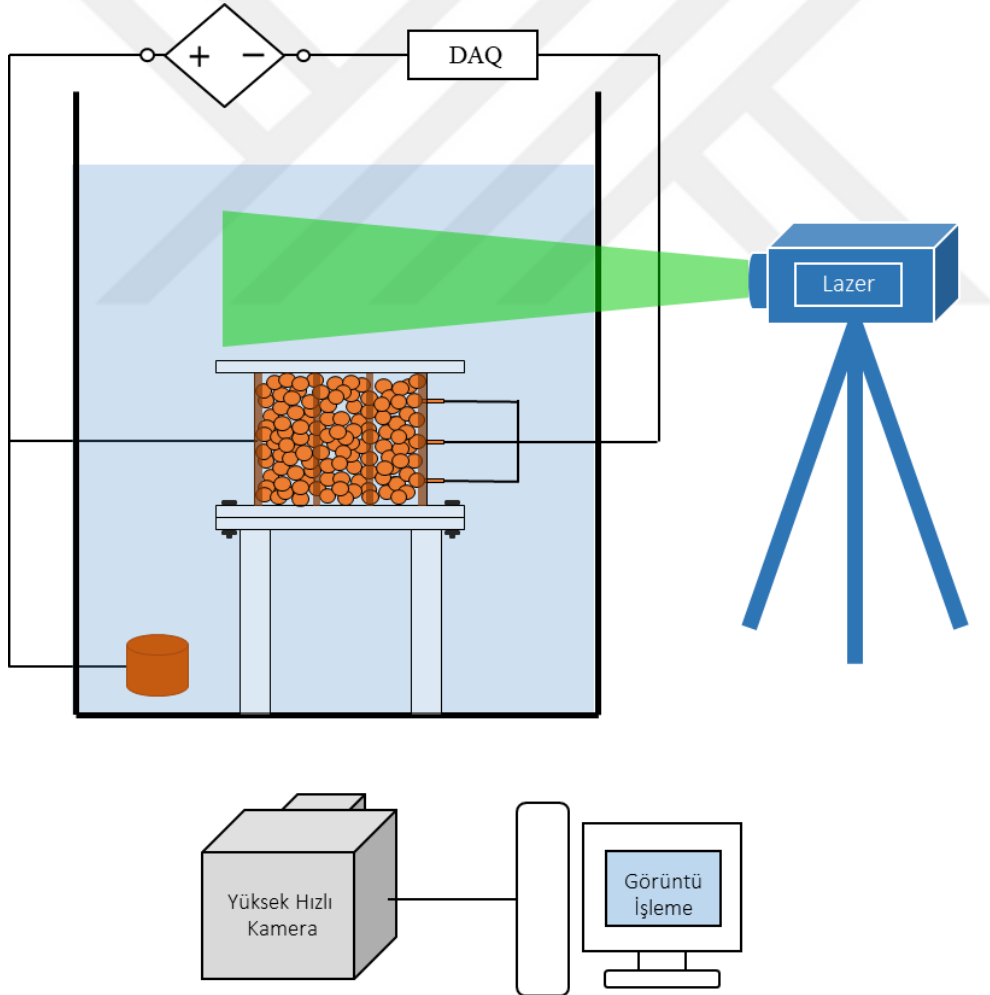


### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 2523 NRF (Güney Kore Ulusal Araştırma Kurumu) ikili işbirliği projesinin çıktısıdır. Güney Kore ekibi deneysel çalışmaları, projenin Türkiye tarafı ise sayısal analiz kısmını gerçekleştirmiştir.

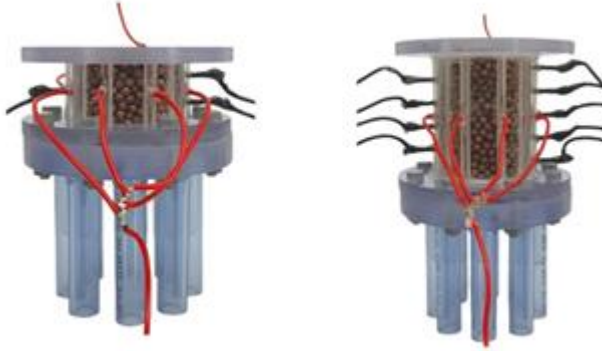
#### 3.1. Deney Düzenegi

Yapılan simülasyonlarda Ahn vd. (2022)'in çakıl yatağında doğal taşınım akışına ilişkin deneysel çalışması baz alınmıştır. Deney düzenegi  $d=4, 6$  ve  $10$  mm çapında ve değişken yüksekliği  $H$  olan bir silindirlerden oluşmaktadır. Bakır küreler silindirik konteynerin içine rastgele yerleştirilmiştir. Kütle ve ısı transferi arasındaki analogi, ısı transferi miktarlarını belirlemek için kullanılır.



Şekil 3.1 Deney düzeneginin şematik gösterimi (Ahn vd., 2022)

Şekil 3.1’de şematik gösterimi verilen deney düzeneğinden iki farklı veri elde edilmektedir. Bunlar Nusselt Sayısı ve hız profilleridir. Şekil 3.2’deki gibi düzenekte, bakır küreler katot görevi görürken yatağa bağlı bakır kablolar anot olarak çalışmaktadır. Sisteme bir güç kaynağı ile voltaj uygulandığında bakır küreler ile  $CuSO_4 - H_2SO_4$  akışkanı arasında bir iyonizasyon gerçekleşir. İyonizasyon sonucunda elde edilen akım analiz edilerek kütle transferi hesaplanır. Reynolds Analoji kullanılarak kütle transferinden ısı transferine geçiş yapılır ve Nusselt Sayısı hesaplanır.



Şekil 3.2 Deneyde kullanılan  $d=6$  mm yatak geometrileri (sırasıyla  $H/d=10$  ve  $20$ ) (Ahn vd., 2022)

Akışkan rezervuarına eklenen mikrometre çapındaki parçacıklar gerçekleşen ısı transferi sonucunda, akışkan ile beraber yukarı yönde bir hareket gerçekleştirir. Yatak bitişinden itibaren 12 mm yükseğe ayarlanmış lazer sisteminden geçen mikro parçacıklar görünür hale gelir. Bu esnada yüksek hızlı kamera ile lazer kesit alanının fotoğrafı alınır. Görüntü işleme ile parçacıkların  $t_0$  anındaki konumları belirlenir. Ardından  $\Delta t$  süre sonra  $t_1$  konumları elde edilir ve konum değişikliğinden yararlanarak parçacık hızları bulunur.

Tablo 3.1  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de  $CuSO_4 - H_2SO_4$  sıvısının fiziksel özellikleri

| Fiziksel Özellikler      | Değer                   |
|--------------------------|-------------------------|
| $\rho$ ( $kg/m^3$ )      | $1,097 \times 10^3$     |
| $\mu$ ( $kg/m \cdot s$ ) | $1,253 \times 10^{-3}$  |
| $\alpha$ ( $m^2/s$ )     | $5,676 \times 10^{-10}$ |
| $k$ ( $W/m \cdot K$ )    | $6,225 \times 10^{-4}$  |
| $\beta$ ( $1/K$ )        | $5,613 \times 10^{-5}$  |
| $Sc$ (Schmidt Sayısı)    | 2014                    |

$CuSO_4 - H_2SO_4$  sıvısının  $20^\circ C$ 'de fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Deneyler  $d=4, 6$  ve  $10$  mm küre çapları için sırasıyla  $5,43 \times 10^6, 1,83 \times 10^7$  ve  $8,48 \times 10^7$  Rayleigh Sayıları ile yapılmıştır (Ahn vd., 2022).

**Tablo 3.2** Deneyde kullanılan geometriler için küre sayıları (Ahn vd., 2022)

| Küre Çapı<br>d(mm) | Küre Sayısı |        |        |
|--------------------|-------------|--------|--------|
|                    | H/d=5       | H/d=10 | H/d=20 |
| 4                  | 1000        | 1930   | 3800   |
| 6                  | 477         | 865    | 1709   |
| 10                 | 140         | 275    | 540    |

Tablo 3.2'de  $d=4, 6$  ve  $10$  mm kürelerden oluşan rastgele geometriler için küre sayıları ve Tablo 3.3'de bu geometriler için hesaplanan porozite değerleri verilmiştir.

**Tablo 3.3** Deneyde kullanılan geometrilerin porozite değerleri (Ahn vd., 2022)

| Küre Çapı<br>d(mm) | Porozite Değeri |        |        |
|--------------------|-----------------|--------|--------|
|                    | H/d=5           | H/d=10 | H/d=20 |
| 4                  | 0,406           | 0,415  | 0,413  |
| 6                  | 0,410           | 0,418  | 0,406  |
| 10                 | 0,441           | 0,439  | 0,413  |

İkili işbirliği projesi kapsamında Güney Kore tarafınca yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen Nusselt Sayıları Tablo 3.4'de verilmiştir.

**Tablo 3.4** Deney sonucunda elde edilen Nusselt sayıları (Ahn vd., 2022)

| Küre Çapı<br>d(mm) | Nusselt Sayısı |        |        |
|--------------------|----------------|--------|--------|
|                    | H/d=5          | H/d=10 | H/d=20 |
| 4                  | 25,8           | 20,7   | 16,4   |
| 6                  | 37,4           | 34,6   | 30,6   |
| 10                 | 56,6           | 56,9   | 57,1   |

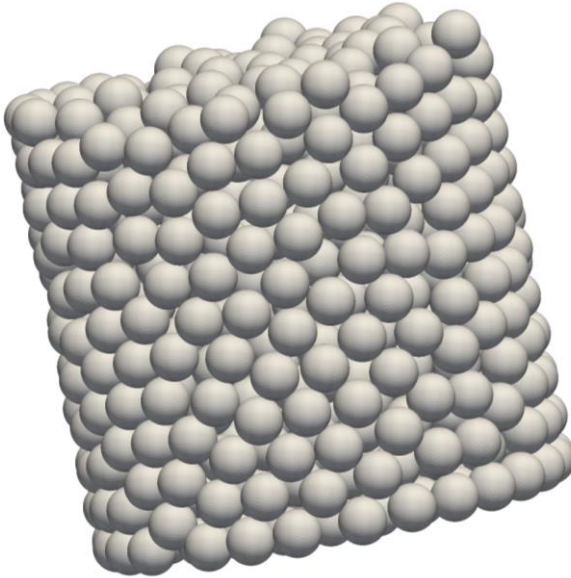
### 3.2. HAD Analizleri

HAD çalışmalarında öncelik olarak simüle edilecek (benzeşimi yapılacak) olan sistemin modellenmesi yapılır. Modelleme kendi içerisinde, geometrinin oluşturulması, örgü yapısının üretilmesi, uygun zaman ve mekan ayrıklaştırmalarının seçilmesi, örgü bağımlılığı analizi olarak ayrılabilir. Her adımda amaç en az hesaplama zamanı ile en doğru sonucu elde etmektir. Bu sebeple model oluşturulurken her aşama farklı seçenekler ile defalarca gerçekleştirilir. OpenFOAM v2112 ile istenilen kriterlere uygun ve en kesin sonuçları veren seçenekler ile simülasyonlar gerçekleştirilir.

#### 3.2.1. Geometri oluşturma

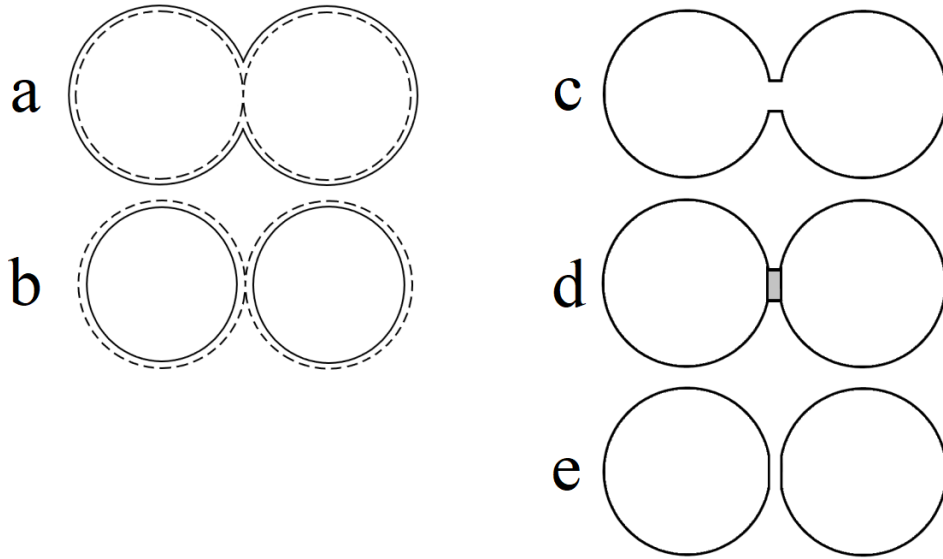
Çakıl yataklı reaktörler binlerce kürenin bir araya gelmesiyle oluştuğundan dolayı geometrik olarak oldukça karmaşıktır. Her kürenin etrafındaki diğer küreler ile temasta bulunması bu geometrileri HAD açısından uğraştırıcı ve zor bir konuma getirir.

Bu sebeple geometrinin oluşturulması aşaması tamamlandığı takdirde model oluşturma aşamasının büyük bir kısmı sonuçlandırılmış olur. Ayrıca çakıl yatakları belirli bir poroziteye sahiptir ve porozite akış karakteristiğini oldukça etkileyen bir parametredir. Bu sebeple geometri oluşturulurken hem temas noktaları hem de porozite dikkate alınmalıdır. Çakıl yatak geometrisini oluşturmadan önce kürelerin içerisinde bulunduğu konteynere rastgele konumlandırılmış halinin koordinatlarını elde etmek gerekmektedir. Bu işlem için iki yöntem denenmiş, avantaj ve dezavantajlarına göre seçim yapılmıştır.

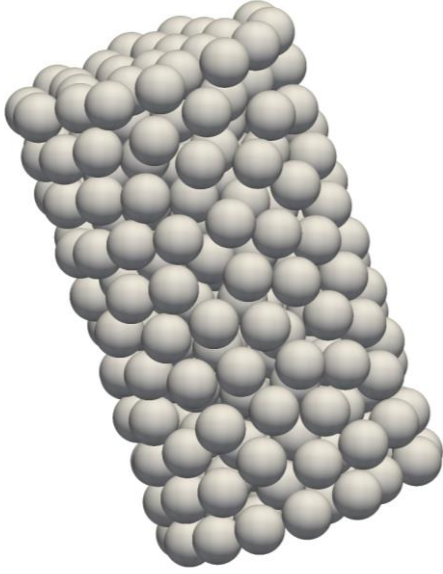


Şekil 3.3 DEM yöntemiyle elde edilen çakıl yatak geometrisi

İlk yöntem Ayrık Elemanlar Yöntemi (Discrete Element Method - DEM) kullanan cemfDEM kodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde küreler, karakteristik özellikleri belirlenmiş bir silindirin içerisine belirli bir yükseklikten bırakılır ve yaptıkları çarpışmalar DEM ile hesaplanır. Simülasyon bitiminde küreler tümü konumlandırılmış haldedir ve koordinatları sabittir. Elde edilen koordinatlar katılaştırılacağı programa yüklenerek çakıl yatak geometrisi elde edilir. Bu yöntemde kürelerin temas noktalarındaki davranış fizikseldir. Yani, iç içe geçme ya da asılı kalma gibi bir durum söz konusu değildir. Ancak kullanılan açık kaynak kodlu cemfDEM programında genellikle *shaker* adı verilen sallama fizik modülü olmadığından dolayı istenilen poroziteler elde edilememektedir. Elde edilen nihai geometrinin porozitesi bir hayli yüksektir ( $p \approx 0.48$ ). İstenilen porozite seviyeleri 0.41 olduğundan dolayı bu yöntem ile elde edilen geometrinin sonucu doğru olmaktan çok uzak olacaktır. Bu sebeple bu yöntem kullanılmamıştır. Şekil 3.3’de DEM ile elde edilen çakıl yatak geometrisi görülmektedir (cemfDEM, 2023).



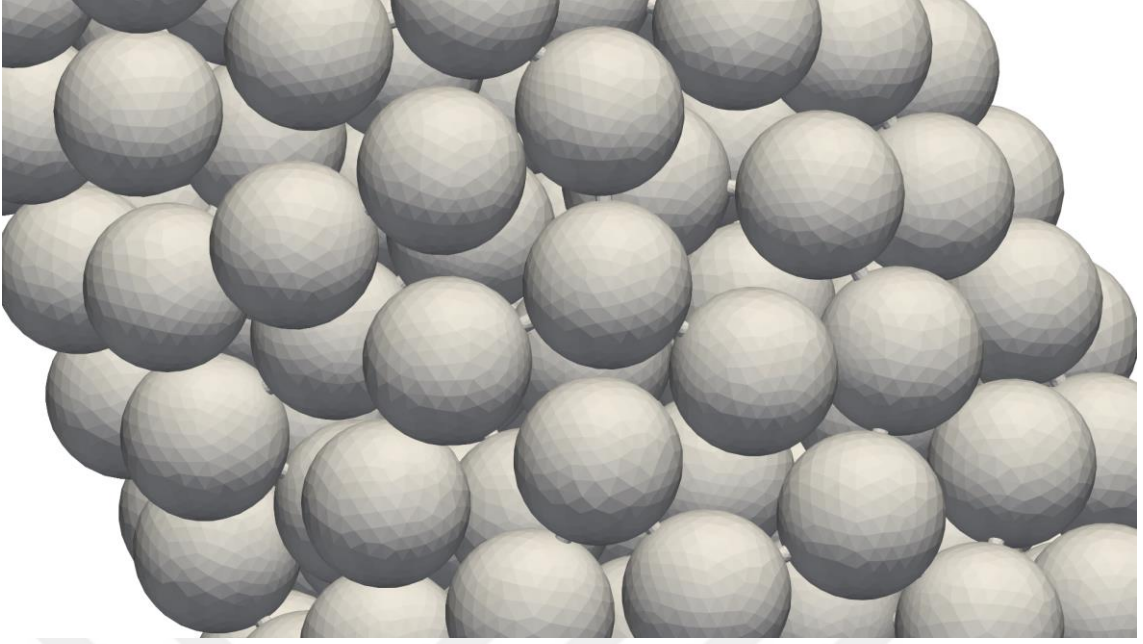
Şekil 3.4 Temas noktası yaklaşımları a) overlaps, b) gaps, c) necks, d) bridges, e) caps



Şekil 3.5 Monte Carlo Yöntemi ile elde edilen çakıl yatak geometrisi

İkinci yöntemde ise Monte Carlo Yöntemi kullanarak kürelerin koordinatları elde edilmektedir. Bunun için nükleer araştırmalarda sıklıkla kullanılan açık kaynak kodlu OpenMC programı kullanılmıştır. OpenMC programının *pack spheres* modülü kullanılmıştır. Program, modelin karakteristik özelliklerini (küre çapı, silindir yüksekliği ve çapı, vb.) ve poroziteyi girdi olarak alarak koordinatları oluşturmaktadır. Elde edilen çakıl yatak geometrisi Şekil 3.5’de görülmektedir (Romano vd., 2015).

Bu yöntemde istenilen porozite elde edilmektedir fakat çok düşük porozitelerde ya da orantısız kanal çapı – küre çapı durumlarında kürelerin çok fazla iç içe geçmesi söz konusudur. Bu sorun önüne geçilmediğinde hesaplama doğruluğu açısından oldukça büyük bir sorun teşkil etmektedir. Temas noktası problemini ortadan kaldırmak için yeni bir yöntem aranmıştır. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi iki ana temas noktası yaklaşımı mevcuttur. Global temas noktası yaklaşımı a ve b uygulamalarından oluşmaktadır. Burada a (overlaps) seçeneğinde sistemde bulunan bütün kürelerin çapı bir çarpan kadar büyütülür, b (gaps) seçeneğinde bütün kürelerin çapı bir çarpan kadar küçültülür. Ancak Dixon vd., (2013) kürelerin çapı %1 arttırıldığında sürükleme katsayısında (drag coefficient) %10’dan fazla artış olduğunu gözlemlenmiştir. Bu sonuç itibariyle küre çapındaki değişikliklerin akış karakteristiğine çok fazla etki ettiği görülmektedir. Ayrıca, porozitenin dikkate alındığı simülasyonlarda hesaplamada ciddi tutarsızlıklara sebep olacaktır (Dixon vd., 2013).



**Şekil 3.6** Bridge yöntemi kullanılmış çakıl yatak geometrisi

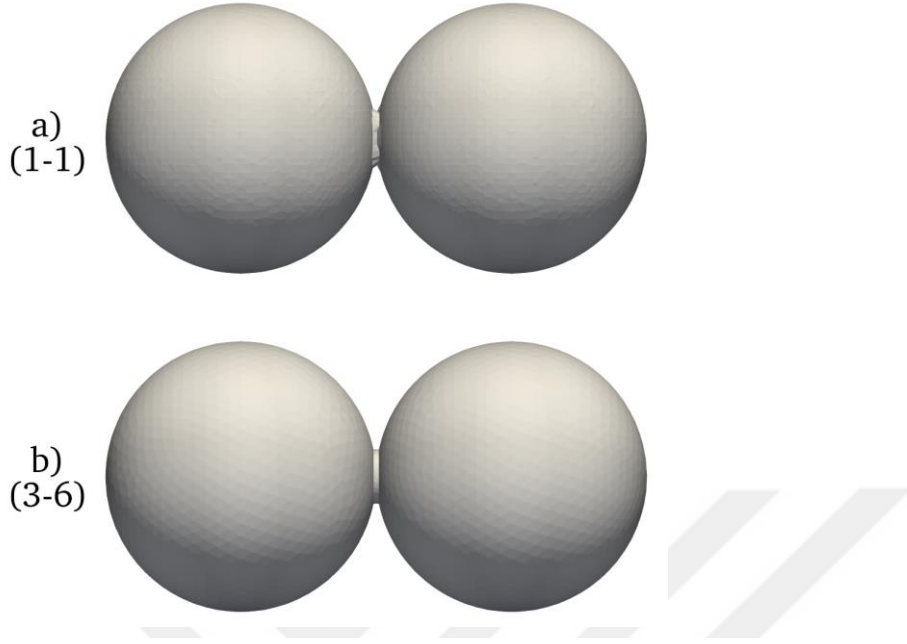
Örneğin yarıçapı 0,03m yüksekliği 0,06m olan silindir bir konteynerde yarıçapı 0,003m olan 865 küre olduğunda aşağıdaki formülden,

$$p = \frac{V_{toplam} - V_{küreler}}{V_{toplam}} \quad (3.1)$$

sistemin porozitesi 0,423 olarak hesaplanırken, kürelerin yarıçapı %1 büyütüldüğünde porozite 0,405'e düşmektedir. Görüldüğü üzere global yöntemler simüle edilecek sistem için uygun değildir. Diğer yandan local yöntemler olan c (necks), d (bridges) ve e (caps) sistemdeki poroziteye çok az etki etmektedir. Dixon vd. (2013) ısı transferi çalışmalarında *bridge* ve *caps* yaklaşımı kullanıldığında, tutarlı sonuçlar elde etmek için hem kürelerin birbirine olan temas noktalarında hem de küre – duvar temas noktalarında  $d/D$  (küre çapı/silindir çapı) oranının 0,2'den küçük ya da eşit olması gerektiğini göstermiştir.

Modelde kullanılacak yaklaşım Şekil 3.6'de gösterilen *bridge* olarak seçilip geometri üretildikten sonra örgü yapısı oluşturulurken edinilen tecrübeler doğrultusunda söz konusu yaklaşımların yapılacak simülasyonlara uygun olmadığı kanaatine varılmıştır. Sistemde 1000 adet küre olduğu varsayılırsa yaklaşık olarak 4000 temas noktası yani silindir üretileceği anlamına gelmektedir. Farklı kompozisyonlarda 140 ila 3800 arasında kürenin olduğu düşünüldüğünde bu yaklaşımdan vazgeçilmiştir. Çünkü her ekstra cisim sistemi daha karmaşık hale getirerek örgü yapısını oluşturmakta zorluklara sebep olurken, örgü sayısında da artış meydana getirmektedir.

Şekil 3.7’de görüldüğü üzere temas noktasında örgü yapısının düzgün bir biçimde oluşturulması için o bölgede yüksek sayıda düzeltme (refinement) gerekmektedir.



Şekil 3.7 Temas noktasında farklı düzeltme değerleri kullanılan küreler (a) 115K, b) 663K hücre sayısı).

Sonuç olarak bu yaklaşımdan vazgeçilmiş ve kürelerin temas noktalarındaki örgü yapısı geometriyi bozmadan oluşturulmaya gayret gösterilmiştir. Koordinatlar OpenMC programı ile üretildikten sonra, sayısal simülasyonlarda ön ve son işleme için ücretsiz bir platform SALOME 9.10.0 programı kullanılarak Şekil 3.5’deki gibi küreler katı hale getirilmiştir.

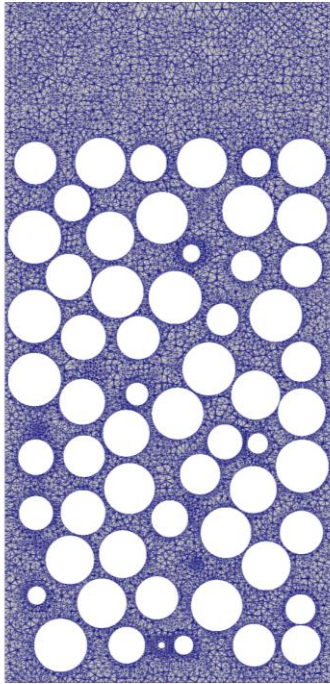
### 3.2.2. Örgü yapısı oluşturma

HAD çalışmalarında örgü yapısı oluşturma adımı, hesaplama alanının örgü hücreleri olarak adlandırılan, birbirine bağlı ve küçük bölümlere ayrılmasıdır. Örgü yapısı, alanın ayrıklaştırılmış bir temsili olarak işlev görür ve sıvı akışını yöneten denklemleri çözmek için çok önemlidir. Etki alanı içindeki hücrelerin boyutunun, şeklinin ve düzeninin belirlenmesini içerir. Örgü tipi seçimi ve özellikleri, HAD çalışmasının doğruluğunu ve verimliliğini önemli ölçüde etkiler. Yaygın örgü türleri, yapılandırılmış (structured) (dikdörtgen veya altı yüzlü) ve yapılandırılmamış (unstructured) (üçgen veya dört yüzlü) örgüleri içerir. Örgü yapısı oluşturulurken geometrinin karmaşıklığı, beklenen akış özellikleri ve hesaplama gücü gibi hususlar dikkate alınır. Örgü, aşırı hesaplama gereksinimlerinden kaçınırken önemli akış olaylarını doğru bir şekilde yakalamak için

yeterli çözünürlüğe sahip olmalıdır. Ayrıca, geometriyi doğru bir şekilde temsil etmek için alanın sınırlarına ve yüzeylerine uymalıdır (Tu vd., 2020).

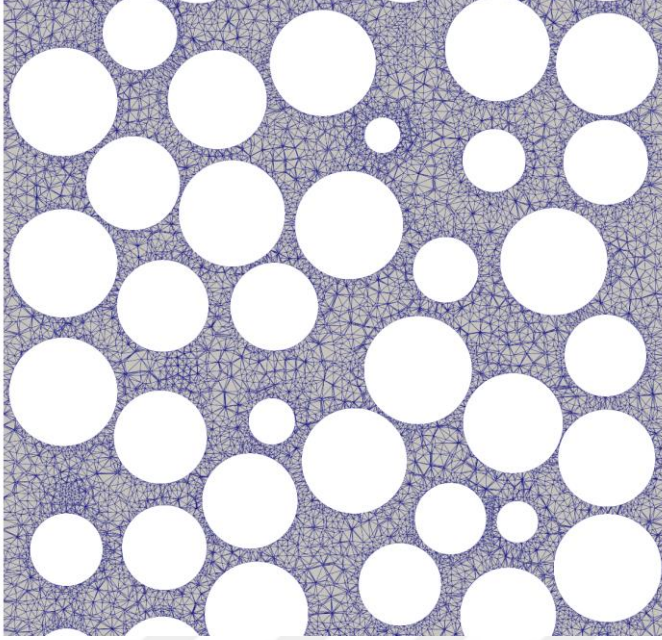
Örgü yapısı oluşturulurken iki farklı yöntem denenmiş ve daha avantajlı bulunan yöntem ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Her iki yöntem için de tercih kriteri olarak örgü yapısının karakteristik özellikleri (skewness, non-orthogonality, aspect ratio) ve üretilen hücre sayısı dikkate alınmıştır. Bütün kriterler simülasyon sonuçlarını doğrudan etkileyen önemli birer parametredir.

İlk yöntem SALOME ön ve son işlem programı kullanarak 1B-2B-3B örgü yapısının oluşturulduğu seçenektir. Burada koordinatlar programın Shaper Modülü'ne yüklendikten sonra mantıksal (boolean) işlemler (kesme, birleştirme, taşıma, ölçekleme vb.) gerçekleştirilir. Tek bir parça haline gelen küreler, oluşturulan silindir içerisinden çıkartılarak yalnızca akışın geçeceği ve sınırlar ile çevrili olan 3B geometri elde edilir. Ardından elde edilen geometri Mesh Modülü'ne yüklenerek NETGEN 1D-2D-3D Algoritması seçilerek örgü yapısı oluşturulur. İhtiyaç duyulması halinde bu algoritmanın ileri ayarlarında sınır tabakası oluşturma, sınır ve duvar kenarlarında örgüyü düzeltme (refinement) gibi işlemler yapılabilir. Elde edilen örgü yapısı UNV uzantısı ile dışa aktarılır ve yukarıda bahsedilen parametreler cinsinden değerlendirilir. İstenilen standartları sağladığı koşulda OpenFOAM'a aktarılabilir (SALOME, 2023).



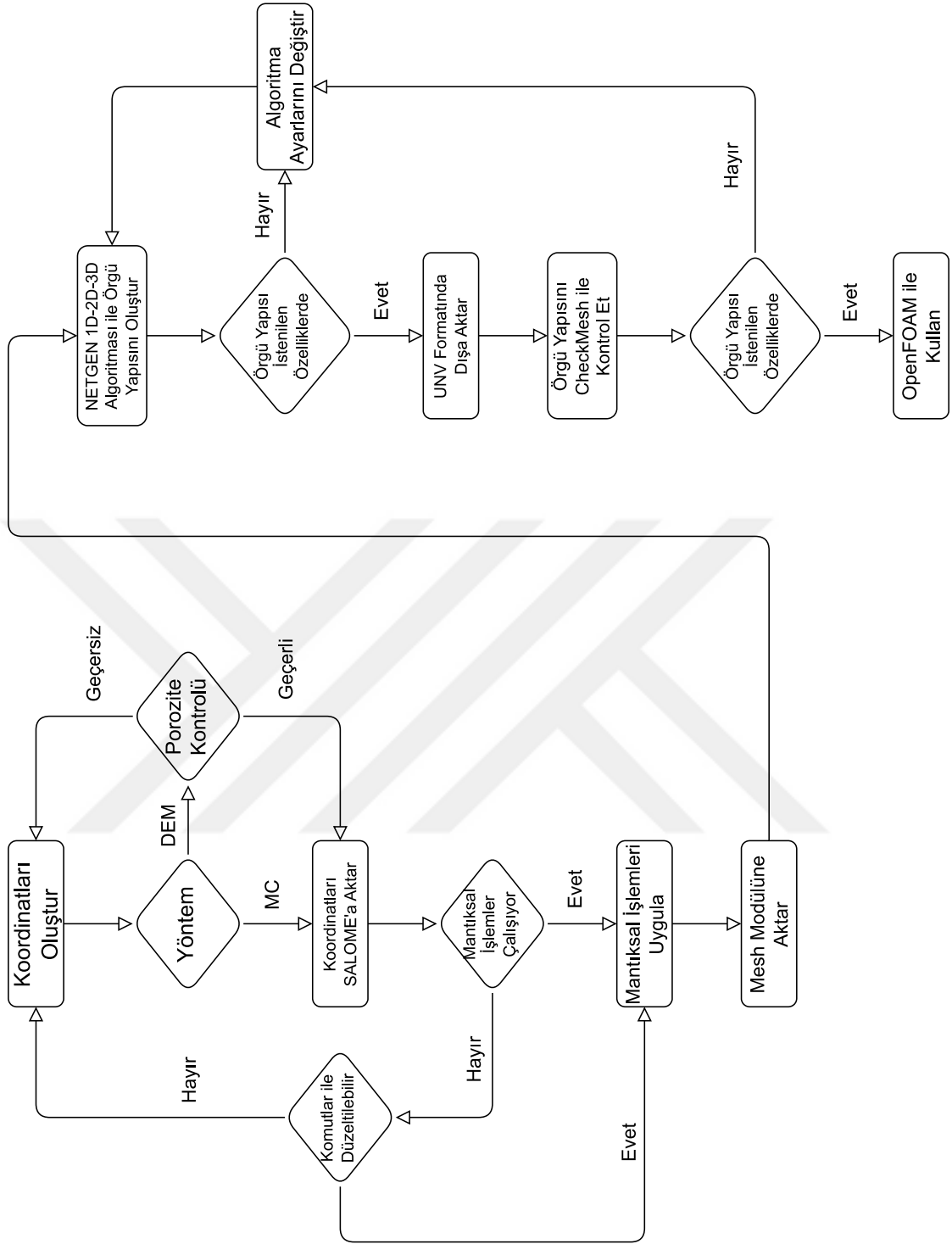
**Şekil 3.8** Tetrahedral hücreler ile üretilen çakıl yatak geometrisinin kesit alanı

Şekil 3.8’da gösterilen kesit alanı yukarıda bahsedilen yöntem ile üretilmiştir. Bu yöntem, her ne kadar çok karmaşık geometrilerin bile yapılarını bozmadan kolaylıkla örgü yapısını oluşturabilsede istenilen örgü yapısı özelliklerini sağlamamaktadır. Genellikle elde edilen örgü yapısı yüksek non-orthogonality değerlerine ( $\sim 0.8$ ) sahip olur ve bu HAD çalışmalarında sonucun doğruluğundan uzaklaşmak anlamına gelir.



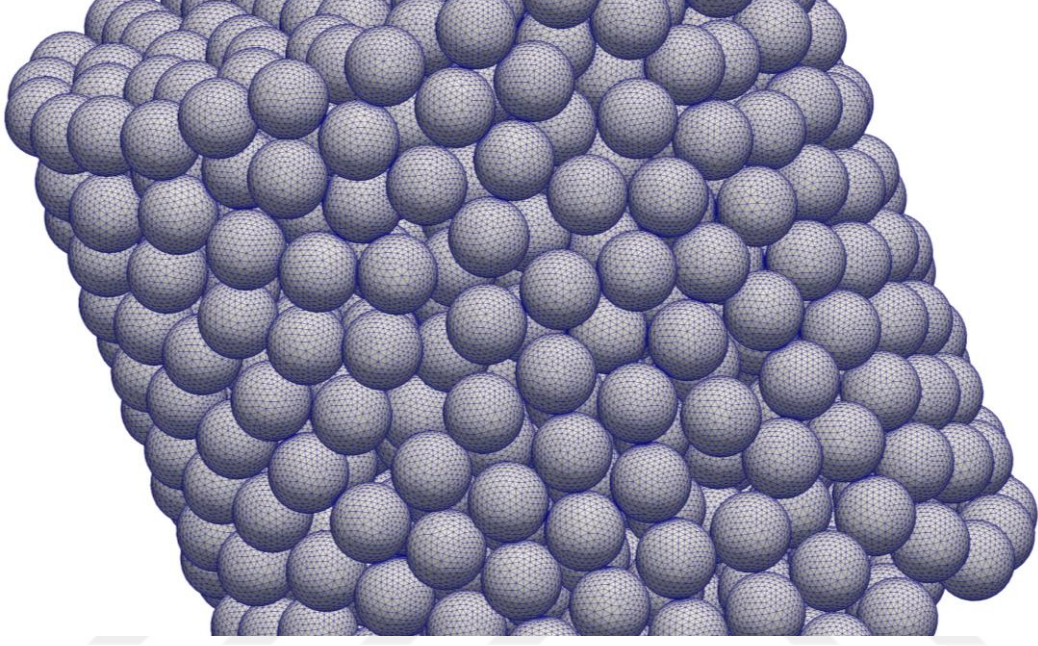
**Şekil 3.9** Tetrahedral hücrelerin karmaşık yapısını gösteren kesit alanı

Bu gibi değerlere sahip örgü yapıları için uygulanabilecek bazı yöntemler olsa bile mümkün olan en düşük değerle yola devam etmek daha faydalı olacaktır. Örneğin, örgü yapısı duvar kenarlarında çok küçük yapıldığında bu değer düşecektir, ancak hücre sayısı çok artacaktır. Bu da mümkün olan en az hücre sayısı ile en doğru sonucu elde etme amacına terstir. Şekil 3.9’da bu yöntemin ne kadar karmaşık olduğu daha net görülmektedir.



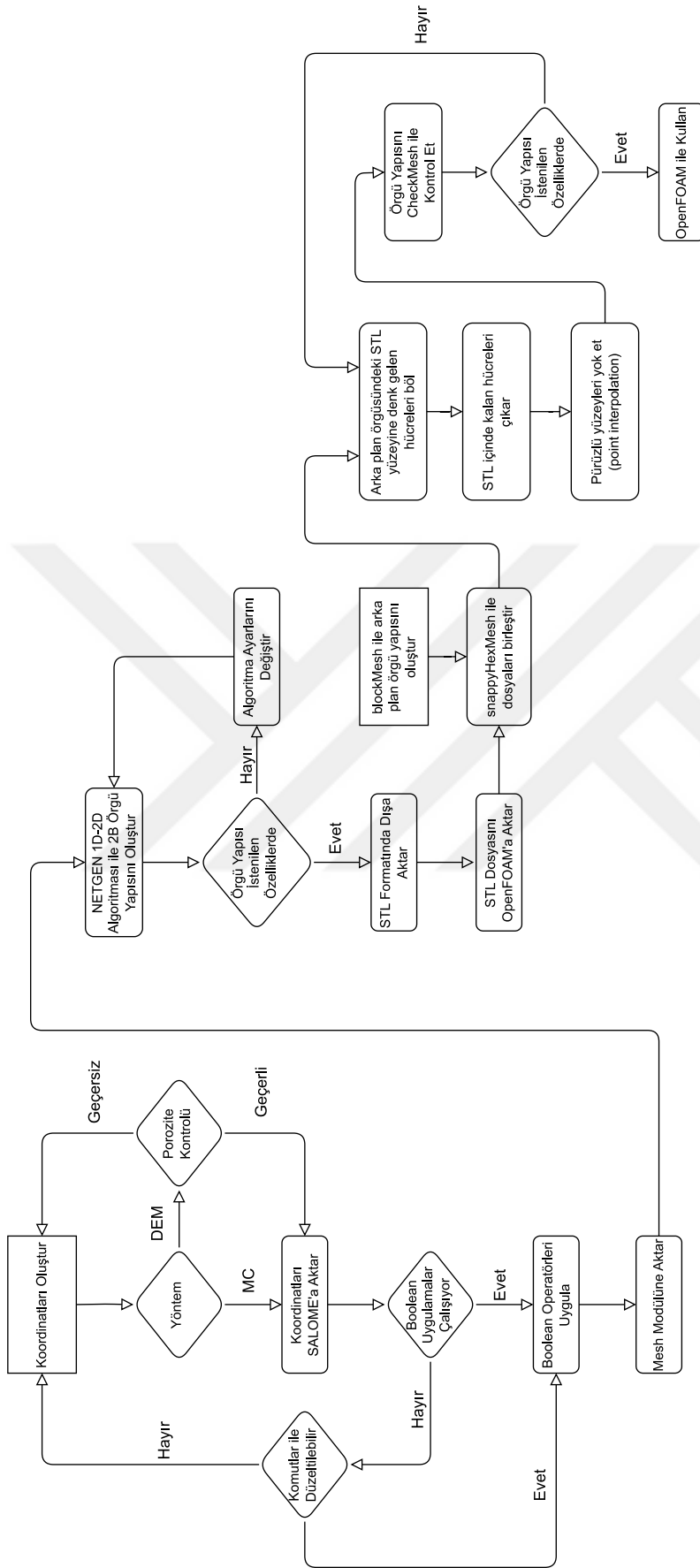
**Şekil 3.10** Örgü yapısını oluşturmak için kullanılan ilk yöntemin akış şeması

İkinci yöntem ise daha karmaşık adımlardan ve uzun bir süreçten oluşmaktadır. Küre koordinatları SALOME'un Shaper Modülü'ne yüklendikten sonra mantıksal (boolean) işlemler gerçekleştirilir. Tek bir parça haline gelen küreler, Mesh Modülü'ne aktarılır ve NETGEN 1D-2D Algoritması seçilerek örgü yapısı oluşturulur. İlk yöntemden farklı olarak burada yalnızca yüzey örgüsü oluşturulur. Şekil 3.11'da gösterildiği gibi elde edilen örgü, STL formatında dışa aktarılır.



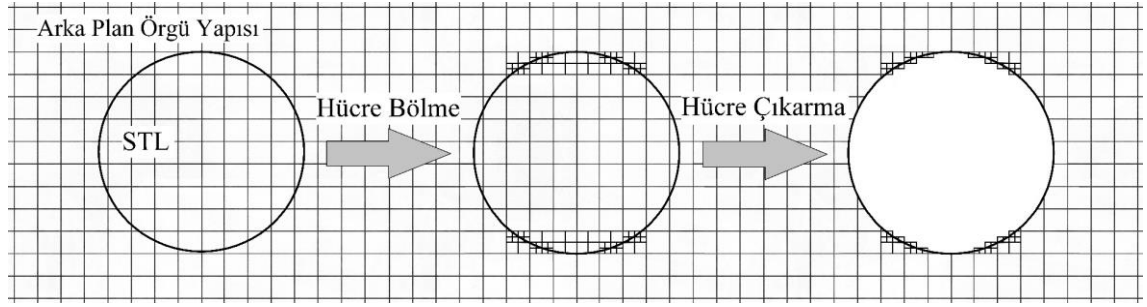
**Şekil 3.11** SALOME ile üretilen 2B örgü yapısı

İlk yöntemde kürelerin içinde bulunduğu konteyner SALOME ile üretilmiştir. Ancak bu yöntemde konteynerin (arka plan örgü yapısı) OpenFOAM'un bir eklentisi olan *blockMesh* ile oluşturulması gerekmektedir. Yine bir OpenFOAM eklentisi olan *snappyHexMesh* ile küreler ve silindir birleştirilir.



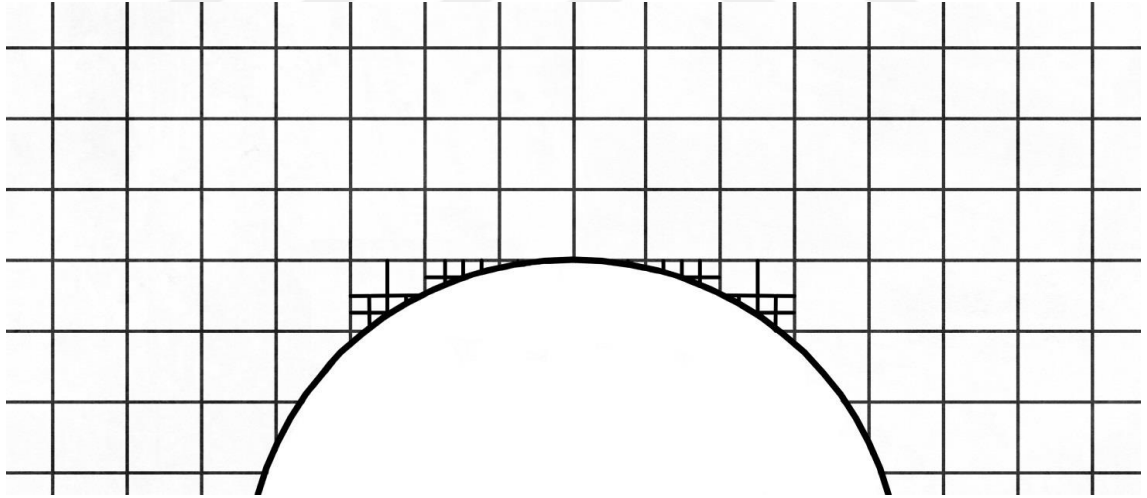
Şekil 3.12 Örgü yapısını oluşturmak için kullanılan ikinci yöntemin akış şeması

İşlem akışının şematik gösterimi Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de görülmektedir. Şekil 3.14’de örgü yapısının son hali görülmektedir.



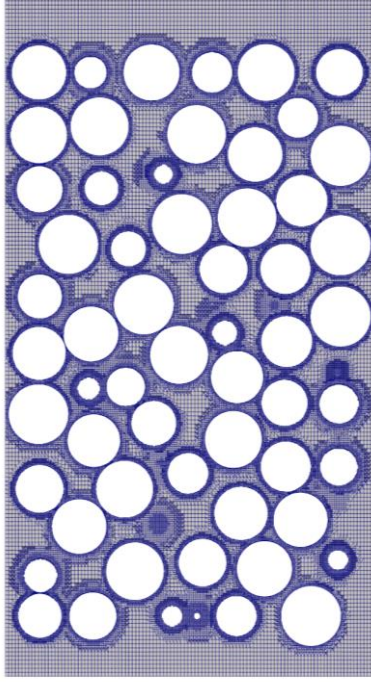
Şekil 3.13 snappyHexMesh yöntemine ait adımların akış şeması

Bu yöntem ile elde edilen örgü yapıları *meshQualityDict* ile OpenFOAM’a girdi olarak verilen maksimum non-orthogonality ve skewness değerlerine sadık kalarak üretilir. Yani, daha kaliteli çıktılara sahiptir. Ancak hücreleri bölme aşaması oldukça önemlidir. Örneğin yüzey normali ile yapılan açı, örgü yapısının ne kadar pürüzsüz olacağını belirler. Bu ayar çok küçük olduğunda çok fazla yüzey düzeltmesi (refinement) gerekmektedir, yüksek olduğunda ise girintili bir yüzey oluşur.



Şekil 3.14 snappyHexMesh yöntemiyle elde edilmiş örgü yapısının son hali

STL geometrinin SALOME ile örgü yapısı oluşturulurken ne çok büyük ne de çok küçük hücrelere bölünmemesi gerekmektedir. Aynı şekilde arka plan örgü yapısı *blockMesh* ile oluşturulurken çok dikkatli olunmalıdır. Eğer çok büyük bir arka plan örgü yapısı olursa *snappyHexMesh* için yeterli sayıda *refinementSurfaces* (min-max) girdisi verilmelidir. Aksi halde örgü yapısında geometrinin keskin yüzeyleri yakalanamayacaktır. Eğer arka plan örgü yapısındaki hücreler gereğinden fazla küçük olursa, bu sefer de son çıktı aşırı hücre sayısına sahip olur.



Şekil 3.15 snappyHexMesh yöntemiyle elde edilen örgünün kesit alanı

Şekil 3.13’de bu yöntem ve aşağıdaki ayarlar ile üretilen bir geometrinin örgü yapısı görülmektedir.

- $\text{max non-orthogonality} \leq 55$
- $\text{mx skewness} \leq 4$
- $\text{nCellsBetweenLevels} = 3$
- $\text{refinementSurfaces} (2-10)$
- $\text{resolveFeatureAngle} < 20$

### 3.2.3. Ayırıklaştırma şemaları

HAD çalışmalarında model oluşturulurken geometri ve örgü yapısının oluşturulmasından sonra genel olarak ayırıklaştırma şemaları belirlenir. Ayırıklaştırma şemaları, örgü

yapısındaki hücreler için akışın yönetici denklemlerine (korunum denklemleri) yaklaşmak için kullanılan yöntemleri ifade eder. Bu ayrıklaştırma şemaları gereklidir, çünkü bilgisayarlar yalnızca ayrık verileri işleyebilirken, sıvı akış denklemleri tipik olarak sürekli formda formüle edilir. Sonlu hacim yöntemi, yönetici denklemleri hesaplama alanındaki kontrol hacimleri üzerinden entegre ederek ayrıklaştırır. Alan bir dizi kontrol hacmine bölünür (örgü yapısı) ve yönetici denklemler bu hacimler üzerinde çözülür. Kontrol hacmi yüzeyleri boyunca değişkenlerin akıları, *upwind differencing*, *central differencing* veya daha yüksek mertebeden (high-order) yöntemler gibi şemalar kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanır. OpenFOAM'da şemalar genel olarak konvektif terimler (*divSchemes*), difüzyon terimleri (*laplacianSchemes*, *snGradSchemes*), gradyent terimleri (*gradSchemes*), ve zaman terimleri (*ddtSchemes*) olarak belirlenir. Bu aşamada birçok seçenek ve kombinasyon vardır. Fakat çoğunlukla simülasyonlar kararlılığı yüksek ve doğruluğu düşük (*first-order*) şemalar ile başlatılır. Bunun sebebi sistemdeki akışın ilk anlarda (iterasyonlarda) üzerinde bulunan atalettir. Probleme göre değişse de yeterli iterasyon yapıldıktan sonra kademeli olarak daha yüksek (*second-order*, *high-order*) doğruluğu olan şemalara geçiş yapılır. Örneğin, konvektif terimlerden hız için başlangıçta *Gauss upwind* şeması kullanılırken yeterli iterasyon yapıldığı takdirde *Gauss linearUpwind* ya da *Gauss LUST* gibi şemalar seçilebilir. Neredeyse bütün problemlerde en az ikinci dereceden doğruluğa sahip şemalar kullanılmalıdır. Ancak bu şemanın derecesi ne kadar yüksek ise o kadar iyi olduğu anlamına gelmez. Kullanılan şemalar yakınsamayı sağlayabilecek kadar da kararlı olmalıdır (OpenFOAM, 2022).

Kullanılan hücre tipine göre şema seçimleri değişiklik göstermektedir. Örneğin non-orthogonality değeri yüksek olan örgülerde (tetrahedral hücreler) gradyent terimlerini limitlemek (sınırlayıcı-*limiter*) sayısal açıdan önemli bir rol oynar. Bu sayede seçilen şemalar daha kararlı davranır. Bu hususta da sınırlayıcı seçerken difüzyonitesi az olan bir sınırlayıcı seçilmelidir, aksi halde elde edilen sonucun doğruluğu azalır. Ek olarak zaman şemaları iki çeşittir. Bunlar, zamandan bağımsız (*steadyState*) ve zamana bağımlı (*backward*, *CrankNicolson*, *Euler*, *localEuler*) şemalardır (OpenFOAM, 2022).

Yapılan simülasyonlarda kullanılan şemalar aşağıda verilmiştir.

- *ddtSchemes* → *Euler*
- *gradSchemes* → *Gauss linear* (default), *cellMDLimited Gauss linear 0.5* (U)
- *divSchemes* → *Gauss LUST* (U), *Gauss linear*
- *laplacianSchemes* → *Gauss linear limited 0.5*

- interpolationSchemes  $\rightarrow$  *linear*
- snGradSchemes  $\rightarrow$  *limited 0.5*

Seçilen bu ayarlar hem geometri hem de örgü yapısının karakteristik özellikleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu kombinasyondan önce test simülasyonlarında farklı kombinasyonlar denenmiş olup belirtilen iki kritere göre en uygun ayarlara karar verilmiştir.

### 3.2.4. Çözüm yöntemi

Diferansiyel denklemin ayrıklaştırılması, çözülecek ifadenin ( $\Phi$ ) ayrık değerlerini elde etmek için çözülmesi gereken bir dizi ayrık cebirsel denklemle sonuçlanır. Bu denklemlerin katsayıları  $\Phi$ 'den bağımsız (doğrusal) veya  $\Phi$ 'ye bağılı (doğrusal olmayan) olabilir. Bu cebirsel denklem sistemini çözme teknikleri, ayrıklaştırma yönteminden bağımsızdır ve bir çözüm elde etmek için izlenebilecek çeşitli yolları temsil eder. Bir doğrusal denklem sistemi, genellikle  $Ax = b$  şeklinde ifade edilir, burada  $A$  bir katsayı matrisi,  $x$  bilinmeyen matrisi ve  $b$  ise sonuç matrisidir. Bu matris denklemi, matris çarpımı ve matris toplaması gibi temel matris işlemleri kullanılarak çözülebilir. Ancak CFD gibi karmaşık sistemlerde ayrık denklemler direkt çözüm yöntemlerine uygun değildir. Bunun yerine iteratif yöntemler kullanılır.

OpenFOAM'da birçok denklem çözücü mevcuttur. Basınç için GAMG (Geometric Agglomerated Algebraic Multigrid) çözücüsü kullanılmıştır. GAMG, özellikle eliptik ve parabolik PDE'lerin ayrıklaştırılmasından kaynaklanan büyük ölçekli lineer denklem sistemlerini verimli bir şekilde çözmek ve çözümü hızlandırmak için yaygın olarak kullanılan sayısal bir yöntemdir. Multigrid yöntemler, farklı çözünürlük seviyelerine sahip bir örgü hiyerarşisi kullanarak denklem sistemini çözmeyi amaçlayan iteratif çözücülerdir. Multigrid yöntemlerin arkasındaki ana fikir, çözümün daha az hücreye sahip örgülerde yakınsamasını hızlandırmak için kaba bir örgü yaklaşımı kullanmaktır. GAMG, hem geometrik multigrid (GMG) hem de cebirsel multigrid (AMG) yöntemlerinin öğelerini birleştirir. GMG, denklemleri farklı çözünürlüklere sahip iç içe geçmiş örgülerden oluşan bir hiyerarşi düzeninde çözer. AMG ise, denklem sistemini temsil eden matrisin özelliklerine dayanarak örgüler hiyerarşisini cebirsel olarak oluşturur (OpenFOAM, 2022).

GAMG çözücülerde hatanın bir kısmından kurtulmak için *smoother* olarak Gauss-Seidel yöntemi gibi farklı teknikler kullanılabilir. Özellikle büyük ve seyrek matrislerin

çözümünde etkili yöntemlerdir. Gauss-Seidel yöntemi, lineer denklem sistemini çözmek için bir başlangıç tahmini kullanır (*initial guess*) ve ardışık adımlarda bu tahmini iyileştirir. Yöntem, lineer denklem sistemini matris formunda  $Ax = b$  şeklinde temsil eder. Başlangıçta  $x^0 = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$  olarak alınabilir. Yöntem,  $x$  matrisinin her bir bileşeni için iteratif bir güncelleme işlemi gerçekleştirir. Her adımda, bir bileşenin değeri diğer bileşenlerin güncellenmiş değerleri kullanılarak yeniden hesaplanır. Bu güncelleme işlemi, iteratif olarak yapılır ve matrisin tüm bileşenleri için tekrarlanır. Gauss-Seidel yöntemi, her adımda güncellenen değerleri kullanarak daha iyi bir çözüm yaklaşımı elde etmeyi hedefler (Greenshields vd., 2022).

Hız için Eşlenik Gradyan yöntemi olarak bilinen PBiCGStab (Preconditioned Bi-Conjugate Gradient Stabilized) çözücüsü kullanılmıştır. GAMG çözücüsüne benzer şekilde PBiCGStab'ın ana avantajı, yakınsamayı hızlandırmak ve iteratif çözücünün kararlılığını iyileştirmek için bir önkoşullama tekniği içermesidir. Önkoşullama adımı, doğrusal sisteme ideal olarak koşul sayısını azaltan ve iteratif yöntemle yakınsamaya daha uygun hale getiren bir matris dönüşümünün uygulanmasını içerir. OpenFOAM'da birçok önkoşullayıcı mevcuttur. Bu çalışmada en sık tercih edilen PBiCGStab/DILU (diagonal-based incomplete LU) kullanılmıştır (OpenFOAM, 2022; Greenshields vd., 2022).

Doğrusal denklem sistemlerinin çözümleri için tolerans değerleri basınç için  $10^{-6}$ , hız ve diğer alanlar için  $10^{-8}$  değeri kullanılmıştır. PIMPLE algoritmasında kullanılan ayarlar birçok denemenin ardından mevcut probleme en uygun olan kombinasyonlar bulunmuştur.

- momentumPredictor → no
- nNonOrthogonalCorrectors → 0
- nOuterCorrectors → 5
- nCorrectors → 3

Yapılan simülasyonlarda bölüm 2.7.1'de anlatılan çözücü ve 2.7.2'de anlatılan çözücü algoritması kullanılmıştır.

### 3.2.5. Sınır koşulları

Deneysel sisteme en yakın modeli oluşturmak için sınır koşulları önemli unsurlardan birisidir. Sistem genel olarak duvarlarla çevrili kapalı bir silindirin içerisinde doğal

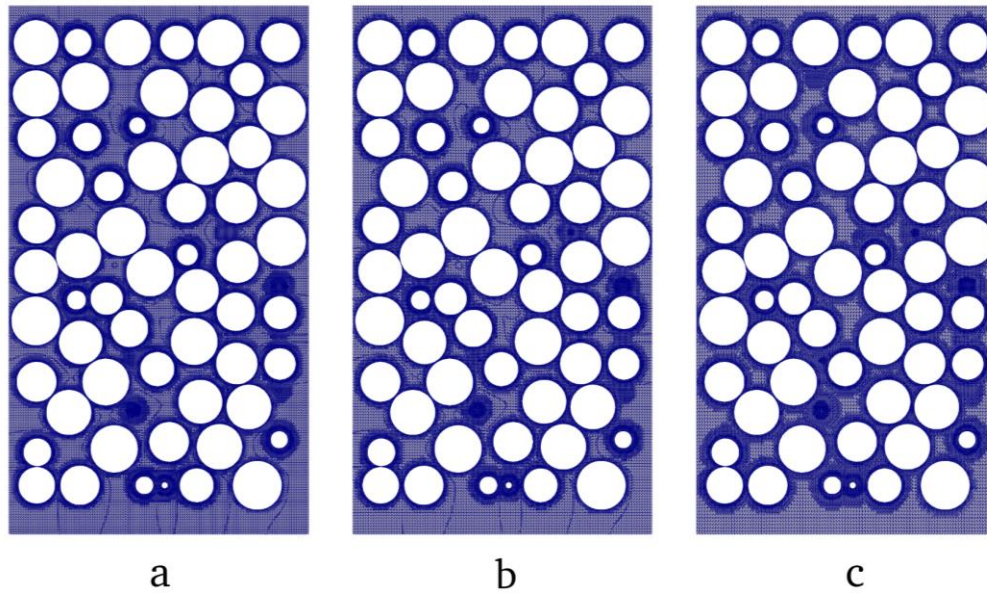
taşıyımı test ettiği için sınır koşulları fiziksel olarak basittir. Tablo 3.5’de sınır koşulları verilmiştir.

**Tablo 3.5** Geometrilere kullanılan sınır koşulları

| Sınır    | U      | p            | T            |
|----------|--------|--------------|--------------|
| Küreler  | noSlip | zeroGradient | fixedValue   |
| Duvarlar | noSlip | zeroGradient | zeroGradient |

### 3.3. Örgü Bağımlılığı Analizi

HAD çalışmalarında örgü bağımlılığı analizi sonucun örgü sayısından etkilenmediği hücre sayısını bulmak için yapılmaktadır. Bir sistemde kullanılan hücre sayısı farklılıklar gösterebilir.

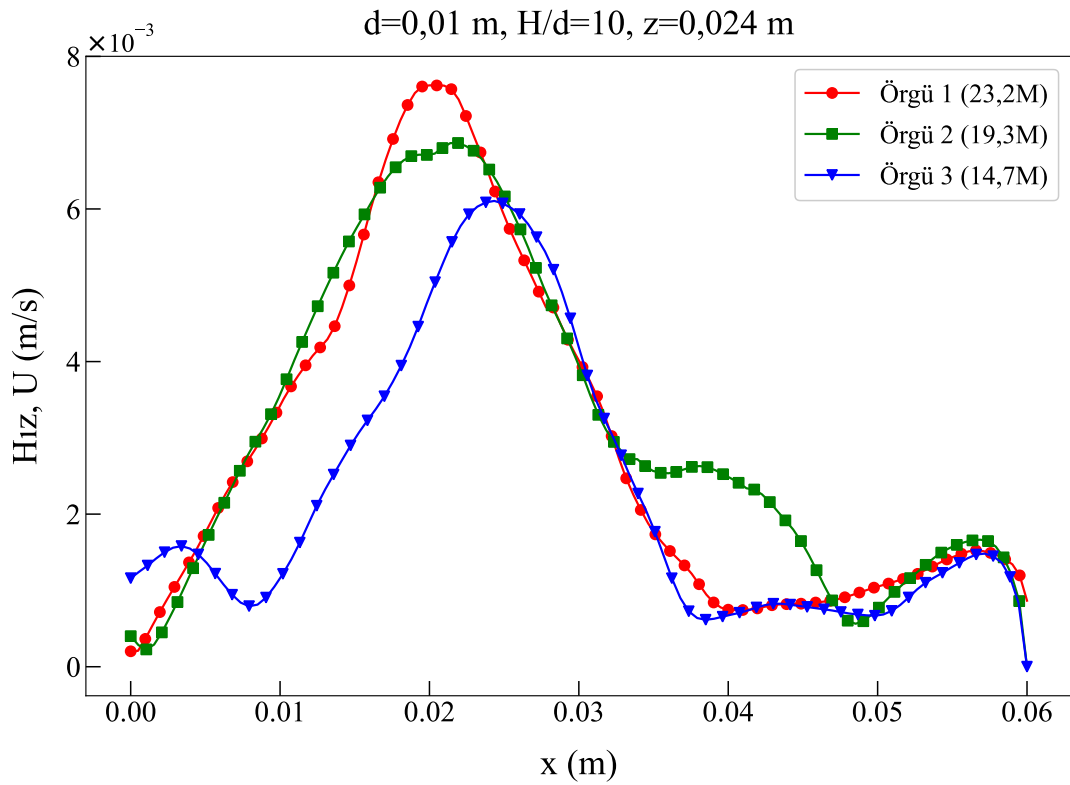


**Şekil 3.16** Analizinde kullanılan örgülerin kesit alanı (a) 23,2M, b) 19,3M, c) 14,7M hücre sayısı)

Örneğin, 1 milyon hücre ile doğru sonuç elde edilebilen bir simülasyonda 5 milyon hücre kullanmak hesaplama zamanı açısından olumsuz etkiye sebep olabilir. Bu sebeple, kaç hücre sayısının yeterli olduğunu bulmak için örgü bağımlılığı analizi yapılmaktadır.

Şekil 3.16’de örgü bağımlılığı analizinde kullanılan 3 farklı hücre sayısına sahip kesitler gösterilmiştir. Elde edilen sonuç hücre sayısından bağımsız olduğunda analiz tamamlanmış olur. Bu çalışma için, örgü bağımlılığı  $d=10$  mm ve  $H/d=10$  geometrisi için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerden, hız değerleri Şekil 3.17’de gösterildiği gibi  $z=24$  mm mertebesinde karşılaştırılmıştır. Şekil 3.17’de gösterilen Örgü 1 ve Örgü 2

arasındaki RMSPE (Root Mean Square Percentage Error) %2,52'dir. Bu sebeple, 23.2M hücre sayısına sahip örgü yapısındaki ortalama hücre boyutlarının simülasyonları gerçekleştirmek için yeterli kesinliğe ve doğruluğa sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca  $d=10$  mm çapındaki kürelerin olduğu geometrinin örgü bağımlılığı  $d=4$  ve  $6$  mm içinde yeterli bir analizdir. Çünkü, artan Rayleigh Sayısı ile beraber  $d=10$  mm'de türbülans daha fazladır. Bu sebeple diğer geometriler için örgü bağımlılığı yapılmaya gerek duyulmamıştır.



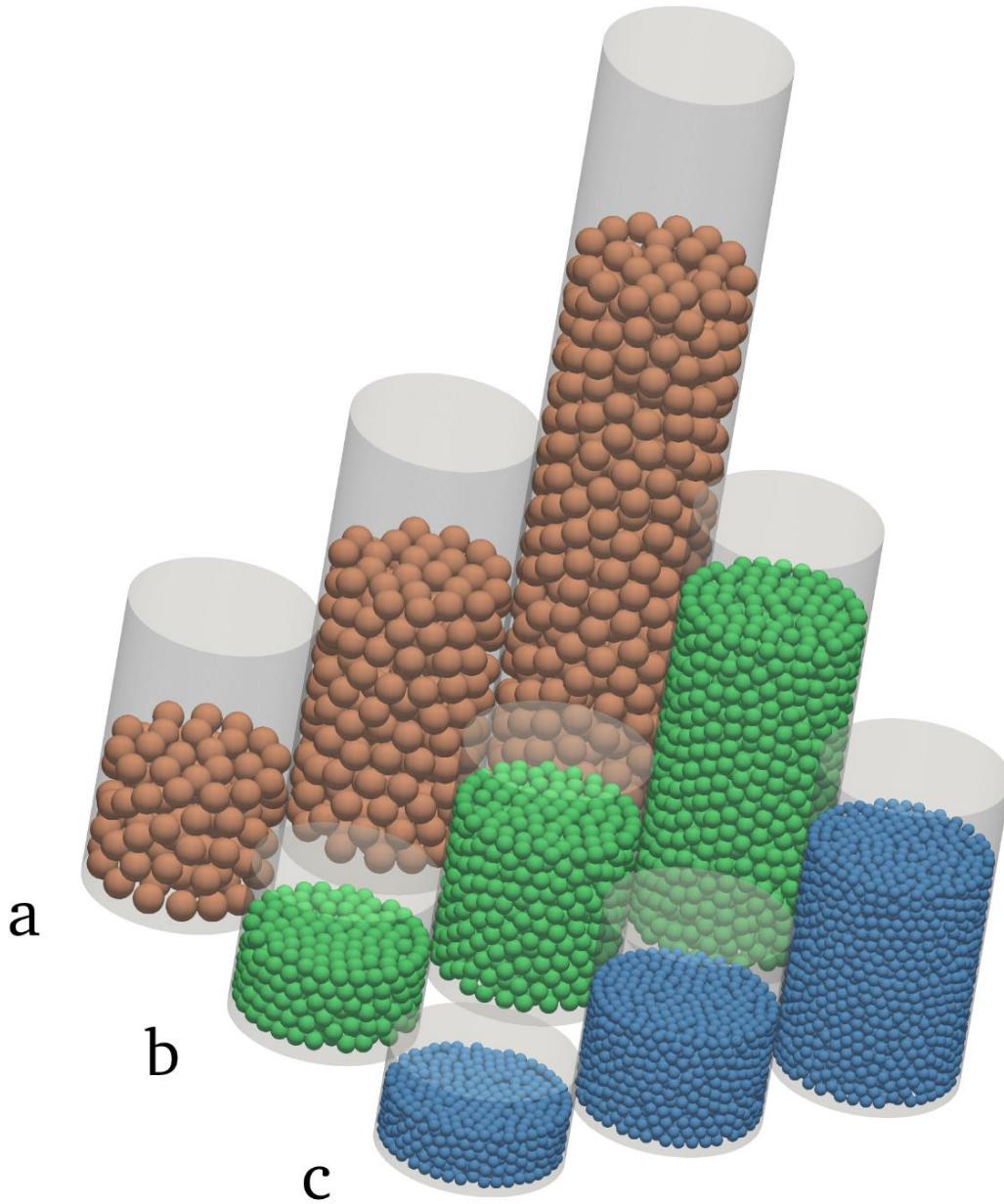
Şekil 3.17 Örgü bağımlılığı analizine ait hız profilleri

Şekil 3.16'da gösterilen  $d=4$ ,  $6$  ve  $10$  mm ve  $H/d=5$ ,  $10$  ve  $20$  geometrileri için Örgü 1 baz alınarak örgü yapısı oluşturulmuştur. Tablo 3.6'de hücre sayıları verilmiştir.

Tablo 3.6 Geometrilere ait hücre sayıları

| Küre Çapı<br>$d(\text{mm})$ | Hücre Sayısı (Milyon) |          |          |
|-----------------------------|-----------------------|----------|----------|
|                             | $H/d=5$               | $H/d=10$ | $H/d=20$ |
| 4                           | 16,60                 | 26,21    | 40,61    |
| 6                           | 13,71                 | 24,24    | 39,57    |
| 10                          | 12,63                 | 23,15    | 37,15    |

Küre sayısının artmasıyla beraber örgü yapısını istenilen değerlerde üretmek zorlaşır. Artan temas noktası bir sorun teşkil ederken, aynı zamanda kürelerin çaplarının küçülmesi de arka plan örgü yapısının daha küçük hücrelerden oluşmak zorunda olduğu anlamına gelir. Yani, küre çapı küçüldükçe ve küre sayısı arttıkça hücre sayısında ani artışlar gerçekleşebilir. Tablo 3.2’de simülasyonların gerçekleştirildiği geometrilere ait küre sayıları mevcuttur.



**Şekil 3.18** Rastgele konumlandırılmış kürelerden oluşan çakıl yatak geometrileri (a)  $d=0,01$  m, b)  $d=0,006$  m ve c)  $0,004$  m kürelerin sırasıyla  $H/d=5$ , 10 ve 20 yatak konfigürasyonları)

### 3.4. Veri Elde Etme ve Verileri İşleme

OpenFOAM son işlem adımı için verimli ve kullanışlı birçok eklentiye sahiptir. Bunlardan birisi olan *heatTransferCoeff* eklentisi ile kürelerin yüzeyindeki ısı transfer katsayısı elde edilir. Bu veriden yararlanarak aşağıdaki formül ile Nusselt Sayısı hesaplanır.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.2)$$

Burada  $h$  ısı transfer katsayısını,  $D$  kürelerin çapını ve  $k$  termal iletkenliği ifade eder. Simülasyonlar zamana-bağlı olduğu için ve 200 saniyelik bir veri olduğundan dolayı elde edilen  $h$  değerinin zaman üzerinden ortalaması alınarak Nusselt Sayısı elde edilir.

## 4. BULGULAR

Elde edilen sonuçlar çakıl yatağı geometrisinde yüksekliğe göre sıcaklık ve hız değişimleri açısından kendi içinde yorumlanmıştır. Nusselt Sayısı değerleri bütün geometrilerde hem Ahn vd., (2022)'nin çakıl yatağında doğal taşınım akışına ilişkin deneysel çalışması ile hem de Tiftikçi vd., (2023)'nin LBM yöntemi ile elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

### 4.1. Nusselt Değerlerinin Karşılaştırılması

Bulgular, deneylerin sonuçları ile OpenFOAM simülasyonları arasında genel olarak iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'de karşılaştırılan sonuçlar incelendiğinde genel olarak, 0,006 m çapındaki küreler için simülasyonlardaki yüzdesel hatalar, 0,004 ve 0,01 m çapındaki kürelerdeki geometriler için yüzdesel hatalardan daha düşüktür. Bunun nedeni, küre konumlarının rastgele oluşturulması ve deneylerde ve sayısal simülasyonlarda farklılık göstermesi olabilir. Ayrıca,  $d=0,01$  m çaplı kürelerin olduğu geometride artan türbülansın ( $Ra_d$  sayısının nispeten daha yüksek olması) hata oranının artmasına sebep olabilir.

**Tablo 4.1**  $d=0,004$  m küre çapındaki geometrilerin Nusselt Sayısı cinsinden karşılaştırmaları (Ahn vd., 2022; Tiftikçi vd., 2023)

| H/d | OpenFOAM | Deney | LBM  | % $\Delta_{Deney}$ | % $\Delta_{LBM}$ |
|-----|----------|-------|------|--------------------|------------------|
| 5   | 23,76    | 25,8  | 26,4 | -7,9               | -10              |
| 10  | 20,27    | 20,7  | 21,1 | -2,1               | -3,9             |
| 20  | 16,99    | 16,4  | 17,6 | -3,7               | -3,4             |

$$\Delta_{Deney} = [Nu_d(Bu\ çalışma) - Nu_d(Deney)] / Nu_d(Deney)$$

$$\Delta_{LBM} = [Nu_d(Bu\ çalışma) - Nu_d(LBM)] / Nu_d(LBM)$$

**Tablo 4.2** d=0,006 m küre çapındaki geometrilerin Nusselt Sayısı cinsinden karşılaştırmaları (Ahn vd., 2022; Tiftikçi vd., 2023)

| H/d | OpenFOAM | Deney | LBM  | % $\Delta_{Deney}$ | % $\Delta_{LBM}$ |
|-----|----------|-------|------|--------------------|------------------|
| 5   | 36,8     | 37,4  | 37,7 | -1,6               | -2,4             |
| 10  | 33,8     | 34,6  | 35,4 | -2,3               | -4,5             |
| 20  | 30,3     | 30,6  | 30,8 | -1,0               | -1,6             |

$$\Delta_{Deney} = [Nu_d(\text{Bu çalışma}) - Nu_d(\text{Deney})]/Nu_d(\text{Deney})$$

$$\Delta_{LBM} = [Nu_d(\text{Bu çalışma}) - Nu_d(\text{LBM})]/Nu_d(\text{LBM})$$

**Tablo 4.3** d=0,01 m küre çapındaki geometrilerin Nusselt Sayısı cinsinden karşılaştırmaları (Ahn vd., 2022; Tiftikçi vd., 2023)

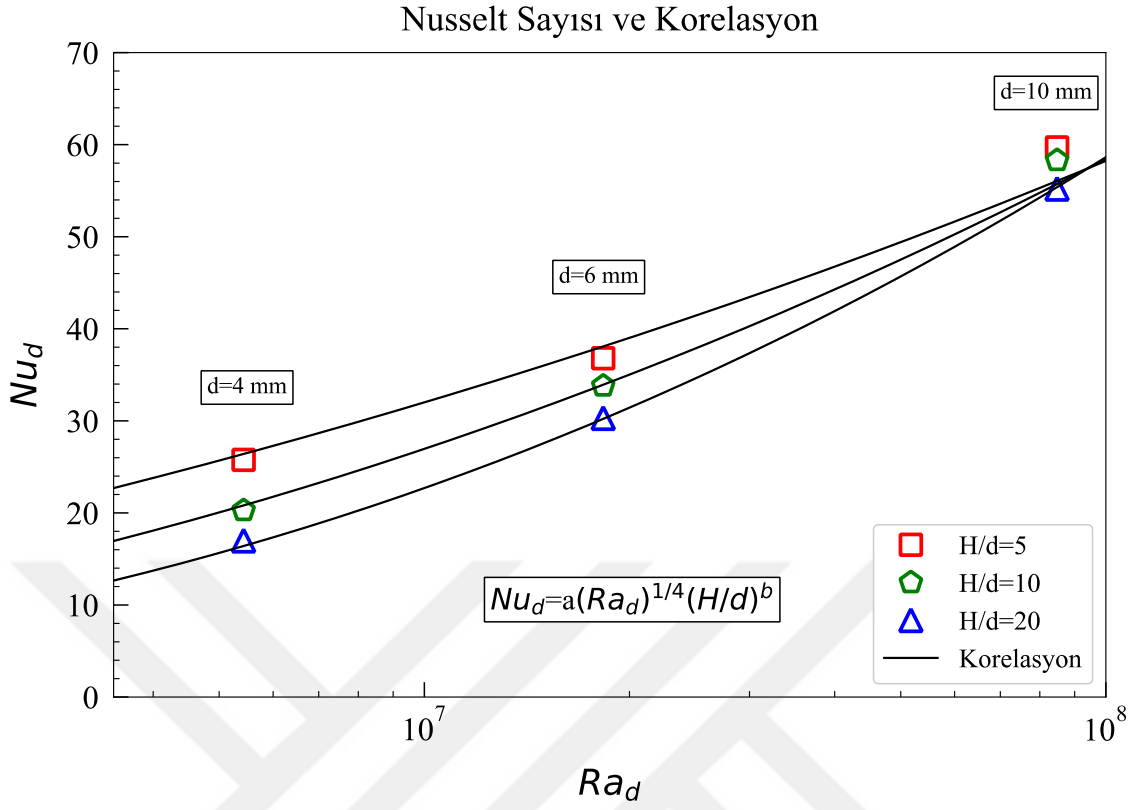
| H/d | OpenFOAM | Deney | LBM  | % $\Delta_{Deney}$ | % $\Delta_{LBM}$ |
|-----|----------|-------|------|--------------------|------------------|
| 5   | 59,7     | 56,6  | 58,1 | 5,5                | 2,8              |
| 10  | 58,3     | 56,9  | 57,5 | 4,2                | 3,1              |
| 20  | 54,5     | 57,1  | 56,0 | -4,6               | -2,7             |

$$\Delta_{Deney} = [Nu_d(\text{Bu çalışma}) - Nu_d(\text{Deney})]/Nu_d(\text{Deney})$$

$$\Delta_{LBM} = [Nu_d(\text{Bu çalışma}) - Nu_d(\text{LBM})]/Nu_d(\text{LBM})$$

Nusselt Sayısındaki farklılıkların d=10 mm kürelere sahip geometrilerde daha fazla olmasının nedenlerinden bir diğeri ise, rastgele konumlandırmadan en fazla etkilenen geometriler olmasıdır. Homojen yapıya yaklaşmanın bir sonucu olarak, küre çapının küçülmesiyle beraber rastgele koordinat farklılığı azalmaktadır.

Şekil 4.1’de deneysel veriler sonucunda d=4, 6 ve 10 mm için elde edilen Nusselt Sayıları ile LBM ve FVM karşılaştırması verilmiştir. Bu verilerden yararlanarak yüksek Prandtl Sayısı ve düşük Rayleigh Sayısına sahip akışlar için yatak yüksekliğine bağlı olan Nusselt Sayısı korelasyonu elde edilmiştir. Elde edilen korelasyon  $5,43 \times 10^6 \leq Ra \leq 8,48 \times 10^7$ ,  $5 \leq H/d \leq 40$  ve  $Pr \sim 2000$  koşullarında geçerlidir.



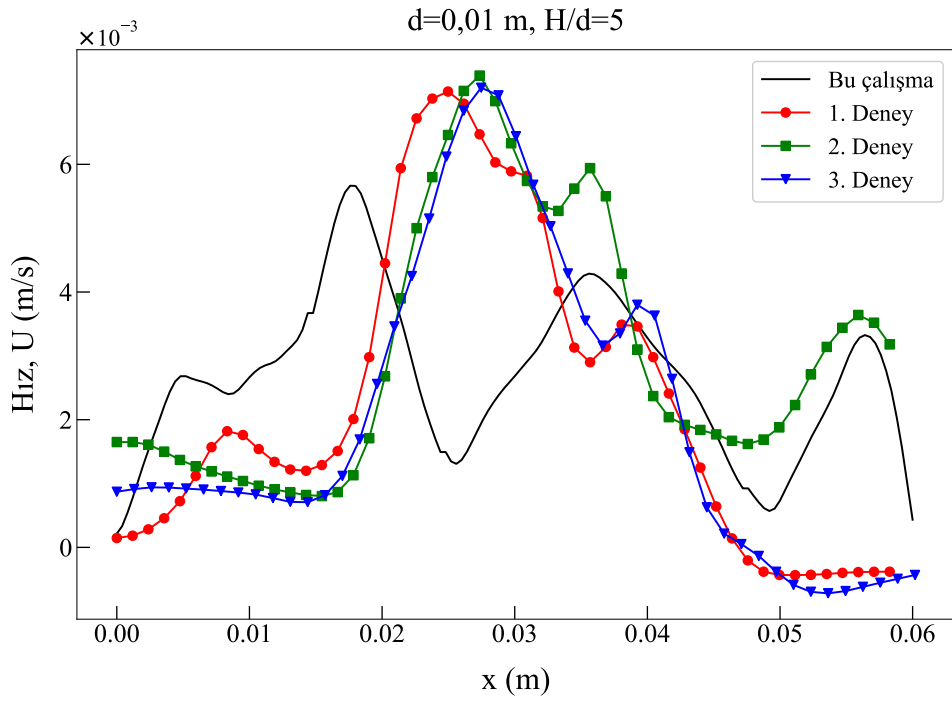
Şekil 4.1 Nusselt korelasyonu (Ahn vd., 2022) ve verilerin karşılaştırılması

#### 4.2. Hız ve Sıcaklık Dağılımları

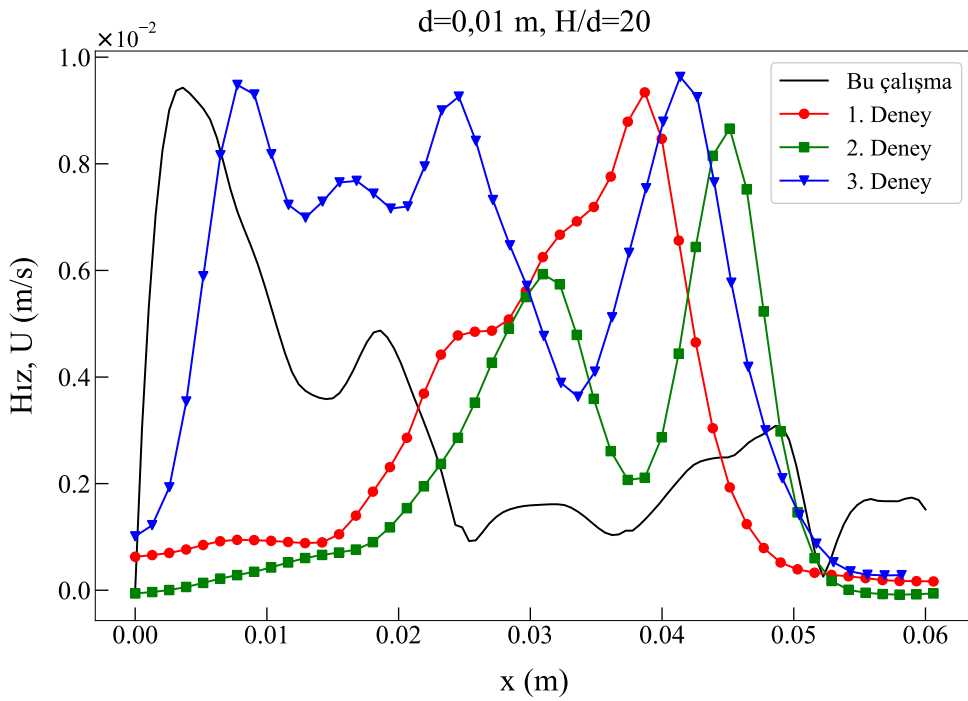
Geometrilere elde edilen veriler bütün küre çaplarında  $H/d=5$ , 10 ve 20 için sırasıyla,  $z=1, 3$  ve  $4d$ ,  $z=2, 5$  ve  $8d$ ,  $z=10, 15$  ve  $20d$ 'dir.

##### 4.2.1. Küre çapı $d=0,01$ m için dağılımlar

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3, OpenFOAM'un hız profillerini  $d=0,01$  m çapındaki kürelerden oluşan geometriler için deneysel verilerle karşılaştırır ve Şekil 4.5-4.6,  $H/d=5$ , 10 ve 20 için çakıl yataktaki hız dağılımlarını sunar. Şekil 4.2 ve 4.3'deki deneysel veriler, çakıl yatak akış sisteminin 0,012 m üzerindeki değerlerdir. Aynı yükseklikten elde edilen veriler kullanılarak bu çalışmanın sonuçları için yapılan sayısal hesaplamalar karşılaştırılmıştır.

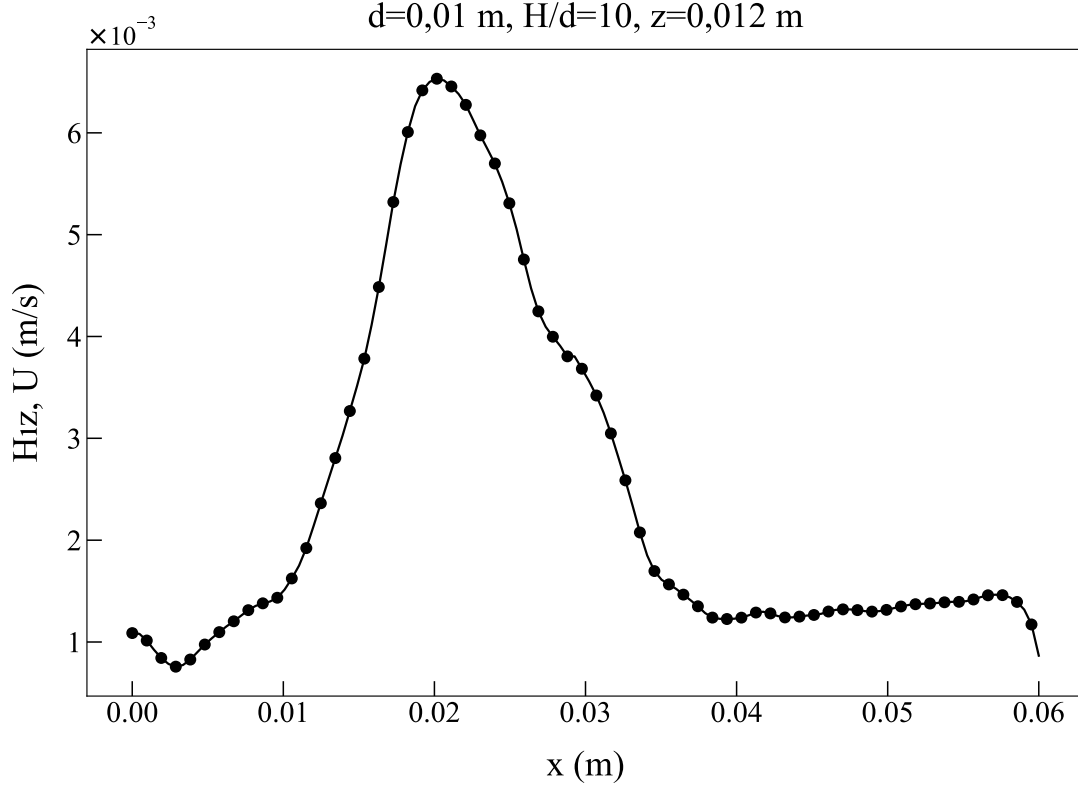


**Şekil 4.2**  $d=0,01 \text{ m}$  ve  $H/d=5$  geometrisinin deneysel (Ahn vd., 2022) ve OpenFOAM hız profillerinin  $z=0,012 \text{ m}$ 'de karşılaştırılması



**Şekil 4.3**  $d=0,01 \text{ m}$  ve  $H/d=20$  geometrisinin deneysel (Ahn vd., 2022) ve OpenFOAM hız profillerinin  $z=0,012 \text{ m}$ 'de karşılaştırılması

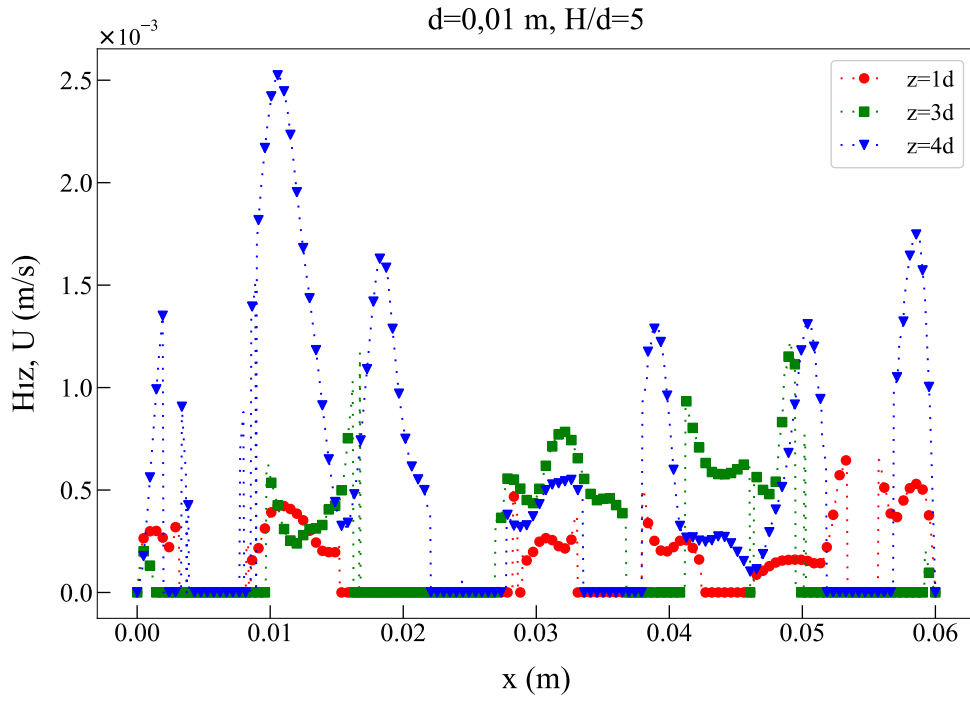
Üç farklı rasgele küre konfigürasyonu için deneysel veriler, Şekil 4.2 ve 4.3'de gösterildiği gibi, z-hızı sıraları çok fazla farklılık göstermese de, birbirinden farklıdır. Kürelerinde aynı sıra içinde olduğu ve karşılaştırılabilir bir profile sahip olduğu görülmektedir.



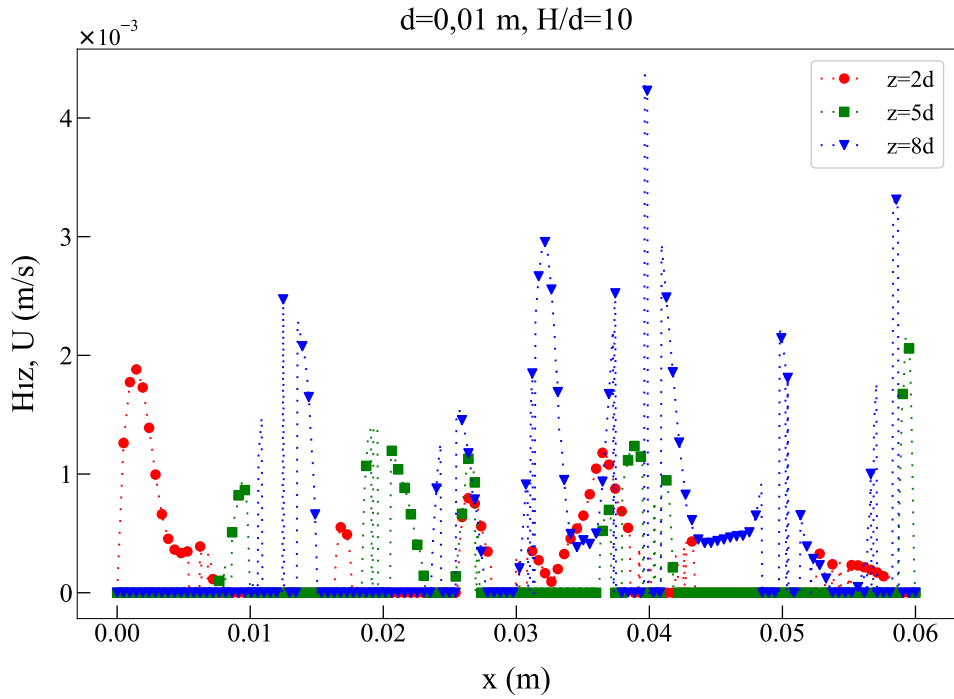
Şekil 4.4 d=0,01 m ve H/d=10 geometrisi için z=0,012 m’de hız profili

Ek olarak, Şekil 4.4 deneysel hız profili verilerinin mevcut olmadığı H/d=10 geometrisi için hız dağılımını sağlar. Maksimum hız noktası  $6,6 \times 10^{-2}$  m/s olup, üretilen hız profilinin H/d=5 ve 20 geometrisi ile sıralama açısından tutarlı olduğu görülmektedir.

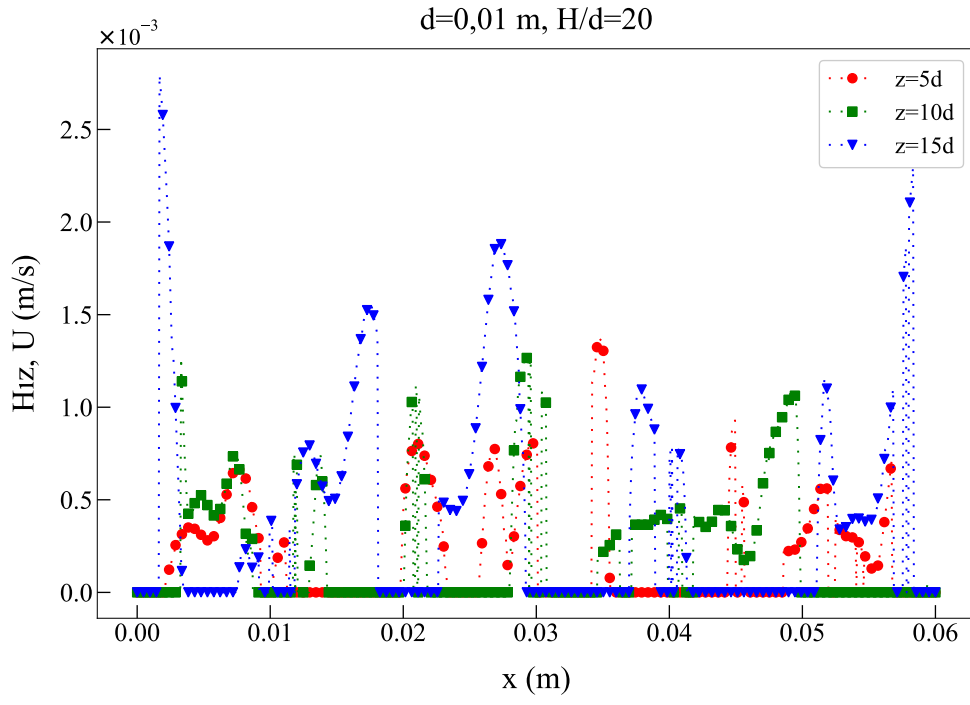
Şekil 4.5-4.7 hız dağılımlarını göstermektedir. Akış geometrisi karmaşık ve rastgele olduğundan hız dağılımları düzensizdir. Çakıl yatak geometrisinin giriş ve orta kısmından alınan profillerde bu dağılımların birbirine yakın olduğu, üst kısımdan alınan profillerde ise biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu, seçilen yüksekliklerdeki kürelerin rastgele olmasından kaynaklanan ani daralmalara veya ısıtılan sıvının yoğunluğundaki azalmaya bağlanabilir.



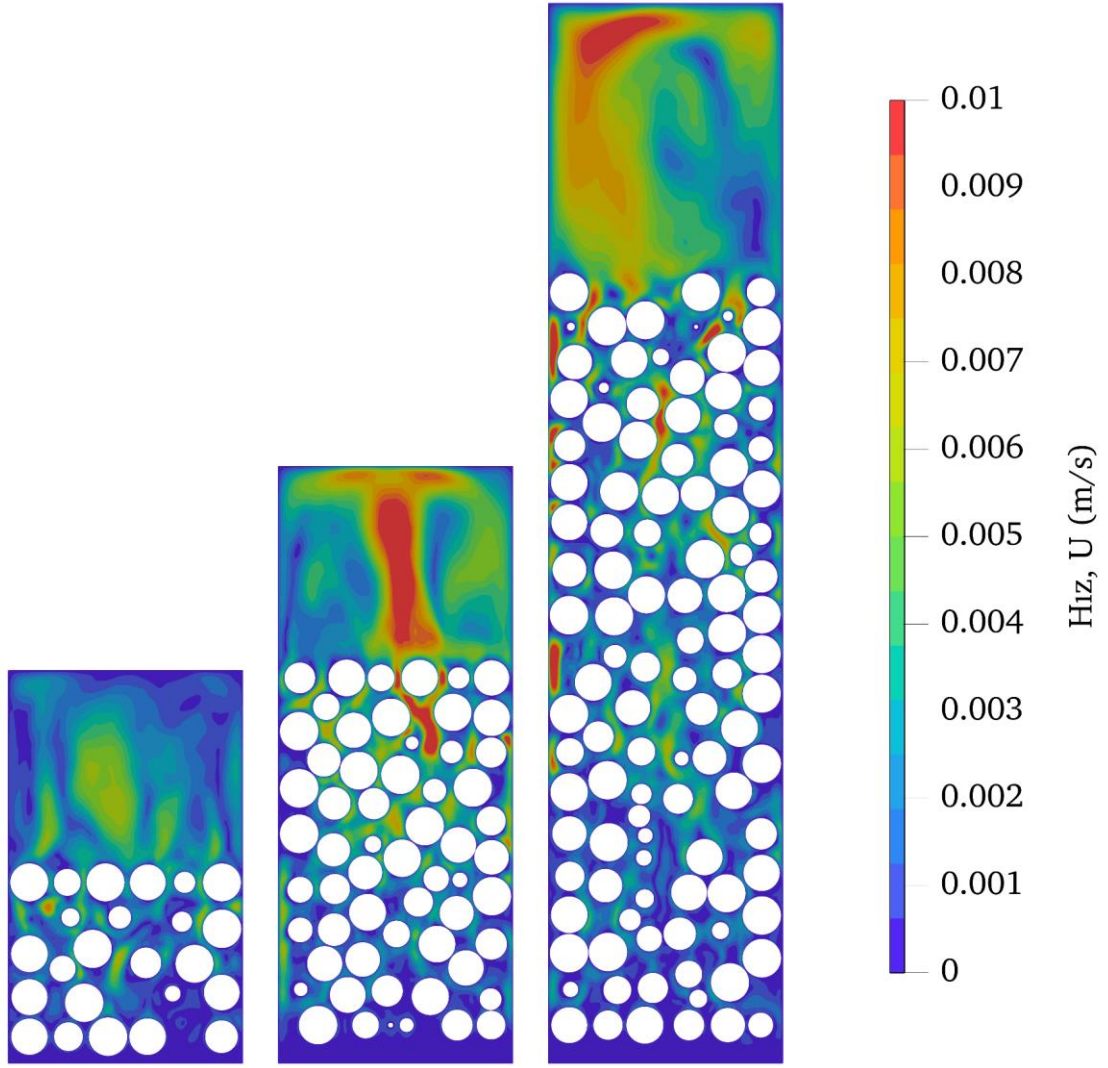
Şekil 4.5  $d=0,01 \text{ m}$  ve  $H/d=5$  geometrisi için  $z=1d, 3d$  ve  $4d$  yüksekliğindeki hız profilleri



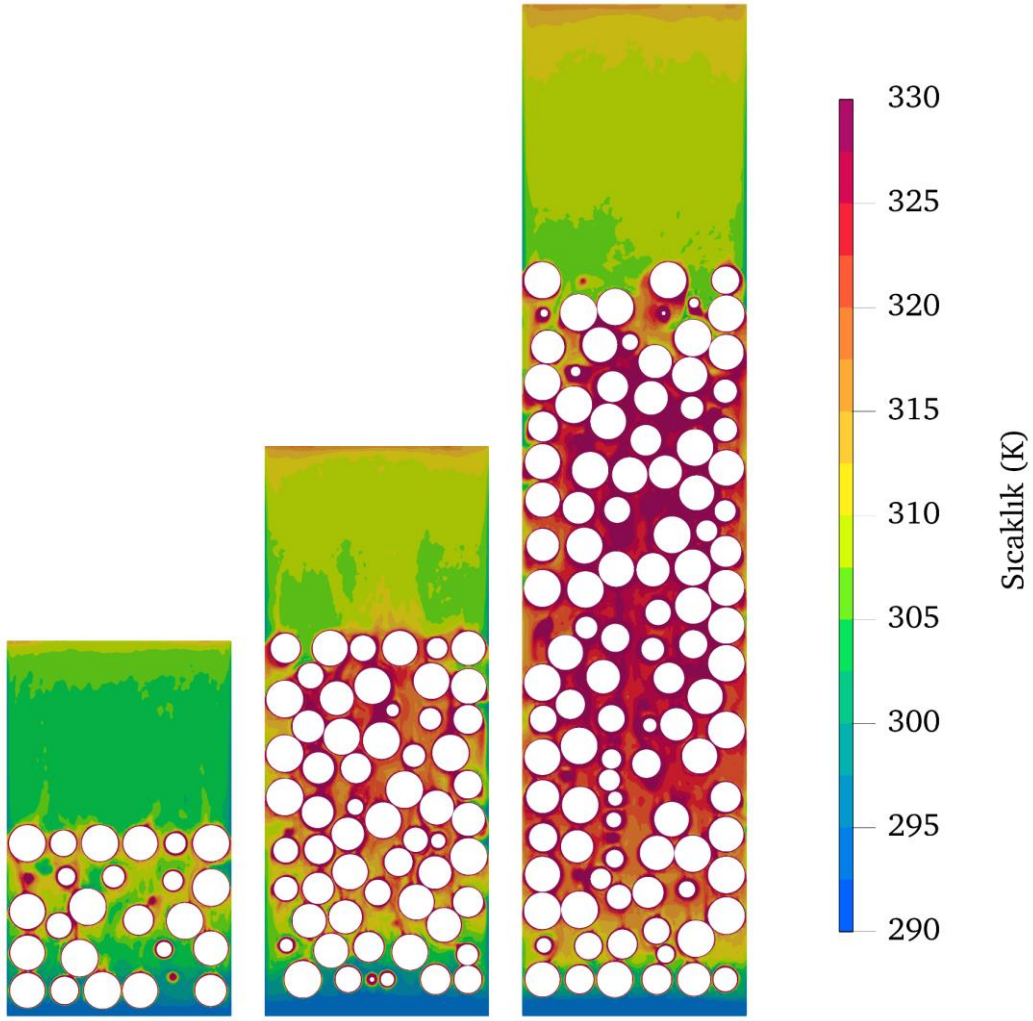
Şekil 4.6  $d=0,01 \text{ m}$  ve  $H/d=10$  geometrisi için  $z=2d, 5d$  ve  $8d$  yüksekliğindeki hız profilleri



**Şekil 4.7**  $d=0,01 \text{ m}$  ve  $H/d=20$  geometrisi için  $z=5d$ ,  $10d$  ve  $15d$  yüksekliğindeki hız profilleri



Şekil 4.8  $d=0,01$  m geometrileri için zamana göre ortalaması alınan hız kesitleri



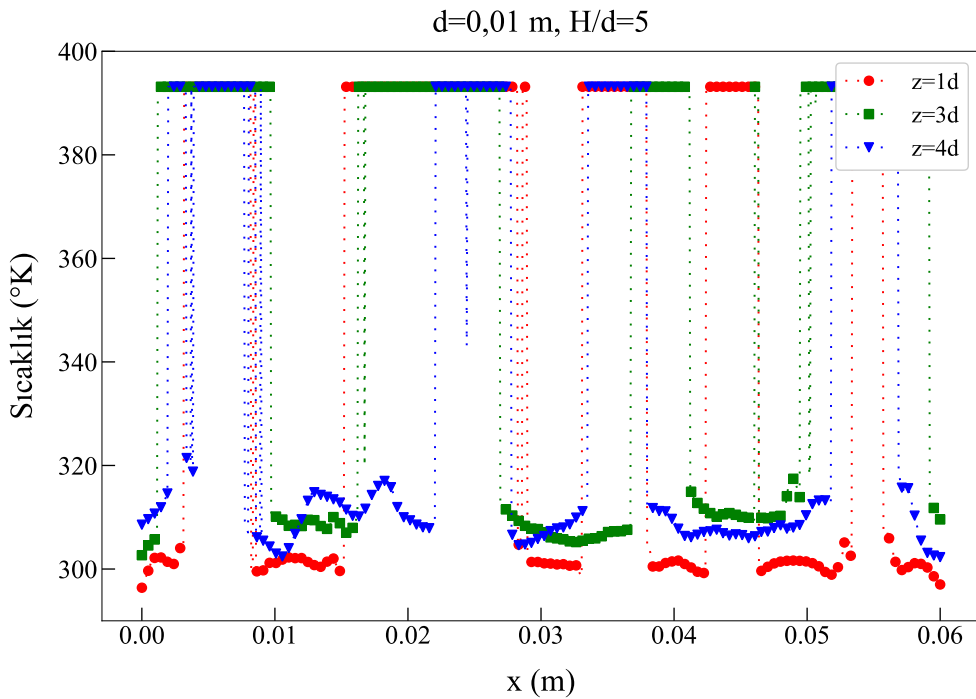
**Şekil 4.9**  $d=0,01$  m geometrileri için zamana göre ortalaması alınan sıcaklık kesitleri

Şekil 4.8 ve 4.9, çakıl yatak geometrisinde doğal taşınım akışı için hız ve sıcaklık dağılımını gösteren kesitlerdir. Küreler arasındaki karmaşık akışta ortalama sıcaklık ve hızın geometrinin üst bölgesinde bir miktar yükseldiği açıktır. Bu artışlar, Şekil 4.8 ve 4.9’de görülebileceği gibi,  $H/d$  oranı yükseldiğinde daha belirgin hale gelmektedir.

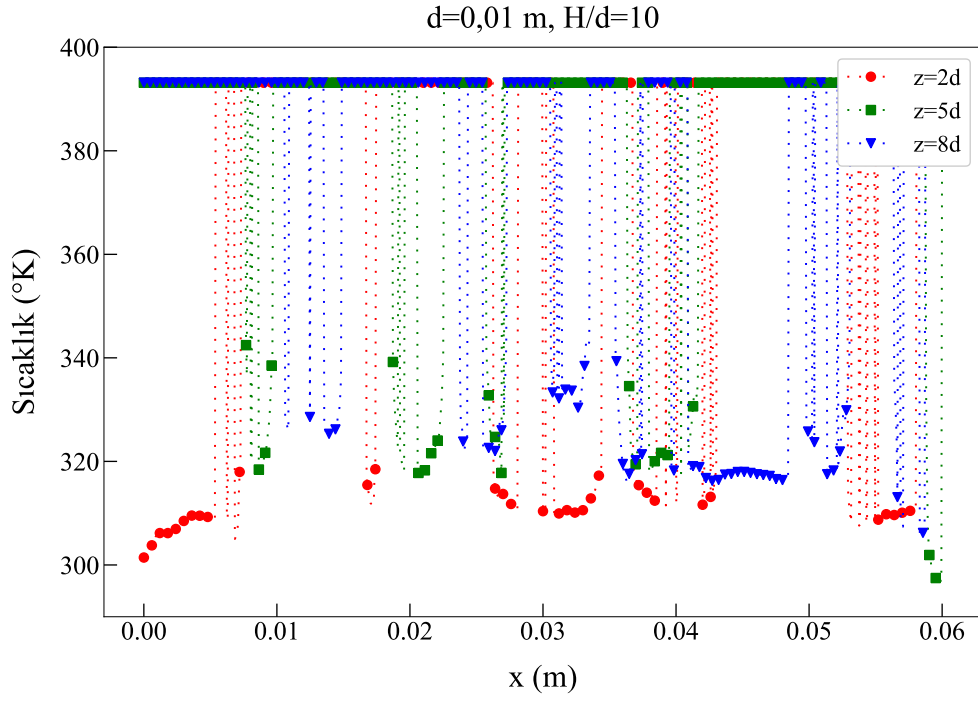
Hız dağılımları gibi sıcaklık dağılımları da rastgele kürelerden oluştuğundan dolayı karmaşık bir görünüme sahiptir. Girişe yakın kısımlarda, orta ve üst kısımlarda sıcaklık dağılımları genel olarak birbirine yakın olmakla birlikte, özellikle orta ve üst kısımdaki bazı lokal noktalarda ani sıcaklık yükselmeler görülmektedir. Şekil 4.5-4.7’deki hız grafikleri incelendiğinde, bu bölgelerin hızın çok düşük değerlere düştüğü yerler olduğu görülmektedir. Şekil 4.10-4.12 incelendiğinde,  $H/d=5$  durumu için sıcaklığın 300 ile 320 K arasında olduğu ve yüksekliğe bağlı olarak önemli bir değişiklik göstermediği açıktır.

Ayrıca sıcaklık dağılımları düzgündür ve herhangi bir yerel noktada ani sıcaklık artışı gözlenmez.  $H/d=10$  durumu için sıcaklığın yüksekliğe bağlı olarak bir miktar değiştiği ve 300 ile 340 K aralığında olduğu görülmektedir.

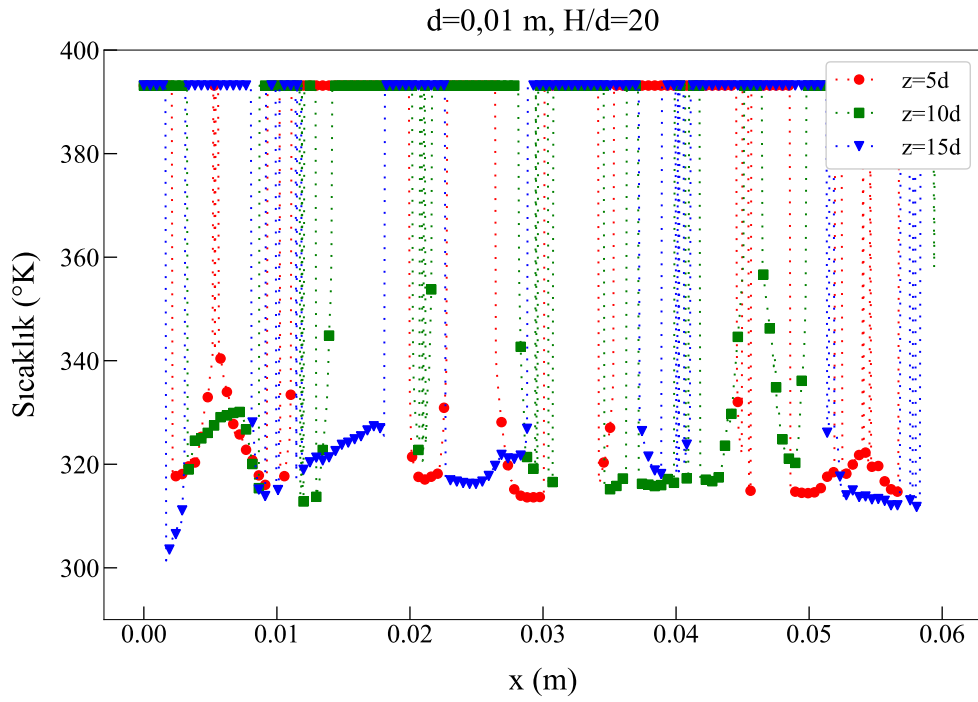
Sıcaklık dağılımları bozulmuş ve bazı lokal noktalarda ani sıcaklık artışları ile sıcaklığın yaklaşık 340 K mertebesine ulaştığı gözlemlenmiştir.  $H/d=20$  durumu için sıcaklığın yüksekliğe bağlı olarak değiştiği ve yaklaşık 320 ile 360 K aralığında olduğu görülmektedir. Ayrıca, sıcaklık dağılımları düzgün değildir ve lokal noktalardaki sıcaklık sıcak noktalarının sayısı artmıştır. Maksimum sıcaklığın yaklaşık 360 K'ye ulaştığı gözlenmiştir. Sonuç olarak yükseklik arttıkça sıcaklık profilinin bozulduğu ve ani sıcaklık artış noktalarının sayısının arttığı söylenebilir. Yükseklik arttıkça çakıl yataktaki küre sayısının arttığı ve dolayısıyla akışın karmaşıklığının arttığı ve lokal sıcak noktaların oluştuğu sonucuna varılabilir.



**Şekil 4.10**  $d=0,01$  m ve  $H/d=5$  geometrisi için  $z=1d$ ,  $3d$  ve  $4d$  yüksekliğinde sıcaklık profilleri



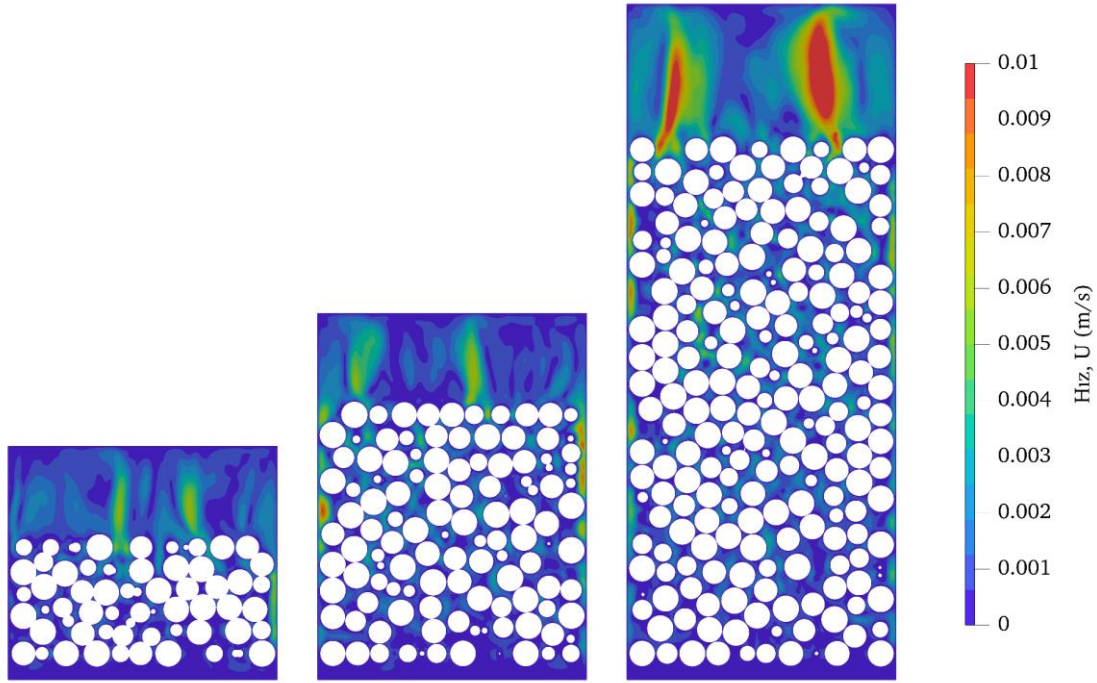
Şekil 4.11  $d=0,01 \text{ m}$  ve  $H/d=10$  geometrisi için  $z=2d$ ,  $5d$  ve  $8d$  yüksekliğinde sıcaklık profilleri



Şekil 4.12  $d=0,01 \text{ m}$  ve  $H/d=20$  geometrisi için  $z=5d$ ,  $10d$  ve  $15d$  yüksekliğinde sıcaklık profilleri

#### 4.2.2. Küre çapı $d=0,006$ m için dağılımlar

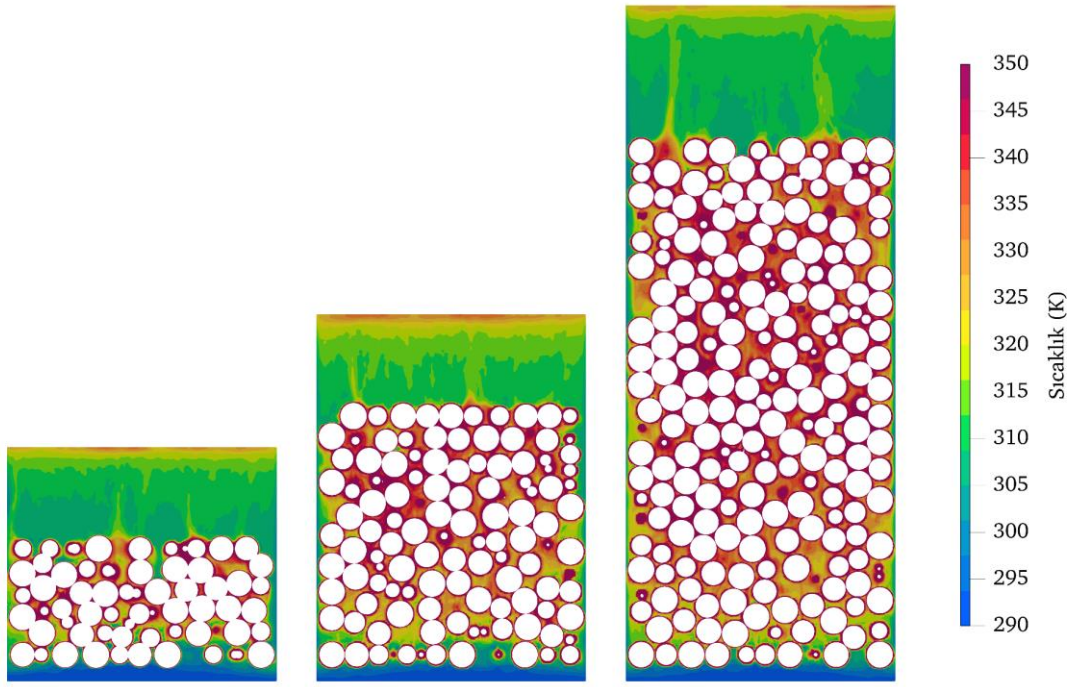
Deneyssel veri olmadığından dolayı  $d=0,006$  m için elde edilen sonuçlar kendi içinde karşılaştırılmıştır. Şekil 4.9 ve 4.13’de görüldüğü üzere  $d=0,01$  m küre çapına sahip geometrilerden daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmıştır. Ancak, lokal hızlanmalar ve kürelerin çıkışındaki hız profilleri daha düşüktür.



Şekil 4.13  $d=0,006$  m geometrilerinin zamana göre ortalaması alınan hız kesitleri

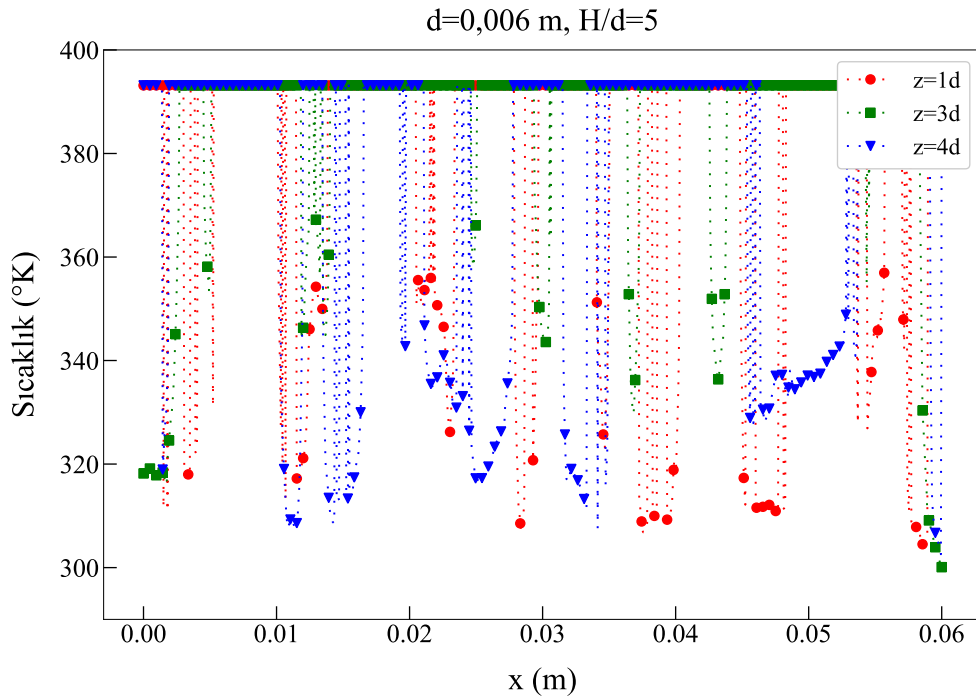
Çakıl yatağın daha fazla küreye sahip olması ve akışkanın geçtiği alanın daha az olması aynı sınır koşulları altında daha fazla lokal sıcaklık noktalarının oluşmasına sebep olduğu görülmektedir. Şekil 4.15-4.17 incelendiğinde  $H/d=5, 10$  ve  $20$  geometrileri için maksimum sıcaklık değerleri  $370$  K civarındadır. Ayrıca yükseklik farkı  $d=0,01$  m’de olduğu gibi hem lokal sıcaklık noktalarının sayısını hem de maksimum sıcaklık değerini etkilememiştir.

Yüksek sıcaklık noktalarının bu kadar fazla olmasının sebebi, küre çapının düştükçe temas noktalarının artması ve akışkanın geçiş yaptığı konumlardaki daralmalar olabilir. Diğer bir neden, küre sayısındaki artış ve küre çapının küçülmesiyle beraber Bölüm 3.3’de bahsedilen örgü yapısının oluşturulmasındaki zorluktur.

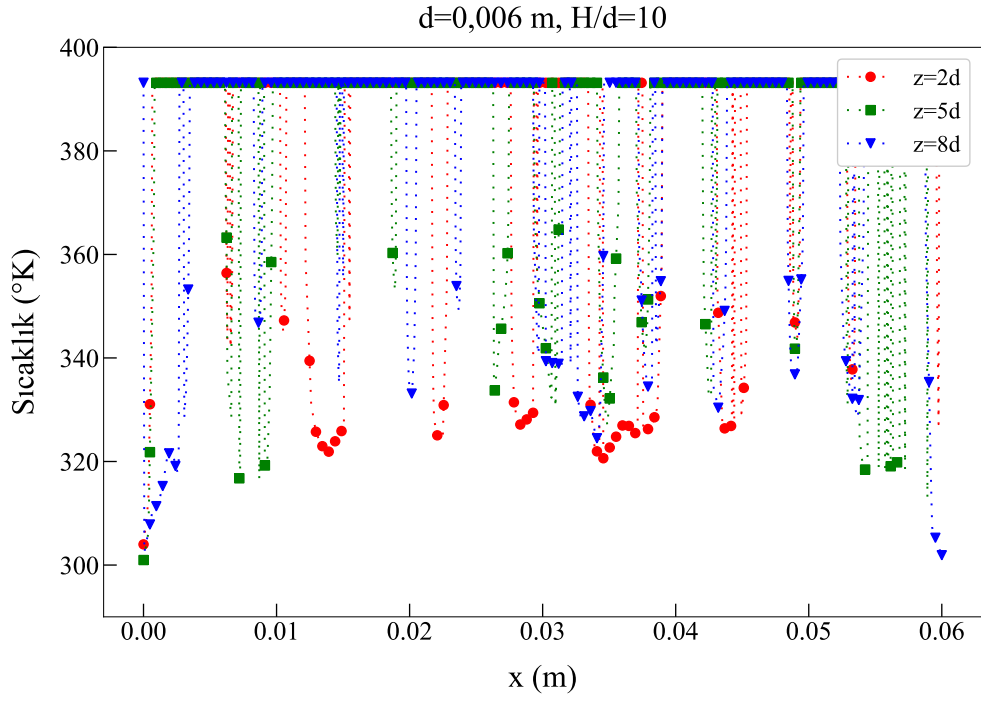


Şekil 4.14  $d=0,006$  m geometrilerinin zamana göre ortalaması alınan sıcaklık kesitleri

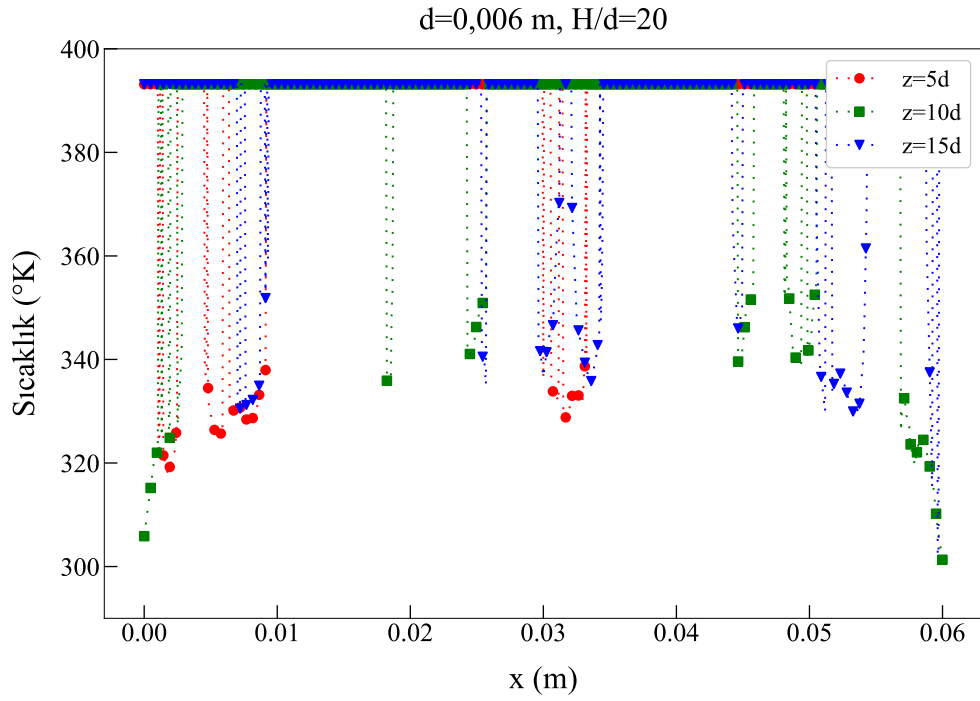
Akışkanın geçtiği dar bölgelerde neredeyse sonsuz küçük hücre kullanılmadığından dolayı o noktalarda sıcaklık sınır koşuluna oldukça yakın olacaktır. Bunu pratik olarak yapmak neredeyse imkansızdır.



Şekil 4.15  $d=0,006$  m ve  $H/d=5$  geometrisi için  $z=1d$ ,  $3d$  ve  $4d$  yüksekliğinde sıcaklık profilleri

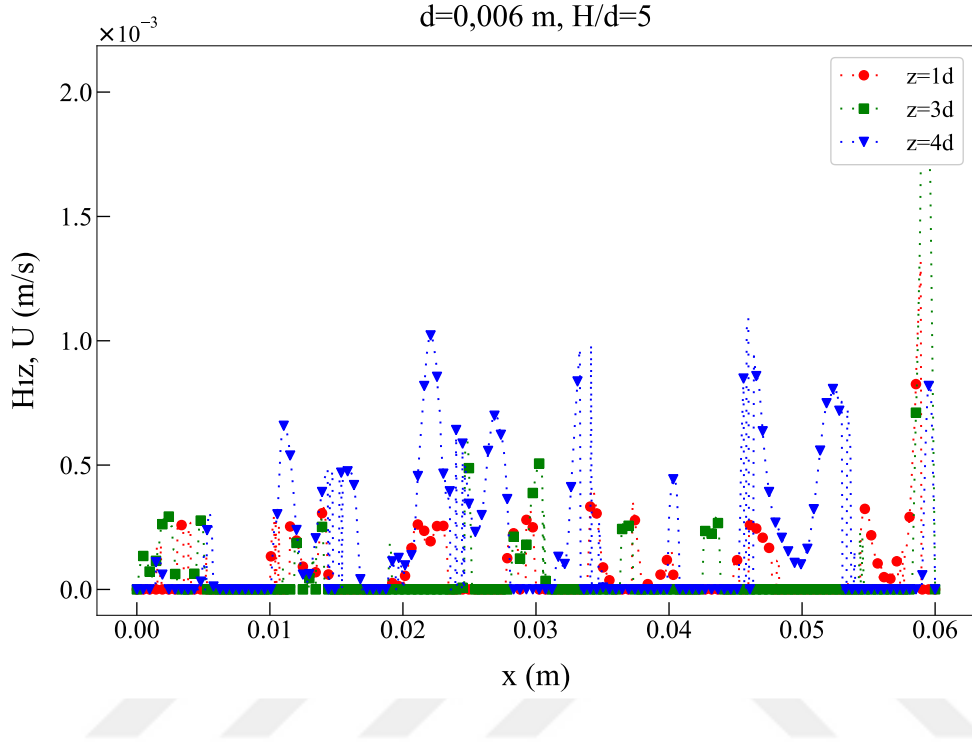


Şekil 4.16  $d=0,006 \text{ m}$  ve  $H/d=10$  geometrisi için  $z=2d$ ,  $5d$  ve  $8d$  yüksekliğinde sıcaklık profilleri

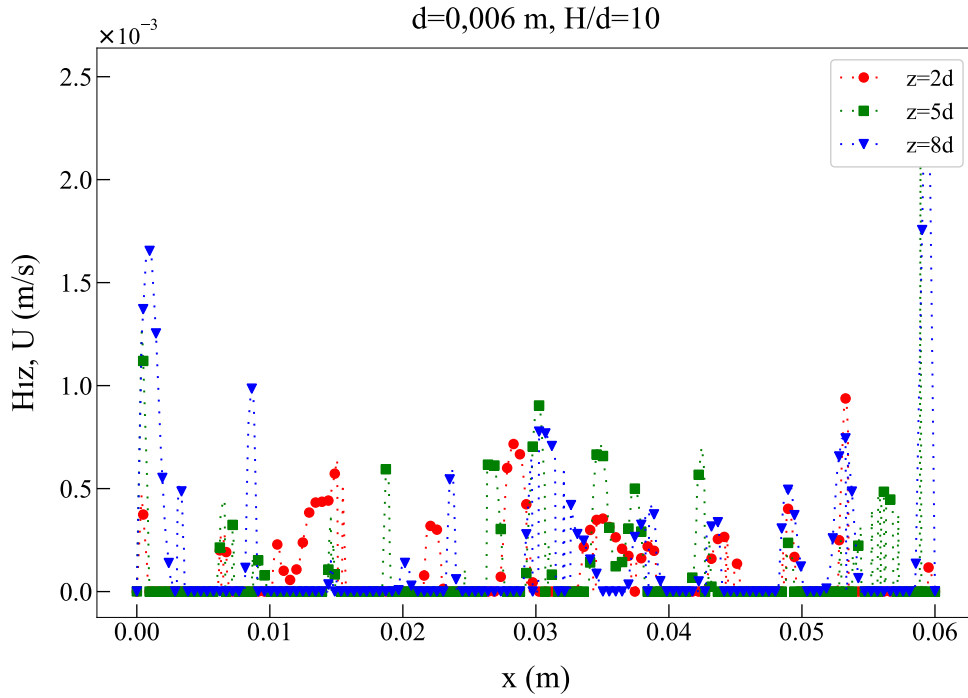


Şekil 4.17  $d=0,006 \text{ m}$  ve  $H/d=20$  geometrisi için  $z=5d$ ,  $10d$  ve  $15d$  yüksekliğinde sıcaklık profilleri

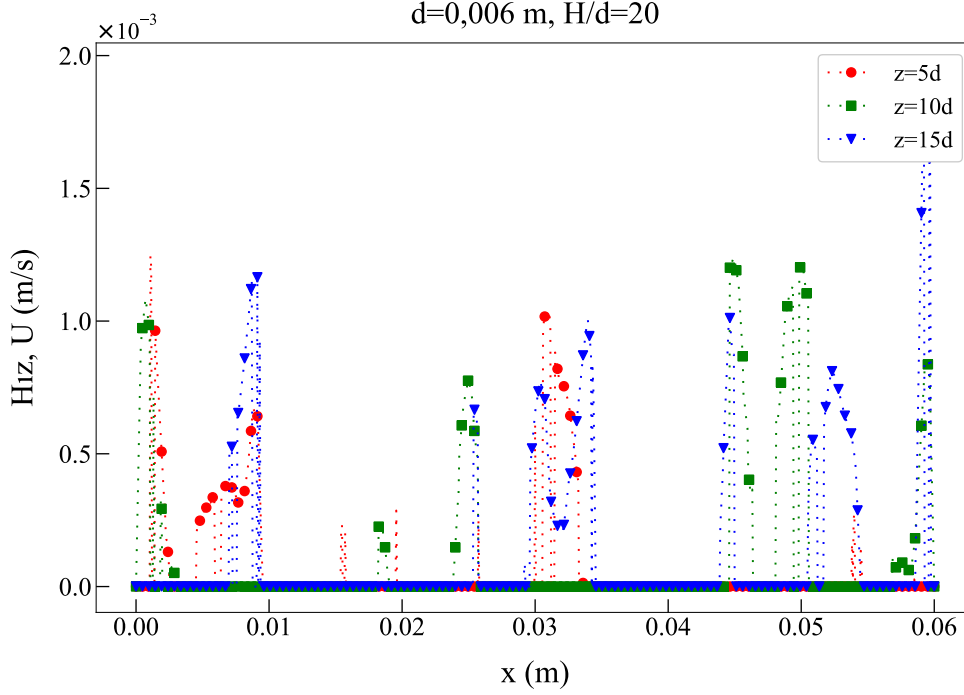
Şekil 4.18-4.19’de gösterilen hız dağılımları incelendiğinde yukarıda bahsedilen olayın hız içinde geçerli olduğu görülmektedir. Hızdaki lokal maksimumlar dışında, ortalama değerlerin  $d=0,01$  m çapındaki kürelerin olduğu geometrilere göre daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18  $d=0,006$  m ve  $H/d=5$  geometrisi için  $z=1d$ ,  $3d$  ve  $4d$  yüksekliğinde hız profilleri



Şekil 4.19  $d=0,006$  m ve  $H/d=10$  geometrisi için  $z=2d$ ,  $5d$  ve  $8d$  yüksekliğinde hız profilleri

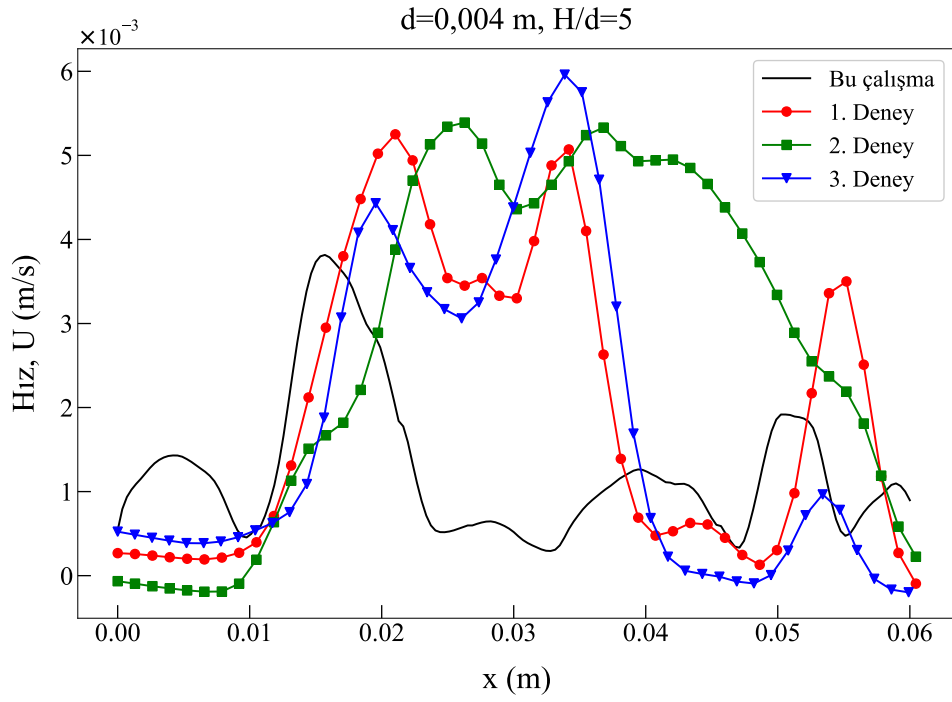


Şekil 4.20  $d=0,006$  m ve  $H/d=20$  geometrisi için  $z=5d$ ,  $10d$  ve  $15d$  yüksekliğinde hız profilleri

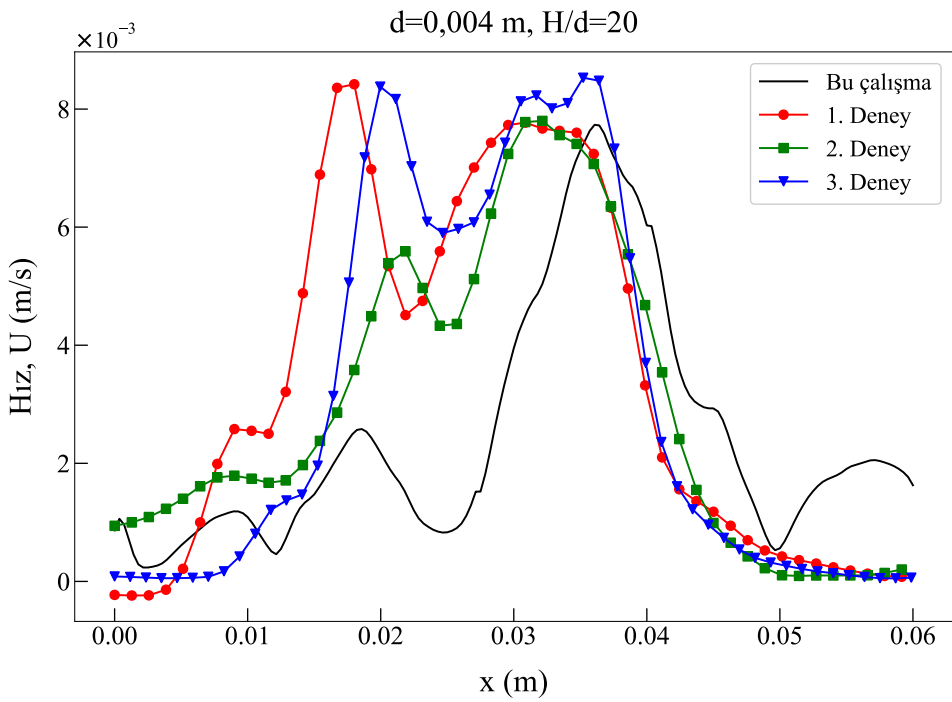
#### 4.2.3. Küre çapı $d=0,004$ m için dağılımlar

Küre çapının küçülmesiyle beraber artan küre sayısı örgü oluşturma aşamasın hücre sayısının çok fazla artmasına sebep olmaktadır. Artan hücre sayısı (örneğin 100 milyon hücre) bu çalışmada kullanılan bilgisayar ile ancak aylar sonunda bir sonuç verecektir. Çünkü, her bir simülasyon zamanı 200 saniyedir. Şekil 4.21 ve 4.22’de deneysel veriler ile OpenFOAM hız profilleri karşılaştırılmıştır. Özellikle Şekil 4.21’de sayısal analiz verisi düşük kesinlikte sonuç vermiştir.

Her ne kadar maksimum noktalar yakın olmasa da sonuçlar merteye cinsinden tutmaktadır. Şekil 4.22’de ise sayısal sonuçlar ile deneysel veriler daha fazla örtüşmektedir. Bütün geometrilerde olduğu gibi en düşük doğruluğun  $H/d=5$ ’de olduğu görülmektedir.

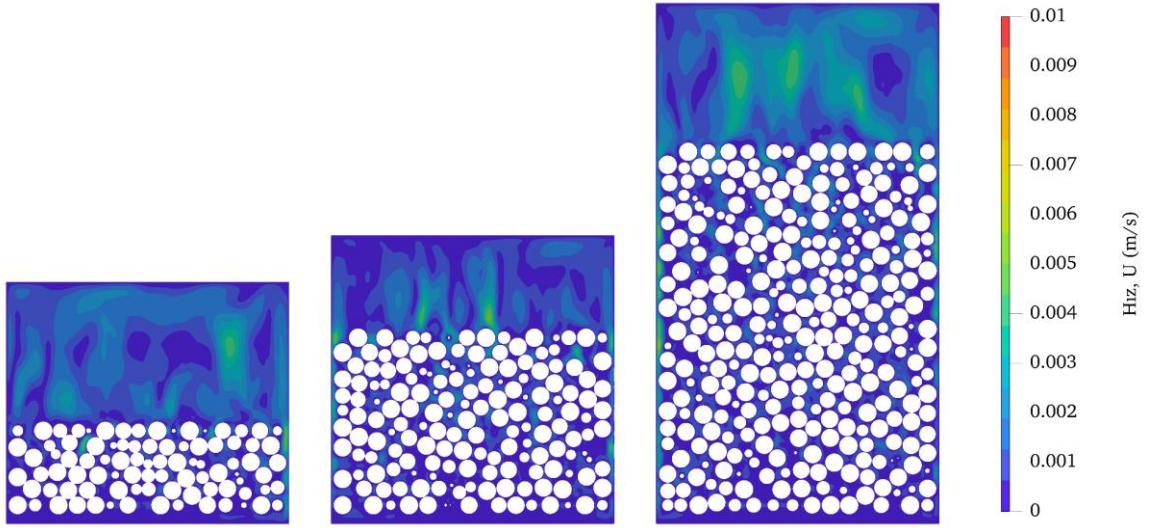


**Şekil 4.21**  $d=0,004 \text{ m}$  ve  $H/d=5$  geometrisinin deneysel (Ahn vd., 2022) ve OpenFOAM hız profillerinin  $z=0,012 \text{ m}$ 'de karşılaştırılması

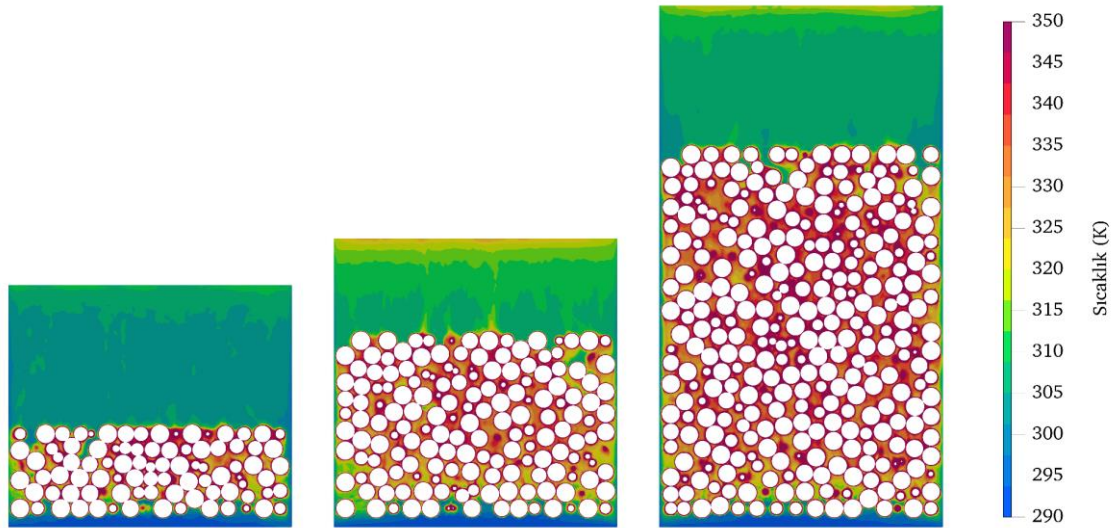


**Şekil 4.22**  $d=0,004 \text{ m}$  ve  $H/d=20$  geometrisinin deneysel (Ahn vd., 2022) ve OpenFOAM hız profillerinin  $z=0,012 \text{ m}$ 'de karşılaştırılması

Şekil 4.23’de görüldüğü üzere  $d=0,006$  ve  $0,01$  m küre çapına sahip geometrilerden daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmıştır. Ancak, Şekil 4.24’deki kesitlerden anlaşıldığı üzere lokal hızlanmalar ve kürelerin çıkışındaki hız profilleri daha düşüktür.

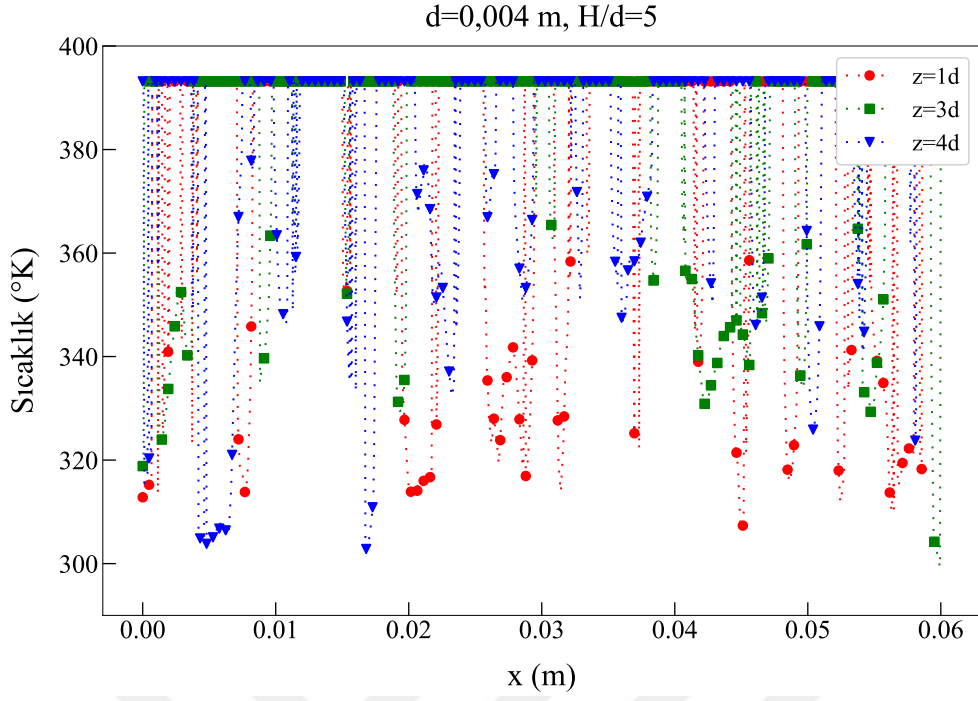


Şekil 4.23  $d=0,004$  m geometrileri için zamana göre ortalaması alınan hız kesitleri

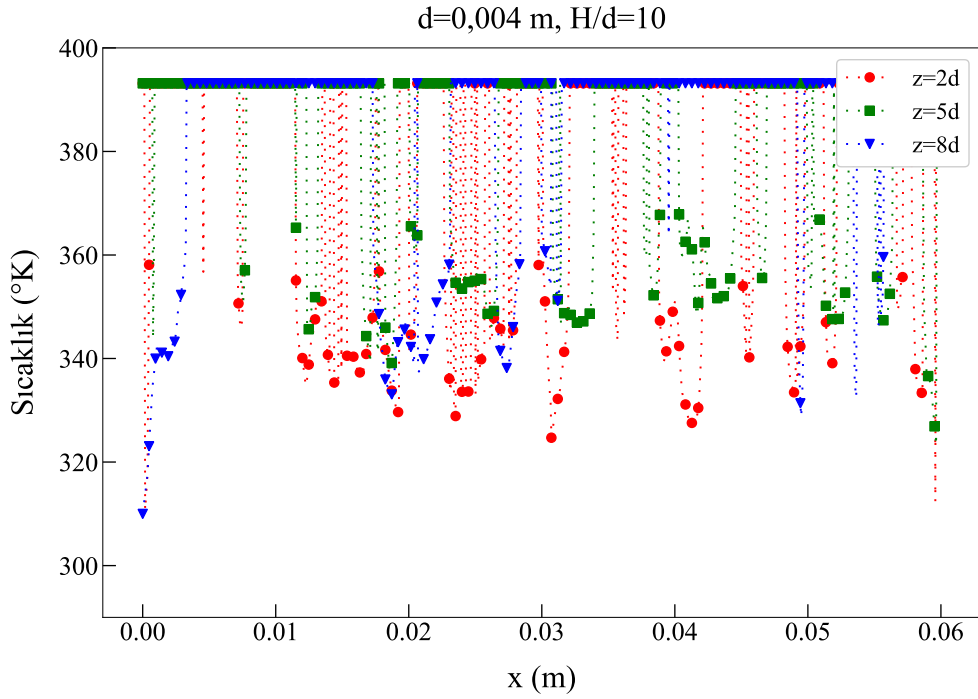


Şekil 4.24  $d=0,004$  m geometrileri için zamana göre ortalaması alınan sıcaklık kesitleri

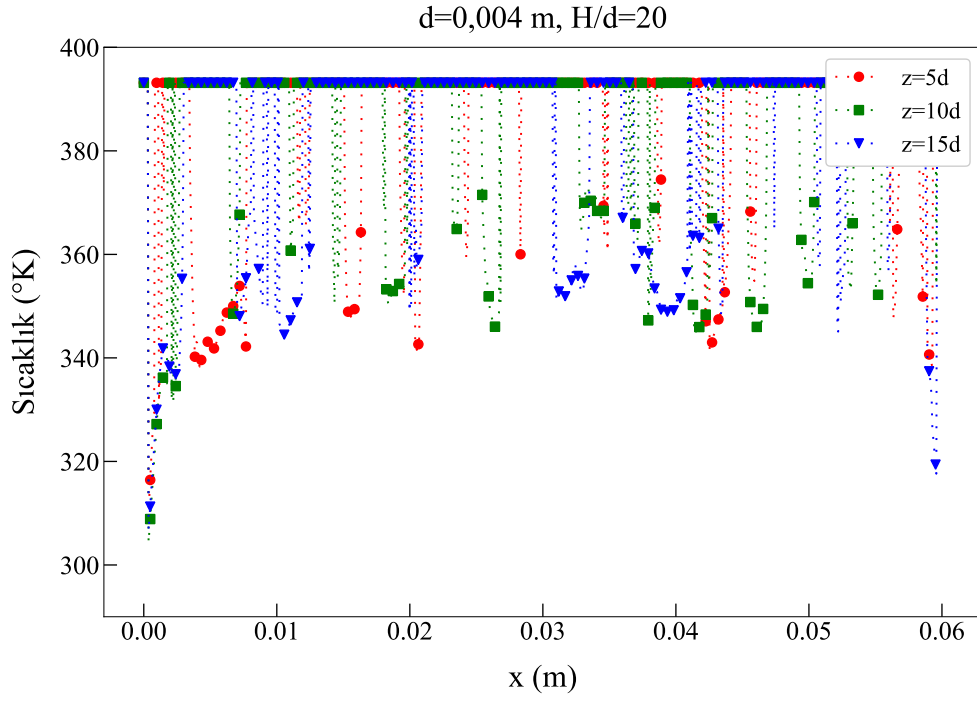
Şekil 4.25-4.27 incelendiğinde kürelerin çapının küçülmesiyle beraber sistemin daha kaotik bir hal aldığı görülmektedir. Akış alanının daralmasıyla beraber, çekirdekte ulaşılan sıcaklıklar neredeyse sınır koşuluyla eşittir.



**Şekil 4.25**  $d=0,004 \text{ m}$  ve  $H/d=5$  geometrisi için  $z=1d$ ,  $3d$  ve  $4d$  yüksekliğinde sıcaklık profilleri

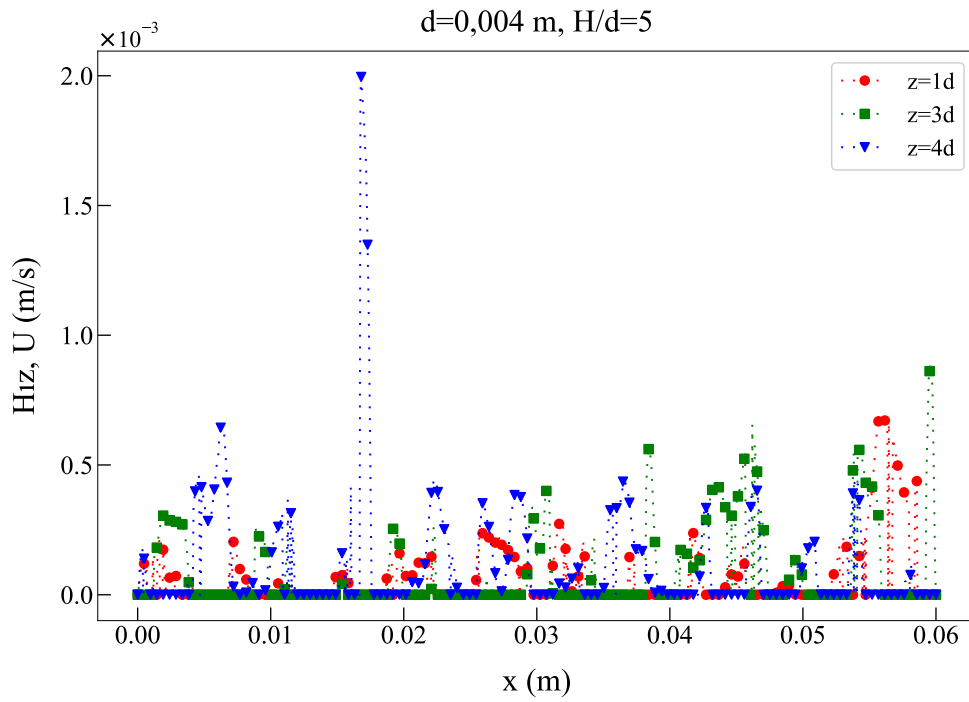


**Şekil 4.26**  $d=0,004 \text{ m}$  ve  $H/d=10$  geometrisi için  $z=2d$ ,  $5d$  ve  $8d$  yüksekliğinde sıcaklık profilleri

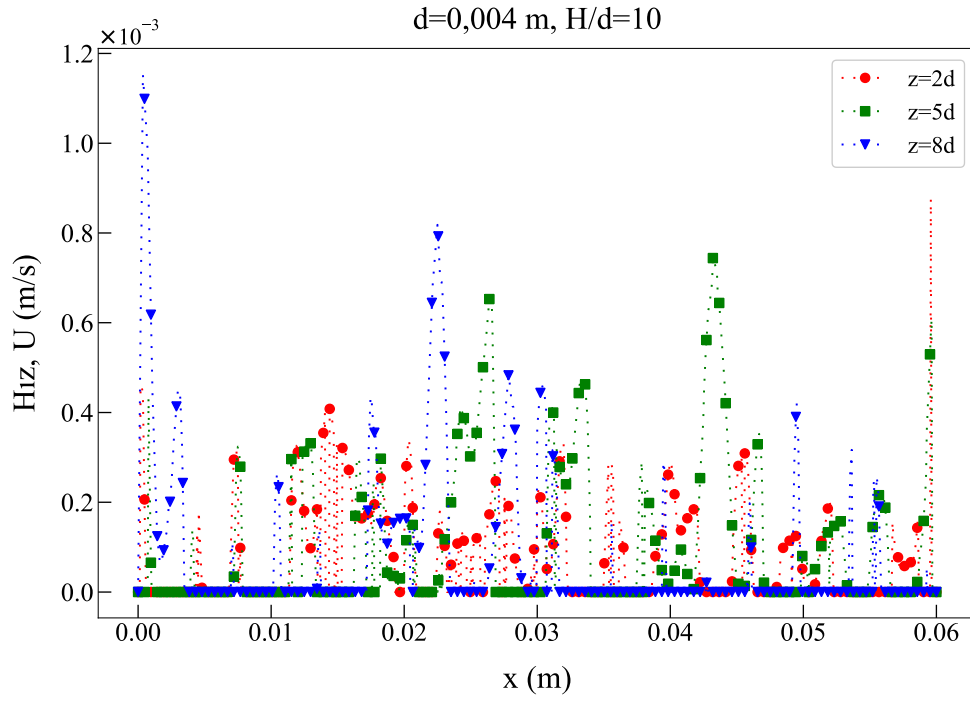


Şekil 4.27  $d=0,004$  m ve  $H/d=20$  geometrisi için  $z=5d$ ,  $10d$  ve  $15d$  yüksekliğinde sıcaklık profilleri

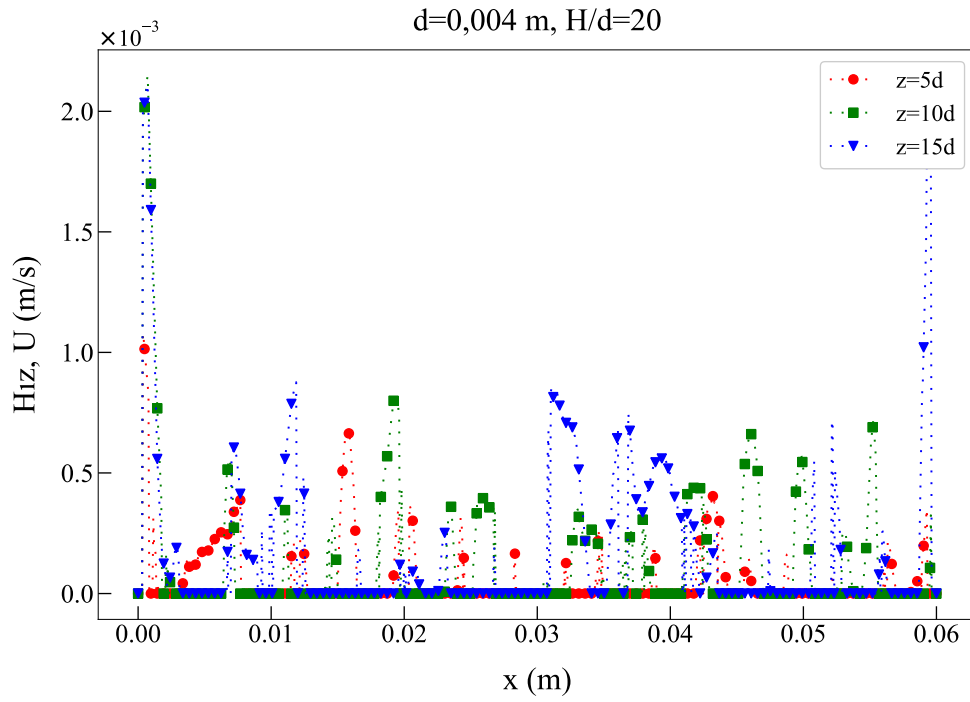
Şekil 4.28-4.30 hız dağılımlarını göstermektedir. Daha büyük küre çapına sahip geometrilerden daha düşük hız ortalamalarına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28  $d=0,004$  m ve  $H/d=5$  geometrisi için  $z=1d$ ,  $3d$  ve  $4d$  yüksekliğinde hız profilleri



Şekil 4.29  $d=0,004 \text{ m}$  ve  $H/d=10$  geometrisi için  $z=2d$ ,  $5d$  ve  $8d$  yüksekliğinde hız profilleri



Şekil 4.30  $d=0,004 \text{ m}$  ve  $H/d=20$  geometrisi için  $z=5d$ ,  $10d$  ve  $15d$  yüksekliğinde hız profilleri

### 4.3. Türbülans Kinetik Enerjisi ve Reynolds Stres Değerleri

Türbülans kinetik enerjileri ( $k$ ) eşitlik (4.1) ile hesaplanmıştır.

$$\bar{k} = \frac{1}{2} ((\bar{u}')^2 + (\bar{v}')^2 + (\bar{w}')^2) \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1)'deki üst çizgi ifadesi, değerlerin zaman üzerinden ortalamasının alındığını ifade etmektedir. Eşitlikteki  $u'$ ,  $v'$  ve  $w'$  ifadeleri eşitlik (4.2)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$u' = u_i - \bar{u} \quad (4.2)$$

Tablo 4.4-4.12 incelendiğinde türbülans kinetik enerjisinin küre çapındaki ile beraber arttığı görülmektedir. P1, kürelerin bitiminden 12 mm üstten alınmış verileri ifade etmektedir.

**Tablo 4.4** d=10 mm ve H/d=5 çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin ortalama ve tepe değerleri

| <b>d=10 mm, H/d=5</b> |                             |                             |                                     |                                |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>z (mm)</b>         | <b><math>\bar{k}</math></b> | <b><math>k_{max}</math></b> | <b><math>\overline{u'w'}</math></b> | <b><math>u'w'_{max}</math></b> |
| 3d                    | $2.4174 \times 10^{-08}$    | $5.0970 \times 10^{-06}$    | $1.0289 \times 10^{-08}$            | $1.9656 \times 10^{-07}$       |
| 4d                    | $7.7747 \times 10^{-08}$    | $6.8558 \times 10^{-07}$    | $3.1410 \times 10^{-07}$            | $5.0360 \times 10^{-06}$       |
| P1                    | $7.5040 \times 10^{-07}$    | $5.9400 \times 10^{-06}$    | $2.8433 \times 10^{-07}$            | $5.6840 \times 10^{-06}$       |

**Tablo 4.5** d=10 mm ve H/d=10 çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin ortalama ve tepe değerleri

| <b>d=10 mm, H/d=10</b> |                             |                             |                                     |                                |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>z (mm)</b>          | <b><math>\bar{k}</math></b> | <b><math>k_{max}</math></b> | <b><math>\overline{u'w'}</math></b> | <b><math>u'w'_{max}</math></b> |
| 5d                     | $1.0144 \times 10^{-07}$    | $1.7699 \times 10^{-06}$    | $7.0141 \times 10^{-09}$            | $7.4566 \times 10^{-07}$       |
| 8d                     | $2.2255 \times 10^{-07}$    | $2.3129 \times 10^{-06}$    | $2.6769 \times 10^{-08}$            | $4.9817 \times 10^{-06}$       |
| P1                     | $6.9396 \times 10^{-07}$    | $9.5155 \times 10^{-06}$    | $9.0554 \times 10^{-07}$            | $9.3537 \times 10^{-06}$       |

**Tablo 4.6** d=10 mm ve H/d=20 çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin ortalama ve tepe değerleri

| <b>d=10 mm, H/d=20</b> |                             |                             |                                     |                                |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>z (mm)</b>          | <b><math>\bar{k}</math></b> | <b><math>k_{max}</math></b> | <b><math>\overline{u'w'}</math></b> | <b><math>u'w'_{max}</math></b> |
| 10d                    | $5.1010 \times 10^{-08}$    | $8.1451 \times 10^{-07}$    | $2.1665 \times 10^{-08}$            | $3.7523 \times 10^{-07}$       |
| 15d                    | $1.2168 \times 10^{-07}$    | $1.5063 \times 10^{-06}$    | $2.3066 \times 10^{-08}$            | $1.9889 \times 10^{-06}$       |
| P1                     | $4.0845 \times 10^{-06}$    | $3.2525 \times 10^{-05}$    | $2.5112 \times 10^{-07}$            | $6.1972 \times 10^{-06}$       |

**Tablo 4.7** d=6 mm ve H/d=5 çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin ortalama ve tepe değerleri

| <b>d=6 mm, H/d=5</b> |                             |                             |                                     |                                |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>z (mm)</b>        | <b><math>\bar{k}</math></b> | <b><math>k_{max}</math></b> | <b><math>\overline{u'w'}</math></b> | <b><math>u'w'_{max}</math></b> |
| 3d                   | $1.1663 \times 10^{-08}$    | $8.6695 \times 10^{-07}$    | $4.4362 \times 10^{-09}$            | $3.1262 \times 10^{-07}$       |
| 4d                   | $5.5528 \times 10^{-08}$    | $4.3355 \times 10^{-06}$    | $1.4627 \times 10^{-08}$            | $2.6214 \times 10^{-07}$       |
| P1                   | $6.2311 \times 10^{-07}$    | $4.3355 \times 10^{-06}$    | $5.7676 \times 10^{-08}$            | $6.3175 \times 10^{-07}$       |

**Tablo 4.8** d=6 mm ve H/d=10 çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin ortalama ve tepe değerleri

| <b>d=6 mm, H/d=10</b> |                             |                             |                                     |                                |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>z (mm)</b>         | <b><math>\bar{k}</math></b> | <b><math>k_{max}</math></b> | <b><math>\overline{u'w'}</math></b> | <b><math>u'w'_{max}</math></b> |
| 5d                    | $1.9670 \times 10^{-08}$    | $4.4513 \times 10^{-07}$    | $3.5453 \times 10^{-08}$            | $2.6208 \times 10^{-09}$       |
| 8d                    | $5.2586 \times 10^{-08}$    | $2.9087 \times 10^{-06}$    | $1.9709 \times 10^{-09}$            | $7.6222 \times 10^{-07}$       |
| P1                    | $1.7300 \times 10^{-07}$    | $7.0836 \times 10^{-06}$    | $1.0786 \times 10^{-08}$            | $1.1597 \times 10^{-06}$       |

**Tablo 4.9** d=6 mm ve H/d=20 çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin ortalama ve tepe değerleri

| <b>d=6 mm, H/d=20</b> |                             |                             |                                     |                                |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>z (mm)</b>         | <b><math>\bar{k}</math></b> | <b><math>k_{max}</math></b> | <b><math>\overline{u'w'}</math></b> | <b><math>u'w'_{max}</math></b> |
| 10d                   | $2.2889 \times 10^{-08}$    | $7.7919 \times 10^{-07}$    | $8.0305 \times 10^{-09}$            | $4.9878 \times 10^{-07}$       |
| 15d                   | $7.0921 \times 10^{-08}$    | $7.7919 \times 10^{-07}$    | $1.5205 \times 10^{-08}$            | $1.6973 \times 10^{-06}$       |
| P1                    | $1.5504 \times 10^{-07}$    | $3.6258 \times 10^{-06}$    | $4.0211 \times 10^{-07}$            | $6.1598 \times 10^{-06}$       |

**Tablo 4.10** d=4 mm ve H/d=5 çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin ortalama ve tepe değerleri

| <b>d=4 mm, H/d=5</b> |                             |                             |                                     |                                |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>z (mm)</b>        | <b><math>\bar{k}</math></b> | <b><math>k_{max}</math></b> | <b><math>\overline{u'w'}</math></b> | <b><math>u'w'_{max}</math></b> |
| 3d                   | $8.9865 \times 10^{-09}$    | $2.0528 \times 10^{-08}$    | $6.1699 \times 10^{-09}$            | $3.7798 \times 10^{-07}$       |
| 4d                   | $2.7232 \times 10^{-08}$    | $4.3810 \times 10^{-07}$    | $2.8626 \times 10^{-09}$            | $7.3777 \times 10^{-06}$       |
| P1                   | $5.7583 \times 10^{-07}$    | $1.8247 \times 10^{-06}$    | $9.2766 \times 10^{-08}$            | $6.2433 \times 10^{-06}$       |

**Tablo 4.11** d=4 mm ve H/d=10 çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin ortalama ve tepe değerleri

| <b>d=4 mm, H/d=10</b> |                             |                             |                                     |                                |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>z (mm)</b>         | <b><math>\bar{k}</math></b> | <b><math>k_{max}</math></b> | <b><math>\overline{u'w'}</math></b> | <b><math>u'w'_{max}</math></b> |
| 5d                    | $7.1563 \times 10^{-09}$    | $9.1809 \times 10^{-08}$    | $1.2145 \times 10^{-09}$            | $1.4412 \times 10^{-07}$       |
| 8d                    | $2.7543 \times 10^{-08}$    | $3.1180 \times 10^{-07}$    | $3.7855 \times 10^{-09}$            | $1.4742 \times 10^{-07}$       |
| P1                    | $8.0711 \times 10^{-07}$    | $1.0841 \times 10^{-06}$    | $7.3969 \times 10^{-08}$            | $2.6150 \times 10^{-07}$       |

**Tablo 4.12** d=4 mm ve H/d=20 çakıl yatak geometrisi için türbülans kinetik enerjisinin ortalama ve tepe değerleri

| <b>d=4 mm, H/d=20</b> |                             |                             |                                     |                                |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>z (mm)</b>         | <b><math>\bar{k}</math></b> | <b><math>k_{max}</math></b> | <b><math>\overline{u'w'}</math></b> | <b><math>u'w'_{max}</math></b> |
| 10d                   | $1.4456 \times 10^{-08}$    | $3.7587 \times 10^{-07}$    | $4.9617 \times 10^{-09}$            | $8.2517 \times 10^{-07}$       |
| 15d                   | $5.2217 \times 10^{-08}$    | $2.9115 \times 10^{-06}$    | $9.9356 \times 10^{-09}$            | $1.6102 \times 10^{-06}$       |
| P1                    | $1.5412 \times 10^{-06}$    | $8.5842 \times 10^{-06}$    | $7.9501 \times 10^{-08}$            | $2.0484 \times 10^{-06}$       |

Beklendiği gibi, her H/d oranı için bütün küre çaplarında ölçüm alınan yükseklikler arttıkça ortalama ve tepe değerler artmaktadır. Yükseklik arttıkça hız alanlarındaki artıştan dolayı türbülans niceliklerinde artış olduğu görülmektedir.

## 5. SONUÇ

Sonuç olarak, çakıl yatak sistemi için sonlu hacim yöntemi kullanılarak doğal taşınım ısı transferi ve akış analizi yapılmıştır. Sonuçlar  $H/d=5$ , 10 ve 20 durum için  $d=0,004$ ; 0,006 ve 0,01 m küreler kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen Nusselt Sayıları, Ahn vd. (2022)'in deneysel verileri ve Tiftikci vd. (2023)'nin LBM sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda kabul edilebilir bir hata ile tutarlı bulgular sağladıklarını ortaya koymuştur. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen korelasyon ile OpenFOAM sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Sayısal analizler sonucunda korelasyon doğrulanmıştır. Hız dağılımlarının deneysel sonuçlar ile mertebe cinsinden iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Kürelerin tam olarak aynı konfigürasyonunu deneysel olarak kullanmak mümkün olmasa da, çeşitli rastgele küreler için OpenFOAM doğal taşınım simülasyonları tarafından üretilen hız profillerinin aynı mertebede olduğu ve benzer bir profile sahip olduğu gözlemlenmiştir. Akış geometrisi, çakıl yatak içinde karmaşık ve rastgele olduğundan, çeşitli yüksekliklerdeki hız dağılımlarının düzensiz olduğu görülmüştür. Çakıl yatak geometrisinin giriş ve orta kısımlarından alınan profiller bu dağılımların benzer olduğunu gösterirken, üst kısımdan alınan profiller biraz farklılık göstermektedir. Bunun nedeni, belirli yüksekliklerde rastgele küre yerleşimlerinin getirdiği ani akış daralması veya ısıtılmış sıvının yoğunluğundaki hafif düşüşler olabilir.

Elde edilen sonuçlara göre orta ve üst yüksekliklerde çok az hız artışı olurken, düşük hız olan bölgelerde ise keskin sıcaklık artışları olmuştur. Sıcaklık profili daha düzensiz hale geldiği gibi yükseklik arttıkça sıcaklığın aniden arttığı daha fazla bölgesel sıcaklık noktası vardır. Küre çapının küçülmesiyle beraber sistem daha homojen bir hale gelmektedir. Bununla birlikte, özellikle  $d=10$  ve 4 mm kürelerin olduğu geometrilerin incelenmesiyle beraber, küre çapı küçüldükçe kor içerisinde sıcaklık dağılımlarının normalleştiği görülmüştür. Termal-hidrolik açısından daha olumlu olsa da, küçük çaplı kürelerin fabrikasyonu daha zor olacağından, VHTR tipi çakıl yataklı nükleer reaktörler için 60 mm çapında küreler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, çok sayıda rastgele yerleştirilmiş kürelerden oluşan çakıl yatak akış geometrisinin, sonlu hacim yöntemine uygun olarak başarılı bir şekilde örgü yapısı oluşturulmuştur. Çakıl yataklarda doğal taşınım akışını analiz etmek için sonlu hacim yönteminin kullanılması ve çakıl yatakta sonlu hacim yöntemi akış simülasyonları için çok sayıda kürenin kullanılması bu çalışmanın orijinalliğini belirleyen unsurlardır.

## KAYNAKLAR

- Ahn, H., Moon, J., & Chung, B. (2022). Influences of sphere diameter and bed height on the natural convection heat transfer of self-heating packed beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123032.
- CEMF. (t.y.). cemfDEM. E Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, <https://www.cemf.ir/dem-discrete-element-method/cemfdem-2/>
- CFD Direct. (2022). Energy Equation in OpenFOAM. Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, <https://doc.cfd.direct/openfoam/energy-equation>
- CFD Direct. (2022). User Guide: Thermophysical Models. Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v10/thermophysical>
- Chen, Z., Wang, Y., & Zheng, Y. (2020). Discussion on the accident behavior and accident management of the HTGR. *Nuclear Engineering and Design*, 360, 110497. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110497>
- Çengel, Y.A., & Cimbala, J.M. (2018). Classification of Fluid Flows. In *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications* (4th edition, ss. 9-15). McGraw Hill.
- Çengel, Y.A., & Cimbala, J.M. (2018). Introduction. In *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications* (4th edition, ss. 2-3). McGraw Hill.
- Dixon, A.G., Nijemeisland, M., & Stitt, E.H. (2013). Systematic mesh development for 3D CFD simulation of fixed beds: Contact points study. *Comput. Chem. Eng.*, 48, 135-153.
- Ferziger, J.H., & Peric, M. (2002). Basic Concepts of Fluid Flow. In *Computational Methods for Fluid Dynamics* (3rd edition, pp. 1-2). Springer.
- Ferziger, J.H., & Peric, M. (2002). Basic Concepts of Fluid Flow. In *Computational Methods for Fluid Dynamics* (3rd edition, pp. 3-9). Springer.
- GEN IV (2022), Very-High-Temperature Reactor (VHTR) Erişim: 8 Haziran 2023, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr)
- Greenshields, C.J., & Weller, H.G. (2022). Gauss-Seidel method. In *Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles* (Bölüm 5.2). CFD Direct Ltd.
- Greenshields, C.J., & Weller, H.G. (2022). Structure of matrices. In *Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles* (Bölüm 5.1). CFD Direct Ltd.
- Greenshields, C.J., & Weller, H.G. (2022). The PIMPLE algorithm. In *Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles* (Bölüm 5.21). CFD Direct Ltd.
- H. Kim, J. Lee, H. No, Thermal hydraulic behavior in the deteriorated turbulent heat transfer regime for a gas-cooled reactor, *Nucl. Eng. Des.* 240 (2010) 783–795.
- IAEA (2020), Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: 2020 Edition Erişim: 8 Haziran 2023, [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)
- IEA (2019), World Energy Balances: Overview Erişim: 20 Haziran 2023, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world>
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., & Lavine, A.S. (2007). Free Convection. In *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th edition, ss. 563-564). John Wiley & Sons.
- IPCC (2018), Global Warming of 1.5°C Erişim: 8 Haziran 2023, <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Lee, D.-Y., & Chung, B.-J. (2016). Forced convection heat transfer of a sphere in packed bed arrangement. *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Gyeongju, Korea, October 27-28.
- Liu, L., Deng, J., Zhang, D., Wang, C., Qiu, S., & Su, G.H. (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>
- Mazumder, S. (2016). Overview of Methods for Solving PDEs. In *Numerical Methods for Partial Differential Equations Finite Difference and Finite Volume Methods* (ss. 17-18). Elsevier.

- Munson, B.R., Okiishi, T.H., Huebsch, W.W., & Rothmayer, A.P. (2013). Chapter 6: Differential Analysis of Fluid Flow. In *Fundamentals of Fluid Mechanics* (7th edition, ss. 331-333). Wiley.
- OpenFOAM Wiki. (2017). The PIMPLE Algorithm in OpenFOAM Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, [https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM\\_guide/The\\_PIMPLE\\_algorithm\\_in\\_OpenFOAM](https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/The_PIMPLE_algorithm_in_OpenFOAM)
- OpenFOAM. (2022). Numerical schemes. Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/6-solving/6.2-numerical-schemes>
- OpenFOAM. (2022). Solution and algorithm control. Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/6-solving/6.3-solution-and-algorithm-control>
- OpenFOAM. (2022). User Guide: File Structure of OpenFOAM Cases. Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/2-openfoam-cases/2.1-file-structure-of-openfoam-cases>
- OpenFOAM. (2022). User Guide: Introduction. Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/1-introduction>
- OpenFOAM. (2022). User Guide: Standard Solvers. Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/a-reference/a.1-standard-solvers>
- Paul K. Romano, Nicholas E. Horelik, Bryan R. Herman, Adam G. Nelson, Benoit Forget, and Kord Smith, "OpenMC: A State-of-the-Art Monte Carlo Code for Research and Development," *Ann. Nucl. Energy*, 82, 90–97 (2015).
- Pioro, I.L. (2016). Introduction: Generation IV International Forum. In K. Johnson (Ed.), *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors* (s. 41). Elsevier.
- Pritchard, P.J., & Leylegian, J.C. (2011). Chapter 2: Fundamental Concepts, Description and Classification of Fluid Motions. In Fox and McDonald's *INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS* (8th edition, pp. 38-44). Wiley.
- SALOME. (2023). SALOME: The Open-source Integration Platform for Numerical Simulation. Erişim tarihi: 11 Haziran 2023, <https://www.salome-platform.org/>
- Tiftikci, A., Catalbas, S.S., Polat, E., Ahn, H., Han, J., & Chung, B. (2023). Investigation of natural convection heat transfer of self-heating packed beds. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 142, 106642.
- Tu, J., Yeoh, G.H., & Liu, C. (2020). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Temelleri ve Uygulamaları*. Ankara: Palme Yayınevi.
- UNSCEAR (2013), *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation* Erişim: 8 Haziran, 2023, [https://www.unscear.org/docs/reports/2013/13-85418\\_Report\\_2013\\_Annex\\_A.pdf](https://www.unscear.org/docs/reports/2013/13-85418_Report_2013_Annex_A.pdf)
- Versteeg, H.K., & Malalasekera, W. (2007). Conservation laws of fluid motion and boundary conditions. In *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method* (2nd edition, ss. 9-20). Pearson.
- WNA (2021), *Advanced Nuclear Power Reactors* Erişim: 20 Haziran 2023, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>
- WNA (2021), *Advanced Nuclear Reactors* Erişim: 8 Haziran 2023, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclearpower-reactors>
- WNA (2021), *Hydrogen Production and Uses* Erişim: 10 Haziran 2023, <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-uses>
- WNA (2022), *World Energy Needs and Nuclear Power* Erişim: 8 Haziran 2023, <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/world-energy-needs-and-nuclear-power>
- WNA (2023), *Fukushima Daiichi Accident* Erişim: 8 Haziran 2023, <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident>

- WNA (2023), Nuclear Power in the World Today Erişim: 20 Haziran 2023, <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- Yan, X.L. (2016). Very high-temperature reactor. In K. Johnson (Ed.), Handbook of Generation IV Nuclear Reactors (s. 57-58). Elsevier.
- Yan, X.L. (2016). Very high-temperature reactor. In K. Johnson (Ed.), Handbook of Generation IV Nuclear Reactors (s. 55-57). Elsevier.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Salih Said ÇATALBAŞ

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : İstanbul Tuzla Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 2016

Lisans : Sinop Üniversitesi, 2020

Yayın Listesi : “Tiftikci, A., Catalbas, S.S., Polat, E., Ahn, H., Han, J.W., & Chung, B.J. (2023). Investigation of natural convection heat transfer of self-heating packed beds. International Communications in Heat and Mass Transfer, 142, 106642. ISSN 0735-1933. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106642.”